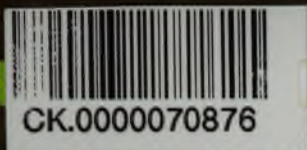


PHẦN II

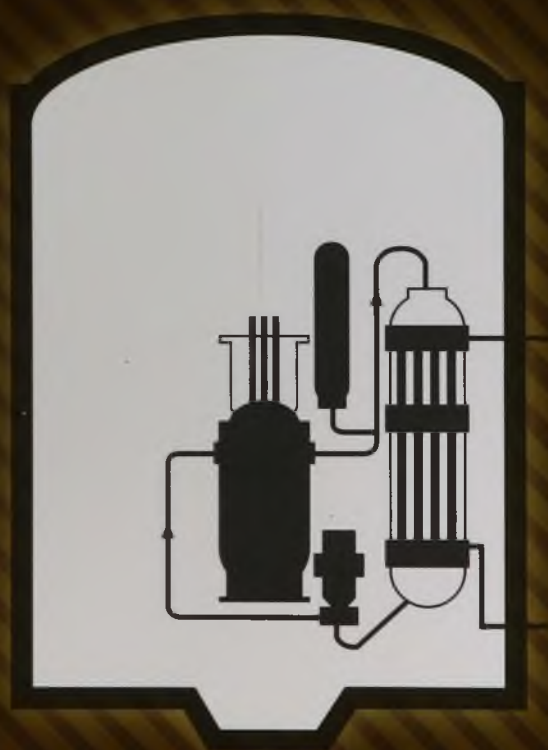


CK.0000070876

VIỆN NĂNG LƯỢNG NGUYÊN TỬ VIỆT NAM



# AN TOÀN ĐIỆN HẠT NHÂN



UYÊN  
HIỆU



NHÀ XUẤT BẢN KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT

**PHẠM DUY HIỂN**

VIỆN NĂNG LƯỢNG NGUYÊN TỬ VIỆT NAM



# **AN TOÀN ĐIỆN HẠT NHÂN**

**ĐẠI HỌC THÁI NGUYÊN  
TRUNG TÂM HỌC LIỆU**



**NHÀ XUẤT BẢN KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT**

Hà Nội - 2015

### **Thông tin bản quyền**

Bản quyền © GS. TS. Phạm Duy Hiển. Việc sao chép, tái bản ấn phẩm này dưới mọi hình thức (bản in hay bản điện tử) đều phải được sự chấp thuận bằng văn bản của tác giả.

### **Liên hệ tác giả**

Phạm Duy Hiển

Địa chỉ: Viện Năng lượng nguyên tử Việt Nam

Email: pdhien@gmail.com

### **Liên hệ mua sách**

BAN KẾ HOẠCH VÀ QUẢN LÝ KHOA HỌC -

VIỆN NĂNG LƯỢNG NGUYÊN TỬ VIỆT NAM

Địa chỉ: Số 59 Lý Thường Kiệt, Hoàn Kiếm, Hà Nội, Việt Nam

Điện thoại: (844) 39420463 - Fax: (844) 39422625

Email: [hq.vinatom@hn.vnn.vn](mailto:hq.vinatom@hn.vnn.vn), [hq.vinatom@vinatom.gov.vn](mailto:hq.vinatom@vinatom.gov.vn)

<http://www.vinatom.gov.vn>

**AN TOÀN  
ĐIỆN HẠT NHÂN**



**PHẠM DUY HIỂN**

**VIỆN NĂNG LƯỢNG NGUYÊN TỬ VIỆT NAM**

# Mục lục

---

|                           |    |
|---------------------------|----|
| LỜI TỰA .....             | 13 |
| GIỚI THIỆU NỘI DUNG ..... | 17 |

## **Chương 1. PHÓNG XẠ VÀ VẬT LÝ HẠT NHÂN**

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1 PHÓNG XẠ – NHỮNG MỐC LỊCH SỬ .....                                               | 21 |
| 1.1.1 Những năm cuối thế kỷ XIX .....                                                | 21 |
| 1.1.2 Những năm đầu thế kỷ XX .....                                                  | 25 |
| 1.1.3 Thập kỷ 30 của thế kỷ XX .....                                                 | 27 |
| 1.1.4 Trước ngưỡng cửa chiến tranh thế giới thứ II.<br>Phân hạch uranium .....       | 28 |
| 1.1.5 Phản ứng dây chuyền .....                                                      | 31 |
| 1.1.6 Vũ khí nguyên tử .....                                                         | 36 |
| 1.1.7 Hoàn chỉnh và mở rộng bản đồ nguyên tố hóa học .....                           | 37 |
| 1.1.8 Bản đồ đồng vị. Đồng vị bền và phóng xạ .....                                  | 39 |
| 1.2 KHỐI LƯỢNG ĐỒNG VỊ, NĂNG LƯỢNG LIÊN KẾT NUCLEON,<br>MẪU HẠT NHÂN .....           | 41 |
| 1.2.1 Khối lượng đồng vị và độ hụt khối .....                                        | 41 |
| 1.2.2 Công thức bán thực nghiệm Weizsäcker. Mẫu giọt<br>chất lỏng .....              | 43 |
| 1.2.3 Chuyển động đơn hạt trong hạt nhân và chuyển động tập<br>thể các nucleon ..... | 46 |
| 1.2.4 Các trạng thái của hạt nhân .....                                              | 49 |
| 1.2.5 Thời gian sống của các trạng thái hạt nhân .....                               | 51 |
| 1.3 PHÂN RÃ PHÓNG XẠ .....                                                           | 53 |
| 1.3.1 Quy luật phân rã phóng xạ .....                                                | 53 |
| 1.3.2 Chuỗi phóng xạ .....                                                           | 55 |

|       |                                                                               |    |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.3.3 | Phân rã đồng hành với quá trình sinh tạo .....                                | 57 |
| 1.3.4 | Phân rã $\beta^-$ .....                                                       | 58 |
| 1.3.5 | Phân rã $\beta^+$ và chiếm electron vỏ K .....                                | 58 |
| 1.3.6 | Phân rã neutron trễ .....                                                     | 61 |
| 1.3.7 | Phân rã alpha .....                                                           | 62 |
| 1.3.8 | Phân rã $\gamma$ .....                                                        | 65 |
| 1.4   | PHẢN ỨNG HẠT NHÂN VỚI NEUTRON .....                                           | 66 |
| 1.4.1 | Các phản ứng với neutron chi phối hoạt động của lò<br>phản ứng hạt nhân ..... | 66 |
| 1.4.2 | Phản ứng bắt neutron phát bức xạ gamma ( $n, \gamma$ ) .....                  | 68 |
| 1.4.3 | Hấp thụ cộng hưởng neutron. Công thức Breit–Wigner .....                      | 69 |
| 1.5   | PHẢN ỨNG PHÂN HẠCH VỚI NEUTRON .....                                          | 72 |
| 1.5.1 | Cơ chế phân hạch .....                                                        | 72 |
| 1.5.2 | Các sản phẩm phân hạch .....                                                  | 77 |
| 1.5.3 | Phân bố mảnh vỡ phân hạch theo số khối .....                                  | 79 |
| 1.5.4 | Nhiệt dư trong lò phản ứng .....                                              | 81 |
|       | TÀI LIỆU THAM KHẢO .....                                                      | 83 |

## Chương 2. PHÓNG XẠ TRONG VŨ TRỤ VÀ TRÁI ĐẤT

|       |                                                                                                 |     |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.1   | NGUYÊN TỐ VÀ ĐỒNG VỊ SINH RA TỪ ĐÂU, VÀ TỪ LÚC NÀO? .....                                       | 86  |
| 2.1.1 | Big Bang và vũ trụ giãn nở .....                                                                | 87  |
| 2.1.2 | Tổng hợp hạt nhân nhẹ sau Big Bang (BBN). Thuyết $\alpha\beta\gamma$ .....                      | 90  |
| 2.1.3 | Phân rã $\beta^-$ của neutron tự do .....                                                       | 91  |
| 2.1.4 | Tổng hợp hạt nhân trong quá trình tiến hóa của các<br>thiên thể (stellar nucleosynthesis) ..... | 94  |
| 2.1.5 | Phản ứng ghép hạt nhân trong điều kiện nhiệt hạch .....                                         | 96  |
| 2.1.6 | Đốt He giải tỏa năng lượng và tạo thành hạt nhân nặng hơn .....                                 | 98  |
| 2.1.7 | Tạo thành hạt nhân nặng qua phản ứng bắt neutron và<br>phân rã $\beta$ .....                    | 99  |
| 2.1.8 | Độ phổ biến các nguyên tố trong vũ trụ .....                                                    | 101 |
| 2.1.9 | Độ phổ biến các nguyên tố trong vỏ Trái Đất .....                                               | 102 |

|       |                                                                |     |
|-------|----------------------------------------------------------------|-----|
| 2.2   | PHÓNG XẠ TRONG ĐẤT ĐÁ .....                                    | 103 |
| 2.2.1 | Các họ phóng xạ .....                                          | 103 |
| 2.2.2 | Cân bằng và mất cân bằng phóng xạ .....                        | 106 |
| 2.2.3 | Phân rã phóng xạ và nội nhiệt Trái Đất .....                   | 107 |
| 2.3   | PHÓNG XẠ DO TIA VŨ TRỤ .....                                   | 109 |
| 2.3.1 | Tia vũ trụ sơ cấp và thứ cấp .....                             | 109 |
| 2.3.2 | Các nhân phóng xạ môi trường do tia vũ trụ sinh ra .....       | 110 |
| 2.3.3 | Berilium-7 .....                                               | 110 |
| 2.3.4 | Tritium ( $^3\text{H}$ ) .....                                 | 112 |
| 2.3.5 | Carbon-14 .....                                                | 114 |
| 2.4   | PHƠI NHIỄM DO PHÓNG XẠ TỰ NHIÊN .....                          | 117 |
| 2.4.1 | Phơi nhiễm do chiếu ngoài từ phóng xạ tự nhiên trong đất đá .. | 117 |
| 2.4.2 | Phơi nhiễm do chiếu ngoài từ tia vũ trụ .....                  | 119 |
| 2.4.3 | Phơi nhiễm do chiếu trong từ các nguồn phóng xạ tự nhiên ....  | 119 |
| 2.5   | PHƠI NHIỄM PHÓNG XẠ VÀ TÁC HẠI ĐẾN SỨC KHỎE .....              | 120 |
| 2.5.1 | Định nghĩa về liều phơi nhiễm và các đơn vị đo .....           | 120 |
| 2.5.2 | Mối quan hệ giữa liều phơi nhiễm với hiệu ứng sinh học .....   | 121 |
| 2.5.3 | Liều tập thể .....                                             | 123 |
| 2.6   | THỰC THI BẢO VỆ BỨC XẠ THEO BA KHUYẾN CÁO CỦA ICRP ..          | 125 |
|       | TÀI LIỆU THAM KHẢO .....                                       | 127 |

### **Chương 3. THỬ VŨ KHÍ HẠT NHÂN TRONG KHÍ QUYỀN**

|       |                                                                                 |     |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.1   | CHẠY ĐUA VŨ TRANG HẠT NHÂN SAU THảm HỌA<br>HIROSHIMA VÀ NAGASAKI .....          | 130 |
| 3.1.1 | Bom A và bom H .....                                                            | 130 |
| 3.1.2 | Thử vũ khí hạt nhân trong khí quyển của năm cường quốc..                        | 131 |
| 3.1.3 | Các địa điểm thử vũ khí hạt nhân trong khí quyển .....                          | 135 |
| 3.1.4 | Thử vũ khí hạt nhân dưới lòng đất .....                                         | 137 |
| 3.2   | PHÁT TÁN PHÓNG XẠ TRÊN TOÀN CẦU TỪ THỬ VŨ KHÍ<br>HẠT NHÂN TRONG KHÍ QUYỀN ..... | 138 |
| 3.2.1 | Đặc trưng nguồn phát tán .....                                                  | 138 |
| 3.2.2 | Kiểm kê phát thải toàn cầu cho từng nuclit .....                                | 138 |
| 3.2.3 | Quá trình lan truyền phóng xạ trên toàn cầu từ thử vũ khí<br>hạt nhân .....     | 140 |

|                                                                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.3. QUAN TRẮC HOẠT ĐỘ PHÓNG XẠ TRONG KHÔNG KHÍ VÀ MẬT ĐỘ RƠI LẮNG CÁC NUCLIT PHÓNG XẠ .....                       | 143 |
| 3.3.1 Kỹ thuật quan trắc .....                                                                                     | 143 |
| 3.3.2 Hoạt độ phóng xạ trong không khí .....                                                                       | 144 |
| 3.3.3 Mật độ rơi lắng và rơi lắng tích lũy của $\text{Sr}^{90}$ .....                                              | 144 |
| 3.3.4 Mật độ rơi lắng và rơi lắng tích lũy của $\text{Cs}^{137}$ .....                                             | 149 |
| 3.3.5 Mật độ rơi lắng các nuclit khác .....                                                                        | 152 |
| 3.3.6 Đánh giá liều hiệu dụng lên dân chúng .....                                                                  | 152 |
| 3.4 LƯỢNG NUCLIT PHÓNG XẠ DO THỬ VŨ KHÍ HẠT NHÂN RƠI LẮNG TRÊN ĐẤT LIỀN VIỆT NAM .....                             | 154 |
| 3.4.1 Phục hồi mật độ rơi lắng tích lũy $\text{Cs}^{137}$ do thử vũ khí hạt nhân trên đất liền Việt Nam .....      | 154 |
| 3.4.2 So sánh kết quả phục hồi mật độ rơi lắng tích lũy trên đất liền Việt Nam với công bố UNSCEAR (2000) .....    | 159 |
| 3.4.3 Đánh giá tổng lượng $\text{Cs}^{137}$ rơi xuống đất liền Việt Nam do thử vũ khí hạt nhân .....               | 161 |
| 3.4.4 Lượng $\text{Pu}^{239+240}$ và $\text{Sr}^{90}$ do thử vũ khí hạt nhân rơi lắng trên đất liền Việt Nam ..... | 162 |
| 3.5 HIỆN TRẠNG NỀN PHÒNG PHÓNG XẠ NHÂN TẠO TRONG MÔI TRƯỜNG VIỆT NAM .....                                         | 164 |
| 3.5.1 Phóng xạ nhân tạo trong không khí và rơi lắng .....                                                          | 165 |
| 3.5.2 $\text{Cs}^{137}$ trong đất bề mặt nguyên sơ .....                                                           | 165 |
| 3.5.3 $\text{Cs}^{137}$ trong đất canh tác .....                                                                   | 170 |
| 3.5.4 $\text{Cs}^{137}$ trong trầm tích hồ chứa .....                                                              | 171 |
| TÀI LIỆU THAM KHẢO .....                                                                                           | 171 |

## Chương 4. NHÀ MÁY ĐIỆN HẠT NHÂN

|                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1 LÒ PHẢN ỨNG HẠT NHÂN VÀ MỘT SỐ ĐẶC ĐIỂM ĐỘNG HỌC..           | 175 |
| 4.1.1 Hệ số nhân neutron và công thức bốn thừa số .....          | 175 |
| 4.1.2 Độ phản ứng .....                                          | 178 |
| 4.1.3 Vòng đời trung bình của neutron và động học lò phản ứng .. | 178 |
| 4.1.4 Vai trò của neutron trễ .....                              | 179 |

|                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2 CƠ CHẾ PHẢN ỨNG TRONG Lò PHẢN ỨNG .....                                          | 182 |
| 4.2.1 Độ phản ứng thay đổi theo nhiệt độ .....                                       | 182 |
| 4.2.2 Hệ số rỗng của độ phản ứng .....                                               | 186 |
| 4.3 ĐỘC TỐ TRONG Lò PHẢN ỨNG .....                                                   | 186 |
| 4.3.1 Vật liệu hấp thụ mạnh neutron dùng trong điều khiển lò .....                   | 186 |
| 4.3.2 Độc tố cháy được .....                                                         | 187 |
| 4.3.3 Nhiễm độc xenon .....                                                          | 187 |
| 4.4 TẢI NHIỆT Ở NHÀ MÁY ĐIỆN HẠT NHÂN .....                                          | 190 |
| 4.4.1 Chính sách phát triển các loại lò phản ứng năng lượng.....                     | 190 |
| 4.4.2 Tải nhiệt ở lò nước nén khi lò hoạt động bình thường .....                     | 192 |
| 4.4.3 Tải nhiệt dư ở lò nước nén .....                                               | 199 |
| 4.4.4 Tải nhiệt trong trường hợp khẩn cấp ở lò nước nén .....                        | 199 |
| 4.4.5 Hệ thống cấp, điều chỉnh và xử lý nước tải nhiệt sơ cấp ở<br>lò nước nén ..... | 202 |
| 4.4.6 Tải nhiệt ở lò nước sôi .....                                                  | 203 |
| 4.5 GIAM GIỮ CHẤT PHÓNG XẠ KHÔNG CHO THOÁT RA<br>MÔI TRƯỜNG .....                    | 206 |
| 4.6 PHÁT THẢI VÀ CHIẾU XẠ LÊN NHÂN VIÊN Ở NHÀ MÁY ĐIỆN<br>HẠT NHÂN .....             | 210 |
| 4.6.1 Chiếu xạ lên nhân viên vận hành khi lò hoạt động<br>bình thường .....          | 210 |
| 4.6.2 Phát thải phóng xạ khi lò phản ứng hoạt động bình thường .                     | 212 |
| 4.6.3 Chất thải phóng xạ rắn từ nhà máy điện hạt nhân .....                          | 217 |
| 4.7 TAI NẠN Lò PHẢN ỨNG Ở NHÀ MÁY ĐIỆN HẠT NHÂN .....                                | 219 |
| 4.7.1 Tai nạn do độ phản ứng làm tăng vọt công suất .....                            | 219 |
| 4.7.2 Tai nạn mất nước tải nhiệt LOCA .....                                          | 222 |
| 4.7.3 Tai nạn nghiêm trọng .....                                                     | 223 |
| 4.8 SÁCH LƯỢC PHÒNG VỆ CHIỀU SÂU Ở CÁC Lò PHẢN ỨNG ....                              | 226 |
| 4.9 THANG SỰ KIỆN HẠT NHÂN QUỐC TẾ .....                                             | 229 |
| TÀI LIỆU THAM KHẢO .....                                                             | 232 |

## **Chương 5. PHÁT THẢI PHÓNG XẠ TRONG NHỮNG TAI NẠN ĐIỆN HẠT NHÂN**

|                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1 SỐ HẠNG NGUỒN TRONG TAI NẠN ĐIỆN HẠT NHÂN .....                                      | 234 |
| 5.1.1 Kiểm kê tồn trữ phóng xạ trong vùng hoạt .....                                     | 235 |
| 5.1.2 Số hạng nguồn .....                                                                | 237 |
| 5.2 PHÁT TÁN NUCLIT PHÓNG XẠ RA KHÍ QUYỀN BÊN NGOÀI<br>NHÀ MÁY THEO MÔ HÌNH GAUSS .....  | 239 |
| 5.2.1 Mô hình phân bố Gauss .....                                                        | 239 |
| 5.2.2 Đánh giá liều phơi nhiễm bên ngoài nhà máy .....                                   | 246 |
| 5.3 PHÁT TÁN NUCLIT PHÓNG XẠ RA XA KHU VỰC NHÀ MÁY .....                                 | 247 |
| 5.3.1 Quỹ đạo lan truyền nuclit phóng xạ trong khí quyển theo<br>mô hình HYSPLIT-4 ..... | 247 |
| 5.3.2 Minh họa .....                                                                     | 252 |
| TÀI LIỆU THAM KHẢO .....                                                                 | 254 |

## **Chương 6. PHÂN TÍCH AN TOÀN NHÀ MÁY ĐIỆN HẠT NHÂN**

|                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.1 HAI CÁCH TIẾP CẬN TRONG PHÂN TÍCH AN TOÀN NHÀ MÁY<br>ĐIỆN HẠT NHÂN .....                 | 258 |
| 6.1.1 Nhiệm vụ và mục tiêu .....                                                             | 258 |
| 6.1.2 Các trạng thái hoạt động của nhà máy điện hạt nhân .....                               | 263 |
| 6.2 PHÂN TÍCH AN TOÀN ĐIỆN HẠT NHÂN THEO PHƯƠNG PHÁP<br>TẮT ĐỊNH .....                       | 264 |
| 6.3 PHÂN TÍCH AN TOÀN ĐIỆN HẠT NHÂN THEO PHƯƠNG PHÁP<br>XÁC SUẤT .....                       | 266 |
| 6.3.1 Định nghĩa rủi ro .....                                                                | 266 |
| 6.3.2 Cây sự kiện .....                                                                      | 268 |
| 6.3.3 Cây lỗi .....                                                                          | 270 |
| 6.3.4 Phân cấp các chuỗi sự kiện dẫn đến tai nạn phát thải<br>do LOCA .....                  | 272 |
| 6.3.5 Hậu quả gây tử vong trong tai nạn điện hạt nhân .....                                  | 277 |
| 6.4 NUREG-1150 – BƯỚC PHÁT TRIỂN HOÀN THIỆN PRA .....                                        | 280 |
| 6.5 ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP XÁC SUẤT TRONG PHÂN TÍCH<br>AN TOÀN CÁC NHÀ MÁY ĐIỆN HẠT NHÂN ..... | 286 |
| TÀI LIỆU THAM KHẢO .....                                                                     | 289 |

**Chương 7. THREE MILE ISLAND**

|                                                        |     |
|--------------------------------------------------------|-----|
| 7.1 LÒ PHẢN ỨNG NƯỚC NÉN Ở NHÀ MÁY THREE MILE ISLAND . | 294 |
| 7.1.1 Hệ tải nhiệt sơ cấp và thứ cấp .....             | 294 |
| 7.1.2 Tải nhiệt dư .....                               | 298 |
| 7.1.3 Hệ thống tải nhiệt vùng hoạt khẩn cấp .....      | 298 |
| 7.2 TAI NẠN TMI-2 .....                                | 299 |
| 7.2.1 Chuỗi sự kiện .....                              | 300 |
| 7.2.2 Hư hại và phát thải phóng xạ ra môi trường ..... | 302 |
| 7.2.3 Hệ quả .....                                     | 303 |
| TÀI LIỆU THAM KHẢO .....                               | 305 |

**Chương 8. CHERNOBYL**

|                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.1 LÒ PHẢN ỨNG VÀ SỰ CỐ .....                                     | 309 |
| 8.1.1 Lò phản ứng RBMK-1000 .....                                  | 310 |
| 8.1.2 Hệ số độ phản ứng .....                                      | 312 |
| 8.1.3 Sự cố .....                                                  | 313 |
| 8.1.4 Bài học phòng vệ theo chiều sâu và văn hoá an toàn .....     | 316 |
| 8.1.5 Số hạng nguồn – Diễn biến và thành phần phát thải .....      | 317 |
| 8.2 VẬN CHUYỂN CHẤT PHÓNG XẠ TRONG KHÍ QUYỀN .....                 | 323 |
| 8.2.1 Các luồng khí phóng xạ .....                                 | 323 |
| 8.2.2 Hàm lượng phóng xạ trong không khí .....                     | 325 |
| 8.2.3 Thành phần nuclid phóng xạ trong các mẫu quan trắc .....     | 325 |
| 8.2.4 Hàm lượng phóng xạ tích phân trong không khí .....           | 326 |
| 8.3 NHIỄM XẠ .....                                                 | 327 |
| 8.3.1 Rơi lắng $I^{131}$ và nhiễm xạ trong sữa và rau .....        | 327 |
| 8.3.2 Rơi lắng và tồn lưu phóng xạ trong đất bề mặt .....          | 328 |
| 8.3.3 Phân bố mật độ rơi lắng $Cs^{137}$ theo khoảng cách .....    | 331 |
| 8.3.4 Vận chuyển nuclid phóng xạ sau khi rơi xuống đất .....       | 333 |
| 8.3.5 Vận chuyển nuclid phóng xạ từ đất lên cây trồng .....        | 335 |
| 8.3.6 Vận chuyển nuclid phóng xạ vào động vật .....                | 337 |
| 8.4 NGHIÊN CỨU PHÓNG XẠ LAN TRUYỀN TỪ CHERNOBYL ĐẾN VIỆT NAM ..... | 338 |
| TÀI LIỆU THAM KHẢO .....                                           | 343 |

## Chương 9. FUKUSHIMA

|                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 9.1 ĐIỆN HẠT NHÂN NHẬT BẢN VÀ NHÀ MÁY FUKUSHIMA                                         |     |
| DAI-ICHI .....                                                                          | 349 |
| 9.1.1 Nhà máy Fukushima Dai-ichi (I) và Dai-ichi (II) .....                             | 349 |
| 9.1.2 Hệ thống pháp quy an toàn hạt nhân của Nhật Bản .....                             | 351 |
| 9.2 LÒ PHẢN ỨNG NƯỚC SÔI BWR .....                                                      | 352 |
| 9.2.1 Cấu tạo và nguyên lý hoạt động. Năm rào cản phóng xạ ở lò BWR .....               | 352 |
| 9.2.2 Hệ thống điều khiển .....                                                         | 356 |
| 9.2.3 Hệ thống tải nhiệt khi lò hoạt động bình thường .....                             | 357 |
| 9.2.4 Giải nhiệt dư sau khi lò dừng .....                                               | 359 |
| 9.2.5 Hệ thống làm nguội vùng hoạt khẩn cấp .....                                       | 359 |
| 9.2.6 Xả khí khi áp suất trong thùng lò lên cao .....                                   | 360 |
| 9.2.7 Điều kiện và mức độ tan chảy vật liệu trong vùng hoạt .....                       | 361 |
| 9.2.8 Nhận dạng tai nạn trong và ngoài cơ sở thiết kế ở các lò phản ứng Fukushima ..... | 362 |
| 9.3 BỂ CHỨA NHIÊN LIỆU ĐÃ CHÁY .....                                                    | 364 |
| 9.3.1 Lưu giữ các thanh nhiên liệu đã cháy .....                                        | 364 |
| 9.3.2 Bể chứa tạm thời và bể chứa trung tâm .....                                       | 365 |
| 9.4 TAI NẠN VÀ XỬ LÝ SỰ CỐ .....                                                        | 366 |
| 9.4.1 Động đất và sóng thần ở Nhật Bản .....                                            | 366 |
| 9.4.2 Tác hại tức thời do động đất và sóng thần .....                                   | 367 |
| 9.4.3 Diễn biến sự cố và chống chọi với nhiệt còn dư .....                              | 368 |
| 9.4.4 Lý giải các vụ nổ .....                                                           | 372 |
| 9.4.5 So sánh chuỗi sự kiện với kết quả mô phỏng trường hợp SBO .....                   | 373 |
| 9.4.6 So sánh mô phỏng với kết quả quan trắc liều bức xạ trong khu vực nhà máy .....    | 374 |
| 9.5 Ô NHIỄM PHÓNG XẠ .....                                                              | 375 |
| 9.5.1 Ô nhiễm trong khu vực nhà máy .....                                               | 375 |
| 9.5.2 Nước phóng xạ trong khu vực nhà máy và ô nhiễm nước biển gần nhà máy .....        | 376 |

|                                                                                   |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 9.5.3 Ô nhiễm phóng xạ khu vực phụ cận .....                                      | 378        |
| 9.5.4 Hàm lượng nuclit phóng xạ trong không khí .....                             | 381        |
| 9.5.5 Mật độ rơi lắng phóng xạ trong vùng phụ cận .....                           | 382        |
| 9.5.6 Đánh giá liều chiếu xạ dân chúng trong vùng phụ cận .....                   | 385        |
| 9.5.7 Dự báo phát tán ô nhiễm trong tình trạng khẩn cấp .....                     | 386        |
| <b>9.6 PHÁT TÁN PHÓNG XẠ TỪ TAI NẠN ĐIỆN HẠT NHÂN</b>                             |            |
| <b>FUKUSHIMA RA NGOÀI NHẬT BẢN .....</b>                                          | <b>388</b> |
| 9.6.1 Mạng lưới quan trắc .....                                                   | 388        |
| 9.6.2 Tác động phóng xạ môi trường của tai nạn Fukushima bên ngoài Nhật Bản ..... | 388        |
| 9.6.3 Vận chuyển phóng xạ trong khí quyển .....                                   | 389        |
| 9.6.4 Khí trơ và sol khí phóng xạ đến Bắc Mỹ .....                                | 390        |
| 9.6.5 Quan trắc phóng xạ Fukushima ở châu Âu .....                                | 393        |
| 9.6.6 Quan trắc phóng xạ Fukushima ở các nước Đông và Đông Nam Á .....            | 393        |
| 9.6.7 Số hạng nguồn Fukushima .....                                               | 394        |
| 9.6.8 Tổng hợp kết quả quan trắc phóng xạ Fukushima trên toàn cầu .....           | 397        |
| <b>9.7 NGHIÊN CỨU PHÓNG XẠ FUKUSHIMA TẠI VIỆT NAM .....</b>                       | <b>399</b> |
| 9.7.1 Điều kiện thực nghiệm .....                                                 | 399        |
| 9.7.2 Kết quả quan trắc .....                                                     | 401        |
| 9.7.3 Tỷ số hoạt độ các đồng vị .....                                             | 403        |
| 9.7.4 Quỹ đạo lan truyền phóng xạ từ Fukushima đến Việt Nam...                    | 405        |
| <b>TÀI LIỆU THAM KHẢO .....</b>                                                   | <b>409</b> |

## **Chương 10. HẬU FUKUSHIMA**

|                                                                         |            |
|-------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>10.1 BÀI HỌC TỪ TAI NẠN FUKUSHIMA .....</b>                          | <b>415</b> |
| 10.1.1 Nhận dạng những thiếu sót về quản lý, thiết kế và vận hành ..... | 415        |
| 10.1.2 Rút ra bài học từ tai nạn Fukushima .....                        | 416        |
| 10.1.3 Kiểm tra ứng lực .....                                           | 420        |
| 10.1.4 Lão hóa và kéo dài tuổi thọ các lò phản ứng thế hệ thứ hai ..... | 424        |

|        |                                                    |     |
|--------|----------------------------------------------------|-----|
| 10.2   | LÒ PHẢN ỨNG THỂ HỆ THỨ BA .....                    | 425 |
| 10.2.1 | An toàn thụ động ở lò phản ứng thể hệ thứ ba ..... | 425 |
| 10.2.2 | Công nghệ lò AP-1000 .....                         | 427 |
| 10.2.3 | Công nghệ VVER của Nga và phiên bản AES-2006.....  | 433 |
| 10.2.4 | Lò nước nén công suất bé .....                     | 437 |
| 10.3   | LÒ PHẢN ỨNG THỂ HỆ THỨ TƯ .....                    | 439 |
|        | TÀI LIỆU THAM KHẢO .....                           | 443 |

## **Chương 11. PHẦN KẾT**

|                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| TỪ NHỮNG NGHIÊN CỨU THÁP NGÀ ĐẾN VŨ KHÍ HỦY DIỆT<br>VÀ ĐIỆN HẠT NHÂN ..... | 445 |
| PHỤ LỤC .....                                                              | 457 |

# Lời tựa

---

Sau thảm họa hạt nhân Fukushima, một số nước dứt khoát từ bỏ điện hạt nhân để phát triển năng lượng tái tạo, trong khi đó nhiều lò phản ứng mới vẫn được xây dựng ở nhiều nước khác. Chủ đề an toàn điện hạt nhân lại tiếp tục chia rẽ thế giới, từ công chúng đến các đảng phái chính trị và ngay cả giới chuyên môn. Dù thấy an toàn điện hạt nhân là chủ đề khoa học rất phức tạp, rất khó cân đong đo đếm để có thể khẳng định dứt khoát, *có hay không*. Đây còn là khoa học đa ngành, nơi hội tụ các đỉnh cao từ nhiều khoa học hiện đại sử dụng tới đa các phương tiện tính toán cực mạnh. Do đó, phán xét về an toàn điện hạt nhân không hề đơn giản, không thể theo những tư duy cơ giới hời hợt, và rất dễ bị những tâm thức chủ quan chi phối.

Mỗi lò phản ứng ở nhà máy điện hạt nhân chứa trong vùng hoạt hàng ty curi chất phóng xạ, sản phẩm phân hạch dây chuyền neutron với hạt nhân uranium. Tai nạn điện hạt nhân xảy ra nếu khối phóng xạ này bị tan chảy do nhiệt độ tăng lên quá cao khi phản ứng dây chuyền tăng tốc không kiểm soát được, hoặc do mất nước tải nhiệt. Khi ấy, nhân viên vận hành có thể bị chiếu xạ, nhà máy sẽ bị hư hỏng hoàn toàn, xác phóng xạ phải được tháo dỡ và chôn cất rất tốn kém. Tệ hại hơn, dân chúng sẽ bị nhiễm xạ, môi trường bị hoang phế một khi chất phóng xạ thoát được ra khỏi nhà lò.

Ở nhiều cấp độ thấp hơn, sự cố điện hạt nhân có thể gây hậu quả về mặt kinh tế xã hội. Đơn giản nhất là lò phản ứng phải ngừng hoạt động do một thông số kỹ thuật nào đó bị lệch lạc, từ đó phát ra tín hiệu cấp bách. Phải mất vài ngày để lò hoạt động trở lại, mà cứ mỗi ngày lò ngưng hoạt động không theo kế hoạch, doanh thu nhà máy mất đi một triệu đôla.

Các sự cố và tai nạn điện hạt nhân thường khởi nguồn từ những sai lệch trong hệ thống công nghệ, sai sót con người và những hiện tượng thiên nhiên cực đoan. Tai nạn càng nghiêm trọng khi các yếu tố này ập đến cùng một lúc, tuy hãn hữu theo lý thuyết xác suất, song lại chính là những kịch bản của ba tai nạn lớn đã từng xảy ra. Công nghệ và thiết bị rất quan trọng, song yếu tố con người bao gồm đội ngũ vận hành, quản lý, hệ thống pháp lý và văn hóa an toàn luôn đóng vai trò quyết định.

*An toàn điện hạt nhân không hề được cài đặt sẵn trong công nghệ mà chỉ nên xem là thành tích của đội ngũ,*

một tổng kết chí lý của nhóm chuyên gia điện hạt nhân đăng trên *The Economist* nhân dịp tròn một năm thảm họa Fukushima. Ý lại vào công nghệ mà thiếu đội ngũ chuyên nghiệp chính là gieo mầm cho điện hạt nhân mất an toàn. Ngược lại, tai nạn điện hạt nhân rất khó xảy ra nếu đất nước sở hữu được một đội ngũ chuyên gia hùng hậu, và đây chính là hiện thực ở hàng trăm lò phản ứng được thiết kế hơn 40 năm trước đây nhưng vẫn được vận hành an toàn ở các nước tiên tiến.

An toàn điện hạt nhân là chủ đề nóng ở nước ta trong thời gian gần đây, được đề cập thường xuyên trong những hội thảo quốc gia và quốc tế, được đăng tải liên tục trên các phương tiện truyền thông. Trong khi đó, các sách trình bày cơ sở khoa học về an toàn điện hạt nhân lại thiếu hẳn. Trăn trở với hiện trạng này đã thôi thúc việc biên soạn sách “**An toàn điện hạt nhân**” được Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật ấn hành.

Mạch logic bắt đầu từ chương 4, khi bàn đến cấu trúc lò phản ứng năng lượng và cơ chế vật lý dẫn đến tai nạn điện hạt nhân cũng như hậu quả thoát chất phóng xạ ra môi trường (chương 5). Không thể hiểu kỹ hai nội dung này nếu không ngược lại lịch sử phát triển vật lý hạt nhân bắt nguồn từ phát minh ra hiện tượng phóng xạ trong khoáng uranium từ đầu thế kỷ XX (chương 1), nguồn gốc phóng xạ trong tự nhiên (chương 2) và nền phóng xạ nhân tạo còn lưu lại từ các cuộc thử vũ khí hạt nhân ào ạt trong khí quyển hồi đầu thập kỷ 60 của thế kỷ XX (chương 3). Phân tích an toàn điện hạt nhân theo phương pháp tất định và xác suất

(chương 6) là hai phương pháp luận cơ bản trong an toàn điện hạt nhân. Tiếp theo, ba tai nạn Three Mile Island, Chernobyl và Fukushima (chương 7, 8, 9) được minh họa tương đối chi tiết. Cuối cùng là câu chuyện hậu Fukushima (chương 10) trình bày hiện trạng điện hạt nhân trên thế giới và triển vọng của các lò thế hệ mới có khả năng sử dụng phế thải hạt nhân ngay trong lò, và có thể được thương mại hóa trong vài thập kỷ tới.

Sách có thể được sử dụng làm tài liệu tham chiếu trong giảng dạy chuyên ngành hạt nhân ở trường đại học. Những người hoạt động trong ngành, kể cả giới quản lý và hoạch định chính sách, có thể tìm thấy ở đây những kiến thức cơ bản, có hệ thống và hữu ích cho công việc của mình. Đặc biệt, sách "*An toàn điện hạt nhân*" còn hy vọng được làm cầu nối giữa các ngành trong công nghệ điện hạt nhân đa ngành, giúp chuyên gia thuộc các chuyên môn khác nhanh chóng có được hành trang cần thiết để rẽ sang công hiến trong lãnh vực điện hạt nhân. Cuối cùng, trong sách vẫn có nhiều chỗ dành cho giới truyền thông thường xuyên tác nghiệp về điện hạt nhân nhưng chưa được trang bị kiến thức nền về chuyên môn này.

Viết sách là đối thoại với người đọc. Đọc sách là đối thoại với tác giả. Từ những cuộc đối thoại này tri thức khoa học sẽ đến với công chúng.

**Tác giả**

**PHẠM DUY HIỂN**



# Giới thiệu nội dung

---

An toàn điện hạt nhân luôn là tiêu điểm gây chia rẽ thế giới trong nhiều thập kỷ qua. Sau thảm họa hạt nhân Fukushima ở Nhật Bản tháng ba năm 2011, một số nước quyết tâm từ bỏ con đường này, trong khi nhiều lò phản ứng mới vẫn được xây dựng ở nhiều nước khác.

Điện hạt nhân có an toàn không? Một câu hỏi không dễ trả lời, nhất là cho những ai muốn thấy đáp số chỉ là có hay không. Mỗi lò phản ứng ở nhà máy điện hạt nhân chứa một khối phóng xạ mạnh gấp hàng tỷ lần lượng phóng xạ có thể gây tử vong. Giữ cho điện hạt nhân an toàn chính là làm sao để khối phóng xạ này không bị tan chảy và thoát ra môi trường. Việc này lại do nhiều yếu tố quyết định, cả con người lẫn thiết bị, do đó khả năng bảo đảm an toàn cho nhà máy điện hạt nhân rất tùy thuộc vào trình độ phát triển và hiện trạng ở từng quốc gia.

Phóng xạ lại chính là ngọn nguồn dẫn đến điện hạt nhân. Nó phát ra từ khoáng uranium ẩn kín trong đất đá khắp nơi xung quanh ta, nhưng mãi đến những năm cuối thế kỷ XIX con người mới có cơ duyên phát hiện ra nó, rồi nhân đó hành trình đến hạt nhân nguyên tử, biết cách điều chế ra các chất phóng xạ, và xây dựng nhà máy điện hạt nhân. Điện hạt nhân dùng uranium làm nguồn nhiên liệu nên chủ đề an toàn điện hạt nhân phải bắt đầu từ tia phóng xạ.

Phóng xạ trong môi trường có cả hai nguồn gốc, tự nhiên lẫn nhân tạo. Trên phạm vi toàn cầu, phóng xạ nhân tạo tồn tại trong môi trường hiện nay là sản phẩm từ các vụ thử vũ khí hạt nhân ào ạt trong khí quyển vào những năm đầu thập kỷ 60 của thế kỷ XX và hai tai nạn điện hạt nhân lớn ở nhà máy Chernobyl, Liên Xô (cũ), năm 1986, và Fukushima Dai-ichi, Nhật Bản, năm 2011.



# Giới thiệu nội dung

---

An toàn điện hạt nhân luôn là tiêu điểm gây chia rẽ thế giới trong nhiều thập kỷ qua. Sau thảm họa hạt nhân Fukushima ở Nhật Bản tháng ba năm 2011, một số nước quyết tâm từ bỏ con đường này, trong khi nhiều lò phản ứng mới vẫn được xây dựng ở nhiều nước khác.

Điện hạt nhân có an toàn không? Một câu hỏi không dễ trả lời, nhất là cho những ai muốn thấy đáp số chỉ là có hay không. Mỗi lò phản ứng ở nhà máy điện hạt nhân chứa một khối phóng xạ mạnh gấp hàng tỷ lần lượng phóng xạ có thể gây tử vong. Giữ cho điện hạt nhân an toàn chính là làm sao để khối phóng xạ này không bị tan chảy và thoát ra môi trường. Việc này lại do nhiều yếu tố quyết định, cả con người lẫn thiết bị, do đó khả năng bảo đảm an toàn cho nhà máy điện hạt nhân rất tùy thuộc vào trình độ phát triển và hiện trạng ở từng quốc gia.

Phóng xạ lại chính là ngọn nguồn dẫn đến điện hạt nhân. Nó phát ra từ khoáng uranium ẩn kín trong đất đá khắp nơi xung quanh ta, nhưng mãi đến những năm cuối thế kỷ XIX con người mới có cơ duyên phát hiện ra nó, rồi nhân đó hành trình đến hạt nhân nguyên tử, biết cách điều chế ra các chất phóng xạ, và xây dựng nhà máy điện hạt nhân. Điện hạt nhân dùng uranium làm nguồn nhiên liệu nên chủ đề an toàn điện hạt nhân phải bắt đầu từ tia phóng xạ.

Phóng xạ trong môi trường có cả hai nguồn gốc, tự nhiên lẫn nhân tạo. Trên phạm vi toàn cầu, phóng xạ nhân tạo tồn tại trong môi trường hiện nay là sản phẩm từ các vụ thử vũ khí hạt nhân ào ạt trong khí quyển vào những năm đầu thập kỷ 60 của thế kỷ XX và hai tai nạn điện hạt nhân lớn ở nhà máy Chernobyl, Liên Xô (cũ), năm 1986, và Fukushima Dai-ichi, Nhật Bản, năm 2011.

Để giúp hiểu được cơ chế phản ứng phân hạch dây chuyền và phát thải phóng xạ ra môi trường, chương 1 sẽ trình bày một số nội dung cơ bản về hiện tượng phóng xạ, cấu trúc và phản ứng hạt nhân có liên quan đến phóng xạ, và phản ứng phân hạch với neutron trong bom nguyên tử và điện hạt nhân. Nội dung này hướng tới các đối tượng rộng rãi không nhất thiết phải chuyên sâu về vật lý hạt nhân. Cách trình bày thiên về bản chất vật lý hơn là dẫn dắt toán học để đi đến các công thức.

Chương 1 cũng đề cập đến cách sắp xếp các nguyên tố và đồng vị, song nguồn gốc của chúng lại là nội dung chương 2. Khi khám phá ra hiện tượng phóng xạ đầu thế kỷ XX, con người kể như đã tìm được chiếc chìa khóa được giấu kín trong khoáng urani, chẳng những để chinh phục nguồn năng lượng vĩ đại trong lòng hạt nhân nguyên tử, mà còn mở cửa vào vũ trụ, rồi không khỏi ngỡ ngàng nhận ra rằng chính phản ứng hạt nhân và phân rã phóng xạ là hai cánh tay siêu nhiên miệt mài nhào nặn nên hàng nghìn nguyên tố và đồng vị trong quá trình giãn nở và tiến hóa không ngừng của vũ trụ. Đặc biệt, những đồng vị phóng xạ tự nhiên thuộc ba họ  $U^{235}$ ,  $U^{238}$ ,  $Th^{232}$  và nhiều nguyên tố nặng khác có mặt trong môi trường ngày nay đã xuất hiện khi hình thành hệ Mặt Trời hàng tỷ năm trước đây do phản ứng chớp nhoáng của neutron kèm theo phân rã  $\beta^-$  ở những nguyên tố nhẹ hơn.

Thảm họa phóng xạ với hàng trăm bom nguyên tử và khinh khí được các cường quốc cho nổ tung trong khí quyển thời đầu chiến tranh lạnh hồi đầu thập kỷ 60 của thế kỷ XX là nguồn phát thải phóng xạ nhân tạo lớn nhất và còn tồn lưu lâu nhất trong môi trường toàn cầu. Những đồng vị  $Cs^{137}$ ,  $Sr^{90}$  và  $Pu^{239+240}$  tạo nên nền phong phóng xạ nhân tạo trong đất bề mặt và môi trường sinh thái ở mọi nơi. Quan trắc phóng xạ nhân tạo trong môi trường do phát thải từ điện hạt nhân chính là phát hiện tín hiệu phóng xạ mới, thường là khá yếu ớt (trừ những nơi gần tai nạn), trên nền phong này. Do đó, sách dành riêng chương 3 để trình bày về phóng xạ từ các cuộc thử vũ khí hạt nhân trước đây.

Nguồn phát thải lớn tiếp theo là các lò phản ứng năng lượng và tai nạn điện hạt nhân được trình bày ở chương 4. Mở đầu là những khái niệm về động học lò phản ứng giúp giải thích cơ chế dẫn đến các tai nạn điện hạt nhân do độ phản ứng tăng lên đột ngột (RIA) và tai nạn LOCA do mất nước tải nhiệt. Đây là hai loại tai nạn có thể làm tan chảy nhiên liệu trong vùng hoạt lò phản ứng và thoát phóng xạ ra môi trường. Từ đây cũng sẽ thấy ý nghĩa các rào chắn nhất giữ phóng xạ trong lò phản ứng và hệ thống phòng vệ theo chiều sâu, những giải pháp cơ bản nhằm bảo đảm an toàn cho các nhà máy điện hạt nhân. Nội dung chương này được minh họa qua hai loại lò phổ biến hiện nay, lò nước nén và lò nước sôi.

Phát thải phóng xạ ra môi trường xung quanh nhà máy điện hạt nhân, và xa hơn nữa, xuyên quốc gia, là nội dung chương 5. Đây là miền giao thoa giữa khoa học hạt nhân với khoa học khí quyển, có vai trò quan trọng trong luận chứng và cấp phép xây dựng nhà máy, nhất là trong tổ chức ứng phó sự cố khi xảy ra tai nạn điện hạt nhân.

Để được cấp phép xây dựng và bảo đảm an toàn trong suốt thời gian vận hành, an toàn nhà máy điện hạt nhân phải được phân tích đánh giá theo phương pháp tất định và xác suất, cả hai phương pháp được trình bày trong chương 6.

Các chương 7, 8, 9 mô tả ba tai nạn điện hạt nhân đã xảy ra ở Three Mile Island, Chernobyl và Fukushima, và phát thải phóng xạ từ các tai nạn này. Bối cảnh, loại lò, kích bản và mức độ tác hại của ba tai nạn phản ánh đầy đủ bức tranh điện hạt nhân khá đa dạng trong bảy thập kỷ qua cũng như những rủi ro có thể tương tự ra được xuất phát từ cơ chế phản ứng phân hạch dây chuyền trong các lò năng lượng. Với thành tích năm lò phản ứng bị tan chảy nhiên liệu trong tổng số gần 500 lò hoạt động trung bình chưa đầy 25 năm, rủi ro điện hạt nhân trên thực tế cao hơn rất nhiều so với những dự báo lạc quan trước đây theo phương pháp xác suất. Những bài học rút ra từ đây, nhất là về văn hóa an toàn của cả hệ thống và tính chuyên nghiệp của đội ngũ, vẫn luôn nóng hổi trong thời đại công nghiệp hiện nay.

Sau Fukushima, điện hạt nhân đang có xu hướng chuyển dịch từ các nước tiên tiến Tây Âu và Bắc Mỹ về lục địa châu Á đang khát năng lượng, nhưng lại quá yếu về cơ sở hạ tầng và trình độ nhân lực. Tương lai điện hạt nhân phụ thuộc rất nhiều vào những đột phá mới về tính an toàn và kinh tế của các lò năng lượng, vào thành công trong công nghệ chôn cất bã thải phóng xạ hoạt độ cao và khả năng loại trừ vũ khí hạt nhân, phóng xạ, rơi vào tay các nhóm khủng bố.

Những vấn đề hậu Fukushima này sẽ được trình bày trong chương 10. Các lò phản ứng thế hệ II phải qua kiểm tra ứng lực gắt gao để đủ sức chống chịu những sự kiện thiên nhiên cực đoan trong khi chúng lại đang lão hóa hàng ngày và sẽ lụi tàn trong vài thập kỷ tới. Thay vào đó là các lò thế hệ III+ được trang bị bằng những hệ thống an toàn thụ động sử dụng cơ chế tự nhiên để vận hành thay vì nguồn điện. Và có thể sau 2030, sẽ là các lò thế hệ IV có đặc điểm an toàn nội tại ngay trong nguyên lý hoạt động của chúng, lại có thể đốt cháy phần lớn các sản phẩm siêu urani ngay trong lò mà không phải đem chôn cất lâu dài.

Đương nhiên, một khi những vấn đề trên được giải quyết trọn vẹn về mặt kỹ thuật thì tính kinh tế của các lò thế hệ IV sẽ quyết định tương lai của điện hạt nhân.

Sách cố gắng trình bày các giải pháp kỹ thuật bảo đảm an toàn cho các lò phản ứng năng lượng. Song an toàn điện hạt nhân không chỉ bảo đảm bằng các giải pháp kỹ thuật mà phụ thuộc rất nhiều vào con người. Yếu tố con người lại rất khác nhau giữa các nước có nền khoa học công nghệ tiên tiến với các nước lạc hậu vừa mới thoát thân ra khỏi nền sản xuất tiểu nông lạc hậu. Có tiền sẽ mua được nhà máy, song không dễ gì mua được đội ngũ có thể đạt đến "khối lượng tới hạn" trước khi vững bước tiến lên quỹ đạo điện hạt nhân.

*Hà Nội, tháng 9 năm 2014*

***Phạm Duy Hiển***

# 1

## Phóng xạ và vật lý hạt nhân

Hiểu rõ bản chất vật lý của hiện tượng phóng xạ là điều kiện tiên quyết để nghiên cứu phóng xạ môi trường và năng lượng hạt nhân. Xuất hiện cách nay vừa đúng 100 năm, vật lý hạt nhân đã trải qua thời kỳ phát triển rực rỡ nhất vào những năm trước Chiến tranh thế giới thứ II, khi mà toàn bộ nền móng của tòa nhà đồ sộ này đã được dựng nên bởi những con người dấn thân âm thầm trong những "tháp ngà" khoa học quá ư tối tăm theo các chuẩn mực ngày nay: máy móc thiết bị tự lắp bày ra ngay trên bàn làm việc cùng với chiếc thước tính lôga kéo tay chỉ làm được vài phép tính đơn giản.

Cách tốt nhất để hiểu được bản chất những hiện tượng vật lý kinh điển là lần theo dấu ấn những người đã từng mò mẫm trong bóng tối để đưa chúng ra ánh sáng. Ngược về cội nguồn cũng sẽ cho ta cảm hứng trong sáng tạo khoa học.

### 1.1 PHÓNG XẠ – NHỮNG MỐC LỊCH SỬ

#### 1.1.1 Những năm cuối thế kỷ XIX

Từ ngàn đời nay con người chung sống với phóng xạ mà không hề hay biết. Mãi đến cuối thế kỷ XIX (1896), trong một cơ duyên tình cờ Becquerel nhận thấy có các tia lạ, vô hình, phát ra từ mẫu vật chứa uranium. Lại, vì để trong bóng tối mà vẫn làm đen kính ảnh, khác với các chất lân quang đang được nghiên cứu khá sôi nổi thời bấy giờ, chúng chỉ phát sáng hoặc làm đen kính ảnh sau khi phơi ra ngoài nắng.

Có gì đó rất giống nhau giữa tia lạ này với tia mà Roentgen đã phát hiện ra một năm trước và vì chưa rõ bản chất nên tác

giả gọi nó là tia X. Giống từ cái cơ may đáng trí dẫn đến hai phát minh khoa học vĩ đại trong vòng chưa đầy một năm tựa hồ như cả hai đã được lập trình sẵn trong hồ sơ của Tạo hóa. Một hôm trước khi ra về, nhà vật lý Đức Roentgen đã quên tắt nguồn điện cung cấp cao áp cho ống tia âm cực trước khi tắt đèn, nhưng cũng chính nhờ vậy ông mới thấy được ánh sáng huỳnh quang le lói trên bàn thí nghiệm. Còn với Becquerel, kính ảnh được gói lại bằng giấy đen rồi vô tình đặt lên cục muối uranyl và bỏ quên hàng tuần lễ trong ngăn kéo. Chỗ giống nhau thứ hai trong hai phát minh trên là khả năng xuyên sâu của các tia vô hình khiến vật chất tù mù trở nên hữu hình (hình 1.1).



Hình 1.1. Bàn tay vợ Roentgen do chính ông chụp bằng tia X (hình bên trái).  
Cẳng chân và bàn chân của vận động viên chạy marathon bị chấn thương xương được hiện hình trên máy PET (Positron Emission Tomography) bằng đồng vị phóng xạ phát positron F18 điều chế trên máy gia tốc (hình bên phải) (Nguồn: Grant et al. (2008)).

Nhưng hai tia lạ cũng có chỗ khác nhau rất cơ bản. Cái nguyên khởi của chúng rất khác nhau và đây chính là điều thật thú vị. Tia X phát ra từ ống tia âm cực do con người chế tạo, còn tia lạ Becquerel phát ra từ một mật mã được cài sẵn trong đất đá vô tri, là nguyên tố uranium. Phát hiện ra mật mã này đã làm cho tia lạ của Becquerel khởi đầu một chuỗi logic các phát minh lớn về khoa học hạt nhân, qua đó đã để lại cột mốc nổi bật trong lịch sử văn minh của nhân loại.

Với truyền thống gia đình nghiên cứu các chất lân quang từ hai đời trước, Becquerel đã sở hữu bộ sưu tập với nhiều khoáng vật phát lân quang quý giá, trong đó có tinh thể uranyl sulphate kali phát sáng trong bóng tối sau khi phơi ngoài nắng. Những thí nghiệm tiếp theo của Becquerel cho thấy, khác hẳn với các tia lân quang, tia lạ có khả năng xuyên qua lá đồng, nhưng nếu trên lá đồng có khoét lỗ tròn, thì sẽ để lại hình lỗ tròn trên kính ảnh. Những đặc điểm mới lạ này không hề phụ thuộc vào thành phần khoáng vật và hóa học của mẫu vật, miễn là trong đó có uranium, và kính ảnh càng đen khi hàm lượng uranium trong mẫu càng cao.

Chưa biết bản chất của tia lạ là gì, người ta gọi nó là tia Becquerel. Ngay sau đó, trong ba năm cuối thế kỷ XIX, các nhà khoa học Pháp và Anh đã vào cuộc, qua đó dựng lên những cột mốc đầu tiên trên hành trình con người nhận thức và chinh phục các tia lạ Becquerel.

Năm 1898, Pierre Curie sau khi thành hôn với cô sinh viên Ba Lan của mình đã tìm ra trong khoáng uranium pitchblende hai nguyên tố phóng xạ polonium (Po) có tính chất hóa học gần giống bismuth (Bi) và radium (Ra) có quang phổ giống barium (Ba) (xem hình 1.2 để đối chiếu). Cả hai nguyên tố mới này có cường độ phóng xạ mạnh hơn uranium gấp bội. Hai ông bà Curie cũng đã phát hiện tính phóng xạ của thorium (Th), nguyên tố đứng trước uranium (U) hai ô trong bảng tuần hoàn (hình 1.2). Nhưng như một trò chơi ú tim, bản thân U và Th không phải là hai nguyên tố phóng xạ mạnh. Bằng chứng là cường độ phóng xạ của uranium tinh khiết trong những hợp chất chứa uranium yếu hơn rất nhiều so với quặng của chúng, cường độ phóng xạ mạnh nhất lại là trong xỉ quặng.

Bằng tiền túi eo hẹp của mình, Pierre và Marie Curie đã mua 8 tấn xỉ quặng từ mỏ Bohemia chở về Paris và hòa tách chúng trong một căn phòng tối tăm ẩm thấp để kết tủa và phân lập được 0,1 g radium chloride, từ đó xác định được khối lượng nguyên tử của Ra là 225 và chứng minh rằng đây là một nguyên tố hóa học hoàn toàn mới nằm cùng nhóm với barium (hình 1.2). Năm 1903, Becquerel, Pierre và Marie Curie nhận chung giải Nobel vật lý.

| Nhóm<br>hư<br>y | 1        | 2        | 3        | 4         | 5         | 6         | 7         | 8         | 9         | 10        | 11        | 12        | 13         | 14        | 15         | 16        | 17         | 18         |
|-----------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|------------|
| 1               | 1<br>H   |          |          |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |           |            |           |            | 2<br>He    |
| 2               |          | 4<br>Be  |          |           |           |           |           |           |           |           |           |           | 5<br>B     | 6<br>C    | 7<br>N     | 8<br>O    | 9<br>F     | 10<br>Ne   |
| 3               |          | 12<br>Mg |          |           |           |           |           |           |           |           |           |           | 13<br>Al   | 14<br>Si  | 15<br>P    | 16<br>S   | 17<br>Cl   | 18<br>Ar   |
| 4               | 19<br>K  | 20<br>Ca | 21<br>Sc | 22<br>Ti  | 23<br>V   | 24<br>Cr  | 25<br>Mn  | 26<br>Fe  | 27<br>Co  | 28<br>Ni  | 29<br>Cu  | 30<br>Zn  | 31<br>Ga   | 32<br>Ge  | 33<br>As   | 34<br>Se  | 35<br>Br   | 36<br>Kr   |
| 5               | 37<br>Rb | 38<br>Sr | 39<br>Y  | 40<br>Zr  | 41<br>Nb  | 42<br>Mo  | 43<br>Tc  | 44<br>Ru  | 45<br>Rh  | 46<br>Pd  | 47<br>Ag  | 48<br>Cd  | 49<br>In   | 50<br>Sn  | 51<br>Sb   | 52<br>Te  | 53<br>I    | 54<br>Xe   |
| 6               | 55<br>Cs | 56<br>Ba | *        | 72<br>Hf  | 73<br>Ta  | 74<br>W   | 75<br>Re  | 76<br>Os  | 77<br>Ir  | 78<br>Pt  | 79<br>Au  | 80<br>Hg  | 81<br>Tl   | 82<br>Pb  | 83<br>Bi   | 84<br>Po  | 85<br>At   | 86<br>Rn   |
| 7               | 87<br>Fr | 88<br>Ra | **       | 104<br>Rf | 105<br>Db | 106<br>Sg | 107<br>Bh | 108<br>Hs | 109<br>Mt | 110<br>Ds | 111<br>Rg | 112<br>Cn | 113<br>Uut | 114<br>Fl | 115<br>Uup | 116<br>Lv | 117<br>Uus | 118<br>Uuo |
| lanthanides     | 57<br>La | 58<br>Ce | 59<br>Pr | 60<br>Nd  | 61<br>Pm  | 62<br>Sm  | 63<br>Eu  | 64<br>Gd  | 65<br>Tb  | 66<br>Dy  | 67<br>Ho  | 68<br>Er  | 69<br>Tm   | 70<br>Yb  | 71<br>Lu   |           |            |            |
| Actinides       | 89<br>Ac | 90<br>Th | 91<br>Pa | 92<br>U   | 93<br>Np  | 94<br>Pu  | 95<br>Am  | 96<br>Cm  | 97<br>Bk  | 98<br>Cf  | 99<br>Es  | 100<br>Fm | 101<br>Md  | 102<br>No | 103<br>Lr  |           |            |            |

Hình 1.2. Bảng tuần hoàn các nguyên tố hóa học bao gồm các nguyên tố siêu nặng được biết đến năm 2012. Các nguyên tố được xếp thành 18 nhóm và 7 chu kỳ dựa trên tính chất hóa học của chúng. Về sau, cơ học lượng tử cho phép tính toán trạng thái lượng tử của các electron bao quanh hạt nhân, từ đó đã giải thích đầy đủ bản chất các nhóm và chu kỳ nói trên. Các nguyên tố lanthanides còn gọi là đất hiếm có cấu hình electron ngoài cùng giống nhau, do đó có tính chất hóa học khá giống nhau. Các nguyên tố actinides cũng vậy.

Lúc này chưa có ống đếm (detector) hoặc phổ kế để nhận biết tia phóng xạ, công cụ thực nghiệm chủ yếu là điện kế có độ nhạy đến pico ampe nối mạch với tụ điện không khí. Không khí giữa hai bản tụ điện trở nên dẫn điện do bị ion hóa khi có tia phóng xạ chiếu vào làm cho dòng điện trong mạch tăng lên. Năm 1898, Wilson phát minh ra buồng ion hóa,

một công cụ cho phép nhìn thấy đường đi các tia phóng xạ. Mãi đến năm 1906 Geiger, một cộng sự của Rutherford, mới sáng chế ra ống đếm chứa khí cho phép đếm từng tia phóng xạ, qua đó có thể biết được tốc độ phân rã phóng xạ và cường độ phát xạ của các nguyên tố (sau này gọi là hoạt độ phóng xạ).

Năm 1899, tại phòng thí nghiệm Cavendish ở Anh, Rutherford phân biệt ra hai loại phân rã  $\alpha$  và  $\beta$  dựa trên quãng chạy và khả năng ion hóa trên đường đi của chúng. Tia  $\alpha$  có thể bị chặn lại bằng một tờ giấy hoặc lá nhôm mỏng, trong khi tia  $\beta$  có thể xuyên qua tấm nhôm dày vài milimet. Ít lâu sau, một cộng sự khác của Rutherford còn nhận dạng ra một loại tia phóng xạ xuyên sâu hơn, gọi là tia  $\gamma$ . Nếu đặt nguồn phóng xạ trong điện trường, tia  $\gamma$  sẽ đi thẳng trong khi tia  $\alpha$  và  $\beta$  sẽ lệch về hai phía khác nhau, chứng tỏ chúng mang điện tích ngược dấu nhau.

Năm 1900, Becquerel bằng thí nghiệm đo tỷ số điện tích và khối lượng đã khẳng định tia  $\beta$  chính là electron. Ba năm sau, Rutherford khẳng định tia  $\alpha$  chính là hạt nhân helium rồi cùng với cộng sự của mình là Soddy tìm ra quy luật chuyển hóa liên tiếp từ nguyên tố này sang nguyên tố khác khi chúng phân rã phóng xạ.

### **1.1.2 Những năm đầu thế kỷ XX**

Cho đến đầu thế kỷ XX người ta vẫn chưa biết tia phóng xạ phát ra từ những đơn vị cấu trúc nào trong lòng vật chất. Mô hình nguyên tử đầu tiên do Thompson đề xướng năm 1904 xem nguyên tử như giọt chất lỏng tích điện dương, trong đó có các electron chuyển động, còn quá thô sơ và không đúng thực tế. Khoa học đã đi vào cấu trúc vi mô của vật chất từ cuối thế kỷ XIX, nhưng lúc này mới chỉ biết có electron, chưa biết gì về hạt nhân và đồng vị. Phải hơn mười năm sau, năm 1911, cộng sự của Rutherford mới nhìn thấy hạt nhân nguyên tử lần đầu tiên trong một thí nghiệm chiếu tia  $\alpha$  từ nguồn phóng xạ radium lên lá nhôm và thấy một số tia  $\alpha$  bị bật ngược về phía sau. Từ thí nghiệm này, Rutherford đã đề ra mô hình cấu trúc nguyên tử với electron quay

quanh hạt nhân giống như các hành tinh quay quanh Mặt Trời. Hạt nhân nằm ở tâm nguyên tử tại đó tập trung hầu hết khối lượng nguyên tử. Mô hình Rutherford gần thực tế hơn, song gặp ngay những mâu thuẫn nội tại có tính nguyên tắc, electron chuyển động có gia tốc ắt phải phát bức xạ mất dần năng lượng và rơi vào tâm. Phải đợi thêm một thập kỷ nữa, cơ học lượng tử ra đời mới xây dựng được mô hình cấu trúc nguyên tử đúng đắn và phù hợp với các quan sát thực nghiệm.

Năm 1913, Soddy và Thompson phát hiện ra hiện tượng đồng vị, theo đó một nguyên tố hóa học có vị trí xác định trong bảng tuần hoàn Mendeleev có thể là hỗn hợp của nhiều đồng vị với số khối A khác nhau. Các đồng vị của nguyên tố có thể chuyển hóa lẫn nhau bằng phân rã phóng xạ hoặc bằng phản ứng hạt nhân. Hiện tượng này được Rutherford khảo sát lần đầu tiên vào năm 1917 khi chuyển hóa nitơ ra oxy bằng cách dùng tia  $\alpha$  từ nguồn phóng xạ Ra-Be. Phản ứng xảy ra theo phương trình:



Nhưng tại sao một nguyên tố có thể có nhiều đồng vị? Lý giải bí ẩn này còn phải đợi thêm hai thập kỷ nữa khi Chadwick, một cộng sự của Rutherford, tìm ra neutron vào năm 1932. Đến lúc này người ta mới biết rằng hạt nhân nguyên tử cấu tạo từ proton và neutron, gọi chung là nucleon, một hạt mang điện dương, hạt kia trung hòa điện, chúng tương tác với nhau bằng lực hạt nhân. Một đồng vị X của nguyên tố có nguyên tử số Z được viết dưới dạng  ${}_Z^AX$ , trong đó  $A = Z + N$ , Z và N tương ứng là số proton và neutron cấu tạo nên hạt nhân của đồng vị. Số Z là số thứ tự của nguyên tố trong bảng hệ thống tuần hoàn.

Cùng với bước đột phá tìm ra neutron, học thuyết lượng tử (Bohr, De Broglie, Heisenberg, Pauli, Dirac...) được hoàn thiện vào những năm đầu thập kỷ 1930 đã giải thích thành công rất nhiều hiện tượng liên quan đến cấu trúc nguyên tử và hạt nhân. Từ đó hàng loạt phát minh về phóng xạ và phản ứng hạt nhân dồn dập xuất hiện trong những năm tiếp theo.

### 1.1.3 Thập kỷ 30 của thế kỷ XX

Năm 1933, Anderson và Millikan đã ghi nhận trong tia vũ trụ một hạt có khối lượng bằng electron, nhưng mang điện tích dương. Trước đó trong công trình lý thuyết về cơ học lượng tử tương đối tính Dirac đã tiên đoán sự tồn tại các phản hạt. Hạt do Anderson và Millikan tìm ra chính là phản hạt của electron, gọi là positron. Positron không chỉ có trong thành phần tia vũ trụ mà còn phát ra trong phân rã phóng xạ của rất nhiều hạt nhân.

Một năm sau, năm 1934, Irene và Joliot Curie đã tìm thấy đồng vị phóng xạ phân rã positron mà cũng chính là đồng vị phóng xạ được con người tạo ra lần đầu tiên. Phóng xạ nhân tạo bắt đầu có từ đây. Hai nhà khoa học đã tiến hành nhiều thí nghiệm chiếu tia  $\alpha$  từ nguồn phóng xạ polonium lên lá nhôm và nghiên cứu các tia phát ra từ phản ứng hạt nhân bằng buồng ion hóa, trong đó có neutron. Lá nhôm cũng được dùng làm cửa sổ cho buồng ion hóa. Hiện tượng phóng xạ nhân tạo được phát hiện khi tình cờ họ quyết định chiếu lá nhôm trong 10 phút sau đó tách lá nhôm ra khỏi buồng ion hóa và đặt lên ống đếm Geiger. Số đếm giảm dần theo quy luật hàm mũ với chu kỳ bán phân rã  $T_{1/2} = 2,5$  phút. Chất phóng xạ đã được tạo thành trong thí nghiệm là một đồng vị của phosphor (P), không có trong thiên nhiên. Hai tuần sau, Joliot-Curie đã công bố kết quả tách phosphor phóng xạ ra khỏi bia nhôm bằng phương pháp hóa học. Phản ứng hạt nhân và phân rã phóng xạ nói trên có thể viết như sau:



Khám phá của Joliot-Curie đã khởi đầu một giai đoạn mới tổng hợp các đồng vị phóng xạ trong phòng thí nghiệm. Thế là các đồng vị phóng xạ không chỉ có trong tự nhiên mà còn có thể điều chế được. Số lượng các đồng vị phóng xạ nhân tạo tăng lên nhanh chóng nhờ sử dụng các chùm hạt được tăng tốc trong máy gia tốc có cường độ và năng lượng cao hơn rất nhiều so với nguồn phóng xạ tự nhiên mà Joliot-Curie đã dùng.

Song, sử dụng máy gia tốc cũng có mặt hạn chế, đó là các hạt tích điện được gia tốc phải vượt qua hàng rào thế Coulomb trước khi chui vào bên trong hạt nhân để gây phản ứng. Về mặt này, neutron có ưu thế hơn hẳn, nó không bị hàng rào thế Coulomb cản trở. Thậm chí, theo lý thuyết cơ học lượng tử, neutron chậm thường dễ gây phản ứng hơn neutron nhanh. Dựa trên ý tưởng này những nhóm nghiên cứu ở Ý, Pháp và Đức đã tìm ra nhiều sản phẩm phóng xạ khi chiếu neutron lên hạt nhân, đa số là các đồng vị phân rã  $\beta$ , phát ra electron, có phổ liên tục.

Nhưng tại sao phổ các electron này lại liên tục, trong khi hạt nhân vốn tồn tại ở các trạng thái năng lượng gián đoạn? Fermi đã xây dựng thành công lý thuyết phân rã  $\beta$  và giải thích được bí ẩn này. Ông đã tiên đoán ra sự tồn tại một hạt khác tham gia vào quá trình phân rã  $\beta$  và chia sẻ năng lượng với electron. Đó là hạt neutrino có khối lượng gần bằng không và không mang điện tích nên có thể xuyên qua những lớp vật chất rất dày mà không bị mất năng lượng, do đó neutrino rất khó phát hiện bằng các dụng cụ đo lúc bấy giờ.

#### 1.1.4 Trước ngưỡng cửa chiến tranh thế giới thứ II. Phân hạch uranium

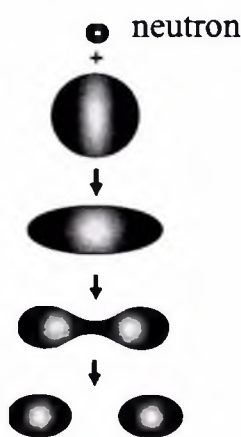
Hấp dẫn nhất trong các nghiên cứu tìm nguyên tố mới vẫn là chiếu neutron lên uranium để sản tìm các nguyên tố phóng xạ hoàn toàn mới, gọi là siêu uranium, không có trong tự nhiên, nhưng nặng hơn, và có điện tích lớn hơn uranium. Fermi đã tìm ra một số sản phẩm phóng xạ trong các phản ứng chiếu neutron lên uranium, nhưng kết quả không lý giải được. Cuối cùng, vào năm 1938 hai nhà hóa học người Đức là Hahn và Strassman đã chứng minh rằng những sản phẩm phóng xạ do chiếu neutron lên uranium chẳng phải là siêu uranium mà là những nguyên tố có số khối trung bình như barium và lanthanum. Để tránh sự nghi ngờ của các đồng nghiệp, hai nhà hóa học khẳng định họ phát hiện ra barium chứ không phải radium (cùng nhóm II trong bảng tuần hoàn, nhưng nặng hơn barium nhiều) và lanthanum chứ không phải actinides

(cùng nhóm III trong bảng tuần hoàn) (xem hình 1.2). Theo Frisch, đồng nghiệp của hai tác giả nói trên, các sản phẩm này có động năng và khả năng ion hóa cao gấp bội so với các tia phóng xạ được biết trước đây.

Thế giới lúc này đang đứng trước ngưỡng cửa Chiến tranh thế giới thứ II. Bên ngoài những phòng thí nghiệm yên ắng ở các đại học châu Âu, không khí đã sặc mùi thuốc súng. Sinh mạng của nhiều nhà khoa học đang treo trên sợi tóc bởi làn sóng cuồng nộ bài Do thái do Đức quốc xã phát động. Nhiều nhà khoa học hạt nhân gốc Do thái phải tìm cách đi khỏi nước Đức và Ý để lánh nạn, trong số này có cả Fermi vì vợ là người gốc Do thái. Ông đưa cả gia đình sang Mỹ nhân chuyến đi Na Uy nhận giải Nobel thưởng cho công trình nghiên cứu phóng xạ beta của mình. Meitner, nhà hóa học nữ tài ba gốc Do thái cùng làm việc trong nhóm Hahn và Strassman cũng đã kịp lánh nạn sang Thụy Điển.

Meitner không nghi ngờ gì về kết quả quá bất ngờ của hai đồng nghiệp Hahn và Strassman do Frisch thông báo. Qua trao đổi, hai cô cháu này đã có ngay lời giải dựa trên mẫu hạt nhân giọt chất lỏng do Gamov đề xuất từ năm 1930 và được Bohr hoàn thiện trong mẫu hạt nhân hợp

phân vào những năm 1935. Theo đó, dưới tác dụng của neutron, hạt nhân bị kích thích, năng lượng kích thích phân bố lại cho mọi nucleon bên trong hạt nhân uranium và chuyển hóa thành dao động tập thể như dao động của mặt ngoài giọt chất lỏng. Quá trình này sẽ làm cho hạt nhân bị biến dạng thành hình elipsoit tròn xoay và khi hình elipsoit được kéo căng ra có thể đến lúc bị thắt lại ở chính giữa để sau đó tách làm hai giọt có số khối lượng trung bình (hình 1.3).



Hình 1.3. Mô tả quá trình biến dạng hạt nhân uranium dẫn đến phân hạch theo Meitner.

Dựa trên những tính toán đơn giản về mối tương quan giữa thế năng do sức căng mặt ngoài và lực đẩy Coulomb, Meitner đã ước lượng hai giọt sẽ bay ra với động năng rất lớn, khoảng 200 MeV. Tác giả còn tiên đoán rằng vì một giọt tách ra đã quan sát được là barium với  $Z = 56$  thì giọt kia phải là krypton có  $Z = 36$ , cả hai giọt đều thừa neutron nên chúng sẽ phân rã  $\beta^-$  liên tiếp tạo thành hai chuỗi đồng vị phóng xạ Ba-La-Ce và chuỗi kia, nhẹ hơn, Sr-Y-Zr. Những tiên đoán của Meitner đúng y như những gì quan sát được sau này.

Những giải thích và tiên đoán trên đã được Meitner và Frisch công bố trên Nature 143, p. 239–240 ngày 11/02/1939. Hai tuần sau, cũng trên Nature 143, p. 330 Bohr đã viết bình luận giải thích rõ hơn ý tưởng trên như sau:

*... Mọi phản ứng hạt nhân xảy ra qua trạng thái hạt nhân hợp phần (compound) trong đó năng lượng kích thích từ phản ứng sẽ phân bố lại cho những mức tự do của hạt nhân giống như khi ta kích thích nhiệt các vật rắn và lỏng... Ở những phản ứng hạt nhân thường thấy, khi hạt nhân hợp phần phân rã sẽ có một hạt bay ra, năng lượng kích thích sẽ tập trung vào hạt ấy giống như quá trình bốc hơi của phân tử từ giọt chất lỏng. Phân rã hạt nhân hợp phần dẫn đến phân hạch, sự phân bố lại của năng lượng kích thích sẽ tập trung cho chuyển động dao động gây ra biến dạng mạnh bề mặt hạt nhân hợp phần...*

Hiện tượng phân hạch uranium đã làm chấn động giới khoa học vốn đang ngột ngạt trong bầu không khí chiến tranh đang cận kề. Năng lượng cực lớn tỏa ra khi phân hạch một hạt nhân uranium tương đương với năng lượng oxy hóa hàng triệu nguyên tử carbon. Nhớ lại, chính phản ứng hóa học cơ bản này khi đốt nhiên liệu hóa thạch đã làm nên cuộc cách mạng công nghiệp trên thế giới từ hơn một thế kỷ trước. Giờ đây với phản ứng hạt nhân trên uranium phải chăng loài người đang đứng trước ngưỡng cửa của một cuộc cách mạng năng lượng mới. Nhưng làm sao có thể chinh phục được nguồn năng lượng vĩ đại này?

### 1.1.5 Phản ứng dây chuyền

Nguồn năng lượng này chỉ có thể khai thác được khi neutron tương tác với hạt nhân uranium theo phản ứng dây chuyền tự duy trì được. Điều này có cơ sở vì khi hạt nhân  $U^{235}$  vỡ làm đôi luôn có khoảng 2,5 neutron thứ cấp phát ra cùng với hai mảnh vỡ. Một neutron bị mất đi lại sinh ra 2,5 neutron mới! Các neutron mới này có thể bị hao hụt do thất thoát trong môi trường chứa uranium và chất làm chậm neutron, nhưng cuối cùng số neutron còn lại vẫn có thể nhiều hơn một đôi chút trước khi gặp một hạt nhân  $U^{235}$  khác để gây phân hạch tiếp theo.

Bảo đảm hệ số nhân neutron  $k \geq 1$  để phản ứng dây chuyền có thể xảy ra là chuyện không dễ. Trong hai đồng vị của uranium, chỉ có  $U^{235}$  là phân hạch dưới tác dụng của neutron nhiệt, mà đồng vị này chỉ chiếm 0,7% trong tự nhiên, 99,2% còn lại là  $U^{238}$  chẳng những không phân hạch được mà còn hấp thụ mất neutron.

Để những băn khoăn trên được giải tỏa, trước hết phải tìm cách chứng minh rằng trong một môi trường làm chậm neutron thích hợp nào đó có chứa uranium, số neutronsẽ được nhân lên khi ta đặt vào đó một nguồn neutron. Fermi cùng với Szilard, một đồng nghiệp người Hungari gốc Do thái di cư sang Mỹ, đã làm thí nghiệm này thành công ở khoa vật lý Đại học Columbia. Những kết quả ban đầu cho thấy trong những điều kiện nhất định số neutron sẽ được nhân lên, đem lại hy vọng phản ứng phân hạch dây chuyền có thể thực hiện được.

Được khích lệ bởi kết quả thí nghiệm nhân neutron, Szilard đi tìm Einstein trong một sứ mệnh lịch sử. Vào câu chuyện, Szilard kể cho Einstein nghe kết quả thí nghiệm nhân neutron và kết quả tính toán về phản ứng phân hạch dây chuyền trong môi trường uranium-graphit. Không ngại phật lòng người bạn trẻ từng quen biết khi còn ở Đức, Einstein ngắt lời khách: "Daran habe ich gar nicht gedacht" (Tôi chưa bao giờ nghĩ như thế). Nhưng ngay sau đó, Einstein hứa sẽ ký tên vào bức thư gửi Tổng thống Roosevelt. Bức thư được chuẩn bị sẵn có nội dung như sau:

Thưa Ngài,

... Trong vòng bốn tháng gần đây, qua các công trình của Jolio – Curie ở Pháp cũng như Fermi và Szilard ở Mỹ dường như đã xuất hiện khả năng thực hiện phản ứng dây chuyền trong khối uranium, từ đó có thể sản sinh ra năng lượng khổng lồ và một lượng vô cùng lớn những nguyên tố phóng xạ giống như radium... Hiện tượng mới này cũng sẽ dẫn đến việc chế tạo ra những quả bom, và ta có thể tin, mặc dù ít chắc chắn hơn, rằng những quả bom cực mạnh kiểu mới đó có thể sẽ chế tạo được trong thời gian trước mắt...

Hoa Kỳ chỉ có một trữ lượng vừa phải quặng uranium không tốt lắm. Quặng tốt hiện nay chỉ có ở Canada, Tiệp Khắc, nhưng nguồn uranium quan trọng nhất vẫn là ở Congo thuộc Bỉ... Tôi được biết nước Đức hiện đang ngừng bán uranium từ những mỏ ở Tiệp Khắc mà họ chiếm được. Hành động kịp thời đó của nước Đức chỉ có thể hiểu được căn cứ trên việc người con trai của thứ trưởng Von Weizacker được điều về làm việc tại Viện Kaiser–Wilhelm ở Berlin, tại đó người ta đang lập lại một số thí nghiệm về uranium của Mỹ.

Nhà khoa học Weizacker được nhắc đến trong thư chính là người đã tìm ra công thức bán thực nghiệm về năng lượng liên kết các nucleon trong hạt nhân (xem 1.2.2), dựa vào đó Meitner và Bohr mới giải thích được hiện tượng phân hạch ở uranium. Nỗi lo người Đức chế tạo được bom nguyên tử đã thôi thúc các nhà khoa học Mỹ chạy đua với thời gian. Nhận được thư, Tổng thống Mỹ đã cho thành lập Ủy ban Uranium và khởi động dự án chế tạo vũ khí nguyên tử mang tên Manhattan.

Cho đến năm 1940, các nhà khoa học đã biết  $U^{235}$  và  $Pu^{239}$  có thể dùng làm nhiên liệu cho bom nguyên tử. Nếu chọn  $U^{235}$  làm nhiên liệu thì phải làm giàu nó từ 0,7% trong uranium thiên nhiên lên khoảng 90%, có thể phản ứng dây chuyền mới có thể xảy ra trong bom nguyên tử. Còn nếu theo phương án thứ hai, thì phải có  $Pu^{239}$ , mà đồng vị này không có sẵn trong tự nhiên nên phải tổng hợp nó bằng phản ứng hạt nhân trên

uranium. Tổng hợp bằng máy gia tốc lúc bấy giờ chỉ có thể tạo ra một lượng rất nhỏ, không quá micro gram, mà bom nguyên tử đòi hỏi khối lượng nhiên liệu hàng chục kilogram  $\text{Pu}^{239}$ . Chỉ còn cách phải xây dựng các lò phản ứng, ở đó phản ứng phân hạch dây chuyền có thể điều khiển được, và  $\text{Pu}^{239}$  sẽ được sinh ra theo phản ứng hấp thụ neutron trên đồng vị  $\text{U}^{238}$  (công thức 1.3), đồng vị này rất dồi dào (99,2%) trong uranium.

Với phương án thứ nhất, nhà máy làm giàu bằng phương pháp khuếch tán khí dự tính sẽ có đủ  $\text{U}^{235}$  trong vòng bốn năm để chế tạo ra hai nửa bán cầu  $\text{U}^{235}$ , mỗi bán cầu có khối lượng dưới tới hạn, nghĩa là chưa đủ khối lượng để phản ứng dây chuyền xảy ra, nhưng khi nhanh chóng ghép hai nửa bán cầu lại với nhau, khối lượng uranium sẽ quá tới hạn, và phản ứng dây chuyền sẽ xảy ra. Phản ứng sẽ giải phóng một năng lượng cực lớn trong thời gian khoảng phần triệu giây, gây ra vụ nổ hạt nhân với sức công phá cực mạnh. Đặc điểm kỹ thuật mấu chốt ở đây là làm sao hai bán cầu tiến đến nhau với vận tốc rất lớn, vài nghìn feet/s và giữ chúng tiếp xúc với nhau trong một khoảng thời gian nhất định để phản ứng dây chuyền xảy ra chớp nhoáng và phần lớn số hạt nhân phân hạch sẽ phải cháy hết trong phần triệu giây.

Nếu phương án trên không thành công, thì toàn bộ kế hoạch sẽ phải trông chờ vào phương án  $\text{Pu}^{239}$ . Để theo phương án này, nhất thiết phải xây dựng được một lò phản ứng để sản sinh và tích lũy đủ số lượng  $\text{Pu}^{239}$ . Nhiên liệu cho lò chỉ có thể là uranium tự nhiên, chứa 0,7%  $\text{U}^{235}$ . Vì thành phần đồng vị này quá ít nên để phản ứng dây chuyền xảy ra cần phải có chất làm chậm neutron sao cho trong quá trình làm chậm neutron ít bị thất thoát nhất. Nước làm chậm neutron rất hiệu quả, nhưng neutron lại dễ mất đi do neutron bị H trong nước hấp thụ. Nước nặng ( $\text{D}_2\text{O}$ ) có lợi thế hơn nhưng không có sẵn, điều chế nước nặng đòi hỏi phải có thời gian. Cuối cùng đành phải dùng graphit, dù biết rằng các hạt nhân carbon trong graphit có khối lượng lớn hơn H và D rất nhiều nên làm chậm neutron ít hiệu quả hơn (bảng 1.1).

Bảng 1.1. Số lần va chạm trung bình để neutron giảm động năng từ 2 MeV xuống 1 eV.

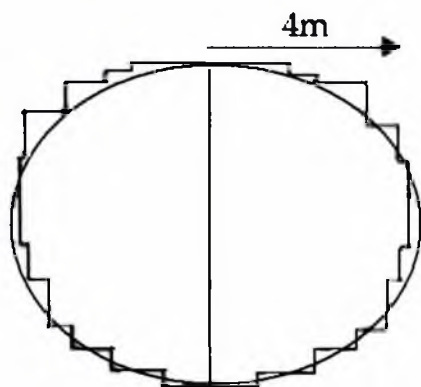
| Chất làm chậm    | Số lần va chạm |
|------------------|----------------|
| H                | 14             |
| D                | 20             |
| H <sub>2</sub> O | 19             |
| D <sub>2</sub> O | 29             |
| He               | 43             |
| Be               | 69             |
| C                | 91             |

Ngoài ra, phải bố trí các khối graphit và uranium sao cho trong quá trình làm chậm neutron từ năng lượng trung bình gần 2 MeV lúc mới sinh ra cho đến năng lượng chuyển động nhiệt  $\sim 0,025$  eV, neutron tránh được vùng hấp thụ cộng hưởng  $\sim 25$  eV của  $U^{238}$  mà đồng vị này lại rất dồi dào trong nhiên liệu. Muốn thế, nhiên liệu không được trộn lẫn với chất làm chậm mà phải xếp chúng thành một cấu trúc ô mạng. Uranium nằm ở nút các ô mạng, giữa các nút này là chất làm chậm. Còn bao nhiêu ẩn số khác phải giải quyết, trong khi các thông số phản ứng hạt nhân thời ấy còn rất thiếu và kém chính xác.

Fermi là nhà khoa học hiếm hoi đã được lịch sử đặt đúng vị trí lãnh đạo phương hướng này. Tài ba siêu việt về cả lý thuyết lẫn thực nghiệm và trực cảm vật lý luôn hướng dẫn ông tìm đúng đường đi trong bóng tối. Ngày 06 tháng 12 năm 1942 loài người đã thực hiện thành công phản ứng phân hạch dây chuyền tại một góc sân vận động Đại học Chicago.

Cơ cấu thí nghiệm CP-1 này, ngày nay ta gọi là lò phản ứng hạt nhân, có dạng hình cầu trong đó graphit và uranium xếp thành từng lớp từ dưới lên (hình 1.4). Sau mỗi lớp, số neutron phát ra ban đầu từ một nguồn phóng xạ tự nhiên dùng làm môi được nhân lên dần sao cho đến lớp cuối cùng lò đạt đến khối lượng tới hạn. Trong CP-1, khối lượng này gồm 350 tấn graphit và 42 tấn uranium sắp thành 57 lớp, những con

số thực nghiệm này suýt soát với tính toán ban đầu của Fermi dùng thước tính kéo tay lôga.



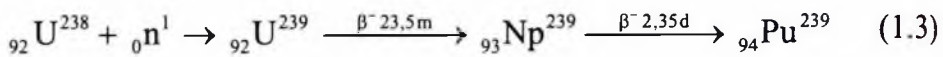
Hình 1.4. Sơ đồ sắp xếp các lớp uranium-graphit trong cơ cấu tới hạn CP-1 theo Fermi. Cơ cấu tới hạn đầu tiên này gồm 4 000 khối graphite, ở mỗi khối có khoét lỗ chứa những viên uranium hình cầu. Cả thảy có 22 000 viên như thế. Khi lắp lò, các khối graphite – uranium được xếp thành từng lớp từ dưới lên trên cho đến lớp thứ 57 thì đạt đến tới hạn, từ lúc này phản ứng dây chuyền tự duy trì.

Không phải vô cớ mà toàn bộ khối vật liệu đồ sộ này có dạng hình cầu, bởi hình cầu bảo đảm neutron ít bị thất thoát ra khỏi mặt ngoài nhất, đồng thời cũng dễ tính toán nhất. Công suất nhiệt của CP-1 vào khoảng 0,5 W.

Fermi cam đoan với mọi người tham gia sự kiện lịch sử này rằng phản ứng dây chuyền sẽ không phát triển vượt ra ngoài tầm kiểm soát. Ông tin như vậy, trước hết là do phản ứng phân hạch chẳng những phát ra neutron tức thời mà cả những neutron trễ, nhờ có chúng mà phản ứng dây chuyền trong các lò phản ứng mới điều khiển được (xem chương 4). Tuy nhiên, trong thí nghiệm, Fermi vẫn dự trù sẵn những hệ thống phòng ngừa sự cố đảm nhiệm việc dập tắt phản ứng dây chuyền ngay tức khắc. Ông bố trí hẳn một người tay cầm rìu trong tư thế sẵn sàng chặt đứt sợi dây thừng treo một thanh hấp thụ neutron làm bằng cadmium để nó rơi xuống dập lò ngay tức khắc khi có sự cố. Thuật ngữ SCRAM mà mọi thế hệ điều khiển lò phản ứng sau này dùng để chỉ động tác dập lò khẩn cấp này có nguồn gốc từ chức danh giành cho con người này là "Safety Control Rod Axe Man". Trường hợp thanh này không hạ xuống kịp thời thì một túi acid boric sẽ sẵn sàng phụt ra trên mặt lò hấp thụ hết neutron. Cơ cấu tới hạn CP-1 không có tường cản xạ và hệ thống tải nhiệt như các lò phản ứng hạt nhân sau này.

### 1.1.6 Vũ khí nguyên tử

CP-1 có công suất rất bé, vào khoảng 0,5 W. Nhưng tri thức tích lũy được từ cơ cấu tối hạn sơ khai này đã giúp Mỹ xây dựng ngay sau đó những lò phản ứng công suất hàng chục MW để sản xuất  $\text{Pu}^{239}$  dùng làm nhiên liệu cho vũ khí nguyên tử.  $\text{P}^{239}$  là đồng vị chẵn – lẻ nên có thể phân hạch bằng neutron chậm, giống như  $\text{U}^{235}$ . Năm 1940, Seaborg và cộng sự ở Đại học Berkely, California đã tổng hợp được một lượng  $\text{Pu}^{239}$  rất bé bằng cách chiếu neutron lên uranium.  $\text{U}^{238}$  hấp thụ neutron sinh ra  $\text{Pu}^{239}$  theo phản ứng:



Phản ứng trên xảy ra trong các lò phản ứng công suất lớn được Mỹ xây trong hai năm 1944 – 1945, trong đó nhiên liệu là uranium thiên nhiên và chất làm chậm neutron là nước nặng hoặc graphit. Tính toán cho thấy với thiết kế tối ưu, lò phản ứng sẽ sản sinh ra 1 g plutonium khi giải phóng được nhiệt năng 1 MWd. Nhưng ngoài  $\text{Pu}^{239}$ , lò phản ứng còn tạo ra đồng vị  $\text{Pu}^{240}$ . Đây là đồng vị chẵn – chẵn (N và Z đều chẵn), rất khó phân hạch với neutron chậm, mà lại có xác suất phân hạch tự phát cao. Quá trình phân hạch tự phát này sản sinh ra nhiều neutron có thể gây kích nổ sớm, rất không có lợi. Do đó, để sử dụng plutonium làm vũ khí, quy trình vận hành lò phải bảo đảm sao cho thành phần đồng vị  $\text{Pu}^{240}$  là thấp nhất có thể chấp nhận được.

Trong hai năm 1944 – 1945 những lò phản ứng đầu tiên của Mỹ đã tích lũy đủ plutonium để chế tạo một cơ cấu nổ nguyên tử được thử nghiệm ở Trinity ngày 16/6/1945, và tiếp theo đó là quả bom nguyên tử thả xuống Nagasaki ngày 09/8/1945. Ba ngày trước đó, ngày 06/8/1945, quân đội Mỹ đã thả một quả bom nguyên tử khác xuống Hiroshima, quả này làm bằng uranium với độ giàu 83%  $\text{U}^{235}$ , số lượng này tích lũy được từ một số nhà máy bằng hai kỹ thuật làm giàu uranium thời bấy giờ là khuếch tán khí  $\text{UF}_6$  và khối phổ với nam châm điện cực lớn.

Hiroshima và Nagasaki bị tàn phá tan hoang, hàng trăm nghìn người Nhật thiệt mạng do sức nổ, nhiệt độ, bức xạ trực tiếp và tia phóng xạ từ

các sản phẩm phân hạch phát ra chậm hơn sau khi bom nổ. Lần đầu tiên khoa học chứng kiến một lượng chất phóng xạ lớn do con người tạo ra, bốc lên tầng bình lưu và lan đi khắp địa cầu. Bắt đầu từ đây, do những vụ thử vũ khí hạt nhân trong hai thập niên tiếp theo của các cường quốc, một lượng chất phóng xạ nhân tạo cực lớn đã thâm nhập vào đất, nước và sinh quyển trên toàn thế giới. Cho đến tận ngày nay, đây vẫn là nguồn phóng xạ nhân tạo chủ yếu trong môi trường, mặc dù các vụ nổ hạt nhân trong khí quyển đã chấm dứt từ thập kỷ 60 của thế kỷ XX.

Sau Chiến tranh thế giới II các lò phản ứng hạt nhân có công suất lớn đã trở thành công cụ điều chế ra chất phóng xạ qua phản ứng neutron với những đồng vị bền sẵn có trong thiên nhiên. Tuy nhiên, những phản ứng này chỉ tạo ra các đồng vị phóng xạ có số A và Z cận kề với các đồng vị bền (hình 1.5). Về sau các máy gia tốc, đặc biệt là máy gia tốc ion nặng, đã mở rộng bản đồ đồng vị ra xa dài đồng vị bền. Từ con số 254 đồng vị bền tồn tại trong thiên nhiên, ngày nay bản đồ đồng vị đã có thêm hàng nghìn đồng vị phóng xạ nhân tạo khác.

### **1.1.7 Hoàn chỉnh và mở rộng bản đồ nguyên tố hóa học**

Trong thời gian dài nhiều nhà hóa học đã tìm cách lấp đầy những ô trống trong bảng tuần hoàn các nguyên tố hóa học do Mendeleev phát minh ra năm 1869. Cho đến cuối thế kỷ XIX vẫn còn nhiều ô trống và để lấp đầy chúng, các phương pháp hóa học cổ điển không còn thích hợp nữa mà phải là các phương pháp vật lý hạt nhân.

Bản đồ nguyên tố hóa học cũng đã mở rộng về phía những nguyên tố siêu nặng sau uranium. Ban đầu các nguyên tố siêu nặng này được tìm ra nhờ có dòng neutron mạnh trong các lò phản ứng, về sau là nhờ các máy gia tốc ion nặng ở Berkely (Mỹ), Dubna (Nga) và Darmstad (Đức). Phần lớn những nguyên tố phóng xạ này phân rã  $\alpha$  hoặc phân hạch tự phát, hạt nhân tự vỡ ra làm đôi mà không cần có neutron chiếu vào.

Hiện tượng phân hạch tự phát của uranium được hai nhà vật lý Liên Xô (cũ) Flerov và Petrzack phát hiện vào năm 1940 trong loạt thí nghiệm

tiến hành dưới một ga tàu điện ngầm ở Matxcova sâu 60 m. Phải làm thí nghiệm ở bên dưới lớp đất dày 60 m để giảm ảnh hưởng của tia vũ trụ vì neutron trong tia vũ trụ cũng có thể gây phân hạch uranium. Cho đến nay, bảng tuần hoàn các nguyên tố hóa học đã được mở rộng đến nguyên tố  $Z = 118$ , chúng đều là các đồng vị phóng xạ phân rã chủ yếu bằng phân hạch tự phát. Trong số này chỉ có 22 nguyên tố đã có tên gọi được Hiệp hội quốc tế về Hóa học cơ bản và ứng dụng (IUPAC) chính thức công nhận. Hiệp hội này đã có quyết định đúng đắn khi gán các nguyên tố hóa học mới bằng tên những nhà khoa học phóng xạ, phần lớn trong giới vật lý, những người đã từng xây nên tòa nhà phóng xạ trong thế kỷ XX. Đó là Curium, Cm ( $Z = 96$ ), Einsteinium, Es ( $Z = 99$ ), Fermium, Fm ( $Z = 100$ ), Lawrencium, Lr ( $Z = 103$ ), Rutherfordium, Rf ( $Z = 104$ ), Seaborgium, Sg ( $Z = 106$ ), Bohrium, Bh ( $Z = 107$ ), Hassium, Hs (Hahn + Strassman,  $Z = 108$ ), Meitnerium, Mt ( $Z = 109$ ), Roentgenium, Rg ( $Z = 111$ ), Flerovium, Fl ( $Z = 114$ ). Địa danh của những chiếc nô khoa học, nơi mà những trí tuệ lớn dày công khám phá ra các nguyên tố phóng xạ siêu uranium cũng được vinh danh như Berkelium, Bk ( $Z = 97$ ), Californium, Cf ( $Z = 98$ ), Dubnium, Db ( $Z = 105$ ), Darmstadtium, Ds ( $Z = 110$ ) và Livermorium, Lv ( $Z = 116$ ).

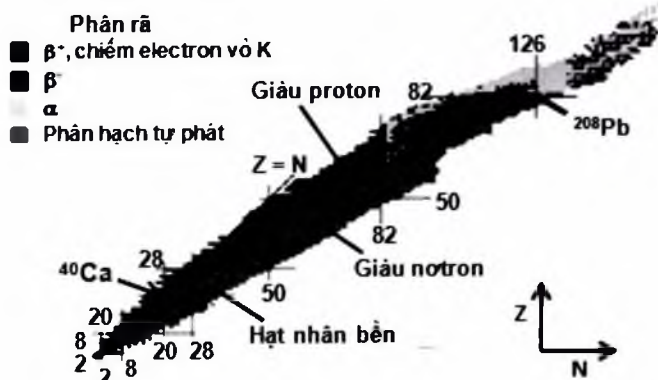
Hai nguyên tố siêu nặng được IUPAC chính thức công nhận gần đây nhất vào ngày 31 tháng 5 năm 2012 là Flerovium số 114 và Livermorium số 116. Đây là kết quả hợp tác nghiên cứu của hai trung tâm Dubna (Nga) và Livermore (Mỹ). Hai nguyên tố siêu nặng này được tổng hợp từ phản ứng hạt nhân giữa những hạt đạn rất hiếm,  $^{48}\text{Ca}$ , bắn lên những bia rất hiếm,  $\text{Pu}^{242}$  và  $\text{Cm}^{245}$ . Để ghi nhận thành công này, nguyên tố thứ 114 được mang tên Georgy Nikolaevich Flerov, người đã lãnh đạo xây dựng máy gia tốc U-400 ở Dubna, ông cũng là người đã phát minh ra hiện tượng phân hạch tự phát của uranium năm 1940 cùng với Petrzack. Nguyên tố thứ 116 được chọn để vinh danh trung tâm khoa học Livermore.

Thời gian sống của các nguyên tố siêu nặng, nói chung, giảm dần khi nguyên tử số  $Z$  tăng, từ 100 ngày với  $^{100}\text{Fm}^{257}$  xuống còn 61 ms với  $^{116}\text{Lv}^{293}$ . Nhưng nhiều tiên đoán lý thuyết cho rằng những hạt nhân siêu nặng ở vùng số kỳ ảo kép (xem 1.2.3) có 184 neutron và 114, hoặc 120, hay 126 proton sẽ rất bền, nên sẽ có thời gian sống lâu hơn nhiều, đến hàng phút. Những đồng vị siêu nặng này giống như viên ngọc nằm trên hòn đảo ở cuối bảng tuần hoàn mà các nhà giả kim thuật thời nay mong được đặt chân đến đó. Nhóm Dubna – Livermore đã tổng hợp được nguyên tố Fl có  $Z = 114$  và  $N = 173$ , còn thiếu hơn 10 neutron nữa mới đạt đến số kỳ ảo này. Có thể đây là lý do khiến các nhà khoa học vẫn chưa chạm đến đảo bền. Tuy nhiên, cũng có nhiều ý kiến bi quan về sự tồn tại của đảo bền và khả năng khoa học có thể đặt chân lên đó.

### 1.1.8 Bản đồ đồng vị. Đồng vị bền và phóng xạ

Dưới ánh sáng của những quan niệm trên ta có thể tìm hiểu sự khác nhau về mặt năng lượng liên kết giữa các nucleon trong số hàng trăm nguyên tố hóa học và hàng nghìn đồng vị. Ngày nay khoa học đã định danh được 118 nguyên tố hóa học, trong số này có 80 nguyên tố tồn tại sẵn trong tự nhiên, số còn lại chỉ tổng hợp được trên các lò phản ứng hoặc máy gia tốc và định danh bằng phương pháp hạt nhân. Các nguyên tố này bao gồm hơn 3 300 đồng vị bền cũng như phóng xạ. Có thể định nghĩa phóng xạ là quá trình phân rã tự phát của các hạt nhân đồng vị và chuyển thành hạt nhân đồng vị khác, quá trình này tỏa ra năng lượng dưới dạng các tia phóng xạ  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , hoặc các mảnh vỡ phân hạch.

Trên bản đồ đồng vị (hình 1.5), dải đồng vị bền ở giữa, hai bên và vùng cuối là các đồng vị phóng xạ. Ở dải đồng vị bền, tỷ lệ số neutron và proton là tối ưu để hạt nhân tồn tại lâu dài không bị phân rã phóng xạ. Dải hạt nhân bền ban đầu tiệm cận theo đường  $N = Z$ , số neutron và proton nói chung bằng nhau, về sau lệch dần xuống phía dưới, proton ít hơn neutron. Hạt nhân càng nặng càng cần nhiều neutron hơn so với proton để lực hạt nhân thắng thế lực đẩy Coulomb làm cho hạt nhân được bền vững.



Hình 1.5. Bản đồ đồng vị phóng xạ. Đồng vị nằm bên dưới dải bền (màu đen) giàu neutron nên phân rã  $\beta^-$  để neutron chuyển thành proton. Ngược lại, phía trên dải đồng vị bền là đồng vị thiếu neutron nên phân rã  $\beta^+$  hoặc chiếm electron K để có thêm neutron do proton chuyển thành neutron.

Trong số 92 nguyên tố đứng trước uranium trong bảng tuần hoàn chỉ có 80 nguyên tố tồn tại trong thiên nhiên bao gồm 254 đồng vị bền. Tính bền của hạt nhân còn là hệ quả cấu trúc vỏ của các nucleon, tương tự như cấu trúc vỏ electron trong nguyên tử (xem 1.2.3). Theo mẫu cấu trúc vỏ, các nucleon trong hạt nhân sẽ lần lượt lấp đầy các vỏ, và khi số nucleon bằng những số kỳ ảo 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126,... hạt nhân sẽ rất bền vững.

Khi lấp đầy vỏ, các nucleon sẽ liên kết chặt chẽ với nhau hơn so với các nucleon mới cho thêm vào bên ngoài vỏ, hoặc khi vỏ chưa được lấp đầy. Đặc biệt có những hạt nhân kỳ ảo kép, ở đó cả hai số neutron và proton đều là số kỳ ảo, chúng rất bền vững như  $O^{16}$  ( $Z, N = 8$ ),  $Ca^{40}$  ( $Z, N = 20$ ),  $Ca^{48}$  ( $Z = 20, N = 28$ ) và  $Pb^{208}$  ( $Z = 82, N = 126$ ).

Hình dạng hạt nhân cũng có liên quan đến cấu trúc vỏ, số kỳ ảo và tính bền vững. Những hạt nhân kỳ ảo kép có dạng hình cầu, càng cách xa số kỳ ảo hạt nhân càng bị biến dạng thành hình elipsoit tròn xoay.  $Pb^{208}$  là hạt nhân có số kỳ ảo kép bền và nặng nhất trong tự nhiên. Các hạt nhân đồng vị nặng hơn đều ít nhiều bị biến dạng thành elipsoit tròn xoay.

Càng ra xa hai bên dải đồng vị bền, tỷ số neutron/proton càng kém tối ưu, hạt nhân càng phân rã nhanh, chu kỳ bán rã càng ngắn. Cho nên về nguyên tắc, số lượng đồng vị phóng xạ còn nhiều hơn những gì có được trên bản đồ hình 1.5, có điều chúng sống quá ngắn để có thể tổng hợp và nhận dạng được.

Ngược lại, trong số 254 đồng vị được xem là bền, nhiều trường hợp có thể là đồng vị phóng xạ, nếu xét trên quan điểm năng lượng liên kết các nucleon bên trong hạt nhân, nhưng vì chu kỳ bán rã quá lớn nên hoạt độ phóng xạ quá thấp và chưa phát hiện được.

Những đồng vị phóng xạ được chia thành hai loại, tự nhiên và nhân tạo. Phóng xạ tự nhiên bao gồm khoảng 85 đồng vị có từ thời nguyên khởi của vũ trụ (xem chương 2) còn tồn tại đến ngày nay nhờ có chu kỳ bán rã rất lớn ( $K^{40}$ ,  $Th^{232}$ ,  $U^{235}$ ,  $U^{238}$ ...); chúng luôn đi cùng với các con cháu của mình có chu kỳ bán rã bé hơn nhiều. Thuộc loại phóng xạ tự nhiên này còn có các đồng vị do tia vũ trụ sinh ra. Toàn bộ số đồng vị phóng xạ còn lại (gần 3 000) có nguồn gốc nhân tạo, chúng được tạo thành nhờ các lò phản ứng hạt nhân hoặc các máy gia tốc.

## **1.2 KHỐI LƯỢNG ĐỒNG VỊ, NĂNG LƯỢNG LIÊN KẾT NUCLEON, MẪU HẠT NHÂN**

### **1.2.1 Khối lượng đồng vị và độ hụt khối**

Phân rã phóng xạ và phản ứng hạt nhân tuân theo những quy luật bảo toàn, trước hết là bảo toàn năng lượng. Bởi vậy, muốn hiểu được các quá trình này, trước hết phải biết các nucleon liên kết với nhau như thế nào trong hạt nhân và năng lượng liên kết ấy phụ thuộc vào số lượng các nucleon trong hạt nhân  $A$ ,  $N$  và  $Z$  như thế nào. Theo thuyết tương đối hẹp của Einstein, năng lượng tỷ lệ với khối lượng và chúng có thể chuyển hóa qua lại theo công thức  $E = mc^2$ , trong đó  $c$  là vận tốc ánh sáng.

Khi các nucleon kết hợp lại với nhau thành hạt nhân, khối lượng hạt nhân luôn bé hơn tổng khối lượng các nucleon hợp thành, tựa hồ như

các nucleon bị "sút cân" khi tương tác với nhau để sát lại gần nhau. Điều này có thể giải thích dựa trên công thức Einstein. Khối lượng cả hạt nhân bị hụt đi là do một phần khối lượng của các nucleon phải chuyển hóa ra năng lượng liên kết:

$$m(A, Z) = Nm_n + Zm_p - B(A, Z)/c^2 \quad (1.4)$$

trong đó,  $m$  là khối lượng đồng vị,  $m_n$  và  $m_p$  tương ứng là khối lượng neutron và proton,  $B(A, Z)$  là năng lượng liên kết các nucleon trong hạt nhân ( $B > 0$ ).

Trong vật lý hạt nhân, khối lượng được tính theo đơn vị khối lượng nguyên tử (amu, atomic mass unit) bằng 1/12 khối lượng của đồng vị  $C^{12}$  và được đo bằng khối phổ kế có độ chính xác rất cao. Giá trị của amu là:

$$\begin{aligned} 1 \text{ amu} &= (1/12) m(C^{12}) = 931,494\,013\,(37) \text{ MeV}c^{-2} = E_B \\ &= 1,660\,538\,73(13) \times 10^{-27} \text{ kg}, \end{aligned}$$

và khối lượng của proton, neutron và electron là

$$\begin{aligned} m_p &= 1,007\,276\,466\,88(13) \text{ amu}, \\ m_n &= 1,008\,664\,915\,8(6) \text{ amu} \\ m_e &= 0,000\,548\,58 \text{ amu} \end{aligned} \quad (1.5)$$

Cần chú ý khối lượng neutron ở trên không phải đo được bằng phương pháp khối phổ kế mà dựa trên phản ứng proton bắt neutron tạo ra hạt nhân deuterium ( ${}_1H^2$  hoặc D):



Deuterium là đồng vị tồn tại trong tự nhiên thường dưới dạng phân tử nước nặng  $D_2O$ . Cũng như H, khối lượng  $H^2$  có thể đo chính xác bằng khối phổ kế, năng lượng tia  $\gamma$  có thể đo chính xác,  $E_\gamma = 2,225 \text{ MeV}$ , từ đó có thể xác định chính xác khối lượng neutron.

Ta có thể kiểm tra ngay hiện tượng hụt khối nói trên với hạt  $\alpha$ , chính là hạt nhân  ${}_2He^4$  có khối lượng đo được là 4,002 602 amu, bé hơn tổng khối lượng của bốn nucleon (4,031 882 765 4 amu) một đại lượng bằng

0,031 62 amu, tương đương năng lượng liên kết trong hạt  $\alpha$  là 27,274 86 MeV. Tính trung bình, năng lượng liên kết cho mỗi nucleon trong hạt  $\alpha$  là 6,82 MeV.

Vì khối lượng được đo bằng khối phổ kế với độ chính xác rất cao nên năng lượng liên kết giữa các nucleon trong hạt nhân được tính chính xác đến hàng chục eV. Nhờ đó Weizsäcker (1935) đã đề ra công thức bán thực nghiệm để tính năng lượng liên kết  $B(A, Z)$ , công thức này thường dùng làm cơ sở để tính toán năng lượng trong các quá trình tương tác hạt nhân và phân rã phóng xạ.

### 1.2.2 Công thức bán thực nghiệm Weizsäcker. Mẩu giọt chất lỏng

Năm 1935, Weizsäcker, người Đức, đã đưa ra công thức bán thực nghiệm để mô tả độ hụt khối và năng lượng liên kết các nucleon trong hạt nhân. Nói bán thực nghiệm vì tác giả đã rút ra công thức này bằng cách hệ thống hóa các kết quả đo khối lượng các đồng vị và sử dụng mô hình giọt chất lỏng hạt nhân do Gamov đề xuất trước đó.

Theo Gamov, hạt nhân giống như giọt chất lỏng hình cầu trong đó các nucleon tương tác với nhau bằng lực hạt nhân. Khác với lực tĩnh điện, tương tác bằng lực hạt nhân chỉ xảy ra trong khoảng cách cực ngắn, khoảng  $10^{-13}$  cm. Các giọt chất lỏng hạt nhân có khối lượng riêng không thay đổi theo số  $A$  và  $Z$ , nói cách khác, chất lỏng hạt nhân không bị nén hoặc giãn khi đi từ hạt nhân này sang hạt nhân khác. Quan niệm này phù hợp với những kết quả thí nghiệm tán xạ electron lên hạt nhân, qua đó có thể thấy thể tích các hình cầu hạt nhân tỷ lệ khá tốt với số khối  $A$ , hay  $r = r_0 \cdot A^{1/3}$ , trong đó  $r_0 = 1,2 \cdot 10^{-15}$  m, công thức đơn giản rút ra từ thực nghiệm.

Theo Weizsäcker, năng lượng liên kết các nucleon trong hạt nhân  $(A, Z)$  gồm năm thành phần như sau:

$$E_B = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z^2}{A^{1/2}} - a_A \frac{N - Z^2}{4A} - \frac{\delta(A, Z)}{A^{1/2}}$$

trong đó,

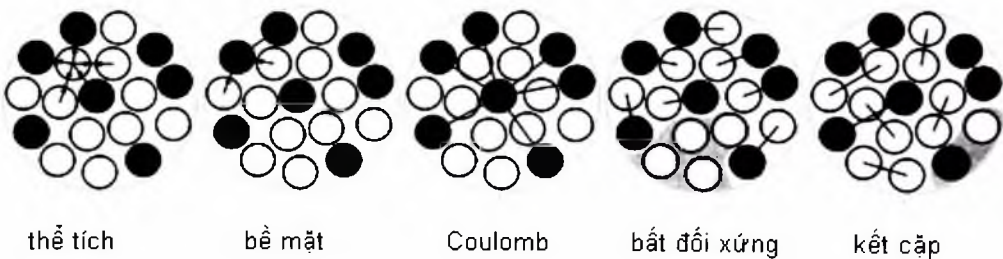
$$a_v = 15,75 \text{ MeV}, a_s = 17,2 \text{ MeV}, a_c = 0,714 \text{ MeV}, a_A = 93,2 \text{ MeV},$$

$$\delta(A, Z) = \begin{cases} +\delta_0 & \text{với } Z, N \text{ chẵn} \\ 0 & \text{với } A \text{ lẻ} \\ -\delta_0 & \text{với } Z, N \text{ lẻ} \end{cases}$$

$$\delta_0 = 11,2 \text{ MeV} \quad (1.7)$$

Số hạng thứ nhất,  $a_v A$ , tỷ lệ với  $A$ , hay với thể tích hạt nhân, đại diện cho lực tương tác mạnh giữa các nucleon, bất luận neutron hay proton nên không phụ thuộc vào số  $Z$  hay  $N$  mà chỉ phụ thuộc số  $A$ . Số hạng này đáng lẽ phải tỷ lệ với số cặp tương tác  $A(A-1)/2$ , nhưng vì lực hạt nhân có cự ly ngắn, mỗi nucleon chỉ tương tác với một số nhất định nucleon bên cạnh, do đó số hạng này tỷ lệ với số nucleon  $A$  trong hạt nhân. Đương nhiên, giả thiết này chưa đúng hẳn với thực tế cho nên phải đưa vào các số hạng hiệu chỉnh tiếp theo.

Trước hết, vì xem hạt nhân như giọt chất lỏng nên phải hiệu chỉnh sức căng mặt ngoài như ở số hạng thứ hai. Có hiệu ứng này là do những nucleon ở gần bề mặt chỉ được bao bọc bởi một số ít nucleon hơn so với bên trong (hình 1.6). Số hạng hiệu chỉnh cho sức căng mặt ngoài có giá trị âm và tỷ lệ với diện tích bề mặt  $\sim A^{2/3}$ .



Hình 1.6. Minh họa năm thành phần trong công thức năng lượng liên kết hạt nhân bán thực nghiệm Weizsäcker.

Sự khác nhau giữa neutron và proton được kể đến trong hai số hạng hiệu chỉnh thứ ba và thứ tư. Số hạng thứ ba,  $a_c Z^2/A^{1/3}$ , đại diện cho tương tác Coulomb có xu hướng đẩy các proton ra xa nhau và cũng có dấu âm. Nếu xem hạt nhân như giọt chất lỏng hình cầu bán kính  $R$  ( $R \sim A^{1/3}$ ) có điện tích phân bố đều bên trong thì năng lượng tương tác Coulomb sẽ có dạng  $\sim Z^2/R$ .

Số hạng thứ tư được đưa vào để hiệu chỉnh cho sự mất cân đối giữa số neutron và proton. Ở hạt nhân nhẹ, năng lượng liên kết lớn nhất và hạt nhân bền nhất khi số neutron bằng số proton. Ở hạt nhân nặng, số neutron phải nhiều hơn để lực hạt nhân đủ khả năng giảm bớt ảnh hưởng của lực đẩy Coulomb tránh cho hạt nhân khỏi phình ra. Nhưng điều gì sẽ xảy ra khi số neutron và proton bị mất cân đối? Tưởng tượng neutron và proton bị nhốt trong hai hồ khác nhau, trong đó chúng chiếm đầy những trạng thái đơn hạt. Theo nguyên lý Pauli, mỗi nucleon chỉ chiếm một trạng thái đơn hạt, tuần tự từ thấp lên cao. Nếu số neutron và proton bằng nhau thì tổng năng lượng các trạng thái được lấp đầy ở hai hồ bằng nhau. Khi số neutron nhiều hơn, những neutron "dôi ra" phải chiếm các mức năng lượng cao hơn làm cho năng lượng liên kết của cả hạt nhân giảm đi. Giả sử bằng cách nào đó chuyển bớt một số neutron thành proton thì hạt nhân sẽ bền vững hơn. Lập luận này giúp hiểu tại sao có số hạng mất cân đối trong công thức bán thực nghiệm Weizsäcker.

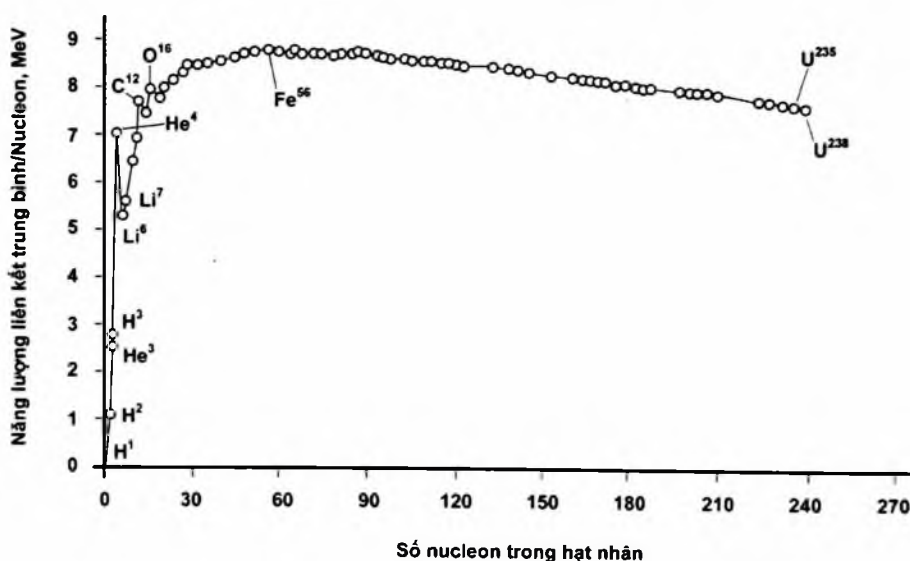
Số hạng thứ năm phản ánh một hiện tượng quan sát được trong thực nghiệm là hạt nhân có số  $Z$  hoặc  $N$  chẵn luôn bền vững hơn những hạt nhân đồng vị bên cạnh có  $Z$  và  $N$  lẻ. Đây là hiện tượng kết cặp các nucleon trên cùng một trạng thái lượng tử có spin đối chiều. Chính hiện tượng kết cặp này cũng tìm thấy sau này ở các electron có spin cùng chiều trong vật liệu siêu dẫn (cặp Cooper).

Như vậy, trong công thức tính năng lượng liên kết bên trong hạt nhân Weizsäcker có năm hệ số cần được xác định bằng cách làm khớp với thực nghiệm, chẳng hạn, so với kết quả đo khối lượng các đồng vị bền bằng khối phổ kế.

Phần trình bày trên đây giúp hiểu được cơ chế các nucleon liên kết với nhau trong hạt nhân và giải thích được quá trình biến hóa giữa các đồng vị với nhau trong phân rã phóng xạ và phản ứng hạt nhân. Nó truyền đạt khá tốt đáng đáp phụ thuộc năng lượng liên kết trung bình tính trên một nucleon vào số khối  $A$  (hình 1.7). Thí dụ, năng lượng liên kết cho một nucleon đạt giá trị cực đại với  $A \sim 62$  (Ni) hoặc  $A = 59$  (Fe), sau đó

giảm dần, hạt nhân càng nặng năng lượng liên kết tính cho từng nucleon càng bé. Từ đây cũng sẽ hiểu được tại sao những hạt nhân nặng có thể phân hạch dưới tác dụng của neutron nhiệt, vì quá trình này tạo ra hai mảnh có số khối trung bình ở đó các nucleon liên kết với nhau mạnh hơn, năng lượng dôi ra chuyển thành động năng của hai mảnh.

Cách tiếp cận trong công thức Weizsäcker rất hữu ích khi xem xét các quá trình biến đổi hạt nhân, chẳng hạn khi giải thích hiện tượng phân hạch uranium và các phản ứng ghép hạt nhân, cả hai phản ứng giải tỏa năng lượng rất lớn. Tuy nhiên, công thức Weizsäcker không thật chính xác. Trong không ít trường hợp, năng lượng liên kết tính trên một nucleon  $E_B/A$  theo công thức Weizsäcker có thể lệch so với kết quả đo khối lượng đồng vị đến cỡ MeV.



Hình 1.7. Phụ thuộc năng lượng liên kết trung bình của nucleon trong hạt nhân theo số nucleon.

### 1.2.3 Chuyển động đơn hạt trong hạt nhân và chuyển động tập thể các nucleon

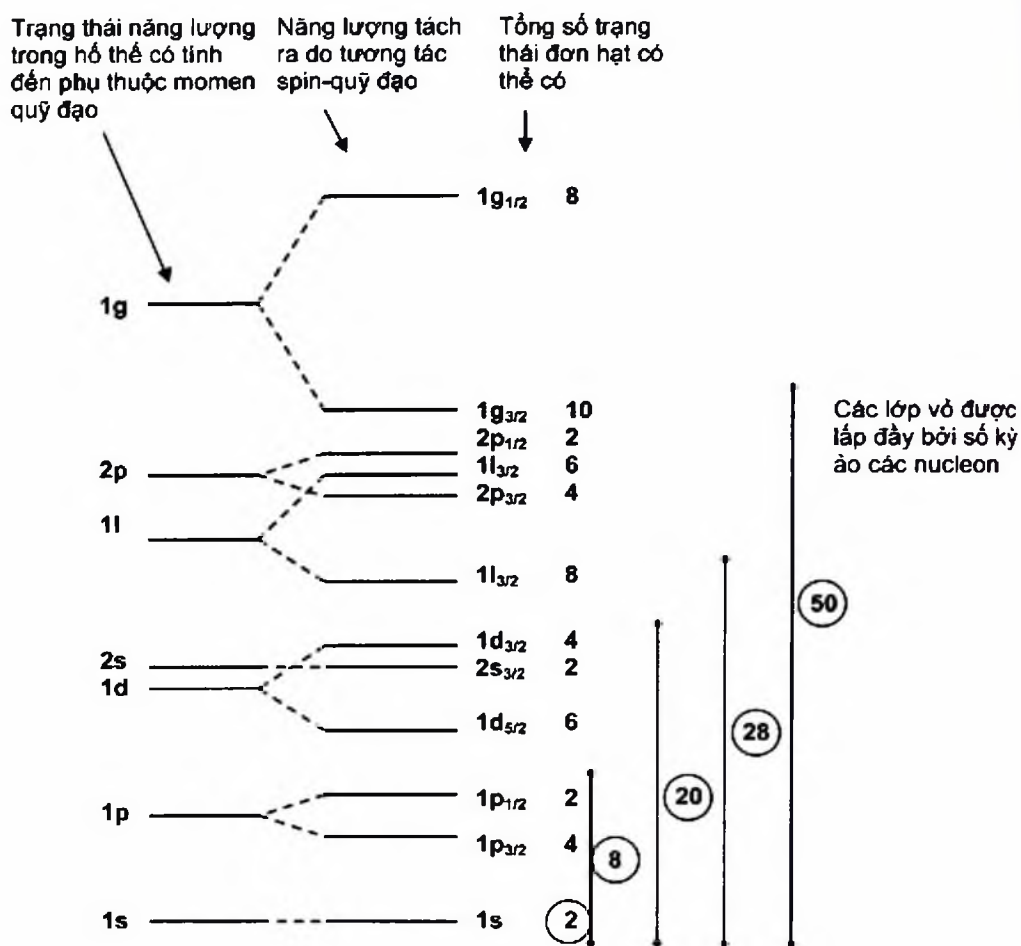
Công thức Weizsäcker phù hợp không tốt với thực nghiệm ở vùng hạt nhân nhẹ và không giải thích được tại sao một số hạt nhân có số nucleon kỳ ảo (2, 8, 20, 28, 50, 82, 126) lại rất bền vững, trong khi đó ở

hạt nhân nặng hơn ngay tiếp theo, năng lượng liên kết của nucleon lại giảm đi rõ rệt. Chẳng hạn, ta có thể thấy trên hình 1.7 năng lượng liên kết trên nucleon giảm đột ngột từ hạt nhân  $\text{He}^4$  có Z và N đều là số kỳ ảo sang hạt nhân  $\text{Li}^6$  có một neutron và một proton lớn hơn số kỳ ảo. Mẫu hạt nhân giọt chất lỏng không giải thích được những hiện tượng này, phải nhờ đến mẫu cấu trúc vỏ nucleon, hoàn chỉnh vào năm 1949 bởi Wigner, Goepper – Mayer và Jensen. Cả ba đoạt chung giải Nobel vật lý năm 1963.

Trên thực tế, ngoài chuyển động tập thể của các nucleon thể hiện ở mẫu giọt chất lỏng, các nucleon còn có chuyển động độc lập của mình trong trường trung bình do các nucleon còn lại tạo nên, gọi là trường tự hợp Hartree – Fox. Nói theo ngôn ngữ lượng tử, trong trường tự hợp ấy các nucleon tồn tại trong những trạng thái "đơn hạt" có số lượng tử xác định. Hình ảnh này rất giống các electron chuyển động quanh hạt nhân trong trường thế do hạt nhân và các electron khác tạo nên, từ đó tạo nên các vỏ electron K, L, M, N...

Nhưng rất khó tưởng tượng tại sao trong hạt nhân các nucleon lại ở trong những trạng thái lượng tử xác định khi chúng rất sát với nhau và luôn va đập vào nhau do tương tác lực hạt nhân. Đó là do nguyên lý trừ khử Pauli không cho phép hai fermion (hạt có spin bán nguyên) ở cùng một trạng thái đơn hạt. Va chạm giữa hai nucleon sẽ dẫn đến thay đổi trạng thái đơn hạt của chúng, nhưng nếu không có một trạng thái "thích hợp" nào chưa bị nucleon chiếm giữ thì các nucleon sẽ không va chạm với nhau và giữ nguyên trạng thái sẵn có của mình. Đây là một quan niệm độc đáo chỉ có trong lý thuyết lượng tử!

Các trạng thái lượng tử đơn hạt được đặc trưng bởi năng lượng, momen quỹ đạo và momen toàn phần của nucleon. Momen quỹ đạo được bảo toàn trong trường tự hợp xuyên tâm và nhận những số lượng tử  $l = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$ , được ký hiệu tương ứng là s, p, d, f... Momen toàn phần I được tổng hợp từ momen quỹ đạo và spin của nucleon ( $1/2$ ) nên có thể nhận giá trị bán nguyên. Mỗi trạng thái đơn hạt có momen toàn phần I chỉ có thể chứa  $2I + 1$  neutron, hoặc proton (hình 1.8).



Hình 1.8. Các trạng thái đơn hạt của nucleon trong hạt nhân và số nucleon tối đa cho từng trạng thái. Hạt nhân có số nucleon kỳ ảo 2, 8, 20, 28, 50... sẽ bền vững hơn nhiều so với các hạt nhân lân cận.

Các trạng thái đơn hạt có năng lượng gần nhau tạo thành một vỏ, giống như vỏ electron trong nguyên tử. Trong hạt nhân, các nucleon lần lượt chiếm các trạng thái lượng tử từ thấp lên cao. Khi một vỏ được lấp đầy với số nucleon "kỳ ảo", hạt nhân sẽ bền vững hơn so với khi vỏ còn nhiều trạng thái chưa lấp đầy, hiện tượng này rất giống các nguyên tố khí trơ trong cấu trúc nguyên tử.

Mẫu cấu trúc vỏ dựa trên chuyển động đơn hạt của nucleon trong trường tự hợp bên trong hạt nhân đã giải thích được rất nhiều đặc điểm của hạt nhân, đặc biệt là các hiện tượng liên quan đến những số kỳ ảo

và kỳ ảo kép. Đặc trưng các trạng thái của phần lớn những hạt nhân nói chung cũng phù hợp khá tốt với mẫu này. Song với số khối  $A$  tương đối lớn, mẫu này chỉ giải thích thành công nhiều đặc điểm của các hạt nhân có số kỳ ảo hoặc cận kỳ ảo. Khi số nucleon cách xa số kỳ ảo, hạt nhân bị biến dạng, mà đơn giản nhất là thành giọt chất lỏng hình elipsoit tròn xoay. Trong trường hợp này, trường tự hợp không xuyên tâm như ở các hạt nhân hình cầu nữa, do đó momen quỹ đạo không bảo toàn, số lượng tử  $l$  không còn đặc trưng cho các trạng thái đơn hạt nữa. Thay vào đó là số lượng tử đặc trưng cho vết chiều momen quỹ đạo nucleon trên trục đối xứng elipsoit tròn xoay.

Song hạt nhân biến dạng không có hình hài xác định như một vật rắn, các nucleon bên trong nó tham gia vào những chuyển động tập thể tạo ra sóng trên bề mặt giọt chất lỏng và làm quay elipsoit tròn xoay.

Hai dạng chuyển động tập thể trên bề mặt này làm thay đổi năng lượng liên kết của hạt nhân đồng thời ảnh hưởng đến trường tự hợp chi phối chuyển động các nucleon trong hạt nhân. Nói cách khác, có sự tương tác qua lại giữa chuyển động đơn hạt với dao động bề mặt và chuyển động quay của giọt chất lỏng hạt nhân. A. Bohr và B. Mottelson đã làm nổi thành công chuyển động đơn hạt và tập thể trong mẫu hạt nhân tổng hợp.

#### **1.2.4 Các trạng thái của hạt nhân**

Hạt nhân có thể tồn tại ở rất nhiều trạng thái có năng lượng và một đặc trưng lượng tử xác định, như spin, tính chẵn lẻ, vết chiều spin từ trục quay... Đây là những trạng thái của toàn hạt nhân như một hệ lượng tử, khác với trạng thái đơn hạt bàn ở phần trên. Trạng thái hạt nhân được gọi là cơ bản có năng lượng thấp nhất, quy ước bằng 0, và có thể sống lâu vô tận ở những hạt nhân bền, nhưng cũng có thể sống hữu hạn ở những đồng vị phóng xạ. Các trạng thái kích thích có năng lượng lớn hơn trạng thái cơ bản, chúng thường có thời gian sống rất ngắn và phát ra tia  $\gamma$  để trở về trạng thái cơ bản.

Những đặc trưng lượng tử của trạng thái hạt nhân có thể đoán nhận dựa trên chuyển động đơn hạt và tập thể của các nucleon, như đã bàn ở mục trên. Chẳng hạn, spin của trạng thái hạt nhân có được bằng cách tổng hợp momen động của các nucleon bên trong hạt nhân. Ở các hạt nhân biến dạng thành hình elipsoit tròn xoay, vết chiếu spin trên trục đối xứng cũng được bảo toàn và bằng tổng vết chiếu momen động của các nucleon trên trục đối xứng. Ở hạt nhân có vỏ nucleon lấp đầy, spin của trạng thái cơ bản luôn bằng 0 vì từng cặp nucleon có momen động đối chiều với nhau. Ở các hạt nhân có một nucleon vượt quá (hoặc chưa đủ) số kỳ ảo, chính chuyển động đơn hạt của các nucleon này chi phối các đặc trưng lượng tử của trạng thái hạt nhân.

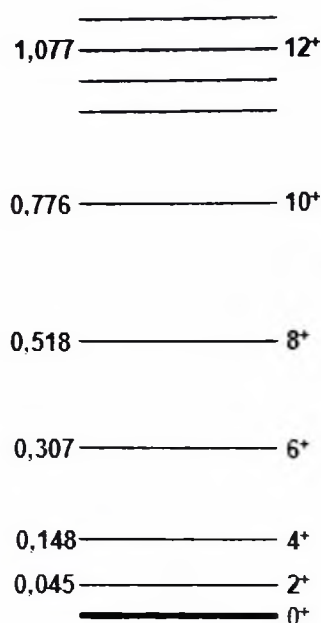
Ở xa số kỳ ảo, hạt nhân có số khối  $A$  tương đối lớn bị biến dạng và đặc trưng lượng tử của các mức năng lượng còn chịu ảnh hưởng của dao động mặt và chuyển động quay của giọt chất lỏng bị biến dạng. Chẳng hạn, những hạt nhân chẵn – chẵn bị biến dạng thành hình elipsoit tròn xoay có thể quay quanh trục vuông góc với trục đối xứng (chuyển động quay quanh trục đối xứng không làm thay đổi hình dạng và năng lượng liên kết trong hạt nhân), và quy tắc lượng tử hóa ở đây chỉ cho phép các trạng thái có spin chẵn và tính chẵn lẻ dương như  $0^+$ ,  $2^+$ ,  $4^+$ ,  $6^+$ ... Mặt khác, năng lượng trong chuyển động quay tỷ lệ với bình phương momen động lượng, hay spin của hạt nhân, nên cũng được lượng tử hóa theo công thức

$$E_I = \left( \frac{h}{2\pi} \right)^2 \cdot \frac{I(I+1)}{2\theta} \quad (1.8)$$

trong đó,  $I$  là spin và  $\theta$  là momen quán tính của hạt nhân. Công thức đơn giản này đã mô tả rất đúng phổ năng lượng quay của các hạt nhân chẵn – chẵn có số khối  $A$  tương đối lớn. Chẳng hạn, với hạt nhân chẵn – chẵn  $U^{238}$  ta có thể nhận ra trong số rất nhiều mức năng lượng thấp một dải quay rất đặc thù với năng lượng từ thấp lên cao tuân theo công thức (1.8). Các mức năng lượng trong chuyển động quay của hạt nhân  $U^{238}$  quanh trục vuông góc với trục đối xứng và trạng thái lượng tử của chúng được minh họa trên hình 1.9.

## Chương 1. PHÒNG XẠ VÀ VẬT LÝ HẠT NHÂN

Ngoài các đặc trưng lượng tử nói trên, mỗi trạng thái hạt nhân còn có những đặc trưng vật lý khác như momen quán tính tham gia vào chuyển động quay, momen lưỡng cực từ phản ánh cường độ tương tác của hạt nhân trong từ trường ngoài. Hạt nhân không có momen lưỡng cực điện nhưng lại có momen tứ cực điện phản ánh phân bố điện tích bên trong hạt nhân khi nó bị biến dạng khác với hình cầu. Hạt nhân hình cầu có momen tứ cực điện bằng không. Momen tứ cực điện phản ánh cường độ tương tác tứ cực điện với tenxơ gradient điện trường tại vị trí hạt nhân, giá trị này phụ thuộc vào cấu hình nguyên tử và tính thể chứa hạt nhân.



Hình 1.9. Các mức năng lượng quay qua trục vuông góc với trục đối xứng của hạt nhân chẵn – chẵn U. Bên trái là năng lượng tính từ MeV, bên phải là spin và tính chẵn lẻ (Nguồn: Tables of Isotopes, C.Lederer and V. Shirley).

Vì trạng thái hạt nhân tuân theo nhiều quy luật bảo toàn khác nhau nên phân rã phóng xạ theo một kênh nào đó có thể được phép về năng lượng nhưng vẫn không xảy ra do không được phép về mặt toàn momen động lượng hay tính chẵn lẻ. Hình 1.10 (mục 1.4.5) minh họa các đặc trưng lượng tử của một số trạng thái liên quan đến phân rã phóng xạ của đồng vị  $^{40}\text{K}$ , một đồng vị thường gặp trong nghiên cứu phóng xạ môi trường.

### 1.2.5 Thời gian sống của các trạng thái hạt nhân

Mỗi trạng thái hạt nhân lại còn có thời gian sống nhất định như : thuộc tính bất biến đối với mọi biến động bên ngoài. Ở trạng thái

bản với năng lượng thấp nhất, hạt nhân có thể sống lâu vô hạn (đồng vị bền) hoặc hữu hạn do bị phân rã phóng xạ. Ở các trạng thái kích thích có năng lượng cao hơn, hạt nhân phải tìm cách phân rã về các mức cơ bản, hoặc về các mức của đồng vị bên cạnh có năng lượng thấp hơn. Do đó, mỗi trạng thái kích thích đều có thời gian sống  $\tau$  nhất định, tỷ lệ nghịch với tốc độ phân rã toàn phần  $\Gamma$  của trạng thái ấy. Hàm phân bố xác suất tìm thấy hạt nhân ở trạng thái kích thích có năng lượng  $E_0$  phân bố quanh giá trị  $E_0$  theo hàm Lorentz với độ rộng  $\Gamma$  có dạng:

$$\omega(E) \approx \frac{a}{(E - E_0)^2 + \Gamma^2} \quad (1.9)$$

Hàm phân bố này có cực đại tại  $E = E_0$ , đạt đến một nửa giá trị cực đại tại  $E - E_0 = \pm \Gamma$  và giảm rất nhanh khi  $|E - E_0| > \Gamma$ . Độ rộng về năng lượng  $\Gamma$  trong phân bố Lorentz tỷ lệ thuận với xác suất phân rã và tỷ lệ nghịch với thời gian sống trung bình của hạt nhân ở trạng thái kích thích,  $\tau \times \Gamma = h$ . Vì hạt nhân có thể phân rã theo nhiều kênh khác nhau, như phát ra tia  $\gamma$ , neutron hay phân hạch nên  $\Gamma$  là tổng của các độ rộng riêng phần:

$$\Gamma = \Gamma_\gamma + \Gamma_n + \Gamma_f \dots \quad (1.10)$$

trong đó  $\Gamma_\gamma$ ,  $\Gamma_n$ ,  $\Gamma_f$  là độ rộng riêng phần cho từng kênh phân rã.

Để có hình dung cụ thể về mối tương quan giữa độ rộng với năng lượng trạng thái kích thích, ta hãy xét trường hợp trạng thái kích thích có năng lượng 600 keV và thời gian sống  $10^{-9}$  s. Độ rộng trong phân bố năng lượng tương ứng sẽ là  $\sim 6.10^{-7}$  eV, rất bé so với năng lượng trạng thái kích thích, nói cách khác, độ chụm về năng lượng của các trạng thái hạt nhân rất sắc nét.

Ở vùng năng lượng thấp, gần trạng thái cơ bản, các mức năng lượng cách nhau từ hàng chục đến hàng trăm keV, càng lên cao chúng càng sát lại. Ở vùng năng lượng kích thích 7 – 8 MeV, tức vùng năng lượng liên kết của nucleon, khoảng cách giữa các mức chỉ còn vài eV, lên cao hơn nữa, phổ năng lượng các trạng thái kích thích có thể xem như liên tục, vì độ rộng của trạng thái kích thích tương đương với khoảng cách giữa chúng.

Công thức Lorentz (1.9) rất thường gặp trong nhiều hiện tượng cộng hưởng liên quan đến hạt nhân. Khi chiếu hạt nhân bằng tia  $\gamma$  hoặc neutron có năng lượng phù hợp với năng lượng kích thích, hạt nhân sẽ hấp thụ cộng hưởng chúng để chuyển từ trạng thái cơ bản lên trạng thái kích thích. Hấp thụ cộng hưởng với tia  $\gamma$  trong hiệu ứng Mössbauer (phát minh năm 1956) đã mang lại rất nhiều ứng dụng và trở thành công cụ nghiên cứu rất phổ biến trong vật lý, hóa học, sinh học. Hấp thụ cộng hưởng neutron là công cụ nghiên cứu đặc trưng các mức hạt nhân trong vùng năng lượng cận kề năng lượng liên kết của neutron trong hạt nhân. Hấp thụ cộng hưởng neutron trên hạt nhân  $U^{238}$  đóng góp quan trọng trong phản ứng phân hạch dây chuyền (xem mục 1.5).

### 1.3 PHÂN RÃ PHÓNG XẠ

#### 1.3.1 Quy luật phân rã phóng xạ

Những hạt nhân trong mẫu vật phóng xạ phân rã một cách ngẫu nhiên, ta không thể khẳng định khi nào thì hạt nhân cụ thể nào sẽ phân rã, nhưng sau một khoảng thời gian nhất định ta có thể biết chắc bao nhiêu hạt nhân đã bị phân rã. Xét tập hợp  $N$  hạt nhân ở cùng một trạng thái không bền. Chúng sẽ phân rã với tốc độ:

$$A = \frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (1.11)$$

trong đó  $\lambda$  là xác suất phân rã trên đơn vị thời gian, được gọi là hằng số phân rã.

Trong đo lường phóng xạ, đại lượng  $A$  được gọi là hoạt độ của nguồn phóng xạ. Lấy tích phân phương trình (1.10) sẽ thấy hoạt độ phóng xạ  $A$  giảm dần theo thời gian theo quy luật hàm mũ:

$$A(t) = A_0 \exp(-\lambda t) \quad (1.12)$$

và  $A_0 = \lambda N_0$

trong đó  $N_0$  là số hạt nhân ở thời điểm ban đầu  $t = 0$ .

Trong hệ đơn vị đo lường quốc tế (SI), hoạt độ phóng xạ được đo theo đơn vị Becquerel (Bq), mỗi Bq bằng 1 phân rã trong 1 s,  $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$ . Trước đây người ta dùng đơn vị Curie (Ci), 1 Ci chính là hoạt độ phóng xạ của 1 gam radium-226,  $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$ .

Để dễ hình dung tốc độ phân rã phóng xạ hơn, thay vì hằng số phân rã  $\lambda$  người ta thường dùng chu kỳ bán rã  $T_{1/2}$ , hay thời gian sống trung bình  $\tau$  của hạt nhân phóng xạ, hai đại lượng này tỷ lệ nghịch với hằng số phân rã  $\lambda$ . Chu kỳ bán rã là khoảng thời gian sau đó số hạt nhân phóng xạ còn lại một nửa,  $N = N_0/2$ :

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0,693}{\lambda} \quad (1.13)$$

Còn thời gian sống trung bình  $\tau$  của các hạt nhân phóng xạ được tính theo công thức:

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} t \left| \frac{dN}{dt} \right| dt}{\int_0^{\infty} \left| \frac{dN}{dt} \right| dt} = \frac{1}{\lambda} \quad (1.14)$$

$\tau = 1/\lambda > T_{1/2}$ , là thời gian để lượng hạt nhân phóng xạ giảm đi  $e = 2,718$  lần. Hằng số phân rã  $\lambda$  cũng như chu kỳ bán rã  $T_{1/2}$  và thời gian sống trung bình  $\tau$  là những thuộc tính của hạt nhân, chúng không bị ảnh hưởng bởi các điều kiện bên ngoài như áp suất, nhiệt độ... của môi trường.

Trong thực tế mỗi trạng thái hạt nhân có thể phân rã theo hai kênh a và b với hai hằng số phân rã  $\lambda_a$  và  $\lambda_b$  khác nhau. Vì hai kênh phân rã độc lập nhau nên

$$\begin{aligned} \left( \frac{dN}{dt} \right) &= - \left( \frac{dN}{dt} \right)_a - \left( \frac{dN}{dt} \right)_b \\ &= N(\lambda_a + \lambda_b) = N\lambda \end{aligned} \quad (1.15)$$

nghĩa là hoạt độ phóng xạ giảm theo thời gian với một hằng số phân rã chung,  $\lambda = \lambda_a + \lambda_b$ , hay một chu kỳ bán rã chung.

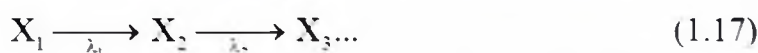
Số hạt nhân con sinh ra sau thời gian  $t$  được tính theo công thức:

$$\begin{aligned} N_a(t) &= \frac{\lambda_a}{\lambda} N_0(1 - \exp(-\lambda t)) \\ N_b(t) &= \frac{\lambda_b}{\lambda} N_0(1 - \exp(-\lambda t)) \end{aligned} \quad (1.16)$$

Những công thức trên có thể khái quát hóa cho trường hợp trạng thái hạt nhân có nhiều kênh phân rã đồng thời,  $a, b, c, d, \dots$  cạnh tranh nhau.

### 1.3.2 Chuỗi phóng xạ

Đó là trường hợp mà hạt nhân mẹ và các hạt nhân con cháu đều phân rã phóng xạ. Mỗi thành viên trong chuỗi được tạo nên bởi phân rã của thành viên thế hệ trước đồng thời chính nó lại phân rã để có thể hệ tiếp theo. Điển hình là các chuỗi phóng xạ tự nhiên  $\text{Th}^{232}$ ,  $\text{U}^{235}$ ,  $\text{Np}^{237}$  và  $\text{U}^{238}$  (chương 2). Chẳng hạn, chuỗi  $\text{U}^{238}$  bao gồm 12 nhân phóng xạ, tận cùng là đồng vị bền  $\text{Pb}^{206}$ . Chuỗi phóng xạ có thể biểu diễn như sau:



Xét trường hợp đơn giản chuỗi có hai thành phần  $X_1$  và  $X_2$ . Đồng vị  $X_1$  phân rã theo quy luật hàm mũ thông thường (1.11), còn với đồng vị  $X_2$ , hoạt độ của nó tại thời điểm  $t$  sẽ bằng tốc độ sản sinh ra nó trừ đi tốc độ phân rã của nó:

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (1.18)$$

$N_1$  và  $N_2$  tương ứng là số lượng hạt nhân mẹ và con ở thời điểm  $t$ , còn  $\lambda_1$  và  $\lambda_2$  là hằng số phân rã tương ứng của hai nhân. Lời giải của (1.18) có dạng:

$$N_1 = N_1^0 \exp(-\lambda_1 t)$$

$$N_2 = [\lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1)] N_1^0 [\exp(-\lambda_1 t)] + [N_2^0 - (\lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1)) N_1^0] \exp(-\lambda_2 t) \quad (1.19)$$

$N_1^0$  và  $N_2^0$  là số lượng nhân mẹ và con có mặt ở thời điểm ban đầu  $t = 0$ . Công thức (1.19) là trường hợp riêng cho lời giải của bài toán chuỗi phóng xạ tổng quát gồm nhiều nhân thành phần do Batemen tìm ra như sau:

$$N_2 = C_{21}\exp(-\lambda_1 t) + C_{22}\exp(-\lambda_2 t)$$

...

$$N_k = C_{k1}\exp(-\lambda_1 t) + \dots + C_{kk}\exp(-\lambda_k t) \quad (1.20)$$

Các hệ số  $C_{ij}$  được tính theo công thức truy hồi:

$$C_{ij} = C_{i-1,j} \frac{\lambda_{i-1}}{\lambda_i - \lambda_j}, \text{ với } i \neq j \quad (1.21)$$

và hệ số  $C_{ii}$  được tính dựa trên điều kiện ban đầu ở  $t = 0$ :

$$N_i(0) = C_{i1} + C_{i2} + \dots + C_{ii} \quad (1.22)$$

Trong trường hợp các chuỗi phóng xạ tự nhiên  $U^{238}$ ,  $U^{235}$  và  $Th^{232}$ , công thức truy hồi trên sẽ đơn giản đi rất nhiều bởi thời gian sống của đồng vị mẹ và thời gian  $t$  đều rất lớn so với chu kỳ bán rã của các đồng vị con (nhờ đó mà ba nhân trên còn tồn tại cho đến ngày nay), tức là:

$$\lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n \gg \lambda_1 \text{ và } \lambda_2 t, \lambda_3 t, \dots, \lambda_n t \ll 1$$

nên các công thức (1.19) và (1.20) sẽ đơn giản rất nhiều, và

$$N_i \propto \frac{\lambda_1}{\lambda_i} N_1 \quad (1.23)$$

hay

$$A_i = \lambda_i N_i = \lambda_1 N_1 = A_1 \quad (1.24)$$

nghĩa là hoạt độ phóng xạ của các đồng vị trong họ đều bằng nhau và bằng hoạt độ phóng xạ của nhân mẹ. Hiện tượng này được gọi là cân bằng phóng xạ trường cừu trong họ phóng xạ. Trong thực tế có những quá trình tự nhiên gây mất cân bằng phóng xạ giữa các đồng vị trong họ, như sẽ thấy ở 2.2.2.

### 1.3.3 Phân rã đồng hành với quá trình sinh tạo

Trong thực tế có rất nhiều trường hợp phân rã phóng xạ xảy ra đồng thời với quá trình tạo ra đồng vị phóng xạ. Chúng ta gặp phải trường hợp này trong phân tích kích hoạt neutron, trong tính toán hoạt độ sản phẩm kích hoạt  $Cs^{134}$  (bên cạnh sản phẩm phân hạch  $Cs^{137}$ ) thoát ra từ tai nạn điện hạt nhân, trong tính toán các đồng vị phân rã neutron trễ trong lò phản ứng... Ta sẽ minh họa quá trình này qua bài toán phân tích kích hoạt neutron trên lò phản ứng.

Giả sử trong bia chiếu xạ có  $N$  hạt nhân là đồng vị bền thuộc nguyên tố cần phân tích. Do phản ứng với neutron, đồng vị bền này sẽ biến thành đồng vị phóng xạ và tốc độ sản sinh có thể tính theo phương trình:

$$\frac{dN_1}{dt} = \varphi \sigma N \quad (1.25)$$

trong đó  $\varphi$  là dòng neutron tính theo số neutron/cm<sup>2</sup>,  $\sigma$  là tiết diện phản ứng kích hoạt. Một khi được sinh ra, hạt nhân đồng vị phóng xạ sẽ phân rã theo chu kỳ bán rã của nó và quá trình này độc lập với quá trình nó được tạo thành. Do đó, hoạt độ hạt nhân phóng xạ hiện diện ở thời điểm  $t$  sẽ bằng hiệu hai tốc độ sinh ra và mất đi:

$$\frac{dN_1}{dt} = \varphi \sigma N - \lambda N_1 \quad (1.26)$$

Lời giải của phương trình vi phân (1.26) sẽ là

$$N_1 = \frac{\varphi \sigma N (1 - e^{-\lambda t})}{\lambda} \quad (1.27)$$

Trong thực tế người ta cần đo hoạt độ của đồng vị phóng xạ được quan tâm, tức là đại lượng  $\lambda N_1$  để xác định tổng số hạt nhân trong mẫu đo  $N$  của nguyên tố cần phân tích:

$$\lambda N_1 = \varphi \sigma N (1 - e^{-\lambda t}) \quad (1.28)$$

Đây là phương trình cơ bản trong phân tích kích hoạt neutron. Đáng chú ý là sau một thời gian chiếu xạ đủ lâu  $t \gg \frac{1}{\lambda}$  số lượng hạt nhân phóng xạ trong mẫu chiếu sẽ đạt đến bão hòa.

### 1.3.4 Phân rã $\beta^-$

Sau đây ta sẽ xét một số đặc điểm quan trọng của các loại phân rã phóng xạ, trước hết là phân rã  $\beta^-$ .

Nằm phía dưới dải đồng vị bền là những đồng vị thừa neutron, chúng phải phân rã  $\beta^-$  để giảm bớt số neutron và làm cho hạt nhân bền hơn, quá trình này phát ra electron và phản neutrino theo công thức:



Thực chất đây là quá trình phân rã neutron ra proton do neutron có khối lượng lớn hơn:



Trên thực tế, neutron tự do phân rã  $\beta^-$  theo cơ chế tương tác yếu với thời gian sống đo được trong hai thập kỷ gần đây nằm trong khoảng từ  $\tau = 878,5$  s đến  $\tau = 889,2$  s. Tương tác yếu là một trong bốn dạng tương tác giữa các hạt cơ bản, ba dạng kia là tương tác mạnh, tương tác điện từ và tương tác hấp dẫn. Xác định chính xác thời gian sống của neutron có ý nghĩa rất quan trọng để hiểu biết quá trình hình thành vũ trụ và các nguyên tố ngay sau Big Bang (xem chương 2).

Năng lượng trong phân rã  $\beta^-$  phân bố một cách thống kê giữa hai hạt electron và phản neutrino, do đó năng lượng electron bay ra có phổ liên tục, thay đổi từ 0 khi năng lượng phản neutrino cực đại đến giá trị cực đại khi năng lượng phản neutrino bằng không.

### 1.3.5 Phân rã $\beta^+$ và chiếm electron vỏ K

Ở phía trên dải bền là những đồng vị thừa proton hoặc thiếu neutron, chúng phải phân rã  $\beta^+$  để giảm bớt số proton, khi ấy proton sẽ chuyển thành neutron đồng thời có hai hạt sẽ được phát ra, đó là phản electron, tức là positron,  $e^+$ , và neutrino:



Để phân rã  $\beta^+$  có thể xảy ra, hiệu năng lượng giữa hạt nhân mẹ  ${}^N_ZX^A$  và hạt nhân con  ${}^{N+1}_{Z-1}X'^A$  phải lớn hơn hai lần khối lượng tĩnh của electron, 1,02 MeV (khối lượng tĩnh của neutrino rất bé). Trên thực tế, positron không tồn tại lâu, khi gặp vật chất nó kết hợp với electron và hủy cặp ( $e^+$ ,  $e^-$ ) phát ra hai tia  $\gamma$  năng lượng 511 keV, hai tia này bay ra đồng thời theo hai hướng ngược nhau

$$e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma \text{ (1,02 MeV)} \quad (1.32)$$

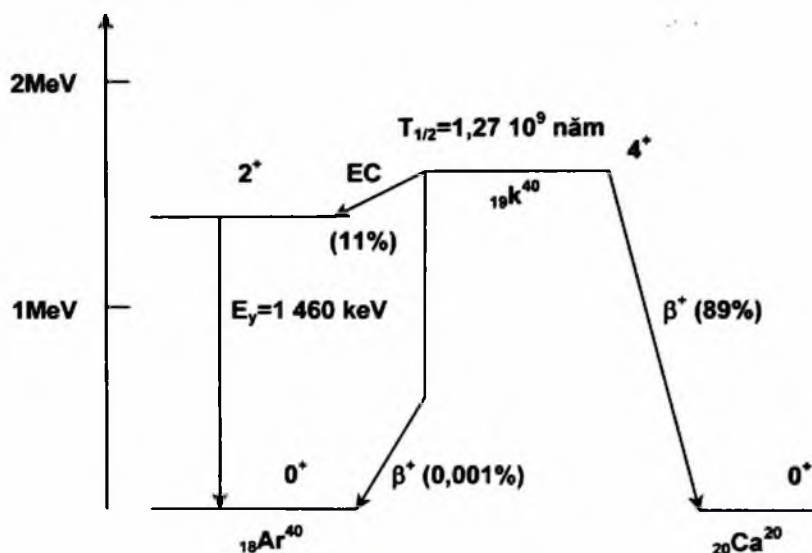
Nhờ có đặc điểm này mà phân rã positron đã có những ứng dụng độc đáo trong y học hạt nhân và nghiên cứu vật liệu. Hình 1.1b giới thiệu hình chân thương xương cẳng chân và bàn chân ở một vận động viên chạy marathon trên máy PET (Positron Emission Tomography) dùng đồng vị  $F^{18}$  phân rã  $\beta^+$  với chu kỳ bán rã 110 phút được điều chế trên máy gia tốc cyclotron.

Ở đồng vị nào thừa proton mà điều kiện nói trên không thỏa mãn, proton có thể chuyển hóa thành neutron bằng cách chiếm electron ở vỏ K của nguyên tử, vỏ này mất một electron nên nguyên tử sẽ phát ra tia X.

$${}^N_ZX^A \rightarrow {}^{N+1}_{Z-1}X'^A + e_K + X \quad (1.33)$$

Khi điều kiện năng lượng nói trên thỏa mãn, cả hai dạng phân rã  $\beta^+$  và chiếm electron K có thể đồng thời cùng xảy ra và cạnh tranh nhau. Thí dụ trường hợp  $K^{40}$  trình bày ở hình 1.9. Chọn đồng vị  ${}_{19}K^{40}$  để minh họa vì đồng vị phóng xạ tự nhiên này đóng góp phần quan trọng trong liều bức xạ trực tiếp từ đất đá và từ chính cơ thể con người. Tia  $\gamma$  với năng lượng 1 460 keV cũng thường xuyên xuất hiện trong phổ gamma của các mẫu môi trường. Ngoài ra, thí dụ minh họa này sẽ cho thấy một đồng vị có thể phân rã theo nhiều kênh cạnh tranh nhau và một kênh nào đó có thể được phép về mặt năng lượng nhưng lại bị cấm nếu xét trên những đặc trưng lượng tử khác của hạt nhân như momen động lượng hoặc tính chẵn lẻ.

Đồng vị  $^{40}_{19}\text{K}$  có từ thời nguyên khởi của vũ trụ, sau Big Bang và trước khi hình thành hệ mặt trời, còn tồn tại đến ngày nay nhờ có chu kỳ bán phân rã rất lớn ( $T_{1/2} = 1,27$  tỷ năm). Trong tương quan với tuổi của vũ trụ, đồng vị này đã phân rã hết 11 chu kỳ, qua đó hàm lượng của nó trong đất đá đã giảm đi 2 048 lần, hiện nay chỉ còn lại 0,01% trong khi hai đồng vị bền của nguyên tố kali là  $\text{K}^{39}$  và  $\text{K}^{41}$  có độ phổ biến áp đảo tương ứng đến 93,08% và 6,91%.



Hình 1.10. Sơ đồ phân rã phóng xạ của đồng vị  $\text{K}^{40}$  theo hai kênh  $\beta^-$  và chiếm electron vỏ K (EC) qua đó có thể thấy cơ chế phát ra tia  $\gamma$  đặc trưng của đồng vị này với năng lượng  $E_\gamma = 1\,460\text{ keV}$ .

Muốn biết tại sao  $^{40}_{19}\text{K}$  phân rã theo sơ đồ trên hình 1.10, ta có thể chú ý đến hai đồng vị bên cạnh kề có cùng số khối là  $^{40}_{20}\text{Ca}$  và  $^{40}_{18}\text{Ar}$ , vì phân rã  $\beta$  không thay đổi số khối. So với hai đồng vị bền này, đồng vị  $^{40}_{19}\text{K}$  vừa thừa neutron vừa thừa proton. Do đó, nó có thể phân rã theo hai kênh  $\beta^-$  để chuyển về  $^{40}_{20}\text{Ca}$  hoặc chiếm electron vỏ K để chuyển về  $^{40}_{18}\text{Ar}$ . Sơ đồ (hình 1.10) cho thấy cả hai kênh phân rã đều được phép về mặt năng lượng. Năng lượng hạt nhân  $^{40}_{19}\text{K}$  cao hơn hai hạt nhân đồng khối kia đến gần 1,5 MeV.

Nhưng mỗi trạng thái hạt nhân còn được xác định bởi những đặc trưng lượng tử khác. Đó là spin (momen động lượng) được lượng tử hóa

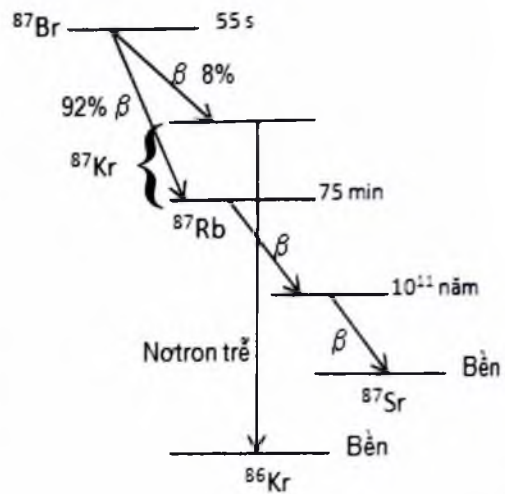
thành những số nguyên hoặc bán nguyên nhân với  $h/2\pi$ ,  $h$  là hằng số Planck, và tính chẵn lẻ phản ánh tính đối xứng (+) hay phản đối xứng (-) qua gương. Lý thuyết hạt nhân cho biết, chẳng những năng lượng mà tổng momen động và tính chẵn lẻ cũng được bảo toàn trong phân rã phóng xạ, từ đây nảy sinh ra các quy tắc lọc lựa ảnh hưởng đến xác suất phân rã của các kênh. Kết quả là kênh  $\beta^-$  có xác suất 89%, kênh thứ hai chiếm 11%. Theo kênh thứ hai, sau khi chiếm electron vỏ K, hạt nhân  $\text{Ar}^{40}$  ở trạng thái kích thích và phát ra tia gamma với năng lượng 1 462 keV. Đây là tia  $\gamma$  khá quen thuộc, luôn xuất hiện khá rõ trong phổ gamma của đất đá.

### 1.3.6 Phân rã neutron trễ

Khi chiếu neutron nhiệt lên uranium, hạt nhân  $\text{U}^{235}$  có thể vỡ làm hai mảnh với số khối trung bình và phát ra một vài neutron thứ cấp. Với  $\text{U}^{235}$  số neutron thứ cấp trung bình cho mỗi phân hạch là 2,47. Chúng phát ra trong thời gian rất ngắn, khoảng  $10^{-12}$  s, nên được gọi là neutron tức thời. Lại cũng có những neutron phát ra chậm hơn, hàng phút sau đó, bởi các mảnh vỡ phân hạch, gọi là neutron trễ. Số lượng neutron trễ không nhiều, khoảng 0,64% so với lượng neutron tức thời tính cho một phân hạch, nhưng thiếu chúng, phản ứng phân hạch dây chuyền trong các lò phản ứng sẽ không điều khiển được. Tại sao mảnh vỡ phân hạch lại có thể phát ra neutron trễ?

Các mảnh vỡ phân hạch thừa neutron được tạo thành ở trạng thái kích thích có năng lượng lớn hơn năng lượng liên kết neutron ( $\sim 8$  MeV) và có thời gian sống rất ngắn ( $\sim 10^{-15}$  s). Neutron tức thời được phát ra từ những trạng thái này. Nhưng những mảnh vỡ này cũng có thể phân rã  $\beta^-$  liên tiếp để giải quyết tình trạng thừa neutron của mình. Có khi, sau phân rã  $\beta^-$  của một mảnh vỡ nào đó với chu kỳ bán rã  $t_d$ , hạt nhân con được tạo thành ở trạng thái kích thích có năng lượng lớn hơn năng lượng liên kết neutron. Hạt nhân con ấy sẽ phát ra neutron với chu kỳ bán rã  $t_d$  của phân rã  $\beta^-$  ngay trước đó, nên những neutron này phát ra trễ hơn các neutron tức thời.

Hình 1.11 minh họa trường hợp phát neutron trễ của mảnh vỡ phân hạch  $^{87}_{35}\text{Br}$  ( $T_{1/2} = 55 \text{ s}$ ). Một mặt, nó phân rã  $\beta^-$  liên tiếp tạo thành các đồng vị phóng xạ  $^{87}_{36}\text{Kr}$  ( $T_{1/2} = 75 \text{ s}$ ),  $^{87}_{37}\text{Rb}$  ( $T_{1/2} = 10^{11} \text{ năm}$ ) và  $^{87}_{39}\text{Sr}$  (bền). Theo một kênh khác, sau lần phân rã  $\beta^-$  đầu tiên tạo thành hạt nhân  $^{87}_{37}\text{Kr}$  ở trạng thái kích thích với năng lượng lớn hơn năng lượng liên kết của neutron, do đó nó sẽ phát ra neutron ngay liền sau tia  $\beta^-$  và trở thành  $^{86}_{37}\text{Kr}$ . Do đó, neutron trễ này sẽ có chu kỳ bán rã 55 s của mảnh vỡ  $^{87}_{35}\text{Br}$ .



Hình 1.11. Sơ đồ phân rã  $\text{Br}^{87}$ , một mảnh vỡ phân hạch của  $\text{U}^{235}$ . Neutron trễ phát ra từ trạng thái kích thích của hạt nhân  $\text{Kr}^{87}$  hình thành do phân rã  $\beta^-$  từ hạt nhân  $\text{Br}^{87}$  với chu kỳ bán phân rã 55 s.

### 1.3.7 Phân rã alpha

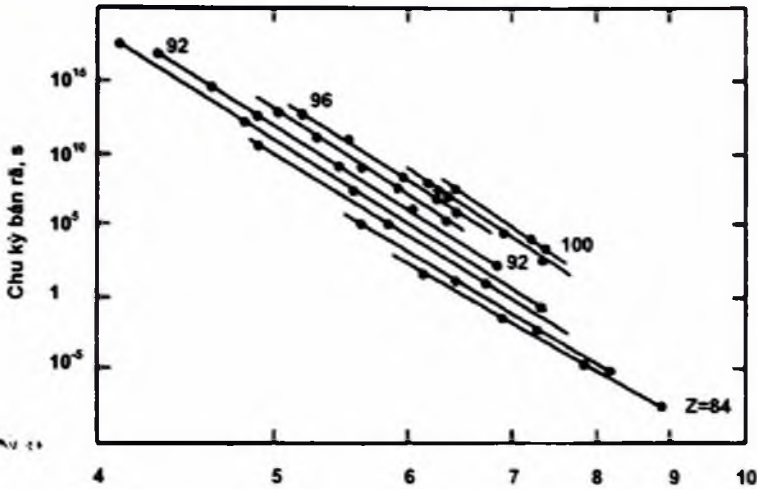
Những đồng vị nặng thừa proton có thể phát ra tia  $\alpha$ , hay hạt nhân  $^4_2\text{He}$ , để giảm bớt tỷ lệ proton trên neutron, và đồng vị được tạo thành sẽ nằm gần hơn đường đồng vị bền trên hình 1.5.



Hạt nhân nặng đến mức nào sẽ phân rã  $\alpha$  và phân rã với tốc độ bao nhiêu? Câu trả lời có thể tìm được trong những giáo trình lý thuyết hạt nhân chuyên sâu.

Phân rã  $\alpha$  là dạng phân rã phổ biến ở các đồng vị vùng actinide và siêu uranium. Nhưng các đồng vị nhẹ hơn cũng có thể phân rã  $\alpha$ . Thực nghiệm đã phát hiện ra phân rã  $\alpha$  tự nhiên ở một số đồng vị vùng đất hiếm. Chẳng hạn,  $\text{Nd}^{144}$  trước kia được xem là đồng vị bền với độ phổ biến 23,8%, nhưng thật ra đây là đồng vị phóng xạ tự nhiên phân rã  $\alpha$  với chu kỳ bán rã rất lớn so với tuổi vũ trụ,  $T_{1/2} = 2,4 \cdot 10^{15} \text{ năm}$ . Tương

tự, hai đồng vị đất hiếm khác là  $Gd^{152}$ ,  $Sm^{147}$  và đồng vị  $Pt^{190}$  cũng phân rã  $\alpha$  với chu kỳ bán rã rất lớn. Ngoài ra còn có bốn đồng vị khác trong vùng đất hiếm cũng phân rã  $\alpha$  với chu kỳ bán rã ngắn hơn.

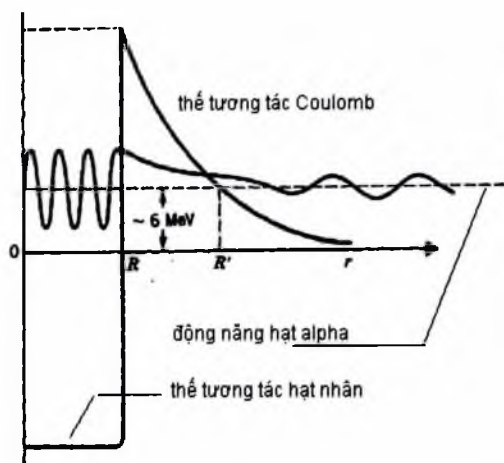


Hình 1.12. Chu kỳ bán rã phụ thuộc vào năng lượng tia  $\alpha$  đúng như định luật Geiger – Nuttall. Trục tung vẽ theo thang logarit, trục hoành theo thang căn bậc hai của năng lượng tia  $\alpha$ .

Năm 1911, hai cộng sự của Rutherford là Geiger và Nuttall đã phát hiện ra một quy luật thực nghiệm rất thú vị. Khi xem xét chu kỳ bán phân rã  $T_{1/2}$  của các đồng vị phân rã  $\alpha$  trong ba chuỗi phóng xạ tự nhiên (chương 2), Geiger và Nuttall thấy chúng có mối quan hệ khá đơn giản với năng lượng hạt alpha ( $E_\alpha$ ) theo công thức:

$$\log_{10} T_{1/2} = -a + bZ/E_\alpha^{1/2} \quad (1.35)$$

trong đó  $T_{1/2}$  đo bằng giây và  $E_\alpha$  bằng MeV,  $Z$  là nguyên tử số của hạt nhân con. Hai hệ số  $a$  và  $b$  trong công thức (1.35) được xác định chính xác sau này dựa trên kết quả thực nghiệm khá phong phú về phân rã  $\alpha$ .  $a = 46,83$  và  $b = 1,454$ . Như vậy, đối với những đồng vị có cùng nguyên tử số  $Z$ , chu kỳ bán rã trên thang logarit giảm tuyến tính với căn bậc hai năng lượng hạt  $\alpha$ . Hình 1.12 so sánh số liệu thực nghiệm với quy luật Geiger – Nuttall đối với những đồng vị có số  $Z$  chẵn từ Po đến Fm.



Hình 1.13. Muốn có phân rã  $\alpha$ , hạt  $\alpha$  chuyển động trong hố thế hạt nhân phải chui qua hàng rào thế Coulomb. Xác suất chui qua hàng rào thế càng lớn khi năng lượng  $E$  của hạt càng cao.

Quy luật thực nghiệm Geiger – Nuttall đã được Gamov giải thích dựa trên lý thuyết cơ học lượng tử vừa hoàn chỉnh trước đó vài năm. Theo đó, hạt  $\alpha$  như bị nhốt bên trong hạt nhân trong hố thế hình chữ nhật có bán kính  $R$ , cũng chính là bán kính hạt nhân (hình 1.13). Với  $R' > R$  hạt  $\alpha$  và hạt nhân tương tác với nhau theo định luật Coulomb. Muốn thoát ra khỏi hố thế hạt nhân, hạt  $\alpha$  phải chui qua hàng rào thế, điều này không thể xảy ra trong cơ học cổ điển. Nhưng với cơ học lượng tử khi xem chuyển động của hạt  $\alpha$  có tính sóng, thì mỗi lần sóng  $\alpha$  đập lên bờ tường thế, nó có xác suất nhất định chui qua khỏi hàng rào. Hiện tượng chui qua hàng rào thế cũng có thể hiểu theo nguyên lý bất định Heisenberg xem hạt  $\alpha$  có độ bất định về tọa độ tỷ lệ nghịch với độ bất định về xung lượng.

Tính toán xác suất chui qua hàng rào thế  $T$  theo cơ học lượng tử, Gamov đi đến công thức

$$T = \exp(-2G),$$

$$G = (2\pi / h) \int_R^{R'} dr \sqrt{2m_\alpha (V(r) - E_\alpha)} \quad (1.36)$$

trong đó  $V$  là thể tương tác Coulomb giữa hạt  $\alpha$  và hạt nhân con,  $m_\alpha$  là khối lượng hạt  $\alpha$ . Với  $R' \gg R$ , tích phân trên sẽ cho công thức gần đúng:

$$G \approx \frac{C}{\sqrt{E_\alpha}} \quad (1.37)$$

trong đó  $C$  là một hệ số tỷ lệ.

Do đó hằng số phân rã  $\lambda$  sẽ phụ thuộc vào năng lượng hạt  $\alpha$  theo công thức:

$$\lambda \sim \exp \left[ -\frac{2C}{\sqrt{E_\alpha}} \right] \quad (1.38)$$

Tương tự như công thức thực nghiệm Geiger – Nuttall (1.35).

### 1.3.8 Phân rã $\gamma$

Trong cả năm quá trình phân rã nêu trên, hạt nhân  $X'$  thường được tạo thành ở trạng thái kích thích, từ đó nó phải trở về trạng thái cơ bản bằng cách phát ra tia  $\gamma$ , quá trình này không làm thay đổi số lượng neutron và proton trong hạt nhân. Những trạng thái kích thích này có thời gian sống rất ngắn, thường từ  $10^{-15}$  đến  $10^{-9}$  giây, nên có thể xem tia  $\gamma$  phát ra đồng thời với các tia beta hoặc tia alpha phát ra trước đó.

Nhưng cũng có trường hợp do momen động lượng của trạng thái kích thích và trạng thái cơ bản khác nhau quá nhiều nên quá trình phát tia  $\gamma$  không thỏa mãn định luật bảo toàn momen động lượng và bị "ách tắc". Khi ấy trạng thái kích thích có thời gian sống dài, có thể đến hàng năm, được gọi là trạng thái isome. Cho nên có những đồng vị bền ở trạng thái cơ bản mà vẫn "phóng xạ" ở trạng thái kích thích, chúng phát ra tia  $\gamma$  và không chuyển hóa thành đồng vị khác.

Bức xạ điện từ của tia  $\gamma$  có hai đặc trưng điện ( $E$ ) hoặc từ ( $M$ ), mỗi loại lại có thể triển khai ra nhiều thành phần ứng với momen góc  $l$  của photon. Tuy nhiên, do các quy tắc lọc lựa mà trong một phân rã cụ thể bức xạ  $\gamma$  thường được đặc trưng bởi một cặp  $E_l$  hoặc  $M_l$  xác định. Trong phân rã  $\gamma$  từ trạng thái  $I_i$  xuống  $I_f$  momen được bảo toàn, cho nên

$$|I_i - I_f| \leq 2 \leq |I_i + I_f| \quad (1.39)$$

Nguyên lý bảo toàn tính chẵn lẻ sẽ dẫn đến một quy tắc lọc lựa thứ hai cho các đặc trưng  $E1$  và  $M1$  của tia  $\gamma$ . Tính chẵn lẻ của photon  $E1$  là  $(-1)^l$ , của photon  $M1$  là  $(-1)^{l+1}$ . Do đó, nếu tính chẵn lẻ của hai trạng thái đầu và cuối của hạt nhân giống nhau, photon phát ra chỉ có thể là  $E2$  hoặc  $M1$ . Trường hợp ngược lại, photon phát ra chỉ có thể là  $E1$  hoặc  $M2$ . Ngoài ra, xác suất phân rã giảm rất nhanh từ  $E1$  sang  $M1$ , cũng như từ  $E1$  sang  $E2, E3...$  Do đó, nếu phân rã theo  $E1$  không thể xảy ra theo các quy tắc lọc lựa trên, tia  $\gamma$  sẽ có đặc trưng  $E2$  hoặc  $M1$ , hoặc  $E2 + M1$ .

Phát xạ  $\gamma$  của các trạng thái kích thích còn bị cạnh tranh bởi quá trình biến hóa nội, khi ấy electron ở các vỏ  $K, L...$  có thể bật ra cùng với tia  $X$  thay vì tia  $\gamma$ . Quá trình biến đổi nội thường trở nên lấn át ở các trạng thái isome khi spin trạng thái kích thích và các trạng thái nằm bên dưới khác nhau rất nhiều khiến tia  $\gamma$  khó phát ra do quy tắc lọc lựa momen và tính chẵn lẻ nói trên.

## 1.4 PHẢN ỨNG HẠT NHÂN VỚI NEUTRON

### 1.4.1 Các phản ứng với neutron chi phối hoạt động của lò phản ứng hạt nhân

Do không có điện tích, neutron rất dễ "thâm nhập" vào hạt nhân, gây ra nhiều phản ứng như

- $(n, \gamma)$  – hạt nhân bắt neutron tạo nên trạng thái kích thích, sau đó phát ra tia  $\gamma$ ,
- $(n, n)$  – tán xạ đàn hồi, năng lượng neutron bay ra và neutron tới bằng nhau
- $(n, n')$  – tán xạ phi đàn hồi, năng lượng neutron bay ra giảm, đây chính là quá trình làm chậm neutron trong lò phản ứng,
- $(n, \alpha), (n, p)...$  – sau phản ứng các hạt  $\alpha$ , proton... bay ra, các phản ứng này thường có ngưỡng, chỉ xảy ra khi năng lượng neutron tới vượt quá những giá trị nhất định, phản ứng phân hạch với neutron  $(n, f)$ .

Các phản ứng trên đây phụ thuộc nhiều vào năng lượng. Tiết diện các phản ứng thay đổi tùy theo năng lượng của neutron. Neutron chậm có năng lượng  $E_n < 1\,000\text{ eV}$ , neutron trung gian có năng lượng  $1\text{ keV} < E_n < 500\text{ keV}$  và neutron nhanh có năng lượng  $0.5\text{ MeV} < E_n < 20\text{ MeV}$ . Ngoài ra, chúng cũng rất khác nhau với hạt nhân nhẹ ( $A < 20$ ), trung bình ( $20 < A < 80$ ), hoặc nặng ( $A > 80$ ). Bảng 1.2 đưa ra tiết diện phản ứng với neutron ở một số hạt nhân thường gặp trong vật liệu lò phản ứng hạt nhân như nhiên liệu, chất tải nhiệt, chất làm chậm, hoặc chất hấp thụ neutron. Tiết diện là đại lượng nói lên tốc độ xảy ra phản ứng trên  $1\text{ cm}^3$  vật chất khi thông lượng neutron đi qua  $1\text{ cm}^2$  trên bia là 1 neutron/s. Tiết diện có thứ nguyên diện tích và tính bằng barn,  $1\text{ barn} = 10^{-24}\text{ cm}^2$ , vào khoảng tiết diện hình học của hạt nhân.

Bảng 1.2. Tiết diện phản ứng ( $n, \gamma$ ), ( $n, f$ ), tán xạ đàn hồi ( $n, n$ ) và phi đàn hồi ( $n, n'$ ) với neutron nhiệt ( $E_n \sim 0.025\text{ eV}$ ) và neutron phân hạch tức thời có năng lượng trung bình khoảng  $2\text{ MeV}$  (hình 1.18). Đơn vị tiết diện: barn.

| Nhân                   | Tiết diện các phản ứng với neutron nhiệt |                   |                  | Tiết diện các phản ứng với neutron phân hạch |                   |        |         |
|------------------------|------------------------------------------|-------------------|------------------|----------------------------------------------|-------------------|--------|---------|
|                        | $n, f$                                   | $n, \gamma$       | $n, n$           | $n, f$                                       | $n, \gamma$       | $n, n$ | $n, n'$ |
| $^{92}\text{U}^{235}$  | 469                                      | 41                | 11.9             | 1,9                                          | 0.07              | 4.4    | 1.2     |
| $^{94}\text{Pu}^{239}$ | 698                                      | 274               | 7.8              | 1,8                                          | 0.05              | 4.4    | 1.5     |
| $^{92}\text{U}^{238}$  | 0                                        | 2.4               | 9.4              | 0.31                                         | 0.07              | 4.8    | 2.6     |
| $^{94}\text{Pu}^{240}$ | 0.05                                     | 264               | 1.5              | 1.4                                          | 0.09              | 4.3    | 2.0     |
| $^1_1\text{H}^1$       | –                                        | 0.29              | 20.5             | –                                            | $4 \cdot 10^{-5}$ | 3.9    | –       |
| $^1_1\text{H}^2$       | –                                        | $5 \cdot 10^{-4}$ | 3.4              | –                                            | $7 \cdot 10^{-6}$ | 2.5    | –       |
| $^{10}_5\text{B}$      | –                                        | 443               | 2.1              | –                                            | $8 \cdot 10^{-5}$ | 2.1    | 0.07    |
| $^{12}_6\text{C}$      | –                                        | 0.003             | 4.7              | –                                            | $2 \cdot 10^{-5}$ | 2.3    | 0.01    |
| $^{91}_{40}\text{Zr}$  | –                                        | 1.1               | 10.6             | –                                            | 0.01              | 5      | 0.7     |
| $^{135}_{54}\text{Xe}$ | –                                        | $2.7 \cdot 10^6$  | $3.8 \cdot 10^5$ | –                                            | 0.01              | 4.9    | 1       |
| $^{149}_{62}\text{Sm}$ | –                                        | $6 \cdot 10^4$    | 373              | –                                            | 0.22              | 4.5    | 2.2     |
| $^{157}_{64}\text{Gd}$ | –                                        | $1.9 \cdot 10^5$  | 819              | –                                            | 0.11              | 4.7    | 2.2     |

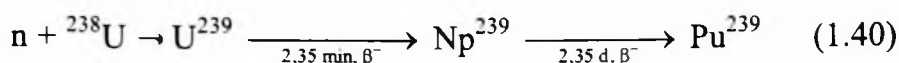
Tiết diện ghi trên bảng 1.2 giúp ta hiểu được tính năng của các vật liệu trong lò phản ứng hạt nhân. Tiết diện phân hạch rất lớn ở những đồng vị nặng có số A lẻ, nhưng hầu như bằng không ở đồng vị chẵn – chẵn. Ở hai đồng vị hydro,  $H^2$  có tiết diện phản ứng  $n, \gamma$  rất bé so với  $^1H$ , do đó dùng nước nặng làm chậm neutron sẽ giảm bớt tổn thất neutron do hấp thụ. Zircon được chọn làm vỏ bọc thanh nhiên liệu là vì nó ít hấp thụ neutron. Các tạp chất đất hiếm như Gd, Sm trong nhiên liệu phải giảm thiểu tối đa bởi chúng có tiết diện hấp thụ neutron trong phản ứng  $(n, \gamma)$  rất lớn. Mặt khác, có khi chúng lại được đưa vào nhiên liệu như những độc tố cháy được để điều khiển độ phản ứng trong lò phản ứng (chương 4).

#### 1.4.2 Phản ứng bắt neutron phát bức xạ gamma $(n, \gamma)$

Phản ứng  $(n, \gamma)$  có vai trò rất quan trọng trong hoạt động và khai thác lò phản ứng hạt nhân. Trong phản ứng  $(n, \gamma)$ , hạt nhân  $(Z, A)$  hấp thụ neutron biến thành hạt nhân hợp phần  $(Z, A + 1)$  ở trạng thái kích thích với năng lượng bằng năng lượng liên kết neutron cộng với động năng của neutron tới. Hạt nhân hợp phần tồn tại trong thời gian đủ lâu ( $\geq 10^{-17}$  s), để năng lượng kích thích kịp phân bố lại cho các nucleon trong hạt nhân. Sau đó nó sẽ phát ra các tia  $\gamma$  kế tiếp nhau, gọi là tia  $\gamma$  tức thời, để trở về trạng thái cơ bản. Ở trạng thái cơ bản (hoặc trạng thái kích thích trung gian nào đó), hạt nhân  $(Z, A + 1)$  thường là đồng vị phóng xạ, nó phát ra tia  $\beta$  và  $\gamma$  theo quy luật phân rã phóng xạ. Cho nên trên thực tế phản ứng bắt neutron  $(n, \gamma)$  phát ra hai loại tia  $\gamma$ , tia tức thời với năng lượng cao hàng MeV và tia  $\gamma$  đặc trưng của đồng vị phóng xạ được tạo thành trong phản ứng, tia này có năng lượng bé hơn, trên dưới 1 MeV. Với đặc điểm trên, phản ứng  $(n, \gamma)$  được sử dụng rộng rãi để nghiên cứu năng phổ hạt nhân ở vùng năng lượng kích thích cao. Phản ứng bắt neutron cũng được sử dụng để điều chế đồng vị phóng xạ và phân tích kích hoạt trên lò phản ứng.

Sau đây là hai thí dụ minh họa vai trò phản ứng  $(n, \gamma)$  trong lò phản ứng hạt nhân.

- Phản ứng (n,  $\gamma$ ) trên hạt nhân  $U^{238}$



Phản ứng trên tạo ra hai đồng vị phóng xạ  $U^{239}$  và  $Np^{239}$ , sau khi phân rã sẽ có được  $Pu^{239}$  là một nhiên liệu phân hạch có thể tách riêng ra được sau khi xử lý các thanh nhiên liệu đã cháy. Như vậy, nhiên liệu sau khi cháy trong lò phản ứng sẽ tái sản xuất ra nhiên liệu mới. Hệ số tái sản xuất thường trong khoảng 0,5 – 0,6 trong các lò neutron nhiệt và lớn hơn 1 trong các lò neutron nhanh. Do đó, lò phản ứng neutron nhanh có khả năng tái sản xuất mở rộng nhiên liệu, qua đó đại bộ phận đồng vị  $U^{238}$  chiếm 99,2% trong thiên nhiên sẽ được sử dụng nên không lo nguồn nhiên liệu uranium sẽ sớm bị cạn kiệt.

- Nhiễm độc xenon trong lò phản ứng

$Xe^{135}$  là một sản phẩm phân hạch có tiết diện hấp thụ neutron cực lớn, đến 2,7 triệu barns và chu kỳ bán rã 9,2 giờ. Trong phân hạch  $U^{235}$  đồng vị này chiếm 6,3% tổng các sản phẩm phân hạch. Ngoài ra, nó còn được tạo thành do phân rã của một số sản phẩm phân hạch khác, thí dụ  $I^{135}$  có chu kỳ bán rã 6,7 giờ. Khi lò hoạt động, lượng  $Xe^{135}$  trong lò tích lũy dần và sau một thời gian đạt đến cân bằng (xem 4.3.3). Nhưng khi lò dừng hoạt động, không còn neutron để  $Xe^{135}$  hấp thụ nữa thì nó lại được tạo thêm do phân rã  $I^{135}$  dẫn đến tích lũy  $Xe^{135}$ . Quá trình này có thể ảnh hưởng đến việc nâng lại công suất của lò ngay sau khi lò dừng và được gọi là lò bị nhiễm độc xenon. Do không chú ý đến nhiễm độc xenon sau khi lò dừng nên kịp vận hành lò phản ứng Chernobyl đã để xảy ra tai nạn hạt nhân ở cấp cao nhất theo thang sự cố hạt nhân quốc tế INES (xem chương 8).

### 1.4.3 Hấp thụ cộng hưởng neutron. Công thức Breit–Wigner

Hạt nhân hợp phần tồn tại ở trạng thái kích thích có thời gian sống  $\tau$  và độ rộng về năng lượng  $\Gamma$ , hai đại lượng này liên hệ với nhau theo công thức sau (xem mục 1.2.5)

$$r = \frac{h}{\tau} \quad (1.41)$$

Theo công thức trên,  $\Gamma$  có giá trị như xác suất phân rã của hạt nhân hợp phần trong 1 giây. Vì trên nguyên tắc, hạt nhân hợp phần có thể phân rã theo nhiều kênh khác nhau phát ra các hạt khác nhau như  $\gamma$ ,  $n$ ,  $\alpha$ , nên người ta còn đưa ra khái niệm độ rộng riêng phần cho từng kênh  $\Gamma_\gamma$ ,  $\Gamma_n$ ,  $\Gamma_\alpha$ ... và độ rộng toàn phần của trạng thái kích thích ở hạt nhân hợp phần sẽ là tổng các độ rộng riêng phần đối với từng kênh phân rã

$$\Gamma = \Gamma_\gamma + \Gamma_n + \Gamma_\alpha \dots$$

Tiết diện của phản ứng hạt nhân ( $n, \gamma$ ) được tính theo công thức Breit - Wigner:

$$\sigma_{n,\gamma}(E) = \pi \left( \frac{\lambda}{2\pi} \right)^2 \cdot \frac{\Gamma_n \Gamma_\gamma}{(E - E_R)^2 + (\Gamma/2)^2} \quad (1.42)$$

Cách rút ra công thức này có thể xem trong các sách chuyên khảo về lý thuyết hạt nhân hoặc cơ học lượng tử.

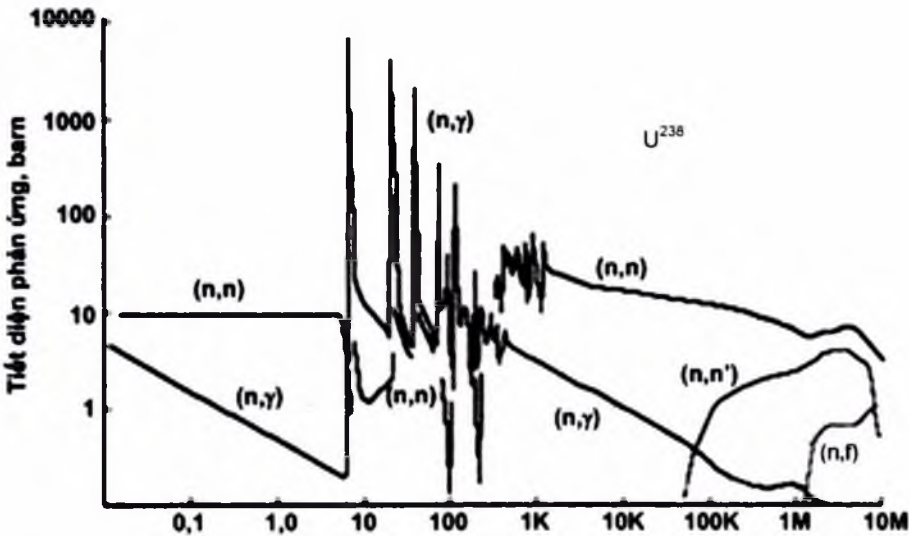
Trong công thức (1.42),  $E$  là động năng và  $\lambda$  là bước sóng của neutron tính theo công thức  $\lambda = 2,86 \cdot 10^{-9} / \sqrt{E}$ . Tiết diện đạt đến cực đại khi năng lượng neutron  $E = E_R$ , khi ấy tiết diện của phản ứng sẽ là:

$$\sigma_{n,\gamma}^0 = 4\pi \left( \frac{\lambda}{2\pi} \right)^2 \cdot \frac{\Gamma_n \Gamma_\gamma}{\Gamma^2} \quad (1.43)$$

$E_R$  chính là năng lượng các mức hạt nhân ở vùng năng lượng liên kết neutron. Khi năng lượng neutron tới  $E = E_R = \frac{\Gamma}{2}$ , tiết diện phản ứng chỉ còn bằng một nửa giá trị cực đại. Tiết diện sẽ giảm rất nhanh khi  $E$  cách xa  $E_R$ , do đó phản ứng ( $n, \gamma$ ) có tính cộng hưởng và  $\Gamma$  được gọi là độ rộng ở giữa độ cao của vạch cộng hưởng.

Năng lượng cộng hưởng  $E_R$  chính là năng lượng các trạng thái kích thích của hạt nhân ở vùng xung quanh năng lượng liên kết neutron. Đối với đồng vị  $U^{238}$  trong lò phản ứng, các mức hạt nhân ở vùng năng

lượng liên kết neutron này thường cách nhau vào khoảng vài chục eV, trong khi độ rộng  $\Gamma$  chỉ vào khoảng hàng chục meV, do đó các cộng hưởng rất nhọn, phân giải khá rõ. Nhưng các mức cộng hưởng sẽ không còn phân giải với nhau mà chồng chập lên nhau khi năng lượng neutron tới lên đến hàng keV đối với những hạt nhân nặng. Hình 1.14 minh họa tiết diện phản ứng  $(n, \gamma)$  trên hạt nhân  $U^{238}$ , phản ứng này đóng vai trò quan trọng trong hoạt động của lò phản ứng hạt nhân. Ở đây, các cộng hưởng phân giải rõ rệt trong vùng năng lượng neutron từ 10 đến 100 eV.



Hình 1.14. Tiết diện các phản ứng hạt nhân  $U^{238}$  với neutron. Vùng cộng hưởng phân giải rõ rệt với năng lượng neutron từ 10 đến 100 eV. Dưới 10 eV, tiết diện phản ứng  $(n, \gamma)$  phụ thuộc vào năng lượng neutron tới theo quy luật  $1/v$ ,  $v$  là vận tốc neutron.

Trong thiết kế các lò phản ứng neutron nhiệt, người ta phải tính toán sao cho năng lượng của neutron được làm chậm không rơi vào vùng cộng hưởng nói trên để tránh mất mát neutron do bị các cộng hưởng này hấp thụ. Tuy nhiên, chính những cộng hưởng này lại góp phần làm ổn định lò phản ứng. Chẳng hạn, khi vì một lý do nào đó hệ số nhân neutron tăng lên, gây nguy cơ tăng tốc phản ứng dây chuyền không kiểm soát được, lúc này nhiệt độ trong vùng hoạt sẽ tăng và neutron sẽ

bị hấp thụ nhiều hơn do hạt nhân  $U^{238}$  dao động nhiệt mạnh hơn trong tinh thể làm cho các vạch cộng hưởng nở rộng ra do hiệu ứng Doppler. Hiện tượng này sẽ được xem xét kỹ ở chương 4.

Ở phần dưới và phần trên vùng cộng hưởng, tiết diện phản ứng  $(n,\gamma)$  không còn "nhấp nhô" nữa mà giảm đều theo quy luật  $1/\sqrt{E}$  hay  $1/v$ . Quy luật này không chỉ xảy ra với hạt nhân  $^{238}U$  mà phổ biến với mọi hạt nhân và có thể suy ra từ công thức Breit – Wigner trên đây (xem sách K. H. Beckurts và Wirtz K., 1964).

Như vậy, ở cách xa các cộng hưởng tiết diện phản ứng  $(n,\gamma)$  càng lớn khi năng lượng neutron tới càng bé. Ý nghĩa vật lý của quy luật này có thể hiểu được nếu chú ý rằng neutron dễ bị hạt nhân bắt hơn khi nó tiếp cận với hạt nhân lâu hơn và vận tốc của nó chậm hơn.

## 1.5 PHẢN ỨNG PHÂN HẠCH VỚI NEUTRON

### 1.5.1 Cơ chế phân hạch

Meitner là người đầu tiên giải thích hiện tượng hạt nhân uranium có thể bị vỡ làm đôi dưới tác dụng của neutron và phát ra năng lượng cực lớn bằng cách sử dụng công thức bán thực nghiệm Weiszäcker (xem 1.2.2).

Trong quá trình hạt nhân bị vỡ làm đôi chỉ có hai thành phần thứ hai và thứ ba trong công thức Weiszäcker là thay đổi, các thành phần còn lại không thay đổi. Hai thành phần này biểu diễn thế năng do sức căng mặt

ngoài  $V_S = a_S A^{2/3}$  và do tương tác Coulomb  $V_C = a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}}$ . Giả thiết hai mảnh vỡ bằng nhau, khi ấy năng lượng  $Q$  phát ra sẽ bằng hiệu thế năng trước và sau phân hạch:

$$Q = V_S(A, Z) + V_C(A, Z) - 2V_S(A/2, Z/2) + V_C(A/2, Z/2)$$

Thay các giá trị của  $a_S = 17,2$  MeV và  $a_C = 0,714$  MeV trong công thức Weiszäcker vào công thức trên sẽ thấy  $Q \cong 190$  MeV, giống như Meitner đã tiên đoán từ 1935. Như vậy, xét về năng lượng, phân hạch uranium hoàn toàn có thể xảy ra trong tự nhiên mà không cần phải có

thêm năng lượng do neutron đưa thêm vào như trong lò phản ứng. Đây là quá trình phân hạch tự phát.

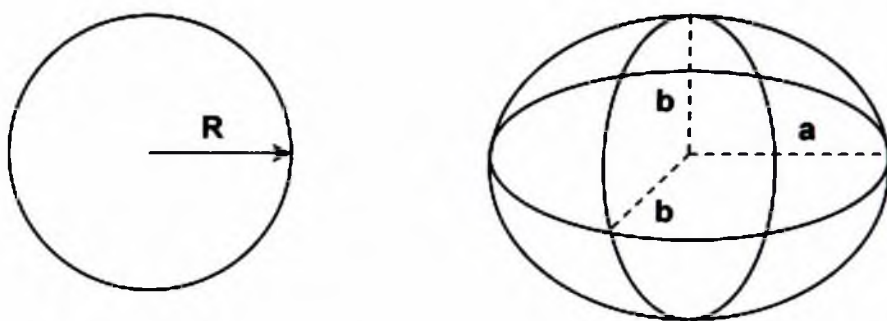
Nhưng phân hạch tự phát chỉ xảy ra với tốc độ rất bé. Các đồng vị lân cận uranium cũng vậy, chúng phân rã  $\alpha$  là chính với hằng số phân rã  $\alpha$  lớn hơn phân rã theo phân hạch tự phát nhiều bậc (bảng 1.3). Hạt nhân  $U^{238}$  phân hạch tự phát với hằng số phân rã hàng triệu lần bé hơn phân rã  $\alpha$ . Như đã nhắc đến ở 1.1.7, Flerov và Petrjak là những người đầu tiên đã khám phá ra hiện tượng phân rã phóng xạ rất chậm này.

**Bảng 1.3. So sánh xác suất phân rã do phân hạch tự phát và phân rã  $\alpha$  của các đồng vị nặng.**

| Đồng vị                | Xác suất phân rã theo các kênh<br>(Đơn vị tính: 1/y) |                      |
|------------------------|------------------------------------------------------|----------------------|
|                        | Phân hạch tự phát                                    | Phân rã $\alpha$     |
| $_{90}\text{Th}^{232}$ | $5,3 \cdot 10^{-19}$                                 | $4,9 \cdot 10^{-11}$ |
| $_{92}\text{U}^{235}$  | $3,6 \cdot 10^{-18}$                                 | $9,7 \cdot 10^{-10}$ |
| $_{92}\text{U}^{238}$  | $1,2 \cdot 10^{-16}$                                 | $1,5 \cdot 10^{-10}$ |
| $_{94}\text{Pu}^{238}$ | $1,4 \cdot 10^{-11}$                                 | $7,7 \cdot 10^{-3}$  |
| $_{94}\text{Pu}^{239}$ | $1,26 \cdot 10^{-16}$                                | $2,8 \cdot 10^{-5}$  |
| $_{94}\text{Pu}^{240}$ | $5,3 \cdot 10^{-12}$                                 | $1,04 \cdot 10^{-4}$ |
| $_{94}\text{Pu}^{242}$ | $9,8 \cdot 10^{-12}$                                 | $2 \cdot 10^{-6}$    |
| $_{95}\text{Am}^{241}$ | $3 \cdot 10^{-15}$                                   | $1,6 \cdot 10^{-3}$  |

Phân hạch tự phát rất chậm vì quá trình này xảy ra theo hiệu ứng đường ngầm qua bức tường thế khi hạt nhân biến dạng từ hình cầu sang hình elipsoit tròn xoay. Quá trình biến dạng này diễn biến như sau. Do có lực đẩy Coulomb giữa các proton, hạt nhân nặng có xu hướng bị biến dạng từ hình cầu bán kính  $r$  sang hình elipsoit tròn xoay với hai trục  $a$  và  $b$  (hình 1.15). Khi ấy các số hạng thứ nhất, thứ tư và thứ năm trong công

thức Weiszäcker không thay đổi, nhưng thế năng liên quan đến sức căng mặt ngoài tăng lên do diện tích bề mặt tăng trong khi thế tương tác Coulomb lại giảm đi do khoảng cách trung bình giữa các proton tăng lên. Hệ quả là trong quá trình biến dạng, hạt nhân sẽ qua một trạng thái trung gian, khi ấy tốc độ biến đổi của tương tác bề mặt và tương tác Coulomb cân bằng nhau. Trạng thái trung gian này được gọi là điểm yên ngựa trên bức tường thế (hình 1.15). Từ đó, tiếp tục biến dạng, giọt chất lỏng hạt nhân sẽ tách làm hai giọt.



Hình 1.15. Giải thích thế năng của hạt nhân hình cầu bị biến dạng thành elipsoit tròn xoay.

Để đơn giản, ta có thể xét giọt chất lỏng cổ điển. Vì thể tích hạt nhân không đổi nên

$$\frac{4\pi}{3}r^3 = \frac{4\pi}{3}ab^2$$

$$a = r(1 + \epsilon), \quad b = r\left(1 + \frac{\epsilon}{2}\right) \quad (1.44)$$

trong đó  $\epsilon$  là thông số đặc trưng cho độ biến dạng.

Đối với hình elipsoit tròn xoay, hai số hạng liên quan đến sức căng mặt ngoài và tương tác Coulomb trong công thức tính năng lượng liên kết Weiszäcker sẽ đổi thành

$$E_S = a_s A^{2/3} \left( 1 + \frac{2}{5} \epsilon^2 + \dots \right)$$

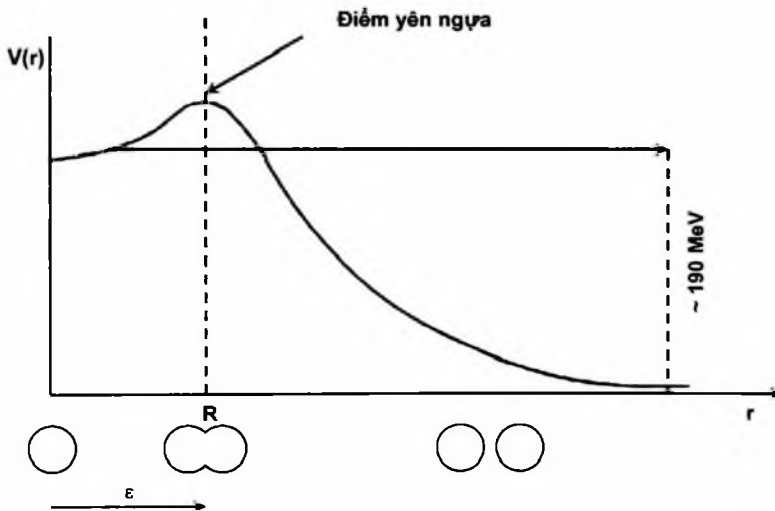
và 
$$E_C = a_c Z^2 A^{-1/3} \left( 1 - \frac{1}{5} \epsilon^2 + \dots \right)$$

nghĩa là thế năng của hạt nhân sẽ thay đổi một lượng

$$\Delta E = \frac{1}{5} \epsilon^2 \left( 2a_s A^{2/3} - a_c Z^2 A^{-1/3} \right) \quad (1.45)$$

tỷ lệ thuận với  $\epsilon^2$ , nghĩa là khi  $\epsilon$  còn bé, thế năng tăng với  $\epsilon$  theo đường parabol (hình 1.16).

Nhưng khi độ biến dạng quá lớn, các công thức khai triển trên sẽ không còn đúng nữa, hạt nhân sẽ bị dẹt lại và sau điểm yên ngựa  $r = R$ , thế năng sẽ giảm, giọt chất lỏng sẽ tách làm đôi, từ đó trở đi thế năng do sức căng mặt ngoài của hai giọt sẽ không thay đổi nhưng tương tác Coulomb sẽ giảm dần. Hình 1.16 minh họa diễn biến của thế năng khi hạt nhân uranium biến dạng, nhưng thay vì dùng thông số biến dạng  $\epsilon$  (chỉ có ý nghĩa với các giá trị  $\epsilon$  bé), trên trục hoành ta dùng khoảng cách giữa hai giọt chất lỏng  $r$ .



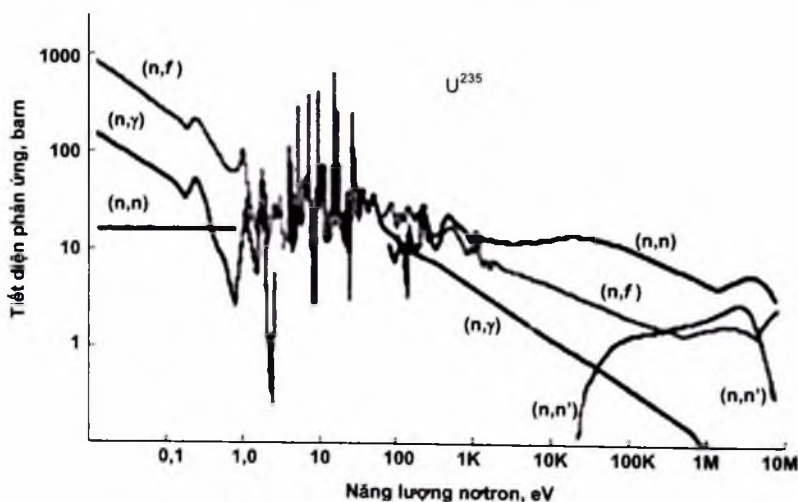
Hình 1.16. Thế năng của hạt nhân uranium theo khoảng cách giữa hai mảnh vỡ khi phân hạch.

Để có thể vỡ làm đôi, hai mảnh vỡ có điện tích phải chui qua được bức tường thế (hình 1.16) theo hiệu ứng đường ngầm. Xác suất chui đường ngầm càng bé khi bức tường thế càng cao. Độ cao bức tường thế tỷ lệ

với tích điện tích của hai mảnh vỡ  $Z_1Z_2$ . Trong trường hợp này, độ cao bức tường thế có giá trị lớn hơn nhiều so với độ cao bức tường thế trong phân rã  $\alpha$  (hình 1.13), từ đó có thể thấy tốc độ phân hạch tự phát bé hơn tốc độ phân rã  $\alpha$  nhiều bậc (bảng 1.3).

Bức tranh sẽ khác hẳn trong phân hạch dưới tác dụng của neutron. Phản ứng với neutron chậm trên hạt nhân  $U^{235}$  sẽ tạo nên hạt nhân hợp phần  $U^{236}$  có năng lượng kích thích lớn hơn năng lượng liên kết (6,5 MeV) đôi chút nhờ có thêm động năng do neutron mang đến. Năng lượng của trạng thái hợp phần lớn hơn độ cao bức tường thế,  $E_F = 6,0$  MeV, do đó hạt nhân  $U^{236}$  sẽ phân hạch mà không bị hạn chế bởi hiệu ứng đường ngầm.

Tuy nhiên, hạt nhân hợp phần  $U^{236}$  ở trạng thái kích thích có thể phân rã theo nhiều kênh phản ứng cạnh tranh nhau, như tán xạ đàn hồi  $(n, n)$ , phi đàn hồi  $(n, n')$ , bắt neutron phát ra tia  $\gamma$   $(n, \gamma)$ , hoặc phân hạch  $(n, f)$ . Hình 1.17 minh họa tiết diện các phản ứng theo năng lượng neutron tới trong trường hợp  $U^{235}$ . Phản ứng phân hạch  $(n, f)$  vẫn áp đảo so với các phản ứng khác, nhất là ở vùng năng lượng neutron nhiệt, phản ứng tán xạ neutron chỉ xảy ra khi năng lượng neutron tới  $> 10$  keV.



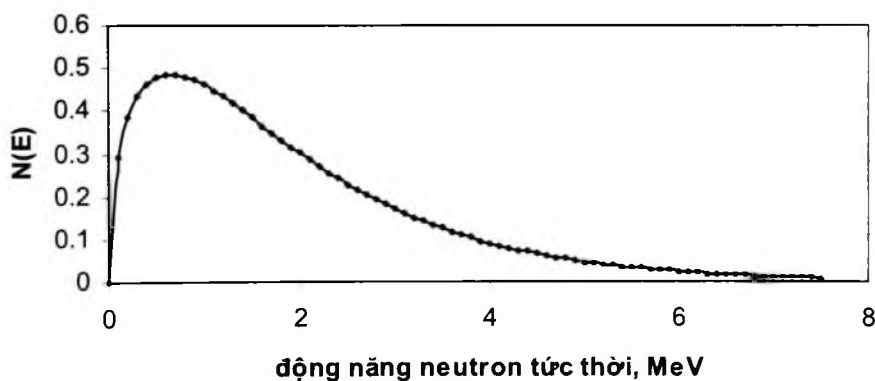
Hình 1.17. Tiết diện các phản ứng hạt nhân của  $U^{235}$  với neutron. Ở vùng neutron nhiệt phản ứng phân hạch  $(n, f)$  có tiết diện lớn nhất.

Với hạt nhân  $U^{238}$  lại có một bức tranh khác nữa. Phản ứng với neutron tạo nên hạt nhân hợp phần  $U^{239}$  ở trạng thái kích thích với năng lượng do neutron mang vào bằng năng lượng liên kết neutron trong  $U^{238}$  (6,0 MeV), thấp hơn độ cao tường thế  $E_F = 7,0$  MeV. Do đó, với neutron tới có năng lượng thấp, phản ứng phân hạch không thể cạnh tranh được với các phản ứng khác, đặc biệt là  $(n, \gamma)$ . Phân hạch chỉ bắt đầu xảy ra khi neutron tới có năng lượng lớn hơn 1 MeV (hình 1.14) để tạo thành hạt nhân hợp phần ở năng lượng lớn hơn 7 MeV.

### 1.5.2 Các sản phẩm phân hạch

Sản phẩm phân hạch bao gồm các mảnh vỡ hạt nhân, neutron, các tia phóng xạ  $\beta$ ,  $\gamma$  và phản neutrino. Hai giọt chất lỏng hạt nhân sau khi tách ra ở trạng thái rất nóng, chúng phát ra neutron và tia  $\gamma$  tức thời. Với hạt nhân  $U^{235}$ , trung bình cứ mỗi phân hạch có 2,46 neutron tức thời phát ra. Chúng có động năng từ 0 đến  $\sim 6$  MeV với hàm phân bố có dạng như trên hình 1.18 và được tính theo công thức:

$$N(E)dE = \sqrt{\frac{2}{\pi e}} \operatorname{sh} \sqrt{2E} e^{-E} \quad (1.46)$$



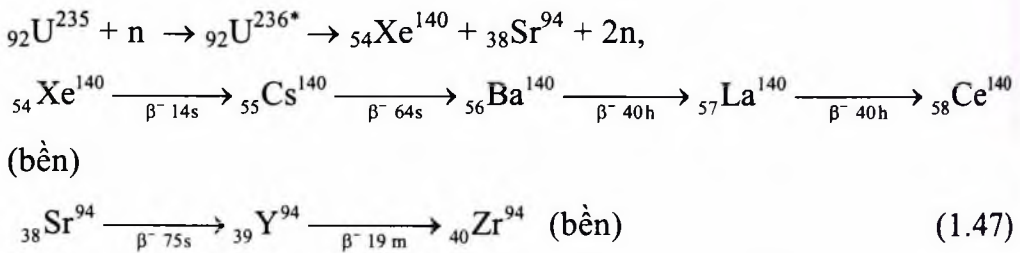
Hình 1.18. Phổ neutron tức thời trong phân hạch  $U^{235}$  dưới tác dụng của neutron nhiệt.

Trong công thức (1.45),  $N(E)dE$  là số neutron tức thời có năng lượng từ  $E$  đến  $E + dE$ , tính theo MeV. Hàm phân bố trên được chuẩn hóa cho một neutron tới, tổng diện tích dưới đường cong bằng 1. Động năng của

neutron tức thời có xác suất cực đại vào khoảng 0,7 MeV và có giá trị trung bình  $\cong 2$  MeV.

Neutron tức thời tán xạ trên những hạt nhân trong vật liệu xung quanh nơi nó sinh ra trong vòng từ 10 đến 100 cm, trong quá trình này năng lượng của nó giảm dần. Cuối cùng, khi biến thành neutron nhiệt, chúng bị những hạt nhân trong vật liệu lò hấp thụ, một số lớn bị hấp thụ theo phản ứng  $(n, \gamma)$  làm mất neutron và phát ra tia  $\gamma$ .

Những mảnh vỡ phân hạch đều thừa neutron nên chúng sẽ phân rã  $\beta^-$  liên tiếp qua các đồng vị cùng số khối, các quá trình này phát ra electron, phản neutrino và tia  $\gamma$  cho đến khi đạt đến đồng vị bền. Chẳng hạn, những mảnh vỡ có  $A = 140$  ( $_{54}\text{Xe}^{140}$ ) và  $A = 94$  ( $_{38}\text{Sr}^{94}$ ) phân rã  $\beta^-$  theo các sơ đồ sau:



Một số mảnh vỡ sau khi phân rã  $\beta^-$  sẽ ở trạng thái kích thích có năng lượng lớn hơn năng lượng liên kết neutron nên sẽ phân rã neutron trễ và trở thành đồng vị  $A - 1$

Nhưng phần lớn, gần 85% năng lượng của phản ứng phân hạch  $\text{U}^{235}$ , tập trung vào động năng hai mảnh vỡ. Do có điện tích và khối lượng lớn, các mảnh vỡ chỉ đi được vài milimet rồi dừng lại, chuyển hết động năng của mình thành nhiệt năng, làm tăng nhiệt độ nhiên liệu lò phản ứng. Các neutron và tia  $\gamma$  tức thời cũng tương tác với vật liệu trong vùng hoạt và biến thành nhiệt. Ngoài ra còn có năng lượng phát ra chậm hơn do phân rã các sản phẩm phân hạch và phản ứng bắt neutron trong quá trình làm chậm. Bảng 1.4 kiểm kê phân bố năng lượng theo các sản phẩm phân hạch của  $\text{U}^{235}$  trong lò phản ứng với neutron nhiệt.

**Bảng 1.4. Năng lượng phân hạch  $U^{235}$  do neutron nhiệt phân bố cho các sản phẩm phân hạch.**

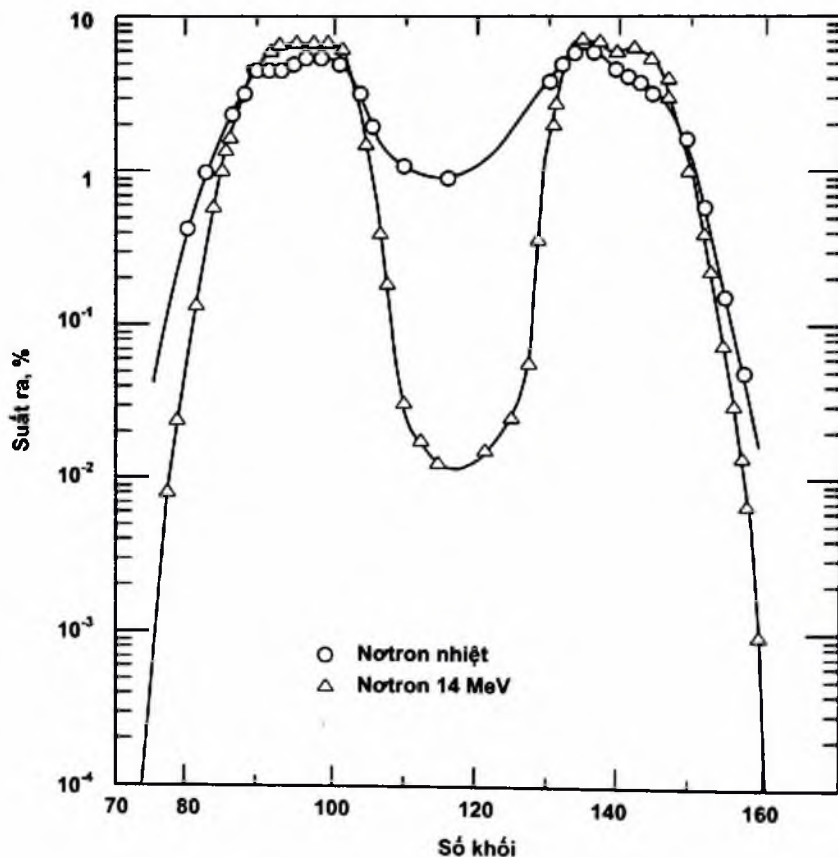
| <i>Nguồn</i>                                                                            | <i>Năng lượng trung bình phát ra, MeV</i> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Năng lượng phát ra tức thời:                                                            |                                           |
| Động năng mảnh vỡ phân hạch                                                             | 169,1                                     |
| Động năng neutron tức thời                                                              | 4,8                                       |
| Năng lượng do tia $\gamma$ tức thời                                                     | 7,0                                       |
| Năng lượng phát ra không tức thời:                                                      |                                           |
| Năng lượng tia $\beta$ do phân rã phóng xạ các mảnh vỡ                                  | 6,5                                       |
| Năng lượng tia $\gamma$ do phân rã phóng xạ các mảnh vỡ                                 | 6,3                                       |
| Năng lượng phát ra do những neutron tức thời không gây ra phân hạch tiếp theo mà bị bắt | 8,8                                       |
| Toàn bộ năng lượng biến thành nhiệt khi lò neutron nhiệt hoạt động                      | 202,5                                     |
| Năng lượng phản neutrino                                                                | 8,8                                       |
| Tổng năng lượng                                                                         | 211,3                                     |

### **1.5.3 Phân bố mảnh vỡ phân hạch theo số khối**

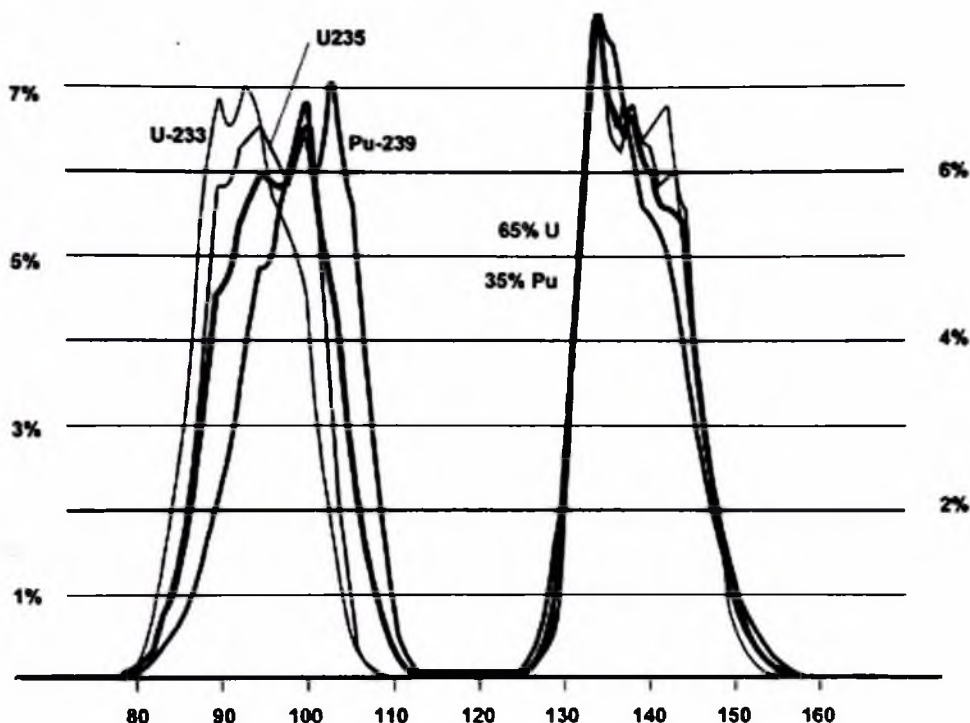
Các mảnh vỡ có số khối quan sát được từ  $A = 72$  đến  $A = 160$ . Tỷ suất phân hạch của chúng (suất ra) trải rộng trong sáu bậc, lớn nhất  $\sim 6\%$  ở hai bướt  $A = 95$  và  $A = 137$  (hình 1.19). Phân bố mảnh vỡ theo số khối có hai bướt hình yên ngựa (bất cân đối) là chuyện khó lý giải. Nếu xem hạt nhân như giọt chất lỏng thì dạng phân bố tối ưu sẽ là cân đối, hai giọt tách ra phải đều nhau, song trên thực tế phân bố cân đối có xác suất gần ba bậc thấp hơn như trên hình 1.19. Trên thực tế, chừng nào neutron tới có động năng đủ bé khiến hạt nhân hợp phần  $^{236}\text{U}$  không quá nóng thì các trạng thái đơn hạt của nucleon và đặc biệt, cấu trúc bền chặt của chúng liên quan đến số kỳ ảo trong hạt nhân trung gian sau khi qua điểm yên ngựa, vẫn có xu hướng được duy trì. Do đó, những mảnh

vỡ với số nucleon kỳ ảo kép  $Z = 50$ ,  $N = 82$  vẫn được ưu tiên phát ra. Đó chính là bước thứ hai trên hình phân bố 1.19.

Có bằng chứng thực nghiệm hỗ trợ cho cách lý giải định tính trên. Thứ nhất, khi động năng neutron tới tăng lên, chẳng hạn khi chiếu  $U^{235}$  bằng neutron nhanh có năng lượng 14 MeV, hạt nhân hợp phần  $U^{236}$  sẽ nóng hơn rất nhiều và phân bố mảnh vỡ sẽ có xu hướng cân đối hơn, như trên hình 1.19. Thứ hai, hình phân bố mảnh vỡ từ các hạt nhân phân hạch có số khối tăng dần từ  $U^{233}$  đến  $Pu^{239}$  đều có hai bước. Trong khi vị trí bước thứ hai hầu như giữ nguyên tại  $A = 132$  đối với mọi hạt nhân phân hạch, thì bước thứ nhất lại dịch về hướng "nặng" hơn khi số khối của hạt nhân phân hạch tăng lên (hình 1.20).



Hình 1.19. Phân bố mảnh vỡ phân hạch  $U^{235}$  với neutron nhiệt và neutron nhanh 14 MeV.



Hình 1.20. Phân bố mảnh vỡ trong phản ứng phân hạch  $U^{233}$ ,  $U^{235}$ ,  $Pu^{239}$  do neutron nhiệt. Phân bố nào cũng có hai bướu, trong khi bướu thứ nhất dịch chuyển về hướng tăng số khối từ  $U^{233}$  đến  $U^{235}$  và  $Pu^{239}$  thì bướu thứ hai vẫn giữ nguyên vị trí quanh số nucleon kỳ ảo kép với  $A = 132$  (Nguồn: Wikipedia, Nuclear fission product).

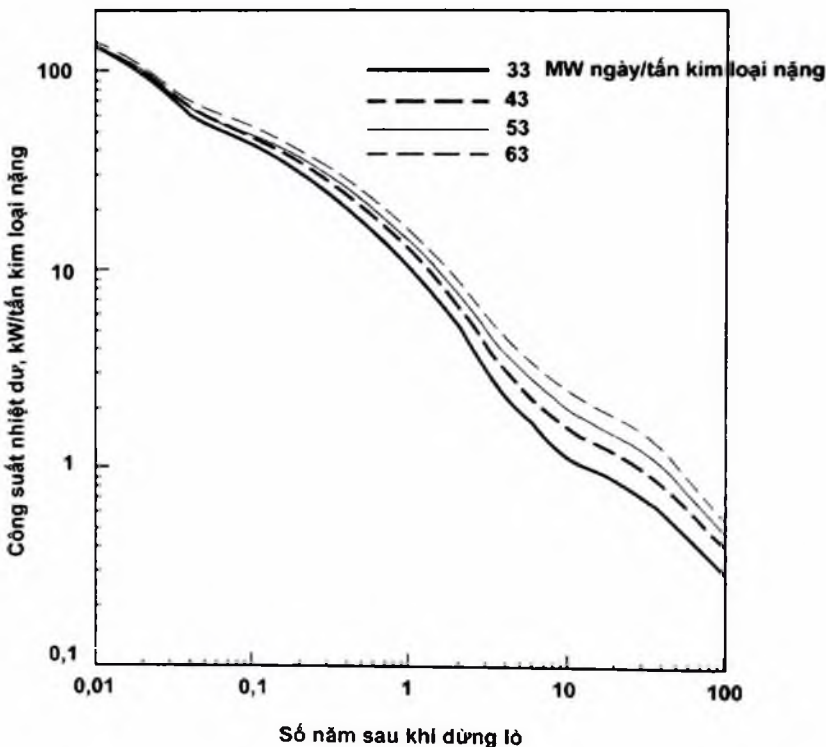
#### 1.5.4 Nhiệt dư trong lò phản ứng

Như vừa trình bày ở trên, phân rã phóng xạ của các mảnh vỡ phân hạch tạo nên nhiệt còn dư bằng 6,5% tổng công suất nhiệt sau khi lò phản ứng dừng hoạt động. Với một lò phản ứng thông thường có công suất nhiệt 3 000 MW, lượng nhiệt dư sẽ còn khoảng 200 MW ngay sau khi lò dừng hoạt động. Nhưng nhiệt còn dư giảm đi khá nhanh, còn lại 1,5% công suất lò sau 1 giờ, 0,4% sau một ngày và 0,2% sau một tuần lễ. Dù sao lượng nhiệt còn dư vẫn rất lớn đòi hỏi phải tải nhiệt liên tục trong nhiều năm sau khi lò dừng hoạt động để tránh cho các thanh nhiên liệu khỏi bị nóng chảy. Không tải được nhiệt còn dư này là nguyên nhân trực tiếp dẫn đến nóng chảy thanh nhiên liệu trong các tai nạn điện hạt nhân lớn như Three Mile Island (1979) và Fukushima (2011).

Rất khó đi đến một công thức giải tích tổng quát cho nhiệt còn dư phụ thuộc vào thời gian sau khi lò dừng hoạt động bởi có quá nhiều mảnh vỡ phân hạch với chu kỳ bán rã rất khác nhau, tỷ suất của chúng lại phụ thuộc vào lịch trình vận hành lò và thành phần cấu tạo của nhiên liệu. Có thể sử dụng công thức giải tích gần đúng tương đối đơn giản sau đây cho thời gian từ 10 giây cho đến 100 ngày sau khi dừng lò:

$$\frac{P}{P_0} = 0,066 \left( (\tau - \tau_s)^{-0,2} - \tau^{-0,2} \right) \quad (1.48)$$

trong đó,  $P_0$  là công suất nhiệt của lò khi dừng,  $P$  là công suất nhiệt còn dư ở thời điểm  $\tau$  tính từ khi lò bắt đầu hoạt động,  $\tau_s$  là khoảng thời gian từ lúc lò bắt đầu hoạt động cho đến khi dừng, thời gian đo bằng s.



Hình 1.21. Nhiệt do phân rã phóng xạ (kW/tán kim loại nặng) của lò phản ứng dùng uranium có độ giàu thấp sau khi dừng lò từ 0,01 năm (4 ngày) đến 100 năm. Tính cho bốn kịch bản khác nhau căn cứ theo độ sâu cháy trên một tấn kim loại nặng của nhiên liệu (The International Panel on Fissile Materials <http://www.fissilematerials.org>).

Với những khoảng thời gian dài hơn có thể dùng đồ thị hình 1.21 để ước tính nhiệt dư. Trong 100 năm đầu sau khi dừng lò, phóng xạ của nhiên liệu đã cháy chủ yếu do mảnh vỡ phân hạch, trong đó  $\text{Sr}^{90}$  và  $\text{Cs}^{137}$  với chu kỳ bán phân rã  $\sim 30$  năm sẽ đóng góp phần lớn. Sau vài trăm năm, các đồng vị siêu uranium như plutonium, americium, neptunium và curium sẽ đóng góp phần chủ yếu.

### **TÀI LIỆU THAM KHẢO**

1. Grant F. D. et al., (2008). Skeletal PET with  $\text{F}^{18}$ -Fluoride: Applying New Technology to an Old Tracer. The Journal of Nuclear Medicine 49, 68–78.
2. Beckurts K. H. & Wirtz K., Neutron Physics, Springer –Verlag, 1964.
3. The International Panel on Fissile Materials <http://www.fissilematerials.org>
4. C. M. Lederer and V. S. Shirley, Table of Isotope, 7<sup>th</sup> edition, a Wiley Interscience Publication.



# 2

## Phóng xạ trong vũ trụ và Trái Đất

Phóng xạ có khắp nơi. Tia phóng xạ từ các nuclit  $K^{40}$ ,  $U^{238}$ ,  $U^{235}$  và  $Th^{232}$  trong đất đá luôn chiếu lên con người bất luận ở ngoài trời, trong nhà, hay dưới lòng đất. Bay trên cao mười nghìn mét con người lại bị phóng xạ do tia vũ trụ. Ngồi trong một boong ke có thể hấp thụ hết các tia phóng xạ do đất đá bên ngoài và do tia vũ trụ bên trên, tia phóng xạ vẫn chiếu vào các nội tạng từ đồng vị  $K^{40}$  luôn có mặt cùng với nguyên tố Kali (K) trong chính cơ thể mình. Trung bình trong cơ thể mỗi người có 40 mg  $K^{40}$ , cứ mỗi giây phân rã 12 000 lần, tia  $\beta$  chiếu lên các mô bên trong cơ thể có thể mất hết năng lượng, nhưng tia  $\gamma$  năng lượng 1 460 keV sau khi chiếu lên các mô vẫn còn đủ khả năng xuyên qua cơ thể để chiếu lên cơ thể người bên cạnh. Những kịch bản không mong muốn này là mặc định từ thiên nhiên, không sao tránh được. Hậu quả là trên thực tế từ ngàn đời nay, con người luôn chung sống với tia phóng xạ và chính nó có thể góp một phần nào đó trong xác suất gây ra ung thư không rõ căn nguyên.

Sẽ có người than: Thượng đế đã sinh ra con người, sao lại còn sinh ra phóng xạ!

Không, phóng xạ có trước, chính nhờ có phóng xạ và phản ứng hạt nhân mới có vũ trụ, Mặt Trời, Trái Đất cùng với hàng trăm nguyên tố, hàng nghìn đồng vị tạo nên tự nhiên, rồi cuối cùng mới có con người chúng ta. Nếu thu gọn tuổi vũ trụ lại trong một ngày thì con người *homo sapien* chỉ xuất hiện trong chớp

nhoáng ở giây cuối cùng để thừa hưởng tất cả những gì mà tạo hóa đã nhào nặn nên từ khởi thủy bằng phản ứng hạt nhân và phân rã phóng xạ.

Con người chìm đắm trong bể phóng xạ ấy hàng vạn năm mà không hề hay biết mãi cho đến những năm cuối cùng của thế kỷ XIX mới phát hiện ra nó, rồi nhờ nó mới phát hiện ra hạt nhân nguyên tử, rồi từ đây bắt đầu cuộc hành trình vào thế giới vi mô, săn tìm các cấu trúc ngày càng bé, những đơn vị tận cùng cấu tạo nên vật chất. Thật kỳ lạ, chính trên hành trình săn tìm cái vô cùng bé con người gặp lại vũ trụ vô cùng lớn và ngọn nguồn xa xưa của nó trước đây hàng chục tỷ năm. Khoa học hạt nhân nguyên tử – phóng xạ đã tìm đến nơi hội tụ của các "vô cùng" trong chiều kích không gian và thời gian: vô cùng bé như siêu dây kích thước  $10^{-35}$  m và vô cùng lớn của vũ trụ kích thước  $10^{+21}$  m, hai cái vô cùng cách nhau đến những 56 bậc đại lượng!

## 2.1 NGUYÊN TỐ VÀ ĐỒNG VỊ SINH RA TỪ ĐÂU, VÀ TỪ LÚC NÀO?

Các phản ứng hóa học và sự biến hóa giữa các thể vật chất chỉ động chạm đến electron ở các lớp ngoài cùng của nguyên tử. Năng lượng trao đổi trong các quá trình này tính cho từng nguyên tử thường không quá vài chục eV, hàng triệu lần ít hơn so với năng lượng trong các phản ứng hạt nhân và phân rã phóng xạ. Phản ứng giữa các nguyên tố hóa học trong những điều kiện môi trường khác nhau tạo nên hàng triệu hợp chất hóa học, hoặc sẵn có trong tự nhiên, hoặc do con người tổng hợp nên trong các phòng thí nghiệm và xưởng hóa chất. Nhưng không có phản ứng hóa học nào biến được nguyên tố này thành nguyên tố khác.

Chương 1 cho thấy các nguyên tố và đồng vị đứng sau uranium hình thành được nhờ có phản ứng hạt nhân và phân rã phóng xạ. Còn những nguyên tố và đồng vị từ uranium về trước thì sao? Cũng vậy, tất thảy đều được tạo ra bằng phản ứng hạt nhân và phân rã phóng xạ trong quá trình hình thành vũ trụ, thiên hà, và các vì sao hàng tỷ năm về trước.

Bằng chứng là thành phần nguyên tố và đồng vị trong vỏ Trái Đất có nhiều đặc điểm rất giống thành phần nguyên tố và đồng vị trên mặt trời, ở các vì sao và thiên thạch. Những đặc điểm này có nguồn gốc từ cấu trúc hạt nhân và năng lượng liên kết các nucleon trong hạt nhân, như đã bàn đến ở chương trước.

### **2.1.1 Big Bang và vũ trụ giãn nở**

Big Bang đánh dấu sự kiện vũ trụ bắt đầu giãn nở đột ngột từ một khối năng lượng có kích thước rất bé, nên cực kỳ nóng và đậm đặc, cách nay 13,7 tỷ năm. Một vũ trụ với kích thước vô cùng bé, tại đó độ cong của không-thời gian trở nên vô hạn chính là điểm kỳ dị (singularity) trong phương trình tương đối tính tổng quát do Einstein tìm ra năm 1915. Năm 1922, nhà vật lý người Nga Friedman đưa ra hai giả thiết đơn giản để giải phương trình Einstein. Friedman xem vũ trụ đẳng hướng và đồng nhất theo mọi góc và mọi vị trí quan sát, từ đó chứng minh rằng vũ trụ không tĩnh như Einstein và nhiều người đương thời khác quan niệm, mà giãn nở không ngừng. Vũ trụ nguyên khởi bắt đầu giãn nở và nguội đi sau Big Bang, qua đó năng lượng biến hóa thành các hạt sơ cấp nhất, từ đó mới tạo nên neutron, proton, những hạt nhân nặng hơn, rồi đến nguyên tử gồm hạt nhân liên kết với electron. Vũ trụ nguội dần cũng sinh ra các thiên hà và thiên thể. Trong Thiên hà của chúng ta xuất hiện Mặt Trời, Trái Đất và con người.

Thuyết giãn nở vũ trụ sau Big Bang được chấp nhận rộng rãi sau nhiều bằng chứng thực nghiệm có tính đột phá lớn ở thế kỷ trước. Trước hết là khám phá ra quy luật giãn nở vũ trụ của Hubble năm 1929, theo đó các thiên hà chuyển động ra xa nhau với vận tốc tỷ lệ thuận với khoảng cách giữa chúng. Vận tốc này đo được từ dịch chuyển các vạch quang phổ về phía đỏ do hiệu ứng Doppler.

Khám phá quan trọng thứ hai thuộc về Penzias và Wilson. Năm 1965 hai nhà vật lý này đã ghi nhận được bức xạ vi ba nền (CBM) với tần số vào khoảng 160 GHz phát đi từ khoảng không giữa các thiên hà và thiên thể với cường độ đẳng hướng. CBM được xem là dấu tích phát xạ

của vũ trụ như vật đen tuyệt đối đã nguội đến  $\sim 3\,000\text{ K}$  ( $\sim 0,25\text{ eV}$ ) sau Big Bang khoảng  $380\,000$  năm, khi các nguyên tử gồm hạt nhân và electron bắt đầu hình thành. Lúc này năng lượng của photon đã xuống quá thấp nên electron và proton đã có thể "yên ổn" kết hợp với nhau để tạo thành nguyên tử trung hòa mà không bị ion hóa, còn photon đã trở thành hạt "tự do" không vướng vào nhiệm vụ truyền tương tác giữa các hạt tích điện như trước đó nữa. Nói một cách hình ảnh, lúc này vũ trụ đã bắt đầu trong sáng do có các photon tự do. Tuy nhiên, vì từ đó trở đi vũ trụ tiếp tục giãn nở nên CBM ghi được chính là bức xạ đã bị dịch chuyển về phía đỏ, tần số giảm đi hơn  $1\,000$  lần và nằm trong vùng sóng viba.

Những gì xảy ra trong thời gian rất ngắn sau Big Bang có thể được mô tả theo mô hình chuẩn các hạt sơ cấp, mô hình này bao gồm các quark, lepton, và các boson làm nhiệm vụ trao đổi tương tác giữa chúng. Mới đây việc tìm ra hạt Higg boson có khối lượng  $125\text{ GeV}$  trên máy gia tốc đối chùm hadron khổng lồ tại CERN tựa hồ như đã lấp lỗ trống cuối cùng và đầy thách thức trong mô hình chuẩn, qua đó có thể giải thích cơ chế tạo nên khối lượng của vật chất. Cả thuyết Big Bang và mô hình chuẩn chưa thể xem là bức tranh hoàn chỉnh của cấu trúc vật chất từ thang độ hạ nguyên tử đến vũ trụ, nhưng cả hai đều được chấp nhận khá rộng rãi hiện nay.

Quy mô giãn nở vũ trụ sau Big Bang có thể hình dung qua công thức liên hệ mật độ vật chất  $\rho$  và nhiệt độ  $T$  với khoảng thời gian  $t$  kể từ khi bắt đầu giãn nở:

$$\begin{aligned}\rho(\text{g.cm}^{-3}) &= \frac{4,5 \cdot 10^5}{t^2} \\ T(\text{K}) &= \frac{5 \cdot 10^{10}}{\sqrt{t}}\end{aligned}\tag{2.1}$$

Ở mỗi thời điểm nhất định, khi đạt đến trạng thái cân bằng nhiệt, năng lượng được phân bố đều cho các mức tự do trong chuyển động nhiệt. Năng lượng chuyển động nhiệt tính trên thang eV của hạt tỷ lệ với nhiệt độ  $T$  theo công thức:

$$E = k_B T \quad (2.2)$$

trong đó  $k_B$  là hằng số Boltzman,  $k_B = 8,617 \cdot 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}$ .

Một đơn vị cấu trúc vật chất nào đó như neutron, proton, hạt nhân hay nguyên tử... chưa thể sinh ra khi năng lượng liên kết bên trong cấu trúc đó còn bé hơn năng lượng chuyển động nhiệt. Lẽ đơn giản là khi đó chuyển động nhiệt sẽ phá ngay cấu trúc liên kết ấy. Dựa trên nguyên tắc này và các công thức (2.1), (2.2) ta có thể xét đoán các đơn vị cấu trúc nào có thể tạo ra trong quá trình giãn nở của vũ trụ.

Trong khoảng thời gian rất ngắn  $< 10^{-12} \text{ s}$  sau Big Bang khi mà nhiệt độ vẫn chưa hạ thấp hơn  $10^{13} \text{ K}$ , vũ trụ chứa đầy quark, lepton, và boson là những hạt sơ cấp nhất không chia nhỏ được nữa theo những hiểu biết cho đến hiện nay. Các boson làm nhiệm vụ chuyển tải các tương tác, trong số này có cả photon làm nhiệm vụ chuyển tải tương tác giữa các hạt tích điện. Với nhiệt độ còn quá cao lúc này, năng lượng chuyển động nhiệt không cho phép các hạt sơ cấp liên kết với nhau tạo thành những cấu trúc phức tạp hơn.

Trước khoảng thời gian  $\cong 10^{-6} \text{ s}$ , nhiệt độ hạ xuống còn khoảng  $10^{12} \text{ K}$  và động năng chuyển động nhiệt của các hạt (công thức 2.2) hạ xuống còn khoảng  $100 \text{ MeV}$ , các hạt quark tự do qua trao đổi với các gluon tạo thành meson và barion, mà neutron và proton là những thành phần nhẹ nhất trong số các barion này. Số lượng neutron và proton gần tương đương nhau. Nhiệt độ lúc này còn quá cao để các nucleon tạo thành hạt nhân.

Sau Big Bang  $10^{-1} \text{ s}$  nhiệt độ hạ xuống còn  $10^{10} \text{ K}$ , lúc này neutron và proton đạt được trạng thái cân bằng nhiệt do chuyển hóa lẫn nhau qua các quá trình tương tác yếu có sự tham gia của các neutrino  $\nu_e$  và phản neutrino  $\bar{\nu}_e$  như công thức



Sau Big Bang 1 s, nhiệt độ hạ xuống còn  $10^9$  K hay  $\sim 1$  MeV, tương đương hiệu khối lượng giữa neutron và proton ( $m_n - m_p \approx 1,3 \text{ MeV}/c^2$ ). Do neutron có khối lượng lớn hơn, phân bố Boltzman lệch về phía proton khiến proton ngày càng nhiều hơn neutron. Thêm vào đó, neutron mất bớt do phân rã  $\beta^-$ . Cán cân khối lượng giữa hai hạt lúc này là 76% proton và 24% neutron. Ngoài ra trong vũ trụ lúc này còn có một lượng lớn photon, electron, neutrino và các phản hạt của chúng.

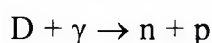
### 2.1.2 Tổng hợp hạt nhân nhẹ sau Big Bang (BBN). Thuyết $\alpha\beta\gamma$

BBN (Big Bang Nucleosynthesis) xảy ra trong khoảng thời gian từ vài phút cho đến vài chục phút sau Big Bang. Trong khoảng thời gian này một số hạt nhân nhẹ nhất như  $^2\text{H}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^7\text{Li}$  được tạo ra từ những phản ứng giữa neutron với proton và phân rã phóng xạ của neutron. Alfer, Gamov và sau đó thêm cả Bethe, là những người khởi xướng ra lý thuyết BBN từ những năm 1940, do đó lý thuyết này còn được gọi là  $\alpha\beta\gamma$  (chữ cái Hy Lạp của tên ba tác giả).

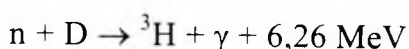
Với năng lượng chuyển động nhiệt khoảng 1 MeV, neutron tương tác với proton tạo thành hạt nhân deuterium (D hay  $^2\text{H}$ ) theo phương trình:



Về nguyên tắc, hạt nhân D mới tạo thành có thể bị mất đi do phản ứng quang ly (photo-dissociation)



nếu photon có năng lượng cao hơn 2,22 MeV. Tuy nhiên, lúc này năng lượng photon trong môi trường đã thấp hơn rất nhiều nên phản ứng quang ly không thể xảy ra nhờ đó hạt nhân D, cấu trúc vật chất phức tạp đầu tiên, đã có thể tồn tại bền vững. Hạt nhân D hấp thụ neutron và proton tạo thành tritium ( $^3\text{H}$  hay T) và hạt nhân helium-3 ( $^3\text{He}$ ):



Tiếp theo, đồng vị bền  $\text{He}^4$  được tạo ra từ các phản ứng  $\text{H}^3 + \text{p}$ ,  $\text{He}^3 + \text{n}$ ,  $\text{He}^3 + \text{H}^2$ ,  $\text{D} + \text{D}$ . Đồng vị nặng hơn,  $\text{Li}^7$ , cũng có thể được tạo ra trong thời gian này theo phản ứng ghép:



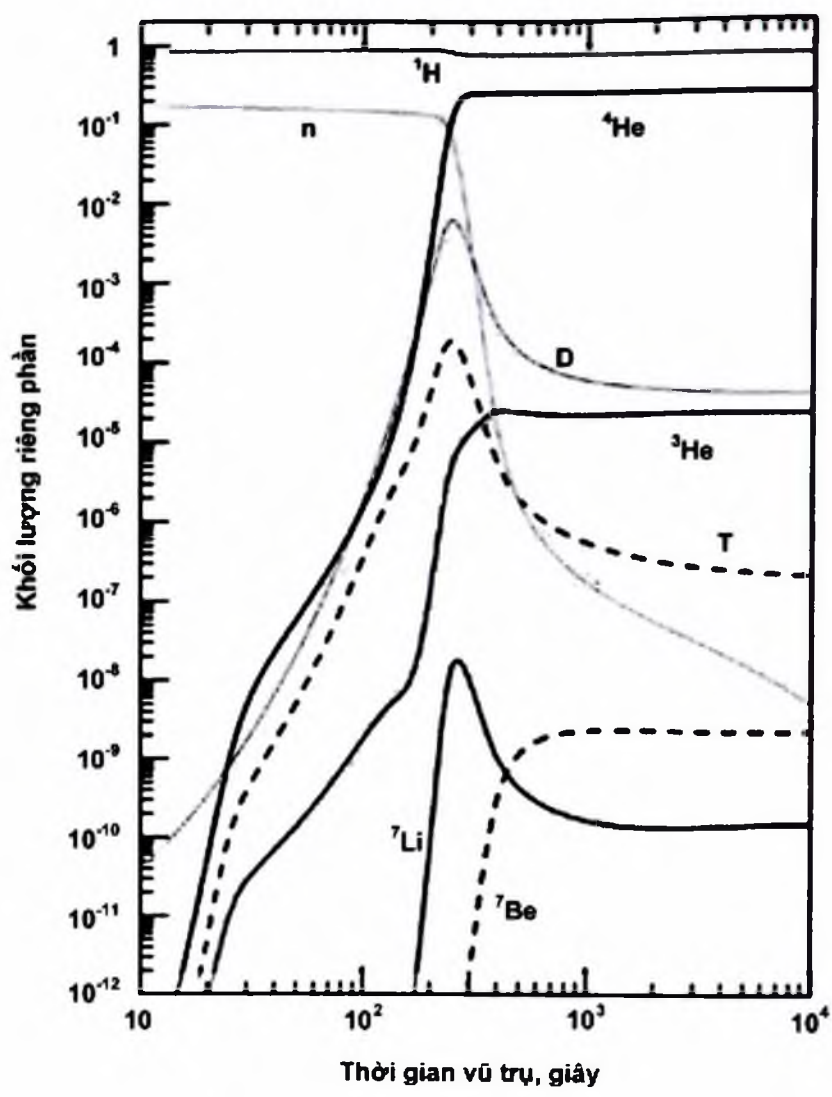
Tuy nhiên, Li mới được tạo ra sẽ nhanh chóng bị hủy bởi phản ứng với proton:



Những phản ứng trên chỉ xảy ra trong vòng chưa đầy nửa giờ sau Big Bang, sau đó do nhiệt độ giảm và hàng rào thế Coulomb cao nên những phản ứng tổng hợp tiếp theo không thể xảy ra. Về khối lượng, lúc này vũ trụ chứa  $\cong 76\%$  H,  $24\%$   $\text{He}^4$ ,  $0,01\%$  D và một lượng rất không đáng kể  $\text{Li}^7$ ,  $\text{Be}^8$ . Kết quả tính toán (hình 2.1) cho thấy hàm lượng các hạt nhân nhẹ tăng vọt sau  $\sim 100$  giây. Từ lúc này trở đi số lượng neutron tự do giảm đi rất nhanh trong khi lượng  $\text{He}^4$  tích lũy được từ các phản ứng hạt nhân đã đạt đến cân bằng, vào khoảng ba lần ít hơn so với proton. Lượng các hạt nhân nhẹ khác cũng đi vào ổn định.

### 2.1.3 Phân rã $\beta^-$ của neutron tự do

Phản ứng hạt nhân và phân rã phóng xạ đã tạo nên các nguyên tố và đồng vị trong suốt quá trình tiến hóa của vũ trụ sau Big Bang. Trong số các phân rã phóng xạ, phân rã  $\beta^-$  của neutron tự do có vị trí đặc biệt bởi nó làm thay đổi tương quan neutron–proton cần thiết cho những phản ứng tổng hợp hạt nhân nhẹ có thể xảy ra trong vòng vài chục phút sau Big Bang. Nếu giả sử thời gian sống của neutron ngắn hơn đôi chút so với giá trị đo được,  $\tau_n \cong 15$  phút, thì ba phút sau Big Bang neutron đã không còn đủ để ghép với proton tạo thành  $\text{He}^4$ ,  $\text{H}^2$ ... và sau đó là cả thế giới vật chất như ta thấy ngày nay. Cho nên thời gian sống của neutron ( $\tau_n$ ) đối với phân rã  $\beta^-$  có ảnh hưởng khá quyết định đến lượng sản phẩm tạo ra trong BBN. "Ai" quyết định chuyện này để vũ trụ được hình thành theo toàn bộ lộ trình tiếp theo, điều này thật khá bí ẩn!

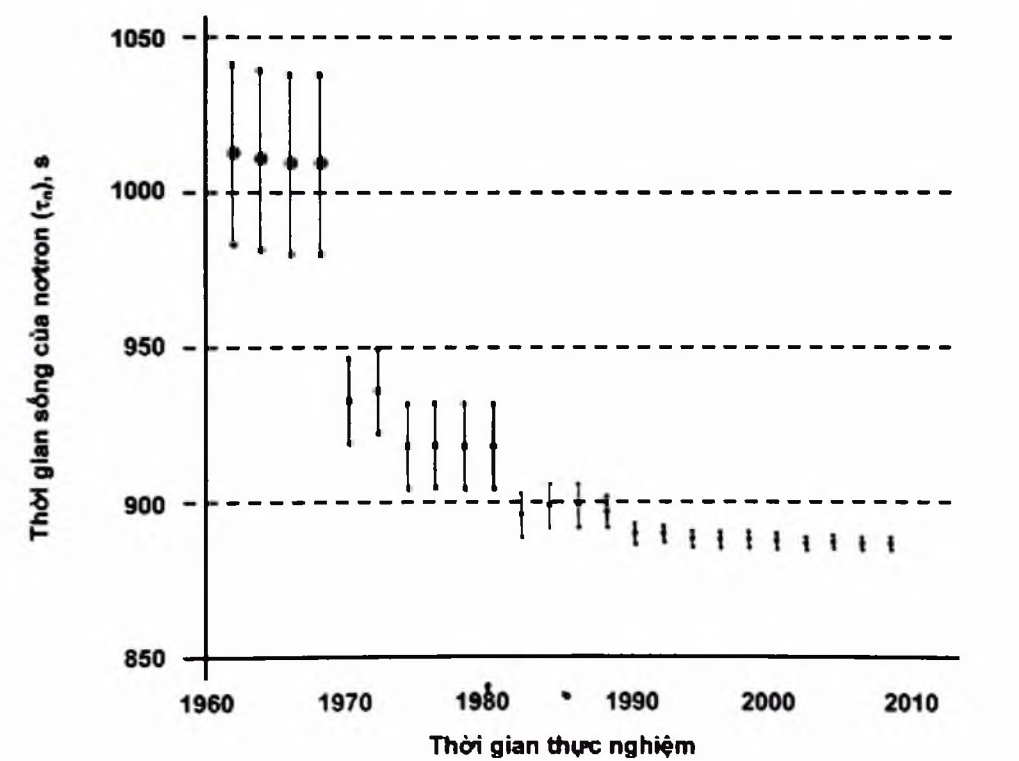


Hình 2.1. Diễn biến hàm lượng hạt nhân nhẹ so với proton trong thuyết BBN (Nguồn: Weiss Achim, Einstein Online).

Cụ thể, tỷ số khối lượng  $^4\text{He}/\text{H}$  tạo thành sau BBN phụ thuộc rất nhiều vào trị số và sai số của  $\tau_n$ . Vì vậy xác định chính xác thời gian sống của neutron có ý nghĩa quyết định trong lý thuyết BBN. Nhưng đây là bài toán thực nghiệm rất khó trong vật lý hạt nhân. Rất nhiều thí nghiệm đã tiến hành trong bốn thập kỷ qua và sai số kết quả đo đã giảm đi rất nhiều (hình 2.2), song vẫn chưa vừa lòng các nhà khoa học. Những kết

quả mới nhất sử dụng hai kỹ thuật khác nhau là chùm neutron lạnh ( $T \cong 20\text{ K}$ , vận tốc neutron khoảng vài nghìn  $\text{m.s}^{-1}$ ), hoặc nhốt neutron siêu lạnh trong bình ( $T \cong \text{mK}$ , vận tốc neutron khoảng vài  $\text{m.s}^{-1}$ ). Neutron siêu lạnh phản xạ toàn phần ở mọi góc tới, nhờ đó người ta có thể nhốt nó trong bình để theo dõi quá trình phân rã của chúng. Trong kỹ thuật chùm neutron siêu lạnh, người ta đo số proton do neutron biến thành khi phân rã  $\beta^-$  trên đường bay, từ đó tính ra chu kỳ bán rã của neutron.

Những kết quả đo thời gian sống neutron tự do trước năm 2004 đã chụm lại ở  $\tau_n = (885,7 \pm 0,08)\text{ s}$ , tuy nhiên, ngay sau đó Serebrov và cộng sự sử dụng kỹ thuật neutron siêu lạnh đã đưa ra một kết quả thực nghiệm khác với giá trị trên đến 8 sai số chuẩn,  $\tau_n = (878,5 \pm 1)\text{ s}$ , có nghĩa là neutron tự do sống bao lâu vẫn còn là câu hỏi chưa có lời kết.



Hình 2.2. Sai số trong kết quả đo thời gian sống củaneutron được cải thiện đáng kể trong bốn thập kỷ gần đây.

#### 2.1.4 Tổng hợp hạt nhân trong quá trình tiến hóa của các thiên thể (stellar nucleosynthesis)

BBN chỉ xảy ra trong khoảng thời gian rất ngắn nên các hạt nhân nặng hơn He vẫn chưa thể tổng hợp được. Phải đợi đến khi các sao hình thành với nhiệt độ trong vùng trung tâm tăng dần đến trên  $10^6$  K trong thời gian dài, hàng tỷ năm, các hạt nhân nặng hơn mới có điều kiện hình thành qua cơ chế phản ứng ghép nhiệt hạch. Cũng chính những phản ứng này sẽ giải tỏa năng lượng để duy trì sự tồn tại của các sao trước khi chúng suy tàn.

Sau BBN, vũ trụ với thành phần vật chất chính là H và một ít  $\text{He}^4$  vẫn tiếp tục giãn nở. Tuy nhiên, ở những vùng có mật độ vật chất cao hơn nơi khác, quá trình giãn nở có thể bị chậm lại do lực hút hấp dẫn thắng thế làm cho kích thước của chúng ngày càng co lại. Hiện tượng này được gọi là sự suy sụp bởi lực hấp dẫn đã dẫn đến sự hình thành các thiên hà.

Những cụm bụi khí đậm đặc bên trong các thiên hà, gọi là các tinh vân, cũng sẽ co lại bởi lực hấp dẫn của chính nó. Trong quá trình này các tinh vân cũng hút thêm bụi khí ở vùng xung quanh, và theo thời gian sẽ làm cho khối tinh vân quay xung quanh mình nó, tốc độ quay ngày càng tăng dần do khối tinh vân ngày càng co lại. Cuối cùng khối khí đậm đặc này sẽ trở thành một đĩa quay với vật chất bị hút vào và nén mạnh ở vùng trung tâm nên ngày càng nóng lên, từ đó bắt đầu hình thành các sao giống như Mặt Trời. Những bụi khí còn lại bao quanh "Mặt Trời" mới được hình thành sẽ phát triển thành những đĩa đồng tâm, tiền thân của hệ hành tinh.

Ở các vì sao, mật độ vật chất và nhiệt độ tăng dần từ ngoài vào trong và khi nhiệt độ ở vùng trung tâm đủ cao,  $\geq 10^6$  K, các phản ứng ghép nhiệt hạch có thể xảy ra để biến H thành He. Năng lượng giải tỏa từ các phản ứng ghép nhiệt hạch sẽ tạo ra áp suất bên trong các sao. Áp suất này lớn dần đến lúc có thể cân bằng lại lực hấp dẫn không cho các sao bị nén tiếp. Các sao có thể tồn tại lâu dài ở trạng thái cân bằng này với H liên

tục chuyển hóa thành He. Năng lượng từ phản ứng chuyển hóa vật chất được giải tỏa dưới dạng nhiệt và bức xạ ánh sáng, nhờ đó ta có thể quan sát được các ngôi sao cách ta hàng triệu năm ánh sáng trên bầu trời.

Tuy nhiên, sẽ đến lúc nhiên liệu H ở vùng trung tâm bị cạn kiệt, lực hấp dẫn thắng thế, quá trình suy sụp do hấp dẫn làm cho vùng trung tâm co lại và nóng lên. Diễn biến tiếp theo phụ thuộc vào khối lượng của sao. Nếu khối lượng bé hơn nhiều so với mặt trời, các phản ứng ghép sẽ không tiếp tục xảy ra và quá trình suy sụp do hấp dẫn cuối cùng sẽ tạo nên sao lùn trắng (white dwarf) có kích thước bé như các hành tinh.

Ngược lại, ở các sao kền (giant), nhiệt độ và mật độ vùng trung tâm phải cao để cân bằng lại lực hấp dẫn ( $T \geq 10^8 \text{ K}$ ,  $\rho = 10^8 \text{ kg.m}^{-3}$ ), nên khi nhiên liệu H cạn kiệt, chúng bị lực hấp dẫn nén tiếp làm nhiệt độ bên trong tăng cao hơn nữa khiến cho He có khả năng chuyển hóa thành các hạt nhân nặng hơn như C, O bằng phản ứng ghép hạt nhân. Nguồn năng lượng mới này đốt nóng lớp vỏ bao quanh, ở đó H vẫn còn dồi dào để có thể tiếp tục phản ứng ghép tạo ra thêm He và phát năng lượng. Quá trình này làm cho độ chói của ngôi sao tăng lên từ 1 000 đến 10 000 lần, đồng thời nó cũng giãn nở mạnh, vùng ngoại vi lạnh hơn, quang phổ chuyển về vùng đỏ nên chúng ta quan sát được *sao kền đỏ* (red giant).

Nhưng những phản ứng tạo ra các hạt nhân nặng ở vùng trung tâm các sao kền không giải tỏa ra nhiều năng lượng nên cuối cùng vẫn xảy ra trạng thái khủng hoảng. Vùng lõi các sao này sẽ rất đậm đặc giống như các sao neutron hay lỗ đen (black hole). Lỗ đen là trường hợp các sao ở giai đoạn suy tàn có lực hấp dẫn rất lớn đến mức không gì, kể cả ánh sáng, có thể thoát ra được từ nó. Bán kính của lỗ đen, gọi là bán kính Schwarzschild, tỉ lệ thuận với khối lượng của sao. Với Mặt Trời bán kính này bằng 3 km, nhưng Mặt Trời không đủ nặng để khi suy tàn trở thành lỗ đen.

Một kịch bản ngược lại xảy ra khi các sao suy tàn có năng lượng rất lớn bên trong lõi khiến cho vùng ngoại vi bung ra thành vụ nổ lớn gọi là sao

siêu mới (supernova), sáng hơn nhiều lần những ngôi sao khác trong thiên hà và hiện tượng này có thể kéo dài trong nhiều năm. Vật chất chứa đầy đủ các nguyên tố từ nhẹ đến nặng, tạo ra trong suốt thời gian trưởng thành và già cỗi của các sao kền được các sao siêu mới tung vào thiên hà dưới dạng bụi khí. Từ đây lại tạo thành các sao thế hệ mới.

Hệ mặt trời của chúng ta chứa khá nhiều (2%) nguyên tố nặng nên có thể xem là sao thế hệ hai hay ba được tạo ra từ những đám mây bụi do một sao siêu mới nào đó tung ra cách nay khoảng 5 tỷ năm.

### 2.1.5 Phản ứng ghép hạt nhân trong điều kiện nhiệt hạch

Trong phản ứng ghép hạt nhân, hai hạt nhân có điện tích  $Z_1$  và  $Z_2$  phải chui qua hàng rào thế Coulomb để tương tác với nhau. Chiều cao hàng rào thế được xác định bằng công thức:

$$V_c (\text{MeV}) \cong 1,44 \frac{Z_1 Z_2}{(R_1 + R_2)} \quad (2.8)$$

trong đó thế năng tính ra MeV,  $R_1$  và  $R_2$  là bán kính hai hạt nhân tính theo đơn vị fermi (fm),  $1 \text{ fm} = 10^{-13} \text{ cm}$ .

Ngay ở những ngôi sao nóng nhất, năng lượng chuyển động nhiệt của hạt nhân tính theo công thức (2.2) cũng rất bé so với độ cao hàng rào thế  $V_c$ . Tốc độ phản ứng nhiệt hạch tỷ lệ thuận với mật độ hai hạt nhân tham gia phản ứng ghép  $n_1$  và  $n_2$ :

$$\frac{dN}{dt} = n_1 n_2 \langle \sigma v \rangle \quad (2.9)$$

trong đó  $N$  là số hạt nhân mới tạo thành trong đơn vị thể tích,  $v$  là vận tốc tương đối giữa hai hạt,  $\sigma$  là tiết diện phản ứng ghép. Dấu ngoặc chỉ phép trung bình hóa theo phân bố vận tốc chuyển động nhiệt Maxwell – Boltzman:

$$n(v) \propto \exp\left(\frac{-mv^2}{k_B T}\right) = \exp\left(\frac{E}{k_B T}\right) \quad (2.10)$$

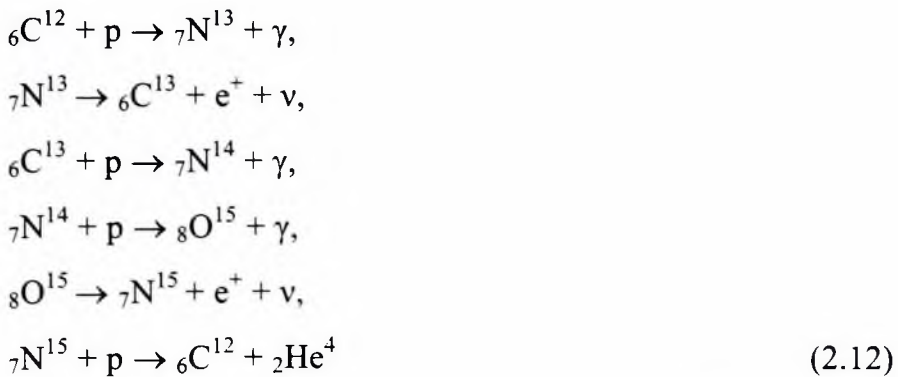
có tính đến xác suất chui qua hàng rào thế Coulomb do hiệu ứng đường ngầm (công thức 1.36).

Trong giai đoạn này H được đốt cháy để tạo thành  $\text{He}^4$ , nhưng phản ứng xảy ra theo cơ chế nhiệt hạch chậm hơn so với giai đoạn BBN. Hydro bị đốt để tạo thành He theo hai chu trình proton–proton và chu trình carbon.

Trong chu trình proton – proton, hai proton kết hợp với nhau theo một chuỗi phản ứng và phân rã  $\beta$  kế tiếp, qua đó một số hạt nhân trung gian được tạo thành rồi bị phân rã ngay như  ${}^2_2\text{He}$ ,  ${}^3_1\text{D}$ ,  ${}^3_2\text{He}$ ,  ${}^7_3\text{Li}$ ... Cuối cùng thì trong chu trình này bốn proton mất đi để sinh ra hạt nhân  $\text{He}^4$ , hai positron, hai neutrino và giải tỏa năng lượng 26,7 MeV theo công thức:



Trong chu trình carbon, hay còn gọi là chu trình Bethe,  $\text{C}^{12}$  đóng vai trò xúc tác:



Kết quả là  $\text{C}^{12}$  chỉ làm nhiệm vụ xúc tác, không mất đi, bốn proton chuyển thành  $\text{He}^4$  và giải tỏa năng lượng 26,7 MeV, trong đó neutrino mang theo 1,7 MeV, giống y như quá trình (2.11). Tuy hai chu trình rất giống nhau về hình thức, song hiệu quả giải tỏa năng lượng lại khác nhau và tùy theo nhiệt độ và mật độ vật chất bên trong lõi các sao. Khi nhiệt độ tăng lên, cả hai chu trình đều đốt hydro nhanh hơn, nhưng chu trình proton–proton ít hiệu quả hơn chu trình carbon. Ở Mặt Trời, hiện

nay chu trình hydro lần át, trong khi đó ở một số sao nặng hơn chu trình carbon lại là nguồn phát năng lượng chính.

### 2.1.6 Đốt He giải tỏa năng lượng và tạo thành hạt nhân nặng hơn

Heli sinh ra sẽ bị đốt cháy tạo thành  ${}^8\text{Be}$ :



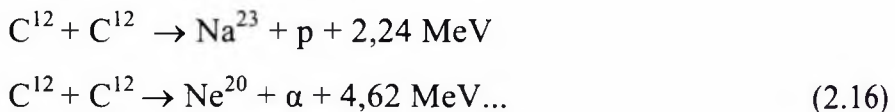
Với  $\rho = 10^8 \text{ kgm}^{-3}$  trong trạng thái cân bằng cứ  $10^9$  hạt nhân  ${}^4\text{He}$  có 1 hạt nhân  ${}^8\text{Be}$ . Với số lượng  ${}^8\text{Be}$  ít ỏi đó cũng đủ để tạo ra  ${}^{12}\text{C}$  theo phản ứng ghép:



Hạt nhân  ${}^{12}\text{C}$  tạo ra sẽ ở trạng thái kích thích, từ đó phát ra tia  $\gamma$ . Phối hợp (2.13) với (2.14) cho thấy ba hạt  $\alpha$  ghép với nhau để tạo thành  ${}^{12}\text{C}$ :



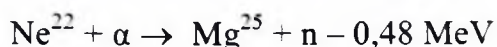
Sau khi đã tích lũy được một lượng  $\text{C}^{12}$  đủ lớn, các quá trình  $3\alpha$  tương tự như (2.15) sẽ tiếp tục tạo nên O, Ne, Mg cho đến Si, Fe, đồng thời năng lượng sẽ được giải tỏa thêm. Thí dụ:



Quá trình  $3\alpha$  có vị trí thiết yếu trong tiến hóa các sao và sự hình thành các nguyên tố trong vũ trụ. Sở dĩ như vậy là vì hạt nhân  $\text{C}^{12}$  có trạng thái kích thích 7,65 MeV rất gần với ngưỡng năng lượng 7,37 MeV khi phân rã ra cặp hạt  $\alpha$  và  ${}^8\text{Be}$ . Do có sự trùng hợp rất may mắn này mà phản ứng ghép nhiệt hạch xảy ra gần như cộng hưởng với tiết diện rất lớn khiến cho  $\text{C}^{12}$  có độ phổ biến rất cao trong vũ trụ. Và cũng chính hàm lượng khá cao của  $\text{C}^{12}$  trong tâm các sao mà các nguyên tố nặng hơn carbon mới hình thành được theo phản ứng (2.15) và (2.16). Trên thực tế, chính từ quan sát về độ phổ biến cao của carbon trong vũ trụ mà người ta tiên đoán ra trạng thái kích thích cộng hưởng ở hạt nhân

$C^{12}$ . Một lần nữa, ta lại thấy sự hội tụ rất thú vị giữa khoa học vô cùng lớn và khoa học vô cùng bé.

Đồng thời các phản ứng với hạt  $\alpha$  cũng tạo ra neutron, chẳng hạn:



Neutron sinh ra sẽ bị các hạt nhân bắt giữ theo phản ứng  $(n, \gamma)$  tạo thành hạt nhân có số khối lớn hơn. Những hạt nhân mới này giàu neutron nên có thể phân rã  $\beta^-$  để tạo thành hạt nhân mới đồng khối nhưng có số  $Z$  lớn hơn.

### 2.1.7 Tạo thành hạt nhân nặng qua phản ứng bắt neutron và phân rã $\beta$

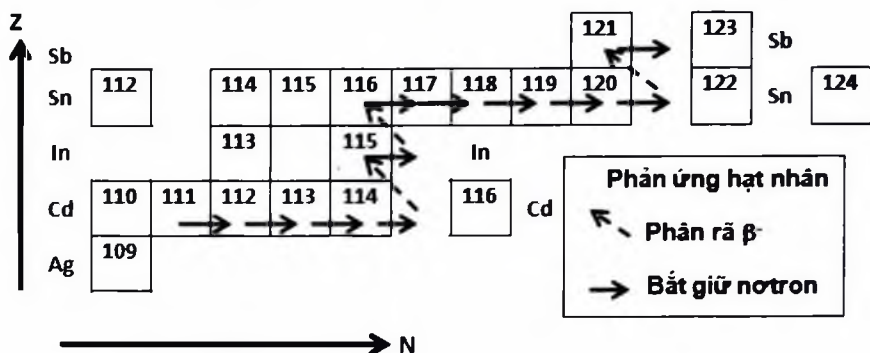
Phản ứng ghép nhiệt hạch rất khó xảy ra với những hạt nhân nặng có hàng rào thế Coulomb rất cao. Với những hạt nhân này phản ứng bắt neutron  $(n, \gamma)$  (xem 1.4.2) dễ xảy ra hơn do tiết diện phản ứng  $(n, \gamma)$  lớn và có xu hướng tăng lên theo số khối  $A$ . Với phản ứng  $(n, \gamma)$ , đồng vị có số khối  $A$  sẽ biến thành đồng vị có số khối  $A + 1$ . Đồng vị mới này sẽ có thể bền hoặc không bền. Nếu không bền, hạt nhân mới tạo thành sẽ phân rã  $\beta^-$  làm tăng nguyên tử số  $Z$ . Do đó, chuỗi phản ứng  $(n, \gamma)$  kèm theo phân rã  $\beta^-$  sẽ tạo ra những nguyên tố ngày càng nặng hơn. Toàn bộ quá trình này có thể xuất phát từ những đồng vị của Fe, được xem là nặng nhất có được từ các phản ứng ghép nhiệt hạch. Tuy nhiên, cần lưu ý phản ứng bắt neutron hấp thụ năng lượng chứ không giải tỏa ra năng lượng như các phản ứng ghép nhiệt hạch.

Trong vũ trụ, quá trình bắt neutron có thể xảy ra một cách từ từ (*s*, slow) hoặc rất nhanh (*r*, rapid).

Quá trình *s* xảy ra khi mật độ neutron tự do trong các ngôi sao quá bé khiến cho khoảng thời gian giữa hai lần bắt neutron kế tiếp lớn hơn nhiều so với thời gian sống của tất cả các đồng vị phóng xạ  $\beta^-$  được tạo ra từ phản ứng  $(n, \gamma)$ . Hình 2.3 minh họa lộ trình tạo ra các đồng vị và

nguyên tố nặng dần từ  $_{47}\text{Ag}^{109}$  đến  $_{51}\text{Sb}^{123}$  trong quá trình s kết hợp với phân rã  $\beta^-$ . Ta hãy chú ý đến mắc xích bắt đầu từ đồng vị bền  $_{48}\text{Cd}^{114}$

Phản ứng bắt neutron:



Hình 2.3. Minh họa quá trình hình thành các đồng vị và nguyên tố nặng thông qua phản ứng bắt neutron từ (quá trình s) và phân rã  $\beta^-$ .

sẽ tạo thành đồng vị phóng xạ  $_{48}\text{Cd}^{115}$  với chu kỳ bán rã 54 giờ. Nếu khoảng thời gian giữa hai lần hấp thụ neutron kế tiếp bé hơn 54 giờ thì một đồng vị bền khác của Cd với  $A = 116$  sẽ hình thành từ phản ứng  $(n, \gamma)$ . Tuy nhiên, vì thời gian giữa hai lần hấp thụ neutron kế tiếp lớn hơn 54 giờ nhiều lần (quá trình s) nên hạt nhân  $_{48}\text{Cd}^{115}$  sẽ kịp phân rã  $\beta^-$  chuyển thành hạt nhân  $_{49}\text{In}^{115}$  trước khi có thể bắt tiếp neutron để tạo thành  $\text{Cd}^{116}$ .

Nhưng quá trình s không thể tạo thành những đồng vị nặng hơn Bi vì sau Bi thường là những đồng vị phân rã  $\alpha$  với chu kỳ bán phân rã quá ngắn. Những đồng vị rất nặng này, trong đó có U và Th, chỉ có thể tạo ra trong điều kiện môi trường có mật độ neutron rất cao để quá trình bắt neutron xảy ra nhanh (quá trình r) trong khi các đồng vị được tạo thành chưa kịp phân rã phóng xạ. Thí dụ, đồng vị bền Bi có thể bắt liên tiếp 20 neutron



Đồng vị được tạo ra rất không bền nên sẽ phân rã  $\beta^-$  liên tiếp để tạo ra các đồng vị nằm giữa  $_{85}\text{At}$  và  $_{87}\text{Fr}$ . Mật độ neutron cao có thể tồn tại trong vụ nổ ở các sao siêu mới. Hệ mặt trời được xem như hình thành từ một vụ nổ như vậy xảy ra ở vùng kế cận trong Thiên hà của chúng ta cách nay khoảng 4,5 tỷ năm và sự có mặt của các nguyên tố nặng U, Th trong vỏ trái đất là một minh chứng cho giả thuyết này.

### **2.1.8 Độ phổ biến các nguyên tố trong vũ trụ**

Mô hình tạo thành các nguyên tố thông qua phản ứng hạt nhân và phân rã phóng xạ trên đây có thể được kiểm chứng tốt nhất bằng cách so sánh với độ phổ biến của các nguyên tố trong vũ trụ.

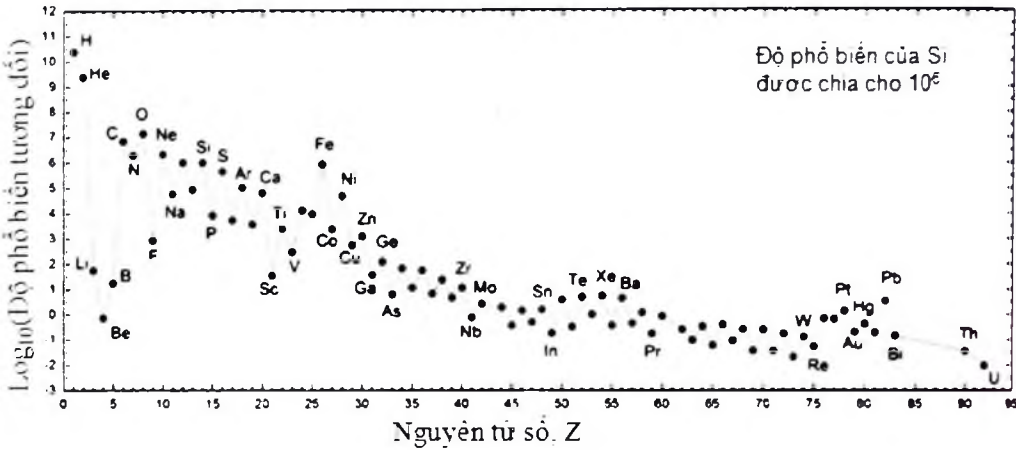
Hydro có hàm lượng áp đảo trong vũ trụ, sau đó đến He, chiếm ~8% về số lượng nguyên tử, nhưng ngay sau đó là một hố sâu chứa ba nguyên tử Li, Be và B (hình 2.4). Độ phổ biến của ba nguyên tố này gộp lại thấp hơn H một trăm triệu lần. Khả năng tạo ra ba nguyên tố này trong BBN cũng như trong tâm các vì sao là rất thấp do phản ứng ghép các hạt nhân He để tạo nên chúng diễn ra rất chậm, mặt khác một khi được tạo ra chúng dễ phản ứng với proton để quay trở lại hạt nhân He, chẳng hạn theo phương trình:



Sau B, các nguyên tố lại dồi dào lên với các đỉnh ở C, O, Si, Ca... Trong vùng này những đồng vị chẵn-chẵn với  $A = 2Z = 2N$  như  ${}_6\text{C}^{12}$ ,  ${}_8\text{O}^{16}$ ,  ${}_{10}\text{Ne}^{20}$ ,  ${}_{12}\text{Mg}^{24}$ ,  ${}_{14}\text{Si}^{28}$  có độ phổ biến cao hơn hẳn các đồng vị khác, hiện tượng này phù hợp với năng lượng liên kết và mẫu vỏ hạt nhân trình bày trong chương 1.

Sau Ca, độ phổ biến các nguyên tố lại qua một hố sâu nữa ở Sc. Nguyên tố này rất hiếm trong vũ trụ, đồng thời cũng là một nguyên tố quý hiếm "nổi tiếng" trong vỏ trái đất (hình 2.4). Sau Sc, độ phổ biến nguyên tố lại tăng lên và qua cực đại ở vùng  $A = 50-60$  quanh đồng vị Fe, Ni. Một lần nữa, độ phổ biến nguyên tố có tương quan chặt chẽ với năng lượng liên kết riêng cũng có giá trị lớn nhất ở vùng Fe (xem 1.2.2). Sau

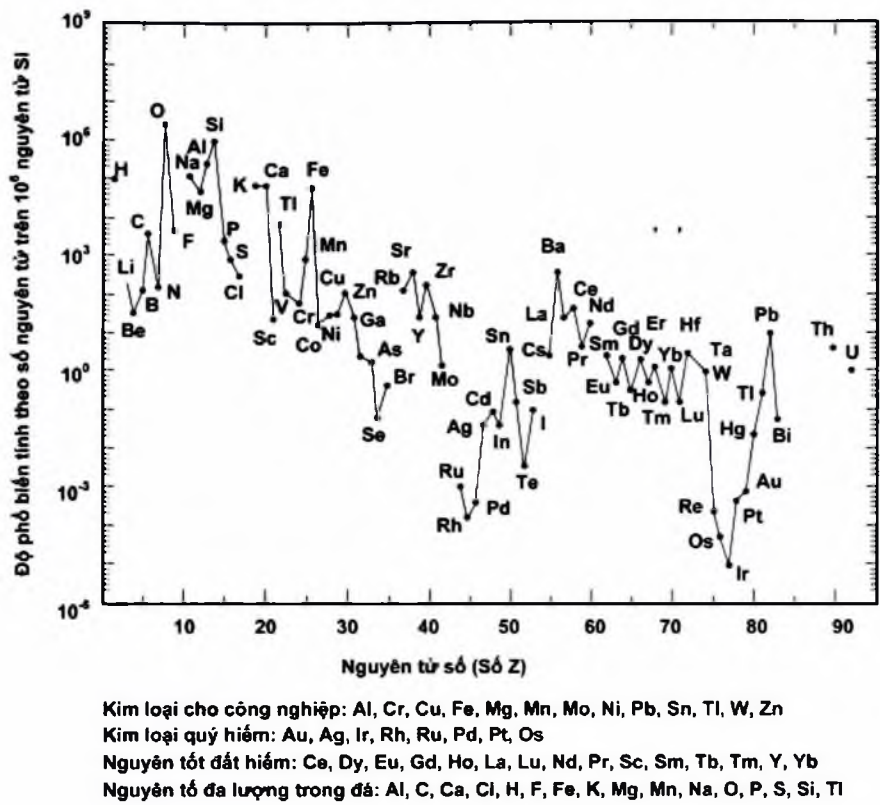
cực đại Fe, Ni độ phổ biến nguyên tố lại giảm và giảm rất chậm sau  $A = 100$ . Tuy nhiên ở vùng nguyên tố nặng này cũng xuất hiện những cực đại nhỏ ở những đồng vị có số kỳ ảo kép (xem 1.2.3).



Hình 2.4. Độ phổ biến tương đối của các nguyên tố trong vũ trụ.

2.1.9 Độ phổ biến các nguyên tố trong vỏ Trái Đất

Hydro không còn là nguyên tố có hàm lượng áp đảo trong vỏ Trái Đất như trong vũ trụ (hình 2.4). Helium lại càng hiếm. Trong vỏ Trái Đất oxy áp đảo về số lượng nguyên tử, tiếp theo là các nguyên tố đa lượng trong đất đá như Si, Ca, Fe, Al (hình 2.5). Các nguyên tố nặng trong vỏ Trái Đất cũng dồi dào hơn trong vũ trụ, đặc biệt, U và Th có hàm lượng khá cao, cao hơn bốn bậc so với những nguyên tố quý hiếm như Au, Pt, Ir. Tuy nhiên những dấu tích nổi bật về độ phổ biến các nguyên tố trong vũ trụ vẫn được lưu giữ lại trong vỏ Trái Đất, chẳng hạn những cực đại ở O, Si, Fe... và cực tiểu ở Li, Be, B và Sc. So sánh độ phổ biến các nguyên tố trong vỏ Trái Đất và trong vũ trụ có thể kết luận rằng Trái Đất cùng với hệ Mặt Trời hình thành từ vật liệu được tung ra bởi một sao siêu mới nào đó ở vùng lân cận trong thiên hà của chúng ta. Nó phản ánh thành phần vật chất trong lớp vỏ của một sao kênh đỏ nào đó tiền thân của sao siêu mới.



Hình 2.5. Độ phổ biến các nguyên tố trong vỏ Trái Đất tính theo số nguyên tử trên  $10^6$  nguyên tử Si.

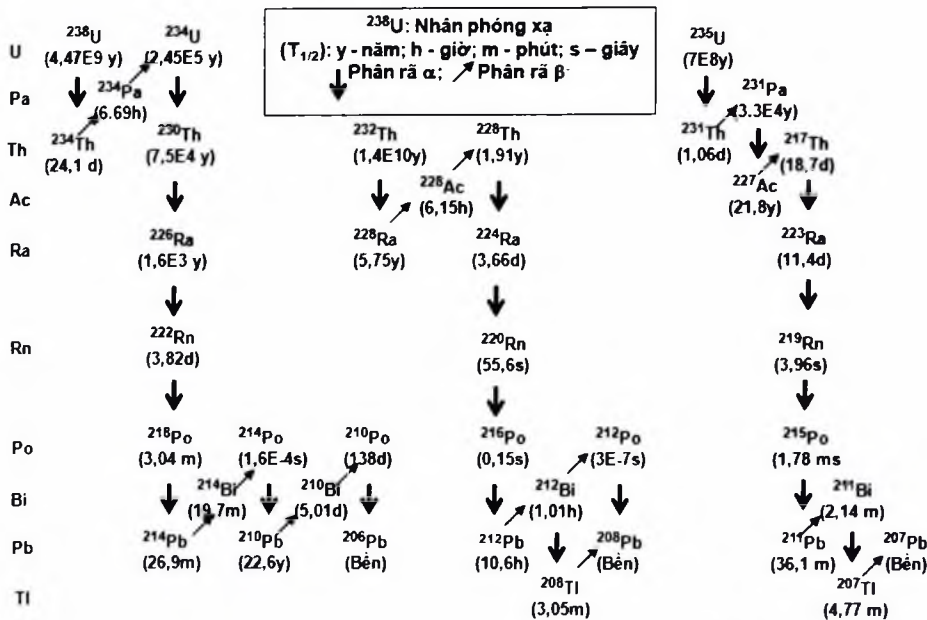
2.2 PHÓNG XẠ TRONG ĐẤT ĐÁ

2.2.1 Các họ phóng xạ

Trong số hàng trăm nguyên tố và đồng vị cấu thành Trái Đất từ thời nguyên khởi trước khi hệ mặt trời được hình thành có các nguyên tố phóng xạ U, Th và K. Chúng còn tồn tại đến ngày nay nhờ có chu kỳ bán rã tương đương với tuổi Trái Đất, khoảng 4,5 tỷ năm. Các nhân đứng đầu ba họ phóng xạ trong đất đá là  $U^{238}$ ,  $Th^{232}$  và  $U^{235}$  có chu kỳ bán tương ứng là 4,5 tỷ năm, 14 tỷ năm và 700 triệu năm.

Các đồng vị trong ba họ phóng xạ nói trên phân rã  $\alpha$  và  $\beta^-$ , trong quá trình phân rã liên tiếp này đồng vị mẹ biến thành đồng vị con gái, sau con gái là cháu gái và quá trình cứ tiếp diễn để cuối cùng dừng lại ở ba

đồng vị bền của chì:  $\text{Pb}^{206}$ ,  $\text{Pb}^{208}$  và  $\text{Pb}^{207}$ . Tất cả có 47 đồng vị khác nhau thuộc ba họ nói trên. Không thể lẫn họ này với họ khác căn cứ trên số khối A của đồng vị trong mỗi họ. Cụ thể  $A = 4n + 2$  đối với họ  $\text{U}^{238}$ ,  $A = 4n$  đối với họ  $\text{Th}^{232}$  và  $A = 4n - 1$  đối với họ  $\text{U}^{235}$ , n là những số nguyên. Hình 2.6 trình bày đầy đủ các đồng vị trong ba họ nói trên cùng với các kênh phân rã và chu kỳ bán rã của chúng.



Hình 2.6. Sơ đồ phân rã của ba họ phóng xạ  $\text{U}^{238}$  (bên trái),  $\text{Th}^{232}$  (giữa) và  $\text{U}^{235}$  (bên phải). Các đồng vị phóng xạ trong ba họ phân rã  $\alpha$  (Z và N giảm 2) hoặc  $\beta^-$  (Z tăng 1, N giảm 1). Chuỗi phân rã phóng xạ chấm dứt ở ba đồng vị bền của chì là  $\text{Pb}^{206, 207, 208}$ .

Các con, cháu trong ba họ phóng xạ nói trên phân rã rất nhanh ( $T_{1/2}$  rất bé) so với chủ họ nên hàm lượng của chúng trong đất đá rất thấp. Chẳng hạn,  $\text{Ra}^{226}$  là một mắt xích chủ yếu trong họ  $\text{U}^{238}$  có chu kỳ bán rã 1 600 năm, hàng triệu lần ngắn hơn so với chủ họ  $\text{U}^{238}$  nên hàm lượng trong đất đá cũng thấp hơn hàng triệu lần. Tuy nhiên, hoạt độ riêng tính trên đơn vị khối lượng lại cao hơn hàng triệu lần. Hiện tượng này được mô tả bởi công thức (1.23) khi xét chuỗi phóng xạ ở mục 1.3.2. Hai ông bà Curie phải miệt mài nghiền đập, hòa tách hàng tấn quặng uranium bằng phương pháp thủ công mới tách được vài miligam radium (Ra), một

nguyên tố hoàn toàn mới lúc bấy giờ và có hoạt độ phóng xạ riêng cao hơn uranium đến hàng triệu lần.

Ngoài uranium và thorium, phóng xạ từ đất đá còn bắt nguồn từ  $^{40}_{19}\text{K}$ . Trong vỏ Trái Đất nguyên tố kali khá phổ biến, có hàm lượng trung bình 2,6%, lớn hơn nhiều so với thorium (7,2 ppm) và uranium (1,8 ppm). Nhưng kali chỉ chứa 0,01% đồng vị  $^{40}_{19}\text{K}$  và tỷ lệ này ổn định trong mọi môi trường vì đồng vị phóng xạ này đã có từ thời nguyên khởi cách nay hàng chục tỷ năm.

Hàm lượng trung bình của uranium trong vỏ Trái Đất là 1,8 ppm, trong lớp đất bề mặt hàm lượng thường cao hơn do U dễ bị hấp thụ bởi các phần tử sét có kích thước bé trong đất. Trong vỏ Trái Đất,  $\text{U}^{238}$  chiếm 99,27%, phần ít ỏi còn lại là  $\text{U}^{235}$  (0,73%). Ngoài ra còn có  $\text{U}^{234}$  (0,0058%) là đồng vị con – cháu được tạo thành do phân rã phóng xạ của  $\text{U}^{238}$  (hình 2.6). Tuy nhiên, uranium phân bố không đều trong đất đá. Tùy theo loại khoáng vật, hàm lượng dao động từ vài phần trăm ppm trong các đá ultrabasic đến hàng chục ppm trong granite. Còn ở các dị thường và quặng phóng xạ, hàm lượng U thường lên đến hàng nghìn hoặc hàng vạn ppm.

Uranium tồn tại trong sáu trạng thái hóa trị, từ  $\text{U}^{+1}$  đến  $\text{U}^{+6}$ , trong số các trạng thái này, quan trọng nhất là  $\text{U}^{+4}$  và  $\text{U}^{+6}$ . Trong môi trường khử, uranium tồn tại dưới dạng  $\text{U}^{+4}$  [U(IV)] và có độ linh động thấp do uraniumite ( $\text{UO}_2$ ) và coffinite ( $\text{USiO}_4$ ) rất khó hòa tan, do đó hàm lượng U trong nước không vượt quá  $10^{-13}$  M. Trong môi trường oxy hóa, U(IV) chuyển sang U(VI), rất dễ hòa tan biến thành những ion uranyl ( $\text{UO}_2^{2+}$ ), hoặc những phức của nó và do đó có thể bị di chuyển khá xa theo nước ngầm. Khi gặp môi trường khử, các ion U(VI) sẽ đọng lại hoặc hấp phụ trên bề mặt các khoáng sét hay hữu cơ.

Hàm lượng trung bình của thorium trong vỏ Trái đất là 7,2 ppm. Nhưng hàm lượng biến đổi theo loại khoáng vật, từ 3 đến 50 ppm trong granite và permatit xuống còn 1–3 ppm trong basalt và các đá basic. Thorium thường xuất hiện trong các khoáng zircon, ở đó Th thay thế những vị trí

của Zr trong tinh thể. Các sa khoáng cát đen chứa Ti và Zr dọc theo ven biển thường là nguồn cung cấp Zr dùng làm vỏ bọc thanh nhiên liệu lò phản ứng hạt nhân.

### 2.2.2 Cân bằng và mất cân bằng phóng xạ

Do chu kỳ bán rã của các đồng vị con – cháu trong cả ba họ phóng xạ đều ngắn hơn rất nhiều so với đồng vị mẹ và cũng rất ngắn so với thời gian tồn tại của Trái đất nên về lý thuyết, có thể xảy ra cân bằng phóng xạ trường cửu giữa các đồng vị thành viên trong họ (xem 1.3.2). Khi đó hoạt độ phóng xạ  $A_i$  của bất cứ thành viên  $i$  nào cũng đều như nhau và bằng hoạt độ phóng xạ của đồng vị mẹ  $A_1$  như công thức (1.23)

$$A_i = \lambda_i N_i = \lambda_1 N_1 = A_1$$

trong đó  $\lambda_i$  và  $N_i$  là hằng số phân rã và số hạt nhân của thành viên thứ  $i$ .

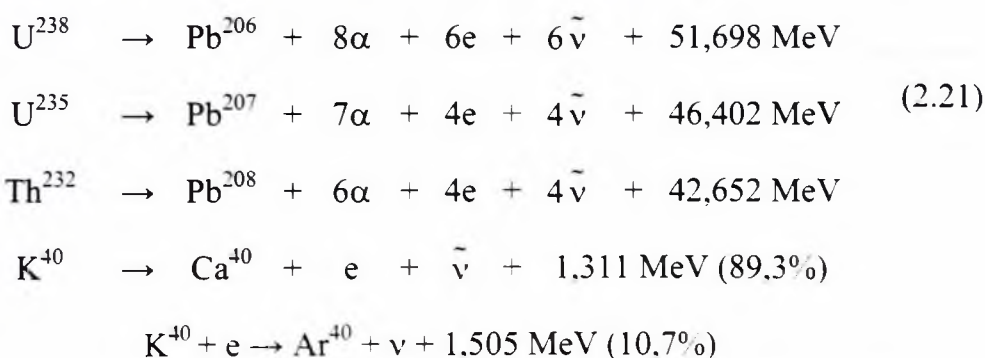
Tuy nhiên, trên thực tế giữa các thành viên trong chuỗi có thể mất cân bằng phóng xạ trường cửu khi một thành viên nào đó bị tách ra khỏi chuỗi phóng xạ, hoặc được bổ sung từ môi trường bên ngoài vào chuỗi do các quá trình địa hóa. Hiện tượng đứt gãy chuỗi này có hai nguyên nhân chính liên quan đến các đặc điểm nguyên tố và đồng vị của các thành viên trong chuỗi.

Do thuộc những nguyên tố khác nhau, những thành viên trong chuỗi có thể có hành vi khác nhau trong môi trường. Thí dụ uranium có độ linh động trong nước cao hơn rất nhiều so với những nguyên tố con – cháu của nó như  $\text{Th}^{230}$  hoặc  $\text{Ra}^{226}$ . Vì thế  $\text{Th}^{230}$  có hàm lượng rất thấp trong nước ngầm. Radium-226 dễ hòa tan trong môi trường nước có hàm lượng ion  $\text{Cl}^-$  cao, nhưng rất khó hòa tan trong nước có nhiều ion sulphate. Ngoài ra,  $\text{Ra}^{226}$ ,  $\text{Th}^{230}$  và  $\text{U}^{238}$  trong nước ngầm được các khoáng vật hấp phụ với mức độ khác nhau cũng gây ra mất cân bằng phóng xạ. Radon là khí trơ nên rất dễ thoát ra khỏi đất đá. Sau khi bị hòa vào không khí, các con – cháu radon gắn kết vào bụi khí và theo đường hô hấp xâm nhập vào cơ thể và trở thành nguồn chiếu trong chủ yếu đối với con người.

Hai đồng vị cùng nguyên tố cũng có thể mất cân bằng phóng xạ như trường hợp cặp  $U^{234} - U^{238}$ . Khi hạt nhân  $U^{238}$  phân rã  $\alpha$ , hạt nhân giạt lùi  $U^{234}$  có động năng đủ lớn để có thể thoát ra ngoài tinh thể. Kết quả là  $U^{234}$  giàu hơn trong nước ngầm và nghèo đi trong khoáng vật so với  $U^{238}$ . Hạt nhân giạt lùi trong phân rã  $\alpha$  cũng có thể tạo nên những đường vết sai hòng trong tinh thể, qua đó các nguyên tử dễ bị chiết ra nước ngầm làm mất cân bằng phóng xạ.

### 2.2.3 Phân rã phóng xạ và nội nhiệt Trái Đất

Trái Đất chứa một lượng lớn nhân phóng xạ tự nhiên  $K^{40}$ ,  $U^{238}$ ,  $U^{235}$  và  $^{232}\text{Th}$ . Trừ lớp đất rất mỏng vài chục cm trên mặt, các tia phóng xạ  $\beta$  và  $\gamma$  do chúng phát ra đều dừng lại trong đất và toàn bộ động năng của chúng biến thành nhiệt năng. Cùng với một số yếu tố khác như nhiệt năng được lưu lại từ khi thành tạo hành tinh, nhiệt do phân rã phóng xạ góp phần quan trọng duy trì nhiệt độ cao ở vùng tâm trái đất, lên đến 7 000 K, gây ra gradient nhiệt độ  $22^{\circ}\text{Ckm}^{-1}$  trong lớp vỏ, cũng như các hiện tượng địa nhiệt và chuyển động kiến tạo khác như động đất, núi lửa... Các loại hạt và năng lượng phát ra từ phóng xạ tự nhiên của  $U^{238}$ ,  $U^{235}$ ,  $\text{Th}^{232}$  và  $K^{40}$  được tổng kết bằng các phương trình dưới đây.



Lượng nhiệt do phân rã phóng xạ tự nhiên trong lớp vỏ Trái Đất (manti) được trình bày trong bảng 2.1. Tuy nhiên, những tính toán lượng nhiệt do phân rã phóng xạ tự nhiên rất khó được kiểm chứng bởi tất cả các tia phóng xạ sinh ra từ các quá trình (2.21) đều bị đất đá cản lại ngay tại

chỗ, duy chỉ có phản neutrino  $\bar{\nu}$  là không bị cản lại và có thể thoát ra khỏi Trái Đất. Tuy nhiên, do không có điện tích và khối lượng rất bé nên các hạt  $\bar{\nu}$  rất khó ghi nhận được.

Bảng 2.1. Nhiệt do phân rã phóng xạ trong manti.

| Đồng vị    | Suất nhiệt,<br>$W.kg^{-1}$ đồng vị | $T_{1/2}$ , năm | Hàm lượng trung<br>bình, kg/kg đất đá | Nhiệt tỏa ra,<br>$W.kg^{-1}$ manti |
|------------|------------------------------------|-----------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| $U^{238}$  | $9,46.10^{-5}$                     | $4,47.10^9$     | $30,8.10^{-9}$                        | $2,91.10^{-12}$                    |
| $U^{235}$  | $5,69.10^{-4}$                     | $7,04.10^8$     | $0,22.10^{-9}$                        | $1,25.10^{-13}$                    |
| $Th^{232}$ | $2,64.10^{-5}$                     | $1,40.10^{10}$  | $124.10^{-9}$                         | $3,27.10^{-12}$                    |
| $K^{40}$   | $2,92.10^{-5}$                     | $1,25.10^9$     | $36,9.10^{-9}$                        | $1,08.10^{-12}$                    |

Mãi gần đây mới có hai nhóm nghiên cứu ở Kamioka, Nhật Bản và Gran Saso, Italia ghi được  $\bar{\nu}$  thoát ra từ phân rã phóng xạ trong lòng đất sau khi chế tạo thành công những hệ detector vừa đồ sộ vừa rất tinh vi để phát hiện neutrino. Để có hiệu suất phát hiện neutrino tối đa cả hai nhóm đều sử dụng hàng nghìn tấn nhấp nháy lỏng và ghi các tín hiệu nhấp nháy do neutrino để lại bằng hàng nghìn ống nhân quang. Nhóm thứ nhất ghi được 841 hạt  $\bar{\nu}$  trong thời gian từ năm 2002 đến 2009, trong đó chỉ có  $(111 \pm 43)$  hạt được xem như từ phân rã phóng xạ trong lòng đất, số còn lại là phong bắt nguồn từ các lò phản ứng đang hoạt động và từ mặt trời. Nhóm thứ hai ghi được 15 sự kiện trong hai năm 2007 – 2009, trong đó  $(9,7 \pm 3,9)$  sự kiện được xem như từ phân rã phóng xạ.

Theo một số tính toán mới đây, nhiệt thoát ra khỏi mặt đất vào khoảng 47 TW ( $47.10^{12}$  W). Những kết quả thực nghiệm về neutrino địa nhiệt trên đây cho phép các tác giả kết luận rằng lượng nhiệt này chủ yếu do phân rã các đồng vị phóng xạ trong lòng đất.

## **2.3 PHÓNG XẠ DO TIA VŨ TRỤ**

### **2.3.1 Tia vũ trụ sơ cấp và thứ cấp**

Bức xạ ion hóa có nguồn gốc từ vũ trụ có thể chia ra làm ba loại gồm tia vũ trụ sơ cấp, tia vũ trụ thứ cấp và tia phát ra từ chất phóng xạ được hình thành do các tia vũ trụ phản ứng với vật chất trong khí quyển. Tia vũ trụ sơ cấp lại có hai loại, tia có nguồn gốc thiên hà và tia xuất phát từ Mặt Trời.

Cường độ tia vũ trụ có nguồn gốc thiên hà đến Trái Đất không biến đổi theo thời gian và đẳng hướng. Thành phần chính của chúng là proton năng lượng cao đến 30 GeV, chiếm đến 85%, sau đó (10%) là hạt nhân của những nguyên tố nhẹ như He, Li, Be, C..., số còn lại là electron, photon, neutrino. Chúng là sản phẩm của phản ứng hạt nhân xảy ra trong quá trình bùng nổ và hình thành các thiên thể thuộc hệ thiên hà. Neutron có thể sinh ra đâu đó trong vũ trụ do phản ứng tổng hợp hạt nhân nhưng không kịp đến trái đất trước khi bị phân rã  $\beta^-$  biến thành proton với chu kỳ bán rã khoảng 15 phút. Trong khi đó, tia sơ cấp xuất phát từ Mặt Trời biến đổi theo thời gian phụ thuộc vào chu kỳ hoạt động 11 năm của Mặt Trời.

Khi đi vào khí quyển, tia vũ trụ sơ cấp có năng lượng lớn sẽ gây ra phản ứng hạt nhân với các nguyên tử và phân tử trong không khí tạo nên những hạt ion hóa trong khí quyển bao gồm photon, electron, neutron, proton, pion, muon..., chúng được gọi là các tia vũ trụ thứ cấp.

Như một nam châm khổng lồ, từ trường của Trái Đất đã uốn quỹ đạo các hạt tích điện trong tia vũ trụ làm cho chúng bật trở lại hoặc lượn vòng quanh trước khi đâm vào khí quyển. Theo đường sức của từ trường các hạt tích điện hướng vào xích đạo sẽ có xu hướng lượn về hai cực làm cho cường độ tia vũ trụ tăng theo vĩ độ, ở những vĩ độ trung bình của Bắc bán cầu phơi nhiễm do tia vũ trụ cao hơn ở vùng xích đạo đến 30 – 40%.

Không khí trong khí quyển hấp thụ và giảm tốc các tia vũ trụ năng lượng cao rất hiệu quả, nhờ đó đã giảm thiểu đáng kể tác hại đối với con người sống trên mặt đất. Càng lên cao phơi nhiễm do tia vũ trụ càng lớn do bề dày của lớp không khí che chắn càng giảm. Trên đỉnh Everest cao 8 850 m so với mặt biển, phơi nhiễm do tia vũ trụ tăng lên 20 lần so với độ cao ngang mặt nước biển.

2.3.2 Các nhân phóng xạ môi trường do tia vũ trụ sinh ra

Trong số những phản ứng hạt nhân của tia vũ trụ sơ cấp năng lượng cao còn có phản ứng đập vỡ (spallation) các hạt nhân C, N, O, Ar... trong không khí ở tầng cao, từ đó vỡ ra những nhân phóng xạ như  $H^3$ ,  $Be^7$ ,  $C^{14}$ ,  $Na^{22}$ ,  $P^{32}$ ,  $S^{35}$ ,  $Cl^{36}$ ... Các nhân này sẽ xâm nhập xuống tầng đối lưu và có thể quan trắc được trong môi trường trên mặt đất. Dễ quan trắc nhất trong số này là  $H^3$ ,  $Be^7$  và  $C^{14}$ . Ba nhân phóng xạ này còn được sử dụng để đánh dấu các quá trình vận chuyển trong môi trường. Một số đặc trưng của ba đồng vị này được ghi trong bảng 2.2.

Bảng 2.2. Đặc trưng các nhân phóng xạ do tia vũ trụ tạo ra trong khí quyển

| Nhân         | $T_{1/2}$  | Phân rã      | $E, MeV$                 | Phản ứng tạo thành                         |
|--------------|------------|--------------|--------------------------|--------------------------------------------|
| ${}_1H^3$    | 12,3 năm   | $\beta^-$    | $E_{\beta\max} = 0,019$  | Tia vũ trụ, thử bom H, lò nước nặng        |
| ${}_6C^{14}$ | 5 730 năm  | $\beta^-$    | $E_{\beta\max} = 0,0156$ | Tia vũ trụ, thử bom H, lò phản ứng         |
| ${}_4Be^7$   | 53,28 ngày | bắt electron | $E_\gamma = 0,477$       | Tia vũ trụ đập vỡ hạt nhân trong khí quyển |

2.3.3 Berilium-7

Đồng vị này được tạo thành từ phản ứng do neutron và proton năng lượng cao trong tia vũ trụ sơ cấp đập vỡ các hạt nhân  $C^{12}$ ,  $N^{14}$  và  $O^{16}$  trong khí quyển. Thí dụ:



Tốc độ phản ứng phụ thuộc vào cường độ tia vũ trụ, do đó có liên quan đến chu kỳ hoạt động 11 năm của Mặt Trời, vì hoạt động này ảnh hưởng đến từ trường Trái Đất. Do đó, hàm lượng  $\text{Be}^7$  trong không khí và nước mưa quan trắc được ở khắp nơi trên thế giới đều tương quan nghịch với số lượng vết đen trên Mặt Trời.

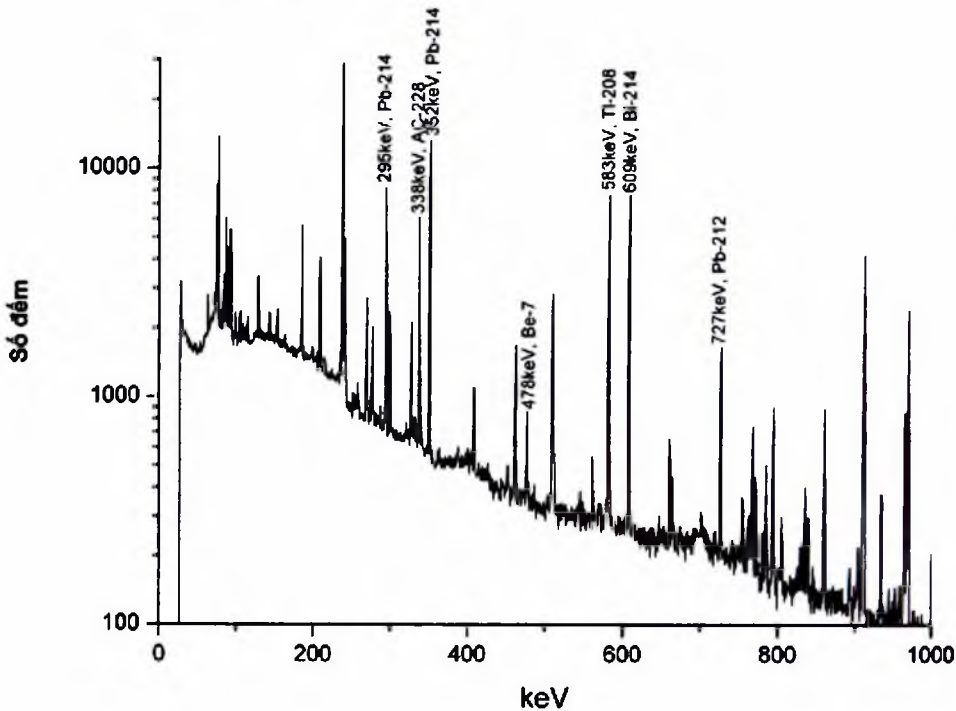
Phản ứng đập vỡ hạt nhân xảy ra chủ yếu trên tầng cao của khí quyển, từ đó hạt nhân  $\text{Be}^7$  được vận chuyển xuống tầng đối lưu và lớp không khí sát mặt đất nhờ các quá trình trao đổi giữa hai tầng bình lưu và đối lưu. Các quá trình này thường mạnh nhất về mùa xuân khi lớp đệm giữa hai tầng này không còn ngăn cản sự xáo trộn giữa chúng nữa. Do đó hàm lượng  ${}^7\text{Be}$  trong không khí biến thiên theo mùa, thường có cực đại về mùa xuân và phụ thuộc vào vĩ độ.

Sau khi được sinh ra từ những phản ứng trên, hạt nhân  $\text{Be}^7$  liền gắn kết với các sol khí có kích thước dưới micron trong tầng bình lưu và có thể quan sát được thường xuyên trong các mẫu sol khí lẫn nước mưa. Tốc độ trung bình sản sinh ra  $\text{Be}^7$  trên toàn địa cầu là  $810 \text{ hạt nhân/m}^2 \cdot \text{s}$ . Hàm lượng trung bình trong không khí tầng bình lưu là  $12,5 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-3}$ . Hàm lượng đo được ở Việt Nam thường thấp hơn, từ 2 đến  $10 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-3}$  do hiệu ứng vĩ độ nói trên, nhưng đỉnh  $477,6 \text{ keV}$  của  $\text{Be}^7$  vẫn nổi bật trong phổ gamma của sol khí, nước mưa, và lớp đất bề mặt mỏng trên cùng (hình 2.7). Những kết quả quan trắc nhiều năm ở Việt Nam cho thấy hàm lượng  $\text{Be}^7$  diễn biến rõ rệt theo chu kỳ hoạt động Mặt Trời và có tương quan nghịch với lượng vết đen trên Mặt Trời. Hiện tượng này đã được quan sát ở nhiều nơi trên thế giới.

Theo mưa rơi xuống đất, các nhân phóng xạ  $\text{Be}^7$  hòa tan trong nước mưa sẽ được hấp phụ lên các khoáng sét và mùn hữu cơ trong lớp đất bề mặt. Do chu kỳ bán rã tương đối ngắn (53 ngày) nên  $\text{Be}^7$  không kịp khuếch tán sâu vào những lớp đất sâu quá vài cm.

### 2.3.4 Tritium ( $^3\text{H}$ )

Đồng vị này được tạo thành từ phản ứng neutron nhanh ( $E_n > 4 \text{ MeV}$ ) trong tia vũ trụ với hạt nhân  $^{14}_7\text{N}$  trong khí quyển:



Hình 2.7. Phổ gamma mẫu đất lấy đến độ sâu 5 cm có chứa đỉnh 477,6 keV do  $\text{Be}^7$  rơi lắng từ không khí theo nước mưa (Nguồn: Phan Sơn Hải, Viện NCHN Đà Lạt).

Phản ứng xảy ra chủ yếu trong thượng tầng đối lưu và hạ tầng bình lưu với tốc độ 0,20 hạt nhân  $\text{H}^3$  trên  $\text{cm}^2/\text{s}$ . Sau khi sinh ra, tritium phân rã  $\beta^-$  trở thành  $^3_2\text{He}$  với chu kỳ bán rã 12,3 năm:



Tia  $\beta^-$  có năng lượng khá thấp,  $E_\beta = 18,6 \text{ keV}$ , chỉ đi được 6 mm trong không khí, và do đó không gây ra nhiều nguy cơ, trừ khi đi vào được bên trong cơ thể. Tritium bị oxy hóa ngay sau khi hình thành trong khí

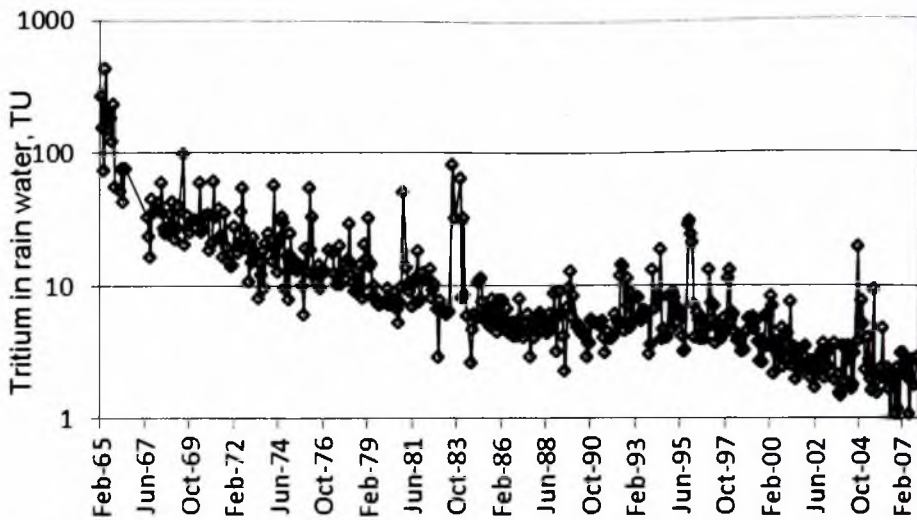
quyển, chuyển thành phân tử nước tritium ( $\text{H}^3\text{H}^1\text{O}$ ) và theo mưa rơi xuống đất đi vào thủy quyển và thâm nhập vào nước ngầm. Hoạt độ tritium trong nước được đo bằng đơn vị TU (Tritium Unit).

$$1\text{TU} = 0,118 \text{ Bq/L}$$

Hàm lượng tritium trung bình đo được trong những năm 2004 – 2011 là 3,1 TU trong nước mưa ở Hà Nội và 4,0 TU trong nước sông Hồng. Hàm lượng tritium trong nước tăng dần theo vĩ độ đạt cực đại ở các vĩ độ trung bình ở châu Âu và Bắc Mỹ.

Các cuộc thử vũ khí hạt nhân trong khí quyển từ năm 1945 đến 1978 đã làm cho hàm lượng tritium trong nước tăng vọt lên hàng nghìn lần trong năm 1963 ở châu Âu, sau đó giảm dần và trở về gần mức phong tự nhiên vào đầu thế kỷ XXI. Ước tính lượng tritium phát ra từ 422 vụ thử vũ khí hạt nhân trong khí quyển vào khoảng  $2 \cdot 10^{20}$  Bq, chủ yếu là do nổ bom khinh khí do phản ứng tổng hợp hạt nhân giữa deuterium và tritium. Cụ thể, cứ mỗi megaton bom khinh khí phát ra  $7,4 \cdot 10^{17}$  Bq tritium, trong khi đó lượng tritium phát ra từ một megaton bom nguyên tử ít hơn rất nhiều, chỉ có  $2,6 \cdot 10^{13}$  Bq.

Các cuộc thử vũ khí hạt nhân trước thập kỷ 60 của thế kỷ XX đã tiêm vào khí quyển một lượng tritium đáng kể. Song, do chu kỳ bán rã tương đối ngắn ( $T_{1/2} = 12,3$  năm) và do các quá trình trao đổi tritium giữa khí quyển và các môi trường khác, đến nay sau gần năm thập kỷ ngừng thử vũ khí hạt nhân, lượng tritium trong nước mưa và trong môi trường thủy quyển hầu như đã trở về mức cân bằng do tia vũ trụ gây ra. Hình 2.8 minh họa kết quả quan trắc tritium trong nước mưa ở Hồng Kông từ năm 1965. Có thể thấy hàm lượng tritium trung bình trong nước mưa đến nay đã giảm đi gần 100 lần. Các kết quả quan trắc tritium trong nước mưa ở Việt Nam cũng cho thấy hàm lượng của nó trong nước đã trở về trạng thái trước khi có các cuộc thử vũ khí hạt nhân hồi thập kỷ 50 của thế kỷ XX.



Hình 2.8. Hàm lượng tritium trong nước mưa ở Hồng Kông quan trắc trong mạng lưới quốc tế IAEA từ năm 1965.

Nguồn nhân tạo thứ hai của T là các lò phản ứng năng lượng, đặc biệt là các lò CANDU dùng nước nặng làm chậm neutron. Phản ứng  $(n, \gamma)$  trên hạt nhân D ( $H^2$ ) trong nước nặng tạo ra T, do đó một lượng phóng xạ tritium khá lớn có thể thoát ra môi trường. Tuy nhiên, lượng phát thải tritium vào không khí từ các lò CANDU ở Canada chỉ bằng 1/10 mức quy định bởi ICRP.

### 2.3.5 Carbon-14

Đồng vị  $C^{14}$  được sinh ra từ phản ứng neutron thứ cấp trong tia vũ trụ với  $N^{14}$ :



Tốc độ sản sinh  $C^{14}$  đạt đến cực đại ở độ cao 9 – 15 km, vùng đệm giữa tầng bình lưu và đối lưu. Tốc độ này cũng tăng lên theo vĩ độ, phản ánh diễn biến của neutron thứ cấp theo vĩ độ địa từ. Sau khi sinh ra,  $C^{14}$  oxy hóa tạo thành phân tử  $C^{14}O_2$ , hòa tan vào bụi nước trong không khí và cuối cùng xâm nhập vào thủy quyển.  $CO_2$  phóng xạ cũng sẽ tham gia vào chu trình carbon, nó được cây cối hấp thụ qua quá trình

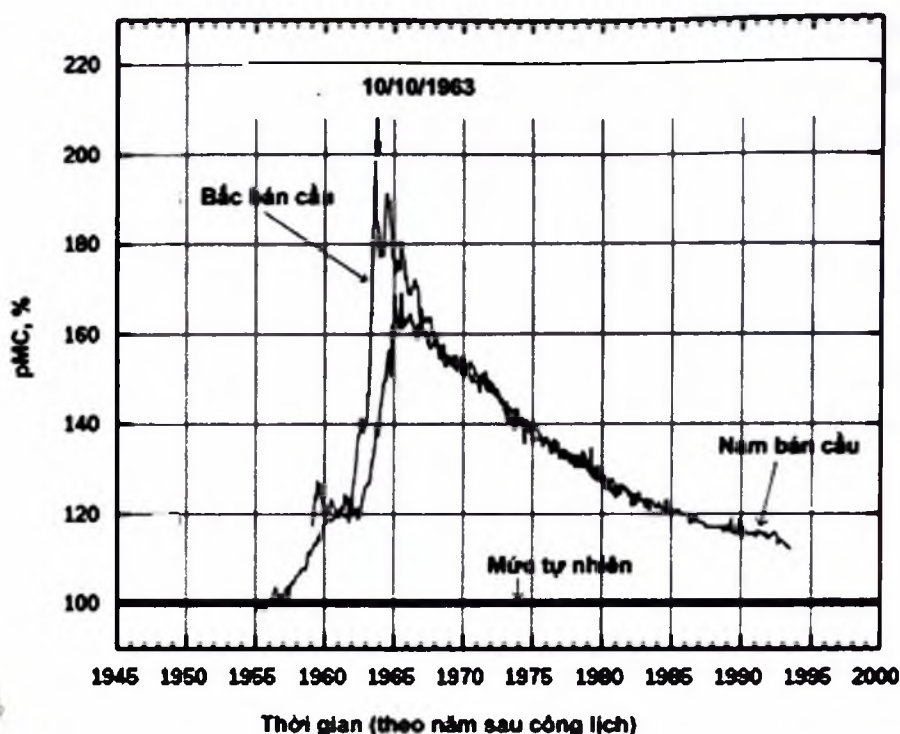
quang hợp hoặc trao đổi với  $\text{CO}_2$  trong nước để cuối cùng lắng đọng thành carbonate. Đồng vị  ${}^6\text{C}^{14}$  phân rã  $\beta^-$  với chu kỳ bán rã khá dài,  $T_{1/2} = 5\,730$  năm.



Sau khi sinh ra,  ${}^6\text{C}^{14}$  phân rã phóng xạ và vận chuyển vào môi trường khác do quá trình trao đổi giữa khí quyển với hệ sinh quyển. Kết quả của các quá trình sinh ra và mất đi làm cho hoạt độ phóng xạ  ${}^6\text{C}^{14}$  trong không khí và trong các mô sống đạt đến trạng thái cân bằng ổn định. Nhiều kết quả nghiên cứu cho thấy hoạt độ phóng xạ  ${}^6\text{C}^{14}$  trung bình trong các mô sống vào khoảng 15 phân rã trong một phút trên một gam C và con số này hầu như không phụ thuộc vào vĩ độ.

Các vụ thử vũ khí hạt nhân trong những thập kỷ 50 – 60 của thế kỷ XX đã tiêm vào khí quyển một lượng  ${}^6\text{C}^{14}$  đáng kể (hình 2.9), duy trì hàm lượng carbon phóng xạ trong không khí cao cho đến những năm cuối thế kỷ trước. Tuy nhiên, sau khi chuyển hóa vào hệ sinh quyển, thành phần carbon phóng xạ do thử vũ khí hạt nhân vẫn bé hơn nhiều so với sản lượng do tia vũ trụ sinh ra. Những kết quả nghiên cứu cho thấy tổng lượng tồn lưu cân bằng (do tia vũ trụ sinh ra) của  $\text{C}^{14}$  trong sinh quyển là 11 000 PBq (1 PBq =  $10^{15}$  Bq) trong khi các cuộc thử vũ khí hạt nhân trong khí quyển chỉ đóng góp 350 PBq, tức là khoảng 3%.

Hàm lượng  $\text{C}^{14}$  trên hình 2.9 tính bằng phần trăm của carbon cận đại (pMC), tức là hàm lượng carbon phóng xạ trong mẫu phân tích so với mẫu chuẩn làm bằng axit oxalic tổng hợp từ mía đường trồng năm 1950, trước khi thử vũ khí khinh khí trong khí quyển, và do Viện Các chất chuẩn và Công nghệ, Mỹ cung cấp. Số liệu được hiệu chỉnh với hàm lượng đồng vị bền  $\text{C}^{12}$ . Phải hiệu chỉnh lại hoạt độ  $\text{C}^{14}$  với hàm lượng  $\text{C}^{12}$  vì  $\text{CO}_2$  trong không khí tăng lên do phát thải công nghiệp sử dụng nhiên liệu hóa thạch trong hai thế kỷ gần đây gây hiệu ứng nhà kính (Nguồn: Wikipedia common, Radiocarbon).



Hình 2.9. Diễn biến hàm lượng  $^{14}\text{C}$  trong không khí đo được trong nửa sau thế kỷ 20 tại Wellington (New Zealand), Nam bán cầu và Vertmunsee (Áo), Bắc bán cầu.

Khi sinh vật chết đi, các quá trình trao đổi  $\text{CO}_2$  với bên ngoài chấm dứt, kể từ đó hoạt độ  $^{14}\text{C}$  trong mô sinh vật chết sẽ giảm dần do phân rã phóng xạ. Dựa trên quy luật phân rã phóng xạ theo hàm mũ và so sánh với hoạt độ phóng xạ các sinh vật đang sống (cũng chính là hoạt độ khi sinh vật chết hàng nghìn năm về trước), người ta có thể xác định niên đại của các cổ sinh vật. Carbon phóng xạ thường được định lượng bằng cách đo tia  $\beta$  năng lượng thấp dùng kỹ thuật nhấp nháy lỏng. Với phương pháp này người ta có thể xác định niên đại các cổ sinh vật không quá một vạn năm về trước với độ chính xác khoảng 50 năm. Gần đây kỹ thuật khối phổ kết nối với máy gia tốc AMS (accelerator mass spectrometer) đã cho phép định lượng  $^{14}\text{C}$  trong những mẫu carbon khối lượng rất bé, cỡ mg, với độ nhạy cao, nhờ đó đã đẩy biên độ niên đại khảo cổ đến sáu vạn năm về trước.

## **2.4 PHƠI NHIỄM DO PHÓNG XẠ TỰ NHIÊN**

Con người bị phơi nhiễm do các tia phóng xạ từ những nuclit phóng xạ trong tự nhiên hoặc có nguồn gốc nhân tạo. Nói chung đối với dân chúng trên toàn cầu, phơi nhiễm do phóng xạ tự nhiên đóng góp phần chủ yếu. Phơi nhiễm do phóng xạ tự nhiên lại gồm có hai thành phần, do chiếu ngoài và do chiếu trong.

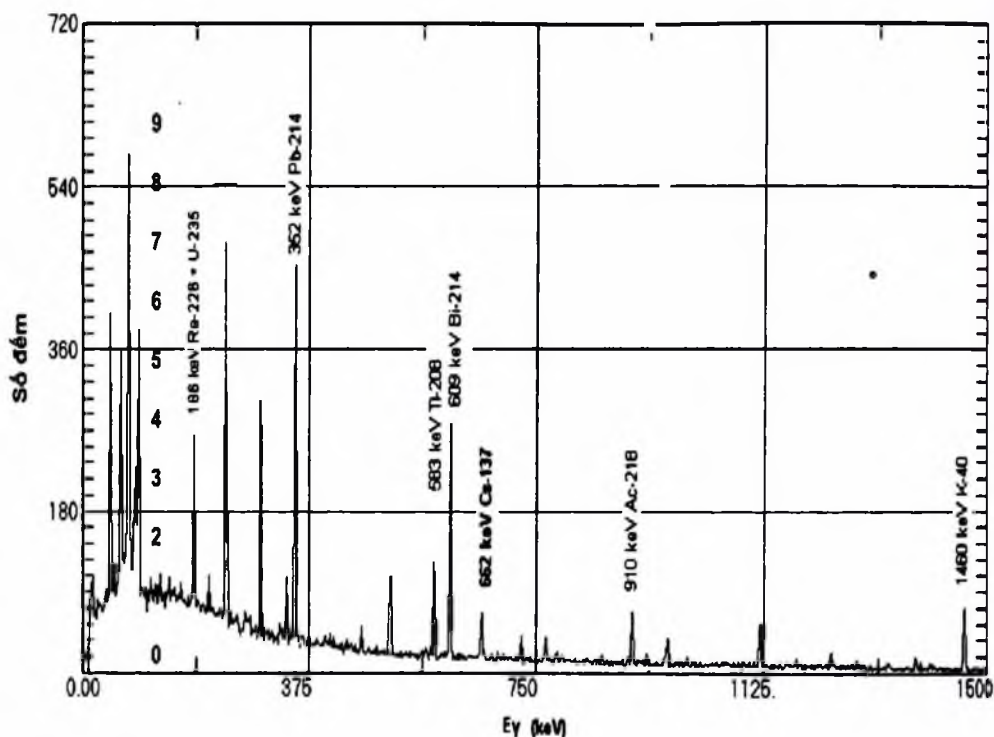
### **2.4.1 Phơi nhiễm do chiếu ngoài từ phóng xạ tự nhiên trong đất đá**

Tia phóng xạ từ những nhân trong lớp đất bề mặt tạo nên phong phóng xạ trên mặt đất và đóng góp chính vào liều chiếu ngoài. Trong ba loại tia phóng xạ alpha, beta, gamma, tia  $\gamma$  đóng góp lớn nhất vào phong phóng xạ trên mặt đất do có khả năng xuyên qua lớp đất bề mặt mạnh hơn hai loại tia kia. Tuy nhiên, ngay đến tia  $\gamma$  phát xuất từ những nhân nằm ở lớp đất sâu hơn 30 cm cũng không đóng góp vào trường phóng xạ trên mặt đất. Tia  $\beta$  xuyên sâu kém hơn nên chỉ những nhân ở lớp đất rất mỏng trên bề mặt mới có tác dụng chiếu xạ ít nhiều. Tia  $\alpha$  từ các nuclit trong đất đá hầu như không đóng góp gì vào phong phóng xạ trên mặt đất, chúng chỉ gây tác dụng khi thâm nhập vào cơ thể qua con đường hô hấp và tiêu hóa.

Trên phạm vi toàn cầu, đóng góp của phong phóng xạ vào liều chiếu ngoài gồm có 35% từ  $K^{40}$ , 25% từ những nuclit phát tia  $\gamma$  trong họ  $U^{238}$  (chủ yếu là hai đồng vị  $Pb^{214}$  và  $Bi^{214}$ ) và 40% từ những nuclit phát tia  $\gamma$  trong họ  $Th^{232}$  (chủ yếu là  $Tl^{228}$  và  $Ac^{228}$ ). Tia  $\gamma$  của những đồng vị vừa kể trên đều thấy rõ trong các mẫu đất phân tích bằng phổ kế gamma dùng detector Ge siêu tinh khiết như trên hình 2.10.

Tại một địa điểm cụ thể nào đó phong phóng xạ phụ thuộc vào hàm lượng các nhân phóng xạ có trong đất đá xung quanh, mà hàm lượng này biến đổi khá mạnh từ vùng này sang vùng khác. Thí dụ ở Việt Nam, hai tỉnh Tuyên Quang và Yên Bái có hàm lượng radium cao gấp ba lần mức trung bình, trong khi đó vùng đất xám miền Đông Nam Bộ như

Bình Phước, Tây Ninh... lại rất nghèo phóng xạ, đặc biệt là  $K^{40}$  (và cả tổng kali) với hàm lượng vài chục lần thấp hơn mức trung bình. Cát đen dọc theo ven biển miền Trung chứa khoáng monazite, nên hoạt độ phóng xạ riêng của thorium trong cát có thể cao hơn mức trung bình hàng chục lần.



Hình 2.10. Phổ gamma mẫu đất bề mặt ở Quảng Nam ghi bằng detector Ge siêu tinh khiết thể tích 120 cm<sup>3</sup>.

(Nguồn: Nguyễn Quang Long, Viện KHKT Hạt nhân Hà Nội).

Tia phóng xạ  $\gamma$  và  $\beta$  trực tiếp chiếu lên con người từ mặt đất khi ở ngoài trời và từ những vật liệu xây dựng khi ở trong nhà. Theo các kết quả nghiên cứu từ nhiều nước trên thế giới, nồng độ gamma bên trong nhà thường cao hơn ngoài trời đến 20%. Thống kê cũng cho thấy trung bình con người sống trong nhà đến 80% thời gian. Cho nên suất liều chiếu ngoài hiệu dụng mà con người nhận được chủ yếu là do sinh hoạt trong nhà.

**Bảng 2.3. Thành phần phóng xạ tự nhiên và liều hiệu dụng trung bình năm lên cơ thể sống từ các thành phần phóng xạ tự nhiên trên thế giới.**

| <i>Thành phần phóng xạ tự nhiên</i>                       | <i>Liều hiệu dụng trung bình hàng năm trên thế giới (mSv/năm)</i> | <i>Khoảng biến thiên (mSv/năm)</i> |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| Tia vũ trụ (chiếu ngoài)                                  | 0,4                                                               | 0,3 – 1,0                          |
| Tia phóng xạ từ đất (chiếu ngoài)                         | 0,5                                                               | 0,3 – 0,6                          |
| Radon (chiếu trong do hô hấp)                             | 1,2                                                               | 0,2 – 10                           |
| Nhân phóng xạ tự nhiên thâm nhập vào cơ thể (chiếu trong) | 0,3                                                               | 0,2 – 0,8                          |
| Tổng cộng chiếu ngoài và chiếu trong                      | 2,4                                                               | 1,0 – 10                           |

#### **2.4.2 Phơi nhiễm do chiếu ngoài từ tia vũ trụ**

Trên toàn cầu liều hiệu dụng trung bình do tia vũ trụ vào khoảng 0,4 mSv/năm (bảng 2.3). Tuy nhiên liều hiệu dụng tăng lên theo độ cao, cụ thể ở độ cao 15 km có thể lên đến 20 mSv/năm ở vùng xích đạo và từ 50 đến 120 mSv/năm ở hai cực tùy theo hoạt động Mặt Trời.

#### **2.4.3 Phơi nhiễm do chiếu trong từ các nguồn phóng xạ tự nhiên**

Các nuclit phóng xạ tự nhiên thâm nhập vào cơ thể theo thức ăn, nước uống và đường hô hấp. Riêng với  $K^{40}$ , đồng vị này còn tồn tại trong các mô như một thành phần đồng vị của kali với hàm lượng trong cơ thể thay đổi từ 1 đến 2,5 g/kg thể trọng, tập trung chủ yếu ở các mô cơ bắp. Quy ra hoạt độ phóng xạ, người nặng 70 kg có thể xem như một nguồn phóng xạ hoạt độ 4 000 Bq  $K^{40}$ . Kali-40 còn thâm nhập vào cơ thể qua thức ăn. Hàm lượng  $K^{40}$  trong thực phẩm nằm trong khoảng từ 20 đến 600 Bq.kg<sup>-1</sup>.

Tính chung, liều hiệu dụng trung bình do chiếu trong từ các nuclit có trong đất như  $U^{238}$ ,  $Ra^{226}$ ,  $Th^{232}$  và  $K^{40}$  là 0,3 mSv/năm.

Trong số các nuclit phóng xạ tự nhiên,  $^{222}\text{Rn}$  đóng góp nhiều nhất vào liều chiếu trong. Liều hiệu dụng chiếu trong trung bình do hít thở các con – cháu  $\text{Rn}^{222}$  là 1,2 mSv/năm gấp bốn lần phần đóng góp do tất cả các nuclit phóng xạ khác cộng lại (0,3 mSv/năm) (bảng 2.3).  $\text{Rn}^{222}$  phân rã  $\alpha$  với chu kỳ bán phân rã 3,82 ngày, nhưng vì radon là khí trơ nên bản thân nuclit này lại theo hơi thở ra ngoài và chỉ gây ra rất ít hậu quả cho cơ thể. Gây ra liều chiếu trong chủ yếu là do các con cháu của nó, những đồng vị phát tia  $\gamma$  với chu kỳ bán rã ngắn hơn 30 phút như  $\text{Bi}^{214}$ ,  $\text{Pb}^{214}$ ... Khi radon hòa ra không khí, các nuclit này liên kết với sol khí có kích thước micron, từ đó xâm nhập sâu vào phổi theo đường hô hấp và gây ra liều chiếu trong. Hàm lượng  $\text{Rn}^{222}$  và con cháu trong không khí về mùa hè cao hơn mùa đông, ban đêm cao hơn ban ngày.

## 2.5 PHƠI NHIỄM PHÓNG XẠ VÀ TÁC HẠI ĐẾN SỨC KHỎE

### 2.5.1 Định nghĩa về liều phơi nhiễm và các đơn vị đo

Mức độ tác hại do phơi nhiễm phóng xạ trước hết phụ thuộc vào năng lượng do tia phóng xạ truyền cho vật chất, gọi là liều hấp thụ  $D$ , được định nghĩa như tỷ số của năng lượng hấp thụ  $d\varepsilon$  trên khối lượng vật chất  $dm$ . Trong hệ SI liều hấp thụ được đo bằng gray (Gy),  $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J.kg}^{-1}$ . Trong nhiều trường hợp, người ta còn dùng đơn vị rad,  $1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ Gy}$ .

Nhưng tác hại đến cơ thể từ cùng một năng lượng hấp thụ có thể rất khác nhau tùy theo dạng tia bức xạ. Nếu trường bức xạ có nhiều thành phần  $R$  khác nhau, tác hại phải được đánh giá theo liều tương đương

$$H = \sum_R D_R \cdot Q_R \quad (2.28)$$

$Q$  được gọi là hệ số phẩm chất đối với thành phần bức xạ  $R$ . Theo khuyến cáo của ICRP,  $Q = 1$  đối với tia X, tia  $\gamma$  và electron,  $Q = 10$  đối với neutron, proton và các hạt đơn điện tích có khối lượng tĩnh lớn hơn 1 amu,  $Q = 20$  đối với hạt  $\alpha$  và các hạt đa điện tích. Liều tương đương  $H$  cũng được đo trong hệ SI như liều hấp thụ  $D$  ( $\text{J.kg}^{-1}$ ) nhưng có tên gọi riêng là sievert (Sv),  $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J.kg}^{-1}$ . Ngoài ra, người ta cũng hay dùng đơn vị rem,  $1 \text{ rem} = 10^{-2} \text{ Sv}$ .

Các mô/cơ quan nội tạng khác nhau trong cơ thể lại có độ nhạy cảm khác nhau khi nhận cùng một liều tương đương. Để tính tác hại khi chiếu xạ toàn thân, người ta phải đưa thêm trọng số  $W_T$  cho từng mô chính (T), như công thức sau:

$$H_E = \sum_T W_T \cdot H_T \quad (2.29)$$

$H_E$  được gọi là liều tương đương hiệu dụng. Theo khuyến cáo của ICRP, trọng số  $W_T$  có số trị cao nhất đối với bộ phận sinh dục (0,25) và vú (0,15), sau đó đến tủy và phổi (0,12), tuyến giáp và mặt xương (0,03), các mô còn lại có trọng số chung là 0,3.

### **2.5.2 Mối quan hệ giữa liều phơi nhiễm với hiệu ứng sinh học**

Công thức (2.29) chỉ dùng để đánh giá tác hại đến sức khỏe dựa trên mối quan hệ mang tính ngẫu nhiên (stochastic) giữa liều phơi nhiễm và hiệu ứng sinh học, như soma ác tính và di truyền. Khi một tập hợp người bị phơi nhiễm với cùng liều hiệu dụng tương đương nhau, những hiệu ứng sinh học như thế chỉ phát hiện ở một vài cá nhân nào đó, cho nên mối quan hệ giữa liều và hiệu ứng sinh học mang tính xác suất, và thường được xác lập với độ tin cậy không cao. Hiệu ứng lại có thể bị trì hoãn một thời gian dài vì các bệnh lý di truyền và ác tính do tia phóng xạ thường chỉ xuất hiện sau nhiều năm và mang tính ngẫu nhiên. Liều phơi nhiễm trong mối quan hệ ngẫu nhiên này thường thấp, nhưng vẫn trong phạm vi quản lý an toàn bức xạ.

Khác với mối quan hệ ngẫu nhiên, quan hệ tất định (deterministic, non-stochastic) giữa liều phơi nhiễm và hiệu ứng sinh học chỉ xuất hiện khi liều tương đương hiệu dụng vượt quá một ngưỡng nhất định nào đó. Quan hệ tất định có ngưỡng này thường thấy ở các hiện tượng bỏng da không ác tính, đục thủy tinh thể, hư hỏng tế bào sinh dục dẫn đến suy giảm khả năng sinh sản... Trong mối quan hệ này, liều càng cao hiệu ứng càng nghiêm trọng và càng ít bị trì hoãn.

Tính tất định nói lên hệ quả chắc chắn xảy ra thể hiện rõ nhất ở vùng liều cao trên ngưỡng 50 rem với những hiệu ứng sinh học cấp tính. Liều 500 rem được xem là liều tử vong, 50% số người nhận liều này sẽ chết trong vòng vài tuần lễ, vì thế liều 500 rem có tên gọi riêng, liều tử vong 50 (lethal dose 50, LD 50). Thời gian từ lúc bị phơi nhiễm đến lúc chết sẽ giảm xuống còn vài ngày với liều 5 000 rem và vài giờ với liều 15 000 rem. Tai nạn điện hạt nhân Chernobyl xảy ra năm 1986 ở Liên Xô (cũ) là một trường hợp thực tế hi hữu qua đó có thể kiểm chứng các kết quả nghiên cứu nói trên. Từ tai nạn này người ta thấy nhiều công nhân nhận liều vượt quá 500 rem nhưng vẫn sống sót nhờ được chăm sóc y tế chu đáo.

Những thông tin sau đây giúp ta hình dung liều 500 rem lớn đến mức nào. Một nguồn  $\text{Co}^{60}$  hoạt độ 01 Ci phát tia gamma năng lượng 1,3 MeV tạo ra ở khoảng cách 1 m liều phơi nhiễm 2,2 rem trong một phút. Các nguồn  $\text{Co}^{60}$  hiện nay được sử dụng rộng rãi trong công nghiệp và ở các bệnh viện thường có hoạt độ hàng nghìn Ci và phải được che chắn rất chu đáo.

Nguồn  $\text{Ir}^{192}$  có hoạt độ khoảng 100 Ci phát tia gamma năng lượng trung bình khoảng 460 keV, đang được sử dụng rất rộng rãi để chụp ảnh kiểm tra không hủy thể trong công nghiệp. Nếu chẳng may nguồn bị rơi ra ngoài lớp chì bảo vệ và không được che chắn, liều phơi nhiễm ở cách 1 m sẽ là 0,82 rem trong một phút. Mức liều này khá cao và sự cố được xem như tai nạn phóng xạ. Mới đây, tháng 6/2014, CNN đưa tin cảnh sát phải ban bố tình trạng khẩn cấp ở một thành phố của Mexico khi phát hiện một nguồn loại này bị mất cắp.

Trong khi quan hệ tất định giữa liều và hiệu ứng sinh học được xác lập với độ tin cậy khá cao, thì quan hệ ngẫu nhiên ở những dải liều tương đối thấp có độ tin cậy không cao lắm, thậm chí ở đây còn nhiều vấn đề đang tranh cãi, gây khó khăn cho việc định giới hạn liều cho dân chúng và nhân viên phóng xạ trong các quy phạm an toàn bức xạ. Có tình trạng này là do số người trong mẫu nghiên cứu thường không đủ lớn,

hiệu ứng do phóng xạ khó phân biệt với các nguyên nhân khác, và vì các hiệu ứng do tia phóng xạ không xảy ra ngay mà thường bị trì hoãn.

Trước những năm 1960, các quy phạm an toàn bức xạ đã dựa trên quan điểm cho rằng hiệu ứng sinh học chỉ đáng quan tâm khi liều tương đương hiệu dụng vượt quá một ngưỡng nào đó, 5 rem trong một năm đối với công chúng. Nhưng quan niệm này đã bị bác bỏ sau khi có nhiều bằng chứng thực nghiệm và dịch tễ học cho thấy hiệu ứng sinh học mang tính thống kê vẫn xảy ra ở những mức liều rất thấp. Từ đó, mối quan hệ liều – hiệu ứng không có ngưỡng được quán triệt trong các quy phạm an toàn bức xạ. Các giới hạn liều đối với dân chúng và nhân viên bức xạ ở các quy phạm an toàn phải được hiểu là những quy định mang tính hành pháp, mà không hề có ý nghĩa giới hạn bảo đảm an toàn. Nói cách khác, một liều dưới giới hạn cho phép trong quy phạm vẫn không thể xem là an toàn.

Hiện nay, đối với công chúng, giới hạn cho phép về liều hiệu dụng tương đương hàng năm được quy định là 5 mSv hay 0,5 rem. Ngoài ra còn quy định liều hiệu dụng tương đương hàng năm không vượt quá 50 mSv, hay 5 rem cho các mô và cơ quan nội tạng riêng lẻ ở một số nhóm công chúng đặc biệt. Đối với nhân viên bức xạ, các giới hạn này được nâng lên mười lần. Những quy định chi tiết hơn đối với công chúng và nhân viên bức xạ, cũng như những giới hạn thứ cấp và phái sinh khác có thể tham khảo trong các văn bản pháp quy về tiêu chuẩn an toàn bức xạ như IAEA Safety Standards, 1982.

### **2.5.3 Liều tập thể**

Quan điểm không có ngưỡng trong mối quan hệ liều – hiệu ứng tuy được chấp nhận rộng rãi, nhưng diễn tả chính xác mối quan hệ này như thế nào luôn là vấn đề tranh cãi. Từ những số liệu thực nghiệm và dịch tễ học trong phạm vi liều hấp thụ dưới vài gray, người ta thấy có thể dùng biểu thức tương đối tổng quát sau đây:

$$E = aD + bD^2 \quad (2.30)$$

Trong đó  $E$  là hiệu ứng,  $D$  là liều hấp thụ,  $a$  và  $b$  là những hằng số. Trong công thức trên, số hạng bậc hai lấn át ở vùng liều cao, số hạng bậc nhất đóng góp chính ở vùng liều thấp. Tuy nhiên, các hằng số  $a$  và  $b$  không thể xác lập nhất quán. Cho nên, khi đưa ra các nguyên tắc bảo vệ bức xạ, người ta phải theo cách tiếp cận thận trọng, xem quy luật liều – hiệu ứng là tuyến tính và không có ngưỡng, hệ số tuyến tính sẽ được chính xác hóa căn cứ trên số liệu thực nghiệm ngày càng tin cậy. Quan hệ liều – hiệu ứng này trong an toàn bức xạ được gọi là mô hình tuyến tính không ngưỡng (linear non-threshold model, LNT).

Xuất phát từ mô hình LNT, người ta đã đưa ra khái niệm liều tập thể cho phép cộng liều phơi nhiễm của từng cá nhân trong cộng đồng để đánh giá hiệu ứng sinh học tập thể. Trong hệ SI, liều tập thể được đo bằng *người-Siverts*. Ngoài ra người ta còn dùng đơn vị *người.rem*. Sử dụng mô hình LNT, Ủy ban nghiên cứu hiệu ứng sinh học do bức xạ ion hóa thuộc Viện hàn lâm khoa học Mỹ đã đánh giá xác suất gây ung thư không do phóng tự nhiên là  $5,7 \times 10^{-4}$  tử vong/người.rem. Cụ thể hơn, nếu một tai nạn điện hạt nhân làm cho 10 000 dân bên ngoài nhà máy nhận thêm bình quân 1 rem mỗi người ngoài liều do phóng tự nhiên, thì gần 6 người trong số họ sẽ tử vong vì ung thư. Nhắc lại, liều cá nhân do phóng tự nhiên bình quân trên thế giới là 0,24 rem/năm (bảng 2.3).

Tuy nhiên cách sử dụng mô hình LNT như trên không khỏi gây ra tranh cãi và chỉ trích. Chẳng hạn, ICRP cho rằng: "Liều tập thể là một công cụ để tối ưu hóa, để so sánh các kỹ thuật và quy trình trong bảo vệ bức xạ. Liều tập thể không nên dùng như công cụ nghiên cứu dịch tễ học bức xạ, và không thích hợp cho những đánh giá rủi ro do tiếp xúc với bức xạ. Đó là vì những giả định dùng để tính toán liều tập thể (theo mô hình LNT) có độ bất định thống kê cao. Đặc biệt, những tính toán xác suất tử vong do ung thư dựa trên liều tập thể là không hợp lý do đó đừng nên sử dụng".

## 2.6 THỰC THI BẢO VỆ BỨC XẠ THEO BA KHUYẾN CÁO CỦA ICRP

Những bất định xung quanh mối quan hệ liều – hiệu ứng sinh học cũng như cách định nghĩa các giới hạn liều nêu ra trên đây đã gây khó khăn cho công tác quản lý an toàn bức xạ. Trước tình hình đó, ICRP đã đưa ra một khuyến cáo (ICRP, 1977) xem như ba nguyên tắc cơ bản trong quản lý và bảo vệ bức xạ.

Thứ nhất là nguyên tắc *minh chứng* (justification) phát biểu rằng không cho phép mọi hoạt động khiến con người bị phơi nhiễm tia phóng xạ trừ phi hoạt động ấy mang lại lợi ích ròng sau khi đã cân nhắc kỹ những thiệt hại do bức xạ gây ra.

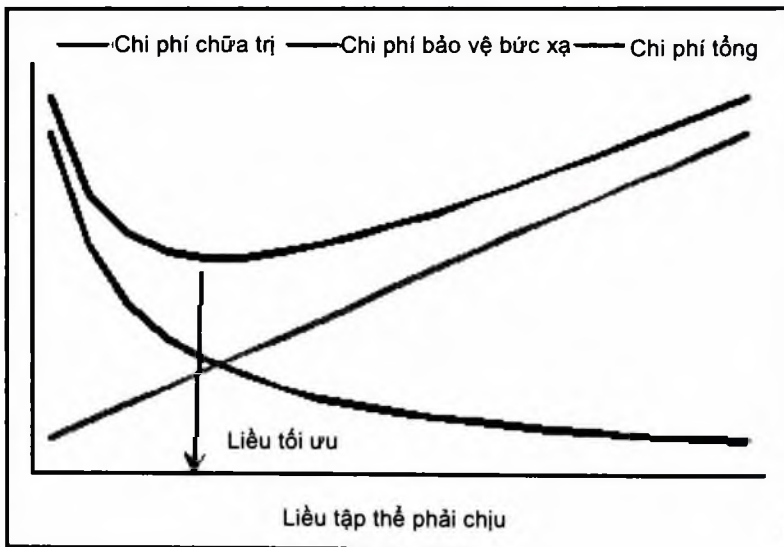
Theo nguyên tắc này, mọi hoạt động sử dụng tia phóng xạ phải mang lại lợi ích ròng sau khi đã xem xét chu đáo mọi mặt lợi hại. Tốt nhất là phải giải bài toán chi phí – lợi ích trước khi đưa ra quyết định cho phép thực hiện một yêu cầu có thể gây ra phơi nhiễm do tia phóng xạ. Nguyên tắc này gây ra thách thức lớn cho các ứng dụng kỹ thuật hạt nhân, kể cả điện hạt nhân, khi mà các kỹ thuật này luôn phải cạnh tranh với các kỹ thuật khác không gây ra phơi nhiễm.

Thứ hai là nguyên tắc *tối ưu* (optimization). Phơi nhiễm phải được giữ ở mức thấp nhất một cách hợp lý trong điều kiện có thể đạt được (as low as reasonably achievable) có tính đến các yếu tố kinh tế và xã hội. Đây là nguyên tắc ALARA nổi tiếng, viết tắt từ cụm từ tiếng Anh trên đây. Nguyên tắc này yêu cầu phải thiết kế các biện pháp bảo vệ bức xạ nhằm giảm thiểu tác hại từ phơi nhiễm do tia phóng xạ đến mức tối ưu sao cho không đáng để cố gắng giảm thiểu tiếp.

Yêu cầu này được minh họa trên hình 2.21. Trong thực thi sử dụng tia phóng xạ, khi tìm cách giảm liều tập thể, với kỳ vọng giảm chi phí chữa trị y tế, thì chi phí bảo vệ bức xạ lại tăng lên, do đó tổng chi phí sẽ đạt đến một cực trị khi ấy liều tập thể phải chấp nhận có thể xem như tối

ưu. Từ đó trở đi, tiếp tục giảm liều tập thể sẽ mất ý nghĩa vì không thể biện minh cho những đầu tư tăng thêm quá cao để bảo vệ bức xạ.

Nguyên tắc thứ ba được gọi là *giới hạn về liều cá nhân*. Theo nguyên tắc này, liều tương đương mà cá nhân phải chịu trong các thực thi ứng dụng tia phóng xạ không được vượt quá giới hạn cho phép. Trong công tác bảo vệ bức xạ, cần phân biệt hai loại giới hạn sơ cấp và thứ cấp, liều đối với dân chúng và nhân viên bức xạ. Giới hạn sơ cấp bao gồm liều tương đương và liều tương đương hiệu dụng. Liều giới hạn thứ cấp được sử dụng khi liều giới hạn sơ cấp không thích hợp. Thí dụ, để phân biệt chiếu xạ ngoài vào các lớp mô nông và sâu người ta phải dùng chỉ số liều tương đương thay cho liều tương đương. Đối với chiếu trong, giới hạn thứ cấp là giới hạn thâm nhập hàng năm vào cơ thể (annual limits on intake, ALI).



Hình 2.11. Minh họa liều tập thể tối ưu theo nguyên tắc ALARA

Ba khuyến cáo cơ bản của ICRP đã giúp mọi người có tư duy và hành động đúng đắn trong thực thi ứng dụng tia phóng xạ nhằm dung hòa được yêu cầu phát triển cộng đồng mà lại hạn chế được tác hại đến sức khỏe con người.

### **TÀI LIỆU THAM KHẢO**

1. Weiss, Achim. "Elements of the past: Big Bang Nucleosynthesis and observation". *Einstein Online*.
2. IAEA Basic Safety Standards for Radiation Protection, 1982.
3. ICRP 26. Khuyến cáo của Ủy hội quốc tế về bảo vệ chiếu xạ, Pergamon Press, Oxford (1977).

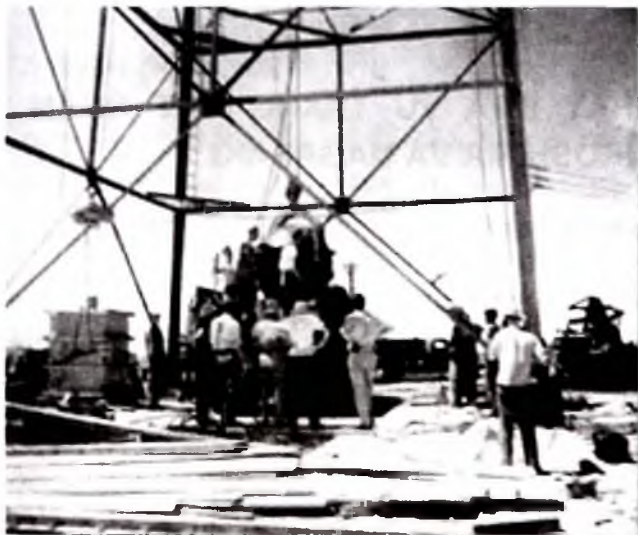


# 3

## Thủ vũ khí hạt nhân trong khí quyển

Sau khi phát xít Đức đầu hàng đồng minh ngày 9 tháng 5 năm 1945, ở mặt trận Thái Bình Dương Nhật Bản gần như tuyệt vọng, chỉ chờ ngày hạ vũ khí. Trong những ngày này đã diễn ra nhiều cuộc thương lượng để Nhật đầu hàng vô điều kiện. Trong thế vô vọng không có gì để mặc cả, phía Nhật chỉ yêu cầu Nhật hoàng được tại vị. Mỹ không chấp thuận, nhưng không vội thúc ép.

Sáng 17 tháng 6, các nhà khoa học Mỹ đã cho nổ thành công quả bom nguyên tử đầu tiên làm bằng plutonium lấy từ lò phản ứng (xem hình). Sức công phá đã vượt quá mọi tưởng tượng của chính những nhà khoa học chế tạo ra nó.



Cơ cấu nguyên tử đầu tiên được cho nổ tại một địa điểm trên sa mạc bang New Mexico (Nguồn internet)

Ngày 06 và 09 tháng 8 hai quả bom nguyên tử làm bằng plutonium và uranium giàu với sức công phá gần 20 nghìn kiloton TNT mỗi quả đã hủy diệt hai thành phố Hiroshima và Nagasaki, giết chết thảm hơn 225 nghìn người dân vô tội bằng sức nổ, bỏng nhiệt và tia phóng xạ. Ngày 15/8 Nhật hoàng Hirohito tuyên bố đầu hàng. Mỹ và phe đồng minh chấp thuận, đồng thời chấp thuận cả sự tại vị của Nhật hoàng sau chiến tranh.

Không có bất cứ lý do nào biện minh cho ba tháng kéo dài chiến tranh để cuối cùng phải nhận lấy thảm cảnh ở Hiroshima và Nagasaki. Ngược lại, cũng không có bất cứ lý do nào biện minh cho hành động hủy diệt bằng bom nguyên tử của Mỹ. Ngay đến những tướng lĩnh chủ chốt, trong đó có D. MacArthur, tư lệnh lực lượng đồng minh ở Thái Bình Dương cũng hoài nghi rằng thảm họa nguyên tử này không phải là không thể tránh được. Các nhà khoa học thai nghén ra bom nguyên tử càng không muốn nhìn thấy thành quả lao động của mình giết chết những người dân vô tội. Đối với Einstein, đây là nỗi dằn vặt không nguôi trong những năm cuối đời. Năm tháng trước khi qua đời (1955), Einstein còn kịp trần trối đã phạm sai lầm lớn nhất trong đời khi viết thư đề nghị Tổng thống Mỹ Roosevelt làm bom nguyên tử.

### **3.1 CHẠY ĐUA VŨ TRANG HẠT NHÂN SAU THẢM HỌA HIROSHIMA VÀ NAGASAKI**

#### **3.1.1 Bom A và bom H**

Hai quả bom nguyên tử Mỹ ném xuống Hiroshima và Nagasaki đã khởi đầu cuộc chạy đua vũ trang hạt nhân và cuộc chiến tranh lạnh giữa các nước đồng minh trong thế chiến thứ hai. Hàng trăm quả bom nguyên tử và khinh khí được Mỹ, Liên Xô (cũ) và một số nước khác mang ra thử nghiệm, gieo rắc chất phóng xạ khắp toàn cầu. Một nguồn phóng xạ lớn ảnh hưởng đến môi trường là từ công nghiệp điện hạt nhân. Công suất điện hạt nhân tăng lên nhanh chóng trong hai thập kỷ 70 – 80 của thế kỷ XX, nhưng trừ một số địa điểm chịu ảnh hưởng trực tiếp bởi các nguồn phát thải điện hạt nhân, các nhân phóng xạ nhân tạo trong môi trường

toàn cầu do điện hạt nhân vẫn không đáng kể so với những vụ thử vũ khí hạt nhân trong khí quyển. Sau năm 1980 các cuộc thử vũ khí hạt nhân chỉ tiến hành dưới lòng đất sâu, hầu như không gây phát tán chất phóng xạ vào môi trường khí và nước.

Vũ khí hạt nhân có thể chia làm hai loại, bom nguyên tử theo cơ chế phân hạch và bom khinh khí dựa trên phản ứng ghép hạt nhân nhẹ trong điều kiện nhiệt hạch. Trường hợp thứ nhất thường gọi là bom A, có sức nổ không quá một trăm kiloton TNT, chất phóng xạ phát ra từ vụ nổ là các sản phẩm phân hạch (xem 1.5.2). Trường hợp thứ hai còn gọi là bom H, có sức nổ mạnh hơn nhiều, từ hàng trăm kiloton (kt) đến hàng chục triệu megaton (Mt) TNT. Trong sản phẩm phóng xạ của bom khinh khí, ngoài các mảnh vỡ phân hạch còn có những đồng vị phóng xạ do kích hoạt neutron và những đồng vị phóng xạ nhẹ như  $H^3$ ,  $C^{14}$ ,  $Na^{22}$ ... Phân biệt ra bom nguyên tử và bom khinh khí chỉ có tính chất quy ước. Thực ra trong bom khinh khí cũng có cơ chế phân hạch đóng góp phần quan trọng trong cường độ bom cũng như lượng chất phóng xạ phát ra khi bom nổ (bảng 3.1).

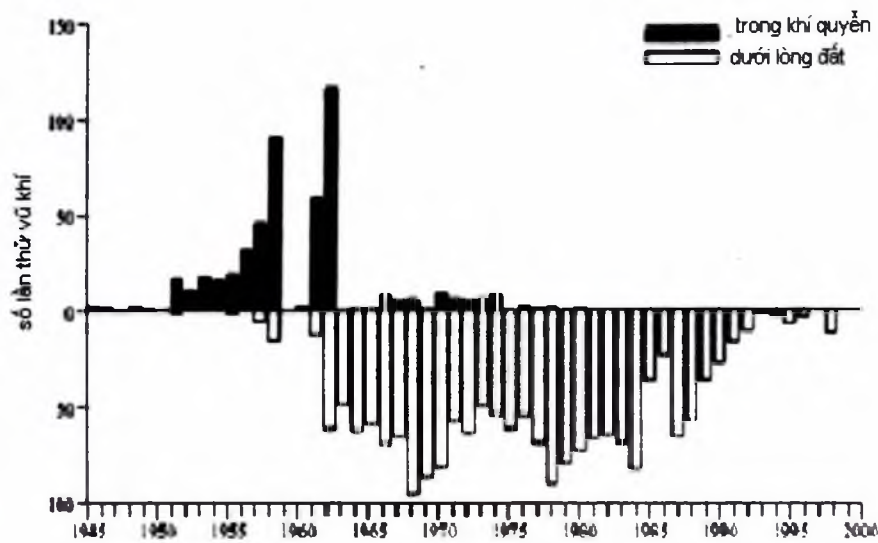
### **3.1.2 Thử vũ khí hạt nhân trong khí quyển của năm cường quốc**

Về năng lượng, trong vụ nổ hạt nhân có từ 40 đến 50% năng lượng tỏa ra dưới dạng sóng xung kích, còn lại là bức xạ nhiệt (30 – 50%), bức xạ ion hóa trực tiếp từ neutron và tia gamma (5%) và bức xạ từ các nhân phóng xạ (5%). Tuy nhiên, tùy theo kết cấu của bom cũng như địa hình và môi trường xảy ra vụ nổ mà thành phần trên có thể thay đổi ít nhiều. Cơ chế hủy hoại vật lý của thành phần thứ nhất (sóng cơ) và thứ hai (bức xạ nhiệt) của bom nguyên tử giống như ở các loại vũ khí thông thường, có điều là năng lượng tỏa ra trong vụ nổ hạt nhân lớn hơn gấp bội. Chẳng hạn, quy mô hủy hoại do sóng xung kích của bom nguyên tử 20 kt TNT cho nổ ở độ cao 500 m có thể làm bình địa hoàn toàn trong phạm vi đường kính 600 m và phá hủy hầu hết các công trình dân sự trong phạm vi 1,7 km. Trong khi đó, bức xạ nhiệt có thể gây ra đại hỏa

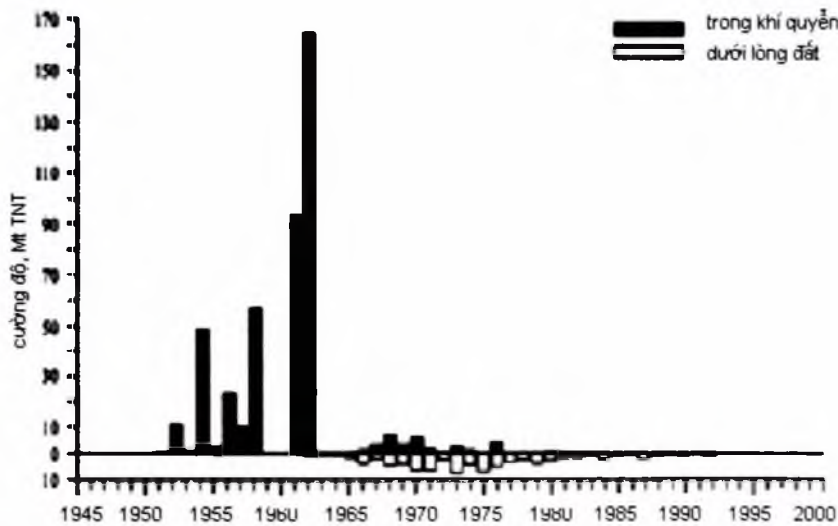
hoạt trong phạm vi 2 km, còn bức xạ ion hóa trực tiếp từ neutron và tia gamma có thể gây ra liều tử vong trong phạm vi 1,4 km. Chỗ khác nhau giữa vũ khí hạt nhân với vũ khí thông thường là các hiệu ứng cơ và nhiệt có tác dụng hủy diệt tại chỗ và ngay tức thời, còn bức xạ ion hóa trực tiếp có thể gây ra tử vong muộn hơn. Sản phẩm phóng xạ từ những mảnh vỡ phân hạch và kích hoạt neutron lan truyền xa hơn và còn gây tác hại trong phạm vi rộng hơn, nhưng chậm hơn.

Mỹ, Liên Xô (cũ), Anh, Pháp và Trung Quốc là năm cường quốc có vũ khí hạt nhân đem ra thử trong khí quyển từ năm 1945 đến 1980. Sau khi hiệp định cấm thử vũ khí hạt nhân trong khí quyển giữa Mỹ và Liên Xô (cũ) có hiệu lực năm 1963, hai nước này chỉ thử dưới lòng đất sâu, chất phóng xạ hầu như không thoát ra ngoài môi trường. Nhưng Pháp và Trung Quốc chưa tham gia hiệp định trên nên vẫn tiếp tục thử trong khí quyển. Pháp bắt đầu thử vũ khí hạt nhân từ năm 1960 và tiếp tục thử trong khí quyển mãi cho đến 1974. Trung Quốc chậm hơn Pháp vài năm, bắt đầu từ 1964 và đến 1980 mới chấm dứt thử trong khí quyển. Các nước tham gia "câu lạc bộ hạt nhân" sau này bao gồm Ấn Độ, Pakistan và Bắc Triều Tiên chỉ thử vũ khí dưới lòng đất.

Thông tin chi tiết về các vụ nổ hạt nhân thường được giữ kín, chỉ sau chiến tranh lạnh mới được bạch hóa ít nhiều. Theo UNSCEAR (2000) dựa trên những thông tin có được từ chính những nước đã thử vũ khí hạt nhân, cả thảy có 543 vụ thử vũ khí hạt nhân trong khí quyển với sức nổ tổng cộng tương đương 430 Mt TNT. Hình 3.1 ghi lại tổng số lần thử vũ khí hạt nhân trong khí quyển của năm cường quốc trước năm 2000, kèm theo đó là diễn biến số lần thử dưới lòng đất. Các cuộc thử vũ khí dưới lòng đất tuy áp đảo về số lượng nhưng có sức nổ thấp hơn rất nhiều (hình 3.2). Hình 3.3 đánh dấu các địa điểm thử vũ khí hạt nhân trong khí quyển của năm cường quốc và sức nổ tổng cộng. Tất cả có 12 địa điểm nổ hạt nhân trải ra hầu khắp năm châu, trừ Nam Mỹ.



Hình 3.1. Diễn biến số lần thử vũ khí hạt nhân trong khí quyển và dưới lòng đất trước năm 2000 của năm cường quốc Mỹ, Liên Xô (cũ), Anh, Pháp và Trung Quốc (UNSCEAR, 2000).



Hình 3.2. Cường độ các vụ nổ hạt nhân trong khí quyển và dưới lòng đất trước năm 2000 của năm cường quốc Mỹ, Liên Xô (cũ), Anh, Pháp và Trung Quốc (UNSCEAR, 2000).

Để có thể tính toán thành phần và hoạt độ của các nuclit phóng xạ thoát ra môi trường cần có thông tin đầy đủ liên quan đến từng vụ thử như địa

điểm, ngày thử, loại vũ khí, sức nổ... (UNSCEAR, 2000). Những thông tin loại này được tổng hợp trong bảng 3.1 cho từng nước. Trong bảng này, việc phân định ra phần đóng góp từ phản ứng phân hạch và nhiệt hạch chỉ có tính chất ước lượng gần đúng. Cụ thể là phần đóng góp của phản ứng phân hạch là 67% trong những vũ khí có sức nổ trong khoảng 0,1 – 0,5 Mt TNT giảm xuống còn 50% trong các vũ khí có sức nổ từ 0,5 đến 5 Mt TNT. Với 17 vụ thử có sức nổ rất lớn, trong khoảng 5 đến 25 Mt TNT, phần đóng góp từ phản ứng phân hạch còn ít hơn nữa, 33%. Riêng với quả bom "vua" 50 Mt TNT của Liên Xô (cũ) thử năm 1961, phần đóng góp từ phản ứng phân hạch được ước lượng chỉ khoảng 3%, 97% còn lại là do phản ứng nhiệt hạch.

Những vụ thử với cường độ lớn hơn 4 Mt TNT (25 vụ) tuy chỉ chiếm 4,6% về số vụ nhưng đóng góp 55% vào lượng sản phẩm phân hạch tung ra môi trường. Xét số lượng vụ thử phân bố theo thời gian (hình 3.2) cho thấy năm 1962 hai nước Mỹ và Liên Xô (cũ) đã tiến hành 165 vụ, nhiều nhất trong tất cả các năm. Từ 1963 trở đi, thi hành hiệp định cấm thử vũ khí hạt nhân trong khí quyển, hai nước không tiến hành vụ thử nào. Các vụ thử sau đó của Pháp và Mỹ có sức nổ không lớn. Vì thế năm 1963 được xem là cọc mốc chấm dứt việc bom chất phóng xạ vào khí quyển. Cọc mốc này được sử dụng để tính tuổi trầm tích và tốc độ xói mòn đất trong các nghiên cứu dựa trên chỉ thị phóng xạ  $Cs^{137}$ .

**Mối quan hệ giữa năng lượng nổ hạt nhân, năng lượng trong lò phản ứng và hoạt độ phóng xạ các mảnh vỡ phân hạch**

1 g TNT (trinitrotoluene) tương đương 1 kcal = 4.184 J = 1,15 kW.h.

1 Mt TNT tương ứng với  $1,45 \times 10^{26}$  phân hạch.

Một lò phản ứng công suất điện 1 000 MW hay công suất nhiệt 3 000 MW hoạt động liên tục trong một năm (8 760 h) sản sinh ra năng lượng  $2,26 \times 10^{16}$  calo tương đương  $2,26 \times 10^4$  kt TNT hay 1 130 quả bom thả xuống Hiroshima (20 kt TNT) tính theo lượng phóng xạ phát ra.

Nhưng chỗ khác nhau căn bản là trong lò phản ứng, năng lượng nói trên phát ra liên tục trong một năm và có thể điều khiển được, trong khi đó ở bom nguyên tử năng lượng phát ra tức thì, công suất rất lớn, gây công phá lớn.

Về các nuclit phóng xạ, chúng có tỷ suất phân hạch như nhau trong bom nguyên tử và lò phản ứng. Tuy nhiên, những nuclit phóng xạ có thời gian sống ngắn bị phân rã ngay trong quá trình vận hành lò nên sự tương đương giữa lò phản ứng và bom nguyên tử về phóng xạ tính theo năng lượng phân hạch phát ra chỉ đúng đối với những đồng vị sống rất lâu, hàng chục năm trở lên như  $\text{Sr}^{90}$ ,  $\text{Cs}^{137}$ ,  $\text{Pu}^{239}$ ...

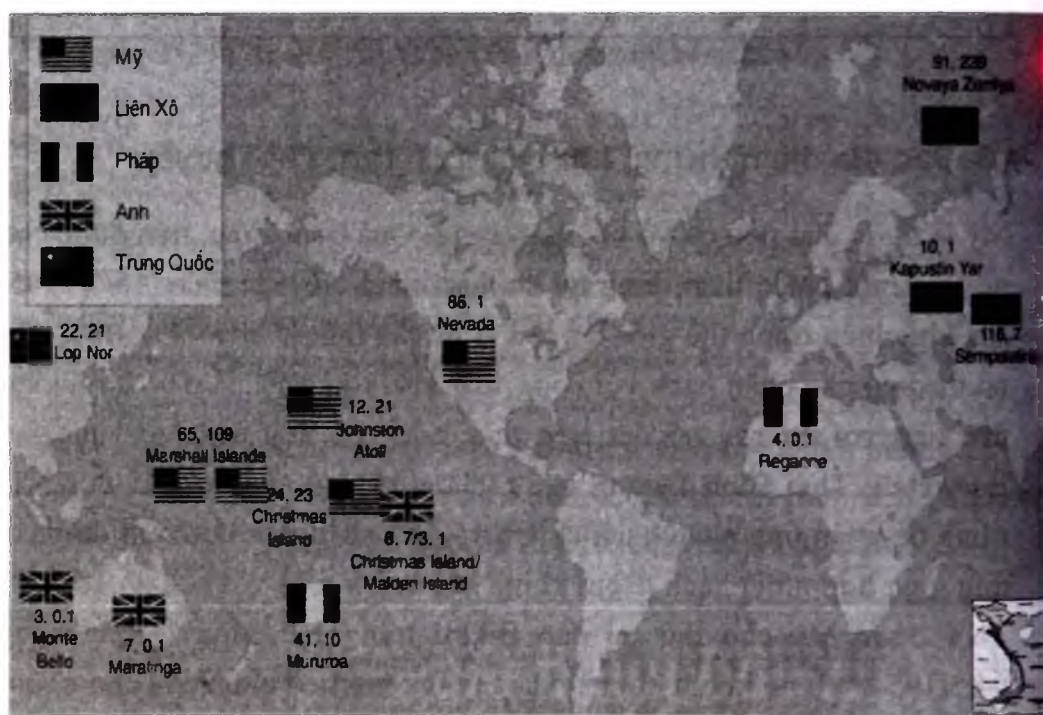
### **3.1.3 Các địa điểm thử vũ khí hạt nhân trong khí quyển**

Mỹ là nước đầu tiên có vũ khí nguyên tử. Quả bom A đầu tiên được cho nổ trên một chiếc tháp dựng tại sa mạc bang Nevada ngày 16/7/1945, sau khi chiến tranh thế giới lần thứ II đã kết thúc ở châu Âu. Bom này nổ theo cơ chế phân hạch với công suất nổ 21 kt TNT. Vụ nổ khinh khí đầu tiên với cơ cấu nổ đặt trên tháp cũng do Mỹ tiến hành tại đảo Eniwetok, Thái Bình Dương ngày 08/5/1951 có sức nổ 225 kt TNT, trong đó phản ứng phân hạch chiếm 150 kt, phần còn lại 75 kt do phản ứng tổng hợp nhiệt hạch. Bom khinh khí mạnh nhất với sức nổ 13,5 Mt TNT được Mỹ cho thử tại đảo Bikini trên Thái Bình Dương ngày 04/5/1954. Vụ nổ khinh khí này đã gây thương tích phóng xạ cho người Nhật đang đánh cá cách đảo 135 km, trong đó có một người tử vong.

Liên Xô (cũ) thử vũ khí nguyên tử đầu tiên ngày 29/8/1949 tại Semipalatinsk, cộng hòa Kazakhtan. Bốn năm sau, ngày 12/8/1953, Liên Xô (cũ) cho thử vũ khí khinh khí đầu tiên có cường độ nổ 400 kt TNT, trong đó phản ứng tổng hợp nhiệt hạch lần đầu, chiếm 360 kt. Liên Xô (cũ) tiến hành nhiều vụ thử vũ khí khinh khí với sức nổ cực lớn, trong đó có loại đến 50 Mt TNT được gọi bom vua (Tsar bomb). Ngoài ra còn bảy lần thử khác với sức nổ từ 5 đến 24 Mt TNT.

Nước Anh thử vũ khí hạt nhân trong khí quyển từ 1952 đến 1958, ban đầu trên đất liền tại vùng sa mạc Australia, sau đó chuyển sang một số đảo trên Thái Bình Dương. Pháp bắt đầu từ 1960 với bốn vụ nổ tại sa mạc Sahara thuộc Algeria và chấm dứt thử năm 1974 sau một số vụ thử ở đảo Mururoa, Nam Thái Bình Dương.

Trung Quốc vào cuộc muộn nhất và đã tiến hành 22 vụ thử hạt nhân trong khí quyển tại Lop Nor từ 1964 đến 1980. Trung Quốc thử bom khinh khí đầu tiên vào năm 1966 và liên tục trong những năm sau, đạt cường độ lớn nhất 4 Mt TNT trong vụ thử ngày 17/11/1976.



Hình 3.3. Những địa điểm thử vũ khí của năm cường quốc hạt nhân.  
 Tại mỗi địa điểm có ghi số lần thử vũ khí và sức nổ (sau dấu phẩy)  
 tính theo Mt TNT

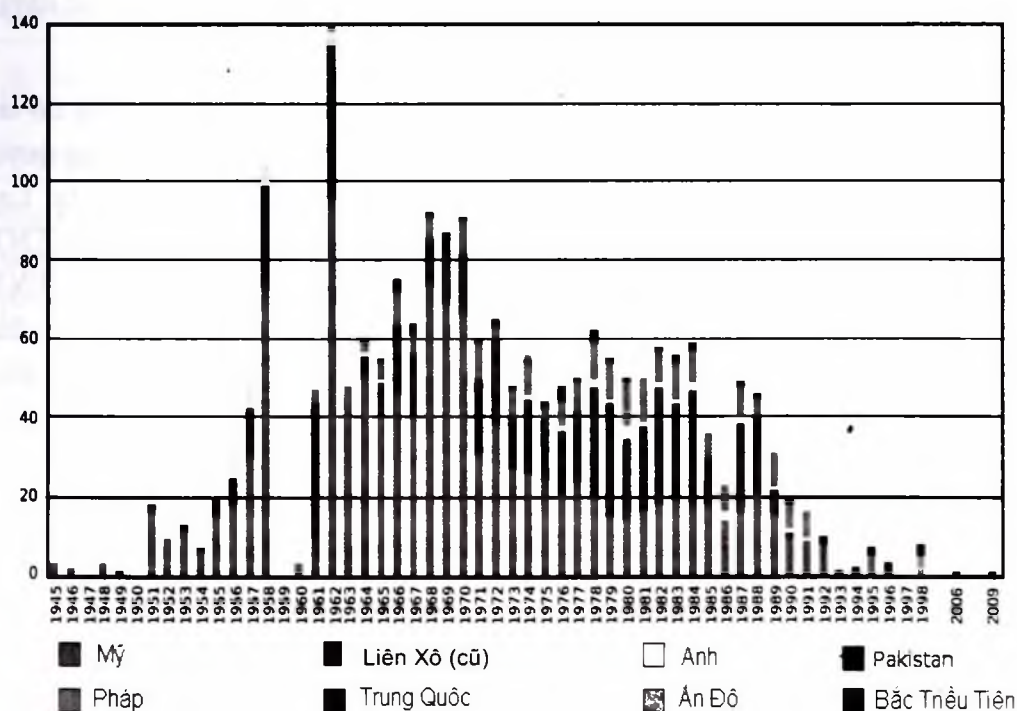
(Dựa theo American Scientists, 2006, v.94, p.48).

Hình 3.4 tổng hợp toàn bộ các vụ thử vũ khí hạt nhân trong khí quyển và dưới lòng đất có phân ra cho từng cường quốc hạt nhân. Vụ thử gần đây nhất, ngày 12/02/2013 là của Bắc Triều Tiên, có sức nổ khoảng dưới 10 kt TNT. Mỹ dẫn đầu về số lần thử, tiếp theo là Liên Xô (cũ) và

Pháp. Nhưng nếu xét về sức nổ thì Liên Xô (cũ) dẫn đầu với 247,3 Mt TNT, sau đó là Mỹ 153,8 Mt (bảng 3.1).

### 3.1.4 Thử vũ khí hạt nhân dưới lòng đất

Cả thảy có khoảng 1876 vụ thử dưới lòng đất với cường độ tổng cộng là 90 Mt TNT, trong số này có 750 lần thử thuộc về Liên Xô (cũ) với cường độ tổng cộng 38 Mt TNT. Mỹ tiến hành 908 lần thử với cường độ tổng cộng 46 Mt TNT. Đứng thứ ba trong danh sách này là Pháp với 160 lần thử và cường độ tổng cộng 3 Mt TNT. Các con số thống kê trong trường hợp này có thể không chính xác vì trong mỗi vụ thử có thể có nhiều đầu nổ cùng lúc. Các vụ thử dưới lòng đất sâu hầu như không ảnh hưởng đến môi trường. Chỉ có một lượng khí trơ phóng xạ như Xe, Kr... có thể dò lên mặt đất, chúng có thể quan trắc được, nhưng không gây mấy tác hại.



Hình 3.4. Tổng hợp các vụ thử vũ khí hạt nhân trong khí quyển và dưới lòng đất từ năm 1945 đến nay.

## 3.2 PHÁT TÁN PHÓNG XẠ TRÊN TOÀN CẦU TỪ THỬ VŨ KHÍ HẠT NHÂN TRONG KHÍ QUYỀN

### 3.2.1 Đặc trưng nguồn phát tán

Trong những thập kỷ 50 – 60 của thế kỷ XX thông tin về các vụ nổ hạt nhân không được tiết lộ đầy đủ, phương tiện quan trắc và mô hình hóa phát tán chất phóng xạ còn thô sơ, nên đánh giá tình trạng phóng xạ môi trường toàn cầu do thử vũ khí hạt nhân còn sơ sài. Để có thể tính toán phát tán các nhân phóng xạ từ thử vũ khí hạt nhân cần rất nhiều thông tin đặc thù cho từng vụ thử, đặc biệt là cường độ nổ, đóng góp của thành phần phân hạch và nhiệt hạch, ước lượng mức độ phát tán trong các tầng đối lưu, bình lưu hoặc cao hơn... Những thông tin này chỉ có thể do chính các nước thử vũ khí cung cấp sau chiến tranh lạnh vào đầu thập kỷ 1990. UNSCEAR (2000) đã tập hợp những thông tin từ hơn 500 vụ thử vũ khí hạt nhân. Trên cơ sở các thông tin này có thể kiểm tra các mô hình phát tán nhờ so sánh với kết quả quan trắc, rồi từ đó ước lượng liều hiệu dụng lên dân chúng toàn cầu.

Trong hơn 500 vụ thử vũ khí hạt nhân, bom khinh khí với cường độ lớn át so với bom nguyên tử, do đó, các vụ nổ khinh khí ảnh hưởng quyết định đến lượng chất phóng xạ phát tán trên toàn cầu. Thí dụ, tại Lop Nor, Trung Quốc đã thử 10 bom khinh khí với cường độ 20,3 Mt TNT, trong khi 12 quả bom nguyên tử còn lại chỉ đóng góp 0,4 Mt TNT. Trong số hơn 13 địa điểm thử vũ khí (hình 3.3) những địa điểm dẫn đầu về cường độ nổ là Novaya Zemlya (74°N, 56°E): 239 Mt, Bikini (11°35'N, 165°23'E): 76,8 Mt, Enewetak (11°30'N, 162°20'E): 34,7 Mt, Johnson Island (16°73'N, 169°52'W): 23,8 Mt, Christmas Island (10°30'S, 105°40'E): 23,3 Mt, và Lop Nor (41°30'N, 88°30'E): 20,7 Mt TNT. Sáu địa điểm này chiếm 95% về cường độ các vụ nổ hạt nhân và đương nhiên có ảnh hưởng khá quyết định đến quá trình lan truyền phóng xạ trên toàn cầu.

### 3.2.2 Kiểm kê phát thải toàn cầu cho từng nuclit

Dựa trên thống kê các vụ thử vũ khí hạt nhân ở bảng 3.1 có thể tính lượng phát thải cho từng nuclit phóng xạ. Kết quả được trình bày ở

bảng 3.2 (UNSCEAR, 2000). Khi tính lượng thải chuẩn hóa trên một PBq ứng với một sản phẩm phân hạch nào đó (cột thứ tư) cần chú ý rằng cường độ nổ 1 Mt TNT tương ứng với  $1,45 \cdot 10^{26}$  phân hạch. Lượng phát thải toàn cầu (cột thứ năm) được tính dựa trên số liệu ở dòng cuối bảng 3.1, theo đó toàn bộ các vụ nổ có 160 Mt TNT phân hạch và 251 Mt TNT nhiệt hạch (không kể phát tán tại chỗ, tương đương 29 Mt TNT). Lượng phát thải của ba đồng vị Pu được tính dựa trên tỷ số phát thải toàn cầu của chúng so với  $\text{Sr}^{90}$ . Bốn nhân nhẹ  $\text{H}^3$ ,  $\text{C}^{14}$ ,  $\text{Mn}^{54}$  và  $\text{Fe}^{56}$  do phản ứng nhiệt hạch sinh ra (UNSCEAR, 2000).

**Bảng 3.1. Tổng hợp thủ vũ khí hạt nhân trong khí quyển trên toàn thế giới.**

| Địa điểm                   | Số vụ nổ | Cường độ, Mt TNT |           |            | Khu vực tác động, Mt TNT |         |          |
|----------------------------|----------|------------------|-----------|------------|--------------------------|---------|----------|
|                            |          | Tổng             | Phân hạch | Nhiệt hạch | Tại chỗ                  | Đối lưu | Bình lưu |
| Lop Nor                    | 22       | 20,7             | 12,2      | 8,5        | 0,15                     | 0,66    | 11,4     |
| Úc (Anh)                   | 21       | 8,05             | 4,22      | 3,83       | 0,07                     | 1,76    | 2,39     |
| Nevada                     | 86       | 0,021            | 0,021     | 0          | 0,011                    | 0,010   | 0        |
| Thái Bình Dương (TBD) (Mỹ) | 105      | 152,6            | 80,4      | 72,2       | 27,9                     | 7,45    | 44,9     |
| TBD (Pháp)                 | 41       | 10,12            | 6,1       | 4,02       | 0,19                     | 0,54    | 5,37     |
| TBD (Anh)                  | 6        | 6,65             | 3,35      | 3,3        | 0                        | 1,09    | 2,6      |
| Semilatinsk                | 116      | 6,59             | 3,74      | 2,85       | 0,097                    | 1,23    | 2,41     |
| Nova Zemlia                | 91       | 239,6            | 80,8      | 159,8      | 0,036                    | 2,93    | 77,8     |
| Sahara                     | 4        | 0,073            | 0,1       | 0          | 0,036                    | 0,035   | 0,001    |
| Tổng                       | 543*     |                  | 189       | 251        | 29                       | 16      | 145      |

(\*) Không kể một số địa điểm thử lẻ tẻ khác và hai quả bom thả xuống Hiroshima và Nagasaki.

### 3.2.3 Quá trình lan truyền phóng xạ trên toàn cầu từ thử vũ khí hạt nhân

Sau khi bom nổ, một phần các sản phẩm phóng xạ sẽ rơi lắng tại chỗ và vùng phụ cận, phần khác sẽ lan truyền rộng hơn trong phạm vi hàng nghìn km theo các luồng khí rồi rơi xuống hoặc tiếp tục di chuyển xa hơn trên phạm vi toàn cầu. Phân bố trên phụ thuộc vào điều kiện khí tượng, độ cao vụ nổ, địa hình và dạng tồn tại của các sản phẩm phóng xạ do vụ nổ tạo ra. Với các nuclit chịu lửa như  $\text{Zr}^{95}$ ,  $\text{Ce}^{144}$  ... ước tính có đến 50% rơi xuống tại chỗ và vùng phụ cận, 25% rơi lắng xuống vùng rộng hơn xung quanh và 25% còn lại tham gia vào quá trình vận chuyển toàn cầu. Với các nuclit dễ bốc hơi như  $\text{Sr}^{90}$ ,  $\text{Cs}^{137}$  và  $\text{I}^{131}$  phần rơi lắng tại chỗ và trong vùng phụ cận chiếm một nửa, nửa còn lại tham gia vào vận chuyển toàn cầu.

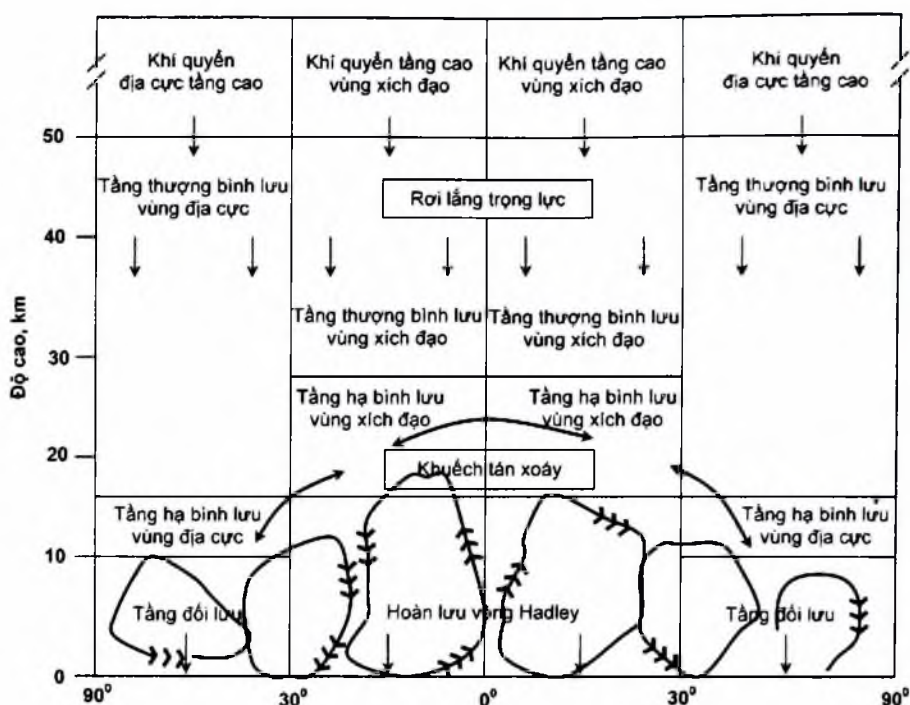
Bảng 3.2. Tổng hợp lượng phát thải toàn cầu do thử vũ khí hạt nhân trong khí quyển

| Nhân              | $T_{1/2}$ | Tỷ suất phân hạch, % | Lượng thải chuẩn hóa, PBq/Mt | Phát thải toàn cầu, PBq |
|-------------------|-----------|----------------------|------------------------------|-------------------------|
| $\text{H}^3$      | 12,33 a   |                      | 740                          | 186 000                 |
| $\text{C}^{14}$   | 5 730 a   |                      | 0,85                         | 213                     |
| $\text{Mn}^{54}$  | 312,3 d   |                      | 15,9                         | 3 980                   |
| $\text{Fe}^{55}$  | 2,73 a    |                      | 6,1                          | 1 530                   |
| $\text{Sr}^{89}$  | 50,53 d   | 3,17                 | 730                          | 117 000                 |
| $\text{Sr}^{90}$  | 28,78 a   | 3,50                 | 3,88                         | 622                     |
| $\text{Y}^{91}$   | 58,5 d    | 3,76                 | 748                          | 120 000                 |
| $\text{Zr}^{95}$  | 64,02 d   | 5,07                 | 921                          | 148 000                 |
| $\text{Ru}^{103}$ | 39,26 d   | 5,20                 | 1 540                        | 247 000                 |
| $\text{Ru}^{106}$ | 373,6 d   | 2,44                 | 76                           | 12 200                  |
| $\text{Sb}^{125}$ | 2,75 a    | 0,40                 | 4,52                         | 741                     |

| Nhân       | $T_{1/2}$ | Tỷ suất phân hạch, % | Lượng thải chuẩn hóa, PBq/Mt | Phát thải toàn cầu, PBq |
|------------|-----------|----------------------|------------------------------|-------------------------|
| $I^{131}$  | 8,02 d    | 2,90                 | 4 210                        | 685 000                 |
| $Ba^{140}$ | 12,75 d   | 5,18                 | 4 720                        | 759 000                 |
| $Ce^{141}$ | 32,5 d    | 4,58                 | 1 640                        | 263 000                 |
| $Ce^{144}$ | 284,9 d   | 5,69                 | 191                          | 30 700                  |
| $Cs^{137}$ | 30,07 a   | 5,57                 | 5,9                          | 948                     |
| $Pu^{239}$ | 24 110 a  |                      |                              | 6,52                    |
| $Pu^{240}$ | 6 563 a   |                      |                              | 4,35                    |
| $Pu^{241}$ | 12,35 a   |                      |                              | 142                     |

Trong tính toán lan truyền trên toàn cầu, khí quyền được chia thành một số khu chính như trên hình 3.5 (UNSCEAR, 1982, 2000 và tài liệu trích dẫn). Theo vĩ độ, khí quyền được chia thành vùng xích đạo ( $0 - 30^\circ$ ) và vùng địa cực ( $30 - 90^\circ$ ). Cách phân chia này chủ yếu dựa trên những địa điểm thử vũ khí chính tập trung chủ yếu ở vùng xích đạo trên Thái Bình Dương của Mỹ và vùng Bắc cực (Novaya Zemlya) thuộc lãnh thổ Liên Xô (cũ) (hình 3.3). Các nuclit phóng xạ lan truyền chủ yếu trong tầng đối lưu và bình lưu.

Tầng bình lưu có hai phân tầng, dưới và trên, như hình 3.5. Trên thực tế rất ít vụ thử đưa chất phóng xạ lên quá tầng bình lưu ở độ cao trên 50 km. Tầng bình lưu là bể chứa phần lớn nuclit phóng xạ từ các vụ thử vũ khí hạt nhân, từ đây chúng sẽ lan tỏa khắp toàn cầu. Độ cao tầng đối lưu thay đổi theo vĩ độ, song để đơn giản, có thể lấy trung bình 9 km cho vùng cực và 17 km cho vùng xích đạo. Vận chuyển không khí trong tầng đối lưu bị chi phối bởi những hoàn lưu khí quyền như hiện tượng gió mùa giữa đại lục và đại dương, hoặc các tế bào Hadley theo đó không khí trong vùng nhiệt đới bốc lên ở xích đạo, vận chuyển trên cao trong tầng đối lưu ra hai cực, rồi giáng xuống ở vĩ tuyến  $30^\circ N$  và  $30^\circ S$ . Tương tự, có hai tế bào Hadley ở hai vùng ôn đới và hàn đới (hình 3.5).



Hình 3.5. Phân chia khí quyển ra những khu vực chính để nghiên cứu lan truyền nhân phóng xạ trong thử vũ khí hạt nhân. Những hoàn lưu chính trong khí quyển cũng được thể hiện trên hình.

Ngoài những vận chuyển kể trên, các sol khí trong cả hai tầng còn rơi xuống đất do trọng lực. Với các sol khí trong tầng bình lưu, quá trình này được tiếp sức do sự xáo trộn khi lớp đệm giữa hai tầng đối lưu và bình lưu bị thủng, thường về mùa xuân. Kết quả là các sol khí trong tầng bình lưu có thời gian sống khá dài, trung bình từ 3 đến 12 tháng ở hai cực và từ 8 đến 24 tháng ở vùng xích đạo. Trong khi đó, thời gian sống của sol khí phóng xạ trong tầng đối lưu ngắn hơn nhiều, không quá 30 ngày (UNSCEAR 1982, Annex E).

Dựa trên thông số của tất cả các vụ nổ có thể tính được lượng sản phẩm phân hạch tiêm vào tầng bình lưu là 145 Mt TNT, nhiều hơn hẳn so với tầng đối lưu là 16 Mt TNT và vùng phụ cận là 29 Mt TNT (bảng 3.1). Con số 161 Mt TNT sản phẩm phân hạch lan truyền toàn cầu phù hợp khá tốt với kết quả quan trắc lượng  $\text{Sr}^{90}$  rơi lắng toàn cầu. Hệ thống quan trắc này đã cho ra tổng rơi lắng toàn cầu của  $\text{Sr}^{90}$  là 155 Mt TNT

và tổng rơi lắng các sản phẩm phân hạch là 604 PBq (UNSCEAR, 2000). Tỷ suất của  $\text{Sr}^{90}$  là 3,9 PBq.Mt<sup>-1</sup> (bảng 3.2).

### **3.3. QUAN TRẮC HOẠT ĐỘ PHÓNG XẠ TRONG KHÔNG KHÍ VÀ MẬT ĐỘ RƠI LẮNG CÁC NUCLIT PHÓNG XẠ**

#### **3.3.1 Kỹ thuật quan trắc**

Trong thời gian thử vũ khí hạt nhân, nghiên cứu phát tán các sản phẩm phân hạch từ những vụ nổ hạt nhân thường dựa trên quan trắc đồng vị phát tia  $\beta$  là  $\text{Sr}^{90}$  trong không khí và rơi lắng. Để xác định hoạt độ phóng xạ trong không khí (tính theo Bq/m<sup>3</sup>) người ta thường dùng máy hút khí qua phin lọc. Các sol khí mang chất phóng xạ từ những vụ nổ hạt nhân trong khí quyển thường có kích thước cỡ micron hoặc bé hơn, chúng bị phin lọc giữ lại hầu như hoàn toàn nếu vận tốc luồng khí qua phin lọc được duy trì trong một giới hạn thích hợp. Các sol khí phóng xạ rơi xuống đất chủ yếu theo nước mưa (tuyết) nên mật độ rơi lắng (tính theo Bq/m<sup>2</sup>) thường được quan trắc bằng các khay hứng có diện tích nhất định.

Lượng  $\text{Sr}^{90}$  trong các phin lọc và các mẫu rơi lắng được đo bằng các detector  $\beta$  phòng thấp, hiệu suất cao, sau khi nguyên tố Sr trong mẫu được tách hóa phóng xạ khỏi các đồng vị phát  $\beta$  khác. Kỹ thuật ghi đo tia  $\beta$  này phải qua phá mẫu, khá mất công và dễ phạm sai sót. Phần lớn các nuclit phóng xạ từ thử vũ khí hạt nhân phát tia  $\gamma$ , nhưng vào những năm 1950 – 1960 các detector nhấp nháy ghi tia  $\gamma$  có độ phân giải kém nên không thể sử dụng đối với các mẫu chứa nhiều đồng vị phát tia  $\gamma$  được. Từ cuối thập kỷ 1960, detector bán dẫn có độ phân giải cao xuất hiện cho phép phân giải và định lượng hầu hết các nhân phát tia  $\gamma$ , đặc biệt là  $\text{Cs}^{137}$ , nhờ đó đã tinh giản bớt các khâu tách hóa phóng xạ phức tạp mà độ tin cậy lại cao hơn nhiều. Do tình hình trên nên kết quả phân bố phát tán nhân phóng xạ từ thử vũ khí hạt nhân trên toàn cầu ban đầu dựa trên đồng vị  $\text{Sr}^{90}$ , sau đó được bổ sung thêm thông tin từ đồng vị  $\text{Cs}^{137}$ .

### 3.3.2 Hoạt độ phóng xạ trong không khí

Một mạng lưới quan trắc toàn cầu đã tiến hành đo hoạt độ các nuclit phóng xạ trong không khí, rơi lắng, thực vật, sữa... từ đó tính ra liều chiếu xạ hiệu dụng trong và ngoài. Hình 3.6 ghi lại kết quả quan trắc so sánh với tính toán hoạt độ  $\text{Sr}^{90}$  trong không khí tính ra  $\text{Bq/m}^3$ . Hoạt độ  $\text{Sr}^{90}$  trong không khí Bắc bán cầu cao hơn Nam bán cầu khoảng 6 – 8 lần do phần lớn các địa điểm thử vũ khí tập trung ở Bắc bán cầu (hình 3.3). Ở cả hai bán cầu hoạt độ phóng xạ đạt đến cực đại vào khoảng năm 1963, sau đó liên tục giảm nhanh, đến sau 1983 – 1985 giảm xuống dưới mức ngưỡng phổ biến của các máy đo. Ở cả hai bán cầu, hoạt độ phóng xạ đều cao hơn về mùa đông khi các sol khí ít bị phát tán và rửa trôi.

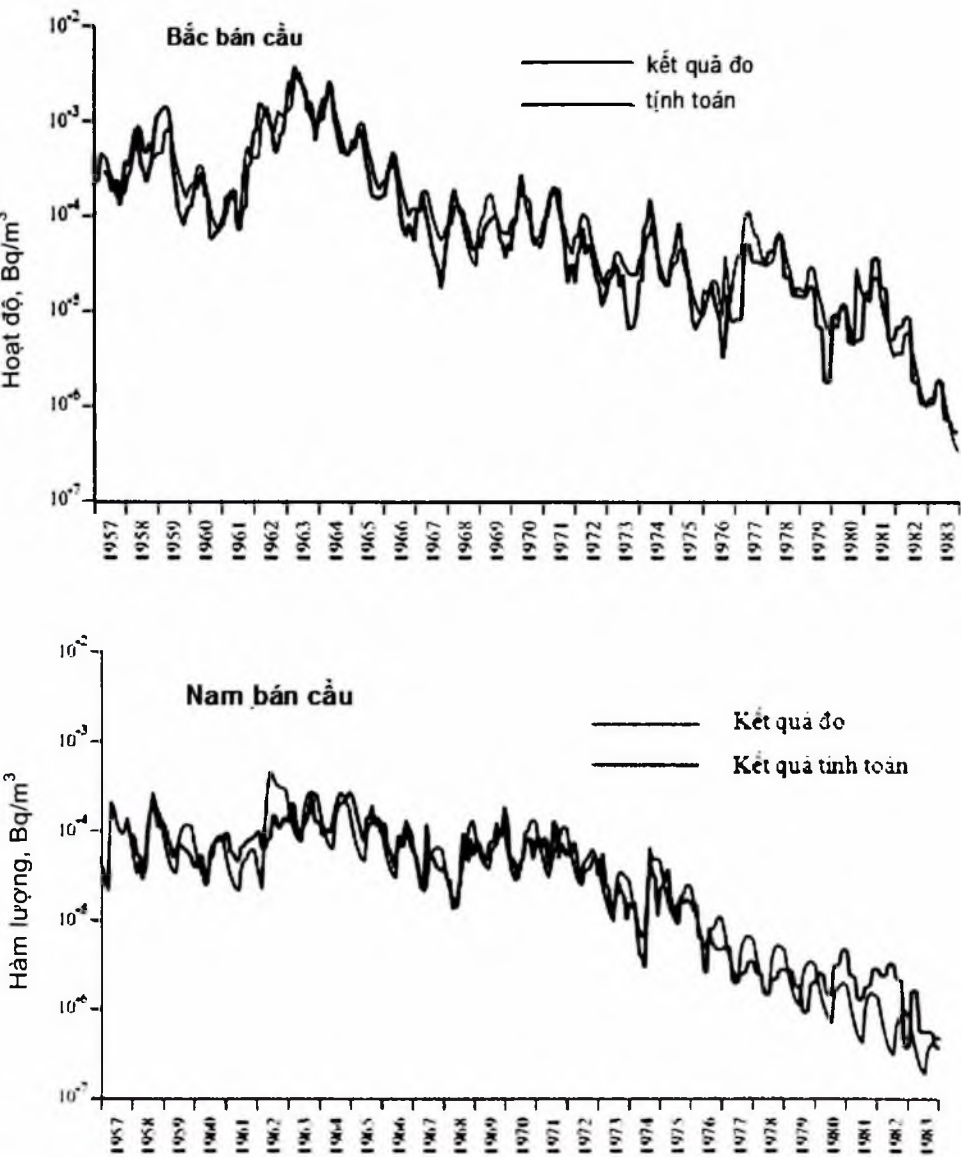
Những đặc điểm nói trên thể hiện rõ ở cả kết quả quan trắc theo tháng được tiến hành bởi mạng lưới quan trắc toàn cầu và tính toán trên hình 3.6. Kết quả trung bình hóa từ mạng lưới quan trắc ở cả hai bán cầu phù hợp khá tốt với kết quả tính toán dựa trên mô hình phát tán toàn cầu trình bày sơ lược trên đây.

### 3.3.3 Mật độ rơi lắng và rơi lắng tích lũy của $\text{Sr}^{90}$

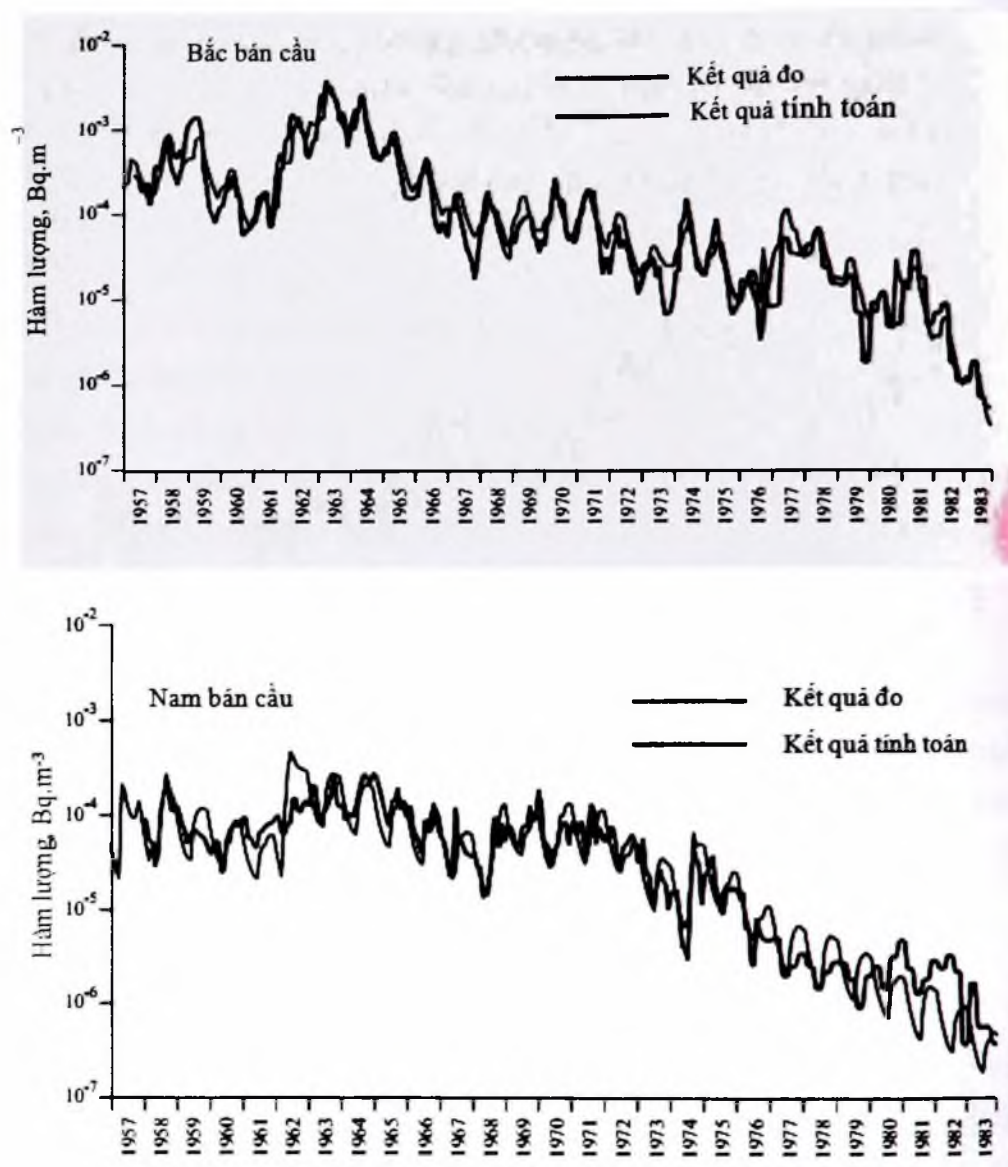
Từ khi quyền các nuclit phóng xạ rơi lắng xuống đất và đại dương. Về cơ bản chúng được lưu lại và tích lũy lâu dài trong những môi trường này trước khi biến mất do phân rã. Cũng chính từ đất mà chất phóng xạ chiếu trực tiếp lên con người (chiếu ngoài) và thâm nhập vào con người qua chuỗi thực phẩm (chiếu trong). Vì vậy quan trắc rơi lắng có ý nghĩa rất quan trọng để tìm ra mối liên hệ giữa nguồn phát (các vụ thử vũ khí hạt nhân) và liều hiệu dụng lên con người.

Mật độ rơi lắng các nuclit phóng xạ được đo bằng các khay hứng nước mưa bởi hai mạng lưới quan trắc toàn cầu thuộc Phòng thí nghiệm Health and Safety, Mỹ (HASL 329) và Phòng thí nghiệm Harwell, Anh. Mật độ rơi lắng  $\text{Sr}^{90}$  đo được tại các trạm quan trắc được trung bình hóa

cho từng dải vĩ độ, sau đó đem nhân cho diện tích từng dải vĩ độ để có được tổng lượng rơi lắng trên hai bán cầu. Tổng lượng rơi lắng cho từng năm, trình bày trên hình 3.7, cho thấy trên thực tế mật độ rơi lắng đã giảm xuống dưới ngưỡng đo vào những năm 1984 – 1985.



Hình 3.6. Kết quả đo và tính toán hàm lượng  $\text{Sr}^{90}$  trong không khí ở vĩ độ trung bình Bắc bán cầu (hình trên) và Nam bán cầu (hình dưới).



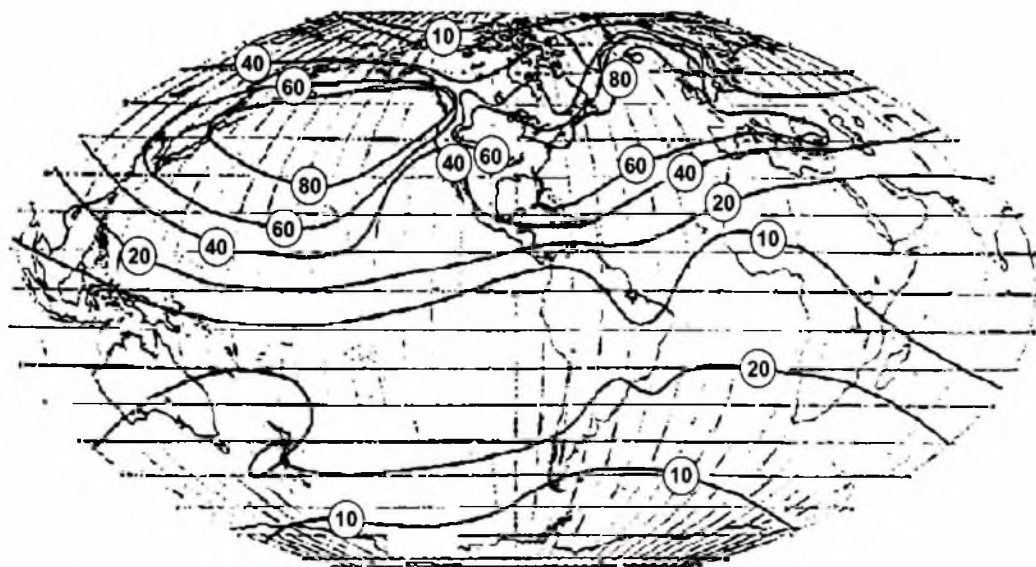
Hình 3.7. Lượng rơi lắng  $\text{Sr}^{90}$  trên Bắc bán cầu (hình trên) và Nam bán cầu (hình dưới) theo mạng lưới quan trắc toàn cầu (điểm) và theo tính toán (đường liền nét).

Cũng từ những quan trắc trên người ta có thể xác định tại một địa điểm nào đó mật độ rơi lắng tích lũy qua nhiều năm thử vũ khí hạt nhân. Do từ năm 1984 – 1985 trở đi rơi lắng phóng xạ đã giảm xuống dưới ngưỡng dò nên từ thời gian này trở đi mật độ rơi lắng tích lũy hầu như không thay đổi nữa. Nếu sau khi rơi xuống đất các nuclit vẫn nằm yên

tại chỗ, như trong trường hợp đất bề mặt nguyên sơ, thì mật độ rơi lắng tích lũy cũng chính là mật độ tồn lưu của nuclit trong đất. Vấn đề này sẽ được xét đến đối với  $\text{Cs}^{137}$  ở 3.3.4 và 3.4.1.

Hình 3.7 ghi lại tổng mật độ rơi lắng tính cho từng năm và mật độ rơi lắng tích lũy đối với  $\text{Sr}^{90}$ . Kết quả tính toán cho từng năm phù hợp khá tốt với quan trắc, trừ giai đoạn cuối, sau năm 1980, khi sai số quan trắc tăng lên do mật độ rơi lắng đã giảm xuống gần ngưỡng đo. Tuy nhiên đối với mật độ rơi lắng tích lũy kết quả quan trắc và tính toán rất phù hợp với nhau.

Phân bố mật độ rơi lắng tích lũy  $\text{Sr}^{90}$  theo vĩ độ được trình bày trên bảng 3.3 và hình 3.8. Rơi lắng ở vĩ độ bắc (N) cao hơn vĩ độ nam (S) khoảng 5 lần do các địa điểm thử vũ khí tập trung nhiều hơn ở Bắc bán cầu. Từ những kết quả đo mật độ rơi lắng tích lũy trong bảng 3.3 có thể tính tổng lượng rơi lắng  $\text{Sr}^{90}$  trên toàn cầu cũng như cho Bắc và Nam bán cầu lần lượt là 604 PBq, 460 PBq và 144 PBq. Những giá trị thu được phù hợp với ước lượng dựa trên thông tin về các vụ nổ (xem 3.3.3).



Hình 3.8. Phân bố mật độ rơi lắng tích lũy của  $\text{Sr}^{90}$  trên toàn cầu thể hiện bằng các đường đồng mức. Mật độ rơi lắng tính theo đơn vị  $100 \text{ Bq.m}^{-2}$  (Nguồn: UNSCEAR 2000).

Bảng 3.3. Phân bố mật độ rơi lắng tích lũy Sr<sup>90</sup> theo vĩ độ ở hai bán cầu

| Vĩ độ     | Mật độ rơi lắng, Bq/m <sup>2</sup> |
|-----------|------------------------------------|
| 80 – 90°N | 256                                |
| 70 – 80   | 681                                |
| 60 – 70   | 1 741                              |
| 50 – 60   | 2 887                              |
| 40 – 50   | 3 246                              |
| 30 – 40   | 2 343                              |
| 20 – 30   | 1 771                              |
| 10 – 20   | 1 189                              |
| 0 – 10    | 810                                |
| 0 – 10°S  | 476                                |
| 10 – 20   | 416                                |
| 20 – 30   | 699                                |
| 30 – 40   | 758                                |
| 40 – 50   | 892                                |
| 50 – 60   | 473                                |
| 60 – 70   | 354                                |
| 70 – 80   | 216                                |
| 80 – 90   | 77                                 |

Mật độ rơi lắng cao nhất ở những vĩ độ trung bình  $40 - 50^\circ$  và thấp nhất ở vùng xích đạo và hai địa cực. Mức chênh lệch giữa cực đại mật độ rơi lắng  $\text{Sr}^{90}$  ở vĩ độ trung bình Bắc bán cầu so với vùng xích đạo và hai địa cực lên đến hàng chục lần. Sở dĩ có hiện tượng này là vì các quá trình trao đổi giữa hai tầng bình lưu và đối lưu xảy ra mạnh ở vĩ độ trung bình, mặt khác các hoàn lưu khí quyển làm cho rơi lắng có khuynh hướng tăng ở vĩ độ trung bình và giảm ở xích đạo và hai địa cực.

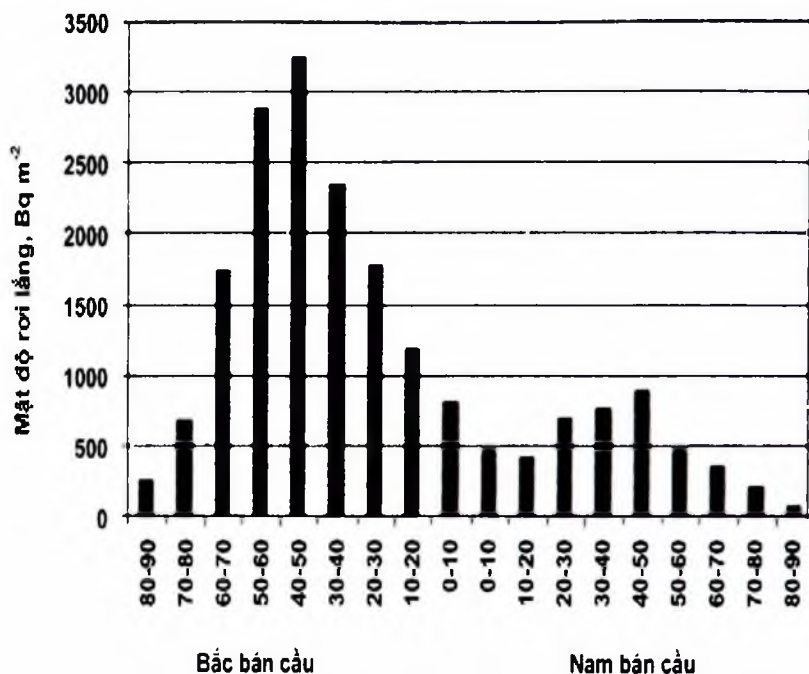
Tuy nhiên, ở cùng một vĩ độ, mật độ rơi lắng  $\text{Sr}^{90}$  thăng giáng khá mạnh tùy theo vị trí quan trắc. Bản đồ phân bố mật độ rơi lắng tích lũy của  $\text{Sr}^{90}$  trên toàn cầu căn cứ trên các kết quả từ mạng lưới quan trắc (UNSCEAR, 1988) cho thấy mức độ thăng giáng rất lớn. Ở đây có ảnh hưởng của các địa điểm thử vũ khí kết hợp với sự tồn tại các trung tâm tác động thường trực chi phối những hoàn lưu chính trong khí quyển.

### **3.3.4 Mật độ rơi lắng và rơi lắng tích lũy của $\text{Cs}^{137}$**

Những kết quả quan trắc và tính toán đối với  $\text{Sr}^{90}$  có thể dùng làm cơ sở tham chiếu để từ đó suy ra mật độ rơi lắng cho các đồng vị sống lâu khác căn cứ trên tỷ suất phân hạch và chênh lệch về chu kỳ bán phân rã giữa chúng với  $\text{Sr}^{90}$ . Thí dụ, so với  $\text{Sr}^{90}$ , mật độ rơi lắng tích lũy của  $\text{Cs}^{137}$  cao hơn 1,45 lần (bảng 3.2). Bắt đầu từ cuối thập kỷ 60 của thế kỷ XX,  $\text{Cs}^{137}$  trong các mẫu môi trường đã có thể định lượng bằng detector bán dẫn có năng suất phân giải cao. Đặc biệt, lượng rơi lắng tích lũy  $\text{Cs}^{137}$  có thể đo được qua các cọc đất bề mặt, nước đại dương và băng. Đối với đất bề mặt,  $\text{Cs}^{137}$  còn nằm nguyên trong lớp đất 30 cm tại những vị trí nguyên sơ không bị xáo trộn do canh tác, xói mòn và bồi lấp. Với những đặc điểm ưu việt này nhiều nhóm nghiên cứu đã đo lại mật độ rơi lắng toàn cầu, lập bản đồ phân bố toàn cầu, từ đó đánh giá lại liều hiệu dụng từ những vụ thử vũ khí hạt nhân ở thập kỷ 50 – 60 của thế kỷ XX.

Trong số những cố gắng trên có thể kể ra công trình của Simon và cộng sự (2004) đánh giá lại mật độ rơi lắng  $\text{Cs}^{137}$  trên toàn lãnh thổ nước Mỹ và phát hiện ra trên cùng một dải vĩ độ mật độ rơi lắng ở phía đông cao

hơn phía tây đến hai lần, tức là có sự phụ thuộc kinh độ rõ rệt. Sự chênh lệch này được giải thích là do lượng mưa ở phía đông cao hơn so với phía tây.



Hình 3.9. Phân bố mật độ rơi lắng tích lũy của  $\text{Sr}^{90}$  theo vĩ độ.

Aoyama và cộng sự (2006) đã tập hợp các kết quả đo mật độ rơi lắng  $\text{Cs}^{137}$  trong 72 công trình trên toàn thế giới, hiệu chỉnh phân rã phóng xạ về chung thời điểm cuối năm 1969, từ đó dựng nên bản đồ phân bố rơi lắng toàn cầu trên mạng lưới  $10^\circ \times 10^\circ$ . Ở những ô mạng thiếu số liệu đo đạc, các tác giả ngoại suy từ những ô lân cận với giả thiết mật độ rơi lắng tỷ lệ thuận với lượng mưa hàng năm. Thông tin về lượng mưa lấy từ bản đồ mưa toàn cầu chi tiết đến  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$  cho giai đoạn 1987 – 1998. Kết quả đo  $\text{Cs}^{137}$  gần đây cho thấy tuy mật độ rơi lắng vẫn cao nhất ở vĩ độ trung bình Bắc bán cầu, song giá trị tuyệt đối lại cao hơn khá nhiều so với số liệu của UNSCEAR (2000) ngoại suy từ mật độ rơi lắng  $\text{Sr}^{90}$  (bảng 3.4). Nếu tính tổng rơi lắng cho toàn Bắc bán cầu thì kết quả mới cao hơn 1,4 lần so với số liệu của UNSCEAR (2000).

**Bảng 3.4. Phân bố mật độ rơi lắng <sup>137</sup>Cs theo vĩ độ (Aoyama et al., 2006).**

| <i>Vĩ độ</i> | <i>Trung bình,<br/>Bq. M<sup>-2</sup></i> | <i>Tích phân<br/>trên toàn cầu,<br/>PBq</i> | <i>Khoảng<br/>biến thiên</i> | <i>UNSCEAR 2000</i> |
|--------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------|---------------------|
| Bắc bán cầu  |                                           |                                             |                              |                     |
| 85°          | 900                                       | 3,5                                         | 820 – 990                    | 280                 |
| 75°          | 1 970                                     | 22,8                                        | 880 – 5 280                  | 800                 |
| 65°          | 3 420                                     | 64,5                                        | 1 110 – 8 060                | 2 050               |
| 55°          | 5 040                                     | 128,9                                       | 2 770 – 7 910                | 3 430               |
| 45°          | 5 090                                     | 159,8                                       | 1 540 – 10 230               | 3 830               |
| 35°          | 4 100                                     | 149,0                                       | 700 – 10 630                 | 2 780               |
| 25°          | 2 620                                     | 105,0                                       | 120 – 6 430                  | 2 110               |
| 15           | 1 820                                     | 77,6                                        | 380 – 7 280                  | 1 420               |
| 5°           | 1 300                                     | 57,3                                        | 410 – 3 860                  | 970                 |
| Nam bán cầu  |                                           |                                             |                              |                     |
| 5°           | 800                                       | 35,1                                        | 100 – 1 210                  | 510                 |
| 15°          | 530                                       | 22,8                                        | 120 – 1 060                  | 440                 |
| 25°          | 470                                       | 18,7                                        | 170 – 830                    | 750                 |
| 35°          | 580                                       | 21,1                                        | 150 – 1 430                  | 810                 |
| 45°          |                                           |                                             |                              |                     |

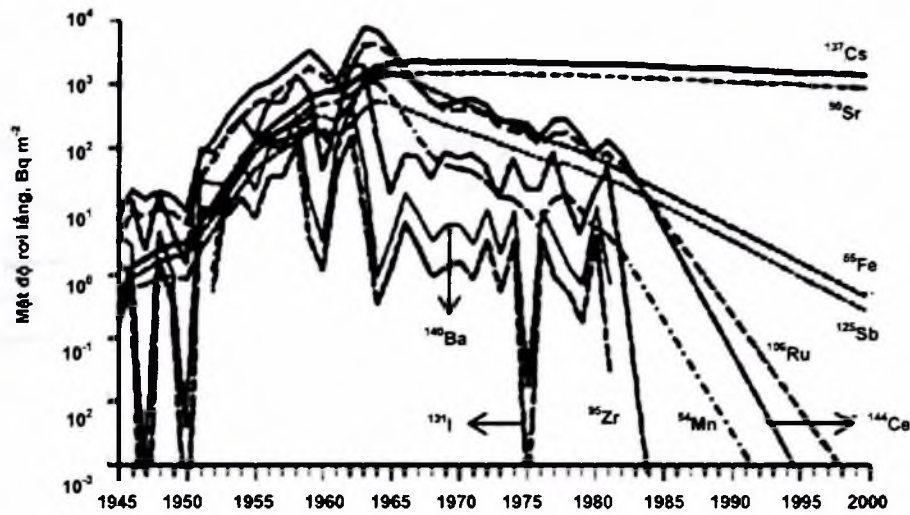
### 3.3.5 Mật độ rơi lắng các nuclit khác

Nhiều nuclit khác cũng không quan trắc được chính xác và có hệ thống trong những năm thử vũ khí cho nên mật độ rơi lắng của chúng chỉ có thể suy ra từ mô hình phát tán toàn cầu hoặc từ kết quả đo  $\text{Sr}^{90}$  sau khi hiệu chỉnh tỷ suất phân hạch và chu kỳ bán rã (hình 3.8). Ngoài ra, một số kết quả quan trắc đáng tin cậy trong những năm đầu đối với đồng vị  $\text{Zr}^{95}$  phát  $\gamma$  (suất phân hạch rất cao và  $T_{1/2} = 64$  ngày) cũng được dùng làm căn cứ để kiểm nghiệm các kết quả tính toán cho những đồng vị khác. Diễn biến rơi lắng của mười nuclit phát  $\gamma$  có ảnh hưởng lớn đến liều hiệu dụng lên dân chúng thể hiện trên hình 3.10. Trong thập kỷ 1960 ảnh hưởng của ba đồng vị  $\text{Ce}^{144}$ ,  $\text{Ru}^{106}$  và  $\text{Zr}^{95}$  chiếm ưu thế. Đến năm 1963, ngay trước khi hiệp định cấm thử vũ khí trong khí quyển có hiệu lực ở Mỹ và Liên Xô (cũ), mật độ rơi lắng của tất cả nuclit đạt đến cực đại. Trong những năm sau, mật độ rơi lắng giảm nhanh, trừ  $\text{Sr}^{90}$  và  $\text{Cs}^{137}$  giảm rất chậm do có chu kỳ bán phân rã khá lớn (khoảng 30 năm).

### 3.3.6 Đánh giá liều hiệu dụng lên dân chúng

Mật độ rơi lắng các nuclit trên hình 3.10 được sử dụng làm cơ sở để đánh giá liều hiệu dụng lên dân chúng. Liều hiệu dụng được đánh giá cho ba con đường: chiếu ngoài, thâm nhập vào cơ thể qua ăn uống và hít thở. Đối với mỗi con đường lại có những hệ số chuyển hóa phóng xạ từ đất, nước và không khí được xác định bằng thực nghiệm riêng. Thí dụ, khả năng hấp thụ các nuclit phóng xạ rất khác nhau ở hệ tiêu hóa, như có thể thấy ở bảng 3.5.

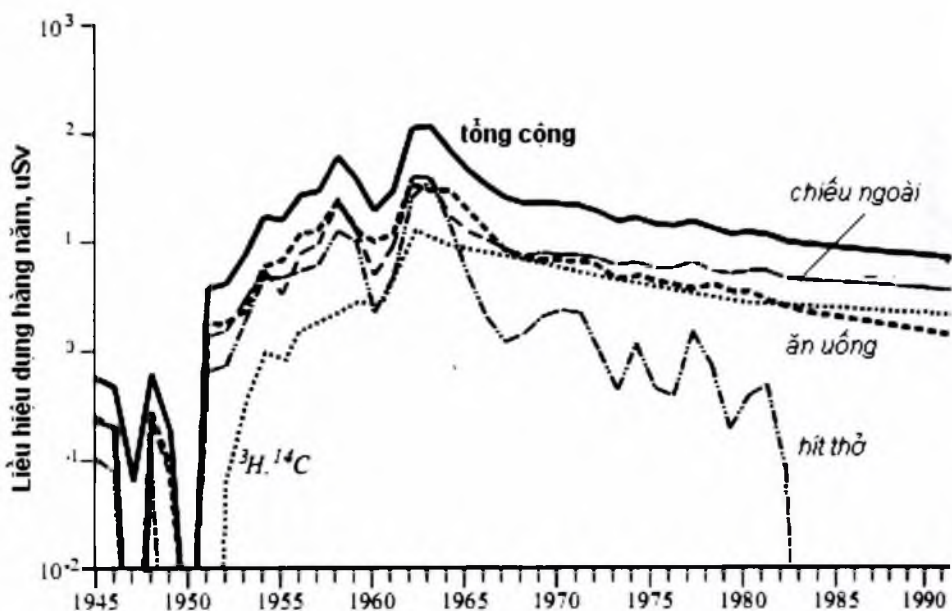
Đối với chiếu ngoài, những đồng vị phát  $\gamma$  có chu kỳ bán rã tương đối ngắn như  $\text{Zr}^{95}$ ,  $\text{Ru}^{106}$  đóng góp phần chủ yếu trong những năm đầu, sau đó phần đóng góp chính là do  $\text{Cs}^{137}$  kéo dài cho đến tận ngày nay. Liều hiệu dụng do ăn uống trong thời gian dài chủ yếu do  $\text{Cs}^{137}$ ,  $\text{Sr}^{90}$ , tuy nhiên  $\text{I}^{131}$  đóng góp phần quan trọng trong những năm đầu thử vũ khí ở ạt. Các đồng vị  $\text{Ce}^{144}$ ,  $\text{Ru}^{106}$ ,  $\text{Cs}^{137}$  đóng góp chính vào liều do hít thở, nhưng hầu như mất hẳn sau năm 1980 do nồng độ của chúng trong không khí giảm đáng kể. Hình 3.11 giới thiệu bức tranh toàn cảnh về liều hiệu dụng qua ba con đường thâm nhập vào cơ thể sống (UNSCEAR, 2000).



Hình 3.10. Mật độ rơi lắng các nuclit do thử vũ khí hạt nhân  
(Nguồn: UNSCEAR, 2000).

Bảng 3.5. Hiệu suất hấp thụ nuclit qua hệ tiêu hóa.

| Nuclit                            | Bức xạ          | Chu kỳ bán hủy | Hấp thụ qua hệ tiêu hóa |
|-----------------------------------|-----------------|----------------|-------------------------|
| $\text{Sr}^{90}/\text{Y}^{90}$    | $\beta$         | 28 năm         | 30%                     |
| $\text{Cs}^{137}$                 | $\beta, \gamma$ | 30 năm         | 100%                    |
| $\text{Pr}^{147}$                 | $\beta$         | 2,6 năm        | 0,01%                   |
| $\text{Ce}^{144}$                 | $\beta, \gamma$ | 285 ngày       | 0,01%                   |
| $\text{Ru}^{106}/\text{Rh}^{106}$ | $\beta, \gamma$ | 1,0 năm        | 0,03%                   |
| $\text{Zr}^{95}$                  | $\beta, \gamma$ | 65 ngày        | 0,01%                   |
| $\text{Sr}^{89}$                  | $\beta$         | 51 ngày        | 30%                     |
| $\text{Ru}^{103}$                 | $\beta, \gamma$ | 39,7 ngày      | 0,03%                   |
| $\text{Nb}^{95}$                  | $\beta, \gamma$ | 35 ngày        | 0,01%                   |
| $\text{Ce}^{141}$                 | $\beta, \gamma$ | 33 ngày        | 0,01%                   |
| $\text{Ba}^{140}/\text{La}^{140}$ | $\beta, \gamma$ | 12,8 ngày      | 5%                      |
| $\text{I}^{131}$                  | $\beta, \gamma$ | 8,05 ngày      | 100%                    |
| $\text{H}^3$                      | $\beta$         | 12,3 năm       | 100%                    |



Hình 3.11. Đóng góp của ba thành phần chiếu ngoài, ăn uống và hít thở vào liều hiệu dụng dân chúng toàn cầu từ thử vũ khí hạt nhân.

Liều hiệu dụng trung bình gây bởi các nuclit phóng xạ nhân tạo lên dân chúng toàn cầu đạt đến cực đại khoảng 0,1 mSv/năm vào những năm 1963 – 1964 và giảm xuống mười lần vào những năm đầu thế kỷ XXI. Con số hiện nay bé hơn 10  $\mu$ Sv/năm, thấp hơn hàng trăm lần so với liều hiệu dụng do phóng xạ tự nhiên.

### 3.4 LƯỢNG NUCLIT PHÓNG XẠ DO THỬ VŨ KHÍ HẠT NHÂN RƠI LẮNG TRÊN ĐẤT LIỀN VIỆT NAM

#### 3.4.1 Phục hồi mật độ rơi lắng tích lũy $\text{Cs}^{137}$ do thử vũ khí hạt nhân trên đất liền Việt Nam

Trong những thập kỷ thử vũ khí hạt nhân, Việt Nam chưa đủ điều kiện quan trắc phóng xạ môi trường, do đó hoàn toàn thiếu thông tin về quá trình rơi lắng  $\text{Sr}^{90}$ ,  $\text{Cs}^{137}$  và các nhân khác. Từ thập kỷ 80 của thế kỷ XX, do được trang bị những detector bán dẫn có độ phân giải và hiệu suất ghi cao, hướng nghiên cứu phóng xạ môi trường bắt đầu phát triển, nhờ

đó có thể đo được hàm lượng của hầu hết các nuclit phóng xạ nhân tạo trong các đối tượng môi trường khác nhau.

Nhưng làm sao từ những kết quả đo đạc này có thể truy hồi lại tổng lượng rơi lắng phóng xạ do thử vũ khí hạt nhân vào đầu thập kỷ 60 của thế kỷ XX cho đến giữa thập kỷ 70 của thế kỷ XX, lúc này có thể xem rơi lắng phóng xạ đã chấm dứt? Đại lượng này là mật độ rơi lắng tích lũy đo bằng đơn vị Bq/m<sup>2</sup>.

Đất bề mặt là nơi tàng trữ các nuclit phóng xạ nhân tạo lớn nhất trong số các đối tượng môi trường trên lục địa. Cũng từ lớp đất bề mặt này các nuclit phóng xạ sẽ được vận chuyển đến các đối tượng môi trường khác như các thủy vực, bùn đáy ở các hồ chứa, hoặc hệ sinh thái động thực vật... Lượng phóng xạ còn được giữ lại trong lớp đất bề mặt tại một vị trí nào đó được gọi là mật độ tồn lưu nuclit phóng xạ tại vị trí ấy. Mật độ tồn lưu cũng được đo bằng đơn vị Bq/m<sup>2</sup>, nhưng có giá trị khác với mật độ rơi lắng tích lũy nói trên, vì sau khi rơi xuống đất các nuclit phóng xạ có thể di chuyển đi nơi khác do đất bị xói mòn, hoặc lượng phóng xạ được bổ sung do từ nơi khác chuyển đến do đất được bồi lắng. Xác định mật độ tồn lưu các nuclit phóng xạ trong lớp đất bề mặt sẽ cho ta những thông tin tham chiếu cơ bản nhất về tổng lượng phóng xạ nhân tạo rơi lắng trên đất liền từ các vụ thử vũ khí hạt nhân.

Cs<sup>137</sup> rơi xuống từ khí quyển, hoặc trực tiếp (rơi khô), hoặc theo nước mưa như những ion hòa tan trong nước, được hấp phụ và gắn chặt ngay vào các hạt sét hoặc hạt keo hữu cơ trong đất. Một số khoáng sét vô cơ trong đất bề mặt, nhất là illite và vermiculite, có năng suất hấp phụ ion hòa tan Cs<sup>137</sup> rất cao nhờ có nhiều chỗ rìa xù xì (frayed edge site) với diện tích bề mặt rất lớn. Một khi bị hấp phụ, Cs<sup>137</sup> rất khó bị giải hấp ra dung dịch trong đất. Bức tranh trên không quan sát thấy ở một số khoáng khác như kaolinite, thành phần khoáng chủ yếu trong đất có nguồn gốc basalt. Trong trường hợp này, thay cho khoáng sét, các colloid trong mùn hữu cơ sẽ trở thành những trung tâm hấp phụ và lưu giữ Cs<sup>137</sup>. Cơ chế hấp phụ Cs<sup>137</sup> bởi các khoáng sét và mùn hữu cơ

trong đất bề mặt được thảo luận nhiều trong các nghiên cứu gần đây và có thể tham khảo trong Staunton et al. (2002).

Sau khi bị hấp phụ, số phận của nuclit  $\text{Cs}^{137}$  phụ thuộc vào các quá trình lý – hóa trong lớp đất bề mặt. Một mặt, chúng khuếch tán xuống những lớp sâu hơn, nhưng không quá vài chục cm. Mặt khác, chúng có thể di chuyển theo phương nằm ngang do các quá trình xói mòn và bồi lắng bởi nước mưa hoặc gió. Chính các quá trình này làm cho mật độ tồn lưu thay đổi và giá trị của nó khác với mật độ rơi lắng tích lũy.

Nơi nào bị xói mòn nhiều như các sườn dốc, mật độ tồn lưu phóng xạ trong đất sẽ xuống thấp, các nuclit phóng xạ chỉ được giữ lại trong lớp đất vài cm trên cùng. Ngược lại, ở chân dốc nơi đất được bồi lắng, mật độ tồn lưu có thể tăng lên rất cao, và các nuclit phóng xạ có thể tìm thấy ở những lớp đất khá sâu, có thể trên 50 cm. Chỉ có những lớp đất bề mặt còn nguyên sơ không bị xáo trộn do canh tác, hoặc đất không bị vận chuyển đi nơi khác do xói mòn và bồi lắng, tại đó mật độ tồn lưu mới giữ nguyên giá trị mật độ rơi lắng tích lũy. Cho nên xác định mật độ tồn lưu của nuclit phóng xạ trong đất bề mặt còn nguyên sơ sẽ cho phép ta truy hồi lại bức tranh rơi lắng phóng xạ từ các vụ thử vũ khí hạt nhân trước đây.

Tuy nhiên, rất khó chọn được vị trí nguyên sơ, nhất là trong điều kiện đất đai được tận dụng triệt để. Cho nên để tiến hành thí nghiệm này các vị trí được chọn chỉ có thể xem gần nguyên sơ, và mật độ tồn lưu đo được tại những nơi được chọn lựa kỹ ấy ( $I$ ,  $\text{Bq/m}^2$ ) không thể đúng hoàn toàn, mà chỉ gần bằng mật độ rơi lắng tích lũy của  $\text{Cs}^{137}$  ( $D$ ,  $\text{Bq/m}^2$ ). Nơi đất bị xói mòn,  $I < D$ , ngược lại nơi đất được bồi lấp,  $I > D$ , nhưng với một số lớn vị trí đo, trị trung bình của  $I$  sẽ tiến gần đến  $D$ . Phương pháp phân tích hồi quy sẽ cho phép suy ra  $D$  từ số lớn các kết quả đo  $I$  trong đất bề mặt nguyên sơ, như được trình bày trong phần sau.

Lãnh thổ Việt Nam trải dài từ  $9^\circ\text{N}$  đến  $23^\circ\text{N}$ , mật độ rơi lắng tích lũy  $\text{Cs}^{137}$  nói chung không cao vì ở gần xích đạo, nhưng tăng đáng kể từ Nam ra Bắc. Căn cứ theo những kết quả công bố trong UNSCEAR (2000), mật độ rơi lắng tích lũy  $\text{Cs}^{137}$  có thể tăng từ  $300 \text{ Bq m}^{-2}$  ở vùng cực nam đến  $700 \text{ Bq m}^{-2}$  ở cực bắc. Tuy nhiên, một số kết quả quan

trắc phóng xạ trong đất trên lãnh thổ nước ta cho thấy ở nhiều nơi mật độ tồn lưu Cs<sup>137</sup> vượt quá xa con số 700 Bq/m<sup>2</sup> cho vùng cực bắc nước ta nếu căn cứ trên tổng kết của UNSCEAR (2000). Chắc chắn lượng mưa hàng năm tại địa điểm quan trắc có ảnh hưởng rất mạnh, và gây ra những biến động này. Lượng mưa hàng năm ở nước ta thay đổi mạnh từ nơi này sang nơi khác, nơi cao nhất lên đến trên 4 000 mm/năm (Bắc Quang, Hà Giang), nơi thấp nhất (Phan Rang) dưới 700 mm/năm.

Cho nên trong nghiên cứu, ngoài kinh vĩ độ còn phải xem xét những yếu tố khác của vị trí quan trắc, trong đó có lượng mưa hàng năm cùng với những thông số hóa lý đặc trưng của đất để xem liệu, ngoài kinh vĩ độ, có còn yếu tố nào khác chi phối mật độ tồn lưu Cs<sup>137</sup> hay không. Phương pháp hồi quy nhiều biến sẽ giúp giải bài toán này để tìm ra yếu tố nào có ý nghĩa thống kê cao nhất.

Bảng 3.6. Tóm lược thống kê kết quả xác định mật độ tồn lưu Cs<sup>137</sup> và các thông số liên quan qua 292 mẫu đất bề mặt được xem là nguyên sơ trên đất liền Việt Nam.

|                                                 | Trung bình | Độ lệch chuẩn | Trung bình hình học | Khoảng biến thiên |
|-------------------------------------------------|------------|---------------|---------------------|-------------------|
| Vĩ độ, °N                                       | 16,8       | 4,34          | 17,1                | 9,2 – 23          |
| Kinh độ, °E                                     | 106,5      | 1,5           | 106,3               | 103 – 110         |
| Hoạt độ Cs <sup>137</sup> , Bq.kg <sup>-1</sup> | 2,03       | 2,2           | 1,58                | 0,5 – 18          |
| Mật độ tồn lưu, Bq.m <sup>-2</sup>              | 643        | 384           | 590                 | 129 – 3 294       |
| Phía Nam, <16°N                                 | 441        | 315           | 361                 | 129 – 1 603       |
| Phía Bắc, >16°N                                 | 808        | 359           | 750                 | 314 – 3 294       |
| Tỷ trọng đất, kg.m <sup>-3</sup>                | 1,22       | 0,3           | 1,23                | 0,43 – 2,1        |
| Lượng mưa năm, m                                | 1,97       | 0,56          | 1,88                | 0,79 – 3,8        |
| Lượng mùn hữu cơ, %                             | 1,97       | 1,11          | 1,81                | 0,3 – 8,5         |
| Lượng sét, %                                    | 19,1       | 12,6          | 15,9                | 0,4 – 60,7        |

Trong những năm 1998 – 2000, các phòng thí nghiệm kiểm xạ môi trường thuộc Viện Năng lượng Nguyên tử Việt Nam đã thu gộp và đo đặc mật độ tồn lưu  $Cs^{137}$  ở 292 mẫu đất bề mặt được xem là nguyên sơ lấy đến độ sâu 30 cm trên đất liền từ Nam ra Bắc. Ngoài mật độ tồn lưu còn xác định nhiều thông số hóa lý của đất. Tóm lược thống kê các mẫu đo được ghi lại trên bảng 3.6.

Kết quả chi tiết cho thấy mật độ tồn lưu  $Cs^{137}$  trong đất bề mặt gần nguyên sơ tăng lên từ nam ra bắc trong phạm vi khá rộng, từ 129 đến  $3294 \text{ Bq.m}^{-2}$ . Trong xu hướng chung ấy, lại có những vùng ở miền Trung, như Quảng Nam, Thừa Thiên, Hà Tĩnh, mật độ tồn lưu cao hơn rất nhiều so với các tỉnh vùng đồng bằng Bắc bộ. Rõ ràng lượng mưa có ảnh hưởng rất lớn đến mật độ rơi lắng tích phân, mưa càng nhiều mật độ này càng cao.

Trong công trình nghiên cứu (P. D. Hien et al., 2002), ngoài kinh vĩ độ và lượng mưa hàng năm tại nơi lấy mẫu, các thông số lý – hóa của mẫu đất bao gồm hàm lượng mùn hữu cơ, CEC, pH, các cation trao đổi  $Ca^{+2}$ ,  $Mg^{+2}$ ,  $K^{+}$ , thành phần cơ giới... được sử dụng như biến độc lập trong phép phân tích hồi quy trong đó biến phụ thuộc là mật độ tồn lưu  $^{137}Cs$  ( $I, \text{Bq.m}^{-2}$ ). Để bảo đảm phân bố thống kê chuẩn – điều kiện cần thiết của phép hồi quy tuyến tính – mật độ tồn lưu được chuyển đổi ra thang logarit.

Phép phân tích hồi quy từng bước qua 292 mẫu đất chỉ chọn được vĩ độ  $L(^{\circ}N)$  và lượng mưa hàng năm  $AR(m)$  là hai biến độc lập có khả năng giải thích được biến thiên mật độ tồn lưu  $Cs^{137}$  (biến phụ thuộc) trong đất bề mặt trên đất liền Việt Nam. Kinh độ và các thông số hóa – lý của đất không đủ ý nghĩa thống kê khi tham gia giải thích biến thiên mật độ tồn lưu  $Cs^{137}$  trên toàn lãnh thổ. Phương trình hồi quy có dạng:

$$\ln(I, \text{Bq.m}^{-2}) - \varepsilon = (3,53 \pm 0,09) + (0,092 \pm 0,004).L(^{\circ}N) + 0,62 \pm 0,03).AR(m)$$

$$[t = 37,9] \quad [t = 22,8] \quad [t = 19,9]$$

$$R^2 = 0,76 \quad (3.1)$$

Sai số chuẩn của các hệ số hồi quy và thống kê  $t$  (student) trong phương trình trên chứng tỏ phép hồi quy (3.1) có ý nghĩa thống kê cao. Hai biến  $L$  và  $AR$  có thể giải thích 43% và 33% tổng phương sai  $\ln(I)$  trên toàn lãnh thổ, 24% còn lại nằm trong số hạng còn dư (residual)  $\varepsilon$ . Số hạng này có phân bố chuẩn với tâm  $\varepsilon = 0$  và độ lệch chuẩn 0,3. Chính số hạng còn dư  $\varepsilon$  nói lên chênh lệch giữa mật độ tồn lưu  $I$  và mật độ rơi lắng tích phân  $D$  tại vị trí lấy mẫu. Mật độ rơi lắng tích lũy  $D$  chính là trung bình của mật độ tồn lưu  $I$ . Mẫu đất với  $\varepsilon = 0$  chính là đất nguyên sơ "đích thực", những vị trí nhận bồi lắng từ nơi khác đến có  $I > D$  và  $\varepsilon > 0$ , ngược lại, vị trí bị xói mòn có  $I < D$  nên  $\varepsilon < 0$ .

Trong thí nghiệm, các vị trí bị xói mòn và bồi lắng đều ngẫu nhiên, do đó  $\varepsilon$  sẽ phân bố chuẩn quanh trị trung bình  $\varepsilon = 0$ . Tại một địa điểm nhất định khi lấy mẫu ta không biết chắc đất bề mặt có còn nguyên sơ hay không, nhưng bằng cách đo nhiều mẫu đất và sau khi áp dụng phép hồi quy, ta có thể biết được vị trí lấy mẫu ấy bị xói mòn hay được bồi lắng tùy theo giá trị  $\varepsilon$  tương ứng dương hay âm. Mối quan hệ giữa mật độ rơi lắng tích lũy và mật độ tồn lưu  $Cs^{137}$  sẽ là

$$\ln(I) - \varepsilon = \ln(D(L, AR)) \quad (3.2)$$

hay

$$\ln(D, Bq.m^{-2}) = (3,53 \pm 0,09) + (0,092 \pm 0,004).L(^{\circ}N) + 0,62 \pm 0,03).AR(m) \quad (3.3)$$

chính là quy luật biến thiên mật độ rơi lắng tích lũy  $Cs^{137}$  theo vĩ độ và lượng mưa hàng năm trên địa phận lãnh thổ Việt Nam.

### **3.4.2 So sánh kết quả phục hồi mật độ rơi lắng tích lũy trên đất liền Việt Nam với công bố UNSCEAR (2000)**

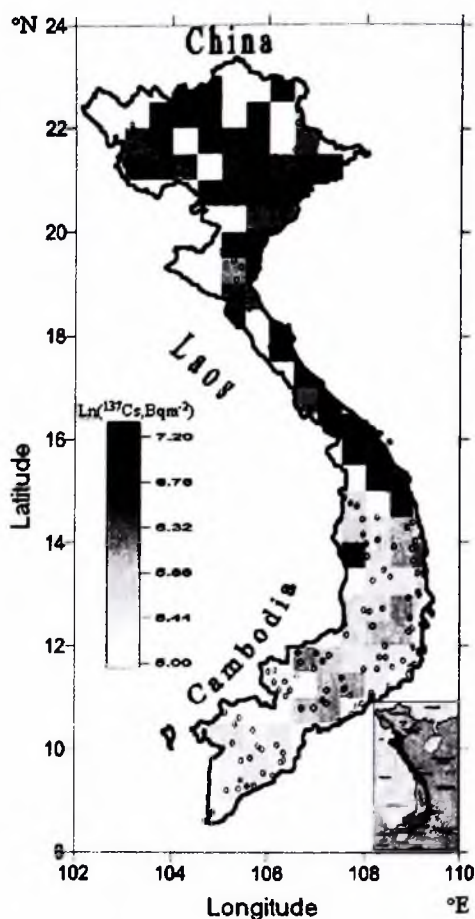
Để so sánh với kết quả trong UNSCEAR (2000), mật độ tồn lưu thực nghiệm được trung bình hóa cho từng dải vĩ độ  $0,5^{\circ}$  và kết quả trung bình hóa này được dùng làm biến phụ thuộc trong phép hồi quy với các biến độc lập là vĩ độ và lượng mưa được trung bình hóa theo vĩ độ như phương trình sau:

$$[\ln(I)]_L - \varepsilon' = [\ln(D)]_L = (3,64 \pm 0,11) + (0,094 \pm 0,004) \cdot [L]_L + (0,54 \pm 0,04) \cdot [AR]_L \quad (3.4)$$

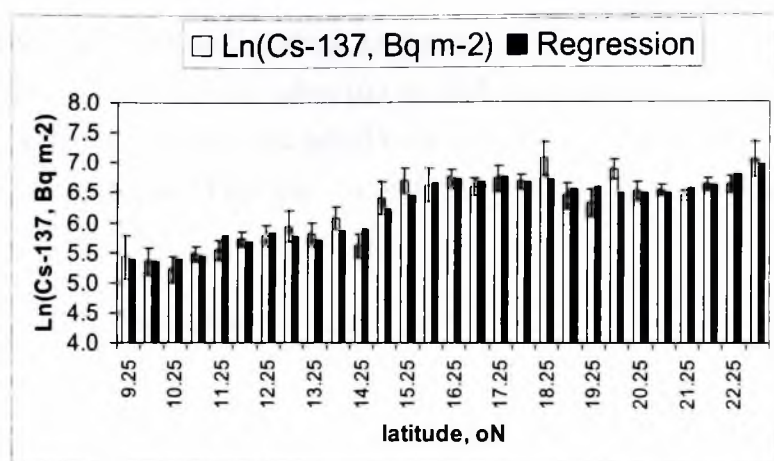
trong đó  $[...]_L$  là ký hiệu lấy trung bình theo dải vĩ độ tại L. Các hệ số trong phương trình hồi quy 3.3 và 3.4 khá giống nhau, song số hạng còn dư  $\varepsilon'$  trong phương trình hồi quy 3.3 nhỏ hơn nhiều so với  $\varepsilon$  trong 3.2.

Nói cách khác, mật độ tồn lưu thực nghiệm trung bình theo vĩ độ và kết quả hồi quy (cũng chính là mật độ rơi lắng tích phân trung bình theo vĩ độ) rất gần nhau, vì quá trình trung bình hóa các mẫu đo cùng vĩ độ đã làm cho mật độ tồn lưu bớt "gồ ghề" bởi các quá trình bồi lắng và xói mòn, và giá trị trung bình của nó tiến gần hơn đến mật độ rơi lắng tích lũy lấy trung bình theo vĩ độ.

Hình 3.13 minh họa những điều vừa nói trên, các cột đen là kết quả hồi quy, các cột trắng là mật độ tồn lưu thực nghiệm được trung bình hóa theo dải vĩ độ, sai số chuẩn của trị trung bình được thể hiện bằng các "vận nút chai".



Hình 3.12. Phân bố mật độ tồn lưu  $Cs^{137}$  trên đất liền Việt Nam qua những mẫu đất bề mặt tại 292 vị trí được xem như nguyên sơ. Vị trí lấy mẫu được đánh dấu màu hồng trên bản đồ.



Hình 3.13. Phân bố theo vĩ độ mật độ tồn lưu thực nghiệm và hồi quy theo công thức (3.2) trong phạm vi lãnh thổ Việt Nam.

Theo phân bố trên hình 3.13, từ nam ra bắc mật độ rơi lắng tích lũy tăng đều theo quy luật chung toàn cầu, nhưng tăng mạnh ở một số tỉnh miền Trung nơi có lượng mưa lớn do chịu tác động của hệ thống gió mùa đông bắc vào những tháng cuối năm. So với công bố của UNSCEAR, kết quả đo được ở Việt Nam nói chung cao hơn, mật độ rơi lắng tích lũy  $Cs^{137}$  ở các tỉnh miền Bắc nói chung cao hơn  $650 \text{ Bq.m}^{-2}$  và đạt đến  $1100 \text{ Bq.m}^{-2}$  ở địa đầu phía bắc (so với khoảng  $700 \text{ Bq.m}^{-2}$  theo UNSCEAR).

### 3.4.3 Đánh giá tổng lượng $Cs^{137}$ rơi xuống đất liền Việt Nam do thử vũ khí hạt nhân

Từ kết quả xác định mật độ rơi lắng tích lũy  $Cs^{137}$  trên đây ta có thể tính ra tổng lượng rơi lắng tích phân trên toàn lãnh thổ đất liền Việt Nam do thử vũ khí hạt nhân trong hai thập kỷ 1950 – 1960. Với mật độ rơi lắng tích lũy trung bình  $643 \text{ Bq.m}^{-2}$  và diện tích  $320\,000 \text{ km}^2$ , tổng lượng rơi lắng  $Cs^{137}$  còn lại vào năm 2000 là  $2,06 \times 10^{13} \text{ Bq}$ . Nếu hiệu chỉnh phân rã phóng xạ về năm ngừng thử vũ khí hạt nhân (1963), tổng lượng rơi lắng lúc ấy sẽ bằng  $4,94 \times 10^{13} \text{ Bq}$ , nghĩa là 1 918 lần bé hơn toàn bộ lượng  $Cs^{137}$  phát ra trên toàn cầu ( $9,48 \times 10^{17} \text{ Bq}$ , bảng 3.2). Trong khi đó, diện tích đất liền Việt Nam bé hơn diện tích bề mặt Trái Đất 1 594

lần, nghĩa là lượng rơi lắng phóng xạ xuống lãnh thổ Việt Nam do thử vũ khí hạt nhân ít hơn đôi chút so với mức rơi lắng trung bình trên thế giới, một kết quả có vẻ hợp lý, nó không cao như các nước vĩ độ trung bình ở Bắc bán cầu, nhưng cũng không thấp như vùng xích đạo và ở hai địa cực.

#### 3.4.4 Lượng $\text{Pu}^{239+240}$ và $\text{Sr}^{90}$ do thử vũ khí hạt nhân rơi lắng trên đất liền Việt Nam

Nếu có thể định lượng hoạt độ phóng xạ  $\text{Cs}^{137}$  khá dễ dàng nhờ các hệ phổ kế gamma phong thấp thì với  $\text{Sr}^{90}$  và  $\text{Pu}^{239+240}$  kỹ thuật thực nghiệm phức tạp hơn nhiều.  $\text{Sr}^{90}$  phải đo bằng máy beta phong thấp sau khi xử lý hóa phóng xạ rất phiền phức. Còn để phát hiện các đồng vị Pu cần phải có phổ kế alpha phong thấp cùng với hệ thống chuẩn bị mẫu để tạo ra lớp mỏng sao cho tia  $\alpha$  ít bị tự hấp thụ ngay trong mẫu đo. Trong thực nghiệm phổ alpha của hai đồng vị  $\text{Pu}^{239}$  và  $\text{Pu}^{240}$  chập với nhau nên kết quả đo được tính chung cho cả hai.

$\text{Pu}^{239+240}$  đo được trong 40 mẫu đất bề mặt, gồm 20 mẫu lấy ở phía Bắc và 20 mẫu ở phía Nam.  $\text{Sr}^{90}$  đo được trong 6 mẫu đất bề mặt lấy ở phía Bắc và 20 mẫu ở phía Nam. Kết quả của nhóm nghiên cứu phía Bắc được công bố trên tạp chí J. of Environmental Radioactivity (Quang et al., 2004). Kết quả của nhóm phía Nam do Trương Ý chủ trì được công bố ở hội nghị khoa học trong nước.

Trong quy trình thực nghiệm, cả hai nhóm nghiên cứu đều xác định hoạt độ phóng xạ của cả hai nuclit  $\text{Pu}^{239+240}$  và  $\text{Cs}^{137}$ , và so sánh chúng với nhau theo hệ số tương quan hoặc bằng phương pháp hồi quy. Kết quả nghiên cứu của hai nhóm được tóm lược ở bảng 3.7. Hoạt độ của cả hai nuclit  $\text{Cs}^{137}$  và  $\text{Pu}^{239+240}$  ở phía Bắc đều cao hơn phía Nam rõ rệt, đúng như đã nói nhiều lần ở phần trên. Tuy hai nhóm tiến hành thí nghiệm độc lập và ở những thời điểm khác nhau, song kết quả rất tương hợp với nhau.

Do khó khăn trong xác định mật độ tồn lưu  $\text{Pu}^{239+240}$  nên không thể đo một số lượng mẫu đủ lớn để lập bản đồ phân bố như trường hợp  $\text{Cs}^{137}$ . Tuy nhiên, nếu hai nuclit này song hành với nhau trong quá trình tạo thành và vận chuyển trong môi trường thì giữa hoạt độ phóng xạ của chúng trong đất bề mặt phải tồn tại một mối tương quan nhất định thể hiện qua hệ số tương quan cao và một tỷ số ổn định không phụ thuộc vị trí lấy mẫu.

Để làm rõ ý tưởng đơn giản này có thể hồi quy các kết quả đo hoạt độ phóng xạ  $\text{Cs}^{137}$  và  $\text{Pu}^{239+240}$  trên cả hai miền, như trên hình 3.14. Đường hồi quy gần như đi qua gốc tọa độ nên ta có thể xem hoạt độ

$$\text{Pu}^{239+240} = (0,0225 \pm 0,0014) \times \text{hoạt độ } \text{Cs}^{137}. \quad (3.5)$$

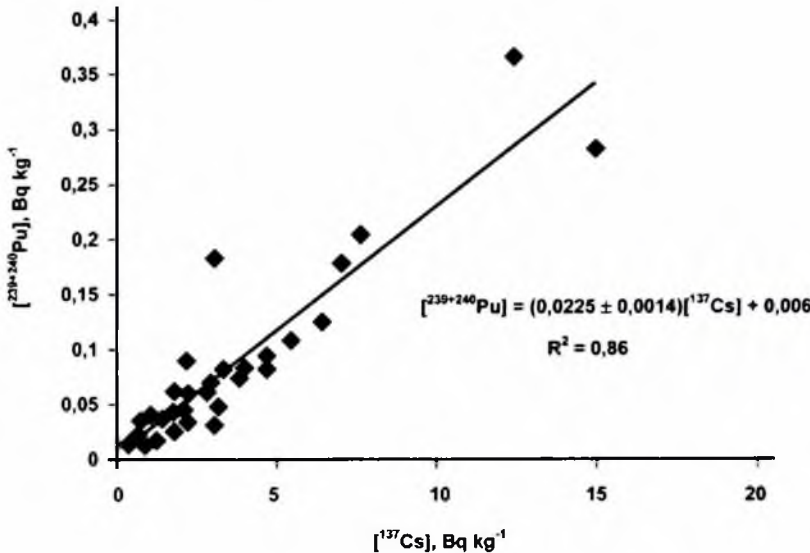
Kết quả này giúp ta xác định hoạt độ  $\text{Pu}^{239+240}$  trong đất bề mặt tại một địa điểm nào đó trên đất liền mà không cần phải sử dụng kỹ thuật phổ kế alpha rất phức tạp bằng cách đo  $\text{Cs}^{137}$  theo phổ kế gamma, sau đó lấy kết quả nhân cho 0,0225.

Bảng 3.7. Tóm lược các kết quả nghiên cứu xác định hoạt độ  $\text{Pu}^{239+240}$  so với  $\text{Cs}^{137}$  trong đất bề mặt ở Việt Nam.

|                                                  | Miền Bắc           | Miền Nam          | Cả nước             |
|--------------------------------------------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| Vĩ độ, °N                                        | 16,6 – 22,7        | 9,1 – 16,5        | 9,1 – 22,7          |
| Hoạt độ trung bình $\text{Cs}^{137}$ , Bq/kg     | 4,65               | 1,24              | 2,95                |
| Hoạt độ trung bình $\text{Pu}^{239+240}$ , Bq/kg | 0,111              | 0,032             | 0,072               |
| Hệ số tương quan                                 | 0,94               |                   | 0,93                |
| Trung bình tỷ số Pu/Cs                           | $0,025 \pm 0,0015$ | $0,026 \pm 0,005$ | $0,0225 \pm 0,0014$ |

$\text{Sr}^{90}$  hầu như không tương quan với  $\text{Cs}^{137}$  và  $\text{Pu}^{239+240}$ . Tỷ số mật độ tồn lưu  $\text{Cs}^{137}/\text{Sr}^{90}$  trong đất bề mặt ở miền Bắc thay đổi từ 2 đến 28, trung bình  $9,3 \pm 1,2$ . Ở miền Nam tỷ số này thay đổi từ 1,86 đến 6,87, trung bình  $3,7 \pm 0,7$ . Các kết quả thực nghiệm này đều cao hơn rất nhiều tỷ số

phát thải 1,52 giữa hai đồng vị (bảng 3.2), chứng tỏ  $\text{Sr}^{90}$  có độ linh động trong đất cao hơn rất nhiều so với  $\text{Cs}^{137}$ .



Hình 3.14. Quan hệ giữa hoạt độ riêng  $\text{Cs}^{137}$  và  $\text{Pu}^{239+240}$  (tính ra  $\text{Bq/kg}$ ) trong đất bề mặt Việt Nam.

### 3.5 HIỆN TRẠNG NỀN PHÒNG PHÓNG XẠ NHÂN TẠO TRONG MÔI TRƯỜNG VIỆT NAM

Vào những năm cuối thập kỷ 90 của thế kỷ XX, các phòng thí nghiệm thuộc Viện Năng lượng Nguyên tử Việt Nam đã có tương đối đầy đủ các điều kiện thực nghiệm để xác định nền phóng xạ môi trường tự nhiên và nhân tạo trên lãnh thổ đất nước. Tất cả các nuclit phóng xạ điển hình trong môi trường đều có thể định lượng theo các phương pháp chuẩn quốc tế với độ tin cậy được kiểm định qua nhiều hoạt động so sánh quốc tế và trong nước. Điều kiện lúc này đã chín muồi để các phòng thí nghiệm trong nước phối hợp với nhau nghiên cứu xác định nền phóng xạ nhân tạo trên toàn quốc. Những nghiên cứu này đã thu thập được rất nhiều thông tin về nền phóng xạ nhân tạo trong nhiều đối tượng môi trường như đất, nước, biển, lương thực thực phẩm,

thực vật chi thị... Dưới đây chỉ tóm lược một số kết quả được công bố ra quốc tế.

Những kết quả đưa ra dưới đây tuy chưa phản ánh đầy đủ hiện trạng phóng xạ nhân tạo trong môi trường Việt Nam nhưng vẫn có thể dùng làm cơ sở tham chiếu cho những quan trắc đang và sẽ tiến hành trong tương lai liên quan đến tác động môi trường của chương trình điện hạt nhân.

### **3.5.1 Phóng xạ nhân tạo trong không khí và rơi lắng**

Trong các mẫu sol khí và rơi lắng quan trắc hàng tháng ở Đà Lạt, TP. Hồ Chí Minh và Hà Nội chỉ xuất hiện các nuclit phóng xạ tự nhiên thuộc dãy U và Th,  $K^{40}$ ,  $Be^7$ . Hàm lượng các nuclit phóng xạ nhân tạo như  $I^{131}$ ,  $Cs^{137}$  đều xuống dưới mức phát hiện trong các mẫu thu góp hàng tháng. Nhưng khi xảy ra tai nạn điện hạt nhân Chernobyl và Fukushima, các trạm quan trắc không khí và rơi lắng ở Việt Nam đã ghi nhận được  $I^{131}$ ,  $Cs^{134}$ ,  $Cs^{137}$ ... ngay trong các mẫu thu góp hàng ngày. Mặc dù rơi lắng phóng xạ từ hai tai nạn trên có thể phát hiện được, song chúng rất yếu so với tồn lưu từ thử vũ khí hạt nhân gần năm thập kỷ trước đây, và không còn có thể phát hiện được sau vài chục ngày.

Một số thực vật được dùng làm chỉ thị như lá thông, địa y... có khả năng tích tụ sol khí phóng xạ từ khí quyển.  $Cs^{137}$  trong lá thông thu góp ở Việt Nam có hoạt độ khá cao, chủ yếu do các lá kim hút sol khí phóng xạ từ khí quyển, không phải từ đất lên. Quan trắc phóng xạ trong các thực vật chỉ thị được tiến hành từ lâu ở Việt Nam, song đến nay chưa có một tổng kết học thuật nào về vấn đề này.

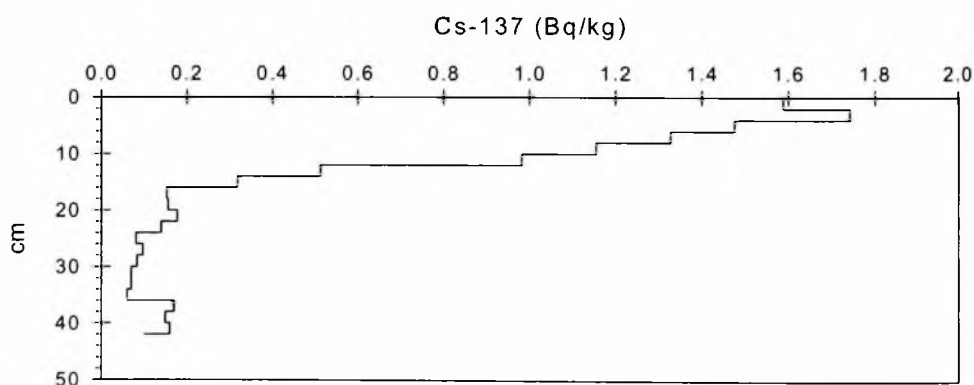
### **3.5.2 $Cs^{137}$ trong đất bề mặt nguyên sơ**

Như đã nói nhiều lần trong các chương trước, đất bề mặt là kho tồn trữ nuclit phóng xạ nhân tạo lớn nhất, và dễ định lượng nhất, so với các môi trường khác. Hàm lượng  $Cs^{137}$  trong môi trường này tùy thuộc rất

nhiều vào đất nguyên sơ hay đất canh tác, đất dốc bị xói mòn hay vùng trũng được bồi lắng.

Năm 1998 ba phòng thí nghiệm ở Hà Nội, Đà Lạt và TP. Hồ Chí Minh của Viện Năng lượng nguyên tử Việt Nam đã phối hợp với nhau trong một dự án nghiên cứu nhằm xác định và tìm quy luật phân bố mật độ tồn lưu  $\text{Cs}^{137}$  qua hàng trăm mẫu đất bề mặt trên toàn quốc được xem là nguyên sơ, không bị xáo trộn do canh tác, hoặc bị xói mòn hay bồi lắng bởi nước mưa.

Ở những nơi đất còn nguyên sơ mật độ tồn lưu  $\text{Cs}^{137}$  cũng chính là mật độ rơi lắng tích lũy của đồng vị này do thử vũ khí hạt nhân trong khí quyển (sau khi đã hiệu chỉnh phân rã phóng xạ). Sở dĩ như vậy vì ở những đất còn nguyên sơ, sau khi rơi lắng xuống đất theo nước mưa,  $\text{Cs}^{137}$  chỉ khuếch tán xuống độ sâu không quá  $\sim 30$  cm mà không di chuyển theo phương nằm ngang đi nơi khác. Hoạt độ  $\text{Cs}^{137}$  giảm nhanh theo độ sâu ở đất nguyên sơ, tập trung chủ yếu (90%) trong lớp đất 20 cm trên cùng, như trên hình 3.15.



Hình 3.15. Phân bố hoạt độ  $\text{Cs}^{137}$  theo độ sâu ở đất bề mặt nguyên sơ Đức Trọng, Lâm Đồng  
(Nguồn: Trương Ý, Viện NCHN Đà Lạt).

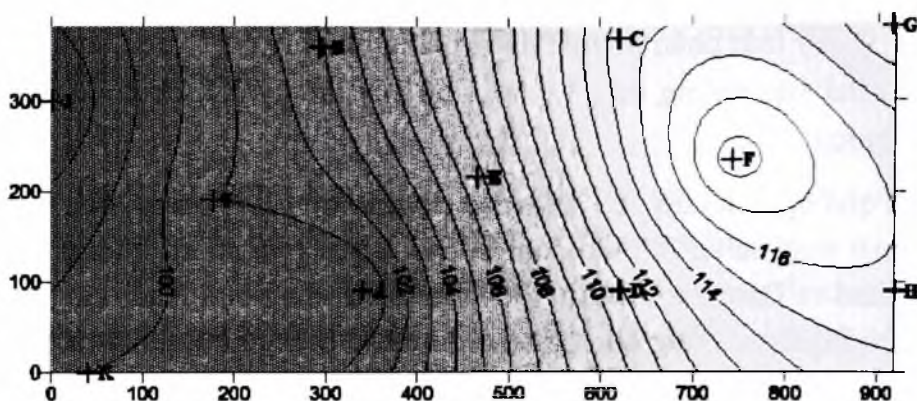
Ngược lại, những nơi đất bị xói mòn,  $\text{Cs}^{137}$  bị mất đi cùng với lớp đất bề mặt, những nơi được bồi lắng, đất từ nơi khác di chuyển đến mang theo  $\text{Cs}^{137}$ . Do đó, đo mật độ tồn lưu ở đất nguyên sơ cho phép phục hồi

và tìm quy luật phân bố mật độ rơi lắng tích lũy  $\text{Cs}^{137}$  trên lãnh thổ Việt Nam mà vào những thập kỷ 50 – 60 của thế kỷ XX chưa có điều kiện đo được.

Kết quả nghiên cứu cho thấy mật độ tồn lưu  $\text{Cs}^{137}$  trung bình trong đất bề mặt nguyên sơ ở Việt Nam là  $643 \text{ Bq m}^{-2}$ , và có xu hướng tăng dần từ Nam ra Bắc, vào khoảng  $300 \text{ Bq m}^{-2}$  ở vùng cực Nam tăng lên trên  $1100 \text{ Bq m}^{-2}$  ở vùng cực bắc (số đo được hiệu chỉnh phân rã phóng xạ về năm 2000). Nhưng xu hướng gia tăng từ Nam ra Bắc không đều mà bị ảnh hưởng bởi lượng mưa hàng năm. Ở những vùng khô hạn mật độ tồn lưu ít đi, ngược lại ở một số vùng miền Trung nhiều mưa, tuy vĩ độ không cao lắm, nhưng mật độ tồn lưu vẫn khá cao.

Mô hình hồi quy theo công thức (3.4) diễn tả quy luật phân bố mật độ tồn lưu  $\text{Cs}^{137}$  trong đất bề mặt nguyên sơ theo vĩ độ và lượng mưa trung bình hàng năm. Công thức này tính cho thời điểm năm 2000, sử dụng nó ở những năm khác sẽ phải hiệu chỉnh phân rã phóng xạ của  $\text{Cs}^{137}$  ( $T_{1/2} = 30,07$  năm). Nhắc lại, ở công thức (3.3),  $L$  là vĩ độ,  $AR$  là lượng mưa hàng năm lấy trung bình trong nhiều thập kỷ vào những năm cuối thế kỷ trước,  $\varepsilon$  là số dư trong công thức hồi quy nói lên độ chênh lệch giữa mật độ tồn lưu  $I$  với mật độ rơi lắng tích lũy  $D$  tại điểm lấy mẫu. Cụ thể, khi  $\varepsilon = 0$ ,  $I = D$ , và đất bề mặt tại điểm lấy mẫu là nguyên sơ lý tưởng,  $\varepsilon > 0$  có nghĩa là  $I > D$ , điểm lấy mẫu được bồi lắng, ngược lại, với  $\varepsilon < 0$  điểm lấy mẫu bị xói mòn.

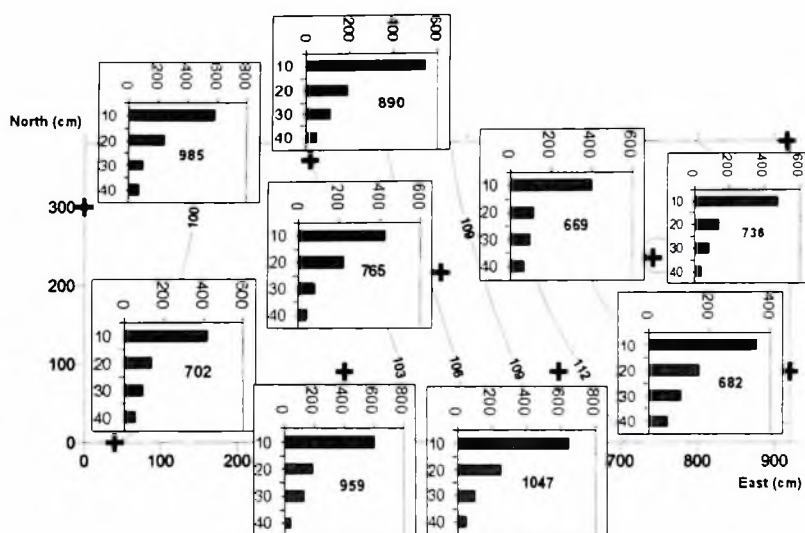
Công thức (3.4) được rút ra từ 292 mẫu đất nguyên sơ trên toàn lãnh thổ Việt Nam nên có độ tin cậy thống kê khá cao. Nó lại được kiểm nghiệm nhiều lần qua các thí nghiệm nghiên cứu xói mòn và trầm tích ở miền Nam (Hai et al., 1999) và miền Bắc (Hien et al., 2013), những thí nghiệm này đòi hỏi phải tìm được những vị trí tham chiếu để xác định mật độ rơi lắng tích lũy  $\text{Cs}^{137}$ , từ đó rút ra tốc độ trầm tích và xói mòn. Hình 3.16 giới thiệu một vị trí tham chiếu như thế trong công trình nghiên cứu xói mòn đất dốc tại Lương Sơn, Hòa Bình (P. D. Hien et al., 2013). Đây là một khoảnh đất bằng phẳng kích thước  $400 \times 900 \text{ cm}$  với cao độ chỉ biến đổi trong khoảng 100 mm được chọn làm vị trí tham chiếu cho thí nghiệm nói trên.



Hình 3.16. Khoảnh đất tham chiếu được chọn để đo mật độ rơi  
lắng  $\text{Cs}^{137}$  trong nghiên cứu xói mòn đất ở Lương Sơn,  
Hòa Bình.

Để xác định mật độ rơi lắng tích lũy, chín cọc đất sâu 40 cm được lấy lên tại những vị trí đánh dấu trên hình 3.16, mỗi cọc đất được cắt thành bốn lát để đo lượng  $\text{Cs}^{137}$  tồn lưu trong từng lát và xác định phân bố mật độ tồn lưu theo độ sâu. Kết quả thể hiện trên các giản đồ hình 3.17. Tại mỗi điểm lấy mẫu, hoạt độ và mật độ tồn lưu  $\text{Cs}^{137}$  trong từng lát cắt giảm rất nhanh theo độ sâu theo quy luật gần hàm mũ. Trên 75% lượng  $\text{Cs}^{137}$  nằm lại ở 20 cm đất trên cùng. Mật độ tồn lưu tại mỗi vị trí lấy mẫu có được từ cả bốn lát cắt tính theo  $\text{Bq.m}^{-2}$  được ghi ở giữa mỗi giản đồ. Trị trung bình ( $\pm$  sai số chuẩn) của chúng là  $827 \pm 50 \text{ Bq.m}^{-2}$ , phù hợp khá tốt với giá trị  $810 \pm 25 \text{ Bq.m}^{-2}$  suy ra từ mô hình hồi quy (3.4) với  $L = 20,9^\circ\text{N}$  và  $AR = 1,8 \text{ m}$ .

Theo mô hình hồi quy (3.4) được rút ra ở 3.4.2, vĩ độ ( $L$ ) và lượng mưa hàng năm ( $AR$ ) tại những vị trí lấy mẫu chỉ giải thích được 76% phương sai mật độ tồn lưu  $\text{Cs}^{137}$  trong đất bề mặt được xem là nguyên sơ trên toàn trên lãnh thổ Việt Nam ( $R^2 = 0,76$ ). Câu hỏi đặt ra là những yếu tố nào khác sẽ tham gia giải thích 34% phương sai còn lại? Cách tốt nhất để trả lời câu hỏi này là tiến hành thí nghiệm với nhiều mẫu đất lấy tại một địa điểm nhất định để không chế hai thông số  $L$  và  $AR$  không cho chúng thay đổi theo điểm lấy mẫu. Chín mẫu đất lấy tại khoảnh đất được chọn làm tham chiếu trong nghiên cứu xói mòn đất ở Lương Sơn, Hà Nội (Hòa Bình cũ) thỏa mãn yêu cầu này.



Hình 3.17. Phân bố mật độ tồn lưu  $\text{Cs}^{137}$  theo độ sâu tại các vị trí khác nhau trên khoảnh đất được chọn làm tham chiếu trong thí nghiệm nghiên cứu xói mòn đất tại Lương Sơn, Hòa Bình (Hien et al. 2013).

Theo hình 3.16, trên khoảnh đất kích thước  $400 \times 900$  cm với L và AR bất biến, mật độ tồn lưu  $\text{Cs}^{137}$  vẫn biến thiên trong một dải khá rộng, từ  $669 \text{ Bq.m}^{-2}$  đến  $1\,047 \text{ Bq.m}^{-2}$ . Hệ số biến thiên tính theo tỷ số độ lệch chuẩn ( $145 \text{ Bq.m}^{-2}$ ) trên trị trung bình ( $827 \text{ Bq.m}^{-2}$ ) là 17,5%. Yếu tố nào gây nên sự biến thiên khá rộng trên một khoảnh đất rất hẹp như thế?

Để trả lời câu hỏi này, các mẫu đất được phân tích theo những thành phần hóa lý cơ bản như lượng mùn hữu cơ, pH, CEC, cations, anions, phân cấp hạt..., và kết quả phân tích được dùng như những biến độc lập (x) trong phép hồi quy với biến phụ thuộc (y) là mật độ tồn lưu  $\text{Cs}^{137}$ . Kết quả cho thấy không biến độc lập x nào đủ độ tin cậy để giải thích phần nào biến thiên của y. Như vậy, mật độ tồn lưu  $\text{Cs}^{137}$  trong đất bề mặt nguyên sơ có thể thăng giáng khá mạnh trong một phạm vi rất hẹp mà nguyên nhân có thể do những yếu tố nào khác ít liên quan đến các thông số hóa lý được phân tích. Có thể bản thân mật độ rơi lắng cũng không đồng đều trong phạm vi rất hẹp, như nhận xét của một số tác giả nước ngoài.

### 3.5.3 $\text{Cs}^{137}$ trong đất canh tác

Canh tác, cày xới đất, cộng với các quá trình xói mòn và trầm tích làm cho mật độ tồn lưu  $\text{Cs}^{137}$  có thể khác rất nhiều so với đất nguyên sơ được trình bày ở phần trên.

Trước hết, cày xới đất khi canh tác làm trộn đều  $\text{Cs}^{137}$  trong lớp đất canh tác, nuclit này không giảm nhanh theo độ sâu như ở đất nguyên sơ như trên hình 8.5 mà phân bố đều trong lớp đất 20 – 30 cm. Kết quả nghiên cứu hàng chục mẫu đất ruộng lúa ở Thái Bình cho thấy  $\text{Cs}^{137}$  phân bố khá đều trong hai lớp 0 – 15 cm và 15 – 30 cm. Mật độ tồn lưu  $\text{Cs}^{137}$  trung bình ở vùng này là  $654 \text{ Bq/m}^2$ , phù hợp với giá trị  $675 \text{ Bq/m}^2$  suy ra từ mô hình hồi quy (8.1) với vĩ độ  $L = 20,5^\circ\text{N}$  và lượng mưa hàng năm  $AR = 1,8 \text{ m}$ . Có sự phù hợp khá tốt này vì đất ruộng lúa ở Thái Bình không bị xói mòn hoặc bồi lắng trong hàng chục năm qua.

Nhưng bức tranh hoàn toàn khác ở đất dốc và vùng núi. Quá trình xói mòn và trầm tích trong nhiều năm đã phân bố lại  $\text{Cs}^{137}$ , làm cho mật độ tồn lưu trong đất bề mặt khác hẳn với mật độ rơi lắng tích lũy do thử vũ khí hạt nhân trong khí quyển. Ở nơi nào đất bị xói mòn lớp đất chứa  $\text{Cs}^{137}$  mỏng hơn, mật độ tồn lưu giảm đi thậm chí có nơi đất không chứa  $\text{Cs}^{137}$ . Ở nơi được bồi lắng hiện tượng lớp đất chứa  $\text{Cs}^{137}$  dày hơn, mật độ tồn lưu tăng lên.

Dọc theo sườn dốc, mật độ tồn lưu  $\text{Cs}^{137}$  phụ thuộc vào đặc điểm bình đồ ở từng vị trí. Ở những chỗ đất lồi,  $\text{Cs}^{137}$  ít đi do đất bị xói mòn. Ngược lại, ở những chỗ lõm,  $\text{Cs}^{137}$  nhiều hơn do đất được bồi lắng (Ritchie et al., 2007). Cho nên,  $\text{Cs}^{137}$  sau khi rơi xuống đất theo nước mưa cách nay hơn nửa thế kỷ đã phân bố lại dọc theo sườn đất dốc do hiện tượng xói mòn và bồi lắng.

Đất rừng nguyên sinh ít bị xói mòn nhất, nhưng khi chuyển sang canh tác nông nghiệp đất sẽ bị xói mòn mạnh. Ngược lại, tốc độ xói mòn đất bị hạn chế rất nhiều khi có lớp che phủ bề mặt đủ kín và các giải pháp canh tác chống xói mòn thích hợp. Nói chung, đất canh tác được cày xới bị xói mòn mạnh hơn đất nguyên sinh, đất rừng lâu năm, hoặc đồng cỏ.

### 3.5.4 Cs<sup>137</sup> trong trầm tích hồ chứa

Nếu trên lưu vực, Cs<sup>137</sup> được dùng làm chỉ thị đánh dấu xói mòn đất thì ở đáy các hồ chứa, nó giúp đánh dấu lớp trầm tích xuất hiện vào những năm đầu thập kỷ 60 của thế kỷ XX khi bắt đầu có rơi lắng phóng xạ do thử vũ khí hạt nhân, qua đó ta có thể xác định tốc độ trầm tích.

Kỹ thuật đánh dấu Cs<sup>137</sup> đã được áp dụng để nghiên cứu tốc độ trầm tích ba hồ chứa ở tỉnh Lâm Đồng gồm hồ nhà máy thủy điện Đa Nhim xây năm 1960 – 1962 với dung tích  $163.10^6 \text{ m}^3$ , và hai hồ tưới tiêu Đa Ham và Tuyên Lâm xây năm 1982 – 1988 với dung tích  $2.8.10^6$  và  $10.6.10^6 \text{ m}^3$  (Hai et al., 2000). Diện tích lưu vực hồ Đa Nhim là  $775 \text{ km}^2$ , hai hồ tưới tiêu có lưu vực bé hơn, từ 20 đến  $33 \text{ km}^2$ . Tốc độ trầm tích đo được là  $0,7 - 1,6 \text{ cm.y}^{-1}$  ở hồ thủy điện Đa Nhim,  $0,5 - 0,8 \text{ cm.y}^{-1}$  ở hồ Tuyên Lâm và  $0,8 - 1,4 \text{ cm.y}^{-1}$  ở hồ Đa Ham.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Aoyama M., Hirose K., Igarashi Y., (2006) Reconstruction and updating our understanding on the global weapons tests Cs<sup>137</sup> fallout Journal of Environmental Monitoring 8, 431–438, 2006.
2. Friedlander, B. R., Gochfeld, M. Burger, J., Powers, C. W. (2005). Radionuclides in the marine environment , A CRESP Science Review, [www.cresp.org/Amchitka...Final...02\\_radionuclide](http://www.cresp.org/Amchitka...Final...02_radionuclide).
3. HASL-329 (1977), Health and Safety Laboratory. Final tabulation of monthly Sr fallout data: 1954–76.
4. Hien PD, Dung BD, Phien T (2013) Redistribution of Cs<sup>137</sup> and Doil components on cultivated hill slopa with hedgerows as conservation meadares. Soil and Tillage Redearch, 128, 145 – 154.
5. Hai, P. S., Son, P. N., Dien, N. N., Tan, V. H., & Hien, P. D. (1999). Assessment of erosion and accretion in catchment areas based on Pb<sup>210</sup> and Cs<sup>137</sup> contents in soil and sediment. In Isotope production and applications in the 21st century. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Isotopes, Vancouver: World Scientific* (pp. 415–418).

6. Hien, P.D., Hiep, H.T., Quang, N.H., Huy, N.Q., Binh, N.T., Hai, P.S., Long, N.Q., Bac, V.T., 2002. Derivation of Cs-137 deposition density from measurements of Cs-137 inventories in undisturbed soils. *Journal of Environmental Radioactivity* 62, 295–303.
7. Owens, P. N., Walling, D. E., He, Q., 1996. The behaviour of bomb derived cesium-137 fallout in catchment soils. *Journal of Environmental* 32, 169–191.
8. Playford, K. J. et al., Radioactive fallout in air and rain: Results to the end of 1991. AEA-EE 0498 DOE/RAS/93.003 (1993).
9. Ritchie, J. C., McCarty, J. W., Venteris, E. R., Kaspar, T. C., 2007. *Soil Geomorphology* 89, 263–171.
10. Simon, S. L., Bouville, A., Beck, H. L., (2004). *Journal of Environmental Radioactivity* Vol. 74, p 91–105.
11. Staunton S., Dumat C. Zsolnay A., (2002). *Journal of Environmental Radioactivity* Vol. 58, p 163–173.
12. United Nations, Annex C. Sources and Effects of Ionizing Radiation. *United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000. Report to the General Assembly with Scientific Annexes*, New York 2000.
13. Zapata F. (edited), (2002). Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides, Kluwer Academic Publisher.

# 4

## Nhà máy điện hạt nhân

Khối urani giàu  $U^{235}$  có kích thước chưa đầy 15 cm trong quả bom nguyên tử thả xuống thành phố Hiroshima có sức nổ tương đương 16 kt TNT, giết chết 66 000 người ngay tức khắc và gây thương tích lâu dài cho 70 000 người khác. Phản ứng phân hạch dây chuyền chỉ xảy ra trong khoảng vài phần triệu giây và chỉ kịp đốt cháy không quá 1 kg trong số 64 kg  $U^{235}$  chứa trong quả bom. Liệu một kích bản nổ tương tự có thể xảy ra ở nhà máy điện hạt nhân (ĐHN) với lượng nhiên liệu phân hạch lớn hơn gấp bội? Chắc chắn là không, lò phản ứng không phải là bom nguyên tử!

Song có những kích bản khác có thể dẫn đến thảm họa lớn. Lò phản ứng công suất điện 1 000 MW tích lũy trong vùng hoạt một lượng phóng xạ khoảng sáu tỷ curi (Ci,  $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10}$  phân rã phóng xạ trong một giây). Chỉ cần một phần nhỏ của lượng phóng xạ này thoát ra khỏi các rào chắn và tung ra môi trường khi vùng hoạt bị tan chảy cũng đã lớn hơn gấp bội so với lượng phóng xạ do quả bom thả xuống Hiroshima. Không ít nhà khoa học cảnh báo nguy cơ này, giới truyền thông và dân chúng luôn lên tiếng, song nói chung không khí lạc quan và chủ quan vẫn bao trùm, nhất là trong giới kinh doanh ĐHN, ít ra cho đến khi chứng kiến tai nạn lớn đầu tiên xảy ra ở Three Mile Island (TMI-2), Mỹ, ngày 28 tháng 3 năm 1979.

Ngay trước khi xảy ra tai nạn TMI-2, an toàn ĐHN dựa trên nguyên lý phòng vệ theo chiều sâu và các rào chắn kế tiếp nhót giữ phóng xạ bên trong chúng đã được "bảo đảm" bằng cả hai phương pháp luận tất định (deterministic) và xác suất

(probabilistic). Phương pháp phân tích rủi ro bằng xác suất (Probability Risk Assessment – PRA) được phát triển lần đầu cho lò phản ứng năng lượng với đỉnh điểm là báo cáo WASH-1400 của Ủy ban Pháp quy Hạt nhân Hoa Kỳ (NRC) công bố tháng 10 năm 1975 do N. Rasmussen, giáo sư Đại học Massachusetts, chủ trì. Theo báo cáo này, sự cố mất nước tải nhiệt làm tan chảy hoàn toàn vùng hoạt (LOCA) ở các lò nước nén (PWR) và nước sôi (BWR) của Mỹ có thể xảy ra với xác suất 1 lần trong 17 000 lò – năm. Xác suất xảy ra chết người do chất phóng xạ thoát ra ngoài môi trường khi vùng hoạt lò bị tan chảy còn thấp hơn rất nhiều, khoảng 1 lần trong hàng triệu lò – năm, và hàng vạn lần thấp hơn các loại tai nạn dân sự khác.

Tuy bị không ít chuyên gia chống đối, nhưng nói chung, báo cáo WASH-1400 đã làm cho nhiều người an lòng về độ an toàn của ĐHN. Thậm chí, những nhà khoa học hạt nhân có thẩm quyền như H. Bethe, nhân vật khá chủ chốt trong chương trình chế tạo bom nguyên tử Mỹ, giải Nobel 1967 về chu trình proton – proton và chu trình carbon trong tiến hóa các thiên thể (xem chương 2), đã viết trên tờ Scientific American tháng giêng 1976: "... điện hạt nhân trên toàn thế giới đã đạt đến con số gần 2000 lò – năm, nếu kể cả các lò dùng trong quân sự. Nếu dự báo của nhóm Rasmussen sai, thậm chí đến 20 lần, nghĩa là xác suất tan chảy vùng hoạt rút xuống còn 1 lần trong 850 lò – năm, thì chúng ta đã phải chứng kiến sự cố này rồi...".

Thực tế đã phản bác nhận định của H. Bethe: tai nạn tan chảy vùng hoạt TMI-2 đã xảy ra năm 1979, chỉ vài năm sau khi công bố báo cáo WASH-1400. Tám năm sau, tai nạn nghiêm trọng hơn, trong đó có hàng chục người thiệt mạng, đã xảy ra ở Chernobyl, và mặc dù con người đã cảnh giác hơn rất nhiều, một tai nạn lớn nữa lại xảy ra với ba lò phản ứng ở Fukushima năm 2011. Đến lúc này, với tổng số 14 000 lò – năm, điện hạt nhân trên toàn thế giới đã ghi nhận 5 lò phản ứng bị tai nạn tan chảy vùng hoạt, trong đó có trường hợp gây thiệt hại nhân mạng.

Phương pháp phân tích rủi ro ĐHN có những giá trị không thể chối cãi, tuy nhiên kết quả định lượng thể hiện ở xác suất tan

chạy vùng hoạt còn quá thấp so với thực tế. Có lẽ đánh giá nhân tố con người, tuy được xem xét phần nào trong PRA, vẫn chưa đúng mức. Tệ hại hơn, những phân tích PRA làm cho một số người mất cảnh giác do quá tin rằng tai nạn ĐHN sẽ rất khó xảy ra, nhất là khi công nghệ lò phản ứng đã được cải tiến rất nhiều với các lò phản ứng thế hệ mới. Một tổng kết có giá trị được đăng trên The Economist nhân tròn một năm sau tai nạn Fukushima đã bác bỏ nhận định này: "an toàn ĐHN không hề được cài sẵn trong công nghệ mà chỉ thể hiện thành tích của đội ngũ".

## 4.1 LÒ PHẢN ỨNG HẠT NHÂN VÀ MỘT SỐ ĐẶC ĐIỂM ĐỘNG HỌC

Đề khai thác được nguồn năng lượng phân hạch vĩ đại cần phải tạo ra điều kiện cho phản ứng dây chuyền có thể điều khiển được. Bài toán này đã được các nhà vật lý hạt nhân giải quyết rất gọn và đẹp ngay từ khi xây dựng lò phản ứng hạt nhân đầu tiên trên thế giới, và lời giải vẫn tồn tại cho đến ngày nay. Trước hết, đó là công thức bốn thừa số dùng để tính hệ số nhân neutron và độ phản ứng.

### 4.1.1 Hệ số nhân neutron và công thức bốn thừa số

Lò phản ứng có ba thành phần chính là nhiên liệu chứa  $U^{235}$ , chất làm chậm neutron, và chất tải nhiệt. Chúng thường được sắp xếp thành ô mạng, ở nút ô là các thanh nhiên liệu, giữa các thanh này có chất làm chậm neutron và chất tải nhiệt.

Lò phản ứng hạt nhân được chia thành hai loại khác nhau về công dụng, lò nghiên cứu có công suất (nhiệt) bé hơn 100 MW dùng để nghiên cứu khoa học, ứng dụng chùm neutron, sản xuất đồng vị phóng xạ và thử vật liệu. Loại thứ hai thường gọi là lò năng lượng dùng để sản xuất điện, thường có công suất nhiệt vào khoảng 3 000 MWt và công suất điện 1 000 MWe. Phần lớn các lò năng lượng dùng nước thường vừa làm chậm neutron vừa để tải nhiệt.

Khi một neutron nhiệt làm cho hạt nhân  $U^{235}$  phân hạch sẽ có 2,47 neutron nhanh phát ra. Chúng phải được làm chậm để trở thành neutron nhiệt và phân chia hạt nhân  $U^{235}$  tiếp theo, cứ thế tạo nên phản ứng dây chuyền. Trong quá trình làm chậm, một số neutron sẽ mất đi do bị hấp thụ bởi chính các hạt nhân làm chậm, bởi các thanh điều khiển và bởi các độc tố do phản ứng phân hạch tạo ra, hoặc bị rò ra khỏi vùng hoạt. Một số khác, tuy không mất đi, nhưng sau khi biến thành neutron nhiệt lại không tương tác với nhiên liệu mà chỉ gây phản ứng trên chất làm chậm, nên cũng không được sử dụng để gây phân hạch tiếp theo. Lò phản ứng phải được thiết kế sao cho số neutron nhiệt còn lại sau mỗi thế hệ phải bằng 1, hoặc lớn hơn chút ít, có thể, phản ứng dây chuyền mới xảy ra và duy trì được. Số neutron nhiệt còn lại sau mỗi thế hệ gọi là hệ số nhân neutron hiệu dụng  $k_{eff}$ , được tính theo công thức

$$k_{eff} = \delta k_{\infty} \quad (4.1)$$

trong đó,  $k_{\infty}$  là hệ số nhân neutron trong môi trường có kích thước rất lớn so với quãng đường vận chuyển trung bình của neutron trong lò, và  $\delta$  là một hệ số hiệu chỉnh mất mát neutron do bị rò ra khỏi mặt ngoài vùng hoạt, kích thước vùng hoạt càng lớn,  $\delta$  càng gần với 1. Hệ số  $k_{\infty}$  được tính theo công thức bốn thừa số, trong đó xem xét mọi quá trình có thể gây mất mát neutron trước khi nó gây phân hạch một hạt nhân  $U^{235}$  tiếp theo:

$$k_{\infty} = \eta p f \epsilon \quad (4.2)$$

ở đây:

$\eta$  gọi là thừa số tái sản xuất được tính bằng số neutron nhanh phát ra khi có một neutron nhiệt bị hấp thụ trong nhiên liệu. Vì trong nhiên liệu neutron nhiệt có thể bị  $U^{238}$  hấp thụ mà không gây phân hạch nên  $\eta$  vào khoảng 2,07, bé hơn số neutron trung bình (2,47) phát ra trong mỗi động tác phân hạch trên  $U^{235}$ ;

$p$  là thừa số tránh hấp thụ cộng hưởng nói lên phần neutron tránh được vùng hấp thụ cộng hưởng của đồng vị  $U^{238}$ , từ 6 eV đến 1 000 keV (hình 1.14), trong quá trình làm chậm để trở thành neutron nhiệt,  $p \approx 0,75 - 0,80$ ;

$f$  là thừa số sử dụng neutron nhiệt điển tả phần neutron nhiệt bị hấp thụ bởi nhiên liệu so với toàn bộ số neutron bị hấp thụ trong lò,  $f \approx 0,8$  ở các lò nước nén PWR;

$\varepsilon$  là thừa số hiệu chỉnh phần đóng góp vào phân hạch của neutron nhanh,  $\varepsilon \approx 1,07$ .

Bằng cách tăng khối lượng nhiên liệu (tăng kích thước vùng hoạt) và bố trí hợp lý nhiên liệu trong môi trường làm chậm, người ta có thể làm cho lò phản ứng có hệ số nhân neutron hiệu dụng  $k_{eff} = 1$ , hoặc lớn hơn đôi chút, khi ấy phản ứng phân hạch dây chuyền sẽ xảy ra. Khi  $k_{eff} = 1$  lò phản ứng đạt đến trạng thái gọi là tới hạn.

Trên thực tế, khi nạp nhiên liệu vào lò, trước hết người ta phải đạt đến trạng thái tới hạn, sau đó hệ số  $k_{eff}$  sẽ tăng lên khi cho thêm nhiên liệu vào để lò có thể hoạt động trong một thời gian dài mà không cần bổ sung nhiên liệu. Khi nạp đủ nhiên liệu cho một chu kỳ hoạt động của lò (khoảng trên một năm ở các lò nước thường), hệ số nhân neutron và độ phản ứng có giá trị lớn nhất. Trong quá trình nạp nhiên liệu, để giữ cho  $k_{eff}$  không quá 1, người ta phải đưa vào lò các thanh hấp thụ neutron làm bằng boron carbide ( $B_4C$ ), hoặc đưa dung dịch chứa boric acid vào nước tải nhiệt.

Khi lò hoạt động,  $k_{eff}$  luôn dao động rất bé quanh 1. Khi dập lò, các thanh hấp thụ sẽ được nhả chìm trong vùng hoạt khiến hệ số nhân neutron giảm nhanh xuống dưới 1, gọi là trạng thái dưới tới hạn. Ngược lại, khi hệ số nhân neutron  $k_{eff} > 1$ , lò ở trạng thái quá tới hạn, các cơ chế điều khiển sẽ tự động đưa lò trở lại trạng thái tới hạn, nếu không, phản ứng dây chuyền sẽ có thể phát triển với tốc độ rất lớn không kiểm soát được, như sẽ thấy ở phần sau.

### 4.1.2 Độ phản ứng

Để đặc trưng cho độ lệch khỏi trạng thái tới hạn người ta thường dùng khái niệm độ phản ứng  $\rho$  xác định theo công thức sau:

$$\rho = \frac{k_{\text{eff}} - 1}{k_{\text{eff}}} \quad (4.3)$$

Khi lò ở trạng thái tới hạn,  $\rho = 0$ . Ở trạng thái dưới tới hạn,  $\rho < 0$ , và ở trạng thái quá tới hạn,  $\rho > 0$ . Trong thực tế, lò phản ứng hoạt động ở công suất không đổi, khi ấy  $\rho = 0$ . Nhưng có khá nhiều yếu tố làm cho độ phản ứng biến đổi thông qua các thừa số trong công thức bốn thừa số (4.2), như lượng nhiên liệu giảm dần do bị cháy, vị trí các thanh điều khiển thay đổi, nhiên liệu mới được sinh ra, chủ yếu là các đồng vị Pu, lượng độc tố do các mảnh vỡ phân hạch biến đổi..., khi ấy để duy trì công suất ổn định, người ta có thể đưa thêm vào hoặc giảm bớt hệ số độ phản ứng bằng cách tác động lên hệ điều khiển lò.

Độ phản ứng là đại lượng không thứ nguyên. Theo công thức 4.3, độ phản ứng được đo bằng đơn vị  $\Delta k/k$ , hoặc phần trăm  $\Delta k/k$ . Nhiều khi người ta còn dùng đơn vị đôla và cent (xem 4.1.4).

### 4.1.3 Vòng đời trung bình của neutron và động học lò phản ứng

Vòng đời neutron trong lò phản ứng là khoảng thời gian trung bình từ khi neutron được sinh ra do phân hạch cho đến khi chính nó gây phân hạch ở một hạt nhân  $U^{235}$  tiếp theo sau khi được làm chậm và tán xạ trong vùng hoạt. Quá trình làm chậm từ neutron nhanh xuống neutron nhiệt thường rất ngắn so với quá trình neutron nhiệt khuếch tán trong môi trường làm chậm. Khoảng thời gian khuếch tán trung bình của neutron nhiệt phụ thuộc rất mạnh vào chất liệu làm chậm, từ  $2,1 \cdot 10^{-4}$  s đối với nước thường  $H_2O$ , tăng lên  $4,3 \cdot 10^{-2}$  s với nước nặng  $D_2O$  và khá lớn, 0,017 s, với graphit (C). Vì trong vùng hoạt còn có nhiên liệu hấp thụ mạnh neutron nhiệt nên khoảng thời gian khuếch tán trung bình sẽ bé hơn các giá trị vừa nêu bởi một hệ số  $(1 - f)$ .

Giả sử mật độ neutron bên trong vùng hoạt là  $n$ , sau một vòng đời  $l_p$ , mật độ neutron sẽ tăng lên  $kn$ , và tốc độ gia tăng mật độ neutron sẽ là

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{kn(t) - n(t)}{l_p} = \frac{n(t)(k - 1)}{l_p} = \frac{\rho}{l_p} n(t) \quad (4.4)$$

hay

$$n(t) = n(0) \exp(t/T) \quad (4.5)$$

với

$$T = \frac{l_p}{\rho} \quad (4.6)$$

$T$  được gọi là chu kỳ lò phản ứng khi chưa tính đến đóng góp của neutron trễ (sẽ bàn ở phần sau). Sau khoảng thời gian một chu kỳ  $T$ , mật độ neutron, hay công suất lò, sẽ tăng lên  $e = 2,718$  lần. Chu kỳ  $T$  giảm theo độ phản ứng  $\rho$ , nghĩa là chỉ cần lò lệch khỏi trạng thái tới hạn đôi chút, chu kỳ  $T$  có thể rất ngắn và lò không thể điều khiển được vì công suất tăng quá nhanh và quán tính của các thanh điều khiển không đáp ứng kịp.

Chẳng hạn, vì một lý do nào đó  $k$  tăng từ 1 (lò ở trạng thái tới hạn) lên 1,001 ( $\rho = 0,001$ ). Với  $l_p = 10^{-4}$  s,  $T$  sẽ bằng 0,1 s, nghĩa là mật độ neutron hay công suất sẽ tăng theo công thức

$$n(t) = n(0) \exp\left(\frac{t}{0,1}\right)$$

nên chỉ sau 1 s, công suất lò sẽ tăng vọt lên  $\exp(10) = 22\,000$  lần!

#### 4.1.4 Vai trò của neutron trễ

Rất may là sự tồn tại các neutron trễ ngăn cản kịch bản trên xảy ra. Neutron trễ do một số sản phẩm phân hạch phát ra theo quy luật phân rã phóng xạ (xem 1.3.6). Neutron trễ có năng lượng ban đầu hàng trăm keV, chúng cũng được làm chậm trở thành neutron nhiệt, và gây ra phân hạch trên hạt nhân  $U^{235}$ , do đó sẽ đóng góp vào lượng neutron gây ra phản ứng dây chuyền.

Trong tính toán lò phản ứng, neutron trễ thường được phân thành sáu nhóm với các đặc trưng như trên bảng 4.1. Phần đóng góp từ mỗi nhóm được ký hiệu là  $\beta_i$ , và đóng góp tổng  $\sum_i \beta_i = \beta = 0,0065$  trong trường hợp phân hạch trên  $U^{235}$ . Tuy phần đóng góp về số lượng neutron không lớn, nhưng vì chúng được phát ra chậm hơn rất nhiều sau mỗi động tác phân hạch do các đồng vị phát neutron trễ có chu kỳ bán rã đến hàng chục giây trở lên (bảng 4.1), nên chúng sẽ đóng góp phần chủ yếu giúp kéo dài vòng đời trung bình của neutron trong lò.

Bảng 4.1. Đặc trưng các nhóm neutron trễ khi  $U^{235}$  phân hạch do neutron nhiệt.

| Nhóm | $T_{1/2}, s$ | Hằng số<br>phân rã, $s^{-1}$ | $E_n, keV$ | số neutron/phân<br>hạch | phần đóng góp $\beta_i$ |
|------|--------------|------------------------------|------------|-------------------------|-------------------------|
| 1    | 55,72        | 0,012 4                      | 250        | 0,000 52                | 0,000 215               |
| 2    | 22,72        | 0,030 5                      | 560        | 0,003 46                | 0,001 424               |
| 3    | 6,22         | 0,111                        | 405        | 0,003 10                | 0,001 274               |
| 4    | 2,30         | 0,301                        | 450        | 0,006 24                | 0,002 568               |
| 5    | 0,61         | 1,14                         | –          | 0,001 82                | 0,000 748               |
| 6    | 0,23         | 3,01                         | –          | 0,000 66                | 0,000 273               |
| Tổng |              |                              |            | 0,015 8                 | 0,006 5                 |

Như vậy, cần phân biệt hai loại neutron được sinh ra trong lò phản ứng: tức thời và trễ. Vòng đời  $l_p$  tính trên đây là cho neutron tức thời (p:prompt). Với sự có mặt của neutron trễ, vòng đời neutron trong lò phản ứng sẽ lớn hơn nhiều, nhờ đó hệ thống điều khiển tự động mới theo kịp các quá trình chuyển tiếp và làm cho lò có thể điều khiển được. Nhưng điều này chỉ đúng khi  $\rho < \beta$ . Thật vậy, vì phần neutron tức thời trong lò là  $(1 - \beta)$  nên lò sẽ đạt đến trạng thái tới hạn với riêng neutron tức thời khi:

$$(1 - \beta)k = 1,$$

(4.7)

hay:

$$\rho = \beta$$

Trạng thái này của lò được gọi là trạng thái tới hạn tức thời (prompt critical), và khi  $\rho > \beta$ , vòng đời neutron rất ngắn khiến công suất lò có thể tăng vọt trong thời gian rất ngắn và lò không điều khiển được, như đã nói ở mục trước. Do  $\beta$  có ý nghĩa quan trọng như thế nên nó được dùng làm đơn vị đo độ phản ứng, gọi là đôla,  $\$$ . Cho nên khi lò đang hoạt động cần tránh đưa vào một hệ số độ phản ứng lớn hơn  $\beta$ , hay lớn hơn  $1\$$  (trừ các lò nghiên cứu làm việc theo chế độ xung, ở đó người ta đưa vào một độ phản ứng  $\rho > \beta$  làm cho thông lượng dòng neutron tăng lên rất cao trong thời gian rất ngắn rồi hạ xuống ngay).

Do có đóng góp của neutron trễ, phương trình động học lò phản ứng sẽ phức tạp hơn công thức (4.4) nhiều và lời giải (xem các sách tham khảo về lò phản ứng) tương đối phức tạp. Ở đây ta chỉ xét những quá trình chuyển tiếp chậm khi lò hoạt động tương đối ổn định, phương trình động học lò lúc này sẽ có dạng đơn giản gần giống như (4.4):

$$\frac{dn}{dt} \approx \frac{\rho}{\Lambda_{\text{eff}}} n \quad (4.8)$$

trong đó  $\Lambda_{\text{eff}}$  là thông số đặc trưng cho vòng đời neutron có kể đến phần đóng góp của neutron trễ:

$$\Lambda_{\text{eff}} = \Lambda + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\lambda_i} \gg \Lambda \quad (4.9)$$

với

$$\Lambda = \frac{l_p}{k} \approx 10^{-4} \text{ s}$$

$\Lambda_{\text{eff}}$  tính theo công thức (4.8) dựa trên số liệu neutron trễ ở bảng 4.1 vào khoảng 0,1 s. Lấy lại thí dụ ở mục trước với  $k$  tăng từ 1 lên 1.001 ( $\rho = 0,001$ ) sẽ thấy chu kỳ lò phản ứng vào khoảng 100 s, nghĩa là lò hoàn toàn có thể điều khiển được.

Như vậy, với vai trò của neutron được làm chậm cùng với sự điều tiết của neutron trễ, phản ứng phân hạch dây chuyền trong lò phản ứng có thể điều khiển được mà không thể phát nổ lớn trong thời gian cỡ phần triệu giây như trong bom nguyên tử, nơi mà neutron phân hạch tức thời không được làm chậm và do không có neutron trễ nên vòng đời neutron rất ngắn. Tuy nhiên, lò phản ứng có thể bị nổ trong các tai nạn điện hạt nhân do khí hydro hoặc do nổ hơi nước, những vụ nổ này có thể phá vỡ nhà lò và tung chất phóng xạ ra môi trường.

## 4.2 CƠ CHẾ PHẢN HỒI TRONG LÒ PHẢN ỨNG

### 4.2.1 Độ phản ứng thay đổi theo nhiệt độ

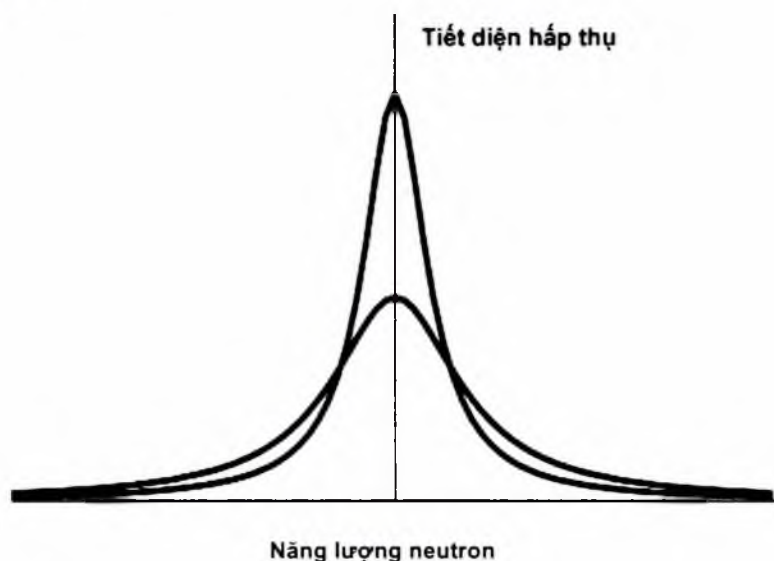
Giả thử, vì một lý do nào đó, nhiệt độ chất tải nhiệt tăng lên khi lò phản ứng đang hoạt động. Lúc ấy các thông số vật lý lò sẽ thay đổi kéo theo sự thay đổi hệ số nhân neutron hiệu dụng và độ phản ứng. Nếu  $k_{\text{eff}}$  và  $\rho$  tăng lên, phản ứng dây chuyền sẽ mạnh hơn làm cho nhiệt độ tiếp tục tăng. Trong trường hợp này ta có cơ chế phản hồi dương và quá trình có thể tiếp tục phát triển thành một kịch bản không mong muốn. Ngược lại, nếu lúc ấy  $k_{\text{eff}}$  và  $\rho$  giảm, ta sẽ có cơ chế phản hồi âm, tốc độ phản ứng dây chuyền sẽ giảm làm cho nhiệt độ chất tải nhiệt giảm, và cơ chế phản hồi âm này có xu hướng đưa lò trở lại trạng thái ban đầu. Đại lượng  $\frac{\delta \rho}{\delta T}$  được gọi là hệ số nhiệt độ của độ phản ứng, nó có giá trị

dương trong trường hợp thứ nhất, và âm trong trường hợp thứ hai. Lò phản ứng sẽ được ổn định và an toàn nếu có hệ số nhiệt độ âm. Đương nhiên, ở đây chỉ xét những biến đổi nhỏ, nếu nhiệt độ đột ngột tăng lên rất mạnh trong những trường hợp xảy ra sự cố, cơ chế phản hồi âm vẫn không thể đưa lò trở lại trạng thái ban đầu.

Tại sao khi nhiệt độ chất tải nhiệt thay đổi sẽ làm cho độ phản ứng thay đổi? Để dễ lập luận ta hãy xét điều gì sẽ xảy ra khi nhiệt độ chất tải nhiệt tăng.

Trước hết, năng lượng chuyển động nhiệt trung bình của neutron tăng khiến tiết diện phản ứng neutron nhiệt trên các hạt nhân trong chất làm chậm và chất tải nhiệt giảm đi theo quy luật  $1/v$  (xem 1.4.3). Yếu tố này có thể làm cho neutron được sử dụng nhiều hơn trong nhiên liệu, thừa số  $f$  trong (4.1) sẽ tăng kéo theo tốc độ phản ứng dây chuyền tăng.

Thứ hai, chuyển động nhiệt của các hạt nhân urani trong nhiên liệu sẽ mạnh lên làm cho các vạch hấp thụ cộng hưởng  $U^{238}$  nở rộng hơn theo hiệu ứng Doppler, khi ấy hấp thụ cộng hưởng neutron trong  $U^{238}$  sẽ mạnh hơn và thừa số tránh hấp thụ cộng hưởng  $p$  trong hình 4.1 sẽ giảm, góp phần kìm hãm tốc độ phản ứng dây chuyền.



Hình 4.1. Minh họa hiện tượng nở rộng vạch cộng hưởng ở hạt nhân  $U^{238}$  do hiệu ứng Doppler.

Hiện tượng nở rộng vạch cộng hưởng theo hiệu ứng Doppler có thể giải thích dựa trên hình minh họa 4.1. Các vạch cộng hưởng chính ở đồng vị  $U^{238}$  có năng lượng trên 6 eV và độ rộng vào khoảng chục meV. Dao động nhiệt của nguyên tử ở nút mạng tinh thể có động năng trung bình  $kT = 25$  meV ở nhiệt độ 300 K, tương đương với độ rộng của các vạch cộng hưởng. Do đó, khi nhiệt độ nhiên liệu tăng lên, dao động nhiệt sẽ mạnh lên, hiệu ứng Doppler sẽ làm cho vạch cộng hưởng rộng ra

và nhiều neutron có năng lượng xa đỉnh cộng hưởng được hấp thụ dễ dàng hơn.

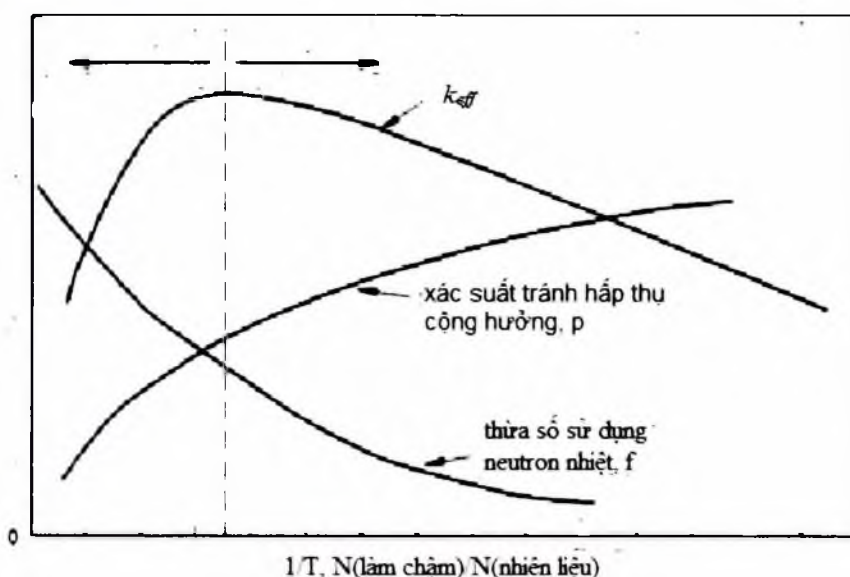
Thứ ba, mật độ chất làm chậm neutron và chất tải nhiệt sẽ giảm do vật liệu dẫn nở cũng góp phần làm cho thừa số  $f$  tăng và thừa số  $p$  giảm. Thật vậy, mật độ chất làm chậm giảm do nhiệt độ chất làm chậm tăng sẽ làm cho nhiều neutron rơi vào vùng cộng hưởng hơn trong quá trình làm chậm và neutron bị hấp thụ nhiều hơn trong nhiên liệu, thừa số  $p$  sẽ giảm. Trong khi đó, vì chất làm chậm bị loãng đi nên neutron có xu hướng được sử dụng nhiều hơn trong nhiên liệu, làm tăng thừa số  $f$ .

Như vậy,  $f$  có xu hướng tăng và  $p$  có xu hướng giảm khi nhiệt độ chất làm chậm tăng và mật độ chất làm chậm giảm. Điều này được minh họa trên hình 4.2, ở đây trên trục hoành đồng thời có hai thang tương đương với nhau, đó là nghịch đảo nhiệt độ chất làm chậm  $1/T$  hoặc tỷ số mật độ chất làm chậm trên mật độ nhiên liệu  $N(\text{làm chậm})/N(\text{nhiên liệu})$ . Trên trục tung đồng thời có ba thang: hệ số nhân neutron hiệu dụng  $k_{\text{eff}}$ , thừa số tránh hấp thụ cộng hưởng  $p$ , và thừa số sử dụng neutron nhiệt  $f$ . Hình 4.2 chỉ mang tính minh họa, thang trên hai trục không có giá trị tuyệt đối. Phối hợp hai xu hướng nói trên của hai thừa số  $f$  và  $p$  sẽ làm cho hệ số nhân neutron hiệu dụng  $k_{\text{eff}}$  có một cực trị, như minh họa trên hình 4.2.

Do diễn biến hai thừa số  $f$  và  $p$  trái ngược nhau nên hệ số nhân neutron hiệu dụng  $k_{\text{eff}}$  diễn biến theo nhiệt độ khác nhau trong hai miền nằm hai bên cực trị trên hình 4.2. Ở miền bên phải cực trị, mật độ chất làm chậm trên mật độ nhiên liệu cao,  $k_{\text{eff}}$  tăng khi nhiệt độ tăng, độ phản ứng có hệ số nhiệt độ dương. Ở miền này, lò phản ứng không ổn định, nếu nhiệt độ và công suất gia tăng, lò sẽ có thêm độ phản ứng dương khiến công suất tiếp tục tăng. Nhưng ở miền bên trái cực trị, xu hướng này sẽ đảo ngược, hệ số nhiệt độ của độ phản ứng âm, khi nhiệt độ chất làm chậm tăng độ phản ứng sẽ giảm, lò phản ứng sẽ ổn định nhờ có khả năng tự điều chỉnh. Để dễ phân biệt, người ta gọi phần bên trái cực trị là miền neutron trong lò được làm chậm kém (undermoderated). Ngược lại, ở phần bên phải, mật độ chất làm chậm dồi dào hơn, neutron được

làm chậm quá nhiều (overmoderated). Để tránh những tai nạn do độ phản ứng, các thông số lò phải được chọn sao cho lò hoạt động ở miền bên trái. Vấn đề này sẽ được xem xét trong phần sau liên quan đến tai nạn điện hạt nhân do độ phản ứng (4.4.1).

Trên đây ta chỉ đề cập đến nhiệt độ và nồng độ chất làm chậm neutron. Tuy nhiên, vì thang trục hoành có cả tỷ số  $N(\text{làm chậm})/N(\text{nhiên liệu})$ , nên giản đồ trên hình 4.2 cũng bao gồm cả nhiệt độ và mật độ nhiên liệu. Khi mật độ nhiên liệu giảm và nhiệt độ nhiên liệu tăng do tốc độ phản ứng dây chuyền mạnh lên, hiện tượng nở rộng các vạch công hưởng theo hiệu ứng Doppler sẽ làm cho  $p$  giảm, neutron bị hấp thụ nhiều hơn làm giảm tốc độ phản ứng dây chuyền.



Hình 4.2. Diễn biến các hệ số  $k_{\text{eff}}$ ,  $p$ , và  $f$  khi nhiệt độ và mật độ chất làm chậm neutron thay đổi.

Song cần chú ý có sự khác nhau giữa sự thay đổi nhiệt độ nhiên liệu và nhiệt độ chất làm chậm. Nhiệt độ chất làm chậm thay đổi do lưu lượng và áp suất chất tải nhiệt thay đổi, còn nhiệt độ nhiên liệu thay đổi do tốc độ phản ứng dây chuyền thay đổi. Do vậy, quá trình phản hồi khi nhiệt độ nhiên liệu tăng xảy ra nhanh hơn so với khi nhiệt độ chất làm chậm tăng.

### 4.2.2 Hệ số rỗng của độ phản ứng

Ở các lò được tải nhiệt bằng nước, sự thay đổi lượng bọt nước sẽ ảnh hưởng đến độ phản ứng. Trong các lò với nước tải nhiệt dưới áp suất, lượng bọt nước có thể tăng lên khi nhiệt độ chất tải nhiệt tăng hoặc áp suất giảm. Khi nước làm chậm chứa nhiều bọt hơn, neutron sẽ ít bị nước hấp thụ hơn làm cho độ phản ứng thay đổi. Mức độ ảnh hưởng được tính theo hệ số rỗng bằng tỷ số biến đổi độ phản ứng trên biến đổi thể tích bọt.

Hệ số rỗng có thể dương và âm tùy theo loại lò. Ở các lò tải nhiệt bằng nước thường dưới áp suất, khi nhiệt độ tăng các bọt nước có thể tăng lên, một phần chất tải nhiệt bị đẩy ra khỏi vùng hoạt, khiến tỷ số  $N(\text{làm chậm})/N(\text{nhiên liệu})$ , giảm. Nếu lò hoạt động ở chế độ thuộc phần bên trái hình 4.2 độ phản ứng sẽ giảm, ta có hệ số rỗng âm. Ngược lại, cũng có trường hợp trạng thái lò rơi vào phần bên phải hình 4.2, khi ấy hệ số rỗng sẽ dương. Như ở lò RBMK, hệ số rỗng dương lẫn át hệ số nhiệt độ âm làm cho tốc độ phản ứng dây chuyền tăng vọt, không điều khiển được và tai nạn độ phản ứng RIA đã xảy ra ở nhà máy Chernobyl (xem chương 8).

## 4.3 ĐỘC TÓ TRONG Lò PHẢN ỨNG

### 4.3.1 Vật liệu hấp thụ mạnh neutron dùng trong điều khiển lò

Trong số các vật liệu này trước hết phải kể đến các thanh hấp thụ và điều khiển có tiết diện hấp thụ neutron rất cao được dùng để bù trừ lại độ phản ứng dư do lượng nhiên liệu dự trữ nạp vào vùng hoạt lúc lắp lò. Khi lò hoạt động, lượng nhiên liệu dự trữ này cạn dần, lượng độc tố trong các thanh điều khiển cũng bớt đi, ngoài ra các thanh điều khiển cũng được rút ra dần khỏi vùng hoạt để bù trừ cho lượng nhiên liệu bị suy giảm. Tuy rất cần thiết, các thanh điều khiển có nhược điểm choán nhiều chỗ trong vùng hoạt và làm cho trường neutron không được phân bố đều, bị sụt giảm mạnh ở vùng gần thanh điều khiển.

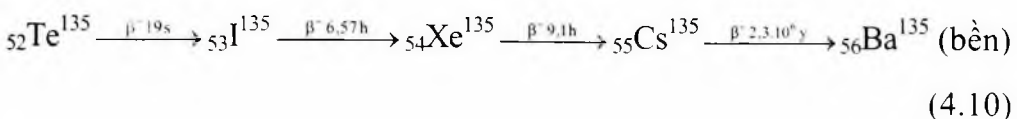
Để góp phần khắc phục nhược điểm này, người ta thường bổ sung các độc tố khác như acid boric hòa tan vào nước tải nhiệt. Bằng cách thay đổi nồng độ độc tố hòa tan này người ta có thể điều chỉnh độ phản ứng của lò. Thật vậy, khi nồng độ boron hòa tan tăng lên, chất làm chậm và tải nhiệt sẽ hấp thụ nhiều neutron hơn làm cho thừa số sử dụng neutron nhiệt  $k$  giảm đi. Ngược lại, giảm nồng độ boron hòa tan trong nước tải nhiệt sẽ có tác dụng giống như đưa thêm độ phản ứng dương vào lò. Tuy nhiên cũng cần lưu ý rằng sử dụng boron hòa tan trong nước tải nhiệt sẽ kèm theo nguy cơ tạo ra hệ số nhiệt độ dương cho độ phản ứng vì khi nhiệt độ nước tăng lên, một lượng boron hòa tan sẽ bị đẩy ra khỏi vùng hoạt làm cho độ phản ứng tăng lên.

#### 4.3.2 Độc tố cháy được

Độ phản ứng dư khi lắp lò sẽ giảm dần do nhiên liệu bị cháy theo thời gian. Để góp phần cân bằng quá trình suy giảm này, người ta đưa vào vùng hoạt các độc tố cháy được, chúng là những nguyên tố/đồng vị có tiết diện phản ứng  $(n, \gamma)$  rất lớn như gadolini. Do cháy được nên độ phản ứng âm do chúng đưa vào sẽ giảm dần theo thời gian, cân bằng lại quá trình giảm độ phản ứng dương do nhiên liệu bị cháy. Các độc tố cháy được này được cho chung vào viên nhiên liệu hoặc để riêng, nên chúng rất dễ bố trí, nhờ đó góp phần làm đều trường neutron trong vùng hoạt, không để xảy ra những chỗ có công suất cục bộ quá cao hoặc quá thấp.

#### 4.3.3 Nhiễm độc xenon

Trong số các mảnh vỡ phân hạch có đồng vị  $^{135}_{54}\text{Xe}$  hấp thụ neutron nhiệt rất mạnh (bảng 1.2) có thể trở thành độc tố gây nhiễm độc lò phản ứng.  $^{135}_{54}\text{Xe}$  được tạo ra trực tiếp như mảnh vỡ phân hạch hoặc qua trung gian một mảnh vỡ khác phân rã  $\beta^-$  theo sơ đồ sau:



Chỉ có 5% lượng đồng vị  ${}_{54}\text{Xe}^{135}$  sinh ra trực tiếp từ phân hạch, 95% còn lại do phân rã  $\beta^-$  của đồng vị  ${}_{53}\text{I}^{135}$ . Sau khi được tạo ra,  ${}_{54}\text{Xe}^{135}$  phân rã  $\beta^-$  thành  ${}_{55}\text{Cs}^{135}$  hoặc hấp thụ neutron nhiệt phát ra tia  $\gamma$  theo phản ứng chiếm bức xạ ( $n, \gamma$ ):



Phản ứng này có tiết diện rất lớn,  $\sigma = 3\,500\,000$  barns, nên  ${}_{54}\text{Xe}^{135}$  là một độc tố trong lò và làm giảm độ phản ứng của lò. Lượng độc tố này bị mất đi do phân rã phóng xạ với chu kỳ 9,1 h và do hấp thụ neutron theo phản ứng (4.11), nhưng lại luôn được tích lũy chủ yếu do phân rã phóng xạ của  ${}_{53}\text{I}^{135}$  với chu kỳ 6,57 h. Nồng độ  ${}_{54}\text{Xe}^{135}$  đạt đến giá trị ổn định khi lượng sinh ra cân bằng với lượng mất đi. Tính toán phương trình động học theo sơ đồ (4.10) sẽ cho ra công thức sau đây đối với nồng độ độc tố  ${}_{54}\text{Xe}^{135}$  cân bằng trong lò:

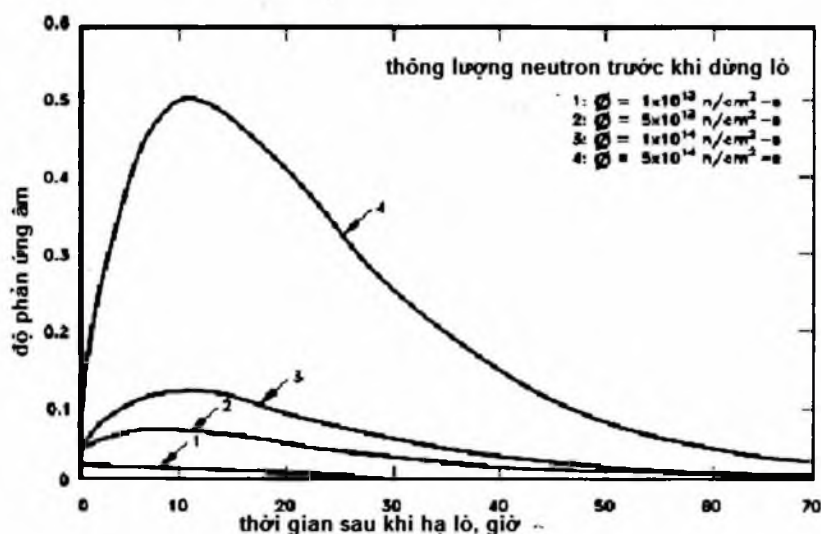
$$N_{\text{Xe(cân bằng)}} = \frac{(\alpha_{\text{Xe}} + \alpha_{\text{I}}) \sum_f \Phi}{\lambda_{\text{Xe}} + \sigma_{\text{Xe}} \Phi} \quad (4.12)$$

trong đó  $\alpha_{\text{Xe}}$  và  $\alpha_{\text{I}}$  là tỷ suất phân hạch của hai đồng vị  $\text{Xe}^{135}$  và  $\text{I}^{135}$ ,  $\lambda_{\text{Xe}}$  và  $\sigma_{\text{Xe}}$  là hằng số phân rã và tiết diện chiếm neutron của đồng vị  $\text{Xe}^{135}$ ,  $\Sigma_f$  là tiết diện phân hạch vĩ mô bằng tiết diện phản ứng phân hạch (vĩ mô) nhân với nồng độ hạt nhân phân hạch, và  $\Phi$  là thông lượng neutron trong lò. Điều đáng chú ý trong công thức trên là nồng độ độc tố  ${}_{54}\text{Xe}^{135}$  cân bằng tăng lên theo thông lượng neutron trong lò, hay công suất lò, nhưng không tăng tuyến tính. Vì nồng độ  ${}_{54}\text{Xe}^{135}$  tạo nên độ phản ứng âm nên khi tăng công suất lò lên giá trị danh định người ta phải lưu ý đến quy luật diễn biến này.

Sản phẩm phân hạch  ${}_{54}\text{Xe}^{135}$  cũng đóng vai trò đặc biệt quan trọng sau khi lò dừng. Lúc này  ${}_{54}\text{Xe}^{135}$  không trực tiếp sinh ra từ phân hạch mà cũng không bị mất đi do hấp thụ neutron nhiệt. Nó chỉ được sinh ra từ  ${}_{53}\text{I}^{135}$  và mất đi do tự nó phân rã phóng xạ. Phương trình động học lúc này sẽ có dạng đơn giản

$$\frac{dN_{\text{Xe}}}{dt} = \lambda_{\text{I}} \cdot N_{\text{I}} - \lambda_{\text{Xe}} \cdot N_{\text{Xe}} \quad (4.13)$$

Vì  $_{53}\text{I}^{135}$  phân rã nhanh hơn  $_{54}\text{Xe}^{135}$  nên  $_{54}\text{Xe}^{135}$  sẽ tăng lên trong thời gian đầu rồi đạt đến cực đại khi hai số hạng trong vế phải của công thức trên cân bằng nhau (khoảng 10 – 11 h). Thông lượng neutron trước khi hạ lò càng lớn, lượng  $_{53}\text{I}^{135}$  càng nhiều và nồng độ cực đại của  $_{54}\text{Xe}^{135}$  càng cao. Sau khi dừng lò, tốc độ sinh ra bé hơn tốc độ mất đi, nên nồng độ  $_{54}\text{Xe}^{135}$  sẽ giảm dần và triệt tiêu sau một khoảng thời gian đủ lớn so với chu kỳ bán rã của nó.



Hình 4.3. Diễn biến độ phản ứng âm do sản phẩm phân hạch  $_{54}\text{Xe}^{135}$  sau khi dừng lò.

Những điều vừa nói được minh họa trên hình 4.3. Độ phản ứng âm trên trục tung được đo bằng đơn vị  $\delta k/k$ . Ở những lò năng lượng thông dụng, thông lượng neutron ở công suất danh định vào khoảng  $10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ , độ phản ứng âm cân bằng tính từ công thức 4.12 vào khoảng  $0,05 \delta k/k$ , sau khi dừng lò nó tăng lên chút ít, đạt đến cực đại rồi giảm dần và triệt tiêu sau vài chục giờ.

Sự tồn tại độ phản ứng âm sau khi dừng lò, được gọi là hiện tượng nhiễm độc xenon, cần được lưu ý để bù trừ nhất là khi muốn khởi động lò trở lại ngay sau khi dừng. Chính sai sót này đã góp phần dẫn đến tai nạn Chernobyl (chương 8).

Ngoài Xe<sup>135</sup>, trong số các sản phẩm phân hạch còn có Sm<sup>149</sup> cũng có thể làm cho lò phản ứng bị nhiễm độc do có tiết diện hấp thụ neutron nhiệt rất cao, 4,1E4 barns. Tuy nhiên, mức nhiễm độc do Sm<sup>149</sup> ít hơn Xe<sup>135</sup>.

## 4.4 TẢI NHIỆT Ở NHÀ MÁY ĐIỆN HẠT NHÂN

### 4.4.1 Chính sách phát triển các loại lò phản ứng năng lượng

Những hiểu biết khá thấu đáo về cơ chế phản ứng dây chuyền, động học và an toàn lò phản ứng đã giúp chế tạo ra nhiều kiểu lò phản ứng năng lượng khác nhau trên thế giới. Sự khác nhau về cấu trúc lò và giải pháp kỹ thuật trong tải nhiệt lúc bình thường cũng như khi xảy ra sự cố phản ánh tầm nhìn của các hãng chế tạo trong sử dụng năng lượng hạt nhân mà họ sẽ theo đuổi để minh chứng cho những đầu tư lớn ban đầu và bảo đảm lợi thế cạnh tranh trong tương lai. Công thức các lò phản ứng năng lượng xoay quanh ba yếu tố cơ bản: độ giàu uranium trong nhiên liệu, chất làm chậm neutron và vật liệu tải nhiệt.

Việc chọn công thức nào nhiều khi còn xuất phát từ thực lực công nghệ của từng nước. Chẳng hạn, Canada chọn loại lò nước nặng CANDU để tránh khâu làm giàu uranium, đồng thời cũng tránh khó khăn khi chế tạo những thùng lò và vỏ lò lớn chịu áp suất cao, như ở công thức lò nước nén (PWR) và nước sôi (BWR).

Công thức thiết kế nhiều khi còn thể hiện chính sách quốc gia, đặc biệt trong vấn đề an ninh năng lượng và nhiên liệu. Chẳng hạn, vì phải theo đuổi chính sách hạt nhân lưỡng dụng nên Liên Xô (cũ) trước đây đã phát triển công thức độ giàu uranium thấp + graphit làm chậm neutron + nước thường tải nhiệt, công thức này thể hiện ở lò RBMK. Nhưng bên cạnh đó, phương án chính vẫn là lò nước nén WWER để giải quyết nhu cầu điện năng.

Ấn Độ là nước đi sau về điện hạt nhân, và trong một thời gian dài trước đây luôn bị các siêu cường o ép vì nước này có cả chương trình chế tạo

vũ khí hạt nhân. Sau khi nhập một nhà máy điện hạt nhân theo công thức nước nén từ Mỹ, Ấn Độ theo đuổi con đường riêng của mình dùng uranium thiên nhiên + nước nặng tải nhiệt, nội địa hóa công nghệ lò CANDU của Canada. Nhờ theo công thức này, Ấn Độ đã tích lũy được Pu để làm vũ khí. Nhưng các lò CANDU nội địa hóa của Ấn Độ có công suất bé, không quá 200 MWe, nên chương trình điện hạt nhân dựa trên nội lực không đáp ứng được yêu cầu phát triển kinh tế. Cuối cùng, Ấn Độ phải chuyển sang mua các lò nước nén của Nga, Mỹ và Pháp với công suất hàng nghìn MWe. Ấn Độ lại còn kiên trì phát triển lò neutron nhanh, và trở thành nước thứ hai, sau Nga, theo đuổi khá thành công phương hướng này. Ấn Độ cũng được xem như tiến khá xa trong phương hướng sử dụng thorium rất dồi dào trong thiên nhiên để chế tạo nhiên liệu hạt nhân  $U^{233}$ .

Trung Quốc cũng là nước đi sau, nhưng gần đây đã nhanh chóng tiến lên vị trí hàng đầu trong đầu tư xây dựng điện hạt nhân sau khi đã nội địa hóa thành công các lò nước nén nhập từ Nga, Pháp và Mỹ.

Bất luận theo công thức nào, bên cạnh những lợi thế đều có những bất lợi kèm theo cái giá phải trả, nhất là về lâu dài. Nước Anh phát triển rất sớm loại lò khí nhiệt độ cao nhằm mục đích nâng cao hiệu suất sử dụng nhiệt năng từ phản ứng dây chuyền so với các lò tải nhiệt bằng nước. Nhưng phương án này đã chấm dứt ngay trong thập kỷ 1980, từ đó Anh quốc không xây thêm lò nào cho đến tận gần đây mới quyết định nhập lò nước nén từ các cường quốc hạt nhân khác để thực hiện cam kết giảm phát thải khí nhà kính. Ở Liên Xô (cũ) lò RBMK không thể tiếp tục phát triển sau tai nạn Chernobyl (1986).

Cho đến nay, hai loại lò nước nén và nước sôi đang chiếm phần áp đảo trên thế giới. Nhưng sau tai nạn Fukushima năm 2011 với các lò nước sôi do GE và Hitachi chế tạo, những đơn đặt hàng mới trong vài năm gần đây đều chuyển sang lò nước nén.

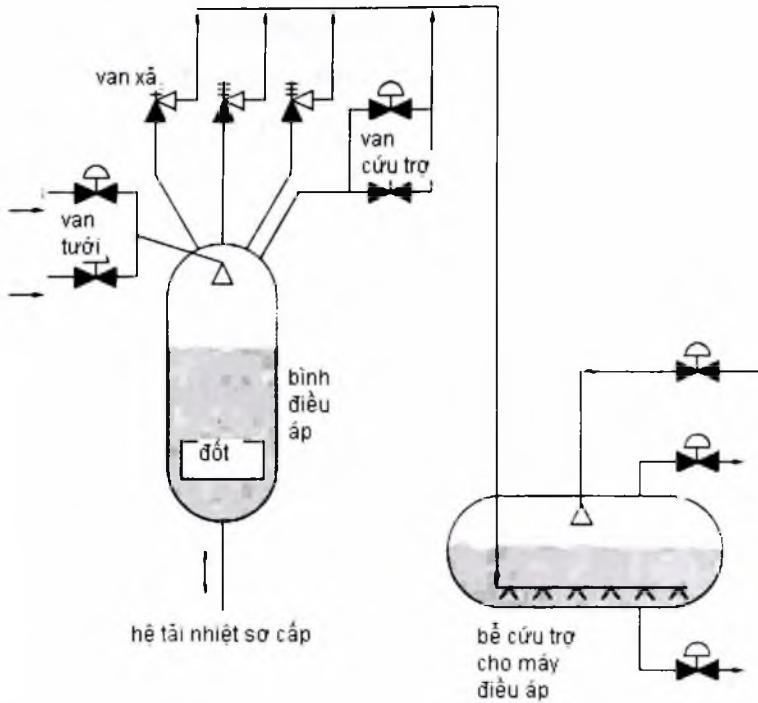
Các thông số cơ bản của hai loại lò nước nén và lò nước sôi điển hình, công suất 1 000 MWe, được trình bày trên bảng 4.2. Quy mô và các thông số cơ bản của hai loại lò khá gần nhau, song đi vào chi tiết cũng dễ thấy những khác biệt khá rõ. Ngay dưới đây sẽ giới thiệu bố trí các hệ thống tải nhiệt ở lò nước nén và nước sôi dựa trên các tài liệu huấn luyện của U.S. NRC. Chi tiết về cấu trúc các hệ kỹ thuật ở hai loại lò có thể xem thêm ở hai chương về tai nạn điện hạt nhân Three Mile Island (PWR) và Fukushima (BWR).

#### 4.4.2 Tải nhiệt ở lò nước nén khi lò hoạt động bình thường

Nhà máy điện hạt nhân dùng lò nước nén có hai vòng tải nhiệt tuần hoàn. Nước trong vòng tải nhiệt sơ cấp ở áp suất cao, khoảng 15 MPa, được bơm tuần hoàn vào lò phản ứng, nóng lên sau khi đi qua vùng hoạt đến khoảng  $324^{\circ}\text{C}$ , nhiệt độ này thấp hơn nhiệt độ hơi bão hòa nên nước không sôi. Áp suất nước trong hệ tải nhiệt sơ cấp được tạo ra và điều khiển bằng hệ điều áp.

Bình điều áp chẳng những tạo ra áp suất cao để bọt nước không thể hình thành bên trong hệ sơ cấp mà còn là phương tiện điều khiển áp suất nước bên trong hệ thống sơ cấp qua cơ chế phản hồi giữa nó với nước trong thùng lò. Áp suất cao có được do nước được đun nóng bằng lò điện đặt chìm bên trong bình. Áp suất được điều khiển qua dòng điện đun nước và các vòi xả. Khi có tín hiệu áp suất giảm, máy đun nước bằng điện sẽ được kích hoạt mạnh lên và bơm nhiều nước nóng vào làm cho áp suất nước tải nhiệt tăng lên. Nếu áp suất giảm xuống dưới mức cho phép, hệ thống bảo vệ sẽ nhận được tín hiệu dập lò khẩn cấp.

Nước trong bình điều áp tồn tại ở hai pha cân bằng, nước và hơi. Nếu áp suất nước trong hệ tải nhiệt sơ cấp hạ xuống, lệch khỏi trị số mong muốn do nhiệt độ vùng hoạt tăng lên, tỷ trọng nước sẽ giảm, nước cần nhiều không gian hơn để giãn nở, nó sẽ giãn nở vào phần trên máy điều áp làm cho pha hơi trong đó co lại và áp suất tăng lên. Quá trình ngược lại sẽ xảy ra khi nhiệt độ trong vùng hoạt giảm.



Hình 4.4. Hệ thống điều áp ở lò nước nén

(Nguồn: U.S. NRC Technical Training Center 0603).

Nếu cơ chế tự phản hồi trên đây chưa đủ hồi phục áp suất, các hệ thống hỗ trợ gắn vào máy điều áp sẽ kích hoạt đưa áp suất trở lại bình thường. Chẳng hạn, nếu áp suất tăng vượt quá mức cho phép, nước nguội sẽ được tưới vào vùng chứa hơi làm cho hơi ngưng tụ, thể tích pha hơi sẽ giảm (do pha hơi chiếm thể tích sáu lần lớn hơn pha nước cùng khối lượng). Nếu khi ấy, áp suất vẫn còn cao, van cứu trợ hoặc van an toàn sẽ kích hoạt xả hơi nước trong bình điều áp ra bể nước cứu trợ. Van cứu trợ và van xả an toàn nằm bên trên bình điều áp (hình 4.4). Van cứu trợ được điều khiển bằng điện từ và thường được ký hiệu là PORV (Pilot-Operated Relief Valve). Van xả an toàn tự động mở khi áp suất trong hệ sơ cấp quá cao, PORV tự động mở ở áp suất thấp hơn.

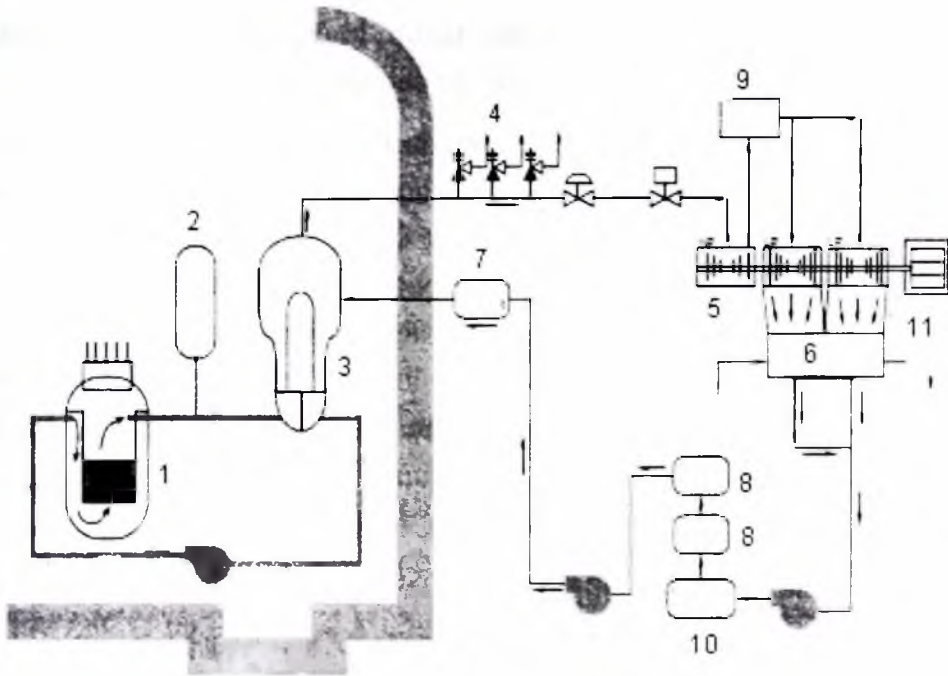
Bể cứu trợ có dung tích lớn chứa nước trong môi trường khí ni tơ. Vì trong nước tải nhiệt sơ cấp luôn có khí hydro nên ni tơ sẽ làm cho khí hydro không đạt đến trạng thái gây nổ.

Vòng tuần hoàn sơ cấp đẩy nước đến bình sinh hơi, tại đây nước trong vòng sơ cấp truyền nhiệt cho nước vòng thứ cấp qua dàn ống trao đổi nhiệt, sau đó được bơm quay lại vùng hoạt. Ở lõi vào vùng hoạt, nước nguội đi nhiều, còn khoảng  $290^{\circ}\text{C}$ . Vì vậy, lõi vào vùng hoạt còn được gọi là chân lạnh, còn lõi ra được gọi là chân nóng. Thiết bị điều áp được nối với chân nóng.

Tùy theo công suất nhà máy, hệ sơ cấp có thể gồm 2, 3, hoặc 4 nhánh tải nhiệt vùng hoạt, mỗi nhánh có bình sinh hơi riêng. Nước trong hệ sơ cấp có độ tinh khiết khá cao, tuy nhiên vẫn bị nhiễm xạ do bị kích hoạt neutron, nên thường xuyên có một phần nước hệ sơ cấp được trích ra để khử khoáng và khử phóng xạ (bố trí trong nhà phụ bên trái nhà lò, hình 4.8), sau đó cho quay lại hòa chung vào hệ. Toàn bộ hệ sơ cấp bao gồm thùng lò chứa vùng hoạt, máy điều áp, bình sinh hơi, bơm nước và hệ đường ống vòng sơ cấp được đặt trong boong ke nhà lò dưới áp suất âm. Nhà lò phải rất kín, và đây là tiêu chuẩn quan trọng bảo đảm an toàn lò phản ứng.

Ở vòng tải nhiệt thứ cấp, nước cấp được bơm vào bình sinh hơi, tại đây qua hệ thống ống trao đổi nhiệt với hệ tải nhiệt sơ cấp, nước sẽ hóa hơi, hơi nước được đưa vào máy tuabin kết nối với máy phát điện. Lượng hơi vào máy tuabin càng nhiều khi công suất lò càng lớn. Bình sinh hơi có hơn 3 000 ống trao đổi nhiệt, mỗi ống có đường kính 20 mm, làm bằng vật liệu chống chịu ăn mòn và bào mòn như hợp kim 600MA hoặc thép không gỉ 316.

Sau khi ra khỏi bình sinh hơi, hơi đi vào tuabin cao áp, trên đường đi có đặt một số van an toàn và van cứu trợ. Trong trường hợp áp suất hơi quá cao, van cứu trợ sẽ mở ra xả hơi vào không khí. Phần hơi còn lại sau khi qua tuabin cao áp có độ ẩm cao được đưa vào bộ phận tách ẩm và sấy. Một phần hơi trích ra từ tuabin cao áp được sử dụng như nguồn nhiệt cho thiết bị sấy, cách làm này tiết kiệm hơi, góp phần nâng cao hiệu suất nhà máy. Sau đó, hơi tiếp tục đi vào tuabin thấp áp.



Hình 4.5. Sơ đồ hệ tải nhiệt sơ cấp và thứ cấp ở lò nước nén

- 1 – lò và vùng hoạt, 2 – bình điều áp, 3 – bình sinh hơi, 4 – van xả an toàn,  
5 – tuabin chính, 6 – ngưng hơi, 7 – đun nóng nước ở áp suất cao,  
8 – đun nước áp suất thấp, 9 – sấy hơi, 10 – khử khoáng, 11 – phát điện.  
(Nguồn: U.S NRC Technical Training Center 0603).

Sau khi qua tuabin thấp áp, hơi nước được ngưng tụ ở thiết bị ngưng nhờ có nước làm mát tải nhiệt ra môi trường tản nhiệt như sông, biển hoặc tháp làm nguội. Nước ngưng sau đó được bơm qua hệ làm sạch để loại bỏ các chất bẩn, chúng có thể lắng đọng và ăn mòn các ống trao đổi nhiệt làm hư hỏng thiết bị sinh hơi. Nước ngưng sau đó được bơm qua hệ gia nhiệt ở áp suất thấp, tại đây nhiệt độ nước ngưng tăng lên nhờ được đun nóng bằng hơi trích ra từ tuabin thấp áp. Từ đây nước ngưng được máy bơm nước cấp chính của vòng thứ cấp hút vào làm cho áp suất tăng lên đủ mức có thể cho quay trở lại bình sinh hơi sau khi được gia nhiệt một lần nữa.

Nước trong hệ thứ cấp có bị thất thoát ít nhiều nên phải có bể dự trữ để bổ sung. Do nước và hơi ở vòng thứ cấp không đi qua vùng hoạt nên trên nguyên tắc nước không bị nhiễm xạ. Do đó, toàn bộ hệ thứ cấp

được đặt trong cùng nhà với máy tuabin không có yêu cầu đặc biệt về bảo vệ phóng xạ, kín và chịu ứng lực cao như nhà lò.

Trong bình sinh hơi, để nhiệt truyền được từ vòng sơ cấp sang vòng thứ cấp, chênh lệch nhiệt độ giữa nước vòng sơ cấp và nước sôi ở vòng thứ cấp phải đủ lớn. Để nước vòng sơ cấp không sôi, áp suất ở đây phải cao hơn nhiều so với vòng thứ cấp. Hệ quả là, áp suất và nhiệt độ hơi vào tuabin không thể đưa lên quá cao, khoảng  $60 \text{ kg/m}^2$  và  $280^\circ\text{C}$  (bảng 4.2) cho nên nhà máy điện hạt nhân dùng lò nước nén với hai vòng tải nhiệt có hiệu suất nhiệt thấp. Lượng hơi đưa vào tuabin do đó phải lớn hơn nhiều lần so với nhà máy nhiệt điện dùng nhiên liệu hóa thạch với cùng công suất. Số vòng quay tuabin cũng bé hơn, khoảng 1 500 vòng/phút loại 50 Hz, và 1 800 vòng/phút loại 60 Hz.

Bảng 4.2. Các thông số cơ bản của lò PWR và BWR

| Mục | Thông số                     | Đơn vị đo             | PWR    | BWR   |
|-----|------------------------------|-----------------------|--------|-------|
| 1   | <b>Công suất tổ máy</b>      |                       |        |       |
|     | Công suất nhiệt              | MW                    | 3 000  | 3 000 |
|     | Công suất điện               | MW                    | 1 000  | 1 000 |
|     | Hiệu suất                    | %                     | 33,5   | 34,4  |
| 2   | <b>Nước tải nhiệt sơ cấp</b> |                       |        |       |
|     | Nhiệt độ lối vào vùng hoạt   | $^\circ\text{C}$      | 289    | 279   |
|     | Nhiệt độ lối ra vùng hoạt    |                       | 325    | 286   |
|     | Áp suất                      | MPa                   | 15,7   | 7,07  |
|     | Số máy bơm                   |                       | 4      | 2     |
|     | Năng suất máy bơm            | $\text{m}^3/\text{h}$ | 20 100 | 9 700 |
| 3   | <b>Vùng hoạt</b>             |                       |        |       |
|     | Chiều cao                    | m                     | 3,66   | 3,71  |
|     | Đường kính                   | m                     | 3,37   | 4,75  |

| <i>Mục</i> | <i>Thông số</i>                                      | <i>Đơn vị đo</i>   | <i>PWR</i> | <i>BWR</i>            |
|------------|------------------------------------------------------|--------------------|------------|-----------------------|
|            | Lưu lượng nước qua vùng hoạt                         | t/h                | 60 100     | 48 300                |
|            | Khối lượng nhiên liệu                                | MTU                | 86         | 132                   |
|            | Độ giàu $U^{235}$                                    | %                  | 2,3/3,5    | 2,5/3,4               |
|            | Số bó nhiên liệu                                     |                    | 193        | 764                   |
|            | Số thanh nhiên liệu trong bó                         |                    | 264        | 60                    |
|            | Chiều dài thanh nhiên liệu                           | m                  | 3,9        | 4,2                   |
|            | Đường kính ngoài thanh nhiên liệu                    | mm                 | 9,5        | 12,3                  |
| <b>4</b>   | <b>Điều khiển lò phản ứng</b>                        |                    |            |                       |
|            | Số thanh điều khiển                                  |                    | 53         | 185                   |
|            | Vật liệu thanh điều khiển                            |                    | Ag-In-Cd   | B <sub>4</sub> C (Hf) |
|            | Điều khiển bằng nồng độ axit bo trong nước tải nhiệt |                    |            |                       |
| <b>5</b>   | <b>Thùng lò</b>                                      |                    |            |                       |
|            | Đường kính trong                                     | m                  | 4,39       | 6,4                   |
|            | Chiều cao                                            | m                  | 12,9       | 22                    |
|            | Trọng lượng                                          | Tấn                | 400        | 740                   |
|            | Áp suất chịu đựng                                    | kg/cm <sup>2</sup> | 175        | 87,9                  |
| <b>6</b>   | <b>Bơm tuần hoàn tải nhiệt</b>                       |                    |            |                       |
|            | Số lượng                                             |                    | 4          | 2                     |
|            | Lưu lượng                                            | m <sup>3</sup> /h  | 20 100     | 9 700                 |
|            | Công suất motor                                      | kW                 | 4 500      | 5 800                 |

| Mục | Thông số                 | Đơn vị đo          | PWR    | BWR   |
|-----|--------------------------|--------------------|--------|-------|
| 7   | <b>Máy nén nước</b>      |                    |        |       |
|     | Đường kính ngoài         | m                  | 2,4    |       |
|     | Chiều cao                | m                  | 15,9   |       |
|     | Công suất gia nhiệt      | kW                 | 1 800  |       |
| 8   | <b>Bình sinh hơi</b>     |                    |        |       |
|     | Số ống trao đổi nhiệt    |                    | >3 000 |       |
|     | Diện tích trao đổi nhiệt | m <sup>2</sup>     | 11 600 |       |
|     | Kích thước               | m                  | ~ 20   |       |
|     | Trọng lượng              | tấn                | ~ 800  |       |
| 9   | <b>Nhà lò</b>            |                    |        |       |
|     | Đường kính trong         | m                  | 43     | 29    |
|     | Chiều cao                | m                  | 65,3   | 48    |
|     | Áp suất thiết kế         | kg/cm <sup>2</sup> | 4      | 3,1   |
| 10  | <b>Tuabin</b>            |                    |        |       |
|     | Nhiệt độ hơi vào         | °C                 | 274    | 282   |
|     | Áp suất hơi vào          | MPa                | 6      | 6,7   |
|     | Lưu lượng hơi            | t/h                | 6 700  | 6 400 |
|     | Tốc độ quay              | vòng/phút          | 1 500  | 1 500 |

Bình sinh hơi là bộ phận thiết yếu đặc thù, đồng thời cũng là chỗ yếu, ở lò nước nén. Sự toàn vẹn của các ống trao đổi nhiệt có ý nghĩa cực kỳ quan trọng tránh cho chất phóng xạ từ vòng sơ cấp thông sang vòng thứ cấp. Các ống này lại dễ bị xuống cấp, nên chúng phải được kiểm tra chu đáo bằng kỹ thuật dòng xoáy, hoặc thay thế, trong thời gian dừng lò định kỳ để thay nhiên liệu. Tuổi thọ của bình sinh hơi thấp hơn các bộ phận khác, như thùng lò, nên ở Mỹ, bình sinh hơi thường được tháo gỡ và thay thế giữa tuổi đời của nhà máy.

### 4.4.3 Tải nhiệt dư ở lò nước nén

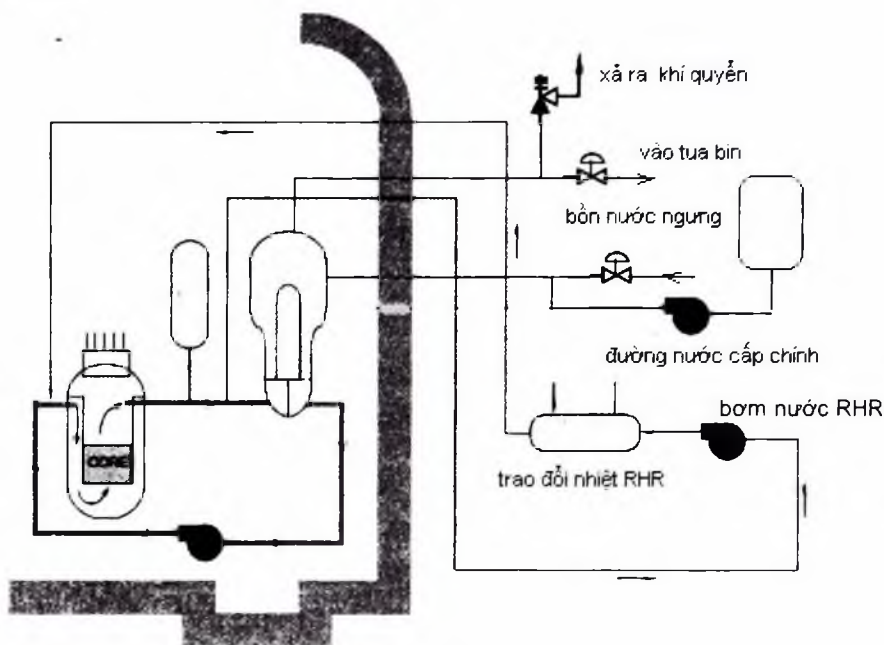
Trong quá trình vận hành nhà máy điện hạt nhân, nhiều khi phải dừng lò phản ứng, hoặc theo kế hoạch để thay nhiên liệu và sửa chữa định kỳ, hoặc không theo kế hoạch vì có sự cố xuất phát từ bên trong lẫn bên ngoài nhà máy. Trong cả hai trường hợp lò được đưa về trạng thái dưới tới hạn, phản ứng dây chuyền ngừng lại, song nhiệt lượng do phân rã phóng xạ từ các thanh nhiên liệu vẫn đủ lớn để có thể làm tan chảy vùng hoạt nếu không được tải đi kịp thời. Mặt khác, muốn bảo dưỡng lò phản ứng, áp suất và nhiệt độ trong hệ tải nhiệt phải hạ xuống thấp để nhân viên có thể tiếp cận với các thiết bị. Do đó, lò phản ứng phải được trang bị một hệ thống tải nhiệt độc lập, gọi là hệ tải nhiệt dư (RHR). Công suất của hệ RHR không cao lắm, vì nhiệt dư ban đầu chỉ gần bằng 7% công suất danh định của nhà máy, khoảng 200 MWt ở các nhà máy có công suất 1 000 MWe (3 300 MWt), và giảm rất nhanh, chỉ còn một nửa sau một ngày.

Lúc lò dừng, hệ nước cấp chính cho bình sinh hơi khóa lại, đường dẫn hơi chính vào máy tuabin cũng được khóa lại, nhưng một hệ thống cấp nước phụ sẽ lấy nước từ bồn chứa nước ngưng đưa vào lò tải nhiệt dư qua bình sinh hơi. Nước này sẽ được phép sôi, và hơi sinh ra sẽ qua một van thải hơi để thải vào bình ngưng, hoặc theo van xả trực tiếp ra khí quyển (xem phần trên bên phải hình 4.6). Bằng cách này nhiệt dư trong lò phản ứng sẽ được giải thoát và nhiệt độ nước tải nhiệt sơ cấp sẽ hạ xuống. Đến một lúc nào đó nhiệt không đủ để sinh hơi và áp suất cũng đã hạ xuống dưới một giới hạn cho phép. Lúc này hệ tải nhiệt dư RHR (phần dưới bên phải hình 4.6) sẽ khởi động tiếp tục làm nguội vùng hoạt cho đến khi nhiệt độ nước sơ cấp đủ thấp để có thể tiến hành bảo dưỡng lò hoặc thay nhiên liệu.

### 4.4.4 Tải nhiệt trong trường hợp khẩn cấp ở lò nước nén

Để ngăn chặn tai nạn điện hạt nhân, các lò phản ứng phải được trang bị hệ thống làm nguội vùng hoạt khẩn cấp (ECCS) nhằm giảm thiểu tối đa khả năng các thanh nhiên liệu bị tan chảy khi xảy ra LOCA. Lúc này phản ứng dây chuyền đã được tự động dập tắt song nhiệt dư do phân rã

phóng xạ có thể làm nóng chảy nhiên liệu nếu không được giải phóng kịp thời. Tuy nhiên tình huống ở đây có thể khởi đầu cho tai nạn điện hạt nhân, hoàn toàn khác với trường hợp lò được dập theo kế hoạch vừa bàn đến ở mục trên, nên các hệ tải nhiệt dư trên hình 4.6 không thể sử dụng được.



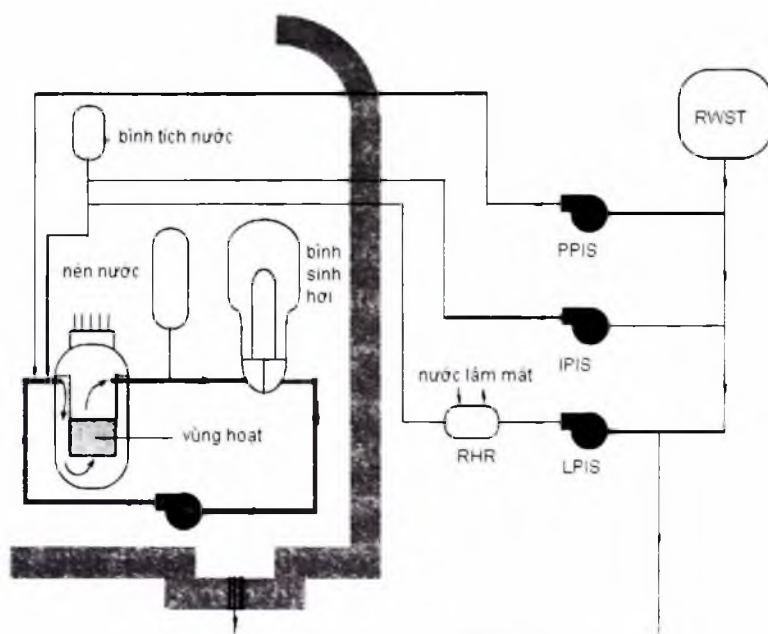
Hình 4.6. Sơ đồ hệ tải nhiệt dư ở lò nước nén

(Nguồn: U.S. NRC Technical Training Center, 0603).

Trong trường hợp này, ECCS phải thực hiện hai chức năng. Trước hết, nó bơm vào hệ tải nhiệt sơ cấp một lượng lớn nước lạnh chứa Bo. Nước chứa Bo còn có chức năng bảo đảm cho lò phản ứng dưới tới hạn, đề phòng phản ứng dây chuyền có thể tái lập sau khi vùng hoạt bị nguội đi và lò sẽ có một độ phản ứng âm khá lớn. Nước chứa Bo được tích trữ trong bồn chứa nước phục vụ quá trình thay nhiên liệu, RWST. Trên hình 4.7, RWST được bố trí ở tận cùng bên phải.

Trong quá trình làm nguội khẩn cấp, áp suất trong vùng hoạt giảm dần theo thời gian, do đó ECCS ở lò nước nén có ba hệ con (hình 4.7), gồm hệ cấp nước cao áp (HPIS), hệ cấp nước trung áp (IPIS), hệ cấp nước từ bình tích nước, và hệ cấp nước thấp áp (LPIS), cũng chính là hệ giai

hiệt dư (RHR). Các bơm nước ở mỗi hệ con, thường là hai bơm cho mỗi hệ, có thể khởi động bằng điện diesel tại chỗ khi nhà máy bị mất điện lưới.



Hình 4.7. Sơ đồ làm nguội vùng hoạt khẩn cấp ở lò nước nén

(Nguồn: U.S. NRC Reactor Training Center 0603).

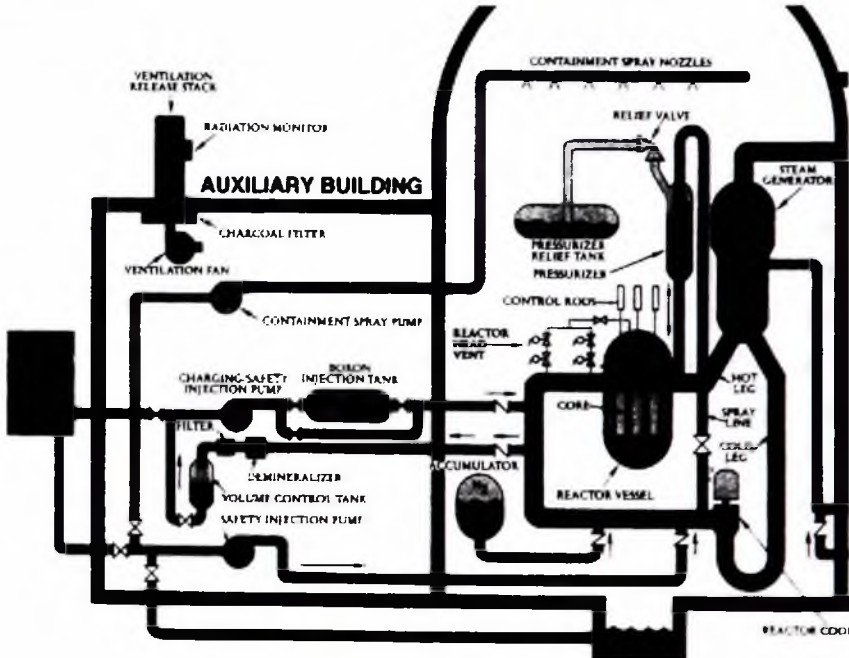
HPIS được khởi động trong những trường hợp áp suất trong vùng hoạt còn cao khi xảy ra những vỡ bé ở đường ống tải nhiệt sơ cấp hoặc thủng các ống trao đổi nhiệt trong bình sinh hơi. Khi nhận được tín hiệu khẩn cấp, HPIS sẽ nối với RWST và bơm nước từ đó vào hệ thống tải nhiệt vùng hoạt. Khi đường ống bị vỡ lớn, áp suất trong lò hạ xuống rất nhanh, lúc này nước chứa bọt trong bình tích nước sẽ tự động tháo xuống vùng hoạt qua chân lạnh mà không cần bơm điện. Do áp suất trong lò đủ thấp, khí nitơ áp suất cao ở phần trên của bình tích nước sẽ đẩy nước nhanh ra khỏi bình và tháo xuống vùng hoạt.

Khi áp suất trong lò hạ xuống quá thấp trong những sự cố LOCA lớn, LPIS hay RHR được khởi động bơm nước từ RWST vào vùng hoạt. Ngoài ra, RHR còn có thể bơm nước từ bể nước động dưới sàn nhà lò nếu RWST đã cạn nước.

#### 4.4.5 Hệ thống cấp, điều chỉnh và xử lý nước sơ cấp ở lò nước nén

Trong nhà phụ (auxiliary building) bên cạnh boong ke nhà lò (hình 4.8) là toàn bộ hệ thống cấp, điều chỉnh và xử lý nước sơ cấp. Khi lò hoạt động bình thường, nước hệ sơ cấp thường xuyên được trích ra cho qua hệ khử khoáng (demineralizer), phin lọc (filter) và bể điều chỉnh thể tích (volume control tank) rồi quay trở lại chân lạnh (cold leg). Cơ chế này cùng với bể nước pha axit boric (boron injection tank) giúp điều chỉnh hóa tính và khử phóng xạ cho nước hệ sơ cấp.

Nếu hệ sơ cấp bị thất thoát không nhiều lắm, bơm tiếp nước an toàn (charging safety injection pump) sẽ chuyển nước từ bể chứa dùng để thay nhiên liệu, RWST, vào chân lạnh của lò để bù vào. Vì các thiết bị ở đây chứa phóng xạ nên không khí trong nhà phụ phải được lọc bằng than hoạt tính (charcoal filter) và đo phóng xạ (radiation monitor) trước khi thải qua ống khói (ventilation release stack) bằng quạt thông gió (ventilation fan).



Hình 4.8. Bố trí các hệ thiết bị trong nhà phụ ở lò nước nén của Mỹ

(Nguồn: <http://www.ucsusa.org/assets/documents/>).

Trong căn nhà phụ cũng bố trí cả hệ thống cấp nước trong trường hợp khẩn cấp. Lúc này máy bơm (containment spray pump) sẽ bơm nước từ RWST đến các vòi hoa sen để tưới mát nhà lò (containment spray nozzles). Nước từ vòi hoa sen và từ đường ống bị vỡ sẽ được thu góp vào bể nước đọng dưới sàn nhà lò, nước này sẽ được tái xử lý để có thể đưa trở lại hệ sơ cấp hoặc hệ tưới mát nhà lò. Ngoài ra, trong căn nhà phụ còn có máy bơm an toàn (safety injection pump) đưa nước thẳng vào chân nóng để làm nguội bình sinh hơi trong trường hợp khẩn cấp.

Nhà phụ không có yêu cầu chống chịu cao như boong ke nhà lò, song các thiết bị ở đây chứa ít nhiều phóng xạ nên không khí được lọc qua hệ thống phin lọc và than hoạt tính sau đó cho thoát ra môi trường qua ống khói. Trong tai nạn TMI-2, boong ke nhà lò không bị thủng, song do hệ thống sơ cấp bị hở nên chất phóng xạ từ bể nước đọng dưới sàn nhà tuồn qua nhà phụ rồi từ đây thoát ra môi trường (chương 7).

#### **4.4.6 Tái nhiệt ở lò nước sôi**

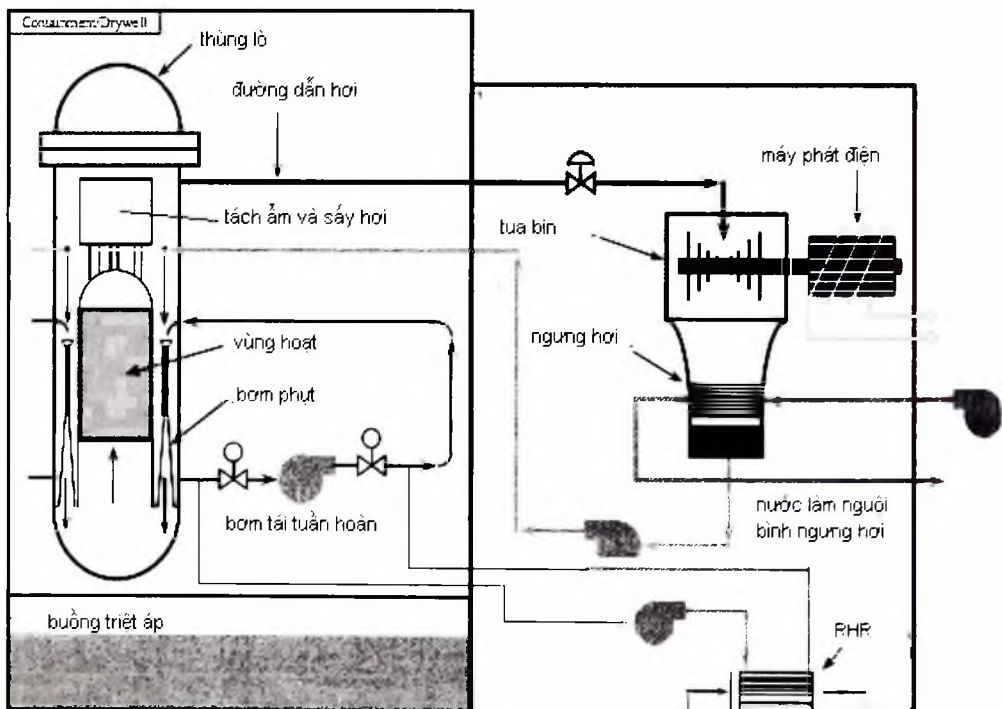
Ở lò nước sôi, nước nhận nhiệt và sôi, tạo thành bọt, ngay trong vùng hoạt. Hỗn hợp nước và hơi bão hòa chuyển động lên phía trên vùng hoạt, tại đây hơi được tách ẩm, sấy khô và đi vào tuabin cao áp, sau đó hơi lại được tách ẩm rồi cho vào tuabin thấp áp. Hơi không dùng sau khi qua tuabin sẽ được ngưng tụ thành nước, khử khoáng, khử khí, rồi nối vào hệ bơm tái tuần hoàn để quay lại vùng hoạt (hình 4.9). Như vậy, lò nước sôi không cần bình sinh hơi và máy điều áp, nhưng nước tái nhiệt ở lò nước sôi chứa phóng xạ.

Ngoài ra, nước tái nhiệt ở đây không pha axit boric để điều chỉnh độ phân ứng như ở lò nước nén. Nước chứa bo chỉ được bơm vào lò trong trường hợp khẩn cấp nhằm bảo đảm cho lò ở dưới tới hạn, nhưng lúc này đường dẫn hơi chính vào máy tuabin đã bị khóa lại.

Cơ chế tái nhiệt một vòng tuần hoàn cộng với chất tái nhiệt tồn tại ở cả hai pha nước và hơi dẫn đến những đặc thù về cấu trúc và giải pháp công nghệ bảo đảm an toàn ở lò nước sôi. So với lò nước nén cùng công

suất, áp suất và lưu lượng nước qua vùng hoạt ở lò nước sôi chưa bằng một nửa (bảng 4.2), do đó thể tích vùng hoạt lớn hơn. Nhiệt độ thanh nhiên liệu thấp hơn, thùng lò bị lão hóa lâu hơn do chịu bức xạ ít hơn, số thiết bị và đường ống ít hơn do không cần máy nén nước và bình sinh hơi, xác suất xảy ra LOCA thấp hơn do số đường ống ít hơn, nhất là vì không có hệ thống ống trao đổi nhiệt trong bình sinh hơi.

Nhà lò sơ cấp ở lò nước sôi bao gồm giếng khô chứa thùng lò và hệ tải nhiệt tái tuần hoàn và giếng ướt chứa một lượng lớn nước nguội nằm ngay dưới giếng khô. Vùng hoạt nằm bên trong thùng lò. Máy tuabin, các hệ xử lý nước được bố trí trong nhà thứ cấp cạnh nhà lò sơ cấp. Bố trí bên trong thùng lò và các lối vào ra của nước tải nhiệt trong trường hợp bình thường và khẩn cấp được minh họa trên hình 4.9, và có thể tham khảo thêm ở các hình 9.1 và 9.2 liên quan đến tai nạn điện hạt nhân với lò nước sôi ở Fukushima.

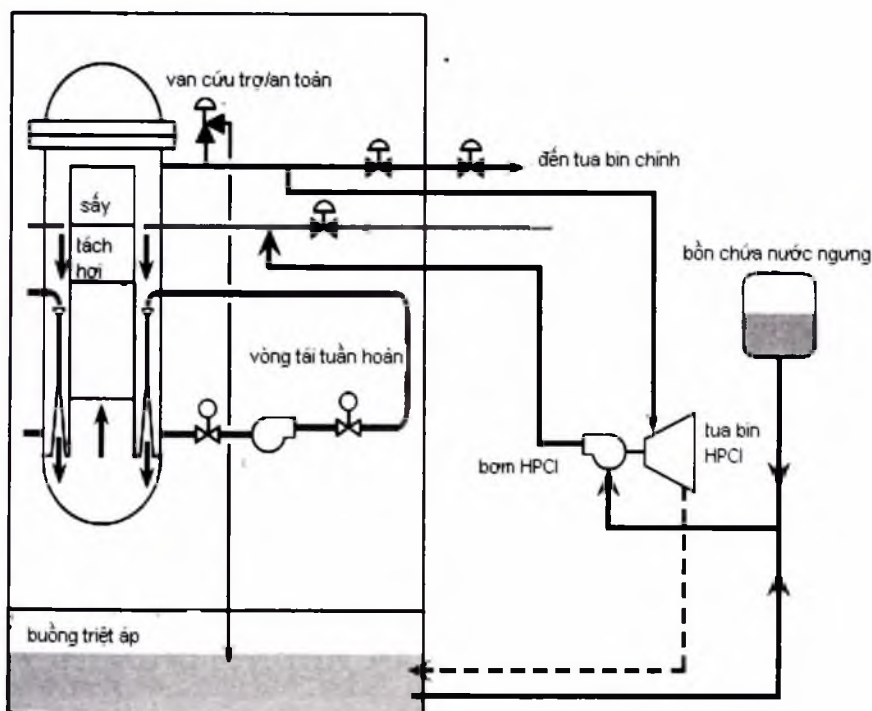


Hình 4.9. Sơ đồ tải nhiệt ở lò nước sôi

(Nguồn: U.S. NRC Technical Training Center 400).

Điều đáng nói trước ở đây là các thanh điều khiển công suất lò làm bằng chất hấp thụ neutron được đưa vào vùng hoạt từ phía dưới lên (tham khảo hình 9.1 – 9.3 liên quan đến tai nạn Fukushima) vì phải dành chỗ phía trên vùng hoạt để tách và sấy hơi. Mặt khác, cách bố trí như vậy còn làm cho phân bố công suất lò bớt bất đối xứng theo trục thẳng đứng do phần trên vùng hoạt chứa nhiều hơi và hấp thụ neutron ít hơn phần dưới. Song cách bố trí thanh điều khiển chuyển động từ dưới lên dễ tạo nên những chỗ không kín ở đáy thùng lò khi có biến dạng do nhiệt hoặc ứng lực, và đây là một nhược điểm thường được nhắc đến của lò nước sôi.

Một đặc điểm quan trọng nữa là do nước tải nhiệt có phóng xạ nên tuabin bị nhiễm xạ và phải được che chắn, nhân viên chỉ có thể thâm nhập vào nhà chứa máy tuabin sau khi dừng lò vài phút do hoạt độ còn quá cao của đồng vị  $N^{16}$  (4.6.2).



Hình 4.10. Sơ đồ làm nguội vùng hoạt khẩn cấp ở áp suất cao HPCI lò nước sôi  
(Nguồn: U.S. NRC Technical Training Center 400).

Lò nước sôi cũng có hệ thống tải nhiệt dư sau khi lò dừng như lò nước nén. Lúc này van dẫn hơi vào tuabin đã khóa lại, và hơi nước đi ra từ thùng lò được chuyển thẳng đến buồng ngưng hơi, ở đây nước dùng làm nguội buồng ngưng hơi sẽ giải phóng lượng nhiệt này ra môi trường. Nhưng sau một thời gian được tải nhiệt, áp suất trong thùng lò sẽ xuống thấp đến khoảng 50 psi, lúc này hệ thống giải nhiệt dư RHR sẽ vào cuộc để hoàn thành nốt nhiệm vụ làm nguội lò. Để tránh đưa thêm đường ống vào thùng lò, hệ RHR kết nối vào mạch bơm tái tuần hoàn vốn được sử dụng khi lò hoạt động ở công suất danh định (phần dưới bên phải hình 4.9).

Ở lò nước sôi cũng có hệ ECCS với chức năng làm nguội vùng hoạt khi xảy ra vỡ đường ống (LOCA) nhằm tránh không cho nhiên liệu bị hư hỏng. ECCS ở lò nước sôi gồm hai hệ ở áp suất cao và hai hệ ở áp suất thấp. Khi xảy ra sự cố LOCA bé và trung bình, áp suất trong lò vẫn còn cao nên hệ bơm nước làm nguội vùng hoạt ở áp suất cao (HPCI) sẽ được khởi động làm nhiệm vụ cấp nước bổ sung cho thùng lò. Nước lấy từ giếng ướt (buồng triệt áp) hoặc bồn chứa nước ngưng dự trữ (hình 4.10). Bơm nước được quay bằng máy tua bin dùng hơi trong hệ thống chính. Nếu hệ này bị hỏng, hoặc không đủ sức khôi phục mực nước trong thùng lò, áp suất trong thùng lò sẽ tăng lên. Lúc này hệ thống giảm áp tự động sẽ mở một số van cứu trợ an toàn để xả nước và làm giảm áp suất trong thùng lò.

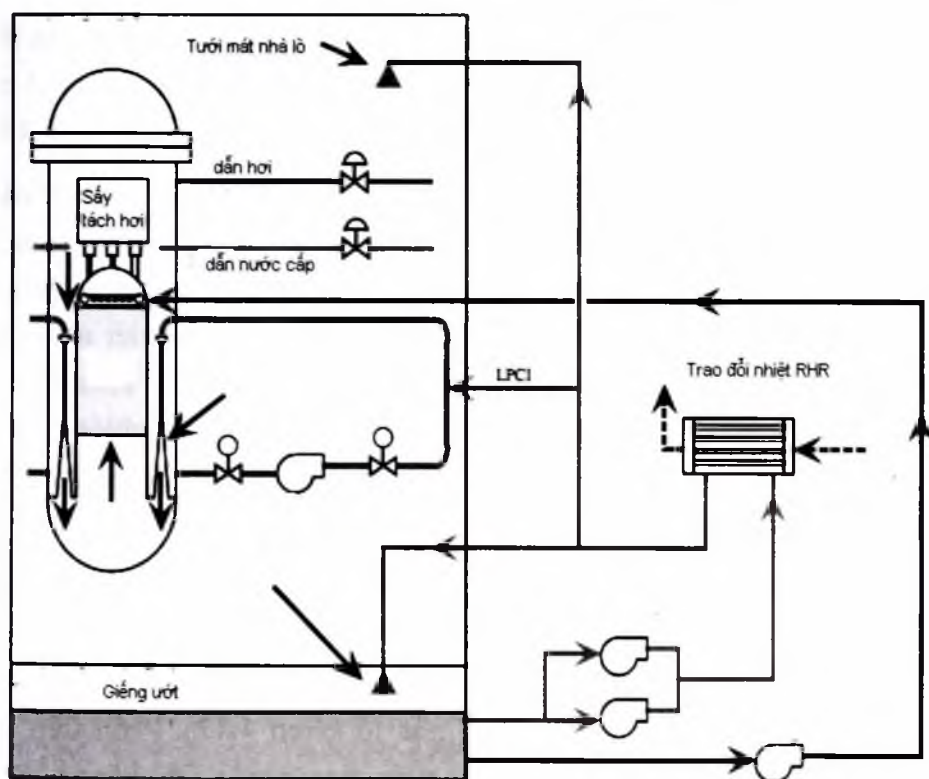
Khi áp suất trong lò xuống thấp, hoặc khi đường ống bị vỡ lớn, vùng hoạt được làm nguội khẩn cấp nhờ hai hệ độc lập gồm hệ tưới vùng hoạt (core spray system) lấy nước từ giếng ướt nằm bên dưới thùng lò và hệ RHR hoạt động trong chế độ làm nguội vùng hoạt ở áp suất thấp (LPCI) (hình 4.11).

#### 4.5 GIAM GIỮ CHẤT PHÓNG XẠ KHÔNG CHO THOÁT RA MÔI TRƯỜNG

Tìm cách giam giữ các sản phẩm phân hạch lại trong nhà lò khi các rào chắn bị hỏng là giải pháp đầu tiên phải tính đến trong thiết kế để chất

phóng xạ không thoát ra môi trường. Rào chắn cuối cùng ngăn cách lò phản ứng với môi trường là boong ke nhà lò (reactor containment), phải được thiết kế sao cho chất phóng xạ chỉ khu trú bên trong nó khi thùng lò và hệ tải nhiệt sơ cấp bị hư hại.

Tại đây, khí phóng xạ không thể thoát ra bên ngoài do nhà lò rất kín và được duy trì bởi áp suất âm nhờ có hệ thống gió hút không khí qua phin lọc. Giả sử đường ống dẫn nước tải nhiệt bị vỡ gây ra sự cố LOCA, nước áp suất cao trong hệ tải nhiệt vùng hoạt sẽ tung ra bùng phát thành hơi làm tăng áp suất và nhiệt độ bên trong nhà lò. Áp suất tăng sẽ khởi động hệ tưới mát nhà lò bằng những vòi hoa sen, làm cho hơi nước trong nhà lò ngưng tụ. Khi ấy, khí và sol khí phóng xạ cũng sẽ bị cuốn theo nước rơi xuống sàn. Nước tưới mát nhà lò được bơm từ bồn dự trữ, khi bồn này cạn nước sẽ được bơm từ bồn nước động dưới sàn nhà lò.



Hình 4.11. Hệ làm nguội vùng hoạt khẩn cấp khi áp suất thấp ở lò nước sôi  
(Nguồn: U.S. NRC Technical Training Center 400)

Mặt khác, boong ke nhà lò cũng được thiết kế đủ rắn chắc để có thể chống đỡ được áp suất tăng lên từ bên trong khi vùng hoạt tan chảy, và từ bên ngoài, chẳng hạn như khi có máy bay rơi đúng nhà máy.

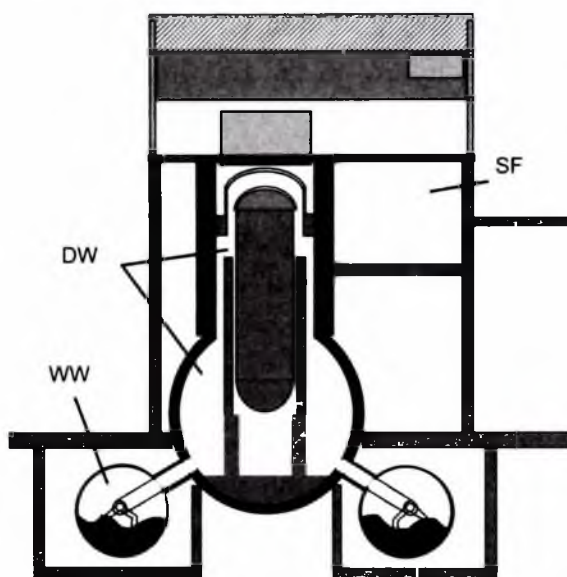
Vai trò quan trọng của boong ke nhà lò được chứng minh qua ba tai nạn điện hạt nhân lớn được trình bày chi tiết ở chương 7, 8, 9.

Tai nạn Three Mile Island, TMI-2, xảy ra năm 1979 với lò nước nén PWR do hãng Bobcox & Wilcox chế tạo. Lò có hai hệ tải nhiệt, sơ cấp và thứ cấp giao tiếp nhau qua hệ thống ống trao đổi nhiệt trong bình sinh hơi. Vùng hoạt, thùng lò, và toàn bộ hệ tải nhiệt sơ cấp, trong đó có bình sinh hơi, được bố trí bên trong boong ke nhà lò. Khi xảy ra tai nạn TMI-2, nhà lò chống đỡ được áp lực tăng cao từ bên trong. Một ít chất phóng xạ thoát ra nhà lò bị nước từ các vòi hoa sen cuốn theo rơi xuống đất. Nhưng do không tải được nhiệt dư trong một thời gian khá lâu kèm theo một số sai lỗi khác của nhân viên vận hành, nên một phần vùng hoạt bị tan chảy, thùng lò bị thủng và một ít khí phóng xạ (13 triệu Ci!) đã thoát ra khí quyển qua nhà phụ nằm bên cạnh nhà lò (hình 4.8).

Chín năm sau đó, tai nạn Chernobyl xảy ra ở Liên Xô (cũ) làm thoát ra khí quyển một lượng cực lớn chất phóng xạ do lò phản ứng thiếu hẳn lớp vỏ đủ kiên cố. Phản ứng dây chuyền tăng tốc do hệ điều khiển bị bất hoạt đã tăng công suất lò lên gấp 120 lần công suất nhiệt danh định (3200 MWe) trong vòng 4 s. Theo ước lượng của các nhà khoa học Mỹ (Lee & Mc Cornick, 2011), khoảng 5% nhiệt năng do nhiên liệu tan chảy chuyển thành cơ năng đã có thể bắn tung nắp đậy lò nặng 1 000 tấn lên cao hơn 50 m, khiến nhà lò thông hoàn toàn với môi trường.

Tai nạn điện hạt nhân lại xảy ra năm 2011 với ba lò nước sôi BWR ở nhà máy Fukushima Dai-ichi. Có thể nói ở đây vỏ lò có hai lớp, lớp thứ nhất bao bọc giếng khô và giếng ướt, cả hai giếng lại được bao bọc trong lớp vỏ thứ hai, có thể gọi là nhà lò (hình 4.12). Phần trên cùng của nhà lò là một khoan rộng để thao tác thay nhiên liệu bằng cần cẩu. Vỏ lò BWR do hãng General Electric chế tạo có thể tích không đủ lớn, do đó theo thời gian loại lò nước sôi này được nâng cấp với thể tích nhà

lò tăng lên từ Mark 1 (điển hình là lò số một nhà máy Fukushima Dai-ichi) đến Mark 3 ở những lò chế tạo sau này. Theo báo cáo của U.S. NRS công bố từ trước 1990 (NUREG-1150), thể tích quá bé bên trong Mark 1 và Mark 2 (chỉ bằng 1/8 và 1/6 thể tích nhà lò PWR cùng công suất) dễ làm tăng áp suất bên trong nhà lò và tăng xác suất hư hỏng nhà lò khi xảy ra tai nạn tan chảy vùng hoạt.



Hình 4.12. Hai lớp vỏ bọc lò BWR Mark-1. (RPV: thùng lò chịu áp suất, DW: giếng khô, WW: giếng ướt, SFP: bể chứa tạm thời nhiên liệu đã cháy).  
(Nguồn: U.S. NRC Technical Training Center 400).

Nhiệt độ và áp suất trong thùng lò tăng lên quá cao trong sự cố LOCA làm bùng phát hơi nước trong giếng khô. Hơi nước rất nóng sẽ tự động tháo xuống giếng ướt, hàng nghìn mét khối nước nguội tại đây sẽ làm ngưng hơi, hấp thụ nhiệt và làm giảm áp suất bên trong lớp vỏ lò thứ nhất. Nhưng nếu giếng ướt hoạt động không hiệu quả, hoặc không hoạt động (như đã xảy ra ở Fukushima) thì với thể tích quá bé vỏ lò sẽ rất dễ hư hỏng.

Khi xảy ra tai nạn tan chảy nhiên liệu ở ba lò Fukushima, nhà lò không đủ sức chống đỡ các vụ nổ khí hydro nên bị hư hại, trần nhà và tường bị bắn tung lên cao, chất phóng xạ thoát ra khí quyển trong nhiều đợt. Sự

cổ này đã khẳng định những quan ngại của U.S. NRC về vỏ lò Mark 1 và Mark 2 là có lý.

Mặt khác, ngoài hơi nước, áp suất bên trong nhà lò còn tăng cao do khí hydro phát ra khi vỏ thanh nhiên liệu bắt đầu hư hỏng. Nước trong giếng ướt không ngưng tụ được khí hydro. Với tốc độ phát ra từ 5 đến 10 kg/s, lượng khí hydro có thể lên đến hàng nghìn kg sau một thời gian rất ngắn, làm tăng áp suất khiến vỏ lò không chịu đựng được, chưa kể trường hợp nổ khí hydro có thể phá hỏng hoàn toàn vỏ lò khiến chất phóng xạ thoát ra môi trường.

Để đối phó với loại sự cố này, U.S. NRC đã yêu cầu lắp đặt vào các lò BWR Mark-1, 2 hệ thống thông gió mạnh để hút khí hydro đưa ra cột ống khói cao. Hệ này phải đủ kiên cố để phòng những sự cố nổ khí hydro. Các lò BWR ở châu Âu lại có trang bị thêm cho hệ này phin lọc năng suất cao có thể giữ lại tối đa các sol khí phóng xạ khi xảy ra sự cố nghiêm trọng.

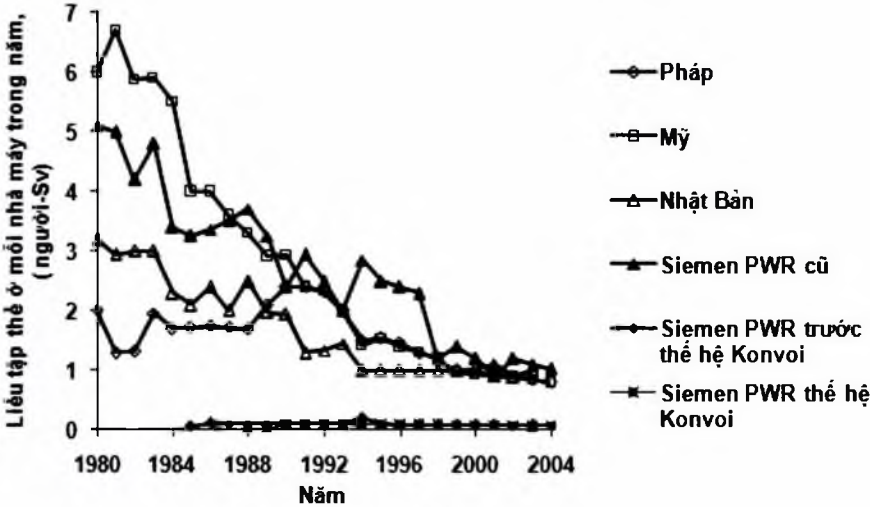
## **4.6 PHÁT THẢI VÀ CHIẾU XẠ LÊN NHÂN VIÊN Ở NHÀ MÁY ĐIỆN HẠT NHÂN**

Nhà máy điện hạt nhân tạo ra chất phóng xạ, chúng có thể thải ra nhà lò và chiếu xạ trực tiếp lên con người, trước hết là các nhân viên vận hành nhà máy. Nhân viên vận hành bị chiếu xạ nhiều nhất khi mở nắp thùng lò để thay nhiên liệu định kỳ. Nguy cơ bị chiếu xạ rất lớn nếu để xảy ra tai nạn. Còn khi nhà máy hoạt động bình thường, phát thải và chiếu xạ được duy trì dưới mức cho phép, song không có nghĩa là vô hại. Do đó, hạ thấp mức phát thải và chiếu xạ lên nhân viên vận hành vẫn là tiêu chí cần được cải thiện trong công nghệ điện hạt nhân.

### **4.6.1 Chiếu xạ lên nhân viên vận hành khi lò hoạt động bình thường**

Nhân viên vận hành lò phải nhận những liều chiếu xạ nhất định, cao hơn dân chúng, gọi là liều chiếu xạ nghề nghiệp, và giảm liều chiếu này là mục tiêu phấn đấu liên tục của công nghiệp điện hạt nhân. Theo

khuyến cáo của ICRP, được luật hóa ở một số nơi như khối EURO, liều hiệu dụng trung bình toàn thân cho nhân viên vận hành nhà máy điện hạt nhân là 100 mSv tính trong 5 năm liên tiếp, trong đó cho phép nhân viên chịu liều cực đại không quá 50 mSv trong một năm. Trên thực tế, các nước đều giữ mức liều nghề nghiệp thấp hơn quy định này (hình 4.13).



Hình 4.13. Thành tích của các nước trong hạn chế liều chiếu nghề nghiệp tập thể (tính theo đơn vị người – Sv cho từng nhà máy trong một năm).

Khoảng thời gian thay nhiên liệu và sửa chữa khi dừng lò sau mỗi chu kỳ hoạt động đóng góp nhiều nhất vào liều nghề nghiệp. Ở một số lò tiên tiến, các công việc này có thể thực hiện trong thời gian không quá 16 ngày, trong đó 11 ngày giành để thay nhiên liệu, và cứ hai năm mới thay nhiên liệu một lần. Chất phóng xạ được sinh ra chủ yếu do sản phẩm gỉ và bào mòn tan ra nước từ kim loại và hợp kim tiếp xúc với nước tải nhiệt sơ cấp. Chúng bị kích hoạt neutron khi đi qua vùng hoạt trở thành phóng xạ và đóng góp vào trường chiếu xạ gamma bên ngoài vùng hoạt. Trong số này có hai sản phẩm chính là  $\text{Co}^{60}$  được kích hoạt bởi neutron nhiệt theo phản ứng:



và  $\text{Co}^{58}$  được kích hoạt bởi neutron nhanh theo phản ứng:



$\text{Co}^{60}$  phân rã  $\beta^-$  với chu kỳ bán rã khá lớn,  $T_{1/2} = 5,27$  năm, lại phát ra tia gamma cứng (1,17 và 1,33 MeV) nên sẽ đóng góp quan trọng vào liều nghề nghiệp ở những lò hoạt động lâu năm. Ở những lò mới hoạt động,  $\text{Co}^{58}$  với  $T_{1/2} = 71,3$  d có vai trò quan trọng hơn. Cobalt có trong hầu hết vật liệu tiếp xúc với nước tải nhiệt sơ cấp, còn nickel có hàm lượng đến 60% trong hợp kim dùng làm ống trao đổi nhiệt trong bình sinh hơi.

#### 4.6.2 Phát thải phóng xạ khi lò phản ứng hoạt động bình thường

Khi lò phản ứng hoạt động bình thường, các sản phẩm phân hạch bị nhốt lại bên trong thanh nhiên liệu, chỉ một phần rất nhỏ bị dò ra nước tải nhiệt sơ cấp qua các khuyết tật trong lớp vỏ bọc. Nước tải nhiệt sơ cấp còn chứa nhiều chất phóng xạ khác do vật liệu trong nước bị neutron kích hoạt khi nước đi qua vùng hoạt lò phản ứng. Lò phản ứng phải trang bị các hệ giải khoáng và giải xạ để lọc các khoáng chất và phóng xạ bảo đảm chất lượng cho nước tải nhiệt sơ cấp.

Hệ tải nhiệt thứ cấp cũng chứa ít nhiều phóng xạ do nước có thể dò từ hệ tải nhiệt sơ cấp qua bộ phận trao đổi nhiệt trong buồng sinh hơi. Với các lò nước nén phổ dụng ở Mỹ tốc độ dò gần 300 lít/ngày, và hàm lượng phóng xạ trong nước tải nhiệt thứ cấp thấp hơn hệ sơ cấp vào khoảng năm bậc (bảng 4.3). Như vậy, phóng xạ chẳng những có mặt trong nước tải nhiệt sơ cấp mà còn loang ra cả nhà lò, hệ tải nhiệt thứ cấp, thậm chí cả nhà chứa máy tuabin.

Bảng 4.3 cho phép ta hình dung mức phóng xạ của các nuclit trong nước tải nhiệt sơ cấp và thứ cấp ở lò nước nén điển hình của Mỹ. Các mảnh vỡ phân hạch được phân thành bốn nhóm bao gồm khí trơ, halogens, kiềm, và những nuclit còn lại khác. Khí trơ phóng xạ có hoạt độ rất cao và dễ phát tán ra ngoài hệ sơ cấp, không bị các phin lọc trong hệ thống xử lý khí phóng xạ giữ lại, song chúng ít tác hại đến môi

trường và con người. Trong số các halogens đáng kể nhất là các đồng vị iốt.

Các nuclit do kích hoạt neutron cũng đóng góp phần quan trọng trong hoạt độ phóng xạ nước tại nhiệt sơ cấp. Trước hết là các sản phẩm kích hoạt do neutron tương tác với O và D trong nước tạo ra  $N^{16}$  và  $H^3$  theo phản ứng:



và



Đồng vị  $N^{16}$  phân rã  $\beta^-$  với chu kỳ bán rã rất ngắn, 7 s, nên tuy được sinh ra nhiều song vẫn đóng góp không đáng kể đến phát thải phóng xạ từ lò phản ứng. Trong khi đó,  $H^3$  đóng góp đáng kể trong thành phần thải xạ, nhất là ở các lò nước nặng, nơi mà đồng vị  $H^2$  (D) được sử dụng làm chất tải nhiệt và được làm giàu từ 0,03% trong tự nhiên lên trên 99%.

Kể đến là các nuclit do kích hoạt neutron trên sản phẩm gì thối ra từ vật liệu tiếp xúc với nước tại nhiệt như bình sinh hơi, thùng lò... Những sản phẩm này nằm trong vùng Cr, Mn đến Zn, nhẹ hơn các sản phẩm phân hạch. Ngoài ra, còn có các vật liệu đưa vào nước tại nhiệt để điều chỉnh độ phản ứng như Bo và để duy trì pH hợp lý như lithi.

Do chứa phóng xạ nên nước tại nhiệt phải được xử lý và giải xạ để bảo đảm chất lượng tối ưu và giảm thiểu tối đa phản phóng xạ thoát ra môi trường. Nước phóng xạ được thu gom lại và xử lý sau khi lưu giữ một thời gian để giảm bớt hoạt độ các nuclit sống ngắn. Khí phóng xạ cũng tạo thành do nước bay hơi. Hệ thống thông gió thu gom khí phóng xạ từ nhà lò và các nơi khác đưa về bồn lưu giữ chờ phân rã phóng xạ, sau đó cho hút lên hệ thống phin lọc trước khi thải ra môi trường khí qua ống khói nhà máy.

Về khí phóng xạ, bảng 4.4 cho phép ta hình dung lượng bụi khí (particulate) thu góp từ nhà lò, nhà phụ trợ cạnh nhà lò và khu vực bên trên bề chứa tạm thời các thanh nhiên liệu đã cháy. Ở đây chỉ kê ra những đồng vị sống dài có chu kỳ bán rã hàng chục ngày trở lên.

Bảng 4.3. Hàm lượng (micro curi/g) nuclit phóng xạ trong nước tải nhiệt sơ cấp và thứ cấp ở lò nước nén điển hình công suất 3400 MWt của Mỹ (NUREG-0017, Rev. 1).

| Nuclit                                                              | Nước lồi vào hệ sơ cấp              | Nước thứ cấp trong buồng sinh hơi               | Hơi ra khỏi buồng sinh hơi            |
|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Khí trơ                                                             |                                     |                                                 |                                       |
| Xe <sup>133</sup>                                                   | 2,6                                 |                                                 | 5,4 x 10 <sup>-7</sup>                |
| Xe <sup>131m</sup> , Xe <sup>135</sup>                              | (7,3 – 8,5) x 10 <sup>-1</sup>      |                                                 | (1,5 – 1,8) x 10 <sup>-7</sup>        |
| Kr <sup>85, 85m, 87, 88</sup><br>Xe <sup>131, 133m, 135m, 138</sup> | (1,2 – 4,3) x 10 <sup>-1</sup>      |                                                 | (1,5 – 8,9) x 10 <sup>-8</sup>        |
| Xe <sup>137</sup>                                                   | 3,4 x 10 <sup>-2</sup>              |                                                 | 7,1 x 10 <sup>-9</sup>                |
| Halogens                                                            |                                     |                                                 |                                       |
| I <sup>132, 133, 134, 135</sup>                                     | (1,4 – 3,4) x 10 <sup>-1</sup>      | n x 10 <sup>-6</sup>                            | (2,4 – 6,6) x 10 <sup>-8</sup>        |
| Br <sup>84</sup>                                                    | 1,6 x 10 <sup>-2</sup>              | 7.5 x 10 <sup>-8</sup>                          | 7,5 x 10 <sup>-10</sup>               |
| I <sup>131</sup>                                                    | 4,5 x 10 <sup>-2</sup>              | 1,8 x 10 <sup>-6</sup>                          | 1,8 x 10 <sup>-8</sup>                |
| Cs, Rb                                                              |                                     |                                                 |                                       |
| Rb <sup>88</sup>                                                    | 1,9 x 10 <sup>-1</sup>              | 5,3 x 10 <sup>-7</sup>                          | 2,6 x 10 <sup>-9</sup>                |
| Cs <sup>134, 137</sup>                                              | (7,1 – 9,4) x 10 <sup>-3</sup>      | 3 x 10 <sup>-7</sup>                            | (1,7 – 2,2) x 10 <sup>-9</sup>        |
| Cs <sup>136</sup>                                                   | 8,7 x 10 <sup>-4</sup>              | 4 x 10 <sup>-8</sup>                            | 2,0 x 10 <sup>-10</sup>               |
| Các sản phẩm phân hạch khác                                         |                                     |                                                 |                                       |
| Sr, Y, Nb, Ce...                                                    | 10 <sup>-3</sup> – 10 <sup>-4</sup> | 10 <sup>-7</sup> – 10 <sup>-9</sup>             | 10 <sup>-10</sup> – 10 <sup>-11</sup> |
| Siêu uranium,                                                       |                                     |                                                 |                                       |
| Np <sup>239</sup>                                                   | 2,2 x 10 <sup>-3</sup>              | 8,4 x 10 <sup>-8</sup>                          | 4,2 x 10 <sup>-10</sup>               |
| Sản phẩm kích hoạt O và H trong nước                                |                                     |                                                 |                                       |
| N <sup>16</sup>                                                     | 40                                  | 1 x 10 <sup>-6</sup>                            | 1 x 10 <sup>-7</sup>                  |
| H <sup>3</sup>                                                      | 1,0                                 | 1 x 10 <sup>-3</sup>                            | 1 x 10 <sup>-3</sup>                  |
| Sản phẩm gỉ bị kích hoạt neutron                                    |                                     |                                                 |                                       |
| Cr <sup>51</sup> , Mn <sup>54</sup> , Fe <sup>55</sup> ,...         | (1,2 – 4,7) x 10 <sup>-3</sup>      | 1,2 x 10 <sup>-8</sup> – 1,9 x 10 <sup>-7</sup> | n x 10 <sup>-10</sup>                 |
| Co <sup>60</sup> , Zn <sup>65</sup>                                 | 5 x 10 <sup>-4</sup>                | 2 x 10 <sup>-8</sup>                            | 1 x 10 <sup>-10</sup>                 |

Khí thải trong nhà lò được hệ thống thông khí hút qua phin lọc, ở đó các sol khí được giữ lại một phần lớn, song các khí trơ phóng xạ vẫn chui qua được và xâm nhập vào môi trường bên ngoài. Lượng phát thải phóng xạ từ nhà máy ĐHN khi hoạt động bình thường không lớn lắm, phụ thuộc vào loại lò, công nghệ và tuổi thọ. Thông tin về chủng loại và hoạt độ các nuclit phóng xạ phát thải ra khí quyển và nước từ các lò năng lượng có thể tham khảo ở UNSCEAR, 1988, Annex B.

**Bảng 4.4. Lượng khí phóng xạ dưới dạng hạt được thu góp hàng năm bởi hệ thống thông gió từ nhà chứa lò, khu phụ trợ và bể chứa tạm thời trước khi xử lý (Ci/năm).**

| <i>Nuclit</i>     | <i>Nhà chứa lò</i>   | <i>Khu phụ trợ</i>   | <i>Bể chứa tạm thời</i> |
|-------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|
| Cr <sup>51</sup>  | $9,2 \times 10^{-3}$ | $3,2 \times 10^{-4}$ | $1,8 \times 10^{-4}$    |
| Mn <sup>54</sup>  | $5,3 \times 10^{-3}$ | $7,8 \times 10^{-5}$ | $3,0 \times 10^{-4}$    |
| Co <sup>57</sup>  | $8,2 \times 10^{-4}$ |                      |                         |
| Co <sup>58</sup>  | $3,5 \times 10^{-2}$ | $1,9 \times 10^{-3}$ | $2,1 \times 10^{-2}$    |
| Co <sup>60</sup>  | $2,6 \times 10^{-3}$ | $5,1 \times 10^{-4}$ | $8,2 \times 10^{-3}$    |
| Fe <sup>59</sup>  | $2,7 \times 10^{-3}$ | $5,9 \times 10^{-5}$ |                         |
| Sr <sup>89</sup>  | $1,3 \times 10^{-2}$ | $7,5 \times 10^{-4}$ | $2,1 \times 10^{-3}$    |
| Sr <sup>90</sup>  | $5,2 \times 10^{-3}$ | $2,9 \times 10^{-4}$ | $8,0 \times 10^{-4}$    |
| Zr <sup>95</sup>  |                      | $1,0 \times 10^{-3}$ | $3,6 \times 10^{-6}$    |
| Nb <sup>95</sup>  | $1,8 \times 10^{-3}$ | $3,0 \times 10^{-5}$ | $2,4 \times 10^{-3}$    |
| Ru <sup>103</sup> | $1,6 \times 10^{-3}$ | $2,3 \times 10^{-5}$ | $3,8 \times 10^{-5}$    |
| Cs <sup>134</sup> | $2,5 \times 10^{-3}$ | $5,4 \times 10^{-4}$ | $1,7 \times 10^{-3}$    |
| Cs <sup>136</sup> | $3,2 \times 10^{-3}$ | $4,8 \times 10^{-5}$ |                         |
| Cs <sup>137</sup> | $5,5 \times 10^{-3}$ | $7,2 \times 10^{-4}$ | $2,7 \times 10^{-3}$    |
| Ba <sup>140</sup> |                      | $4,0 \times 10^{-4}$ |                         |
| Ce <sup>141</sup> | $1,3 \times 10^{-3}$ | $2,6 \times 10^{-5}$ | $4,4 \times 10^{-7}$    |

Để có thể hình dung mức độ phát thải phóng xạ trong công nghiệp điện hạt nhân, bảng 4.5 giới thiệu kết quả khảo sát phát thải bốn loại lò nước nén (PWR), nước sôi (BWR), nước nặng (HWR), và lò tải nhiệt bằng nước thường làm chậm bằng graphit (LWGR) trong giai đoạn trước 2002 trên toàn thế giới (UNSCEAR. 2008). Để dễ so sánh các lò với nhau, lượng khí phát thải được chuẩn hóa theo đơn vị điện năng GWa (1 GWa = 8,76 tỷ kWh) đối với từng loại lò. Năm 2002 các lò PWR, BWR, HWR và LWGR có tổng công suất điện trên toàn thế giới lần lượt là 196,5 GW (69%), 64,8 GW (22,8%), 13,7 GW (5%) và 8,06 GW (3%).

Bảng 4.5. Lượng phát thải của bốn loại lò phổ biến tính theo đơn vị TBq/GWa (UNSCEAR, 2008). 1 TBq =  $10^{12}$  Bq = 27 Ci, 1 GWa = 8,76 tỷ kWh.

|                  | PWR     | BWR    | HWR    | LWGR  |
|------------------|---------|--------|--------|-------|
| Phóng xạ khí trơ |         |        |        |       |
| 1985–1989        | 81      | 290    | 190    | 200   |
| 1990–1994        | 27      | 354    | 2100   | 1700  |
| 1995–1997        | 13      | 180    | 250    | 480   |
| 1998–2002        | 11      | 44     | 80     | 3156  |
| Tritium          |         |        |        |       |
| 1985–1989        | 2,7     | 2,1    | 690    | 26    |
| 1990–1994        | 2,3     | 0,94   | 650    | 26    |
| 1995–1997        | 2,4     | 0,86   | 330    | 26    |
| 1998–2002        | 2,1     | 1,6    | 874    | 26    |
| Iodine-131       |         |        |        |       |
| 1985–1989        | 0,0009  | 0,0018 | 0,0002 | 0,014 |
| 1990–1994        | 0,00033 | 0,0008 | 0,0004 | 0,007 |
| 1995–1997        | 0,00022 | 0,0003 | 0,0001 | 0,007 |
| 1998–2002        | 0,0003  | 0,0006 | 0,0001 | 0,009 |

Đễ dàng nhận ra rằng tổng lượng phát thải của điện hạt nhân vẫn còn thấp hơn rất nhiều bậc so với các vụ thử vũ khí hạt nhân. Nhìn chung, lượng phát thải có xu hướng giảm dần theo thời gian, nhất là ở hai loại lò chính PWR và BWR. Ngoài ra, lò nước nặng HWR thải ra nhiều tritium hơn các loại lò khác do phản ứng neutron với hạt nhân deuterium trong nước nặng dùng làm chậm neutron và tải nhiệt sơ cấp.

Phát thải vào môi trường nước từ ĐHN khi lò hoạt động bình thường cũng khá thấp (xem UNSCEAR, 2008). Do phát thải vào môi trường thấp nên liều tập thể của điện hạt nhân đối với dân chúng quanh nhà máy cũng như dân chúng toàn cầu rất thấp so với liều do phóng xạ tự nhiên. Tuy nhiên, phát thải phóng xạ do điện hạt nhân sẽ rất lớn khi xảy ra tai nạn tan chảy vùng hoạt, như sẽ xét đến trong phần sau.

#### **4.6.3 Chất thải phóng xạ rắn từ nhà máy điện hạt nhân**

Chất thải phóng xạ sinh ra từ nhà máy điện hạt nhân chứa nhiều đồng vị sống dài nên phải được chôn cất chu đáo tránh khả năng gây ô nhiễm môi trường cho hàng nghìn, thậm chí hàng triệu năm sau. Chúng thường được phân thành hai loại tùy theo hoạt độ cao và thấp.

Chất thải hoạt độ cao là những thanh nhiên liệu đã cháy được lưu giữ trong các bể chứa tạm thời trước khi đưa đi chôn cất vĩnh viễn, hoặc bã thải từ những nhà máy tái xử lý nhiên liệu đã cháy để thu hồi plutonium và uranium giàu. Một lò phản ứng nước nhẹ công suất 1 000 MWe hàng năm sản sinh ra gần 20 tấn chất thải hoạt độ cao khi chưa được tái xử lý. Con số này thật không đáng kể so với khoảng 300 000 tấn xỉ than thải ra từ các nhà máy nhiệt điện hàng năm. Lượng nhiên liệu đã cháy lên đến 140 tấn ở những lò phản ứng nước nặng loại CANDU dùng urani thiên nhiên có độ sâu cháy rất thấp nên nhiên liệu thường được rút ra khỏi lò sau một thời gian ngắn để thay thế.

Nhiên liệu đã cháy là những nguồn phóng xạ cực mạnh. Một bó nhiên liệu đã cháy tạo ra trường bức xạ gamma 200 Sv/h ở khoảng cách 1 m, gấp bốn lần liều tử vong. Tính đến cuối 2010, lượng nhiên liệu đã cháy

được tích lũy lại nhiều nhất ở Mỹ, lên đến 65 500 tấn, sau đó đến Canada, Nhật, Pháp, Nga, mỗi nước trên 20 000 tấn. Mỹ và Canada không xử lý chúng mà theo phương án chôn vĩnh viễn. Pháp và Nhật chọn phương án tái xử lý, trong khi đó Nga chỉ xử lý một phần.

Khối lượng vật liệu có phóng xạ trong nhiên liệu ở các lò nước nhẹ sau khi cháy thường gồm:

- 95,6% uranium, quá 98,5% trong số này là  $U^{238}$ , đồng vị  $U^{235}$  đã bị cháy khá nhiều trong lò nên chỉ còn lại từ 0,5 đến 1,0%. Ngoài ra còn có các đồng vị uranium khác với số khối 232, 233, 234, 236, 237, chúng đóng góp chính vào hoạt độ phóng xạ từ uranium.
- 2,9% các đồng vị phân hạch bền
- 0,9% plutonium
- 0,3% caesium & strontium (sản phẩm phân hạch)
- 0,1% iodine & technetium (sản phẩm phân hạch)
- 0,1% các sản phẩm phân hạch sống lâu khác
- 0,1% actinides như americium, curium, neptunium.

Nhiều nuclit trong nhiên liệu đã cháy sống rất lâu. Sau hàng chục nghìn năm vẫn còn tồn tại các đồng vị như  $Pu^{239}$ ,  $Tc^{99}$ ,  $I^{129}$  với chu kỳ bán rã tương ứng là 24 000, 220 000 và 15,7 triệu năm. Vì vậy cần có các biện pháp ứng xử rất đặc biệt đối với nhiên liệu đã cháy sao cho các nuclit phóng xạ



Hình 4.14. Bể lưu giữ nhiên liệu đã cháy trong khu vực nhà máy trước khi đưa đi chôn cất vĩnh viễn hoặc tái xử lý (Nguồn: internet).

này không có khả năng tiếp xúc với môi trường sinh quyển trong thời gian hàng triệu năm.

Sau một thời gian lưu giữ trong bể chứa ở ngay tại khu vực nhà máy để cho hoạt độ phóng xạ của chúng hạ xuống mức thích hợp, các thanh nhiên liệu đã cháy được cho vào côngtainer khô, có thiết kế đặc biệt, đưa đi chôn cất vĩnh viễn, hoặc đưa đến nhà máy tái xử lý để tách ra các vật liệu phân hạch (như Pu, U) dùng trong các lò phản ứng mới. Với giải pháp tái xử lý này khoảng 25% đến 30% lượng nhiên liệu ban đầu sẽ được tái chế biến để dùng trong các lò phản ứng mới. Mặt khác, lượng chất thải hoạt độ cao từ nhà máy tái xử lý sẽ giảm bớt 20%.

## **4.7 TAI NẠN Lò PHẢN ỨNG Ở NHÀ MÁY ĐIỆN HẠT NHÂN**

Như trên đã nói, lượng phóng xạ phát ra môi trường không lớn lắm khi nhà máy điện hạt nhân hoạt động bình thường. Nhưng khi xảy ra tai nạn, vùng hoạt bị tan chảy, nhà lò bị thủng, lượng phóng xạ thoát ra ngoài có thể rất cao, tàn phá môi trường sống, nhất là những vùng lân cận nhà máy.

Ngay dưới đây sẽ trình bày cơ chế các tai nạn. Hậu quả của chúng đối với con người và môi trường sẽ được đề cập ở chương 5, tiếp theo đó, chương 6 sẽ trình bày phương pháp luận phân tích an toàn các nhà máy điện hạt nhân nhằm chủ động tránh tai nạn theo cả hai phương pháp tắt định và xác suất.

### **4.7.1 Tai nạn do độ phản ứng làm tăng vọt công suất**

Như đã trình bày ở 4.1.3, lò phản ứng đạt đến trạng thái tới hạn tức thời khi độ phản ứng đưa vào lò có giá trị bằng  $\beta \cong 0,7\%$ , đây là phần đóng góp từ neutron trễ. Nếu một độ phản ứng dương lớn hơn  $\beta$  được đưa thêm vào khi lò đang hoạt động ở trạng thái ổn định ( $k_{\text{eff}} = 1$ ), công suất lò sẽ tăng nhanh với tốc độ càng lớn khi độ phản ứng đưa vào càng lớn hơn  $\beta$ , làm cho nhiệt độ nhiên liệu tăng lên rất nhanh.

Nếu lúc này hệ điều khiển bị bất hoạt, phản ứng dây chuyền cứ tăng tốc, nhiệt độ trong lò có thể tăng rất cao làm nhiên liệu nóng chảy. Áp lực trong thùng lò tăng cao có thể gây ra nổ do khí hydro hoặc do hơi nước phá vỡ hệ thống tải nhiệt sơ cấp và nhà lò làm thoát chất phóng xạ ra môi trường.

Hiện tượng nói trên được gọi là tai nạn quá tới hạn tức thời hay tai nạn do độ phản ứng (reactivity-initiated accident, RIA). Kịch bản tồi tệ nhất có thể xảy ra khi lò bị mất hoàn toàn hệ điều khiển, hoặc hệ điều khiển bị bất hoạt, khiến công suất tăng vọt do toàn bộ dự trữ độ phản ứng dương trong lò không được bù trừ. Ở các lò năng lượng, dự trữ độ phản ứng có thể lên đến hàng chục  $\beta$  do cần phải nạp vào lò một lượng nhiên liệu đủ lớn nhằm duy trì hoạt động trong thời gian dài. Trong quá trình vận hành, nhiên liệu bị cháy, độ phản ứng dự trữ giảm dần nhưng vẫn còn đủ lớn để gây ra tai nạn một khi hệ điều khiển bị bất hoạt.

Tai nạn RIA do các thanh điều khiển bị rút ra khỏi vùng hoạt đã xảy ra ở một số lò thử nghiệm và lò nghiên cứu trong thời kỳ đầu phát triển năng lượng hạt nhân. Đáng kể có trường hợp lò nghiên cứu đa chức năng NRX công suất 40 MW, ở Chalk River, Canada. Tai nạn xảy ra ngày 12/12/1952 do sai sót của kíp vận hành khi lò đang thử nghiệm ở công suất thấp nhưng do mất ba trong số bốn thanh điều khiển nên chu kỳ nhân neutron chỉ còn 2 s. Công suất tăng vọt làm tan chảy một phần nhiên liệu và nổ khí hydro. Nước phóng xạ chứa hơn 10 kilocuries (400 TBq)  $I^{131}$  tràn ra sàn nhà lò.

Một tai nạn RIA khác do các thanh điều khiển rút ra khỏi vùng hoạt quá nhanh đã xảy ra ngày 03/01/1961 ở lò phản ứng thử nghiệm SL-1 công suất 3 MW tại Idaho, một trung tâm nghiên cứu lò phản ứng chủ chốt ở Mỹ. Sự cố đã gây ra nổ hơi nước giết chết cả kíp vận hành gồm ba nhân viên. Do bị chiếu neutron thì thể các nạn nhân đã trở thành vật phóng xạ. Tai nạn này phát ra môi trường 1100 Ci (41 TBq) chất phóng xạ, trong đó có 80 Ci (3.0 TBq)  $I^{131}$ , lớn hơn cả lượng  $I^{131}$  phát ra trong tai nạn nhà máy điện hạt nhân Three Mile Island TMI-2. Địa điểm phát thải là vùng xa xôi hẻo lánh ở Idaho nên không ảnh hưởng đến dân

chúng, tuy nhiên có ba nhân viên chết ngay tại chỗ và 22 nhân viên khác bị nhiễm xạ toàn thân từ 3 đến 27 Rem (30 đến 270 mSv). Công việc xử lý bã thải và chôn cất ba người chết cũng làm cho nhiều người khác bị nhiễm xạ.

Những tai nạn RIA nói trên đã xảy ra với lò phản ứng nghiên cứu. Đối với nhà máy điện hạt nhân, có thể tưởng tượng ra một số kịch bản tai nạn liên quan đến độ phản ứng, thí dụ trong trường hợp, vì một lý do nào đó, hệ điều khiển trở nên không đủ chắc chắn khiến áp suất rất cao trong lò có thể bắn tung các thanh điều khiển ra khỏi vùng hoạt. Nếu kịch bản này rất khó xảy ra do hệ điều khiển ở các lò năng lượng được thiết kế, chế tạo và bảo trì tốt, thì trên thực tế, hệ điều khiển không thực hiện động tác dập lò (SCRAM) do sai sót trong mạch logic đã xảy ra một số lần ở Mỹ trước những năm 1980. Rất may, các sự cố này đã không dẫn đến tai nạn nhờ có sự can thiệp kịp thời của ekip vận hành.

Cho nên có một loại tai nạn giả định gọi là "lò không dập được trong trạng thái chuyển tiếp được tiên liệu" (Anticipated Transient without Scram, ATWS). Chẳng hạn ở lò nước nén, ATWS có thể xảy ra khi mất nguồn nước cấp cho bình sinh hơi khiến tuabin ngừng lại, nhưng sự kiện này lại không kích hoạt được hệ điều khiển khiến lò không dập được. Khi đó, áp suất và nhiệt độ nước sẽ tăng lên do phản ứng dây chuyền vẫn phát ra nhiệt năng nhưng không tải đi được. Tuy nhiên khả năng tăng vọt công suất lò sẽ không xảy ra nếu lò hoạt động ở chế độ neutron được làm chậm kém (under moderated) thuộc miền bên trái hình 4.2, nơi độ phản ứng có hệ số nhiệt độ âm, nghĩa là khi nhiệt độ chất làm chậm neutron tăng, độ phản ứng sẽ giảm.

Nhắc lại, hệ số nhiệt độ của độ phản ứng có được chủ yếu do sự cạnh tranh của hai thừa số cơ bản trong công thức bốn thừa số được dùng để tính độ phản ứng. Đó là thừa số sử dụng neutron nhiệt  $f$  trong nhiên liệu (bởi  $U^{235}$ ) và xác suất tránh hấp thụ cộng hưởng  $p$  (bởi  $U^{238}$ ). Cả hai thừa số này đều phụ thuộc vào những thông số của lò như độ giàu nhiên liệu, nồng độ Bo pha vào nước tải nhiệt, lượng độc tố neutron có mặt trong vùng hoạt, công suất lò... Do đó, thiết kế và vận hành lò phải phối

hợp các thông số này sao cho chế độ hoạt động của lò rơi vào miền bên trái hình 4.2.

Yêu cầu quan trọng này càng được minh chứng khi xảy ra tai nạn Chernobyl năm 1986. Lò phản ứng này dùng graphit làm chậm neutron, phổ neutron nghiêng về vùng neutron nhiệt, neutron được làm chậm tốt (over moderated), và trạng thái của lò ở công suất thấp rơi vào miền bên phải hình 4.2. Tai nạn do độ phản ứng RIA đã xảy ra khi các thanh điều khiển đã rút gần hết ra khỏi vùng hoạt do sai sót của kíp vận hành (xem chương 8).

#### 4.7.2 Tai nạn mất nước tải nhiệt LOCA

Ở các lò nước nén (PWR) và nước sôi (BWR), nước tải nhiệt được duy trì ở áp suất và nhiệt độ cao. Nếu vùng hoạt bị mất nước tải nhiệt, chẳng hạn do đường ống hệ sơ cấp bị vỡ, áp suất sẽ giảm, nhiệt độ nhiên liệu sẽ tăng lên vượt quá phạm vi cho phép. Lúc này hệ điều khiển sẽ tự động dập lò, nhưng nhiệt dư do phân rã phóng xạ vẫn còn đủ lớn, nếu không tải nhiệt kịp thời nhiên liệu sẽ tan chảy khi vùng hoạt bị phơi trần.

Trong thiết kế các nhà máy điện hạt nhân người ta đã trù liệu biện pháp ứng phó với tai nạn LOCA, ngay cả trường hợp đường ống cung cấp nước cho chân ngưng (lối vào nước ngưng) của hệ tải nhiệt sơ cấp bị vỡ làm đôi (large break LOCA, LBLOCA). Đường ống bị vỡ phía chân ngưng nguy hiểm hơn phía chân nóng vì khi ấy nước thoát ra ngoài không tham gia tải nhiệt trong vùng hoạt. Các hệ thống tải nhiệt khẩn cấp (Emergency Core Cooling System, ECCS) và một số biện pháp khác đã được dự phòng trong thiết kế để xử lý các tình huống LOCA và LBLOCA. Tuy nhiên, những giải pháp này vẫn không đủ giúp điện hạt nhân tránh khỏi tai nạn LOCA xảy ra ở lò số 2 nhà máy Three Mile Island (Mỹ) năm 1979 (xem chương 7).

Tồi tệ hơn, nếu sự cố xảy ra lúc mất điện lưới và cả điện diesel dự phòng khiến các hệ thống tải nhiệt khẩn cấp bị bất hoạt. Tai nạn LOCA

kèm theo mất điện tại nhà máy luôn là nỗi ám ảnh lớn nhất trong suốt quá trình phát triển điện hạt nhân. Nỗi ám ảnh này đã trở thành hiện thực khi xảy ra tai nạn điện hạt nhân cấp 7 tại ba lò phản ứng ở nhà máy Fukushima Dai-ichi hồi tháng 3 năm 2011 kèm theo mất điện toàn nhà máy trong nhiều ngày do động đất và sóng thần (chương 9).

Nhưng bước đột phá lớn trong xu thế mở rộng cơ sở thiết kế để tính đến các sự cố nặng hơn là xây dựng những lò phản ứng kiểu mới, thế hệ III thay cho các lò thế hệ II được vận hành phổ biến trên toàn thế giới. Các lò thế hệ mới này sử dụng nguyên tắc an toàn thụ động với công nghệ nguồn từ Mỹ, Nga, Pháp được bắt đầu xây dựng vài năm gần đây ở một số nước, và sẽ trở thành hướng công nghệ chủ đạo trong nhiều thập kỷ tới. Khác với các lò thế hệ II, an toàn thụ động ở những lò thế hệ mới dựa trên nguyên tắc đối lưu tự nhiên và lực trọng trường để đưa nước làm nguội vùng hoạt trong trường hợp khẩn cấp và mất điện kéo dài tại nhà máy.

Trong khi còn phải chờ xem liệu những giải pháp an toàn thụ động ở lò thế hệ III đang và sắp đưa vào vận hành sẽ mang lại hiệu quả thế nào thì điện hạt nhân đang chuẩn bị cho sự xuất hiện những lò thế hệ IV có an toàn nội tại kèm theo những giải pháp xử lý cơ bản hơn bài toán chất thải phóng xạ hoạt độ cao và tránh lan truyền vũ khí hạt nhân. Một số lò công suất vài trăm MWe được thiết kế và lắp đặt theo môđun (Small Modular Reactor, SMR) đang được thử nghiệm có thể xem như bước đệm trước khi chuyển sang điện hạt nhân với lò thế hệ thứ IV.

### **4.7.3 Tai nạn nghiêm trọng**

Những tai nạn xét đến ở hai mục trên đều được trù liệu trong thiết kế nhà máy điện hạt nhân. Nhưng tai nạn vẫn xảy ra ở nhà máy Three Mile Island (TMI-2) năm 1979 làm tan chảy vùng hoạt và chất phóng xạ đã thoát ra môi trường. TMI-2 bắt đầu bằng một LOCA không lớn và hệ thống tự động đã dập ngay tức khắc phản ứng dây chuyền, nhưng do quyết định sai lầm của ekip vận hành khiến vùng hoạt cạn nước và nhiệt còn dư do phân rã phóng xạ đã làm nhiên liệu tan chảy (chương 7).

Vào những năm đầu phát triển điện hạt nhân, những tai nạn loại này được xem như rất khó xảy ra, nên cơ quan pháp quy các nước không đòi hỏi phải giải trình khả năng xảy ra chúng để được cấp phép. Sau tai nạn TMI-2, quan niệm này đã thay đổi, và một phương hướng nghiên cứu mới đã xuất hiện về những tai nạn nghiêm trọng, được xem như nằm ngoài cơ sở thiết kế (beyond design basis accident,bdba).

Sau đó, trong tai nạn Chernobyl năm 1986, vùng hoạt cũng bị tan chảy nhưng do lò mất điều khiển và công suất lò tăng cao bột phát. Năm 2011, ở Fukushima Dai-ichi cả ba lò phản ứng bị tan chảy nhiên liệu do mất điện kéo dài. Những sự kiện trên cho thấy trên thực tế tai nạn nghiêm trọng làm tan chảy vùng hoạt có nhiều khả năng xảy ra hơn những gì được xem xét trong cơ sở thiết kế các lò thế hệ thứ hai phổ dụng hiện nay.

Các loại tai nạn ngoài cơ sở thiết kế (bdba) có thể khởi đầu bằng nhiều sự kiện tập hợp thành năm nhóm

1. Mất điện toàn nhà máy, điện lưới lấn điện xoay chiều tại chỗ,
2. LOCA,
3. Không thực hiện được SCRAM,
4. Các trạng thái chuyển tiếp. Có hàng chục nguyên nhân dẫn đến các trạng thái chuyển tiếp ở lò nước nén và nước sôi (xem NUREG/CR-6042),
5. Các tình huống khởi đầu khác như thiên tai, máy bay rơi thẳng xuống nhà lò, khủng bố...

Thông thường, một sự kiện khởi đầu nào đó có thể không dẫn đến tai nạn nếu không có chuỗi trục trặc tiếp theo do máy móc thiết bị hoặc do con người. Thiết kế các hệ dự phòng là giải pháp giúp ngăn chặn các trục trặc phát triển nối tiếp nhau thành tai nạn. Các trục trặc có thể cùng chung nguồn gốc, hoặc độc lập hoàn toàn với nhau và với sự kiện khởi đầu. Thí dụ, trong tai nạn Fukushima, mất điện lưới là do động đất còn mất điện diesel là do sóng thần, hệ quả của động đất, song hai biến cố có thể xem như độc lập nhau và là hai mắc xích chủ yếu dẫn đến tai

nạn.Trục trặc cũng có thể xảy ra đồng thời ở hệ dự phòng. Thí dụ, khi máy bơm phun nước tải nhiệt ở hệ chính không bật được thì ở hệ dự phòng van không mở được.

Trở lại kịch bản LOCA để xem quá trình dẫn đến tan chảy vùng hoạt diễn ra thế nào. Khi mất nước tải nhiệt, hệ điều khiển sẽ tự động dập phản ứng dây chuyền, từ lúc này nhiệt trong vùng hoạt chỉ do phân rã phóng xạ. Nhưng nếu các hệ tải nhiệt khẩn cấp bị bất hoạt, vùng hoạt bắt đầu bị phơi trần, nhiệt độ vùng hoạt tăng lên qua các pha kế tiếp, a) nhiên liệu quá nóng, nhiệt độ ngày càng cao hơn giá trị danh định, b) ôxy hóa vỏ bọc, c) nhiên liệu bị hóa lỏng, d) nhiên liệu tan chảy tương tác với nước, d) áp suất và nhiệt độ cao có thể nổ phá hỏng hệ tải nhiệt sơ cấp và phóng xạ thoát ra nhà lò. Bảng 4.3 minh họa các diễn biến ở lò nước nén TMI-2.

**Bảng 4.6. Diễn biến quá trình tan chảy vùng hoạt lò PWR qua các giai đoạn**  
(theo NUREG CR-6042, Rev.2 và Lee & Cormick, 2011).

| Giai đoạn | Điều kiện khởi đầu                       | Mô tả                                                            | Thời gian mất nước tải nhiệt |
|-----------|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| 1         | Vùng hoạt bắt đầu cạn nước               | Vùng hoạt bị phơi trần, nhiên liệu nóng lên                      | 5 – 35 phút                  |
| 2         | Chỗ nóng nhất ở vỏ bọc lên 1 000°C       | Ôxy hóa vỏ bọc, vật liệu cấu trúc và thanh điều khiển nóng chảy  | 5 – 10 phút                  |
| 3         | Chỗ nóng nhất ở vỏ bọc lên 1 760°C       | Vỏ bọc tan chảy, nhiên liệu hóa lỏng nhưng vẫn ở trong vùng hoạt | 10 – 30 phút                 |
| 4         | Vật liệu tan chảy rơi xuống đáy thùng lò | Vùng hoạt tan chảy kết vón trong nước                            | 0 – 80 phút                  |
| 5         | Vỡ thùng lò                              | Thùng lò vỡ, vật liệu kết vón nóng chảy xâm nhập vào nhà lò      |                              |

Vùng hoạt tan chảy theo kịch bản trên đây có thể làm thoát chất phóng xạ ra nhà lò và môi trường theo ba kịch bản chính: nổ khí hydro sinh ra từ phản ứng ôxy hóa vỏ bọc zircaloy, nổ hơi nước khi vật liệu nóng chảy kết vón (corium) gặp nước, hoặc corium xuyên thùng thùng lò.

thậm chí sau đó xuyên qua móng nhà lò và đi vào đất. Nổ khí hydro đã xảy ra ở cả ba lò Fukushima Dai-ichi, còn nổ hơi nước đã phá tung nhà lò ở Chernobyl. Kịch bản thứ tư thường được nói đến như "hội chứng Trung Hoa" của tai nạn điện hạt nhân. Những nghiên cứu ban đầu ở Mỹ cho thấy vật liệu kết vón nóng chảy trên nguyên tắc có thể xuyên vào lòng đất không quá 30 m (NUREG/CR-6042), không thể xuyên thủng Trái Đất như tưởng tượng trong hội chứng Trung Hoa.

#### 4.8 SÁCH LƯỢC PHÒNG VỆ CHIỀU SÂU Ở CÁC Lò PHẢN ỨNG

Để giảm thiểu tối đa rủi ro do tai nạn điện hạt nhân có thể chiếu xạ lên người dân và nhân viên vận hành, các lò phản ứng được thiết kế, chế tạo, xây dựng và vận hành theo triết lý phòng vệ theo chiều sâu, nghĩa là tổ chức phòng vệ theo nhiều lớp kế tiếp. Phòng vệ theo chiều sâu bao gồm nhiều khâu, từ thiết kế nhà máy với đủ mức bảo thủ, bảo đảm chất lượng, hoạt động giám sát, các giải pháp giảm thiểu hậu quả, cho đến văn hóa an toàn tổng thể... bảo đảm cho các lớp phòng vệ kế tiếp được vẹn toàn.

Để nhà máy điện hạt nhân được vận hành an toàn cần bảo đảm thực hiện được ba chức năng an toàn cơ bản sau đây:

- a) Kiểm soát được độ phản ứng và các quá trình trong lò,
- b) Làm nguội vật liệu phóng xạ,
- c) Giữ vật liệu phóng xạ bên trong các rào chắn vật lý. Từ trong ra ngoài, các rào chắn này bao gồm:
  - Viên nhiên liệu,
  - Vỏ bọc nhiên liệu,
  - Thùng lò và hệ thống chịu áp lực của nước tải nhiệt vùng hoạt,
  - Nhà lò,
  - Khu đệm ngăn cách nhà máy với khu dân cư.

Phòng vệ theo chiều sâu được cấu trúc thành năm cấp, nếu một cấp nào đó không thực thi được, bất luận do thiết bị hỏng hóc hay sai lầm của con người, thì cấp tiếp theo sẽ vào cuộc. Mục tiêu và giải pháp cho từng cấp được tổng hợp trong bảng 4.7.

Bảng 4.7. Mục tiêu và giải pháp cho các cấp phòng vệ chiều sâu (theo INSAG-10).

| Cấp phòng vệ | Mục tiêu                                                                                                     | Giải pháp chủ yếu                                                            |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Cấp 1        | Tránh các tình huống bất thường và sai hỏng                                                                  | Thiết kế lò có dự trữ lớn, bảo đảm chất lượng cao trong xây dựng và vận hành |
| Cấp 2        | Kiểm soát và phát hiện kịp thời tình huống bất thường và sai hỏng                                            | Có những hệ thống kiểm soát, hạn chế, theo dõi và bảo vệ trong thiết kế      |
| Cấp 3        | Khống chế sự cố trong cơ sở thiết kế                                                                         | Được trù liệu trong tính năng công nghệ và quy trình an toàn                 |
| Cấp 4        | Khống chế các điều kiện hiểm nghèo, không cho tai nạn diễn biến, giảm thiểu hậu quả của tai nạn nghiêm trọng | Có những giải pháp bổ sung và xử lý tai nạn                                  |
| Cấp 5        | Giảm thiểu hậu quả do lượng lớn phóng xạ thoát ra môi trường                                                 | Xử lý tình trạng khẩn cấp bên ngoài nhà máy                                  |

Bốn cấp đầu gồm những giải pháp nhằm bảo đảm sự vẹn toàn các rào chắn vật lý và giảm thiểu khả năng phát thải phóng xạ ra bên ngoài, cấp thứ năm lên quan đến các giải pháp xử lý tình huống khẩn cấp bên ngoài nhà máy khi phóng xạ thoát ra môi trường.

Với phương châm "phòng cháy hơn chữa cháy", cấp thứ nhất có tầm quan trọng đặc biệt. Cấp thứ nhất phải được quán triệt trong mọi khâu từ chọn địa điểm, thiết kế, thi công, chế tạo thiết bị, chạy thử, cho đến vận hành và bảo dưỡng. Trước hết, ngay từ cơ chế phản ứng dây chuyền phải có những yếu tố an toàn nội tại. Hệ số độ phản ứng âm và hệ số rỗng âm phải được bảo đảm để những lệch lạc làm tăng nhiệt độ

chất tải nhiệt phải được tự phục hồi theo cơ chế phản hồi âm. Ngoài ra, thiết kế phải bảo đảm chống chọi được những sự kiện cực đoan như động đất, sóng thần, máy bay rơi, hỏa hoạn...

Các giải pháp ở cấp thứ hai bao gồm những đặc điểm kỹ thuật trong thiết kế nhằm phát hiện kịp thời các tình huống bất thường, kích hoạt kịp thời các thiết bị như van cứu trợ, không cho các thông số kỹ thuật như áp suất, nhiệt độ vượt quá giới hạn cho phép.

Kiểm tra và bảo dưỡng thiết bị, nhất là các hệ thống tự động, đúng quy trình nhằm phát hiện sớm tình trạng xuống cấp của chúng cũng là giải pháp quan trọng ở cấp thứ hai. Sự vẹn toàn của vỏ bọc nhiên liệu được theo dõi kịp thời nhờ quan trắc có hệ thống phóng xạ trong nước tải nhiệt. Áp suất trong hệ thống tải nhiệt vùng hoạt được bảo đảm nhờ quan trắc tốc độ dòng của nước, sự vẹn toàn của nhà lò được theo dõi thường xuyên bằng cách đo tốc độ dòng của không khí.

Những giải pháp phòng vệ như trên vẫn chưa đủ ngăn cản những điều kiện dẫn đến sự cố. Các giải pháp thiết kế và quy trình vận hành ở cấp thứ ba nhằm bảo đảm các rào chắn vật lý được vẹn toàn, không cho sự cố phát triển thành những tai nạn, nhất là tan chảy vùng hoạt. Ở đây phải tính đến các hệ thống dự phòng, khả năng đáp ứng tốt của thiết bị giúp hạn chế sai sót của con người, tính năng thiết bị, linh kiện và kết cấu phải được thử thách, nhất là trong điều kiện môi trường đặc biệt khi có tai nạn hoặc thảm họa thiên nhiên.

Trong sách lược phòng vệ chiều sâu, các giải pháp ở ba cấp 1 – 3 được xem như cần thiết để bảo đảm cho vùng hoạt không bị hư hại và hạn chế nguy cơ chiếu xạ lên nhân viên và dân chúng. Song phải có bước tiếp theo để giảm thiểu hơn nữa rủi ro điện hạt nhân. Những giải pháp ở cấp thứ tư nhằm giữ cho rủi ro xảy ra tan chảy vùng hoạt cùng với những hậu quả nặng nề đối với con người và môi trường ở mức thấp hợp lý nhất, có tính đến cả hai mặt kinh tế và xã hội. Phòng vệ chiều sâu ở cấp này thể hiện quan điểm ALARA (keep as low as reasonably achievable) trong bảo vệ bức xạ. Cấp thứ tư quan tâm đến những điều

kiện rất ngặt nghèo có thể xảy với lò phản ứng nhưng chưa được chú ý đến đầy đủ trong ba cấp trên do xác suất các tình huống này rất thấp. Ứng phó với những tình huống này, ngoài các giải pháp bổ sung trong thiết kế và công nghệ, các hệ dự phòng..., còn phải tập trung vào các giải pháp kiểm soát khi sự cố xảy ra nhằm không chế diễn biến ở bên trong nhà lò.

Cấp thứ năm tập trung vào những giải pháp ứng phó sự cố bên ngoài nhà máy bao gồm việc thu thập và xử lý thông tin về lan truyền phóng xạ, nhiễm xạ và các giải pháp can thiệp với sự hợp tác của địa phương. Những giải pháp cho tình trạng khẩn cấp cả bên trong lẫn bên ngoài nhà máy phải được tập dượt thường xuyên để bảo đảm tính sẵn sàng của cả hệ thống.

Bảo đảm mức độ dự phòng thích hợp, bảo đảm chất lượng (QA) cao trong mọi khâu thiết kế, xây dựng, vận hành và bảo dưỡng và văn hóa an toàn là ba nội dung tiên quyết quán triệt trong cả năm cấp phòng vệ chiều sâu. Văn hóa an toàn thể hiện trình độ phát triển về mặt văn hóa và công nghiệp của quốc gia. Xây dựng nếp văn hóa an toàn là trách nhiệm của cả hệ thống từ trên xuống dưới, không chỉ là nghĩa vụ của riêng tổ chức vận hành. Trên quan điểm này, đội ngũ quản lý, kể cả ở cấp cao, cũng phải chuyên nghiệp và được đào tạo chu đáo.

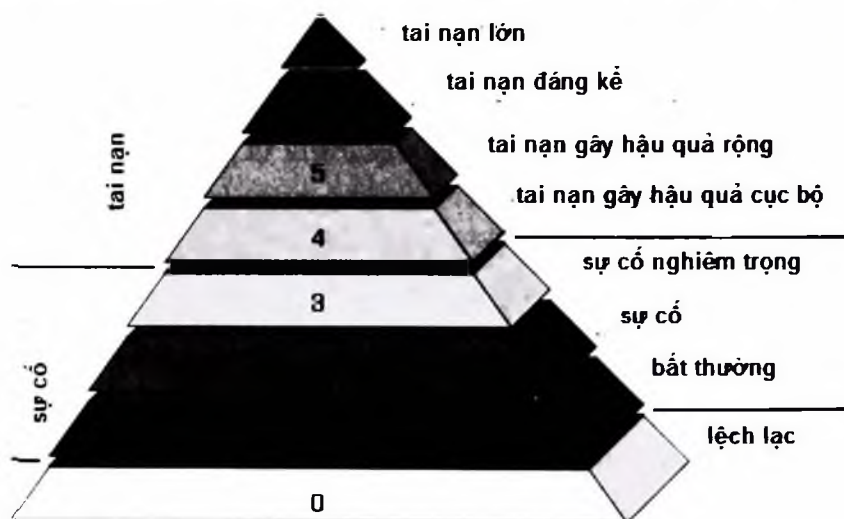
#### **4.9 THANG SỰ KIỆN HẠT NHÂN QUỐC TẾ**

Trong quá trình phát triển điện hạt nhân và ứng dụng phóng xạ, sự cố và tai nạn đã xảy ra ở nhiều nơi với mức độ tác hại khác nhau. Trong thang sự kiện hạt nhân, sự cố và tai nạn được gọi chung là sự kiện. Xếp hạng các sự kiện này dựa trên mức độ tác hại của chúng là yêu cầu cần thiết, trước hết để kịp thời công bố với công chúng một khi có sự kiện xảy ra ở một cơ sở hạt nhân nào đó. Việc làm này giống như xếp hạng các cơn bão theo năm cấp hoặc xếp hạng động đất theo thang Richter. Thang sự cố hạt nhân quốc tế (International Nuclear Event Scale – INES) được IAEA phối hợp với OECD đề xuất từ năm 1989, ban đầu

áp dụng cho điện hạt nhân, sau đó mở rộng ra cho cả những hoạt động ứng dụng và vận chuyển các vật liệu phóng xạ. Từ đó, nhiều nước đã chấp nhận INES để tự xếp hạng các sự kiện hạt nhân xảy ra trên nước mình và thông báo kịp thời với thế giới.

Theo INES, các sự kiện hạt nhân được xếp trên bảy nấc thang (hình 4.15). Các nấc từ 4 đến 7 gọi là tai nạn (accident), nấc 2 – 3 gọi là sự cố (incident), nấc 1 có thể xem là bất thường (anomaly). Những sự kiện có tác hại thấp hơn nữa, hoặc không mấy ý nghĩa về mặt an toàn, được xếp ở nấc 0 và được xem như hiện tượng lệch lạc (deviation).

Những tác hại của các tai nạn và sự cố lại được xem xét trên ba đặc trưng theo thứ tự từ ngoài vào trong nhà máy và theo mức độ ảnh hưởng đến cơ cấu phòng vệ chiều sâu. Bảy nấc và ba đặc trưng của các sự kiện hạt nhân được trình bày dưới dạng ma trận ở bảng 4.8.



Hình 4.15. Thang sự kiện hạt nhân quốc tế INES

Đến nay đã có 6 tai nạn hạt nhân từ nấc 4 trở lên được công bố chính thức, và được xếp hạng trên thang INES như bảng 4.6. Các tai nạn và sự cố dưới cấp ba đã xảy ra ở nhiều nơi, phần lớn liên quan đến các nguồn xạ (xem IAEA International Nuclear Event Scale INES <http://www.iaea.org/ns/tutorials/regcontrol/appendix/app96.htm>).

**Bảng 4.8. Ma trận thang INES và ba đặc trưng an toàn**

|                                                      | <i>Tiêu chuẩn ở mỗi bậc và ba đặc trưng</i>                                                                           |                                                                                        |                                                                     |
|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
|                                                      | Tác hại ngoài nhà máy                                                                                                 | Tác hại trong nhà máy                                                                  | Ảnh hưởng đến hệ phòng vệ chiều sâu                                 |
| 7<br>Tai nạn lớn                                     | Phát thải lớn: hậu quả tai hại đến con người và môi trường                                                            |                                                                                        |                                                                     |
| 6<br>Tai nạn đáng kể                                 | Phát thải đáng kể: rất có thể đòi hỏi những giải pháp ứng phó sự cố toàn diện theo kế hoạch                           |                                                                                        |                                                                     |
| 5<br>Tai nạn có thể gây tác hại ngoài nhà máy        | Phát thải trong phạm vi hạn chế: rất có thể đòi hỏi những giải pháp ứng phó sự cố nhất định theo kế hoạch             | Vùng hoạt hay các rào chắn vật lý bị hư hại nghiêm trọng                               |                                                                     |
| 4<br>Tai nạn gây tác hại ngoài nhà máy không đáng kể | Phát thải không đáng kể: mức độ phơi nhiễm của công chúng trong giới hạn cho phép, ít nhất một người chết vì phóng xạ | Vùng hoạt hư hại 0,1%, phóng xạ thoát ra ngoài, dân chúng có thể bị phơi nhiễm đáng kể |                                                                     |
| 3<br>Sự cố lớn                                       | Phát thải rất bé: mức phơi nhiễm của công chúng chỉ một phần nhỏ của giới hạn cho phép                                | Mức phơi nhiễm tại chỗ quá 1 Sv/h, nhân viên bị chiếu xạ nặng                          | Các giải pháp an toàn không hoạt động                               |
| 2<br>Sự cố                                           | Phơi nhiễm dân chúng quá 10 mSv, phơi nhiễm nhân viên quá mức cho phép hàng năm                                       | Mức phơi nhiễm tại nơi làm việc quá 50 mSv/h                                           | Các giải pháp an toàn không hoạt động nhưng không để lại hậu quả    |
| 1<br>Sự kiện bất thường                              |                                                                                                                       |                                                                                        | Nguồn bị mất hoặc đánh cắp, chiếu xạ lên người dân quá mức cho phép |

Bảng 4.9. Các tai nạn đã xảy ra theo thang INES

| Tai nạn                     | Nước                     | Năm  | Thiết bị                            | Nấc |
|-----------------------------|--------------------------|------|-------------------------------------|-----|
| Chernobyl                   | Liên Xô (cũ),<br>Ukraina | 1986 | Lò RBMK                             | 7   |
| Fukushima–<br>Dai-ichi      | Nhật Bản                 | 2011 | Lò BWR                              | 7   |
| Kyshtim                     | Liên Xô (cũ), Nga        | 1957 | Bể chứa phóng xạ hoạt<br>độ cao     | 6   |
| Three Mile<br>Island, TMI-2 | Mỹ                       | 1978 | Lò PWR                              | 5   |
| Windscale                   | Anh                      | 1957 | Hỏa hoạn trong lò<br>graphit–khí    | 5   |
| Tokai–Mura                  | Nhật                     | 1999 | Quá tới hạn ở bể chứa<br>nhiên liệu | 4   |

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. INSAG–10 Defense in depth in nuclear safety – A report by the International Nuclear Safety Advisory Group, IAEA Vienna, 1996.
2. IAEA International Nuclear Event Scale INES,  
<http://www.iaea.org/ns/tutorials/regcontrol/appendix/app96.htm>
3. Lee J. C. and McCormick N. J. (2011), Risk and Safety Analysis of Nuclear System, John Wiley & Sons, New Jersey.
4. US NRC Technical Training Center 0603. Pressurized Water Reactor System.
5. U.S. NRC Technical Training Center 400
6. UNSCEAR, 1988, Annex B
7. UNSCEAR, 2008.