

**THỰC HÀNH CÁC CHƯƠNG TRÌNH MÔ PHỎNG
TRONG HỌC TẬP VÀ NGHIÊN CỨU VẬT LÝ, THỦY NHIỆT
VÀ PHÂN TÍCH AN TOÀN HẠT NHÂN**

NỘI DUNG

PHẦN I. YÊU CẦU VÀ MỤC TIÊU THỰC HÀNH TÍNH TOÁN MÔ PHỎNG	3
1. Tổng quan về các hệ mô phỏng và chương trình mô phỏng	3
2. Đào tạo sử dụng các chương trình mô phỏng	3
3. Ưu điểm của chương trình đào tạo với các chương trình mô phỏng	4
4. Mục tiêu cần đạt được khi đào tạo với các chương trình mô phỏng.....	5
4.1. Xây dựng năng lực và tiếp thu kiến thức	5
4.2. Rèn luyện kỹ năng thực hành	5
5. Ứng dụng chương trình mô phỏng trong đào tạo.....	5
6. Các chương trình mô phỏng.....	7
PHẦN II. CƠ SỞ PHÂN TÍCH AN TOÀN NHÀ MÁY ĐIỆN HẠT NHÂN	9
1. Vật lý lò phản ứng	9
2. Nhiệt phân rã	11
3. Nhiên liệu hạt nhân	12
3.1. Các sản phẩm phân hạch trong nhiên liệu	13
3.2. Nhiệt độ nhiên liệu.....	14

3.3. Áp suất khí bên trong thanh nhiên liệu.....	16
3.4. Sự căng lớp vỏ bọc.....	17
4. Hệ thống tải nhiệt trong lò phản ứng.....	18
5. Khí hidro.....	21
6. Boong ke nhà lò.....	22
7. Nguồn các sản phẩm phân hạch, phát tán trong khí quyển và liều bức xạ	24
7.1 Nguồn các sản phẩm phân hạch	24
7.2 Phát tán trong khí quyển	25
7.3. Liều bức xạ.....	27
8. Kết luận	28

PHẦN I. YÊU CẦU VÀ MỤC TIÊU THỰC HÀNH TÍNH TOÁN MÔ PHỎNG

1. Tổng quan về các hệ mô phỏng và chương trình mô phỏng

Một hệ mô phỏng (simulator) thực hiện việc nghiên cứu trạng thái của mô hình để qua đó hiểu được hệ thống thực, mô phỏng là tiến hành thử nghiệm trên mô hình. Tính toán mô phỏng (simulation) là việc xây dựng các mô hình toán học biểu diễn hệ thống cần nghiên cứu và thực hiện giải bằng số trên máy tính. Các tính toán mô phỏng có thể sử dụng các phương pháp tắt định hoặc phương pháp xác suất.

Tính toán mô phỏng sử dụng mô tả toán học, mô hình của hệ thống thực ở dạng chương trình máy tính. Các chương trình tính toán mô phỏng thường được sử dụng rất có hiệu quả để nghiên cứu trạng thái động của nguyên mẫu trong những điều kiện nếu nghiên cứu trên hệ thực khó khăn, tốn kém và mất an toàn. Các phần mềm mô phỏng vận hành lò phản ứng của IAEA đã được một số cơ sở đào tạo và nghiên cứu áp dụng trong việc đào tạo sinh viên. Ngoài ra, các hệ mô phỏng mới được trang bị gần đây như hệ mô phỏng nhà máy điện hạt nhân lò VVER-1200 (Trung tâm Đào tạo hạt nhân, VINATOM), hệ mô phỏng vùng hoạt COSI cho lò OPR-1000, Hàn Quốc (Đại học Đà Lạt) cũng đã được nghiên cứu sử dụng trong đào tạo.

Các hệ mô phỏng trên máy tính và các tính toán mô phỏng đã và đang được nghiên cứu và áp dụng rộng rãi trên nhiều lĩnh vực. Trong lĩnh vực phân tích an toàn hạt nhân, các bài giảng có áp dụng các chương trình tính toán mô phỏng sẽ tạo cho sinh viên nhiều kỹ năng như: khả năng nắm bắt vấn đề (hiện tượng, nguyên nhân, bài toán và cách giải quyết), khả năng thao tác trên đối tượng (tạo lập, chỉnh sửa input), khả năng tự do phát triển tư duy (thay đổi các thông số, phán đoán, phân tích, dự báo kết quả), lựa chọn cách tốt nhất để học hỏi và tích lũy kinh nghiệm.

2. Đào tạo sử dụng các chương trình mô phỏng

Cùng với sự phát triển công nghệ thông tin, việc sử dụng các chương trình mô phỏng là phương pháp dạy học tích cực phát huy tính độc lập, khả

năng nghiên cứu của sinh viên. Đặc biệt, mô phỏng diễn tả những quá trình động, hiện tượng xảy ra bên trong các thiết bị mà không thể thực hiện trong phạm vi phòng thí nghiệm.

Bằng phương pháp mô phỏng, sinh viên không chỉ tiếp thu kiến thức một cách sâu sắc mà trong quá trình học họ còn có thể tìm ra cách tiếp cận vấn đề, cách thức để đạt mục tiêu bài học. Đặc biệt người học còn có thể xây dựng và chỉnh sửa các thuộc tính, thông số của đối tượng theo ý muốn. Tìm tòi phát hiện một số khái niệm mới cũng như rèn luyện kỹ năng chuyên môn.

3. Ưu điểm của chương trình đào tạo với các chương trình mô phỏng

Đào tạo sử dụng các chương trình mô phỏng có nhiều ưu điểm:

- Các chương trình mô phỏng cung cấp cho sinh viên những kinh nghiệm cụ thể về đối tượng học tập qua đó sinh viên có được những kinh nghiệm cụ thể về phân tích, đánh giá, dự báo kết quả, tư duy về hành vi, đáp ứng của hệ thống.
- Hiệu quả sư phạm của chương trình mô phỏng thể hiện ở chỗ nó huy động khả năng xử lý thông tin của người học như tìm hiểu quá trình phát triển của phần mềm, mục tiêu nghiên cứu, phạm vi áp dụng. Do đó chương trình mô phỏng cung cấp một kiến thức tổng hợp và cụ thể hơn so với chỉ dùng các giáo trình thông thường.
- Chương trình mô phỏng được sử dụng để huấn luyện, cung cấp những kinh nghiệm trước khi người học thực hành thực tế trên các bài toán phức tạp hơn như thực hiện khóa luận tốt nghiệp hoặc tham gia các đề tài nghiên cứu.
- Sử dụng chương trình mô phỏng cho phép người học làm việc theo kế hoạch riêng và tự điều chỉnh cách học của bản thân, kích thích sự tìm tòi, say mê học tập của sinh viên. Tuy nhiên, để có thể học tốt một chương trình mô phỏng, sinh viên phải có tính kiên nhẫn trước khi thu được những kết quả mong muốn.
- Giáo viên cũng có thể tìm thấy ở các chương trình mô phỏng những khả năng đa dạng trong việc tổ chức bài giảng, làm cho hoạt động dạy-học trở nên

tích cực hơn, giúp người học làm việc một cách sáng tạo, tìm được giải pháp thay thế những hoạt động học thiếu hiệu quả.

- Với các chương trình mô phỏng, người học có thể tiết kiệm thời gian trong việc định hướng học tập, nghiên cứu. Qua các áp dụng chương trình mô phỏng, có thể khám phá nhiều chủ đề, tăng cường thời gian giao tiếp, thảo luận và tăng cường làm việc nhóm.

4. Mục tiêu cần đạt được khi đào tạo với các chương trình mô phỏng

4.1. Xây dựng năng lực và tiếp thu kiến thức

Nâng cao hiệu quả bài giảng và khả năng lĩnh hội kiến thức của người học. Người học có cơ hội phát huy tư duy sáng tạo. Thông qua các chương trình mô phỏng, sinh viên được rèn luyện các năng lực: cách đặt vấn đề, khảo sát hệ thống, khả năng mô tả và diễn đạt tư duy thể hiện trong việc xây dựng các dữ liệu đầu vào, tạo điều kiện cho họ hình thành năng lực phân tích, so sánh, tổng hợp kết quả.

4.2. Rèn luyện kỹ năng thực hành

Thông qua chương trình mô phỏng để rèn luyện cho người học kỹ năng thực hành. Cụ thể người học có thể tự mình tiến hành mô phỏng với các bài toán đơn giản kết hợp với các kiến thức công nghệ thông tin để điều chỉnh quá trình mô phỏng theo ý muốn.

5. Ứng dụng chương trình mô phỏng trong đào tạo

Đối với các ngành khoa học kỹ thuật thì ngoài việc đào tạo kiến thức còn phải đào tạo cả về kỹ năng chuyên môn và do đó hoạt động đào tạo trước đây có những nhược điểm:

- Hoạt động giữa thầy, trò chỉ dừng lại ở các mô hình toán học hay sơ đồ thuật toán... kết quả là sau khi ra trường sinh viên chủ yếu chỉ có kiến thức lý thuyết mà khi tham gia thực hiện một ứng dụng cụ thể thì gặp rất nhiều khó khăn.

- Quá trình tiếp thu thụ động dẫn đến người học bị hạn chế khả năng sáng tạo, thiếu khả năng tự nghiên cứu và tiếp cận các lĩnh vực công nghệ mới

dẫn đến là sau quá trình đào tạo luôn bị động với công việc, thiếu khả năng tự đào tạo, cập nhật và tự nâng cao trình độ.

- Thiếu khả năng làm việc theo nhóm, hợp tác trong công việc...

Mặt khác, hoạt động đào tạo cần áp dụng những thành tựu của khoa học công nghệ vào quá trình dạy học nhằm đạt các mục tiêu đề ra. Ngày nay, với sự phát triển nhanh của công nghệ thông tin, sử dụng các chương trình mô phỏng trong đào tạo sẽ thay đổi hoạt động đào tạo theo hướng tiếp cận với công nghệ thông tin (e-learning) trên cơ sở kế thừa và phối hợp với các chương trình đào tạo trước đây.

Ngoài ra, các khóa luận tốt nghiệp của sinh viên và học viên cao học thực hiện tại viện NLNTVN cho thấy vai trò của các chương trình mô phỏng trong hoạt động nghiên cứu khoa học là rất lớn nhằm thúc đẩy hoạt động nghiên cứu khoa học của sinh viên một cách có hiệu quả. Điều này đòi hỏi sinh viên phải có cái nhìn tổng quan và phân tích quá trình thực nghiệm ngay trên máy tính. Vì vậy, sử dụng các chương trình tính toán mô phỏng trong hoạt động nghiên cứu khoa học và giảng dạy vật lý lò phản ứng, phân tích an toàn thủy nhiệt và đánh giá phát tán phóng xạ là một cách tiếp cận thực tiễn, đạt hiệu quả cao.

Các chương trình mô phỏng có thể được sử dụng trong giảng dạy và học tập:

- Có thể dùng chương trình mô phỏng để nêu tình huống hay vấn đề, từ đó giúp sinh viên sẵn sàng tham gia tích cực vào quá trình tiếp cận kiến thức mới mà chương trình mô phỏng cung cấp.

- Từ các chương trình mô phỏng có thể gợi mở việc phát triển những ý tưởng mới cho người học.

- Khi sử dụng chương trình mô phỏng trong đào tạo, giáo viên không chỉ giúp người học nắm kiến thức môn học mà người học còn có thể hiểu biết các phương pháp giải quyết các bài toán trong lĩnh vực đó.

- Với chương trình mô phỏng với các mô hình và các dữ liệu đầu vào được thiết kế tốt, người học có thể tự học mà vẫn đạt kết quả tốt như học với giáo viên. Điều này tạo điều kiện cho việc tự học.

- Có thể sử dụng mô phỏng như một tài liệu giảng dạy và học tập độc lập (chủ yếu phục vụ tự học, tự nghiên cứu). Tài liệu học tập kiểu này được cung cấp trên web.

- Có thể sử dụng các chương trình tính toán mô phỏng phối hợp với các phần mềm trình chiếu khác như power point để giảng dạy trên lớp hay trên mạng (e-learning).

Tuy nhiên khi làm việc với các chương trình mô phỏng cũng cần lưu ý những điểm sau:

- Người học cần có một số kiến thức chuyên môn và công nghệ thông tin nhất định, kỹ năng sử dụng máy tính và đặc biệt là các cơ sở lý thuyết và hướng dẫn sử dụng (user manuals) cần được nghiên cứu kỹ trước và trong quá trình học tập với chương trình mô phỏng.

- Sử dụng các chương trình mô phỏng trong đào tạo cần kết hợp với các phương tiện và phương pháp khác như làm việc nhóm, tăng cường khả năng trao đổi, đề xuất giải pháp khắc phục lỗi .v.v.

6. Các chương trình mô phỏng

Các chương trình thực tập sử dụng các công cụ tính toán mô phỏng được đặt ra nhằm phục vụ cho việc thực hành một số môn học và đồng thời đáp ứng nhu cầu đào tạo chuyên sâu, đào tạo theo công việc như đã phân tích ở trên. Các chương trình tính toán mô phỏng được sử dụng bao gồm:

- Chương trình SRAC: Tính toán vật lý lò phản ứng
- Chương trình mô phỏng MCNP: Tính toán vật lý lò phản ứng, che chắn bức xạ
- Chương trình RELAP5: Phân tích an toàn thủy nhiệt lò phản ứng và NMĐHN
- Chương trình MELCOR : Mô phỏng sự cố nghiêm trọng
- Chương trình RASCAL : Đánh giá phát tán phóng xạ trong khí quyển
- Chương trình ANSYS: Áp dụng tính toán CFD

Trong số các chương trình tính toán nêu trên, một số chương trình đã được sử dụng nhiều năm tại viện NLNTVN, các chương trình này cũng được đào tạo, hướng dẫn ở nhiều lớp đào tạo trong và ngoài nước, kể cả các khóa huấn luyện do IAEA tổ chức. Tuy nhiên cũng có một số chương trình còn chưa được phổ biến rộng rãi do đặc thù hoạt động chuyên môn hoặc phạm vi áp dụng khá rộng. Chẳng hạn như công cụ ANSYS mới được sử dụng trong ngành năng lượng hạt nhân vài thập kỷ trở lại đây và cũng mới được triển khai sử dụng ở Việt Nam trong vài năm gần đây. Do đó, việc xây dựng các bài thực tập cho các chương trình tính toán nêu trên dựa trên một số nguyên tắc cơ bản sau đây:

- Bài toán đơn giản (người học tiếp cận nhanh và hiệu quả hơn)
- Bài toán chuẩn (so sánh với thực nghiệm)
- Bài toán có thể so sánh giữa các chương trình với nhau hoặc so sánh với kết quả tính giải tích.
- Bài toán đóng (các bài toán không cho lời giải tường minh theo cách copy / paste and Run) đòi hỏi người học phải nghiên cứu kỹ hơn về chương trình để vượt qua các điểm mù (Blind points) trước khi có gợi ý và giải pháp thực hiện. Đây cũng là cách thiết kế một số bài toán Benchmark áp dụng trong các bài toán phân tích an toàn hạt nhân của NEA/OECD.

Các bài thực tập được bắt đầu với phần lý thuyết tổng quan cùng với việc giới thiệu các mô hình tính toán được đặt ra trong quá trình thực tập. Phần tiếp theo là các sơ đồ cụ thể (của thực nghiệm hay nút hóa) để giúp người sử dụng chương trình tiếp cận nhanh hơn đến việc xây dựng Input. Tiếp theo là các đề xuất thực hiện tính toán như các thông số cần tính toán, so sánh hoặc các vấn đề cần lưu ý. Phần trình bày kết quả cũng được đặt ra như yêu cầu bắt buộc giúp người học đi sâu vào phân tích kết quả thu nhận được từ các kết quả chạy chương trình cũng như đưa ra các phân tích, nhận xét thể hiện hiểu biết của cá nhân đối với bài toán đã thực hiện.

PHẦN II. CƠ SỞ PHÂN TÍCH AN TOÀN NHÀ MÁY ĐIỆN HẠT NHÂN

Phần này đưa ra các mô tả cơ bản về các hiện tượng, quá trình, thành phần của nhà máy điện hạt nhân (NMDHN) dựa trên các phân tích an toàn và biểu diễn dưới dạng đơn giản hóa các loại mô hình được sử dụng. Lý thuyết và mô hình chi tiết, chuyên sâu được trình bày trong các tài liệu chuyên khảo hoặc tài liệu hướng dẫn sử dụng của từng chương trình nên được nghiên cứu và học hỏi trước khi sử dụng. Tài liệu này giúp người học có cái nhìn tổng thể và cung cấp cơ sở hiểu biết cần thiết cho người sử dụng chương trình có thể nhận biết vai trò và vị trí của mỗi chương trình tính toán trong quá trình phân tích an toàn.

1. Vật lý lò phản ứng

Các phương trình cơ bản trong vật lý lò phản ứng được trình bày trong nhiều tài liệu, sách và các lớp ngắn hạn cũng như môn học tại trường đại học. Các vấn đề chính của vật lý lò phản ứng được sử dụng trong phân tích an toàn là động học lò phản ứng và lý thuyết khuếch tán. Đối với động học lò phản ứng không phụ thuộc không gian (còn gọi là động học lò điểm) ta có phương trình mô tả sự thay đổi mật độ neutron:

$$\frac{dN_f(t)}{dt} = \frac{k_\infty(\rho - \beta)}{l_p} N_f(t) + \sum_{i=1}^M \lambda_i C_i$$

Trong đó:

$N_f(t)$ – Mật độ neutron như hàm của thời gian t

k_∞ - Hệ số nhân vô hạn

ρ - Độ phản ứng (reactivity)

β – Phần các neutron trễ tổng cộng

l_p – Thời gian sống của neutron tức thời

M – Số nhóm neutron trễ (thường chọn 6 nhóm)

λ_i – Hằng số phân rã của nhóm neutron trễ thứ i

C_i – Số các neutron của nhóm i , và cho mỗi nhóm neutron trễ:

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i N_f(t)}{l_p(1-\rho)} - \lambda_i C_i$$

Trong đó β_i là phần các neutron trễ của nhóm i .

Tuy nhiên, một lò phản ứng không thể được coi là một lò phản ứng điểm trong phân tích sự cố, tai nạn. Sự phụ thuộc không gian do phân bố lệch của thông lượng (đặc biệt đối với sự cố LOCA lớn, nếu chỉ có một nửa vùng hoạt bị rỗng nước), việc chèn các thanh an toàn từ phía trên của lò phản ứng, hoặc các sự kiện khác. Do đó, trong thực tế, người ta phải sử dụng phương trình khuếch tán ba chiều kết hợp với động học lò điểm. Mô hình khuếch tán theo dõi các neutron như là một dòng chảy qua môi trường có tán xạ, hấp thụ và rò rỉ. Phương trình liên tục, đối với các hệ thống đồng nhất với vận tốc neutron đơn năng, trở thành phương trình khuếch tán neutron:

$$D\nabla^2\phi - \Sigma_a\phi + s = \frac{1}{v} \frac{\partial\phi}{\partial t}$$

Trong đó:

D – Hệ số khuếch tán

Σ_a – Tiết diện hấp thụ

v – Vận tốc neutron

$\phi(r,t)$ – Thông lượng neutron.

$s(r,t)$ – Hàm phân bố nguồn, là số neutron phát ra trên một đơn vị thể tích từ nguồn trong một đơn vị thời gian tại điểm r và thời điểm t .

Điều này rất giống với sự khuếch tán nhiệt qua môi trường, với việc bổ sung số hạng nguồn (do phân hạch).

Sự khuếch tán neutron chuyển động cộng với các quá trình động học là cơ sở của rất nhiều các chương trình tính toán vật lý lò phản ứng được sử dụng trong phân tích sự cố. Các phương trình này được giải bằng các phương pháp khác nhau với không gian hữu hạn của vùng hoạt lò phản ứng chia thành nhiều nút, trong đó phương trình khuếch tán được áp dụng ở từng bước thời gian.

Ví dụ, đối với LOCA, các thiết diện phụ thuộc thời gian đại diện cho sự mất mát của chất làm mát, chuyển tiếp nhiệt độ nhiên liệu, hành động của hệ thống điều khiển lò phản ứng, và sự dịch chuyển của thanh an toàn là các yếu tố dẫn đến chuyển tiếp trong thông lượng neutron. Chuyển tiếp công suất trung bình cho lò phản ứng được rút ra từ tính toán, cùng với các hệ số đỉnh cho kênh nóng, bó nóng, và phần tử nhiên liệu nóng được phân tích. Độ phản ứng của hệ thống như là hàm của phần rỗng, nhiệt độ cũng được tính toán. Những dữ liệu này được sử dụng làm đầu vào cho chương trình phân tích thủy nhiệt hệ thống. Chương trình này tính toán sự phân bố áp suất, nhiệt độ, lưu lượng chất tải nhiệt trong các thành phần của hệ thống nhà máy. Sự kết hợp giữa các tính toán vật lý (động học lò) và các tính toán thủy nhiệt cho mô tả chính xác hơn về các quá trình xảy ra trong các chuyển tiếp.

Chương trình SRAC

SRAC (Standard thermal Reactor Analysis Code system). Đây là bộ chương trình tính toán vật lý lò phản ứng được phát triển bởi Cơ quan Năng lượng nguyên tử Nhật Bản (JAEA) kết hợp các mô đun tính toán xác suất va chạm Pij, tính toán S_N (ANISN) và tính toán khuếch tán 3D (CITATION) do các phòng thí nghiệm Hoa Kỳ phát triển và được sử dụng rộng rãi trên thế giới. Bộ chương trình SRAC được xây dựng với mục đích thực hiện liên hoàn các tính toán vận chuyển và khuếch tán neutron cho nhiều loại lò phản ứng hạt nhân khác nhau, tính toán cháy nhiên liệu hạt nhân... để xác định các thông số vật lý và thiết kế lò phản ứng.

2. Nhiệt phân rã

Việc dừng lò phản ứng không loại bỏ tất cả các mối quan tâm về an toàn: nhiệt phân rã (decay heat) phải được lấy ra khỏi vùng hoạt. Nhiệt này xuất phát từ sự phân rã phóng xạ của các mảnh phân hạch và rất khó kiểm soát. Về nguyên tắc, nó có thể được tính toán từ lịch sử vận hành: thành phần của các sản phẩm phân hạch có thể được dự báo tại bất kỳ thời điểm nào, và thời gian sống của các sản phẩm phân hạch và các chuỗi phân rã được biết, cho ta:

$$P_d(t) = \sum_i n_i(t) E_i$$

Trong đó:

$P_d(t)$ – Công suất nhiệt phân rã của các sản phẩm phân hạch tại thời điểm t

$n_i(t)$ – số nguyên tử phân rã trong đơn vị thời gian của sản phẩm phân hạch i tại thời điểm t

E_i – Năng lượng trung bình từ phân rã của mỗi nguyên tử sản phẩm phân hạch i .

Trên thực tế, điều này phức tạp hơn vì $n_i(t)$ phụ thuộc vào lịch sử chiếu xạ, mỗi sản phẩm phân hạch có thể có nhiều hơn một chuỗi phân rã (với các năng lượng khác nhau) và nhiều sản phẩm phân hạch được tạo ra. Trong thực tế, tính toán cơ bản như vậy được thực hiện như một tham chiếu với giả thiết khi dập lò nhanh sau khi vận hành ở trạng thái cân bằng. Trong hầu hết các trường hợp, công suất phân rã không thay đổi đáng kể trong tiến trình sự cố (vì nó xảy ra trong khoảng thời gian rất ngắn), do đó kết quả tính toán cơ bản có thể được khớp bằng cách sử dụng một loạt các hàm mũ, và sự phù hợp của đường cong đơn giản được thêm vào công suất phân hạch ước lượng từ các chương trình tính toán vật lý.

Trong các trường hợp ngoại lệ, chẳng hạn như một tai nạn xảy ra trong quá trình vận hành công suất, kết quả sẽ không chính xác lắm, nhưng cũng như bất kỳ phân tích nào, có thể giả thiết một công suất phân rã phù hợp với hoạt động của lò ở trạng thái ổn định kéo dài trước khi tai nạn xảy ra. Sự cân bằng giữa các giả thiết đơn giản cho phép ràng buộc bảo thủ và những giả định thực tế hơn đòi hỏi các công cụ phân tích phức tạp hơn rất phổ biến hiện nay trong phân tích an toàn (phương pháp ước lượng tốt nhất). Vấn đề của phân tích an toàn là khi nào sử dụng các giả định giới hạn (phương pháp bảo thủ) và khi nào sử dụng các mô hình phức tạp thực tế (ước lượng tốt nhất). Do các mô hình giới hạn có thể dẫn đến những hạn chế không cần thiết trong vận hành nên các phương pháp ước lượng tốt nhất cùng với đánh giá độ không chắc chắn đang được áp dụng ngày càng phổ biến hơn trong các phân tích an toàn.

3. Nhiên liệu hạt nhân

Các thông số cơ bản liên quan đến nhiên liệu trong lò phản ứng bao gồm:

- Tính toán vện của vỏ bọc nhiên liệu

- Tổng lượng sản phẩm phân hạch trong (và phát thải từ) nhiên liệu, và
 - Nhiệt độ nhiên liệu.
- Dự báo nhiệt độ nhiên liệu trong vùng hoạt lò phản ứng rất quan trọng vì:
- Nó quyết định nhiệt độ lớp vỏ bọc và do đó tính toàn vẹn của vỏ;
 - Việc tan chảy nhiên liệu có giới hạn có thể dẫn đến sự hư hỏng của vỏ nhiên liệu;
 - Giải phóng các sản phẩm phân hạch ra khỏi nhiên liệu tăng với nhiệt độ nhiên liệu;
 - Phản hồi độ phản ứng theo nhiệt độ nhiên liệu xảy ra, mặc dù nó là nhỏ

3.1. Các sản phẩm phân hạch trong nhiên liệu

Trong điều kiện vận hành bình thường, tất cả các sản phẩm phân hạch được hình thành trong các hạt nhiên liệu; Chúng được giữ ở đó (ngoại trừ một vài hạt phát sinh trực tiếp vào khoảng cách giữa các hạt và khí) cho đến khi chúng được giải phóng khỏi hạt bằng cách khuếch tán. Những sản phẩm phân hạch dễ bay hơi được phóng ra tạo thành hỗn hợp khí bên trong lớp vỏ nhiên liệu. Do đó, thường người ta phân loại các sản phẩm phân hạch thành ba nhóm là: a) Tổng lượng nằm trong nhiên liệu, (b) Tổng lượng trong ranh giới của các hạt nhiên liệu, và (c) Tổng lượng trong khe khí.

Tổng lượng trong khe khí bao gồm các khí sản phẩm phân hạch trong các khe tiếp giáp giữa các viên nhiên liệu và giữa nhiên liệu với vỏ bọc. Nếu vỏ bọc nhiên liệu bị hư hỏng thì lượng khí phân hạch trong khe khí thoát ra rất nhanh, lượng khí phân hạch trong ranh giới của các hạt nhiên liệu sẽ thoát ra chậm hơn và lượng nằm trong nhiên liệu sẽ chậm hơn nhiều. Ở nhiệt độ nhiên liệu tương đối thấp, các quá trình khuếch tán xảy ra rất chậm, do đó gần như tất cả các đồng vị vẫn còn trong hạt nhiên liệu. (Ngoại trừ trường hợp khi UO_2 tiếp xúc với không khí ở nhiệt độ vừa phải, trong trường hợp này, oxy hóa đến các trạng thái cao hơn diễn ra, và cấu trúc hạt bị phá hủy. Nhiều sản phẩm phân hạch sau đó được giải phóng ra ngoài thùng lò.

Tại bất kỳ độ sâu cháy nhiên liệu nào, phần lớn hơn các khí phân hạch được giải phóng gần tâm của viên nhiên liệu, nơi có nhiệt độ cao nhất. Tất cả các sản phẩm phân hạch dễ bay hơi có xu hướng di chuyển xuống theo gradient

hiệt độ về phía bên ngoài viên nhiên liệu. Sự khuếch tán của chúng được hỗ trợ bởi các vết nứt của viên dưới ảnh hưởng của gradient nhiệt độ; Sự rạn nứt này tăng lên theo nhiệt độ tại tâm viên nhiên liệu và độ sâu cháy nhiên liệu.

Tóm tắt:

(a) ở nhiệt độ hoặc độ sâu cháy thấp, gần như tất cả các sản phẩm phân hạch bị mắc kẹt trong các hạt nhiên liệu;

(b) sản phẩm phân hạch bị mắc kẹt ở ranh giới hạt tăng với nhiệt độ và độ sâu cháy;

(c) Lượng khí phân hạch trong khe khí tăng theo nhiệt độ nhiên liệu và độ sâu cháy.

3.2. Nhiệt độ nhiên liệu

Xét độ dẫn nhiệt trạng thái ổn định ba chiều trong môi trường. Giả sử rằng năng lượng đang được cung cấp trong môi trường với tốc độ thể tích H , bảo toàn năng lượng có thể được mô tả như sau:

(Tốc độ thay đổi nội năng) = (Tốc độ giải phóng năng lượng ra môi trường) - (Tốc độ mất năng lượng do dẫn nhiệt), hoặc tại bất kỳ điểm nào,

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = H + k \nabla^2 T$$

Trong đó T là nhiệt độ, k là độ dẫn nhiệt, ρ - mật độ, và c nhiệt dung riêng. Lưu ý sự tương đồng với Phương trình khuếch tán neutron ở trên.

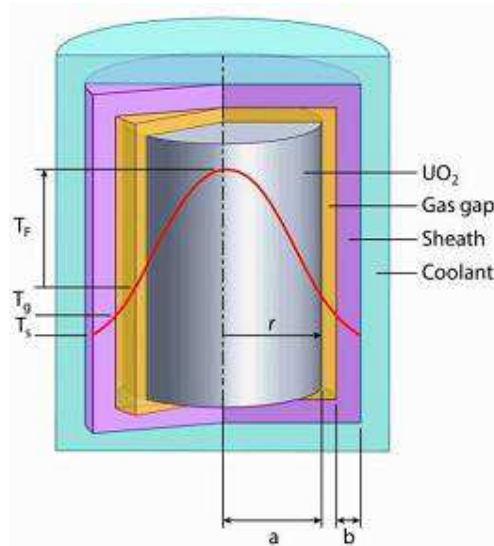
Xét sự dẫn nhiệt ổn định một chiều trong một viên nhiên liệu hình trụ. Trong tọa độ hình trụ,

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} = -\frac{H}{k_F}$$

Trong đó k_F là độ dẫn nhiệt trong nhiên liệu. Tích phân ta có

$$T(r) = T(0) - \frac{Hr^2}{4k_F}$$

cho phân bố nhiệt độ parabol điển hình của nhiệt độ trong một phần tử nhiên liệu, như thể hiện trong hình 1.



Hình 1. Phân bố nhiệt độ trong viên nhiên liệu của lò phản ứng

Chúng ta có thể áp dụng cùng phương pháp với độ giảm nhiệt độ ΔT_s qua lớp vỏ bọc (trong đó nhiệt sinh ra bên trong $H_s = 0$):

$$\Delta T_s = T_{Si} - T_{So} = \frac{Ha^2 \ln[(a+b)/a]}{2k_s}$$

Các chỉ số i và o liên quan đến bề mặt bên trong và bên ngoài của vỏ. Có thể rút ra kết luận rằng sự giảm nhiệt độ từ tâm nhiên liệu đến phần ngoài của vỏ chỉ đơn giản là $\Delta T_F + \Delta T_s$. Thực ra - khoảng cách giữa nhiên liệu và vỏ bọc cung cấp khả năng chịu nhiệt tốt hơn, vì vậy ta có thể viết:

$$q = h_g (T_F - T_{Si})$$

Trong đó h_g là hệ số truyền nhiệt trong khe khí, là một hàm phức tạp của độ nhám bề mặt, áp suất tiếp xúc, và nhiệt độ và được xác định bằng thí nghiệm.

Mối quan hệ giữa nhiệt độ vỏ bọc và nhiệt độ chất làm mát có thể được đưa ra từ biểu thức:

$$q = h(T_{So} - T_C)$$

Trong đó q là thông lượng nhiệt trên một đơn vị diện tích (tới chất làm mát), T_C là nhiệt độ chất làm mát, và h là hệ số truyền nhiệt đối lưu. Ở trạng thái ổn định, toàn bộ lượng nhiệt được tạo ra trong nhiên liệu được chuyển sang chất làm mát, vì vậy với chiều dài của nhiên liệu ℓ ,

$$q = \frac{H\pi a^2 \ell}{2\pi(a+b)\ell},$$

Do đó,

$$T_{so} - T_C = \frac{Ha^2}{2h(a+b)}$$

Nhiệt dung (heat capacity), c , không đưa vào các phương trình trạng thái ổn định, nhưng lại quan trọng trong các chuyển tiếp. Giá trị cho UO_2 và Zircaloy-4 tương ứng là 0,5 và 0,4 J/g- $^{\circ}C$. Giá trị tương đối lớn của c và điểm nóng chảy cao (2840 $^{\circ}C$) đối với UO_2 thể hiện các đặc tính an toàn quan trọng: thông thường, gần như gấp đôi năng lượng lưu trữ trong vận hành bình thường, bên trong viên UO_2 trước khi tan chảy. Mặt khác, nhiên liệu kim loại có nhiệt dung thấp và nóng chảy ở nhiệt độ thấp hơn, nhưng có độ dẫn nhiệt cao hơn, thường cao gấp 10 lần UO_2 .

3.3. Áp suất khí bên trong thanh nhiên liệu

Khoảng khe khí kín rất nhỏ trong thanh nhiên liệu rất nhạy với áp suất khí trong vỏ nhiên liệu. Một lượng nhỏ khí (heli) nạp vào không gian này khi chế tạo để đạt được sự phân bố áp suất bên trong thanh nhiên liệu phù hợp với điều kiện vận hành. Khi quá trình sâu cháy nhiên liệu tăng, áp suất khí sẽ làm cho vỏ bọc có thể đẩy các viên nhiên liệu lên; Hệ số truyền nhiệt của khe khí giảm vì lớp vỏ bọc có thể phồng ra khỏi viên nhiên liệu. Sự giảm này dẫn đến nhiệt độ nhiên liệu cao hơn, giải phóng khí phân hạch lớn hơn từ nhiên liệu, và cuối cùng là áp suất khí cao hơn. Một điểm cân bằng mới đạt được. Trong sự có, áp lực khí là động lực làm cho vỏ bọc căng.

3.4. Sự căng lớp vỏ bọc

Xét sự cố LOCA vỡ lớn làm ví dụ. Một trong những mục tiêu của phân tích LOCA là dự đoán số vỏ bọc nhiên liệu bị hư hỏng (phồng rộp, nứt vỡ .v.v.); Điều này xác định lượng chất phóng xạ được thoát ra chất làm mát và được tính như đầu vào cho các tính toán phát thải vào nhà lò và ước lượng liều lượng công chúng.

Bởi vì nhiên liệu nóng lên nhanh chóng, áp suất khí bên trong vỏ tăng lên tương đối so với áp suất chất làm mát và có thể làm cho vỏ bọc căng lên. Sự căng đồng dạng ít nhất là 5% sẽ không dẫn đến hư hỏng vỏ bọc; Tuy nhiên, những sức căng lớn hơn có thể dẫn đến sự bất ổn cục bộ, phồng rộp và hư hỏng.

Các phương trình tốc độ biến dạng là các hàm phức tạp của thành phần vật liệu, trạng thái vật liệu, nhiệt độ, bức xạ và ứng suất ngang và được xác định từ các thực nghiệm. Thông thường, dạng của chúng được thiết lập như sau.

Xác định ứng suất ngang σ qua lớp vỏ như

$$\sigma = \frac{Pr}{w}$$

Trong đó:

P – Sự chênh lệch áp suất trong thanh nhiên liệu,

R – Bán kính thanh,

w – độ dày thanh.

Tỷ suất biến dạng sau đó được biểu diễn bằng các số hạng tương ứng như sau

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = A\sigma^n e^{-k/T} + B\sigma^m e^{-l/T}$$

Trong đó ϵ is độ biến dạng, A, B, k, l, m, n được xác định bằng thực nghiệm, và T là nhiệt độ.

Phần mềm ANSYS

Áp dụng các phương pháp giải bằng số như phần tử hữu hạn (FEM), thể tích

hữu hạn (FVM) .v.v. Các bài toán kỹ thuật về cơ, nhiệt, thủy khí, điện từ, sau khi được mô hình hóa và xây dựng mô hình toán học cho phép giải bài toán với các điều kiện biên cụ thể với số bậc tự do lớn. ANSYS (Analysis Systems) là gói phần mềm được sử dụng rộng rãi trong mô phỏng, thiết kế công nghiệp, được sử dụng rộng rãi trên thế giới trong hầu hết các lĩnh vực: nhiệt, dòng chảy, kết cấu, điện từ, tương tác giữa các môi trường và các hệ vật lý khác nhau (đa trường, đa vật lý).

ANSYS cùng với nhiều công cụ CFD khác cũng đã được áp dụng trong thiết kế, phân tích các hệ thống hạt nhân.

Phần mềm ANSYS bao gồm nhiều môđun khác nhau như ANSYS Fluent, ANSYS mechanical, ANSYS CFX, ANSYS LS-DYNA, ANSYS FLORAN .v.v.

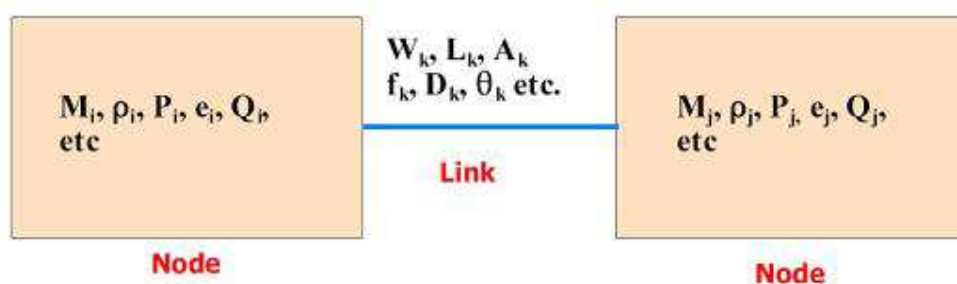
4. Hệ thống tải nhiệt trong lò phản ứng

Tính chất của hệ thống truyền tải nhiệt được dự đoán bằng cách giải các phương trình bảo toàn khối lượng, năng lượng và mômen động lượng cho dòng chảy hai pha không cân bằng thường trong dạng một chiều. Hai pha bao gồm nước và hơi nước. "Không cân bằng" có nghĩa là các pha hơi và nước, thậm chí ở cùng vị trí, có thể có áp suất khác nhau, nhiệt độ và tốc độ dòng chảy khác nhau. Các chuyển tiếp (transient) có nghĩa là hành vi mong muốn là hàm của thời gian. Các chương trình tính toán, phân tích an toàn thủy nhiệt phổ biến hiện nay là mô hình một chiều, đôi khi có tính đến hai hoặc ba chiều được sử dụng cho các bộ phận như vùng hoạt lò phản ứng và ống U trong SG. Các chương trình mô hình hệ thống vận chuyển nhiệt bao gồm:

- Phương trình trạng thái cho các pha khác nhau
- Các mô hình thành phần cho SG, các kênh nhiên liệu, nhiên liệu, phần thứ cấp, van, máy bơm, v.v.
- Tương quan tổn thất áp suất, truyền nhiệt (bao gồm thông lượng nhiệt tới hạn (CHF)), các chế độ dòng chảy

- Các mối quan hệ cấu thành: đó là các phương trình mô tả chuyển khối lượng, xung lượng và năng lượng giữa các pha. Các tập hợp các mối quan hệ cấu thành phụ thuộc vào chế độ dòng chảy.
- Các lời giải bằng số.

Hầu hết các chương trình mô phỏng thủy nhiệt cho lò phản ứng rời rạc hóa mạch tải nhiệt thành các nút chứa khối lượng (chất tải nhiệt), và do đó năng lượng, và các liên kết nối các nút, được đặc trưng bởi dòng chảy, chiều dài, độ nhám, đường kính thủy lực, ... Phương trình bảo toàn năng lượng và khối lượng được viết cho Nút, và phương trình bảo toàn momen động lượng được viết cho các liên kết. Chúng ta xét ví dụ đơn giản sau (dòng chảy một chiều trong một đường ống cấp). Hình 2 chỉ ra 2 nút i và j với liên kết k.



Hình 2. Cấu trúc nút / liên kết

Phương trình bảo toàn khối lượng cho nút i là:

$$\frac{dM_i}{dt} = \sum_k W_k$$

Trong đó W_k là các dòng khối đi vào và đi ra khỏi nút i theo các liên kết k.

Phương trình bảo toàn momen động lượng áp dụng cho liên kết k (bỏ qua lực trọng trường):

$$\frac{dW_k}{dt} = \frac{A_k}{L_k} \left[(P_i - P_j) - \left(\frac{f_k L_k}{D_k} + k_k \right) \frac{W_k^2}{2g_c \rho A_k^2} \right]$$

Trong đó cho liên kết:

W – dòng khối đi vào liên kết k (giữa nút i và j)

A – Tiết diện dòng chảy

P – Áp suất trong các nút với liên kết k

L – chiều dài

D – Đường kính thủy lực

F – hệ số ma sát

$(fL/D + k)$ là hệ số tổn thất áp suất do sự thay đổi tiết diện, hướng dòng chảy, v.v.

Số hạng đầu tiên chỉ đơn giản là định luật Newton áp dụng cho chất lỏng có sự chênh lệch áp suất; Số hạng thứ hai là sự mất mát do ma sát cộng với những ảnh hưởng khác gây tổn thất áp suất. Các số hạng cho máy bơm và lực trọng trường có thể được thêm vào.

Phương trình bảo toàn năng lượng áp dụng cho mỗi nút:

$$\frac{dU_i}{dt} = \sum W_{in} e_{in} - \sum W_{out} e_{out} + Q_i$$

Trong đó

U_i – Nội năng của nút i

Q_i – Nhiệt sinh ra trong nút i.

Tổng là các năng lượng đi vào và đi ra khỏi nút i do di chuyển khối lượng.

Ba phương trình được áp dụng cho mỗi pha. Có bốn biến số: khối lượng, momen động lượng, nhiệt độ, và áp suất. Cần có phương trình thứ tư là phương trình trạng thái cho mỗi chất lỏng, thông thường ở dạng:

$$\rho = f(P, T)$$

Trong các chương trình phân tích an toàn, phương trình trạng thái được sử dụng dưới dạng các bảng chi tiết cho các tính chất của nước và hơi nước hoặc được làm khớp với các hiệu chỉnh.

Chương trình RELAP5

RELAP5 (Reactor Excursion and Leak Analysis Program) được phát triển tại phòng thí nghiệm quốc gia Idaho (INL), Hoa Kỳ. Chương trình thực hiện mô hình hoá nhà máy điện hạt nhân trong các điều kiện vận hành bình thường cũng như chuyển tiếp, sự cố, đặc biệt là các sự cố LOCA.

Các phiên bản RELAP5:

RELAP5/MOD 0 1979	RELAP5/MOD 2.5 1989
RELAP5/MOD 1 1982	RELAP5/MOD 3 1990
RELAP5/MOD 1.5 1982	RELAP5/MOD 3.1 1993
RELAP5/MOD 2 1985	RELAP5/MOD 3.2 1995

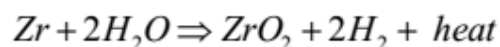
Phiên bản cuối cùng (1 chiều): RELAP5/MOD 3.3 được hỗ trợ phát triển bởi US NRC và cộng đồng sử dụng RELAP5 trong khuôn khổ chương trình ICAP (International Code Assessment and Applications Program) và chương trình CAMP (Code Applications and Maintenance Program) trước đó.

Các phiên bản RELAP5-3D được phát triển từ 1997 cho đến nay. Phiên bản mới nhất 4.3 (2015).

Chương trình bao gồm nhiều mô hình thành phần chung đáp ứng mô phỏng hệ thống nhà máy. Các mô hình thành phần bao gồm máy bơm, van, ống dẫn, các cấu trúc hấp thụ hoặc tỏa nhiệt, kết hợp với động học lò điểm, các bộ đốt điện, bơm phản lực, tuabin, máy tách hơi, bình tích nước và các thành phần của hệ thống điều khiển. Ngoài ra, các mô hình quá trình đặc biệt bao gồm các hiệu ứng như thay đổi dạng hình học (form loss), dòng chảy thay đổi diện tích đột ngột, phân nhánh, dòng chảy nghẽn (choking) và vận chuyển khí không ngưng tụ.

5. Khí hidro

Ở nhiệt độ cao, Zircaloy bị ô xi hóa do phản ứng với hơi nước phát sinh nhiệt và khí hidro:



Đây là mối nguy hiểm tiềm năng: Hidro lưu giữ trong nhà lò (một lượng lớn hidro có thể phát sinh nhanh chóng trong sự cố LOCA khi hệ thống an toàn ECCS thất bại hoặc trong sự cố nghiêm trọng gây hư hỏng vùng hoạt) và có thể trở nên dễ cháy hoặc nổ; Hidro cũng có thể được sản sinh chậm trong thời gian dài bởi sự phân ly phóng xạ của nước do hệ ECCS khi nó luân chuyển qua vùng hoạt;

- Nhiệt sinh ra bởi phản ứng hóa học làm tăng nhiệt độ nhiên liệu và áp suất trong thanh;
- Sự có mặt của khí không ngưng tụ với số lượng lớn có thể cản trở nước từ ECCS đổ vào nếu nhân viên vận hành cố gắng phục hồi từ sự suy yếu của ECCS bằng cách tiêm nước muộn (nó có thể tạo thành các "bong bóng khí" trong thùng lò phản ứng như trong tai nạn TMI. Hidro thoát ra nhà lò có chứa oxy, tạo ra một hỗn hợp dễ cháy với 9% hidro và thực sự đã cháy mà không có hậu quả nghiêm trọng); Và
- Việc tạo thành ô xit zirconi có thể làm cho vỏ bọc dễ dàng bị vỡ, chúng có thể phân mảnh và ngăn dòng chảy nước làm mát.

Tương quan của tốc độ phản ứng của hơi nước và Zircaloy do đó tạo thành một phần thiết yếu của chương trình phân tích cho các kênh nhiên liệu.

Tốc độ phản ứng rất cao ở khoảng nhiệt độ 1400°C-1500°C, nghĩa là, nhiệt nó tạo ra giữ cho phản ứng hóa học xảy ra mà không cần có thêm nhiệt đầu vào. Trong các lò phản ứng nước nhẹ, đây là điều được đặc biệt quan tâm: các phần tử nhiên liệu gần nhau, do đó không có nơi thoát nhiệt. Theo yêu cầu pháp quy giới hạn nghiêm ngặt về nhiệt độ lớp vỏ trong sự cố trong cơ sở thiết kế (DBA) là không vượt quá 1200°C

6. Boong ke nhà lò

Về cơ bản, thuộc tính của nhà lò được điều chỉnh bởi cùng một hiện tượng vật lý như hệ thống tải nhiệt, với một vài điểm cần nhấn mạnh:

- Thê tích nhà lò được chia thành từng phần, và dòng chảy trong các khoang lớn hơn là ba chiều;

- Có một số loại chất lỏng khác nhau tồn tại cùng nhau: không khí, nước và hơi nước từ sự cô, và hiđrô nếu lớp vỏ bị oxy hóa mạnh.
- Nhiệt được thêm vào bởi hơi nước nóng và cũng như bởi sự phân rã phóng xạ của các sản phẩm phân hạch được vận chuyển vào không khí trong nhà lò do rò rỉ chất tải nhiệt; Nhiệt được lấy đi bằng phun nước, ngưng tụ trên bề mặt nhà lò và bề mặt thiết bị, hệ làm mát không khí nhà lò, và gián tiếp bởi ECCS trong chế độ phục hồi
- Áp lực cũng có thể tăng lên do nhiệt độ trong nhà lò tăng lên.

Các chương trình phân tích nhà lò thường có các mô hình con (sub model) cho từng hiện tượng trên.

Nhiều chương trình phân tích nhà lò cũng theo dõi chuyển động của các sản phẩm phân hạch cùng với các chất lỏng khác.

Các sản phẩm phân hạch có thể tồn tại như:

- Các khí trơ (noble gas) tương tác rất ít với nước hoặc bề mặt
- Ô xit triti từ chất tải nhiệt hoặc chất làm chậm
- Iốt, Sêzi, stronti ... tương tác mạnh với nước (hòa tan và ion hoá) và có xu hướng bám trên bề mặt
- Các actinides như plutoni. Chúng được giải phóng từ nhiên liệu nếu vùng hoạt bị phá hủy.
- Nói chung, I-131 là đồng vị phóng xạ đáng quan tâm do thời gian bán hủy ngắn (8,1 ngày), phát xạ gamma năng lượng cao và khả năng đi vào chuỗi thức ăn như mô tả trong Phần 7.3.

Khi độ pH của nước trong nhà lò cao, Iốt sẽ tan trong nước. Độ pH cao có thể được duy trì thông qua việc lưu trữ các hóa chất như tri-sodium phosphate ở các khu vực có thể bị ngập khi xảy ra sự cố. Tuy nhiên, một phần Iốt sẽ phản ứng với các chất hữu cơ trong nhà lò và hình thành nên methyl iodide, rất dễ bay hơi, không tan hết được, và khó giữ được trên các bộ lọc. Khi xảy ra sự cố, I-131 bị rò rỉ từ nhà lò và do đó có khả năng ở dạng hóa học này.

Chương trình MELCOR

MELCOR là chương trình tính toán được tích hợp đầy đủ các mô hình thành

phần của nhà máy điện hạt nhân, được phát triển bởi Phòng thí nghiệm Quốc gia Sandia cho US NRC để mô hình sự tiến triển của các tai nạn nghiêm trọng trong nhà máy điện hạt nhân. Một loạt các hiện tượng tai nạn nghiêm trọng trong cả hai lò phản ứng nước sôi và nước áp lực được xử lý trong MELCOR trong một khuôn khổ thống nhất. Ứng dụng MELCOR bao gồm ước lượng các số hạng nguồn từ tai nạn nghiêm trọng, độ nhạy và sự không chắc chắn trong nhiều ứng dụng khác nhau. Mô hình vùng hoạt nóng chảy và sự hư hỏng đáy thùng lò cùng với phát thải phóng xạ ra không gian nhà lò cũng được mô phỏng trong MELCOR.

7. Nguồn các sản phẩm phân hạch, phát tán trong khí quyển và liều bức xạ

7.1 Nguồn các sản phẩm phân hạch

Tổng lượng sản phẩm phân hạch trong lò phản ứng đang vận hành có thể được ước tính như sau. Giả sử lò phản ứng hoạt động với công suất P MW (th). Nếu năng lượng thu hồi được trên mỗi phân hạch được giả định là 200 MeV, tổng số phân hạch xảy ra mỗi giây là

$$\text{Fission rate} = P(\text{MW}) \times \frac{10^6 \text{ joule}}{\text{MW} - \text{sec}} \times \frac{\text{fissions}}{200 \text{ MeV}} \times \frac{\text{MeV}}{1.60 \times 10^{-13} \text{ joule}}.$$

Nếu suất ra tích lũy của sản phẩm phân hạch thứ i (suất ra của sản phẩm phân hạch cộng với các suất ra của tất cả các hạt nhân tiền với thời gian sống ngắn của nó) là γ_i nguyên tử trên mỗi phân hạch, thì tốc độ tạo thành đồng vị này là

$$\text{Tốc độ tạo thành} = 3.13 \times 10^{16} P \gamma_i \text{ nguyên tử/sec}$$

Hoạt độ tại thời điểm t của sản phẩm phân hạch này trong vùng hoạt của lò sẽ là

$$\alpha_i = 3.13 \times 10^{16} P \gamma_i (1 - e^{-\lambda_i t}) \text{ disintegrations/sec},$$

Hay trong đơn vị Curi

$$\alpha_i = 3.13 \times 10^{16} P \gamma_i (1 - e^{-\lambda_i t}) \text{ Bq} \times \frac{1 \text{ Ci}}{3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}}.$$

Nếu hoạt độ là bão hòa, tức là nếu $\lambda_i \gg 1$, phương trình trên có thể viết lại

$$\alpha_i = 8.46 \times 10^5 P \gamma \text{ Ci.}$$

Bảng sau cho suất ra của các loại khí phân hạch quan trọng nhất và các sản phẩm phân hạch iốt được tính cho một nhà máy điện 1000 MWe điển hình (PWR) vào cuối chu kỳ nhiên liệu.

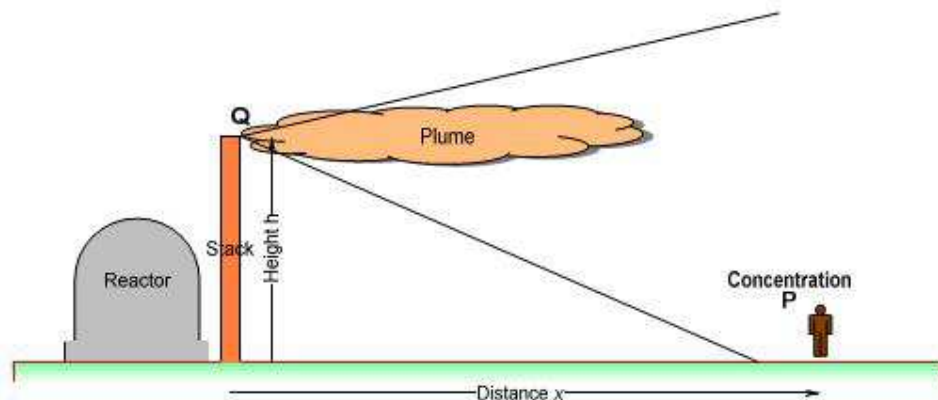
Bảng 1. Tổng lượng trong vùng hoạt điển hình của các sản phẩm phân hạch dễ bay hơi

Nuclide*	Half-life [†]	Fission yield [‡]	Curies ($\times 10^{-85}$)
^{85m} Kr	4.4 h	0.0133	0.24
⁸⁵ Kr	10.76 y	0.00285	0.0056
⁸⁷ Kr	76 m	0.0237	0.47
⁸⁸ Kr	2.79 h	0.0364	0.68
¹³³ Xe	5.27 d	0.0677	1.7
¹³⁵ Xe	9.2 h	0.0672	0.34
¹³¹ I	8.04 d	0.0277	0.85
¹³² I	2.28 h	0.0413	1.2
¹³³ I	20.8 h	0.0676	1.7
¹³⁴ I	52.3 m	0.0718	1.9
¹³⁵ I	6.7 h	0.0639	1.5

* Superscript *m* refers to a nuclide in an isomeric state (see Section 2.8).

7.2 Phát tán trong khí quyển

Xét nhà lò sau sự cố trong đó nồng độ của một nuclit là $C \text{ Bq/m}^3$. Giả sử tỷ lệ rò rỉ $V \text{ m}^3/\text{s}$ vào khí quyển ở độ cao h mét, như thể hiện trong hình 3.



Hình 3. Phát tán trong không khí

Tốc độ phát tán Q được cho bằng biểu thức:

$$Q(Bq / Sec) = C(Bq / m^3) \times V(m^3 / sec)$$

Sự phát thải này được phân tán vào vùng lân cận bằng luồng phát thải. Với điều kiện thời tiết với vận tốc gió u và các dữ liệu khác, nồng độ vật liệu phóng xạ ở một khoảng cách và hướng từ nguồn có thể được tính từ mô hình phát tán Gauss

$$\chi = \left(\frac{2}{\pi} \right)^{1/2} \frac{Q}{\sigma_z \bar{u}} \frac{f}{\theta x} e^{-h^2 / 2\sigma_z^2}$$

Trong đó (xem hình):

χ – Nồng độ dài hạn trung bình theo sector (Bq/m³) ở khoảng cách x m tính từ nguồn và xem như đồng nhất trong sector

Q – tốc độ phát thải (Bq/s) từ nguồn ở độ cao h m

Σz – Hệ số khuếch tán theo độ cao (m)

θ – góc chia sector (radians)

f - phần thời gian gió thổi vào sector

u – tốc độ gió trung bình (m/s).

Chương trình RASCAL

RASCAL (Radiological Assessment System for Consequence AnaLysis) là công cụ được sử dụng bởi Trung tâm vận hành các biện pháp bảo vệ của US NRC để thực hiện các dự báo trong các sự cố bức xạ và điều kiện ứng phó khẩn cấp. RASCAL đã được NRC phát triển cách đây hơn 25 năm cung cấp công cụ để đánh giá nhanh sự cố hoặc tai nạn tại cơ sở được cấp phép của NRC và ra quyết định trợ giúp như liệu công chúng có nên sơ tán hoặc trú ẩn tại chỗ hay không. RASCAL đánh giá các phóng xạ khí quyển từ các nhà máy điện hạt nhân, bể chứa nhiên liệu đã qua sử dụng, thùng chứa nhiên liệu, các cơ sở xử lý chất phóng xạ.

7.3. Liều bức xạ

Sự phát thải vật liệu phóng xạ từ nhà lò dẫn đến liều bên ngoài đối với người (thường được gọi là liều "đám mây" – “cloud” dose) phụ thuộc vào mức độ bức xạ môi trường (phông) và liều chiếu trong phụ thuộc vào các điều kiện hít thở (và, trong thời gian dài, ăn các thực phẩm bị ô nhiễm) . Liều chiếu ngoài là hàm của thời gian phơi nhiễm do bức xạ từ môi trường xung quanh. Liều chiếu trong là hàm của sự hấp thụ bức xạ và thời gian cư trú trong cơ thể.

Chẳng hạn, liều từ I-131 có thể từ các con đường sau:

- Phát thải từ nhà lò
- Lưu giữ trong cây cỏ
- Bò ăn cỏ và cho ra sữa uống

Ngoài ra, I-131 có thể đi vào các loại rau củ, quả được ăn trực tiếp. Liều chiếu ngoài (trực tiếp) từ việc phát tán trong khí quyển của I-131 cũng có thể là đáng kể.

Các bảng chi tiết đã được chuẩn bị cho mỗi đồng vị phóng xạ mà nó có thể chuyển đổi từ nồng độ bên ngoài, hít phải và ăn uống thành liều chiếu. Tuy nhiên, chúng thường được cho bởi loại bức xạ chứ không phải bởi các đồng vị phóng xạ;

Chương trình MCNP

MCNP (Monte carlo N-Particle) là chương trình mô phỏng đa mục tiêu dùng để mô phỏng vận chuyển của các hạt photon, electron và neutron trong môi trường hoặc vận chuyển kết hợp (couple) neutron/photon/electron. Ngoài ra, phiên bản mở rộng MCNPX còn mô phỏng vận chuyển các ion nặng và các hạt cơ bản. Phiên bản đầu tiên được phát triển vào 1977 tại phòng thí nghiệm quốc gia Los Alamos (Hoa Kỳ).

Các lĩnh vực áp dụng cụ thể bao gồm, nhưng không giới hạn, bảo vệ chống phóng xạ và đo liều, che chắn bức xạ, chụp X quang, vật lý y học, an toàn hạt nhân, phân tích và thiết kế các detector, thiết kế kênh chiếu trên máy gia tốc, thiết kế lò phản ứng hạt nhân và phản ứng nhiệt hạch.

Chương trình xử lý cấu hình ba chiều tùy ý của vật liệu trong các ô mạng hình học bị giới hạn bởi các bề mặt bậc nhất, bậc hai và các mặt elip bậc bốn.

8. Kết luận

Có rất nhiều tài liệu chuyên sâu, mô tả chi tiết các quá trình, hiện tượng vật lý, hóa học xảy ra trong lò phản ứng hạt nhân và nhà máy điện hạt nhân. Tài liệu này cố gắng đưa ra một mô tả ngắn gọn các vấn đề mang tính cơ sở giúp người đọc có thể nhận biết vai trò và vị trí của các chương trình phân tích đưa ra trong nghiên cứu, học hỏi về tính toán vật lý lò phản ứng, mối liên hệ giữa tính toán vật lý và thủy nhiệt, các hệ thống lò phản ứng, hệ thống tải nhiệt, hệ thống an toàn giam giữ chất phóng xạ và những nguy cơ tiềm ẩn gây sự cố. Các chương trình phân tích cho ta bức tranh về:

- Thiết kế vật lý nhiên liệu và vùng hoạt lò phản ứng (Chương trình SRAC)
- Tính toán tới hạn và bảo vệ chống bức xạ (chương trình MCNP)
- Phân tích và đánh giá na toàn thủy nhiệt (Chương trình RELAP5)
- Phân tích an toàn khi xảy ra sự cố nghiêm trọng gây hư hỏng vùng hoạt và tạo ra nguồn phát thải (Chương trình MELCOR)
- Đánh giá phát tán phóng xạ trong khí quyển từ các sự cố phóng xạ (Chương trình RASCAL)
- Các công cụ CFD phân tích đa vật lý (multiphysics) các quá trình hiện tượng ở mọi tỷ lệ từ vi mô đến vĩ mô (Chương trình ANSYS)

Các tài liệu hướng dẫn sử dụng chương trình cùng với cơ sở lý thuyết của các phương pháp tính toán cần được nghiên cứu kỹ trước khi sử dụng các chương trình vào các bài toán thực tế. Các bài thực hành cùng với phần lý thuyết đưa ra chỉ mang tính sơ lược và đơn giản giúp người học bước đầu tiếp cận đến việc sử dụng chương trình, tạo điều kiện cho việc khai thác chương trình sau này.