

CHƯƠNG TRÌNH MELCOR

CÁC MÔ HÌNH HƯ HỎNG VÙNG HOẠT

VÀ ĐÁY THÙNG LÒ PHẢN ỨNG

NỘI DUNG

1. Mở đầu	2
2. Mô tả chung về MELCOR.....	2
3. Chạy chương trình MELCOR.....	5
4. Chương trình MELCOR với gói COR.....	7
5. Mô hình chảy nền.....	8
6. Dòng dừng (Steady Flow).....	8
7. Các khối gây nghẽn dòng.....	10
8. Mô hình hư hỏng các cấu trúc đỡ	11
8.1. Hư hỏng do chảy dẻo	11
8.2. Hư hỏng do oằn	12
8.3. Hư hỏng do rão nhiệt.....	12
9. Mô hình đáy thùng lò.....	13
PHỤ LỤC: SỰ CỐ NÓNG CHẢY VÙNG HOẠT LÒ PHẢN ỨNG HẠT NHÂN	16
1. Ý nghĩa của nghiên cứu hư hỏng thùng lò trong điều kiện sự cố nghiêm trọng	16
2. Các quá trình và hiện tượng vật lý trong sự cố nóng chảy vùng hoạt của lò phản ứng.	17
2.1. Tiến trình sự cố dẫn đến nóng chảy vùng hoạt của lò phản ứng	18
2.2. Các giai đoạn sớm của quá trình nóng chảy vùng hoạt	20
2.3 . Các giai đoạn sau của quá trình nóng chảy vùng hoạt.....	23
2.4. Các quá trình xảy ra trong khoang đáy thùng lò phản ứng.....	27
3. Cơ sở dữ liệu thực nghiệm	30
4. Tai nạn nhà máy điện hạt nhân TMI-2	33
5. Các tiếp cận mô hình trong các chương trình phân tích sự cố nghiêm trọng.....	35

1. Mở đầu

Nghiên cứu và phát triển các mô hình xác định cơ chế hư hỏng đáy thùng lò phản ứng là một trong những vấn đề quan trọng cho việc thiết lập các chiến lược quản lý tai nạn nghiêm trọng cho các lò phản ứng nước nhẹ sau tai nạn TMI 2.

Các hiện tượng tai nạn nghiêm trọng của nhà máy điện hạt nhân có sự không chắc chắn (bất định) rất lớn. Để duy trì sự toàn vẹn và đảm bảo an toàn của lò phản ứng hạt nhân đối với tai nạn nghiêm trọng, cần có những hiểu biết nhất định các hiện tượng tai nạn nghiêm trọng và có thể đề cập nghiên cứu tiến trình tai nạn một cách chính xác bằng cách sử dụng các chương trình máy tính. Hơn nữa, điều quan trọng là đạt được khả năng phát triển kỹ thuật và các công cụ đánh giá để thiết kế lò phản ứng hạt nhân tiên tiến cũng như để ngăn ngừa và giảm nhẹ hậu quả tai nạn nghiêm trọng.

2. Mô tả chung về MELCOR

MELCOR (**M**ethods for **E**stimation of **L**eakages and **C**onsequences of **R**eleases) thực hiện mô hình hóa các tiến triển của sự cố nặng trong lò phản ứng nhà máy điện hạt nhân nước nhẹ (LWR). MELCOR là chương trình tích hợp đầy đủ mô hình các thành phần chính của lò phản ứng và tòa nhà lò, đặc biệt là mô hình thùng lò phản ứng với vùng hoạt và các cấu trúc hỗ trợ cũng như khoang đáy thùng lò. MELCOR được phát triển tại phòng thí nghiệm quốc gia Sandia (SNL), Hoa Kỳ. Được hỗ trợ bởi cơ quan pháp quy hạt nhân US NRC và được xây dựng ban đầu như một công cụ đánh giá rủi ro nhà máy thế hệ thứ hai và cung cấp dữ liệu cho đánh giá số hạng nguồn, ngày nay MELCOR đã được phát triển và áp dụng cho nghiên cứu, đánh giá các sự cố nặng và là một trong các chương trình chuẩn quốc tế được nhiều nước sử dụng.

MELCOR đã được NRC bắt đầu phát triển vào những năm 1980 tại phòng thí nghiệm quốc gia Sandia, do US NRC hỗ trợ nhằm cung cấp công cụ ước tính về nguy cơ liên quan đến sự cố nóng chảy vùng hoạt của lò phản ứng trong các nhà máy điện hạt nhân. Mục tiêu ban đầu của việc phát triển chương trình là xây dựng công cụ phân tích để định lượng đầy đủ các rủi ro tai nạn nghiêm trọng, trong một chương trình tính toán nhanh một cách hợp lý thể hiện theo các mô hình tham số, dựa trên các kiến thức hiện

tượng học về các tai nạn nghiêm trọng. Trong những phân tích này, các phiên bản MELCOR 1.8.5 và 1.8.6 được sử dụng rộng rãi, mặc dù hiện tại đã phát triển tới phiên bản 2.1.

MELCOR là chương trình máy tính được tích hợp hoàn toàn, có mục đích chính là mô phỏng sự tiến triển của các tai nạn trong các nhà máy điện hạt nhân lò phản ứng nước nhẹ. 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. Việc áp dụng MELCOR hiện nay bao gồm đánh giá các số hạng nguồn phóng xạ phát sinh trong sự cố nghiêm trọng, tính toán vện của đáy thùng lò phản ứng và các áp dụng khác.

MELCOR là chương trình tính toán tích hợp mức hệ thống mô phỏng mô hình tiến triển của tai nạn nghiêm trọng (các tai nạn gây ra hư hỏng vùng hoạt nghiêm trọng, có thể làm nóng chảy vùng hoạt, dẫn đến phát thải phóng xạ) trong các lò phản ứng hạt nhân. Phạm vi của mô hình tiến trình tai nạn bao gồm:

- Vùng hoạt bị hở nước (do mất mát chất làm mát), nhiên liệu bị đốt nóng, chảy nén, phồng rộp vỏ bọc thanh nhiên liệu, oxy hóa vỏ bọc, suy thoái nhiên liệu (mất dạng hình học), nóng chảy các vật liệu trong vùng hoạt và di chuyển khối nóng chảy.
- Tăng nhiệt tại đáy thùng lò phản ứng do các vật liệu nóng chảy di chuyển, dẫn đến sự hư hỏng của đáy thùng lò do các tải về nhiệt và cơ. giải phóng các mảnh vỡ nóng chảy vào khoang lò phản ứng.
- Tương tác giữa chất nóng chảy và bê tông trong khoang lò phản ứng dẫn đến phát sinh các son khí.
- Xuất hiện việc tạo, di chuyển và đốt cháy khí hydro trong và ngoài thùng lò phản ứng.
- Các sản phẩm phân hạch (dạng son khí và hơi) thoát ra từ vùng hoạt, vận chuyển và lắng đọng trong nhà lò.
- Nhà lò chịu tác động từ áp lực phun chất nóng chảy cao áp, sự quá áp do các khí không ngưng tụ bao gồm hydro, hoặc các cơ chế khác (ví dụ như đốt cháy hydro, lớp cốt thép bị gia nhiệt) và do đó dẫn đến hư hỏng nhà lò phản ứng.
- các sản phẩm phân hạch phát tán vào môi trường.

MELCOR có kiến trúc mô đun bao gồm một số "gói" nhằm giải quyết các khía cạnh khác nhau của phân tích tai nạn lò phản ứng. Các gói có ba loại:

- (1) Các hiện tượng vật lý cơ bản (tức là thủy động lực học, truyền nhiệt và truyền khối lượng cho các cấu trúc, sự xuống cấp của vùng hoạt và tái định vị, các cấu trúc vùng hoạt và các tương tác giữa chất làm mát và nhiên liệu, đốt cháy khí và vận chuyển hơi và son khí),
- (2) Dữ liệu cụ thể của thiết kế lò phản ứng (tức là, sự tạo nhiệt phân rã, hệ phun nước nhà lò và các hệ thống an toàn kỹ thuật, .v.v.), và
- (3) Các chức năng hỗ trợ (nhiệt động lực học, phương trình trạng thái, tính chất vật liệu, các tiện ích xử lý dữ liệu, và bộ giải phương trình).

Các gói /môđun quan trọng (nhóm (1)) được liệt kê trong Bảng 1.

Bảng 1. Các gói chương trình mô phỏng hiện tượng quan trọng trong MELCOR

Ký hiệu	Tên gói /môđun	Mô tả chức năng
BUR	Burn package	Mô phỏng việc đốt các khí trong các thể tích kiểm tra. Các mô hình xem xét các ảnh hưởng của đốt cháy trên cơ sở toàn bộ và dựa trên các mô hình đốt cháy trong chương trình HECTR 1.5
CAV	Cavity package	Bao gồm các mô hình về tương tác vùng hoạt nóng chảy-bê tông (hiện tượng bên ngoài thùng lò) và sự lan truyền chất nóng chảy. Tác động của việc truyền nhiệt, ăn mòn bê tông, thay đổi hình dạng khoang đáy, và sự phát sinh khí, sử dụng các mô hình lấy từ chương trình CORCON-Mod3.
COR	Core package	Các mô hình phản ứng nhiệt của vùng hoạt và các cấu trúc trong thùng lò, bên dưới vùng hoạt, bao gồm phần đáy trực tiếp dưới vùng hoạt. Gói này cũng mô phỏng việc di dời các vật liệu kết cấu trong quá trình nóng chảy, sự vón cục, hình thành bể nóng chảy và mảnh vụn, sự hồng học của thùng lò phản ứng, và phun các mảnh vụn vào khoang lò phản ứng.
CVH/FL	Control volume hydrodynamic	Các mô hình thủy nhiệt của nước, hơi và khí trong các thể tích kiểm tra được kết nối bởi các dòng chảy, bao gồm

	and flow path	hiện tượng bốc hơi và ngưng tụ.
FDI	Fuel dispersal package	Mô hình phun nhiên liệu nóng chảy ở áp suất thấp và phun nhiên liệu nóng chảy cao áp từ thùng lò phản ứng, và hành vi của các mảnh vỡ phân tán trong nhà lò (hiện tượng đốt nóng trực tiếp).
HS	Heat structure package	Mô phỏng sự dẫn nhiệt trong cấu trúc rắn, vững chắc và truyền năng lượng qua các bề mặt ranh giới. Khả năng mô hình hóa của các cấu trúc nhiệt là tổng quát và có thể bao gồm các thành phần và thành của thùng lò, các cấu trúc nhà lò, thanh nhiên liệu, ống dẫn bình sinh hơi, các đường ống, v.v.
RN	Radionuclide package	Mô hình hóa sự vận chuyển của các sản phẩm phân hạch dạng son khí và hơi bay ra từ nhiên liệu và mảnh vụn, động lực học các son khí với sự ngưng tụ hơi nước và bốc hơi, lắng đọng trên bề mặt của cấu trúc, vận chuyển qua đường dẫn và loại bỏ bởi các tính năng an toàn kỹ thuật.

3. Chạy chương trình MELCOR

Việc chạy chương trình MELCOR thông thường bao gồm các bước:

- 1) Chạy MELGEN – Khởi động mô phỏng chuyển tiếp với các dữ liệu mô tả nhà máy
- 2) Chạy MELCOR – Mô phỏng chuyển tiếp / sự cố với các bước thời gian và số liệu điều khiển
- 3) Chạy chương trình sản sinh các đồ thị từ output của MELCOR như HISPLOT hay các công cụ khác như AptPlot hay PTFRead add-in trong MS Excel

Người sử dụng có thể đặt tên tệp với phần mở rộng (phần đuôi) tùy ý, không có hạn chế hay quy định nào cho việc đặt tên tệp.

MELCOR được thực hiện với hai phần như nêu trên: MELGEN và MELCOR. Phần lớn dữ liệu được xác định, xử lý và kiểm tra trong MELGEN. Khi tệp Input không có lỗi,

tệp khởi động lại (Restart File) được tạo ra với các điều kiện ban đầu cho tính toán. Chương trình MELCOR tự nó sẽ tiếp tục tính toán dựa trên các bước thời gian xác định trong input của MELGEN hay MELCOR.

Các dữ liệu chính trong Input của MELGEN bao gồm:

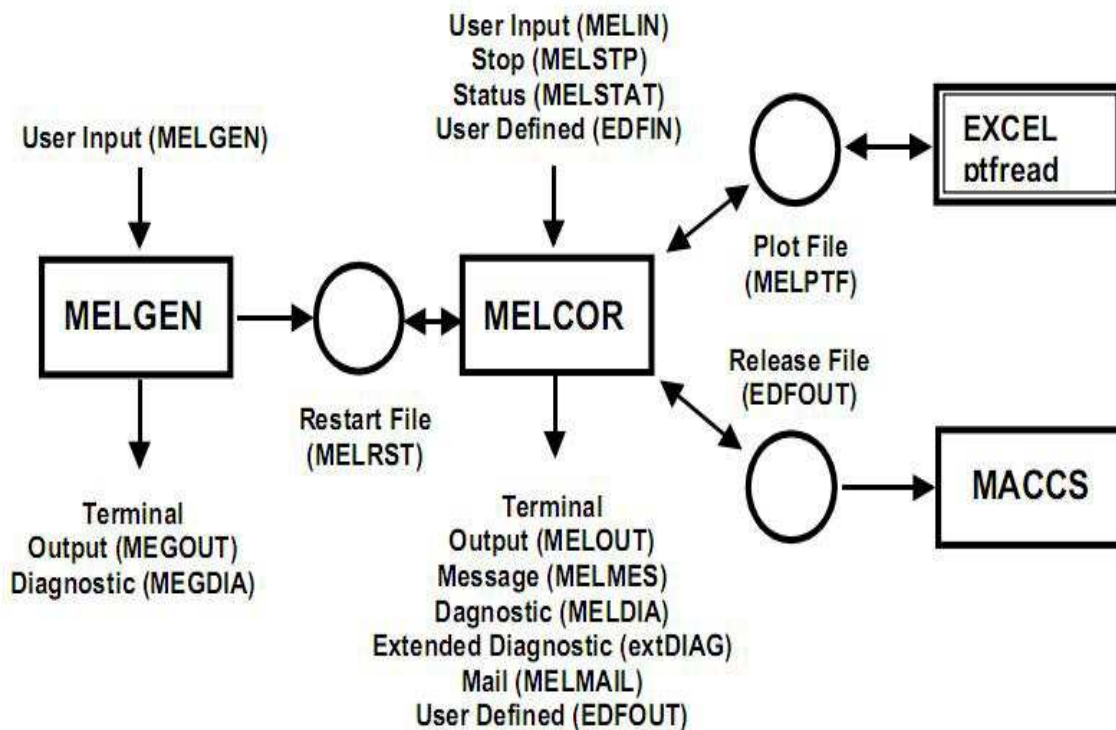
- Các dữ liệu không phụ thuộc thời gian như số liệu hình học của hệ thống
- Các điều kiện đầu như áp suất, nhiệt độ và tốc độ dòng .v.v.

MELGEN sẽ tạo lập tệp khởi động ban đầu (initial restart dump).

Các dữ liệu chính trong Input của MELCOR bao gồm:

- Bước thời gian
- Thời gian chạy chương trình
- Tần suất ghi dữ liệu ra tệp kết xuất (outputs)

MELCOR dựa trên tệp khởi động (restart file) với các dữ liệu không phụ thuộc thời gian, tính toán bởi MELGEN. MELCOR ghi tiếp các kết quả bổ sung. Các dữ liệu này lại có thể được sử dụng để chạy các tính toán MELCOR tiếp theo.



Hình 1. Giải đồ các bước chạy chương trình MELCOR

4. Chương trình MELCOR với gói COR

MELCOR là tích hợp của các gói chương trình thành phần khác nhau bằng cách sử dụng cấu trúc mô-đun. MELCOR sử dụng mô hình hóa một cách tổng quát và linh hoạt thông qua các thẻ tích kiểm tra trong việc mô tả các hệ thống nhà máy cho phép lựa chọn các mức độ chi tiết phù hợp qua việc xây dựng sơ đồ nút hóa.

Một loạt các hiện tượng sự cố nặng trong NMĐHN được mô hình trong MELCOR trong một khuôn khổ thống nhất. Chúng bao gồm: các đáp ứng nhiệt-thủy động trong hệ thống tải nhiệt lò phản ứng, khoang chứa lò phản ứng, nhà lò sơ cấp, và các tòa nhà giam giữ phóng xạ; sự nóng lên và thoái hóa của vùng hoạt, hư hỏng các thanh nhiên liệu hạt nhân và quá trình di chuyển, tái định vị, tương tác với bê tông của corium nóng chảy, phát sinh, vận chuyển khí hydro; phát thải và lan truyền các sản phẩm phân hạch; và tác

động của các tính năng an toàn thiết kế đối với các tính chất nhiệt thủy động và lan truyền phóng xạ.

Quá trình nóng lên của vùng hoạt, tan chảy và di dời chất nóng chảy xuống khoang đáy thùng lò được mô phỏng trong gói COR. Mô hình vùng hoạt và khoang đáy thùng lò được chia thành các vành theo bán kính và các mức theo chiều cao và liên hệ với các thể tích kiểm tra trong mô hình nút hóa các thành phần thủy nhiệt của toàn hệ thống. Các phương trình bảo toàn như được trình bày ở phần trên được áp dụng cho các thể tích kiểm tra trong khi các mô hình trong gói COR áp dụng các quy luật truyền nhiệt để đánh giá tính toàn vẹn của các thành phần vật liệu có trong mỗi nút của COR.

5. Mô hình chảy nền

Phần này trình bày các vật liệu nóng chảy vùng hoạt ở dạng chảy nền, vận chuyển các vật liệu không bị nóng chảy cùng với vật liệu nóng chảy, sự định vị lại và tạo thành các khối gây nghẽn dòng chảy cũng như bề nóng chảy được mô phỏng trong chương trình MELCOR.

Mô hình chảy nền mô phỏng dòng chất nóng chảy từ vùng hoạt đi xuống phía dưới và dần bị đông kết do truyền nhiệt cho các cấu trúc bên dưới. Mô hình mô tả dòng dừng của các màng hoặc các dòng chảy nhỏ (với diện tích tiếp xúc nhỏ hơn màng) bằng các hiệu chỉnh thích hợp các hệ số tái đông kết.

6. Dòng dừng (Steady Flow)

Cùng với quá trình truyền nhiệt và ôxi hóa, chất nóng chảy có thể bám trên bề mặt của các thiết bị ở các vị trí khác nhau trong vùng hoạt. Do các thành phần vật liệu trong vùng hoạt bao gồm các vật liệu cấu trúc bằng thép, vật liệu thanh điều khiển và nhiên liệu hạt nhân nên nhiệt độ nóng chảy và do đó quá trình nóng chảy có thể mô tả bởi mô hình chảy nền. Mô hình chảy nền mô phỏng dòng chảy chất nóng chảy đi xuống (do trọng lực)

thông qua các cột ô chia vùng (còn gọi là các ô) theo chiều đứng. Cần lưu ý rằng, môđun CVH trong MELCOR thực hiện phân vùng và mô tả các thành phần thủy động (nước, hơi) còn môđun COR thực hiện mô tả các cấu trúc rắn trong vùng hoạt và đáy thùng lò.

Lượng vật liệu nóng chảy sau đó tái đông kết trên mỗi ô phía dưới được xác định bằng cách tính toán lượng quá nhiệt (superheat) của màng chất nóng chảy:

$$Q_{sh} = M_m C_{pm} (T_m - T_{mp})$$

Trong đó,

M_m = Khối lượng chất nóng chảy đi vào ô trên bề mặt s

$C_{p,m}$ = Nhiệt dung riêng của màng nóng chảy

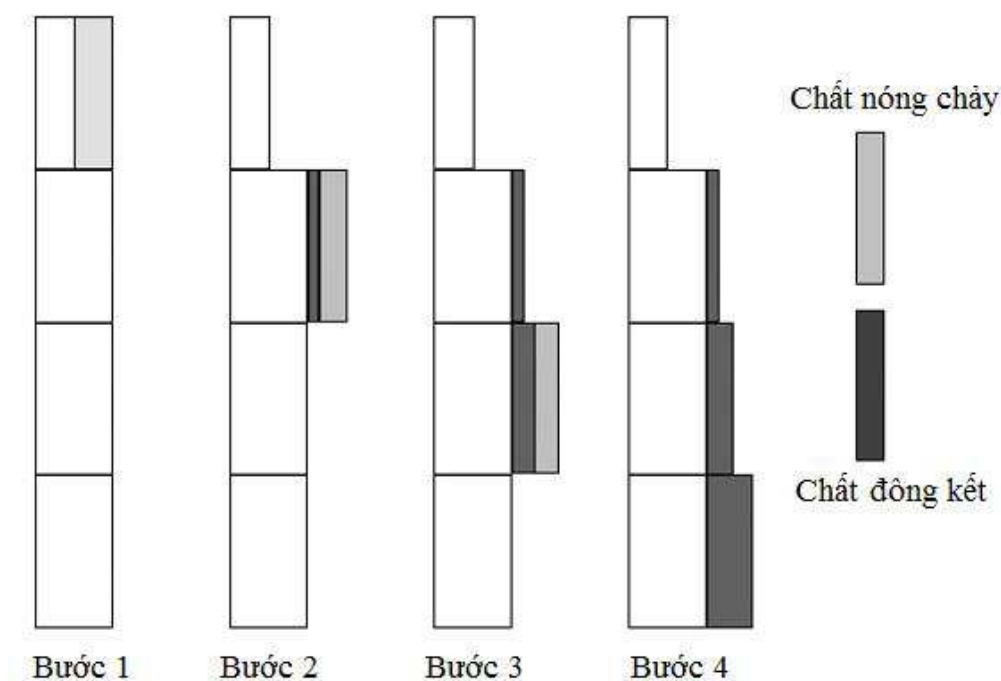
T_m = Nhiệt độ của màng nóng chảy đi vào ô

T_{mp} = Điểm nóng chảy của vật liệu màng

Nếu nhiệt lượng Q nhỏ hơn Q_{sh} , nhiệt lượng được truyền nhưng không có lượng chất nóng chảy nào bị đông kết. Nếu Q lớn hơn Q_{sh} , khối lượng chất nóng chảy bị đông kết được xác định theo biểu thức:

$$\Delta M = (Q - Q_{sh})/H$$

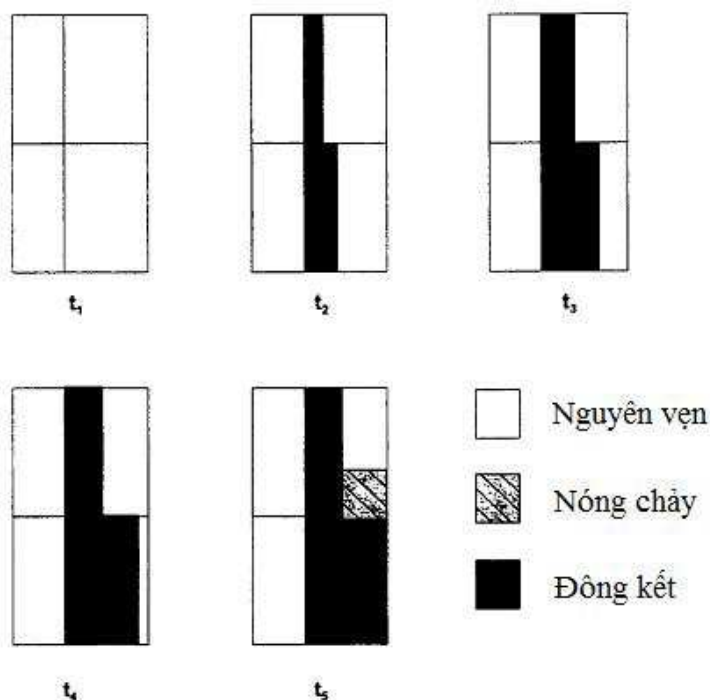
Với H là ẩn nhiệt riêng của vật liệu màng. Chúng tạo thành lớp các mảnh vụn trên bề mặt các thành phần và cân bằng nhiệt với các cấu trúc này.



Hình 2. Các bước trong quá trình chảy nền

7. Các khối gây nghẽn dòng

Các khối gây nghẽn dòng chảy có thể hình thành như minh họa trong hình 3.4 khi các chất nóng chảy bị đông kết đầy trong ô. Khi vật liệu chảy nền tạo ra khối gây nghẽn dòng hoặc đọng lại ở đáy thùng lò, một số vật liệu vẫn bị nóng chảy do thành phần tái đông kết trong ô phía trên khối gây nghẽn không thể hấp thụ ản nhiệt (nhiệt được giải phóng hay hấp thụ trong quá trình nhiệt độ không đổi). Các mảnh vỡ kết hợp với các hạt vụn tạo thành bề nóng chảy. Sự tái định vị các vật liệu vùng hoạt có thể làm giảm diện tích và do đó làm tăng trở kháng dòng chảy hoặc gây tắc hoàn toàn dòng chảy giữa các phần khác nhau trong vùng hoạt.



Hình 3. Sự tạo thành khối nghiền dòng trong mô hình chảy nền

8. Mô hình hư hỏng các cấu trúc đỡ

8.1. Hư hỏng do chảy dẻo

Ứng suất chảy dẻo phụ thuộc nhiệt độ được biểu thị bằng biểu thức sau:

$$\sigma_y(T) = 260. \times 10^6 \left\{ \left[1 + \left(\frac{T}{800.} \right)^3 \right]^{-1} - \left[1 + \left(\frac{1700.}{800.} \right)^3 \right]^{-1} \right\}$$

Biểu thức này cũng được dùng trong mô tả cho đáy thùng lò. Các hằng số 260. 10^6 , 1700, 800, và 3 được chọn nhằm xấp xỉ với dữ liệu của thép không gỉ mark 304 là vật liệu cấu trúc bên trong thùng lò. Các hằng số này có thể thay đổi bởi người sử dụng chương trình khi áp dụng cho các vật liệu thép khác.

8.2. Hư hỏng do oằn

Các cấu trúc cột sẽ oằn xuống nếu chịu tải vượt quá giá trị cho phép [T. H. Lin, Theory of Inelastic Structures, John Wiley and Sons, NY, 1983] theo biểu thức:

$$W_{buckl} = \pi^2 E \frac{I}{\ell^2}$$

Trong đó I là mômen quán tính, E là môđun đàn hồi, và ℓ là độ dài cột. Với cột dạng ống trụ bán kính ngoài r_o và bán kính trong r_i :

$$I = \frac{\pi}{4} (r_o^4 - r_i^4) = \frac{\pi}{4} (r_o^2 - r_i^2) (r_o^2 + r_i^2)$$

Cho N cột tương tự nhau trong một vành (vùng hoạt động được chia thành các vành theo chiều bán kính và các mức theo chiều cao để tạo thành các ô), xảy ra oằn nếu ứng suất vượt quá ứng suất chịu oằn:

$$\sigma_{buckling} < \pi^2 \frac{(r_o^2 + r_i^2)}{4N \ell^2} E$$

Môđun đàn hồi được biểu diễn bằng phương trình:

$$E(T) = 370. \times 10^9 \left\{ \left[1 + \left(\frac{T}{1650.} \right)^3 \right]^{-1} - \left[1 + \left(\frac{1700.}{1650.} \right)^3 \right]^{-1} \right\}$$

Các hằng số 370.10^9 , 1700, 1650, 3 được chọn tương ứng với thép loại 304..

8.3. Hư hỏng do rão nhiệt

Mô hình hư hỏng đứt-rão của Larson-Miller [F. R. Larson and J. Miller, "A Time-Temperature Relationship for Rupture and Creep Stress," Transactions of the ASME, July 1952] cho thời gian cấu trúc bị đứt, t_R , tính bằng giây theo biểu thức:

$$t_R = 10^{\left(\frac{P_{LM}}{T} - 18.44 \right)}$$

Trong đó nhiệt độ T (tính bằng K). Tham số Larson-Miller, P_{LM} , cho thép có thể được làm khớp như hàm của ứng suất hiệu dụng, σ_e ($\text{Pa}=\text{N/m}^2$):

$$P_{LM} = 81000 - 7500 \log_{10}(\sigma_e)$$

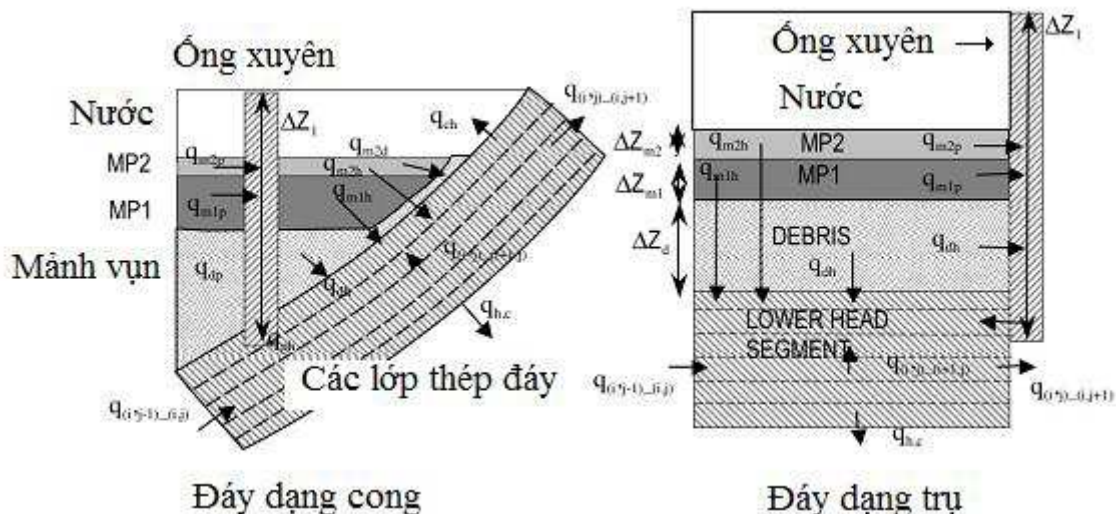
Theo ASME [American Society of Mechanical Engineers, "ASME Boiler and Pressure Vessel Code Case N-47-22," April 5, 1984]. Các hằng số (16.44, 81000, 7500) có thể thay đổi như các hệ số độ nhạy. Do ứng suất và nhiệt độ thay đổi, quy luật thời gian sống riêng phần được áp dụng và hư hỏng xảy ra khi tổng tỷ số thời gian của các khoảng thời gian Δt_i và thời gian $t_R(t_i)$ bằng đơn vị:

$$\int \frac{dt}{t_R(t)} \approx \sum \frac{\Delta t_i}{t_R(t_i)} = 1$$

Với cách tạo hình học dạng nhiều vòng trong MELCOR, lịch sử nhiệt độ, chịu tải và do đó thông số Larson-Miller cũng thay đổi từ ô này sang ô khác. Các cấu trúc đỡ trong các ô khác nhau có thể hư hỏng vào các thời điểm khác nhau.

9. Mô hình đáy thùng lò

Mô hình đáy thùng lò khi có bề nóng chảy bao gồm bề nóng chảy, đáy thùng lò được phân thành các lớp khác nhau và cấu trúc vật liệu ống xuyên (ống dẫn các thiết bị đo bên trong thùng lò) như được biểu diễn trong hình 4.



Hình 4. Mô hình đáy thùng lò phản ứng

Xảy ra hư hỏng của đáy thùng lò nếu một trong bốn tiêu chuẩn sau được thỏa mãn:

1. Nhiệt độ của ống xuyên đạt nhiệt độ gây hư hỏng xác định bởi người sử dụng (chương trình);
2. Hàm điều khiển logic xác định bởi người sử dụng nếu nhận giá trị .TRUE. Chẳng hạn, hàm điều khiển tham chiếu đến bảng các áp suất gây hư hỏng như là hàm của nhiệt độ đáy thùng lò.
3. Hư hỏng do quá áp khi áp suất vượt quá giá trị cho phép bởi người sử dụng (thường giá trị mặc định là 20 MPa);
4. Hư hỏng do rão trước các tải cơ học trong các điều kiện vật liệu bị làm yếu ở các nhiệt độ tăng cao.

Mô hình Larson-Miller hư hỏng do rão cho thời gian dẫn đến hư hỏng, t_R được xác định như sau:

$$t_R = 10^{\left(\frac{P_{LM}}{T} - 7.042\right)}$$

Thông số Larson-Miller, P_{LM} được cho bằng biểu thức:

$$P_{LM} = 4.812 \times 10^4 - 4.725 \times 10^3 \log_{10}(\sigma_e)$$

Trong đó σ_e là ứng suất hiệu dụng (Pa) và các hằng số 4.812×10^4 , -4.725×10^3 và 7.042 tương ứng với thép loại SA533B1 dùng chế tạo thùng lò phản ứng. Các thông số này có thể thay đổi bởi người sử dụng cho loại thép chế tạo thùng lò cụ thể.

Quy luật thời gian sống riêng phần cho hư hỏng tích lũy được biểu thị như hàm biến dạng dẻo, $\varepsilon_{pl}(t)$, bằng biểu thức:

$$\varepsilon_{pl}(t + \Delta t) = \varepsilon_{pl}(t) + 0.18 \frac{\Delta t}{t_R}$$

Trong đó hằng số 0.18, được sử dụng như hệ số độ nhạy chỉ sự hư hỏng (được xác định khi giá trị tích phân $\Delta t/t_R = 1$) xảy ra khi độ biến dạng đạt 18%. Một cách gần đúng, khi điều kiện hư hỏng thỏa mãn, một lỗ thủng với đường kính ban đầu do người sử dụng chương trình đưa ra hay đường kính ban đầu mặc định 0.1 m được tạo ra (giá trị mặc định 0.1m cho sự phun ra của chất nóng chảy tương đối nhanh và không gây khó khăn cho quá trình mô phỏng số).

PHỤ LỤC: SỰ CỐ NÓNG CHẢY VÙNG HOẠT Lò PHẢN ỨNG HẠT NHÂN

Các quá trình, hiện tượng vật lý cơ bản xảy ra trong tiến trình sự cố nặng dẫn đến nóng chảy vùng hoạt cùng với mô tả tổng quan các cơ sở dữ liệu thực nghiệm được trình bày trong phần này.

Nhiều kịch bản giả thiết về sự cố nặng được đưa ra với việc vùng hoạt bị nóng chảy và tạo thành khối hỗn hợp nóng chảy ở đáy thùng lò phản ứng nước nhẹ (LWR) có thể dẫn đến hư hỏng thùng lò chịu áp lực và rò thoát chất nóng chảy ra ngoài nhà chứa lò phản ứng. Các nghiên cứu hiện nay tập trung vào phân tích cơ chế kiểm soát, hạn chế và đề ra chiến lược quản lý, ứng phó khẩn cấp trong đó việc ổn định khối nóng chảy trong thùng lò phản ứng nhằm chống lại sự rò thoát không kiểm soát được của nhiệt và phóng xạ vào nhà lò phản ứng là vấn đề quan trọng trong nghiên cứu sự cố nặng.

1. Ý nghĩa của nghiên cứu hư hỏng thùng lò trong điều kiện sự cố nghiêm trọng

Đáy dưới của thùng lò phản ứng áp lực (RPV) có thể chịu tải nhiệt và áp lực đáng kể trong trường hợp sự cố nóng chảy vùng hoạt. Các đáp ứng cơ học của đáy thùng lò phản ứng có tầm quan trọng cả trong đánh giá sự cố nặng và đánh giá các chiến lược giảm thiểu tai nạn.

Tai nạn TMI-2 liên quan đến việc tạo ra khoảng 20 tấn corium vào đáy dưới của RPV [2]. Mặc dù còn nước, đáy thùng lò phản ứng đạt nhiệt độ khoảng 1300K trong 30 phút trong một khu vực có đường kính tương đương 1m vào thời điểm khi áp suất hệ thống làm mát lò phản ứng (RCS) ở mức 10MPa. Mặc dù thùng lò TMI-2 đã không bị thủng, nhưng trong chương trình phân tích của OECD / NEA (VIP) về khảo sát thùng lò TMI-2 đã dự đoán ở các điều kiện như vậy thùng lò sẽ bị hư hỏng nặng. Điều này cho thấy việc mô hình hóa thùng lò và khoang đáy thùng lò phản ứng trong các tình huống sự

cố nặng còn chưa hoàn toàn chính xác và đầy đủ về các quá trình hư hỏng vật liệu ở nhiệt độ cao. Từ dự án TMI-VIP, nhiều phương pháp đã được phát triển nhằm phân tích các lò phản ứng thể hệ hiện tại từ quan điểm đánh giá, quản lý và giảm nhẹ tai nạn. Tuy nhiên, vẫn còn tồn tại nhu cầu các dữ liệu thực nghiệm về các hiện tượng biến dạng và hư hỏng đáy thùng lò phản ứng nhằm kiểm chứng các mô hình tính toán cũng như hiểu biết rõ hơn về các quá trình, cơ chế xảy ra trong sự cố nặng.

Các chương trình phân tích sự cố nặng thường mô hình các đặc trưng của toàn bộ hệ thống lò phản ứng trong các điều kiện sự cố nặng, tức là, suy thoái nhiên liệu, thủy động lực, vận chuyển các sản phẩm phân hạch và đáp ứng của thùng lò đối với các tải cơ-nhiệt. Dự báo thời gian và mức độ hư hỏng của thùng lò phản ứng là rất quan trọng trong việc xác định các hiện tượng sẽ xảy ra bên ngoài thùng lò. Do vậy việc phân tích ở mức hệ thống bằng các phương pháp đơn giản và hiệu quả để dự đoán thời gian hư hỏng của đáy thùng lò là cần thiết.

Việc đánh giá khả năng phân tích đúng đắn của các chương trình phân tích được kiểm chứng thông qua các tính toán cho các mô hình thực nghiệm. Các thực nghiệm được tiến hành trong nhiều năm tạo nên cơ sở dữ liệu quan trọng. Các mục 1.3 và 1.4 trình bày một số thực nghiệm tiêu biểu cũng như tai nạn TMI-2 nhằm cung cấp cái nhìn tổng quát về vấn đề này.

2. Các quá trình và hiện tượng vật lý trong sự cố nóng chảy vùng hoạt của lò phản ứng.

Mục đích cuối cùng của đánh giá, xem xét an toàn trong nhà máy điện hạt nhân là đảm bảo việc giam giữ các chất phóng xạ. Khái niệm "bảo vệ theo chiều sâu" trong an toàn hạt nhân đưa ra một số rào cản đối với các sản phẩm phân hạch, các hệ thống an toàn và các biện pháp để bảo vệ các hàng rào này.

Những rào cản bao gồm:

- Nhiên liệu hạt nhân, nơi lưu giữ phần lớn các sản phẩm phân hạch;

- Lớp vỏ bọc thanh nhiên liệu;
- Thùng lò phản ứng chịu áp lực, cùng với hệ thống tải nhiệt sơ cấp tạo thành biên chịu áp cao;
- Boongke nhà lò kín và chịu áp lực;

Các biện pháp được đưa ra để bảo vệ những hàng rào này bao gồm:

- Yêu cầu về chất lượng thiết kế, xây dựng và vận hành để có thể ngăn ngừa các sự kiện có thể gây nguy hiểm cho các rào cản.
- Các hệ thống an toàn bổ sung được lắp đặt (hệ thống ECCS với khả năng phun an toàn ở áp lực cao và thấp, máy phát điện dự phòng khẩn cấp), trong đó bảo vệ những hàng rào đối với các tai nạn dự kiến trong phạm vi "tai nạn cơ bản thiết kế" (DBA). Các hệ thống này được thiết kế theo nguyên tắc độc lập, dư thừa và đa dạng. Được kích hoạt và điều khiển tự động, do đó không cần biện pháp can thiệp thủ công vào khoảng 30 phút đầu tiên xảy ra tai nạn đối với các lò phản ứng thế hệ II, và có thể kéo dài tới 24 giờ hoặc 72 giờ đối với các lò thế hệ III, III+ với việc áp dụng các nguyên lý an toàn thụ động.

Nhìn chung, tần suất tan chảy vùng hoạt trong lò phản ứng nước nhẹ (LWR) là rất thấp ($\leq 5 \cdot 10^{-6}$ / năm). Nó chỉ có thể xảy ra, nếu vùng hoạt của lò phản ứng bị hở nước một phần hoặc hoàn toàn và không được làm mát kịp thời và nhiệt tạo ra trong tâm lò (nhiệt phân rã phóng xạ của các sản phẩm phân hạch và nhiệt sinh ra bởi các phản ứng hóa học tỏa nhiệt) không thể lấy đi được bởi hệ thống tải nhiệt và làm mát. Tiến trình dẫn đến nóng chảy vùng hoạt là rất phức tạp, và nói chung là do sự hư hỏng đồng thời của một số hệ thống an toàn.

2.1. Tiến trình sự cố dẫn đến nóng chảy vùng hoạt của lò phản ứng

Trong số các chuỗi tai nạn tiềm năng kịch bản mất điện toàn bộ nhà máy (SBO) được coi là kịch bản có xác suất cao nhất dẫn đến sự tan chảy nhiên liệu trong vùng hoạt.

Nó có thể được bắt đầu bởi việc mất điện lưới và việc không sẵn sàng của hệ thống làm mát khẩn cấp do thất bại của các máy phát điện dự phòng khẩn cấp.

Khi xảy ra sự cố, lò phản ứng sẽ được dập bằng việc đưa vào các thanh điều khiển để chấm dứt phản ứng phân hạch dây chuyền. Việc ngắt tuabin và bơm tải nhiệt sẽ làm cho phần thứ cấp của các bình sinh hơi bị khô trong thời gian ngắn. Do đó, lượng nhiệt dư sinh ra trong vùng hoạt không được thải ra từ hệ thống làm mát chính thông qua hệ thống làm mát thứ cấp. Áp lực sẽ tăng lên trong các vòng sơ cấp vẫn còn nguyên vẹn do nhiệt và bốc hơi của nước tải nhiệt.

Nếu hệ thống không được giảm áp, nước trong hệ thống làm mát lò phản ứng sẽ sôi dưới áp suất cao và thoát qua các van an toàn. Tuy nhiên, sự hư hại tiềm năng của thùng lò chịu áp lực là do sự tan chảy vùng hoạt dưới áp lực cao, nó có thể dẫn đến hư hỏng sớm của nhà lò sơ cấp (hình thành của mảnh văng ra với động lực lớn, áp lực tích tụ nhanh do hiệu ứng đốt nóng trực tiếp nhà lò - DCH). Vì vậy, các chiến lược quản lý tai nạn hiện nay là nhằm mục đích loại trừ các khả năng gây ra áp lực cao bằng cách giảm áp của mạch sơ cấp thông qua các van xả (PORV) nằm trên đỉnh của bình điều áp. Việc mất nước làm mát cuối cùng sẽ dẫn đến vùng hoạt bị hờ nước. Khoảng thời gian cho đến khi vùng hoạt bị hờ nước hoàn toàn phụ thuộc vào thiết kế nhà máy cụ thể, đặc biệt là hoạt động của các hệ thống an toàn và hành động của nhân viên vận hành.

Một kịch bản khác cũng dẫn đến sự tan chảy có thể xảy ra trong sự cố vỡ lớn (LBLOCA) của hệ thống tải nhiệt. Chẳng hạn như các sự cố vỡ đôi đường ống tải nhiệt chính hay đường dâng áp nối giữa chân nóng và bình điều áp và việc không khởi động được các thành phần chủ động của hệ thống làm mát tâm lò khẩn cấp (các hệ tiêu an toàn cao và thấp áp) được giả định. Áp suất trong hệ thống tải nhiệt lò phản ứng giảm xuống qua chỗ vỡ. Kể từ khi nước thoát ra qua chỗ vỡ, khoảng thời gian cho đến khi vùng hoạt bị hờ nước trong kịch bản LBLOCA là ngắn hơn rất nhiều so với kịch bản vỡ nhỏ (SBLOCA). Nó phụ thuộc vào thiết kế nhà máy, thường là trong khoảng 300 đến 600s.

Ngoài ra, do động học của các quá trình chuyển tiếp thủy nhiệt, mực nước ở thời điểm vùng hoạt bắt đầu nóng lên có thể là thấp hơn đáng kể so với đỉnh của vùng hoạt.

Khả năng xảy ra LBLOCA là thấp hơn so với SBLOCA. Tuy nhiên, do quá trình xảy ra nhanh hơn nên khoảng thời gian để bắt đầu các biện pháp quản lý tai nạn trước khi thùng lò bị hư hại là ngắn hơn đáng kể. Các kịch bản tai nạn này được đặc biệt quan tâm nghiên cứu, nhất là từ sau tai nạn tại các lò phản ứng của NMDHN Fukushima.

2.2. Các giai đoạn sớm của quá trình nóng chảy vùng hoạt

Nếu vùng hoạt không có đủ nước làm mát, nhiệt phân rã của các sản phẩm phân hạch trong nhiên liệu sẽ đốt nóng vùng hoạt của lò phản ứng và đẩy nhanh quá trình bốc hơi nước. Nếu việc cung cấp nước ít hơn tốc độ bay hơi, mực nước trong RPV giảm. Nhiên liệu và các thanh điều khiển trong các khu vực khô của vùng hoạt sẽ gia nhiệt. Với sự gia tăng nhiệt độ, một số tương tác hóa học giữa các vật liệu trong vùng hoạt và hình thành các pha lỏng sẽ xảy ra. Tổng quan các quá trình trong sự phụ thuộc nhiệt độ được đưa ra trong hình 1.1. Trong giai đoạn đầu, các quá trình chủ yếu sau đây có thể xảy ra:

- Với nhiệt độ tăng, áp lực trong nhiên liệu tăng lên và có thể dẫn đến đảo và vỡ lớp vỏ bọc thanh nhiên liệu. Điều này khởi đầu cho sự phát thải các sản phẩm phân hạch dễ bay hơi (Iôt, Cesium) qua các vết nứt.

- Trên 1100 K, vật liệu hấp thụ (hợp kim bạc-indium-cadmium, AIC) bắt đầu tan chảy và tương tác với sắt (Fe) trong các vỏ bọc bằng thép không gỉ và sau đó hòa tan Zircaloy của các ống dẫn.

- Trên 1500 K các tương tác cục bộ, ví dụ giữa Inconel (từ các lưới giăng) và Zircaloy (từ vỏ bọc thanh nhiên liệu hay ống dẫn các thanh điều khiển) dẫn đến sự hình thành một lượng nhỏ chất nóng chảy và có thể gây thùng cục bộ thông qua đó các sản phẩm phân hạch thoát ra.

- Sức nóng lên của các thanh nhiên liệu và thanh điều khiển được tăng tốc ở nhiệt độ vượt quá khoảng 1500K bởi phản ứng tỏa nhiệt giữa hơi quá nhiệt và zirconi của lớp vỏ bọc thanh nhiên liệu hoặc các ống dẫn (oxy hóa zirconi). Các bề mặt bị oxy hóa bị xói mòn và hình thành lớp ZrO_2 . Cũng do phản ứng này, một lượng lớn hydro được tạo ra, thoát ra ngoài nhà lò phản ứng hoặc qua rò rỉ hoặc qua các van an toàn của hệ thống làm mát lò phản ứng. Nồng độ hydro ở mức cao trong nhà lò phản ứng có thể dẫn đến bùng cháy hay nổ của hỗn hợp khí với việc hư hại nhà lò phản ứng như đã xảy ra trong tai nạn Fukushima.

- Lúc đầu, chất lỏng kim loại được tạo ra khi đạt đến điểm nóng chảy của Zircaloy. Nhiệt độ nóng chảy này phụ thuộc vào hàm lượng oxy của lớp vỏ Zircaloy và do đó lịch sử quá trình oxy hóa trước đó và nằm trong khoảng giữa 2000K và 2.250K. Zircaloy nóng chảy tương tác với thanh nhiên liệu và hòa tan các bộ phận của nó. Hợp kim U-Zr-O nóng chảy giàu zirconi và do đó thường được gọi là chất nóng chảy kim loại.

- Sự chuyển chỗ của chất nóng chảy thường được khởi phát bởi sự hư hỏng cơ học của phần giam giữ còn lại (vỏ bọc / ống dẫn hoặc lớp ZrO_2). Chất nóng chảy thoát ra qua các vết nứt ở dạng vệt và di chuyển dọc theo thanh vào vùng lạnh hơn của vùng hoạt. Ở đó, chất nóng chảy bị đông đặc và hình thành một lớp vỏ. Đây là loại di dời chất nóng chảy thường được gọi là "quá trình chảy nền". Việc mở rộng hình thành lớp vỏ có thể dẫn đến tắc nghẽn các khu vực trống cho dòng nước tải nhiệt. Điều này cản trở sự tiếp cận của hơi nước đến vùng phía trên và có thể gây ra ứ đọng chất nóng chảy, lan rộng sang hai bên và tạo thành bể nóng chảy.

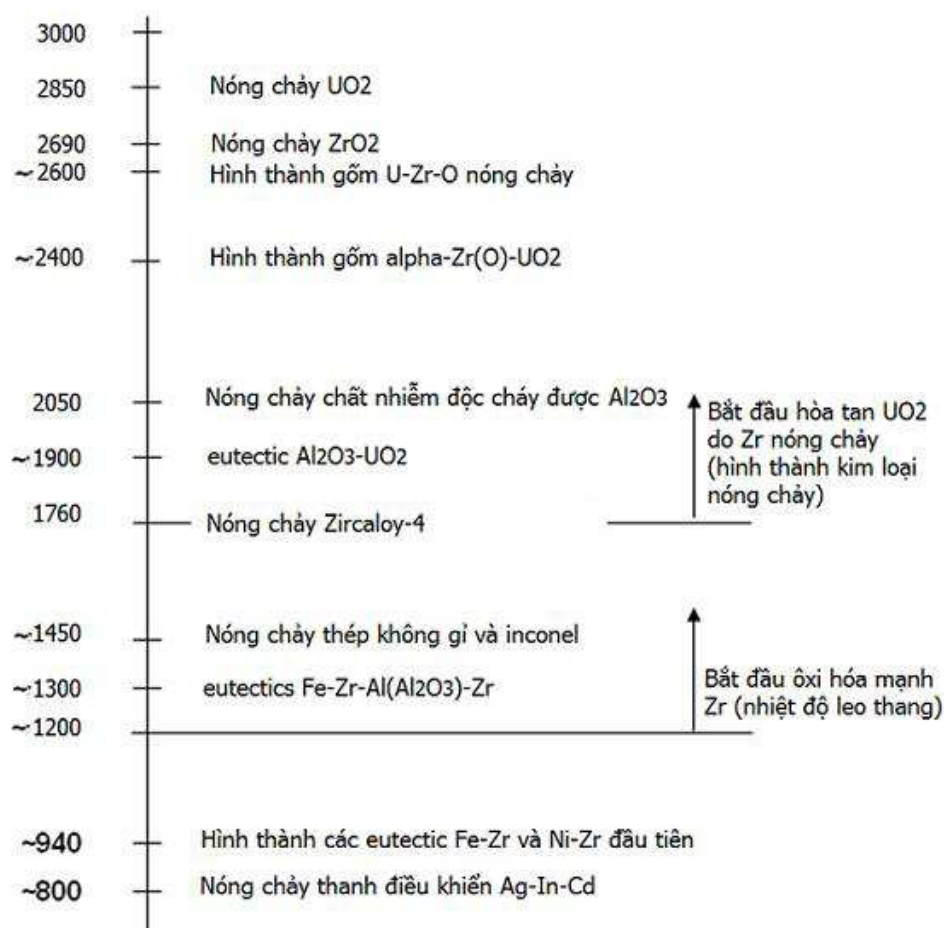
Các thanh nhiên liệu và vỏ bọc chiếm khoảng 90% khối lượng vùng hoạt. Các tương tác vật liệu với các lưới giăng và thanh điều khiển chủ yếu chỉ có hiệu ứng cục bộ. Tính chất của vùng hoạt trong giai đoạn đầu và tác động của nó trên các tiến triển của tai nạn về cơ bản được xác định bởi quá trình oxy hóa, hình thành chất nóng chảy kim loại, di chuyển và tương tác giữa các quá trình này:

- Ban đầu, sự nóng lên của vùng hoạt được xác định bởi năng lượng nhiệt phân rã và các điều kiện làm mát của nước còn lại trong vùng hoạt. Lượng nước còn lại tiếp tục giảm do năng lượng phân rã, quá trình dẫn nhiệt dọc theo các thanh đẩy mạnh tốc độ bay hơi. Các phần của vùng hoạt còn ngập nước vẫn được làm mát, trong khi sự nóng lên của phần bên trên cũng được làm nguội một phần bởi dòng hơi bốc lên.

- Quá trình oxy hóa zirconium tỏa nhiệt làm tăng tốc quá trình nóng lên của vùng hoạt. Ngoài ra động học phản ứng oxy hóa phụ thuộc nhiệt độ, tốc độ phản ứng được xác định cũng bởi lượng hơi nước gây ra quá trình oxy hóa.

- Việc di chuyển chất nóng chảy kim loại và hình thành lớp vỏ cứng có ảnh hưởng quan trọng đến sự tiến triển nhiệt độ. Nhiệt được vận chuyển với chất nóng chảy di chuyển đến vùng lạnh hơn, làm tăng quá trình đốt nóng và nhiệt độ tăng lên và do đó đẩy mạnh quá trình oxy hóa lớp vỏ bọc zirconium. Cùng với phần nhiên liệu trong chất nóng chảy kim loại các sản phẩm phân hạch cũng di chuyển theo, dẫn đến một sự thay đổi phân bố nhiệt phân rã ban đầu. Các quá trình này sẽ tăng tốc độ bay hơi và tiếp tục làm giảm mức nước còn lại bên trong thùng lò. Sự hình thành các tắc nghẽn do nóng chảy nhiên liệu gây ra độ lệch của dòng hơi nước sang hai bên. Điều này ảnh hưởng đến việc làm mát và thiếu hơi nước cho quá trình oxy hóa ở phần trên các tắc nghẽn.

Nếu việc phun nước vào thùng lò có thể được tái kích hoạt trong giai đoạn đầu của sự suy thoái vùng hoạt, khả năng ngăn chặn sự tan chảy và làm mát vùng hoạt vẫn còn khả dĩ. Tuy nhiên, một lượng lớn hydro có thể được tạo ra trong quá trình làm ngập trở lại, gây ra bởi sự hình thành của các bề mặt mới cho quá trình oxy hóa do vỡ các lớp oxit như là kết quả của ứng suất nhiệt cũng như việc có sẵn hơi nước thay vì thiếu hơi như trước. Điều này cũng được quan sát trong tai nạn TMI-2, trong đó một số lượng đáng kể khí hydro được tạo ra trong một nỗ lực để tái ngập vùng hoạt (ước tính 160kg trong tổng số 270kg tạo ra trong toàn bộ vụ tai nạn).



Hình 5. Các tương tác hóa học và sự tạo thành các pha lỏng trong vùng hoạt lò phản ứng trong quá trình tăng nhiệt độ(°C)

2.3 . Các giai đoạn sau của quá trình nóng chảy vùng hoạt

Các giai đoạn cuối của sự tan chảy vùng hoạt và suy thoái được đặc trưng bởi sự mất dần hình dạng của bó nhiên liệu ban đầu và hình thành khối chất nóng chảy. Với sự gia tăng nhiệt độ và sự tan chảy / di chuyển của lớp vỏ bọc thanh nhiên liệu dẫn đến sự sụp đổ các viên nhiên liệu. Điều này dẫn đến sự hình thành lớp hạt xộp mảnh vỡ bao gồm các mảnh vỡ nhiên liệu và mảnh vỡ của lớp vỏ bọc bị oxy hóa xếp chồng lên lớp vỏ kim loại được hình thành trước đó hoặc trên các cơ cấu đỡ vùng hoạt.

Phân tích các mảnh vỡ tạo ra trong tai nạn TMI-2 cho thấy, nhiên liệu bị phân mảnh thành các hạt trong một phạm vi kích thước từ 30µm (cỡ chiều dài của hạt nhiên

liệu) đến 4mm. Tính thấm thấp do mật độ (độ xốp ước tính cỡ 36 - 50%) và kích thước hạt nhỏ của các mảnh vỡ xốp làm hạn chế chất lỏng đi vào và cản trở việc làm mát. Dòng hơi chính đi qua khu vực vẫn còn nguyên vẹn trong vùng hoạt. Truyền nhiệt từ bên trong lớp mảnh vỡ ra mặt ngoài của nó cũng rất nhỏ do sự dẫn nhiệt thấp của vật liệu chủ yếu là oxit (UO_2 và ZrO_2), nhiều trở kháng tiếp xúc và tầm ngăn của truyền nhiệt bức xạ. Điều này làm nhiệt tiếp tục tăng lên và làm tăng sự tan chảy của các thành phần oxit (UO_2 và ZrO_2). Lượng lớn chất nóng chảy oxit được tạo ra bắt đầu với sự hình thành chất nóng chảy ZrO_2 ở nhiệt độ trên 2960 K hòa tan UO_2 . Một lượng chất nóng chảy có thể đã tạo ra bởi sự tương tác eutectic ở nhiệt độ thấp hơn khoảng 2800 K.

Vận tốc của chất nóng chảy oxit qua các lỗ hổng của lớp các mảnh vỡ là khá thấp ($\sim 1 \text{ mm/s} - 1 \text{ cm/s}$) do ma sát bề mặt lớn. Ngoài ra, các hiệu ứng mao mạch cũng cần được xem xét. Ban đầu, dòng chảy xuống sẽ bị dừng lại bởi lớp vỏ cứng hình thành khi tiếp xúc với các phần lạnh hơn (mảnh vỡ, lớp vỏ kim loại được hình thành trước đó hay các cấu trúc đỡ vùng hoạt). Điều này làm cho chất nóng chảy lan sang ngang, hình thành lớp vỏ bên cạnh và tích tụ của chất nóng chảy bên trong lớp vỏ bọc này. Một cấu hình điển hình của vùng hoạt trong giai đoạn nóng chảy cuối được đưa ra trong hình 1.2. Sự phát triển tiếp theo là kết quả của quá trình cạnh tranh của việc nóng lên liên tục, nóng chảy lại của lớp vỏ, đông cứng gần ranh giới bao phủ, sự chảy xuống so với sự tiến triển sang bên của chất nóng chảy dẫn đến sự tích tụ thành bể nóng chảy. Các quá trình này về cơ bản chi phối bởi các điều kiện biên nhiệt tùy thuộc vào:

- Khả năng làm mát của phản xung quanh của lớp vỏ / chất nóng chảy bởi dòng hơi và độ dẫn nhiệt hoặc bức xạ vào nước. Do đó, mực nước còn lại là rất quan trọng trong khi quá trình bay hơi cung cấp khả năng tản nhiệt lớn để ngăn chặn chất nóng chảy đi xuống.

- Quán tính nhiệt tùy thuộc vào lịch sử của quá trình nóng lên. Chất nóng chảy kim loại trước đó đóng vai trò quan trọng. Một mặt, việc nóng chảy lại của lớp vỏ kim loại

hoạt động như một nguồn tản nhiệt. Mặt khác, chất nóng chảy kim loại cũng lại là một tác nhân gây ra giảm mực nước nhanh hơn trong quá trình nó di chuyển xuống dưới,

- Phân bố các nguồn nhiệt từ năng lượng phân rã và các phản ứng hóa học. Tuy nhiên sự phân bố nhiệt thay đổi do sự di chuyển các sản phẩm phân hạch với sự tan chảy nhiên liệu và phát thải các sản phẩm phân hạch;

- Các đặc trưng thiết kế cụ thể của lò phản ứng. Sự nóng chảy các thành phần cấu trúc với khối lượng lớn (các đầu thanh và bó thanh nhiên liệu, lớp phản xạ) cho một nguồn tản nhiệt tạm thời làm chậm lại tiến trình nóng chảy.

Tùy thuộc vào tiến triển đi xuống so với di chuyển sang bên của chất nóng chảy và lớp vỏ, về nguyên tắc hai cấu hình có thể được xác định:

- Không có sự hình thành lớp vỏ phía dưới ổn định, lượng lớn chất nóng chảy không thể tích tụ trong vùng hoạt. Chất nóng chảy sau đó sẽ được dần dần thoát ra từ vùng hoạt xuống dưới với lưu lượng tương ứng với tốc độ tan chảy,

- Nếu lớp vỏ ổn định ngăn chặn sự tiến triển đi xuống và sang bên, ít nhất khi đến biên vùng hoạt (tầm đỡ đáy dưới vùng hoạt và giỏ vùng hoạt hoặc phản xạ bên), chất nóng chảy sẽ tích tụ trong trung tâm vùng hoạt và tạo thành bể nóng chảy lớn.

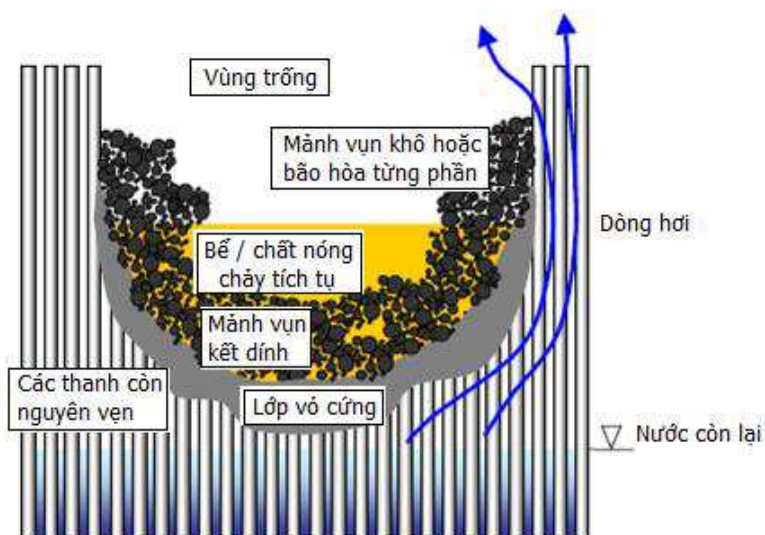
Trong trường hợp sau, tính chất nhiệt của bể nóng chảy được xác định bởi một dòng chảy đối lưu tự nhiên bắt đầu trong bể sau khi tan chảy các phần rắn còn lại. Với đối lưu tự nhiên nói chung khuynh hướng truyền nhiệt lên trên và sang bên trội hơn truyền nhiệt xuống phía dưới. Sự ổn định của lớp vỏ phụ thuộc vào phân bố thông lượng nhiệt tại các ranh giới bên trong bể và khả năng lấy nhiệt từ bên ngoài. Tải nhiệt trên bề mặt chất nóng chảy thay đổi bởi sự hình thành của một lớp kim loại phía trên giàu Zircaloy và thép từ sự tan chảy của các cấu trúc phía trên. Do tính dẫn nhiệt cao hơn của các thành phần kim loại các thông lượng nhiệt sẽ tập trung về phía mặt bên của lớp này.

Tải do nhiệt cuối cùng sẽ dẫn đến hư hỏng của cấu trúc đỡ phía dưới bể nóng chảy. Tùy thuộc vào kiểu và vị trí hư hỏng, ba chế độ chính của chất nóng chảy thoát xuống đáy dưới của RPV có thể là:

- Bể nóng chảy có thể rơi xuống cùng với lớp vỏ cứng và tấm lưới đỡ vùng hoạt, nhiều khả năng, nó sẽ nghiêng đi do hư hỏng không đều của các cấu trúc đỡ vùng hoạt, dẫn đến một sự đổ sập khối chất nóng chảy vào trong nước vẫn còn trong đáy thùng lò ,

- Nếu lớp vỏ bọc ra ở tâm dưới của bể nóng chảy, chất nóng chảy tích tụ sẽ thoát ra thành dòng liên tục qua tấm lưới đỡ vùng hoạt. Dòng chất nóng chảy sau đó sẽ loang ra và đi vào khoang đáy thùng lò ở dạng các dòng phun mạnh,

- Lớp vỏ bọc ra tại mặt bên của bể nóng chảy rất có thể sẽ xuất hiện ở mép trên. Tác động không đối xứng sẽ dẫn đến tạo ra một hoặc một số vết rách có kích thước giới hạn. Mặc dù vết rách có thể mở rộng do chất nóng chảy trào ra, nhưng tốc độ chảy ra sẽ tương đối thấp do kích thước hạn chế của các lỗ và chiều cao hạn chế của chất lỏng ở trên. Việc di chuyển chất nóng chảy từ vùng hoạt xuống dưới theo cách này có thể xảy ra một vài lần trong khoảng thời gian khá dài.



Hình 6. Cấu hình vùng hoạt điển hình trong quá trình nóng chảy

Tiến triển suy thoái vùng hoạt (mất dạng hình học và hình thành lớp mảnh vỡ), nóng chảy và tích tụ chất nóng chảy trong giai đoạn cuối có ảnh hưởng quyết định đến khả năng làm mát trong giai đoạn này.

2.4. Các quá trình xảy ra trong khoang đáy thùng lò phản ứng

Khi chất nóng chảy thoát ra từ vùng hoạt, nó tương tác với nước còn lại trong khoang đáy thùng lò. Cường độ tương tác và cấu hình kết quả của các mảnh vỡ corium phụ thuộc vào nhiều thông số là kết quả của quá trình xảy ra trước đó. Các thông số chủ yếu là chiều cao của mức nước còn lại, điều kiện của chất nóng chảy (sự quá hơi, thành phần) và đặc biệt là phương thức tái định cư của chất nóng chảy từ vùng hoạt xuống khoang dưới.

Nếu chất nóng chảy đi vào đáy dưới ở dạng một dòng phun lớn sau khi hư hỏng hoàn toàn cấu trúc đỡ vùng hoạt, tương tác với nước sẽ bị hạn chế. Chất nóng chảy di chuyển phần lớn vẫn là chất lỏng và ngay lập tức tạo thành bể nóng chảy bao quanh bởi lớp vỏ cứng ở phía dưới, có thể có một lớp nước ở phía trên. Bể nóng chảy như vậy ở đáy dưới thùng lò gần như không thể làm mát được, ngay cả khi có nước phun vào. Do tính dẫn nhiệt thấp của corium dạng oxit và hạn chế tiếp xúc của nước với lớp vỏ (chỉ với lớp vỏ phía trên và có thể các phần của lớp vỏ bên thông qua các khe nhỏ), việc làm mát sẽ chỉ có thể nếu khối lượng corium không lớn (~ 5 tấn [3]).

Nếu chất nóng chảy thoát ra từ bể nóng chảy bên trong vùng hoạt qua các vết nứt rách của lớp vỏ cứng, nó sẽ đi vào đáy dưới ở dạng một hoặc một số lỗ phun chất nóng chảy (đường kính thường nằm trong khoảng từ 5 - 10 cm) do chất nóng chảy chảy qua các lỗ của tấm lưới đỡ vùng hoạt.

Mặt khác, sự phân mảnh chất tan chảy, sự tôi các giọt nhỏ và sự hình thành của lớp mảnh vụn dạng hạt trong khi chất tan chảy di chuyển xuống đáy thùng lò sẽ làm mát một lượng nhất định các mảnh vỡ corium, như được thấy trong tai nạn TMI-2. Bên cạnh

đó khả năng làm mát các hạt mảnh vỡ do nước chảy qua vùng khe hẹp của các phần không bị phân mảnh cũng góp phần làm giảm nhiệt.

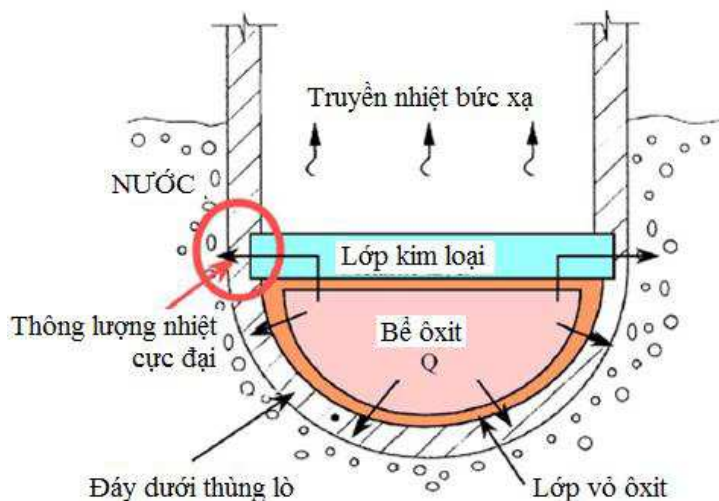
Chỉ một phần của tổng khối lượng của vùng hoạt có thể được tôi bằng nước còn lại ở đáy thùng lò. Nếu không kịp cung cấp nước bổ sung, nước sẽ sôi và các mảnh vỡ sẽ nóng chảy trở lại. Tuy nhiên, sự chậm trễ thời gian do việc tôi các mảnh vỡ và bay hơi nước còn sót lại trong đáy thùng lò cung cấp thêm thời gian cho các biện pháp giảm thiểu tai nạn.

Nếu việc làm mát corium không thể được thiết lập, một bể nóng chảy lớn sẽ hình thành ở đáy thùng lò. Không có làm mát bên ngoài thùng lò bằng cách làm ngập khoang chứa thùng lò, tải nhiệt từ bể nóng chảy sẽ nung nóng thành thùng lò phản ứng. Thành thùng lò sẽ rã do tải trọng của áp lực lớn bên trong của hệ thống tải nhiệt lò phản ứng và do trọng lượng và cuối cùng sẽ bị hư hại.

Có giả thiết cho rằng việc làm mát mảnh vỡ trong đáy thùng lò TMI-2 đã được thực hiện bằng làm mát qua khe hẹp, khi một phần của thành thùng lò đạt nhiệt độ rất cao (điểm nóng) và sau đó được tôi lại. Với giả định rằng nước chảy qua các khe giữa lớp vỏ cứng ở đáy vùng nóng chảy và thành thùng lò đã làm mát thành thùng lò. Khe hẹp này được đề xuất (Henry và Hammersley, 1996) là một khe nhỏ (1-3mm) giữa lớp vỏ và thành thùng lò và nó cho nước chảy vào để làm mát thành thùng lò và đảm bảo tính toàn vẹn của thùng lò. Giả thiết này đã được thực nghiệm FOREVER nghiên cứu.

Thực nghiệm FOREVER cho thấy đối với trường hợp của bể nóng chảy được tạo thành trước ở đáy dưới, hư hại đầu tiên được quan sát là vết vỡ dạng "miệng cá" ở vị trí thành chịu nhiệt cao nhất do quá trình đối lưu tự nhiên bên trong bể nóng chảy. Tuy nhiên, nếu thay đổi việc di chuyển chất tan chảy từ vùng hoạt bằng việc tạo một số lỗ đổ vào trong một khoảng thời gian, khi đó tác động của nhiệt và hư hỏng phụ thuộc vào lịch sử nóng lên, có thể dẫn đến các kết quả khác nhau. Ngoài ra, chỉ có một phần của chất

nóng chảy trong đáy thùng lò sẽ thoát ra qua vết vỡ ban đầu. Hành vi tiếp theo của đáy thùng lò và chất nóng chảy thoát ra từ thùng lò hiện vẫn còn đang được nghiên cứu.



Hình 7. Giữ chất nóng chảy bên trong thùng lò

Đối với những khái niệm áp dụng làm mát bên ngoài thùng lò phản ứng bằng cách làm ngập khoang lò phản ứng (ví dụ lò AP1000), việc vùng hoạt bị nóng chảy và di chuyển xuống đáy thùng lò dường như không quan trọng, khi thiết kế chỉ tập trung vào việc giữ một lượng lớn một bể nóng chảy bên trong thùng lò. Tuy nhiên, với các lò phản ứng với công suất lớn hơn 1000 MWe (ví dụ như US-APWR, APR1400 hoặc EPR), khái niệm làm mát từ bên ngoài vẫn còn là vấn đề cần xem xét do ảnh hưởng của việc hình thành lớp kim loại phía trên bể ôxit. Hiệu ứng tác động ngang của thông lượng nhiệt bởi các lớp kim loại nóng chảy làm giảm biên độ thông lượng nhiệt ra bên ngoài và dẫn đến một tải trọng dư rất nhỏ ở thành thùng lò. Các lớp kim loại tạo ra từ sự tan chảy vùng hoạt hoặc các cấu trúc phía trên vùng hoạt hoặc thành thùng lò, hoặc thậm chí có thể là kết quả của quá trình phân ly hóa học phức tạp của corium (chủ yếu là hợp kim U-Zr-O). Sự tồn tại của lớp kim loại với độ dày phụ thuộc vào lịch sử, các quá trình nóng chảy vùng hoạt trước đó trở nên rất quan trọng. Bên cạnh thời gian hư hỏng thùng lò là thông số đáng quan tâm, chế độ (lưu lượng, vấn đề DCH) và điều kiện (nhiệt độ, thành phần)

của chất nóng chảy thoát ra từ thùng lò cũng rất quan trọng cho việc đánh giá các tiến triển tiếp theo của tai nạn.

3. Cơ sở dữ liệu thực nghiệm

Việc nghiên cứu bằng mô hình hóa các hiện tượng và thực hiện đánh giá các mô hình này trong các chương trình tính toán là một ưu tiên trong nghiên cứu các sự cố nặng. Bằng các thông số mô hình hóa việc phân tích các quá trình xảy ra như một toàn bộ (IET) được thực hiện, trong khi các hiện tượng, quá trình quan trọng phải được nghiên cứu và kiểm tra một cách riêng rẽ (SET). Nhu cầu kiểm chứng thực nghiệm cho các mô hình vẫn luôn được đặt ra, ở mức độ tổng thể hoặc các quá trình riêng rẽ nhằm hoàn thiện và nâng cao những hiểu biết cần thiết và đầy đủ về các quá trình và hiện tượng xảy ra trong sự cố nặng.

Các điều kiện thực nghiệm thường không đại diện cho các kịch bản thực tế xảy ra trong lò phản ứng. Các thực nghiệm được thực hiện trong các điều kiện cụ thể và hạn chế, ví dụ như nhiệt độ hạn chế không cho phép xảy ra tan chảy gốm, hoặc hạn chế liên quan đến các thành phần vật chất ban đầu. Hơn nữa, sau khi hình thành bể nóng chảy, các quy trình thường không được tiếp tục đến khi lớp vỏ cứng bị vỡ và chất nóng chảy thoát ra ngoài vỏ thùng.

Sự phá vỡ lớp vỏ cứng và vị trí dòng chảy có thể được nghiên cứu từ các thực nghiệm dạng SET. Sự phân bố cục bộ đo được của các thông lượng nhiệt tại ranh giới của bể cho đánh giá về vị trí có khả năng vỡ. Các thực nghiệm về sự hư hỏng đáy thùng LHF thực hiện tại phòng thí nghiệm quốc gia quốc gia Sandia (Hoa Kỳ) tập trung vào quá trình rã dưới áp suất cao bên trong thùng lò. Tuy nhiên, thùng được làm nóng trong điều kiện "khô" do bức xạ, do đó các thông lượng nhiệt là khác nhau so với kết quả thực tế từ đối lưu của bể nóng chảy.

Chỉ trong các thực nghiệm FOREVER tại Viện Công nghệ Hoàng gia Thụy Điển, sự hư hỏng của thùng lò và giai đoạn đầu tiên của dòng phun ra từ bể nóng chảy được khảo sát. Những thực nghiệm này được thực hiện với chất nóng chảy và hình học tương tự thùng lò phản ứng (RPV) với kích thước thu nhỏ. Kết quả cho thấy sự hư hỏng của thùng lò xảy ra cục bộ có dạng "miệng cá", ở vị trí của mật độ thông lượng nhiệt cao nhất chứ không phải ở chỗ có sự kéo dãn lớn nhất. Tuy nhiên thực nghiệm được dừng lại sau khi có các dòng chảy đầu tiên.

Các nghiên cứu thực nghiệm với các vật liệu mô phỏng chất nóng chảy trong vùng hoạt lò phản ứng như COPO, ACOPO, BALI, RASPLAV-SALT và SIMECO đều liên quan đến vấn đề phân bố thông lượng nhiệt xung quanh bể nóng chảy bị đốt nóng trong một khoảng giá trị rộng của số Rayleigh. Mục tiêu chính của các nghiên cứu này là đánh giá tải do nhiệt trong chất nóng chảy của vùng hoạt tác động lên đáy thành thùng lò (RPV). Trong khi đó thực nghiệm LHF mô phỏng lại kịch bản tai nạn TMI-2 với tải của áp lực 10MPa và các kịch bản giảm áp được tập trung nghiên cứu trong các thực nghiệm FOREVER. Thực nghiệm RASPLAV sử dụng các vật liệu nóng chảy điển hình trong lò phản ứng (UO-ZrO) với khối lượng lên tới 200kg nhằm nghiên cứu các tải do nhiệt trong chất nóng chảy điển hình tác động lên thành thùng lò được làm mát. Các thực nghiệm RASPLAV được tiến hành với số Rayleigh $Ra \leq 10^{11} - 10^{12}$ đã cho thấy chất nóng chảy corium phân tầng một cách ổn định thành hai lớp với thành phần và mật độ khác nhau. Lớp ở dưới giàu UO (nặng hơn) còn lớp phía trên giàu ZrO (nhẹ hơn) với phân bố thông lượng nhiệt thay đổi rất nhiều dọc theo đường cong biên của đáy thùng lò.

Cuối cùng, các thực nghiệm với các vật liệu thực tế và nhiệt độ đủ cao là khó khăn về kỹ thuật và tốn kém và do đó hạn chế về quy mô, thường là nhỏ. Ví dụ, phần thử nghiệm với lớp mảnh vỡ trong thực nghiệm PHEBUS -FPT4 được chứa trong một hộp hình trụ Zircaloy đường kính chỉ 6,8cm và chiều cao 36cm. Trong các thực nghiệm MP, lớp mảnh vỡ cũng chỉ có đường kính 8 cm và các gói trong PHEBUS FTP0-2 chỉ có

đường kính 7,3cm, mặc dù với thanh có chiều dài 1m. Kết luận về sự hình thành lớp do đó có thể được đặt ra liên quan đến điều kiện cụ thể của lò phản ứng, chẳng hạn như sự xáo trộn do đối lưu tăng cường và các bất ổn định của các lớp ở quy mô lớn có thể không thể tạo ra các lớp ổn định.

Tổng quan về các chương trình thực nghiệm liên quan đến sự cố nặng trong thùng lò phản ứng [7] với sự nhấn mạnh vào giai đoạn cuối quá trình tan chảy vùng hoạt được trình bày trong bảng 1.1.

Bảng 1. 1 Tóm tắt một số chương trình thực nghiệm liên quan đến sự cố nặng trong thùng lò phản ứng [7]

Chương trình thực nghiệm	Các hiện tượng liên quan được nghiên cứu
COPO (IVO, Finland), ACOPO(UCSB, USA), BALI (CEA, France),	Bể nóng chảy lỏng 1 pha
RASPLAV (muối), SIMECO	Các hỗn hợp nóng chảy phức tạp
SIMECO (RIT, Sweden)	Bể nóng chảy phân tầng
RASPLAV, COPO, BALI	Bể kim loại và oxit nóng chảy
COPO, BALI, SIMECO, RASPLAV	Hiệu ứng tạo lớp vỏ sứ
CTF, FOREVER (RIT, Sweden), SONATA (Korea, France)	Truyền nhiệt và tạo thành khe
POMECO (RIT, Sweden)	Khả năng khô và làm nguội lớp mảnh vụn
CORA (Germany), PHEBUS-FP	Sự hình thành bể nóng chảy trong vùng hoạt
PHEBUS-FP (CEA, France)	Sự lan rộng bể nóng chảy và đường đi chuyển xuống khoang đáy thùng lò

RASPLAV (OECD/NEA)	Các phản ứng liên kim loại, các tính chất của corium ($\text{UO}_2\text{-Zr- ZrO}_2$)
LHF (SNL, USA)	Nứt thùng ở áp suất cao
OLHF (OECD, SNL), FOREVER	Mô tả đảo và nứt ở áp suất thấp

4. Tai nạn nhà máy điện hạt nhân TMI-2

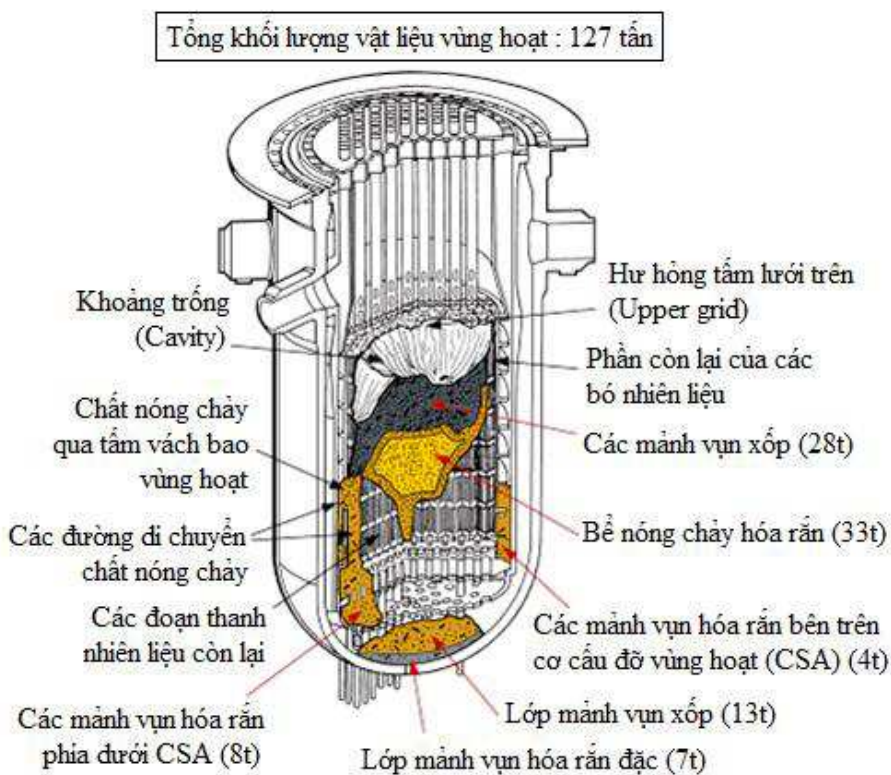
Tai nạn lò phản ứng TMI-2 không thuộc về các "cơ sở dữ liệu thực nghiệm" cho các sự cố nặng. Tuy nhiên, nó cung cấp các dữ liệu tham khảo thực tế cho tai nạn nghiêm trọng trong lò phản ứng nước nhẹ kiểu phương Tây (PWR) và đó là các dữ liệu quan trọng nhất cho sự phát triển và chính xác hóa các mô hình.

Tai nạn xảy ra tại tổ máy số 2 của nhà máy điện hạt nhân TMI ngày 28-3-1979. Trong quá trình xảy ra tai nạn, một phần ba vùng hoạt của lò phản ứng đã bị phá hủy, chất nóng chảy đã di dời xuống khoang đáy thùng lò phản ứng và đe dọa sự toàn vẹn của thùng lò. Trạng thái an toàn của lò phản ứng cuối cùng đã đạt được bằng các biện pháp làm mát và chỉ có một lượng nhỏ phóng xạ phát thải ra môi trường.

Quá trình di chuyển chất nóng chảy xuống khoang đáy thùng lò và trạng thái cuối cùng của thùng lò phản ứng được thể hiện trong hình 1.4. Lớp vỏ xung quanh bể nóng chảy vỡ ra ở bên cạnh và chất nóng chảy di chuyển chủ yếu theo đường vòng giữa các vách ngăn vùng hoạt và giỏ chứa vùng hoạt qua phần giá đỡ vùng hoạt xuống khoang đáy thùng lò còn đầy nước. Khoảng 4,2 tấn chất nóng chảy hóa rắn trở lại ở phía trên phần giá đỡ vùng hoạt, khoảng 5,8 tấn được giữ lại trong giá đỡ vùng hoạt và 19,1 tấn nằm tại đáy thùng lò. Không có bằng chứng của một sự kiện nổ hơi được đưa ra theo các dữ liệu được ghi lại và các khảo sát vùng hoạt sau tai nạn. Tuy nhiên, sự tương tác của chất nóng chảy với nước dẫn đến sự vỡ ra của khối nóng chảy như được thấy các mảnh vỡ trong đáy thùng lò. Thành phần của nó được ước tính khoảng 12,4 tấn mảnh vỡ xộp và 6,7 tấn mảnh vỡ đã được kết khối. Độ xộp được quan sát có thể gây ra bởi bọt của hơi nước hoặc

hoi của các vật liệu cấu trúc, có nghĩa là ít nhất một phần của lớp mảnh vụn vẫn còn nóng chảy trong đáy thùng lò trong một thời gian.

Như vậy, chỉ có tai nạn TMI-2 cho ta dữ liệu từ một chuỗi thực tế xảy ra trên quy mô nhà máy thực. Những kết quả chính liên quan đến giai đoạn cuối, tức là hình thành bể nóng chảy gồm lớn (khoảng 50 tấn) trên một lớp vỏ ổn định. Với các kết quả của chương trình điều tra tai nạn TMI-2, mặc dù các chuỗi sự kiện đặc trưng là cụ thể cho vụ tai nạn, nhưng các dữ liệu thu thập được từ tai nạn đã giúp cho việc đánh giá khả năng của các phương pháp phân tích cũng như hiểu biết về tiến trình xảy ra của sự cố nặng trong NMDHN.



Hình 8. Cấu hình trạng thái cuối của thùng lò TMI-2 [2]

5. Các tiếp cận mô hình trong các chương trình phân tích sự cố nghiêm trọng

Các chương trình tính toán phân tích các sự cố nghiêm trọng, tùy thuộc vào phạm vi áp dụng có thể được xác định theo ba nhóm: Phân tích tổng hợp hay phân tích hệ thống, phân tích chi tiết và phân tích chuyên dụng.

Các chương trình phân tích tổng hợp (Integral code)(còn gọi là phân tích mức " hệ thống "-system code): các chương trình mô phỏng các đáp ứng tổng thể của nhà máy điện hạt nhân , tức là đáp ứng của hệ thống RCS , nhà lò sơ cấp và các số hạng nguồn phát thải ra môi trường, sử dụng các mô hình " tích hợp " phù hợp với hệ thống nhà máy và tai nạn xảy ra. Chúng bao gồm một sự kết hợp cân bằng giữa các mô hình hiện tượng luận và các mô hình tham số do người dùng xác định mô phỏng các hiện tượng có liên quan. Chúng phải thực hiện nhanh để cho phép mô phỏng các kịch bản khác nhau, kèm theo các nghiên cứu tham số để đánh giá các bất định: thời gian tính toán nên tương đương với khoảng thời gian thực xảy ra trong tai nạn. Các chương trình này không được thiết kế để thực hiện các mô phỏng ước tính tốt nhất, nhưng cho phép người dùng tập trung đánh giá các hiện tượng hoặc quá trình quan trọng thông qua các thông số do người dùng định nghĩa . Các chương trình phân tích hệ thống thường được sử dụng để hỗ trợ phân tích an toàn xác suất mức 2 (PSA2) và đáp ứng sự phát triển và xác nhận của các chương trình quản lý sự cố nặng (SAM). Trong những năm qua , sự gia tăng nhanh chóng của hiệu suất máy tính cho phép ngày càng nhiều sự thay thế các mô hình tham số bằng các mô hình cơ nhiệt trong các chương trình phân tích tổng hợp. Các chương trình mang tính quốc tế được sử dụng ngày nay là ASTEC, do IRSN (Pháp) và GRS (Đức) phát triển, MAAP, do Fauske & Associates Inc (Hoa Kỳ) phát triển, và MELCOR, được phòng thí nghiệm Sandia (Hoa Kỳ) phát triển.

Các chương trình phân tích chi tiết (detail code) (còn gọi là các chương trình phân tích mang tính cơ học – mechanistic code) : chúng được đặc trưng bởi các mô hình hiện tượng ước tính tốt nhất, phù hợp với các cập nhật mới nhất từ các thực nghiệm hoặc mô

hình lý thuyết, để cho phép càng nhiều càng tốt một mô phỏng chính xác về hành vi của nhà máy điện hạt nhân trong trường hợp sự cố nặng. Để minh họa rõ sự khác biệt với cách tiếp cận của các phân tích tích hợp, trong hầu hết trường hợp, nghiệm bằng số thu được từ các phương trình vi-tích phân trong khi các hiệu chỉnh có thể được áp dụng trong các chương trình tích hợp. Những yêu cầu cơ bản là những bất định của mô hình có thể so sánh với những bất định của các dữ liệu thực nghiệm được sử dụng để làm chính xác chương trình tính toán và các thông số người dùng xác định chỉ cần thiết cho các hiện tượng chưa được biết rõ do dữ liệu thực nghiệm không đầy đủ (bao gồm cả các vấn đề tỷ lệ).

Về nguyên tắc, các chương trình phân tích nên có càng ít càng tốt các tùy chọn người dùng, các bất định trong mô phỏng các hiện tượng khác nhau phải được xác định để cho phép xác định độ bất định của các kết quả. Các chương trình phân tích cho đánh giá chi tiết và sự tiến triển của sự cố nặng và giúp cho việc thiết kế và tối ưu hóa các biện pháp giảm thiểu hậu quả sự cố. Chúng cũng có thể được sử dụng cho việc kiểm chuẩn (benchmark) các chương trình phân tích tích hợp. Do thời gian tính toán lớn, các chương trình này thường chỉ mô phỏng một phần của nhà máy, ví dụ như hệ RCS hoặc nhà lò. Thời gian tính toán của chúng phụ thuộc vào phạm vi ứng dụng nhưng nói chung là rất lớn. Các chương trình quốc tế được sử dụng rộng rãi ngày nay như : ATHLET - CD (GRS, Đức), SCDAP/RELAP5(INL, Hoa Kỳ), RELAP / SCDAPSIM (ISS, Hoa Kỳ) và ICARE / CATHARE (IRSN, Pháp) mô phỏng đáp ứng của RCS và sự thoái hóa vùng hoạt của lò phản ứng và để mô phỏng nhà lò sơ cấp là các chương trình CONTAIN (ANL, Hoa Kỳ) và COCOSYS (GRS, Đức).

Các chương trình chuyên dụng (Dedicated codes) là các chương trình phân tích liên quan đến một số hiện tượng quan trọng như mô phỏng vụ nổ hơi nước và lan truyền chất nóng chảy vùng hoạt (ví dụ MC3D tại IRSN), cơ học cấu trúc (ví dụ CAST3M tại

CEA, Pháp, hoặc ABAQUS, Hoa Kỳ). Lớp các chương trình này bao gồm các chương trình CFD như GASFLOW (Đức), TONUS của IRSN, ANSYS CFX, v.v.

Một cách tổng quát, các chương trình tích hợp (như MELCOR) cố gắng để mô tả toàn bộ phạm vi các hiện tượng có liên quan đến an toàn, bao gồm tiến triển của quá trình tan chảy, làm mát và các tùy chọn giam giữ, sự vận chuyển khí hydro và sản phẩm phân hạch trong vùng hoạt và trong nhà lò sơ cấp cho đến phát thải sản phẩm phân hạch từ nhà máy. Sự cần thiết phải sử dụng một mô hình thô hơn có thể làm cho kết quả rất nhạy với sự lựa chọn các thông số và đánh giá của người sử dụng chương trình.