

**BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO**

**VIỆN HÀN LÂM
KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ VN**

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



Bùi Hà Dũng

**KHẢO SÁT MỘT SỐ ĐẶC TRƯNG VẬT LÝ CỦA LÒ PHẢN ỨNG
HẠT NHÂN THỬ NGHIỆM KỸ THUẬT LÀM MÁT BẰNG KHÍ
NHIỆT ĐỘ CAO (HTTR) SỬ DỤNG CHƯƠNG TRÌNH TÍNH TOÁN
MONTE CARLO SERPENT 2**

LUẬN VĂN THẠC SĨ NGÀNH VẬT LÝ

Hà Nội - 2022

**BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO**

**VIỆN HÀN LÂM
KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ VN**

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



Bùi Hà Dũng

**KHẢO SÁT MỘT SỐ ĐẶC TRƯNG VẬT LÝ CỦA LÒ PHẢN ỨNG
HẠT NHÂN THỦ NGHIỆM KỸ THUẬT LÀM MÁT BẰNG KHÍ
NHIỆT ĐỘ CAO (HTTR) SỬ DỤNG CHƯƠNG TRÌNH TÍNH TOÁN
MONTE CARLO SERPENT 2**

Chuyên ngành: Vật lý nguyên tử và hạt nhân
Mã số: 8440106

LUẬN VĂN THẠC SĨ NGÀNH VẬT LÝ

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

1. TS. Phạm Như Việt Hà
2. PGS. TS. Phạm Đức Khuê

Hà Nội - 2022

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đề tài nghiên cứu trong luận văn này là công trình nghiên cứu của tôi dựa trên những tài liệu, số liệu do chính tôi tự tìm hiểu và nghiên cứu. Chính vì vậy, các kết quả nghiên cứu đảm bảo trung thực và khách quan nhất. Đồng thời, kết quả này chưa từng xuất hiện trong bất cứ một nghiên cứu nào. Các số liệu, kết quả nêu trong luận văn là trung thực nếu sai tôi hoàn toàn chịu trách nhiệm.

Tác giả luận văn

Bùi Hà Dũng

LỜI CẢM ƠN

Đầu tiên, tác giả xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc tới hai thầy hướng dẫn là TS. Phạm Như Việt Hà và PGS. TS. Phạm Đức Khuê đã tận tình chỉ bảo, hướng dẫn và giúp đỡ tôi trong suốt quá trình học tập, nghiên cứu và hoàn thành bản luận văn tốt nghiệp này.

Tác giả xin chân thành cảm ơn tới các thầy cô, Viện Vật lý, ban Lãnh đạo, phòng Đào tạo, các phòng chức năng và các cán bộ công tác tại Học viện Khoa học và Công nghệ đã tận tình giảng dạy, tạo mọi điều kiện, giúp đỡ và hỗ trợ mọi thủ tục cần thiết cho tác giả trong suốt quá trình học tập, nghiên cứu và thực hiện luận văn tốt nghiệp.

Cuối cùng, tác giả xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc tới đơn vị công tác, gia đình, bạn hữu đã luôn động viên, giúp đỡ, tạo điều kiện thuận lợi nhất cho tác giả trong quá trình học tập, nghiên cứu và công tác.

Bản luận văn không tránh khỏi còn nhiều khiếm khuyết, thiếu sót, tác giả mong muốn nhận được những ý kiến đóng góp của các thầy cô, đồng nghiệp và những người quan tâm để tác giả tiếp tục hoàn thiện.

Hà Nội, ngày tháng năm 2022

Tác giả

Bùi Hà Dũng

MỤC LỤC

Danh mục từ viết tắt.....	1
Danh mục các bảng	3
Danh mục các hình vẽ, đồ thị.....	4
MỞ ĐẦU	6
CHƯƠNG 1. NGHIÊN CỨU TỔNG QUAN TÌNH HÌNH PHÁT TRIỂN CÁC CÔNG NGHỆ Lò PHẢN ỨNG KHÍ NHIỆT ĐỘ CAO TRÊN THẾ GIỚI.....	8
CHƯƠNG 2: TÌM HIỂU Lò PHẢN ỨNG THỬ NGHIỆM KỸ THUẬT NHIỆT ĐỘ CAO (HTTR) VÀ CHƯƠNG TRÌNH TÍNH TOÁN MONTE CARLO SERPENT 2.....	22
2.1 Tìm hiểu lò phản ứng HTTR.....	22
2.2 Tìm hiểu chương trình tính toán Monte Carlo Serpent 2.....	44
CHƯƠNG 3: XÂY DỰNG MÔ HÌNH TÍNH TOÁN MÔ PHỎNG HTTR DÙNG CHƯƠNG TRÌNH TÍNH TOÁN MONTE CARLO SERPENT 2	51
3.1 Mô tả bài toán benchmark đối với HTTR.....	51
3.2 Mô hình hóa lò phản ứng HTTR dùng Serpent 2	69
CHƯƠNG 4. TÍNH TOÁN, KHẢO SÁT MỘT SỐ ĐẶC TRƯNG VẬT LÝ CỦA HTTR VÀ SO SÁNH VỚI CÁC KẾT QUẢ ĐÃ ĐƯỢC CÔNG BỐ TRƯỚC ĐÂY	75
4.1 Hệ số nhân neutron hiệu dụng và độ phản ứng.....	75
4.2 Tốc độ phản ứng, thông lượng neutron và phân bố công suất.....	77
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ	80
DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	82

Danh mục từ viết tắt

Chữ viết tắt	Tiếng Anh	Tiếng Việt
ĐHN		Điện hạt nhân
NLHN		Năng lượng hạt nhân
HTGR	High Temperature Gas-cooled Reactor	Lò phản ứng hạt nhân làm mát bằng khí nhiệt độ cao
HTTR	High Temperature engineering Test Reactor	Lò phản ứng thử nghiệm kỹ thuật nhiệt độ cao
VHTR	Very High Temperature Reactor	Lò phản ứng nhiệt độ rất cao
FSV	Fort St. Vrain	Lò phản ứng nguyên mẫu phát điện FSV của Hoa Kỳ
AVR	Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor	Lò phản ứng thử nghiệm phát điện AVR của Đức
THTR-300	Thorium Hochtemperatur Reaktor	Lò phản ứng nguyên mẫu phát điện THTR-300 của Đức
HTR-PM	High Temperature Gas-Cooled Reactor - Pebble-bed Module	Lò phản ứng trình diễn HTR-PM kiểu pebble bed của Trung Quốc
NGNP	Next Generation Nuclear Plant	Dự án Nhà máy hạt nhân thế hệ tiếp theo của Hoa Kỳ
DOE	Department of Energy	Bộ Năng lượng Hoa Kỳ
MMR	Micro Modular Reactor	Lò phản ứng siêu nhỏ kiểu mô đun MMR của Công ty USNC, Hoa Kỳ
PBMR	Pebble Bed Modular Reactor	Lò phản ứng mô đun kiểu pebble bed PBMR của Nam Phi
SMR	Small Modular Reactor	Lò phản ứng mô đun nhỏ
TRISO	TRistructural ISOtropic	Viên nhiên liệu TRISO
CFP	Coated Fuel Particle	Viên nhiên liệu được bọc ngoài
IHX	Intermediate Heat Exchanger	Bộ trao đổi nhiệt trung gian
LWR	Light Water Reactor	Lò phản ứng nước nhẹ

PCR V	Pre-stressed Concrete Reactor Vessel	Thùng lò phản ứng bê tông ứng suất trước
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development	Tổ chức hợp tác và phát triển kinh tế
GT-MHR	Gas Turbine Modular Helium Reactor	Lò phản ứng heli mô đun tuabin khí GT-MHR của Hoa Kỳ
JAEA	Japan Atomic Energy Agency	Cơ quan Năng lượng Nguyên tử Nhật Bản
GIF	Generation IV International Forum	Diễn đàn Quốc tế thế hệ thứ IV
FP	Fission Product	Sản phẩm phân hạch
NS	Nuclear Steelmaking	Luyện thép dùng nhiệt hạt nhân
LOCA	Loss Of Coolant Accident	Sự cố mất chất làm mát
PPWC	Primary Pressurized Water Cooler	Bộ làm mát nước áp lực sơ cấp
SPWC	Secondary Pressurized Water Cooler	Bộ làm mát nước áp lực thứ cấp
VCS	Vessel Cooling System	Hệ thống làm mát thùng lò
PSG	Probabilistic Scattering Game	Trò chơi tán xạ xác suất
PyC	Pyrolytic Carbon	Carbon nhiệt phân
RPV	Reactor Pressure Vessel	Thùng lò phản ứng
BP	Burnable Poison	Chất độc có thể cháy được
CSG	Constructive Solid Geometry	Hình học cấu trúc khối rắn
CMM	Cumulative Migration Method	Phương pháp di chuyển tích lũy
ATF	Accident Tolerant Fuel	Nhiên liệu chịu được tai nạn

Danh mục các bảng

Bảng 1.1. Các lò phản ứng HTTR được xây dựng trên thế giới [11]	15
Bảng 2.1. Một số thông số kỹ thuật chính của HTTR [11].....	33
Bảng 2.2. Các đặc trưng kỹ thuật của HTTR [11]	43
Bảng 4.1. Hệ số nhân neutron hiệu dụng của cấu hình tới hạn và dưới tới hạn	76
Bảng 4.2. Độ phản ứng dự trữ và dự trữ đập lò	76
Bảng 4.3. Phân bố tốc độ phản ứng phân hạch theo phương trục tại các kênh đo đặc	77

Danh mục các hình vẽ, đồ thị

Hình 1.1. Sơ đồ lò phản ứng VHTR [1].....	10
Hình 1.2. Địa điểm xây dựng HTR-PM tại Vịnh Shidao, Trung Quốc [8]	10
Hình 1.3. Các cấu trúc nhiên liệu dạng lăng trụ (prismatic) và dạng cầu (pebble) của VHTR (Nguồn: Internet)	11
Hình 1. 4. Cấu trúc của viên nhiên liệu TRISO (Nguồn: Internet).....	12
Hình 1.5. Lò phản ứng HTTR của Nhật Bản [13]	19
Hình 1.6. Cấu trúc nhiên liệu của lò phản ứng HTTR [13]	20
Hình 2. 1. Cấu trúc lò phản ứng HTTR [11].....	23
Hình 2. 2. Các ứng dụng nhiệt tiềm năng của HTGR [11]	25
Hình 2. 3. Đặc điểm an toàn của HTGR cho phép loại bỏ sự cố nổ hydro [11]	26
Hình 2. 4. Đặc điểm an toàn của HTGR giam giữ các sản phẩm phân hạch [11]	27
Hình 2. 5. Đặc điểm an toàn của HTGR trong quản lý sự cố [11]	28
Hình 2. 6. Lượng thấp chất thải phóng xạ mức độ cao của HTTR [11]	29
Hình 2. 7 Hình ảnh mặt cắt nhà lò HTTR [11]	34
Hình 2. 8. Cấu hình vùng hoạt và thùng lò của HTTR [11]	34
Hình 2. 9. Hệ thống làm mát của HTTR [11]	35
Hình 2.10. Bó nhiên liệu của HTTR [11]	36
Hình 2.11. Các bộ phận bên trong vùng hoạt HTTR [11]	37
Hình 3.1. Hạt nhiên liệu TRISO [19].....	53
Hình 3.2. Khối nhiên liệu chứa các hạt TRISO với phân bố ngẫu nhiên (các hạt không được trình bày chi tiết trên hình) [19].....	54
Hình 3.3. Phần tử nhiên liệu HTTR [19]	55
Hình 3.4. Thanh chất độc cháy được (trái) và vị trí thanh trống (phải) [19] ..	56
Hình 3.5. Bó nhiên liệu 33 thanh. Dxx ký hiệu đường kính là xx (mm) [19]	57
Hình 3.6. Bó nhiên liệu 31 thanh. Dxx ký hiệu đường kính là xx (mm) [19]	58
Hình 3.7. Một phần thanh điều khiển [19].....	59
Hình 3.8. Thanh điều khiển bao gồm 10 phần [19]	60
Hình 3.9. Cột thanh điều khiển. Dxx ký hiệu đường kính là xx (mm) [19] ...	61
Hình 3.10. Cột thiết bị đo. Dxx ký hiệu đường kính là xx (mm) [19].....	62
Hình 3.11. Cột phản xạ có thể thay thế [19]	63

Hình 3.12. Khối phản xạ có thể thay thế cho bó nhiên liệu 33 thanh. Dxx ký hiệu đường kính là xx (mm) [19]	64
Hình 3.13. Khối phản xạ có thể thay thế cho bó nhiên liệu 31 thanh. Dxx ký hiệu đường kính là xx (mm) [19]	65
Hình 3.14. Các vùng nhiên liệu HTTR [19]	66
Hình 3.15. Cấu hình vùng hoạt HTTR [19]	67
Hình 3.16. Các hướng cột thanh điều khiển và nhiên liệu [19]	68
Hình 3.17. Ký hiệu các cột của HTTR [19]	68
Hình 3.18. Mặt cắt ngang của HTTR [19]	69
Hình 3.19. Mặt cắt ngang của vùng hoạt HTTR mô phỏng bằng Serpent 2 ..	71
Hình 3.20. Lò phản ứng HTTR tới hạn mô phỏng bằng Serpent 2 (các thanh điều khiển trung tâm, R1 và R2 ở vị trí 177.5 cm và các thanh điều khiển R3 ở vị trí 404.9 cm tính từ phần đáy nhiên liệu).....	72
Hình 3.21. Lò phản ứng HTTR dưới tới hạn mô phỏng bằng Serpent 2 (các thanh điều khiển trung tâm, R1, R2 và R3 ở vị trí -5.5 cm tính từ phần đáy nhiên liệu).....	73
Hình 3.22. Lò phản ứng HTTR trên tới hạn mô phỏng bằng Serpent 2 (các thanh điều khiển trung tâm, R1, R2 và R3 rút ra hoàn toàn khỏi vùng hoạt)	74
Hình 4.1. Tốc độ phản ứng phân hạch tương đối theo chiều cao vùng hoạt lò phản ứng HTTR tại các kênh đo đặc	78
Hình 4.2. Phổ thông lượng neutron của lò phản ứng HTTR	79
Hình 4.3. Phân bố công suất theo phương bán kính lò phản ứng HTTR.....	79

MỞ ĐẦU

Việc duy trì, phát triển nguồn nhân lực về khoa học và công nghệ lò phản ứng hạt nhân nhằm phục vụ chương trình điện hạt nhân (ĐHN) trong tương lai của Việt Nam cũng như công tác lập kế hoạch ứng phó sự cố an toàn bức xạ hạt nhân của quốc gia là cần thiết; đặc biệt trong bối cảnh các quốc gia trên thế giới và trong khu vực vẫn tiếp tục vận hành, xây mới và/hoặc có kế hoạch xây mới các nhà máy ĐHN ở trên đất liền hoặc nổi trên biển. Đối tượng nghiên cứu của đề tài luận văn là kiểu lò phản ứng hạt nhân làm mát bằng khí nhiệt độ cao (HTGR: High Temperature Gas-cooled Reactor), một loại lò phản ứng thế hệ thứ IV với các đặc tính an toàn thụ động tiên tiến. Đây là loại lò phản ứng đang được quan tâm nghiên cứu, phát triển rộng rãi trên thế giới với nhiệt độ chất làm mát đầu ra cao có thể lên tới 1000°C, cho phép đồng thời sản xuất điện và nhiệt (phục vụ các ứng dụng phi điện). Đề tài nghiên cứu đề xuất việc tính toán, khảo sát một số đặc trưng vật lý của lò phản ứng thử nghiệm kỹ thuật nhiệt độ cao (HTTR: High Temperature engineering Test Reactor) sử dụng chương trình tính toán Monte Carlo Serpent 2 cùng với thư viện dữ liệu hạt nhân mới nhất là ENDF/B-VIII.0 của Hoa Kỳ. Các dữ liệu phục vụ việc xây dựng mô hình tính toán mô phỏng HTTR sử dụng chương trình Serpent 2 sẽ được lấy từ bài toán benchmark đối với lò phản ứng HTTR.

Trong khuôn khổ luận văn thạc sỹ, luận văn đặt ra các mục tiêu như sau:

- Tìm hiểu tổng quan tình hình phát triển các công nghệ lò phản ứng làm mát bằng khí nhiệt độ cao trên thế giới;
- Sử dụng thành thạo chương trình tính toán Monte Carlo Serpent 2 để tính toán mô phỏng lò phản ứng thử nghiệm kỹ thuật nhiệt độ cao (HTTR);
- Tính toán, khảo sát một số đặc trưng vật lý của lò phản ứng HTTR dùng chương trình tính toán Monte Carlo Serpent 2.

Đối tượng và phạm vi nghiên cứu của luận văn:

- Đối tượng nghiên cứu của luận văn là lò phản ứng thử nghiệm kỹ thuật nhiệt độ cao (HTTR) của Nhật Bản.
- Phạm vi nghiên cứu của luận văn là tính toán, khảo sát một số đặc trưng vật lý của lò phản ứng HTTR sử dụng chương trình Monte Carlo Serpent 2.

Nội dung nghiên cứu của luận văn bao gồm:

- Nội dung 1: Nghiên cứu tổng quan tình hình phát triển các công nghệ lò phản ứng khí nhiệt độ cao trên thế giới;
- Nội dung 2: Tìm hiểu lò phản ứng thử nghiệm kỹ thuật nhiệt độ cao (HTTR) và chương trình tính toán Monte Carlo Serpent 2;
- Nội dung 3: Xây dựng mô hình tính toán mô phỏng lò phản ứng HTTR dùng chương trình tính toán Monte Carlo Serpent 2;
- Nội dung 4: Tính toán, khảo sát một số đặc trưng vật lý của lò phản ứng HTTR và so sánh với các kết quả đã được công bố trước đây.

Phương pháp nghiên cứu của luận văn: Luận văn được tiến hành bằng phương pháp tính toán mô phỏng lò phản ứng HTTR sử dụng chương trình tính toán Monte Carlo Serpent 2:

- Xây dựng mô hình tính toán mô phỏng lò phản ứng thử nghiệm kỹ thuật nhiệt độ cao (HTTR) dùng chương trình tính toán Monte Carlo Serpent 2;
- Tính toán một số đặc trưng vật lý của lò phản ứng HTTR dùng chương trình Serpent 2 cùng với thư viện dữ liệu hạt nhân mới nhất ENDF/B-VIII.0;
- Phân tích, đánh giá các kết quả tính toán và so sánh với các kết quả đã được công bố trước đây với HTTR.

Dự kiến kết quả đạt được:

- Các kết quả thu được nắm bắt được tình hình phát triển các công nghệ lò phản ứng khí nhiệt độ cao trên thế giới, hiểu được các đặc điểm chính của lò phản ứng HTTR, sử dụng được chương trình Monte Carlo để mô phỏng và tính toán, khảo sát một số đặc trưng vật lý của lò phản ứng HTTR.
- Các kết luận đánh giá kết quả tính toán với Serpent 2 được so sánh với các kết quả đã được công bố với bài toán benchmark lò phản ứng HTTR.

Cấu trúc của luận văn gồm Mở đầu, Chương 1 tổng quan tình hình phát triển các công nghệ lò phản ứng khí nhiệt độ cao trên thế giới, Chương 2 tìm hiểu lò phản ứng HTTR và chương trình Serpent 2, Chương 3 xây dựng mô hình tính toán HTTR dùng Serpent 2, Chương 4 trình bày về các kết quả và thảo luận, sau đó là Kết luận và Tài liệu tham khảo.

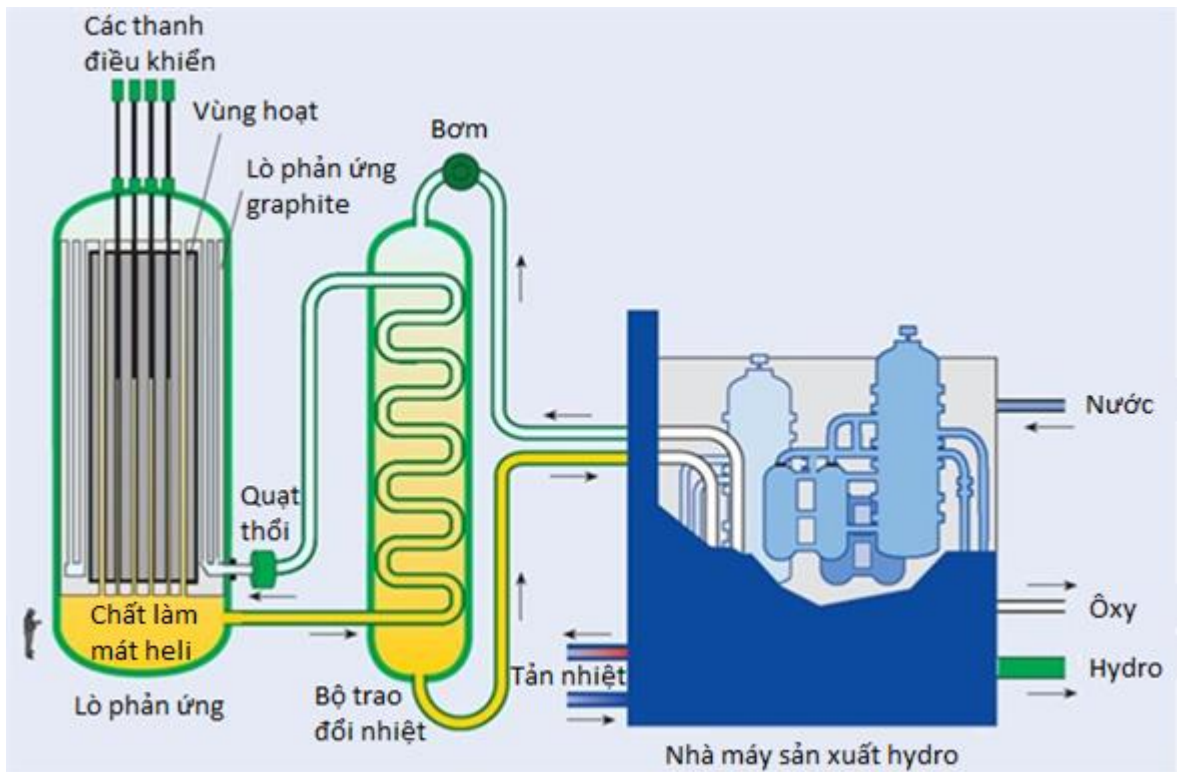
CHƯƠNG 1. NGHIÊN CỨU TỔNG QUAN TÌNH HÌNH PHÁT TRIỂN CÁC CÔNG NGHỆ Lò PHẢN ỨNG KHÍ NHIỆT ĐỘ CAO TRÊN THẾ GIỚI

Trong thế kỷ 20, việc phát hiện ra năng lượng hạt nhân (NLHN) đã cung cấp cho con người một nguồn năng lượng gần như vô tận. Trong sự phát triển của điện năng, sự tạo ra NLHN và giá trị tiềm ẩn của NLHN là vô cùng to lớn. Ngoài việc được dùng để tạo ra điện, NLHN còn được sử dụng rộng rãi trong việc sưởi ấm, sản xuất hydro, khử mặn nước biển và các lĩnh vực khác. Nhưng đáng tiếc là mặc dù trên lý thuyết ĐHN có thể giải quyết được vấn đề năng lượng của con người, nhưng tính an toàn, vấn đề quản lý chất thải phóng xạ cùng giá thành cao đã và đang cản trở sự phát triển nhanh chóng của ĐHN. Kể từ khi NLHN được sử dụng vì mục đích hòa bình, việc phát triển ĐHN đã được đặt lên hàng đầu. Sau các sự cố nhà máy ĐHN Fukushima ở Nhật Bản, Chernobyl ở Liên Xô cũ và Three Mile Island ở Hoa Kỳ có thể thấy con người đang cần gấp những lò phản ứng hạt nhân tiên tiến và an toàn hơn. Sau quá trình khai thác và cải tiến liên tục, các nhà phát triển đã đề xuất các lò phản ứng hạt nhân tiên tiến hơn, như ABWR, AP1000, EPR, VVER-1200, ... và độ an toàn của chúng đã được cải thiện rất nhiều. Tuy nhiên, với việc nâng cao mức độ an toàn, chi phí xây dựng các lò phản ứng hạt nhân cũng tăng chưa từng thấy, do đó việc giảm chi phí xây dựng cũng đã trở thành một vấn đề được quan tâm chú trọng. Trong bối cảnh đó, các công nghệ lò phản ứng hạt nhân làm mát bằng khí (carbon dioxide, heli, v.v.) nhiệt độ cao (HTGR: High Temperature Gas-cooled Reactor) ngày càng được quan tâm nhiều hơn nhờ các ưu điểm về an toàn và tính kinh tế của chúng [1-7].

HTGR còn được gọi là lò phản ứng nhiệt độ rất cao (VHTR: Very High Temperature Reactor), là loại lò phản ứng hạt nhân thế hệ thứ IV có thể hoạt động ở nhiệt độ rất cao lên đến cỡ 1000°C và được làm mát bằng khí, làm chậm neutron bằng than chì (graphite) với phổ năng lượng neutron nhiệt (Hình 1.1). Thiết kế HTGR đầu tiên được đề xuất tại các phòng thí nghiệm Clinton (nay là Phòng thí nghiệm Quốc gia Oak Ridge, ORNL) vào năm 1947. Đức cũng đóng một vai trò quan trọng trong sự phát triển HTGR trong thập kỷ tiếp theo. Lò phản ứng Peach Bottom ở Hoa Kỳ (US) là HTGR đầu tiên sản xuất điện năng, hoạt động từ năm 1966 đến năm 1974 như một nhà máy trình diễn

với công suất nhiệt 150 MWth. Nhà máy Fort St. Vrain (FSV) là thiết kế điện thương mại đầu tiên, hoạt động từ năm 1979 đến năm 1989 với công suất nhiệt 842 MWth. Mặc dù lò phản ứng này gặp các vấn đề về vận hành dẫn đến việc ngừng hoạt động do các yếu tố kinh tế, nhưng FSV vẫn là bằng chứng cho khái niệm HTGR ở Hoa Kỳ. HTGR cũng đã được phát triển ở Vương quốc Anh (lò phản ứng Dragon) và Đức (AVR: Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor; và THTR-300: Thorium Hochtemperatur Reaktor); và hiện đang được nghiên cứu, phát triển ở Nhật Bản (HTTR sử dụng nhiên liệu dạng lắng trụ với công suất nhiệt 30 MWth) và Trung Quốc (HTR-10, thiết kế pebble bed (dạng “đá cuội” hay khối cầu) với công suất điện 10 MWe). Gần đây nhất vào ngày 20/12/2021, hai mô đun lò phản ứng trình diễn HTR-PM kiểu pebble bed (High Temperature Gas-Cooled Reactor - Pebble-bed Module) ở Vịnh Shidao, Sơn Đông, Trung Quốc (Hình 1.2) đã lần đầu tiên được kết nối với lưới điện [8]. Mỗi mô đun HTR-PM có công suất nhiệt 250 MWth và hai mô đun HTR-PM được kết nối với một tuabin hơi nước để cung cấp công suất điện 210 MWe. Trong khi đó, Dự án Nhà máy Hạt nhân Thế hệ Tiếp theo (NGNP: Next Generation Nuclear Plant) [9] của Bộ Năng lượng Hoa Kỳ (DOE: Department of Energy) và thiết kế lò phản ứng siêu nhỏ kiểu mô đun MMR (Micro Modular Reactor) [10] của Công ty USNC (Ultra Safe Nuclear Corporation), Hoa Kỳ đại diện cho các hoạt động phát triển quan trọng gần đây đối với công nghệ lò phản ứng HTGR ở Hoa Kỳ.

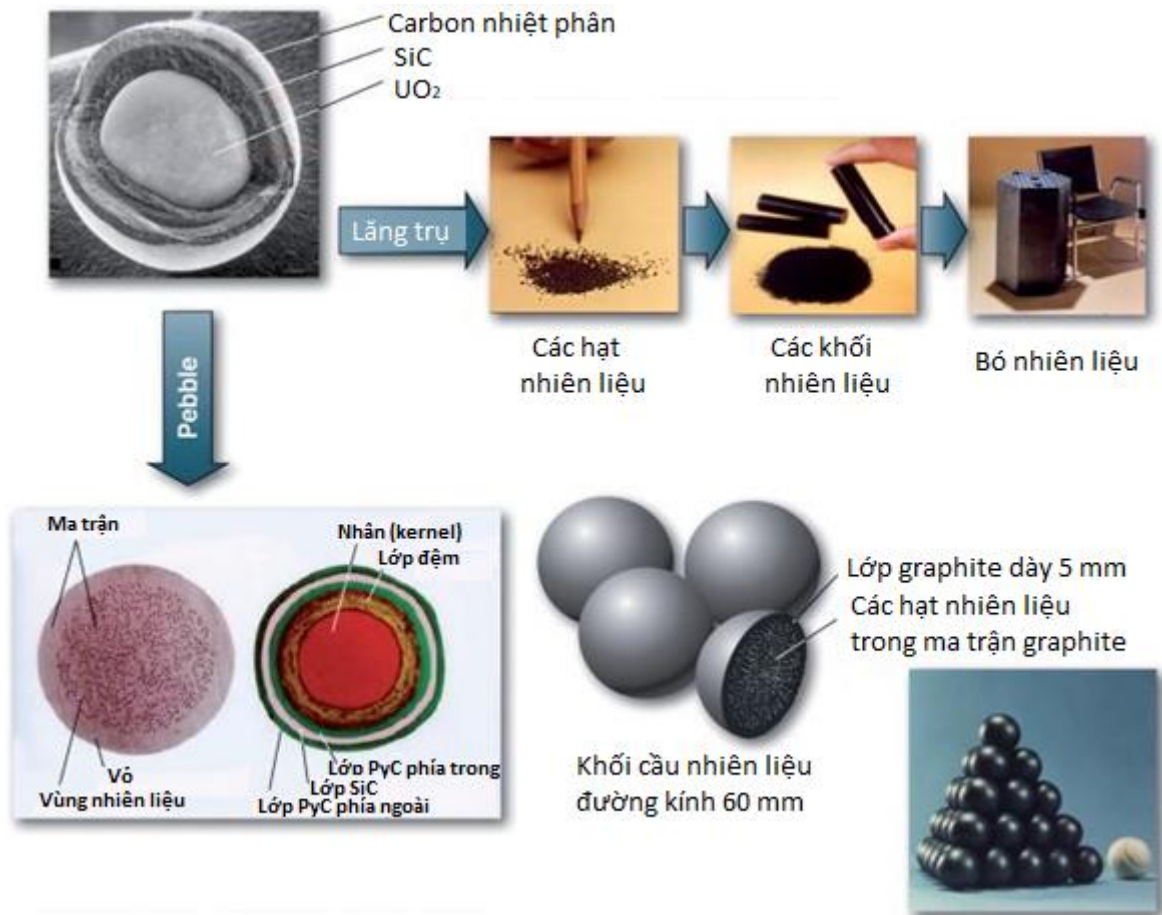
VHTR có hai cấu hình lò phản ứng điển hình: (1) kiểu khối lắng trụ như thiết kế HTTR của Nhật và GTMHR trước đó của General Atomics và các lò khác ở Nga; (2) kiểu pebble bed như HTR-10 hoặc HTR-PM của Trung Quốc và PBMR (Pebble Bed Modular Reactor) trước đây ở Nam Phi (Hình 1.3). Mặc dù hình dạng của phần tử nhiên liệu cho hai cấu hình là khác nhau, nhưng nền tảng kỹ thuật cho cả hai cấu hình đều giống nhau, chẳng hạn như nhiên liệu dạng hạt TRISO (TRistructural ISOtropic) (Hình 1.4) trong ma trận graphite, cấu trúc vùng hoạt lò phản ứng hoàn toàn bằng các vật liệu chịu nhiệt độ cao như gốm và graphite, chất làm mát heli và mật độ năng lượng thấp; nhằm đạt được nhiệt độ đầu ra cao và duy trì sự phân hạch bên trong nhiên liệu TRISO trong các điều kiện vận hành của lò phản ứng. VHTR có thể hỗ trợ các chu trình nhiên liệu thay thế như U-Pu, Pu, ô xít hỗn hợp MOX, U-Th.



Hình 1.1. Sơ đồ lò phản ứng VHTR [1]



Hình 1.2. Địa điểm xây dựng HTR-PM tại Vịnh Shidao, Trung Quốc [8]

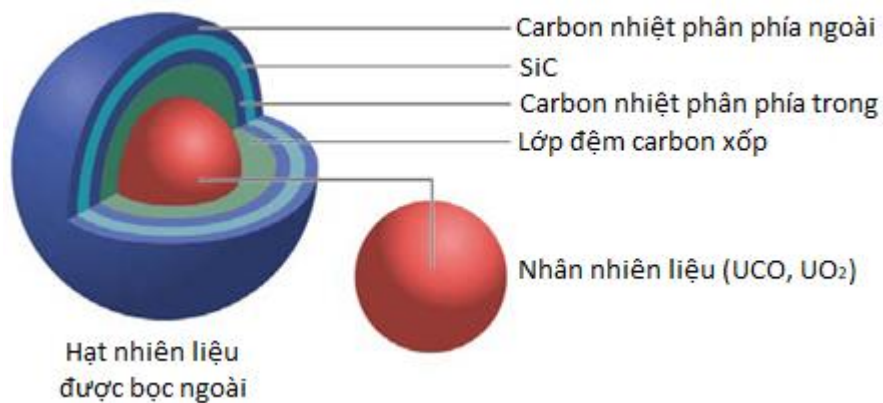


Hình 1.3. Các cấu trúc nhiên liệu dạng lãng trụ (prismatic) và dạng cầu (pebble) của VHTR (Nguồn: Internet)

Để phát điện, hệ thống tuabin khí heli có thể được đặt trực tiếp trong vòng làm mát sơ cấp, được gọi là chu trình trực tiếp; hoặc ở phía cuối của dải nhiệt độ đầu ra, một bình sinh hơi có thể được sử dụng với chu trình Rankine thông thường. Đối với các ứng dụng nhiệt hạt nhân như nhiệt quá trình cho các nhà máy lọc dầu, hóa dầu, luyện kim và sản xuất hydro, quá trình ứng dụng nhiệt thường được kết hợp với lò phản ứng thông qua bộ trao đổi nhiệt trung gian (IHX: Intermediate Heat Exchanger), được gọi là chu trình gián tiếp.

Nền tảng kỹ thuật cho VHTR là nhiên liệu TRISO, graphite làm cấu trúc vùng hoạt lò phản ứng, chất làm mát heli, cũng như bố trí vùng hoạt lò phản ứng chuyên dụng và mật độ công suất thấp để loại bỏ nhiệt phân rã một cách tự nhiên. Nhiên liệu ở dạng hạt TRISO (Hình 1.4) có đường kính nhỏ hơn một milimét. Mỗi hạt có một nhân (kernel) (đường kính khoảng 0.5 mm) UCO

(uranium oxycarbide) hoặc UO_2 (uranium dioxide), với urani được làm giàu có thể lên tới 20% U-235, mặc dù thông thường thấp hơn. Phần nhân này được bao quanh bởi các lớp carbon và silicon carbide, tạo ra một lớp giam giữ các sản phẩm phân hạch ổn định với nhiệt độ cao tới khoảng 1600°C . Các hạt TRISO được kết hợp lại trong các viên pebble dạng cầu cỡ quả bóng bi-a, hoặc trong các khối graphite dạng lăng trụ (Hình 1.3). VHTR có độ sâu cháy nhiên liệu cao (100-200 GWd/t), hiệu suất nhiệt cao, khả năng ứng dụng nhiệt quá trình, an toàn thụ động hoàn toàn, tính mô-đun, các chi phí vận hành và bảo trì thấp, và độ linh hoạt trong xây dựng ngày càng tăng.



Hình 1. 4. Cấu trúc của viên nhiên liệu TRISO (Nguồn: Internet)

Lò phản ứng làm mát bằng khí đã được đề xuất lần đầu tiên là vào năm 1942, năm mà cấu hình hạt nhân đầu tiên (CP-1) đạt tới trạng thái tới hạn. Vào giữa những năm 1940, thiết kế của một lò phản ứng năng lượng làm mát bằng khí heli được đề xuất như trình bày ở trên. Trong thiết kế này, các đặc điểm cơ bản của lò phản ứng làm mát bằng khí nhiệt độ cao tiên tiến đã được thiết lập, đó là việc sử dụng khí heli làm chất làm mát trong hệ thống sơ cấp tuabin khí chu trình trực tiếp, việc lựa chọn graphite làm vật liệu làm chậm neutron và cấu trúc lò phản ứng, và lựa chọn cacbua urani (uranium carbide) và thori cacbua (thorium carbide) tương ứng là vật liệu fissile (dễ phân hạch) và vật liệu tái sinh (fertile) trong chu trình nhiên liệu $^{235}\text{U}/\text{Th}/^{233}\text{U}$. Khái niệm này đã được sửa đổi cập nhật vào giữa những năm 1950 ở Vương quốc Anh.

HTGR được kỳ vọng sẽ có những ưu điểm sau so với các lò phản ứng

làm mát bằng khí khác mà đại diện là lò phản ứng Magnox.

- HTGR có thể giảm được kích thước vì mật độ công suất nhiệt cao như một lò phản ứng làm mát bằng khí.
- HTGR có hiệu suất nhiệt cao do nhiệt độ chất làm mát đầu ra cao.
- Từ các đặc điểm trên, tính kinh tế vượt trội của HTGR có thể được kỳ vọng.
- Ngoài việc phát điện, HTGR có thể được sử dụng như một nguồn nhiệt cho các quá trình ứng dụng nhiệt khác nhau.

Vào thời điểm đó, tính an toàn nội tại cao của HTGR không được nhấn mạnh như lý do để chọn một lò phản ứng, nhưng tính kinh tế cao hơn được kỳ vọng vì chưa có tai nạn hạt nhân nghiêm trọng nào xảy ra.

Nói chung, rất khó để tăng nhiệt độ lớp vỏ bọc nhiên liệu trên 650°C đối với lò phản ứng với nhiên liệu sử dụng vỏ bọc kim loại như lò phản ứng nước nhẹ (LWR: Light Water Reactor) và lò phản ứng nhanh. Do đó, rất khó để làm nóng nhiệt độ chất làm mát đầu ra của lò phản ứng trên 600°C . Để tách nhiệt ở nhiệt độ cao từ lò phản ứng hạt nhân, cần phải phát triển một loại vật liệu làm vỏ bọc nhiên liệu, có chức năng chứa nhiên liệu và ngăn chặn sự giải phóng các sản phẩm phân hạch và chịu được nhiệt độ cao trên 650°C . Năm 1956, viên nhiên liệu được bọc ngoài (CFP: Coated Fuel Particle) đã được phát triển bởi phòng thí nghiệm Harwell ở Vương quốc Anh để giải quyết vấn đề này.

Với sự phát triển của CFP, Dự án Dragon đã được phòng thí nghiệm Harwell đề xuất với Cơ quan Hạt nhân Châu Âu (European Nuclear Agency) vào năm 1958. Tổ chức Hợp tác và Phát triển Kinh tế (OECD: Organisation for Economic Co-operation and Development) đã chấp nhận đề xuất này và thiết lập một chương trình trong đó 12 quốc gia châu Âu hợp tác phát triển công nghệ HTGR. Lò phản ứng HTGR thử nghiệm 20 MWt, Dragon, với nhiệt độ chất làm mát đầu ra của lò phản ứng là 750°C được xây dựng tại Winfrith, Vương quốc Anh. Đây là HTGR đầu tiên đạt được trạng thái tới hạn, nhưng Dragon đã không được dùng để phát ra điện năng. Sau khi đạt tới trạng thái tới hạn đầu tiên vào năm 1964, Dragon đóng vai trò như một công cụ nghiên cứu hiệu quả nhất để phát triển và chứng minh tính khả thi của nhiên liệu và graphite, đồng thời tích lũy kinh nghiệm quý báu trong vận hành và bảo trì

HTGR, và hoạt động này bị chấm dứt vào năm 1976. Sau đó, việc xây dựng và vận hành các lò phản ứng thí nghiệm kiểu lăng trụ (prismatic) và kiểu pebble bed và lò phản ứng nguyên mẫu phát điện lần lượt được thực hiện ở Hoa Kỳ và Đức.

Việc phát triển nhà máy ĐHN dựa trên công nghệ HTGR bắt đầu vào đầu những năm 1960 tại Hoa Kỳ và Đức. Các quốc gia này đã xây dựng và vận hành lò phản ứng thử nghiệm và lò phản ứng trình diễn với hệ thống phát điện tuabin hơi nước. Nhưng Hoa Kỳ và Đức đã ngừng xây dựng một lò phản ứng thương mại vì các lý do chính trị và kinh tế khác nhau. Sự phát triển HTGR đã tiếp tục diễn ra trong hơn nửa thế kỷ qua trên thế giới, trong đó các lò phản ứng được liệt kê trong Bảng 1.1 đã được xây dựng và vận hành trên thế giới. Sự phát triển hiện tại tập trung vào các thiết kế thương mại thế hệ tiếp theo, còn được gọi là lò phản ứng nhiệt độ rất cao (VHTR), cho một loạt các ứng dụng kinh tế. Một trong số đó hứa hẹn khai thác tiềm năng cao nhất của HTGR là sản xuất hydro.

Tại Hoa Kỳ, General Atomics (GA) đã xây dựng một lò phản ứng nguyên mẫu phát điện (sản lượng nhiệt: 115 MWt, nhiệt độ chất làm mát đầu ra: 725°C), Peach Bottom, từ cuối những năm 1950. Các hạt nhiên liệu (fuel kernel), ban đầu được phủ một lớp cacbon nhiệt phân (PyC: Pyrolytic Carbon), có dạng lăng trụ và sử dụng cacbua urani và cacbua thori làm nhiên liệu. Đây là HTGR đầu tiên tạo ra năng lượng điện (sản lượng điện: 40 MWe) bằng tuabin hơi nước và vận hành thành công từ năm 1966 đến năm 1974. Lò phản ứng này cũng được vận hành như một thiết bị thử nghiệm (test bed) đối với nhiên liệu ma trận graphite các hạt bọc gốm tiên tiến cho các HTGR cỡ lớn.

Sau Peach Bottom, GA đã xây dựng lò phản ứng nguyên mẫu phát điện FSV, trong đó công suất nhiệt và điện lần lượt là 842 MWt và 330 MWe, và nhiệt độ đầu ra lò phản ứng của chất làm mát là 775°C. Các đặc điểm chính của FSV là sử dụng thùng lò phản ứng bê tông ứng suất trước (PCR: Pre-stressed Concrete Reactor Vessel), các bình sinh hơi nước liên tục kiểu mô-đun với các bộ quá nhiệt (superheater) và bộ tái nhiệt (reheater) tích hợp, các bộ tuần hoàn heli dòng hướng trục điều khiển bằng hơi nước và các phần tử nhiên liệu graphite hình lục giác kết hợp các CFP dạng cacbon và cacbua cải tiến. FSV đạt được trạng thái tới hạn vào năm 1974. FSV bắt đầu hoạt động thương mại với 70% công suất từ năm 1979 và đạt 100% công suất vào năm 1981 với hiệu

suất tổng thể xấp xỉ 40%. Hoạt động của FSV chấm dứt vào năm 1989 do hiệu suất vận hành không ổn định.

Ở Đức, 15 công ty điện lực cấp thành phố đã thành lập một công ty con để vận hành AVR, được xây dựng như một nhà máy thử nghiệm phát điện cho các lò phản ứng kiểu đá cuội với một mục đích bổ sung là thử nghiệm nhiên liệu. Công suất nhiệt và điện với tuabin hơi nước lần lượt là 46 MWt và 13 MWe, và nhiệt độ chất làm mát đầu ra là 950°C. Vùng hoạt động cung cấp nhiên liệu với khoảng 100000 viên pebble graphite có chứa các CFP. Trong quá trình vận hành, các viên pebble có đường kính 6 cm liên tục được rút ra khỏi đáy của vùng hoạt lò phản ứng và các viên pebble khác được thêm vào ở trên cùng của vùng hoạt để quá trình tuần hoàn nhiên liệu qua vùng hoạt diễn ra. Sau một vài lần đi qua vùng hoạt, những viên pebble đã qua sử dụng sẽ được loại bỏ khỏi chu trình khi đạt được mục tiêu về độ cháy nhiên liệu và được thay thế bằng những viên pebble mới. Chất làm mát chảy từ dưới lên trên qua pebble bed và sau đó đi qua các ống của bình sinh hơi, nằm phía trên vùng hoạt của lò phản ứng trong vỏ thùng lò bằng thép. AVR đạt được trạng thái tới hạn vào năm 1966, bắt đầu phát điện vào năm 1967, đạt công suất tối đa vào năm 1968 và chấm dứt hoạt động vào năm 1988. Dự án AVR-U, mà điều chỉnh từ AVR và cung cấp khí heli ở 950°C cho thiết bị steam reformer và IHX đặt bên ngoài lò phản ứng cho các thí nghiệm ứng dụng nhiệt hạt nhân, đã được nghiên cứu; tuy nhiên, dự án này đã bị hủy bỏ vì các lý do ngân sách.

Bảng 1.1. Các lò phản ứng HTTR được xây dựng trên thế giới [11]

	HTGR thử nghiệm				HTGR nguyên mẫu		
	Dragon	AVR	HTTR	HTR-10	Peach Bottom	FSV	THTR-300
Quốc gia	Anh	Đức	Nhật Bản	Trung Quốc	Hoa Kỳ	Hoa Kỳ	Đức
Thời gian vận hành	1963-76	1967-88	1988-hiện tại	2000-hiện tại	1967-74	1976-89	1986-89
Loại lò phản ứng	Ống	Pebble	Lăng trụ	Pebble	Ống	Lăng trụ	Pebble

Công suất nhiệt, MWt	21.5	46	30	10	115	842	750
Nhiệt độ chất làm mát heli đầu ra, °C	750	950	950	700	725	775	750
Áp suất chất làm mát, MPa	2.0	1.1	4.0	3.0	2.25	4.8	3.9
Sản lượng điện, MW	-	13	-	2.5	40	330	300
Sản lượng nhiệt quá trình, MW	-	-	10	-	-	-	-
Nhiệt độ nhiệt quá trình, °C	-	-	863	-	-	-	-
Mật độ công suất vùng hoạt, W/cm ³	14.0	2.6	2.5	2.0	8.3	6.3	6.0
Hạt nhiên liệu	UO ₂	(Th/U,U)O ₂ , C ₂	UO ₂	UO ₂	ThC ₂	(Th/U,U)C ₂	(Th/U)O ₂
Lớp phủ nhiên liệu	TRISO	BISO (Bi-Structural Isotropic) & TRISO	TRISO	TRISO	BISO	TRISO	BISO

Lò phản ứng nguyên mẫu phát điện kiểu pebble bed, THTR-300, được tài trợ bởi Cộng hòa Liên bang Đức (FRG) và Nordrhein Westfalen. Công suất nhiệt và điện với tuabin hơi nước lần lượt là 750 MWt và 300 MWe, và nhiệt độ đầu ra của chất làm mát là 750°C. Thùng lò phản ứng ở dạng PCRV, và các hạt nhiên liệu được sử dụng là uran oxit uran và thori oxit. Việc xây dựng THTR-300 bắt đầu vào năm 1971, nhưng chủ yếu do các yêu cầu cấp phép thay đổi nên đã không được hoàn thành cho đến năm 1984. THTR-300 được kết nối với lưới điện của Công ty vận hành Hochtemperatur-Kernkraftwerk GmbH (HKG) vào năm 1985. Năm 1989, HKG quyết định đóng cửa vĩnh viễn THTR-300 vì các lý

do chính trị xã hội, chứ không phải vì những khó khăn kỹ thuật liên quan đến nhà máy. Những lý do chính trị xã hội này được HKG đưa ra bằng đơn xin tháo dỡ sớm dựa trên sự thiếu hụt dự kiến về kinh phí và những thay đổi trong hợp đồng trong việc phân bổ chi phí tháo dỡ nhà máy giữa FRG, Nordrhein Westfalen và HKG sẽ có hiệu lực khi kết thúc giai đoạn trình diễn trong năm 1991.

Châu Á là nơi có các lò phản ứng mới nhất, HTTR và lò phản ứng nhiệt độ cao 10 MWt (HTR-10), tương ứng là các thiết kế lắng trụ và pebble bed, và đang hoạt động ngày nay ở Nhật Bản và Trung Quốc. HTTR có công suất 30 MWt có nhiệt độ chất làm mát đầu ra là 950°C và cho phép sản lượng nhiệt quá trình là 863°C. Khả năng nhiệt độ cao như vậy tương thích với các công nghệ quá trình hiện đại và mở rộng vai trò thị trường của lò phản ứng, như được thể hiện trong các thiết kế thương mại gần đây. Ở Trung Quốc, một nhà máy trình diễn là HTR-PM đã lần đầu tiên được kết nối với lưới điện vào cuối năm 2021 như trình bày ở trên và các chương trình nhà máy lò phản ứng thương mại đang được triển khai thực hiện.

Được tài trợ chính bởi DOE, một nhóm nghiên cứu và công nghiệp đã đề xuất lò phản ứng heli mô đun tuabin khí (GT-MHR: Gas Turbine Modular Helium Reactor) vào năm 1994. Thiết kế dựa trên lò phản ứng kiểu lắng trụ với công suất 600 MWt và nhiệt độ chất làm mát đầu ra 850°C, an toàn thụ động và sử dụng chuyển đổi công suất tuabin khí ở hiệu suất nhiệt đạt tới 50%. Chi phí phát điện cạnh tranh so với các phương án phát điện khác. GA kể từ đó đã tiếp tục phát triển GT-MHR với sự hợp tác của các đối tác ở Liên bang Nga. Cơ quan Năng lượng Nguyên tử Nhật Bản (JAEA: Japan Atomic Energy Agency) cũng đã giới thiệu GTHTR300C, một lò phản ứng nhiệt độ cao tuabin khí công suất 300 MWe để đồng phát điện và hydro. GTHTR300C sử dụng một lò phản ứng kiểu lắng trụ 600 MWt với nhiệt độ chất làm mát đầu ra là 950°C để cung cấp năng lượng cho tuabin khí chu trình trực tiếp để phát điện và quy trình nhiệt hóa để sản xuất hydro. Nam Phi đã và đang phát triển lò phản ứng mô-đun kiểu pebble bed 400 MWt (PBMR) với nhiệt độ chất làm mát đầu ra của lò phản ứng là 900°C để sản xuất điện và hydro và cho các ứng dụng nhiệt quá trình khác.

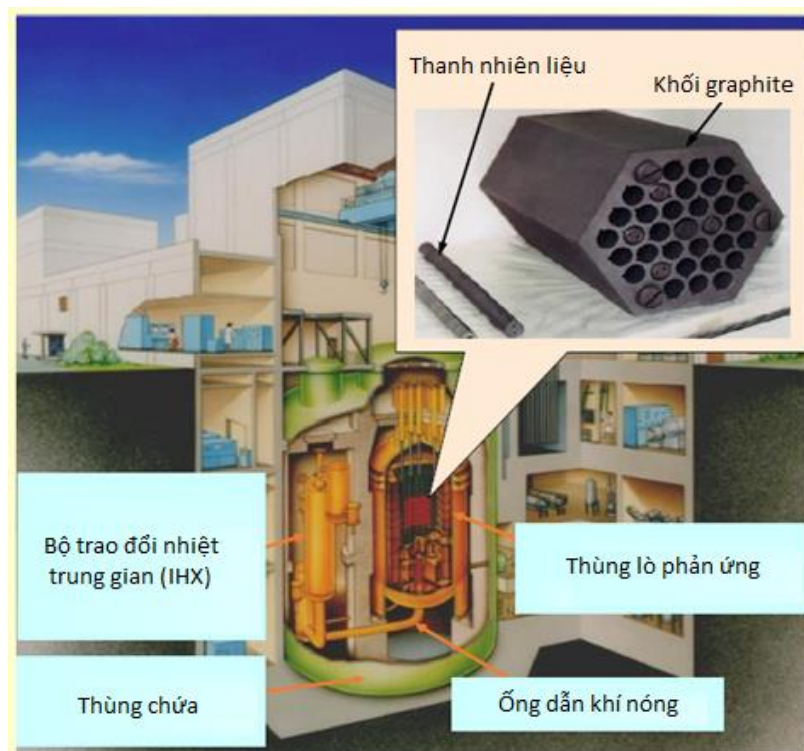
Năm 2001, Diễn đàn Quốc tế Thế hệ thứ IV (GIF: Generation IV International Forum) gồm 10 quốc gia thành viên đã chấp thuận 6 hệ thống hạt

nhân có thể được cấp phép, xây dựng và vận hành vào năm 2030 và sẽ cung cấp các sản phẩm năng lượng giá cả phải chăng đồng thời giải quyết thỏa đáng các vấn đề về an toàn hạt nhân, chất thải và phổ biến vũ khí hạt nhân. Nhận thấy VHTR có thể được triển khai trong tương lai gần và đặc biệt thích hợp không chỉ cho sản xuất điện mà còn cho sản xuất hydro và các ứng dụng nhiệt công nghiệp, DOE đã đặt ưu tiên cho VHTR trong các công nghệ lò phản ứng Thế hệ IV. Điều này dẫn đến việc Hoa Kỳ thành lập chương trình Dự án Nhà máy Hạt nhân Thế hệ Tiếp theo (NGNP) để chứng minh việc sản xuất điện và hydro hiệu quả cao trong thương mại.

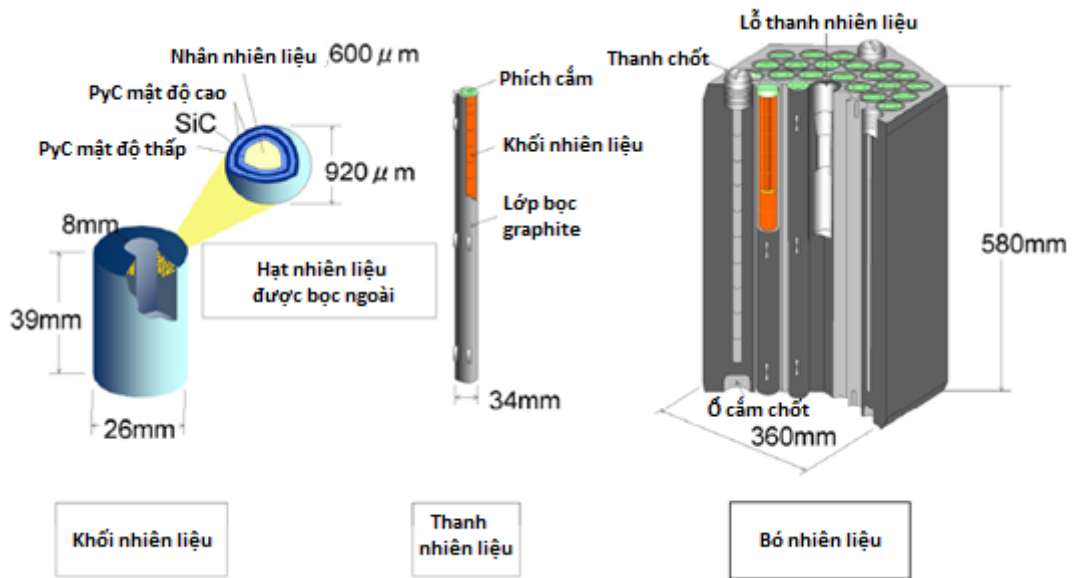
Trên thế giới hiện nay, chính sách, kinh tế, xã hội và môi trường đang trở nên bất ổn; an ninh năng lượng và hạn chế sự nóng lên toàn cầu là những chủ đề chung cần được giải quyết. Cụ thể, NLHN được đánh giá xem xét dựa trên tính bền vững, phát thải thấp và tính đa dạng của nó, mặc dù một số quốc gia đã trở thành “tránh xa hạt nhân”, nhiều quốc gia đang thúc đẩy phát triển và/hoặc giới thiệu NLHN, thông qua việc tăng cường bảo đảm an toàn trong các điều kiện tai nạn nghiêm trọng. Ba Lan đã lên kế hoạch hợp tác với Nhật Bản để xây dựng HTGR. Anh, Canada và Hoa Kỳ đang có kế hoạch giới thiệu lò phản ứng mô đun nhỏ (SMR: Small Modular Reactor) bao gồm HTGR.

Tại Nhật Bản, Viện Nghiên cứu Năng lượng Nguyên tử Nhật Bản (JAERI: Japan Atomic Energy Research Institute) đã thiết kế và xây dựng lò phản ứng thử nghiệm kỹ thuật nhiệt độ cao (HTTR: High Temperature engineering Test Reactor) nhằm thiết lập và nâng cấp cơ sở công nghệ cho HTGR và phát triển công nghệ cho các ứng dụng nhiệt ở nhiệt độ cao như sản xuất hydro (Hình 1.5) [12,13]. Việc xây dựng lò phản ứng bắt đầu vào năm 1991. HTTR là HTGR được làm mát bằng khí heli và được làm chậm bằng graphite với công suất nhiệt 30 MWth và nhiệt độ chất làm mát đầu ra lò phản ứng tối đa là 950°C. HTTR được coi là cơ sở cho việc thiết kế lò phản ứng GTHTR300, là HTGR với hệ thống phát điện tuabin khí. Thiết kế và vận hành thử của lò phản ứng này cũng được bắt đầu bởi JAERI vào năm 2001. Vùng hoạt lò phản ứng của HTTR bao gồm các khối nhiên liệu hình lục giác (Hình 1.6), các khối dẫn hướng thanh điều khiển và các khối phản xạ có thể thay thế [14,15]. Đáng chú ý là JAEA ngày nay đã nhận được sự cho phép của Cơ quan Pháp quy hạt nhân (NRA: Nuclear Regulation Authority) của Nhật Bản để thực

hiện các thay đổi đối với HTTR tuân theo các yêu cầu an toàn đã được sửa đổi một cách nghiêm ngặt sau sự cố nhà máy ĐHN Fukushima. Thỏa thuận mà NRA đã thông qua vào tháng 3 năm 2020 bao gồm việc thiết lập các hệ thống kỹ thuật chống cháy bên trong và bên ngoài. Sau đó, lò phản ứng HTTR đã được khởi động lại vào ngày 30/07/2021 để tiếp tục các sứ mệnh phục vụ nghiên cứu, phát triển và trình diễn công nghệ HTGR của Nhật Bản.



Hình 1.5. Lò phản ứng HTTR của Nhật Bản [13]



Hình 1.6. Cấu trúc nhiên liệu của lò phản ứng HTTR [13]

Ở Việt Nam, các nghiên cứu về lò phản ứng cho đến nay tập trung chủ yếu trên các đối tượng lò phản ứng nước nhẹ như VVER của Liên bang Nga và PWR của Phương Tây nhằm phục vụ các dự án nhà máy ĐHN Ninh Thuận trước đây và Lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt. Ngoài ra, hiện đã có một số nghiên cứu bước đầu về mặt vật lý đối với lò phản ứng HTGR dạng pebble bed của nhóm nghiên cứu vật lý và kỹ thuật lò phản ứng hạt nhân của PGS.TS. Trần Hoài Nam tại Đại học Duy Tân [16-18]. Do đó có thể thấy hướng nghiên cứu về loại lò phản ứng HTGR dạng lắng trụ như HTTR của Nhật Bản và MMR của USNC, Hoa Kỳ hầu như chưa được thực hiện ở Việt Nam.

Trong bối cảnh hiện nay, việc duy trì và phát triển nguồn nhân lực hạt nhân về công nghệ, vật lý và an toàn lò phản ứng hạt nhân ở Việt Nam là cần thiết để phục vụ chương trình ĐHN dài hạn của Việt Nam trong tương lai và hỗ trợ công tác lập kế hoạch ứng phó sự cố an toàn bức xạ hạt nhân quốc gia. Ngoài ra, để phục vụ các cam kết mà Việt Nam đã ký kết trong Hội nghị COP26 về chống biến đổi khí hậu, NLHN có thể được coi là một nguồn năng lượng sạch với công suất lớn và ổn định nhằm hỗ trợ Việt Nam thực hiện tốt các cam kết này, đồng thời giúp bảo đảm an ninh năng lượng. Như trình bày ở trên, lò phản ứng thử nghiệm kỹ thuật nhiệt độ cao (HTTR) của Nhật Bản là một loại lò phản ứng HTGR thuộc thể hệ thứ IV. HTGR hiện đang được quan tâm nghiên cứu,

phát triển rộng rãi trên thế giới với triển vọng phục vụ các ứng dụng điện và phi điện, có thể góp phần bảo vệ môi trường và chống biến đổi khí hậu. Do đó, hướng nghiên cứu về các lò phản ứng tiên tiến như HTTR là cần thiết đối với Việt Nam để duy trì nguồn nhân lực về công nghệ lò phản ứng hạt nhân cũng như để có thể theo kịp và nắm bắt được tình hình nghiên cứu, phát triển các công nghệ lò phản ứng hạt nhân trên thế giới.

Đề tài luận văn của học viên được đề xuất ở đây sẽ tính toán, khảo sát một số đặc trưng vật lý của lò phản ứng HTTR [19] sử dụng chương trình tính toán Monte Carlo Serpent 2 [20]. Thông qua việc thực hiện luận văn, học viên sẽ nắm bắt được tình hình phát triển các công nghệ HTGR trên thế giới, các đặc điểm kỹ thuật của lò phản ứng HTTR cũng như phương pháp tính toán, phân tích vật lý lò phản ứng HTTR dùng Serpent 2. Đây cũng sẽ là một cơ hội tốt cho học viên để tiếp cận, làm chủ Serpent 2 nhằm phục vụ tính toán, mô phỏng các lò phản ứng tiên tiến như HTTR. Các chương trình tính toán Monte Carlo hiện đại như Serpent 2 có ưu điểm là cho phép mô phỏng chính xác cấu hình hình học phức tạp của HTTR cũng như cho phép sử dụng thư viện dữ liệu hạt nhân năng lượng liên tục nhằm mô phỏng chính xác các quá trình vật lý diễn ra trong HTTR. Các kết quả nghiên cứu của luận văn được kỳ vọng có thể được ứng dụng trong các nghiên cứu chuyên sâu sau này tại Việt Nam về các công nghệ lò phản ứng HTGR dạng lắng trụ nói riêng và các công nghệ lò phản ứng HTGR nói chung.

CHƯƠNG 2: TÌM HIỂU Lò PHẢN ỨNG THỬ NGHIỆM KỸ THUẬT NHIỆT ĐỘ CAO (HTTR) VÀ CHƯƠNG TRÌNH TÍNH TOÁN MONTE CARLO SERPENT 2

2.1 Tìm hiểu lò phản ứng HTTR

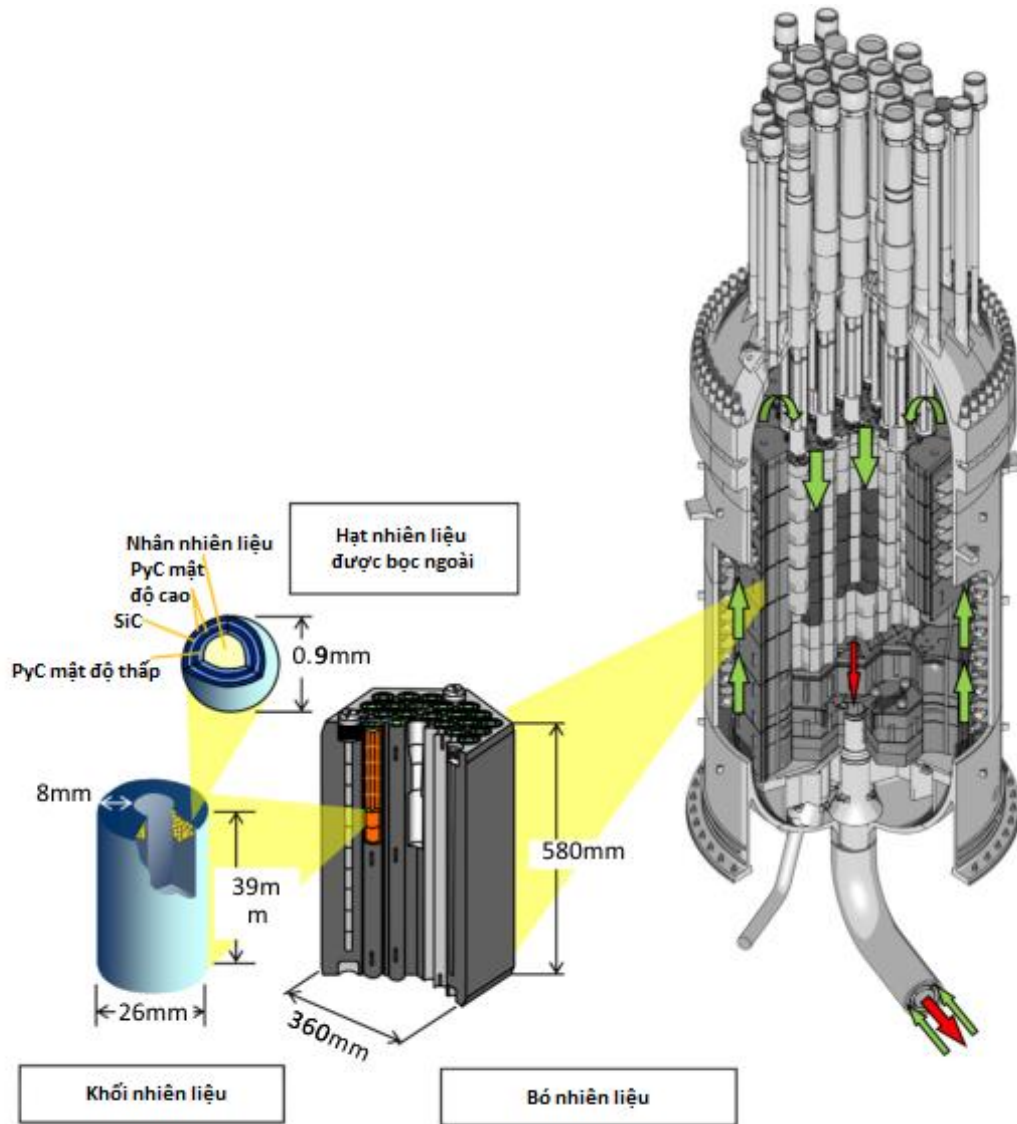
Lò phản ứng làm mát bằng khí ở nhiệt độ cao (HTGR) là một lò phản ứng hạt nhân có thể cung cấp nhiệt năng ở nhiệt độ cao 750°C - 950°C bằng cách sử dụng nhiên liệu hình cầu phủ gồm như carbon và cacbua silic (silicon carbide), khí trơ heli làm chất làm mát, và graphite làm chất chậm neutron.

Hiện tại, LWR chủ yếu được sử dụng để tạo ra điện hạt nhân, nhưng HTGR đang thu hút sự quan tâm của cộng đồng hạt nhân chủ yếu vì hai lý do sau: Lý do thứ nhất là nhiệt hạt nhân cần được sử dụng cho các lĩnh vực khác ngoài sản xuất điện, ví dụ sản xuất năng lượng thứ cấp như nhiên liệu tổng hợp, metanol và hydro, vì nhiên liệu hóa thạch và năng lượng tái tạo có giới hạn trong việc đáp ứng nhu cầu năng lượng ngày càng tăng trong tương lai và cần thiết để bảo vệ môi trường toàn cầu khỏi hiệu ứng nhà kính và mưa axit do khí cacbonic gây ra. Lý do thứ hai là tính an toàn xuất cao. Sau các vụ tai nạn tại Lò phản ứng TMI số 2 (TMI-2) ở Hoa Kỳ và Lò phản ứng Chernobyl số 4 (Chernobyl-4) ở Liên Xô trước đây, nghiên cứu và phát triển một lò phản ứng hạt nhân không gây ô nhiễm môi trường nghiêm trọng trong bất kỳ tai nạn nào đã được tiến hành bao gồm cả các lò nước nhẹ và lò phản ứng neutron nhanh. Trong số tất cả các loại lò phản ứng, HTGR có tính an toàn nội tại cao và tính an toàn của HTGR đã được chứng minh trong các lò phản ứng thử nghiệm.

2.1.1 Đặc điểm của lò phản ứng làm mát bằng khí ở nhiệt độ cao

a. Cấu trúc và các vật liệu

Hình 2.1 trình bày cấu trúc của lò phản ứng thử nghiệm kỹ thuật nhiệt độ cao HTTR do JAEA xây dựng. Sự khác biệt về cấu trúc và vật liệu của nhiên liệu, chất làm mát, chất làm chậm, v.v. với LWR được sử dụng để phát điện được mô tả dưới đây. Chi tiết về thiết kế, cấu trúc và hoạt động của HTTR được mô tả trong tài liệu tham khảo [11, 19].



Hình 2. 1. Cấu trúc lò phản ứng HTTR [11]

Nhiên liệu

LWR sử dụng nhiên liệu bọc dạng kim loại, trong khi HTGR sử dụng các hạt nhiên liệu CFP có đường kính khoảng 1 mm, trong đó hạt nhiên liệu như oxit urani được phủ nhiều lớp với cacbon nhiệt phân và silic cacbua như trong Hình 2.1. Các lớp phủ này chứa các sản phẩm phân hạch (FP: Fission Product) sinh ra từ phản ứng phân hạch của nhiên liệu. Các CFP được sử dụng trong HTGR có khả năng chịu được nhiệt độ cao, và thực nghiệm đã chứng minh rằng chức năng giam giữ sản phẩm phân hạch của lớp vỏ bọc của CFP không bị suy giảm ngay cả ở nhiệt độ cao tới 1600°C.

Như đã trình bày ở trên, tùy thuộc vào hình dạng của nhiên liệu, HTGR được phân loại thành loại lắng trụ và loại pebble bed. Trong nhiên liệu kiểu

lăng trụ, khối nhiên liệu (fuel compact) trong đó các hạt nhiên liệu được thiêu kết sau khi trộn với bột graphite hoặc một thanh nhiên liệu trong đó khối nhiên liệu được đặt trong ống bọc graphite được đưa vào khối graphite. Mặt khác, trong nhiên liệu loại pebble bed, các CFP được thiêu kết thành hình cầu với đường kính khoảng 6 cm sau khi trộn với bột graphite. HTTR là kiểu lăng trụ và còn được gọi là kiểu thanh-trong-khối vì thanh nhiên liệu với khối nhiên liệu trong ống bọc graphite được lắp vào một khối graphite hình trụ lục giác.

Chất làm mát

HTGR làm mát sử dụng khí heli có áp suất đến 10 MPa làm chất làm mát. Khí heli trơ về mặt hóa học và không phản ứng hóa học với nhiên liệu hoặc các vật liệu cấu trúc ngay cả ở nhiệt độ cao. Ngoài ra, không có sự thay đổi pha trong phạm vi nhiệt độ hoạt động, và khí heli hầu như không có các hiệu ứng hạt nhân như làm chậm và hấp thụ neutron, và do đó không ảnh hưởng đến phản ứng hạt nhân của vùng hoạt lò phản ứng.

Chất làm chậm neutron

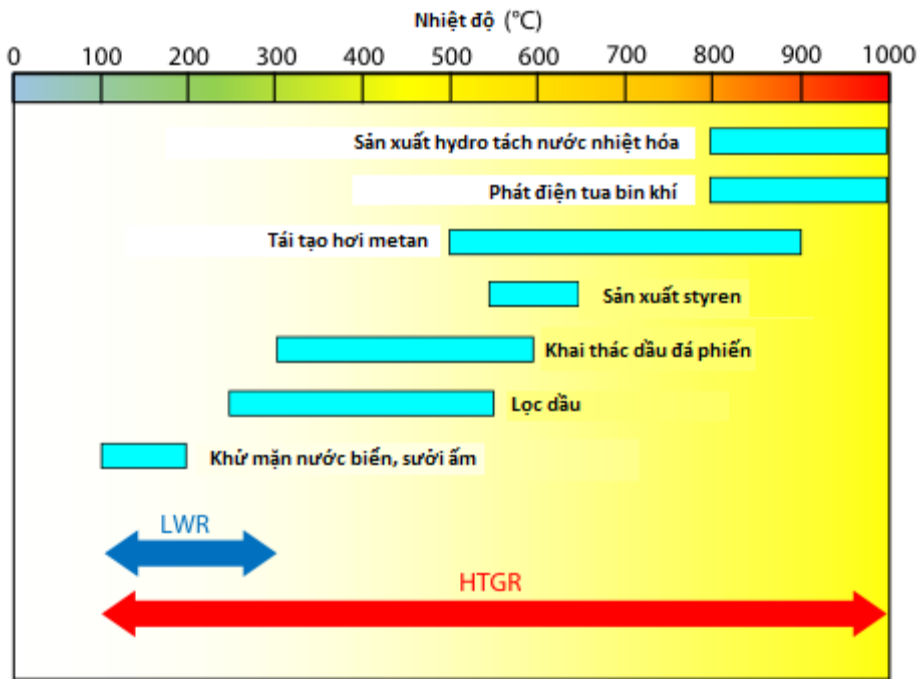
HTGR sử dụng graphite làm chất làm chậm neutron. Graphite cũng là một vật liệu cấu trúc vùng hoạt thích hợp với các đặc tính rất tốt như hấp thụ neutron thấp, khả năng chống bức xạ cao, khả năng chịu nhiệt cao (nhiệt độ thăng hoa khoảng 3000°C) và độ dẫn nhiệt cao. Mặt khác, chất làm chậm cần khối lượng lớn vì công suất làm chậm thấp hơn so với nước. Vì chất làm chậm graphite cũng đóng vai trò là vật liệu cấu trúc vùng hoạt, kích thước vùng hoạt HTGR tăng lên và mật độ công suất nhiệt giảm tương ứng so với LWR. Nhờ vậy, vùng hoạt HTGR có nhiệt dung (heat capacity) lớn, góp phần tạo nên sự an toàn rất cao.

b. Ứng dụng nhiệt

HTTR có thể cung cấp nhiệt ở nhiệt độ rất cao nhờ sử dụng khí heli làm chất làm mát, gồm có khả năng chịu nhiệt cao làm vật liệu bọc nhiên liệu và có vùng hoạt cấu trúc bằng graphite. Nhiệt độ đầu ra của chất làm mát của LWR là khoảng 290°C - 340°C, trong khi của HTGR là 750°C - 950°C.

Hình 2.2 cho thấy các phạm vi nhiệt độ có thể được cung cấp từ HTGR và các ứng dụng nhiệt tiềm năng của nó. Nhiệt độ cao có thể được sử dụng để phát điện tuabin khí hiệu quả cao. Sản xuất hydro quy mô lớn bằng quá trình tách nước nhiệt hóa cũng có thể được thực hiện để sử dụng trong công nghiệp như

nhà máy luyện thép và nhiên liệu dùng trong vận tải. Hơi nước của quá trình có thể được cung cấp ở nhiều mức nhiệt độ và áp suất khác nhau theo yêu cầu của các ngành công nghiệp dầu khí và hóa chất. Trong những năm 1960, ứng dụng nhiệt của năng lượng hạt nhân vào quá trình sản xuất thép, cụ thể là luyện thép dùng nhiệt hạt nhân (NS: Nuclear Steelmaking), đã được đề xuất nhằm giải quyết mối lo ngại về sự thiếu hụt than cốc trong tương lai và ô nhiễm bụi. Khái niệm của NS là các khí khử như carbon monoxide và hydro được tạo ra bằng nhiệt từ HTGR và được cung cấp cho lò luyện thép. Giai đoạn đầu của nghiên cứu này được thực hiện bởi British Steel Corporation, Juelich Research Center và EC. Nghiên cứu và phát triển HTTR tại Nhật Bản được bắt đầu với mục đích của NS.



Hình 2. 2. Các ứng dụng nhiệt tiềm năng của HTGR [11]

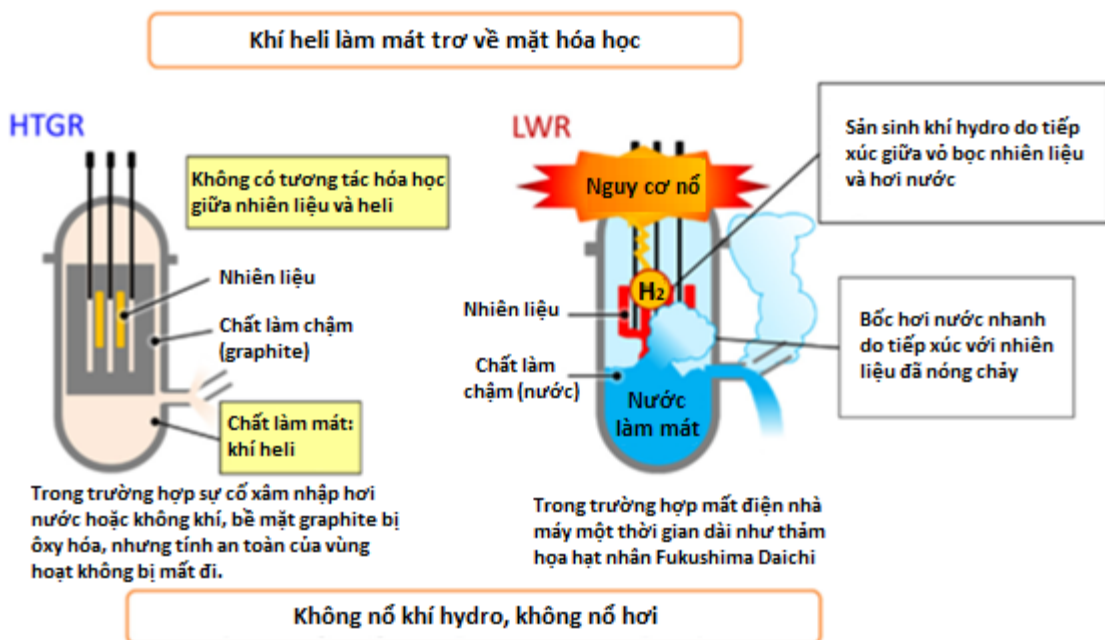
Do nhiệt độ đầu ra của lò phản ứng cao, nhà máy điện HTGR có hiệu suất nhiệt cao hơn so với LWR và lò phản ứng nhanh làm mát bằng natri. Trong khi hiệu suất nhiệt của sản xuất điện tuabin hơi nước LWR thấp hơn 35%, hệ thống phát điện tuabin khí HTGR có thể đạt được hiệu suất năng lượng cao khoảng 46% ở 850°C của chất làm mát. Hiệu suất nhiệt cao mang lại mức tiêu thụ năng lượng thấp và hiệu suất an ninh năng lượng cao. Các tính năng an toàn nội tại của HTGR cũng cho phép chi phí xây dựng thấp bằng cách giảm thiết

bị an toàn vì HGTR có thể bỏ qua xác suất xảy ra tai nạn nghiêm trọng và hư hỏng vùng hoạt kèm theo.

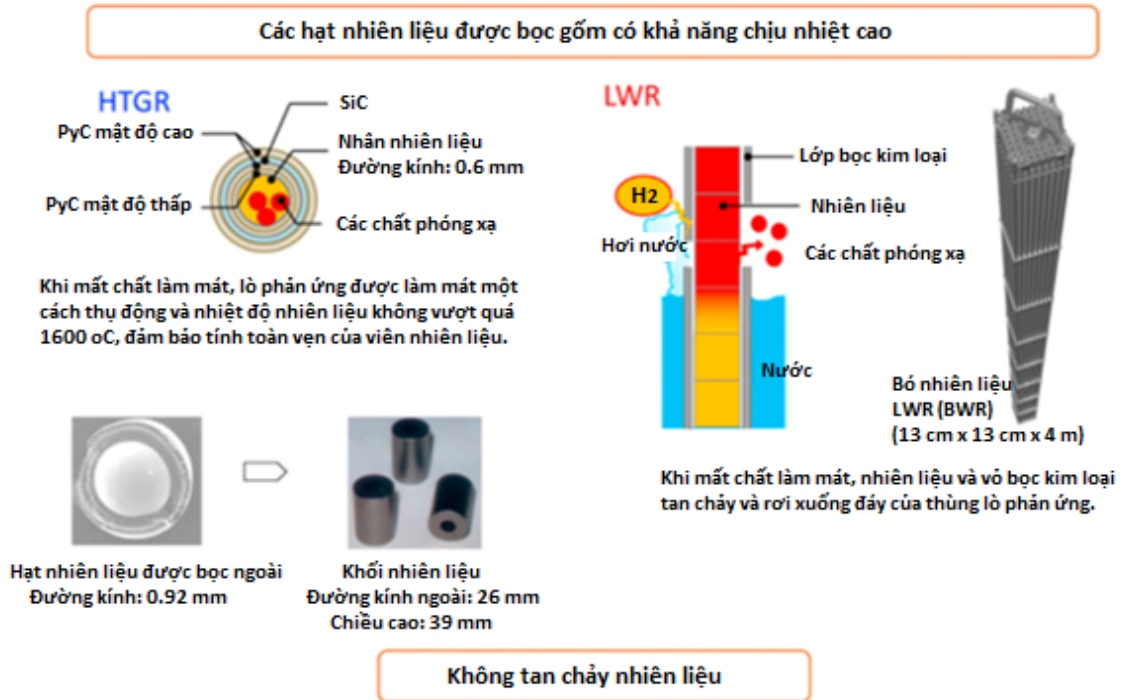
c. Tính an toàn

Khí heli không phản ứng hóa học với nhiên liệu và cấu trúc vùng hoạt do đó khí hydro không được tạo ra bởi phản ứng hóa học của thành phần nhiên liệu trong tình huống sự cố như LWR như trong Hình 2.3. Một lượng lớn nước hoặc không khí xâm nhập có thể được loại bỏ bằng cách thiết kế hệ thống làm mát bằng nước thứ cấp và nhà lò để ngăn chặn quá trình oxy hóa nhiên liệu và vật liệu cấu trúc vùng hoạt graphite. HTGR không cần xem xét đến các sự cố nổ hydro và nổ hơi.

CFR gồm có thể chịu điều kiện nhiệt độ rất cao trên 2200°C mà không có bất kỳ sự giải phóng FP nào như trong Hình 2.4. HTGR có thể được thiết kế để nhiệt độ nhiên liệu không vượt quá 1600°C trong bất kỳ tai nạn nào để tránh làm hỏng nhiên liệu. Do đó HTGR không cần xem xét đến sự cố tai nạn nóng chảy vùng hoạt.

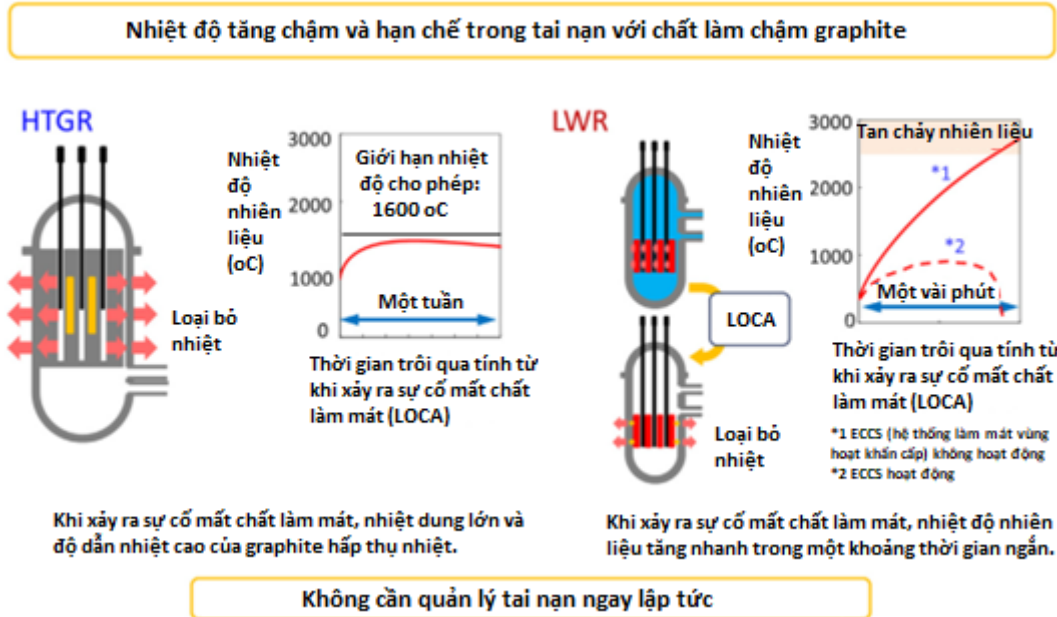


Hình 2. 3. Đặc điểm an toàn của HTGR cho phép loại bỏ sự cố nổ hydro [11]



Hình 2. 4. Đặc điểm an toàn của HTGR giam giữ các sản phẩm phân hạch [11]

HTGR có thể loại bỏ nhiệt dư của lò phản ứng một cách gián tiếp do mật độ công suất lò phản ứng thấp được tối ưu hóa và cấu trúc vùng hoạt bằng graphite. Graphite có nhiệt dung lớn và độ dẫn nhiệt cao. Vì hiệu suất làm mát cưỡng bức không còn trong sự cố mất chất làm mát (LOCA: Loss Of Coolant Accident), nhiệt phân rã của nhiên liệu truyền từ từ đến thùng lò thông qua cấu trúc vùng hoạt bằng graphite bằng cách dẫn nhiệt và phát xạ nhiệt như trong Hình 2.5, nhờ đó hạn chế việc tăng nhiệt độ nhiên liệu lên đến giới hạn thiết kế 1600°C. HTGR không cần xem xét việc quản lý tai nạn ngay lập tức và cung cấp hệ thống an toàn khẩn cấp dư thừa.

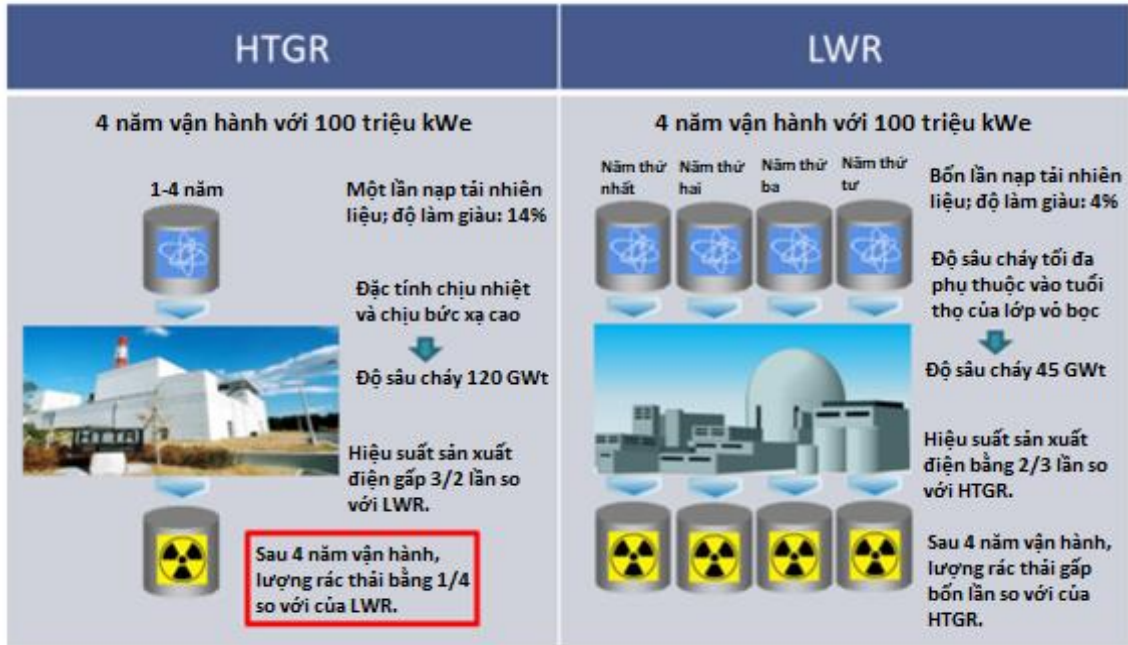


Hình 2. 5. Đặc điểm an toàn của HTGR trong quản lý sự cố [11]

d. Khả năng thích ứng với môi trường

Nhiên liệu CFP của HTGR có khả năng chống bức xạ cao và hiệu suất giam giữ FP cao. Độ sâu cháy trung bình của HTGR có thể là 120 GWd/t, cao gấp ba lần so với nhiên liệu ống bọc kim loại như LWR. Hệ thống phát điện HTGR cung cấp lượng chất thải phóng xạ mức độ cao thấp kết hợp với độ sâu cháy nhiên liệu cao và hiệu suất phát điện cao. Ước tính sơ bộ cho thấy lượng chất thải phóng xạ mức độ cao có thể giảm xuống còn $\frac{1}{4}$ so với của LWR như trong Hình 2.6.

HTGR cũng có thể cung cấp nhiệt và hơi ở nhiệt độ cao thông qua hệ thống làm mát thứ cấp. Nhiệt này có thể được sử dụng như một nguồn nhiệt của nhà máy hóa chất như nhà máy sản xuất hydro như trong Hình 2.2. Việc thay thế nhà máy nhiên liệu hóa thạch bằng HTGR có thể góp phần giảm tiêu thụ nhiên liệu hóa thạch và phát thải carbon dioxide. Điều này góp phần giải quyết vấn đề nóng lên toàn cầu.



Hình 2. 6. Lượng thấp chất thải phóng xạ mức độ cao của HTTR [11]

2.1.2 Thiết kế lò phản ứng HTTR

HTTR là HTGR đầu tiên và duy nhất ở Nhật Bản, được xây dựng tại Viện Nghiên cứu và Phát triển Oarai của JAEA. Các chi tiết thiết kế của HTTR có thể được mô tả tóm tắt như sau [11]:

1. Tổng quan về các tính năng thiết kế HTTR: Triết lý chung và các khía cạnh cụ thể của thiết kế HTTR và các đặc điểm chính của HTTR cùng với lịch sử, cơ sở và mục tiêu.

2. Thiết kế hạt nhân: Các đặc tính hạt nhân, chẳng hạn như điều khiển độ phản ứng, phân bố công suất, hệ số độ phản ứng, v.v., đã được đánh giá. Lò phản ứng có thể được tắt an toàn bằng các thanh điều khiển hoặc hệ thống dừng lò dự phòng. Lò phản ứng có đặc tính an toàn là làm giảm công suất khi xảy ra sự cố nhờ các hệ số độ phản ứng âm.

3. Thủy nhiệt lò phản ứng: Nhiệt độ nhiên liệu tối đa tại hoạt động bình thường và sự cố vận hành được dự kiến và sự phân bố tốc độ dòng chất làm mát đã được đánh giá. Phân tích an toàn đã làm rõ nhiệt độ nhiên liệu tối đa khi vận hành bình thường và tại bất kỳ sự cố vận hành dự kiến nào không vượt quá giới hạn thiết kế.

4. Các thành phần graphite: Các tiêu chí thiết kế cho các thành phần graphite đã được JAEA phát triển bởi vì không có tiêu chuẩn thiết kế sẵn có cho các vật liệu giòn như graphite. Một phác thảo về kiểm soát chất lượng quy định trong tiêu chí thiết kế cũng đã được vạch ra.

5. Các thành phần kim loại: Hastelloy XR được phát triển cho các kết cấu nhiệt độ rất cao như các ống truyền nhiệt của IHX thông qua việc tối ưu hóa hoặc hạ thấp hàm lượng của một số nguyên tố của Hastelloy X. Hướng dẫn thiết kế cấu trúc nhiệt độ cao cho Hastelloy XR, thép không gỉ $2^{1/4}\text{Cr-1Mo}$, thép không gỉ Austenit SUS316 và SUS321 và thép 1Cr-0,5Mo-V được thành lập dựa trên các hướng dẫn thiết kế hiện có.

6. Các thành phần vùng hoạt và bên trong lò phản ứng: Các yêu cầu thiết kế đã được giải quyết và các nỗ lực thiết kế tăng cường cũng như R&D đã được thực hiện để duy trì tính toàn vẹn của các thành phần vùng hoạt và bên trong lò phản ứng. Việc đánh giá tính toàn vẹn của nhiên liệu đã được thực hiện một cách toàn diện và tính toàn vẹn của nhiên liệu đã được xác nhận đối với các điều kiện hoạt động bình thường và chuyển tiếp của HTTR. Tính toàn vẹn cấu trúc của các thành phần graphite cũng được xác định bằng cách thực hiện các đánh giá phân tích.

7. Thiết kế địa chấn: Tính hiệu lực của chương trình phân tích địa chấn vùng hoạt có tên SONATINA-2V đã được xác nhận. Đặc điểm tải tác động đối với các hệ thống ổ cắm chốt và rãnh then chốt và các trụ đỡ vùng hoạt đã được làm rõ về mặt định lượng. Tính toàn vẹn cấu trúc của các thành phần graphite chống lại động đất cũng đã được xác nhận trong suốt các cuộc thử nghiệm địa chấn và phân tích.

8. Hệ thống làm mát: Sơ đồ dòng chảy của hệ thống làm mát sơ cấp và thứ cấp và các yêu cầu thiết kế của các bộ phận chính như bộ làm mát nước áp lực sơ cấp, IHX, bộ tuần hoàn khí heli và ống dẫn khí nóng đồng tâm được thiết kế.

9. Hệ thống điều khiển độ phản ứng: Yêu cầu thiết kế của các thanh điều khiển được sử dụng trong môi trường nhiệt độ rất cao được đáp ứng. Hợp kim 800H được chọn cho các bộ phận kim loại của thanh điều khiển, vì nhiệt độ tối đa của thanh điều khiển đạt khoảng 900°C tại thời điểm dập lò phản ứng. Hướng

dẫn thiết kế cho thanh điều khiển của HTTR được thực hiện dựa trên ASME Code Case N-47-21. Tuân thủ hướng dẫn, phân tích nhiệt độ và ứng suất đã được tiến hành và cho thấy tuổi thọ mục tiêu của các thanh điều khiển là 5 năm.

10. Hệ thống điều khiển và đo đạc: Sơ đồ thiết kế của thiết bị đo đạc, thiết bị điều khiển và hệ thống bảo vệ an toàn và sơ đồ hệ thống điều khiển đã được mô tả. Hiệu suất của chúng như giám sát nhiệt độ trong vùng hoạt, kiểm soát công suất lò phản ứng, kiểm soát nhiệt độ chất làm mát đầu ra của lò phản ứng, v.v. đã được làm rõ trong thử nghiệm nâng lên công suất.

11. Các cấu trúc nhà lò: Các thông số kỹ thuật thiết kế của thùng lò phản ứng, khu vực dịch vụ và hệ thống lọc không khí khẩn cấp được mô tả. Tốc độ rò rỉ đo được của thùng lò phản ứng đủ nhỏ hơn giới hạn rò rỉ quy định 0.1% / ngày được xác nhận trong các thử nghiệm vận hành và kiểm tra hàng năm. Khu vực dịch vụ được giữ sao cho áp suất thiết kế trở nên thấp hơn giới hạn cho phép bằng hệ thống lọc không khí khẩn cấp.

12. Các hệ thống khác: Các thông số kỹ thuật thiết kế của các hệ thống heli phụ trợ như lọc heli, lấy mẫu heli, hệ thống lưu trữ và cung cấp heli cũng như hệ thống xử lý và lưu trữ nhiên liệu.

13. Thiết kế an toàn: Một triết lý thiết kế an toàn của HTTR xem xét các tính năng thiết kế chính của HTGR được mô tả. Chiến lược phòng thủ theo chiều sâu được thực hiện để các chức năng kỹ thuật an toàn như kiểm soát độ phản ứng, loại bỏ nhiệt dư và giam giữ các sản phẩm phân hạch phải được thực hiện tốt để đảm bảo an toàn. Các chương trình phân tích để đánh giá an toàn cũng được giới thiệu.

Trong phạm vi luận văn này, tổng quan về các đặc điểm thiết kế chính của HTTR và thiết kế hạt nhân của HTTR sẽ được trình bày như dưới đây.

2.1.2.1 Các đặc điểm thiết kế chính của HTTR

JAEA đã thực hiện nghiên cứu và phát triển về HTGR và các ứng dụng nhiệt ở nhiệt độ cao từ những năm 1960. Dựa trên Chương trình dài hạn về Nghiên cứu, Phát triển và Sử dụng Năng lượng Hạt nhân được Ủy ban Năng lượng Nguyên tử Nhật Bản sửa đổi vào năm 1987, việc xây dựng HTTR đã được xác định và khởi xướng tại Viện Nghiên cứu và Phát triển Oarai của JAEA vào năm 1991. HTTR đạt được trạng thái tới hạn đầu tiên vào ngày 10 tháng

11 năm 1998 và đạt được công suất tối đa là 30 MW với nhiệt độ chất làm mát đầu ra của lò phản ứng là 850°C vào ngày 7 tháng 12 năm 2001. Sau một loạt các thử nghiệm trình diễn an toàn, HTTR sẽ được sử dụng làm nguồn nhiệt của một hệ thống sản xuất hydro.

Mục đích của dự án HTTR là thiết lập HTGR và công nghệ sử dụng nhiệt hạt nhân và thực hiện các nghiên cứu cơ bản về chiếu xạ nhiệt độ cao. Gần đây, JAEA đã nhấn mạnh tầm quan trọng của việc nghiên cứu và phát triển sản xuất hydro, coi hydro như một chất mang năng lượng đối với an ninh năng lượng và ngăn ngừa biến đổi khí hậu toàn cầu. Để đạt được việc triển khai sớm một xã hội hydro, có lợi cho sức khỏe con người và môi trường, JAEA đang đóng vai trò là một tổ chức nổi bật cho HTGR và các công nghệ sản xuất hydro, và HTTR được sử dụng làm nền tảng cho sự phát triển của các công nghệ này.

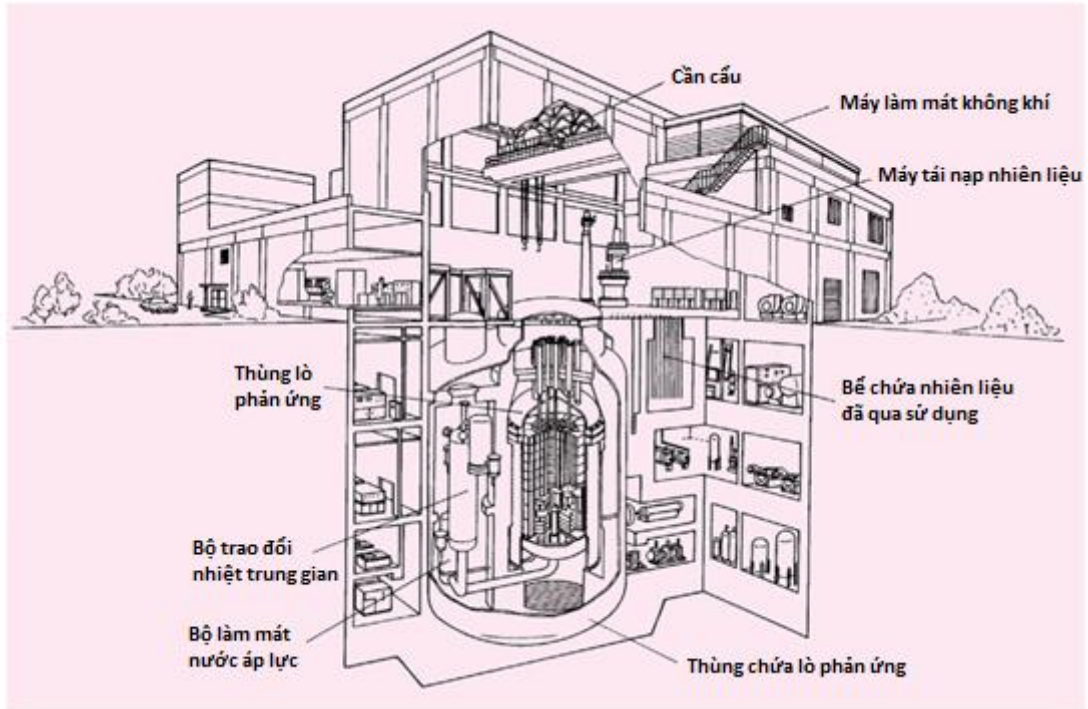
Công nghệ HTGR hiện đang được thiết lập thông qua việc tích lũy kinh nghiệm vận hành và các dữ liệu thử nghiệm khác nhau của HTTR. Đối với nghiên cứu ứng dụng nhiệt hạt nhân, việc phát triển một hệ thống sản xuất hydro được kết nối với HTTR đã được tiến hành, nhằm mục đích hiện thực hóa việc sản xuất hydro bằng cách sử dụng nhiệt hạt nhân. Đặc biệt, sản xuất hydro bằng phương pháp iốt-lưu huỳnh tách nước đã được phát triển từ lâu bởi JAEA được coi là hệ thống sạch hiệu quả và tối ưu, và do đó quy trình tách nước này được coi là ứng cử viên chính để kết nối với HTTR. Hệ thống GTHTR300 để phát điện với hiệu suất nhiệt cao khoảng 46%, kết hợp một HTGR và một hệ thống máy phát tuabin khí, cũng đang được phát triển. Các nghiên cứu cơ bản bao gồm phát triển các vật liệu mới và phát triển các công nghệ thiết bị đo nhiệt độ cao trong vùng hoạt.

Dự án HTTR cho phép triển khai HTGR và các công nghệ ứng dụng nhiệt hạt nhân liên quan. Do đó, nhiệt hạt nhân sẽ được áp dụng cho nhiều lĩnh vực khác nhau như công nghiệp hóa chất, hiện đang thải ra một lượng lớn khí cacbonic. Việc sản xuất hydro bằng cách sử dụng nhiệt hạt nhân sẽ cắt giảm hoàn toàn sự thải ra của carbon dioxide và có thể giúp tiến tới một xã hội hydro sạch. Hệ thống phát điện với hiệu suất nhiệt cao khoảng 46% được kỳ vọng là hệ thống an toàn và có tính cạnh tranh kinh tế. HTGR và các công nghệ ứng dụng nhiệt liên quan có thể góp phần cải thiện môi trường bằng cách giảm sự phụ thuộc vào nhiên liệu hóa thạch và sử dụng hiệu quả năng lượng hạt nhân.

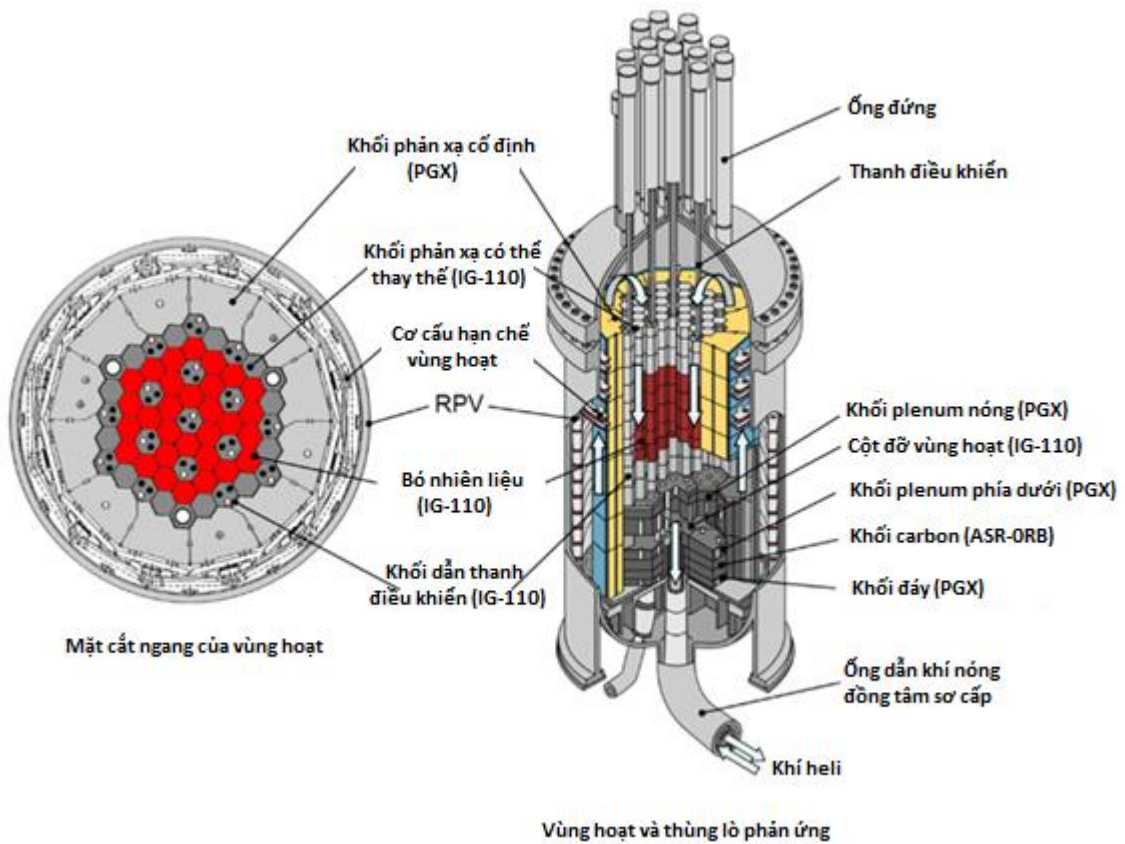
Một số thông số kỹ thuật chính của HTTR được tóm tắt trong Bảng 2.1. HTTR bao gồm lò phản ứng, hệ thống làm mát lò phản ứng, các hệ thống an toàn kỹ thuật, thiết bị đo và hệ thống điều khiển. Hình 2.7-2.9 cho thấy hình ảnh sơ đồ của nhà lò phản ứng HTTR, hình ảnh sơ đồ của các thành phần lò phản ứng và các cấu trúc vùng hoạt lò phản ứng và thùng lò phản ứng (RPV: Reactor Pressure Vessel), và hệ thống làm mát của HTTR, một cách tương ứng.

Bảng 2.1. Một số thông số kỹ thuật chính của HTTR [11]

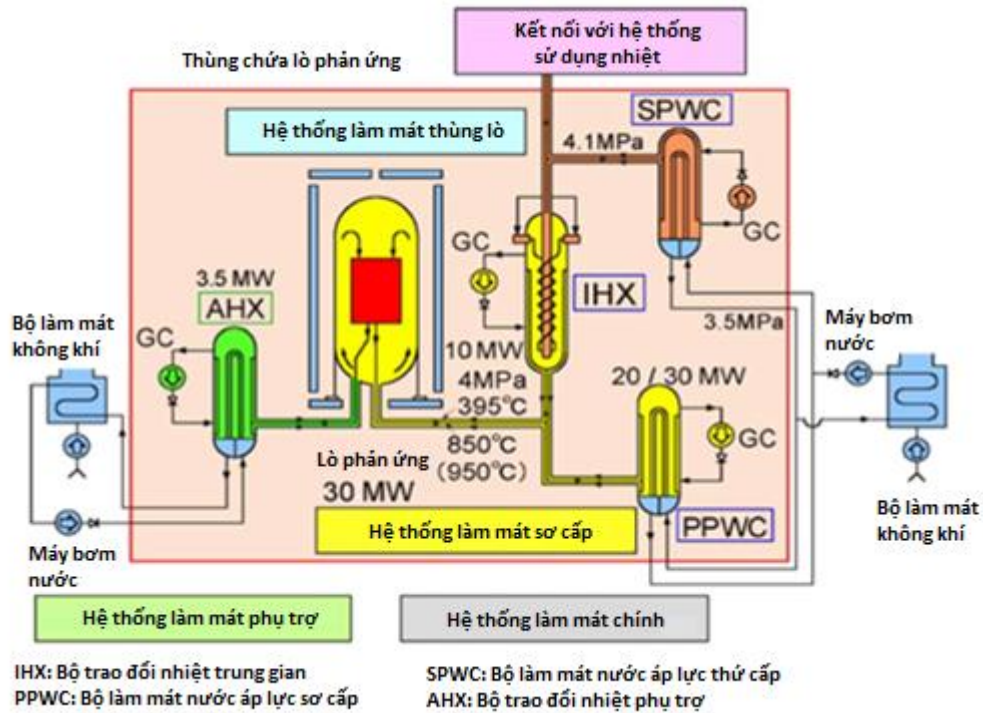
Công suất nhiệt (MW)	30
Nhiệt độ chất làm mát đầu ra (°C)	850/950
Nhiệt độ chất làm mát đầu vào (°C)	395
Nhiên liệu	UO ₂ độ giàu thấp
Loại nhiên liệu	Khối lặn trụ
Hướng dòng chất làm mát	Từ trên xuống dưới
Vỏ thùng lò	Thép
Tải nhiệt	Bộ trao đổi nhiệt trung gian (IHX)
	Bộ làm mát nước áp lực (PWC)
Áp suất chất làm mát vòng sơ cấp (MPa)	4
Tuổi thọ nhà máy	Khoảng 20 năm



Hình 2. 7 Hình ảnh mặt cắt nhà lò HTTR [11]



Hình 2. 8. Cấu hình vùng hoạt và thùng lò của HTTR [11]



Hình 2. 9. Hệ thống làm mát của HTTR [11]

a. Vùng hoạt lò phản ứng

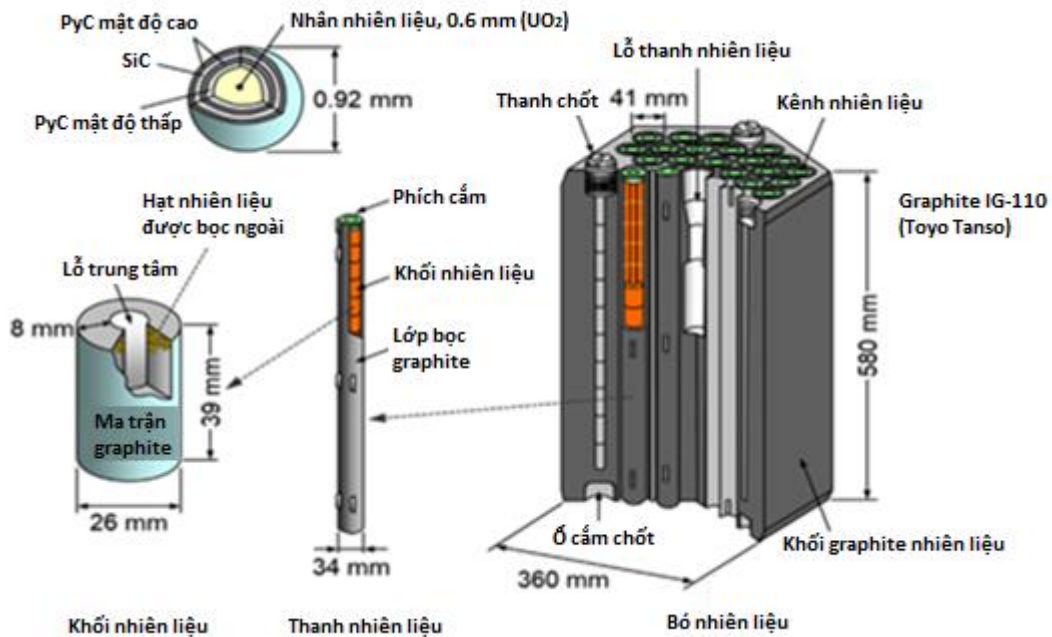
Vùng hoạt lò phản ứng bao gồm các thành phần vùng hoạt, bên trong lò phản ứng, hệ thống điều khiển phản ứng và RPV như trên Hình 2.7.

Các thành phần vùng hoạt

Vùng hoạt lò phản ứng chủ yếu bao gồm các khối nhiên liệu hình lục giác, các khối dẫn hướng thanh điều khiển và các khối phản xạ có thể thay thế được. Vùng hoạt, mà có chiều cao 2.9 m và đường kính 2.3 m, gồm 30 cột nhiên liệu và 7 cột dẫn hướng thanh điều khiển. Một cột được tạo thành từ năm khối nhiên liệu và bốn khối phản xạ có thể thay thế ở trên và dưới các khối nhiên liệu. Vùng hoạt được bao quanh bởi các khối phản xạ có thể thay thế và các khối phản xạ cố định. Các khối phản xạ cố định được cố định chặt chẽ bằng cơ cấu hạn chế vùng hoạt.

Một bó nhiên liệu bao gồm các thanh nhiên liệu và một khối graphite hình lục giác, chiều ngang 360 mm và chiều cao 580 mm, như thể hiện trong Hình 2.10. Bó nhiên liệu có ba chốt ở phía trên và ba khe cắm ở phía dưới để căn chỉnh các bó nhiên liệu. Các hạt TRISO (CFP) với kernel UO_2 , độ giàu trung bình khoảng 6% và đường kính 600 μm , được phân tán trong ma trận

graphit và thiêu kết để tạo thành một khối nhiên liệu. Bộ nạp nhiên liệu được chứa trong một thanh nhiên liệu, đường kính ngoài 34 mm và chiều dài 577 mm. Các thanh nhiên liệu được đưa vào các lỗ thẳng đứng trên khối graphite. Chất làm mát là khí heli chảy qua các khe hở giữa các lỗ và các thanh.



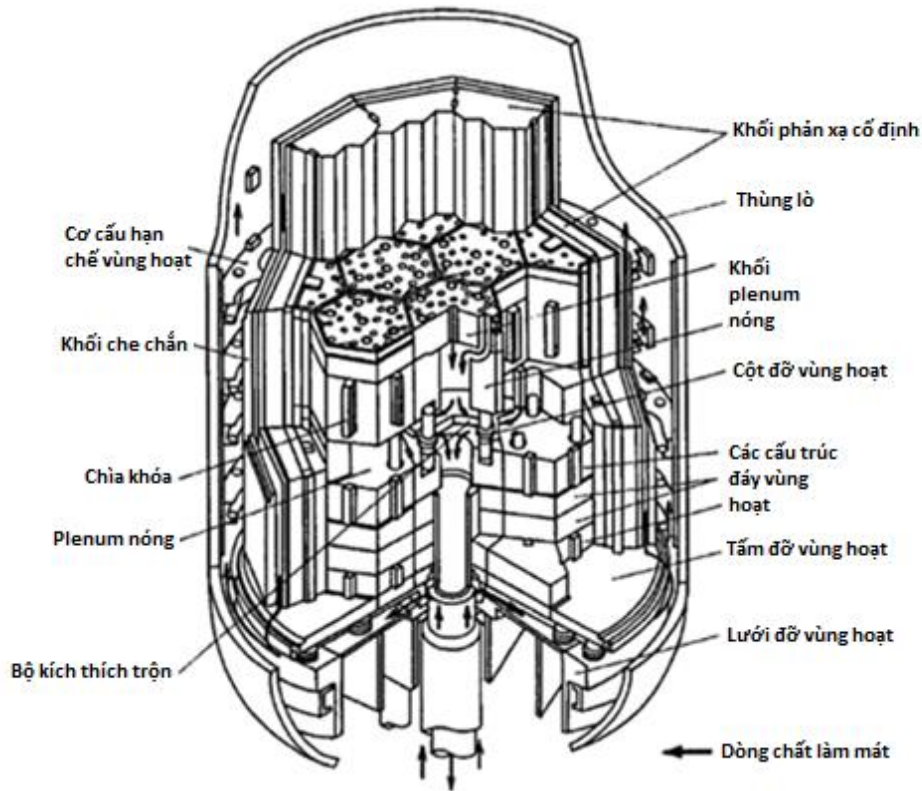
Hình 2.10. Bộ nhiên liệu của HTTR [11]

Các bộ phận bên trong lò phản ứng

Các bộ phận bên trong lò phản ứng bao gồm các cấu trúc đỡ lò phản ứng bằng graphite, cấu trúc đỡ lò phản ứng bằng kim loại và các thành phần khác như trong Hình 2.11.

Các cấu trúc hỗ trợ bằng graphite bao gồm các khối plenum (khoảng đầy) nóng, kết cấu đáy vùng hoạt, các trụ đỡ vùng hoạt, v.v. Các khối plenum nóng cung cấp sự định vị và đỡ vùng hoạt theo chiều dọc và ngang của mảng vùng hoạt. Các khối chứa các đường dẫn dòng chảy, dẫn chất làm mát sơ cấp từ đầu ra của các cột nhiên liệu và phân phối đến khoang chứa nóng bên dưới các khối plenum nóng. Các cột đỡ vùng hoạt được thiết kế để hỗ trợ vùng hoạt và các mảng khối plenum nóng. Khối phản xạ cố định là một cấu trúc bằng graphite bao quanh các khối phản xạ có thể thay thế và các khối dẫn hướng thanh điều khiển nằm ở biên của vùng hoạt. Các cấu trúc đỡ vùng hoạt kim loại bao gồm

các tấm đỡ vùng hoạt, lưới đỡ vùng hoạt và cơ cấu hạn chế vùng hoạt. Tấm đỡ vùng hoạt và lưới đỡ vùng hoạt được đặt bên dưới các lớp cách nhiệt. Cơ cấu hạn chế vùng hoạt bao quanh các khối phản xạ cố định.



Hình 2.11. Các bộ phận bên trong vùng hoạt HTTR [11]

Hệ thống kiểm soát độ phản ứng

Các thanh điều khiển được hỗ trợ riêng biệt bởi các cơ cấu dẫn động thanh điều khiển nằm trong các ống đứng nối với đầu trên hình bán cầu của thùng lò phản ứng. Các thanh điều khiển được đưa vào các kênh trong vùng hoạt và các khối phản xạ có thể thay thế xung quanh vùng hoạt. Cơ cấu truyền động thanh điều khiển rút ra và đưa vào một cặp thanh điều khiển. Đầu tiên, việc tắt lò phản ứng được thực hiện bằng cách đưa vào chín cặp thanh điều khiển vào vùng phản xạ, sau đó bằng cách đưa vào bảy cặp thanh điều khiển khác vào vùng hoạt sau 40 phút hoặc sau khi nhiệt độ chất làm mát đầu ra hạ xuống 750°C sao cho các thanh điều khiển không được vượt quá giới hạn nhiệt độ thiết kế của chúng. Khả năng dập lò dự trữ được cung cấp bằng cách chèn

các viên B₄C/C vào các lỗ trên khối dẫn hướng thanh điều khiển.

Thùng lò phản ứng

RPV, cao 13.2 m và đường kính 5.5 m, được làm bằng thép 2^{1/4}Cr-1Mo. Thép 2^{1/4}Cr -Mo có độ bền rã tốt hơn ở nhiệt độ cao hơn thép Mn-Mo, được sử dụng rộng rãi trong các thùng lò áp lực của lò phản ứng nước nhẹ. Đầu trên cùng của RPV được bắt vít vào mặt bích của vỏ hình trụ. Ba mươi một ống đứng, bao gồm cả thanh điều khiển và các ống đứng chiếu xạ, được hàn vào đầu trên cùng. Một nắp đậy ống đứng được lắp trên đầu mỗi ống đứng và được tháo ra trong quá trình tiếp nhiên liệu.

b. Hệ thống làm mát lò phản ứng

Hệ thống làm mát chính của HTTR bao gồm một hệ thống làm mát sơ cấp, một hệ thống làm mát heli thứ cấp và một hệ thống làm mát bằng nước áp suất như được trình bày trong Hình 2.9. Hệ thống làm mát sơ cấp, có bộ tuần hoàn khí và hai bộ trao đổi nhiệt, đó là một IHX kiểu heli - heli và một bộ làm mát nước áp lực sơ cấp (PPWC: Primary Pressurized Water Cooler), loại bỏ nhiệt từ vùng hoạt lò phản ứng đến hệ thống làm mát heli thứ cấp và hệ thống làm mát bằng nước áp lực. Khí heli sơ cấp được chuyển từ vùng hoạt đến heli/heli IHX và PPWC thông qua một ống dẫn khí nóng đồng tâm sơ cấp. Hệ thống làm mát heli thứ cấp, bao gồm bộ làm mát nước áp lực thứ cấp (SPWC: Secondary Pressurized Water Cooler) và một bộ tuần hoàn khí, loại bỏ nhiệt từ khí heli sơ cấp thông qua heli - heli IHX. Hệ thống làm mát bằng nước áp lực bao gồm bộ làm mát không khí và máy bơm nước. Bộ làm mát không khí làm mát nước áp lực cho cả PPWC và SPWC, đồng thời truyền nhiệt từ vùng hoạt lò phản ứng đến bộ tản nhiệt cuối cùng, tức là khí quyển.

c. Các hệ thống an toàn kỹ thuật

Hệ thống làm mát phụ trợ

Hệ thống làm mát phụ trợ chủ yếu bao gồm bộ trao đổi nhiệt phụ, bộ tuần hoàn khí phụ trợ và bộ làm mát không khí như trong Hình 2.9. Hệ thống làm mát phụ trợ có công suất truyền nhiệt khoảng 3.5 MW. Hệ thống làm mát phụ trợ tự động khởi động khi lò phản ứng bị tác động và hệ thống làm mát chính bị dừng do sự cố tai nạn. Có thể làm mát vùng hoạt bằng tuần hoàn cưỡng bức với hệ thống làm mát phụ trợ. Hệ thống làm mát phụ trợ bao gồm các thành

phần động dự phòng như bộ tuần hoàn khí, máy bơm nước và van cũng được vận hành với nguồn điện khẩn cấp.

Hệ thống làm mát thùng lò

Các hệ thống làm mát thùng lò (VCS: vessel cooling system) bao gồm các tấm làm mát trên, dưới và bên, xung quanh RPV và hệ thống tuần hoàn nước làm mát. Các VCS được sử dụng như một hệ thống loại bỏ nhiệt dư khi không thể duy trì tuần hoàn cưỡng bức trong hệ thống làm mát sơ cấp do vỡ đường ống bên trong hoặc vỡ cả hai đường ống trong ống dẫn khí nóng đồng tâm. Các VCS cũng là một tính năng an toàn được thiết kế bao gồm hai bộ hoàn chỉnh độc lập được dự phòng với nguồn điện khẩn cấp.

Cấu trúc nhà lò

Cấu trúc nhà lò bao gồm một thùng lò phản ứng, khu vực dịch vụ và một hệ thống lọc không khí khẩn cấp, giúp giảm sự phát tán các sản phẩm phân hạch vào môi trường trong các sự cố tai nạn dự kiến. Thùng lò được thiết kế để chịu được các sự thay đổi về nhiệt độ và áp suất và kín để tránh rò rỉ trong giới hạn quy định trong trường hợp vỡ ống dẫn khí sơ cấp. Khu vực dịch vụ là không gian xung quanh thùng lò, nơi đặt các hệ thống xử lý và lưu trữ nhiên liệu cũng như hệ thống làm sạch heli sơ cấp và thứ cấp. Hệ thống lọc không khí khẩn cấp loại bỏ phóng xạ trong không khí và duy trì áp suất thấp hơn một chút so với áp suất của bầu không khí trong khu vực dịch vụ trong các điều kiện tai nạn.

d. Hệ thống đo đạc và điều khiển

Hệ thống đo đạc

Hệ thống đo đạc hạt nhân của HTTR bao gồm một hệ thống giám sát dải rộng và một hệ thống giám sát dải công suất. Hệ thống giám sát dải rộng có sẵn như một thiết bị giám sát sau tai nạn trong các điều kiện tai nạn như đứt ống dẫn khí nóng đồng tâm chính. Hệ thống giám sát dải rộng được sử dụng để đo thông lượng neutron từ $10^{-80}\%$ đến 30% công suất định mức. Ba buồng phân hạch được lắp đặt trong các khối phản xạ cố định thông qua các ống đứng. Hệ thống giám sát dải công suất được sử dụng để đo thông lượng neutron từ 0,1% đến 120% công suất định mức. Hệ thống giám sát dải công suất cũng được sử dụng làm cảm biến cho hệ thống điều khiển công suất lò phản ứng. Các đầu dò (detector) của hệ thống giám sát dải công suất được đặt bên ngoài RPV. Do đó,

các đầu dò có độ nhạy cao để phát hiện thông lượng neutron ở mức rất thấp. Để theo dõi nhiệt độ đầu ra vùng hoạt của chất làm mát sơ cấp, bảy cặp nhiệt điện được bố trí trong các khối plenum nóng bên dưới vùng hoạt lò phản ứng. Các cặp nhiệt điện loại N (Nicrosil - Nisil) được lựa chọn vì nhiệt độ của chất làm mát sơ cấp trong vùng plenum nóng đạt khoảng 1000°C ở hoạt động với công suất danh định. Hệ thống phát hiện lỗi nhiên liệu bao gồm bộ lọc bụi, bộ tiền khuếch đại và hộp điều khiển. Bộ kết tủa được sử dụng để phát hiện tia β phát ra từ các sản phẩm phân hạch dạng khí tồn tại trong thời gian ngắn như ^{88}Kr , ^{89}Kr và ^{138}Xe .

Hệ thống điều khiển

Hệ thống điều khiển lò phản ứng được thiết kế để đảm bảo độ ổn định cao và các đặc tính giảm chấn hợp lý chống lại các nhiễu khác nhau trong quá trình vận hành. Hệ thống điều khiển chính của HTTR bao gồm bộ chọn chế độ hoạt động, bộ điều khiển công suất lò phản ứng và hệ thống điều khiển nhà máy. Bộ chọn chế độ hoạt động được thiết kế để chọn một số hoạt động chế độ như vận hành công suất danh định, vận hành thử nghiệm nhiệt độ cao, vận hành thử nghiệm trình diễn an toàn và thử nghiệm chiếu xạ. Hệ thống điều khiển công suất lò phản ứng bao gồm thiết bị điều khiển nhiệt độ chất làm mát đầu ra của lò phản ứng và điều khiển công suất. Thiết bị điều khiển nhiệt độ chất làm mát đầu ra của lò phản ứng cung cấp nhu cầu công suất của lò phản ứng cho thiết bị điều khiển công suất để nhiệt độ chất làm mát đầu ra có thể được điều khiển đến một giá trị nhất định. Hệ thống điều khiển nhà máy kiểm soát các thông số của nhà máy như nhiệt độ chất làm mát đầu vào của lò phản ứng, áp suất chất làm mát sơ cấp và chênh lệch áp suất giữa hệ thống làm mát sơ cấp và hệ thống làm mát bằng nước áp lực hoặc hệ thống làm mát heli thứ cấp.

Hệ thống bảo vệ an toàn

Hệ thống bảo vệ an toàn bao gồm hệ thống bảo vệ lò phản ứng và hệ thống kích hoạt các tính năng an toàn chủ động. Hệ thống bảo vệ lò phản ứng của HTTR tự động khởi tạo đập lò bằng cách đưa vào các thanh điều khiển và đồng thời dừng các bộ tuần hoàn khí. Hệ thống kích hoạt các tính năng an toàn chủ động của HTTR được thiết kế để ngăn chặn sự giải phóng các sản phẩm phân hạch và đảm bảo tính toàn vẹn của vùng hoạt lò phản ứng, biên áp suất chất làm mát của lò phản ứng và biên thùng lò chống lại các điều kiện không

mong muốn trong các quá trình chuyển tiếp vận hành bất thường và các sự cố tai nạn như vỡ đường ống hệ thống làm mát sơ cấp.

2.1.2.2 Thiết kế hạt nhân

Giới thiệu

HTTR là HTGR kiểu lắng trụ, được thiết kế cho nhiệt độ khí đầu ra 950°C. Nhiệt độ khí đầu ra cao có thể làm tăng sự giải phóng sản phẩm phân hạch từ nhiên liệu do nhiệt độ nhiên liệu tăng lên. Do đó, điều quan trọng trong thiết kế hạt nhân là giảm nhiệt độ nhiên liệu tăng bằng cách tối ưu hóa phân bố công suất, được thực hiện trong các bước sau.

Đầu tiên, thay thế mỗi khối nhiên liệu bằng một khối nhiên liệu mới sau mỗi chu kỳ đốt cháy. Sự phân bố công suất theo chiều cao và theo phương bán kính đã được tối ưu hóa để làm phẳng bằng cách phân bố tối ưu các khối nhiên liệu với 12 loại nhiên liệu tươi với độ giàu urani khác nhau khắp vùng hoạt lò phản ứng.

Thứ hai, việc nạp các khối nhiên liệu mới vào khắp vùng hoạt lò phản ứng gây ra độ phản ứng dư ban đầu lớn, dẫn đến việc chèn sâu các thanh điều khiển vào vùng hoạt và dẫn đến nhiệt độ nhiên liệu cao. Khả năng độ phản ứng dư lớn hơn là cần thiết vì sự suy giảm độ phản ứng nhanh là kết quả của các tỷ lệ chuyển đổi thấp của nhiên liệu urani làm giàu thấp. Do đó, điều quan trọng đối với thiết kế hạt nhân của HTTR là phải giảm độ phản ứng dư một cách thích đáng. Vấn đề với độ phản ứng dư đã được giải quyết bằng cách tối ưu hóa các chất độc có thể cháy được (BP: Burnable Poison) trong vùng hoạt. Việc tối ưu hóa đã giữ cho độ phản ứng dư ở mức tối thiểu cần thiết cho các hoạt động của lò phản ứng.

Thứ ba, tránh được sự sai lệch so với sự phân bố công suất tối ưu do đốt cháy vật liệu phân hạch bằng cách tối ưu hóa các thông số kỹ thuật của BP, cụ thể là mật độ nguyên tử trung bình và bán kính cho từng khu vực cục bộ. Độ phản ứng dư của vùng hoạt được duy trì không đổi. Do đó, có thể vận hành lò phản ứng mà không cần thay đổi vị trí chèn của các thanh điều khiển trong quá trình vận hành công suất ở 950°C. Dựa trên chính sách thiết kế trên, các yêu cầu thiết kế, phương pháp phân tích, và các đặc tính hạt nhân của HTTR đã được xác định, và các phương pháp phân tích được cải thiện dựa trên các kết

qua thực nghiệm.

Yêu cầu thiết kế

Các thông số vật lý chính của vùng hoạt HTTR được liệt kê trong Bảng 2.2. Thiết kế hạt nhân phải đáp ứng các yêu cầu sau.

Độ phản ứng dư

Độ phản ứng dư phải được xác định có tính đến các ảnh hưởng sau:

- tăng nhiệt độ từ trạng thái dừng lò lạnh sang trạng thái hoạt động công suất danh định;
- tích tụ các sản phẩm phân hạch, chẳng hạn như Xe và Sm;
- sự cháy nhiên liệu;
- các giới hạn bao gồm cả các thử nghiệm chiếu xạ; và
- độ bất định đối với các tính toán hạt nhân.

Giới hạn dập lò phản ứng

Các thanh điều khiển phải được thiết kế sao cho cung cấp giới hạn dập lò phản ứng lớn hơn $0.01 \Delta k/k$, ngay cả khi một cặp thanh điều khiển có giá trị độ phản ứng tối đa bị rút hoàn toàn và không thể đưa vào lại. Hệ thống dập dự phòng phải được thiết kế để cho phép giới hạn dập lò phản ứng từ $0.01 \Delta k/k$ trở lên, ngay cả khi hệ thống thanh điều khiển không khả dụng.

Tốc độ đưa vào độ phản ứng

Tốc độ đưa vào độ phản ứng tối đa với các thanh điều khiển phải được giới hạn ở mức độ sao cho công suất phát ra liên quan không làm ảnh hưởng đến tính toàn vẹn của vùng hoạt, các cấu trúc bên trong lò phản ứng, hệ thống làm mát sơ cấp, v.v. Để thỏa mãn các điều kiện này, hệ thống thanh điều khiển phải được thiết kế sao cho chiều dài rút thanh trong một bước được giới hạn dưới 50 mm và tốc độ đưa vào độ phản ứng tối đa không vượt quá $2.4 \times 10^{-4} \Delta k/k/s$, ngay cả khi các thanh điều khiển được rút với tốc độ tối đa cho phép.

Bảng 2.2. Các đặc trưng kỹ thuật của HTTR [11]

Công suất nhiệt (MW)	30
Nhiệt độ chất làm mát đầu ra / đầu vào (°C)	950 / 395
Áp suất chất làm mát vòng sơ cấp (MPa)	4
Vật liệu cấu trúc	Graphite
Đường kính lò phản ứng tương đương (m)	2.3
Chiều cao của lò phản ứng (m)	2.9
Mật độ công suất trung bình (W/cm ³)	2.5
Nhiên liệu, độ giàu urani (wt.%)	UO ₂ , 3-10
Loại nhiên liệu	Thanh-trong-khối
Chu kỳ cháy nhiên liệu (ngày)	660
Khối nhiên liệu	
• Đường kính ngoài (cm)	2.6
• Đường kính trong (cm)	1.0
• Chiều dài (cm)	3.9
• Hệ số lấp đầy của các CFP (% thể tích)	30
• Mật độ của ma trận graphite (g/cm ³)	1.7
• Nhiễm tạp trong ma trận graphite (ppm)	<1.2 (tương đương boron)
CFP	
• Đường kính CFP / kernel (cm)	920 / 600
• Mật độ (g/cm ³)	10.41
• Vật liệu phủ	PyC/PyC/SiC/PyC
• Độ dày lớp phủ (μm)	60/30/25/45
Chất làm mát	Khí heli
Độ dày lớp phản xạ neutron	
• Lớp phản xạ phía trên / dưới đáy (m)	1.16 / 1.16
• Lớp phản xạ phía bên cạnh (m)	0.99
Số khối nhiên liệu / số cột nhiên liệu	150 / 30
Số cặp thanh điều khiển	16

Hệ số độ phản ứng

Một hệ số độ phản ứng quan trọng là hệ số công suất của độ phản ứng, được đóng góp chính bởi hệ số Doppler của nhiên liệu và hệ số nhiệt độ của chất làm chậm. Vùng hoạt lò phản ứng phải có đặc tính phản hồi độ phản ứng âm, làm giảm sự thay đổi mức công suất. Để đạt được điều kiện này, vùng hoạt của lò phản ứng phải được thiết kế sao cho hệ số công suất của độ phản ứng là âm đối với bất kỳ điều kiện vận hành nào.

Phân bố công suất

Sự phân bố công suất phải được xác định sao cho nhiệt độ nhiên liệu không vượt quá giá trị giới hạn trong quá trình vận hành. Để có được điều kiện này, nhiên liệu và BP phải được nạp tải sao cho nhiệt độ nhiên liệu tối đa được giữ ở mức thấp nhất có thể.

Độ sâu cháy nhiên liệu

Độ sâu cháy trung bình tối đa trong một phân tử nhiên liệu không được vượt quá 33000 MWd/t. Để đạt được nhiệt độ chất làm mát đầu ra 950°C, sự phân bố độ làm giàu ^{235}U và phân phối BP trong vùng hoạt được tối ưu hóa. Do đó độ sâu cháy nhiên liệu trở nên thấp.

2.2 Tìm hiểu chương trình tính toán Monte Carlo Serpent 2

Tổng quan

Serpent là một chương trình vận chuyển hạt Monte Carlo ba chiều đa mục đích với năng lượng liên tục, được phát triển tại Trung tâm Nghiên cứu Kỹ thuật VTT của Phần Lan từ năm 2004. Serpent ban đầu được gọi là Trò chơi tán xạ xác suất (PSG: Probabilistic Scattering Game) từ năm 2004 đến bản phát hành trước đầu tiên của Serpent 1 vào tháng 10 năm 2008. Sự phát triển của Serpent 2 được bắt đầu vào năm 2010. Phiên bản ổn định hiện tại Serpent 2.2.0 được phát hành vào tháng 5 năm 2022.

Serpent ban đầu được phát triển để trở thành một chương trình tính toán vận chuyển neutron đơn giản cho các ứng dụng vật lý lò phản ứng. Trọng tâm chính của Serpent là tạo hàng số nhóm với các phép tính lưới hai chiều. Khả năng tính toán cháy nhiên liệu đã được đưa vào từ rất sớm. Ngày nay Serpent

được sử dụng trong một loạt các ứng dụng từ tạo hằng số nhóm đến các ứng dụng đa vật lý kết hợp, nhiệt hạch và che chắn bức xạ. Ngoài khả năng tính toán vận chuyển neutron, Serpent có thể thực hiện tính toán vận chuyển photon.

Serpent được phân phối với các tùy chọn giấy phép khác nhau cho nghiên cứu phi thương mại và sử dụng giáo dục và cho công việc thương mại. Việc phân phối được xử lý bởi VTT và hai trung tâm dữ liệu: Ngân hàng Dữ liệu OECD/NEA (NEA: Nuclear Energy Agency) và Trung tâm Tính toán Thông tin An toàn Bức xạ (RSICC) ở Hoa Kỳ. Ấn phẩm được đề xuất để tham khảo Serpent là tài liệu tham khảo [20]: Leppänen, J., et al., "The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013," *Ann. Nucl. Energy*, 82 (2015) 142-150.

Tuy nhiên, cần lưu ý rằng tài liệu tham khảo này phần lớn đã lỗi thời và không bao gồm nhiều tính năng và khả năng hiện có trong phiên bản hiện tại. Nhiều ấn phẩm hơn được liệt kê trên một trang phụ riêng biệt với các công bố khoa học dưới nhiều dạng khác nhau. Hỗ trợ cho người dùng được cung cấp tại Diễn đàn Thảo luận về Serpent và Serpent Wiki hoạt động như một hướng dẫn sử dụng trực tuyến.

Các ứng dụng tiêu biểu

Phương pháp Monte Carlo năng lượng liên tục có thể được sử dụng cho một loạt các ứng dụng vận chuyển hạt. Mô hình vật lý trong Serpent bao gồm các mô phỏng neutron, photon và neutron-photon kết hợp. Serpent ban đầu được phát triển như một chương trình vật lý lò phản ứng, nhưng phạm vi ứng dụng của Serpent đã được mở rộng đáng kể trong những năm qua. Các ứng dụng phổ biến nhất cho Serpent được giới thiệu sau đây, cùng với các tính năng và khả năng chính liên quan.

Mô hình hóa lò phản ứng

Serpent đã được sử dụng để mô hình hóa các loại lò phản ứng phân hạch hạt nhân khác nhau kể từ khi bắt đầu dự án. Mô hình hình học tiêu chuẩn dựa trên kiểu hình học cấu trúc khối rắn (CSG: Constructive Solid Geometry) dựa trên các universe (miền không gian), đủ cho hầu hết các loại lò phản ứng dựa trên hình dạng thông thường. Các tùy chọn hình học bổ sung bao gồm mô hình nhiên liệu hạt/pebble rõ ràng cho lò phản ứng làm mát bằng khí ở nhiệt độ cao

và kiểu hình học dựa trên CAD cho các cấu trúc không thông thường phức tạp. Phương pháp Monte Carlo vốn là không gian ba chiều và có thể mở rộng đến các mức độ chi tiết không gian tùy ý.

Vật lý tương tác neutron trong Serpent dựa trên động học va chạm cổ điển trong đó các tiết diện được truy xuất từ định dạng ACE của thư viện dữ liệu hạt nhân ENDF. Định dạng ban đầu được phát triển cho chương trình MCNP từ Phòng thí nghiệm Quốc gia Los Alamos và cũng được sử dụng bởi các chương trình Monte Carlo khác, chẳng hạn như OpenMC và Geant4. Dữ liệu tương tác năng lượng liên tục được tạo ra từ các tệp dữ liệu hạt nhân đã được đánh giá mà không có các ước tính chính xác. Điều này cũng có nghĩa là kiến thức tốt nhất hiện có về tương tác neutron có thể được sử dụng trong các mô phỏng như hiện tại. Chương trình Monte Carlo có thể được sử dụng với bất kỳ công nghệ lò phản ứng nào mà không có giới hạn về ứng dụng cụ thể. Các thư viện tiết diện định dạng ACE được xử lý trước ở một nhiệt độ cụ thể. Nhiệt độ có thể được điều chỉnh thêm bằng cách sử dụng quy trình mở rộng Doppler tích hợp.

Serpent có khả năng tính toán cháy tích hợp để theo dõi nồng độ nuclide chịu tương tác neutron và phân rã phóng xạ. Phương pháp này có thể áp dụng cho nhiên liệu hạt nhân và vật liệu được kích hoạt. Việc phân chia vùng cháy và hình thành các đường biến đổi (transmutation) và phân rã (decay) được thực hiện tự động, với đầu vào tối thiểu từ người dùng. Serpent sử dụng phương pháp xấp xỉ hợp lý Chebyshev cho lời giải của các phương trình cháy Bateman và cung cấp các phương pháp tích hợp thời gian khác nhau để thực hiện lặp lại giữa vật lý neutron (neutronics) và lời giải phương trình cháy.

Để giảm nhu cầu bộ nhớ trong tính toán ghi dữ liệu, Serpent cung cấp các chế độ tối ưu hóa khác nhau cho các hệ thống quy mô nhỏ và quy mô lớn. Các tính năng được sử dụng để tăng tốc độ mô phỏng vận chuyển có thể được tắt để cải thiện hiệu quả bộ nhớ. Phương pháp tiêu chuẩn có thể áp dụng cho các tính toán cháy toàn bộ vùng hoạt ở quy mô lò phản ứng mô đun nhỏ. Một lược đồ phân giải miền dựa trên va chạm cho phép chạy các tính toán cháy nhiên liệu trong các lò nước nhẹ lớn truyền thống, mặc dù chi phí tính toán cao.

Các tally trong Serpent cho phép tính toán phân bố thông lượng, công suất và tốc độ phản ứng trong các ô hình học và vật liệu, cũng như các cấu trúc

thông thường, chẳng hạn như các lattice và lưới chồng chập. Ngoài các tally tích hợp bề mặt và thể tích (tùy theo không gian) tiêu chuẩn, Serpent cung cấp một phương pháp luận để tái tạo lại các phân bố không gian thành dạng chức năng. Một cách tiếp cận như vậy sử dụng tally mở rộng hàm (FET) dựa trên cơ sở đa thức trực chuẩn. Phương pháp luận của FET cung cấp các ước tính của Monte Carlo với khả năng tắt định/kết hợp.

Mô hình hóa lò phản ứng bao gồm một loạt các ứng dụng với các phương pháp luận khác nhau. Các khả năng tiêu biểu có thể kể đến như chế độ mô phỏng động học với vật lý neutron trễ và các phương pháp phân tích độ nhạy và độ bất định. Việc ghép nối kết hợp với các bộ giải vật lý khác được đề cập riêng bên dưới.

Tạo các hằng số nhóm

Một trong những mục đích sử dụng ban đầu cho Serpent là tạo hằng số nhóm để mô phỏng chu trình nhiên liệu xác định và chương trình phân tích tức thời. Serpent có thể tạo ra tất cả các thông số đầu vào cần thiết cho tính toán khuếch tán nút (nodal), bao gồm tiết diện phản ứng vĩ mô đồng nhất, tiết diện vi mô của các đồng vị, hệ số khuếch tán, hệ số bất liên tục, tiết diện nhiễm độc và động học điểm cùng các thông số neutron trễ. Việc tính toán hầu hết các thông số dựa trên các tally Monte Carlo tiêu chuẩn. Đối với hệ số khuếch tán, Serpent sử dụng phương pháp di chuyển tích lũy (CMM: Cumulative Migration Method) và các phân tử neutron trễ hiệu dụng được tính bằng cách sử dụng phương pháp xác suất phân hạch lặp. Tạo hằng số nhóm có thể được thực hiện dưới dạng tính toán phổ vô hạn hoặc tới hạn.

Việc tạo các hằng số nhóm đòi hỏi phải lặp lại tính toán cho một số lượng lớn các điểm cháy nhiên liệu và các thay đổi trong điều kiện phản ứng và thủy nhiệt. Quản lý chuỗi tính toán liên quan đến hàng nghìn lần chạy trở thành một nhiệm vụ đáng kể, có thể được đơn giản hóa đáng kể bằng cách sử dụng các tính năng tích hợp. Serpent cung cấp khả năng rẽ nhánh để gọi ra các biến thể nhỏ trong điều kiện hoạt động. Tính năng casematrix cho phép tổ chức lịch sử và khởi động lại các tính toán theo cách tối ưu để chạy trong các cụm máy tính. Với đủ tài nguyên tính toán, phương pháp Monte Carlo có thể được coi là một lựa chọn khả thi để tạo hằng số nhóm.

Phương pháp luận được sử dụng để tạo hằng số nhóm đã được thiết kế để tương thích với chương trình nodal Ants của VTT, được sử dụng như một phần của khung tính toán Kraken (xem bên dưới). Serpent cũng đã được sử dụng rộng rãi để tạo dữ liệu đầu vào cho các chương trình nodal khác, chẳng hạn như DYN3D và PARCS.

Kết hợp các ứng dụng đa vật lý và khung Kraken

Mô hình hóa một lò phản ứng hạt nhân đang hoạt động đòi hỏi phải giải quyết một vấn đề kết hợp giữa neutronics, thủy nhiệt và hành vi của nhiên liệu. Một trong những thách thức khi kết hợp bộ giải neutronics Monte Carlo với chuỗi tính toán đa vật lý như vậy là xử lý việc truyền dữ liệu hai chiều giữa các bộ giải. Cách tiếp cận trong Serpent là tách biệt hoàn toàn các phân bố điểm trạng thái thủy nhiệt khỏi mô hình hình học do người dùng xác định. Thông tin về nhiệt độ và mật độ vật liệu được đưa vào mô phỏng vận chuyển thông qua giao diện vật lý đa năng phổ quát, về cơ bản là một cấu trúc ba chiều được áp đặt lên hình học bên dưới.

Đối với người dùng chương trình, điều này có nghĩa là không cần sửa đổi trong mô hình hình học khi Serpent được kết hợp với một bộ giải khác. Bên trong các phân phối được xử lý bằng cách sử dụng thuật toán dựa trên lấy mẫu loại bỏ hiệu quả, cho phép cả những thay đổi tùy tiện và liên tục về nhiệt độ và mật độ. Việc sửa đổi nhiệt độ được thực hiện bằng cách sử dụng quy trình mở rộng Doppler nhanh chóng, do đó không cần phải lưu trữ các mặt cắt ở nhiều nhiệt độ. Giao diện đa vật lý hỗ trợ một số kiểu phân phối, bao gồm lưới OpenFOAM không có cấu trúc và kiểu giao diện đặc biệt để ghép nối với chương trình tính toán hiệu suất nhiên liệu.

Kể từ năm 2017, Serpent đã được phát triển như một phần của khung tính toán vật lý lò phản ứng Kraken mới của VTT, nơi Serpent có thể được sử dụng để tạo ra các hằng số nhóm cho chương trình nodal Ants (phương pháp hạ bậc) hoặc được kết hợp trực tiếp với các bộ giải khác (phương pháp với độ tin cậy cao).

Vận chuyển bức xạ và ứng dụng nhiệt hạch

Mặc dù Serpent ban đầu được phát triển như một chương trình vật lý lò phản ứng, việc triển khai các phương pháp và khả năng mới đã cho phép các

ứng dụng vượt ra ngoài phạm vi của lò phản ứng phân hạch. Kiểu hình học dựa trên CAD là một lựa chọn thiết thực cho việc mô hình hóa các cấu trúc phức tạp và bất thường. Dạng hình học như vậy thường gặp trong các ứng dụng nhiệt hạch và vận chuyển bức xạ. Các quá trình vật lý neutron và photon giống nhau được phát triển cho các ứng dụng phân hạch cũng có giá trị tương tự, bất kể nguồn phát ra các hạt là gì.

Một trong những ưu điểm chính của Serpent trong các ứng dụng vận chuyển bức xạ là khả năng tính toán chấy tích hợp cung cấp phương tiện để tạo ra các số hạng nguồn của nhiên liệu hạt nhân đã qua sử dụng hoặc vật liệu kích hoạt neutron. Các ví dụ thực tế bao gồm tính toán che chắn bức xạ được thực hiện đối với thùng chứa nhiên liệu hạt nhân đã qua sử dụng, hoặc tính toán tỷ lệ liều đóng cho lò phản ứng nhiệt hạch. Số hạng nguồn được hình thành tự động bằng cách sử dụng các thành phần vật liệu thu được từ tính toán chấy/kích hoạt, kết hợp với phổ phát xạ photon được đọc từ tệp dữ liệu phân rã định dạng ENDF. Người dùng không cần xử lý thêm.

Các tính toán che chắn bức xạ thường yêu cầu sử dụng rộng rãi phương pháp giảm phương sai, để có được số liệu thống kê đầy đủ trong các phần được che chắn nhiều của hình học. Sơ đồ giảm phương sai trong Serpent dựa trên phương pháp cửa sổ trọng số thông thường, với các ranh giới cửa sổ trọng số được xác định bởi một lưới độ quan trọng chồng chập. Các giá trị độ quan trọng có thể được đọc từ các tệp định dạng MCNP WWINP hoặc được tạo bằng cách sử dụng bộ giải dựa trên phương pháp ma trận phản hồi tích hợp sẵn. Bộ giải tích hợp hỗ trợ tính toán độ quan trọng đối với một hoặc nhiều phản hồi và tùy chọn giảm phương sai toàn cục để điền đầy toàn bộ hình học. Các tùy chọn lưới bao gồm các loại hình chữ nhật và hình trụ và lưới tự điều chỉnh có thể tự động tinh chỉnh xung quanh các cấu trúc được che chắn kỹ lưỡng.

Kiểm chứng và hiệu lực hóa

Trong suốt quá trình phát triển của mình, Serpent đã được kiểm chứng bằng cách so sánh với chương trình MCNP nổi tiếng của Hoa Kỳ, trong đó mô hình vật lý neutron sử dụng thư viện dữ liệu hạt nhân ENDF. Sự khác biệt thường nằm trong phạm vi độ chính xác thống kê khi sử dụng các thư viện ACE giống nhau trong các tính toán. Sự khác biệt với các chương trình Monte Carlo khác (Keno, OpenMC, Tripoli, v.v.) là nhỏ, nhưng có thể quan sát thấy sự khác

biệt có ý nghĩa thống kê trong một số trường hợp. Mô hình vật lý photon trong Serpent khác với mô hình trong MCNP ở một mức độ nào đó. Mức độ đồng thuận tương tự không thể được mong đợi như trong mô phỏng vận chuyển neutron, nhưng sự khác biệt nên duy trì ở mức nhỏ.

Việc kiểm chứng các tính toán cháy nhiên liệu trở nên phức tạp hơn do thiếu một chương trình tham chiếu hoàn hảo. Điều tương tự cũng áp dụng cho các mô phỏng đa vật lý, trong đó Serpent được kết hợp với thủy nhiệt và/hoặc chương trình tính toán hiệu suất nhiên liệu. Ngoài sự khác biệt trong vật lý vận chuyển, còn có các yếu tố bổ sung liên quan đến dữ liệu được sử dụng trong tính toán, thuật toán ghép nối, phương pháp được sử dụng trong bộ giải bên ngoài, v.v. Độ bất định lớn nhất trong các tính toán cháy thường bắt nguồn từ dữ liệu hạt nhân cơ bản và các phép tính gần đúng được áp dụng trong công thức của các chuỗi biến đổi.

Nỗ lực đáng kể từ cả các nhà phát triển Serpent và cộng đồng người dùng đã được dành cho việc kiểm chứng và hiệu lực hóa Serpent bằng các bài toán benchmark. Các trường hợp tính toán bao gồm một loạt các ứng dụng và một số bài toán benchmark cung cấp dữ liệu thử nghiệm để so sánh. Các ấn phẩm và báo cáo liên quan được thu thập trong Serpent Wiki.

CHƯƠNG 3: XÂY DỰNG MÔ HÌNH TÍNH TOÁN MÔ PHỎNG HTTR DÙNG CHƯƠNG TRÌNH TÍNH TOÁN MONTE CARLO SERPENT 2

3.1 Mô tả bài toán benchmark đối với HTTR

Trong khi không có đủ thông tin công khai về lò phản ứng HTTR, một mô hình bài toán benchmark (so sánh chuẩn) chi tiết khó có thể được thiết lập. Một mô hình bài toán benchmark của HTTR đã được thiết lập theo cách đơn giản hóa [19]. Mặc dù xu hướng đơn giản hóa cho mô hình này cũng không thể được xác định đầy đủ, độ bất định trong mô hình được cho là đủ lớn để bao gồm bất kỳ sai lệch nào phát sinh do quá trình đơn giản hóa mô hình benchmark và sai lệch do loại bỏ thiết bị đo vùng hoạt đã được ước tính. Hiện tại rất khó để có được thông tin cần thiết để cải thiện độ tin cậy trong mô hình benchmark; dữ liệu cần thiết là độc quyền và việc phát hành dữ liệu này đang bị hạn chế vì cấu hình benchmark của lò phản ứng HTTR giống với cấu hình hiện đang hoạt động. Một khi các thông tin này được cung cấp, bài toán benchmark HTTR có thể được điều chỉnh thích hợp. Vùng hoạt tới hạn của HTTR nạp tải 30 cột nhiên liệu được mô hình hóa trong bài toán benchmark nói trên và sẽ được khảo sát trong phạm vi luận văn này dùng chương trình Monte Carlo Serpent 2.

Mô tả đơn giản hóa mô hình benchmark

Đơn giản hóa đáng kể đã được thực hiện để phát triển mô hình benchmark của HTTR do thiếu thông tin công khai có sẵn để xác định các kích thước và thành phần. Việc đơn giản hóa được áp dụng trong các mô tả về kích thước và đặc tính vật liệu của mô hình benchmark. Như đã nêu ở trên, các sai lệch của mô hình không được đánh giá nhưng sẽ được giải quyết khi có thêm thông tin về HTTR.

Các vị trí xử lý nhiên liệu, chốt và ổ cắm không được đưa vào mô hình do không có đủ dữ liệu về các thông số kỹ thuật, nhưng được tính với tỷ lệ rỗng là giảm 0.5 % mật độ graphite. Các lỗ chèn chất độc có thể cháy được đặt trên cùng một cao độ với các kênh nhiên liệu để đơn giản hóa mô hình. Độ sâu mà thanh điều khiển, hệ thống dập lò dự trữ và các lỗ thiết bị được khoan khác

nhau. Do đó, độ cao 1060 mm so với đáy vùng hoạt được chọn cho tất cả các vị trí để đơn giản hóa mô hình.

Không có đủ thông tin để lập mô hình khối phản xạ dưới cùng theo thiết kế thực tế; do đó khối phản xạ này được mô hình hóa với thiết kế giống như hai khối phản xạ phía trên và khối phản xạ phía dưới còn lại. Mặt trên và mặt dưới của mỗi kênh làm mát dự kiến sẽ thuôn dần từ đường kính 21 mm đến đường kính 41 mm của các bó nhiên liệu, nhưng không có thông tin để mô tả độ thuôn trong mô hình. Do đó, các kênh trong các khối phản xạ được lập mô hình với đường kính 21 mm. Các phần riêng lẻ của vành phản xạ cố định hình khối thập nhị giác (dodecagon) không được mô hình hóa do không đủ thông tin. Vành phản xạ này sẽ được mô hình hóa như một vùng hình trụ bao quanh các cột vùng hoạt.

Không có đủ thông tin để lập mô hình các khối che chắn xung quanh vùng hoạt lò phản ứng và các phích cắm dùng để che chắn trong vùng hoạt. Do đó, chúng không được đưa vào mô hình benchmark. Tất cả các neutron đến biên vùng hoạt được giả thiết đều bị mất mát và không bị tán xạ trở lại bởi vật liệu che chắn. Một ước tính thận trọng về các hiệu ứng tán xạ trở lại này cho thấy sự thay đổi không đáng kể đối với hệ số nhân neutron hiệu dụng k_{eff} .

Trong phần vật liệu, hàm lượng tạp chất trong vật liệu dựa trên tính tương đương của boron tự nhiên. Tuy nhiên, trong mô hình, chỉ có thành phần ^{10}B được đưa vào, vì tác động của thành phần ^{11}B sẽ không đáng kể. Mật độ là như nhau (1.80 g/cm^3) đối với cả hai loại viên chất độc cháy được. Hàm lượng boron trong các viên dựa trên phần trăm trọng lượng được dùng thay vì phần trăm nguyên tử.

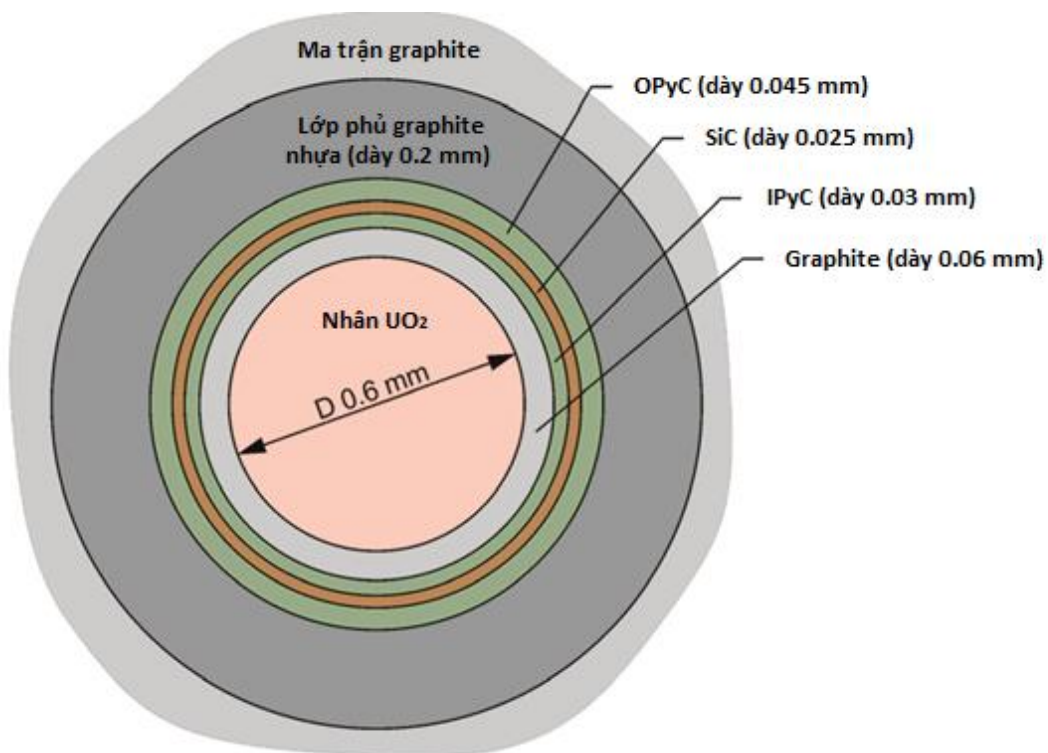
Có nhiều thông tin để xác định các tham số cho nhiên liệu hạt TRISO. Bởi vì khối lượng nhiên liệu của một thanh riêng lẻ rất có thể là thông số được đo chính xác nhất, nên giá trị này được giữ nguyên trong mô hình benchmark với một số thay đổi đối với các thông số khác khi cần thiết. Đường kính kernel

TRISO được duy trì ở giá trị danh nghĩa là 600 μm và mật độ của nhiên liệu là 10.39 g/cm^3 , nằm trong khoảng 95% mật độ lý thuyết của UO_2 . Số lượng hạt TRISO trong một khối nhỏ nhất định đã giảm từ 13000 xuống 12987 với tỷ lệ lấp đầy (packing fraction) là 30%, để bảo đảm khối lượng nhiên liệu danh nghĩa trên mỗi thanh là 188.58 g.

Nhiên liệu thanh-trong-khối hình lăng trụ

Các hạt TRISO

Thành phần cơ bản của nhiên liệu HTTR là hạt TRISO. Một kernel UO_2 được bao quanh bởi bốn lớp bọc: lớp đệm carbon nhiệt phân xốp (PyC) mật độ thấp, lớp PyC đẳng hướng mật độ cao bên trong, lớp SiC và lớp PyC cuối cùng bên ngoài. Sau đó, một lớp phủ graphite dẻo hóa được phủ xung quanh mỗi hạt TRISO. Hình 3.1 mô tả các lớp TRISO và kích thước tương ứng của chúng.



Hình 3.1. Hạt nhiên liệu TRISO [19]

Khối nhiên liệu

Tất cả mười bốn khối nén nhiên liệu trong mỗi thanh nhiên liệu được mô hình hóa như một đơn vị duy nhất điền đầy với lưới TRISO. Các hộp khối xếp chồng lên nhau có đường kính trong là 1 cm, đường kính ngoài là 2.6 cm và chiều cao tổng thể là 54.6 cm.

Mặt cắt ngang của khối nhiên liệu được thể hiện trong Hình 3.2. Trong mô hình benchmark, 12987 hạt TRISO được phân bố ngẫu nhiên trong toàn bộ ma trận khối trong một khối khối nhiên liệu. Đối với một chồng gồm 14 khối, như được mô hình hóa trong bài toán benchmark này, tổng số hạt TRISO là 181818. Một tham số quan trọng là tổng khối lượng nhiên liệu của một thanh nhiên liệu (14 khối xếp chồng lên nhau) xấp xỉ 188.58 gam.

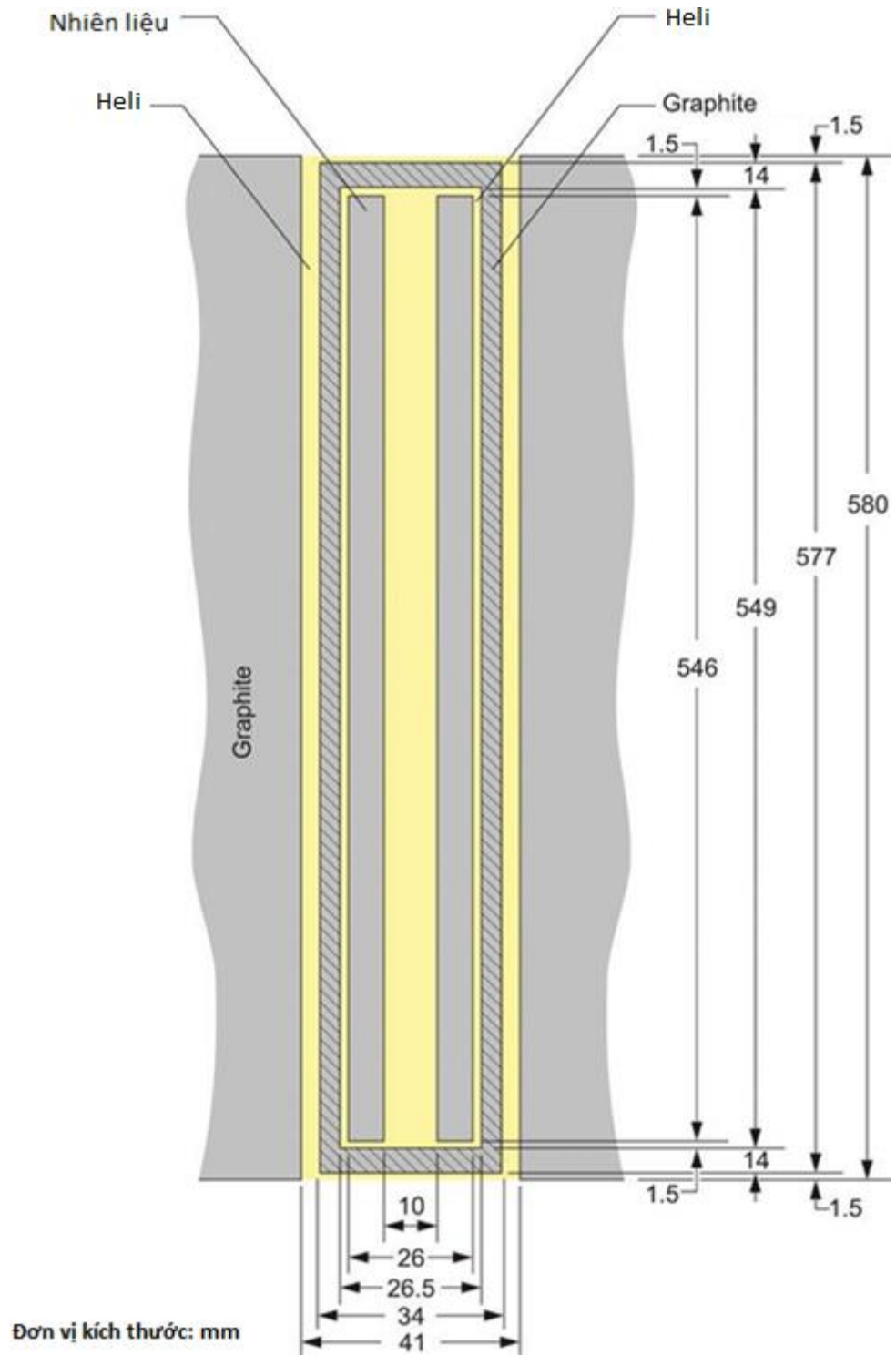
Trong khi mô hình benchmark duy trì tính ngẫu nhiên trong phân bố, nhiều chương trình máy tính không thể mô hình hóa đúng các cấu hình như vậy. Tùy thuộc vào người dùng để xác định phương pháp nào là phù hợp nhất trong khi tính đến tác động của phương pháp đó đối với độ phản ứng của mô hình. Sự khác biệt trong các phương pháp để lập mô hình chính xác các hạt TRISO ngẫu nhiên trong toàn bộ lò phản ứng là ở mức $\sim 0.1\%$ k_{eff} .



Hình 3.2. Khối nhiên liệu chứa các hạt TRISO với phân bố ngẫu nhiên (các hạt không được trình bày chi tiết trên hình) [19]

Phần tử nhiên liệu

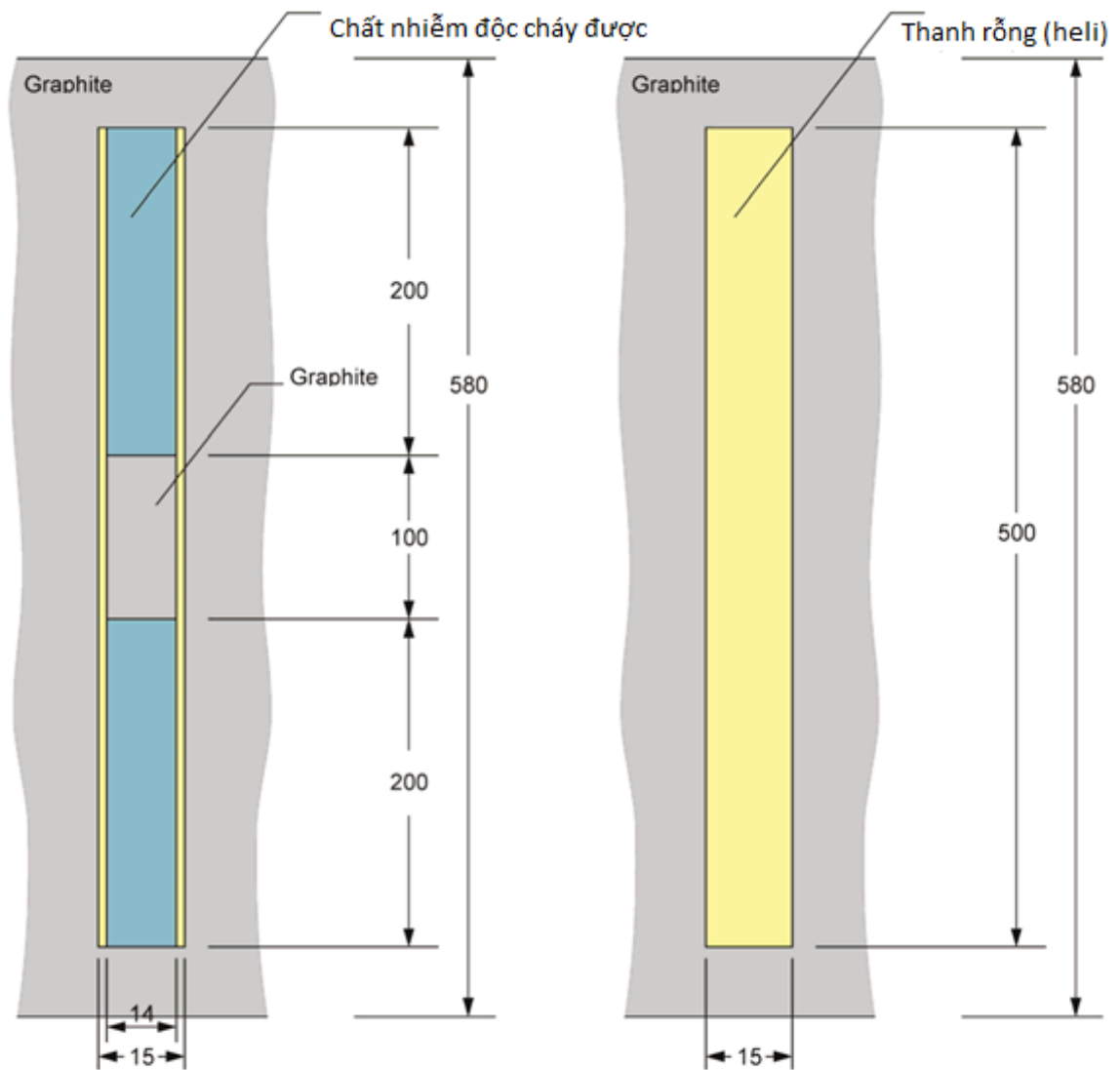
Mô tả phần tử nhiên liệu HTTR được mô hình hóa như Hình 3.3.



Hình 3.3. Phần tử nhiên liệu HTTR [19]

Chất độc có thể cháy được

Các viên chất độc có thể cháy được và các đĩa graphite được mô hình hóa thành các ngăn riêng lẻ ở một vị trí thanh trong các khối nhiên liệu (Hình 3.4). Mỗi khối nhiên liệu chứa hai thanh chất độc có thể cháy được và một vị trí thanh trống.

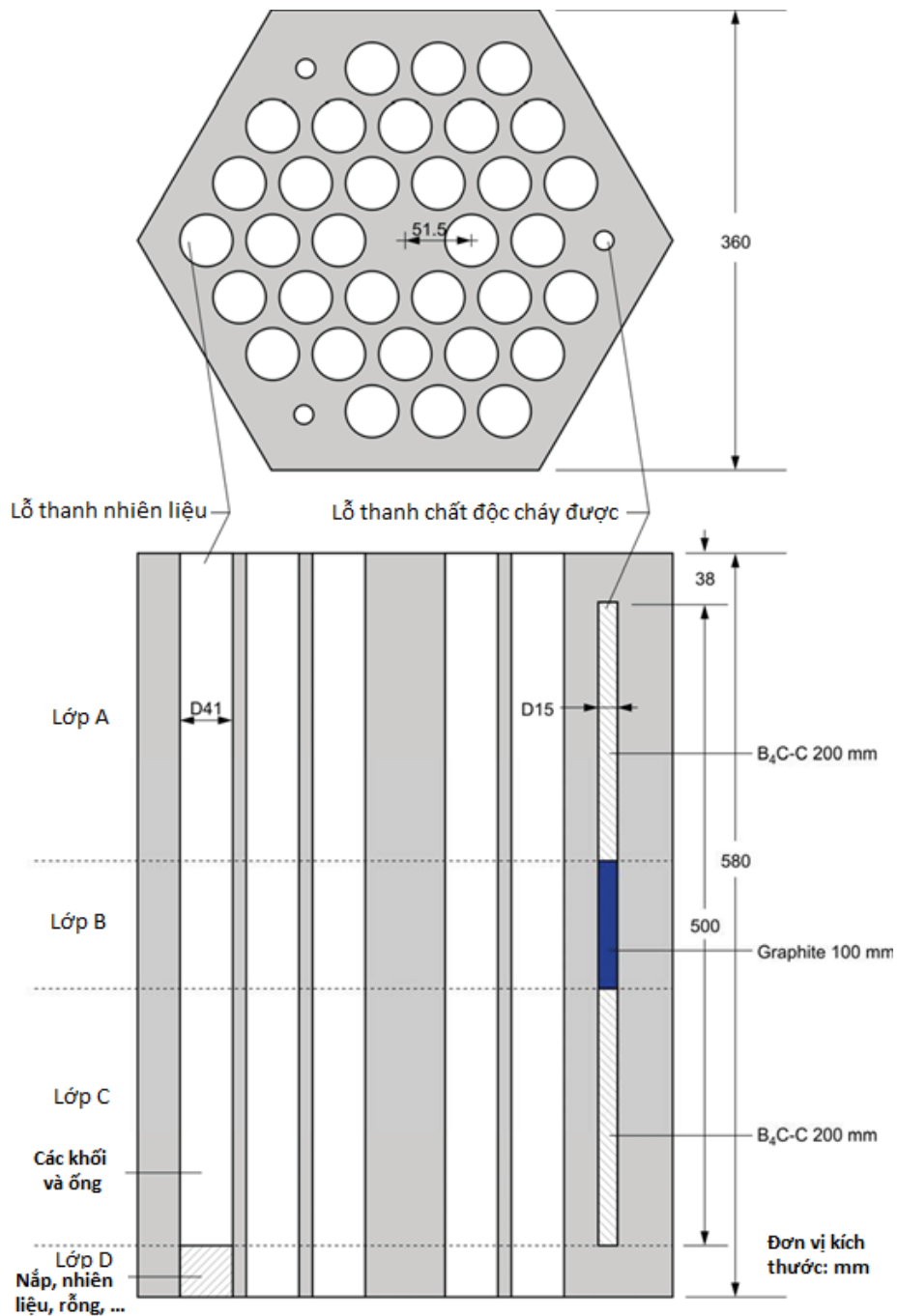


Đơn vị kích thước: mm

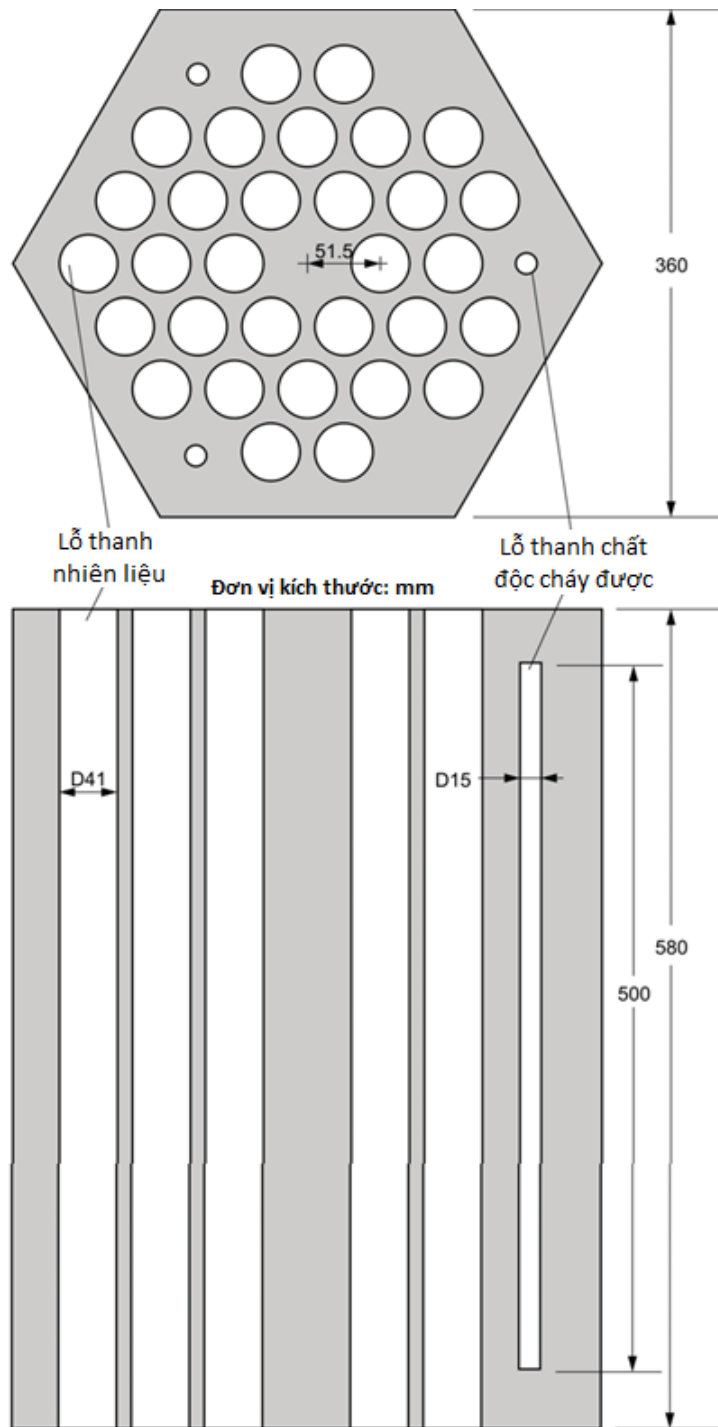
Hình 3.4. Thanh chất độc cháy được (trái) và vị trí thanh trống (phải) [19]

Các khối nhiên liệu

HTTR chứa hai loại bó nhiên liệu lục giác thông thường: 33 thanh (Vùng 1 và 2) và 31 thanh (Vùng 3 và 4). Sơ đồ của từng thiết kế khối nhiên liệu được thực hiện trong mô hình benchmark được thể hiện tương ứng trong Hình 3.5 và Hình 3.6. Khoảng cách cho tất cả các vị trí là 51.5 mm.



Hình 3.5. Bó nhiên liệu 33 thanh. Dxx ký hiệu đường kính là xx (mm) [19]



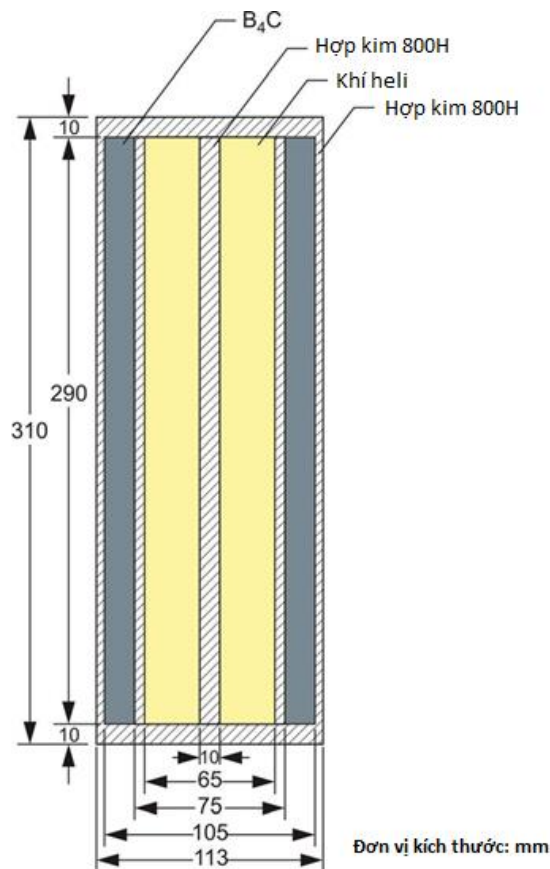
Hình 3.6. Bó nhiên liệu 31 thanh. Dxx ký hiệu đường kính là xx (mm) [19]

Hệ thống thanh điều khiển

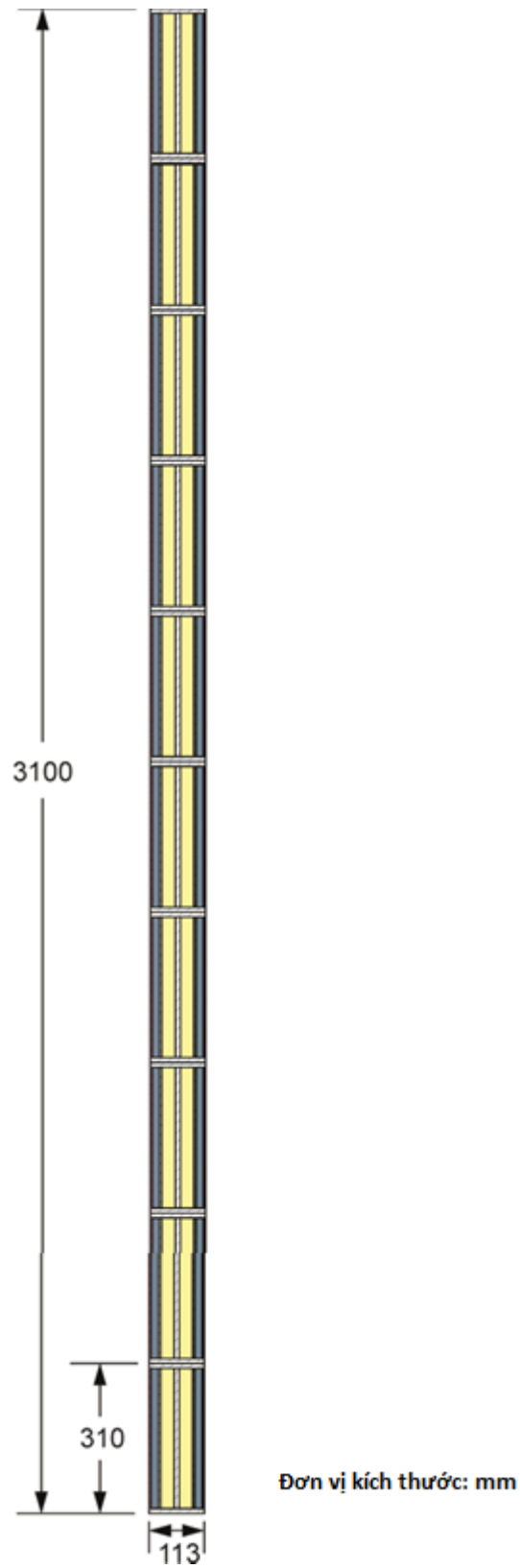
Thanh điều khiển

Sơ đồ của thanh điều khiển được thể hiện trong Hình 3.7. Các khối hấp thụ được mô hình hóa như một bộ phận. Các kích thước chi tiết liên quan đến lớp bọc cho từng phần không có sẵn và do đó, lớp bọc được mô hình hóa một cách đơn giản như Hình 3.7. Một thanh điều khiển bao gồm mười phần với tổng chiều cao là 3.1 m (Hình 3.8).

Các thanh điều khiển được chia thành bốn bộ: vị trí trung tâm (C), vòng 1 (R1), vòng 2 (R2) và vòng 3 (R3). Vị trí trung tâm chứa hai thanh điều khiển. Các vòng khác bao gồm sáu, sáu và ba vị trí, chứa tổng cộng mười hai, mười hai và sáu thanh điều khiển tương ứng. Các thanh điều khiển trong mỗi bộ thanh điều khiển được di chuyển đồng bộ.



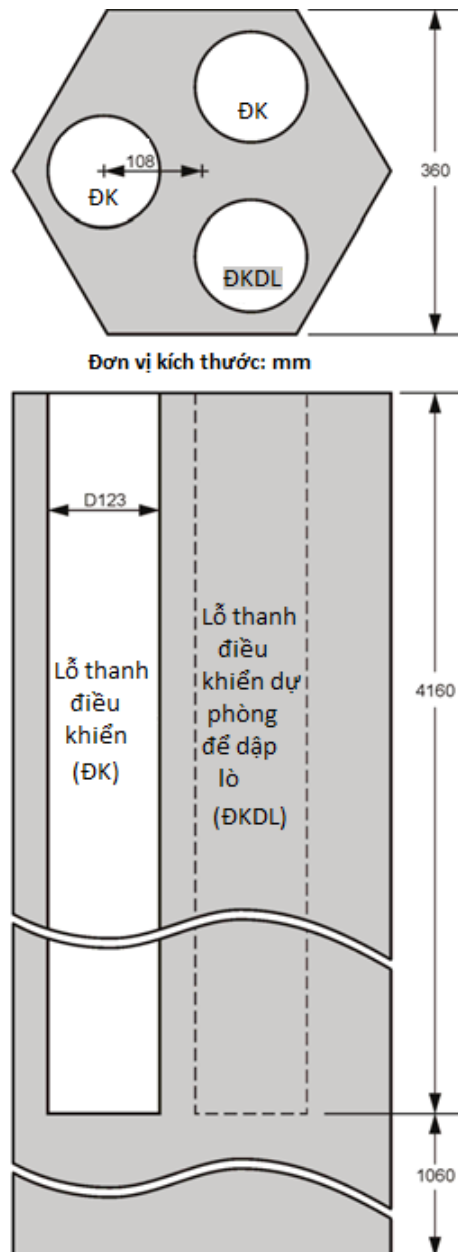
Hình 3.7. Một phần thanh điều khiển [19]



Hình 3.8. Thanh điều khiển bao gồm 10 phần [19]

Các cột thanh điều khiển

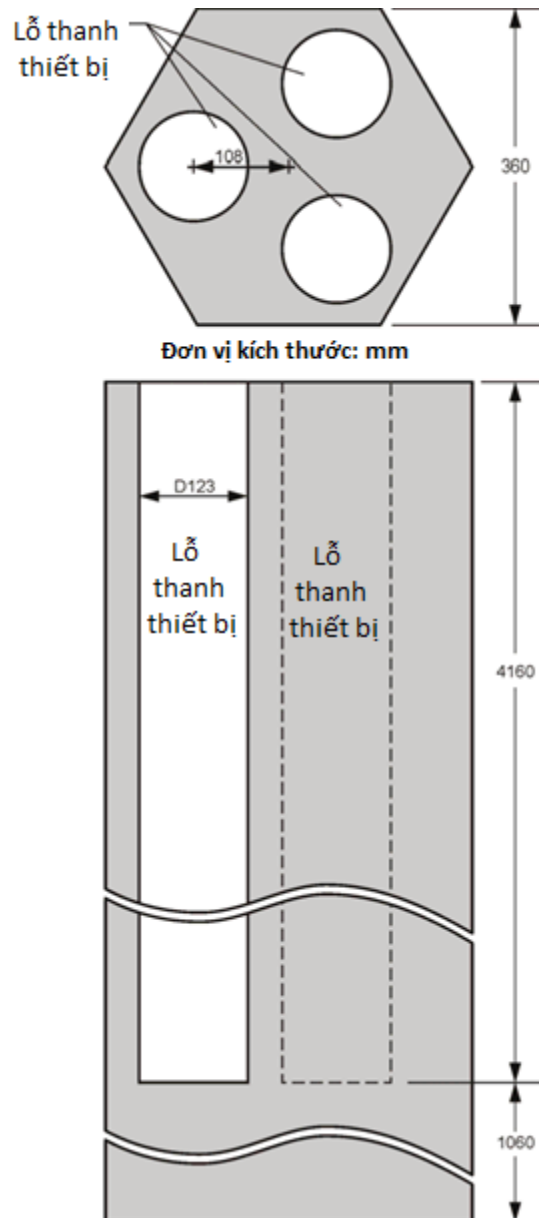
Các khối thanh điều khiển riêng lẻ không được mô hình hóa. Một cột thanh điều khiển duy nhất được mô hình hóa với ba lỗ để chứa hai thanh điều khiển và một vị trí trống (đối với hệ thống dập lò dự phòng). Một sơ đồ cột điều khiển chung (không có thanh điều khiển) được thể hiện trong Hình 3.9. Các lỗ trên thanh điều khiển và cột thiết bị cách đều nhau, với một góc 120° .



Hình 3.9. Cột thanh điều khiển. Dxx ký hiệu đường kính là xx (mm) [19]

Các cột thiết bị đo

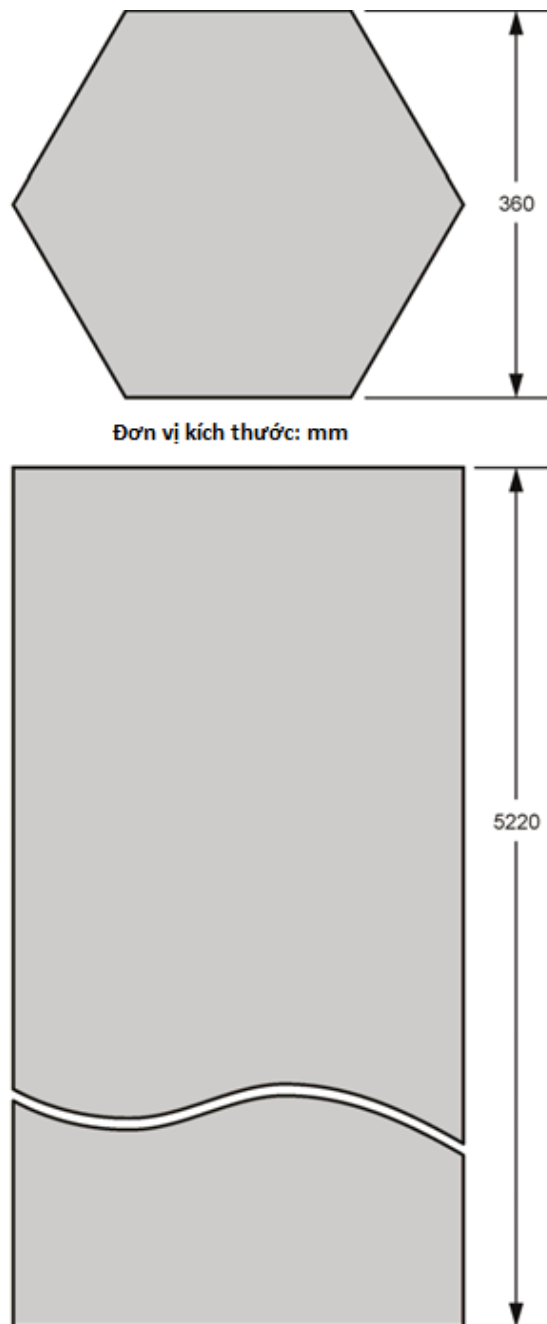
Các cột thiết bị được mô hình hóa dưới dạng một bộ phận liền không chia khối, tương tự như các cột thanh điều khiển. Tuy nhiên, cả ba vị trí đều trống (Hình 3.10).



Hình 3.10. Cột thiết bị đo. Dxx ký hiệu đường kính là xx (mm) [19]

Các cột phản xạ có thể thay thế

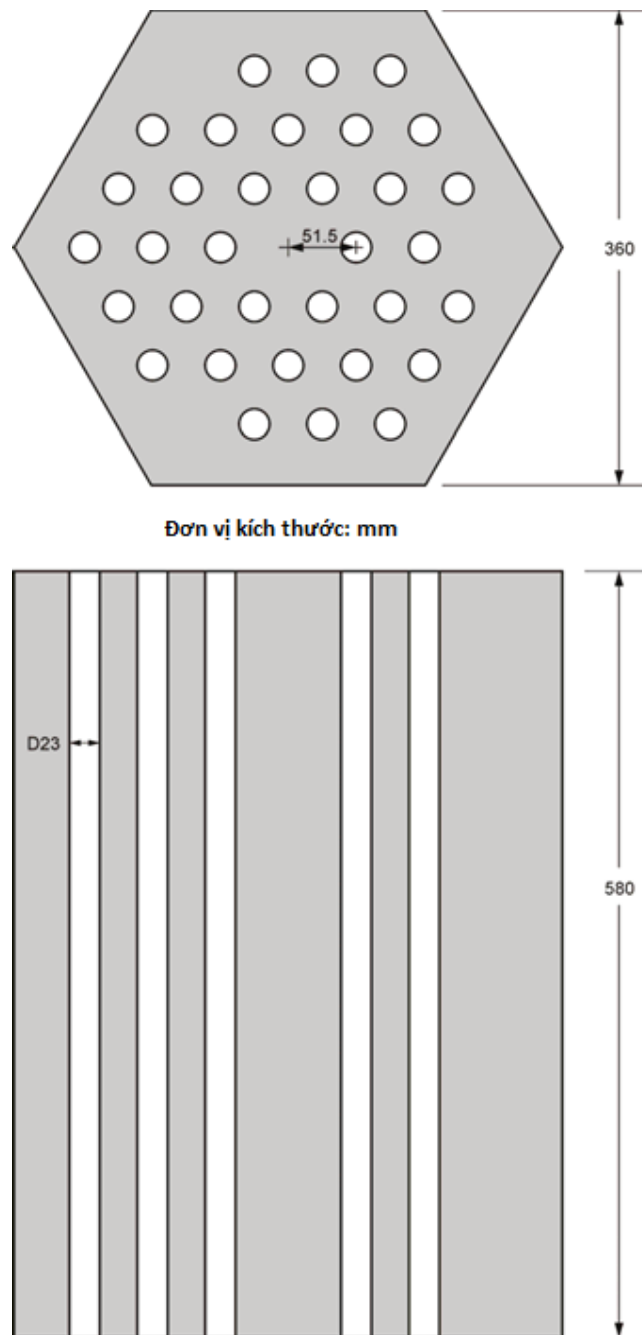
Các cột phản xạ có thể thay thế được mô hình hóa dưới dạng một bộ phận chứ không phải là các khối riêng lẻ, tương tự như thanh điều khiển và cột thiết bị nhưng không có bất kỳ kênh nào (Hình 3.11).



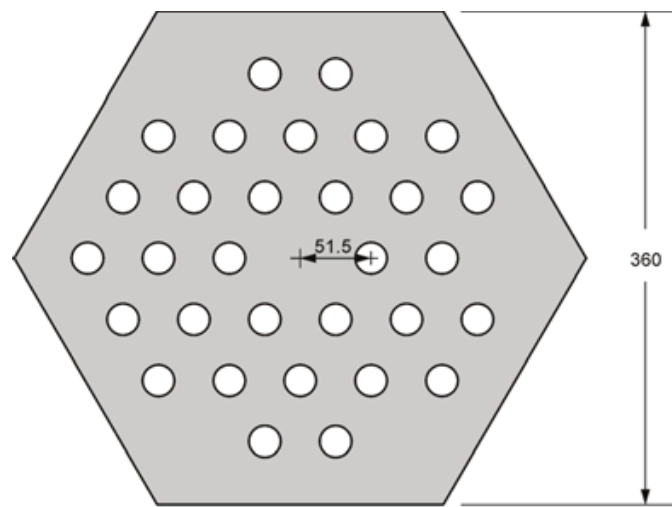
Hình 3.11. Cột phản xạ có thể thay thế [19]

Khối phản xạ có thể thay thế trong cột nhiên liệu

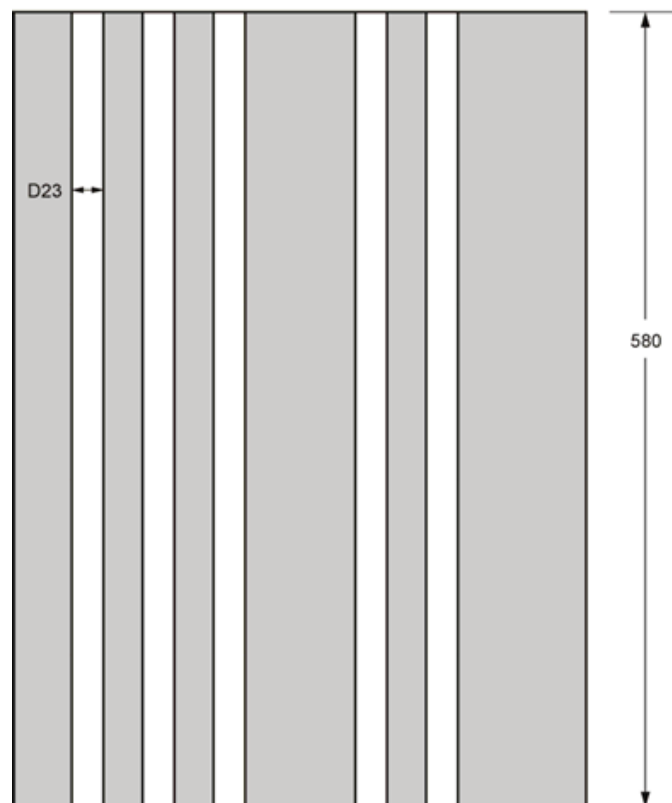
Các khối phản xạ có thể thay thế, nằm ở các cột nhiên liệu trên cùng và dưới cùng, được hiển thị trong Hình 3.12 và Hình 3.13, tương ứng cho bó nhiên liệu 33 thanh và 31 thanh. Các khối phản xạ có thể thay thế có hình lục giác với cùng giá trị pitch như được mô tả cho các khối nhiên liệu.



Hình 3.12. Khối phản xạ có thể thay thế cho bó nhiên liệu 33 thanh. Dxx ký hiệu đường kính là xx (mm) [19]



Đơn vị kích thước: mm

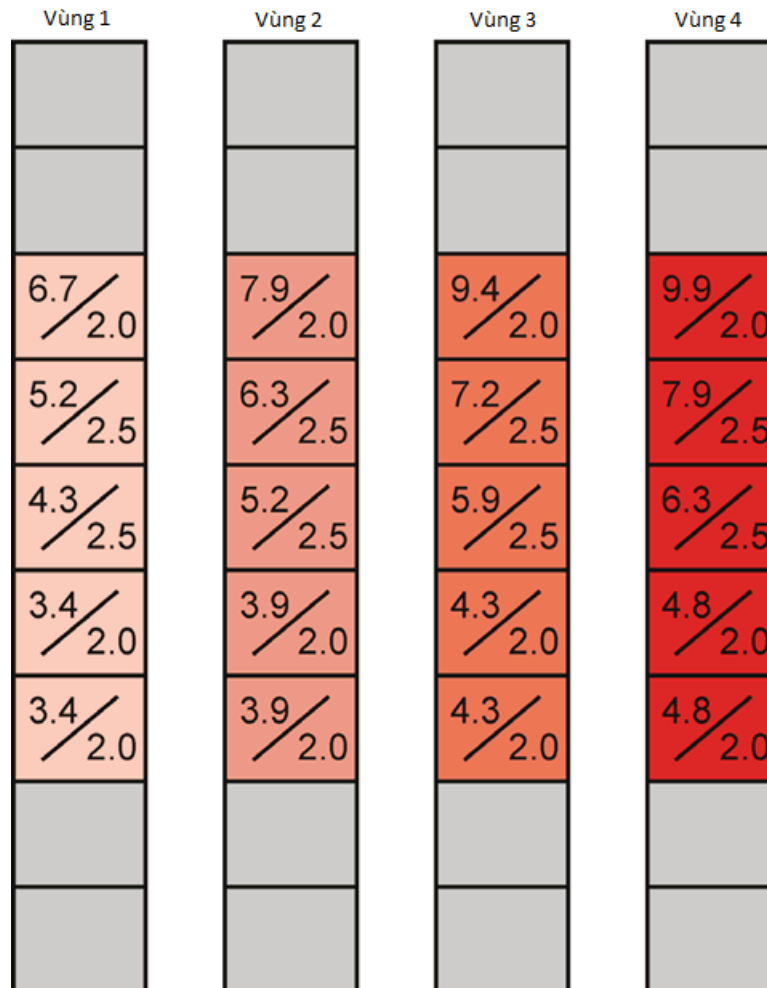


Hình 3.13. Khối phản xạ có thể thay thế cho bó nhiên liệu 31 thanh. Dxx ký hiệu đường kính là xx (mm) [19]

Các cột nhiên liệu

Các cột nhiên liệu được chia thành bốn vùng. Mỗi vùng có một mô hình

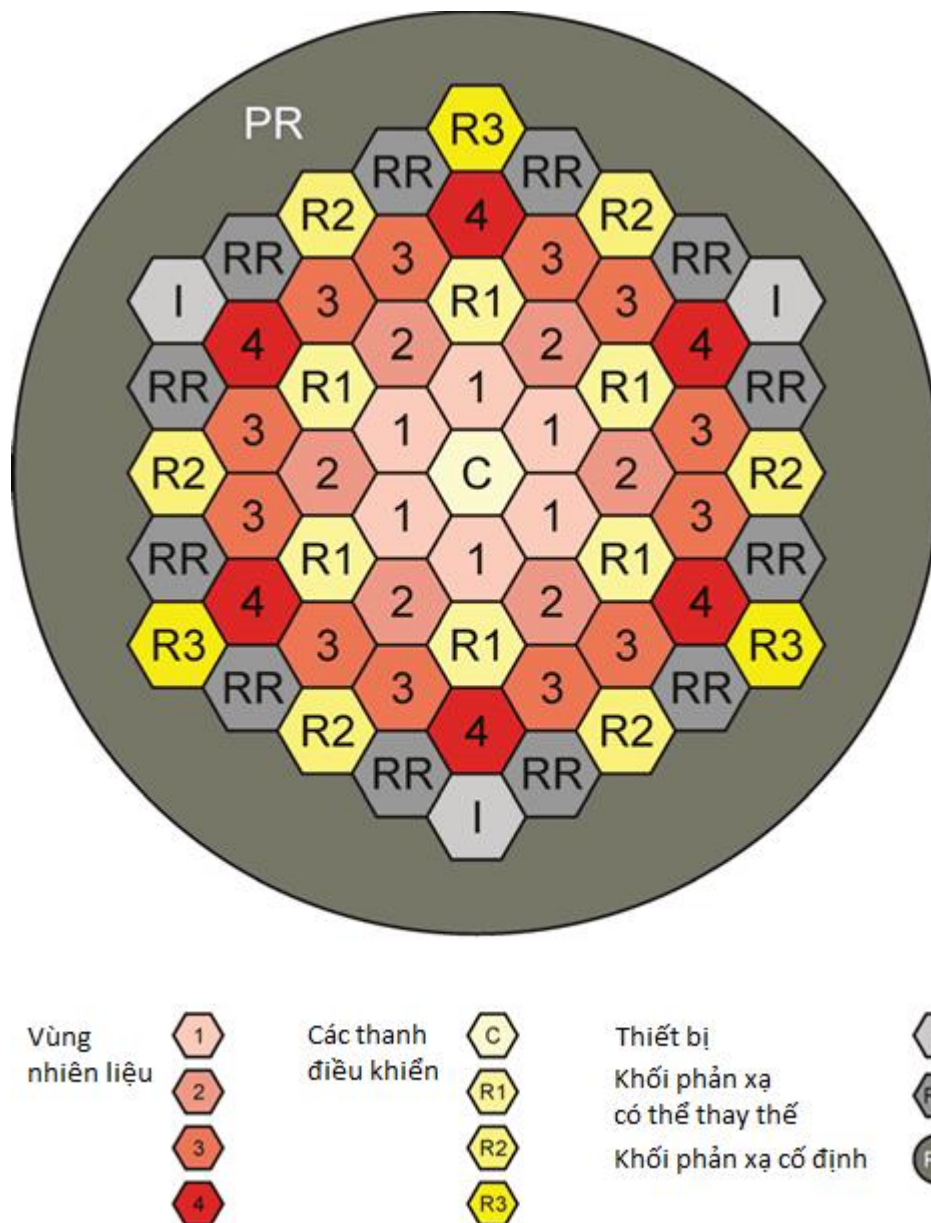
làm giàu urani cụ thể. Mỗi cột chứa hai khối phản xạ có thể thay thế trên cùng (Hình 3.12 cho Vùng 1 và 2 hoặc Hình 3.13 cho Vùng 3 và 4), năm khối nhiên liệu (Hình 3.5 cho Vùng 1 và 2 và Hình 3.6 cho Vùng 3 và 4) và hai khối phản xạ có thể thay thế ở dưới cùng (Hình 3.11 cho Vùng 1 và 2 hoặc Hình 3.13 cho Vùng 3 và 4). Các khối nhiên liệu thứ hai và thứ ba tính từ trên xuống chứa các viên chất độc cháy được được làm giàu cao hơn so với các viên ở ba vị trí còn lại. Hình 3.14 cho thấy độ làm giàu urani (wt%) trong nhiên liệu TRISO (phía trên bên trái) và hàm lượng boron tự nhiên (wt%) trong các viên chất độc cháy được (phía dưới bên phải).



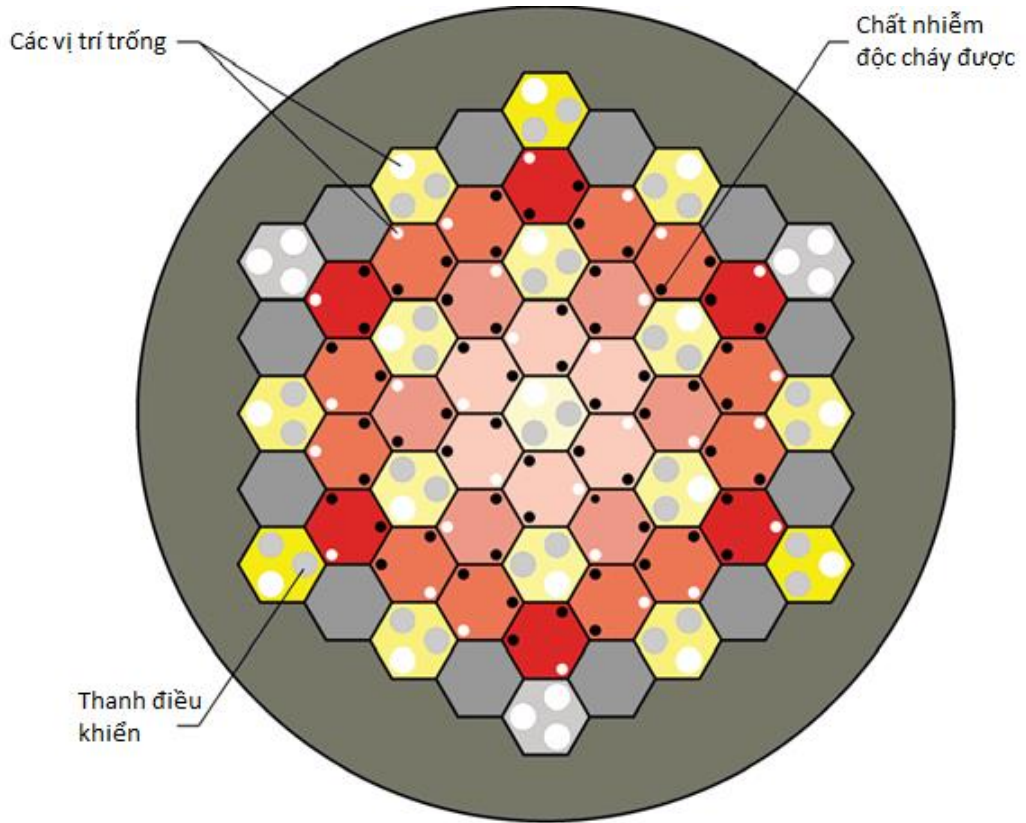
Hình 3.14. Các vùng nhiên liệu HTTR [19]

Cấu hình vùng hoạt lò phản ứng

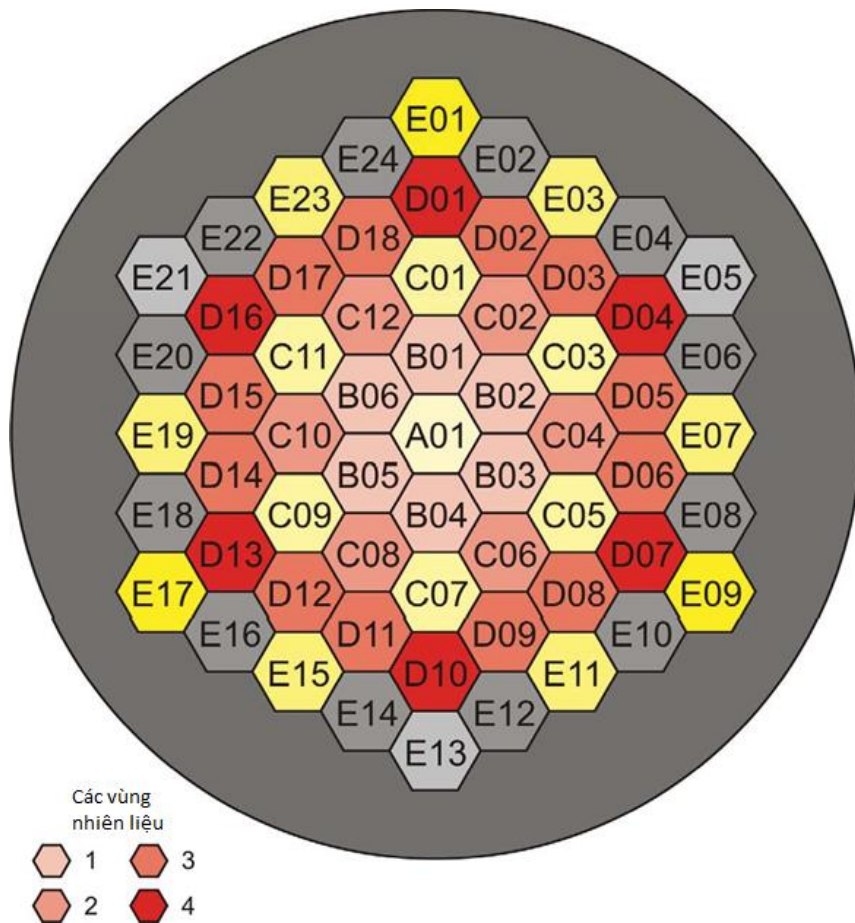
Cấu hình vùng hoạt HTTR được thể hiện trong Hình 3.15, 3.16, 3.17. Hình đầu tiên xác định các vị trí trong vùng hoạt cho một loại cột nhất định. Hình thứ hai cung cấp hướng và vị trí tương ứng của mỗi cột trong vùng hoạt. Hình thứ ba hiển thị số nhận dạng cột cho từng vị trí trong vùng hoạt. Hình 3.18 cho thấy mặt cắt ngang cơ bản của vùng hoạt HTTR được tạo trong MCNP. Khối phản xạ cố định bao quanh vùng hoạt có bán kính 2125 mm và chiều cao 5220 mm.



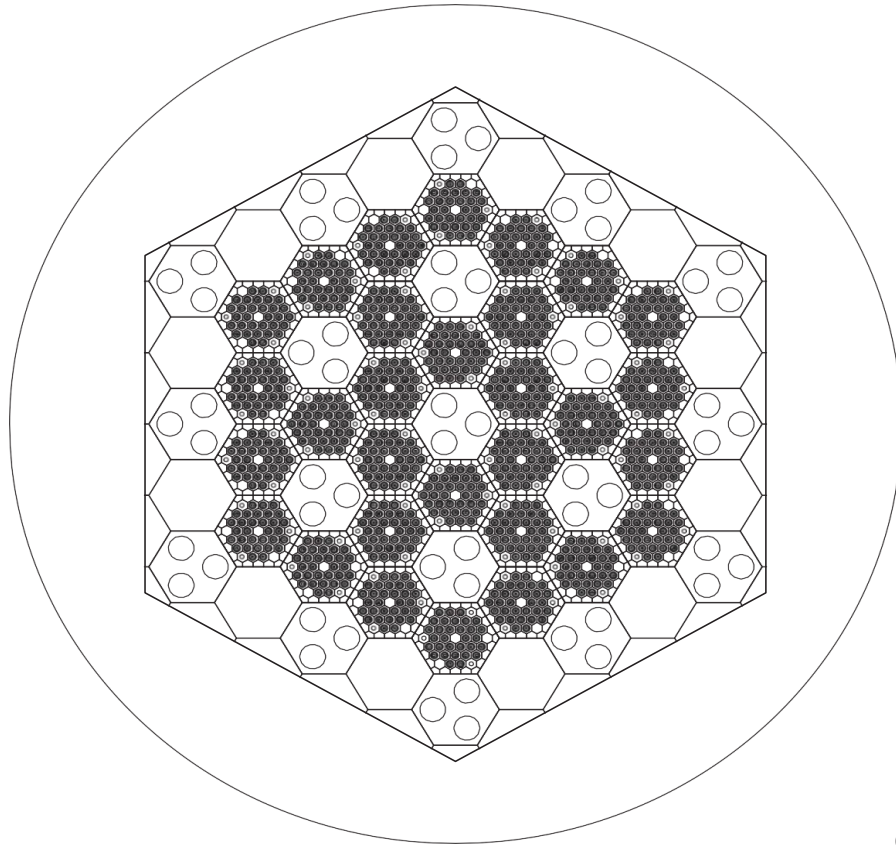
Hình 3.15. Cấu hình vùng hoạt HTTR [19]



Hình 3.16. Các hướng cột thanh điều khiển và nhiên liệu [19]



Hình 3.17. Ký hiệu các cột của HTTR [19]



Hình 3.18. Mặt cắt ngang của HTTR [19]

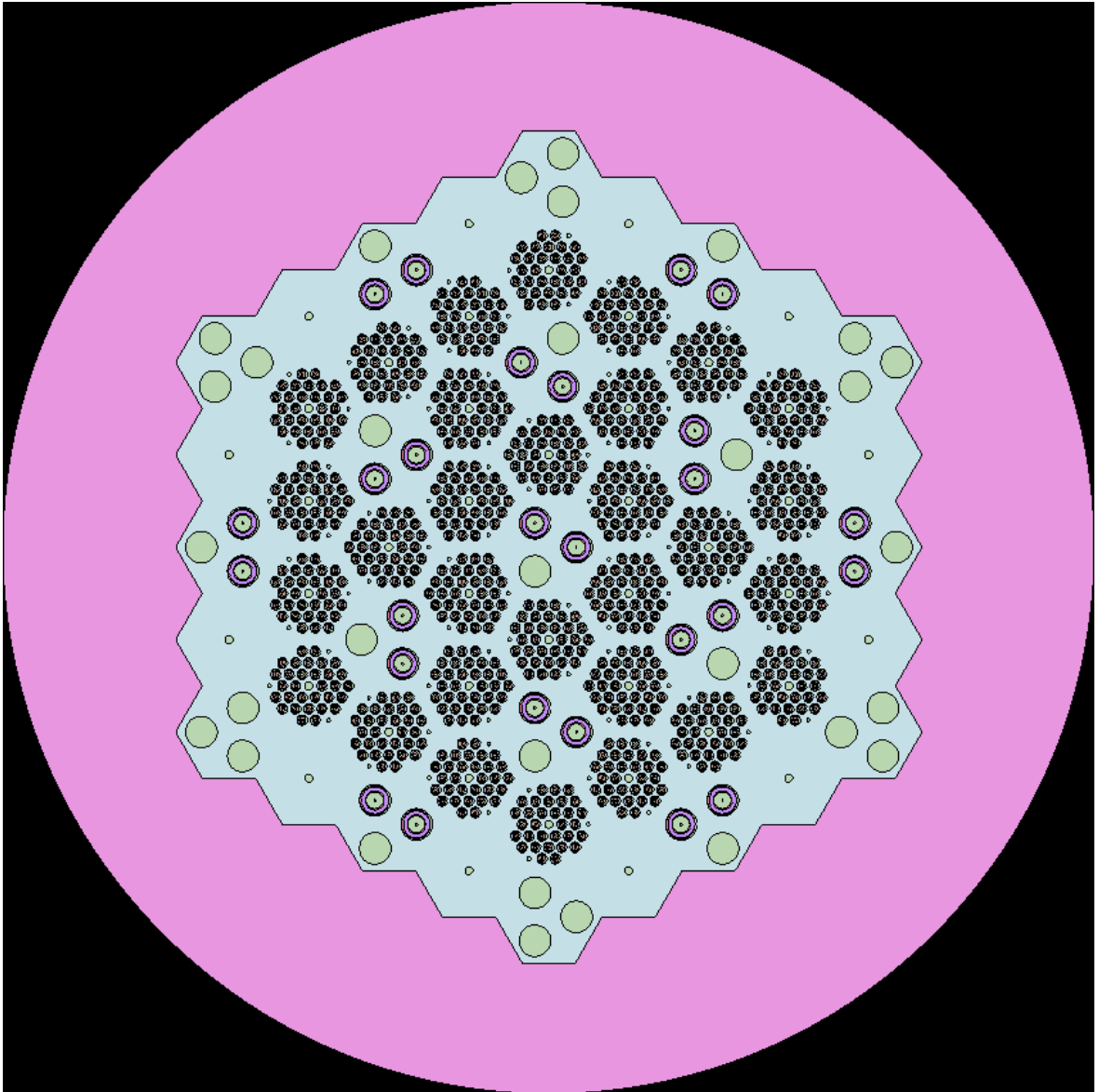
3.2 Mô hình hóa lò phản ứng HTTR dùng Serpent 2

Trong phạm vi luận văn này, chương trình Serpent 2 được sử dụng để mô hình hóa và tính toán tới hạn lò phản ứng HTTR với cấu hình nạp tải 30 bó nhiên liệu (Hình 3.15). Các thông tin chi tiết về hình học và vật liệu của bài toán benchmark [19] (như được giới thiệu ở Mục 3.1) sẽ được sử dụng trong mô hình lò phản ứng HTTR với Serpent 2. Trong mô phỏng HTTR với Serpent 2, thẻ (card) “pbed” được dùng để tạo hình học ngẫu nhiên của phân bố các hạt TRISO trong mỗi khối nhiên liệu được Serpent 2 mô hình hóa. Tổng cộng có 12 loại khối nhiên liệu với độ giàu urani khác nhau (Hình 3.14) nên cần khai báo 12 thẻ “pbed” khác nhau. Với mỗi thẻ “pbed” trong mô hình HTTR với Serpent 2 cần khai báo một tệp dữ liệu đầu vào chứa dữ liệu tọa độ và kích thước của các hạt TRISO (có tổng cộng 12987 hạt trong mỗi khối nhiên liệu, tương đương với hệ số lấp đầy là 30%). Các tệp đầu vào này được tạo riêng rẽ bằng một thủ tục phân bố hạt tự động của Serpent 2. Sau khi khai báo được 12

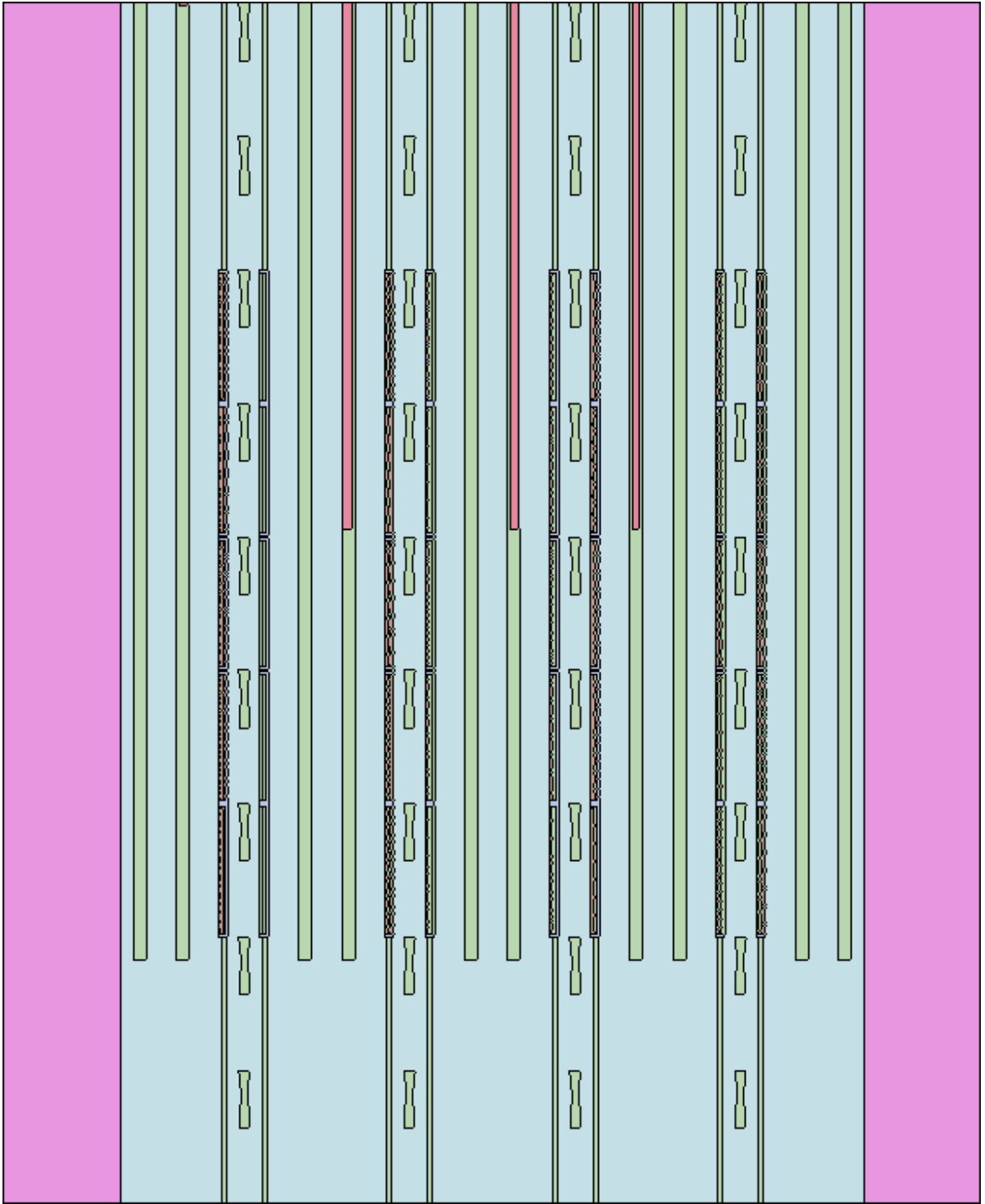
khối nhiên liệu kể trên dùng thẻ “pbed”, các chi tiết hình học khác của mô hình HTTR với Serpent 2 được mô phỏng giống với bài toán benchmark [19].

Các mặt cắt lò phản ứng HTTR theo phương bán kính và theo phương chiều cao được trình bày trên các Hình 3.19, Hình 3.20 (trạng thái tới hạn), Hình 3.21 (trạng thái dưới tới hạn) và Hình 3.22 (trạng thái trên tới hạn). Lưu ý các trạng thái tới hạn, dưới tới hạn và trên tới hạn của HTTR chỉ khác nhau ở vị trí các thanh điều khiển trung tâm, R1, R2, R3 như chú thích trên Hình 3.19, Hình 3.20 và Hình 3.21. Thư viện dữ liệu hạt nhân ENDF của Hoa Kỳ phiên bản mới nhất là ENDF/B-VIII.0 [21] được sử dụng trong các tính toán với Serpent 2 cho lò phản ứng HTTR.

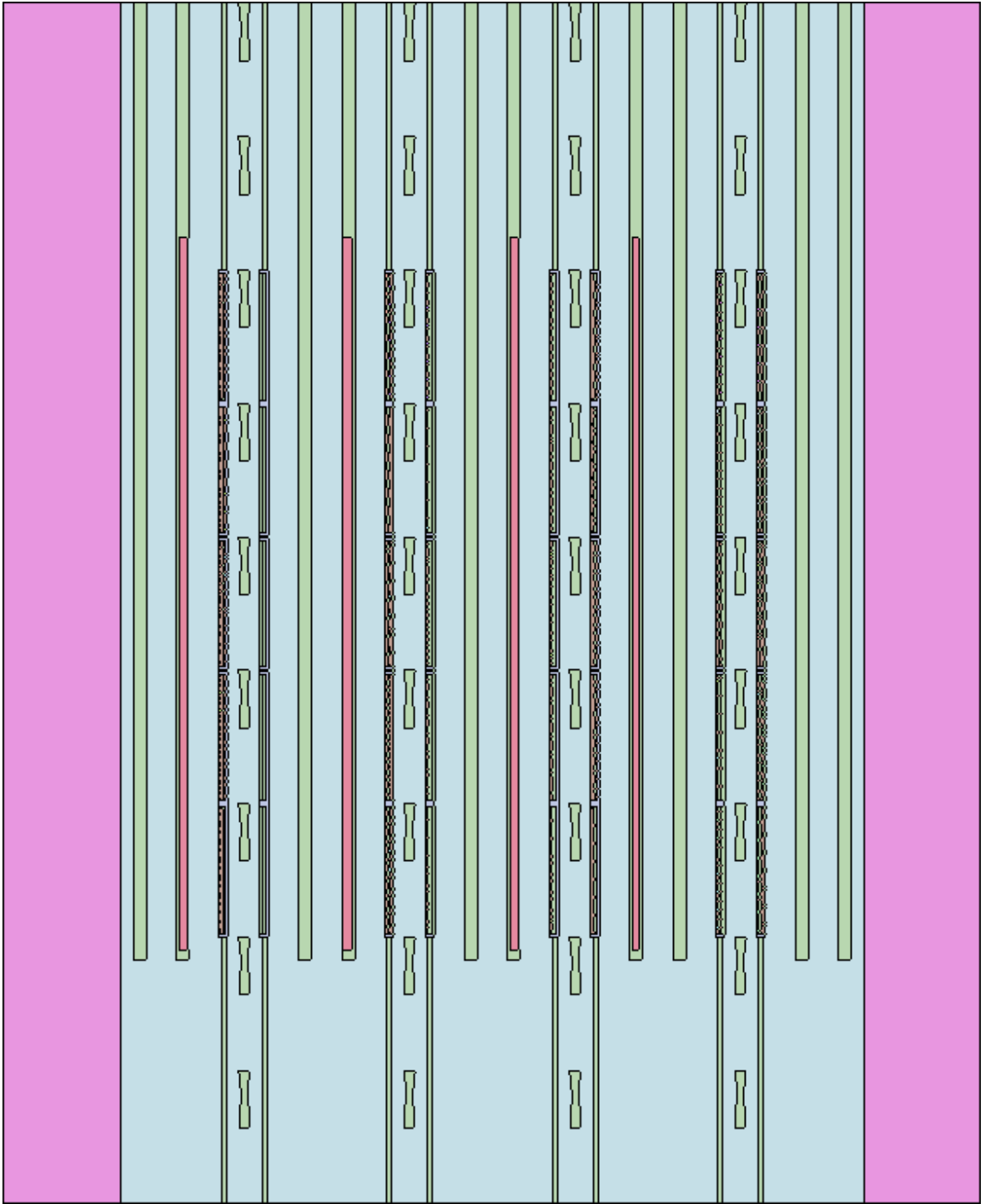
Một số đặc trưng vật lý được tính toán, khảo sát với Serpent 2 bao gồm hệ số nhân neutron hiệu dụng k_{eff} của cấu hình tới hạn và dưới tới hạn của lò phản ứng HTTR (cấu hình trên tới hạn của HTTR được cho trên Hình 3.22 không được tính toán do không có kết quả tương ứng trong bài toán benchmark), độ phản ứng dự trữ, dự trữ đập lò, phân bố tốc độ phản ứng phân hạch, phổ thông lượng neutron và phân bố công suất. Các kết quả tính toán với Serpent 2 sẽ được phân tích và so sánh với các kết quả benchmark và các kết quả tính toán bằng các chương trình MCNP5, SCALE được cung cấp trong bài toán benchmark. Các kết quả này sẽ được trình bày và thảo luận trong Chương 4.



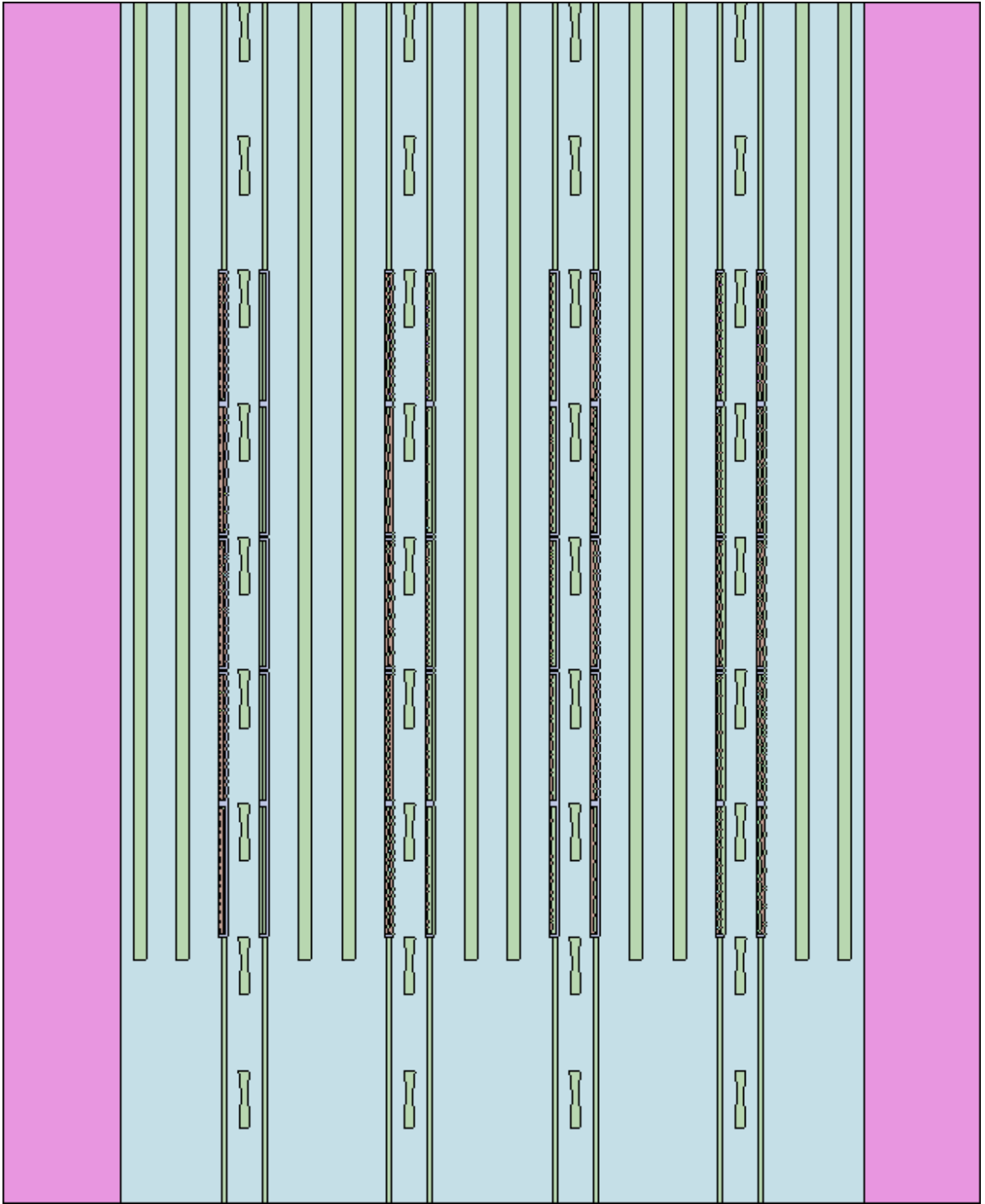
Hình 3.19. Mặt cắt ngang của vùng hoạt HTTR mô phỏng bằng Serpent 2



Hình 3.20. Lò phản ứng HTTR tới hạn mô phỏng bằng Serpent 2 (các thanh điều khiển trung tâm, R1 và R2 ở vị trí 177.5 cm và các thanh điều khiển R3 ở vị trí 404.9 cm tính từ phần đáy nhiên liệu)



Hình 3.21. Lò phản ứng HTTR dưới tới hạn mô phỏng bằng Serpent 2 (các thanh điều khiển trung tâm, R1, R2 và R3 ở vị trí -5.5 cm tính từ phần đáy nhiên liệu)



Hình 3.22. Lò phản ứng HTTR trên tới hạn mô phỏng bằng Serpent 2 (các thanh điều khiển trung tâm, R1, R2 và R3 rút ra hoàn toàn khỏi vùng hoạt)

CHƯƠNG 4. TÍNH TOÁN, KHẢO SÁT MỘT SỐ ĐẶC TRƯNG VẬT LÝ CỦA HTTR VÀ SO SÁNH VỚI CÁC KẾT QUẢ ĐÃ ĐƯỢC CÔNG BỐ TRƯỚC ĐÂY

4.1 Hệ số nhân neutron hiệu dụng và độ phản ứng

Các kết quả tính toán hệ số nhân neutron hiệu dụng của cấu hình tới hạn và dưới tới hạn được trình bày ở Bảng 4.1. Giá trị độ phản ứng dư và ngưỡng dập lò được tính toán và đưa ra ở Bảng 4.2. Sai số thống kê (độ lệch chuẩn) của các giá trị tính toán hệ số nhân hiệu dụng với Serpent 2 khoảng 40 pcm. Lưu ý các kết quả tính toán với MCNP5 và SCALE được thực hiện với thư viện dữ liệu ENDF/B-VII.0 [22] trong khi các kết quả tính toán với Serpent 2 được thực hiện với thư viện dữ liệu hạt nhân mới nhất là ENDF/B-VIII.0 [21].

Bảng 4.1 cho thấy sự sai khác giữa các kết quả tính toán hệ số nhân hiệu dụng bằng Serpent 2 với các kết quả thực nghiệm (benchmark) là 4346 pcm (hoặc 4.3%) cho cấu hình tới hạn và 3482 pcm (hoặc 5.0%) cho cấu hình dưới tới hạn. Có thể thấy các giá trị tính toán k_{eff} bằng Serpent 2 đều dự đoán thấp hơn các giá trị thực nghiệm cho các cấu hình tới hạn và dưới tới hạn của lò phản ứng HTTR.

Trong khi đó, các giá trị tính toán với MCNP5 và SCALE [23] được cho trên Bảng 4.1 đều dự đoán cao hơn các giá trị thực nghiệm. Sai khác giữa các giá trị tính toán bằng MCNP5 và SCALE so với giá trị thực nghiệm lần lượt là 2040 pcm (hoặc 2%) và 1597 pcm (1.6%) đối với cấu hình tới hạn của HTTR và 1230 pcm (1.8%) và 1000 pcm (1.5%) đối với cấu hình dưới tới hạn của HTTR.

Các kết quả trên cho thấy mô hình tính toán với SCALE cho kết quả tính toán k_{eff} gần với giá trị thực nghiệm nhất và mô hình tính toán với Serpent 2 cho kết quả tính toán k_{eff} lệch với giá trị thực nghiệm nhất. Một nguyên nhân chính có thể là do mô hình Serpent 2 được phát triển trực tiếp dựa trên mô hình bài toán benchmark [19] với các mô tả đơn giản hóa về hình học và vật liệu của HTTR trong khi trong các mô hình tính toán với SCALE và MCNP5 đã được tinh chỉnh thận trọng hơn để giảm các sai lệch so với cấu hình thực tế của HTTR. Tuy nhiên, có thể nhận thấy mô hình tính toán cùng các kết quả tính toán k_{eff} với Serpent 2 trong phạm vi luận văn này là sơ bộ và hoàn toàn có thể chấp nhận được. Để giảm sai lệch với kết quả thực nghiệm, mô hình Serpent 2 được phát triển ở đây sẽ được cải thiện trong các nghiên cứu tiếp theo. Ngoài ra, các mô hình tính toán HTTR với MCNP5 và SCALE kể trên sẽ được nghiên cứu nhằm cải thiện mô hình tính toán HTTR với Serpent 2.

Bảng 4.2 cho thấy sự sai khác giữa các kết quả tính toán độ phản ứng dư trữ (excess reactivity) bằng Serpent 2 với các kết quả benchmark 17.6%. Trong khi đó sự sai khác này đối với MCNP5 và SCALE lần lượt là -11.8% và -3.9%. Tương tự

như khi dự đoán giá trị k_{eff} , SCALE dự đoán tốt nhất độ phản ứng dự trữ so với thực nghiệm trong khi Serpent 2 dự đoán sai lệch nhất so với thực nghiệm. Tuy nhiên, giá trị tính toán độ phản ứng dự trữ của Serpent 2 vẫn nằm trong độ lệch chuẩn của giá trị thực nghiệm và do đó vẫn có thể chấp nhận được.

Bảng 4.1. Hệ số nhân neutron hiệu dụng của cấu hình tới hạn và dưới tới hạn

Cấu hình	k_{eff}			
	Benchmark	MCNP5 (ENDF/B- VII.0)	SCALE (ENDF/B- VII.0)	Serpent 2 (ENDF/B- VIII.0)
Tới hạn	1.0025 ± 0.1	1.0229 ± 0.0001	1.01847 ± 0.0009	0.95904 ± 0.00039
Dưới tới hạn	0.6876 ± 0.1	0.6999 ± 0.0001	0.69760 ± 0.0009	0.65278 ± 0.00041

Bảng 4.2. Độ phản ứng dự trữ và dự trữ dập lò

Tham số	Độ phản ứng (% $\Delta k/k$)			
	Benchmark	MCNP5 (ENDF/B- VII.0)	SCALE (ENDF/B- VII.0)	Serpent 2 (ENDF/B- VIII.0)
Độ phản ứng dự trữ	12 ± 3.3	11.38	11.54	14.11
Dự trữ dập lò	-46.3 ± 1.2	-46.59	-45.29	-48.92

Bảng 4.2 cũng cho thấy sự sai khác giữa các kết quả tính toán dự trữ dập lò (shutdown margin) bằng Serpent 2 với các kết quả benchmark là -5.7%. Trong khi đó sự sai khác này đối với MCNP5 và SCALE lần lượt là 0.1% và -2.2%. Có thể thấy MCNP5 dự đoán giá trị dự trữ dập lò tốt nhất so với giá trị thực nghiệm và các giá trị tính toán với MCNP5 và SCALE đều nằm trong độ lệch chuẩn của giá trị thực nghiệm. Trong khi đó Serpent 2 dự đoán sai lệch nhất so với giá trị thực nghiệm. Tuy nhiên giá trị tính toán dự trữ dập lò của Serpent 2 vẫn có thể coi là chấp nhận được trong phạm vi luận văn này nếu tham chiếu đến giá trị tính toán trước đây bởi Nhật Bản là -42.9% $\Delta k/k$ (lệch 7.3% so với giá trị thực nghiệm) [23].

4.2 Tốc độ phản ứng, thông lượng neutron và phân bố công suất

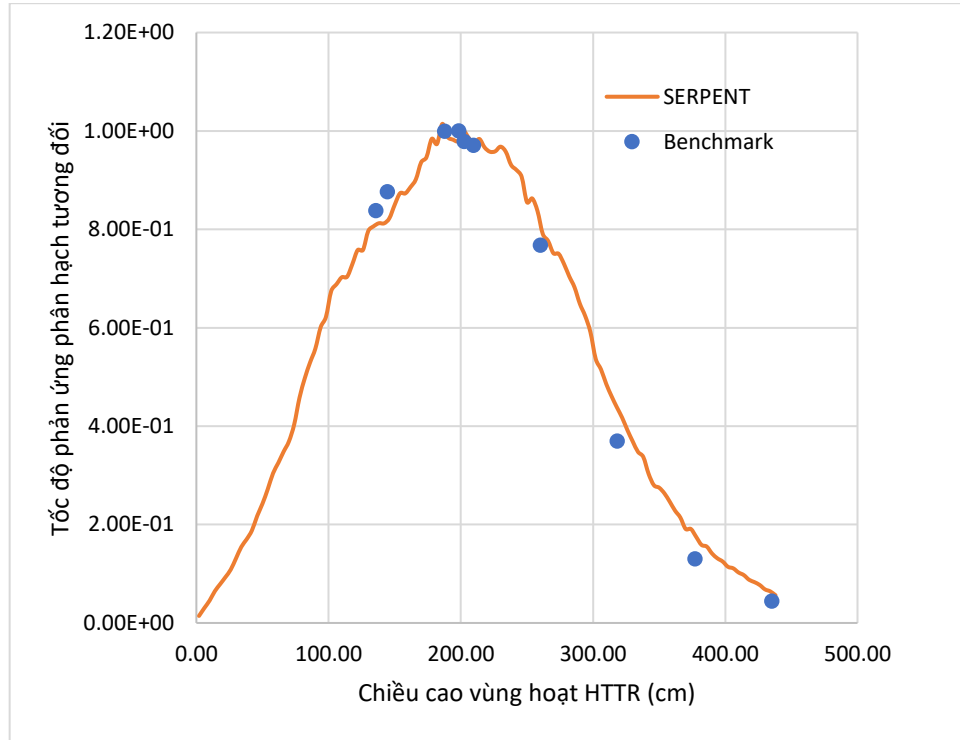
Bảng 4.3 và Hình 4.1 trình bày phân bố tốc độ phản ứng phân hạch theo phương trục tại kênh đo đặc tính toán bằng Serpent 2 và so sánh với các kết quả benchmark cùng kết quả tính toán bằng MCNP5. Lưu ý tốc độ phản ứng trên bảng này đã được chuẩn hóa theo giá trị tốc độ phản ứng cao nhất tại điểm dữ liệu 4 tương ứng với chiều cao 198.53 cm.

Bảng 4.3. Phân bố tốc độ phản ứng phân hạch theo phương trục tại các kênh đo đặc

Điểm dữ liệu	Chiều cao vùng hoạt	Benchmark	MCNP5	Serpent 2
1	135.68	0.8381 ± 0.0127	0.8307 ± 0.0013	0.8229 ± 0.0082
2	144.47	0.8759 ± 0.0126	0.8650 ± 0.0014	0.8398 ± 0.0085
3	187.81	0.9991 ± 0.0128	0.9918 ± 0.0015	1.0354 ± 0.0093
4	198.53	1.0000 ± 0.0116	1.0000 ± 0.0015	1.0000 ± 0.0081
5	202.52	0.9784 ± 0.0242	0.9989 ± 0.0015	1.0202 ± 0.0092
6	209.61	0.9703 ± 0.0306	0.9920 ± 0.0015	0.9946 ± 0.0087
7	260.22	0.7673 ± 0.0277	0.7981 ± 0.0013	0.8069 ± 0.0078
8	318.28	0.3695 ± 0.0158	0.4070 ± 0.0009	0.4475 ± 0.0055
9	377.19	0.1302 ± 0.0094	0.1505 ± 0.0006	0.1785 ± 0.0036
10	435.13	0.0440 ± 0.0057	0.0552 ± 0.0004	0.0655 ± 0.0024

Bảng 4.3 cho thấy sự sai khác giữa kết quả tính toán tốc độ phản ứng theo phương trục với Serpent 2 và giá trị benchmark nằm trong khoảng 5.2% với các điểm dữ liệu từ 1 đến 7 và nằm trong khoảng 21.1% đến 48.9% với các điểm dữ liệu từ 8 đến 10. Trong khi đó sự sai khác giữa kết quả tính toán với MCNP5 và giá trị benchmark nằm trong khoảng 4.0% với các điểm dữ liệu từ 1 đến 7 và nằm trong khoảng 10.2% đến 25.5% với các điểm dữ liệu từ 8 đến 10. Có thể thấy xu hướng các kết quả tính toán với MCNP5 và Serpent 2 là tương tự nhau khi so sánh với kết quả benchmark mặc dù các kết quả tính toán với Serpent 2 lệch nhiều hơn, đặc biệt ở các điểm dữ liệu từ 8 đến 10. Tuy nhiên, chú ý là giá trị tuyệt đối của tốc độ phân hạch tại ba điểm dữ liệu này là nhỏ hơn nhiều so với tốc độ phân hạch ở các điểm dữ liệu từ 1 đến 7. Do đó nói chung có thể thấy sự phù hợp tốt giữa các kết quả tính toán

Serpent 2 khi so với kết quả benchmark (Hình 4.1). Cuối cùng, các kết quả tính toán với Serpent 2 sẽ cần được cải thiện trong những nghiên cứu tiếp theo để giảm thiểu tối đa sự sai lệch so với kết quả benchmark.

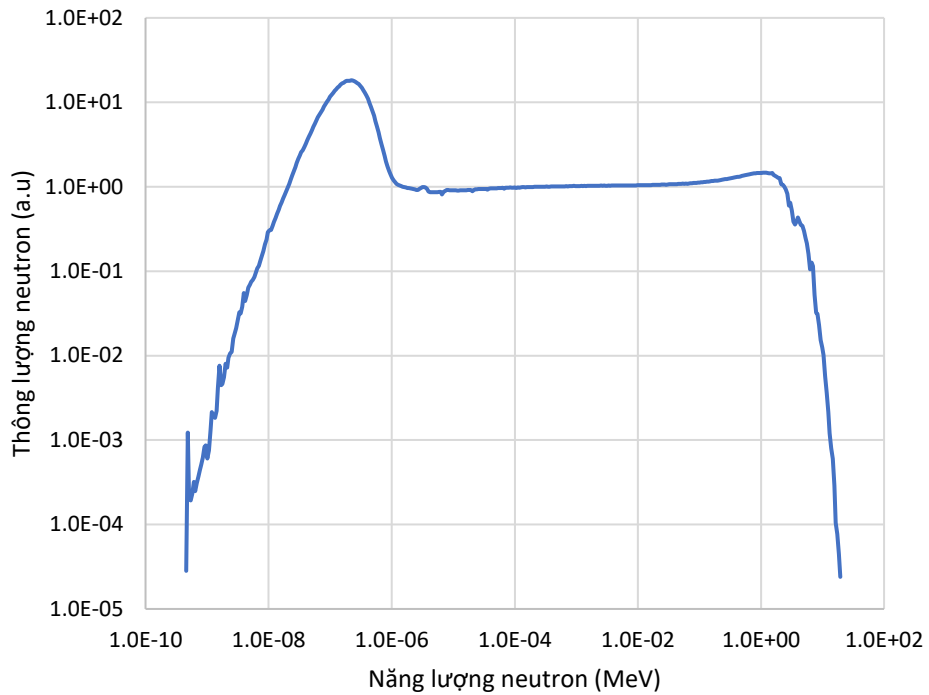


Hình 4.1. Tốc độ phản ứng phân hạch tương đối theo chiều cao vùng hoạt lò phản ứng HTTR tại các kênh đo đạc

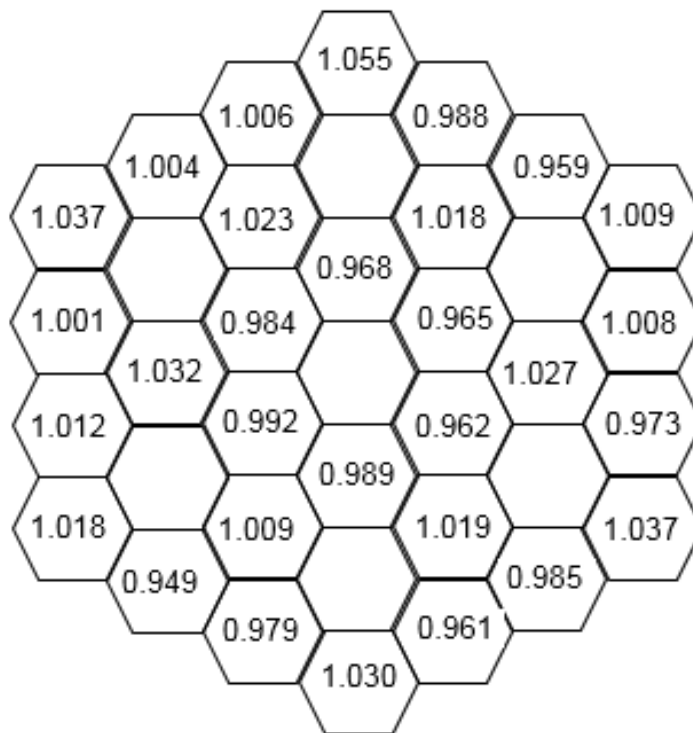
Hình 4.2 trình bày phổ thông lượng neutron trong lò phản ứng HTTR tính toán bằng Serpent 2 theo thang lôgarit. Có thể thấy phổ thông lượng neutron tập trung chủ yếu ở vùng năng lượng nhiệt do tác dụng làm chậm neutron của graphite từ dải neutron phân hạch với năng lượng cao xuống dải neutron nhiệt. Hình dạng phổ neutron như thế này là thông thường đối với các lò phản ứng hạt nhân sử dụng neutron nhiệt để duy trì dây chuyền phản ứng phân hạch. Lưu ý rằng mô hình hóa chính xác chất làm chậm graphite trong cấu hình lò phản ứng HTTR có ảnh hưởng đáng kể tới kết quả tính toán thông lượng neutron và các kết quả tính toán khác dùng Serpent 2 trong phạm vi luận văn này.

Hình 4.3 trình bày phân bố công suất theo phương bán kính của lò phản ứng HTTR tính toán bằng Serpent 2. Có thể nhận thấy phân bố công suất tương đối đồng đều trong lò phản ứng đảm bảo hoạt động an toàn của HTTR. Sự sai khác tối đa trong phân bố công suất khoảng 8.8% giữa bó nhiên liệu có công suất cao nhất (1.055) ở

biên vùng hoạt và bó nhiên liệu có công suất thấp nhất (0.962) ở tâm vùng hoạt của lò phản ứng HTTR.



Hình 4.2. Phổ thông lượng neutron của lò phản ứng HTTR



Hình 4.3. Phân bố công suất theo phương bán kính lò phản ứng HTTR

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Kết luận

Các công nghệ lò phản ứng hạt nhân tiên tiến như HTGR hiện đang được quan tâm nghiên cứu, phát triển rộng rãi trên thế giới với triển vọng phục vụ các ứng dụng điện và phi điện, có thể góp phần bảo vệ môi trường và chống biến đổi khí hậu cũng như giúp giải quyết vấn đề an ninh năng lượng. Do vậy, hướng nghiên cứu về lò phản ứng thử nghiệm kỹ thuật nhiệt độ cao HTTR của Nhật Bản như được thực hiện trong phạm vi luận văn này là cần thiết để Việt Nam chúng ta có thể theo kịp và nắm bắt được tình hình nghiên cứu, phát triển các công nghệ lò phản ứng HTGR trên thế giới; đồng thời giúp Việt Nam duy trì nguồn nhân lực về công nghệ lò phản ứng hạt nhân.

Luận văn đã thực hiện được các nội dung nghiên cứu như sau: (1) Nghiên cứu tổng quan tình hình phát triển các công nghệ lò phản ứng khí nhiệt độ cao trên thế giới; (2) Tìm hiểu lò phản ứng thử nghiệm kỹ thuật nhiệt độ cao (HTTR) và chương trình tính toán Monte Carlo Serpent 2; (3) Xây dựng được mô hình tính toán mô phỏng lò phản ứng HTTR dùng chương trình Serpent 2; (4) Tính toán, khảo sát sơ bộ một số đặc trưng vật lý của lò phản ứng HTTR và so sánh với các kết quả đã được công bố với bài toán benchmark.

Các kết quả nghiên cứu của luận văn về tính toán, khảo sát một số đặc trưng vật lý của lò phản ứng HTTR sử dụng chương trình tính toán Monte Carlo Serpent 2 có ý nghĩa khoa học và thực tiễn nhất định trong bối cảnh Việt Nam có thể xem xét lại chương trình phát triển điện hạt nhân trong tương lai sắp tới. Tính mới về mặt khoa học của luận văn là xây dựng được mô hình lò phản ứng HTTR dùng chương trình Serpent 2 cùng các kết quả tính toán, phân tích vật lý lò phản ứng HTTR bằng Serpent 2. Một số đặc trưng vật lý của HTTR bao gồm hệ số nhân neutron hiệu dụng, độ phản ứng dự trữ, dự trữ đập lò, tốc độ phản ứng phân hạch, phổ thông lượng neutron, phân bố công suất được tính toán, khảo sát đã cung cấp một sự hiểu biết cần thiết về mặt vật lý của lò phản ứng HTTR cho học viên. Hơn nữa, việc thực hiện luận văn đã giúp học viên: (1) nắm bắt được tình hình phát triển các công nghệ HTGR trên thế giới và các đặc điểm kỹ thuật của lò phản ứng HTTR của Nhật Bản; (2) làm chủ được chương

trình Serpent 2 để tính toán mô phỏng lò phản ứng HTTR; (3) nắm bắt được phương pháp tính toán, phân tích các đặc trưng vật lý của lò phản ứng HTTR. Cuối cùng, mô hình tính toán lò phản ứng HTTR với Serpent 2 cùng các kết quả của luận văn cũng có thể được cải thiện và ứng dụng trong các nghiên cứu chuyên sâu sau này tại Việt Nam về các công nghệ lò phản ứng HTGR dạng lắng trụ nói riêng và các công nghệ lò phản ứng HTGR nói chung.

Kiến nghị

Trong những nghiên cứu tiếp theo, mô hình tính toán lò phản ứng HTTR với Serpent 2 được phát triển trong phạm vi luận văn này sẽ được học viên tiếp tục hoàn thiện và dự kiến được dùng để nghiên cứu cải tiến thiết kế nhiên liệu chịu được tai nạn (ATF: Accident Tolerant Fuel) cho các công nghệ lò phản ứng HTGR kiểu lắng trụ. Ngoài ra, học viên cũng dự kiến mở rộng hướng nghiên cứu mô phỏng tính toán vật lý lò phản ứng với Serpent 2 cho các công nghệ lò phản ứng HTGR khác nhau như công nghệ HTGR kiểu pebble bed (HTR-PM của Trung Quốc) hoặc công nghệ MMR của USNC, Hoa Kỳ. Xa hơn nữa, chương trình Serpent 2 có thể được đề xuất kết hợp với các chương trình tính toán khác như các chương trình tính toán thủy nhiệt, hành vi nhiên liệu hoặc động học chất lưu để thực hiện các tính toán đa vật lý đối với công nghệ lò phản ứng HTGR phục vụ đánh giá chính xác hơn hiệu suất và an toàn của HTGR.

DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Generation IV International Forum (GIF), 2022, *Very-high-temperature reactor (VHTR)*, accessed by 22 March 2022. https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_42153/very-high-temperature-reactor-vhtr
- [2]. World Nuclear Association (WNA), 2022, *Generation IV nuclear reactors*, Updated December 2020, accessed by 22 March 2022. <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/generation-iv-nuclear-reactors.aspx>
- [3]. Li H., 2021, A brief review of the development of high temperature gas cooled reactor, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 631 (2021) 012080. doi:10.1088/1755-1315/631/1/012080
- [4]. Alshehri S.M., Said I.A., Usman S., 2020, A review and safety aspects of modular high-temperature gas-cooled reactors, *International Journal of Energy Research* (2020) 1-14. DOI:10.1002/er.6289
- [5]. Chen F., Li F., Gougar H. (on behalf of the VHTR System Steering Committee), 2018, *VHTR system safety assessment*, Generation IV International Forum (GIF), Revision 2.1. https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2018-12/gifvhtr_safety_assessment_finaldec2018.pdf
- [6]. Fang C., Morris R., Li F., 2017, Safety features of high temperature gas cooled reactor, *Science and Technology of Nuclear Installations*, Volume 2017, Article ID 9160971, 3 pages. <https://doi.org/10.1155/2017/9160971>
- [7]. Fütterer M.A., Fub L., Sink C., Groot S., Pouchon M., Kim Y.W., Carré F., Tachibana Y., 2014, Status of the very high temperature reactor system, *Progress in Nuclear Energy*, Volume 77, Pages 266-281. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.01.013>
- [8]. World Nuclear News (WNN), 2021, *Demonstration HTR-PM connected to grid*, accessed by 22 March 2022. <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Demonstration-HTR-PM-connected-to-grid>
- [9]. Beck J.M., Pincock L.F., 2011, *High temperature gas-cooled reactors lessons learned applicable to the next generation nuclear plant*, Idaho National Laboratory, INL/EXT-10-19329, Revision 1.
- [10]. Ultra Safe Nuclear Corporation (USNC), 2021, *USNC micro modular reactor*

(MMR™ Block 1) technical information.

- [11]. Takeda T., Inagaki Y., Koizumi Y., 2021, *High temperature gas-cooled reactors*, JSME Series in Thermal and Nuclear Power Generation, Elsevier, ISBN: 978-0-12-821031-4.
- [12]. Hirofumi O., 2021, HTTR licensing experience and commercial modular HTGR safety design requirements including coupling of process heat applications, *SNETP Forum 2021 - Towards Innovative R&D in Civil Nuclear Fission*, 2-4 February 2021.
- [13]. Shibata T., 2020, Present status of HTGR development in Japan, *Indonesian Nuclear Society Webinar on the Progress of HTGR, 2nd Webinar towards HTR2021*, December 17, 2020.
- [14]. Zhang Z., Rahnema F., Zhang D., Pounders J.M., Ougouag A.M., 2011, Simplified two and three dimensional HTTR benchmark problems, *Annals of Nuclear Energy* 38 (2011) 1172–1185. doi:10.1016/j.anucene.2010.11.020
- [15]. International Atomic Energy Agency (IAEA), 2003, *Evaluation of high temperature gas cooled reactor performance: Benchmark analysis related to initial testing of the HTTR and HTR-10*, IAEA-TECDOC-1382.
- [16]. Liem P.H., Hartanto D., Tran H.N., 2021, Lattice physics study of a block/prismatic-type HTGR design option for the Indonesian experimental power reactor (RDE), *Proceedings of HTR 2021*, Paper HTR 2021-033, Yogyakarta, Indonesia, June 2-4, 2021.
- [17]. Liem P.H., Sembiring T.M., Tran H.N., 2018, Evaluation on fuel cycle and loading scheme of the Indonesian experimental power reactor (RDE) design, *Nuclear Engineering and Design*, Volume 340, Pages 245-259. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2018.10.004>
- [18]. Tran H.N., Liem P.H., 2015, Neutronic feasibility study of U–Th–Pa based high burnup fuel for pebble bed reactors, *Progress in Nuclear Energy*, Volume 80, Pages 17-23. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.11.024>
- [19]. Bess J.D., Fujimoto N., Dolphin B.H., Snoj L., Zukeran A., 2010, *Evaluation of the start-up core physics tests at Japan's high temperature engineering test reactor (fully-loaded core)*, Idaho National Laboratory, INL/EXT-08-14767 Rev. 2.
- [20]. Leppänen J., Pusa M., Viitanen T., Valtavirta V., Kaltiaisenaho T., 2015, The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013,

Annals of Nuclear Energy, Volume 82, Pages 142-150.
<https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.08.024>

- [21]. Brown D.A., Chadwick M.B., Capote R., et al., 2018, ENDF/B-VIII.0: The 8th major release of the nuclear reaction data library with CIELO-project cross sections, new standards and thermal scattering data, *Nuclear Data Sheets* 148, 1–142. <https://doi.org/10.1016/j.nds.2018.02.001>.
- [22]. Chadwick M.B., Oblozinsky P., Herman M., et al., 2006, ENDF/B-VII.0: Next generation evaluated nuclear data library for nuclear science and technology, *Nuclear Data Sheets* 107, 2931-3060. <https://doi.org/10.1016/j.nds.2006.11.001>
- [23]. Ilas G., Ilas D., Kelly R.P., Sunny E.E., 2012, *Validation of SCALE for high temperature gas-cooled reactor analysis*, Oak Ridge National Laboratory, NUREG/CR-7107, ORNL/TM-2011/161