# KHẢO SÁT ĐẶC TRƯNG NƠTRON CỦA LÒ PHẢN ỨNG PWR 900 MWe NHẬT BẢN

PHAN QUỐC VƯƠNG[1], TRẦN VĨNH THÀNH[2]
*Viện Khoa Học và Kỹ Thuật Hạt Nhân*
*179 Hoàng Quốc Việt, Nghĩa Đô, Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam*
*Email: [1]vuong.pvl@gmail.com, [2]tranvinhthanh.vn@gmail.com*

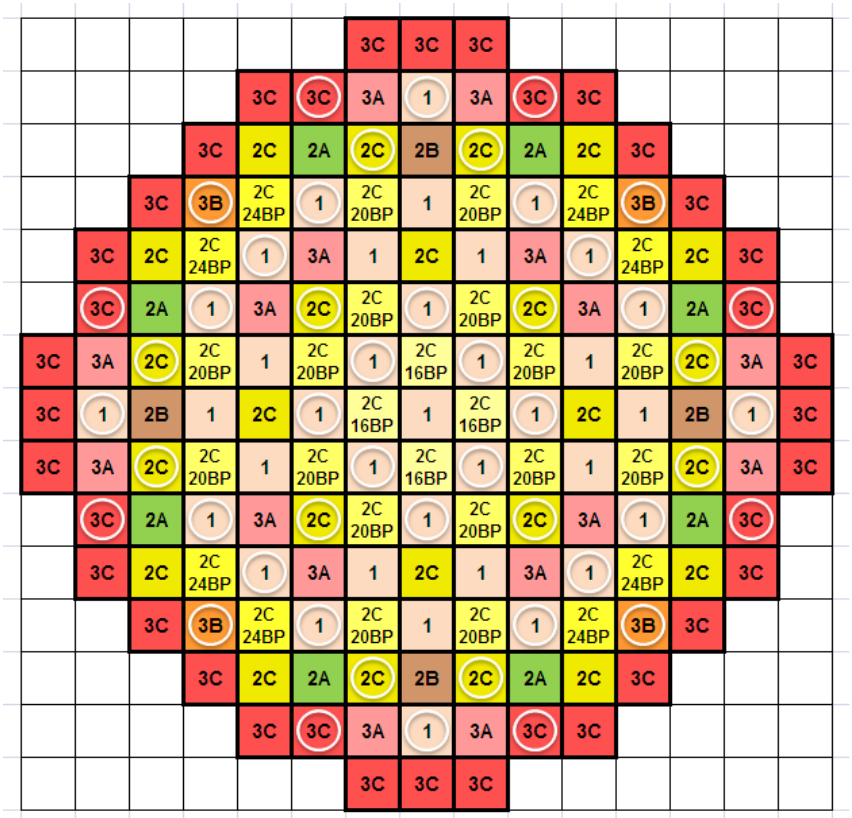
**Tóm tắt:** Báo cáo trình bày các kết quả tính toán đặc trưng nơtron của lò phản ứng nước áp lực (PWR) 900MWe Nhật Bản sử dụng bộ chương trình tính toán SRAC dùng thư viện số liệu JENDL-3.3 với 107 nhóm năng lượng. Thanh nhiên liệu, bó nhiên liệu và toàn vùng hoạt của lò phản ứng được mô hình hóa bằng các chương trình con PIJ và CITATION. Các đặc trưng nơtron chính được trình bày trong báo cáo bao gồm: hệ số nhân nơtron vô hạn ($k_{inf}$) theo độ sâu cháy, phân bố mật độ hạt nhân trong thanh nhiên liệu; phân bố tốc độ phân hạch trong bó nhiên liệu, hệ số nhân nơtron hiệu dụng ($k_{eff}$) toàn lò bằng và đặc biệt là phân bố công suất trong vùng hoạt của lò phản ứng.

**Từ khóa :** *SRAC, PIJ, CITATION, hệ số nhân hiệu dụng, phân bố công suất, độ sâu cháy.*

## I. GIỚI THIỆU

Nước ta đang chuẩn bị nguồn nhân lực cho chương trình điện hạt nhân để khắc phục tình trạng thiết hụt năng lượng điện. Các hướng nghiên cứu về lò phản ứng công suất trong nước mới bắt đầu được thúc đẩy, đặc biệt là các lò phản ứng của Liên Bang Nga và Nhật Bản vì đây là hai đối tác trong chương trình điện hạt nhân của Việt Nam. Vì vậy mà nhóm nghiên cứu chúng tôi lựa chọn hướng nghiên cứu tính toán các đặc trưng nơtron của lò PWR 900MWe theo thiết kế mới nhất của công ty Mitsubishi[1]. Lò phản ứng nước áp lực (PWR) của Mitsubishi có công suất thiết kế 900MWe – 1000MWe với hệ thống ba vòng tải nhiệt.

Lò PWR 900MWe có ba loại thanh nhiên liệu $UO_2$ với độ làm giàu 1.6%, 3.5%, 4.4%, hai loại thanh nhiên liệu $UO_2$ độ giàu 3.5%, 4.4% nhưng có pha thêm 8% Gd. Trong vùng hoạt có tất cả 157 bó nhiên liệu được sắp xếp như **Error! Reference source not found.**. Mỗi bó có chứa 264 thanh nhiên liệu và có thêm các thanh chất chất độc cháy được (BP) hoặc thanh điều khiển với số lượng được trình



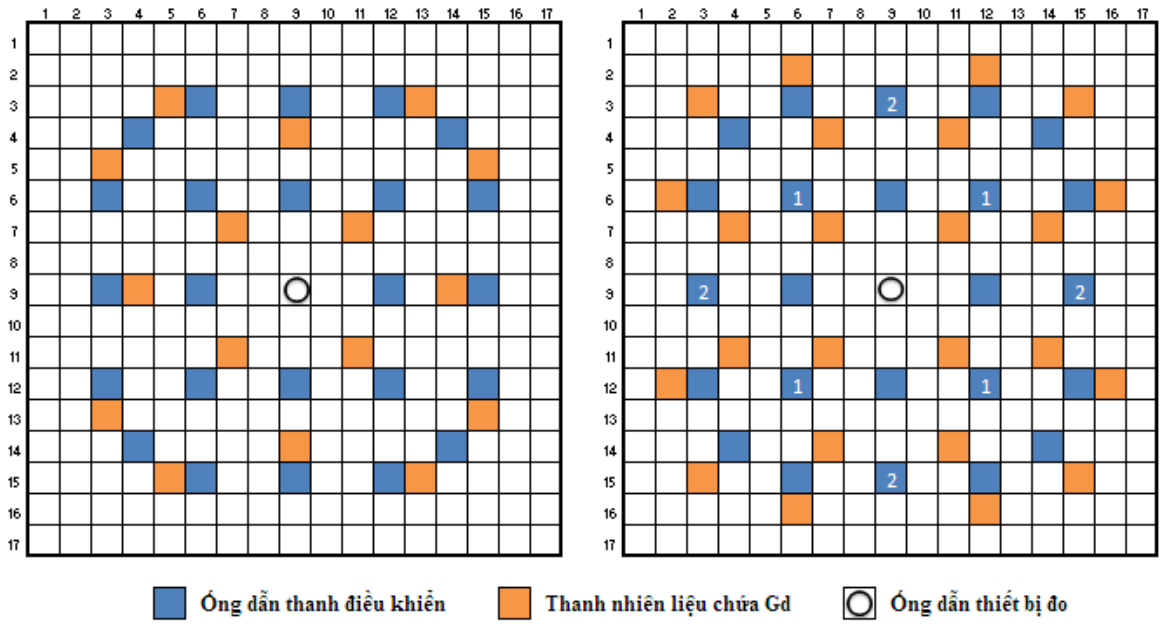

Hình 1: Toàn vùng hoạt lò phản ứng

bày trong bảng 1 dưới đây:

Bảng 1: Các loại bó nhiên liệu

| Loại bó | 3A | 3B | 3C | 3C | 2C | 2C | 2C 24BP | 2C 20BP | 2C 16BP | 2B | 2A | 1 | 1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Độ làm giàu (%) | 4.4 | | | | 3.5 | | | | | | | 1.6 | |
| Số thanh BP | | | | | | | 24 | 20 | 16 | | | | |
| Số thanh chứa Gd | 24 | 16 | | | | | | | | 16 | 24 | | |
| Số thanh điều khiển | | 24 | | 24 | | 24 | | | | | | | 24 |

Vị trí của các thanh nhiên liệu chứa Gd và các thanh điều khiển được biểu diễn trong hình 2. Các thanh chất độc cháy được cũng được đưa vào các ống dẫn có vị trí giống như các thanh điều khiển. Các vị trí được đánh số 1,2 trong hình 2b là các nút chặn trong trường hợp bó nhiên liệu có chứa 16 thanh chất độc cháy được và chỉ các vị trí đánh số 1 là các nút chặn khi bó nhiên liệu chứa 20 thanh chất độc cháy được.




Hình 2. a-Trái) Bó nhiên liệu chứa 16 thanh Gd, b-Phải) Bó nhiên liệu chứa 24 thanh Gd

Để thực hiện các tính toán nhóm tác giả đã sử dụng bộ chương trình SRAC do Cơ quan Năng lượng Nguyên tử Nhật Bản (JAEA) phát triển. SRAC là bộ chương trình có thể tính toán các đặc trưng nơtron cho nhiều loại lò phản ứng. SRAC gồm các môdun như : PIJ, ANISN, TWOTRAN, TUD và CITATION[2]. Trong báo cáo nhóm tác giả sử dụng hai môdun PIJ và CITATION cùng với thư viện số liệu JENDL 3.3[3]. Môdun PIJ dựa trên phương pháp xác suất va chạm một chiều, hai chiều nên được dùng trong các tính toán cho ô mạng. Sử dụng môdun PIJ để đồng nhất hóa các ô mạng thanh nhiên liệu và bó nhiên liệu. Môdun CITATION dựa trên lý thuyết khuếch tán nhiều chiều nên thường được dùng để mô hình hóa toàn vùng hoạt. Chia vùng hoạt thành các ô mạng mà mỗi ô mạng là một vùng đồng nhất. Môdun CITATION sẽ giải phương trình khuếch tán cho các ô mạng đồng nhất mà các ô mạng có thư viện số liệu thu được từ đồng nhất hóa bó nhiên liệu bằng môdun PIJ.

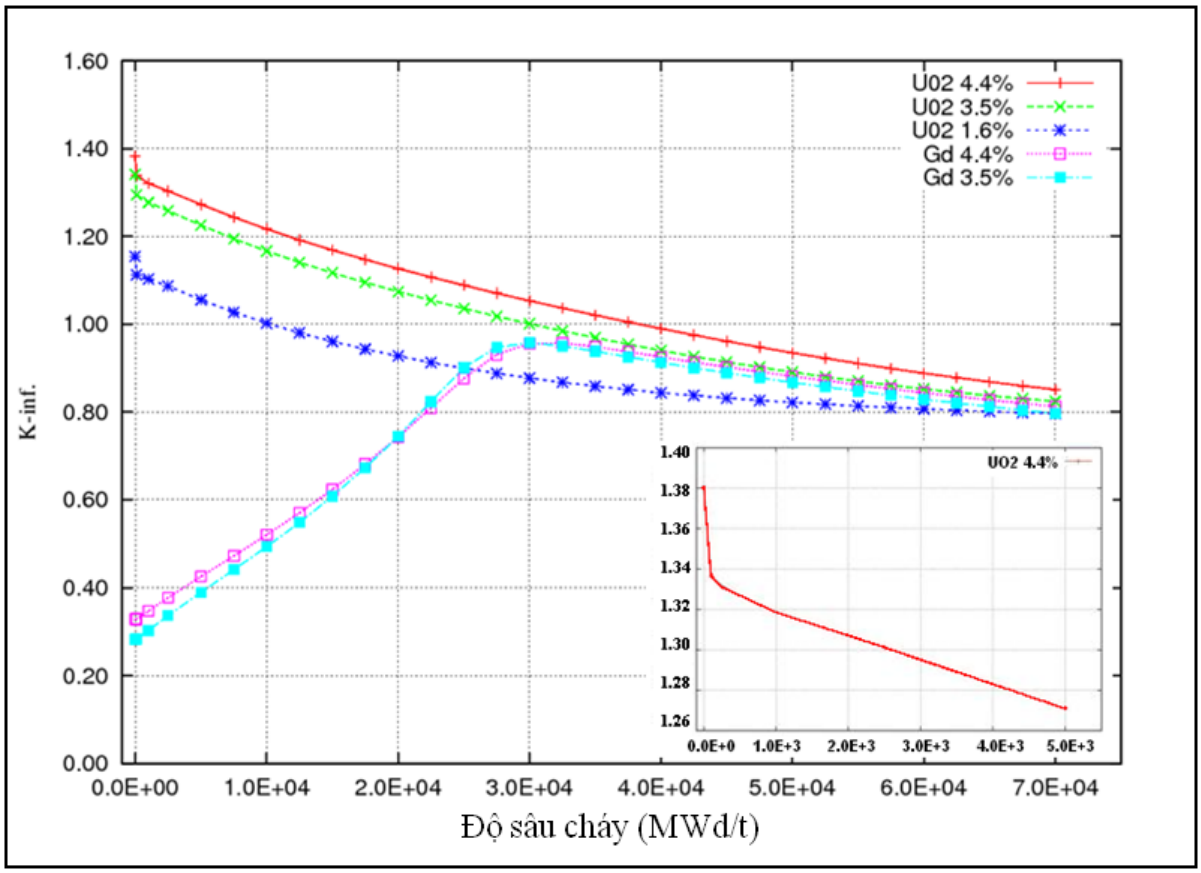
Các đặc trưng nơtron chính được trình bày trong báo cáo bao gồm: hệ số nhân nơtron vô hạn ($k_{inf}$) theo độ sâu cháy, phân bố mật độ hạt nhân trong thanh nhiên liệu; phân bố tốc độ

phân hạch trong bó nhiên liệu, hệ số nhân nơtron hiệu dụng ($k_{eff}$) và phân bố công suất trong vùng hoạt của lò phản ứng. Các tính toán đặc trưng nơtron là cần thiết vì nó giúp cho chúng ta biết các đặc trưng thiết kế của thanh nhiên liệu, bó nhiên liệu và vùng hoạt và cho các thông số đầu vào trong các tính toán thủy nhiệt động, các hệ số an toàn thiết kế. Qua đó từng bước xây dựng năng lực nghiên cứu vật lý lò phản ứng tại Viện Khoa học và Kỹ thuật hạt nhân, tiếp cận các yêu cầu về chuyên môn khi đánh giá thẩm định thiết kế đưa nhà máy điện hạt nhân vào nước ta.

## II. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

### II.1. Các kết quả tính toán ô mạng thanh nhiên liệu sử dụng môdun PIJ.

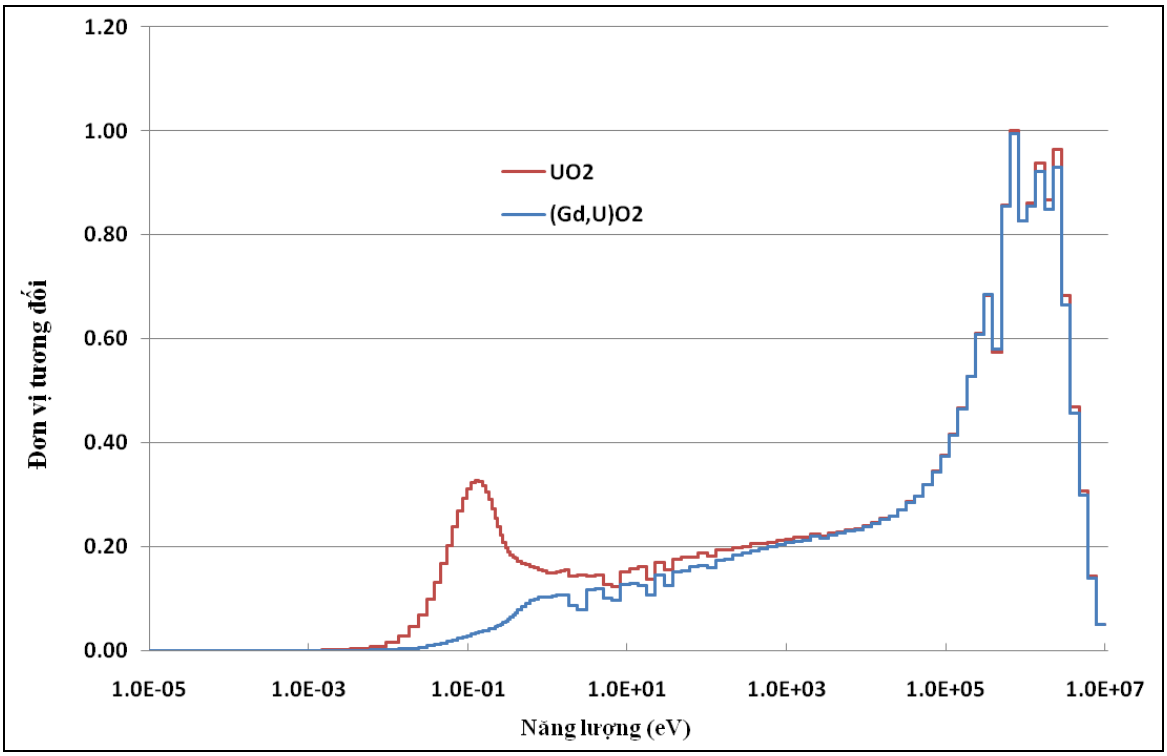
Hình 3 biểu diễn hệ số nhân nơtron vô hạn $k_{inf}$ của các thanh nhiên liệu $UO_2$ và các thanh nhiên liệu chứa Gd theo độ sâu cháy. Các thanh nhiên liệu $UO_2$ có hệ số nhân giảm mạnh tại những bước cháy đầu tiên do các chất độc lò phản ứng như $^{135}Xe$ và $^{149}Sm$ sinh ra. Đến độ sâu cháy khoảng 300 MWd/t thì nồng độ các chất độc cân bằng nên hệ số nhân nơtron vô hạn bắt đầu giảm đều như nhau theo độ sâu cháy. Các thanh nhiên liệu chứa Gd ban đầu có hệ số nhân nơtron vô hạn thấp do Gd là chất hấp thụ mạnh notron nhiệt. Theo thời gian lượng Gd cháy dần làm cho hệ số nhân nơtron tăng lên tới khi độ sâu cháy khoảng 30GWd/t thì hệ số nhân nơtron vô hạn của các thanh nhiên liệu chứa Gd bắt đầu giảm tương tự như các thanh nhiên liệu $UO_2$ do Gd đã cháy hết.




Hình 3: Hệ số nhân nơtron vô hạn của thanh nhiên liệu theo độ sâu cháy.

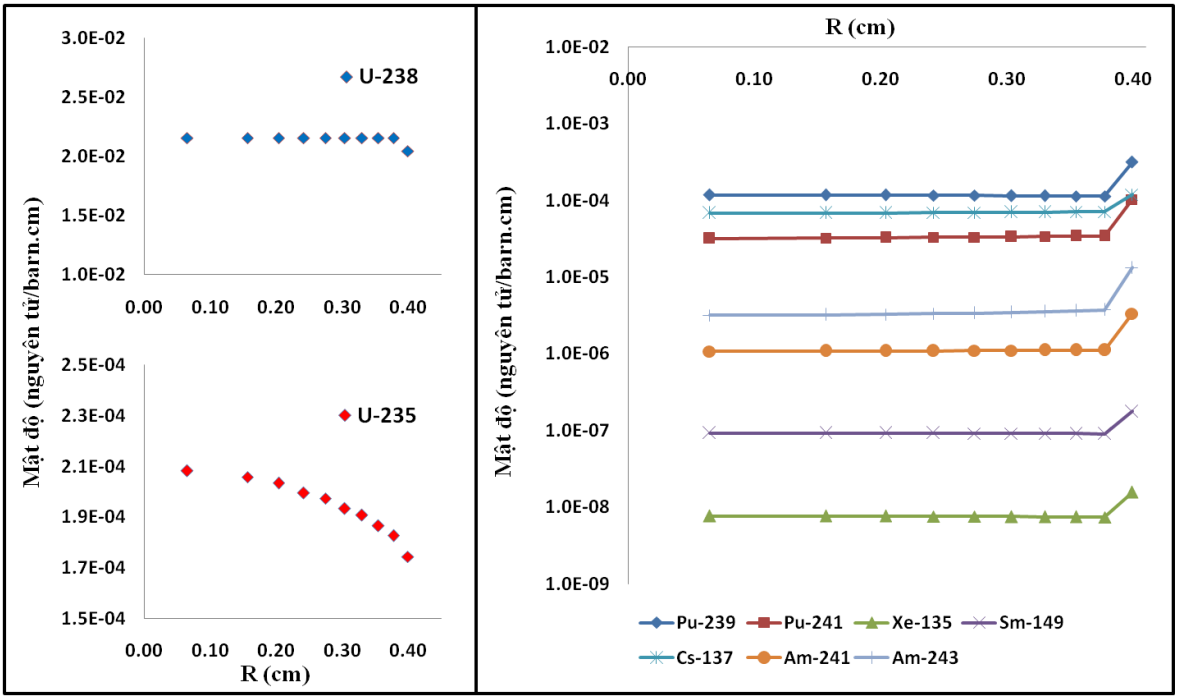
Thông lượng nơtron trong các thanh nhiên liệu $UO_2$ trong vùng năng lượng 1.86eV–10KeV thấp hơn các vùng bên cạnh do nơtron bị hấp thụ trong vùng năng lượng cộng hưởng của $^{235}U$. Khả năng hấp thụ mạnh nơtron nhiệt của Gd làm cho phổ nơtron của các thanh

nhiên liệu chứa Gd cứng hơn nên không còn đỉnh nơtron nhiệt như các thanh nhiên liệu $UO_2$ trong hình 4.




Hình 4: Thông lượng nơtron tương đối trong thanh nhiên liệu.

Hình 5 biểu diễn mật độ của một số đồng vị tại độ sâu cháy 50 GWd/t của thanh nhiên liệu $UO_2$ độ giàu 4.4% theo chiều bán kính. Mật độ $^{235}U$ giảm đều từ tâm thanh nhiên liệu ra tới ngoài vỏ trong khi đó $^{238}U$ giảm đột ngột phía ngoài vỏ.Nơtron tập trung nhiều trên lớp biên giữa nhiên liệu và chất làm chậm nên tốc độ phản ứng tại vùng biên lớn hơn dẫn đến các sản phẩm cháy tập trung chủ yếu ở lớp vỏ của viên nhiên liệu.



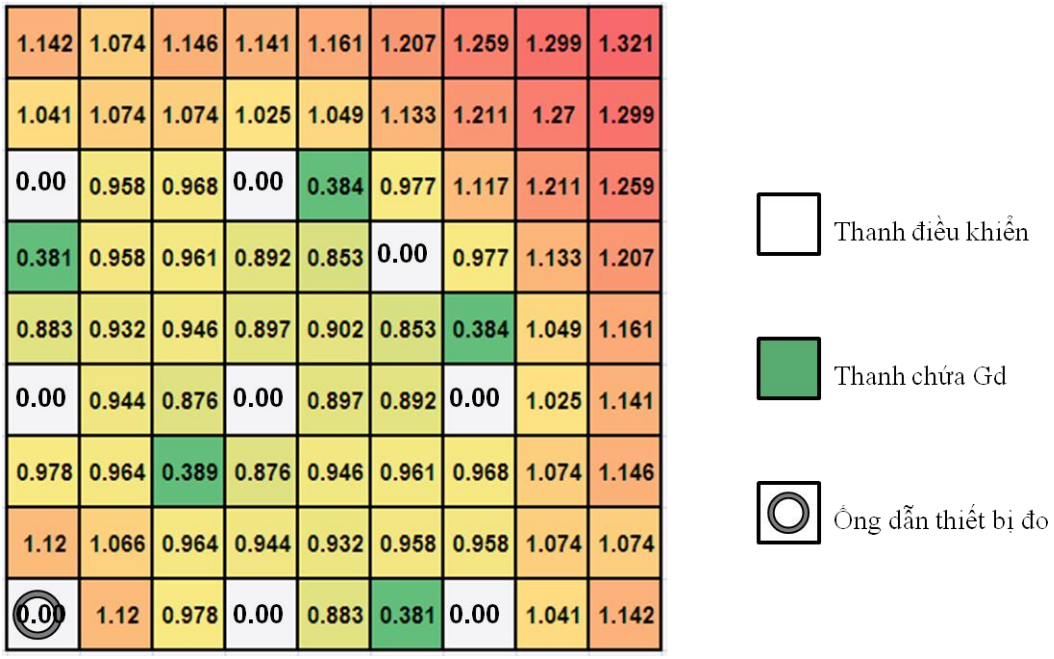

Hình 5: Mật độ của một số đồng vị theo chiều bán kính viên nhiên liệu.

II.2. Kết quả tính toán bó nhiên liệu sử dụng môdun PIJ.

Bảng 2: Hệ số nhân nơtron vô hạn của các ô mạng bó nhiên liệu.

| Loại bó | 3A | 3B | 3C | 3C | 2C | 2C | 2C 24BP | 2C 20BP | 2C 16BP | 2B | 2A | 1 | 1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| k-inf | 1.014 | 0.815 | 1.246 | 0.894 | 1.184 | 0.826 | 0.998 | 1.025 | 1.054 | 1.007 | 0.936 | 0.923 | 0.59 |

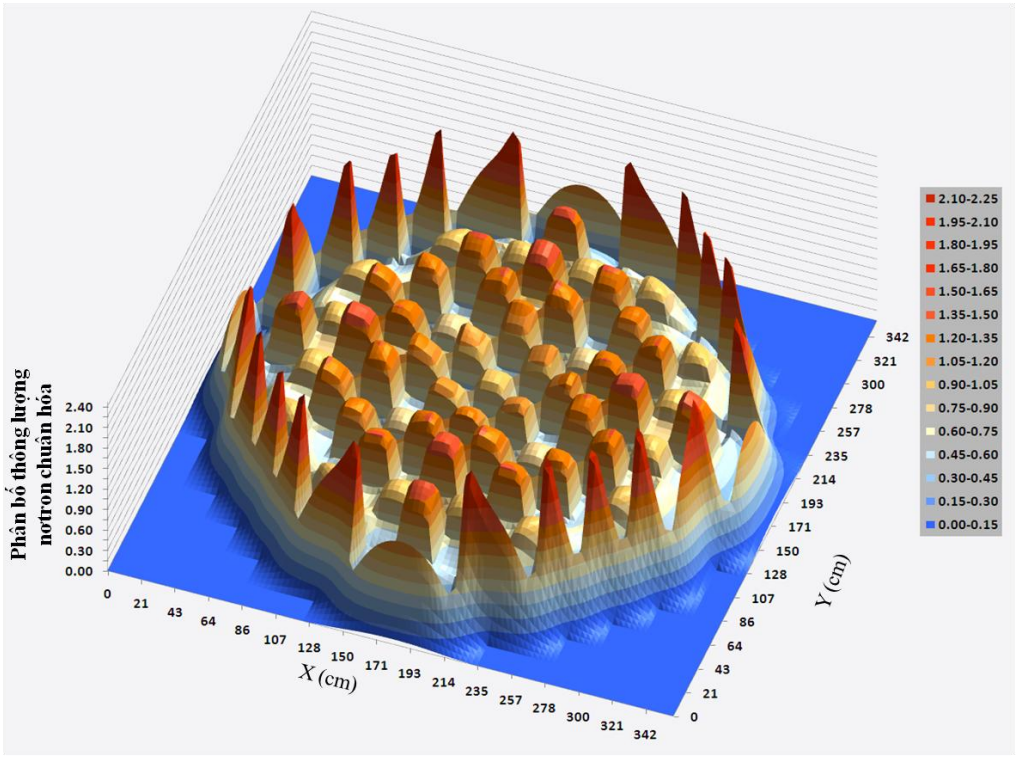
Kết quả tính với giả thiết chất làm chậm có chứa boron nồng độ 1700 ppm, nhiệt độ của thanh nhiên liệu là 900$^{o}$C và các thành phần còn lại có nhiệt độ 580$^{o}$K. Các kết quả này để chuẩn bị hằng số ô mạng của các bó nhiên liệu cho tính toán toàn vùng hoạt. Các bó 2C và 3C không có các thanh chứa chất hấp thụ mạnh nơtron nên có hệ số nhân cao hơn. Các bó có chứa thanh điều khiển có hệ số nhân nơtron vô hạn thấp nhất. Còn các bó có các thanh nhiên liệu chứa Gd và thanh chất độc cháy được có hệ số nhân nơtron vô hạn sấp sỉ bằng 1. Hình 6 mô tả phân bố tốc độ phân hạch của ¼ bó nhiên liệu loại 3B độ làm giàu 4.4% có một ống dẫn thiết bị đo ở giữa, 16 thanh chứa Gd và 24 thanh điều khiển. Các thanh nhiên liệu xung quanh các thanh điều khiển có tốc độ phản ứng giảm xuống do thanh điều khiển đã hấp thụ bớt nơtron. Ống dẫn thiết bị đo ở giữa có chứa nước nên đã làm tăng khả năng làm chậm nơtron giúp cho các thanh bên cạnh có tốc độ phân hạch tăng lên. Các thanh chứa Gd có tốc độ phản ứng tương đối nhỏ do Gd có tiết diện bắt nơtron nhiệt lớn. Tại các góc của bó nhiên liệu này có tốc độ phân hạch cao nhất do lân cận không có thanh điều khiển và thanh chứa Gd.




Hình 6: Phân bố tốc độ phân hạch tương đối của 1/4 bó nhiên.

II.3. Kết quả mô hình hóa toàn bộ vùng hoạt bằng môdun CITATION.

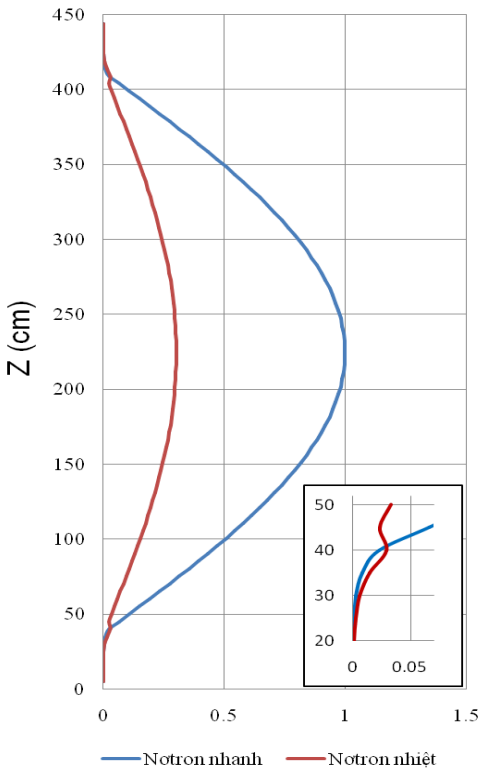
Theo thiết kế nồng độ axit boric được giữ khoảng từ 2300-3000 ppm trong suốt quá trình dừng lò nguội . Nồng độ axit boric sẽ được đưa xuống 1600 - 1800 ppm ở điều kiện dừng lò nóng trước khi lò được khởi động bằng cách rút các thanh điều khiển**Error! Reference source not found.**. Vì vậy tác giả đã chọn điều kiện tính toán là toàn bộ các thanh điều khiển rút ra khỏi lò và nồng độ boron là 1700 ppm. Kết quả hệ số nhân nơtron hiệu dụng $k_{eff}$ của toàn vùng hoạt là 1.0083 chứng tỏ lò PWR 900MWe tới hạn khi rút toàn bộ các thanh điều khiển ra khỏi lò và nồng độ boron là 1700 ppm. Hình 7 biểu diễn thông lượng notron nhiệt tương đối của nhóm notron nhiệt có năng lượng dưới 0.025eV. Thông lượng notron nhiệt trong vùng hoạt khá đồng đều. Thông lượng notron nhiệt tại vành phản xạ cao hơn nhiều so với trong vùng hoạt do hai nguyên nhân: do phản xạ từ vành phản xạ và do hấp thụ của $^{235}U$ trong vùng hoạt.



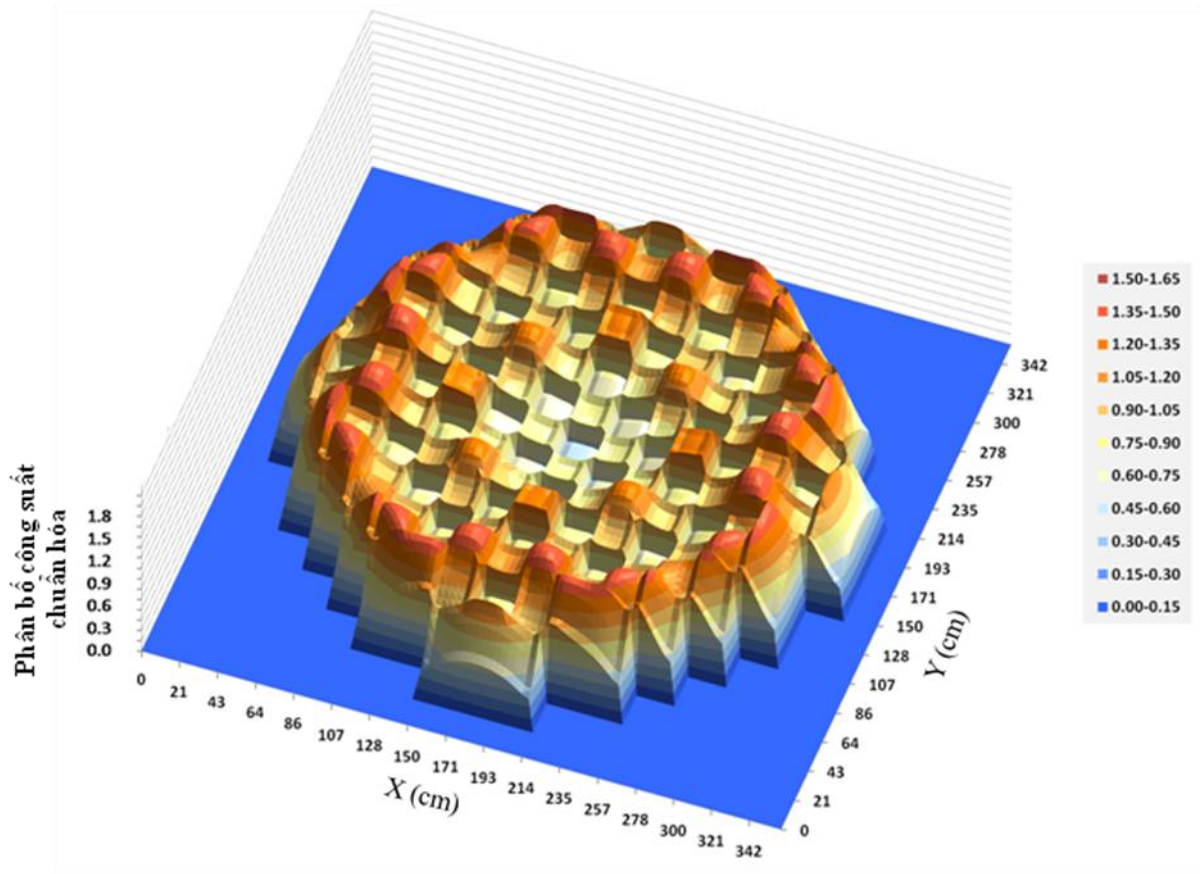

Hình 7: Phân bố thông lượng nơtron nhiệt (≤ 0.025eV) tương đối trong toàn vùng hoạt theo bán kính

Trong hình 8 ta thấy thông lượng nơtron tại tâm vùng hoạt cao nhất. Thông lượng nơtron nhanh (>1.86eV) gấp khoảng hơn 3 lần thông lượng nơtron nhiệt(≤1.86eV) như tại tâm vùng hoạt là 3.3 lần. Do các giả thiết không tính đến trường nhiệt độ và dòng chất tải nhiệt nên thông lượng nơtron đối xứng qua mặt phẳng tâm lò. Đường thông lượng nơtron nhiệt có hai đỉnh nhỏ tại biên giữa nhiên liệu và lớp phản xạ do khả năng phản xạ và làm chậm tốt của lớp phản xạ.

Phân bố công suất trong vùng hoạt không đồng đều theo chiều bán kính với đỉnh công suất cực đại là 1.48. Công suất tại tâm vùng hoạt thấp nhất và cao nhất ở biên vùng hoạt nơi tập trung các bó nhiên liệu độ giàu cao. Phía trong vùng hoạt còn có các đỉnh công suất là vị trí của bó nhiên liệu 2C độ giàu 3.5%. Nguyên nhân làm cho công suất ở tâm vùng hoạt thấp hơn là do cách bố trí các bó nhiên liệu độ giàu thấp tập trung ở giữa và nguyên nhân chủ yếu là do nồng độ boron cao 1700 ppm. Khi hoạt động nồng độ boron bị cháy và giảm 2-3 ppm/ngày [1] nên sẽ làm cho công suất ở tâm lò tăng lên so với vùng biên dẫn đến công suất trong vùng hoạt sẽ đều hơn.




Hình 8: Thông lượng nơtron theo chiều dọc vùng hoạt




Hình 9: Phân bố công suất tương đối trong toàn vùng hoạt theo bán kính

## III. KẾT LUẬN

Báo cáo đã trình bày được các kết quả tính toán đặc trưng hạt nhân của lò phản ứng PWR-900MWe của Nhật Bản. Các kết quả đã thu được bao gồm: hệ số nhân nơtron vô hạn ($k_{inf}$) theo độ sâu cháy, phân bố mật độ hạt nhân trong thanh nhiên liệu; phân bố công suất trong bó nhiên liệu, hệ số nhân nơtron hiệu dụng ($k_{eff}$) của toàn lò là 1.0083 và phân bố công suất trong vùng hoạt của lò phản ứng với đỉnh công suất cực đại là 1.48. Trong hướng nghiên cứu tiếp theo nhóm tác giả sẽ sử dụng các chương trình dựa trên phương pháp ngẫu nhiên như chương trình MCNP để tính toán benchmark và kiểm chứng các kết quả trong báo cáo này.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] HUST-Mitsubishi Collaboration Program: Text book of Nuclear Power Plant Engineering, Mitshubishi heavy industries,Ltd. 2011

[2] Okumura, K., Kugo, T., Kaneko, K. and Tsuchihashi, K., SRAC2006: A comprehensive neutronics calculation code system, JAEA-Data/Code 2007-004, 2007

[3] Shibata, K., et al., Japanese evaluated nuclear data library version 3 revision-3: JENDL-3.3. J. Nucl. Sci. Tech. 39, 1125. 2002.

# INVESTIGATION OF NEUTRONIC CHARACTERISTICS OF A JAPANESE PWR 900 MWe

**Abstract:** Neutronic characteristics for a Japanese PWR 900 MWe were investigated by using SRAC codes and neutron data library JENDL-3.3 with 107 energy groups. The elementary codes, PIJ and CITATION, have been used for modeling of the fuel rods, fuel assemblies and full core. The main neutronic characteristics analyzed in this work include infinite multiplication factors ($k_{inf}$) versus burnup, the distribution of nuclide densities in the pin cells; the pin-wise fission rate distribution in the assembly and the effective multiplication factors ($k_{eff}$), and the power distribution in the core.

**Keywords:** *SRAC, PIJ, CITATION, effective multiplication factor, power profile, burnup.*