

# KHẢO SÁT ĐẶC TRƯNG NƠTRON CỦA CHU TRÌNH NHIÊN LIỆU OTTO Lò PHẢN ỨNG PBMR VÀ SO SÁNH VỚI CHU TRÌNH MULTI-PASS

HOÀNG VĂN KHÁNH<sup>1</sup>, TRẦN HOÀI NAM<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Viện Khoa Học và Kỹ Thuật Hạt Nhân, Hà Nội*

**Email: hvkhanh21@yahoo.com**

<sup>2</sup>*Khoa Kỹ Thuật Hạt Nhân, Trường Đại học Công Nghệ Chalmers, Thụy Điển*

**Email: nam@nephy.chalmers.se**

**Tóm tắt:** Báo cáo khảo sát đặc trưng neutron của chu trình nhiên liệu OTTO lò phản ứng PBMR 400 MWt và so sánh với chu trình multi-pass. Lò phản ứng được nạp bởi các viên nhiên liệu mới được thiết kế trong bài toán tối ưu nhiều biến sử dụng các hạt  $Gd_2O_3$  nhằm cực đại độ sâu cháy trung bình trong khi duy trì đỉnh công suất ở mức giới hạn và đảm bảo trạng thái tối hạn của lò phản ứng. Kết quả cho thấy chu trình OTTO có thể đạt độ sâu cháy trung bình lớn nhất là 75 GWd/t, nhỏ hơn 21% so với chu trình multi-pass (95 GWd/t), trong khi các đặc trưng khác xấp xỉ nhau.

**Từ khóa:** PBMR, OTTO, phân bố công suất, độ sâu cháy.

## I. MỞ ĐẦU

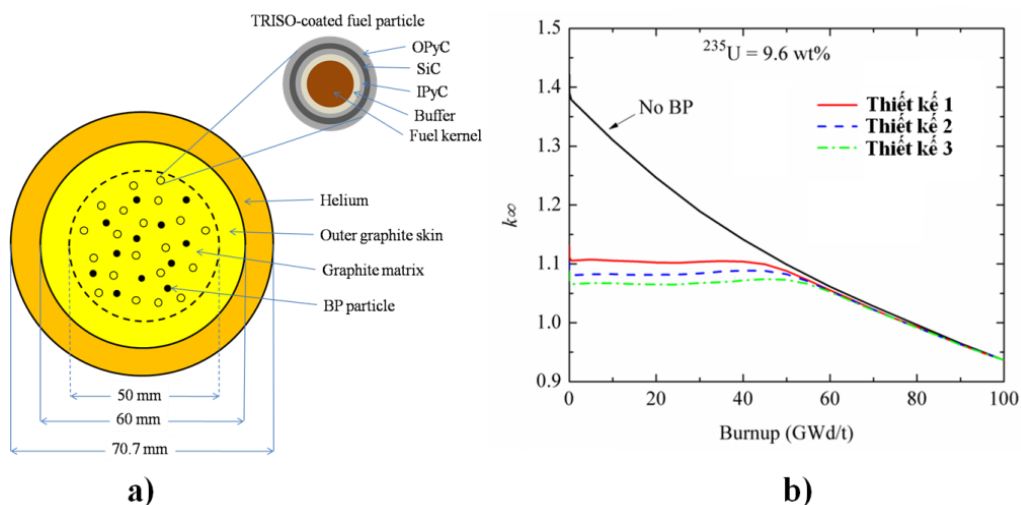
Lò phản ứng PBR (pebble bed reactor), một trong hai loại công nghệ HTGR (high temperature gas-cooled reactor) được lựa chọn là một trong sáu công nghệ lò phản ứng thế hệ thứ IV [1]. Điểm khác biệt trong thiết kế lò PBR so với các công nghệ lò phản ứng khác đó là việc sử dụng các viên nhiên liệu (fuel pebble=FP) hình cầu đường kính 6 cm thay vì các thanh nhiên liệu. Nhiên liệu được nạp liên tục trong quá trình vận hành lò phản ứng và được thực hiện bởi hệ thống thay đảo nhiên liệu. Các lò phản ứng PBR hiện tại như PBMR-400 (Nam Phi), HTR-10 (Trung Quốc) được vận hành với chu trình multi-pass. Trong đó các viên nhiên liệu đã sử dụng được tái nạp nhiều lần cho đến khi chúng đạt độ sâu cháy theo thiết kế. Khác với chu trình multi-pass, chu trình OTTO chỉ nạp tải với nhiên liệu tươi, nhiên liệu đã sử dụng không được tái nạp, do đó hệ thống thay đảo nhiên liệu đối với chu trình OTTO được tinh giản tối đa so với chu trình multi-pass [2].

Một trong những yếu điểm làm cho chu trình OTTO chưa được ứng dụng trong thực tế là phân bố công suất không đều dọc theo chiều cao của lò với đỉnh công suất lớn. Phân bố công suất không đều đó sẽ làm giảm hiệu quả quá trình tải nhiệt và có thể dẫn đến nhiệt độ của các viên nhiên liệu tăng quá giới hạn an toàn (1600 °C) khi xảy ra sự cố mất chất tải nhiệt (loss of coolant accident=LOCA). Sử dụng chất hấp thụ cháy được (burnable poison=BP) trong thiết kế viên nhiên liệu có thể giúp duy trì phân bố công suất đồng đều theo chiều cao lò. Nguyên lý nạp chất hấp thụ cháy được đề xuất, theo đó nếu các chất hấp thụ cháy được được nạp một cách tối ưu để duy trì hệ số nhân vô hạn ( $k_{\infty}$ ) không đổi trong quá trình cháy thì hệ số bất đồng đều phân bố công suất sẽ cực tiểu [3][4]. Tuy nhiên sử dụng chất hấp thụ cháy được sẽ làm giảm hiệu quả sử dụng nhiên liệu cũng như các đặc trưng neutron của lò PBR. Trong các nghiên cứu trước, để đạt độ sâu cháy 100 GWd/t của nhiên liệu trong chu trình OTTO độ giàu  $^{235}U$  được chọn là 16 wt%. Trong khi đó lò PBMR với chu trình multi-pass nhiên liệu đạt độ sâu cháy 90-95 GWd/t với độ giàu 9.6 wt% [3][4]. Trong một thiết kế nhiên liệu với BP cho chu trình OTTO của lò PBR công suất 200 MWt đạt được phân bố đều công suất, tuy nhiên độ sâu cháy nhiên liệu nhỏ hơn 35% so với chu trình multi-pass [5]. Do đó việc đánh giá định lượng hiệu quả sử dụng nhiên liệu đối với chu trình OTTO sử dụng BP là cần thiết.

Báo cáo này trình bày tóm tắt các kết quả của bài báo [6], là một nghiên cứu tiếp theo của [7], nhằm khảo sát khả năng tăng hiệu quả sử dụng nhiên liệu và các đặc trưng hạt nhân của chu trình OTTO và so sánh với chu trình multi-pass. Viên nhiên liệu nạp tải trong chu trình OTTO được thiết kế mới với  $Gd_2O_3$  là chất hấp thụ cháy được nhằm duy trì phân bố công suất đều. Các thiết kế được thực hiện thông qua bài toán tối ưu nhiều biến nhằm cực đại hóa độ sâu cháy, trong khi duy trì đỉnh công suất ở mức giới hạn đồng thời đảm bảo độ tới hạn của lò phản ứng. Các phân tích và so sánh được thực hiện dựa trên thiết kế lò phản ứng PBMR-400.

## II. THIẾT KẾ NHIÊN LIỆU VỚI $Gd_2O_3$

Viên nhiên liệu lò PBMR dạng hình cầu chứa khoảng 15000 hạt nhiên liệu TRISO được bao bọc bởi vỏ graphít. Hạt nhiên liệu TRISO gồm nhân  $UO_2$  đường kính 500  $\mu m$  được bọc bởi các lớp vỏ carbon và SiC, trong đó lớp vỏ SiC đóng vai trò quan trọng trong việc ngăn chặn các đồng vị phóng xạ thoát ra ngoài trong quá trình cháy nhiên liệu. Mỗi viên nhiên liệu chứa tổng cộng 9 g uranium với độ làm giàu 9.6 wt%  $^{235}U$ . Trong thiết kế nhiên liệu mới nhằm đạt tới phân bố công suất đều trong chu trình OTTO, các hạt  $Gd_2O_3$  hình cầu được nạp vào viên nhiên liệu tươi, và phân bố đều cùng với các hạt TRISO. Cấu trúc viên nhiên liệu, hạt TRISO, BP và mô hình tính toán thiết kế viên nhiên liệu được mô tả trên Hình 1a). Trong đó, mô hình tính toán bao gồm viên nhiên liệu được bao quanh bởi một lớp chất tải nhiệt (khí Héli) với bề dày được xác định sao cho tỷ lệ thể tích của nhiên liệu là 0.61. Các tính toán thiết kế nhiên liệu được thực hiện bởi chương trình tính toán theo phương pháp Monte Carlo MVP [8] và thư viện số liệu JENDL-3.3 [8]. Chương trình MVP cho phép mô tả chính xác mô hình viên nhiên liệu cũng như vùng hoạt của PBR.



Hình 1. a) Mô hình viên nhiên liệu trong MVP  
b)  $k_{\infty}$  của nhiên liệu mới thay đổi theo độ sâu cháy.

Khi các hạt BP dạng hình cầu được nạp vào viên nhiên liệu, các tính chất hấp thụ neutron của hạt BP sẽ phụ thuộc chủ yếu vào tổng diện tích bề mặt của chúng, tức là phụ thuộc vào bán kính và số hạt. Việc tối ưu hóa các thông số BP được thực hiện tương tự trong các nghiên cứu trước [3][4]. Tuy nhiên, trong nghiên cứu này các thông số của  $Gd_2O_3$  (bán kính và số hạt) được xác định nhằm duy trì  $k_{\infty}$  không đổi trong những giai đoạn cháy ban đầu (từ 0-60 GWd/t). Để khảo sát đặc trưng neutron của chu trình OTTO trong bài toán tối ưu nhiều biến, trong đó độ sâu cháy trung bình là thông số cần cực đại hóa trong khi đảm bảo duy trì đỉnh công suất ở mức giới hạn đồng thời đảm bảo điều kiện tới hạn của lò phản ứng, ba thiết kế được lựa chọn tương ứng với các thông số của  $Gd_2O_3$  như sau:

Thiết kế 1: 14 hạt  $Gd_2O_3$ ; bán kính 0.68 mm

Thiết kế 2: 13 hạt  $Gd_2O_3$ ; bán kính 0.74 mm

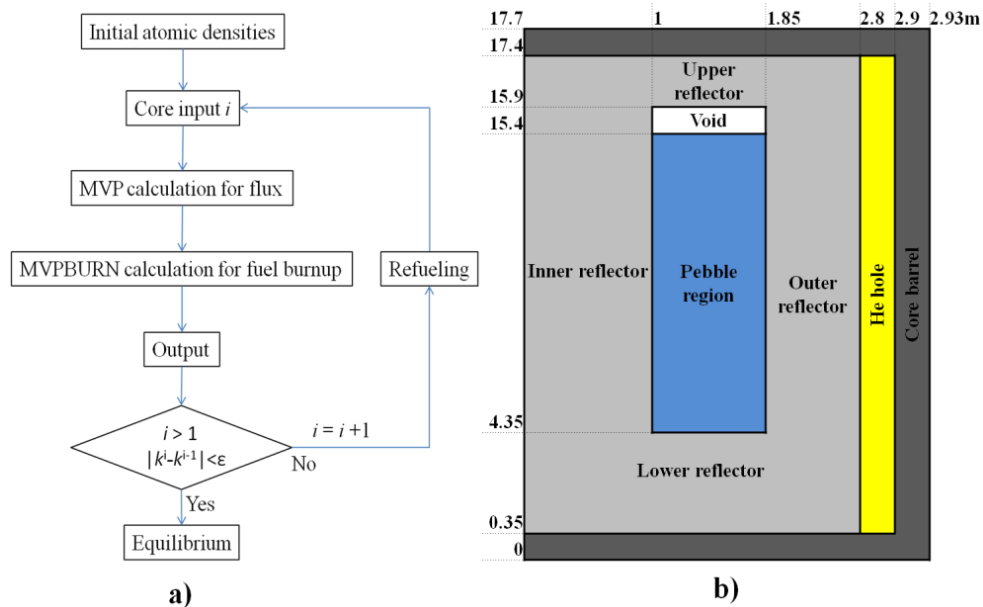
Thiết kế 3: 11 hạt  $Gd_2O_3$ ; bán kính 0.82 mm

Hình 1b) biểu diễn sự phụ thuộc của  $k_\infty$  theo độ sâu cháy tương ứng trong ba thiết kế trên. Ở giai đoạn cháy ban đầu,  $k_\infty$  được duy trì xấp xỉ ở giá trị tương ứng là 1.1, 1.08 và 1.06. Ở giai đoạn cháy sau 60 GWd/t khi hầu hết các chất hấp thụ đã cháy hết  $k_\infty$  giảm tương tự như với nhiên liệu ban đầu khi không có BP.

### III. ĐẶC TRƯNG NOTRON CỦA CHU TRÌNH OTTO

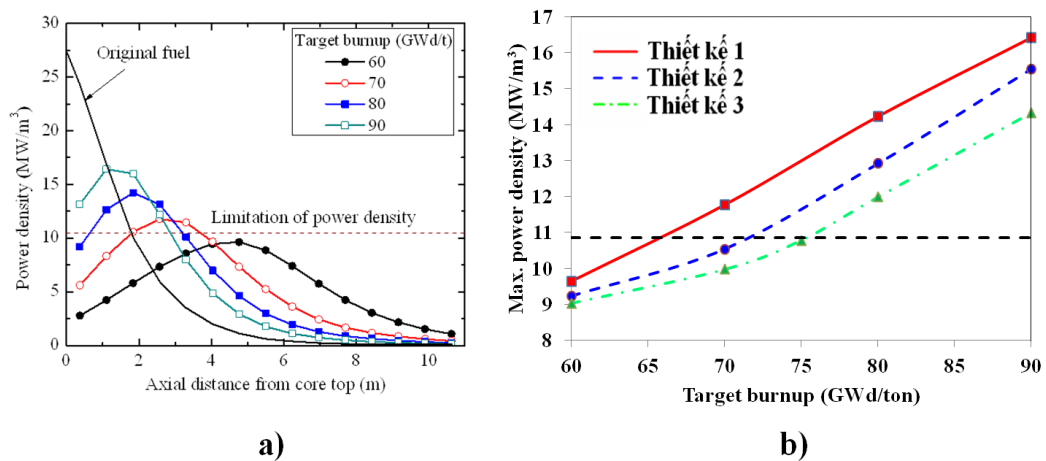
Lò phản ứng PBMR có vùng hoạt dạng hình xuyên, chiều cao 11.0 m và bề dày 0.85 m, ở giữa là lớp phản xạ graphít bán kính 1.0 m. Hình 2 mô tả mặt cắt dọc của mô hình lò PBMR sử dụng MVP. Các đặc trưng neutron của chu trình OTTO ở trạng thái cân bằng (equilibrium state) được tính toán và so sánh với chu trình multi-pass. Các đặc trưng của chu trình multi-pass với mỗi viên nhiên liệu được tái nạp sáu lần được sử dụng trong so sánh này bao gồm: Độ sâu cháy trung bình 95 GWd/t đạt được sau khoảng 3 năm; Hệ số nhân neutron hiệu dụng ( $k_{eff}$ ) là 1.0260, trong đó không tính đến ảnh hưởng của Xe; Định công suất cực đại khoảng 10.85 MW/m<sup>3</sup> gần vành phản xạ bên trong tại khoảng cách 2.5 m từ đỉnh vùng hoạt [10]. Để tiện cho việc so sánh hiệu quả sử dụng nhiên liệu, trong báo cáo, định công suất của chu trình multi-pass được dùng như là giới hạn đối với chu trình OTTO.

Đối với lò PBR vận hành với chu trình nạp tải nhiên liệu liên tục, sau một khoảng thời gian hoạt động lò phản ứng sẽ đạt tới trạng thái cân bằng, khi đó sự thay đổi các đặc trưng của vùng hoạt là không đáng kể. Do đó việc mô phỏng trạng thái cân bằng của lò phản ứng là rất quan trọng. Mô hình tính toán mô phỏng để đạt tới trạng thái cân bằng của chu trình OTTO sử dụng chương trình MVP được mô tả trên Hình 2a). Xuất phát từ một mô hình lò ban đầu, sau một số lần lặp lại các tính toán như mô tả trên Hình 2a) sẽ thu được trạng thái cân bằng của chu trình OTTO. Trong đó mô hình lò ban đầu có thể được xác định từ giả thiết phân bố độ sâu cháy là tuyến tính dọc theo chiều cao của lò và là đồng nhất theo chiều bán kính. Khi đó mật độ các đồng vị được nội suy từ các bước cháy tương ứng trong tính toán mô hình viên nhiên liệu. Mô tả chi tiết hơn của phương pháp có thể xem thêm tại [6].



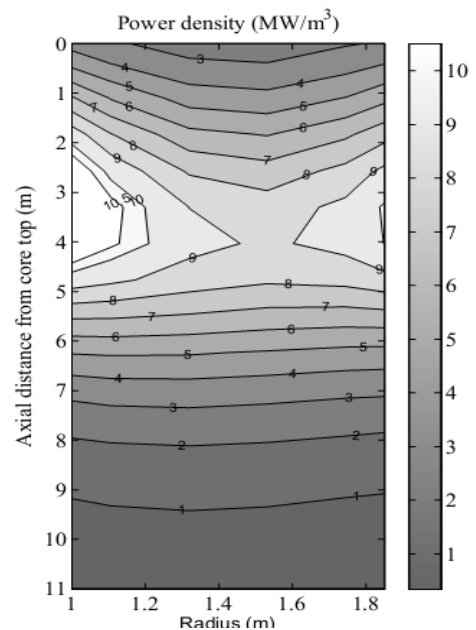
Hình 2. a) Mô hình tính toán trạng thái cân bằng của chu trình OTTO sử dụng MVP  
b) Mô hình PBMR core.

Để đánh giá sự phụ thuộc của các đặc trưng lò PBMR đối với độ sâu cháy và từ đó xác định độ sâu cháy cực đại, các tính toán với trạng thái cân bằng của chu trình OTTO được thực hiện tại một số độ sâu cháy tương ứng 60, 70, 80 và 90 GWd/t. Hình 3a) mô tả sự thay đổi phân bố công suất dọc theo chiều cao của lò tại các độ sâu cháy được tính toán đối với thiết kế 1. Phân bố công suất đều hơn đối với độ sâu cháy nhỏ. So sánh giữa các kết quả tính toán cho thấy phân bố công suất đều nhất đối với độ sâu cháy 60 GWd/t. Tăng độ sâu cháy sẽ làm tăng đỉnh công suất. Ngược lại với xu hướng tăng của đỉnh công suất theo độ sâu cháy, hệ số  $k_{eff}$  giảm dần khi độ sâu cháy tăng. Sự phụ thuộc của đỉnh công suất và  $k_{eff}$  vào độ sâu cháy cũng tương tự đối với các thiết kế nhiên liệu 2 và 3. Mục đích của bài toán tối ưu nhiều biến này là xác định độ sâu cháy cực đại (tức hiệu quả sử dụng nhiên liệu cao nhất) đồng thời đảm bảo đỉnh công suất thấp hơn giá trị cho phép ( $10.85 \text{ MW/cm}^3$ ) và điều kiện tới hạn của lò phản ứng ( $k_{eff} > 1.0$ ).



Hình 3. a) Phân bố công suất theo chiều cao vùng hoạt trong thiết kế 1  
b) Sự phụ thuộc của mật độ công suất cực đại vào độ sâu cháy trong các thiết kế nhiên liệu.

Nghiên cứu trước đó chỉ ra rằng tại các độ sâu cháy thỏa mãn điều kiện đỉnh công suất thấp hơn giá trị giới hạn ( $10.85 \text{ MW/cm}^3$ ) thì đều thỏa mãn điều kiện tới hạn của lò phản ứng. Do đó trong trường hợp này ta chỉ cần xác định độ sâu cháy cực đại và đảm bảo thỏa mãn điều kiện đối với đỉnh công suất. Hình 3b) biểu diễn sự phụ thuộc của đỉnh công suất vào độ sâu cháy trong ba thiết kế nhiên liệu và so sánh với giới hạn của đỉnh công suất. Kết quả cho thấy độ sâu cháy cực đại có thể đối với thiết kế 3 của viên nhiên liệu và  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ . Bằng phép nội suy giá trị đỉnh công suất trong khoảng 70 - 80 GWd/t, ta nhận được giá trị cực đại của độ sâu cháy khoảng 75 GWd/t, tại đó đỉnh công suất sẽ xấp xỉ giá trị giới hạn cho phép. Từ đó thực hiện các tính toán cho trạng thái cân bằng của lò PBMR tại độ sâu cháy 75 GWd/t. Kết quả thu được với hệ số  $k_{eff}$  là 1.0072 và đỉnh công suất cực đại là  $10.80 \text{ MW/cm}^3$ . Hình 4 mô tả phân bố công suất tại độ sâu cháy 75 GWd/t với đỉnh công suất cách 3.5 m tính từ phía trên vùng hoạt. Độ sâu cháy 75 GWd/t nhỏ hơn 21% so với chu trình multi-pass.



Hình 4. Phân bố công suất trong vùng hoạt với thiết kế 3 của nhiên liệu và độ sâu cháy 75 GWd/t.

#### IV. KẾT LUẬN

Báo cáo đã khảo sát các đặc trưng neutron của lò PBMR với chu trình OTTO và so sánh với chu trình multi-pass. Viên nhiên liệu được thiết kế mới sử dụng  $Gd_2O_3$  là chất hấp thụ cháy được nhằm đạt được phân bố công suất đều trong vùng hoạt. Các thiết kế được khảo sát trong bài toán tối ưu nhiều biến nhằm so sánh hiệu quả sử dụng nhiên liệu và các đặc trưng khác. Kết quả cho thấy chu trình OTTO có thể đạt độ sâu cháy 75 GWd/t, khi đó phân bố công suất tương tự như trong chu trình multi-pass. Độ sâu cháy này nhỏ hơn 21% so với chu trình multi-pass, có nghĩa là hiệu quả sử dụng nhiên liệu của chu trình OTTO nhỏ hơn 21%. Do đó để có thể so sánh toàn diện hơn giữa hai chu trình cần thực hiện các nghiên cứu đánh giá chi tiết về giá thành xây dựng và vận hành hệ thống thay đảo nhiên liệu trong chu trình multi-pass. Kết quả cũng gợi ý những nghiên cứu nhiên liệu mới có khả năng đảm bảo phân bố công suất đều và đạt hiệu quả sử dụng nhiên liệu cao trong chu trình OTTO thay cho việc sử dụng chất hấp thụ cháy được.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. GIF, 2002. “A technology roadmap for generation IV nuclear energy systems”, GIF-002-00
- [2]. Hansen, U., et al, “Physical properties of the ”Once Through Then Out” pebble-bed reactor”. Nucl. Sci. Eng. 47, 132-139, 1972.
- [3]. Tran, H.N., et al., Y “Optimization of burnable poison loading for HTGR cores with OTTO refueling”. Nucl. Sci. Eng. 158, 264-271., 2008.
- [4]. Tran, H.N., Kato, Y., “An optimal loading principle of burnable poisons for an OTTO refueling scheme in pebble bed HTGR cores”. Nucl. Eng. Des. 239, 2357-2364, 2009.
- [5]. Mulder, E.J, “Pebble bed reactor with equalized core power distribution: Inherently safe and simple”, JUL-3632., 1999.
- [6]. Tran, H.N., Hoang V.K. “Neutronic characteristics of an OTTO refueling PBMR”, submitted to, Nucl. Eng. Des. (2012).
- [7]. Tran, H.N., “Fuel burnup performance of an OTTO refueling pebble bed reactor with burnable poison loading”, Prog. Nucl. Energy (2012), doi:10.1016/j.pnucene.2012.05.006.
- [8]. Nagaya, Y., et al., “MVP/GMVP II: General purpose Monte Carlo codes for neutron and photon transport calculations based on continuous energy and multigroup methods”. JAERI- 1348, 2005.
- [9]. Shibata, K., et al., Japanese evaluated nuclear data library version 3 revision-3: JENDL-3.3. J. Nucl. Sci. Tech. 39, 1125. 2002.
- [10]. Boer, B., Kloosterman, J.L., Lathouwers, D., van der Hagen, T.H.J.J., In-core fuel management optimization of pebble-bed reactors. Ann. Nucl. Energy 36, 1049–1058, 2009.

# INVESTIGATION OF NEUTRONIC CHARACTERISTICS OF AN OTTO REFUELING PBMR AND COMPARISON WITH A MULTI-PASS SCHEME

**Abstract:** Neutronic characteristics were investigated for a once-through-then-out (OTTO) refueling scheme based on the 400 MWt pebble bed modular reactor (PBMR) and compared with that of a reference multi-pass scheme. The core was loaded with new fuel pebbles which were designed with  $Gd_2O_3$  particles in a multi-parameter optimization to maximize the average discharged burnup while maintaining a limited power peak and ensuring core criticality. It was found that the OTTO scheme can achieve the maximum average discharged burnup of about 75 GWd/t, i.e. about 21% less than that of the multi-pass scheme (95 GWd/t), while other characteristics are approximate.

**Keywords:** *PBMR, OTTO, power profile, target burnup*