

# THIẾT KẾ KÊNH CHIẾU XẠ PHỤC VỤ THỬ NGHIỆM PHA TẠP ĐƠN TINH THỂ SILIC TRÊN Lò PHẢN ỨNG HẠT NHÂN ĐÀ LẠT

Trang Thế Đạt, Nguyễn Nhi Điền, Phạm Quang Huy, Trần Quốc Dũng  
Viện Nghiên cứu Hạt nhân,  
01 - Nguyễn Tử Lực, thành phố Đà Lạt, tỉnh Lâm Đồng, Việt Nam.  
[trangthedat@gmail.com](mailto:trangthedat@gmail.com)

## Tóm tắt

Kỹ thuật pha tạp đơn tinh thể Silic (NTD-Si) thông qua việc chiếu xạ bằng neutron nhiệt trên các lò phản ứng nghiên cứu trên thế giới đã và đang được triển khai có hiệu quả nhằm tạo ra các thiết bị bán dẫn chất lượng cao. Tại Việt Nam, kỹ thuật chiếu xạ pha tạp đơn tinh thể Silic trên lò phản ứng chưa được triển khai nghiên cứu. Do vậy, việc thiết kế, thử nghiệm kênh chiếu xạ phục vụ NTD-Si trên Lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt (LPU Đà Lạt) là rất cần thiết nhằm có những bước đi ban đầu trong lĩnh vực NTD-Si. Báo cáo này trình bày kết quả thiết kế và thử nghiệm kênh chiếu xạ sử dụng phương pháp màn chắn phục vụ thử nghiệm NTD-Si trên LPU Đà Lạt bằng thực nghiệm và tính toán sử dụng chương trình MCNP5. Các nội dung quan trọng được trình bày bao gồm việc khảo sát phổ và phân bố thông lượng neutron tại vị trí chiếu xạ bằng thực nghiệm và tính toán. Từ các kết quả thu được, kênh chiếu xạ sử dụng phương pháp màn chắn phục vụ thử nghiệm NTD-Si đã được thiết kế, chế tạo và lắp đặt. Việc chiếu xạ thử nghiệm với nhôm, vật liệu thay thế có tính chất tương đương Silic cũng được tiến hành nhằm khẳng định thiết kế tối ưu của kênh chiếu xạ trước khi có thể tiến hành chiếu xạ thử nghiệm trên các thỏi Silic. Các kết quả thu được cho thấy kênh chiếu xạ mới được thiết kế đảm bảo các yêu cầu phục vụ thử nghiệm NTD-Si trên LPU Đà Lạt với độ đồng đều thông lượng neutron nhiệt chiếu xạ nhỏ hơn 5% theo chiều cao và 3% theo bán kính.

**Từ khóa:** *Chiếu xạ pha tạp đơn tinh thể Silic (NTD-Si), MCNP5, lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt (DNRR), phương pháp màn chắn, phương pháp kích hoạt lá dò, kênh chiếu xạ NTD-Si.*

## A DESIGN OF IRRADIATION CHANNEL FOR SILICON TRANSMUTATION DOPING EXPERIMENT AT THE DALAT RESEARCH REACTOR

Trang The Dat, Nguyen Nhi Dien, Pham Quang Huy, Tran Quoc Duong  
Dalat Nuclear Research Institute, Vietnam Atomic Energy Institute  
01-Nguyen Tu Luc, Dalat city, Vietnam  
[trangthedat@gmail.com](mailto:trangthedat@gmail.com)

## Abstract

The silicon transmutation doping (NTD-Si) using thermal neutron irradiation of research reactors has been successfully implementing in the world to produce high-quality semiconductors. In Vietnam, NTD-Si has not been performed yet. Therefore, a design and testing of new irradiation channels for NTD-Si of Dalat Nuclear Research Reactor (DNRR) would be necessary to have some initial steps in the field of NTD-Si. This paper presents a design and testing of new irradiation channel using screen method for NTD-Si of DNRR. The paper content covers neutron spectrum and neutron flux distribution determination of the irradiation hole in the core of DNRR by experiment and calculation using MCNP5 computer code. From the experiment and calculation results, the irradiation channel using screen method for NTD-Si was designed, manufactured and installed in the core of DNRR. Before the irradiation of the silicon ingots can be carried out, aluminum, which has similar neutronic characteristic with silicon ingots, was irradiated in the designed channel to confirm the optimum design. The uniformity of irradiation neutron flux in the designed channel is less than 5% in height and 3% in radius, respectively. These designed values are satisfied the requirements of NTD-Si experiment on the DNRR.

**Keywords:** *NTD-Si, MCNP5, Dalat Nuclear Research Reactor (DNRR), screen method, foil activation, NTD-Si irradiation channel.*

## I. MỞ ĐẦU

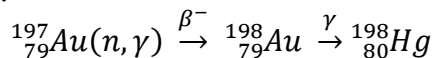
Kỹ thuật pha tạp đơn tinh thể Silic (NTD-Si) thông qua việc chiếu xạ bằng neutron nhiệt trên các lò phản ứng nghiên cứu trên thế giới đã và đang được triển khai có hiệu quả nhằm tạo ra các thiết bị bán dẫn chất lượng cao. Một trong những yêu cầu quan trọng nhất của việc chiếu xạ pha tạp đơn tinh thể Silic là đảm bảo độ đồng đều về thông lượng neutron nhiệt chiếu xạ theo bán kính và chiều cao. Hiện nay, yêu cầu thị trường đối với độ bất đồng đều theo của điện trở suất sau chiếu xạ trong khoảng  $\pm 5 \sim 6\%$  tùy thuộc vào kích thước khối tinh thể [1]. Trong các lò phản ứng nghiên cứu, phân bố neutron trong các kênh chiếu xạ thường không đồng đều theo cả hai hướng trục và bán kính. Nếu không có những sửa đổi về cấu hình kênh chiếu xạ, chỉ một phần nhỏ của kênh chiếu xạ có thể được sử dụng để chiếu xạ NTD-Si, như vậy sẽ không hiệu quả về mặt kinh tế cho chiếu xạ NTD-Si. Do đó, những can thiệp để làm đồng nhất phân bố neutron trên các kênh chiếu xạ là rất cần thiết. Ba phương pháp chính thường được sử dụng để làm đều thông lượng neutron chiếu xạ theo hướng trục được áp dụng phổ biến như phương pháp dịch chuyển qua lại như tại BR2 của Bỉ, hoặc tại RISO của Đan Mạch, phương pháp chiếu xạ tráo đầu tuyến tính trong lò JRR-3M của Nhật, và phương pháp sử dụng màn chắn neutron như trong lò OPAL của Úc hoặc HANARO của Hàn quốc [1]. Các phương pháp nấn đều thông lượng neutron chiếu xạ sẽ được lựa chọn sao cho phù hợp với đặc trưng thiết kế và điều kiện thực tế của mỗi lò phản ứng. Đối với LPU Đà Lạt, phương pháp chiếu xạ sử dụng màn chắn (sử dụng các vật liệu chính là thép không gỉ, nhôm, nước) đã được lựa chọn phục vụ mục đích chiếu xạ thử nghiệm đơn tinh thể Silic. Trên cơ sở đó, kênh chiếu xạ sử dụng các vật liệu màn chắn khác nhau đã được tính toán, thiết kế, chế tạo và lắp đặt. Sau khi đã được đánh giá, hiệu lực hóa thông qua việc so sánh kết quả tính toán với số liệu thực nghiệm đối với vùng hoạt dùng hoàn toàn nhiên liệu độ giàu thấp, chương trình MCNP5 được sử dụng chính thức cho tính toán. Nội dung chính được trình bày trong báo cáo này liên quan đến kết quả tính toán thiết kế, thực nghiệm khảo sát phân bố thông lượng neutron trên kênh chiếu xạ trước và sau khi đã chế tạo cho mục đích chiếu xạ thử nghiệm các đơn tinh thể Silic trên LPU Đà Lạt. Trước khi thực hiện chiếu xạ trên các đơn tinh thể Silic, việc khảo sát thực nghiệm trên vật liệu thay thế cần được thực hiện nhằm khẳng định thiết kế phù hợp của các kênh chiếu xạ về phân bố thông lượng neutron chiếu xạ. Vật liệu thử nghiệm chiếu xạ thay thế Silic được chọn là nhôm (loại 6061) với đặc trưng lý tính cũng như thời gian bán rã phù hợp cho việc khảo sát. Những kinh nghiệm và kết quả thu được trong quá trình thiết kế, chế tạo, khảo sát đặc trưng kênh chiếu xạ là một trong những bước rất quan trọng để phục vụ chiếu xạ thử nghiệm đơn tinh thể Silic trên LPU Đà Lạt.

## II. NỘI DUNG

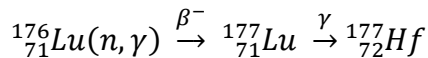
### II.1. Đo đạc thực nghiệm và mô phỏng Monte-Carlo bằng MCNP5 phổ và phân bố thông lượng neutron tại vị trí chiếu xạ dự kiến.

Một trong số các nhiệm vụ trọng tâm của việc nghiên cứu chiếu xạ thử nghiệm Silic trên LPU Đà Lạt là khảo sát các thông số về phổ và phân bố thông lượng neutron tại vị trí chiếu xạ bằng thực nghiệm và tính toán lý thuyết. Các kết quả thu được từ thực nghiệm xác định phổ và phân bố thông lượng neutron sẽ là cơ sở cho các bước tính toán và thiết kế kênh chiếu xạ.

Để tiến hành việc đo thông lượng neutron nhiệt tuyệt đối, ta sử dụng lá dò vàng với phản ứng bắt neutron nhiệt/trên nhiệt của Au-197 như sau:



Để đo được phân bố thông lượng neutron nhiệt tại bẫy neutron, các lá dò Lu-176 sẽ được sử dụng. Phản ứng của Lu-176 với neutron như sau:



Hạt nhân bia được chiếu xạ bằng chùm neutron sẽ trở thành hạt nhân phóng xạ. Thông lượng neutron nhiệt  $\Phi_{th}$  phụ thuộc theo tốc độ phản ứng trong suốt quá trình chiếu xạ R được thể hiện:

$$\Phi_{th} = \frac{R}{\sigma_{a.th} N_s} \quad (1.1)$$

Trong đó:

$\Phi_{th}$  - Thông lượng vùng neutron nhiệt. (n/cm<sup>2</sup>.s)

$\sigma_{a.th}$  - Tiết diện bắt neutron trên nhiệt của hạt nhân bia. (cm<sup>-2</sup>)

$N_s$  - Số hạt nhân bia.

Hoạt độ của lá dò  $A(T, \tau)$  sau quá trình chiếu xạ sẽ giảm dần theo thời gian  $\tau$  (s) theo hàm mũ:

$$A(T, \tau) = A(T). e^{-\lambda.\tau} = R(1 - e^{-\lambda.\tau})e^{-\lambda.\tau} \quad (1.2)$$

Trong đó:

$\lambda$  - hằng số phân rã của hạt nhân sau kích hoạt. (s<sup>-1</sup>)

$t$  - thời gian. (s)

$T$  (s) là thời gian chiếu xạ trong lò.

Kết hợp công thức (1.1) và (1.2) cũng như những tính toán chi tiết cho từng phần tử ta tính được công thức tính thông lượng neutron nhiệt:

$$\Phi_{th} = \frac{A(T,t).e^{\lambda t}}{1-e^{-\lambda T}} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{T_n}{T_0}} \frac{1}{\sigma_{0.act}} \frac{1}{G_{th}} \frac{A}{m\alpha N_A} \frac{1}{G} \quad (1.3)$$

Trong đó:

$T_0 = 293$  K (20°C)

$T_n$  - nhiệt độ tuyệt đối của neutron. (K)

$\sigma_{0.act}$  - tiết diện kích hoạt tương ứng với vận tốc  $v_0 = 2200$  m/s (tại nhiệt độ  $T_0 = 293$  K). (cm<sup>-2</sup>)

$G_{th}$  - hệ số tự che chắn neutron nhiệt

$m$  - khối lượng mẫu (g).

$\alpha$  - độ giàu đồng vị.

$N_A = 6,02.10^{23}$  - hằng số Avogadro.

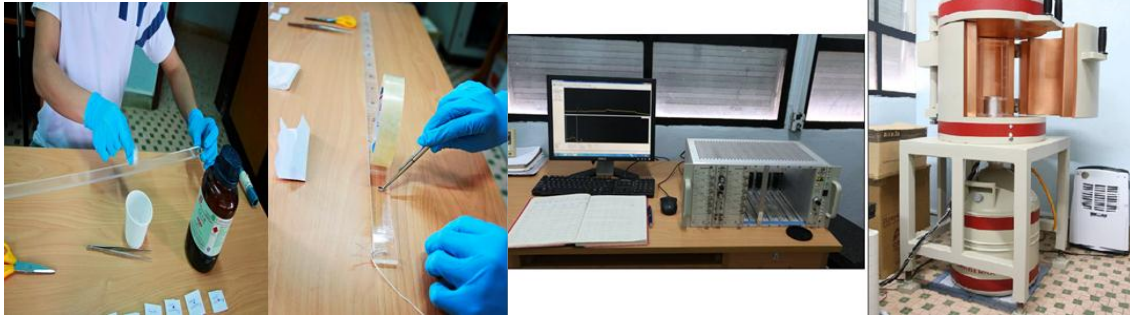
$G$  - Tỷ lệ pha của nguyên tố trong lá dò.

Phương pháp đo phổ neutron dựa trên các phản ứng kích hoạt một tập lá dò và xác định tốc độ phân rã (hay hoạt độ) của chúng. Biểu diễn toán học tổng quát của quá trình này phải xét thông lượng vi phân như một hàm của năng lượng và thời gian  $\varphi(E, t)$ . Các lá dò trước khi chiếu trong lò phản ứng sẽ được chuẩn bị theo trình tự các bước như sau:

- Các lá dò được cắt sao cho tương đồng về hình dạng, kích thước.
- Cân khối lượng các lá dò bằng cân điện tử có độ chính xác cao.
- Dùng cồn lau các lá dò nhằm loại bỏ các tạp chất cơ học bám dính.
- Lau cồn làm sạch giá giữ mẫu bằng thủy tinh hữu cơ (polyethylene), trên giá giữ mẫu có đánh dấu vị trí dán lá dò với các kích thước chính xác đến mm.
- Dán các lá dò lên giá giữ mẫu. Các lá dò bọc Cd được dán cách lá dò trần ít nhất là 10 cm để tránh sự suy giảm thông lượng. Quy trình chuẩn bị giá giữ mẫu và dán lá dò được trình bày trong Hình 1a.

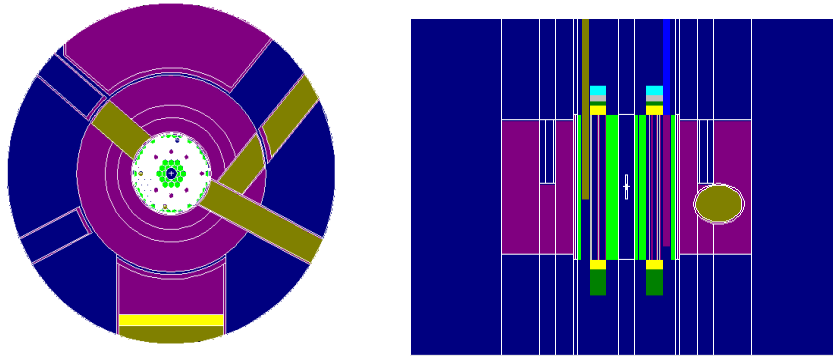
- Đưa giá giữ mẫu vào kênh thực nghiệm để chuẩn bị chiếu xạ. Tùy vào phép đo phân bố thông lượng hay phép đo phổ neutron mà ta chiếu xạ ở các mức công suất khác nhau với thời gian từ 10-20 phút. Sau thời gian chiếu xạ, giá giữ mẫu được lấy ra khỏi vùng hoạt lò phản ứng nhưng vẫn được giữ trong bể lò phản ứng. Giá giữ mẫu được đưa đến phòng thí nghiệm sau 1-2 ngày, các mẫu được lấy ra và lần lượt được đo trên hệ phổ kế gamma của phòng Vật lý & Kỹ thuật Lò, Trung tâm LPU (Hình 1b).

Các nội dung liên quan đến nguyên lý xác định thông lượng được trình bày dưới đây được tham khảo chính từ các nguồn [2], [3].



**Hình 1.** (a) Quy trình làm sạch giá giữ mẫu và dán các lá dò; (b) Hệ phổ kế gamma của phòng Vật lý & Kỹ thuật Lò, Trung tâm LPU.

Sau khi đã được đánh giá, hiệu lực hóa thông qua việc so sánh kết quả tính toán với số liệu thực nghiệm đối với vùng hoạt dùng hoàn toàn nhiên liệu độ giàu thấp [5], chương trình MCNP5 được sử dụng chính thức cho tính toán quản lý vùng hoạt và nhiên liệu cùng với thư viện tính toán ENDF/B 7.0. Sai khác giữa kết quả tính toán và thực nghiệm đối với các thông số như độ phản ứng dự trữ, độ hiệu dụng các thanh điều khiển, các bó nhiên liệu chỉ trong khoảng từ 4 đến 6% [4], [5]. Như vậy, chương trình MCNP5 hoàn toàn đáp ứng tốt nhu cầu về tính toán Vật Lý cho LPU hạt nhân Đà Lạt. Mô hình tính toán LPU hạt nhân Đà Lạt bằng chương trình MCNP5 được trình bày ở Hình 2 [3],[4].



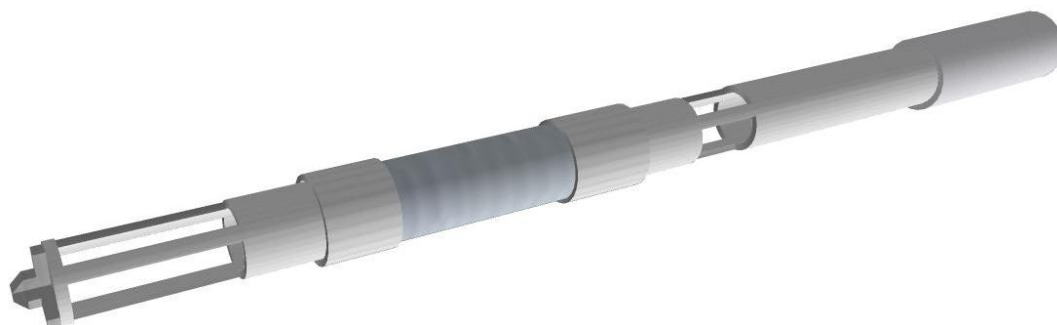
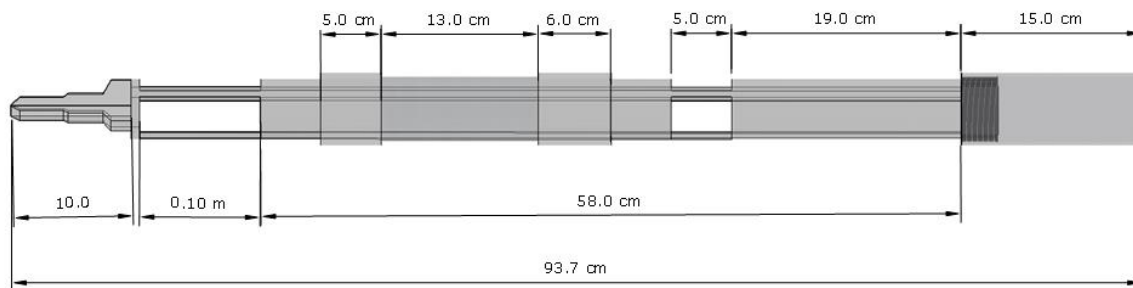
**Hình 2.** Mô hình tính toán LPU hạt nhân Đà Lạt bằng chương trình MCNP5

## II.2. Tính toán thiết kế, lắp đặt kênh chiếu xạ pha tạp đơn tinh thể Silic.

Với kích thước đường kính 65mm chiều cao 600mm và xung quanh có đặt các khối berily (các khối đặc và 12 thanh berily), bẫy neutron của LPU Đà Lạt hiện tại cần được thiết kế lại cho phù hợp với mục đích chiếu xạ thử nghiệm pha tạp đơn tinh thể Silic. Việc tính toán, thiết kế cấu hình các cốc chiếu mẫu tại đây được thực hiện theo phương án đảm bảo các tiêu chí như sau:

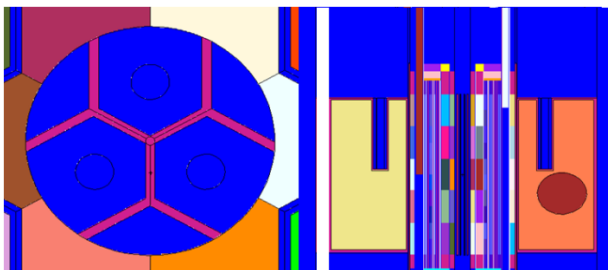
- Đảm bảo an toàn hạt nhân (không làm thay đổi độ phản ứng lớn, vi phạm các giá trị an toàn hạt nhân của LPU).
- Thuận lợi trong thao tác tháo lắp kênh chiếu tại đây, đảm bảo an toàn bức xạ cho người thao tác, và
- Giảm thiểu lượng thải phóng xạ rắn sinh ra sau khi chiếu xạ, có thể tái sử dụng nhiều lần các kênh chiếu mẫu (sử dụng vật liệu chủ yếu là nhôm loại 6061).

Để đảm bảo các yêu cầu về độ bất đồng đều phân bố thông lượng neutron nhiệt chiếu xạ theo chiều cao và bán kính thì kênh chiếu xạ sử dụng phương pháp màn chắn đã được lựa chọn. Thông tin về thiết kế của cốc chiếu được trình bày như trong Hình 3.

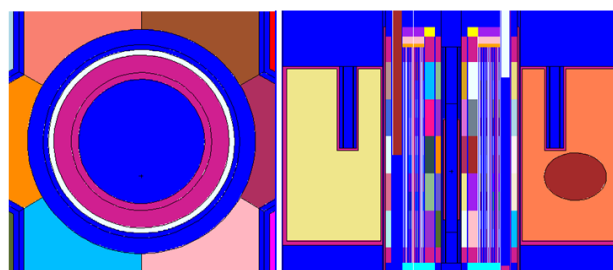


**Hình 3.** Thiết kế của cốc chiếu mẫu mới sử dụng màn chắn cho mục đích chiếu xạ thử nghiệm đơn tinh thể Silic

Các tính toán an toàn hạt nhân cho cốc chiếu đã thiết kế sử dụng chương trình MCNP5 trước khi chế tạo cốc chiếu sử dụng màn chắn đã được thực hiện. Các kết quả tính cho trường hợp so sánh độ phản ứng đưa vào của cấu hình có cốc chiếu mẫu hiện tại đang dùng và cốc chiếu mẫu mới chế tạo với hốc nước tại bể neutron. Mô hình tính toán được trình bày trong Hình 4 và Hình 5.



**Hình 4.** Mô hình tính của cốc chiếu cũ hiện đang sử dụng tại bể



**Hình 5.** Mô hình tính của cốc chiếu dùng màn chắn

### II.3. Chế tạo, lắp đặt và chiếu xạ thử nghiệm để khảo sát phổ và phân bố thông lượng neutron trên kênh chiếu xạ đã thiết kế.

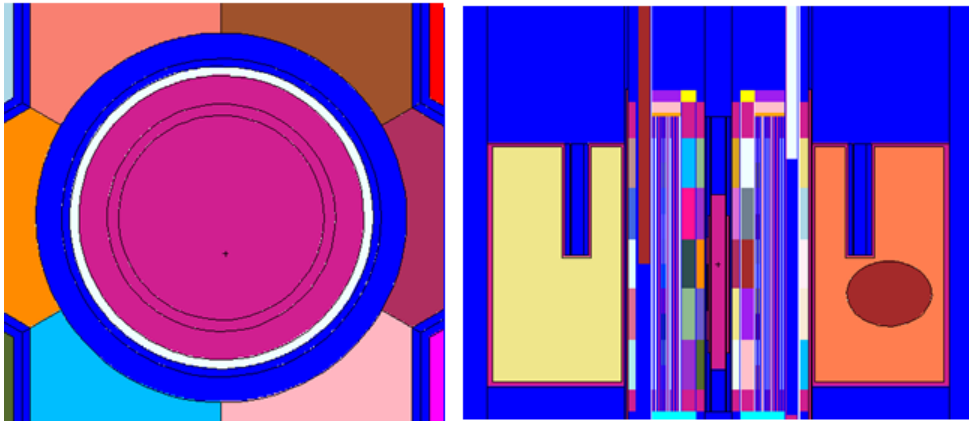
Kích thước của kênh chiếu cũng như các lớp màn chắn sử dụng để nắn đều thông lượng đã được tính toán thiết kế, chế tạo và hiệu chỉnh nhiều lần để có kích thước phù hợp với cấu hình lắp đặt tại bể, đảm bảo về mặt an toàn hạt nhân và an toàn phóng xạ khi thực hiện thao tác tháo lắp kênh chiếu. Các tính toán cho cấu hình kênh chiếu được thực hiện qua các tính toán mô phỏng sử dụng chương trình MCNP. Kênh chiếu mới sử dụng phương pháp màn chắn được thiết kế, chế tạo cho mục đích chiếu xạ thử nghiệm pha tạp đơn tinh thể Silic trên lò Đà Lạt được chế tạo (Hình 6).



**Hình 6.** Kênh chiếu mẫu sử dụng phương pháp màn chắn

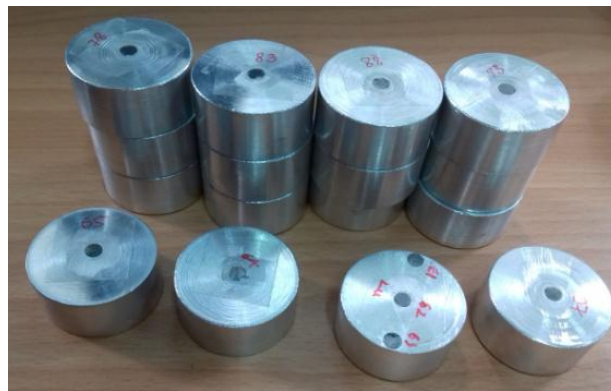
Các tính toán kiểm tra trước thực nghiệm cũng được tiến hành cho trường hợp đưa vào kênh chiếu mẫu mới chế tạo 14 thỏi nhôm (được cắt có hình dạng và kích thước hoàn toàn giống với các thỏi đơn tinh thể Silic) loại 6061, mỗi thỏi có đường kính khoảng 3,8cm và chiều cao 2cm.

Hình 7 trình bày mô hình tính toán trong MCNP trước khi đưa kênh chiếu xạ có chứa các thỏi nhôm vào lắp đặt tại bể. Các kết quả tính toán và thực nghiệm đều cho thấy kênh chiếu mẫu sử dụng màn chắn mới chế tạo cho mục đích chiếu xạ thử nghiệm đơn tinh thể Silic là phù hợp và không vi phạm các giá trị an toàn vận hành của Lò phản ứng.



**Hình 7.** Mô hình tính của kênh chiếu mới với 14 thỏi nhôm

Phân bố thông lượng và phổ neutron trên kênh chiếu đã thiết kế được xác định bằng phương pháp kích hoạt lá dò (Các thỏi nhôm có dán lá dò Lu ở Hình 8 sẽ được đưa vào các kênh chiếu mẫu mới chế tạo và đưa vào chiếu xạ tại bể neutron) và tính toán dùng chương trình MCNP5.



**Hình 8.** Các thỏi nhôm có dán lá dò Lu

## II.2. KẾT QUẢ

### II.2.1. Phổ và phân bố thông lượng neutron thông qua đo đạc thực nghiệm và mô phỏng Monte-Carlo bằng MCNP5 tại vị trí chiếu xạ dự kiến.

Phổ neutron ban đầu tại bể neutron tính từ chương trình MCNP và phổ thu được sau khi hiệu chỉnh với thực nghiệm bằng chương trình hiệu chỉnh phổ SANDBP hầu như trùng khớp với nhau như vậy chương trình MCNP tính rất tốt phổ neutron. Kết quả quy về 3 nhóm năng lượng (trình bày ở Bảng 1) cho thấy thông lượng nhiệt không khác nhiều so với kết quả đo bằng phương pháp kích hoạt lá dò vàng.

Thông lượng (n/cm <sup>2</sup> .s)	MCNP	SANDBP
Nhiệt	2,24.10 <sup>13</sup>	2,29.10 <sup>13</sup>
Trên nhiệt	6,52.10 <sup>12</sup>	6,22.10 <sup>12</sup>
Nhanh	2,56.10 <sup>12</sup>	2,64.10 <sup>12</sup>

**Bảng 1.** Thông lượng tích phân thu về 3 nhóm

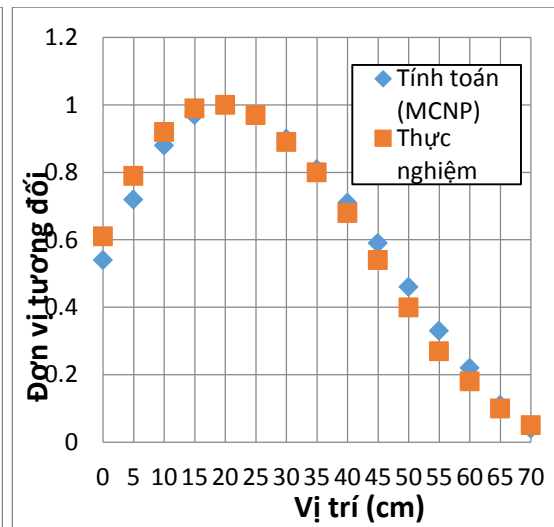
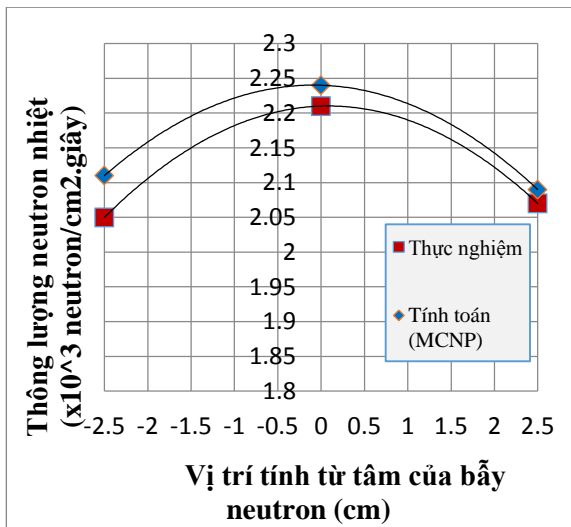
Khoảng cách (cm)	Thực nghiệm	Tính toán (MCNP)	Chênh lệch giữa thực nghiệm và tính toán (%)
0	0,61	0,54	11.48
5	0,79	0,72	8.86
10	0,92	0,88	4.35
15	0,99	0,97	2.02
20	1,00	1,00	0.00
25	0,97	0,97	0.00
30	0,89	0,90	1.12
35	0,80	0,81	1.25
40	0,68	0,71	4.41
45	0,54	0,59	9.26
50	0,40	0,46	15.00
55	0,27	0,33	22.22
60	0,18	0,22	22.22
65	0,10	0,11	10.00
70	0,05	0,04	20.00

**Bảng 2.** Kết quả tính toán và thực nghiệm xác định phân bố thông lượng theo chiều cao tại bể (đơn vị tương đối)

Vị trí (cm)	-2.5	0	2.5
Thực nghiệm	2.05	2.21	2.07
Tính toán (MCNP)	2.114	2.24	2.092

\*Giá trị thông lượng x10<sup>13</sup> neutron/cm<sup>2</sup>.giây

**Bảng 3.** Kết quả tính toán và thực nghiệm xác định phân bố thông lượng theo chiều bán kính.



**Hình 9.** Kết quả xác định phân bố thông lượng neutron nhiệt theo chiều bán kính tại bể (vị trí 0cm tính từ tâm bể)

**Hình 10.** So sánh kết quả tính toán và thực nghiệm xác định phân bố thông lượng neutron theo chiều cao tại bể.

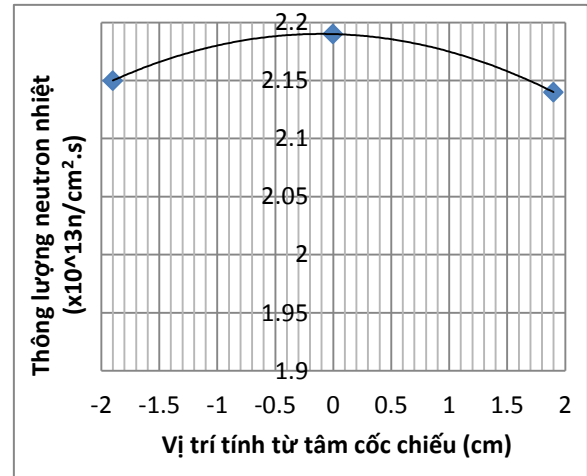
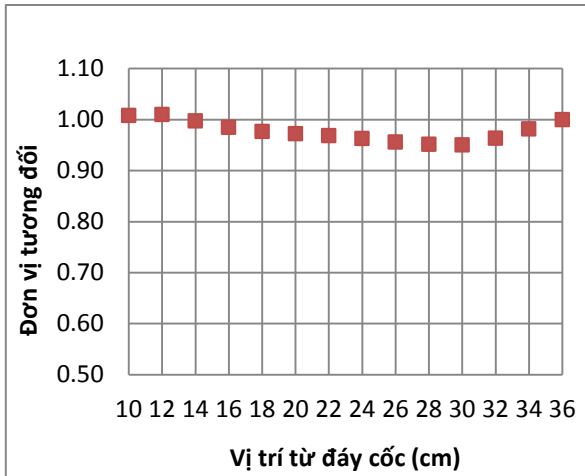
Hình 9 và Bảng 3 trình bày kết quả tính toán và thực nghiệm xác định phân bố thông lượng neutron theo chiều bán kính tại bể. Kết quả thực nghiệm và tính toán đều cho thấy độ lệch thông lượng nhiệt theo chiều bán kính trong bể đều nằm trong khoảng từ 5-7%. Về phân bố thông lượng neutron nhiệt theo chiều cao như trình bày trong Bảng 2 và Hình 10, ta thấy kết quả thực nghiệm khá phù hợp với kết quả tính toán. Thông lượng neutron đạt cực đại tại vị trí 20cm tính từ đáy vùng hoạt. Do có sự ảnh hưởng từ vị trí các thanh điều khiển nên thông lượng cực đại có xu hướng bị đẩy xuống phía dưới của bể neutron. Phân bố thông lượng phía nửa trên 40-65cm của bể có sự khác biệt đáng kể giữa tính toán và thực nghiệm, lên đến hơn 20 %, điều này có thể do đóng góp của sai số vị trí thanh điều khiển. Tuy nhiên, do vùng chiếu xạ thử nghiệm đơn tinh thể Silic dự kiến trong vùng từ 5cm đến 45cm có kết hợp với các phương pháp nắn đều thông lượng chiếu xạ nên kết quả khảo sát như đã trình bày là có thể áp dụng trong việc tính toán các phương án thiết kế kênh chiếu xạ.

### II.2.2. Kết quả tính toán và thực nghiệm xác định phổ, phân bố thông lượng neutron và tính toán an toàn hạt nhân trên các kênh chiếu mới chế tạo.

Các tính toán an toàn hạt nhân cho cốc chiếu đã thiết kế sử dụng chương trình MCNP trước khi chế tạo cốc chiếu sử dụng màn chắn cho thấy cốc chiếu mẫu hiện tại đang dùng đưa vào độ phản ứng dương khoảng 21 cents trong khi cốc chiếu mẫu mới chế tạo đưa vào độ phản ứng dương khoảng 15 cents so với hóc nước tại bể. Các kết quả tính toán trước thực nghiệm đều cho thấy cốc chiếu mẫu sử dụng màn chắn cho mục đích chiếu xạ thử nghiệm đơn tinh thể Silic là phù hợp và không vi phạm các giá trị an toàn vận hành, độ phản ứng dương đưa vào của cốc chiếu là rất nhỏ, không ảnh hưởng đến dự trữ độ phản ứng 8,6 \$ của lò phản ứng (số liệu đo năm 2018) và giá trị dự trữ đập là 2,5 \$ (2%  $\Delta k/k$ ).[5]

Hình 11 và Hình 12 trình bày kết quả tính toán phân bố thông lượng neutron theo bán kính và chiều cao tại cốc chiếu mẫu sử dụng màn chắn cho mục đích chiếu xạ thử nghiệm đơn tinh thể Silic. Độ bất đồng đều thông lượng theo chiều bán kính là khoảng 2% và lớn nhất theo chiều cao là 5% (vị trí 36cm, các vị trí khác có giá trị lệch nhỏ hơn nhiều), kết quả tính toán thiết kế như trên phù hợp so với giá trị yêu cầu cho chiếu xạ thử nghiệm đơn tinh thể Silic trên lò Đà Lạt là 5%. [6]

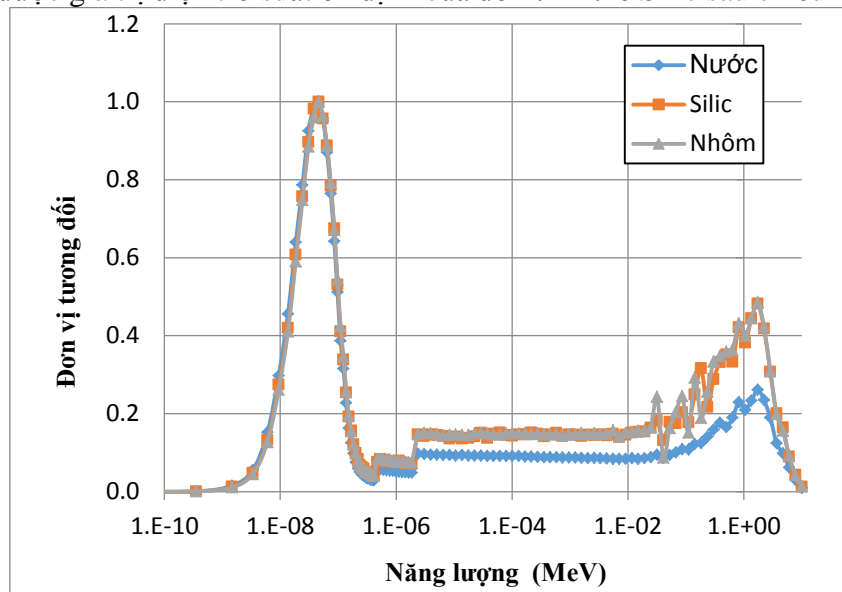




**Hình 11.** Phân bố thông lượng theo chiều cao tại bể dùng màn chắn

**Hình 12.** Phân bố thông lượng theo chiều bán kính tại bể dùng màn chắn

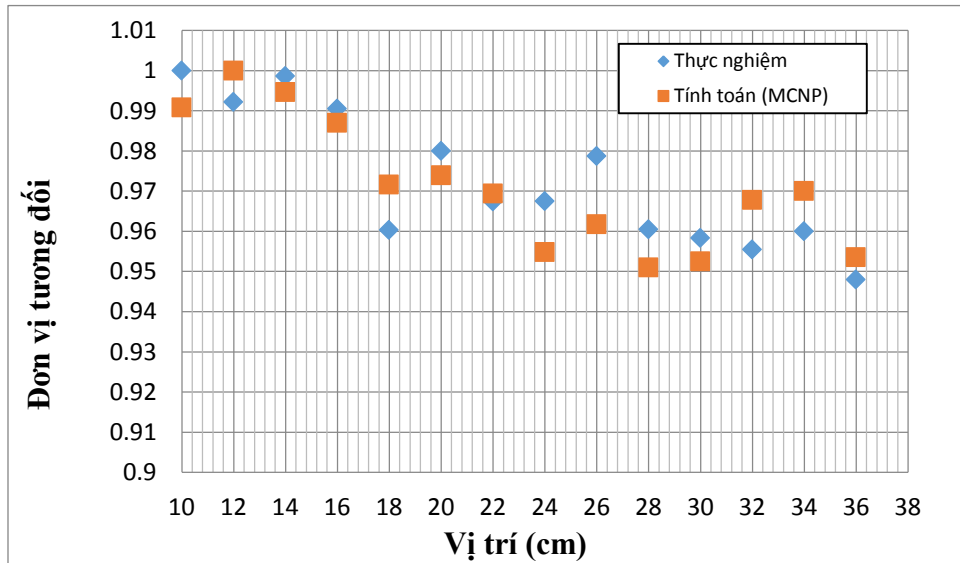
Hình 13 trình bày kết quả tính toán phổ neutron cho cốc chiếu mẫu sử dụng màn chắn với các trường hợp chứa nước, nhôm và Silic. Có thể nhận thấy do vật liệu nhôm hoặc Silic chiếm chỗ của nước nên vùng neutron nhanh của cấu hình cốc chiếu chứa nhôm và Silic cao hơn so với cấu hình cốc chiếu chứa nước. Những ảnh hưởng của neutron nhanh trên mạng tinh thể Silic có thể được giảm thiểu qua quá trình nung hoặc xử lý nhiệt sau chiếu xạ. Tuy nhiên, cần khảo sát nhiệt độ và thời gian nung phù hợp để giảm thiểu ảnh hưởng của neutron nhanh trên mạng tinh thể Silic và có được giá trị điện trở suất ổn định của đơn tinh thể Silic sau chiếu xạ.[6]



**Hình 13.** Kết quả tính phổ neutron tại cốc chứa sử dụng phương pháp màn chắn với vật liệu nước, nhôm và Silic

Kết quả thực nghiệm và tính toán trình bày ở Hình 14 và Bảng 4 đều cho thấy độ lệch thông lượng nhiệt theo chiều cao tại vùng chiếu xạ đều nằm trong khoảng dưới 5%. Phân bố thông lượng neutron nhiệt theo chiều cao khá phù hợp với kết quả tính toán. Thông lượng neutron nhiệt đạt cực đại tại vị trí 10cm tính từ đáy cốc chiếu trong thực nghiệm và khoảng 12cm tính từ đáy cốc chiếu trong tính toán. Phân bố thông lượng phía nửa trên từ 30-34cm của cốc

chiều có xu hướng tăng lên một chút nhưng vẫn dưới giá trị mong muốn 5% trong cả tính toán và thực nghiệm do việc không sử dụng lớp màn chắn nhôm phía trên như thiết kế ban đầu để thuận tiện trong việc tháo lớp màn chắn thép không rỉ sau chiếu xạ. Từ các kết quả thu được, vùng chiếu xạ từ 10cm đến 35cm theo chiều cao trong cốc chiếu sử dụng màn chắn là phù hợp cho việc chiếu xạ thử nghiệm đơn tinh thể Silic. [6]



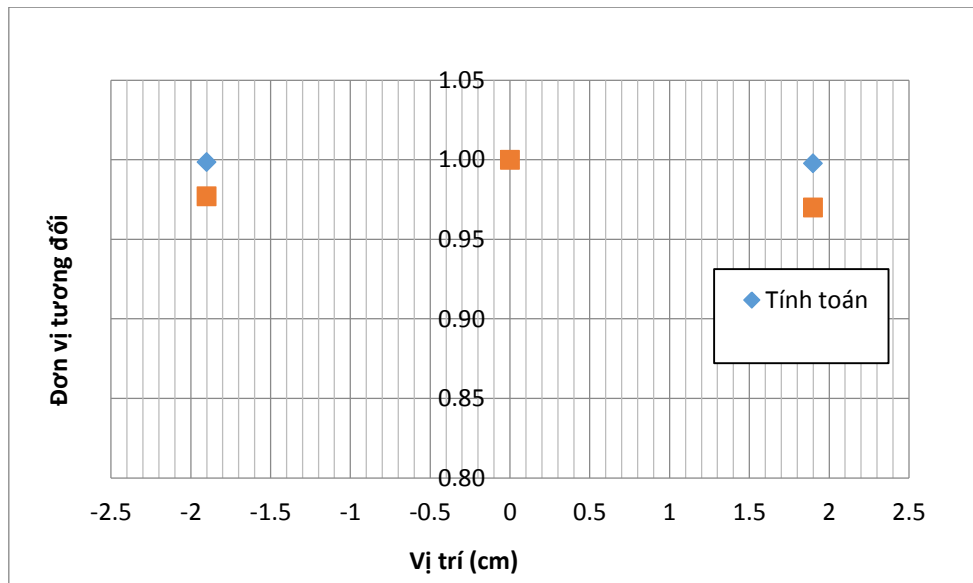
**Hình 14.** Kết quả xác định phân bố thông lượng neutron theo hướng trục tại cốc chứa sử dụng phương pháp màn chắn.

Vị trí (cm)	Thực nghiệm	Tính toán (MCNP)
10	1.000	0.991
12	0.992	1.000
14	0.999	0.995
16	0.991	0.987
18	0.960	0.972
20	0.980	0.974
22	0.967	0.969
24	0.968	0.955
26	0.979	0.962
28	0.961	0.951
30	0.958	0.953
32	0.955	0.968
34	0.960	0.971
36	0.948	0.954

**Bảng 4.** Phân bố thông lượng neutron theo hướng trục tại cốc chứa sử dụng phương pháp màn chắn.

Hình 15 và Bảng 5 cho thấy độ lệch thông lượng nhiệt theo chiều bán kính tại vùng chiếu xạ đều nằm trong khoảng dưới 3% trong thực nghiệm và khoảng 1% trong tính toán. Phân bố thông lượng neutron nhiệt theo bán kính khá phù hợp giữa kết quả tính toán và thực nghiệm. Giá trị thông lượng neutron nhiệt cực đại giảm xuống  $1.31 \times 10^{13}$  neutron/cm<sup>2</sup>.sec trong cốc chiếu do

hiệu ứng hấp thụ từ lớp màn chắn và các thời nhô chiếm diện tích của nước trong cốc chiếu. Từ các kết quả thu được, có thể khẳng định bất đồng đều thông lượng theo hướng bán kính cũng như giá trị thông lượng chiếu xạ trong cốc chiếu sử dụng màn chắn là phù hợp cho việc chiếu xạ thử nghiệm đơn tinh thể Silic [6].



**Hình 15.** Kết quả xác định phân bố thông lượng neutron theo hướng bán kính tại cốc chứa sử dụng phương pháp màn chắn.

Thông lượng $\times 10^{13}$ neutron/cm <sup>2</sup> .sec			
Vị trí (cm)	Bên trái (-1.9cm)	Giữa (0 cm)	Bên phải (+1.9cm)
10	1.30	1.30	1.31
12	1.31	1.31	1.30
20	1.25	1.27	1.26
30	1.24	1.25	1.24

**Bảng 5.** Kết quả tính toán phân bố thông lượng theo chiều bán kính tại cốc chứa sử dụng phương pháp màn chắn

### **III.KẾT LUẬN**

Kênh chiếu xạ sử dụng các vật liệu màn chắn khác nhau đã được tính toán, thiết kế, chế tạo và lắp đặt phục vụ chiếu xạ thử nghiệm NTD-Si trên LPU Đà Lạt. Việc chiếu xạ thử nghiệm với nhôm, vật liệu thay thế có tính chất tương đương Silic cũng được tiến hành nhằm khẳng định thiết kế phù hợp của kênh chiếu xạ trước khi có thể tiến hành chiếu xạ thử nghiệm trên các thỏi Silic. Các kết quả tính toán và thực nghiệm cho thấy kênh chiếu xạ mới được thiết kế với độ đồng đều thông lượng neutron nhiệt chiếu xạ nhỏ hơn 5% theo chiều cao và 3% theo bán kính. Thông qua các kết quả thu được, có thể khẳng định việc thiết kế, lắp đặt kênh chiếu xạ đáp ứng tốt cho việc nghiên cứu, chiếu xạ thử nghiệm pha tạp đơn tinh thể Silic trên LPU hạt nhân Đà Lạt. Quá trình thiết kế, thử nghiệm và lắp đặt kênh chiếu xạ cũng là những bước quan trọng để tích lũy kinh nghiệm cho việc triển khai NTD trên lò phản ứng nghiên cứu mới trong tương lai.

#### **TÀI LIỆU THAM KHẢO**

1. International Atomic Energy Agency-TECDOC-1681, “Neutron Transmutation Doping of Silicon at Research Reactors”, IAEA, Vienna, (2012).
2. International Atomic Energy Agency, “Regional training course calculation and measurement of neutron flux spectrum for research reactors”, Serpong, Indonesia, (1993).
3. Lê Vĩnh Vinh (2014), “Hướng dẫn thực hành và quy trình thực hiện các thí nghiệm đo đặc thông lượng và phổ neutron sử dụng phương pháp kích hoạt các lá dò”, Báo cáo chuyên đề, Viện nghiên cứu hạt nhân Đà Lạt, (2014).
4. Bảng tra cứu độ phản ứng dự trữ theo vị trí các thanh điều khiển của LPU hạt nhân Đà Lạt, 2016.
5. Viện nghiên cứu hạt nhân Đà Lạt, “Báo cáo phân tích an toàn lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt”, (2012).
6. Thực nghiệm và tính toán khảo sát, đánh giá kênh chiếu xạ sử dụng chiếu xạ Silic, Báo cáo chuyên đề, Viện nghiên cứu hạt nhân Đà Lạt, (2017).