

# 中子活化程序ABURN在核装置停堆剂量率计算中的应用研究

赵晓泽, 张竞宇\*, 谭琳, 肖懿鑫, 王娟娟, 于虓, 倪王慕鸿

华北电力大学核科学与工程学院, 北京

收稿日期: 2022年11月10日; 录用日期: 2023年1月5日; 发布日期: 2023年1月12日

## 摘要

在核装置中, 活化区产生的大量中子导致装置内的材料活化严重, 停堆后装置周围的放射性水平依然较强, 为装置的维修维护带来了困难。分析核装置中放射性核素的活度、衰变热、光子剂量等参数是屏蔽计算中不可或缺的工作, 同时精确的活化计算和停堆后的光子剂量计算, 对于核装置检修和人员辐射安全也有非常重要的意义。ABURN程序是由华北电力大学核设施源项研究组自主研发的中子活化计算程序, 可以进行活化计算、衰变计算、不确定性和敏感性分析、核素径迹追踪和贡献统计, 可以输出多种工况下的核素原子数量、质量、活度、衰变热、 $\gamma$ 谱等关键参数。本文基于国际上主流的停堆剂量率计算方法——严格两步法(R2S), 实现了自主化活化程序ABURN和蒙卡程序MCNP的耦合, 开发了中子输运计算、材料活化计算和光子输运计算的自动耦合接口程序, 进而得到核装置周围的停堆剂量率分布。本文利用ITER-T426实验装置模型进行基准验证, 将ABURN程序计算结果与FISPACT程序计算结果以及实验测量结果进行了对比, 结果一致性较好, 表明了ABURN程序在核装置停堆剂量率计算中的可用性。

## 关键词

ABURN程序, 中子活化计算, 停堆剂量率, 严格两步法

# Application Research of Neutron Activation Code ABURN in Shutdown Dose Rate Calculation of Nuclear Installation

Xiaoze Zhao, Jingyu Zhang\*, Lin Tan, Yixin Xiao, Juanjuan Wang, Xiao Yu, Wangmuhong Ni

School of Nuclear Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing

Received: Nov. 10<sup>th</sup>, 2022; accepted: Jan. 5<sup>th</sup>, 2023; published: Jan. 12<sup>th</sup>, 2023

\*通讯作者。

## Abstract

In nuclear devices, the large number of neutrons produced by the core leads to severe activation of the materials in the device, and the radioactivity level around the device remains high after the reactor shutdown, making it difficult for the maintenance of the device. The analysis of activation problems such as activity, decay heat and photon dose of radionuclides in fusion devices is an indispensable study in shielding calculations, and accurate activation calculations and photon dose calculations after reactor shutdown are also of great importance for reactor maintenance and radiation safety of personnel. ABURN program is an activation calculation program developed by the source project team of North China Electric Power University, which uses TTA and CRAM. It can perform activation calculation, decay calculation, uncertainty and sensitivity analysis, nuclide tracing and pulse calculation, and can output key parameters such as nuclide atomic number, activity, decay heat and  $\gamma$  spectrum under various operating conditions. In this paper, based on the international mainstream dose rate calculation method for deactivation, the rigorous two-step method (R2S), the coupling of the autonomous activation procedure ABURN and Monte Carlo procedure MCNP is realized, and the automatic coupling interface of neutron transport calculation, material activation calculation and photon transport calculation is developed, which leads to the deactivation dose rate distribution around the nuclear device. The results of the ABURN are compared with those of the FISPACT and experimental measurements using the ITER-T426 experimental device model for benchmark validation, and the small deviations are within acceptable limits, the usability of the ABURN program in shutdown dose rate calculate of the deactivation pile is verified.

## Keywords

**ABURN Code, Neutron Activation Calculation, Shutdown Dose Rate, Strict Two-Step Method**

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

当中子与高能离子与物质作用时，稳定的核素可能被转化为不稳定的核素，成为衰变光子的来源。随后的衰变光子对参与维修活动的工人和远程操作的设备构成潜在的风险，因此必须对其辐照剂量进行分析，相关计算分析工作需要借助中子输运程序和中子活化程序开展。

在核装置中，源项屏蔽计算的重要环节是对放射性核素活度、衰变热、光子剂量等活化问题的分析。目前国际上对于光子活化剂量计算主要有三种方法：转换因子法[1]、直接一步法(DIS) [2]和严格两步法(R2S) [3] [4]。转换因子法是在ITER设计初期采用的方法，但通过该方法计算的停堆剂量率结果误差很大，难以满足工程设计的需求；直接一步法只关注材料中贡献最大的几种核素，且只能进行一次衰变计算，计算效率高但计算精度较差；严格两步法考虑全面，计算精度高但比较耗时。本文选取计算精度高的停堆剂量率计算方法——严格两步法(R2S)，实现了自主活化程序和蒙卡程序的耦合，开发了中子输运计算、材料活化计算和光子输运计算的自动耦合接口程序。本文通过对华北电力大学核设施源项研究组开发的中子活化程序(ABURN) [5]和蒙卡程序(MCNP)的耦合测试，验证了ABURN程序在核装置停堆剂量率计算中的可行性。

## 2. 方法和程序

### 2.1. 中子活化计算方法和程序

中子活化计算在核装置停堆剂量率计算中有十分关键的作用，在给定辐射条件和材料的情况下，活化计算能够预测材料的成分、放射性活度等重要参数随时间演化特征。活化计算的核心是通过求解核素平衡方程获得各核素的原子核数目[6]。

$$\frac{dN_i}{dt} = \sum_{j \neq i} (\lambda_{i,j} + \sigma_{i,j}\phi(t))N_j - (\lambda_i + \sigma_i\phi(t))N_i \quad (1)$$

其中：

$N_i$  是  $t$  时刻核素  $i$  的原子核数目；

$\Phi$  是辐照粒子的通量，单位  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ；

$\lambda_{i,j}$  是核素  $j$  衰变产生核素  $i$  的衰变常数(单位  $\text{s}^{-1}$ )， $\sigma_{i,j}$  是核素  $j$  核反应产生核素  $i$  的微观截面(单位  $\text{cm}^2$ )， $\lambda_i$  是核素  $i$  的衰变常数(单位  $\text{s}^{-1}$ )， $\sigma_i$  是核素  $i$  的微观截面(单位  $\text{cm}^2$ )。

华北电力大学核设施源项研究组自主开发了中子活化计算程序 ABURN，它采用了基于解析求解的线性子链(TTA)高精度计算方法。ABURN 程序能够计算活化产物的存量、衰变热和  $\gamma$  能谱，同时能对重要核素的活化/衰变反应链进行跟踪，进行径迹追踪。

### 2.2. R2S 方法和程序

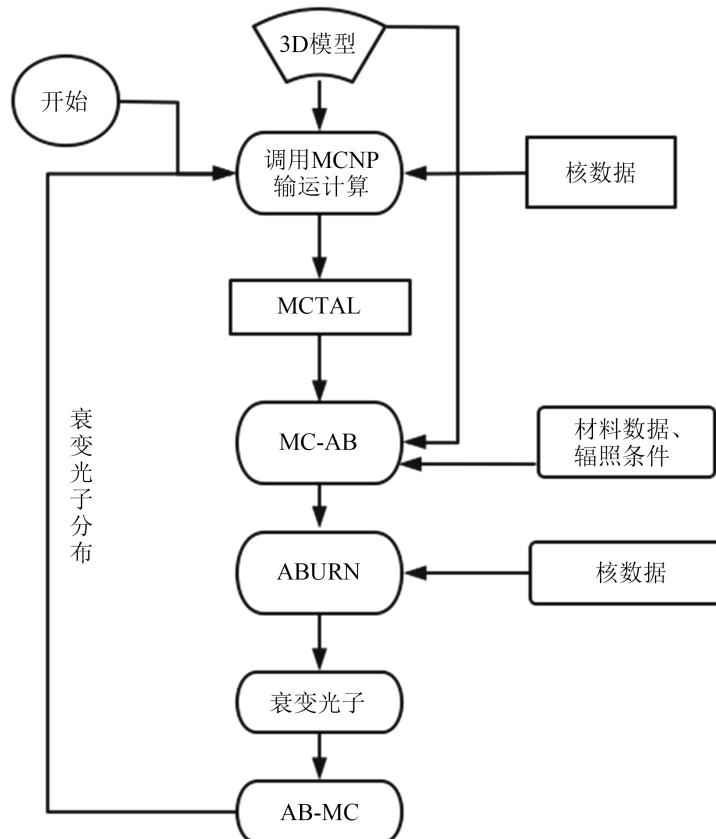


Figure 1. Flow scheme of R2S method

图 1. 严格两步法(R2S)的计算流程

本文在计算停堆剂量率时，采用了国际主流的计算精度较高的严格两步法(R2S) [7] [8] [9]。该方法先进行中子输运计算，以获得几何模型上需要的多组中子通量分布，之后进行活化计算获得各个栅元的衰变光子分布。这种衰变光子的分布被用作后续光子输运计算步骤的源定义，以获得光子通量分布。最后通过光通量 - 剂量率转换系数来得到目标区域的停堆剂量率。

R2S 方法基于以下计算步骤：I 中子输运计算，得到各栅元中子通量密度；II 材料活化计算，通过辐照条件及 I 求出的各栅元中子通量分布，求出停堆后各栅元材料的活化情况及衰变光子分布；III 光子输运计算，利用 II 求出的衰变光子分布，求出停堆剂量率。

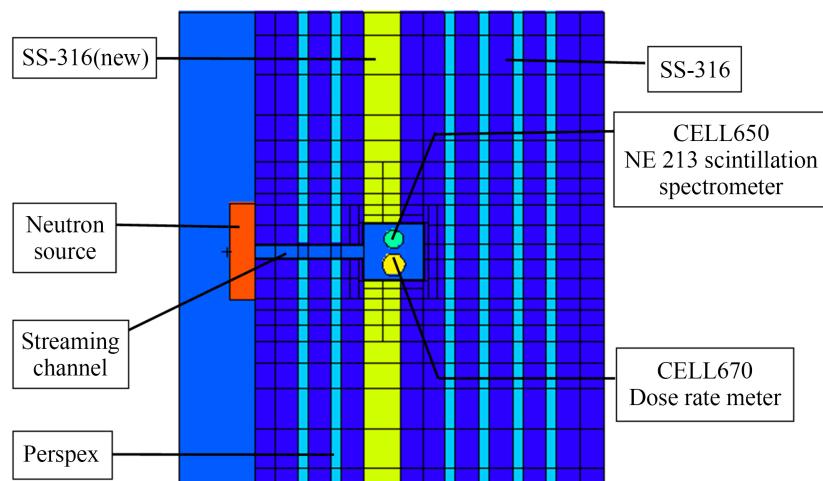
本文停堆剂量率计算程序系统的核心部分是蒙卡程序 MCNP 及活化程序 ABURN，这两个程序通过所开发的自动接口程序连接起来。**图 1** 是进行停堆剂量率计算的 R2S 方法流程图。

首先利用 MCNP 计算出每个模型栅元的中子通量分布，中子输运计算所得的中子通量信息被存储在相关文件 MATAL 中。之后通过接口程序 MC-AB 将中子通量和材料组分整理，并根据辐照条件及冷却方案等，通过 ABURN 程序完成各个栅元的材料活化计算，得到每个栅元的衰变光子强度。接口程序 AB-MC 将衰变光子强度及能谱计算结果经处理后生成一个单一的衰变光子源分布文件，用于 MCNP 的衰变光子输运计算。

### 3. 计算模型

SINBAD [10] (Shielding Integral Benchmark Archive Database)数据库是一个中子学领域基于实验的基准题合集，目的是提供基准实验信息，以验证粒子输运程序和核数据。在其收录的基准题中，ITER-T426 是在意大利进行的一个停堆剂量率的实验，用于检验停堆剂量率的计算方法和程序的可靠性。ITER-T426 实验使用了基于氘氚聚变反应的 14 MeV 中子生成器 FNG (Frascati Neutron Generator)产生的 D-T 中子来照射 ITER 包层及真空室的模拟装置，这个装置设计并建造在 ENEA 的能源中心。

ITER-T426 [11]采用两部分实验装置，一个是中子产生器，另一个是立体层状的屏蔽材料。屏蔽组件内有一个空腔(在光束方向 12 厘米 × 15 厘米 × 12 厘米)。在 ITER-T426 停堆剂量率实验中，屏蔽材料主要由 SS316 钢和有机玻璃组成。按照该实验方案，总共照射时间为  $5.14 \times 10^4$  s，共产生了  $1.95 \times 10^{15}$  个 D-T 中子。**图 2** 给出了 ITER 停机剂量率实验 T-426 模拟装置的 MCNP 计算模型剖面图，包含材料成分及进行结果分析的两个栅元。



**Figure 2.** MCNP model of ITER-T426 experimental facility  
**图 2.** ITER-T426 实验装置的 MCNP 模型图

表 1 给出了整个实验过程中的源中子产生情况, 表 2 给出了活化计算需要的材料成分。

**Table 1.** Irradiation conditions

**表 1. 辐照条件**

辐照时间(s)	源强度(n/s)	中子产额(个)
17,480	$3.04 \times 10^{10}$	$5.31 \times 10^{14}$
7820	$4.29 \times 10^{10}$	$3.35 \times 10^{14}$
54,140	0.00	0.00
22,140	$4.29 \times 10^{10}$	$9.50 \times 10^{14}$
900	0.00	0.00
3820	$3.38 \times 10^{10}$	$1.29 \times 10^{14}$
420	0.00	0.00
140	$2.86 \times 10^{10}$	$4.00 \times 10^{12}$

**Table 2.** Shielding material composition

**表 2. 屏蔽材料成分**

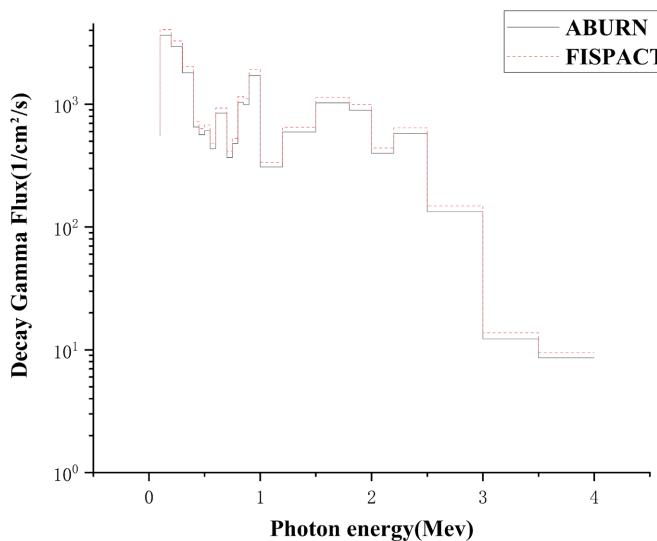
	B	C	Si	P	S	V	Cr
SS-316 (%)	0.0075	0.04	0.45	0.022	0.006	0.16	16.8
SS-316 (new) (%)	0.005	0.003	0.69	0.021	—	0.12	17.8
	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Mo	Pb
SS-316 (%)	1.14	68.4235	0.04	10.7	0.09	2.12	0.001
SS-316 (new) (%)	1.64	66.234	0.07	11.3	0.09	2.0	—

#### 4. 计算结果分析

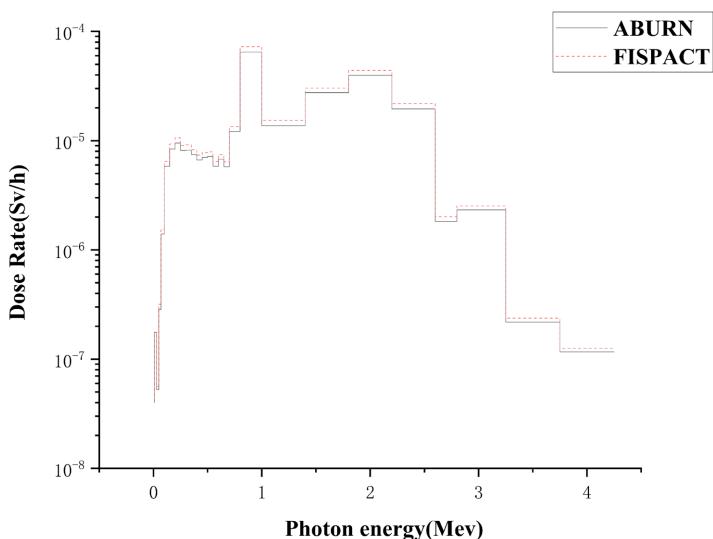
国际上之前普遍采用欧洲活化程序 FISPACT 耦合蒙卡程序 MCNP 进行停堆剂量率的计算, 因此可以将相关结果用于本文 ABURN 程序的验证。

为了验证 ABURN 程序的活化计算能力在停堆剂量率计算中的可行性, 将利用 ABURN 的计算结果与利用 FISPACT 程序的计算结果进行了比较分析。除了活化计算使用的程序不同, 停堆剂量率计算过程中使用的是相同的输运程序 MCNP、核数据库和 ITER-T426 计算模型。选取了包围模型中心剂量探测器的两个衰变光子源栅元, 来进行比较计算。在空腔中心有两个探测器, 栅元 651 为闪烁光谱仪, 用于测量衰变光子能谱, 栅元 670 为剂量率计, 用于测量空腔的停堆剂量率。

图 3、图 4 分别给出了冷却时间为 2.08 h 的栅元 651 的衰变光子能谱和栅元 670 的停堆剂量率。从中可以看出, MCNP-ABURN 程序系统与 MCNP-FISPACT 程序系统的计算结果吻合较好。



**Figure 3.** Decay gamma energy spectrum at 2.08 h  
**图 3.** 2.08 h 衰变光子能谱

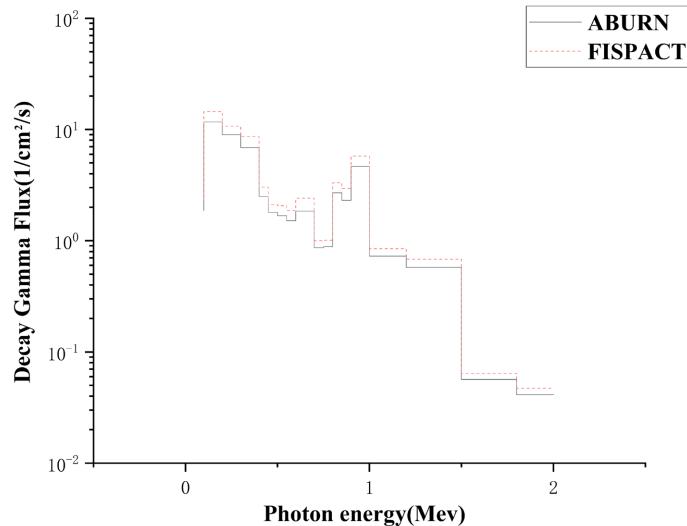


**Figure 4.** Shutdown dose rate for each energy interval at 2.08 h  
**图 4.** 2.08 h 各能量区间停堆剂量率

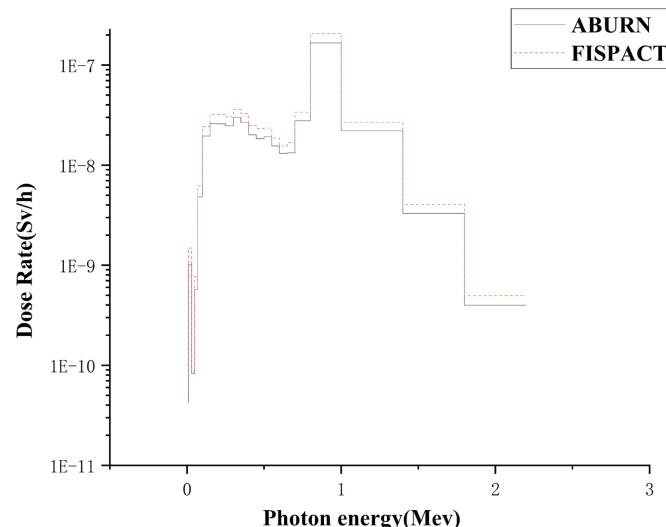
之后分别用两种程序系统计算了冷却时间为 15.2 h、25.2 h、4 d、8.20 d、12.2 d、19.3 d 的栅元 651 的衰变光子能谱和栅元 670 的停堆剂量率。图 5、图 6 给出了 19.3 d 的衰变光子能谱和停堆剂量率。

对比图 3 和图 5、图 4 和图 6 可以看出，随着冷却时间从 2.08 h 增加到 19.3 d，高能光子数量明显下降，造成衰变光子能谱和停堆剂量率存在的能量区间越来越小。从图 4 和图 6 可以看出，冷却时间到 19.3 d 时，MCNP-ABURN 程序系统与 MCNP-FISPACT 程序系统的计算结果的趋势一致，但是对比图 3 和图 5，两者的计算差别有了一定程度的增加，采用 ABURN 程序得到的结果比 FISPACT 程序的结果略低。造成差别增加的原因是实验中各个栅元的中子通量密度较小，致使两个程序在活化计算中活度贡献大的几个主要核素存量相对较少，计算光子能谱误差偏大，进而影响后续的光子输运计算，最后得到的结果也存在一定的误差。对于冷却初期，核素存量数值较大，两者的差别较小；随着冷却时间增加，核素存

量数值快速下降,对于较小的核素存量数值两者计算结果的差别会比较明显,从而造成各栅元的光子能量和光子强度存在一定的差别,进而影响光子输运后得到的停堆剂量率。总体而言,采用 ABURN 程序和 FISPACT 程序的计算结果符合较好,从而初步验证了 ABURN 程序的准确性。

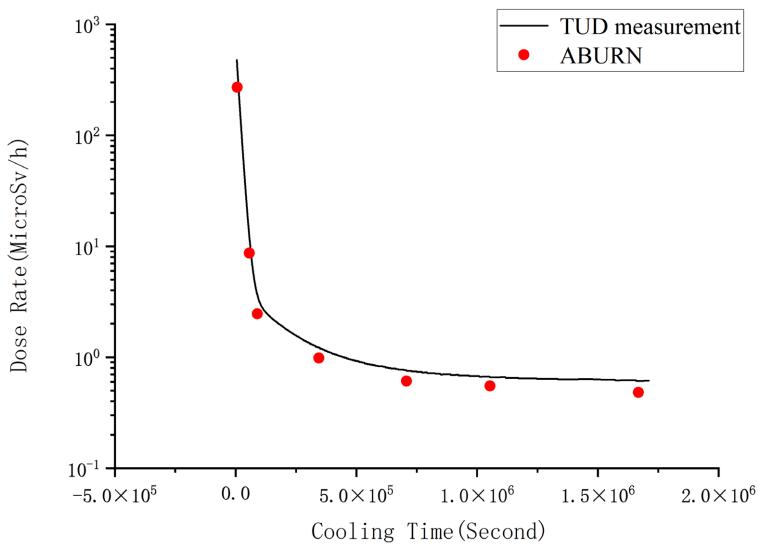


**Figure 5.** Decay gamma energy spectrum at 19.3 d  
**图 5.** 19.3 d 衰变光子能谱



**Figure 6.** Shutdown dose rate for each energy interval at 19.3 d  
**图 6.** 19.3 d 各能量区间停堆剂量率

图 7 给出了 ITER-T426 停堆剂量率的实验测量结果和 MCNP-ABURN 程序系统计算结果随时间的变化情况。计算的精确性主要依赖于中子通量和光子通量分布的计算结果,从该图中可以看出,采用 ABURN 程序计算结果和实验测量结果的变化趋势总体符合,经统计最大相对误差小于 30%。由于 ITER-T426 实验数据在测量时存在 9%~20% 的不确定度[12],再考虑到 MCNP 程序和 ABURN 程序本在存在一定计算误差,故在屏蔽计算领域,对于这样偏差也是在可接受范围内,从而进一步验证了 ABURN 程序在停堆剂量率计算中的可用性。

**Figure 7.** Shutdown dose rate as a function of cooling time of ITER-T426**图 7.** ITER-T426 停机剂量率随时间的变化

## 5. 结论

本文采用 R2S 方法，基于自主化的中子活化程序 ABURN 和粒子输运程序 MCNP，通过开发两者的耦合接口程序，实现了核装置停堆剂量率计算功能。随后利用 ITER-T426 实验装置模型进行基准题验证，将 ABURN 程序计算结果与 FISPACT 程序计算结果以及实验测量结果进行了对比，整体趋势相符，偏差在可接受范围内，说明所开发的 ABURN 程序及与 MCNP 的耦合接口程序可以用于核装置停堆剂量率的计算分析。

## 基金项目

国家磁约束核聚变发展研究专项(2019YFE03110000, 2019YFE03110003)。

## 参考文献

- [1] 李卫. 基于栅元计数的停堆剂量率计算程序研发及应用[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- [2] Lopez, V., Sauvan, P. and Ogando, F. (2021) Shutdown Dose Rates Calculations due to Light Ions Induced Activation Using D1S Methodology. *Fusion Engineering and Design*, **167**, 33-36. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112298>
- [3] Kim, J.H., Woo, M.H., Chang, H.S. and Hong, S.G. (2021) A Shutdown Dose Rates Analysis of the Korean Fusion Demonstration Reactor Using MCNP5 Mesh-Based R2S Approach. *Fusion Engineering and Design*, **167**, 65-67. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112321>
- [4] 郑剑, 李斌, 邹俊, 杨琪. 基于网格计数的停机剂量率计算方法研究[J]. 核科学与工程, 2016, 36(6): 784-789.
- [5] Zhang, J., Ma, Y., Peng, Y. and Chen, Y. (2017) ABURN: A Material Activation Calculation Code Based on CRAM Method. *Fusion Engineering and Design*, **125**, 659-663. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.04.130>
- [6] Cetnar, J. (2006) General Solution of Bateman Equations for Nuclear Transmutations. *Annals of Nuclear Energy*, **33**, 640-645. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2006.02.004>
- [7] 吴明昌, 吴亮亮, 郝丽娟, 郑华庆, 宋婧. MCNP 源子程序在停机剂量率计算中的应用[J]. 核科学与工程, 2012, 32(4): 366-370.
- [8] 陈义学, 吴宜灿, 黄群英, Fischer U. 核聚变实验装置 HT-7U 停机辐射剂量率三维计算与分析[J]. 核科学与工程, 2004(1): 49-55.
- [9] 陈义学, 吴宜灿, Fischer U. 核聚变装置停机剂量率分析计算的严格两步(R2S)法[J]. 核技术, 2003(10): 763-766.

- [10] Kodeli, I., Sartori, E. and Kirk, B. (2006) SINBAD Shielding Benchmark Experiments Status and Planned Activities. *The American Nuclear Society's 14th Biennial Topical Meeting of the Radiation Protection and Shielding Division*, Carlsbad New Mexico, USA, 3-6 April 2006, 1-5.
- [11] Chen, Y. and Fischer, U. (2002) Rigorous MCNP Based Shutdown Dose Rate Calculations: Computational Scheme, Verification Calculations and Application to ITER. *Fusion Engineering and Design*, **63**, 107-114.  
[https://doi.org/10.1016/S0920-3796\(02\)00144-8](https://doi.org/10.1016/S0920-3796(02)00144-8)
- [12] Batistoni, P., Angelone, M., Petrizzi, L. and Pillon, M. (2011) Experimental Validation of Shutdown Dose Rates Calculations inside ITER Cryostat. *Fusion Engineering and Design*, **58-59**, 613-616.  
[https://doi.org/10.1016/S0920-3796\(01\)00516-6](https://doi.org/10.1016/S0920-3796(01)00516-6)