

ITER 赤道窗口生物屏蔽层特性研究

党同强^{1,2}, 应栋川^{2,3}, 杨琪^{1,2}, 曾勤^{1,2,3}, 王国忠^{1,2},
邹俊^{1,2,3}, 龙鹏程^{1,2,3}, 吴宜灿^{1,2,3}, FDS 团队

(1. 中国科学技术大学核科学技术学院, 安徽 合肥 230027;

2. 中国科学院核能安全技术研究所, 安徽 合肥 230031;

3. 中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: ITER 赤道窗口生物屏蔽层外的窗口室是放置各种电子仪器和管道的场所, 在停堆后允许人员进入其中进行维修等工作。为了保证工作人员安全, 本文研究了停堆后窗口室中的剂量率分布。文中使用大型集成中子学计算分析系统 VisualBUS 中的建模、计算分析模块完成了停堆剂量率计算。结果表明, ITER 停堆 1 天后赤道窗口室中剂量率高出限值 ($10 \mu\text{Sv/h}$) 2 个数量级。因此, 建议优化生物屏蔽层的设计以增加屏蔽能力。

关键词: ITER; 中子学; 窗口室; 生物屏蔽层

中图分类号: TL61

文章标志码: A

文章编号: 0258-0918(2011)04-0356-04

Shielding analysis for ITER equatorial bio-shield plug

DANG Tong-qiang^{1,2}, YING Dong-chuan^{2,3}, YANG Qi^{1,2}, ZENG Qin^{1,2,3}, WANG Guo-zhong^{1,2},
ZOU Jun^{1,2,3}, LONG Peng-cheng^{1,2,3}, WU Yi-can^{1,2,3}, FDS Team

(1. School of Nuclear Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei of Anhui Prov. 230027, China;

2. Institute of Nuclear Energy Safety Technology, Chinese Academy of Sciences, Hefei of Anhui Prov. 230031, China;

3. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei of Anhui Prov. 230031, China)

Abstract: ITER equatorial port cell outside bio-shield plug is a place for allowing free personnel access after shutdown which accommodates various sensitive equipment and pipes. To ensure the personnel safety in port cell after shutdown, the distribution of dose rate in port cell was studied. Based on VisualBUS (CAD-Based Multi-Functional 4D Neutronics Simulation System), dose rate calculations were completed in port cell after shutdown. The result showed that dose rates in port cell are still 2 orders of magnitude more than desired limit ($10 \mu\text{Sv/h}$) after one day shutdown. The optimization of bio-shield was needed.

Key words: ITER; neutronics; port cell; bio-shield

收稿日期: 2011-10-25; 修回日期: 2011-11-10

基金项目: ITER 中子学合同(DWO-73-102-MLN); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA03040000)

作者简介: 党同强(1985—), 男, 安徽萧县人, 博士研究生, 现从事中子学分析研究

ITER 作为世界上第一个托卡马克聚变实验堆,它的聚变功率为 500 MW、可持续燃烧 400 s,在运行期间产生能量高达 14.1 MeV 的中子。为了有效屏蔽由托卡马克产生的强辐射,在托卡马克外面设置了一层屏蔽,即生物屏蔽层。在生物屏蔽层内是窗口间隙,其中有许多管道和部件。在赤道窗口生物屏蔽层外有一个窗口室,它是放置各种电子仪器和管道的场所,在停堆期间允许人员进入进行维修等操作,具体布局如图 1 所示。为了有效降低停堆后窗口室中人员所受的剂量,保证工作人员的安全,需要窗口室前面的生物屏蔽层提供足够的屏蔽。本文中研究了窗口室中的剂量率分布,以检验生物屏蔽层的屏蔽特性。

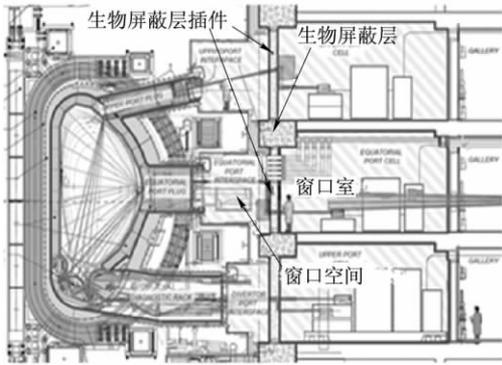


图 1 ITER 托卡马克和窗口室截面
Fig. 1 Cross-section of ITER tokamak and port cells

借助于蒙特卡罗自动建模软件 MCAM^[1-4]和赤道窗口 CAD 模型创建了中子学模型,然后再将该模型整合到 ITER 中子学分析的基准模型 Alite4^[5]中。使用 MCNP^[6]-FISPACT^[7]耦合的“两步法”剂量率计算方法,分析研究了 ITER 装置停机后窗口室中的剂量率分布。

这些工作都是在大型多功能中子学计算分析系统 VisualBUS^[8-9]平台上完成的。它是由 FDS 团队开发的具有中国自主知识产权的大型多功能中子学计算分析系统,它包括三维 CAD 自动建模、多功能中子学计算、计算过程与结果可视化、计算结果优化四大部分功能,同时以 FDS 团队自主研发的混合评价数据库 HENDL^[10-12]为数据库平台,可以应用于蒙特卡罗和离散纵标法多维复杂中子学模型建模与输运

计算、四维中子物理过程求解、各类反应率计算和停堆剂量计算,以及四维动态可视化分析等。

1 赤道窗口模型创建

ITER 组织于 2009 年 10 月向世界发布了 ITER 最新的中子学基准模型 Alite4,它包括所有的主要部件,例如,磁场线圈、中心螺线管、真空室、偏滤器部件、包层模块、上窗口、赤道窗口和下窗口等^[13]。但是,在该模型中的赤道窗口材料为钢水混合材料,并不是真实的工程设计。为了研究赤道窗口生物屏蔽层的屏蔽特性,依据工程设计创建中子学模型并更新 Alite4 中的赤道窗口中子学模型,并计算了赤道窗口室中剂量率分布。

本文根据 ITER 组织发布的赤道窗口 CAD 模型,如图 2 所示,创建了赤道窗口的中子学模型。为了准确有效地完成赤道窗口模型的更新和模型的集成,使用了 VisualBUS 平台上的自动建模工具 MCAM,经过预处理(包括简化和修正),将赤道窗口的 CAD 模型转换成中子学模型(见图 3),再将更新模型集成到 ITER 40°基准模型 Alite4 中。

在 ITER 赤道窗口 CAD 模型的生物屏蔽层插件上有许多的管道插孔,它是诊断设备进入到窗口内的入口。按照图 1 中管道布局,根据 ITER 国际组织提供的参数,在生物屏蔽层插件上创建了相应的管道,管道外壁与插件的缝隙都为 10 mm,管道壁厚 2 mm,管道材料为 314 钢。(图 4)

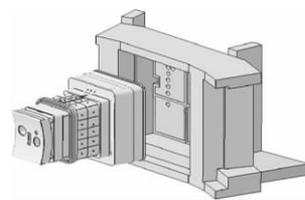


图 2 ITER 赤道窗口的 CAD 模型
Fig. 2 Equatorial port CAD model for ITER

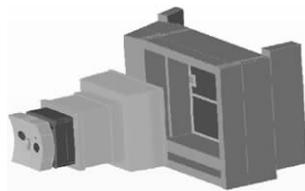


图 3 ITER 赤道窗口的中子学模型
Fig. 3 Equatorial port neutronics model for ITER

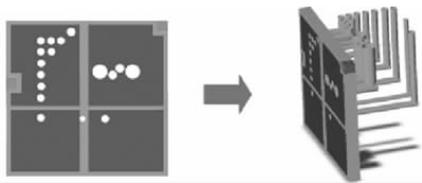


图4 生物屏蔽插件上管道
Fig. 4 Pipes in bio-shield plug

2 计算与分析

2.1 程序和数据库

本文采用了 MCNP 与 FISPACT 耦合的“两步法”计算方法,计算得到了窗口室中的剂量。文中使用蒙特卡罗粒子输运程序 MCNP 和 IAEA 聚变数据库 FENDLE2.1 实现了中子输运计算和衰变光子计算,使用活化程序 FISPACT2007 和欧洲活化数据库 EAF-2007 实现了材料的活化计算。

为了研究赤道窗口室中剂量率,计算了生物屏蔽层、生物屏蔽层插件和管道以及窗口间隙中设备的活化情况。这些被活化的材料被定义为辐射光子源,用于停堆剂量率计算。

材料活化计算时,使用的活化方案是由 ITER 国际组织提供的托卡马克运行方案 SA2^[14]。(表 1)停堆冷却时间分别为 1 h、1 d 和 12 d。

表 1 ITER 等离子体运行方案

Table 1 Irradiation history for ITER plasma

时间	聚变功率 /MW	脉冲
2 a	2.68	1
10 a	20.6	
0.667 a	0	
1.325 a	41.8	
3 620 s	0	17
400 s	500	
3 620 s	0	3
400 s	700	

2.2 计算与分析

基于更新后的 ITER 中子学参考模型 Alite4,计算了窗口室中的停堆剂量分布,验证生物屏蔽层插件的屏蔽能力。窗口室中停堆剂量率来源分为两个部分,一部分由窗口间隙中的活化设备产生的剂量,另一部分是由活化生

物屏蔽、屏蔽插件以及管道产生的剂量。

为了计算窗口室中剂量率分布,设置了两组计数球。其中一组用来研究窗口室中剂量分布,如图 5 中 1 至 24 号计数球;另一组小球靠近管道,用来计算窗口室剂量的极端情况,如图 5 中 25 至 35 号小球。

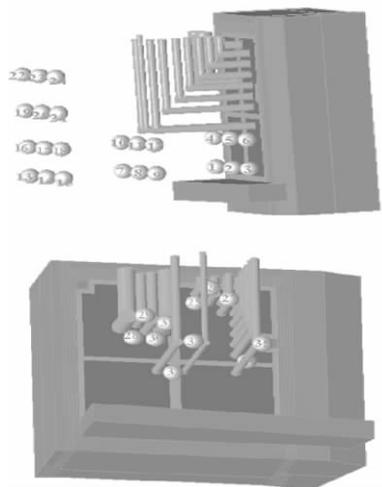


图 5 窗口室中计数球的分布
Fig. 5 Tally spheres distribution in port cell

2.2.1 窗口间隙中活化设备产生的剂量

在托卡马克停堆之后,窗口间隙中活化设备产生的衰变光子对窗口室中剂量产生剂量。设备的活化计算和光子源的定义是英国卡拉姆聚变能中心计算完成的。该光子源为一面源,离生物屏蔽层插件的距离为 240.5 cm。图 6 中为窗口室中剂量率分布。由图可以得到,停堆 1 h 窗口室中剂量率最高达 $1.45704E+04 \mu\text{Sv/h}$;当停堆 1 d 时剂量率急剧下降到 $100 \mu\text{Sv/h}$ 以

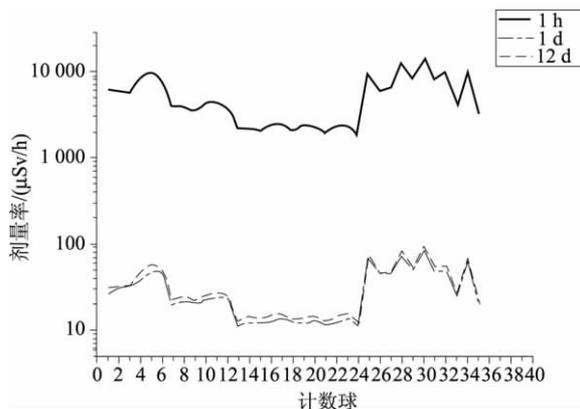


图 6 活化设备产生的剂量率
Fig. 6 Dose rate induced by activated equipment

下;停堆 12 d 时的剂量率与 1 d 相比变化不大,但是仍然比剂量限值高 2 个数量级。

2.2.2 活化生物屏蔽、屏蔽插件以及管道产生的剂量

该部分研究停堆 1 h, 1 d 和 12 d 活化的生物屏蔽、屏蔽插件以及管道在窗口室产生的剂量率。

由图 7 显示了由活化生物屏蔽、屏蔽插件产生的停堆剂量率变化规律。停堆 1 h 活化生物屏蔽、屏蔽插件产生的剂量率最高达 $2.29948 \times 10^3 \mu\text{Sv/h}$;停堆 1 d 后,剂量率为几百 $\mu\text{Sv/h}$;停堆 12 d 后,剂量率小于 $100 \mu\text{Sv/h}$,比剂量限值高 2 个数量级。

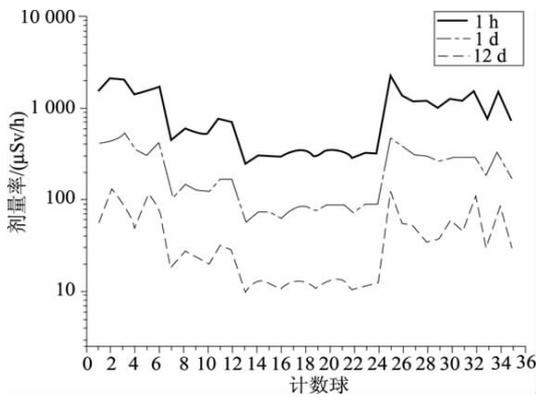


图 7 活化的生物屏蔽、屏蔽插件产生的剂量率
Fig. 7 Dose rate induced by activated bio-shield and bio-shield plug

图 8 显示了由活化管道产生的剂量率的变化规律。停堆 1 h 的最高剂量达 $1.12998 \times 10^4 \mu\text{Sv/h}$;停堆 1 d 后,剂量下降 1 个数量级;停堆 12 d 之后与停堆 1 d 相比变化不大。

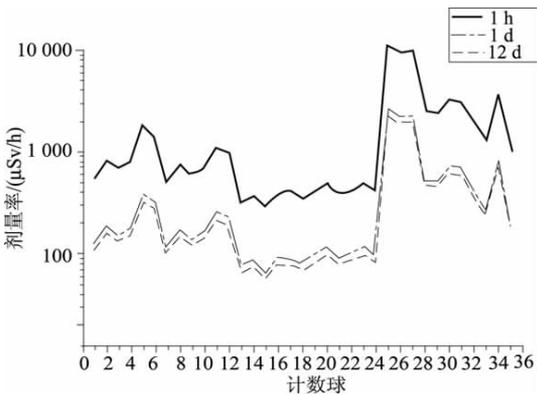


图 8 活化的管道产生的剂量率

Fig. 8 Dose rate induced by activated pipes

2.2.3 窗口室总剂量和结果分析

把以上由活化设备、生物屏蔽、插件和管道产生的剂量率相加,得到总的剂量率。图 9 中显示剂量率的分布规律。停堆 1 h, 13 至 24 号小球位置处的剂量率达到几千 $\mu\text{Sv/h}$,但是,在靠近生物屏蔽层位置处的剂量率要高 1 个数量级;停堆 1 d 后,剂量率下降一个数量级,但是比剂量限值高 2 个数量级;停堆 12 d 后,总剂量率仍比剂量限值高 2 个数量级。

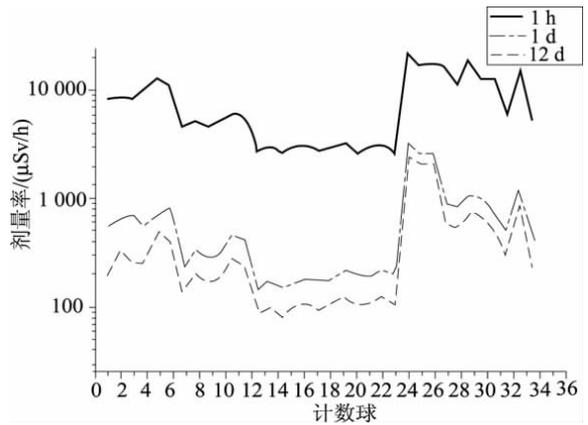


图 9 窗口室中总的停堆剂量率

Fig. 9 Total dose rate in port cell

为了保证停堆之后到达窗口室中的工作人员和设备的安全,赤道窗口生物屏蔽插件的设计需要优化。

3 结论

在 VisualBUS 平台上,基于赤道窗口的 CAD 模型,创建了中子学计算模型,并把模型插入到 Alite4 模型中。使用更新后的 Alite4 模型,研究了生物屏蔽层的屏蔽特性,计算了停堆 1 h, 1 d 和 12 d 时窗口室中的剂量率分布情况。结果表明,停堆 1 d 的剂量率仍比剂量限值($10 \mu\text{Sv/h}$)高 2 个数量级,主要是由生物屏蔽层后的活化管道产生的。因此,赤道窗口的生物屏蔽层插件的设计需要改进。

致谢

本工作是在 FDS 团队与 ITER 国际组织

(下转第 371 页)

项基础性研究工作,为我国钍基熔盐堆研发打下良好的基础,促进我国早日掌握具有自主知识产权的钍基熔盐堆技术。

(5) 建议结合我国快堆及放射性废物处理与处置技术开发利用,全面统筹规划我国钍基燃料循环系统各环节研发工作,避免个别环节冒进或脱节。

参考文献:

- [1] 连培生. 原子能工业[M]. 北京:原子能出版社,2002.
- [2] IAEA. Thorium Fuel Cycle—Potential Benefits and Challenges[R]. IAEA-TECDOC-1450.
- [3] IAEA. Thorium based fuel options for the generation of electricity; Developments in the 1990s [R]. IAEA-TECDOC-1155.

(上接第 359 页)

签署的核分析任务(合同编号: DWO-73-102-MLN)框架下完成的,在研究过程中得到了 ITER 组织的 Michael Loughlin 博士的宝贵的意见和亲切指导,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] Y Wu, FDS Team. CAD-based Interface Programs for Fusion Neutron Transport Simulation [J]. Fusion Engineering and Design, 2009, 84: 1987-1992.
- [2] 吴宜灿,李莹,卢磊,等. 蒙特卡罗粒子输运计算自动建模程序系统的研究与发展[J]. 核科学与工程, 2006, 26(1): 20-27.
- [3] Yican Wu, X George Xu. The Need for Further Development of CAD/MCNP Interface Codes Invited presentation at the American Nuclear Society Annual Meeting[J]. Transactions of American Nuclear Society, 2007, 96: TRANSAO 961-882, ISSN: 0003-018X, June 24-28, 2007, Boston, Massachusetts.
- [4] 曾勤,卢磊,李莹,等. 蒙特卡罗粒子输运计算自动建模程序 MCAM 在 ITER 核分析建模中的应用[J]. 原子核物理评论, 2006, 23(2): 138-141.
- [5] Q Zeng, L Lu, A Ding, et al. Update of ITER 3D Basic Neutronics Model with MCAM[J]. Fusion Engineering and Design, 2006, 81(23-24): 2773-2778.
- [6] X-5 Monte Carlo Team. MCNP—A General Monte Carlo N-

- [4] Uranium 2009: Resources, Production and Demand[R]. Nuclear Energy Agency. International Atomic Energy Agency.
- [5] 顾忠茂. 钍资源的核能利用问题探讨[J]. 核科学与工程, 2007, 27(2): 97-105.
- [6] 张书成,刘平,仇宝聚. 钍资源及其利用[J]. 世界核地质科学, 2005, 22(2): 98-103.
- [7] 戴波. 钍基核燃料循环和发展现状[J]. 国外核动力, 2006, 4, 11-15.
- [8] 苏文清,贺海钧,宋洪芳,等. 包头白云鄂博钍资源的回收及用于核电燃料的研究现状[J]. 稀有金属, 2005, 29(6): 914-918.
- [9] 徐光宪. 白云鄂博矿钍资源开发利用迫在眉睫[J]. 稀土信息, 2005(6): 4-8.
- [10] 赵长有. 白云鄂博的钍与铀[J]. 稀土信息, 2006(268-270).
- [7] Particle Transport Code[J]. Version 5, 24 April, 2003.
- [7] R A Forrest. FISPACT-2007: User manual[M]. March, 2007.
- [8] 吴宜灿,李静惊,陈明亮,等. 大型集成多功能中子学计算与分析系统 VisualBUS 的研究与发展[J]. 核科学与工程, 2007, 27(4): 365-373.
- [9] 胡丽琴,龙鹏程,罗月童,等. 先进核能系统设计分析软件与数据库研发进展[J]. 核科学与工程, 2010, 30(1): 55-64.
- [10] Jun Zou, Zhaozhong He, Qin Zeng, et al. Development and Testing of Multigroup Library with Correction of Self-shielding Effects in Fusion-Fission Hybrid Reactor [J]. Fusion Engineering and Design, 2010, 85(7-9): 1587-1590.
- [11] Gao Chunjing, Xu Dezheng, et al. Integral Data Test of HENDL1.0/MG and VisualBUS with Neutronics Shielding Experiments (I) [J]. Plasma Science and Technology, 2004, 6(5): 2507-2513.
- [12] 许德政,蒋洁琼,邹俊,等. 多用途核数据库 HENDL2.0/MG/MC 的重核临界基准校验[J]. 核科学与工程, 2009, 29(1): 67-71.
- [13] Michael Loughlin. The presentation; The Alite Model [J]. ITER Organization, 14 Jan 2010.
- [14] Michael Loughlin, et al. Recommended Plasma Scenarios for Activation Calculations[J]. ITER doc ITER D 2V3V8G v1.1, October 2009, downloadable from <http://www.iter.org>.