

文章编号: 1007-4627(2006)02-0170-04

## 国际聚变材料辐照装置屏蔽中子学设计研究\*

陈义学<sup>1</sup>, 吴宜灿<sup>2</sup>, U. Fischer<sup>3</sup>

(1 华北电力大学核动力工程系, 北京 102206;

2 中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031;

3 Forschungszentrum Karlsruhe, Germany)

**摘要:** 介绍了中国科学院等离子体物理研究所与德国 Forschungszentrum Karlsruhe 合作开展的国际聚变材料辐照装置(IFMIF)屏蔽中子学方面的相关设计研究工作。重点介绍了新开发的三维耦合屏蔽计算方法, 包括其基本原理和程序系统等, 以及基于该方法的 IFMIF 的三维屏蔽计算典型结果与分析。

**关键词:** 国际聚变材料辐照装置; 聚变材料; 屏蔽, Monte Carlo; 离散纵标法

**中图分类号:** TL328      **文献标识码:** A

## 1 引言

国际聚变材料辐照装置(IFMIF)<sup>[1]</sup>是在国际能源机构(IEA)组织协调下, 由欧盟、日本、俄罗斯及美国共同参与的, 能源领域最大的国际合作项目之一, 同时也是聚变领域最重要的两个国际合作项目当中的一个, 目前 IFMIF 项目已进入关键性的工程验证及工程设计阶段。

IFMIF 高强度、高能量中子辐照环境由两台线性加速器产生的两束氦离子束轰击一个流动锂靶产生。屏蔽系统设计是 IFMIF 工程设计的关键组成部分之一, 其设计优劣直接影响 IFMIF 的工程造价及工作人员与周围环境的辐射安全。Monte Carlo 方法与离散纵标法是最常用的屏蔽计算方法。Monte Carlo 方法的优点是可以精确模拟复杂的几何模型及物理过程, 但计算耗时, 尤其对于屏蔽计算中常见的“深穿透”问题。离散纵标法(Discrete Ordinates method, 即  $S_N$  方法)是求解中子输运方程最常用的数值计算方法之一, 计算速度快, 特别适合求解屏蔽计算中的“深穿透”问题, 并可提供整个模型的分布解。但离散纵标法的主要缺点是难以精确描述复杂几何模型, 另外, 对于多维离散纵标法方法, 射线效应是影响计算

精度的一个关键性问题。

IFMIF 氦-锂中子源物理过程及靶系统的几何结构非常复杂, Monte Carlo 方法是进行靶系统粒子输运模拟研究的首选。同时, IFMIF 测试腔的屏蔽墙厚达数米, Monte Carlo 难以解决此类典型的“深穿透”屏蔽问题, 而离散纵标法是解决此类问题的最佳选择。为了解决这类具有复杂物理过程与几何结构, 同时具有“深穿透”特点的屏蔽问题, 最有效的方法是开发一种 Monte Carlo 方法与离散纵标法的耦合方法。

国际上, 为了解决大型散裂中子源系统的屏蔽计算问题, 已进行了这方面的研究<sup>[2,3]</sup>, 但此类研究工作仅支持 Monte Carlo 方法与一维或二维离散纵标法的耦合, 而不支持三维屏蔽计算, 这无疑难以满足现代核装置精确屏蔽设计的要求。我国在加速器、核聚变反应堆、新一代先进裂变反应堆等大型核装置研究方面取得了很大的进步, 但针对这些复杂装置的先进屏蔽计算方法, 研究工作相对较少, 目前尚没有发现三维耦合屏蔽计算方法研究方面的文献资料及相关报道。

为了解决大型复杂核装置的屏蔽计算难题, 中国科学院等离子体物理研究所与德国卡尔斯鲁厄研

收稿日期: 2005-11-20; 修改日期: 2006-01-12

\* 基金项目: 德国 Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) 国际合作项目

作者简介: 陈义学(1972-), 男(汉族), 山东青岛人, 博士, 副研究员, 从事核系统设计与粒子输运模拟研究;

E-mail: yxchen@ncepu.edu.cn

究中心合作, 开发了一种三维耦合计算方法<sup>[4, 5]</sup>, 该方法集成 Monte Carlo 技术在复杂几何模型模拟方面的长处以及三维离散纵标法解决“深穿透”问题的优点, 克服常规屏蔽计算方法在大型核装置屏蔽分析方面的缺点, 提高其屏蔽计算的精度及速度, 从而为保证屏蔽系统优化设计的质量提供有力的技术支持。本文介绍了新开发的三维耦合屏蔽计算方法及程序系统, 以及基于该方法的 IFMIF 三维屏蔽设计计算的一些典型结果。

## 2 屏蔽中子学计算方法

对于大型核装置, 一般来说粒子源区几何结构与物理过程比较复杂, 而粒子源周围的屏蔽层几何结构则相对简单, 但尺寸相对很大。为了实现三维耦合计算, 一般来说, 需要将装置的整个屏蔽计算模型分解成两类子模型: 源区或复杂几何模型及几何模型相对简单的屏蔽区模型。对于源区或复杂几何模型, 利用 Monte Carlo 方法来模拟其复杂的几何结构或物理过程, 而离散纵标法显然不适合这一区域的粒子输运计算; 对于屏蔽区, 需要解决屏蔽计算中典型的“深穿透”难题, 无疑离散纵标法是最佳选择, 而 Monte Carlo 方法对于这类极小概率问题则无法得到满意解。一般来说, 耦合屏蔽计算分析可以遵循下面的步骤: (1) 模型分解为适合 Monte Carlo 模拟的源或复杂几何模型及屏蔽区  $S_N$  模型; (2) 定义 Monte Carlo 模型与  $S_N$  模型的连接面; (3) 对源模型进行 Monte Carlo 模拟, 得到通过连接面的粒子信息; (4) 将记录的 Monte Carlo 粒子信息转化为  $S_N$  角通量分布; (5) 根据得到的  $S_N$  角通量分布生成  $S_N$  程序所需的面源文件; (6) 利用面源进行  $S_N$  计算, 得到厚屏蔽区的粒子通量分布。

为了实现上面的耦合计算, 开发了处理大型复杂核装置三维屏蔽计算分析的程序系统, 如图 1 所示, 其中 Monte Carlo 模拟使用国际上最通用的 Monte Carlo 粒子输运程序 MCNP<sup>[6]</sup>, 三维离散纵标法计算使用美国橡树岭国家实验室开发的三维离散纵标法程序 TORT<sup>[7]</sup>, 而 Monte Carlo 方法与三维离散纵标法之间的接口转换程序则基于一种新开发三维映射方法<sup>[5]</sup>。该系统可以处理三维  $(x, y, z)$  及  $(r, \theta, z)$  几何。

为了对耦合程序系统进行校核, 针对各种算例

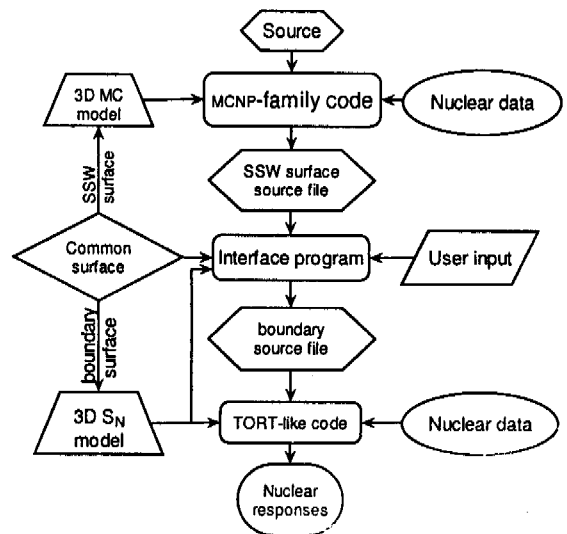


图 1 三维耦合屏蔽计算程序系统

进行了一系列的计算, 并与 MCNP 计算结果进行了对比分析。几何模型为一高 40 cm, 横截面为 20 cm × 20 cm 的长方体, 其中底端有一高 6 cm、半径为 2 cm 的圆柱中子源, 而探测器位于上端。中子源为均匀分布各向同性的 14 MeV 中子, 屏蔽材料为水与不锈钢的混合材料 (原子含量 60% SS316L + 40% Water)。连接面为距底端 10 cm 处的水平面, 将模型分割为源区及屏蔽区。图 2 给出了探测器处三维耦合程序系统计算的中子通量与 MCNP 计算结果的对比。可以看出, 基于这两种方法的计算结果吻合得非常好, 显示三维耦合程序可以提供屏蔽问题的精确解。

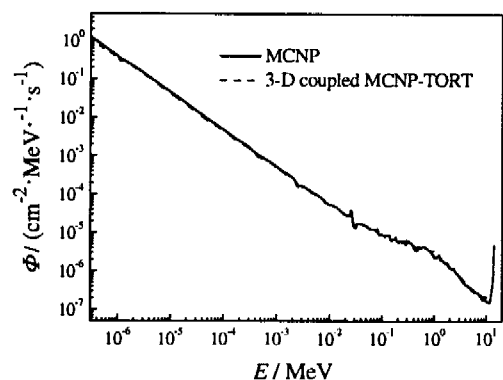


图 2 中子通量计算结果比较

## 3 IFMIF 三维屏蔽计算与分析

IFMIF 屏蔽计算非常复杂, 已有研究工作表

明,  $S_N$  或 Monte Carlo 方法无法提供可靠的计算结果<sup>[8,9]</sup>, 三维 Monte Carlo- $S_N$  耦合计算方法成为 IFMIF 三维屏蔽设计的首选。

IFMIF 中子源中子能量高达 50 MeV, 峰值为 14 MeV。在耦合计算中, Monte Carlo 计算基于 McDeLicious 程序<sup>[10]</sup> 及核数据库 ENDF/B-VI Release 6<sup>[11]</sup> 与 FZK/INPE 评价库<sup>[12]</sup>, 三维  $S_N$  程序为 TORT 及多群(256 群中子 + 49 群光子) 截面数据库 Vite-nea-IEF<sup>[13]</sup>。图 3 给出了三维耦合计算几何模型, 其中测试腔模型用于 Monte Carlo 模拟, 精确描述了其中所有重要部件, 而  $S_N$  模型包括后屏蔽墙及维修大厅。为了降低  $S_N$  计算对计算机内存的要求, 将  $S_N$  网格模型分成了两部分: 测试腔后屏蔽墙 ( $64 \times 52 \times 60$ ) 与维修大厅 ( $64 \times 52 \times 60$ ), 利用 TORSET<sup>[14]</sup> 程序实现这两部分的数据传输与耦合。

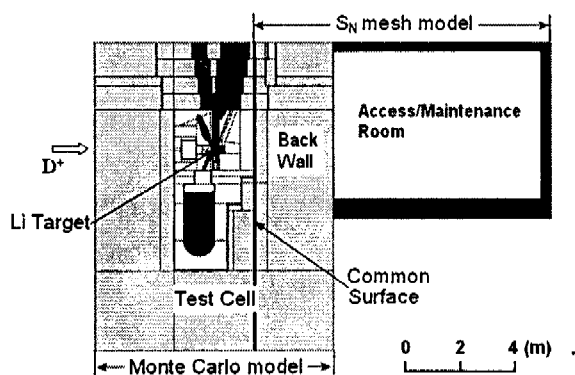


图 3 IFMIF 三维几何模型(垂直截面)

图 4 给出了维修大厅中的三维剂量分布情况。可以看出, 大厅中剂量水平超过了设计限值 ( $10 \mu\text{Sv/h}$ ), 因此需要对屏蔽设计进行再优化。在以前的工作中, 利用 Monte Carlo 程序 MCNPX<sup>[15]</sup> 以及一维  $S_N$  程序对 IFMIF 进行了相关的屏蔽计算分析<sup>[8,9]</sup>, 其中在 MCNPX 计算中, 屏蔽墙材料为重水泥, 而  $S_N$  计算中屏蔽材料为普通水泥, 为了进行比较, 利用耦合方法分别计算了这两种方案, 计算结果比较如图 5 所示。可以看出, 在靠近后屏蔽墙内侧处, 与耦合方法相比, MCNPX 与  $S_N$  方法将剂量率高估了约 2 倍, 这显然是这两种方法由于其内在原因采用的非常简化的中子源模型造成的。另外发现, MCNPX 剂量衰减趋势与耦合方法基本一致,

而一维  $S_N$  方法则与耦合方法差别很大, 这是由于一维  $S_N$  方法无法描述 IFMIF 测试腔的复杂几何以及采用简化中子源模型造成的。

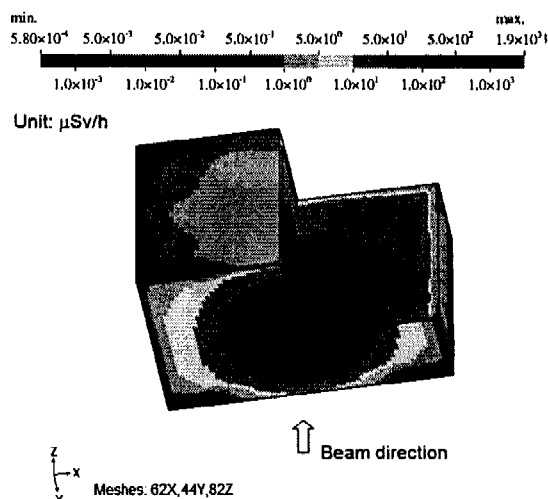


图 4 IFMIF 维修大厅剂量分布

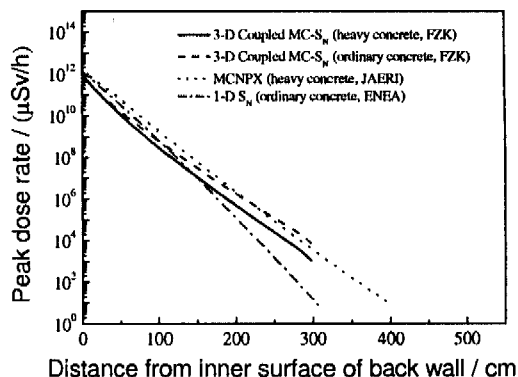


图 5 IFMIF 屏蔽计算方法比较

## 4 总结

由于几何结构复杂而且屏蔽层较厚, IFMIF 屏蔽系统设计非常复杂, 常用的计算方法无法满足其设计要求, 为解决这一问题, 开发了一种三维 Monte Carlo 与  $S_N$  的耦合计算方法与程序系统。本文对这一耦合计算方法与程序系统做了较详细的介绍, 包括其原理与测试计算, 最后对其在 IFMIF 三维屏蔽计算中的典型应用做了相关介绍, 并与其它方法做了比较分析。计算结果表明, 三维耦合计算方法与程序系统是解决大型复杂核系统精确屏蔽设计的有力工具。

## 参考文献:

- [1] International Fusion Materials Irradiation Facility. [http://insdell.tokai.jaeri.go.jp/IFMIFHOME/ifmif\\_home\\_e.html](http://insdell.tokai.jaeri.go.jp/IFMIFHOME/ifmif_home_e.html).
- [2] Gallmeier F X, Pevey R E. Proceeding of 3rd International Topical Meeting on Nuclear Application of Accelerator Technology. La Grange Park III, USA, 1999, 404—409.
- [3] Filges D, Neef R D, Schaal H, *et al.* Proceeding of the Specialist's Meeting of Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities. Arlington, USA, 1994, 253—270.
- [4] Chen Y, Fischer U. Nucl Instr and Meth, 2005, **A551**: 387.
- [5] Chen Y. Coupled Monte Carlo-discrete Ordinates Computational Scheme for Three-dimensional Shielding Calculations of Large and Complex Nuclear Facilities. Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA 7075, April 2005, ISSN 0947-8620.
- [6] Briesmeister J F (ed). MCNP——A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C. Report LA-13709 - M, Los Alamos National Laboratory, 2000.
- [7] Rhoades W A, Simpson D B. The TORT Three-dimensional Discrete Ordinates Neutron/Photon Transport Code. ORNL/TM-13221, Oak Ridge National Laboratory, 1997.
- [8] Cepraga D G, Cambi G, Frisoni M. JAERI-Tech 2003-005, IFMIF-KEP, 401—407, IFMIF International Team, Japan Atomic Energy Research Institute, 2003.
- [9] Ida M, Sugimoto M, Takeuchi H. JAERI-Tech 2003-005, IFMIF-KEP, 486—492, IFMIF International Team, Japan Atomic Energy Research Institute, 2003.
- [10] Simakov S P, Fischer U, *et al.* Journal of Nuclear Materials, 2002, **307—311**: 1 710.
- [11] Chadwick M B, Young P G, *et al.* Nucl Sci and Eng, 1999, **131**: 293.
- [12] Yu Konobeev A, Yu Korovin A, *et al.* Nucl Sci and Eng, 2001, **139**: 1.
- [13] Frisoni M, Cepraga D G, Cambi G. New Computational Tools and Data Libraries for IFMIF Shielding Calculations. FUS-TN-SA-SER-034, ENEA Report, 2002.
- [14] DOORS 3. 2, One-, Two- and Three-dimensional Discrete Ordinates Neutron/Photon Transport Code System. RSICC Computer Code Collection, CCC-650, 1998.
- [15] Hendricks J S, *et al.* MCNPX, Version 2. 5 E. Los Alamos National Laboratory Report, LAUR-04-0569, February 2004.

## Shielding Design of International Fusion Materials Irradiation Facility\*

CHEN Yi-xue<sup>1</sup>, WU Yi-can<sup>2</sup>, U. Fischer<sup>3</sup>

(1 Department of Nuclear Power Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2 Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

3 Forschungszentrum Karlsruhe, Germany)

**Abstract:** The International Fusion Materials Irradiation Materials Irradiation Facility (IFMIF) is a joint project within the framework of the Fusion Materials Implementing Agreement of the International Energy Agency (IEA). Shielding is one of the key issues of the IFMIF engineering design. Due to the complex geometry and large size of the shields, it is difficult to make accurate shielding design using the conventional computational tools. To handle this problem, a coupled 3-D computational scheme has been developed under the cooperation of the Institute of Plasma Physics of Chinese Academy of Sciences and Forschungszentrum Karlsruhe Germany. This paper presents the newly-developed 3-D coupled computational scheme and its application to the IFMIF shielding design.

**Key words:** IFMIF; fusion material; shielding; Monte Carlo; discrete ordinate method

\* Foundation item: International Cooperation Project of Forschungszentrum Karlsruhe(FZK) Germany