



## TMSR白光中子源关键核数据实验进展

王小鹤 胡继峰 韩建龙 蔡翔舟 王宏伟 刘龙祥 姜炳 郭子安 陈金根

### Experimental Progress of Key Nuclear Data in TMSR Photoneutron Source

WANG Xiaohe, HU Jifeng, HAN Jianlong, CAI Xiangzhou, WANG Hongwei, LIU Longxiang, JIANG Bing, GUO Zian, CHEN Jingen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2020082>

#### 引用格式:

王小鹤, 胡继峰, 韩建龙, 蔡翔舟, 王宏伟, 刘龙祥, 姜炳, 郭子安, 陈金根. TMSR白光中子源关键核数据实验进展[J]. *原子核物理评论*, 2020, 37(4):908–912. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2020082

WANG Xiaohe, HU Jifeng, HAN Jianlong, CAI Xiangzhou, WANG Hongwei, LIU Longxiang, JIANG Bing, GUO Zian, CHEN Jingen. Experimental Progress of Key Nuclear Data in TMSR Photoneutron Source[J]. *Nuclear Physics Review*, 2020, 37(4):908–912. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2020082

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### TMSR白光中子源本底屏蔽设计

Background Shielding Design for TMSR Photoneutron Source

原子核物理评论. 2020, 37(3): 777–783 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC38>

#### 小型模块化熔盐堆钍利用方案

Thorium Utilization Strategy for a Small Modula Molten Salt Reactor

原子核物理评论. 2017, 34(3): 672–676 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.672>

#### 钍基熔盐堆用238群中子–48群光子耦合多群常数库的屏蔽基准验证

Shielding Benchmarks of the 238–Neutron and 48–gamma Ray Coupled Group Constant Library for Thorium Molten Salt Reactor

原子核物理评论. 2017, 34(3): 682–690 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.682>

#### 散裂中子源高压二维位置灵敏<sup>3</sup>He探测器的实验研究

Experimental Study on Two-dimensional Position Sensitive Detector Filled with Helium-3 for the China Spallation Neutron Source

原子核物理评论. 2019, 36(3): 351–356 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.03.351>

#### 中国散裂中子源小角中子散射谱仪探测器研制

Small Angle Neutron Scattering Spectrometer Detector of China Spallation Neutron Source

原子核物理评论. 2019, 36(2): 204–210 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.02.204>

#### 核数据研究及应用的进展与展望

Progress and Prospects of Nuclear Data Research and Its Application

原子核物理评论. 2020, 37(3): 309–316 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC42>

文章编号: 1007-4627(2020)04-0908-05

## TMSR 白光中子源关键核数据实验进展

王小鹤<sup>1,2,3</sup>, 胡继峰<sup>1,2</sup>, 韩建龙<sup>1,2</sup>, 蔡翔舟<sup>1,2,3</sup>, 王宏伟<sup>3,4</sup>, 刘龙祥<sup>4</sup>, 姜炳<sup>1,3</sup>, 郭子安<sup>1,3</sup>, 陈金根<sup>1,2,3,†</sup>

(1. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800;

2. 中国科学院先进核能创新研究院, 上海 201800;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 中国科学院上海高等研究院, 上海 201204)

**摘要:** 钍铀燃料循环核数据的精度和可靠性直接关系着钍基熔盐堆的安全性和经济性。目前大多数核数据都是基于铀钚燃料循环进行开发, 若直接用在钍基熔盐堆上将会出现核设计不确定度较高的问题。为了提高钍基熔盐堆物理设计所需核数据的适用性, 中国科学院上海应用物理研究所自行设计并建造了紧凑型的 15 MeV 电子加速器驱动的白光中子源 (Photon Neutron Source, PNS), 用于开展钍铀燃料循环核数据的实验测量。该装置已通过技术验收, 并进行了一系列关键核素的核数据测量, 检验了现用核数据的可靠性, 为相关核素的核数据评价与改进提供了基础实验数据。

**关键词:** 白光中子源; 钍基熔盐堆; 钍铀燃料循环核数据; 总截面测量

**中图分类号:** TL32

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.37.2020082

### 1 前言

熔盐堆作为六种第四代反应堆中唯一一个液态燃料反应堆, 具有更好的本征安全性、防核扩散性、燃料循环方式灵活性和较高的钍资源利用率等特点<sup>[1]</sup>。2011 年, 中国科学院启动了“未来先进核裂变能——钍基熔盐堆核能系统”战略性先导科技专项 (TMSR), 旨在为我国核能大发展开辟一条符合中国国情的创新之路<sup>[2]</sup>。其中, 钍铀燃料循环核数据的研究是必须首要解决的关键核心问题之一。

钍铀燃料循环核数据是指钍铀燃料循环核反应链上主要核素的核数据, 如  $^{231}\text{Th}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{233}\text{Th}$ 、 $^{231}\text{Pa}$ 、 $^{232}\text{Pa}$ 、 $^{233}\text{Pa}$ 、 $^{234}\text{Pa}$ 、 $^{232}\text{U}$ 、 $^{233}\text{U}$ 、 $^{234}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}$  等。结合钍基熔盐堆的特点, 还需要考虑慢化剂、冷却剂、结构材料等材料的核数据。目前, 现有核数据大多是面向铀钚燃料循环研制的, 将该数据用于钍基熔盐堆, 将会引入较高的核数据不确定度<sup>[3]</sup>。世界各国都相继开展了相关的研究, 针对钍铀燃料循环核数据进行改进。改进的方法分为两种, 一种是以经过筛选后的实验数据为基础, 通过改进核数据评价方法, 重新评价相关核素的核数据; 另一种是结合反应堆的实际情况, 重新开展关

键核素的核数据测量并评价, 比如, 印度开展了一系列的钍铀燃料循环相关核素的截面实验测量并取得了重要的成果<sup>[4]</sup>。

为了满足 TMSR 对核数据的需求, 中国科学院上海应用物理研究所对钍铀燃料循环核数据开展了一系列的研究与改进工作。首先, 联合中国核数据中心 (CNDC) 研制并发布了钍铀燃料循环专用核数据库 (CENDL-TMSR-V1)<sup>[5]</sup>, 用于钍基熔盐堆的临界计算以及屏蔽设计<sup>[6]</sup>。该数据库以钍基熔盐堆的物理设计为主要原则, 结合宏观检验及微观评价的合理性, 从国际主流数据库中挑选合适的核数据<sup>[7]</sup>。同时, 根据钍基熔盐堆的特点, 重新选择合适的实验, 对  $^{232}\text{Th}$  和  $^{233}\text{U}$  的核数据进行了重新评价。其次, 自主设计并建造了 15 MeV 电子直线加速器驱动的白光中子源装置<sup>[8]</sup>, 用于钍铀燃料循环关键核素核数据的测量, 为其重新评价提供基础实验数据。

本文将介绍白光中子源及开展的一系列实验测量。首先阐述白光中子源的物理参数、主要特征以及数据获取系统。其次介绍已开展的实验测量, 主要包括核级石墨、氧化钍、GH3535 合金的总截面测量, 以及钍铀转换率与核级石墨的硼当量实验测量。

收稿日期: 2020-02-26; 修改日期: 2020-05-06

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项项目 (XDA22010501); 中国科学院前沿科学重点研究项目 (QYZDY-SSW-JSC016); 国家自然科学基金资助项目 (11875311)

作者简介: 王小鹤 (1985-), 男, 江苏泰兴人, 助理研究员, 博士研究生, 从事核科学与工程研究; E-mail: wangxiaoh@sinap.ac.cn

† 通信作者: 陈金根, E-mail: chenjingen@sinap.ac.cn.

## 2 TMSR 白光中子源装置

### 2.1 物理参数

基于 15 MeV 电子加速器驱动的白光中子源为紧凑型中子源, 所有设备均集中在同一实验大厅中, 其布局见图 1。电子加速器可产生能量为 15~20 MeV 的电子, 脉冲宽度为 3 ns~3  $\mu$ s(可调), 脉冲频率为 1~266 Hz(可调), 平均脉冲电流为 0.1 mA, 设计最大功率为 1.5 kW。

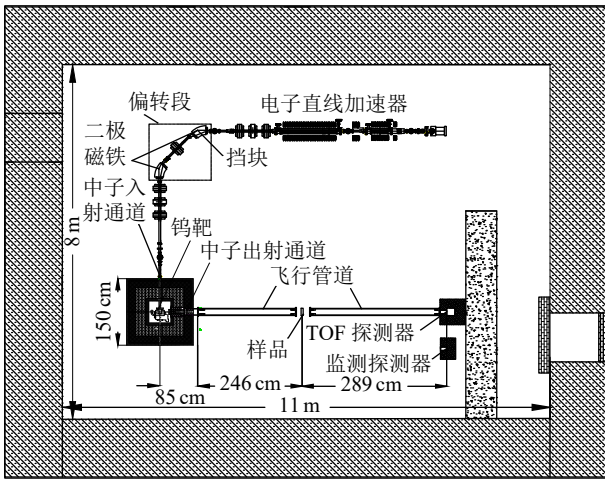


图 1 TMSR 白光中子源布局

电子加速器产生脉冲电子, 加速后达到 15 MeV, 通过三个挡块刮掉其余能量的电子后, 使用二极磁铁对电子进行 90°偏转, 然后轰击钨靶。电子受到靶的作用而减速, 发生韧致辐射反应, 产生高能 X 射线。高能 X 射线与靶核发生 ( $\gamma, n$ ) 反应, 产生中子。初级中子的峰值能量约 1 MeV, 通过 10 cm 厚的聚乙烯对中子进行慢化, 可获得需要的具有连续能谱的热中子。图 2 给出了通过 MCNP5 模拟计算得到的慢化前后的中子能谱。

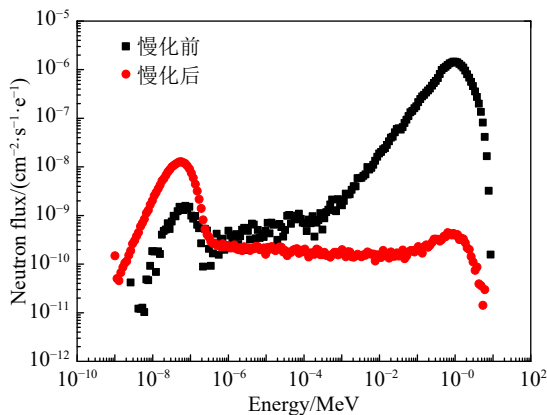


图 2 (在线彩图) 慢化前后的中子能谱

中子从垂直电子束的 90°方向出射, 通过两根低真空管道进行传输。在每根管道头尾及中间的位置放置 10 cm 的聚乙烯(含硼 5%)和 5 cm 厚的铅对中子进行准直。两根管道中间为样品区, 用于放置测量样品。中子飞行距离为 5.8 m。

### 2.2 装置特征

白光中子源采用了钨靶作为中子产生靶, 直径为 60 mm, 厚度为 48 mm, 纯度 99.7%。钨靶通过特殊工艺直接焊接在铜底座上。在中子产生靶的不同位置安装了 13 只热偶温度计, 用以监测中子产生靶的温度变化, 达到间接监测束斑位置及大小的作用。整个中子产生靶系统采用了独立水循环进行冷却, 放置在由铝、聚乙烯和铅组合而成的屏蔽壳中。该布局的主要优势在于结构简单, 体积小, 中子产生溢出率高<sup>[9]</sup>。

与其他中子源不同的是, 受到建筑空间的限制, 白光中子源的所有设备均集中在实验大厅中, 虽然对中子产生靶、探测器进行了一系列屏蔽, 但实验大厅中的环境 neutron/伽马本底仍然较高, 而且实验大厅外墙壁附近的剂量也较高, 严重影响了中子源的实验测量能力及正常运行。为了降低实验大厅中的环境本底, 自主设计并安装了复合局部屏蔽体<sup>[10]</sup>。最终, 中子能量在 0.01~0.1 eV 之间, 有效中子与本底中子的比值达到约 100:1, 在实验大厅外的环境剂量降至本底水平。该项工作在 2018 年 1 月份通过专家组的技术验收。

### 2.3 数据获取系统

白光中子源采用了对热中子较为敏感的  $^6\text{LiF}/\text{ZnS}(\text{Ag})$  探测器, 直径为 50 mm, 厚度为 0.5 mm, 热中子探测效率为 73.42%, 不确定度为 0.3%<sup>[11]</sup>。实验中采用了两个相同型号的中子探测器, 一个用于测量通过实验样品后的透射中子, 即 TOF 探测器; 一个用于监测束流强度的变化, 即监测探测器。

基于 CAEN 公司生产的数字波形采样器 (Digitizer, 型号为 DT5720), 自主开发了多功能数据获取软件系统 (TMSR-Digitizer-DAQ)<sup>[12]</sup>, 并与实验靶控制软件进行耦合, 实现了硬件控制、数据获取、波形在线显示、靶位自动定时更换、数据文件自动开机、自动报警等功能。该数据获取系统采用了自触发模式, 即在加速器的一个脉冲宽度范围内, 以加速器的 Gamma Flash 巨脉冲作为脉冲起始时间, 期间的小信号 (中子或者伽马) 都会自触发并被记录, 其时间作为事件终止时间。这种触发模式的优势在于可以记录任何触发阈值以上的信号, 提高中子/伽马射线的计数率。

### 3 白光中子源实验进展

利用白光中子源,对钚基熔盐堆的关键材料开展了一系列的总截面实验测量,主要包括慢化剂、结构材料以及燃料熔盐中的一些主要核素。同时,也开展了一些应用实验的研究。

#### 3.1 总截面实验测量

在钚基熔盐堆中,石墨作为慢化剂,GH3535合金作为结构材料,采用指定配比的含钚燃料熔盐( $\text{LiF-BeF}_2\text{-ThF}_4\text{-UF}_4$ )<sup>[13]</sup>。因此,基于白光中子源,主要测量了核级石墨、GH3535合金以及钚在低能区的总截面。

首先,对核级石墨进行了总截面的测量。图3给出了石墨总截面的测量结果,并与评价数据及已有实验数据进行了对比。在低能区,石墨的散射截面远大于吸收截面,可认为总截面近似于散射截面。由于美国的ENDF/B-VII.0评价数据库及EXFOR实验数据为常用的数据库,其可靠性得到了广大用户的一致认可<sup>[14]</sup>,因此,将测量结果与ENDF/B-VII.0中石墨的热中子散射数据(ENDF/B-VII.0/TSL)以及EXFOR中的实验数据(EXFOR/J.A.H)进行了对比。图中显示,在0.0045~0.007eV及0.015~0.03eV之间,基于白光中子源测量得到的截面要显著低于评价数据,主要是受到石墨晶体结构的影响。在其他能区,测量值与评价数据基本一致。在J.A.H开展的石墨总截面测量实验中,当中子能量小于在0.003eV时,截面都要高于评价数据。整体来看,基于白光中子源得到的截面要与ENDF/B-VII.0中的评价数据更为接近。

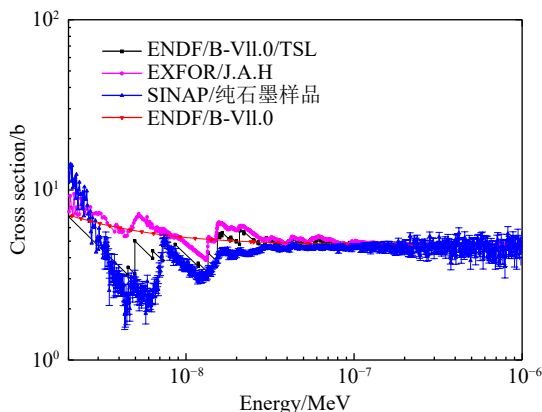


图3 (在线彩图)石墨总截面测量

其次,测量了773K时GH3535合金在热区的总截面,测量结果见图4。图中显示,在0.006eV以上,测量截面与ENDF/B-VII.0库中评价数据基本符合;在0.006eV以下,测量截面出现了明显的热中子散射效应

的布拉格峰,但是评价数据库中并没有相应的热中子散射数据。测量结果表明在低能区GH3535合金也存在热中子散射效应,但是现有评价数据并未考虑热中子散射效应的影响,后续需开展相关的理论计算,对该数据进一步的验证,并分析对钚基熔盐堆的影响。

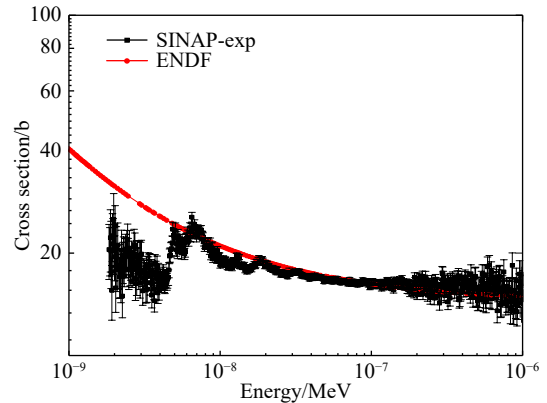


图4 (在线彩图)GH3535合金的总截面测量

最后,钚是钚基熔盐堆中的重要燃料核素,其核数据的精确性非常重要。因此,利用白光中子源测量了钚的总截面。实验中使用的是二氧化钚,厚度为9mm,扣除氧的总截面后可得到钚的总截面。图5给出了钚的总截面测量结果,并与评价数据(ENDF/B-VII.1)以及EXFOR数据库中已有实验数据(EXFOR/P.A.E)进行了对比。图中显示,在0.02eV以上,测量结果、已有实验数据、评价数据基本一致。但是,在0.02eV以下,评价数据呈光滑状态,已有实验数据有两个吸收峰,而测量结果呈现出明显的布拉格峰。氧化铀与氧化钚均为重金属燃料,在ENDF/B-VII.1热中子散射数据库中,氧化铀的热中子散射数据也存在类似结构<sup>[15]</sup>,因此也需要考虑氧化钚的热中子散射效应,后续将进一步优化实验,降低钚总截面的测量不确定度,并结合相关理论模型,开展钚的热中子散射数据研究。

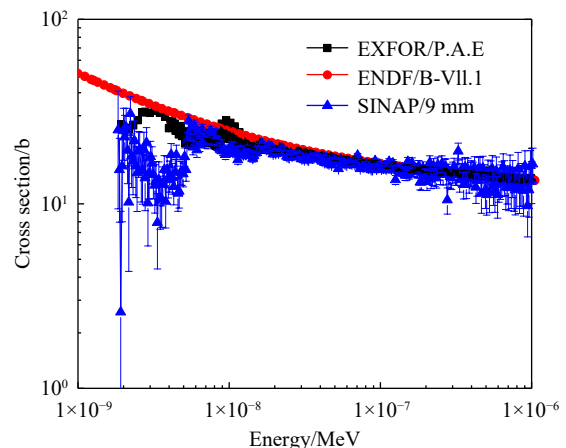


图5 (在线彩图)钚的总截面测量

### 3.2 应用实验

白光中子源除了可以进行总截面的测量, 还可以开展其他的实验测量, 如钚铀转换率、钚裂变率等中子学积分实验。目前主要完成了石墨的硼当量测量与氧化钚的辐照实验。

在反应堆设计中, 通常以硼当量来表示核材料的纯度, 硼当量是核材料纯度的重要指标之一 [16]。当样品中含有吸收中子的杂质时, 会引起宏观吸收截面的变化, 宏观吸收截面的变化由穿透率的对数差表示 ( $\Delta \ln TR = \ln(TR_0) - \ln(TR_n)$ ,  $\ln(TR_n) = \ln(I_n/I)$ ,  $I$  为入射中子束强度,  $I_n$  为经过第  $n$  个几何形状相同、硼当量不同的靶后未经碰撞的中子束强度,  $n=0$  表示该靶的硼当量近似为零)。通过一系列已知硼当量石墨样品的测量, 建立  $\Delta \ln TR$  与硼当量的关系, 获得硼当量刻度曲线。根据该刻度曲线, 通过白光中子源测量得到被测样品的  $\Delta \ln TR$ , 则可计算得到被测石墨样品的硼当量。石墨硼当量刻度曲线见图 6。其中, 理论刻度曲线为通过公式直接计算得到的刻度曲线, 模拟刻度曲线为通过 MCNP5 模拟计算得到的刻度曲线。结果显示, 在考虑各种不确定度后, 刻度曲线的斜率为  $6.35 \times 10^{-5}$ , 相对不确定度为 8.64%。根据该刻度曲线得到石墨测量样品的硼当量测量精度为 9.69%, 高于同条件下已有实验的硼当量测量精度 [17]。

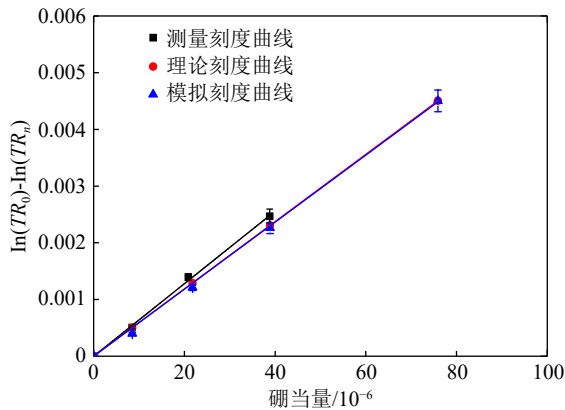


图 6 (在线彩图) 石墨硼当量刻度曲线(测量、理论、模拟)

为了检验钚铀燃料循环的转换性能, 初步开展了  $^{232}\text{Th}/^{233}\text{U}$  转换率的中子学积分实验研究。基于白光中子源, 对氧化钚进行辐照, 利用高纯锗探测器测量其伽马射线谱(图 7), 然后计算  $^{232}\text{Th}/^{233}\text{U}$  的转换率, 即  $^{233}\text{U}$  的产生量占  $^{232}\text{Th}$  初装量的份额。图中显示, 在辐照前, 可明显观测到  $^{228}\text{Ac}$  在 338.32 和 340.97 keV 的特征峰。辐照后, 可明显观测到  $^{233}\text{Pa}$  在 311.9 以及 340.48 keV 的特征峰, 表明二氧化钚经过辐照后, 发生  $(n, \gamma)$  反应, 生成  $^{233}\text{Th}$ ,  $^{233}\text{Th}$  发生  $\beta$  衰变生成了

$^{233}\text{Pa}$ 。由于  $^{233}\text{Pa}$  的半衰期为 27 d, 而在白光中子源上辐照时间仅为 1 d, 产生的  $^{233}\text{U}$  非常少, 未测量到  $^{233}\text{U}$ 。假设生成的  $^{233}\text{Pa}$  全部转换为  $^{233}\text{U}$ , 则此次实验  $^{232}\text{Th}/^{233}\text{U}$  的转换率为  $3.2 \times 10^{-12}$ 。

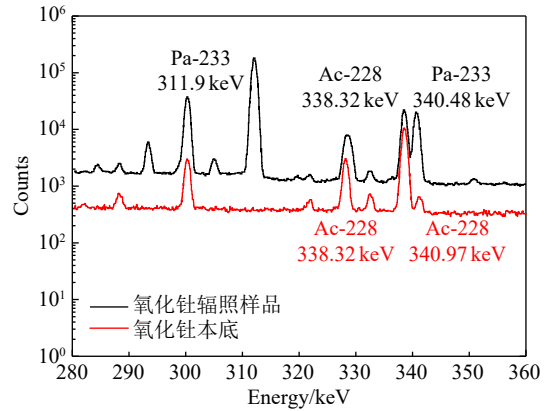


图 7 (在线彩图) 辐照前后的二氧化钚的伽马射线谱

## 4 总结

TMSR 白光中子源为紧凑型中子源, 主要集中于热区及共振区的核数据测量, 已开展了石墨、钚、GH3535 合金的总截面实验测量。结果显示, 石墨的测量结果与 ENDF/B-VII.0 中的评价数据基本符合, GH3535 合金在 0.006 eV 以上时测量结果与评价数据基本符合, 但在 0.006 eV 以下则出现明显的布拉格峰, 而钚在 0.02 eV 以下也同样出现了布拉格峰, 表明在低能区 GH3535 合金和钚也存在热中子散射效应, 后续需进一步验证。其次, 还开展了一些应用实验, 建立了白光中子源上的石墨硼当量测量方法, 并对钚铀燃料循环转换性能进行了初步验证。测量结果表明, 利用白光中子源可进行钚铀燃料循环关键核素的核数据测量, 为核数据的验证与改进提供基础实验数据, 以提高钚基熔盐堆物理设计的安全性和经济性。

### 参考文献:

- [1] GIF. A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems[R]. Paris: OECD Nuclear Energy Agency, 2013.
- [2] JIANG Mianheng, XU Hongjie, DAI Zhimin. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2012, 27(3): 366. (in Chinese) (江绵恒, 徐洪杰, 戴志敏. *中国科学院院刊*, 2012, 27(3): 366.)
- [3] WARIS A, PRAMUDITYA S, PERKASA Y S, et al. *International Journal of Nuclear Energy Science and Technology*, 2013, 8(1): 1.
- [4] GANESAN S. Nuclear Data Development Related to Th-U Fuel Cycle in India[C]. Thorium Energy Conference, ThEC2013. 2013. doi: 10.1007/978-3-319-26542-1\_31.
- [5] 核物理主题数据库[EB/OL]. [2020-02-12]. <http://www.nucle>

- ar.csdb.cn.
- [6] WANG Xiaohe, HU Jifeng, CHEN Jingen, et al. *Atomic Energy Science and Technology*, 2019, 53(8): 1. (in Chinese)  
(王小鹤, 胡继峰, 陈金根, 等. *原子能科学技术*, 2019, 53(8): 1.)
- [7] ZHAO Qiujuan, WU Haicheng, WU Xiaofei, et al. *Nuclear Physics Review*, 2017, 34(3): 682. (in Chinese)  
(赵秋娟, 吴海成, 吴小飞, 等. *原子核物理评论*, 2017, 34(3): 682.)
- [8] WANG Hongwei, CHEN Jingen, CAI Xiangzhou, et al. *Nuclear Techniques*, 2014, 37(10): 100522. (in Chinese)  
(王宏伟, 陈金根, 蔡翔舟, 等. *核技术*, 2014, 37(10): 100522.)
- [9] LIN Zuokang, SUN Guomin, CHEN jingen, et al. *Nuclear Science and Techniques*, 2012, 23: 272.
- [10] WANG X H, LIU L X, HU J F, et al. *Progress in Nuclear Energy*, 2019, 115: 74.
- [11] ZHU Liang, LIU Longxiang, WANG Hongwei, et al. *Nuclear Physics Review*, 2016, 33(3): 308. (in Chinese)  
(朱亮, 刘龙祥, 王宏伟, 等. *原子核物理评论*, 2016, 33(3): 308.)
- [12] LIU L X, WANG H W, MA Y G, et al. *Chinese Physics C*, 2017, 40(5): 70.
- [13] JI Ruimin, LI Minghai, ZOU Yang, et al. *Nuclear Science and Techniques*, 2017, 28(6): 76.
- [14] MOSTELLER R. *Nuclear Data Sheets*, 2014, 118: 442.
- [15] WORMALD J L, HAWARI A I. *Transactions of the American Nuclear Society*, 2016, 115: 1156.
- [16] IAEA. *Guidelines for Nuclear Transfers*[S]. INFCIRC/254/Rev.5/Part 1, 2002.
- [17] BOLEWSKIJR A, CIECHANOWSKI M, DYDEJCZYK A, et al. *Nucl Instr and Meth B*, 2005, 237(3-4): 602.

## Experimental Progress of Key Nuclear Data in TMSR Photoneutron Source

WANG Xiaohe<sup>1,2,3</sup>, HU Jifeng<sup>1,2</sup>, HAN Jianlong<sup>1,2</sup>, CAI Xiangzhou<sup>1,2,3</sup>, WANG Hongwei<sup>3,4</sup>, LIU Longxiang<sup>4</sup>,  
JIANG Bing<sup>1,3</sup>, GUO Zian<sup>1,3</sup>, CHEN Jingen<sup>1,2,3,†</sup>

(1. *Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;*

2. *CAS Innovative Academies in TMSR Energy System, Shanghai 201800, China;*

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

4. *Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China)*

**Abstract:** The accuracy and reliability of Th-U fuel cycle nuclear data have an important impact on the safety and economy of thorium based molten salt reactor. However, the existing nuclear data, which are developed based on U-Pu fuel cycle, will arise high uncertainty in the nuclear design of thorium molten salt reactor. In order to improve the applicability of nuclear data for the physical design of thorium molten salt reactor, a compact photoneutron source (PNS) driven by a 15 MeV electron LINAC was designed and built up by Shanghai Institute of Applied Physics of CAS for the measurement of Th-U fuel cycle nuclear data. The PNS has passed the technical acceptance, and carried out a series of nuclear data measurement for key nuclides, which are used for verifying the reliability of existing nuclear data and providing the basic experimental data for the evaluation and improvement of nuclear data.

**Key words:** Photoneutron source; Thorium molten salt reactor; Th-U fuel cycle nuclear data; total cross section measurement

Received date: 26 Feb. 2020; Revised date: 06 May 2020

Foundation item: Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences(XDA22010501); Key Research Program of FrontierSciences, CAS(QYZDY-SSW-JSC016); National Natural Science Foundation of China(11875311)

† Corresponding author: CHEN Jingen, E-mail: chenjingen@sinap.ac.cn.