

DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2021.01.015

· 监督与管理/论著 ·

气动磁镜氘氚聚变体中子源的辐射安全管理初探

邹静婷^{1,2}, 汪振¹, 陈超¹, 曾秋孙¹, 陈志斌¹

1. 中国科学院合肥物质科学研究院, 安徽 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学

摘要: 随着聚变能研究进入工程化阶段, 迫切需要高通量聚变体中子源开展材料和部件的辐照测试。基于气动磁镜 (Gas Dynamic Trap, GDT) 装置的聚变中子源具有中子通量高、测试空间大、建造成本低等优点, 是高通量聚变体中子源的理想方案。作为一种新型的放射性装置, 在我国现行核安全监管法律法规体系下, 如何对其开展辐射安全管理是在该装置建造之前必须要理清的问题。本文分析了 GDT 聚变体中子源的辐射安全特性, 阐明了 GDT 聚变体中子源的主要辐射源项, 并结合我国现有核安全监管法律法规要求, 提出 GDT 聚变体中子源在建造及应用过程中的辐射防护与安全管理要点, 建议 GDT 中子源作为 I 类射线装置管理, 运行之前应取得辐射安全许可证和核材料许可证, 特别需要注意对放射性氚的安全防护。本文为国际高通量聚变体中子源 ALIANCE 的辐射安全管理工作提供指导, 同时可供我国的核与辐射安全管理部门参考。

关键词: 气动磁镜; 中子源; 聚变; 氚; 中子活化产物

中图分类号: TL75+2 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2021)01-0069-04

Preliminary study on radiation safety management of Gas Dynamic Trap based D-T fusion volumetric neutron source

ZOU Jingting^{1,2}, WANG Zhen¹, CHEN Chao¹, ZENG Qiusun¹, CHEN Zhibin¹

1. Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031 China;

2. University of Science and Technology of China

Abstract: The fusion neutron source based on Gas Dynamic Trap (GDT) device has the advantages of high neutron flux, large testing space and low construction cost, so it is an ideal solution for high-flux fusion volumetric neutron source. As a new type of radioactive facility, how to carry out radiation safety management under the current nuclear safety regulatory laws and regulations in China is an important issue that must be addressed before the construction of this facility. In this paper, the radiation safety characteristics of GDT fusion neutron source was analyzed and the main radiation terms of GDT fusion neutron source were expounded. Combined with the existing nuclear safety regulatory laws and regulations in China, the key points of radiation protection and safety management in the process of construction and application of GDT fusion neutron source were put forward. It is recommended that the GDT neutron source should be managed as a class I radiological device. Prior to operation, radiation safety permit and nuclear material permit should be obtained, and special attention should be paid to the safety protection of radioactive tritium. This study will pay the way for the radiation safety management of the international high flux fusion neutron source ALIANCE project, and also provide the reference for the related nuclear and radiation safety management departments in China.

Keywords: Gas Dynamic Trap; Neutron Source; Fusion; Tritium; Neutron Activation Product

Corresponding author: CHEN Zhibin, E-mail: zhibin.chen@inest.cas.cn

聚变能被认为是人类的终极能源之一。为了达到聚变“点火”条件, 相对而言目前最容易实现的是氘氚聚变燃料方案。然而, 氘氚聚变反应会产生~14 MeV 的高能中子, 将对聚变材料和部件造成严重的辐照损伤。同时, 高能中子还会与材料发生嬗变反应, 生成

大量的氢和氦, 其与辐照损伤产生的缺陷相互作用, 造成材料的辐照肿胀和变形, 致使材料性能严重恶化^[1]。现有中子源在中子能谱、源强和测试空间等方面不能复现聚变堆内复杂的中子环境, 无法满足聚变堆部件的测试需求。因此, 迫切需要发展高通量、大

基金项目: 1. 国际原子能机构 (IAEA) 研究协调项目 (项目编号: F13018-22776) 2. 安徽省重点研究与开发计划国际科技合作专项 (项目编号: 202004b11020032) 3. 中俄青年科学家交流计划--气动磁镜 GDT 中子源的核安全设计与分析

作者简介: 邹静婷 (1988—), 女, 安徽六安人, 硕士研究生, 工程管理专业, 从事先进核能系统的辐射安全管理研究。E-mail: jingting.zou@inest.cas.cn
通信作者: 陈志斌, E-mail: zhibin.chen@inest.cas.cn

体积聚变中子源, 服务于聚变材料和部件的性能测试与研发。随着国际热核聚变实验堆 ITER 的推进和中国聚变工程实验堆 CFETR 的推进, 这一需求变得愈发强烈。

基于气动磁镜(Gas Dynamic Trap, GDT)装置的聚变中子源是目前国际公认的聚变体中子源重要候选方案^[2~4]。它是一种轴对称磁镜装置, 磁镜比高、等离子体散射损失少。相比托卡马克类方案, 其具有中子通量高、测试空间大、结构简单紧凑、等离子体易实现稳态运行、聚变氘消耗量低、建造运行成本低等优点, 不仅可满足聚变堆材料/部件验证的需求, 在其它先进核能系统、核科学、材料科学及生命科学领域也有广阔的应用前景。近年来, 中国科学院合肥物质科学研究院与俄罗斯科学院布德科尔核物理研究所(BINP)合作, 联合日本、乌克兰、瑞典等国际优势单位发起了基于 GDT 的国际高通量聚变体中子源 ALIANCE(寓意盟友, 倡导合作)大科学计划倡议^[5], 目前正在开展 ALIANCE 聚变体中子源总体设计和关键技术预研。

GDT 聚变体中子源含有大量的高能中子和百克量级的放射性氚, 如果使用和管理不当, 有可能引发职业辐照、放射性物质释放等辐射安全问题。作为一种新型的放射性装置, 如何对其开展辐射安全管理是在该装置建造之前必须要理清的问题。本文分析了 GDT 聚变体中子源的辐射安全特性, 并结合我国现行核安全监管法律法规要求, 提出了 GDT 聚变体中子源在建造及应用过程中的辐射防护与安全管理要点, 为 ALIANCE 聚变体中子源的辐射安全取证工作提供指导, 同时可供我国的核与辐射安全监管部门参考。

1 GDT 聚变体中子源的工作原理

GDT 概念最早在 1979 年由俄罗斯科学家 V.V. Mirnov 和 D.D. Ryutov 共同提出^[6], 其本质上是一种磁约束聚变装置, 原理及主要系统示意图如图 1 所示。

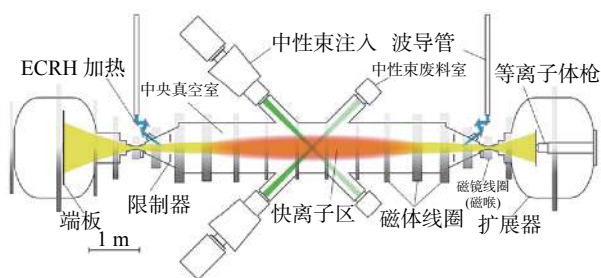


图 1 GDT 原理及主要系统示意图^[8]

Figure 1 The principle and main system of GDT^[8]

示。作为一种开端的磁约束装置, GDT 磁场位形与地球磁场类似, 呈现出磁场强度中间低、两端高的特点, 使得带电粒子受到一个指向弱磁场梯度运动方向的力, 被约束住的带电粒子就在这 2 个磁极间沿磁力线运动^[7]。

GDT 等离子体呈现双组分, 一是能量较低的温离子, 构成背景靶等离子体; 二是能量较高的快离子, 由聚变反应所需的氘氚燃料组成。在初始运行时, GDT 真空室内充斥着较高密度的背景靶等离子体。由于频繁碰撞, 靶等离子体在速度空间上呈各项同性的麦克斯韦分布, 因此很多宏观或微观不稳定性得到抑制, 从而使约束在 GDT 真空室中的等离子体行为适用于经典气体动力学理论。然后, 中性束注入系统以一定角度注入高能中性束粒子, 其与靶等离子体作用形成快离子。快离子在磁场约束下来回运动, 在靠近真空室两端的折返点处聚集, 因此该区域的等离子体密度最大, 氘氚聚变反应主要在这个区域发生, 从而产生高通量的 14 MeV 聚变中子^[9~10]。

2 GDT 聚变体中子源的辐射特性分析

GDT 聚变体中子源的典型设计参数为: 氘氚聚变功率 ~ 3 MW, 中子产额 $\sim 10^{18}$ n/s, 测试体积 > 1 m³。一般而言, 在正常运行时, 装置安装有严密的中子屏蔽材料来确保满足安全限值, 在停堆或事故工况下, 中子的产生将随即终止, 也不会造成严重的辐射危害。因此, GDT 中子源的辐射来源主要是氚和中子活化产物。

作为聚变燃料之一, 氚是一种 β 衰变的放射性核素, 半衰期为 12.3 年, 每克氚的放射性为 3.56×10^{14} Bq。由于 β 射线的能量低、射程短, 难以穿透皮肤, 所以氚对外照射危害较小^[11~12]。但是, 一旦氚被吸入人体内, 其放射性危害不容忽视, 尤其是以氚化水 HTO 形式, 其危害是气态氚 (HT、DT、T₂) 危害的约 2.6×10^4 倍^[9]。一个聚变功率为 ~ 3 MW 的 GDT 聚变体中子源, 满功率运行一年的氚消耗量约为 168 g, 考虑到无时无刻的衰变损失等, 氚的初始投料量在 ~ 300 g 量级, 总的放射性活度达到 $\sim 1.068 \times 10^{17}$ Bq, 这些氚主要分布于氚燃料循环系统中, 包括真空室、中性束注入系统、同位素分离系统、燃料贮存与运输系统等。

由于氚的渗透性非常强, 在正常运行工况下, 它将会渗透到屏蔽包层的冷却剂中, 也有可能直接渗透到空气中, 释放出来的氚通过氧化和同位素置换反

应,一般以 HTO 的形式存在,构成了 GDT 中子源气态流出物和液态流出物中氚放射性的主要部分。在事故工况下,理论上也存在氚释放的可能性,但是由于 GDT 中子源的结构简单易于包容,功率低且事故过程较为温和,即使发生真空室破口、氚管道泄漏等事故,预计发生大量放射性释放的可能性极低。

中子活化产物主要指的是氚氘聚变产生的中子与 GDT 装置的结构材料、液态冷却剂等发生活化反应产生的放射性产物,对人和环境的影响主要为 γ 辐射。部分活化产物还具有可移动性,包括活化粉尘和腐蚀活化产物,因而与放射性氚类似,具有潜在的环境释放风险。

粉尘主要来自高能等离子体与面向等离子体材料的相互作用,其成分与选取的材料有关,其被中子活化后而具有放射性,同时也会滞留氚。腐蚀活化产物取决于冷却管道材料。对于不锈钢管道,主要的腐蚀活化产物有 ^{55}Fe 、 ^{56}Mn 、 ^{60}Co 、 ^{51}Cr 、 ^{58}Co 等。此外,冷却剂也会被活化,例如水中的 ^{16}O 通过 (n, p) 反应会生成 ^{16}N , ^{16}N 是一种具有 γ 放射性的核素,半衰期为 7.13 s。衰变时释放出能量高达 6.13 MeV 和 7.12 MeV 的 γ 射线。

3 GDT 聚变体中子源的辐射安全管理要点分析

针对核能与核技术利用的辐射安全,我国已形成较为系统完备的法规标准体系。本节将参照我国现行核与辐射安全监管法律法规要求,结合 GDT 聚变体中子源的辐射特性,提出 GDT 聚变体中子源在建造及应用过程中的辐射防护与安全管理要点。

3.1 装置所属类型 明确 GDT 聚变体中子源是属于核设施,还是属于射线装置,是对其进行辐射安全管理的前提。依据《中华人民共和国放射性污染防治

法》,核设施主要包含核动力厂和研究堆、实验堆、临界装置等反应堆;射线装置,是指 X 线机、加速器、中子发生器以及含放射源的装置。虽然严格来讲, GDT 装置依赖氚氘聚变核反应产生中子,属于反应堆的范畴,但是其安全特性与传统反应堆有本质差异,其不存在链式反应,不存在超临界风险,同时由于氚氘聚变反应所需的条件十分苛刻,任何造成干扰的事件发生或任何粒子进入等离子体,都将导致聚变反应终止,因而具有固有安全性。此外,根据环境保护部 2016 年发布的《关于磁约束聚变实验装置辐射安全管理有关事项的通知》,磁约束聚变实验装置参照射线装置实施管理。GDT 也属于磁约束聚变装置,因此,建议将 GDT 聚变体中子源作为射线装置进行管理。

根据《射线装置分类》,事故时短时间照射可以使受到照射的人员产生严重放射损伤的应属于 I 类射线装置,其安全与防护要求高。EAST 全超导托卡马克核聚变实验装置、中国散裂中子源等均作为 I 类射线装置进行管理。GDT 聚变体中子源在放射性源项方面有类似之处,在此基础上还增加了放射性氚的问题,对其的安全与防护要求高,因此也应作为 I 类射线装置进行管理。

3.2 辐射安全许可 按照《放射性污染防治法》及相关法律法规,建造和使用 GDT 聚变体中子源的单位,在人员和配套条件方面应首先满足《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》第七条及《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》第十六条规定的条件,同时要编制环境影响评价报告书(I 类射线装置所必需的),并应取得所在地省级环保部门批复,然后再向有审批权的生态环境主管部门申请领取辐射安全许可证,申请的流程如图 2 所示。

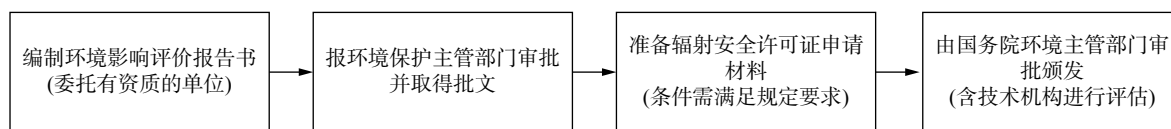


图 2 I 类射线装置的辐射安全许可证申办流程

Figure 2 Application procedure of radiation safety license for class I radiation device

3.3 放射性氚管理 氚以及含氚的材料和制品属于《中华人民共和国核材料管制条例》规定的核材料,而我国对核材料实行严格的许可制度。GDT 聚变体中子源(聚变功率为 ~ 3 MW 的)所需氚的初始投料量为 ~ 300 g,总的放射性活度为 $\sim 1.068 \times 10^{17}$ Bq,已满足《中华人民共和国核材料管制条例》规定的“累计调入量大于或等于 3.7×10^{13} Bq (1000 Ci) 的氚,必须申

请核材料许可证”的要求(见图 3)。同时,必须建立氚材料衡算制度和分析测量系统,达到国家规定的衡算误差要求,以保持核材料收支平衡。

针对 GDT 装置的氚循环系统,应参考 ITER、EU-DEMO、CFETR 等的最新氚燃料循环设计,尽可能用最小氚初始投料量满足 GDT 运行的要求。由于氚的强渗透性和高度迁移性, GDT 装置应至少设置 2 道

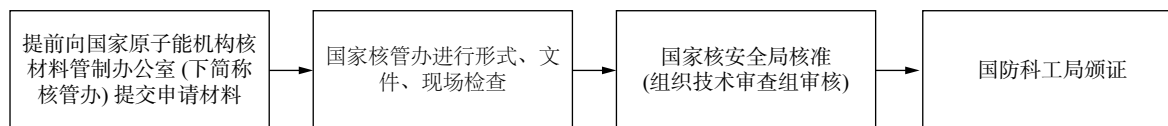


图 3 核材料许可证申办流程

Figure 3 Application procedure of nuclear material license

包容系统,且各包容系统之间应保持独立性。同时装置所在房间应维持负压,并配备气体除氚系统和水除氚系统。此外,GDT 装置内存在大量氢同位素,有泄露进而发生爆炸的可能性,还需要设置氢气安全系统。

3.4 人员安全和防护 按照《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》,直接从事 GDT 装置运行的操作人员以及辐射防护负责人应接受中级或高级辐射安全培训,并要求考核通过。在工作过程中,应对每位辐射工作人员进行个人剂量监测,并建立个人剂量档案。根据《注册核安全工程师执业资格关键岗位名录》,对于 GDT 装置这样的 I 类射线装置生产使用单位,最少需要 2 名注册核安全工程师,1 名负责核安全综合管理,1 名负责辐射防护。

根据《电离辐射防护和辐射源安全基本标准》GB 18871—2002,对工作人员的年职业剂量限值为连续 5 年有效平均剂量 20 mSv,任何一年内有效剂量不大于 50 mSv,可以根据辐射最优化原则及本聚变中子源装置的辐射源项特性设定更为严格的剂量限值指标。对于公众,年剂量限值则为 1 mSv。在装置的设计和运行管理中,需要开展详细的辐射屏蔽设计,根据计算得到的空间剂量场分布,确定最优的冷却管线布置和屏蔽层厚度,然后根据辐射防护的基本原则,对整个装置场地划分不同的辐射剂量区域,从而规划对遥操、现场部件更换以及人员接触的要求,评估人员维修过程可能受到的辐射剂量。

3.5 放射性废物管理 如第 2 章所述,GDT 聚变体中子源在运行服役期间产生的中子会使得大量的结构材料被活化。当这些部件因维修等原因被替换下来后,便被当做放射性废物。GDT 中子源产生的绝大部分放射性物质都属于低放。这些放射性废物将被收集并分类放置在配套的放废贮存室内,等待放射性衰变到足够低的时候,再运送到低放处置场。

同时,GDT 聚变体中子源在运行中还会产生一些包含放射性核素的废液和废气。前者的放射性主要来自 HTO 及腐蚀活化产物,在经过除氚系统过滤以及蒸发浓缩和离子交换等处理,达到豁免水平后,即可排放;后者的主要来自被活化的空气和氚等,经

过除氚系统过滤检测达标后即可排放。

4 总结

GDT 聚变体中子源内含有大量的高能中子和百克量级的放射性氚,如果使用和管理不当,有可能引发职业辐照、放射性物质释放等辐射安全问题。首先,本文分析了 GDT 聚变体中子源的辐射源项,指出氚、放射性粉尘、腐蚀活化产物是 GDT 装置中 3 大可移动源项,具有潜在的环境释放风险,而被中子活化的结构材料不可移动,对人和环境的影响主要为 γ 辐射。然后,结合我国现行核安全监管法律法规要求,提出了 GDT 聚变体中子源在建造及应用过程中的辐射防护与安全管理要点,主要包括建议 GDT 装置作为 I 类射线装置管理,并阐明了其辐射安全许可证和核材料许可证的取证流程;提出氚安全防护的建议,以及对人员防护和放废安全管理的要求等。本文研究成果不仅为国际高通量聚变体中子源 ALIANCE 的辐射安全管理工作提供指导,同时可供我国的核与辐射安全管理部门参考。

利益冲突声明 本研究由署名作者按以下贡献声明独立开展,排名无争议。文章不涉及任何利益冲突

作者贡献声明 邹静婷:设计论文框架,起草论文;汪振:参与撰写论文;陈超:参与撰写论文;曾秋孙:参与撰写论文;陈志斌:提出研究方向,修订论文、审核论文

参考文献

- [1] Knaster J, Moeslang A, Muroga T. Materials research for fusion[J]. *Nat Phys*, 2016, 12 (5) : 424-434. DOI: [10.1038/nphys3735](https://doi.org/10.1038/nphys3735).
- [2] Fischer U, Möslang A, Ivanov AA. Assessment of the gas dynamic trap mirror facility as intense neutron source for fusion material test irradiations[J]. *Fusion Eng Des*, 2000, 48 (3/4) : 307-325. DOI: [10.1016/S0920-3796\(00\)00164-2](https://doi.org/10.1016/S0920-3796(00)00164-2).
- [3] Molvik A, Ivanov A, Kulcinski GL, et al. A gas dynamic trap neutron source for fusion material and subcomponent testing[J]. *Fusion Sci Technol*, 2010, 57 (4) : 369-394. DOI: [10.13182/FST10-A9499](https://doi.org/10.13182/FST10-A9499).

(下转第 77 页)

DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2016.03.013](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2016.03.013).

- [14] 尚春林, 卢建坤. 检验检测机构现场操作考核的组织与实施[J]. 计量技术, 2017 (3): 64-66. DOI: [10.3969/j.issn.1000-0771.2017.03.20](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0771.2017.03.20).

Shang CL, Lu JK. Organization and implementation of on-site operation assessment of inspection and testing institutions[J]. Meas Tech, 2017 (3): 64-66. DOI: [10.3969/j.issn.1000-0771.2017.03.20](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0771.2017.03.20).

收稿日期: 2020-08-23

(上接第 72 页)

- [4] Knaster J. An assessment of the available alternatives for fusion relevant neutron sources[J]. Nucl Fusion, 2018, 58 (9): 095001. DOI: [10.1088/1741-4326/aacf4f](https://doi.org/10.1088/1741-4326/aacf4f).
- [5] Bagryansky PA, Chen Z, Kotelnikov IA, et al. Development strategy for steady-state fusion volumetric neutron source based on the gas-dynamic trap[J]. Nucl Fusion, 2020, 60 (3): 036005. DOI: [10.1088/1741-4326/ab668d](https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab668d).
- [6] Mirnov VV, Ryutov DD. Linear gasdynamic system for plasma confinement[EB/OL]. 1979. <https://www.osti.gov/biblio/5565404-linear-gasdynamic-system-plasma-confinement>, [2020-07-20].
- [7] 曾秋孙. 高能增益GDT聚变中子源物理设计研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- Zeng QS. Physics design of high energy gain fusion neutron source based on gas dynamic trap[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.
- [8] 曾秋孙, 邹小亮, 廉超, 等. GDT聚变中子源驱动的嬗变系统的初步物理设计与包层中子学分析[J]. 核科学与工程, 2018, 38 (2): 217-224. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0918.2018.02.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0918.2018.02.006).
- Zeng QS, Zou XL, Lian C, et al. Preliminary physical design and blanket neutronics analysis of a transmutation system driven by the gas dynamic trap based fusion neutron source[J]. Nucl Sci Eng, 2018, 38 (2): 217-224. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0918.2018.02.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0918.2018.02.006).
- [9] 陈德鸿, 杜红飞, 蒋洁琼, 等. 基于GDT的聚变裂变混合堆堆芯参数初步设计研究[J]. 核科学与工程, 2012, 32 (1): 63-67.

DOI: [10.3969/j.issn.0258-0918.2012.01.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0918.2012.01.011).

- Chen DH, Du HF, Jiang JQ, et al. Preliminary design of core plasma parameters for the fusion-fission hybrid reactor based on GDT[J]. Nucl Sci Eng, 2012, 32 (1): 63-67. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0918.2012.01.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0918.2012.01.011).
- [10] 杜红飞, 陈德鸿, 蒋洁琼, 等. 基于GDT的14 MeV中子源初步设计研究[J]. 核科学与工程, 2012, 32 (1): 68-73. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0918.2012.01.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0918.2012.01.012).
- Du HF, Chen DH, Jiang JQ, et al. Preliminary design of GDT-based 14 MeV neutron source[J]. Nucl Sci Eng, 2012, 32 (1): 68-73. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0918.2012.01.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0918.2012.01.012).
- [11] 王孔钊, 王悦, 肖薇, 等. 秦山三核重水堆核电站职业氚内照射监测报告[J]. 中国辐射卫生, 2018, 27 (4): 294-298. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714x.2018.04.002](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714x.2018.04.002).
- Wang KZ, Wang Y, Xiao W, et al. Personnel dosimetry report on occupational tritium internal exposure of third Qinshan heavy water reactor nuclear power plant[J]. Chin J Radiol Heal, 2018, 27 (4): 294-298. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714x.2018.04.002](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714x.2018.04.002).
- [12] 侯炳君, 赵鸿翮, 温晋爱, 等. VVER机组商运后的氚剂量监测与评价[J]. 中国辐射卫生, 2019, 28 (6): 671-676. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714x.2019.06.020](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714x.2019.06.020).
- Hou BJ, Zhao HR, Wen JA, et al. Monitoring and evaluation on Tritium dose in VVER unit after commercial operation[J]. Chin J Radiol Heal, 2019, 28 (6): 671-676. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714x.2019.06.020](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714x.2019.06.020).

收稿日期: 2020-07-23