

磁约束聚变装置辐射监测系统概况

李成勋^{1,2} 霍志鹏¹ 钟国强¹ 胡立群¹

1(中国科学院合肥物质科学研究院 合肥 230031)

2(中国科学技术大学 合肥 230026)

摘要 采用氘、氚燃料的核聚变反应会产生大量的中子、 γ 射线及活化产物等,对人员和环境的辐射安全产生影响。为了减小电离辐射带来的影响,需要准确掌握聚变装置核辐射场强度的时间与空间分布信息。世界上已建设的磁约束聚变装置,均根据其自身运行工况特点,建立了完整的核辐射监测系统来应对电离辐射带来的潜在影响。通过对磁约束聚变装置运行及维护期间辐射剂量的监测,获得实验场所与外围环境的电离辐射和放射性核素数据,为辐射安全防护管理提供数据支撑。基于对国内外磁约束聚变装置辐射监测系统的调研,本文归纳了此类装置主要的电离辐射源项及监测系统架构,进而介绍了磁约束聚变中子与 γ 辐射剂量的测量方法及常用探测器。最后综述了国内外核聚变装置辐射监测系统的研究状况,展望了未来核辐射监测系统的发展趋势与目标。

关键词 磁约束聚变, 电离辐射, 中子, γ 射线, 辐射监测

中图分类号 TL75⁺1

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.020001

Survey of radiation monitoring system for magnetic confinement fusion device

LI Chengxun^{1,2} HUO Zhipeng¹ ZHONG Guoqiang¹ HU Liqun¹

1(Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

2(University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract The nuclear fusion reaction using deuterium and tritium fuel produces a large number of neutrons, γ rays and activation products, which have an impact on the radiation safety of people and the environment. In order to reduce the impact of ionizing radiation, it is necessary to know accurately well the time and space distribution information of nuclear radiation field intensity in fusion device. The magnetic confinement fusion devices built in the world have established a complete nuclear radiation monitoring system according to their own operating conditions to deal with the potential impact of ionizing radiation. By monitoring the radiation dose during the operation and maintenance of the magnetic confinement fusion device, the ionizing radiation and radionuclide data of the experimental site and the surrounding environment are obtained, which provides data support for radiation safety protection management. Based on the investigation of radiation monitoring systems of magnetic confinement fusion device at home and abroad, the main ionizing radiation source terms and monitoring system architecture are reviewed

中国科学院合肥大科学中心"高端用户培育基金"(No.2020HSC-UE012)、中国聚变堆主机关键系统综合研究设施项目(No.2018-000052-73-01-001228)、能源研究院(安徽省能源实验室)项目(No.21KZL401、No.21KHH105、No.21KZS205)资助

第一作者: 李成勋, 男, 1994年出生, 2017年毕业于安徽理工大学, 现为硕士研究生, 研究领域为核辐射监测与防护

通信作者: 霍志鹏, E-mail: zhipeng.hu@ipp.ac.cn; 钟国强, E-mail: gqzhong@ipp.ac.cn

收稿日期: 2022-07-04, 修回日期: 2022-12-06

Supported by the Users with Excellence Program of Hefei Science Center, Chinese Academy of Sciences (No.2020HSC-UE012), Comprehensive Research Facility for Fusion Technology Program of China (No.2018-000052-73-01-001228), Institute of Energy, Hefei Comprehensive National Science Center (No.21KZL401, No.21KHH105, No.21KZS205)

First author: LI Chengxun, male, born in 1994, graduated from Anhui University of Science and Technology in 2017, master student, focusing on nuclear radiation monitoring and protection

Corresponding author: HUO Zhipeng, E-mail: zhipeng.hu@ipp.ac.cn; ZHONG Guoqiang, E-mail: gqzhong@ipp.ac.cn

Received date: 2022-07-04, revised date: 2022-12-06

in this paper, and the measuring methods and common detectors of neutron and γ radiation dose in magnetic confinement fusion are introduced. Finally, the research status of radiation monitoring system for nuclear fusion devices at home and abroad is summarized, and the development trend and goal of nuclear radiation monitoring system in the future are prospected.

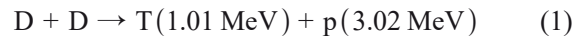
Key words Magnetic confinement fusion, Ionizing radiation, Neutron, γ ray, Radiation monitoring

核聚变能被视为解决人类未来能源危机的终极能源而备受关注,目前受控核聚变研究途径主要包括磁约束聚变与惯性约束聚变这两种。核聚变反应需要将氘氚加热到上亿摄氏度高温,该温度下原子的电子被剥离出去形成等离子态。对于磁约束聚变,在强磁场下带电粒子受到洛伦兹力作用,垂直磁力线方向受磁约束作回旋运动,而沿磁力线方向作自由运动,通过强磁场对等离子体的约束作用实现受控聚变反应^[1]。惯性约束聚变是利用高功率激光照射氘氚形成的靶丸表面,强激光束加热靶丸表面电离形成等离子并快速膨胀,向外膨胀时根据动量守恒定理向中心部分挤压而反向压缩燃料,当压缩到一定程度时产生的高温高压使氘氚发生聚变反应。惯性约束聚变要求激光功率足够大且激光照射必须均匀,对于靶壳厚度的要求也相当严苛。经过长时间的探索,科学家发现利用磁约束实现受控核聚变是实验路径中最具有希望的一种。

磁约束聚变探索过程中经历了箍缩、磁镜、仿星器、托卡马克等多种途径^[2]。从20世纪80年代后,磁约束核聚变的研究主要集中在托卡马克装置上。托卡马克的概念最初是苏联专家提出的,托卡马克(Tokamak)在俄语中是由“环形、真空室、磁、线圈”的开头词组成。托卡马克是环形强磁场装置,中心是环形真空室并在外围缠绕线圈。对等离子体进行高温加热,托卡马克通过强磁场将真空室内部的高温等离子体约束在环形真空内,实现高参数受控核聚变反应并释放出大量能量。托卡马克的强磁场是由环向线圈产生的环向磁场与等离子体电流自身形成的极向磁场共同组成的螺旋磁场。20世纪80年代以来,国内外相继建设一批大型托卡马克装置,如日本的JT-60(后升级为JT-60U)、欧洲联合环(Joint European Torus, JET)、中国环流器二号A(HL-2A)、全超导托卡马克核聚变实验装置(Experimental Advanced Superconducting Tokamak, EAST)、国际热核聚变实验堆(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)等,其中国际热核聚变实验堆ITER仍处于在建当中。与托卡马克装置相比,仿星器装置也不断发展,如日本大型仿星器装置(Large Helical Device, LHD)。这些聚变装置的建设验证了多项聚变工程的前沿关键技术,极大推动

磁约束受控核聚变研究领域的巨大发展。

磁约束聚变装置采用氘、氚燃料的核聚变反应,主要采用D-D放电与D-T放电两种模式,核反应过程如式(1)。D-D核反应产生平均能量为0.82 MeV的 ^3He 和2.45 MeV的中子或产生平均能量为1.01 MeV的氚和3.02 MeV的质子。D-T核反应截面最大,所需温度相对较低,更容易发生聚变反应并产生平均能量为3.56 MeV的 ^4He 和14.03 MeV的中子。



磁约束聚变装置在放电时不仅直接产生聚变中子及次级 γ 射线,而且高能中子作用于装置金属壁材料导致金属材料活化,在停机状态下活化的材料仍然具有放射性辐射残留。不仅如此,为了达到聚变反应需要的高温高压环境,需要外部高功率中性束辅助加热系统来完成,而等离子体中性束辅助加热系统自身就是辐射源,在放电过程中会产生大量的韧致辐射、 γ 射线与部分中子。D-T放电运行时,通过注入氩杂质可以改善对等离子体的约束作用,在放电时氩被中子活化生成放射性 ^{41}Ar ^[3]。并且,中子通过对冷却水活化生成 ^{14}C 与 ^{13}N 等。因此磁约束聚变装置D-T放电时通过真空泵后会释放 ^3H 、 ^{41}Ar 、 ^{14}C 、 ^{13}N 等放射性气体。图1为磁约束聚变堆(D-T)运行中产生的主要核辐射和核素^[4]。

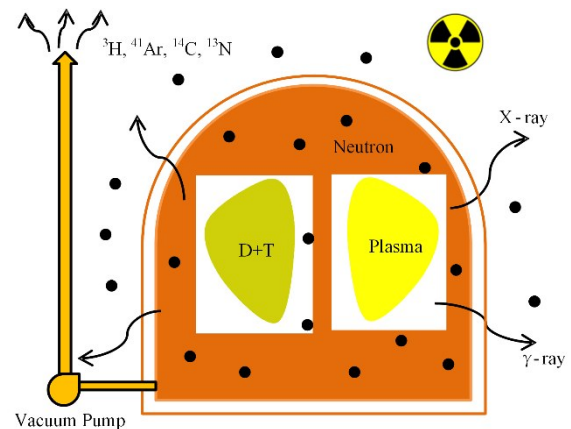


图1 磁约束聚变堆(D-T)运行中产生的主要核辐射和核素
Fig.1 Main nuclear radiation and nuclide produced during the operation of magnetic confinement fusion reactor (D-T)

总之,磁约束聚变装置放电产生的辐射主要包括中子辐射、 γ 射线辐射、放射性氙、中子活化产生的各种放射性核素等。这些辐射可对人体产生较强的生物效应危害健康,个体主要表现在确定效应和随机效应。确定效应指随着电离辐射剂量增加而增加的生物效应,它存在剂量阈值,当剂量达到或超过剂量阈值时而发生的效应,如白内障、皮肤损伤、白细胞减少等。随机效应指生物效应的发生概率与照射剂量的大小有关的生物效应,如辐射致癌和遗传效应。达到一定剂量的电离辐射可以导致人类生殖细胞的基因突变,最终导致后代患有遗传性疾病和先天性畸形的可能,造成严重损害^[5]。因此,磁约束聚变装置根据自身运行工况特点,建立核辐射监测系统十分必要。利用核辐射监测系统进行监测,能够准确获得聚变装置在整个运行阶段不同运行参数条件下辐射强度变化信息。同时,为辐射安全防护管理提供数据支撑,降低电离辐射对人员和环境的影响,保障工作人员和环境安全。

1 辐射监测系统架构

磁约束聚变装置在放电时产生的中子和 γ 射线是电离辐射产生的主要源头,也是监测的重点内容。中子的来源主要包括两部分:D-D与D-T直接聚变反应产生中子;高能逃逸电子与次级高能硬X射线作用某种物质发生光致核反应产生光致中子。而 γ 射线的来源主要包括高能离子与装置第一壁和偏滤器等杂质核反应、中子与材料在输运时非弹性散射和辐射俘获、中子活化设备与材料产生放射性核素衰变等途径。而潜在的放射性来源主要是中子活化产物与放射性氙,然而实现受控核聚变就难于避免出现放射性问题,这些均是影响工作人员与环境安全的主要因素,是实现聚变能安全可控利用的一大难点。

一个比较完备的磁约束聚变装置辐射监测系统应有多个监测子系统组成,针对磁约束聚变装置主要的运行工况和源项而建立的辐射监测系统应该包括中子与 γ 实时剂量监测、中子与 γ 累积剂量监测、人员辐射剂量监测与氙监测等监测子系统。图2为核聚变装置辐射监测系统架构图,它普遍适用于一个比较完备的磁约束聚变装置辐射监测系统,是一种理想化状态。然而由于国内外磁约束聚变装置发展阶段、技术水平、探测实际需求等各不相同,因此并不是所有聚变装置均全部配套监测子系统。在所有监测子系统中,对中子与 γ 射线的测量是整个监测系统最核心的一部分,国内外磁约束聚变装置都高度重视对中子与 γ 射线的在线监测,也是本文论

述的重点内容。

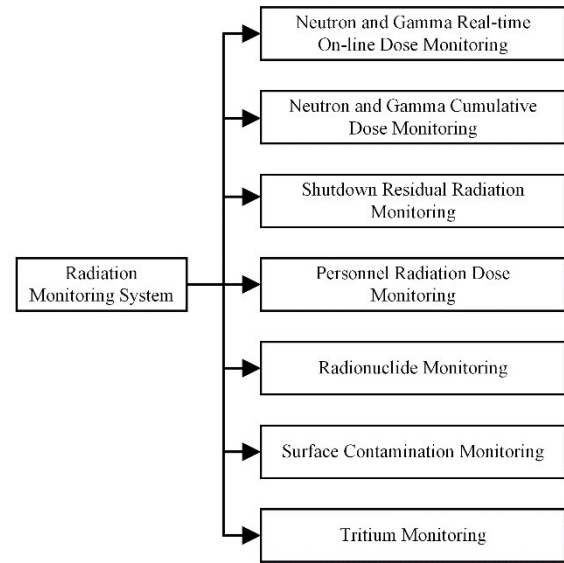


图2 核聚变装置辐射监测系统架构图
Fig.2 Block diagram of radiation monitoring system for nuclear fusion device

目前国内外磁约束聚变装置均建立了中子与 γ 实时剂量在线监测子系统。磁约束聚变装置在D-D或D-T等离子体放电期间均产生大量中子及中子诱导产生的次级 γ 射线,并以混合辐射场形式辐射到外部空间。为了更好地掌握辐射场不同区域范围中子及 γ 射线的空间分布随时间的演化信息,根据聚变装置不同区域监测实际需求,选择相对应的中子与 γ 探测器。中子和 γ 射线与探测器靶物质某种相互作用,产生带电粒子进行激发或电离,输出相对应的脉冲信号,通过对脉冲信号进一步处理,从而获得辐射剂量数据。

磁约束聚变装置建立中子和 γ 射线累积剂量监测子系统是由于中子与 γ 实时在线监测系统可能存在探测器响应不及时、漏计数甚至过饱和等问题,此时实时在线监测系统测量的数据存在误差,因此可选择热释光剂量计(Thermo-Luminescence Dosimeter, TLD)或光释光(Optically Stimulated Luminescence, OSL)剂量计实现辐射累积剂量监测。以热释光剂量计为例,热释光剂量计是利用热致发光原理实现对辐射累积剂量测量的器件,其内部有固体晶体,辐射场照射热释光剂量计晶体,产生自由电子与空穴,接着自由电子被导带俘获,而空穴又被激发能级俘获。对剂量计进行加热处理,此时空穴中的能量以光的形式释放出来,产生的光强度与辐射能量成正比例关系,从而实现辐射剂量的测量。热释光剂量计工作性能较好,可同时监测中子、 γ 射线、X射线和 β 射线等辐射累积剂量,对在线监测系统进行补充与验证。

磁约束聚变装置建立停机残余辐射监测子系统是由于聚变装置在停机后电离辐射物已衰减至较低水平,但仍然有部分残余辐射,尤其是真空室内部区域。工作人员在停机对设备进行检修时,仍然存在潜在危害。为了能够准确获得停机后的辐射强度,可以使用便携式多功能辐射测量仪快速测量辐射强度。便携式多功能辐射测量仪种类较多且功能强大,可同时测量中子、 α 、 β 、 γ 、X等放射性水平。将便携式测量仪放置大厅不同区域多个测量点,多次测量取其平均剂量,从而实现停机后残余辐射的监测,为划定辐射区域提供数据支撑。

磁约束聚变装置建立人员辐射剂量监测子系统是由于聚变装置虽然外围有比较厚的屏蔽墙,但是仍然有少量辐射通过门缝、管道、天空反散射等进入外部环境,同时聚变装置在中子活化作用下自身就带有辐射,这些都是个人辐射剂量的来源。聚变装置在整个运行期间都需要工作人员长期值班,在停机时工作人员要进入聚变装置内部检修,因此需要对重点工作人员建立个人剂量监测数据档案,及时掌握工作人员的辐射情况及健康报告。工作人员要正确佩戴个人剂量计,对于进入大厅内部的人员不仅佩戴常规个人剂量计,还应当携带报警式剂量计。通过个人辐射剂量监测数据来验证防护水平,从而为完善辐射防护措施提供数据支撑。

磁约束聚变装置建立放射性核素监测子系统是由于聚变装置放电时通过真空泵后会释放经中子活化产生的 ^{41}Ar 、 ^{14}C 、 ^{13}N 等放射性核素,这些核素会迁移到环境中,目前科学家正在积极研究放射性核素迁移对外界的影响,只有达到排放要求的核素才能允许被释放到空气中^[6]。

磁约束聚变装置建立表面污染监测子系统是由于聚变装置在放电时会产生 α 、 β 表面污染,装置停机时在装置大厅的墙体表面、真空室内壁表面、实验器件表面以及地面仍然有部分放射性残余,这些表面污染仍然对工作人员的安全造成影响,因此可以使用便携式智能 α 、 β 表面污染测量仪,该测量仪能

够自动区分 α 、 β 粒子,通过单片机自动控制,能够实现连续采集并存储数据,从而实现对装置大厅内表面污染监测。

磁约束聚变装置建立氚监测子系统是由于聚变装置在D-D等离子体放电时氚是聚变产物,在D-T放电时又是燃料,氚本身就具有 β 放射性, β 粒子能量较低,通过外照时对人体影响较小。然而当被吸食到人体内部时对人体还是有较大影响,因此对于氚的监测十分必要。为了实现对放射性氚的监测,可选择电离室探测器或采样器进行测量。JET装置是全世界首个实现D-T放电运行的托卡马克装置,自身安装有氚监测系统。国际热核聚变实验堆ITER也是采用D-T放电,在其建设过程中,工作人员也高度重视对氚的监测。

2 中子与 γ 射线探测

聚变装置放电产生大量放射性物质,相比于其他辐射,中子和 γ 射线是监测系统最重要的探测目标。由于中子与 γ 射线均不带电,当它们通过一种物质时,不能直接电离或激发该物质,也不能直接被检测到。只有当辐射穿过物质并与物质相互作用时,才能直接或间接获得有关辐射类型、能量和强度等信息,因此对于中子与 γ 射线的探测必须选择合适的探测器。中子与 γ 射线探测器种类繁多,不同探测器的灵敏度、稳定性、探测与甄别效率、时间与能量分辨率等都有差异,因此根据聚变装置自身特点与实际需求,应选择不同种类的探测器,实现对中子与 γ 射线最有效的测量。本文主要介绍聚变装置中辐射监测几种常用的中子与 γ 射线探测器的选型,并简单描述了辐射在线监测系统的主要组成。

2.1 探测原理

中子与原子核的相互作用方式主要为弹性散射、非弹性散射、辐射俘获和裂变反应等,其相互作用机制分别如图3所示^[7]。

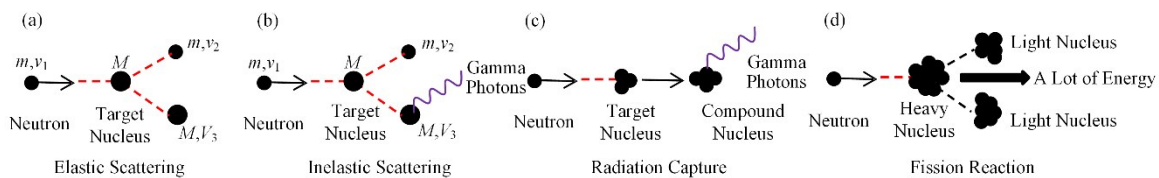


图3 中子与原子核的相互作用机制 (a) 弹性散射, (b) 非弹性散射, (c) 辐射俘获, (d) 裂变反应

Fig.3 Interaction mechanism between neutron and nucleus

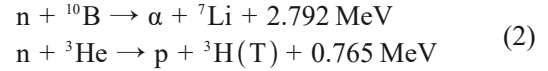
(a) Elastic scattering, (b) Inelastic scattering, (c) Radiation capture, (d) Fission reaction

中子与物质的原子核作用,中子把自身能量传递给原子核,且中子与原子核总动能与总动量前后

保持不变,原子核未发生能级跃迁现象,这个过程称为弹性散射,图3(a)为弹性散射示意图。中子与物

质的原子核作用,中子将部分能量传递给原子核得到反冲,且其中一部分能量用于原子核能级跃迁,中子和原子核作用前后总动能减少,这个过程称为非弹性散射,图3(b)为非弹性散射示意图。中子与物质的原子核作用被吸收形成复合核,复合核比原有原子核多一个中子,此时的复合核处于不稳定激发态,具有放射性,当放射性核素退激释放 γ 射线后回到基态,图3(c)为辐射俘获示意图。当中子轰击如 ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{239}Pu 等重原子核时,会使一个重原子核分裂成两个或多个较轻的原子核,并释放大能量,这个过程称为裂变反应,图3(d)为裂变反应示意图。对中子的探测是通过中子与靶核的某种相互作用产生带电粒子引起的电离或激发进行探测,输出与中子剂量或能量成正比关系的脉冲信号,从而达到测量中子的目的。

目前探测中子主要有核反冲探测、核反应探测、核裂变探测和活化探测这四种基本方法。为了得到聚变放电产生的中子一般最常用的是采用核反应探测方法,中子与探测器中物质靶核的相互作用产生次级带电粒子,将获取的模拟电脉冲信号转换成数字信号并记录,从而得到中子计数率和中子剂量率等参数。采用核反应法探测中子在不同的能区和目的有着不同的方法,此处给出代表性的两种反应方程式(2)以做示例说明。



对于 γ 射线的探测主要依赖于 γ 射线通过物质时和原子进行相互作用而产生光电效应、康普顿效应和电子对效应,其相互作用机制分别如图4所示^[8]。光电效应是指 γ 光子与靶物质的原子发生作用,把自身全部能量作用于靶物质原子内层的一个电子上,使电子脱离靶物质原子束缚被激发出去产生光电子而光子自身消失的效应,图4(a)为光电效应示意图。康普顿效应是指 γ 光子与物质的原子发生作用,使原子外层轨道电子脱离束缚形成反冲电子的效应,图4(b)为康普顿效应示意图。电子对效应是指能量超过1.022 MeV的 γ 光子进入靶物质原子,经过靶物质原子核,在原子核库仑力的作用下,而产生两个能量为0.511 MeV的正负电子对(e^+ , e^-)的效应,图4(c)为正负电子对效应示意图。与探测中子原理相似,辐射场中 γ 射线作用于探测器,和靶原子相互作用而产生电离,电离激发产生的电子在库仑力作用下继续碰撞靶物质,促进更多电离的发生。带电粒子在高电压场下被电极收集,从而输出与 γ 射线剂量或能量成正比关系的脉冲信号。进一步计算并分析脉冲信号,从而得到辐射场中 γ 射线的参数信息。

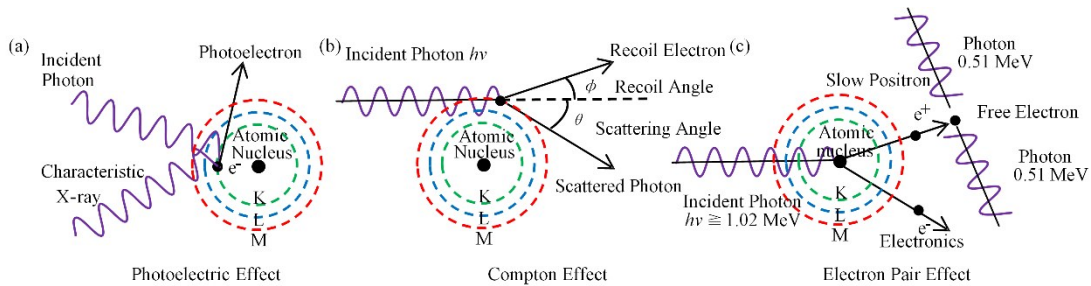


图4 γ 射线与原子的相互作用机制 (a) 光电效应, (b) 康普顿效应, (c) 正负电子对效应

Fig.4 Interaction mechanism between γ ray and atoms (a) Photoelectric effect, (b) Compton effect, (c) Electron pair effect

2.2 探测器选型

聚变装置放电产生的辐射场是混合场,首先,辐射场中探测器的选择一定要有较高的探测效率,能快速获取数据信号,方便后端处理与判断。其次,探测器要有较高的时间与能量分辨率,能准确识别中子与 γ 射线的响应信号。紧接着,探测器要有较强的中子与 γ 射线甄别能力,能够准确分辨中子与 γ 射线。最后,探测器工作时要有一定的稳定性,对复杂环境要有良好的适应性,从而保障探测器长期稳定运行^[9]。

中子探测器种类较多,以广泛应用的核反应型 BF_3 正比计数管与 ${}^3\text{He}$ 正比计数管为例, BF_3 正比计

数管是气体电离室,内部充满 BF_3 气体^[10]。和 BF_3 正比计数管相似, ${}^3\text{He}$ 正比计数管是充有 ${}^3\text{He}$ 气体的正比计数管^[11]。辐射场中的中子经过探测器外层的慢化体后,与正比计数管内部靶原子核发生核反应作用,产生带电粒子,带电粒子在高电压场下被电离室的电极收集输出电流信号,经过前置放大器、运算放大器、甄别与成形等一系列转换处理后输出电压脉冲信号。图5为 BF_3 或 ${}^3\text{He}$ 正比计数管工作原理图^[12]。 BF_3 与 ${}^3\text{He}$ 正比计数管探测效率高,能有效区分中子与 γ 射线脉冲,对混合场中的辐射产物有很好的甄别能力,能量响应范围较宽且能在复杂恶劣的环境下长期稳定工作,被广泛应用于核聚变实验中。

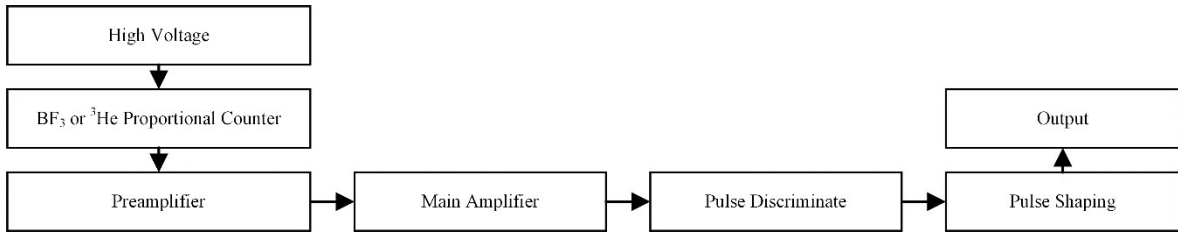


图5 BF_3 或 ^3He 正比计数管工作原理图
Fig.5 Working principle diagram of BF_3 or ^3He proportional counter

γ 射线探测器种类较多,不同种类与型号的 γ 射线探测器都有自身不同特性,主要取决于监测环境与监测目标参数的需求。以高压氩气电离室探测器为例,辐射场中的 γ 射线作用于探测器中的气体靶物质,使靶物质电离与激发,电离产生的带电粒子在高压场的作用下,被电极收集获得电流信号,再用电流频率变换电路将电流信号转换成一定频率的脉冲

信号,根据脉冲强度的大小与入射光子的强度按照相应关系运算转换为剂量或剂量率,从而实现对 γ 射线的有效测量。高压氩气电离室探测器具有探测效率高、时间响应快、能量响应好、抗干扰能力强等特点,被广泛应用于 γ 剂量监测。该探测器电流频率变换电路工作原理图如图6所示^[13]。

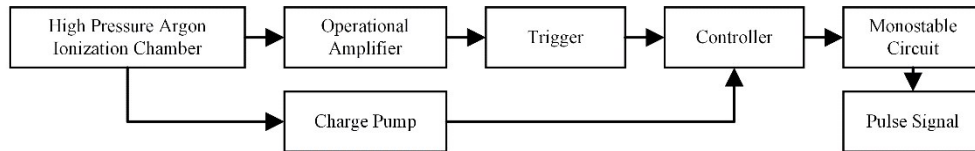


图6 高压氩气电离室探测器电流频率变换电路工作原理图
Fig.6 Working principle diagram of current frequency conversion circuit of high pressure argon ionization chamber detector

2.3 在线监测系统组成

聚变装置辐射在线监测系统通常由探测器、信号转换与处理、数据显示、中央计算机等组成。实现核辐射剂量的有效监测离不开合适的核辐射探测器,探测器能将辐射粒子在气体、液体或固体中激发电离或发光等现象输出模拟电流信号。因探测器所需工作电压不同,信号转换与处理部件一般采用转换器或电压转换芯片把交流电压转换为所需要的直流电压值,并且将探测器输出的电流信号经过放大器,比较器,甄别与整形等处理后送入微机或控制器进一步计数与处理获得辐射剂量率、计数率等参数信息。集成化的探测器能将探头、信号处理与转换、显示模块等部件一体化组装,通过显示模块就可以实时显示辐射计数率、剂量率等数据。各监测点的辐射信息经过处理与转换后再通过线路传输到采集机,采用自行编制的数据采集软件实现不同监测

点数据的显示与保存。控制大厅的中央计算机系统将采集到的数据统一管理,并将辐射数据与人身安全连锁系统连接,实现辐射阈值报警功能,保障工作人员安全。控制大厅的中央计算机系统与采集机进行数据传输,将采集机采集到的各个监测点辐射数据实时显示在大型显示屏上。图7为辐射在线监测系统整体框图。

3 核辐射监测系统的发展状况

3.1 JT-60 装置辐射监测系统

日本JT-60托卡马克装置于1978年开始建造,1984年9月完成组装,1985年4月开始运行。JT-60托卡马克装置在1989~1991年期间升级为JT-60U并于1998年6月实现了等效聚变增益达到1.25的历史性重大突破。

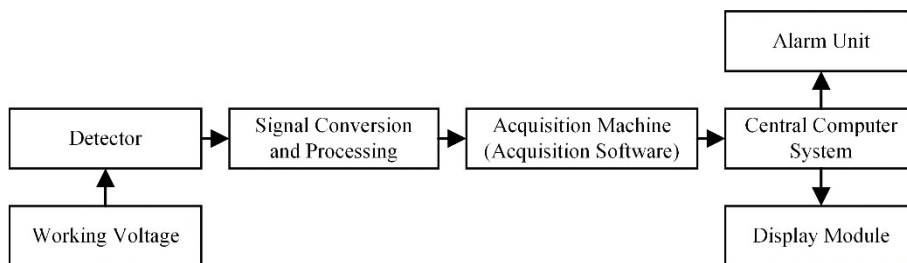


图7 辐射在线监测系统整体框图
Fig.7 Overall block diagram of radiation online monitoring system

JT-60托卡马克装置放电产生的部分中子和次级 γ 射线穿过墙壁进入建筑物外,在外部空间大气中反复散射和扩散,这种辐射可能会对实验建筑周围的工作环境产生影响。为了减少这种辐射对周围环境的影响,在实验建筑的顶部堆叠了聚乙烯和混凝土,以加强屏蔽功能。此外,主要房间周围通信、电力、各种设备电缆经过的侧壁开口均采取管道结构式的屏蔽措施。工作人员为了评估JT-60托卡马克装置聚变实验产生的辐射影响,建立了JT-60辐射监测系统。为了达到辐射监测效果,主要从三个方面监测。第一,监测在高温高密度等离子体放电条件下氘(D)氚(T)聚变产生的中子及 γ 射线剂量率;第二,监测控制区域外的核泄漏辐射剂量;第三,监测停机状态或者维护期间,实验装置残留的放射性核素引起的辐射^[14]。

为了有效监测辐射控制区域,在JT-60建筑大厅控制区域周围安装了一些区域探测器(中子区域探测器和 γ 射线区域探测器)。中子和 γ 射线区域探测器可以分别监测等离子体放电期间产生的中子和 γ 射线实时剂量,同时也可用于监测JT-60装置停机期间中子与 γ 射线的辐射情况。对于环境监测,JT-60装置在实验楼屋顶的烟囱区安装粉尘探测器和气体探测器来监测从真空泵排放到空气中的 ^3H 、 ^{41}Ar

和 ^{13}N 等放射性核素,环境中子探测器与 γ 射线探测器安装在监测区域边界上。除上述探测器外,还采用热释光剂量计对辐射控制区域和边界周围的 γ 射线、热中子和快中子进行累积剂量测量。

JT-60托卡马克装置放电运行时产生的中子、 γ 射线以及排放到空气中的放射性核素作用于相对应的探测器产生电信号,经过内置的转换电路和微机进一步处理后获得辐射数据。控制区域和环境区域的中子与 γ 射线探测器以及实验楼屋顶烟囱区的粉尘和气体探测器分别将监测数据通过线路传输到监测室的数据采集装置,将采集数据保存并建立数据库,JT-60控制大厅调取辐射数据库辐射信息,从而将辐射监测数据实时显示在大屏上。JT-60托卡马克装置利用TLD实现对辐射累积剂量测量,通过读取热释光强度获得辐射累积剂量^[15]。读取装置一般分为测量与显示输出两大模块。测量模块是热释光信号作用于光电倍增管转换成脉冲信号,再输出到后端处理电路进行数据处理。输出显示模块不仅可以显示出辐射场中辐射剂量值,而且能对前端加热盘与电源系统进行加热控制。JT-60装置累积剂量的监测是离线系统,不需要实时显示,只需要通过一定周期读取即可。图8为JT-60装置辐射源与监测区域^[16]。

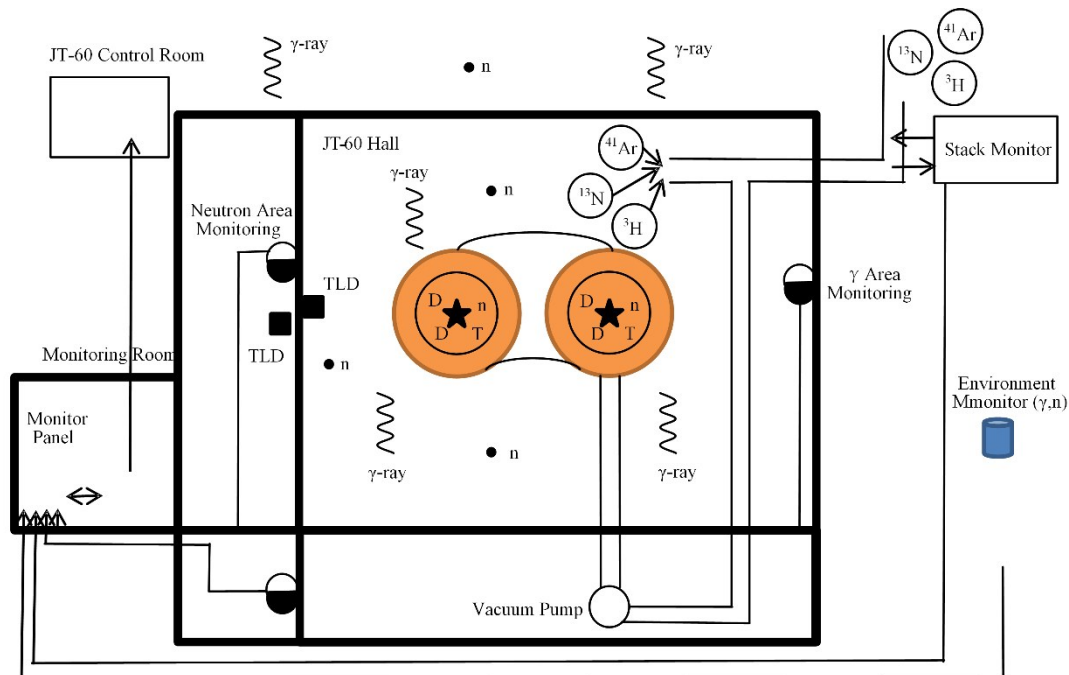


图8 JT-60装置辐射源与监测区域示意图

Fig.8 Diagram of radiation source and monitoring area of JT-60 device

3.2 LHD装置辐射监测系统

仿星器LHD装置是由日本国家核聚变科学研究所建立,并于1998成功放电。日本国家核聚变科

学研究所建立了适用于聚变实验的辐射监测系统(Radiation Monitoring System Applicable to Fusion Experiments, RMSAFE)来监测以氘为燃料的等离子体聚变产生的大量中子和诱导产生的 γ 射线。同

时,辐射监测系统也能够监测由等离子体放电产生的核辐射的累积剂量。

LHD装置外围建筑长127.5 m,宽97.5 m,高62 m。LHD装置的主体建在LHD大楼的LHD主厅(一层)内。大厅位于LHD地下室(B1和B2)上。该大厅和地下室构成了一个LHD实验大厅,并在这里进行了各种LHD实验。LHD实验大厅周围有2 m厚的混凝土生物屏蔽墙,以防止对周边环境产生辐射。LHD大楼中共设立16个监测点,安装了19个辐射监测器。该大楼控制区分一、二级辐射控制区。一级辐射控制区的9个点上安装了4个充气电离室、5个加压氩气电离室和1个 ^3He 正比计数器室。二级辐射控制区的7个点上安装了7个加压氩气电离室和2个 ^3He 正比计数器。图9为LHD大楼中辐射监测器的位置示意图。

LHD装置的辐射监测网络系统主要由四部分组成:传感器、定标器、中央数据处理器和联锁信号发射器。来自传感器的电信号被转换成光脉冲信号通过光纤电缆传输到定标器上,脉冲信号经定标器计数后将数据发送到中央数据处理器。采用带有通用接口总线(General-Purpose Interface Bus, GPIB)的个人计算机作为系统控制器和数据采集系统,通过国家聚变科学研究所局域网(National Institute for Fusion Science Local Area Network, NIFS-LAN)

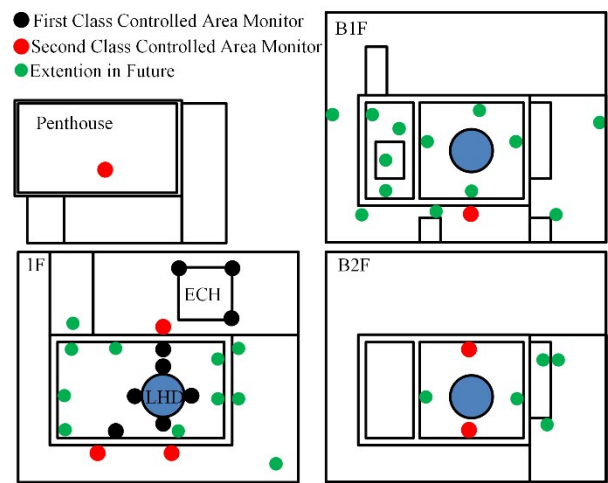


图9 LHD大楼中辐射监测器的位置示意图
Fig.9 Location diagram of radiation monitors in LHD building

与GPIB控制器连接的 workstation 被用作数据服务器。操作员可以利用个人计算机通过NIFS-LAN观察该数据服务器的监控结果,各监测点测量的辐射剂量以实时剂量、累积剂量、日剂量或周剂量等形式显示。如果LHD建筑控制区域的剂量超过设置的剂量限制,联锁信号发射机立即将联锁信号发送到LHD中央控制系统,立即停止实验,始终保证实验在安全情况下进行。图10为RMSAFE辐射监测网络系统图^[18]。

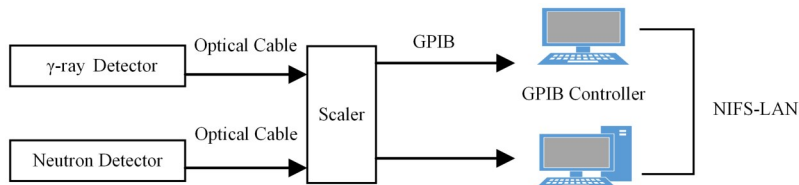


图10 RMSAFE辐射监测网络系统图
Fig.10 Diagram of RMSAFE radiation monitoring network system

3.3 TFTR 装置辐射监测系统

托卡马克聚变实验反应堆(Tokamak Fusion Test Reactor, TFTR)是由美国普林斯顿大学等离子体物理实验室建造的聚变实验装置,旨在实现美国核聚变能源计划的目标。TFTR聚变装置采用D-T混合放电运行,为了降低电离辐射带来的潜在威胁,需要定期对TFTR运行的场外辐射影响进行了全面评估,这包括测量托卡马克周围瞬时聚变辐射的剂量水平,以及放射性核素释放到空气中的剂量水平。

TFTR建立了辐射安全监测系统用于监测装置放电运行时产生的放射性物质带来的电离辐射。TFTR辐射监测系统包括12套固定位置的中子和 γ 探测器,其中4套位于TFTR大厅外屏蔽墙(北、东、南、西),3套在TFTR地下室(北、南、西),1套位于

TFTR上方的屋顶,4套位于东北、东南、西和西北方向的边界围栏处,TFTR辐射监测系统探测器位置如图11所示^[19]。

对于中子探测,TFTR辐射监测系统采用的是由聚乙烯球体慢化的 ^3He 比例计数器,而 γ/X 探测器采用的是加压电离室,对电离室中的电子器件进行改进,并通过使用更大的反馈电容来测量脉冲场。12套固定的 γ/X 和中子探测器连接到数据采集系统,采集机是一个用于读取和更新的microPDP-11微型计算机,并安装有菜单驱动的VAXcluster软件。监测数据使用中央控制和数据采集计算机系统存储和处理,数据采集系统每隔15 min就自动保存辐射监测数据。除了这些固定的电子探测器系统外,还广泛部署了大量经校准后的 ^7LiF 热释光剂量计和

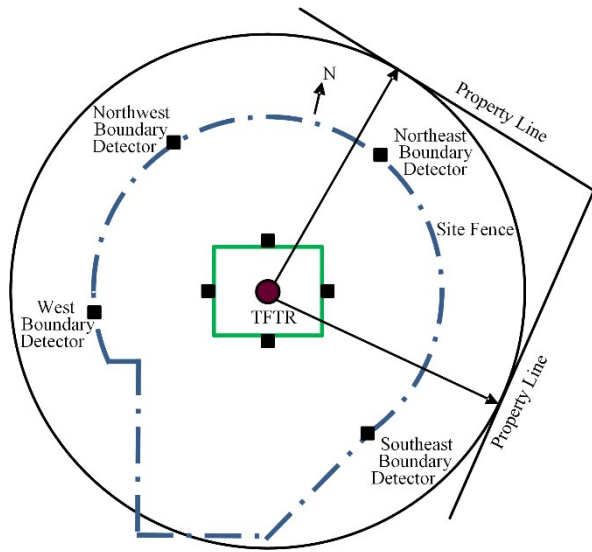


图11 TFTR辐射监测系统探测器的位置示意图
Fig.11 Location diagram of the detector in the TFTR radiation monitoring system

径迹探测器,以监测人员和设备的辐射暴露。同时,慢化后的LiI探测器和 ^{235}U 裂变室探测器也可在选定的位置使用。

为了更加广泛地获得辐射监测数据,在许多远程边界围栏处进行了 γ 剂量等效测量, γ 剂量等效测量在西北、东北和东南边界辐射监测拖车中进行,使用的是 $7.6\text{ cm}\times 7.6\text{ cm}$ NaI和 γ 闪烁计数器。而中子剂量等量测量是在更偏远位置进行的,使用的是 25 cm 聚乙烯球慢化的 ^3He 比例计数器。此外,还利用盖革-穆勒计数管和 γ 剂量计来定性地确定脉冲期间暴露率增加的位置,从而实现了对TFTR装置聚变辐射产物的全面监测。

3.4 HL-2A装置辐射监测系统

中国环流器HL-2A托卡马克装置是由核工业西南物理研究院建立的国内第一个带偏滤器的受控核聚变装置,于2002年开始运行^[20]。2005年该装置连续放电四十余天,实验过程中HL-2A各参数不断创造新的纪录,在此期间该装置运行时等离子体电流最大达到 $3.2\times 10^5\text{ A}$,纵场强度为 2.2 T ,平均电子密度为 $4.2\times 10^{13}\text{ cm}^{-3}$,脉冲长度达到 1.58 s 。

为了监测放电过程产生的核辐射影响,保护工作人员和公众的健康,核工业西南物理研究院与中国科学院高能物理研究所共同研制了脉冲中子剂量辐射监测系统来评价装置放电时中子的辐射水平。HL-2A装置在大厅1和2两个监测点设置了2个 BF_3 正比计数管用于探测大厅内的中子辐射水平,图12(a)为HL-2A中子探测器监测点布局^[21-22]。

监测主机大厅的中子采用 BF_3 正比计数管作为探测器,将 BF_3 正比计数管放置在 6.5 cm 厚圆柱形

聚乙烯慢化体和吸收体的中心。中子在慢化体中的慢化过程使其达到 BF_3 管的时间展宽,相当于使脉冲辐射场的脉冲展宽。聚变产生的中子作用于 BF_3 正比计数管输出 20 mA 、 1 ms 宽的电流脉冲信号,通过前置放大器和运算放大器后输出电压脉冲信号,经过甄别整形等处理后进入数据采集器,再经过微型计算机处理后获得辐射监测数据。辐射监测系统通过微型计算机进行控制,利用DOS系统内部中断,每隔 55 ms 采集一次中子数据。对于中子监测只需采集1和2两个探测器传来的数据即可,根据预先输入的两个监测器的刻度系数和报警阈值,经过进一步运算和处理后获得1和2监测点的中子剂量率、累积剂量以及是否报警等信息。脉冲中子剂量辐射监测系统监测后可以绘制出每次放电运行时中子辐射剂量率随时间的变化图,时间轴的取值范围可以根据脉冲中子场的周期在 $1\sim 10\text{ s}$ 内任意调节。

为了监测HL-2A托卡马克装置 γ 射线辐射剂量,在主机大厅及其附属区域共设置9个 γ 射线监测点, γ 射线探测器采用的是经过校正后的BH3103A型便携式闪烁X- γ 剂量仪。主机大厅分为两层均为辐射控制区域,一楼设置4和5两个监测点,距离主机距离均为 15 m ,二楼设置1、2、3监测点,距离主机的距离分别为 5 m 、 4 m 和 15 m 。其他区域为辐射监督区,分别设置6、7、8、9监测点。图12(b)为HL-2A γ 射线探测器监测点布局。HL-2A托卡马克装置主机大厅四周和顶层分别是 0.8 m 和 0.5 m 的混凝土墙,然而仍然有部分 γ 射线进入外部环境中。为了获取环境中的 γ 辐射剂量数据,在主机大厅东、南、西、北方位的 300 m 、 500 m 、 1 000 m 处以及核工业西南物理研究院的东南西北四个边界处共设置16个监测点,使用BH3103A型便携式闪烁X- γ 剂量仪从而实现对环境 γ 射线的有效监测。

3.5 EAST装置辐射监测系统

国内托卡马克装置最具代表性的是中科院等离子体物理研究所自主设计并建造的东方超环EAST装置^[23]。2021年5月28日,EAST托卡马克装置实现了可重复的 1.2×10^8 度 101 s 等离子体运行,首次突破百秒大关。仅半年时间,EAST托卡马克装置成功实现电子温度在近 $7\times 10^7\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下 1 056 s 等离子体运行,成为世界上第一个突破千秒大关的托卡马克装置,该装置备受世界瞩目并成功入围2021年度国内十大科技新闻。

EAST装置采用氘(D)和氚(D)核聚变燃料进行等离子体放电,放电期间会产生大量中子和次级 γ 射线。为了满足EAST装置实验期间重点监测区域全面覆盖,且考虑监测点布局合理性,EAST装置辐

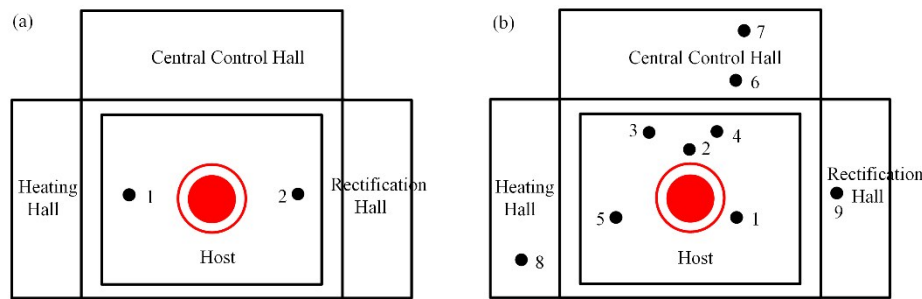


图 12 HL-2A 中子(a)和 γ 射线(b)探测器监测点布局
Fig.12 Layout of monitoring points of HL-2A neutron (a) and γ ray (b) detector

射在线监测系统共设置 13 个固定监测点,布局如图 13 所示。EAST 装置按照监测布局点,每处监测点分别放置 1 个中子探测器和 1 个 γ 射线探测器。经过综合考虑,中子探测器是使用基于 BF_3 正比计数管的气体探测器, γ 射线探测器是基于 Ar 气电离室的气体探测器^[24]。EAST 装置放电产生的中子和 γ 射线作用于探测器,通过前置放大器和运算放大器后输出脉冲信号,辐射脉冲信号经过甄别整形等处理后进入单片机,单片机输出 RS-485 协议数据传输到 PC 采集机。11 到 13 号监测点离采集机较远且布线不方便,采用 C2000 N220 二串口设备联网服务器,用等离子体公共以太网进行数据传输,其余监测点均采用双绞线传输,因此监测系统采用双绞线+以太网的混合组网模式^[25]。EAST 装置选用的采集机没有 RS-485 串口的通信协议,不能直接进行通信,因此选择了能够实现 RS-485 和 RS-232 相互转换的 MOXA-CP-118EL 多串口卡实现通信数据的转换,最后连接到 DB9 采集机接口,将监测数据传输到采集机。EAST 装置的中子和 γ 射线在线辐射监测控制软件是基于实验室虚拟仪器工程平台 LabVIEW 开发的,LabVIEW 控制采集软件由数据通信端口定义、数据请求、数据改写、数据读取、数据显示、数据保存等 6 组模块组成,能实现对辐射监测数据的采集、获取和存储等功能。软件显示界面由初始化、累积剂量、实时剂量、剂量率显示和累计时间等组成。基于 LabVIEW 监测软件系统界面能够显示 EAST 装置 13 处监测点中子和 γ 射线的实时剂量率及累积剂量^[26]。

EAST 装置辐射在线监测系统在监测过程中可能存在时间响应不及时,漏计数甚至突发停电等情况而存在误差。为了验证在线监测系统辐射累积剂量的准确性,EAST 装置又在 13 个固定监测点分别放置了光释光剂量计并将其封存在专用透明袋中。定期更换光释光剂量计再交给第三方专业核测量机构进行读取,从而实现离线状态下核辐射累积剂量的监测。对于长期从事聚变辐射相关人员需要佩戴光释光个人剂量计,而临时出入聚变装置内部的检

修或参观人员需要采用电子直读式个人剂量计实现对个人辐射剂量的测量,从而时刻保障人员的安全。

3.6 JET 装置辐射监测系统

欧洲联合环装置是世界上最大的聚变实验反应堆之一,1983 年开始运行,1991 年第一次进行氦气实验。在运行期间,主要辐射是 D-T 反应产生的 γ 和中子还有放射性氦。JET 安装了中子与 γ 射线在线监测系统,后来监测系统又得到了一些改进用于氦监测。 γ 和中子探测器安装在环形大厅内外周围区域固定位置,探测器都经过了充分的调试和操作。由于聚变装置放电时环形大厅内辐射强度较高,对探测器探测范围要求也高,因此环形大厅内选择了高量程探测水平的 γ 和中子探测器。除此之外,又安放了两个中等量程探测水平的 γ 探测器,其中一个 γ 探测器带有远程电子设备,安放在外围入口处用于监测人员进入环形大厅之前的辐射强度,另一个 γ 探测器则安放在环形大厅内稍远离主机装置的位置,JET 装置的监测点布局如图 14 所示^[27]。

JET 聚变装置在 D-T 放电运行时,核辐射物质作用于探测器,使探测器发送出与辐射剂量成比例的脉冲信号,通过传输效率更高的光纤传输到计算机控制与数据访问及通信系统上,然后在 JET 控制室的控制平台上计算和显示辐射剂量率,对超出阈值的辐射发出警报信号并记录保存原始数据。此外,在建筑物周围部署了一大批被动剂量计(如 γ 热释光剂量计和中子铪剂量计)。

JET 装置对工作区域和通风烟囱处等重要区域进行氦监测,氦的监测由一系列探测仪器和采样器共同完成。JET 装置将开放式电离室探测器安装在预定区域实现对氦的在线监测,电离室探测器可用于监测通风排放烟囱处的氦。这些单元器件还可以监测氦排放的体积流量并能计算总流量。JET 选择开放式电离室探测器是因为其对氦的测量过程简单高效,具有较高的安全性与可靠性。每个区域探测器都有声光报警器,报警信号通过连接线发送到

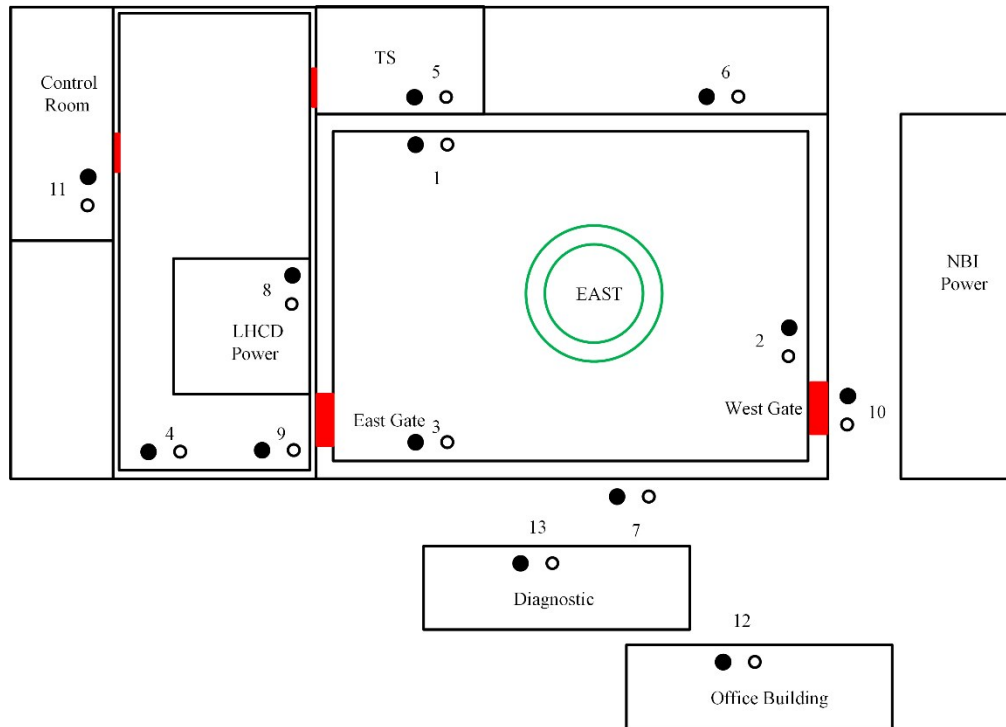


图13 EAST装置监测点布局
Fig.13 Layout of monitoring points of East device

JET突发事件应急指挥台,所有此类警报数据都发送此处。通过记录并保存来自探测器获得的氙释放量,从而能掌握本地氙释放的历史数据。JET装置除了监测空气中的氙外还需要能够监测氙表面污染,这主要是通过擦拭来进行的,使用四个气体流量比例计数器进行计数。氙主要以氙化水(HTO)与氙化氢(HT)的形式存在空气中,为了监测空气中氙含量,JET还开发了一种HT/HTO鉴定采样离线监测系统。离线测量是基于硅胶作为HTO的吸收介质,采样空气会通过三根柱子。第一根含有硅胶,能吸收所有水蒸气,包括HTO。第二根是使用催化剂的催化氧化柱,HT被氧化为HTO,最后被收集在第三根硅胶柱里。图15为JET装置的HT/HTO鉴定取样器示意图^[28]。

3.7 KSTAR装置辐射监测系统

韩国超导托卡马克先进研究(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research, KSTAR)是韩国最大的托卡马克装置,于2008年进行首次放电实验。放电运行时虽然屏蔽墙有良好的屏蔽效果,但仍然有部分电离辐射物可以通过各种公用孔洞进入环境,安全裕度并不大。因此KSTAR需要监测核聚变反应产生的中子和光子等放射性影响。

通常情况下利用³He探测器和裂变室对KSTAR中的裂变中子进行测量。然而,这些探测器在辨别

n- γ 脉冲形状和评估中子通量或能量方面的能力有限。因此,在KSTAR中选择了二苯乙烯闪烁体作为中子通量监测器,使其能够区分中子和 γ 射线并测量中子能量。为了测量高度混合 γ 射线背景中的快中子,并能提高实时数据传输速率,KSTAR工作人员开发了一种具有现场可编程门阵列(Field Programmable Gata Array, FPGA)的闪烁型模数转换器(flash analog to digital converter, FADC)。中子和 γ 射线信号由脉冲甄别电路实时分辨,模拟信号直接送入FADC并进行数字化处理,分析处理后的数据通过以太网传输到在线监测PC机上,数据采集系统原理图如图16所示^[29]。

为了获取辐射累积剂量,KSTAR使用的是OSL中子和 γ 剂量计。OSL剂量计通过用特定波长的光照射辐照过的氧化铝来测量发射的荧光,这种荧光的量与被照射的辐射量成正比。辐射工作人员也可佩戴同样的OSL剂量计,每季度读取一次OSL剂量计,用于评价长期工作在装置周围环境的个人辐射累积剂量。

3.8 DIII-D装置辐射监测系统

DIII-D托卡马克装置由1986年早期的Doublet III装置演变而来,位于加利福尼亚州。DIII-D是一个中等尺寸的托卡马克,具有很大的灵活性和非常强大的子系统。DIII-D托卡马克研究计划的主要目标是为开发具有商业吸引力的核聚变发

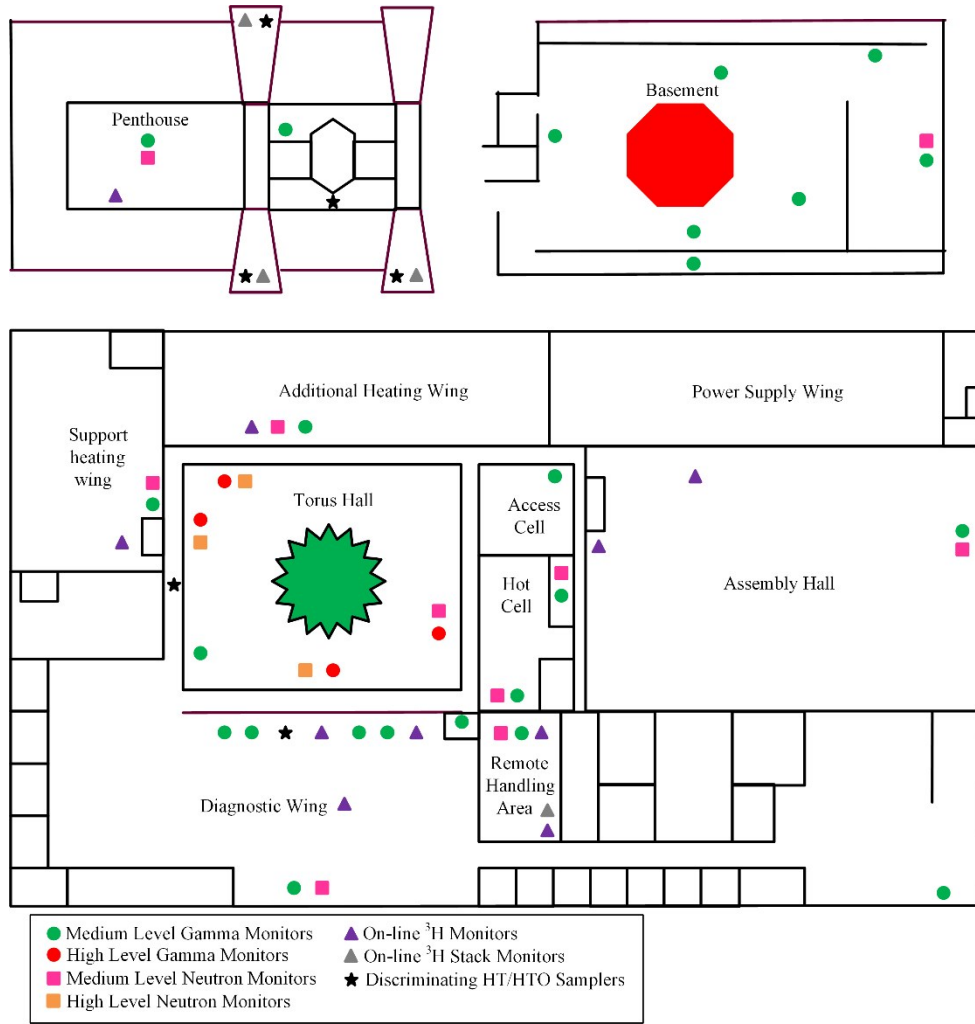


图 14 JET装置的辐射监测点布局
Fig.14 Layout of radiation monitoring points of JET device

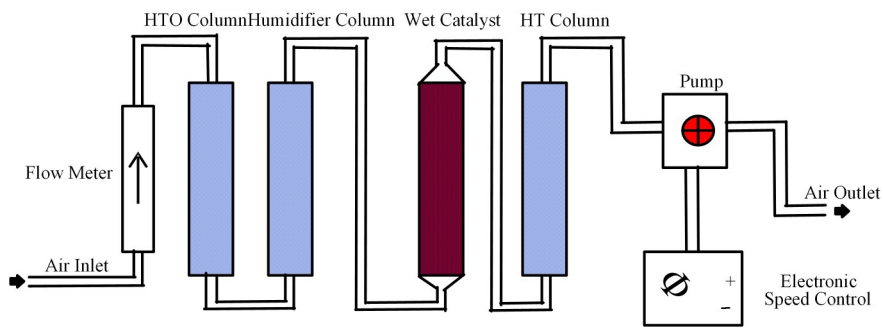


图 15 JET装置HT/HTO鉴定取样器示意图
Fig.15 Schematic diagram of HT/HTO identification sampler of JET device

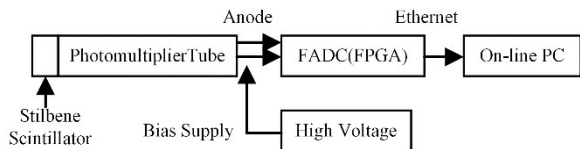


图 16 KSTAR数据采集系统模块示意图
Fig.16 Module diagram of data acquisition system for KSTAR

电厂的概念物理蓝图提供数据。DIII-D 聚变装置等离子体放电时有两个主要的辐射源，第一个是放电瞬时产生的中子和 γ 辐射，这种辐射决定了现场边界和员工辐射剂量。第二个是主机和周围物质的中子活化所产生的长期 γ 辐射，这种辐射也决定了员工的辐射程度。加利福尼亚州和美国能源部对DIII-D设施都有一般要求，即公众和人员的辐射暴

露量保持在合理可行的最低水平。本着这个目标，美国能源部和通用原子公司最终将场地边界目标限制为20 mrem/年。

中子和 γ 辐射通过贯穿整个设施和现场边界区域的胶片剂量计进行监测。TLD由于其较高的灵敏度，

也被用于监测沿场地边界的 γ 辐射。人员剂量计(胶片/TLD)用于记录每个人对中子和 γ 辐射的暴露，每个季度都要读取所有数据以确定累积剂量。由于现场边界部分区域产生的辐射水平较低，低于胶片剂量计的灵敏度，这时在实验过程中也采用中子和 γ 闪烁探测器进行实时监测。探测器监测现场边界最高辐射点(距离主机83 m)和控制室(距离主机30 m)两个永久性站点以及偶尔布放便携式测量仪的位置，以便对设施和现场边界进行测量^[30]。所有实时探测器的信号都由一台基于PC的计算机收集，计算机跟踪记录每小时、每天、每周和每季度辐射水平，帮助首席操作员确定辐射水平。辐射监测计算机与放电控制计算机联锁，该计算机在每次放炮前需检查辐射监测程序是否正常运行，以及是否超过现场辐射水平限制。

3.9 ITER装置辐射监测系统

受控核聚变装置经过几代人的不断拼搏攻关已经取得长足的发展，相关技术与经验日益成熟。多国共建的国际热核聚变实验堆是最具希望实现从实验阶段走向商业应用的核聚变装置，它承载了无数核聚变工作者的梦想^[31]。ITER虽然尚在建设之中，但是本着安全至上的原则，ITER组织机构设计一种世界上最先进的辐射与环境监测系统(Radiological and Environmental Monitoring Systems, REMS)。REMS的主要功能是为员工提供人员健康辐射监测，以及为公众提供区域环境辐射监测，从而保障在ITER运行、维护和退役期间人员和环境安全，降低电离辐射对人员和环境的影响。

ITER装置产生的辐射主要包括中子和次级 γ 射线、加热和电流驱动系统发出的X射线及放射性氚等辐射。对于 γ 射线(X射线)与中子辐射监测，由若干个固定监测器组成。固定 γ 射线(X射线)和中子监测器一般用于高于本底预期水平的地方，为补充固定测量系统，ITER还应配备便携式辐射测量仪器。使用固定和便携式辐射监测设备联合搭配，能更好地实现不同条件下的灵活监测。固定测量设备能监测外部区域辐射，特别是ITER运行状态的变化可能导致剂量率显著增加的区域辐射监测。在空气中可能含有大量放射性辐射物质的所有控制区域内，应连续确定空气中放射性物质的活度水平。移

动测量设备能测量固定测量仪器无法覆盖的工作区域，或由于放射性非常低而不需要固定测量站的区域的空气的放射性活度，以便在ITER装置的不同运行条件下使用。ITER采用氚运行，氚是作为燃料被提供的。氚主要存在于真空室、低温泵、氚燃料循环处理和存储设备中。氚的释放可能发生在装置维护操作期间，尤其是在真空室内(主要是真空室打开/关闭和转移容器对接/脱离操作)，以及在运行期间由于冷却水和其他系统的泄漏与储存部件的气体排放，图17为REMS架构图^[32]。

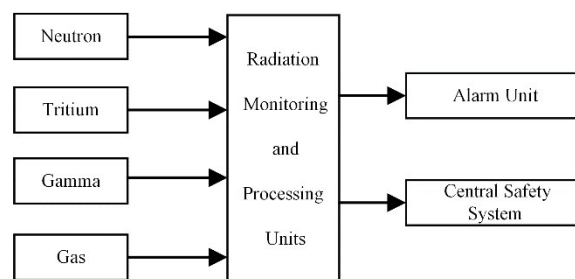


图17 REMS架构图
Fig.17 Architecture diagram of REMS

对于空气中的氚监测使用氚触发监测器，该探测器应提供安全保护等级信号，当ITER空气中氚浓度增强时，氚触发监测器提供触发信号，信号经过进一步处理后作用于除氚系统，将除氚系统连接到某些区域防止氚污染超过规定水平。为了尽可能减少氚对建筑物内部和大气的污染，ITER采用了两个通风系统。第一个被称为暖通空调系统，它能更新空气并提供足够的温度和湿度。另一个系统为空气除氚系统/排气除氚系统，根据监测到的放射性氚活度水平，两个系统可以自动切换，控制氚污染。对于环境监测，还包括对其他放射性气体(如 ^{14}C 和 ^{41}Ar)的监测，以测量和控制释放到环境中的放射性气体含量。

ITER中央控制系统确保了ITER整个系统的协调与正常运行，以及实验数据的存储和检索。系统结构分为三个级别：第一级为控制、数据访问和通信系统(Control, Data Access and Communication system, CODAC)来控制ITER运行并协调所有系统；第二级为中央联锁系统(Central Interlock System, CIS)以确保整个运行过程的连锁保护；第三级为中央安全系统(Central Safety System, CSS)以确保工人和环境的安全。其中CSS集成了仪表和控制装置，从传感器到执行器，包括操作台控制和处理设备，以实现设施的安全功能。它还包括处理在事故或事故后条件下的操作员进行控制所需的数据，并通过单向链接向CODAC和CIS提供数据和状态。为了ITER运行期间保护工作人员和公众免受电离

辐射的危害,确保 ITER 辐射安全,辐射监测功能应在健康物理办公室、监控和记录中心进行集成和监控,并向控制、数据访问和通信系统以及中央安全系统提供读数。监控和记录中心将信息提供给控制、数据访问和通信系统、中央联锁系统和中央安全系统,每个被监测设施的辐射状态与接入控制系统及门禁系统相连。

为了实现辐射监测系统的预警功能,ITER 设置了读数和报警处理系统(Readout and Alarms Handling System, RAHS)。该系统能定期和自动地从探测器中收集数据。数据显示在监控和记录中心。该辐射预警系统实现的功能如图 18 所示。

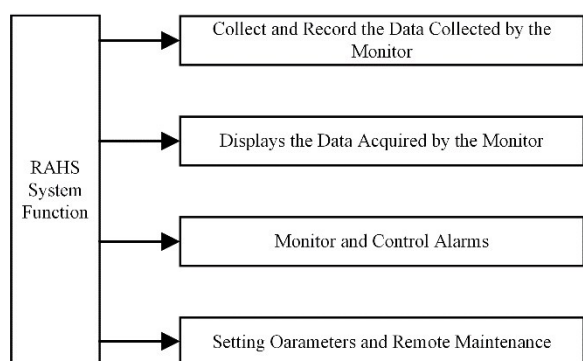


图 18 RAHS 辐射预警系统的功能模块图

Fig.18 Functional module diagram of RAHS radiation early warning system

ITER 还在建设之中,REMS 的设计也会根据实际需求不断更新完善。总之,REMS 能为 ITER 在实验、维护甚至退役期间提供辐射监测服务,保障工作人员的健康安全,防止电离辐射对人员和环境的危害。

4 结语

中国政府高度重视核能的安全开发与利用,2021 年末,国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知指出在我国要在确保安全的前提下有序发展核电,实行最严格的安全标准和最严格的监管,持续提升核安全监管能力以保障人员安全^[33]。尽管目前世界上建有核聚变装置的国家采用各种防护手段减少辐射带来的影响,但是仍然有少量经过活化的辐射残余进入环境,给周边环境与人员带来潜在威胁。因此,未来的核辐射监测系统仍有不断发展和完善的空间:

1) 选用抗电磁干扰能力强,稳定性高的新型探测器,在传统气体电离室和闪烁探测器等基础上,增加应用新技术与新工艺的新型半导体探测器,该类探测器抗电磁干扰能力强,体型小且便于安装,方便一体化集成^[34]。

2) 逐步实现辐射监测数据传输从有线到无线传输过渡。传统辐射监测系统由多路复杂线路构成且布线复杂,并且长期运行的线路可能存在损坏现象,未来采用无线数据传输能避免出现这种问题,降低有线传输损坏带来的不利影响。

3) 加大研发可移动辐射监测设备,目前大多数监测系统主要采用固定位置的辐射设备,依靠现有固定位置探测器不能准确涵盖所有监测区域,当聚变装置运行出现事故时可能导致电离辐射外漏,采用可移动辐射监测设备可以及时进入事故区域,准确获得第一手辐射数据,可移动辐射监测机器人能够巡视不同区域,准确判断异常区域并报警,确保人员安全。

4) 不断攻坚高新技术,加大研发智能采样,远程遥控监测设备,无人机放射源搜寻处置,无人机载辐射监测,无人车应急等重要系统也将是未来辐射监测技术的发展趋势。

作者贡献声明 李成勋:负责资料的收集和初稿的起草;霍志鹏:负责文章结构设计及论文修改;钟国强:负责资金支持及论文修改;胡立群:负责资源与资金支持。

参考文献

- 1 万宝年,徐国盛. EAST 超导托卡马克[J]. 科学通报, 2015, 60(23): 2157 - 2168. DOI: 10.1360/n972014-01235.
WAN Baonian, XU Guosheng. Experimental advanced superconducting Tokamak[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(23): 2157 - 2168. DOI: 10.1360/n972014-01235.
- 2 冯开明. 可控核聚变与 ITER 计划[J]. 现代电力, 2006, 23(5): 82 - 88. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2006.05.013.
FENG Kaiming. Controlled nuclear fusion and ITER Project[J]. Modern Electric Power, 2006, 23(5): 82 - 88. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2006.05.013.
- 3 Kubo H, Sakurai S, Asakura N, *et al.* High radiation and high density experiments in JT-60U[J]. Nuclear Fusion, 2001, 41(2): 227 - 233. DOI: 10.1088/0029-5515/41/2/310.
- 4 周梦洁. EAST 实验场所核辐射剂量场的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
ZHOU Mengjie. Investigation of nuclear radiation dose field in EAST experimental site[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.
- 5 周平坤. 核辐射对人体的生物学危害及医学防护基本

- 原则[J]. 首都医科大学学报, 2011, **32**(2): 171 - 176. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7795.2011.02.001.
- ZHOU Pingkun. The detriment of nuclear radiation on human and the protection principal[J]. Journal of Capital Medical University, 2011, **32**(2): 171 - 176. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7795.2011.02.001.
- 6 聂保杰. 聚变堆放射性核素的环境迁移与公众后果研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- NIE Baojie. Research on radionuclides environmental migration and public consequences of fusion reactor[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.
- 7 卢希庭. 原子核物理[M]. 北京: 原子能出版社, 1981.
- LU Xiting. Nuclear physics[M]. Beijing: Atomic Press, 1981.
- 8 陈伯显, 张智. 核辐射物理及探测学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2011.
- CHEN Boxian, ZHANG Zhi. Physics and detection of nuclear radiation[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2011.
- 9 刘光柱. EAST中子核伽马射线辐射场监测与研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- LIU Guangzhu. Monitoring and research of neutron gamma ray radiation field in EAST[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- 10 马烈华, 向艳军, 艾杰, 等. 基于BF₃正比管的宽量程脉冲中子探测技术[J]. 强激光与粒子束, 2017, **29**(9): 140 - 145. DOI: 10.11884/HPLPB201729.170056.
- MA Liehua, XIANG Yanjun, AI Jie, *et al.* Wide range pulsed neutron detection technology based on BF₃ proportional counters[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, **29**(9): 140 - 145. DOI: 10.11884/HPLPB201729.170056.
- 11 余周香, 孙凯, 李眉娟, 等. 基于脉冲幅度谱的³He正比计数管中子散射谱仪探测系统关键参数测定方法[J]. 原子能科学技术, 2021, **55**(1): 169 - 177. DOI: 10.7538/yzk.2020.youxian.0089.
- YU Zhouxiang, SUN Kai, LI Meijuan, *et al.* Key parameter determination methods of neutron scattering spectrometer detector system with ³He proportional counting tube based on pulse amplitude spectrum[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2021, **55**(1): 169 - 177. DOI: 10.7538/yzk.2020.youxian.0089.
- 12 洪兵, 李桃生, 张志勇, 等. 单球多计数器中子剂量仪的电子学系统研制[J]. 核技术, 2014, **37**(11): 110401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.110401.
- HONG Bing, LI Taosheng, ZHANG Zhiyong, *et al.* Design of the electronics system of neutron dosimeter of a single sphere with multi-counters[J]. Nuclear Techniques, 2014, **37**(11): 110401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.110401.
- 13 李凯, 钟国强, 胡立群, 等. EAST托卡马克装置的核辐射监测系统[J]. 核技术, 2015, **38**(11): 110602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.110602.
- LI Kai, ZHONG Guoqiang, HU Liquan, *et al.* Radiation monitoring system for EAST Tokamak[J]. Nuclear Techniques, 2015, **38**(11): 110602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.110602.
- 14 Isamu Akiyama, Takashi Umehara, Toru Tayama, *et al.* Radiation protection in the large Tokamak device (JT-60) facility[C]. IRPA 10, Hiroshima, 2000: P-6a-314.
- 15 欧向明, 范瑶华. 辐射剂量监测用热释光剂量计的校准[J]. 中国医学装备, 2019, **16**(5): 25 - 29. DOI: 10.3969/J.ISSN.1672-8270.2019.05.007.
- OU Xiangming, FAN Yaohua. Calibration on TLD of radiation dosimetry monitoring[J]. China Medical Equipment, 2019, **16**(5): 25 - 29. DOI: 10.3969/J.ISSN.1672-8270.2019.05.007.
- 16 Oikawa A, Miya N, Kodama K, *et al.* Tritium experience in JT-60 DD plasma operation[J]. Fusion Science and Technology, 2002, **41**(3P2): 612 - 616. DOI: 10.13182/fst02-a22661.
- 17 Miyake H, Yamanishi H, Kodaira J, *et al.* Radiation monitoring system applicable to nuclear fusion experimental site, Part (2)[C]. Proceeding of International Radiation Protection Association, 2000.
- 18 Uda T, Yamanishi H, Miyake H, *et al.* Radiation safety considerations for LHD experiments[J]. Journal of Fusion Energy, 1997, **16**(1): 167 - 173. DOI: 10.1023/A:1022541819280.
- 19 Kugel H W, Barnes C W, Gilbert J, *et al.* Measurements of TFTR radiation shielding during high power D-D operations[J]. Fusion Technology, 1991, **19**(3P2B): 1989 - 1995. DOI: 10.13182/fst91-a29633.
- 20 Liu Y, Ding X T, Yang Q W, *et al.* Recent advances in the HL-2A Tokamak experiments[J]. Nuclear Fusion, 2005, **45**(10): S239 - S244. DOI: 10.1088/0029-5515/45/10/s19.
- 21 宋先瑛, 李旭, 杨进蔚. HL-2A装置脉冲中子剂量监测[J]. 核工业西南物理研究院年报, 2005(1): 76-77.
- SONG Xianying, LI Xu, YANG Jinwei. Dose monitoring of pulse neutron on HL-2A Tokamak[J]. Southwestern Institute of Physics Annual Report, 2005(1): 76-77.

- 22 宋先瑛, 李旭, 杨进蔚. HL-2A 装置 X- γ 辐射剂量调查[J]. 核工业西南物理研究院年报, 2003(1): 56-57.
SONG Xianying, LI Xu, YANG Jinwei. X- γ radiation dose survey for HL-2A Tokamak[J]. Southwestern Institute of Physics Annual Report, 2003(1): 56-57.
- 23 万宝年. 我国磁约束聚变研究进展和展望[J]. 中国科学基金, 2008, 22(1): 1 - 7. DOI: 10.16262/j.cnki.1000-8217.2008.01.002.
WAN Baonian. Recent progress and perspective of magnetic confined fusion in China[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2008, 22(1): 1 - 7. DOI: 10.16262/j.cnki.1000-8217.2008.01.002.
- 24 徐宇. EAST 核辐射监测与辐射防护体系的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
XU Yu. Investigation of nuclear radiation monitor and protection rule on EAST[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.
- 25 Liu G Z, Hu L Q, Zhong G Q, *et al.* Nuclear radiation doses monitoring of EAST's environment[J]. Journal of Fusion Energy, 2016, 35(3): 544 - 549. DOI: 10.1007/s10894-016-0065-2.
- 26 Liu G Z, Hu L Q, Zhong G Q, *et al.* LabVIEW-based radiation monitoring system of EAST[J]. Journal of Fusion Energy, 2016, 35(2): 470 - 481. DOI: 10.1007/s10894-015-0054-x.
- 27 Russ R M, Bell A C, Caldwell-Nichols C J, *et al.* Health physics and environmental implications of JET's first tritium experiment[M]. Fusion Technology, Amsterdam: Elsevier, 1993: 1769 - 1773. DOI: 10.1016/b978-0-444-89995-8.50347-7.
- 28 Caldwell-Nichols C J, Russ R M, Bell A C, *et al.* Radiation monitoring, environmental and health physics aspects during the first JET tritium experiment[J]. Fusion Engineering and Design, 1992, 19(2): 149 - 159. DOI: 10.1016/0920-3796(92)90069-G.
- 29 Kim Y K, Lee S K, Kang B H, *et al.* Performance improvement of neutron flux monitor at KSTAR[J]. Journal of Instrumentation, 2012, 7(6): C06013. DOI: 10.1088/1748-0221/7/06/c06013.
- 30 Taylor P L. DIII-D radiation shielding procedures and experiences[R]. General Atomics, San Diego, CA (United States), 1991.
- 31 Aymar R. Status of ITER[J]. Fusion Engineering and Design, 2002, 61 - 62: 5 - 12. DOI: 10.1016/s0920-3796(02)00218-1.
- 32 Perna L, Molinaro S, Berruyer M. ITER radiological and environmental monitoring systems conceptual design elements[C]//2011 IEEE/NPSS 24th Symposium on Fusion Engineering. June 26-30, 2011, Chicago, IL, USA. IEEE, 2011: 1 - 5. DOI: 10.1109/SOFE.2011.6052235.
- 33 国务院. 国务院关于印发2030年前碳达峰行动方案的通知[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2021(31): 48 - 58.
The State Council. Circular of the state council on printing and issuing the action plan for carbon dioxide peaking before 2030[J]. Gazette of the State Council of the People's Republic of China, 2021(31): 48 - 58.
- 34 李曼. 浅谈核电厂辐射监测系统的特点与发展趋势[J]. 科技创新导报, 2018, 15(25): 39, 41. DOI: 10.16660/j.cnki.1674-098X.2018.25.039.
LI Man. Characteristics and development trend of radiation monitoring system in nuclear power plants[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2018, 15(25): 39, 41. DOI: 10.16660/j.cnki.1674-098X.2018.25.039.