

AP1000 核电站安全壳缪子透射成像模拟

徐仲行¹ 代文翰¹ 曾 志¹ 程建平²

1(清华大学 工程物理系 北京 100084)

2(北京师范大学 物理与天文学院 北京 100875)

摘要 核电厂安全壳结构检测对公共安全和设施寿命至关重要,但现有无损检测技术应用受限;而高能量、强穿透的宇宙线缪子,是大尺寸安全壳结构远距离无损检测的理想探针。本研究以 AP1000(Advanced Passive PWR)结构参数为基础构建安全壳模型,搭建“蒙卡模拟框架+代数重建算法”的缪子透射成像框架:首先通过 Geant4 程序开展安全壳缪子透射模拟,获取多方向缪子输运信息;随后基于代数重建算法 ART(Algebraic Reconstruction Technique)对模拟数据进行三维重建,成功实现了安全壳屏蔽墙、非能动安全壳冷却系统和蒸汽发生器等关键结构成像,同时验证了对空气、蒸汽、水、混凝土等不同材料的分辨能力。模拟分析结果表明:当采用 1 000 cm² 灵敏面积的理想缪子探测系统,并累积月量级测量时间时,可获得大致 100 cm 空间分辨率的缪子透射图像。本研究为缪子透射成像实验的设计和开展提供技术参考,同时对提升缪子成像技术在核电安全检测领域的实际应用能力具有重要指导意义。

关键词 宇宙线缪子, 缪子透射成像, AP1000 核电站, 安全壳结构检测

中图分类号 TL99

DOI: 10.3724/j.0253-3219.2026.hjs.49.250275

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2026.49.250275

Simulation study on muography of AP1000 nuclear power plant containment

XU Zhonghang¹ DAI Wenhan¹ ZENG Zhi¹ CHENG Jianping²

1(Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

2(School of Physics and Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract [Background] The structural inspection of nuclear power plant (NPP) containment is crucial for public safety and facility lifespan, but the application of existing non-destructive testing technologies is limited. High-energy and strongly penetrating cosmic ray muons are ideal probes for long-distance, non-destructive inspection of large-scale containment structures. [Purpose] This study aims to provide technical references for muography simulation studies of NPP containment. [Methods] Firstly, the containment model was constructed based on the structural parameters of the AP1000 (Advanced Passive PWR) Nuclear Power Plant, and a muography framework was established combining "Monte Carlo simulation framework + ART (Algebraic Reconstruction Technique) algorithm." Then, the basic principles of cosmic ray muography were summarized into forward and inverse models, and the ART algorithm was introduced. Finally, muography simulations of the containment were conducted using the Geant4 program to obtain multi-directional muon transport information. [Results] The simulated data for three-dimensional reconstruction by using ART algorithm successfully achieve imaging of key structures such as the

北京市自然科学基金项目(No.L242004)资助

第一作者: 徐仲行, 男, 1997 年出生, 2019 年毕业于南华大学, 现为博士研究生, 主要研究方向为缪子探测及成像

通信作者: 曾志, E-mail: zengzhi@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2025-07-04, 修回日期: 2025-11-28

Supported by the Beijing Natural Science Foundation Project (No.L242004)

First author: XU Zhonghang, male, born in 1997, graduated from the University of South China in 2019, doctoral student, focusing on muon detection and imaging technologies

Corresponding author: ZENG Zhi, E-mail: zengzhi@tsinghua.edu.cn

Received date: 2025-07-04, revised date: 2025-11-28

containment shielding wall, PCCS (Passive Containment Cooling System), and steam generator, while validating the potential to distinguish between materials like air, steam, water, and concrete. Simulation analysis results indicate that with an ideal muon detection system featuring a 1 000 cm² sensitive area and a cumulative measurement time of months, muon transmission images with approximately 100 cm spatial resolution can be obtained. **[Conclusions]** This research provides technical references for the design and implementation of muography experiments, offering significant guidance for enhancing the practical application of muon imaging technology in nuclear power safety inspections.

Key words Cosmic-ray muon, Muography, AP1000 nuclear power plant, Containment structure inspection

核电厂安全壳结构检测是核安全领域的特殊检测场景^[1],其空间尺寸大,内部设施多;当发生意外情况使得安全壳内部无法进入时,需要依赖强穿透、非侵入式的检测技术对安全壳及内部结构进行探测。传统的非侵入成像技术,如超声波^[1]、X射线检测^[2]等,穿透能力和检测能力有限,在安全壳检测应用场景中受限较多。

缪子透射成像是开展反应堆安全壳检测的可行方案。天然宇宙线缪子(μ 子)是宇宙射线入射地球大气层的簇射产物,主要由簇射中 π 介子和K介子的衰变产生,地表海平面处宇宙线缪子的注量率大致在 $1 \mu \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ ^[3]。缪子为带电粒子,其在物质中主要通过电离损失能量,宇宙线缪子能量分布在GeV-TeV(平均能量约3 GeV),具有很强的穿透性,在岩石埋深2 400 m的中国锦屏地下实验室(China Jinping Underground Laboratory, CJPL)仍能测量到穿透山体的宇宙线缪子,CJPL二期的宇宙线缪子注量率每周约 $1.83 \mu \cdot \text{m}^{-2}$ ^[4]。缪子透射成像通过测量宇宙线缪子穿过物质后的通量衰减对大型物体进行非侵入式无损成像,已被应用到金字塔^[5]、冰川^[6]、火山^[7]、城墙^[8]和高炉^[9]等结构的成像中。

缪子透射成像可以在不进入核电站安全壳的情况下对安全壳及内部结构进行成像,对核电站安全具有重要意义。在2011年福岛核事故发生后,美国洛斯阿拉莫斯实验室首次提出了可以利用缪子透射成像对反应堆内部情况进行成像的设想^[10-11],2014~2015年,日本高能加速器研究机构(High Energy Accelerator Research Organization, KEK)等研究团队^[12]对福岛第一核电站1号机组开展缪子成像,利用单个点位的缪子测量结果推测压力容器中的大部分燃料组件已熔化,但尚未对反应堆内部结构进行三维重建。2023年,俄罗斯国立核能研究大学莫斯科工程物理学院(National Research Nuclear University MEPhI, MEPhI)研究团队^[13]对卡利宁(Kalinin)核电站反应堆开展缪子透射成像研究,采用条状闪烁体和漂移管探测器组成的混合缪子望远镜系统,部署在距反应堆中心约70 m位置并累积测

量20 d,成功分析获取到内部反应堆等单点位图像。2023~2025年,法国原子能和替代能源委员会(French Alternative Energies and Atomic Energy Commission, CEA)团队^[14-15]以退役G3核反应堆为成像对象,采用Micromegas探测器部署在堆外四周共46个观测点位,采集了12个月缪子数据,并创新性地结合扩散去噪、U-Net模型等机器学习理论,优化提升了缪子三维成像结果,成功揭示了石墨堆芯密度超预期等检测异常,推测石墨结构存在开裂、老化的情况。本课题组也正在三门核电站开展AP1000反应堆的安全壳成像实验^[16]。

目前国内外安全壳缪子透射成像研究,实验研究占据主导地位,而与之配套的模拟分析体系仍存在显著完善空间;同时各实验布置方案大不相同,“碎片化”特征明显,各研究成果难以进行完整验证、有效对比和数据融合。因此通过蒙特卡罗模拟的方式对探测器布点、测量时间、成像空间分辨率、成像算法等进行研究,对特定场景的成像实验开展具有重大指导意义,同时也可应用到实验数据的融合、分析和反馈中,从而充分发挥预研指导与结果验证的双重作用。

为更好地研究安全壳缪子透射成像的特点,并以此开展AP1000核电站安全壳的缪子成像。本文建立了AP1000核电站安全壳及其内部主要设施的模型,利用欧洲核子中心开发的几何与径迹蒙特卡罗模拟软件包(GEANT4)^[17]对缪子的输运和探测进行模拟,基于模拟缪子透射结果,利用代数重建算法(Algebraic Reconstruction Technique, ART)对安全壳和内部蒸汽发生器的结构进行重建,获得了三维结果图像,为现场实验提供参考。

1 蒙特卡罗模拟方法

1.1 AP1000安全壳内部结构

AP1000反应堆为美国西屋公司开发的第三代压水堆^[18],具有非能动安全性等特点。AP1000反应堆主要结构如图1所示,包含安全壳、蒸汽发生器、

堆芯压力容器、稳压器以及各种管路和机械支撑结构。AP1000整体坐落在地下约12 m处的反应堆基础上，反应堆的堆芯压力容器高约10 m，直径约4 m，中心在外部地面以下约3 m处。布置在外部地面的缪子探测器很难探测到穿过堆芯的宇宙线缪子，因此缪子透射成像很难获得其图像。

反应堆位于地面以上的结构主要是反应堆安全壳和蒸汽发生器。其中安全壳主要包括：1)内带钢衬的钢筋混凝土圆筒体屏蔽墙，外径为22.098 m，墙体厚约1 m，总高度约52.3 m；2)位于顶部的非能动安全壳冷却系统(Passive Containment Cooling System, PCCS)，近似为截面梯形的旋转体结构，储存着冷却水；外层有提高结构强度和辐射防护的混凝土；PCCS内部为圆柱体空气腔，用作冷却空气的对流排出；3)带上下椭圆封头的圆柱壳钢制安全壳容器，半径约19.8 m，高约65.6 m，其下端部分低于外层地面。

AP1000共有两台蒸汽发生器，单个蒸汽发生器高约22 m，直径约4 m。蒸汽发生器位于反应堆压力容器的两侧，其下端高于外层地面约2 m。布置在安全壳外部的探测器可以接收穿过蒸汽发生器的天然宇宙线缪子，因此预计可以利用缪子透射成像获得其图像。

1.2 几何建模

根据§1.1描述，利用天然宇宙线缪子透射主要

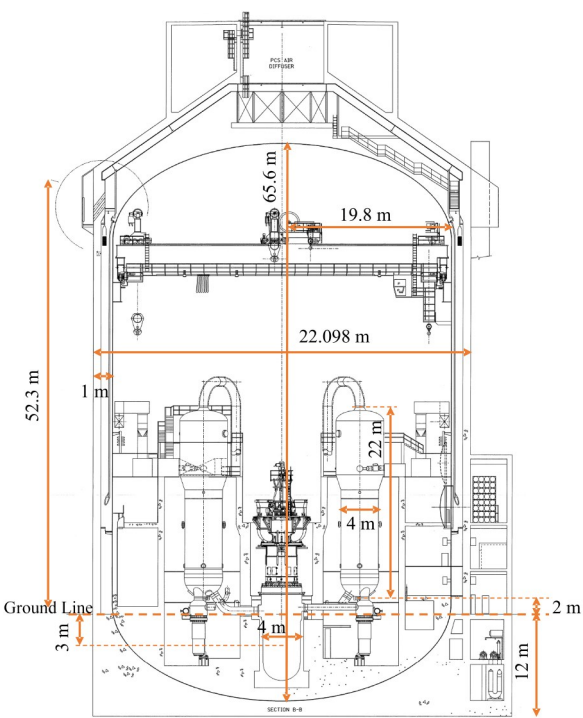


图1 AP1000核电厂反应堆示意图(G.L.表示地平线)^[18]
Fig.1 Schematic diagram of AP1000 nuclear power plant reactor^[18]

可以对AP1000安全壳及其内部的蒸汽发生器进行成像，本文在GEANT4 11.0.3里建立AP1000安全壳和蒸汽发生器的几何模型，建模中各个部分的材料和密度设置如表1所示。

表1 模拟实验中安全壳模型材料和尺寸数据
Table 1 Material and dimensional data of the containment model in simulation experiments

结构 Structure	材料 Material	密度 Density / g·cm ⁻³	尺寸 Dimension
安全壳-屏蔽墙 Containment-shield wall	混凝土 Concrete	2.30	外径22.098 m，高52.3 m，厚1 m的圆筒 Cylinder with outer diameter of 22.098 m, height of 52.3 m, and thickness of 1 m
安全壳-PCCS Containment-PCCS	水 Water	1.00	截面为梯形的旋转体 Solid of revolution with trapezoidal cross-section
安全壳-空气腔 Containment-air cavity	空气 Air	1.29×10 ⁻³	圆柱体 Cylinder
安全壳-容器壳 Containment-vessel shell	不锈钢 Stainless steel	8.00	带上下椭圆封头圆柱壳，半径19.8 m，高65.6 m Cylindrical shell with elliptical heads at top and bottom, radius of 19.8 m, height of 65.6 m
蒸汽发生器-U型管区 Steam generator-U-tube region	不锈钢-水-混合物 Stainless steel-water mixture	2.54	高22 m，直径4 m Height of 22 m, diameter of 4 m
蒸汽发生器-蒸汽区 Steam generator-steam region	不锈钢-蒸汽-混合物 Stainless steel-steam mixture	0.88	

在反应堆安全壳的建模考虑了钢筋混凝土屏蔽墙、内部钢衬，顶部的非能动安全壳冷却系统等结构，安全壳混凝土材料的组成和密度取自PDG报告^[19]，建模如图2所示。

在蒸汽发生器(Steam Generator, SG)建模中，由于其内部结构复杂，实际建模进行了简化处理，简化后的模型如图2(b)所示，SG外壳为参考ASTM A240/A240M-23规范^[20]的SS316L不锈钢，壁厚为

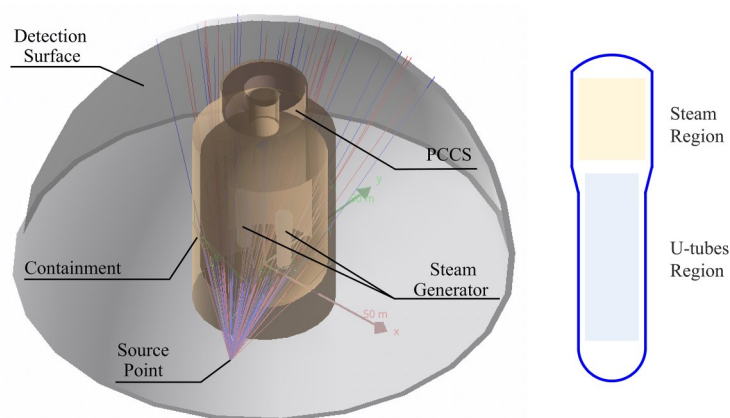


图2 蒙特卡罗模拟设置示意图(彩图见网络版) (a) AP1000安全壳和蒸汽发生器的几何模型, (b) 蒸汽发生器简化模型
Fig.2 Schematic diagram of Monte Carlo simulation settings (color online) (a) Geometric model of AP1000 containment vessel and steam generator, (b) Simplified model of steam generator

2 cm, 在高度上分为三段: 半球壳的底部封头, 三段式的轴对称的中段壳体和弧球壳的顶部封头。SG内部结构简化为两段圆柱体: 底部淡蓝色阴影为“U型管区域”, 是倒U型管一回路水换热位置, 材料近似为22%不锈钢加78%水混合物; 顶部淡黄色阴影为“蒸汽发生区域”, 材料近似为11%不锈钢加89%蒸汽混合物, 材料密度如表1所示。

1.3 缪子源项及输运模拟

模拟中使用宇宙射线生成程序(Cosmic-ray shower generator, CRY)^[21]生成宇宙线缪子源项。图3为CRY软件生成的三门核电站大致位置处(经度、纬度、海拔)的宇宙线缪子的能谱, CRY给出三门核电站位置处的缪子总注量率约为 $(0.647 \pm 0.002) \mu \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ (重复1 000次计算标准差估计总体标准差)。模拟中, 缪子的能量直接根据探测器可以接收到缪子的方向对缪子源的方向进行抽样, 对于方位角按照均匀分布在探测器视野范围内进行抽样, 对于天顶角则按照 $dN/dAdtd\Omega \propto \cos^2 \theta$ 分布在限定范围内进行抽样。图4展示天顶角 $\theta \in [30^\circ, 60^\circ]$ 范围内CRY给出缪子天顶角分布以及按照 $\cos^2 \theta$ 抽样得到天顶角分布。

采用Geant4蒙特卡罗程序模拟缪子在安全壳模型中的输运过程。由于不朝向探测器发射的缪子基本不会被探测到, 因此为节省模拟时间, 不对这部分缪子进行模拟, 具体采用对易性原理^[22], 对换实际源项和探测器位置, 即在地面源项点位朝安全壳发射宇宙线缪子, 并在半球型探测面统计记录各方向缪子的天顶角、方位角、不透明度、沉积能量等信息。

1.4 缪子探测结果统计

为了实现缪子透射成像, 需要统计不同位置、不同角度入射的缪子穿透安全壳及其内部结构后的通

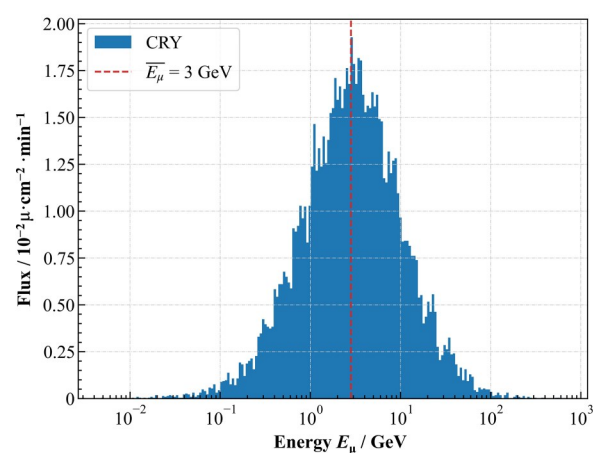


图3 CRY软件生成三门核电站位置处的宇宙线缪子能谱 (能量bin取对数)

Fig.3 Cosmic ray muon energy spectrum generated by CRY software at the location of SanMen nuclear power plants (with logarithmic energy binning)

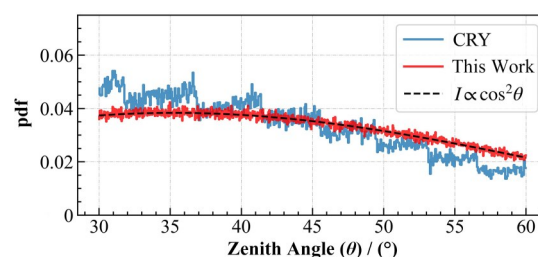


图4 宇宙线缪子限定天顶角抽样(彩图见网络版)

Fig.4 Cosmic ray muon limited zenith angle sampling result (color online)

量变化。因此需要在反应堆安全壳周围设置缪子探测器阵列, 实现不同穿透方向缪子的测量。

如图5(a)所示, 模拟中探测器布置在安全壳周围共8个点位 $P_0 \sim P_7$, 方位角间隔为 22.5° ; 图中 P'_0 表示 P_0 的虚拟对称点, 不参与后续§2.2迭代算法的数据重建。

天顶角布局方面,根据监测对象不同设置两种成像视野:1)针对安全壳顶部PCCS系统进行成像,天顶角范围 $\theta \in [20^\circ, 50^\circ]$,如图5(b)浅紫色区域,根据CRY软件计算该视野占全视野的比值约61.1%;2)针对安全壳内蒸汽发生器进行成像,天顶角范围 $\theta \in [64^\circ, 85^\circ]$,如图5(b)浅绿色区域,根据CRY软件计算该视野比例约3.4%。图5(b)中蒸汽发生器

的居中位置仅作示意,根据对称点 P_0 和 P'_0 的天顶角视野,浅绿色布局方案可覆盖完整蒸汽发生器。针对这两种天顶角跨度几十度的成像视野,需要采用灵敏面积边长与系统高度比约为1:3的缪子探测系统实现覆盖探测。

模拟中设置探测器为理想探测器,即进入探测器缪子的径迹都可以被探测器检测到,模拟中记录进入探测器缪子的方向和数量信息。

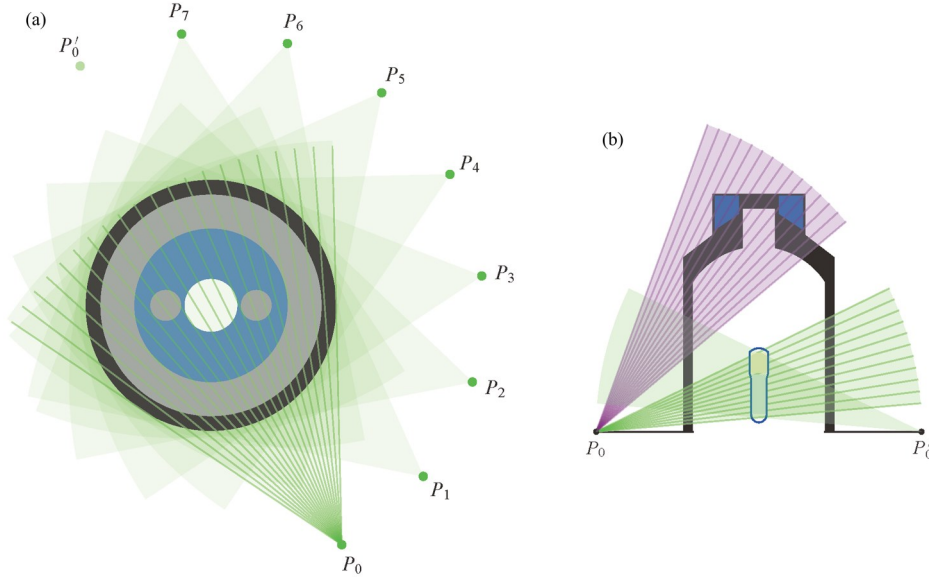


图5 探测器监测视野示意图(彩图见网络版) (a) 俯视图, (b) 侧视图
Fig.5 Schematic diagram of detector measurement view field (color online) (a) Top view, (b) Side view

2 缪子透射成像算法

2.1 基本原理

缪子透射成像中,考虑到宇宙线缪子平均能量较高,假设其在大尺寸待测物内径迹为直线;宇宙线缪子透射成像本质需测得从各方向穿透大尺寸待测物的存活缪子计数率,在立体角 Ω 处单位方向 $d\Omega$ 内接收到缪子计数 $N(\Omega)$ 可表示为:

$$N(\Omega) = \Delta T \cdot A(\Omega) \cdot \Phi_i(\Omega) \quad (1)$$

式中: ΔT 为缪子累积探测时间,s; $A(\Omega)$ 表示缪子探测系统接收函数, $\text{sr} \cdot \text{cm}^2$,表示缪子探测系统对各方向缪子的探测能力,与几何布置、探测效率等系统参数有关; $\Phi_d(E, \Omega)$ 表示宇宙线缪子的微分注量率, $\text{GeV}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,可通过理论Gaisser模型^[23]或CRY软件等计算获取,积分注量率 $\Phi_i(\Omega)$ 是微分注量率谱的积分:

$$\Phi_i(\Omega; E_{\min}(\Omega)) = \int_{E_{\min}(\Omega)}^{\infty} \Phi_d(E, \Omega) dE \quad (2)$$

宇宙线缪子在穿透大尺寸待测物过程中将不断

损失能量,能量损失殆尽时将不会被探测器所记录,因此能穿透立体角 Ω 方向上一定厚度待测物的缪子,其能量需高于一定的阈值 $E_{\min}(\Omega)$,该值将直接影响该方向的积分注量率 $\Phi_i(\Omega; E_{\min}(\Omega))$ 。

缪子透射成像本质是基于强度衰减原理的成像,因此需获取穿透大尺寸待测物后的缪子计数 $N_T(\Omega)$,和假定无待测物的开阔场景时缪子计数 $N_O(\Omega)$ 。实际测量中 $N_T(\Omega)$ 通过实验测量获得, $N_O(\Omega)$ 通过模拟或实验测量得到,本文中二者都通过模拟得到。通常测量两者的探测系统情况是可以统一的,即认为探测系统接收函数 $A(\Omega)$ 基本不变;尝试消除该项引起的系统误差,采用存活率 $R(\Omega)$ 表示:

$$R(\Omega) = \frac{N_T(\Omega)/\Delta T_T}{N_O(\Omega)/\Delta T_O} = \frac{\Phi_i(\Omega; E_{\min}(\Omega))}{\Phi_i(\Omega; E_0)} \quad (3)$$

由此,建立起测量计数 $N_T(\Omega)$ 或存活率 $R(\Omega)$ 与最小穿透能量 $E_{\min}(\Omega)$ 的映射关系,宇宙线缪子穿过不同结构和材料的物质对应的最小穿透能量

$E_{\min}(\Omega)$ 不同,进而影响测量存活率 $R(\Omega)$,即通过实验获取存活率 $R(\Omega)$ 可以推测缪子穿过物质的材料结构信息。

另一种考虑,将进一步建立最小穿透能量 $E_{\min}(\Omega)$ 与材料密度 ρ 的关系:平均能量高的宇宙线缪子是典型的相对论粒子,具有最小电离粒子(Minimum Ionizing Particle, MIP)特性^[3],其穿过单位质量厚度物体的平均电离能量损失率 $\bar{S}$ 有近似恒定的特征值 $\bar{S} \approx 2 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,例如对于液态水^[19],缪子平均电离能量损失率 $\bar{S} = 1.981 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。因此,最小穿透能量 $E_{\min}(\Omega)$ 可近似反映为材料密度 ρ 的影响:

$$E_{\min}(\Omega) = \int_{\mathcal{L}} S \rho dl \cong \bar{S} \int_{\mathcal{L}} \rho dl \quad (4)$$

式中: $\mathcal{L}$ 表示该立体角 Ω 方向上缪子透射待测物的径迹,上述近似忽略了缪子径迹在透射过程中的电离能量损失变化,只采用平均电离能量损失率 $\bar{S}$ 描述。

总结,使用缪子径迹探测器测量不同方向透射缪子径迹的方向和数量,并计算最小穿透能量,该过程称为正演模型;通过正演模型计算缪子信息,即可推断待测物的材料结构。

2.2 迭代算法

基于不同位置处探测器探测到的缪子径迹,使用ART代数重建算法^[24]对扫描视野内的安全壳和内部结构进行重建。重建迭代算法中,将待测物离散为若干体素表示,假设空间中物质在单个体素中均匀,以体素为单位进行结构的重建和成像。最小穿透能量 $E_{\min}(\Omega)$ 本质反映了该缪子方向上各体素材料信息的累和:

$$\mathbf{L} \times \mathbf{m} = \mathbf{d} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{L}$ 为缪子径迹长度矩阵,其元素 $L_{i,j}$ 为第 i 条缪子径迹在第 j 个体素中的长度,径迹长度矩阵 $\mathbf{L}$ 的第 i 行即第 i 条缪子径迹长度向量 $\mathbf{l}_i$,其求解是经典射线几何问题,可通过Siddon算法^[25]计算得到; $\mathbf{m}$ 为材料参数矩阵,其元素 m_j 为第 j 个体素对缪子的线性电离能量损失率,单位为 $\text{MeV} \cdot \text{cm}^{-1}$,定义为 $m \triangleq S \rho \cong \bar{S} \rho$; $\mathbf{d}$ 为探测数据向量,即最小穿透能量向量,其元素 d_i 为第 i 条径迹方向上缪子穿过物质并被探测所需的最小能量,可通过模拟或实验获取。迭代算法本质是从测量数据 $\mathbf{d}$ 重建出材料信息 $\mathbf{m}$ 的反演过程,称为反演模型。

应用ART迭代算法框架,采用逐条缪子径迹迭代重建的计算思路进行图像重建,具体流程如下:

1)初始化。算法参数进行初始赋值,如松弛系

数 λ ,用于图像偏差修正,通常初始化为1附近;当前材料信息图像 $\mathbf{m}_0$,当前偏差 ε_0 ,当前探测值累计模长 d_0 ,均初始化为0;设置收敛条件,最大迭代次数 K 或偏差收敛值 ε_m 。

2)计算修正。从缪子径迹数据集中取出一条缪子径迹,对应测量数据 d 和径迹长度向量 $\mathbf{l}$;计算图像修正过程:

$$\begin{aligned} \Delta &= d - \langle \mathbf{l}, \mathbf{m}_0 \rangle \\ \Delta &= \lambda \frac{\Delta}{\langle \mathbf{l}, \mathbf{l} \rangle} \mathbf{l} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $\langle \mathbf{l}, \mathbf{m}_0 \rangle$ 表示向量 $\mathbf{l}, \mathbf{m}_0$ 的点乘,表征当前径迹 $\mathbf{l}$ 在当前图像 $\mathbf{m}_0$ 的投影; Δ 即表示探测值的偏差; Δ 为引入松弛系数的归一化探测值的偏差向量。修改图像修正式(6)具体形式,可实现为其他ART系列算法。

3)修正更新。计算更新图像 $\mathbf{m}_1$ 和偏差 ε_1 :

$$\begin{aligned} \mathbf{m}_1 &= \mathbf{m}_0 + \Delta \\ \varepsilon_1^2 &= \varepsilon_0^2 + \Delta^2 \end{aligned} \quad (7)$$

4)判断收敛。根据收敛条件,判断是否达到最大迭代次数 K 或偏差小于设定值 ε_m ;若满足,则退出算法得到重建结果图像 $\mathbf{m}_0$;否则,更新当前数值,并重复2)~4):

$$\begin{aligned} \mathbf{m}_0 &= \mathbf{m}_1 \\ \varepsilon_0^2 &= \varepsilon_1^2 \end{aligned} \quad (8)$$

综上,根据§2.1基本原理,以各方向缪子的实测或模拟计数为输入,获取到探测数据 $\mathbf{d}$,具体为最小探测能量 $E_{\min}(\Omega)$;结合离散体素的径迹长度矩阵 $\mathbf{L}$,基于§2.2迭代算法,得到重建材料信息 $\mathbf{m}$,具体为线性电离能量损失率 m 或材料密度 ρ ;从而实现了完整的缪子透射成像过程,可获得模拟透射数据,并分析重建透射物质的内部结构。总结形成完整的缪子透射成像框架Muography。

如图6所示,缪子透射成像框架Muography包括模拟框架MuSimu和重建框架MuReco两部分。其中,模拟框架MuSimu可配置不同的成像对象几何和实验缪子探测系统,可配置缪子输运所需常用的物理过程或列表,缪子源设置了常见的单能源项、结合其他缪子源软件的宇宙线缪子源项和带理论公式接口的模型源项,并实现了§1.3提及的限定角度、对易性抽样等模拟设置功能,可得到缪子天顶角、方位角等径迹信息;而重建框架MuReco则集成了缪子透射成像正演计算流程、以ART算法框架为主导的三维重建算法以及相关可视化、图像质量分析其他计算接口,输出三维重建图像。基于该完整框架,根据第一节AP1000安全壳几何和模拟设置,模拟框架MuSimu输出各方向缪子径迹信息,并输入到重建框架MuReco中,采用§2.2提及的ART迭代算法,

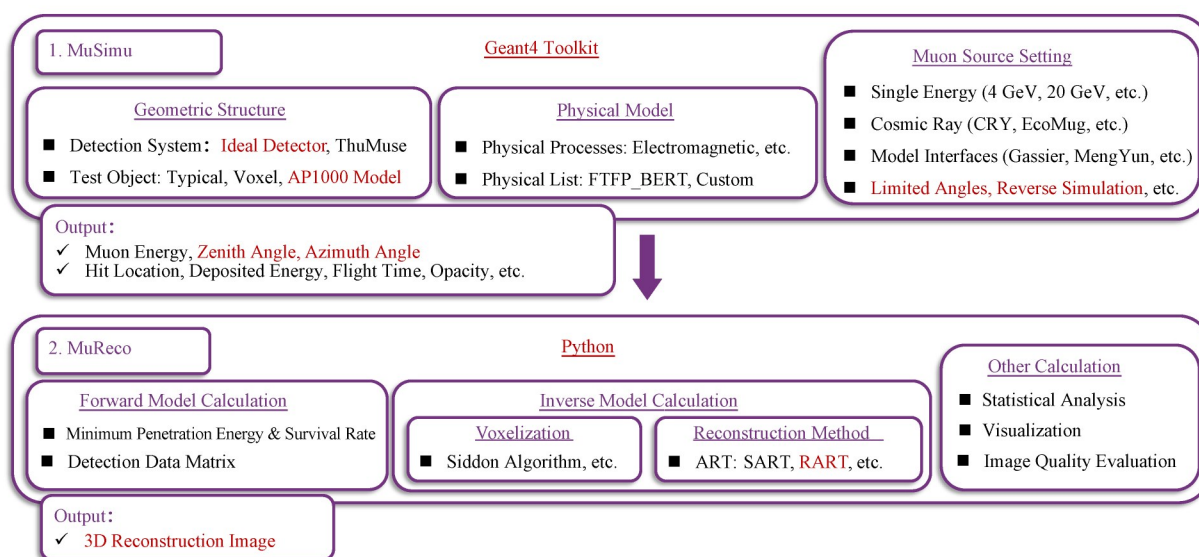


图6 缪子透射成像框架 Muography 框架图
Fig.6 Framework diagram of Muography

实现对探测器监测视野内的反应堆安全壳及其内部结构的三维重建。

3 成像结果和讨论

3.1 安全壳透射成像

基于图5所示缪子探测器布点和浅紫色视野，探测器朝向安全壳的PCCS系统设置，模拟得到各个点位探测器测量到缪子径迹，使用§2.2迭代算法重建安全壳的三维结构。

针对安全壳顶部PCCS系统成像，考虑到该结构的Z轴对称特性，此处仅模拟 P_0 点位，并在重建中将缪子径迹做随机角度的Z轴旋转，等价于将探测点位从 P_0 拓展到与其同半径圆上所有点。共模拟了 10^6 条缪子径迹，相当于 $1\,000\text{ cm}^2$ 灵敏面积的缪子探测系统约1.76 d的测量时间。

图7展示了重建得到的反应堆安全壳三维结构图像的中心切片，XY切片位置由图中黑色虚线表示；模拟几何结构相关轮廓标识如下：反应堆安全壳的结构轮廓边界用橙色虚线标出，PCCS系统则大致在红色虚线区域，粉色虚线标志着PCCS系统内的圆柱体空气腔，可见重建结构与几何设置基本一致。图7重建图像做了归一化处理，色块颜色深浅代表材料密度的相对关系。从成像结果中基本可以识别到安全壳的混凝土外壳、安全壳顶部的PCCS系统水箱，以及安全壳内部的空腔，并且可以基本区分出空腔中的空气、PCCS系统水箱中的冷却水以及安全壳的混凝土这三种密度由小到大的不同材料。

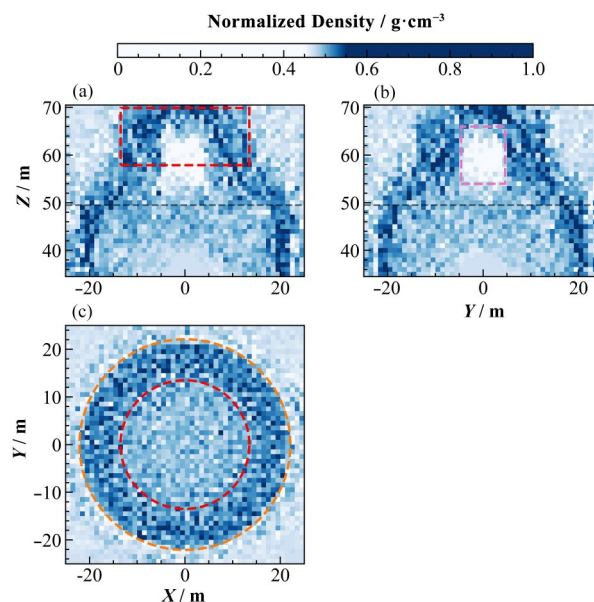


图7 PCCS模拟数据的重建图像三视图(彩图见网络版)
(a) $Y=0\text{ m}$ 处切片, (b) $X=0\text{ m}$ 处切片, (c) $Z=49.5\text{ m}$ 处切片
Fig.7 Three views of reconstructed image from PCCS simulation (color online) (a) Slice at $Y=0\text{ m}$, (b) Slice at $X=0\text{ m}$, (c) Slice at $Z=49.5\text{ m}$

3.2 蒸汽发生器透射成像

模拟中设置探测器视野面向蒸汽发生器，同图5浅绿色视野所示，共模拟 $P_0 \sim P_7$ 8个点位，每个点位模拟 10^6 条缪子径迹，相当于 $1\,000\text{ cm}^2$ 灵敏面积的缪子探测系统在每个点位累积测量约31.57 d。

图8展示了 P_0 点位处得到的缪子的透射图像，图中坐标 (X, Z) 表示每条缪子径迹投影到与 P_0 点位半径垂直平面的交点，图中颜色深浅值表示该方向上测量到缪子径迹计数率和空旷条件下预期径迹计

数率的比值,即存活率 $R(\Omega)$ 。透射图像反映了成像物体结构在探测器表面的投影,因此其形状和真实物体结构相比存在一定畸变,畸变大小与探测器视野以及物体到探测器的距离有关。从图8可以看到,两侧清晰的安全壳混凝土墙结构,虚线表示由几何模型计算的混凝土墙轮廓,两者符合得很好;两个蒸汽发生器的轮廓也同样清晰可见,其中由于左侧的蒸汽发生器距离 P_0 探测点位更远,因此其在投影图像中轮廓尺寸较小。

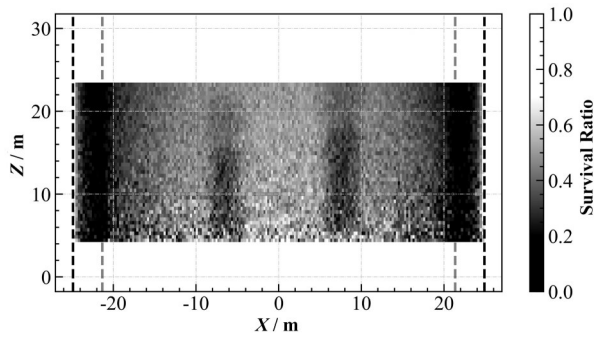


图8 点位 P_0 透射图像
Fig.8 Muography image at point P_0

结合8个测量点位的结果,利用§2.2迭代算法对反应堆内部结构进行重建,重建结果的中心切片如图9所示。其中蒸汽发生器和安全壳的轮廓用橙色虚线标出,重建结果基本识别到了两个蒸汽发生器的位置,并且对于蒸汽发生器上端密度较小的“蒸汽发生区域”和下端密度较大的“U型管区域”也有一定的识别,分别为绿色虚线和红色虚线。

在安全壳的边缘位置可以看到成像图像存在伪影和畸变,对比§3.1 PCCS系统轴对称结构良好的成像结果,这与Tuy-Smith精确重建条件^[26]有关:在同等数据量情况下,PCCS重建中的等效点位圆,相比蒸汽发生器重建中的8个离散点位,更完备的重建条件,将有更好的重建效果;由此也表明,对于大尺寸复杂结构物体的缪子透射成像,多点位监测是合理且十分必要的。而图9中外部混凝土结构和内部蒸汽发生器重建质量也有差异,这可能和缪子径迹线与多点位监测形成的有效重建空间有关:内部蒸汽发生器尺寸较小,基本覆盖在有效重建空间中;而位于外部的混凝土墙尺寸较大,更容易出现重建伪影。

3.3 空间分辨率分析

在图像重建中,通常采用正方体体素进行离散重建,空间体素(Voxel)的大小(即正方体体素边长)决定了空间分辨率的上限。体素尺寸过大会导致单个体素中的结构差异无法被表征;而体素尺寸过小

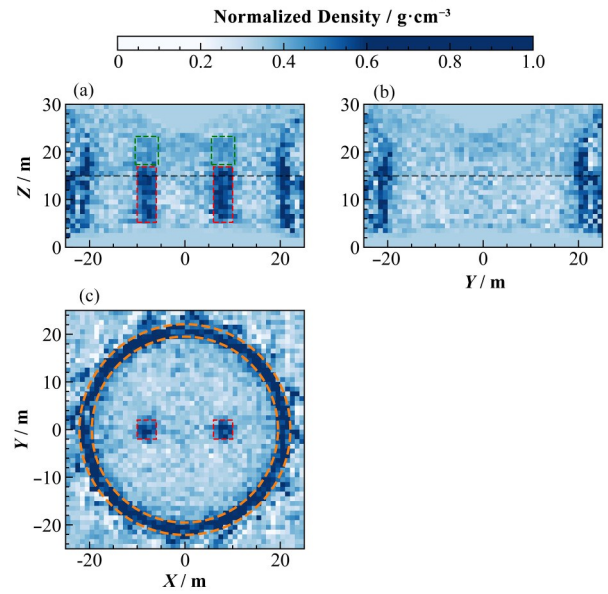


图9 蒸汽发生器模拟数据的重建图像三视图(彩图见网络版)
Fig.9 Three views of reconstructed image from steam generator simulation (color online) (a) Slice at $Y=0$ m, (b) Slice at $X=0$ m, (c) Slice at $Z=15$ m

时,穿过各个体素的缪子径迹数量较少,成像结果的统计涨落大,也无法有效地识别到结构差异。因此,体素的选取是固有空间分辨和测量统计性的平衡。

§3.1、§3.2中成像结果对应的体素尺寸均为100 cm;针对§3.2蒸汽发生器成像场景,保持模拟缪子径迹数不变,改变体素大小为20 cm、50 cm和200 cm,图10展示了不同体素尺寸下蒸汽发生器区域的成像结果。

当体素尺寸变大时,成像统计性变好,但当体素

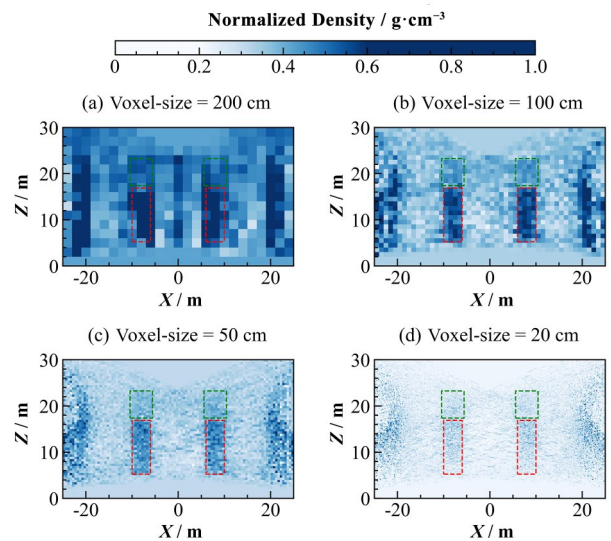


图10 不同体素大小的成像结果(彩图见网络版)
Fig.10 Reconstructed image with different voxel sizes (color online)

大到 200 cm 时,无法识别到蒸汽发生器结构,上端“蒸汽发生区域”和下端“U 型管区域”较难区分。当体素尺寸小至 20 cm 时,单体素内统计性变差导致也无法准确识别到蒸汽发生器内部结构。为定量描述上述不同材料和结构的区分情况,定义参考对比度 α :

$$\alpha = \frac{|\rho_1 - \rho_2|}{(\rho_1 + \rho_2)/2} \times 100\% \quad (9)$$

参考对比度值表征两种材料密度的差异程度,值越大差异越大,可为重建图像中区分不同材料密度提供参考;如图 10 所示,针对绿色虚线的“蒸汽发生区域”和红色虚线的“U 型管区域”,采用区域内重建密度的平均值代表该区域计算参考对比度。不同体素尺寸情况计算结果如表 2。

表 2 不同体素尺寸的蒸汽发生器成像结果参考对比度
Table 2 Contrast of steam generator image with different voxel sizes

体素大小 Voxel size / cm	参考对比度 Contrast / %
200	56.864
100	65.637
50	58.613
20	18.064

保持模拟统计量一致情况下,当体素尺寸为 20 cm 时,参考对比度值最小,说明此时重建图像中“蒸汽发生区域”和“U 型管区域”两区域的代表密度差异不大,不具备良好的材料分辨能力。体素的选取在 100 cm 左右,有相对最大的参考对比度,能有较好的材料差异甄别效果,这与图 10 成像结果表现一致。

基于以上讨论,对于 1 000 cm² 灵敏面积的理想探测器,累积月量级的测量数据,选取 100 cm 左右的体素尺寸,可识别到 AP1000 核电站安全壳、PCCS 系统和内部蒸汽发生器等结构。

3.4 成像时间分析

在地表海平面位置,天然宇宙线通量水平为 1 $\mu\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$;在三门核电站位置处,CRY 计算得到缪子通量为 $(0.647 \pm 0.002) \mu\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ 。针对蒸汽发生器的成像,模拟中对于 1 000 cm² 灵敏面积的理想探测器,8 个点位累积测量时间共约 8 个月,设置重建体素尺寸为 100 cm,可以获得清晰的图像;若采用多套性能一致的缪子探测系统布置在不同点位同时监测的方案,可相应压缩测量时间。

实际缪子探测系统存在几何接收、本征探测能力等效率。以双层缪子探测阵列为例,假定灵敏面积边长与两层间距比为 1:3,其天顶角接收范围约

$2 \times \arctan(1/3) \approx 37^\circ$,将缪子探测系统与成像视野中心对齐,以实现 §1.4 PCCS 和蒸汽发生器成像视野的完全覆盖;若阵列系统的天顶角接收范围减为 18.5° ,相当于几何接收效率对应减半,需要花两倍测量时间分两次扫描以实现完全覆盖的探测成像。探测效率方面,典型的缪子探测器(例如能达到 97% 以上探测效率的 MRPC 气体探测器^[27])单独探测效率基本都不小于 90%,双层缪子探测阵列探测效率优于 81%。综上,为实现良好的三维成像效果,缪子探测系统总测量时间需延长至年量级。

4 结语

本文针对 AP1000 核电站,实现了完整的安全壳缪子三维成像模拟流程,验证了缪子透射成像在核电厂安全壳结构检测领域应用的可行性。在 Geant4 程序中,建立 AP1000 核电站几何模型,通过多点位多倾角的模拟实验,统计记录各方向缪子信息,并结合迭代重建算法,实现安全壳结构成像,可识别屏蔽墙、PCCS 系统水箱、空气柱和蒸汽发生器等结构轮廓,同时也能分辨空气、蒸汽、水、混凝土等材料密度差异。模拟预计,对于 1 000 cm² 灵敏面积的理想探测器,经过月量级累积测量时间,预计能获得空间分辨率约 100 cm 的缪子透射图像。本项模拟为后续安全壳缪子成像实验提供了详细可靠的技术指导和支撑,对同类大尺寸结构缪子成像实验和相关计算分析具有参考价值,助力探测布局方案的优化改进,是获取更佳成像效果的缪子透射图像的良好分析工具。

作者贡献声明 徐仲行负责模拟计算、数据处理和文章撰写;代文翰负责文章细节审阅修改;曾志负责研究提出、工作指导和文章修改;程建平负责审核把关文章的科学性。

参考文献

- Norris W E, Naus D J, Graves H L. Inspection of nuclear power plant containment structures[J]. Nuclear Engineering and Design, 1999, 192(2 - 3): 303 - 329. DOI: 10.1016/s0029-5493(99)00125-9.
- Katz J I, Blanpied G S, Borozdin K N, et al. X-radiography of cargo containers[J]. Science & Global Security, 2007, 15(1): 49 - 56. DOI: 10.1080/08929880600993030.
- Bonomi G, Checchia P, D'Errico M, et al. Applications of cosmic-ray muons[J]. Progress in Particle and Nuclear Physics, 2020, 112: 103768. DOI: 10.1016/j.pnpnp.2020.

- 103768.
- 4 Zhang P, Ma H, Dai W, *et al.* Measurement of cosmic-ray muon flux at CJPL-II[J]. *Astroparticle Physics*, 2025, **172**: 103147. DOI: 10.1016/j.astropartphys.2025.103147.
- 5 Morishima K, Kuno M, Nishio A, *et al.* Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons[J]. *Nature*, 2017, **552**(7685): 386 – 390. DOI: 10.1038/nature24647.
- 6 Nishiyama R, Ariga A, Ariga T, *et al.* Bedrock sculpting under an active Alpine glacier revealed from cosmic-ray muon radiography[J]. *Scientific Reports*, 2019, **9**: 6970. DOI: 10.1038/s41598-019-43527-6.
- 7 Nagamine K, Iwasaki M, Shimomura K, *et al.* Method of probing inner-structure of geophysical substance with the horizontal cosmic-ray muons and possible application to volcanic eruption prediction[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1995, **356**(2 – 3): 585 – 595. DOI: 10.1016/0168-9002(94)01169-9.
- 8 Liu G R, Luo X J, Tian H, *et al.* High-precision muography in archaeogeophysics: a case study on Xi'an defensive walls[J]. *Journal of Applied Physics*, 2023, **133**: 014901. DOI: 10.1063/5.0123337.
- 9 Cohu A, Chevalier A, Nechyporuk O, *et al.* First 3D reconstruction of a blast furnace using muography[J]. *Journal of Instrumentation*, 2023, **18**(7): P07004. DOI: 10.1088/1748-0221/18/07/P07004.
- 10 Miyadera H, Borozdin K N, Greene S J, *et al.* Imaging fukushima daiichi reactors with muons[J]. *AIP Advances*, 2013, **3**(5): 052133. DOI: 10.1063/1.4808210.
- 11 Perry J, Azzouz M, Bacon J, *et al.* Imaging a nuclear reactor using cosmic ray muons[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, **113**(18): 184909. DOI: 10.1063/1.4804660.
- 12 Fujii H, Hara K, Hayashi K, *et al.* Investigation of the Unit-1 nuclear reactor of Fukushima Daiichi by cosmic muon radiography[J]. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2020, **2020**(4): 043C02. DOI: 10.1093/ptep/ptaa027.
- 13 Pasyuk N, Yashin I, Shutenko V V, *et al.* Muonography of the structure of the power unit of the Kalinin NPP[J]. *Technical Physics*, 2024, **70**(1): 165 – 173. DOI: 10.13140/RG.2.2.33079.94885.
- 14 Procureur S, Attié D, Gallego L, *et al.* 3D imaging of a nuclear reactor using muography measurements[J]. *Science Advances*, 2023, **9**(5): eabq8431. DOI: 10.1126/sciadv.abq8431.
- 15 Lefevre B, Vogel J, Gomez H, *et al.* 3D reconstruction of a nuclear reactor by muon tomography: structure validation and anomaly detection[J]. *PRX Energy*, 2025, **4**: 013002. DOI: 10.1103/prxenergy.4.013002.
- 16 徐仲行, 曾志, 程建平, 等. 核电厂安全壳宇宙线缪子成像初步研究[C]//中国辐射防护学会2024年学术年会论文集. 太原, 中国: 中国辐射防护学会, 2024: 80 – 84. XU Zhonghang, ZENG Zhi, CHENG Jianpin, *et al.* Preliminary study on muography using cosmic ray muons of nuclear power plant containment[C]//Chinese Society for Radiation Protection. Proceedings of the 2024 Academic Annual Meeting of the Chinese Society for Radiation Protection. Taiyuan, China: Chinese Society for Radiation Protection, 2024: 80 – 84.
- 17 Agostinelli S, Allison J, Amako K, *et al.* Geant4—a simulation toolkit[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2003, **506**(3): 250 – 303. DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8.
- 18 Westinghouse Electric Company, U. S. Nuclear Regulatory Commission. Introduction to reactor technology - PWR: Section 5.3 AP1000 plant overview [EB/OL]. (2023-06-10) [2025-07-01]. <https://www.nrc.gov/docs/ML1215/ML12159A247.pdf>.
- 19 Workman R L. Review of particle physics[J]. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2022(8): 521 – 523.
- 20 ASTM International. ASTM A240/A240M - 23: standard specification for chromium and chromium - nickel stainless steel plate, sheet, and strip for pressure vessels and for general applications[S]. ASTM International, 2023.
- 21 Hagmann C, Lange D, Wright D. Cosmic-ray shower generator (CRY) for Monte Carlo transport codes[C]//2007 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record., Honolulu, HI, USA. IEEE, 2007: 1143 – 1146. DOI: 10.1109/nssmic.2007.4437209.
- 22 Desorgher L, Lei F, Santin G. Implementation of the reverse/adjoint Monte Carlo method into Geant4[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2010, **621**(1 – 3): 247 – 257. DOI: 10.1016/j.nima.2010.06.001.
- 23 Gaisser T, Engel R, Resconi E. Cosmic rays and particle physics[M]. Cambridge: Cambridge University Press,

- 2016.
- 24 Gupta U, Ranjan U. Algebraic reconstruction techniques [M]//Encyclopedia of Mathematical Geosciences. Cham: Springer International Publishing, 2022: 1 - 7. DOI: 10.1007/978-3-030-26050-7_41-1.
- 25 Jacobs F, Sundermann E, De Sutter B, *et al.* A fast algorithm to calculate the exact radiological path through a pixel or voxel space[J]. Journal of Computing and Information Technology, 1998, **6**(1): 89 - 94.
- 26 Smith B D. Image reconstruction from cone-beam projections: necessary and sufficient conditions and reconstruction methods[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1985, **4**(1): 14 - 25. DOI: 10.1109/tmi.1985.4307689.
- 27 Chen X L, Han D, Wang X, *et al.* The performance study of MRPCs used for muon tomography[J]. Journal of Instrumentation, 2019, **14**(6): C06012. DOI: 10.1088/1748-0221/14/06/C06012.