适用于高湿惰性气体辐射监测的管外γ测量装置设计与性能研究

郑 皓[1]　袁蔓蕾[2]　李 鑫[2]　秦文超[1]　陈 峰[2]　申忱迪[1]　王学诚[2]

[1]（中国核电工程有限公司　北京 100049）

[2]（西安中核核仪器股份有限公司　西安 710061）

摘要　M310及华龙一号堆型的凝汽器真空系统气体活度监测通道，通常采用将工艺管线内气体抽取至监测设备以测量β活度浓度的方式进行监测。由于工艺气体往往湿度过高，上述测量方式的准确性及设备运行稳定性容易受到影响。更重要的是，常见的检测设备依赖国外进口，研制国产化惰性气体监测装置意义重大。为响应我国核辐射监测设备国产化要求，本研究设计了一种适用于高湿惰性气体监测的辐射监测装置。该设备采用管道外测量γ活度的方法，不与管内高湿气体接触，有效避免管内高湿环境对探测器的影响。通过蒙卡分析刻度确定最优测量位置，并通过试验刻度标定源与Kr-85、Xe-133的传递系数，将测量结果归一到管道内惰性气体放射性比活度，实现对Kr-85、Xe-133的准确测量。结果表明，该装置稳定性与可靠性强，其相对固有误差在3%以内。同时，设备在高湿环境下（温度：（40±2）℃，湿度：92%~97%RH）表现出优异性能，测量值偏差≤4%。

关键词　高湿度，惰性气体监测，环境特性

中图分类号　TL8

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0112

CSTR: 32195.14.j.JRRRP.1000-3436.2025-0112

引用该文：

郑皓, 袁蔓蕾, 李鑫, 等. 适用于高湿惰性气体辐射监测的管外γ测量装置设计与性能研究[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, XXXX, **XX**(XX): XXXXXX. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0112.

ZHENG Hao, YUAN Manlei, LI Xin, *et al*. Design and performance study of an external γ-ray measurement device suitable for radiation monitoring of high-humidity inert gases[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, XXXX, **XX**(XX): XXXXXX. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0112.

Design and performance study of an external γ-ray measurement device suitable for radiation monitoring of high-humidity inert gases

ZHENG Hao[1]　YUAN Manlei[2]　LI Xin[2]　QIN Wenchao[1]　CHEN Feng[2]　SHEN Chendi[1]　WANG Xuecheng[2]

[1](*China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100049, China*)

[2](*Xi'an Nuclear Instrument Co., Ltd., Xi'an 710061, China*)

ABSTRACT　For the condenser exhaust activity monitoring channel of the M310 and HPR1000 reactor types, β

第一作者：郑皓，男，1993年出生，2019年于华北电力大学获工学硕士学位，研究领域为辐射监测，E-mail：513054169@qq.com

通信作者：秦文超，硕士，E-mail：qinwc@cnpe.cc

收稿日期：初稿 2025-11-26；修回 2026-03-06

First author: ZHENG Hao (male) was born in 1993, obtained a master's degree in engineering from North China Electric Power University in 2019, focusing on radiation monitoring, E-mail: 513054169@qq.com

Corresponding author: QIN wenchao, master degree, E-mail: qinwc@cnpe.cc

Received 26 November 2025; accepted 06 March 2026

activity concentration measurement is conventionally implemented by extracting gas from process pipelines into dedicated monitoring equipment. However, the excessively high humidity of process gas tends to compromise the measurement accuracy and operational stability of such equipment. More critically, mainstream detection devices of this type rely heavily on foreign imports, highlighting the imperative to develop localized inert gas monitoring systems to address national needs for the localization of nuclear radiation monitoring equipment. To this end, this study designs a radiation monitoring device tailored for high-humidity inert gas monitoring. The device employs a pipeline-external γ activity measurement method, which eliminates direct contact with the high-humidity gas inside the pipeline, thereby effectively circumventing the adverse impacts of the high-humidity pipeline environment on the detector. The optimal measurement position is determined via Monte Carlo simulation-based calibration. Moreover, the transfer coefficients between the calibration source and target nuclides (Kr-85 and Xe-133) are obtained through experimental calibration, and the measured data are normalized to the radioactive specific activity of the inert gas inside the pipeline, enabling accurate quantification of Kr-85 and Xe-133. Test results demonstrate that the developed device features high stability and reliability, with a relative intrinsic error of less than 1%. Furthermore, the device exhibits superior performance under high-humidity conditions (temperature: (40±2) ℃, relative humidity: 92% – 97%RH), yielding a measurement deviation of ⩽ 4%. This device provides a feasible technical solution for the localized monitoring of high-humidity inert gas in nuclear power plants, and holds promising application potential in relevant fields.

KEYWORDS High humidity, Inert gas monitoring, Environmental characteristics

CLC TL8

电厂辐射监测系统（IRM）用于监测核电厂环境中的放射性水平是否在正常的阈值范围之内，以确保核电厂的运行安全，使工作人员和周围居民免受超剂量辐照的影响，是核电站及核设施安全运行的基础保障[1-4]。我国核电站IRM发展初期，由于核电站内高温、高湿、强辐射等多种复杂环境对设备可靠性要求极高，国内工业发展与国外相比较为缓慢，各核电站多采用国外进口辐射监测系统，其设备存在价格高、供货及维修周期长、技术沟通不便捷等缺点。随着国际局势变化以及我国辐射监测仪表制造能力的提升，作为守护我国核电站及核设施安全运行的第一道防线，辐射监测系统国产化研发刻不容缓[5]。

2016年，包括西安中核核仪器股份有限公司、陕西卫峰核电子有限公司、中国船舶集团有限公司第七一九研究所等国内厂家陆续布局，针对“华龙一号”等核电站或核设施开展了IRM的研发，逐渐形成各单位主营产品。部分厂家采用传统的管内β测量技术，由于β射线穿透能力弱，需在传输管道开设取样口，不仅存在泄漏风险，而且操作人员受辐射影响增加[6]；同时，高湿度气体附着在测量面形成水膜，导致β射线能量衰减偏差达12%~18%，显著影响测量准确度[7]。通过β-γ符合测量实现管外监测，系统结构复杂，在高湿度工况下抗干扰能力差[8]。相比之下，管外γ测量技术具备显著技术优势。

本文阐述了一种对高湿度环境下惰性气体进行监测的设备设计方法，与传统惰性气体采取管内β监测方法不同，本设备通过蒙卡分析刻度最优测量位，采用管外γ测量方式对惰性气体进行监测。

1 设备设计

1.1 探测方法设计

早期，核电站采用国外进口惰性气体监测设备进行高湿环境下惰性气体的监测，由于β射线的穿透能力较差，探测器测量端需暴露在测量环境下。此时，测量环境中的高湿水蒸气会附着在测量端表面形成液滴，当凝结到一定程度后，在重力作用下滴落。该现象导致原本应直接射入测量端的β射线穿过凝结水时，与水分子发生碰撞，导致能量损失和路径偏转，从而影响测量结果。同时，由于核电站电磁环境较复杂，设备经常出现受到电磁干扰的现象[9]。

针对上述情况，本文设计了一套国产化惰性气体监测设备，为避免水蒸气对测量结果产生影响，采用探测器临近管线测量γ活度的方法，将测量结果归一到管道内惰性气体放射性比活度[10]，实现

对管道惰性气体的监测。为增强设备抗干扰能力，采用探测器浮空，探测器至就地处理显示单元接地线翻接至航空插头尾部附件方式，提升信号抗干扰能力。为降低外γ场对测量结果的影响，采用4 cm铅室，达到对662 keV的外场衰减60倍以上效果。

为保证测量结果满足探测范围要求，根据监测道源项建立MCNP模型：材料为TP316无缝钢管，晶体外部为MgO反射层厚度1.3 mm，底部反射层厚度2 mm，反射层外部为铝壳，厚度1.2 mm，底部铝壳厚度0.8 mm，铝壳外部不锈钢304层厚度2.5 mm。开展蒙卡计算，通过公式（1）得到NaI晶体全谱区间探测效率（此处也可表示为灵敏度），计算结果如表1所示。

$$S=TallyF8\times V\times I \quad (1)$$

式中：S为NaI晶体全谱区间探测效率；$TallyF8$为MCNP程序对全谱区间的计算结果；V为气体为源体积，V=4.98×10^{-3} m^3；I为光子发射概率，I=0.795 008 58。

得出S后，带入美标ANSIN42.18-2004（Specification and Performance of On-Site Instrumentation for Continuously Monitoring Radioactivity in Effluents）§5.4.3探测下限公式[11]，即可得出其探测下限。本设备探测上限为监测仪在误差范围内允许的最大计数率（2×10^5 Hz）与灵敏度的比值。

根据蒙卡计算结果，当使用Φ50 mm×50 mm的NaI（Tl）晶体，铅室厚度为4 cm，探测器前端晶体距离管道2 cm时，灵敏度为2.54×10^{-5} Hz/（Bq·m^{-3}）。此时探测量程为3.265×10^3~7.87×10^9 Bq/m^3，满足测量限3.7×10^3 ~3.7×10^9 Bq/m^{3}要求。

根据蒙卡分析刻度确定最优测量位置后，对于气体探测器，通常采用试验刻度标定源（通常为Cs-137）与Kr-85、Xe-133气态源的传递系数，将测量结果归一到管道内惰性气体放射性比活度，实现对Kr-85、Xe-133的准确测量。

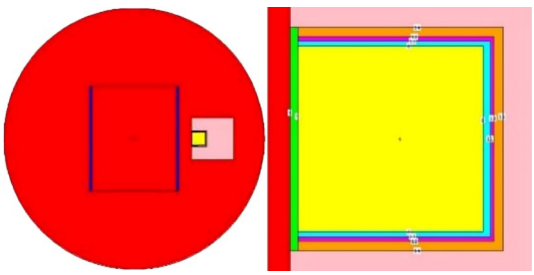


图1 50 mm×50 mm NaI晶体模型
Fig.1 50 mm×50 mm NaI crystal model

表1 蒙卡计算结果
Table 1 Monte Carlo calculation results

序号 Number	NaI距管道距离 / cm Distance from NaI to pipeline	灵敏度S Sensitivity
1	0	3.07×10^{-5}
2	0.5	2.93×10^{-5}
3	1	2.79×10^{-5}
4	2	2.54×10^{-5}

1.2 设备组成

本设备由探测装置、就地处理箱、铅屏蔽体及配套支架组成。其中，探测装置采用Φ50 mm×50 mm的NaI晶体探测装置，就地处理箱采用一体化就地处理显示单元，根据探测现场环境外γ场强度，计算铅屏蔽厚度约40 mm。工作时，先将探测装置置于铅屏蔽体内，正对测量管道进行γ辐射的探测。由于γ射线的穿透能力较强，管路中待测气体的γ射线穿过管道射入NaI晶体内并在晶体中损耗能量引起闪烁体原子的电离和激发，受激原子退激发出波长位于可见光或邻近可见光的闪烁光子。光子作用于光电倍增管的光阴极上，从中打出电子。由于光电倍增管打拿极上的二次电子发射作用，使打出的电子数量不断增加，最后在光电倍增管的阴极负载上产生光脉冲信号，此负脉冲经电容耦合至射极跟随器的输入端，进行功率放大后，送至就地处理箱进行数据计算、分析、处理、显示及报警，并通过RS485信号将测量结果上传至DCS系统[12]。

其逻辑流程图、探测器及铅屏蔽体外形图分别如图2~3所示。

为满足核辐射监测设备国产化需求，防止国际区域冲突升级、大国战略竞争导致的贸易问题对我国核辐射监测设备运行影响，本次设备研发

坚持采用国产化元器件，建立自主可控的核心技术与知识产权体系，为我国核电行业安全、稳定、高效运行注入关键技术动能。

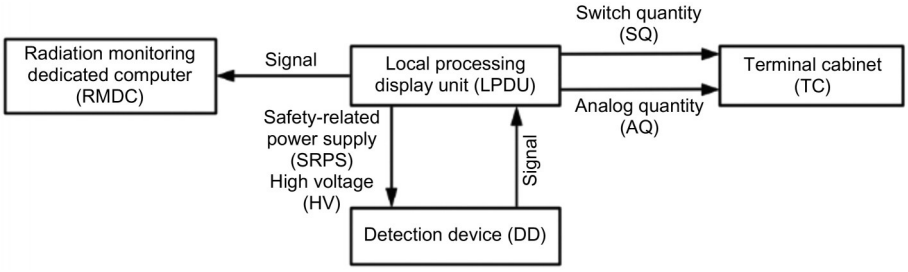


图2 设备逻辑流程图
Fig.2 Equipment logic flow diagram

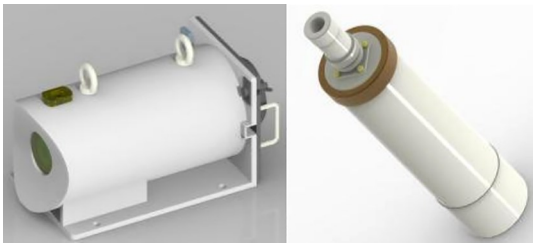


图3 探测器及铅屏蔽体外形图
Fig.3 External outline drawing of detector and lead shield assembly

2 试验方法及结果分析

2.1 试验方法及结果

辐射监测系统设备作为核电安全运行的基石，其可靠性及稳定性为设备研发的重中之重。为验证设备性能，分别进行了统计涨落、指示值的稳定性、电源变化、响应时间、过载、环境、电磁兼容等近30项试验，部分试验结果如下所示。

（1） 统计涨落

在基准条件下，将初始活度7.69×10^3 Bq的Cs-137源放入源托中，置于铅屏蔽体上端源检孔内。开机30 min后，每隔10 s记录一次监测仪的测量值（Bq/m^3），共记录10次，求出算术平均值$\bar{X}$和标准偏差σ，按式（2）计算出变异系数，其测量结果如表2所示。

$$v=\sigma/\bar{X}=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(X_i-\bar{X}\right)^2}/\bar{X} \qquad (2)$$

式中：X_i为第i次测量值；$\bar{X}$为n次测量的算术平均值；σ为n次测量的标准标准偏差。

表2 统计涨落试验数据表
Table 2 Data Table of Statistical Fluctuation Test

核素 Nuclide	活度 / Bq Activity	真值 /（Bq·m^{-3}） True value	测量值 /（Bq·m^{-3}） Measured value		均值 /（Bq·m^{-3}） Mean value	变异系数 / % Coefficient of variation
^{137}Cs	7.69×10^3	2.81×10^7	2.73×10^7	2.75×10^7	2.76×10^7	2.2
			2.80×10^7	2.78×10^7		
			2.68×10^7	2.85×10^7		
			2.81×10^7	2.78×10^7		
			2.78×10^7	2.65×10^7		

（2） 相对固有误差试验

在本底外γ场的情况下，将探测器放置于铅室内，将初始活度7.93×10^4 Bq的Cs-137源放入源托中，置于铅屏蔽体上端源检孔内。每隔10 s记录一次监测仪的测量值（Bq/m^3），共记录30次求出平均值。按式（3）计算相对固有误差E，其测量结果如图4所示。

$$E=\frac{A_i-A_t}{A_t}\times100\% \qquad (3)$$

式中：A_i是量的指示值；A_t是量在测量点的约定真值；E是相对固有误差。

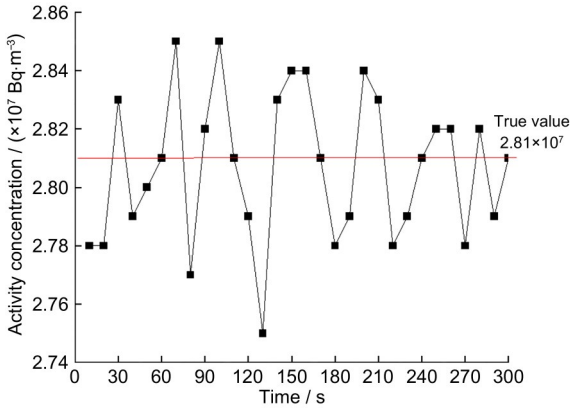


图4 相对固有误差试验数据图
Fig.4 Experimental data plot of relative intrinsic error

（3） 额定高温

依据 GB/T 7165.1－2005 [13] 中的标准试验条件，将监测仪置于该基准条件下（18~22 ℃），将探测器放置于铅室内，将初始活度 7.93×10⁴ Bq 的 Cs-137 源放入源托中，开机预热 30 min 后，每隔 10 s 读一次监测仪计数，读取 10 个数，求出平均值 $\bar{C}1$，此数就作为基准条件下的标称读数。

将监测仪置于人工气候室，将探测器放置于铅室内，将初始活度 7.93×10⁴ Bq 的 Cs-137 源放入源托中，监测仪在整个试验过程中通电。开始以不超过 1 ℃/min 的速率升温至（55±2）℃后，持续 1 h 使监测仪达到温度稳定。然后恒温 24 h，在此试验结束的最后 30 min 内，每隔 10 s 读一次监测仪计数，取 10 个数求平均值 $\bar{C}2$，与 $\bar{C}1$ 比较，按式（4）计算其试验前后温度变化，得到试验数据如图 5 所示。

$$[(\bar{C}2-\bar{C}1)/]\times100\% \leqslant \pm20\% \qquad (4)$$

式中：$\bar{C}1$ 为基准条件下或试验前的平均值；$\bar{C}2$ 试验后的平均值。

（4） 额定低温

将监测仪置于基准条件下，将探测器放置于铅室内，将探测器放置于铅室内，将初始活度 7.93×10⁴ Bq 的 Cs-137 源放入源托中，开机预热 30 min 后，每隔 10 s 读一次监测仪计数，读取 10 个数，求出平均值 $\bar{C}2$，此数就作为基准条件下的标称读数。

将监测仪置于人工气候室，在探测器附近放置活度为 7.29×10⁴ Bq 的放射源，监测仪在整个试验过程中通电。开始以不超过 1 ℃/min 的速率降温至−20 ℃后，持续 1 h 使监测仪达到温度稳定。然后恒温 24 h。在此试验结束的最后 30 min 内，每隔 10 s 读一次监测仪计数，取 10 个数求平均值 $\bar{C}2$，与 $\bar{C}1$ 比较，按式（4）计算其试验前后温度变化，得到试验数据如图 6 所示。

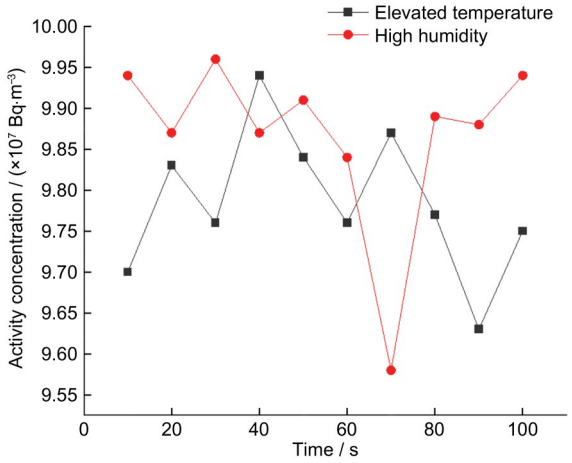


图5 额定高温试验数据图
Fig.5 Experimental Data Plot of Rated High Temperature

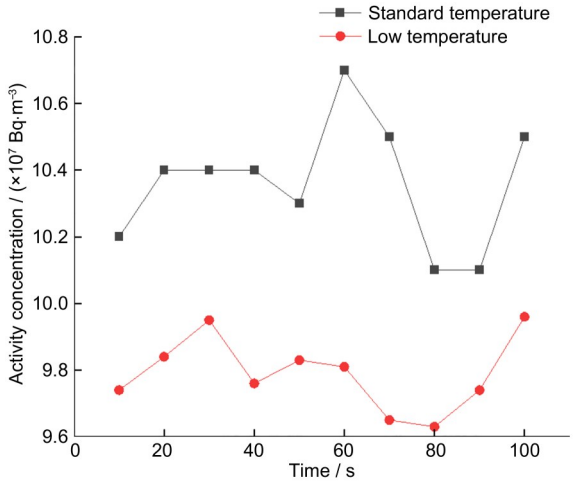


图6 额定低温试验数据图
Fig.6 Experimental Data Plot of Rated Low Temperature

（5） 潮湿试验

将监测仪置于人工气候室，开机 30 min 后，在探测器附近放置活度为 7.29×10⁴ Bq 的放射源。开始以不超过 1 ℃/min 的速率升温至（40±2）℃，监测仪开机预热直至温度平衡 1 h 后，每隔 10 s 读一次监测仪计数，

读取 10 个数求取平均值 $\bar{C}1$。而后关机，开始加湿达到 95^{+2}_{-3}% RH（35±2）℃的条件，保持 48 h，在此试验结束的最后 1 h，接通电源进行预热，最后 30 min，每隔 10 s 读一次监测仪计数，读取 10 个数，求出平均值 $\bar{C}2$。按式（4）计算其试验前后湿度变化对测量结果的影响，得到试验数据如图 7 所示。

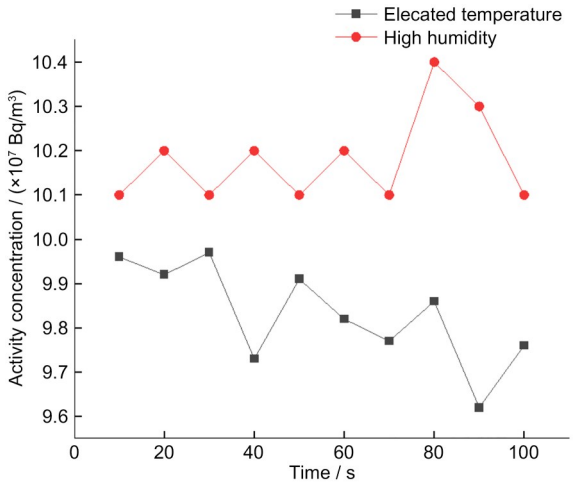


图7 潮湿试验数据图

Fig.7 Experimental data plot of damp heat test

（6） 电磁兼容试验

监测仪依照GB/T 17626[13-17]及GJB 151B[18]电磁兼容系列标准开展了包含静电放电、浪涌、电快速瞬变脉冲、振铃波、射频电磁场辐射骚扰等16项电磁兼容试验，试验结果满足A类要求。

2.2 试验数据分析

通过模拟与试验结果可知，本文研发的国产化惰性气体监测设备具备较高的测量精度与准确性，且在高、低温及高湿环境下性能表现优异。与正常环境（18~22）℃测量结果相比，设备在55 ℃高温下误差为0.8%，在−20℃低温下误差为5.9%，在（40±2）℃，92%~97%湿度下误差仅为3.8%，能有效解决目前高湿环境下惰性气体监测在高温环境下因探测端水蒸气凝结导致数据偏差的现象。与法国MGP同类型设备温度试验（0~55 ℃，误差≤±10%），湿度试验（40 ℃，95% RH误差≤±5%）相比性能优异。

3 结论

本文研发了一套国产化惰性气体监测设备，该设备采用探测器临近管线测量γ活度的测量方法，将测量结果归一到管道内惰性气体放射性比活度，通过蒙卡分析刻度最优测量位并对探测限及铅屏蔽进行计算。试验结果表明，该设备具备较高的测量精度与准确性，在高湿工况下测量值偏差≤4%，能有效测量高湿环境下Kr-85、Xe-133的活度浓度。

本设备解决了取样高湿惰性气体监测的相应劣势，同时可以满足现有标准及设计要求，目前已应用于多个核电现场。未来可根据现场业主使用反馈意见对设备进一步升级，也可增加能谱测量功能，为辐射监测能谱化提供基础。同时，作为辐射监测仪表，本设备在复杂环境中的适应性及拓宽探测量程角度仍有提升空间，为核电厂全生命周期安全管理提供更全面的数据支持。

作者贡献声明 郑皓、袁蔓蕾负责文献调研、资料整理与论文撰写；李鑫负责实验条件保障与数据采集；秦文超负责实验协助与数据整理；陈峰、申忱迪负责论文审校与修改指导；王学诚负责结构数据与材料支持。所有作者均已阅读并同意最终文本。

4 参考文献

1 邹树梁, 刘兵, 陈甲华, 等. 中国核电发展的现状与展望[J]. 南华大学学报(社会科学版), 2004(4): 36-40.
ZOU Shuliang, LIU Bing, CHEN Jiahua, *et al*. Current status and prospects of nuclear power development in China[J]. Journal of University of South China (Social Science Edition), 2004(4): 36-40.

2 刘杰, 孙鸣. 核电厂辐射监测系统技术发展趋势及产品研发思路[J]. 中国核电, 2009, **2**(2): 133-139.
LIU Jie, SUN Ming. Technical development trends and product research ideas for radiation monitoring systems in nuclear power plants[J]. China Nuclear Power, 2009, **2**(2): 133-139.

3 胡澄, 陈超峰, 张启明, 等. 核电厂辐射监测系统特点及发展趋势分析[J]. 中国科技博览, 2015, **43**(1): 323-324.
HU Cheng, CHEN Chaofeng, ZHANG Qiming, *et al*. Analysis of characteristics and development trends of radiation monitoring systems in nuclear power plants[J]. China Science and Technology Review, 2015, **43**(1), 323-324.

4 张振华, 张波, 陈方强, 等. 核电厂辐射监测系统的定期试验浅析[J]. 科技界, 2018(27): 4-6.
ZHANG Zhenhua, ZHANG Bo, CHEN Fangqiang, *et al*. A brief analysis of periodic testing for radiation monitoring systems in nuclear power plants[J]. Science and Technology Circle, 2018(27): 4-6.

5 郭伟, 罗传杰. 核电站辐射监测系统国产化可行性研究[J]. 核电子学与探测技术, 2010, **30**(6): 751-754.
GUO Wei, LUO Chuanjie. Feasibility study on localization of radiation monitoring systems for nuclear power stations[J]. Nuclear Electronics and Detection

Technology, 2010, **30**(6): 751-754.

6 王磊, 孙健, 周明. 管内β测量法在核电惰性气体监测中的局限性分析[J]. 原子能科学技术, 2022, **56**(8): 1567-1573.
WANG Lei, SUN Jian, ZHOU Ming. Analysis of limitations of in-pipe β measurement method in nuclear power inert gas monitoring[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2022, **56**(8): 1567-1573.

7 冯亚洁, 张瑞芹, 牛亚洲, 等. ^{41}Ar β-γ符合探测器的Geant4模拟研究[J]. 核技术, 2025, **48**(2): 020402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.240233.
FENG Yajie, ZHANG Ruiqin, NIU Yazhou, *et al*. Geant4 simulation study of ^{41}Ar β - γ coincidence detector[J]. Nuclear Technology, 2025, **48**(2): 020402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.240233.

8 余少杰, 张静, 郝锐. 核电厂辐射监测系统特点及发展趋势分析[J]. 辐射防护通讯, 2014, **34**(4): 6-9.
YU Shaojie, ZHANG Jing, HAO Rui. Analysis of characteristics and development trends of radiation monitoring systems in nuclear power plants[J]. Radiation Protection Bulletin, 2014, **34**(4): 6-9.

9 孙儒渊, 庞开峰, 王冠, 等. 一种在线测量高放射性液体中γ辐射的管旁监测装置: CN201821217191.7[P]. 2025-07-08.
SUN Ruyuan, PANG Kaifeng, WANG Guan, *et al*. An online pipe-adjacent monitoring device for measuring γ radiation in highly radioactive liquids: CN201821217191.7[P]. 2025-07-08.

10 American Nuclear Society. Specification and performance of on-site instrumentation for continuously monitoring radioactivity in effluents: ANSIN42.18－2004 [S]. New York: American Nuclear Society, 2004.

11 李鑫. 核电厂KRT系统NaI探测器故障辅助诊断装置研制[D]. 衡阳：南华大学, 2020. DOI: 10.27234/d.cnki.gnhuu.2020.000435.
LI Xin. Development of auxiliary diagnostic device for NaI detector faults in KRT system of nuclear power plant [D]. Hengyang: University of South China. DOI: 10.27234/d.cnki.gnhuu.2020.000435.

12 核工业标准化研究所. 气态排出流（放射性）排除效率活度连续监测设备 第1部分：一般要求 GB/T 7165.1－2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
Standardization Administration of China (SAC). Equipment for continuous monitoring of radioactivity in gaseous effluents Part1: General requirements GB/T 7165.1－2005[S]. Beijing: China Standards Press, 2005.

13 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电磁兼容 试验和测量技术 静电放电抗扰度试验: GB/T 17626.2—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Electromagnetic compatibility—Testing and measurement techniques—Electrostatic discharge immunity test: GB/T 17626.2—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.

14 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电磁兼容 试验和测量技术 第3部分：射频电磁场辐射抗扰度试验: GB/T 17626.3—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Electromagnetic compatibility—Testing and measurement techniques: Part 3: Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test: GB/T 17626.3—2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.

15 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电磁兼容 试验和测量技术 浪涌(冲击)抗扰度试验: GB/T 17626.5—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Electromagnetic compatibility - Testing and measurement techniques - Surge immunity test: GB/T 17626.5—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.

16 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电磁兼容 试验和测量技术 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验: GB/T 17626.4—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Electromagnetic compatibility—Testing and measurement techniques—Electrical fast transient/burstimmunity test: GB/T 17626.4—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.

17 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电磁兼容 试验和测量技术 0Hz~150kHz共模传导骚扰抗扰度试验: GB/T 17626.16—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of

China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Electromagnetic compatibility—Testing and measurement techniques—Test for immunity to conducted common mode disturbances in the frequency range 0 Hz to 150 kHz: GB/T 17626.16—2007 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.

18 中央军委装备发展部. 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量: GJB 151B—2013[S]. 北京：总装备部军标出版社, 2013.

Central Military Commission Equipment Development Department. Electromagnetic emission and sensitivity requirements and measurement for military equipment and subsystems: GJB 151B—2013[S]. Beijing: Military Standard Press of General Armaments Department, 2013.