

分布式动态放射性探测成像系统

中国科学院高能物理研究所

仪器研发背景

习近平总书记在2016年第四届核安全峰会中指出，“发展核能是各国自主选择，确保核安全是各国应尽之责。……为防止各国数量庞大的放射源被恐怖分子觊觎，我们将在未来5年内，进一步梳理境内放射源情况，健全安保制度，重点实现对高风险移动放射源的实时监控。”

核科学与核技术的发展为人类社会带来了巨大利益。当今世界无论在军事还是核能工业，甚至在工业和医学中放射性材料的使用也非常广泛，但是放射性同位素的生产、使用等也不可避免地带来了某些直接或潜在的危害。如何有效、全面、高效地监测和追踪生产和使用过程的放射性材料以及各种核废料是我国核安全所面临的一个重要挑战。

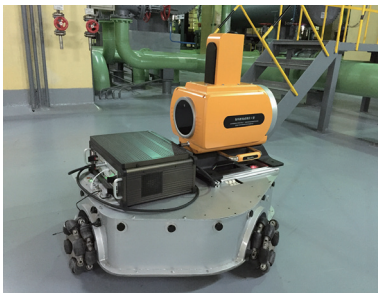
常见的核辐射探测设备只能以计数率的形式测量周围环境剂量，对于辐射源的具体位置及剂量分布大都不能直观显现出来，而且需要将探测设备放置在距离放射源很近的范围之内，探测效率低，且对搜寻人员的安全也存在威胁。

中国科学院高能物理研究所充分利用其在核探测、核电子学等方面的技术优势，对核成像技术进行了深入研究，解决和掌握了核成像领域的共性和核心技术，研发了一系列核成像设备和系统，将看不见的核辐射变为可见的图像，直观准确地展现放射性物质特性以及辐射场空间分布，对推进核能行业的发展和维护社会安定有

至关重要的作用，同时也为人类全面了解放射性物质以及更好地安全利用和安全控制提供了新的方法。

取得的进展

分布式动态放射性探测成像系统是首批立项的国家重大科学仪器设备开发专项。该项目针对国家在放射性材料及各种核废料的实时搜寻监测方面的需求，研发了具有高灵敏度射线成像功能、全方向射线自动定位功能、物理定位功能、数据通信功能、联网功能，可以不同安装方式和多种工作方式工作的射线探测装置；以多台装置组成分布式的射线检测系统，各探测装置将目标区域的放射性强度、种类、方位等数据传输至信息处理中心，经分类处理，得到测量范围内的综合性信息，达到对放射源进行准确、实时、快速和直观地观测及搜寻的目的。该项目实现了辐射成像方法的创新，掌握了核辐射成像探测的核心技术，研制了系列国际先进水平的核辐射成像系统；相关成果已申请国家发明专利19项，授权11项，获北京市科学



移动式探测单元

执笔人：郭静，张玉包，帅磊，章志明

技术奖二等奖1项，获北京市新技术新产品认定1项，获第十七届中国国际高新技术成果交易会优秀产品奖1项。

项目成果已在5家应用开发单位安装应用，实现了秦山核电站辐射场的实时观测和成像，中核兰州铀浓缩有限公司核燃料生产链中供取料厂房的辐射安全监测，浙江省内目标区域放射性环境分布图绘制，以及高能电子加速器、重离子加速器等大科学装置的辐射安全监测等。在此基础上，项目研发并运行的核辐射探测成像平台已经在30多家重要涉核单位及现场开展应用，涉及核工业、环保、安保、医疗、科研、国防等行业，为国家重大安保活动、国防部门、核电站、核燃料工厂、环保应急部门、大科学装置等提供了核辐射场分布成像、辐射热点搜寻与评估、放射源应急搜寻等方面的服务。对我国所有运行核电站的反应堆端面、新燃料装载点、装换料机、慢化剂毒物添加罐区等辐射水平较高的设备或区域辐射场进行了扫描，绘制了详细直观的辐射场分布，帮助核电厂辐射防护人员分析辐射场的分布，并且发现了部分原未发现的辐射热点，使得用户首次图像化地掌握了现场辐射热点分布情况，为核电安全运行及维护提供了新手段；此外，还为核燃料生产单位扫描了退役厂房的辐射分布，发现了未知强辐射热点；所建立的常态化核辐射安全检查和突发核事件应急服务队伍，多次为国家大型社会活动提供核生化安保服务，排除核辐射威胁，为活动的安全、顺利举办提供了保障，并在国际公众面前展现了我国在核辐射探测成像领域的实力，具有重大社会效益。

项目的产业化和推广应用由专门从事民用核技术产品研发推广的北京高能新技术有限公司实施。建立的项目产业化中试基地对仪器研发任务形成的样机进行产品定型、工艺流程确定、小批量生产、市场推广、产品销售、售后服务等，有力地推动了项目成果转移转化及规模化产业化。其中伽马射线成像仪已在核电、核燃料、安保反恐、环境监测、放射物退役等诸多领域打开了市场，为军口、核电、核燃料等领域单位进行了装配。积极组织参加国家重大科学仪器设备开发专项阶段成果展、中国国际工业博



固定式探测单元



RAMO-C 个人辐射报警仪和手持式伽马相机

览会、中国国际高新技术成果交易会等大型展会，很好地宣传了项目成果，扩大了影响力。

在项目研发基础上，北京高能新技术有限公司研发、产品化了3大类10余种系列产品，涵盖了核探测领域的3个应用方向（数值、核素、图像）。如衍生产品手持式辐射测量仪（RAMO）、便携式核素识别仪、壁挂式场所辐射监测仪等。其中以RAMO为例，该仪表采用最新的硅光电倍增管探测器技术，实现了放射性数值的快速实时响应，能实现环境级放射性测量，目前该产品每年销量逾100台套。

核心、共性关键技术

项目组创新性地提出了基于孔径编码精细采样的成像方法，突破了传统成像方法探测效率与分辨率相互制约的技术瓶颈，极大地提高了探测效率和灵敏度，与传统成像方法相比探测效率提高了2个量级以上。为了实现量化成像，该项目利用近场编码投影放大效应，通

通过对编码图样进行精细采样和专门设计的图像迭代对比算法，成功实现了辐射热点三维位置和活度的量化测量，利用单次测量即可获得辐射热点的准确三维位置信息和活度信息。其原理对于光学、红外等其他成像技术也具有良好的参考意义和应用价值。

掌握了基于双层晶体编码阵列的 4π 视野 γ 射线源定向技术。在此基础上，采用多个具有定向功能的 γ 探测器协同工作，实现了区域内放射源精确定位和活度测量的方法（误差小于5%），并可适用于多个不同能量的放射源同时测量。

掌握了脉冲场、低本底环境中子探测关键技术，分析了以正比计数管为核心的中子探测器在脉冲辐射中工作时存在漏计数的原因，通过智能化数据处理系统实现误差补偿。在此基础上，研制了应用于环境监测和场所监测的高灵敏度环境中子探测器和宽能区中子探测器，能量响应范围为0.025 eV—1 GeV，总不确定度小于11%。

在促进经济发展、产业应用中的数据和案例

（1）服务于国家大型重要活动安全检查和核安全监测。2014年8月，项目成果作为南京市公安局指定放射性安检设备服务于南京青奥会，对赛前各个场馆进行放射源筛查，并用于安检口和一些重要场所的放射性监测，排除放射性威胁，为南京青奥会的安全、顺利举办作出贡献。2016年9月，在杭州G20峰会中对80万平方米中的20万平方米核心区域进行了逐区域、逐场所一一排查。高效、准确、专业的核排查工作，为G20峰会的安保工作贡献了一份力量。多次参加了环保部门组织的放射性应急演练，发挥了重要作用，分布式动态放射性探测成像系统在使用过程中性能优异，稳定可靠，代表了国内核探测领域一流水平。

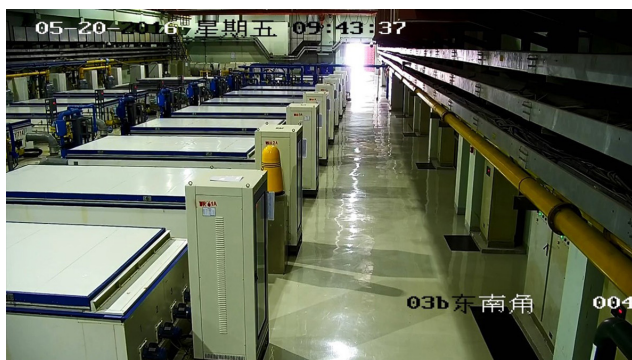
（2）应用于我国铀浓缩、核燃料后处理等重要核基地。进行核辐射分布调查，能够对厂区内辐射情况特别是热点源给出明确位置标示及核素组成。分布式动态放射性探测成像系统响应时间短、定位准确度高，并且能



南京青奥会排查现场及奖牌



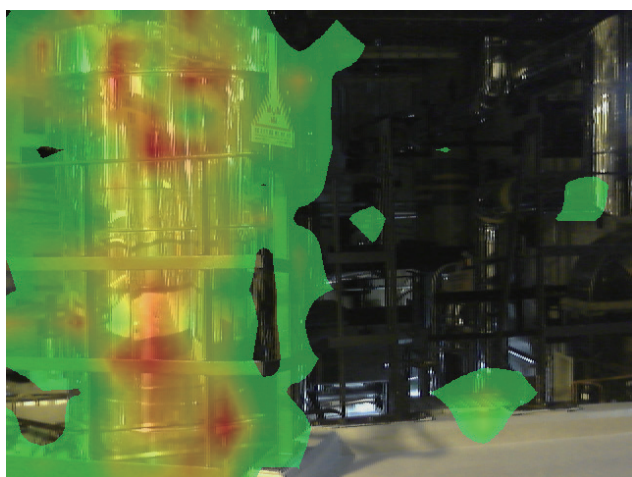
北京怀柔某综合检查站监测现场



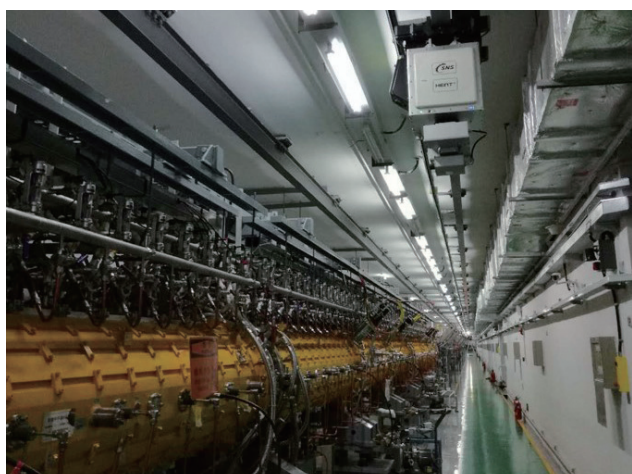
中核兰州铀浓缩有限公司核燃料装料监测现场

够独立供电工作，使用方便，操作简单，对于顺利完成国家重要核设施退役提供了重要技术支持。

（3）在我国所有运行核电现场开展应用。分布式动态放射性探测成像系统多次服务于核电站大修现场，使得用户首次图像化地掌握了现场辐射热点分布情况。在维护核电安全运行、未知热点搜寻、反应堆水池清污、工艺分析、降低核电集体剂量等多个方面均起到了积极作用，为核电运行及维护提供了新的技术手段。



核电站在高本底环境下的低剂量辐射热点成像



中国散裂中子源隧道环境巡检

(4) 服务于国家大科学装置。分布式动态放射性探测成像系统实时、快速地实现了对北京正负电子对撞机、兰州重离子加速器装置及中国散裂中子源内的放射源及加速器活化部件（感生放射性）和工作区域内放射性环境的监测和评估，从而及时发现放射源或活化部件的异常和强度变化，达到及时发现放射性异常等安全隐患，确保了工作区域的人员和环境安全，为放射源及加速器活化部件的实时辐射探测成像提供了一种新的方法和系统解决方案。

结语

项目的实施为我国核安全保障、事故预警及应急处理提供了新的技术手段，项目产业化团队目前已建立常态化的核辐射安全检查和突发核事件应急服务队伍，为国家、地区各类大型社会活动以及行业需求提供核安保服务。核安全是核能与核技术利用事业发展的生命线，随着我国核辐射探测技术水平的提升和高端装备的国产化，国家核安全应急体系的不断完善，核安全文化的培育和持续推进，以及公众意识增强和事故处理能力提升，核能将在弥补我国能源需求缺口，应对气候变化挑战中发挥更大的作用。

专家点评

产品改变了传统的反恐应急的行动模式。

——陈东兵，北京市城市放射性废物管理中心主任，研究员级高工

系统成像速度快，测量结果准确直观，体积小、重量轻，可广泛应用于放射源和放射性材料查找，同时通过辐射热点定位和辐射场分布测绘实现辐射防护最优化管理，具有广泛的应用前景。

——王孔钊，中核核电运行管理有限公司保健物理三处处长，高级工程师