

全球核科学和核技术发展现状及趋势

沈欣媛

(中国国际核聚变能源计划执行中心, 北京, 100038)

摘要: 国际原子能机构 (International Atomic Energy Agency, IAEA) 认为, 2014 年全球核技术发展主要集中在动力应用、原子数据和核数据、加速器和研究堆应用以及非动力应用这四大领域。本文从上述四个方面, 对 2014 年以来全球在核科学与技术方面所取得的主要进展进行概括与阐述。认为全球核能发展暂时仍未能脱离调整阶段, 我国科技界和管理部门可重点关注核技术的非动力应用。

关键词: 核科学; 核技术; 科技发展; 国际原子能机构

中图分类号: G323; TL99 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3772/j.issn.1009-8623.2015.06.011

核技术 (nuclear technology) 是指以核性质、核反应、核效应和核谱学为基础, 以反应堆、加速器、辐射源和核辐射探测器为工具的现代高新技术。具有高度的灵敏度、特异性、选择性、抗干扰性、穿透性等特点, 广泛应用于国民经济的各个领域, 亦为自然科学的深入发展提供了更多工具和可能。除早已投入实用并广为人们所熟知的利用核技术发电及核动力以外, 核技术开拓的重要交叉学科还有核农学、核医学、同位素地质学等, 其应用十分广泛, 从烟雾探测器到核反应堆, 从瞄准具到核武器均可涉及核技术。此外, 它在国家安全中占有特殊而重要的位置。

自 1957 年全球首座核电厂——希平港核电厂, 在美国投入运行以来, 核能发电已经走过了 60 多年的发展历程。其间, 核电经历了建设高潮和低谷的不断切换, 特别是三次重要核事故的发生, 使人们对核能的想法反复改变, 核电也成为了一种备受争议的能源。但核能作为一种清洁能源, 所具有的低排放、燃料能量密度高, 以及燃料成本低等诸多优势还是为人们所识别并认可, 尽管各国做法有所不同, 但是许多国家还是将核电看作满足电力需求增长、保障能源安全, 以及应对气候变化的一种

有效途径。另一方面, 作为核技术的另一大应用领域, 核技术在同位素水文、癌症防治、气候变化、海洋环境等非动力应用领域表现亦十分活跃, 其重要性及地位日益获得关注和认可。

国际原子能机构 (International Atomic Energy Agency, IAEA) 认为, 2014 年全球核技术发展主要集中在动力应用、原子数据和核数据、加速器和研究堆应用, 以及非动力应用这四大领域^[1]。

1 核技术动力应用

1.1 核电

1.1.1 全球核电现状

截至目前, 全球共有 30 个国家的 440 台核电机组正在运行, 总装机容量 378 吉瓦。正在运行的核反应堆中, 压水堆 (PWR) 279 台, 占 63%, 沸水堆 (BWR) 81 台, 占 18.5%, 加压重水堆 (PHWR) 49 台, 占 11.2%, 气冷堆 (GCR) 15 台, 占 3.4%, 轻水冷却石墨慢化堆 (LWGR) 15 台, 占 3.4%, 快中子堆 (FBR) 2 台, 占 0.5% (如图 1 所示)。在建的 68 台机组中, 压水堆 (PWR) 57 台, 沸水堆 (BWR) 4 台, 加压重水堆 (PHWR) 4 台, 高温气冷堆 (HTGR) 1 台, 快中子堆 (FBR)

作者简介: 沈欣媛 (1981—), 女, 管理学硕士, 助理研究员, 主要研究方向为科技战略和科技管理, 核能与核安全技术及管理。

收稿日期: 2015-04-22

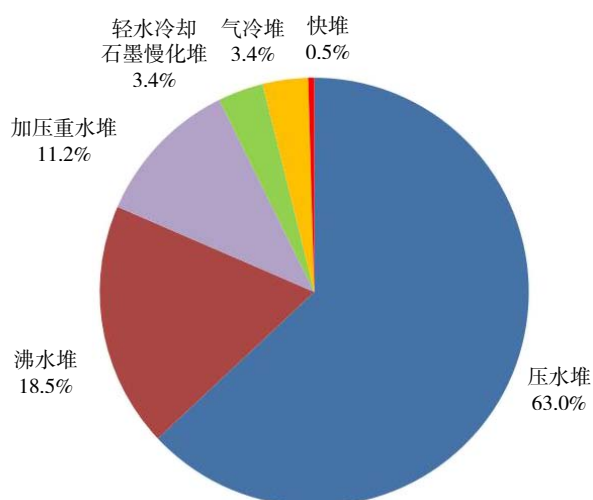


图1 全球在运反应堆类型分布情况

来源：International Atomic Energy Agency. Power Reactor Information System。

2台^[2]。当前在运和在运核电机组中，压水堆均是主力堆型。

目前日本的全部48台核电机组继续停运。2014年11月，日本鹿儿岛县知事批准重启仙台1号和2号核电机组，使这两台机组成为2011年3月福岛核事故后前置实施的新安全标准审核的首批机组。

2014年以来，全球共有六座新反应堆并网，分别是中国宁德2号机组（1018兆瓦）、福清1号机组（1000兆瓦）和方家山1号机组（1000兆瓦）、方家山2号机组（1000兆瓦）、阿根廷阿图查2号机组（692兆瓦），以及韩国新月城2号机组（960兆瓦）。2014年以来，共有三台核电机组开工建设，分别是：白俄罗斯的白俄罗斯2号机组、阿拉伯联合酋长国（阿联酋）的巴拉卡3号机组和阿根廷的一种小型一体化加压轻水堆设计 CAREM-25 反应堆。仅有美国佛蒙特州扬基一座核电站永久关闭。

2013年6月召开的21世纪部长级核电大会认为，尽管发生了福岛核事故，但核电仍然是许多国家加强能源安全、应对和缓解气候变化影响的一项重要选择^[3]。在这种主导思想影响下，新兴核电国家的核能发展计划方兴未艾，全球在建的68座反应堆，有44座集中在以中国为中心的亚洲，其次是中、东欧及拉丁美洲等地区。目前约有30个无核电运行国家正在考虑、规划或积极努力引进核

电。2014年，很多国家在实现首座核电厂目标方面取得重要进展：阿联酋联邦核监管局批准了巴拉卡场址再建两台机组的申请；白俄罗斯1号机组已进入地面以上建造阶段，2号机组已浇筑第一罐混凝土；土耳其继续发展核电计划基础设施；波兰部长理事会确认了在能源结构中增加约6000兆瓦核电容量的决定以及到2024年拥有首个运行机组的计划；越南接待了IAEA“综合核基础结构评审”后续工作组访问。另外一些已决定引进核电的国家正处于基础结构后期准备阶段：继2011年就合作建造两台机组的卢普尔核电厂与俄罗斯签署政府间协定之后，孟加拉国于2013年开始了场址准备工作，预计将于2016年开工建设；2013年10月，约旦选择了俄罗斯原子能建设出口公司作为首选供应商，目前正在对阿姆拉场址进行表征，2014年8月IAEA“综合核基础结构评审”工作组对约旦进行访问并得出了已在发展其核基础结构方面取得进展的结论。

在全球的440座在运核动力堆中，有225座已经服役30年或30年以上，动力堆长期运行问题仍然凸显。目前适用于超出许可证期限的长期运行的核电厂寿期管理模式主要有两种。第一种是美国及其它许多国家所遵循的基于许可证延期申请概念的模式，按照这种模式，监管当局可发放长达40年的运行许可证，每次延期申请可以将许可证期限最多延长20年。截至2014年底，在美国99座在运反应堆中，总共有78座延期20年的运行许可已获批。另一种许可证审批模式以定期安全评审结果为基础，主要用于欧洲的反应堆。在这种模式下，许可证持有者需接受标准化的定期安全评审（通常每10年一次），以确认许可证审批条款和环境状况。长期运行中的一项主要挑战是制订和实施老化管理计划，以正确评定基本结构、系统的完整性以及关键部件的剩余寿期，为此IAEA编写了纲领性导则以及很多关于具体部件的老化管理导则。

1.1.2 增长预测

根据IAEA在2014年发布的预测，至2030年全球核能将持续实现增长^[4]。根据低值预测，2030年全球核电总装机容量将自目前水平增长至401吉瓦，但核电占全球发电量的份额将下降至9%；根据高值预测，2030年全球核电装机总容量将在目

前水平上增长 88%，达到 699 吉瓦，核电占全球发电总量的份额将增加至 13%^[5]。与 2013 年进行的预测相比，高值和低值均有所下调，造成这种下调的原因主要有以下几点：一是反应堆提早退役或新建延迟；二是由于实施安全改进举措而带来的额外成本导致核电经济性下降；三天然气价格持续低迷和享受政府补贴的可再生能源产能不断扩大以及成本降低造成的核电竞争力下降；四是全球经济衰退对核电等资本密集型项目产生的消极影响；最后是发达国家电力需求增长乏力。但考虑到发展中国家人口和电力需求增长的基本面将保持不变、人们对核能在避免二氧化碳排放方面所发挥作用的认识

不断深化，以及能源安全和化石燃料价格变化无常等因素的存在，IAEA 认为核能未来仍将在能源结构中将继续占据重要的一席之地。

经合组织国际能源署（OECD/IEA）于 2014 年 11 月发布了《2014 世界能源展望》报告，根据 IEA 预测，在中间假想方案“新政策情境下”，全球核电装机容量至 2030 年将达到约 543 吉瓦，与上年相比没有太大变化，且相当于 IAEA 预测的平均值。同时与世界核协会 2013 年所做预测相比发现，三个组织 2020 年和 2030 年高值预测均显示了类似的结果，但低值预测呈现出较大差异。三个组织预测结果如下图 2 所示：

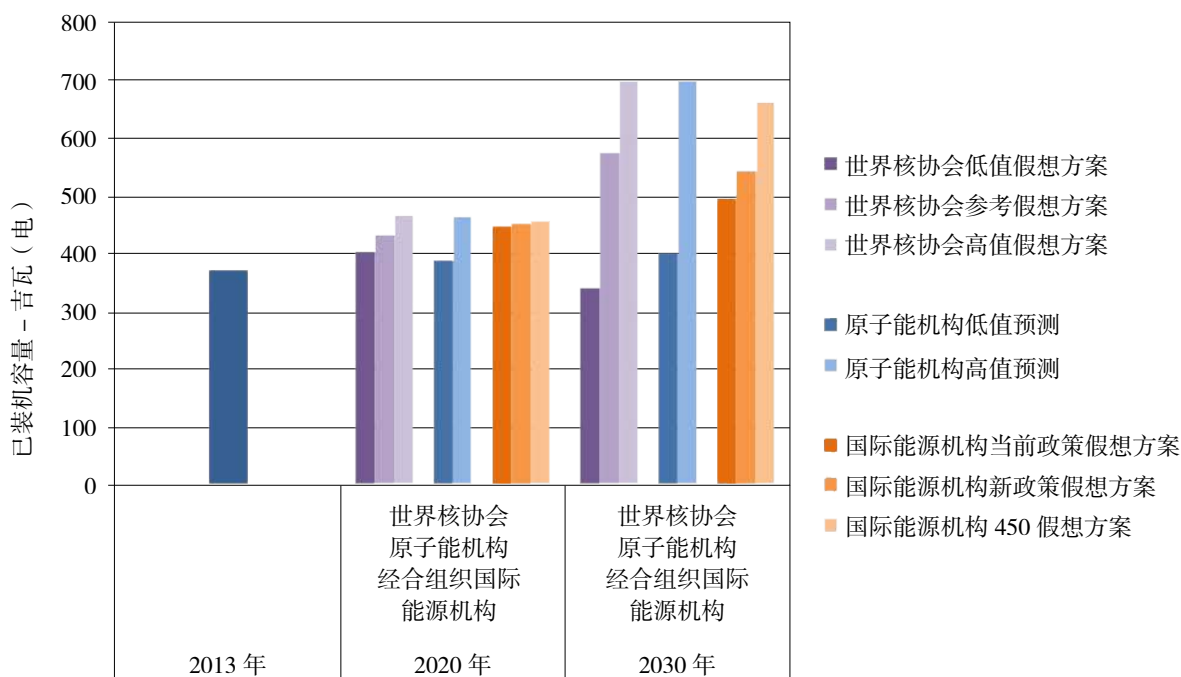


图 2 IAEA、国际能源机构 2014 年和世界核协会 2013 年所作预测比较

来源：IAEA, International Status and Prospects for Nuclear Power (2014)。

1.2 燃料循环

1.2.1 铀资源开采和生产

铀资源价格持续下滑，许多新开采项目已被推迟或预计被推迟。非常规铀资源基础进一步扩大，从海洋中经济地回收铀的研究取得积极成果。尽管钍一直在示范性地作为燃料使用，但在真正实现商用之前仍需开展大量的前期工作。若干可能作为副产品生产钍和含钍残留物的稀土元素项目预计将在近期投产。世界核协会估计，2014 年铀生产提供了月 92% 的预计反应堆铀消耗量，随着来自军

用库存的二次供应源，这一比例较前几年有所提高。按照 2013 年的估计销量率，按当前市场价格在经济上可行预计，目前 590 万吨的资源总量使用期限为 84 年左右。

1.2.2 铀浓缩

全球铀浓缩能力目前约为每年 6 500 万分离功单位，每年总需求接近 4 900 万分离功单位。商业规模的八氧化三铀转化工厂目前仅在加拿大、中国、法国、俄罗斯、英国和美国在内的六个国家运行，阿根廷、巴西、伊朗、日本和巴基斯坦分别有小型

转化设施运行。目前全球共有五家公司可提供商用铀浓缩服务,这五家企业分别是:中核集团公司(中国)、阿海珐集团公司(法国)、国家原子能公司(俄罗斯联邦)、美国能源公司(美国)和铀浓缩公司(欧洲和美国)。阿根廷正在皮尔卡尼耶乌重建气体扩散能力。

2014年铀浓缩领域有若干新技术转化为生产能力或正在开发当中。中国的田湾1号机组经监管部门批准后已经开始使用TVEL燃料公司新型燃料TVS-2M,这种燃料在堆芯使用期限更长;正在建设中的田湾3号和4号机组也将采用TVS-2M燃料,并将由中国宜宾燃料厂制造生产。美国西屋公司正在研制置于燃料棒组件内以监测堆芯功率和温度分布的热声中子传感器,原型将在2015年进行测试,预计在2019年前投入更广泛的商业使用。为发展耐受事故燃料,特别是作为轻水反应堆锆合金包壳的替代物,利用碳化硅制造核燃料部件的新技术正在日本由东芝公司和揖斐电公司开发,目前原型燃料组件套罩已开发成功,将于2016年在研究堆开始测试。

IAEA低浓铀银行项目继续向前推进。2014年,IAEA针对地震安全对项目的影响开展评定,以确定建议场址存在的地质断层是否会对低浓铀银行的安全带来潜在影响。基于评定结果,IAEA和哈萨克斯坦认为,可以在乌尔巴冶金厂场址建立原子能机构低浓铀银行。

1.2.3 燃料循环后端

2014年,从所有核电厂卸出的重金属乏燃料大约为1万吨。全球累计卸出的重金属乏燃料总量约为380500吨,其中约258700吨重金属贮存在堆内或离堆场址设施中。在全球卸出的乏燃料累积量中,有不到1/3已进行了后处理。2014年,分布在五个国家(法国、印度、日本、俄罗斯联邦和英国)的商业后处理设计能力总共约为每年4600吨重金属。

目前核动力堆乏燃料管理采用的战略主要有两种:第一种是将乏燃料贮存起来,随后进行后处理,提取可用材料(铀和钚)用于新燃料制造;第二种是将乏燃料贮存,等待在深地质处置库中处置。中国、法国、印度、俄罗斯和英国等国家采用乏燃料后处理战略,芬兰和瑞典等其他国家选择在自愿的

东道场址进行乏燃料处置。大多数国家均在对乏燃料进行贮存并密切关注与两种战略有关的最新发展情况,但尚未决定采用哪种战略。

欧盟理事会2011/70/Euratom号指令从法律上对欧盟成员国制订和维持乏燃料和放射性废物管理政策进行了约束。2014年,欧洲科学院科学咨询委员会发布了《乏核燃料及其废物的管理》报告,向决策部门通报在制定相关国家计划时需要考虑的重点问题。美国能源部核能办公室2014年发布了有关核燃料循环评价和筛选研究的最终报告,确定了支持核燃料循环研发决策的“框架”(包括配套数据、方法和工具的逻辑结构和过程)。2014年美国批准了一项新法规,即《乏核燃料持续贮存规则》,根据这项法规,乏燃料在超出反应堆的许可寿期后,可以安全地贮存在乏燃料池和干法屏蔽容器中,直到在深地质处置库永久处置。该新规则及其有关的《乏核燃料持续贮存通用环境影响报告》取代2010年《废物置信裁决和临时贮存规则》。

2014年11月5日,贮存在福岛第一核电站4号机组乏燃料池内的所有1331根乏燃料组件被移除。这些乏燃料已被转移到位于反应堆场址内的共用乏燃料池,该反应堆场址较旧的组件被转移到该反应堆场址的金属屏蔽容器中进行干法贮存。

1.2.4 退役、治理和放射性废物管理

将任何形式的核技术用于能源生产、研究活动、医疗和工业应用都伴随着安全管理以及放射性废物管理,并且需要提前规划未来的退役和环境治理活动。放射性废物的安全管理需要对废物流及其处理和整备进行适当的管理,并提供适当的贮存能力、设施间运输和最终处置方案。

截至2014年12月,全世界正在运行、被暂停或被关闭的废物贮存设施和废物处置设施分别为467个和154个。2014年全球放射性废物存量如表1所示。

IAEA大会第五十八届常会期间举办的科学论坛强调,制订全面、综合、“从摇篮到坟墓”的放射性废物管理方案十分必要,且目前已经存在具备可行性的解决方案。

截至2014年10月31日,全球共有149座反应堆被关闭或正在进行退役,其中包括17座已经完全退役;共有约170座燃料循环设施已关闭或正

表 1 全球放射性废物存量估计数

废物分类	贮存 ^[9] [立方米]	累积处置量 [立方米]
极低放废物	173 000	273 000
低放废物	56 703 000	65 192 000
中放废物	8 745 000	10 589 000
高放废物	2 745 000	72 000

资料来源：网基废物物管理数据库（2013 年）、正式国家报告和公开可得数据。

在进行退役，125 个已完全退役；共有超过 180 座研究堆已经关闭或正在进行退役，300 多座研究堆和临界装置已完全退役。由于目前正在运行的许多核设施都在 20 世纪 70 年代和 80 年代期间交付运行，并将在未来的 20 年之内达到其设计寿命终点，因此，预计未来几十年内会有大量退役活动发生。自本世纪以来，全球在反应堆退役方面已取得一定实用经验，如，法国、德国、俄罗斯、西班牙、英国、美国等有长期运行核电计划的国家在这方面进展更为显著。2014 年法国和西班牙分别在拆除第一代核电站和反应堆废物分割和整备等方面继续取得进展。

在处理受以往活动和事故影响的土地治理方面，一些国家建立了技术资源和专门知识，并正在积极推动发展。但许多国家的计划仍然面临着阻碍治理计划实施的巨大挑战。2013 年 IAEA 启动的“实施退役和环境治理的制约因素”项目基准报告已经完成，报告识别出治理面临的四类主要障碍：（1）国家政策、法律和监管框架；（2）财政制约因素，包括物流、资源和可用资金管理；（3）技术和基础设施的障碍；（4）整个退役和环境治理项目规划和实施周期内涉及的利益相关方问题。为了克服其中部分障碍，基准报告建议采取加强计划间协作的战略，但具体解决方案仍需进一步创新。通过与国际社会合作并向 IAEA 国际评审工作组寻求建议，日本在福岛第一核电站场内和场外区域退役、治理和放射性废物管理方面取得良好进展，完成了包括将 4 号机组燃料池中的乏燃料和新鲜燃料移到厂内共用池等重要任务，去除放射性水中的放射性核素污染物、积极分享治理经验等方面亦向前实现推进。

除高放废物和乏燃料之外，在全世界范围内均有其它类型的放射性废物处置设施运行。其中包括：极低放废物的深沟处置（法国、西班牙、瑞典和美国）；干旱地区低放废物的深沟处置（阿根廷、

印度、南非和美国）；处置低放废物的近地表专设设施（中国、捷克共和国、法国、印度、日本、波兰、斯洛伐克、西班牙和英国）；处置中低放废物的地下专设设施（芬兰、瑞典）；在美国开展的低放废物钻孔处置；接收中低放废物的地质设施（匈牙利、美国）等。2014 年以来在放射性废物处置方面，世界各主要国家均取得不同程度的进展。

2 原子数据与核数据

目前，全球共有四大核心核数据中心，分别是：IAEA 核数据科、美国布鲁克海文国家实验室国家核数据中心、经合组织核能机构（OECD/NEA）数据库和俄罗斯奥布宁斯克核数据中心。四大核数据中心不断更新文件和档案，为全球核科学和技术的动力应用及非动力应用提供支持。另外两个核数据网络亦发挥着重要作用，分别是：“实验核反应数据”数据库的“国际核反应数据中心网”，以及负责监督“编评核结构数据文件”的“核结构和核衰变数据评价者国际网”。IAEA 核数据科负责这几大数据中心和数据网之间的协调联络工作。

经合组织核能机构（OECD/NEA）成立了国际核数据评价合作工作组（WPEC），WPEC 下又设立子工作组，在一些项目的框架下解决一些具体问题。WPEC 小组汇集了全球核数据界的专家，识别和记录现有编评数据库、测量数据和模型计算解释之间的差异，调和差异最终做出准确评价。

除裂变反应堆以外，聚变研究、医用同位素生产和剂量测定等同样对核数据具有较大需求，此外核数据国际合作的另一个重点领域是实验设施。欧洲核研究组织（CERN）中子飞行时间设施（nTOF）的脉冲中子源在很宽的能量范围内测量了恒星核合成、复合原子核中对称破缺效应、核液位密度调查以及核废物嬗变、加速器驱动系统和核燃料循环调查等核技术应用数据。欧洲最大的有源

基础设施项目之一欧洲散裂中子源已由若干欧洲国家联合开工建设,奠基仪式于2014年10月在瑞典隆德举行,预计第一批中子将在2019年产生。

放射性束流设施(RIB)使许多在常规设施中无法研究的核素的测量成为可能。法国国家大型重离子加速器研究中心正在建造的“螺旋-2”号(Spiral-2)设施将使众多国际科研工作者有机会获得放射性束流,第一次实验计划于2015年进行。

不确定性量化科学在复杂系统如天气和气候的模拟应用中迅速扩大。在2013年和2014年召开的国际会议上,讨论了不确定性量化在原子数据和分子数据计算的方面的新兴应用,涉及简单物理系统的准确计算等领域,在一定程度上代表着不确定性量化科学的一个新的分支。

3 加速器和研究堆应用

3.1 加速器

目前,据科学界估计,全球范围内有超过1.7万台加速器运行^[6],分布在研究机构、医院和工业生产等不同部门。2014年以来,全球共有两个大型加速器项目开工建设,分别计划于2020年至2022年投入运行。一是位于法国格勒诺布尔的欧洲同步加速器辐射设施,目前已开展基于加速器光子源的升级工作。新的源被认为是同类型设施中的第四代,亮度较现有源将更高,预计性能增强100万倍,同时能耗减少20%。其目的是为物理学、化学、材料科学和生物学等广泛学科的研究人员提供多种能力。二是位于瑞典隆德的欧洲散裂中子源粒子加速器,该项目的原理是以加速器为基础,利用中子散射开展材料科学研究,目前已进入施工阶段,该粒子加速器将为世界科学研究提供最强烈的脉冲中子束,提供比当前中子源亮度高30倍的中子束,该粒子加速器将在材料科学研究方面与欧洲散裂中子源形成重要互补。

同步加速器不仅是相关技术发展的重要研究工具,同时也是重要推动者。然而目前现存的同步加速器往往供不应求,认购束时间通常超过实际供应能力的2~3倍,即所有研究申请中只有1/3到一半最终能够获批并实现。在这种情况下,来自发展中国家的新兴研究团体很难在同步加速器获得束时间。为解决这一难题,IAEA与德国联邦物理学和

技术研究所,以及柏林技术大学合作,在位于意大利里雅斯特的Elettra设施建立了一个多技术实验设施,作为X射线荧光束终端站,以便更好地满足科学研究,特别是发展中国家开展科研的需求,该束源已于2014年10月正式投入运行。

除基础研究和应用研究以外,粒子加速器也是工业应用中非常重要的工具。随着技术的进步,目前加速器已能够提供几微安到100毫安的高度稳定和准直的离子束电流和100电子伏到约10兆电子伏的入射离子能量,为制造用于逻辑、存储和模拟操作的集成电路以及日益多样化的光学传感器和成像器件提供了广泛的能力支撑。以纳米精度注入离子的单离子源近年来逐渐成为若干研究领域和新技术发展的潜在驱动力,离子注入技术目前被广泛用于半导体行业,以制造和修改电子材料和光子材料。IAEA亦设立了有关半导体和绝缘体辐射感生缺陷的协调研究项目,该项目采用单离子照射评价电荷感生缺陷在辐射损伤电子器件中的输运性质的方案,目的是为精确位置控制材料改性等研究提供一定支持。

为整合全球加速器界,并向处理人类问题和科研基础设施的决策者、研究者以及政府部门更好地提供参考,2014年IAEA推出了一个全新的“加速器知识门户”网站。该门户网站包括全球共196个在运中低能量粒子加速器设施数据库,它收集有关软件和数据库、科教文件、基于加速器研究的最新亮点、会议、讲习班和短训班通知的各种链接,并允许注册用户上传自己的文稿。由于加速器设施既是研究对象,同时又是研究工具,具有双重属性,在管理上目前尚存在缺口和盲点,因此为提高全球加速器设施的管理水平,2014年IAEA与SOLEIL同步加速器设施开展合作,共同主办了名为“加速器设施管理战略”的技术会议,共同探讨加速器设施在管理方面存在的特性,以及所面临的独特挑战。

3.2 研究堆

研究堆主要用于各种中子源的研究和应用,其功率范围从0至约200兆瓦(热)不等,与典型的核电厂不同,研究堆的特征之一即为功率规模较小。相比动力堆,研究堆不仅具有更多的设计多样性,还具有不同的运行模式,既可以是稳态模式,也可以是脉冲模式。全球目前最常见的研究堆应用领域

如表 2 所示^[7]。

截至 2014 年 12 月 31 日，全球已建成研究堆共计 747 座，其中 247 座正在运行。俄罗斯拥有的在运研究堆数量最多（包括临界设施），共 49 座，其次是美国（41 座）、中国（15 座）和法国（12 座），

很多发展中国家也有研究堆运行（如，非洲有八座设施正在运行）。在世界范围内，共有 57 座研究堆以超过 5 兆瓦的功率水平运行，为高容量应用提供高中子通量^[8]。

多数在运研究堆利用率严重不足，且平均已运

表 2 世界各地研究堆的常见应用

应用类型 ^a	所涉研究堆数量 ^b	拥有被利用设施的成员国
教学/培训	178	55
中子活化分析	129	53
放射性同位素生产	100	44
材料/燃料辐照	85	30
中子照相	74	41
中子散射	53	35
嬗变（硅掺杂）	31	20
地质年代学	26	22
嬗变（半宝石）	22	13
中子治疗，主要是研发	19	13
其他	141	38

*a 来自所考虑的 284 座研究堆（247 座在运，19 座临时关闭，6 座在建、12 座列入计划；2014 年 12 月 31 日）。

*b 其他应用包括仪器仪表校准和测试及剂量测定、屏蔽实验、反应堆物理学实验、核数据测量以及公众参观和研讨会。

行 45 年以上，因此，老化管理、现代化改造和修整方面面临的形势十分严峻。为了进一步提高设施利用效率、获取额外收益，各国对研究堆战略利用和业务规划的兴趣近年来有持续增加的趋势。在过去两年中，共有 37 座研究堆制定了战略计划并提交 IAEA 审查，为此 IAEA 于 2014 年组织召开专题讲习班，传播各国获得的经验教训，并将审查结果作为良好实践在成员国中进行分享。国际合作在促进和加强研究堆实现教育培训目的方面继续起到积极作用，以拉丁美洲和欧洲互联网反应堆实验室项目为例，其目的是实现各大学与专用于教育和培训目的的在运研究堆的互连互通。

目前，阿根廷、法国、约旦、韩国、俄罗斯和沙特等国家分别由研究堆建设计划，这些国家的研究堆建设多设置在本国发展核科学和技术设施的框架之下；比利时、巴西、印度、荷兰、美国和越南已出台新增研究堆的建设计划；阿塞拜疆、孟加拉国、白俄罗斯等国家正在考虑新建研究堆。

由于老旧研究堆退役和研究堆领域国际合作不断加强等因素，预计未来由国家运行的研究堆数量

将继续减少。加强国际合作有助于提高设施的利用效率和覆盖面，为此 IAEA 发起了研究堆地区网络/联盟，以帮助促进国际合作；2014 年 IAEA 启动了一个新的协作机制，目标是由 IAEA 来构建以研究堆为基础的国际中心。

2014 年并未出现重大的钼 -99 供应短缺，但加工设施和老旧研究堆的运行挑战依然存在。由于需求变化、效率提高以及供应多元化水平提升，尽管仍存在少量短缺，但 2007 年至 2010 年间爆发的大规模危机并未再次出现。医用同位素生产工艺继续从高浓铀向低浓铀转换，非高浓铀钼 -99 的主要供应商仍旧为澳大利亚核科学和技术组织和南非 NTP 放射性同位素公司。

4 核技术的非动力应用

尽管核技术在动力应用中的作用已广为人们所知晓和开发，实际上除提供能量来源以外，核技术的应用十分广泛，在物理化学等基础研究、环境保护、放射医学、检测技术等领域一直具有广阔的应用前景。IAEA 总干事在 2015 年的讲话中高调指

出, 将 IAEA 的宗旨从“原子用于和平”扩展为‘原子用于和平与发展’的时机已经成熟^[9], “原子用于发展”的内涵和范畴中一大部分集中在核技术的非动力应用领域。IAEA 认为, 目前核和核技术的应用正在改善动物健康, 特别是疾病诊断和病原微生物表征; 医用电离辐射利用和辐射治疗; 放射性同位素生产; 同位素用于气候和水文研究; 了解海洋环境等领域发挥重要作用。

4.1 改善动物健康

4.1.1 利用辐照疫苗保护牲畜免于跨境动物疾病

疫苗是保护人类和动物免受致命疾病威胁不可或缺的工具, 大多数疫苗通常采用化学或物理方法, 使病原体衰减或失活同时维持病原体的免疫原性的原理制作, 但现存物理和化学方法在减毒和灭活过程中存在一定缺陷, 导致减少毒性和激发免疫的目标难以同时实现。辐照是替代化学或物理处理实现疫苗开发的重要方法之一, 通过辐照可以逐渐破坏或削弱病原体基因组核酸同时又可以保持其抗原性并从而触发更好的宿主免疫反应。辐照法生产疫苗方面取得的最新进展表明, 获得具有代谢活性而不具有复制性, 并能够引起与暴露于活病原体相同的免疫反应的微生物已存在可能, 国际医疗界在这一方面已取得丰富的成果, 积累了一定的研究数据和处理经验。

4.1.2 核技术用于跨境动物疾病和人畜共患疾病的早期和快速诊断

早期、快速诊断对控制跨境疾病至关重要。放射性标记对改进确定病原体或其抗原或抗体(暴露于病原体抗原引起的蛋白质)的疾病诊断测试非常重要。过去, 为检测样品中的疾病, 免疫分析使用放射性标记脱氧核糖核酸或特定病原体的蛋白质作为引发免疫反应的抗原。随后酶和荧光染料逐步取代同位素标记应用到快速检测现场, 但酶和荧光染料一直未达到使用放射性同位素的高度特异性和灵敏度。在需要高度灵敏度和特异性时(如诊断 H5N1 禽流感等), 同位素标记依然是最可靠的早期和快速诊断技术。

4.1.3 利用核技术跟踪和监测跨境动物疾病和人畜共患疾病

受动物迁徙及动物制品流动、气候变化导致环境变化影响, 传染性疾病的媒介控制迫切需要更

加有效的技术支撑, 以及及时掌握疾病地理来源、动物摄食习惯及其相关疾病媒介迁移情况等信息。稳定同位素分析技术为认识疾病流行病学提供了有力工具。

稳定同位素分析基于环境中某些同位素的水平和动物组织中相同同位素的浓度之间的相关性原理, 动物组织中的氢($\delta 2H$)和氧($\delta 18O$)比率被用于研究动物迁移, 该比率精确地反映了动物在不同摄食生境如湖泊、河流、海洋和地下水之间的迁移。近几年来, 利用稳定同位素使用代谢活性组织(血液和肌肉)中的 $\delta 13C$ 和 $\delta 15N$ 值表征和区分动物种群(特别是鸟类)方面取得的进展最为显著。

4.2 医用辐射剂量学

4.2.1 医学成像

医用电离辐射的利用发展至今已十分成熟。在辐射治疗中, 利用辐射杀死恶性细胞, 使辐射剂量作用于靶体积而成为治疗恶性疾病的重要手段。在医学成像中, 利用辐射产生诊断图像, 但对患者施用的任何剂量均难免有副作用产生。虽然辐射治疗和诊断个例的基本原则和目标具有显著差异, 但在所有病例中, 充分了解辐射剂量情况对核实治疗体系、按处方实施或预估医疗成像过程中患者辐照风险均至关重要。

联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR)强调指出, 医疗照射特别是诊断放射学是迄今最大的人工电离辐射来源, 而且正在继续大幅度增加。因此, 有必要监测和控制患者剂量, 并优化 X 射线成像系统的设计和性能。

患者剂量测定是从事诊断放射学的医用物理学家的主要责任, 并已在许多国家被纳入国家立法和管理条例。IAEA 在这一领域中的工作主要集中在推动医院实施同一的患者标准和进一步实现标准化方面。

4.2.2 辐射治疗

辐射治疗中的一项关键要求就是应当具有同一的参考剂量学标准和程序。最近各种形式的立体定向放射治疗、立体定向全身放射治疗、立体定向放射外科等方面技术的利用方面有所提高。这些发展增加了临床剂量测定的不确定性, 目前小射野剂量测定进行标准化的静态光子小射野剂量测定实施准则正在制定当中。

4.3 放射性药物、同位素用于气候和水文学研究

核医学的进展极大取决于新型放射性核素生产方法的发展。近年来放射性同位素生产技术的发展方面已经取得了显著的进展，最近对高能量和高电流回旋加速器的利用再次证明了这一点。目前工业界已经可以更加广泛地获得包括镓-68、铜-64、锆-89和锌-63在内的若干新放射性核素，并使得在此基础上构建基于加速器的镓-99m大规模生产技术成为可能，镓-99m目前仍是最广泛使用的诊断用放射性核素。供医学应用的新放射性同位素的可获得性可能能够解决尚未预见到的一些临床问题。这些进步正在给核医学领域带来巨大变化。

4.4 同位素用于气候和水文学研究

水是可持续发展所需的一种关键资源，其可获得性影响着社会和经济活动的几乎所有部门。确保获得安全饮用水以及有充足的淡水供应，保障卫生、粮食生产和能源生产是目前很多国家面临的一项挑战，影响着数十亿人的生活。但目前科学界和工业界对淡水可获得性的差异却了解不足，对河流、湖泊和含水层中可用水总量及其贮存和流动情况的估计也不尽相同。另外，人们已经预见到气候变化将对局地 and 地区水循环可能产生影响，为开展有效的水管理，可靠的水文资料、对不同空间可获得资源准确测定更加迫在眉睫。

评定和管理水资源需要采取基于科学的多学科研究方案，并以地表水和地下水产生、分布和流动的科学数据为基础。天然存在的水的稳定同位素和放射性同位素及其溶解组分是跟踪水循环过程、不同水体间的水文学相互作用的有力工具。水的同位素“指纹”有助于以较快的速度和相对低廉的成本评定和管理水资源，以及证明水如何在气候变化中发挥作用和如何受气候变化影响。

4.4.1 水循环和气候变化

降水和地表水中的稳定同位素被用于破解和量化水文过程、研究大气环流、验证气候模型和模拟当前与过去的气候状况等领域已经历数十年发展历程。由IAEA与世界气象组织联合运营的“全球降水同位素网”自1961年推出，一直致力于提供关键同位素数据供大气科学、水文学和其他领域的研究使用。最新分析发展使得获取降水和河水中的稳定同位素数据更加容易，许多新的监测点纷纷设立，

促进更精细时空尺度的同位素监测发展。更加简单、价格低廉且维护率低的基于激光的仪器正在促使基于稳定同位素应用不断扩大。

涉及环境问题的许多科学学科都将稳定同位素列为自然界中的来源、过程和相互作用的示踪剂。为了进一步增强探知和监测气候对水循环的影响的能力，IAEA正在建立监测河水同位素的全球网络，该网络将现代和历史降水的同位素数据集成起来，为进一步改进预测未来气候变化影响所使用的全球气候模型提供更加有效的手段。

4.4.2 水资源的评定和管理

进行水资源综合管理需要对河流和湖泊中的可用水资源及其与流域规模地下水相互作用的程度作出更精确的估计。地下水中的氡多年来一直被用作地下水的主要水文学示踪剂，但这些水在目前的水位往往非常低，难以进行定量测量。将氡测量与其放射性衰变产物即惰性气体氦-3的测量相结合，会有助于量化现代补给。

鉴于干旱和半干旱地区的水短缺问题，必须发掘更大深度含水层的新淡水资源。使用水龄指标，主要为长寿命放射性核素和惰性气体，如同位素如碳-14、氦-4和氩-81进行同位素测龄，是能够准确测定深层原生水、高龄地下水资源的唯一手段。最新分析发展使得精确测定古地下水中稀有同位素原子成为可能，因此可以估计最高达100万年的地下水水龄。

新的同位素工具和使用方案，加上创新性分析的发展，在最近几年中促进了环境同位素在水文学、大气科学、生态学，以及古气候学等许多自然科学中的利用。这些最新发展对了解、监测和测定气候变化对水资源及其他自然资源的影响十分重要。此外，需要更先进分析方法来测量惰性气体和长寿命放射性核素的地下水测龄所需的更新型同位素工具的需求预计未来还将持续存在。

4.5 利用核技术了解海洋环境变化

4.5.1 核技术用于研究全球性变化

核技术还可以被用于海洋环境中的二氧化碳研究。大气二氧化碳的增加正在越来越大地影响着海洋环境，特别是海水的酸度。放射性核素为了解不断变化的碳循环以及碳循环如何影响生物提供了强有力的工具。放射性核素还可用于重建海水化学的

古变化,以了解当前变化和这些变化将来可能如何影响海洋。地球上的海洋约可吸收人为二氧化碳排放总量 25%,并因此在抑制不断增加的大气二氧化碳浓度方面发挥着重要作用。海洋生物活性将这部分二氧化碳中的一小部分吸收到有机碳和碳酸钙粒子中,最终发生沉降,此过程被称为“生物碳泵”。天然存在的放射性核素钍-234 可用于量化二氧化碳从海洋上层发生生物学移动的速率,了解这一过程的规模和速率对完整了解碳循环至关重要,有助于科学家最终寻求降低海洋酸度的办法。

二氧化碳在被海洋吸收后会使海水酸化,这反过来又影响到海洋生物。放射性同位素被用于调查海洋生物的变化,如响应这种越来越高的酸度而出现的钙化(钙-45)、生物矿化(锶-85)、新陈代谢(锌-65)或痕量元素(如钴-57、钴-60、锰-54 或硒-75)的生物累积。还可以利用长寿命块状珊瑚的硼-10 和硼-11 同位素组分研究古海水 pH 值的重建,反过来可在前瞻性气候模型中用于估计对珊瑚的未来影响。利用放射性示踪剂(钙-45)了解海洋酸化对海洋生物影响的实验。二氧化碳和甲烷都是作用力很强的温室气体,它们通过各种来源和沉降物在大气中循环。这些来源和沉降物可利用二氧化碳和甲烷分子的碳($\delta^{13}C$)和氧($\delta^{18}O$)稳定同位素特征中所含的稳定同位素标记物或“指纹”来跟踪。

最近几年开发的光学同位素分析仪,能够进行研究二氧化碳和甲烷中微小但动态的大气变化所需的高度精确准确测量。IAEA 供的国际稳定同位素参考材料是校准空气中符合用途的二氧化碳和甲烷参考气体混合物的唯一工具。

4.5.2 核技术用于研究局地环境变化

多种核和稳定同位素技术可用于研究环境变化和污染过程,是重建过去发生污染事件、跟踪污染趋势,以及评估污染控制措施有效性的重要工具。这些技术还可被用于研究引起沿海富营养化的营养物陆基污染源、区分人为污染物浓度和天然污染物浓度、确定污染源以进行法证学污染研究以及为了保护人类确定海产品中与有害藻华有关的生物毒素等。

5 结语

尽管距发生福岛核事故已过去四年,人们普遍

认为核能正在逐步复苏,面对电力需求增长、保障能源安全和应对气候变化等战略需要,核能仍被广泛认为是能源结构中的一个重要选项,全球许多国家,特别是发展中国家对核电建设项目的兴趣依然浓厚,但当前判断全球核能界已走出福岛核事故阴霾仍为时尚早。尽管已开启重启程序,但日本的 48 座反应堆无一座恢复运行;IAEA 福岛核事故报告迟迟未能发布;IAEA 等国际组织对核能的增长预期连续三年下调;德国、瑞士等国仍坚持退核立场,由此可见全球对核能的态度总体上仍然谨慎,核能发展暂时仍未能脱离调整阶段。

与核能动力应用陷入调整状态形成鲜明对比的是核技术非动力应用的蓬勃发展。IAEA 亦调整工作战略,连续几年将核技术非动力应用方面工作列为优先事项,这说明核科学和技术在放射医疗、粮食安全、基础研究、创新支撑、工业应用以及应对紧急突发问题中的地位与作用进一步获得外界认可。核与同位素技术为相关领域的研究提供了新的思路、工具、方法,以及解决方案,并在降低设施和设备使用成本、提高检测和反应速度等方面贡献卓著,成为工业与科研创新领域一支不可或缺的支撑力量。尽管核技术的非动力应用实际上具有广阔的应用和市场前景,近年来作用和显示度也有所凸显,然而总体上看仍然处于相对被低估与被埋没的状态,我国在核技术非动力应用方面的统筹考虑及总体设计还有待加强,一定程度上制约了核技术非动力应用的效果及发展前景,是未来科技界和相关领域可重点关注的领域之一。■

参考文献

- [1] International Atomic Energy Agency. Nuclear Technology Review 2014. Vienna: IAEA, 2014.
- [2] International Atomic Energy Agency. Power Reactor Information System. (2015-3-10)[2015-3-10]. <http://www.iaea.org/pris..>
- [3] International Ministerial Conference on Nuclear Power in the 21st Century. “Nuclear Power in the 21st Century”- Concluding Statement by the President of the Conference. St. Petersburg: Sergey Kiriyenko, 2013.
- [4] International Atomic Energy Agency. International Status and Prospects for Nuclear Power (2014). Vienna: IAEA, 2014.

- [5] International Atomic Energy Agency. Introductory Statement to the Board of Governors at the Board Meeting. Vienna: Director General Yukiya Amano, 2014.
- [6] Robert W Hamm, Marianne E. Hamm. Industrial Accelerators and Their Applications. Paris: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2012.
- [7] International Atomic Energy Agency. Applications of Research Reactors (IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-5.3, 2014). Vienna: IAEA, 2014.
- [8] International Atomic Energy Agency. Research Reactor Database. (2014-11-1)[2015-3-10]. <http://nucleus.iaea.org/RRDB/>.
- [9] International Atomic Energy Agency. Introductory Statement to the Board of Governors at the Board Meeting. Vienna: Director General Yukiya Amano, 2015.

Progress and Developing Trend of Global Nuclear Science and Technology

SHEN Xin-yuan

(China International Nuclear Fusion Energy Program Execution Center, Ministry of Science and Technology,
Beijing 100038)

Abstract: Nuclear technology refers to a modern high technology, based on nuclear properties, nuclear reactions, nuclear effects and nuclear spectroscopy, using reactors, accelerators, radiation and nuclear radiation detectors as tools. As a clean energy source, nuclear energy has many advantages such as low-emission, high fuel energy density, and low cost etc. Many countries regarded nuclear power as an effective way to meet electricity demand growth, energy security, as well as to deal with climate change. On the other hand, as another major application field of nuclear technology, non-power applications of nuclear technology is also very active in the fields of isotope hydrology, cancer prevention and control, climate change, and marine environment. International Atomic Energy Agency(IAEA) indicates that since 2014, the major developments of the world's nuclear technology focused on the areas of power applications, atomic and nuclear data, accelerator and research reactor, and non-power applications. This paper elaborates the world's major progress in nuclear science and technology from the four aspects mentioned above.

Key words: nuclear science; nuclear technology; science and technology progress; International Atomic Energy Agency (IAEA)