DOI 10.15302/J-SSCAE-2025.07.037

我国内陆核电发展问题的再研究

王莹杰[1]，彭现科[1]，赵万广[2]，周觅[3]，苏罡[4]，罗琦[3]，叶奇蓁[3]，赵宪庚[5*]

（1. 中国工程科技创新战略研究院，北京 100088；2. 中国工程物理研究院，四川绵阳 621000；3. 中国核工业集团有限公司，北京 100822；4. 中国核电工程有限公司，北京 100840；5. 中国工程院，北京 100038）

摘要：核能作为一种清洁低碳、稳定高效的高能量密度基荷能源，已成为多国能源战略的重要组成部分，发展核电对我国能源结构转型具有重要意义。然而，与全球发展趋势及我国领先的核电装机规模相比，内陆核电可行路径与发展方案亟待明确，我国内陆地区尚未部署建设核电站。本文从战略必要性与技术可行性两个维度，结合最新发布的《核动力厂环境辐射防护规定》（GB 6249—2025），系统分析和论证重启内陆核电建设的现实条件。研究认为，发展内陆核电对于保障国家能源安全、构建新型电力系统及推动区域战略实施具有重要且迫切的必要性；同时，我国成熟的第三代压水堆核电技术为内陆厂址的环境安全提供了可靠保障，具备内陆部署的技术可行性。研究建议，将内陆核电纳入“十五五”发展规划，设立针对氚和碳-14 核素的处理与排放技术攻关专项，适时启动内陆示范工程建设，持续完善配套法律法规与公众沟通机制，推动内陆核电科学有序发展，为我国能源绿色转型与高质量发展注入强劲动力。

关键词：内陆核电；排放标准；纵深防御；氚；碳-14；极端事故

中图分类号：TL　　**文献标识码：**A

Re-examination of the Development Issues of Inland Nuclear Power in China

Wang Yingjie[1], Peng Xianke[1], Zhao Wanguang[2], Zhou Mi[3], Su Gang[4], Luo Qi[3], Ye Qizhen[3], Zhao Xiangeng[5*]

(1. Chinese Academy of Engineering Innovation Strategy, Beijing 100088, China; 2. China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621000, Sichuan, China; 3. China National Nuclear Corporation, Beijing 100822, China; 4. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China; 5. Chinese Academy of Engineering, Beijing 100038, China)

Abstract: Nuclear energy, characterized by cleanliness, low carbon emissions, stability, high efficiency, high energy density, and suitability as a baseload power source, has become an essential element of the energy strategies in many countries. The development of nuclear power is of crucial importance for China’s transition in energy structure. Despite global trends and China’s leading position in installed nuclear capacity, the country has not yet commenced the construction of nuclear power plants in inland regions. There is an urgent need to clarify the feasible pathway and development plans for inland nuclear power. This study systematically analyzes and makes the case for resuming the construction of inland nuclear power plants, focusing on two key dimensions—strategic necessity and technical feasibility—in conjunction with the newly released “Regulations for environmental radiation protection of nuclear power plant” (GB 6249—2025). The study concludes that developing inland nuclear power is both highly necessary and urgent in terms of safeguarding national energy security, constructing a new power system, and advancing regional strategic implementation.

收稿日期：2025-07-31；**修回日期：**2025-09-19

通讯作者：*赵宪庚，中国工程院院士，研究方向为核能及核技术应用发展战略；E-mail: zhaowanguang430@126.com

资助项目：中国工程院咨询项目“我国能源安全战略研究”(2022-JB-05)，“内陆核电及核技术应用创新发展战略研究”(2023-HYZD-03)

本刊网址：sscae.engineering.org.cn

Concurrently, China's mature third-generation pressurized water reactor technology provides reliable assurance of environmental safety for inland sites, demonstrating technical feasibility for inland deployment. It is recommended that inland nuclear power be included in the 15th Five-Year Plan, with the establishment of a dedicated research program focused on the treatment and discharge technologies for tritium and carbon-14 nuclides, and that demonstration projects for inland nuclear power be initiated in a timely manner. Meanwhile, supporting laws, regulations, and public communication mechanisms should be continuously improved. Promoting the scientific and orderly development of inland nuclear power will inject strong momentum into China's transition toward green and high-quality energy development.

Keywords: inland nuclear power; emission standards; defense in depth; tritium; carbon-14; extreme accident

一、前言

近年来，地缘政治冲突和大国博弈紧张局势加剧了能源供应的不稳定性与能源市场的波动性，致使油气供应链安全面临严峻挑战[1]；同时，风光等可再生能源的间歇性、波动性和季节性与稳定供电需求之间的矛盾，随着其在能源结构中占比的持续提高而日益凸显。核能作为稳定可靠的高能量密度基荷能源，被视为填补能源缺口的重要手段。温室气体的持续积累加剧了全球气候变暖的趋势，生态系统的脆弱性愈加显现[2]。为应对气候变化的全球性挑战，世界各国逐渐形成了加快推动非化石能源发展的共识，并在2015年的第21届联合国气候变化大会上签署《巴黎协定》，明确了在21世纪下半叶实现温室气体净零排放的目标[3]。在这一过程中，核能的清洁低碳、安全高效属性，使其成为多个主要经济体碳中和战略的重要组成部分。2023年，第28届联合国气候变化大会（COP28）召开[4]，会议强调了核能在实现全球温室气体净零排放和将升温限制在1.5 ℃目标方面发挥的关键作用[5]。目前，全球多个国家已将核能视为国家能源安全战略及实现碳中和目标的重要依托[6]，如美国联合其他21个国家在COP28上发起的《三倍核能宣言》[7]、国际原子能机构（IAEA）联合40多个成员国发表的“净零排放需要核电”声明[8]。美国、欧盟、日本等已相继上调核能规划发展目标[9~11]，发布了一系列核能发展政策，如美国2025年发布了4项核能相关行政令[12]、世界银行解除核电融资禁令[13]等。整体来看，“核能复兴”信号频发，核能发展迎来新的历史机遇。

我国高度重视核电事业的发展。党的二十大报告明确提出，积极安全有序发展核电。《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议》明确提出，坚持风光水核等多能并举，统筹就地消纳和外送，促进清洁能源高质量发展。当前，我国已成为在运、在建和核准建设的核电装机规模最大的国家[14]，步入“核电大国”向“核电强国”转型的重要阶段。然而，我国核电发展在空间布局方面仍存在认识不统一的问题，目前在运核电机组全部位于沿海地区，内陆地区尚未建设核电机组。实际上，我国内陆核电项目早在21世纪初期就已启动部署，2007年，国务院发布《核电中长期发展规划（2005—2020年）》，正式提出在内陆省份陆续开展核电发展工作。2008年，国家发展和改革委员会下发了同意湖南桃花江、湖北咸宁大畈和江西彭泽（“两湖一江”）3个内陆核电项目开展前期准备工作的文件。然而，2011年日本福岛核事故发生后，我国上述3个核电项目被紧急叫停，后续的恢复建设也仍未启动。近3年来，我国沿海核电机组审批建设速度达每年10台左右，但内陆核电机组建设一直处于停滞状态，甚至面临永久搁置的风险。上述三大内陆核电项目前期已完成大部分项目审批、环境评价和主要设备采购等相关工作，但目前仍处于开发性保护状态。

多年来，中国工程院、中国核能行业协会等针对内陆核电是否重启问题开展过多轮研究。长期来看，内陆核电发展问题仍面临“推进”与“审慎”两种观点博弈，再加上技术论证不足、社会认知局限等共同导致了决策困境。然而，近年来能源市场的不确定性、“核能复兴”的兴起、我国区域协调发展的迫切需求、沿海核电厂址的有限性、核电技术取得的进步以及内陆地区已开展的核能系统运行实践都表明，我国内陆核电发展问题亟需进行再研究。2011年，我国发布的《核动力厂环境辐射防护规定》一贯将内陆核电厂（即受纳水体为河流或湖库的核电厂）纳入规范范围，从制度层面为内陆核电发展奠定了基础；2025年，生态环境部发布了修订后的《核动力厂环境辐射防护规定》（GB 6249—2025），对内陆核电厂流出物排放提出了更严格的管控要求，这为当下重新审视和探讨内陆核电建设

提供了指引。

为推动我国核电事业的高质量发展，本文针对新形势、新变化、新要求下我国内陆核电发展的必要性和可行性进行综合研究，通过总结全球内陆核电发展的现状与趋势，并结合我国自身发展需要与最新的法规标准要求，旨在回答“是否发展”与“能否发展”的问题，为内陆核电的科学决策与路径规划提出针对性建议。

二、全球内陆核电的发展现状与趋势

（一）全球核电发展现状与趋势

截至2024年[15]，全球实际在运核电机组共计417台，总净装机容量为3.991 8×10^9 kW，分布在31个国家和地区，其中美国、法国、中国的装机容量位列前三；全球在建核电机组有65台、装机容量达7.26×10^8 kW，分布在全球15个国家和地区，其中我国在建核电机组有27台，排名世界第一。我国在运、在建和核准待建核电机组数量达102台，总装机容量约为1.13×10^8 kW，从装机规模和装机技术水平上看已进入世界第一方阵。

IAEA连续5年上调了核电发展的预期，表1展示了IAEA、国际能源署（IEA）及世界核协会（WNA）在2024年对全球核电装机规模的预测情况[16~18]。由表1可知，到2050年，全球核电装机容量的最低预测值范围为5.61×10^8~6.47×10^8 kW，最高预测值范围为9.92×10^8~1.017×10^9 kW。表2展示了国内外机构对我国核电装机规模的预测情况[19~22]，预计2060年，我国核电装机容量最高约为4×10^8 kW。

（二）全球内陆核电发展现状与趋势

从全球核电发展经验看，核电建设并无滨海和内陆之分，核电站选址不局限于滨海，同样可适应河流、湖泊、水库甚至荒漠等环境。核电机组的建设在充分考虑周边冷却条件、提出针对性技术解决方案、符合相关环境法规和标准规定的基础上，可因地制宜建设。截至2024年12月，全球58.03%的核电机组部署在内陆地区，内陆地区核电装机容量约占核电总装机容量的55.58%。根据IAEA发布的核电站信息系统统计发现，美国、法国、俄罗斯、印度等国家的内陆核电机组数量占比分别为88%、67%、83%、75%。内陆核电技术路线涵盖多种商用堆型，其中压水堆占主导地位。整体来看，全球在运的内陆核电机组平均运行年限已超过30年，保持了良好的安全运行记录状态。日本福岛核事故发生后，全球内陆核电建设仍在稳步推进。全球已有多台内陆核电机组在事故后新增并网，并有13台内陆核电机组相继开工。当前，我国尚未重启内陆地区的核电建设工作。

表1 国际核电装机容量预测

预测机构	预测年份/年	2040年装机容量/×10^8 kW		2050年装机容量/×10^8 kW	
		低值	高值	低值	高值
IAEA	2025	5.19	7.10	5.61	9.92
IEA	2024	—	—	6.47	10.17
WNA	2024	4.86	9.31	—	—

三、我国内陆核电发展的必要性分析

（一）内陆核电是我国能源安全的有力保障

随着生成式人工智能、区块链、大数据等新兴技术和新兴产业的高速发展与规模扩张，经济社会发展对能源的需求持续增长。目前，我国油气资源的对外依存度偏高，加上复杂多变的国际形势、干旱等极端天气的不确定性和多发性，使我国的能源安全、稳定、可靠供应面临一定风险。内陆核电作为一种清洁低碳、稳定可靠的高能量密度基荷能源，对保障能源电力的稳定供应具有重要意义。虽然我国铀资源的对外依存度也较高，但由于铀的高能量密度属性，铀资源储备具有与油气资源储备截然不同的概念，两者不可相提并论。目前，我国的铀资源储备量可满足近中期核能发展需要。凭借燃

表2 我国核电装机容量预测

机构	预测年份/年	预测值/×10^8 kW
WNA	2040	低值：1.54
		中值：2.06
		高值：3.00
中国工程院	2060	4.00
中核战略规划研究总院有限公司	2030	低值：1.05
		高值：1.17
中国核电发展中心与国网能源研究院有限公司	2030	1.3
	2040	1.7
	2050	3.4

料需求的极低边际增长、不受气候条件制约的稳定出力特性以及为电网提供暂态频率与电压的应急支撑，核电可成为强化能源系统韧性、实现多元化能源保障的战略性基础。

（二）内陆核电是构建新型电力系统的重要支撑

核电机组可以实现24 h持续稳定运行，年发电利用小时数常年保持在7000 h以上，居所有电源之首，这对保持电力系统的稳定性和可靠性具有重要作用。近年来，风电、光伏等可再生能源凭借清洁低碳、灵活布置以及可再生优势迅速崛起，并随着技术迭代在发电效率和经济性方面迅速提升。但是随着可再生能源发电在电网中的占比逐渐提升以及分布式系统的扩大部署，其间歇性和波动性对电力系统平衡带来的威胁不容忽视。此外，夏冬季节性“双高峰”电力紧缺现象的频繁出现及极端天气对电力供应安全性和稳定性的影响日益加剧。内陆核电可以成为解决电力供应在时间和空间上失衡的重要手段，有效弥补可再生能源、水电资源因气候敏感性导致的电力波动。此外，核能的有效负荷承载能力（ELCC）高于海陆风电、光伏资源，有利于提升电网的稳定性与安全性[23]。因此，在我国构建新型电力系统时，需重视内陆核电的重要作用。

（三）内陆核电是实施中部崛起战略的重要依托

我国中部地区，尤其是湖南、湖北、江西三省在承接国家赋予的“经济新增长极”“国内大循环的连接轴”战略定位的同时，其用能需求必将持续增长，这对能源安全、绿色转型与可调度功能提出了更高要求[24]。然而，我国中部地区面临一次能源禀赋不足、新能源资源条件相对一般、二氧化碳封存地质潜力较差、土地开发约束加剧、水电潜力趋近开发极限、碳减排与环境保护压力持续加大等多重结构性限制，以及用能高度依赖外部输入使输电电网的系统安全性面临巨大挑战。相关研究指出，如果不发展内陆核电，则需要部署2~3倍规模的脱碳煤电才能达到相同的减排效果，这将显著增加减排成本[25]。虽然华中地区的部分电力供应可依赖西部地区的电力外送，但“西电东送”也面临送端意愿下降、输电通道规划困难和受端电源支撑不足等多方面的挑战[26]。核电的高能量密度、安全稳定运行、清洁低碳、经济高效等属性，为驱动中部地区能源结构优化和高质量发展提供了现实路径。综上所述，内陆核电是我国能源体系中必不可少的一部分，可为能源安全保供、结构优化和低碳转型做出重要贡献，也是实施中部崛起战略的必然选择。

四、我国发展内陆核电的技术可行性分析

（一）我国第三代压水堆核电技术的安全性

我国第三代大型先进压水堆作为目前最成熟的核电技术，其安全性相比二代堆技术大幅提升。以“华龙一号”“国和一号”为代表的中国自主第三代压水堆核电技术，在设计上充分汲取了全球核电运营经验与重大安全事故（如福岛核事故）的深刻教训，全面贯彻落实了“纵深防御”的安全理念（见图1），即通过4道实体屏障和5道连续防线，有效预防和应对潜在事故，确保将放射性物质限制在厂区甚至安全壳以内，不会对公众和环境造成影响。从堆型、自然灾害防御以及安全保障方面分析后发现，“华龙一号”“国和一号”均不会发生像切尔诺贝利核电站和福岛核电站那样的事故后果。

第三代压水堆核电技术首先在设计上遵循多重性、多样性、独立性等设计原则，确保关键系统和设备在出现单一故障时仍能保持功能，以维持核电站的安全稳定运行。同时，第三代机组将设计扩展工况（DEC）纳入设计范围，对潜在的超设计基准事故和严重事故情景进行系统分析，并配置相应的防护与缓解措施，包括能动与非能动安全系统、双层钢筋混凝土安全壳、堆芯熔融物滞留（IVR）或堆芯捕集器等严重事故缓解技术。这些措施能够在严重事故发生时保持反应堆和安全壳的完整性，将放射性物质的释放控制在可接受范围内。此外，通过设置专设安全设施，进一步增强机组在极端外部事件及严重事故工况下的应对能力，提高整体安全裕度。

为确保核电厂在紧急情况下用电设备与系统的可靠供电，核电厂设有厂外、厂内两套独立电源系统。厂外电源由主电源和辅助电源组成；厂内电源包括应急柴油发电机组、不间断电源（UPS）系统、蓄电池组和其他辅助电源系统。这套电源保障体系可确保核电厂即使遭遇极端的全厂断电事故，也能迅速启用备用电源，维持关键设备运转，降低事故风险，确保机组处于受控状态。

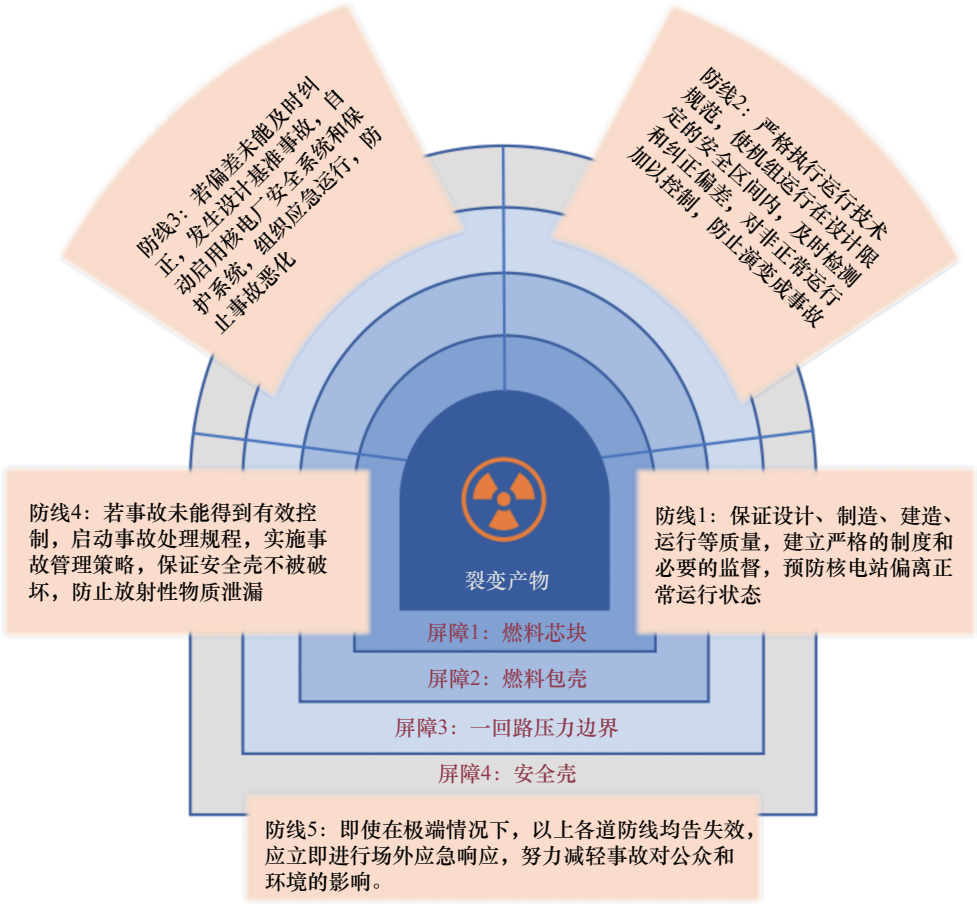

图1　我国第三代压水堆核电厂“纵深防御”体系

为抵御核电厂可能遭受的内外部事件，核电厂设置了多项防护措施。在内部事件方面，对于飞射物、管道破裂、爆炸、火灾等，采用厚混凝土墙隔离、安装防甩击装置等严密防护手段；在外部自然灾害方面，以极限安全地震动标准、考虑台风浪作用的基准洪水位进行设计建造，确保地震、洪水影响在安全裕度范围内。我国第三代压水堆核电机组的抗震设防设计标准达到0.3 g，反应堆置于基岩，地震安全有保障；“两湖一江”单个内陆核电厂址的厂坪设计标高比设计基准洪水位高出7~22 m，防洪安全裕度充足。在外部人为灾害方面，核电厂设计了应对飞机撞击、爆炸、外部火灾等防护措施，以保障重要设施安全。

综上，我国以“华龙一号”“国和一号”为代表的大型先进压水堆技术能够保证核电站安全，从设计上实质消除大量放射性物质释放影响。未来，该技术可根据内陆环境条件进行适应性修改后，直接应用于内陆核电建设。同时，我国也在推进四代堆和小堆的技术研究与开发，可以考虑因地因需部署。

（二）内陆核电厂水资源需求与温排水的环境影响

内陆核电厂的汽轮机乏汽余热依靠循环水系统排出，循环水通常取自河流和湖库。核电厂运行过程中产生的温排水，可能会对这些受纳水体的生态环境造成影响。因此，要实现内陆核电厂的可持续发展，水资源的合理利用与热排放的有效管控是无法回避的重要议题。

在水资源利用方面，我国计划选择的30个内陆核电厂址中，有26个为滨河厂址、4个为滨水库厂址，主要分布在长江、珠江、松花江流域等水资源较为丰富的地区。这些厂址的水源条件普遍较好，水体流量和水库容积可以满足核电厂的用水需求。例如，在26个滨河厂址中，有5个厂址的年平均流量为150~500 m^3/s、11个厂址的年平均流量为500~5000 m^3/s、10个厂址的年平均流量大于5000 m^3/s，

且大多数厂址所在河流97%的枯水流量在100 m^3/s以上，仅个别厂址97%的枯水流量小于20 m^3/s。此外，4个滨水库厂址的库容均大于1×10^9 m^3，入库径流量也较大。相对于内陆核电厂运行所需的取水量4~6 m^3/s而言，所占河流或水库水量比例很小。

内陆核电厂一般选择湿冷塔或间接空冷塔作为冷却方案。若采用湿冷塔，需配置补水系统和循环水预处理系统来弥补蒸发、风吹和排污导致的水量减少；若采用间接空冷塔，所需补水量较少。正在建设中的广东廉江核电项目，其逆流式自然通风高位集水海水冷却塔是我国核电厂湿冷塔技术的良好实践，可为内陆核电建设积累经验。

在温排水影响方面，内陆核电厂可以采取水底淹没式排放或水体中下层排放的方式，消除近水表排放时，温排水温升作用对流出物近区稀释扩散能力的消极影响。这样可以加速核电厂液态流出物的初始稀释能力，减小放射性物质的影响范围[27]。从生态角度看，温排水对受纳水体生物，如浮游动植物、底栖生物、鱼类等的影响十分有限，基本可忽略不计。实际上，在内陆核电项目的前期阶段，会对受纳水体的水质和水生物状况进行详细调查，明确生物种类及其潜在影响，优先避开生态敏感水域。同时，通过编制生态系统影响评估报告并接受监管部门的严格审核，确保工程建设对环境的影响降至最低。

综上分析，内陆核电厂的用水需求以及温排水对当地水资源和生态环境的影响能够确保处于可控范围内。

（三）流出物排放管理措施的可行性

内陆核电站在正常运行期间会产生放射性废物，其处理与排放方式直接影响公众辐射剂量，因此，核电站运行期间的流出物排放管理问题是内陆核电建设的核心议题，也是当前制约内陆核电推进的“卡脖子”问题。核电厂流出物排放管理的要求总体上按照剂量限值、剂量约束、排放总量和排放浓度控制、剂量管理目标值4个方面提出。我国对核电厂液态流出物的排放控制标准总体严于美国、日本、韩国等国家。根据我国运行核电厂的实践经验，GB 6249—2025进一步降低了单堆流出物的年排放总量控制值、加严了流出物的排放浓度控制，对内陆核电厂流出物排放提出了更严格的管控要求。为保证内陆核电厂的流出物可以达标排放，需要先处理放射性废物中的放射性核素及常规污染物。

1. 氚和碳-14的排放管理方式

氚和碳-14在环境中具有高迁移性且难以去除，导致其易被生物体吸收并在体内集聚，产生内照射风险，因此被列为核电厂流出物管理中的重点控制核素。GB 6249—2025中保留了“十分之一”的规定，即对于受纳水体为河流或湖库的核动力厂厂址，其槽式排放口处的液态流出物中放射性核素活度浓度不应超过受纳水体为海洋的液态流出物中的放射性核素活度浓度的1/10。因此，对于内陆核电站，槽式排放口处的液态流出物中氚、碳-14的活度浓度不应超过3×10^6 Bq/L、300 Bq/L，其他放射性核素的总活度浓度不应超过100 Bq/L；此外，新版修订还保留了“排放口下游1 km处受纳水体中总β放射性不超过1 Bq/L，氚浓度不超过100 Bq/L”的要求。

核电厂中的氚主要来源于核燃料三元裂变、可燃毒物和冷却剂中的硼与中子反应、冷却剂中的锂反应和氘反应，以氚化水的形式存在于放射性废液中。现阶段可用于含氚废水处理的技术主要包括水精馏技术（WD)、低温精馏技术（CD)、气相催化交换技术（VPCE）液相催化交换技术（LPCE）和联合电解催化交换技术（CECE）等[28~31]。目前，重水堆氚处理设施已在实际核电站中投入应用，有效管理了含氚废液的排放和回收[32]。由于压水堆的含氚废液浓度相对较低，处理难度更大，目前国内外商用压水堆尚无大规模应用的含氚水处理设备。国内外对于压水堆含氚废水处理的研究大多处于试验或工程验证阶段，中国工程物理研究院、秦山核电有限公司、中国原子能科学研究院等已开展较深入的研究，为内陆核电含氚废水处理奠定了良好基础。中国工程物理研究院自主设计并搭建了“WD+VPCE/LPCE/CECE+GC+CD”级联含氚废水处理工程示范台架，年处理能力可达300 t，目前正在推进600 t/a处理能力的核电站近堆含氚废水处理示范工程。秦山核电有限公司正在建设秦山三期重水精馏设施，为重水精馏除氚技术提供了有力保障。中国原子能科学研究院在“CECE+CD”含氚废水处理方面也有相关技术储备且正在研制。

为了使液态流出物中的氚达标排放，本研究从

“源头–路径–处理–复用”的角度提出了核电厂含氚废水应对措施。一是源头减氚。研究表明[33]，取消核反应堆次级中子源约可以降低20%的因氚排放造成的公众剂量，还可以降低氚源项对厂址规划机组数量的制约。二是高氚废水分类收集。通过对高氚废水开展分类收集和处理，有望将单机组高氚废水（浓度约为10^7 Bq/L）产生量从约3000 m^3/a降低到1000 m^3/a，进一步提高氚处理效能。三是先进氚处理技术应用。基于当前含氚废水处理工艺，进一步优化工艺流程、提高处理规模、降低处理成本，可实现含氚废水处理设施建造费用低于整个机组总投资的5%，设施运行费低于机组年收益的1%。四是氚处理衍生产品的资源化利用。对于体积较小的浓氚水，可以探讨输送至氚浓缩提纯地点，生产用于国防工业或民用市场的氚产品。通过这一系列措施，核电厂液态流出物中的氚可实现达标排放，但需要付出相应的经济代价，也需要在工程实践中进一步验证和落地。

然而，现实条件下内陆核电的重启阻力，可能不仅限于含氚水达标排放，而是确保含氚水不进入水体资源的“零”排放。为此，本研究针对空气载带排放、空冷塔、烟囱、天然蒸发池4种“液转气”主流技术方案展开调研，结果表明，“蒸发池+烟囱”的排放方式更具经济性，且国内外已有相关工程实践。因此，可作为液态流出物“零”排放的备选方案，但需要关注含氚蒸气的有效扩散及遇冷凝结问题，其中总量控制和扩散评估是前提条件。此外，放射性固体废物增多、放射性废液渗漏等潜在风险也不可忽视。

核电厂中的碳-14主要由一回路冷却剂中的氮-14和氧-17等元素受中子照射后形成。大量检测情况表明，压水堆核电厂的碳-14主要通过核电厂“三废”系统向环境排放，其中气态和固态排放为主要途径。固态碳-14一般经过处置、封存处理后不进入环境。气载碳-14主要以烷烃的形式存在[34,35]，化学性质稳定，传统“过滤吸附+延迟衰变”的放射性废气处理方式无法处理，一般需要通过催化氧化技术将其转化为化学性质较为活泼的CO_2，再进行吸收处理[36]。但由于核电厂废气中的气载碳-14处于痕量级浓度[37]，目前现有工业中的催化氧化技术需要在催化剂性能上进一步优化。对于痕量$^{14}CO_2$的吸收技术，国外已开展大量研究，其中碱性床吸收法和两步化学法具备较大的工程应用前景[38,39]，但存在技术难度大、工艺流程复杂、经济性差和放射性废物产量大等问题；国内在该领域的研究相对不足。液态碳-14主要以碳酸根的形式溶解在放射性废液中，传统去污方法如沉淀、蒸发、离子交换难以有效去除，可通过“液转气”方法将其转化为气态，再经过吸收和捕集方法进行处理，但目前尚缺乏成熟落地的工程实践。

2. 除氚和碳-14外放射性核素的排放处理

除了“十分之一”的限制，GB 6249—2025还新增了液态流出物中除氚、碳-14之外放射性核素的放射性活度浓度推荐值。根据目前滨海核电厂的设计及运行经验，在正常运行期间，核电厂运行产生的放射性废液经废液处理系统处理后，在槽式排放口处的流出物中除氚和碳-14之外的放射性核素浓度一般不超过250 Bq/L。这一浓度满足GB 6249—2025中滨海核电厂的排放标准，但超过了内陆核电厂放射性核素浓度排放控制值（100 Bq/L）的要求。因此，内陆核电厂的废液处理系统需要重新配置，以提高对除氚和碳-14外其他放射性核素的去除效果。通过提高去污因子1~2个量级，可满足内陆核电厂址的排放要求。

传统滨海核电厂废液处理系统大多采用蒸发浓缩、离子交换、化学沉淀和膜分离等多项技术手段；此外，可行的深度处理技术还包括反渗透膜、连续电除盐和无机吸附材料技术等。通过多种技术的组合应用，可以有效提高去污因子1~2个数量级，以满足内陆核电厂址的排放需求。本研究针对“华龙一号”机组，提出了“过滤+蒸发+离子交换”的放射性废液处理改进组合工艺，实现了槽式排放口处流出物中除氚和碳-14外的放射性核素浓度降低至50 Bq/L以下、符合GB 6249—2025规定的内陆核电厂放射性核素浓度排放控制值要求。同时，该改进方案可以显著降低除氚和碳-14外其他放射性核素的年排放总量。

整体来看，氚的活度浓度总体上具备实现达标排放的技术条件；碳-14也能通过“液转气”处理、气态转化和吸收等技术手段，原则上可以实现达标排放。现有处理技术能够保证内陆核电厂流出物中除氚和碳-14之外的核素满足GB 6249—2025的排放标准；但氚、碳-14的处理与排放技术在工程实际中的稳定性和可靠性，仍需开展示范工程与技术

落地工作，才能确保内陆核电能够满足GB 6249—2025中对流出物的排放要求，为推动内陆核电高质量发展提供有力保障。

（四）极端事故下“四能”措施的有效性

内陆环境由于缺乏沿海核电站的排海条件，确保极端事故工况下放射性废液的有效控制，以保障内陆厂址所在区域的水资源安全，是公众最为关心的核心问题。经估算，在核电厂极端事故工况下，各功能系统产生的最大废液量约为9755 m^3。实施“能贮存、能封堵、能处理、能隔离”（“四能”）措施，可以有效控制放射性废液不进入自然水体，保障核电厂周围环境安全。“四能”措施是内陆核电极端事故工况下的兜底保障。

1. 贮存措施有效性

与日本福岛核事故中的Mark I型、Mark II型抑压式安全壳（自由体积分别为4280 m^3、4420 m^3）不同，我国第三代核电采用大型干式安全壳，其自由体积约为58 000~89 000 m^3，具有很好的放射性废液滞留能力。以“华龙一号”为例，反应堆厂房0 m以下空间为9000~11 400 m^3，仅0 m以下空间就能有效包容安全壳内产生的废液。“华龙一号”核岛部分的反应堆厂房及其周边的安全厂房、电气厂房等也具有一定的事故废液贮存能力。基于一体化的设计理念，除了较高的平面部分外，反应堆厂房还被电气厂房、安全厂房、燃料厂房等其他厂房全方位环绕。周围厂房的底层标高为−12.5 m，均低于反应堆厂房的底层标高（−5.4 m）。这种布局设计在极端事故条件下，能有效保证从反应堆厂房泄漏出来的废液，顺利流入相邻厂房并被成功封堵，避免直接排入环境。经测算，安全壳外厂房的自由容积总计约为59 755 m^3，在紧急情况下，可为废液的存贮和滞留提供充足保障。

由于事故废液放射性水平高，贮存废液后的厂房将被严重污染，去污清洁难度较高，对人员辐照影响也较大。因此，在实际工程建设时，为防止事故后废液严重沾污厂房，会优先利用各厂房底层的备用房间及非安全相关系统房间贮存废液，或在备用房间内设置备用储槽。内陆核电厂还可对底层厂房布局进行调整优化，进一步保证事故条件下放射性物质与水体的隔离。在内陆核电厂建设过程中，会将极端事故条件下废液贮存相关预案纳入核电厂应急计划中，并对方案进行预备布置或安排。

2. 封堵措施有效性

封堵的主要目的是将放射性废液控制在安全壳和反应堆厂房内，防止废液通过安全壳的裂缝外泄至其他厂房。日本福岛核事故的经验表明，水玻璃是一种有效的封堵阻水剂。内陆核电厂在投入运行前，可以根据厂址条件预备一定数量的阻水剂，以应对废液封堵需求。此外，国内外已有多项先进技术可供选择，在出现极端事故的情况下，可根据具体情况及时修复核电厂混凝土结构的裂缝和渗漏。

目前，我国第三代压水堆采用预应力钢筋混凝土安全壳，其泄漏率在设计压力范围内经过实测，可确保24 h内气体泄漏量符合法规要求。在设计压力范围内，对于可能出现的极少量裂缝，可通过水泥–水玻璃复合材料进行初步修复，防止裂缝进一步拓展；也可借鉴建筑领域通用的一些方法，如将聚氨酯灌浆液高压注入混凝土内部完成裂缝修补。当壳内压力略超出设计压力，可以通过降温、降压等措施，及时防止壳内压力进一步上升。在壳内压力超过极限承载能力（通常为设计压力的1.5~2倍）的极端情况下（尽管极为罕见），放射性废液可能通过设备闸门大洞口通向周围厂房，这些厂房虽然未采取气密性设计，但也具备一定封闭能力。此外，为防止大规模放射性物质释放，可考虑增加外部第二道实体屏障以增强防护能力。

3. 处理措施有效性

为了处理核电厂事故状态时产生的废液，内陆核电厂拟建设废液应急处理设备。一是在划定区域内预留移动式废液应急处理装置的场地。在发生严重事故时，适时将废液应急处理装置运至现场，进行事故废液处理。二是建设废液应急处理设备，建立闭式处理循环，并辅以临时废水处理设施；同时，在保证事故缓解功能的前提下，用处理后的水置换安全壳内放射性废液，以降低剂量水平。

废液应急处理设备主要包括四级废液处理工艺。一级处理为预处理系统，通常采用除油、絮凝沉淀和陶瓷超滤，去除废液中的油类、悬浮物及胶体物质。二级处理采用核素吸附装置，针对性地去除铯、锶、碘等核素。三级处理为除盐系统，采用反渗透膜和蒸发器，去除废液中的大部分核素、硼和其他盐类。四级处理系统为水精馏等深度净化装置，处理后水的放射性活度浓度小于100 Bq/L，可

有序达标排放或根据需求复用于注水池。此外，现场还配置污泥 / 浓缩液存放槽和固体废物储存容器，确保处理过程中产生的污泥、浓缩液和固体废物安全存储，为后续的最终安全处置做好准备。

4. 隔离措施有效性

核电厂一般通过取水口、排水口与自然水体建立连接。为有效防范潜在风险，可在取水口、排水口处分别设置取水阀门、排水阀门，作为关键隔离设施。在必要情况下，通过及时关闭取水阀门、排水阀门，能够迅速且有效切断核电厂与地表水之间的水体联系，实现二者的可靠隔离。液压止水钢闸门具有结构合理、耐磨耐蚀、坚固耐用、维修方便、质量较小等优点，在水利工程实践中已被广泛应用，可适用于内陆核电厂建设需要。另外，可以在核电厂中储备一定数量的放射性物质抑制剂，并在电厂取水口、排水口处设置过渡段，在紧急情况下利用排污栅、挡板或沸石沙袋与地表水体进行应急隔离。

内陆核电厂在选址时，一般优先考虑地震活动弱、地质条件优且地下水欠发育的区域。通常核岛和废水贮存水池会布置于中等至微风化基岩之上，这类基岩透水性差，岩体内地下水多为局部裂隙水，且各水系统间联系微弱。在核电厂建设中，含水量较高的地层会被移除，切断与地下水的补给通道，使得核岛及废水水池区域的地下水富水性差、渗水量小。从已建核电厂的数据来看，基坑开挖后，中等至微风化岩体区域无大量地下水涌出，仅局部有少量渗水现象。由此可见，核岛和废水贮存水池区域的地下水与周围水体关联微弱，岩体本身就具备良好的隔水屏障功能。此外，在建造过程中，可采用天然黏土或改性黏土等柔性隔水材料进行回填，其渗透系数可达 10^{-7} cm/s，进一步增强地下水隔离效果。

综上所述，通过“四能”措施，内陆核电厂可确保极端事故工况下放射性废液的有效控制，使水资源安全和公众健康得到有效保障。

（五）其他先进堆型技术可行性初探

目前我国在高温气冷堆、钍基熔盐堆及钠冷快堆等先进核能技术领域取得了显著进步，部分技术已达到国际领先或先进水平，未来有望为内陆核电发展提供重要的战略支撑。

在技术安全性方面，高温气冷堆具有优异的固有安全特性，其全陶瓷包覆燃料元件的正常运行最高温度可达 1620 ℃且能够更好地约束燃料和裂变产物，加之负温度系数大，从根本上杜绝了堆芯熔化和大规模放射性物质释放的风险。钍基熔盐堆以液态熔盐作为冷却剂，其自动排盐、在线加料、常压运行和温度负反馈特性极大降低了大规模放射性物质释放的可能性。钠冷快堆利用液态金属钠的高热导性和大热容，具备强大的非能动余热排出能力，可在全厂断电等极端工况下，依靠自然循环实现堆芯冷却。在水资源需求与温排水影响方面，高温气冷堆采用氦气作为一回路冷却剂，无需依赖安全级设备冷却水系统和安全级厂用水等，机组冷却对水资源的需求量小。同样，钍基熔盐堆和钠冷快堆的冷却剂导热效率优异，单位能量产出的水耗和温排水量也较低。总体来看，高温气冷堆、钍基熔盐堆和钠冷快堆等先进核能技术在安全性、水资源兼容性和新型应用场景等方面展现出在内陆部署的理论潜力，但由于这些技术仍处于发展初期，其技术成熟度、经济性和对环境的影响需待时间检验。

五、结论与建议

内陆核电是全球核电发展的重要组成部分。在我国能源转型的进程中，内陆核电是保障能源安全、维持电网平衡、实施中部崛起战略的重要支撑和必然选择。我国自主第三代大型先进压水堆核电技术处于全球最高安全梯队，可大幅提升核反应堆的本质安全水平和事故预防能力，在设计上实质消除了大量放射性物质释放影响，能够保证社会公众与环境安全。当第三代压水堆核电技术应用于内陆核电建设时，在水资源需求、温排水影响、流出物排放及极端事故工况下的放射性废液应对方面均有相关技术与管理措施，若落实到位，将能够为内陆核电建设提供坚实支撑。需要指出的是，我国内陆核电厂的流出物排放标准总体较为严格，虽然当前针对氚和碳-14 的处理与排放技术在理论和工艺上具备达标能力，但仍需在工程实践中不断优化和验证，确保技术方案在实际运行中稳定可靠。此外，我国高温气冷堆、钍基熔盐堆、钠冷快堆等先进堆型技术稳步发展，为内陆核电部署提供了重要战略支撑。总体而言，随着技术进步和工程经验的积

累，内陆核电建设具备良好的可行性和发展前景。为稳妥推进内陆核电建设，提出如下建议。

一是建议国家将内陆核电纳入“十五五”规划和能源中长期发展纲要。希望国家有关部门统筹考虑国家能源安全保障、“双碳”目标实现、区域协调发展战略、国土空间规划及生态环境分区管控要求等，制定新一轮核电中长期发展规划，系统考虑内陆核电的发展目标、发展规模和发展路线图，统筹考虑地域适应性与安全保障问题，明确技术路线、项目选址与监管要求。

二是建议国家相关部门在“十五五”时期，围绕已经开始实施的GB 6249—2025排放控制标准，设立专项科技研发和工程示范支持计划，重点支持氚、碳-14等难处理放射性核素的处理与排放技术攻关。组织核电企业、高校、科研院所、核技术单位等联合攻关，推动“液转气”、水精馏、催化交换、气态吸收等关键技术装备的研发突破，形成技术示范和工程化验证以及可复制、可推广的解决方案，确保内陆核电厂能够全面达标排放，为后续规模化发展奠定坚实基础。

三是在确保内陆核电机组能够全面满足GB 6249—2025排放标准、生态环境底线不突破的前提下，建议根据区域协调发展用能需要、能源结构升级以及落实“双碳”目标的战略需求，统筹推进内陆核电项目建设。可结合已有厂址或另择新址，有序启动内陆核电项目建设，助力区域绿色转型与高质量发展，为构建新型能源体系和提升我国能源自主保障能力提供坚实支撑。

四是持续完善核电领域法律法规体系建设并深化公众参与机制。随着《中华人民共和国原子能法》的颁布实施，下一步应着力推进配套法规细则的制定与完善，加快构建全面系统、衔接有序的核能法律体系；同时，进一步优化核电厂信息公开发布与公众沟通平台建设，强化信息披露的及时性、规范性和透明度，切实保障公众知情权、参与权和监督权。在此基础上，继续通过多样化科普宣传和多渠道信息传播等方式，增强社会公众对内陆核电的理性认知，深化对核安全文化的认同感，全面提升公众参与核电事务的广度与深度。

利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: July 31, 2025; **Revised date:** September 19, 2025

Corresponding author: Zhao Xiangeng is a member of Chinese Academy of Engineering. His major research fields include development strategy for nuclear energy and nuclear technology applications. E-mail: zhaowanguang430@126.com

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on China’s Energy Security Strategy” (2022-JB-05), “Research on Innovative Development Strategy of Inland Nuclear Power and Nuclear Technology Application” (2023-HYZD-03)

参考文献

[1] 段阳伟, 王凯. 俄乌冲突下的能源安全及我国的应对 [J]. 中外能源, 2024, 29(6): 8–14.
Duan Y W, Wang K. Energy security in the context of Russia-Ukraine conflict and China’s response [J]. Sino-Global Energy, 2024, 29(6): 8–14.

[2] 谢昭. 2024年成为史上最热一年 [N]. 环球时报, 2025-01-02(08).
Xie Z. 2024 becomes hottest year on record [N]. Global Times, 2025-01-02(08).

[3] 巴黎协定 [EB/OL]. (2015-12-12)[2025-05-23]. https://unfccc.int/sites/default/files/chinese_paris_agreement.pdf.
Paris agreement [EB/OL]. (2015-12-12)[2025-05-23]. https://unfccc.int/sites/default/files/chinese_paris_agreement.pdf.

[4] UNFCCC Secretariat. Technical dialogue of the first global stocktake. Synthesis report by the co-facilitators on the technical dialogue [EB/OL]. (2023-09-08)[2025-05-23]. https://unfccc. int/sites/default/files/resource/sb2023_09E.pdf.

[5] Donovan J. Nuclear energy makes history as final COP28 agreement calls for faster deployment [EB/OL]. (2023-12-13)[2025-05-23]. https://www.iaea.org/newscenter/news/nuclear-energy-makes-history-as-final-cop28-agreement-calls-for-faster-deployment.

[6] 邓琨. 俄乌冲突对全球核电市场的影响分析 [J]. 产业与科技论坛, 2023, 22(11): 15–17.
Deng K. Analysis of the impact of Russia–Ukraine conflict on the global nuclear power market [J]. Industrial & Science Tribune, 2023, 22(11): 15–17.

[7] 王墨, 杨鹏, 赵宏. 从COP28到COP29: 美主导的《三倍核能宣言》进展及其影响 [J]. 国外核新闻, 2025 (1): 3–5.
Wang M, Yang P, Zhao H. From COP28 to COP29: Progress and influence of *the declaration of triple nuclear energy* led by the United States [J]. Foreign Nuclear News, 2025 (1): 3–5.

[8] IAEA statement on nuclear power at COP28 [EB/OL]. (2023-12-01)[2025-05-23]. https://www. iaea. org/newscenter/statements/iaea-statement-on-nuclear-power-at-cop28.

[9] U.S. Department of Energy. Pathways to commercial liftoff: advanced nuclear [R]. Washington DC: U.S. Department of Energy, 2023.

[10] Nuclear included in NZIA by European Council [EB/OL]. (2023-12-11)[2025-05-23]. https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Nuclear-included-in-NZIA-by-European-Council.

[11] European Parliament. Framework of measures for strengthening Europe’s net-zero technology products manufacturing ecosystem (*Net zero industry act*) [R]. Strasbourg: European ParliamenT, 2023.

[12] 杨舒宇, 陈欣. 美签行政令, 欲推动“核能复兴” [N]. 环球时报, 2025-05-26(06).

Yang S Y, Chen X. U.S. signs executive order aiming to promote “nuclear energy renaissance” [N]. Global Times, 2025-05-26(06).

[13] 王宝锟. 全球核电市场迎来新机遇 [N]. 经济日报, 2025-06-27(04).
Wang B K. Global nuclear power market facing new opportunities [N]. Economic Daily, 2025-06-27(04).

[14] 丁怡婷. 我国核电在运在建规模升至世界第一 [N]. 人民日报, 2024-12-18(04).
Ding Y T. China’s nuclear power in operation and under construction scale rises to world’s first [N]. People’s Daily, 2024-12-18(04).

[15] 中国核能行业协会. 中国核能发展报告2025 [R]. 北京: 中国核能行业协会, 2025.
China Nuclear Energy Association. China nuclear energy development report 2025 [R]. Beijing: China Nuclear Energy Association, 2025.

[16] International Atomic Energy Agency. Energy, electricity and nuclear power estimates for the period up to 2050 [R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2025.

[17] International Energy Agency. World energy outlook 2024 [R]. Paris: International Energy Agency, 2024.

[18] 世界核协会发布《核燃料报告: 2023—2040年全球需求和供应情景》[J]. 辐射防护, 2023, 43(6): 619.
The World Nuclear Association released *the nuclear fuel report: Global demand and supply scenarios from 2023 to 2040* [J]. Radiation Protection, 2023, 43(6): 619.

[19] 李晨曦, 伍浩松. 世界核协会发布新版核燃料报告 [J]. 国外核新闻, 2021 (10): 13–14.
Li C X, Wu H S. World Nuclear Association releases new nuclear fuel report [J]. Foreign Nuclear News, 2021 (10): 13–14.

[20] 中国能源中长期发展战略研究项目组. 中国能源中长期(2030、2050)发展战略研究: 电力·油气·核能·环境卷 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
China Energy Medium- and Long-Term Development Strategy Research Project Team. Study on China’s medium- and long-term energy development strategy (2030 and 2050): electricity, oil and gas, nuclear energy and environment [M]. Beijing: Science Press, 2011.

[21] 张廷克, 李闽榕, 尹卫平. 中国核能发展报告—2022 [M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2022.
Zhang T K, Li M R, Yin W P, et al. Blue book of nuclear energy development: report on China’s nuclear energy development (2022) [M]. Beijing: Social Science Literature Press, 2022.

[22] 中国核电发展中心, 国网能源研究院有限公司. 我国核电发展规划研究 [M]. 北京: 中国原子能出版社, 2019.
China Nuclear Power Development Center, State Grid Energy Research Institute. Study on China’s nuclear power development planning [M]. Beijing: China Atomic Energy Press, 2019.

[23] Carden K, Dombrowsky A, Nathan A. Effective load carrying capability study: Final report [EB/OL]. (2025-02-11)[2024-05-23]. https://www.ercot.com/files/docs/2025/02/12/2024ERCOT_ELCC_Study_Final_Report02112025.pdf.

[24] 冯君淑, 伍声宇, 吕梦璇. 区域电力“双碳”目标推进侧重点分析 [N]. 中国电力报, 2024-10-10(04).
Feng J S, Wu S Y, Lyu M X. Analysis on the focus of regional electric power “double carbon” target [N]. China Electric Power News, 2024-10-10(04).

[25] 国网能源研究院有限公司. 中国能源电力发展展望2023 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2024.
State Grid Energy Research Institute Co., Ltd. China energy and power development outlook 2023 [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2024.

[26] 梁双, 王涉, 徐辉. 中国西电东送40年发展成效与政策建议 [J]. 中国电力, 2024, 57(11): 88–93.
Liang S, Wang S, Xu H. Development achievements and policy suggestions of China’s west to east power transmission for 40 years [J]. Electric Power, 2024, 57(11): 88–93.

[27] 刘永叶, 杨阳, 乔亚华, 等. 不同排放深度下温升作用对核电厂液态流出物近区稀释的影响研究 [J]. 辐射防护, 2017, 37(5): 355–360.
Liu Y Y, Yang Y, Qiao Y H, et al. Study on the influence of thermal discharge on near field dilution of liquid effluent from inland NPPs [J]. Radiation Protection, 2017, 37(5): 355–360.

[28] 刘江海, 贾惠敏, 于淞淞, 等. 后处理厂含氚废水处理技术 [J]. 广东化工, 2023, 50(11): 168–170.
Liu J H, Jia H M, Yu T T, et al. Treatment of tritiated wastewater in reprocessing plant [J]. Guangdong Chemical Industry, 2023, 50(11): 168–170.

[29] 罗阳明, 孙颖, 彭述明, 等. 含氚重水提氚工艺技术进展 [R]. 绵阳: 第二届全国核技术及应用研究学术研讨会, 2009.
Luo Y M, Sun Y, Peng S M, et al. Progress in tritium extraction technology using tritium-containing heavy water [R]. Mianyang: Second National Academic Symposium on Nuclear Technology and Applications, 2009.

[30] 梁小虎, 杨素亮, 杨磊, 等. 低放废水中氚的快速分离方法 [R]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2012.
Liang X H, Yang S L, Yang L, et al. Rapid separation method for tritium in low-level radioactive wastewater [R]. Beijing: China Institute of Atomic Energy, 2012.

[31] 王君妍, 高娇, 陈超. 核电站液态流出物氚减排方案设计 [J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2025, 43(2): 110–119.
Wang J Y, Gao J, Chen C. Design of tritium reduction scheme for liquid effluents of nuclear power plants [J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2025, 43(2): 110–119.

[32] Davidson R B, Von Hatten P, Schaub M, et al. Commissioning and first operating experience at Darlington tritium removal facility [J]. Fusion Technology, 1988, 14(2P2A): 472–479.

[33] 王奇. 取消次级中子源对压水堆氚源项的影响分析 [J]. 强激光与粒子束, 2023, 35(11): 146–151.
Wang Q. Analysis of the impact of canceling secondary neutron sources on tritium sources in pressurized water reactors [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2023, 35(11): 146–151.

[34] Magnusson Å, Aronsson P O, Lundgren K, et al. Characterization of ^{14}C in Swedish light water reactors [J]. Health Physics, 2008, 95(2): 110–121.

[35] Kunz C. Carbon-14 discharge at three light-water reactors [J]. Health Physics, 1985, 49(1): 25–35.

[36] International Symposium on Management of Gaseous Wastes

from Nuclear Facilities. Management of gaseous wastes from nuclear facilities[R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1980.

[37] 周国丰. 核电厂痕量气载碳 14 处理工艺关键技术研究 [D]. 上海: 上海交通大学(博士学位论文), 2019.
Zhou G F. Key technologies for the treatment of trace carbon-14 in nuclear power plants [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University (Doctoral dissertation), 2019.

[38] Cheh C H. Removal of ^{14}C from nitrogen annulus gas [R]. Baltimore: The 18th DOE Nuclear Airborne Waste Management and Air Cleaning Conference, 1985.

[39] Chang S D, Cheh C H, Leinonen P J. Demonstration of carbon-14 removal at CANDU nuclear generating stations [R]. San Diego: The 21st DOE/NRC Nuclear Air Cleaning Conference, 1990.