

核技术应用创新发展研究：基于科技创新与产业创新融合视角

王莹杰¹, 彭现科¹, 胡晓棉^{2*}

(1. 中国工程科技创新战略研究院, 北京 100088; 2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

摘要: 核技术应用产业作为战略性新兴产业, 具有高科技、高效能、高质量特征; 推动核技术应用创新发展, 是顺应新一轮科技革命和产业变革的必然选择, 也是拓展核技术应用领域、促进高质量发展和培育新质生产力的优选方向。本文从科技创新与产业创新深度融合(创新融合)的视角出发, 总结了核技术应用创新融合的内涵要义和特征要素, 深入剖析了核技术应用的多元创新主体和创新融合机制, 提出了核技术应用创新融合的体系架构。在此基础上, 分析核技术应用创新融合的发展现状和面临的挑战, 针对性提出了推动核技术应用创新发展的对策建议, 包括完善核技术应用产业发展的顶层规划与法规标准、强化核技术应用的高质量科技供给、巩固核技术应用产业发展基础、促进核技术应用高质量成果转化, 为推动核技术应用产业高质量发展提供理论支撑和实践参考。

关键词: 核技术应用; 科技创新; 产业创新; 创新融合; 辐射安全

中图分类号: TL **文献标识码:** A

Innovation and Development in Nuclear Technology Application: A Study Based on the Integration of Sci-Tech Innovation with Industrial Innovation

Wang Yingjie¹, Peng Xianke¹, Hu Xiaomian^{2*}

(1. Chinese Academy of Engineering Innovation Strategy, Beijing 100088, China; 2. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

Abstract: As a strategic emerging industry, the nuclear technology application sector is characterized by high technology, high efficiency, and high quality. Promoting the innovation and development of nuclear technology application is an inevitable choice in response to the new round of scientific and technological revolution as well as industrial transformation. It also represents the optimal direction for expanding the application fields of nuclear technologies, fostering high-quality development of the sector, and cultivating new productive forces. This study examines the deep integration of scientific and technological innovation with industrial innovation. It summarizes the essence and key characteristics of deep integration of scientific and technological innovation with industrial innovation in nuclear technology applications. It analyzes the diverse innovation entities and innovative integration mechanisms within nuclear technology applications, proposing a systematic framework for innovative integration in this field. Building on this foundation, it

收稿日期: 2025-03-17; **修回日期:** 2025-04-16

通讯作者: *胡晓棉, 北京应用物理与计算数学研究所研究员, 中国工程院院士, 研究方向为核物理工程技术; E-mail: hu_xiaomian@iapcm.ac.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“核裂变与聚变技术和产业发展战略研究”(2025-HZ-11), “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: sscac-engineering.org.cn

examines the current status and challenges facing the innovative integration, and proposes the following targeted policy recommendations: (1) improving the overarching planning and regulatory standards for the nuclear technology application industry, (2) enhancing the supply of high-quality scientific and technological resources for nuclear technology application, (3) strengthening the foundational infrastructure for the nuclear technology application industry, and (4) promoting the high-quality transformation of nuclear technology application outcomes. These recommendations provide theoretical support and practical guidance for driving the high-quality development of the nuclear technology application industry.

Keywords: nuclear technology application; scientific and technological innovation; industrial innovation; innovative integration; radiation safety

一、前言

核技术应用通常指民用非动力核技术应用或同位素与辐射技术应用，主要在工业、农业、医疗、环保、空间地球、公共安全等领域应用^[1,2]。当前，新一轮科技革命与产业变革正在重构全球创新版图、重塑全球经济结构，核技术应用产业因其知识密集、交叉性强、适应性广、附加值高等特性，将在推动新质生产力形成过程中发挥独特作用^[3]，也是易引发颠覆性技术创新和革命性科技突破的重点产业。推动核技术应用产业不断创新是拓展核技术应用领域、促进高质量发展的重要路径，更是助力传统产业现代化建设，推进新型工业化发展，建设科技强国、制造强国、质量强国、健康中国、美丽中国的重要组成部分^[4]。近年来，国家原子能机构协同多部门先后发布了《医用同位素中长期发展规划（2021—2035年）》（简称《规划》）、《核技术应用产业高质量发展三年行动方案（2024—2026）》（简称《行动方案》）等重要文件，为核技术应用发展构建了“顶层设计—专项推进”的政策体系，也为核技术应用参与主体提供了发展目标和行动指南^[5,6]。

核技术应用的关键在于应用，即通过技术创新、产品创新、管理创新和政策创新等，将核反应与辐射等资源或技术进行成果转化/实践运用，解决特定领域、环境或场景的实际需求及问题。在核技术应用领域，科技创新与产业创新的深度融合（创新融合）是打通从实验室到产业化“最后一公里”的核心驱动力，可以系统整合技术研发与产业化的全链条要素，加速核技术成果的高效转化，显著提升产业链的自主可控性与安全韧性。因此，把握核技术应用创新融合的特点与运行机制十分重要。这关系到核技术应用能否通过创新融合实现“高质量科技供给—高价值产业需求”的双向驱动创新生态^[7]，实现核技术应用产业高质量发展。

然而，当前核技术应用创新融合发展研究仍存

在理论框架尚未系统构建、创新发展面临的瓶颈剖析不足、创新机制研究仍显薄弱、核技术应用产业新质生产力培育路径缺乏理论阐释和实践指引等问题亟待解决。为此，本文立足核技术应用创新融合视角，深入剖析核技术应用创新融合的内涵要义、特征要素和运行机制，总结核技术应用创新融合的发展现状和不足，提出推动核技术应用高质量发展的对策建议。

二、核技术应用创新融合的内涵要义、特征要素和运行机制

核技术应用新质生产力的形成本质在于创新融合与协同演进，其理论基础源于创新融合要素与创新机制的系统化构建。现有研究多从抽象的创新管理视角探讨融合路径^[8,9]，但尚未建立适用于核技术应用领域的专属理论框架；而核技术应用领域的创新研究又局限于产业现状描述与经验总结，缺乏对创新规律和创新瓶颈的深度剖析^[10-14]。本文通过提出核技术应用创新融合发展的理论框架和创新机制，为核技术应用创新发展提供理论依据，也为核技术应用新质生产力培育提供实践参考。

（一）核技术应用创新融合的内涵要义

核技术应用创新融合指在核技术应用中，通过系统性整合技术研发与产业化进程，实现从基础研究到实际应用的全链条协同创新。这一过程强调技术驱动与产业需求的双向互动，确保科技创新能够精准响应产业需求，同时产业需求有效引导技术突破。深度融合的核心是在保障核技术应用高安全标准的前提下，提升技术转化效率与经济效益。

（二）核技术应用创新融合的特征和要素

1. 核技术应用创新融合的特征

一是技术复杂性高。核技术涉及核物理、核工

程、材料科学、辐射学、环境科学等学科领域，技术创新突破不仅要解决单一领域的技术瓶颈，还需要交叉学科知识或跨学科、跨领域的技术合作。此外，核技术在不同行业的应用往往需要根据特定需求进行调整适配，甚至需要设计高度定制化的技术方案，与应用场景紧密结合。例如，在工业探伤领域，需依据不同工业部件的材质、结构和检测精度要求，采取针对性的核检测技术方案，以取得精准且有效的探伤效果^[15]。在核医学诊疗中，放射性药物的种类选择、使用剂量和治疗方案等都需要根据患者的具体情况进行定制^[16]。

二是安全性要求高。核技术应用涉及放射性物质和能量释放过程，在技术研发、生产制造和产品应用等各环节，都必须严格遵守安全标准和监管要求，确保技术和产品的安全性^[17]。核技术应用产业发展必须与环境保护、国家标准、公共安全等深度对接，确保技术应用中的辐射安全。以电子束废物处理技术为例，在设备运行过程中不仅要通过参数调节控制废物的处理效率，还需要符合环保标准，确保处理过程中不会产生二次污染，以保障公众与环境安全^[18]。

三是基础设施依赖性高。核技术应用通常需要大型基础设施支持，其产业化进程高度依赖专用设备和工艺体系，这对产业链的建设和维护提出了更高要求。例如，辐照加工产业离不开电子加速器或钴源装置的运维支撑，医用同位素的生产运输依赖辐照设施和处理热室等。核技术应用产业创新通常需要配套相应的基础设施或运维体系，并与科技创新同步推进，形成科技与产业的紧密结合。

四是行业准入门槛高。核技术应用涉及高安全风险和高额投入，因此行业准入门槛较高。一般情况下，只有在技术成熟并经过充分验证后，才会进入大规模的市场应用阶段。而当技术成熟度与应用场景需求契合时，技术的市场化应用才可能实现指数级增长。以放射性药物镥^[177Lu]特昔维匹肽(^{177Lu}-PSMA-617)为例，该药物分子在2015年即由德国海德堡癌症研究中心完成合成^[19]，经过长达7年的临床验证和监管审批后，于2022年获批上市；之后，商业化进程发展迅速，2024年全球销售额已突破13亿美元^[20]。因此，场景驱动的市场需求对技术创新十分重要。

2. 核技术应用创新融合的要素

核技术应用创新融合是一个涉及政策支持、技

术研发、人才培养和市场需求等多维复杂创新要素的系统工程。

政策支持是核技术应用创新融合的保障。政策在推动核技术应用创新融合过程中发挥引导、促进等作用。由于核技术应用涉及高风险、高投资和长周期，政策支持可以明确国家在核技术应用领域的发展战略，确保科研及产业发展朝着符合国家安全、经济发展和社会进步的方向推进。政策引导为核技术应用创新融合提供了清晰的目标和方向，也为推动重大技术攻关提供了资金保障、风险补偿、税收优惠、知识产权保护以及安全标准和规范等方面的支持。例如，核技术重大科技基础设施建设、职务科技成果权属、发展科技金融和耐心资本等是促进科技创新与产业创新深度融合的重要支撑。

技术研发是核技术应用创新融合的基础。作为具有高复杂性、高专业壁垒和高安全性要求的一项技术，核技术研发通常需要依托核安全资质主体，瞄准国内外技术空白或自主化生产需求开展技术攻关突破，结合市场需要或应用场景拓展进行应用研究。为确保核技术创新成果能够转化为实际生产力，技术研发必须与产业需求紧密对接。核技术研发还需要同时加强核技术的基础研究和应用研究，攻克关键核心技术，提升自主创新能力。核技术研发不仅能推动技术本身的创新，还能促使相关产业形态和商业模式的变化。例如，随着医疗领域核技术的不断发展，核医学将成为一个新的产业分支，推动相关设备、药品以及服务的产业创新。科研机构（包括科研院所、高等院校和实验室等）作为技术积累和人才储备的优势主体，在核技术应用前沿基础研究、核心技术突破和可持续发展方面发挥着重要作用；企业作为市场发展趋势的感知主体和产业需求的反馈主体，又牵引着核技术的不断研发。

人才培养是核技术应用创新融合的核心。核技术的多领域渗透和跨行业应用，对放射化学、核医学、核农学等交叉学科人才以及兼具核科学与工程实践能力的复合型人才提出了更高需求。高校作为人才培养的摇篮，为核技术应用基础研究和突破提供了源源不断的创新动力，也为核技术应用全生命周期的各环节提供了全方位的支持。此外，凭借人才优势，高校也成为推动“产学研”合作的纽带，能够与企业 and 科研院所建立密切的合作关系，在基础研究、应用研究方面发挥重要作用。

市场需求是核技术应用创新融合的引擎。一方面，核技术应用的市场需求能够为技术研发提供明确的方向。例如，核医学诊疗的需求增长和适应症的场景需要，推动了正电子发射计算机断层扫描/X线计算机断层扫描（PET/CT）等医疗影像技术、硼中子俘获治疗（BNCT）等放射治疗技术的创新发展^[21,22]。市场需求的多样性和细分化推动核技术研发向定制化、精准化的方向发展。另一方面，核技术应用的市场需求促使科技成果快速转化。技术研发成果转化为实际产品离不开市场化的手段，市场需求可以反馈产品推广过程中来自产业链下游主体的问题和挑战，从而推动技术的改进和优化。此外，市场需求作为核技术应用商业化的基础，能够刺激企业加大研发投入，促进技术与产业的深度融合。企业作为核技术应用市场需求感知、应用场景挖掘、技术落地实施和商业模式创新的主体，为挖掘核技术应用场景、推动核科技成果转化、解决核技术产业化过程中的实际问题做出了重要贡献，充

分发挥了核技术应用创新融合的主体作用。

整体来看，核技术应用创新融合离不开政策支持、技术研发、人才培养和市场需求等创新要素的有机协同与互动。政府、科研院所、高校、企业作为多元创新主体，是促进创新要素流动、激发创新要素活力的有力保障。通过系统性的机制设计，有效整合各创新要素，充分调动各主体的创新潜力与协同能力，才能推进核技术应用创新融合，助力核技术应用产业高质量与可持续发展。图1展示了核技术应用创新融合的体系。

（三）核技术应用创新融合的运行机制

“产学研”合作机制是推动核技术应用创新融合的基础。高校、科研院所和企业等主体的紧密合作与协同创新，能够有效促进核技术应用技术研发与实际产业需求的对接，助力核技术科研成果转化为实际应用。例如，同方威视技术股份有限公司基于政府、科研院所、高校和市场的紧密合作，在核安

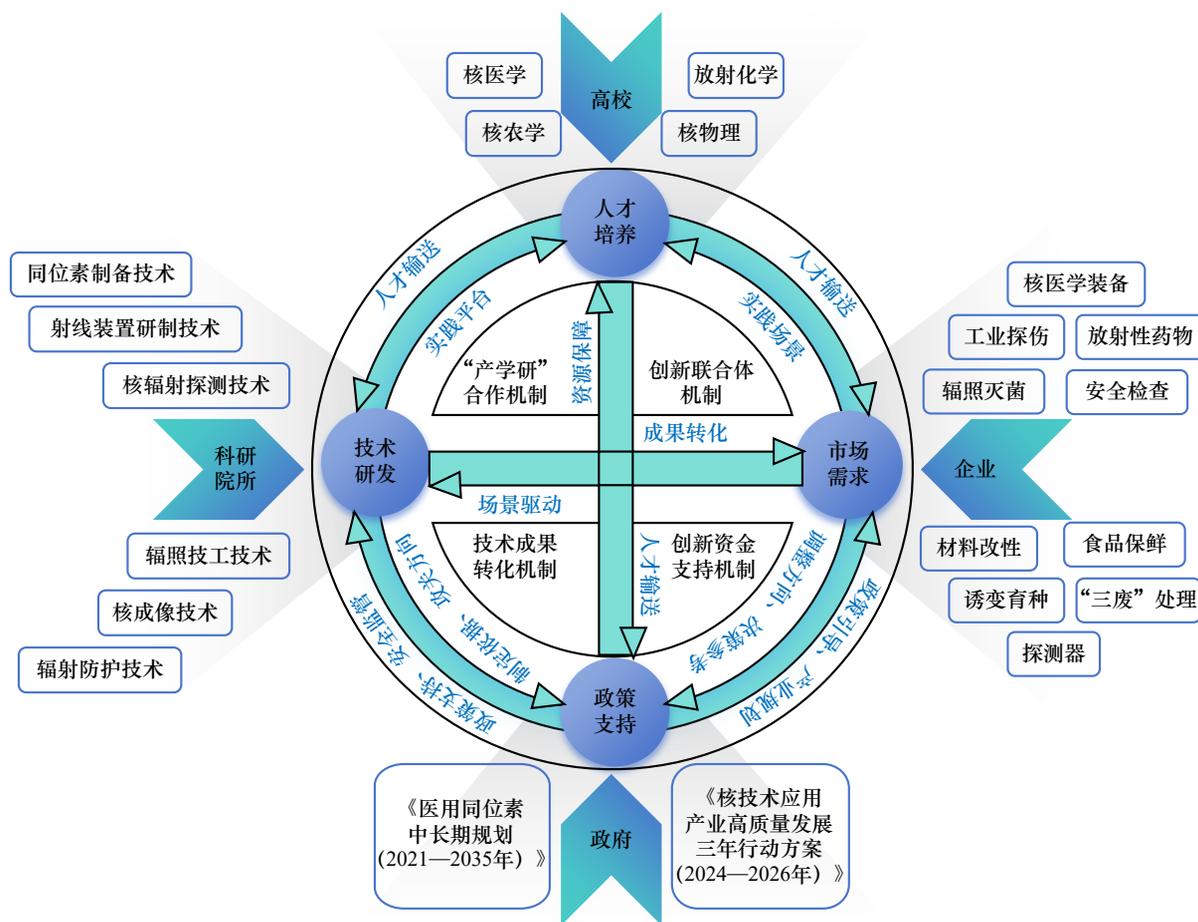


图1 核技术应用创新融合体系

检领域实现了关键技术自主突破，提升了设备的精准性和可靠性，现已在国际市场中占据重要地位。

创新联合体机制是促进核技术应用创新融合的新动力。创新联合体通过集成核技术应用不同领域与不同环节的技术、资源和人才，形成跨界协作的强大创新合力。例如，中国核工业集团有限公司（中核集团）成立的“一体化快堆”创新联合体，涵盖7个技术组、3个工作组和26个创新团队，汇聚了核电、核燃料循环、先进制造、基础科研等领域的42家企事业单位，共同加快推动核能“三步走”战略的实施。创新联合体内部的技术交流与资源共享为解决核技术应用高复杂技术难题、加速技术成果研发和转化等方面提供了有效支撑。

技术成果转化机制是核技术应用创新融合的关键。技术成果转化机制通过优化科技成果的评估、转化和应用过程，减少技术转化中的壁垒，以确保科研创新成果能够有效进入市场应用，推动核技术的产业化。例如，中核集团通过设立科技成果转化基金，鼓励核技术成果的转化和产业化应用。相比“产学研”合作机制，技术成果转化机制侧重将已有的技术成果推向实际应用，重点关注技术从实验室到市场的商业化和产业化过程。

创新资金支持机制是核技术应用创新融合的保障。政府的专项基金、研发补贴和税收优惠以及金融机构的投融资，能够为核技术应用科技创新提供坚实的资金保障，同时激励企业和科研机构加大研发投入，降低创新风险。例如，中核集团通过构建“科创基金+产业基金”接续孵化的金融服务模式，用少量的企业资金引导和撬动更多的社会资本，用于支持核技术应用从研发到产业化的全链条发展。

整体来看，在核技术从研发走向实际应用的过程中，核技术应用创新融合过程往往涉及上述多种融合机制，而创新融合机制的有效运行依赖于多元创新主体的有机协同和多维创新要素的系统集成，通过技术链、人才链、产业链、资金链的深度融合，实现创新驱动发展。

三、核技术应用创新融合发展现状

（一）政策支持力度持续加大

近年来，我国积极推动和布局核技术应用产业的发展，相继发布了多项与核技术应用产业发展相关

的政策规划。一是将核技术应用作为国防与民用产业一体化的典型产业，推进核技术应用产业化进程。《国务院办公厅关于推动国防科技工业军民融合深度发展的意见》（2017年）为核技术应用发展提供了指导意见。二是从国家层面鼓励核技术应用开发，发布核技术应用发展规划。例如，2024年，国家发展和改革委员会发布《产业结构调整指导目录（2024年本）》，持续将同位素应用技术开发列为鼓励类条目以引导产业升级。《规划》《行动方案》的相继发布，有效推动了核技术在国民经济领域更快、更好、更广的深度融合。此外，我国还发布了具体领域的技术攻关或管理实施方案，如《关于改革完善放射性药品审评审批管理体系的意见》，为放射性药物发展提供了指导，对放射性药物产业的发展起到了重要推动作用。

地方政府积极响应国家政策，发布实施地方性核技术应用发展规划，启动建设核技术应用产业集群项目。四川省发布了《四川省核技术应用科技创新发展实施方案（2023—2025年）》，提出要大力提升四川省核技术应用领域的科技创新能力，支撑构建具有四川特色的核技术应用产业体系；2023年，绵阳市印发了《加快建设成渝医疗副中心暨深入推进“委市共建”卫生健康事业高质量发展先行市实施方案》，提出将加快建设国家卫生健康委员会核技术医学转化重点实验室，加快建设精准医学中心，培育国家医学中心；夹江县先后发布了《先进核能与核技术应用产业发展规划》《核能装备产业园总体规划》《夹江县核技术产业园控制性详细规划》以促进核能与核技术应用产业的发展；目前，夹江县核技术应用产业集群已被纳入四川省首批23个战略性新兴产业集群。浙江省发布的《关于培育发展未来产业的指导意见》提出，将核医疗列入省重点培育并优先发展的“未来医疗”产业；浙江海盐县相继发布了《海盐核技术应用（同位素）产业园专项规划》《海盐县“十四五”核电关联及核技术应用产业发展规划》《关于进一步扶持核电关联及核技术应用产业发展的若干意见》，大力推进核技术应用产业尤其是同位素产业发展。山东烟台市发布《烟台市医用同位素健康产业发展规划（2022—2025年）》，旨在建设世界级医用同位素健康全产业链生态圈。此外，湖南衡阳、江西南昌、重庆高新区等地也将核技术应用产业作为当地重要产业，与

相关企业或高校联合投资建设众多项目。

（二）技术研发实力显著提升

我国核技术应用技术研发相继实现多个重要突破，尤其是核医学领域发展快速。一是成功突破部分放射性同位素的关键制备技术，打破国外垄断。例如，基于中核集团秦山核电基地，我国第一个医用钴-60放射源成功生产、第一批碳-14辐照生产靶件成功出堆、首个商用堆在线辐照生产同位素装置成功投运，这对填补关键核素的技术空白和提升自主生产供应能力具有重要意义；此外，中核集团还首次实现了高丰度克量级镱-176同位素（镱-177前体核素）、公斤级丰度99%钼-100同位素（钼-99前体核素）、核纯度大于99.9%的放射性同位素锿-68样品（镱-68前体核素）的制备和生产。二是成功攻克高端医疗设备关键技术并实现国产替代。例如，中国科学院近代物理研究所研制的首台国产医用重离子癌症治疗设备在技术先进性、维护费用、性价比和治疗效果方面走在世界前列，目前正在多个城市部署建设，下一代正朝着小型化、低成本方向发展。我国自主研发的首台电子Flash放射治疗设备已正式获得型检，目前设备已进入最后的组装和调试阶段，随后将开启临床试验。联影医疗技术集团有限公司在PET/CT方面具备全球领先优势，发布的全球首台全芯无极数字PET/CT系统（uMI Panorama）实现了全球最高空间分辨率及领航级系统灵敏性能、全球首台“零噪声”数字减影血管造影X射线成像系统（DSA），是自1895年伦琴发现X射线以来的一大重要突破。三是放射性药物新药研发取得重要突破。例如，成都纽瑞特医疗科技股份有限公司自主研发的钇^[90Y]炭微球注射液为胰腺癌治疗提供了有效手段；中国工程物理研究院核物理与化学研究所在国内率先实现碘^[131I]化钠口服液、无载体镱^[177Lu]溶液等同位素制品的规模化生产及常态化市场供给。北京大学成功开发出靶向共价放射性药物，该研究成果成为《自然》期刊近50年来的首篇放射性核素治疗领域论文^[23]。

此外，我国加速器自主化研制水平取得了显著提高。中国原子能科学研究院成功突破了多能量加速器、高功率加速管、射频脉冲电源等关键技术，加速器性能达到国际同类产品的先进水平。中广核技术发展股份有限公司自主研发的120 keV-520 mA

电子帘加速器，标志着我国在高功率电子加速器领域取得了重大技术突破。中国工程物理研究院研制的花瓣加速器攻克了束流动力学设计、高重频电子枪、高品质因数射频加速枪等核心关键技术，掌握了从物理设计到工程实现的全过程器件级自主可控国产化技术，打破了国外在大功率高能电子花瓣加速器领域的垄断，并实现了大剂量率高能微焦点花瓣加速器X射线CT检测系统制造。同时，我国在新型探测器领域的创新研发能力逐渐增强，中国原子能科学研究院先后研制出高性能硅基探测器、室温探测器、化合物探测器和高效碳化硼中子探测器等，探测器性能和稳定性逐渐提升。在大型工业CT系统检测方面，同方威视技术股份有限公司研制的全球首套基于碳纳米管分布式光源的静态CT智能安检系统，突破了传统滑环CT在成像速度和通道尺寸方面的瓶颈，整体技术达到国际领先水平。

（三）人才培养持续有力

随着核技术应用向多个领域深度拓展，我国对核技术产业应用人才的需求不断增长。在政府引导、高校教育和企业实践等多方面的共同努力下，逐渐形成了多层次、多模式的人才培养体系。《行动方案》提出，健全核技术应用人才引育机制，建立科教融合、产教融合的开放式培养模式。近年来，高等院校、科研院所通过提供核技术应用相关的高质量教育和专业训练，为我国核技术应用产业不断培养和输送人才。在国家核科技教育布局和核工业发展需求演变的背景下，核技术应用专业设置逐渐辐射至全国多所高等院校，已有近40所高等院校设置了核技术应用相关专业，涵盖综合类、理工类、师范类、医学类等，如北京大学、清华大学、哈尔滨工程大学、兰州大学、上海交通大学、西安交通大学等。此外，校企联合培养和中外合作办学也是核技术应用人才培养的重要支撑。中核集团、中国广核集团有限公司（中广核集团）与多所高校开展联合培养学生，学生毕业后可定向到企业工作；中山大学、华北电力大学等与法国高校（如格勒诺布尔综合理工学院）建立相关合作，培养具有国际视野的人才。

（四）市场需求稳步增长

当前，我国核技术应用产业经济规模持续扩

大,产业进入快速扩张期。根据《中国核技术应用产业发展报告(2023年)》^[21],我国核技术应用产业的产值由2015年的3000亿元增长到2022年的近7000亿元,年均增长率达15%以上。其中,工业应用产值占比超过50%,医用核技术产值占比约为20%。《行动方案》提出,到2026年,我国核技术应用产业年直接经济产值达4000亿元。届时,我国核技术应用产业的总体产值可达万亿市场规模。在核医疗领域,我国放射性医用同位素与放射性药物的需求量逐年增长。目前,国内市场上常用的8种医用同位素需求量正在以每年5%~30%的速度增长,预计2030年的市场总额将达10亿元;在放射性药物方面,预计2030年的市场规模将达260亿元^[24]。在农业领域,辐照技术在食品保鲜和育种方面的应用需求持续增长。在工业领域,材料无损检测和辐照改性应用需求不断扩大,工业生产的智能化、精细化对核技术应用提出了进一步的要求。此外,在未来产业方面,量子计算、新型储能、脑机接口等为核技术提供了新的应用场景。

我国主要的核技术应用企业紧跟市场需求,重视核技术应用的产业布局工作,积极构建核技术应用全产业链的技术体系。中核集团打造了以核医疗、安检安保、辐照应用为主的“3+N”核技术应用产业体系,并积极进行资源调整,统一组建了中国宝原投资有限公司,形成了以同位素及制品、安检安保、特色装备、核医疗、辐照应用为代表的核心主业。中广核核技术发展股份有限公司以电子加速器研发制造及下游应用为优势主业,在辐照灭菌、材料改性和污水处理方面具有显著优势,并在质子加速器、核药等医疗健康领域,核仪器仪表、安检设备等测控装备领域进行积极探索。2022年,国家电力投资集团有限公司成立核素同创(重庆)科技有限公司,积极开展先进强流加速器技术的研发;成立江西天红科技有限公司,支撑天红研究堆的建设工作。

(五) “产学研”合作初见成效

核技术应用多元创新主体的协同发力和优势互补是核技术应用创新融合和产业高质量发展的关键要素。在《规划》《行动方案》的指引下,核技术应用创新平台与产业园逐渐在全国范围内部署实施,成为“产学研”合作的典范。在创新平台方面,

2021年以来,我国建立了7个放射性药物研发中心和2家核医学相关重点实验室,依托这些创新平台,我国放射性药物的研发水平和创新能力大幅提升,陆续在¹⁷⁷Lu-Dotatate、¹⁷⁷Lu-PSMA、²²⁵Ac-PSMA等药物研发和临床试验上取得重要突破。在产业园建设方面,四川、浙江、广东等地积极实施投产,如四川省夹江县核技术应用产业园作为我国第一个获得环评批复的产业园,围绕“堆、源、素、药”完整医用同位素和放射性药物产业链,建立了“院地校企”推进机制和“产学研用”生态系统^[25]。在核技术应用多方合作中,多创新主体的协同发力和优势互补成为解决科技创新与产业需求之间脱节问题的关键。

四、核技术应用创新融合发展面临的挑战

(一) 标准体系和监管法规亟待进一步健全

核技术应用的安全性、可靠性和规范性发展,离不开标准体系和监管规范的指引。随着核技术应用向更多领域和更多行业拓展,现有的法规、标准体系未能完全适应新的技术需求和产业发展需要。虽然近年来我国团体标准编制与修订工作发展迅速,部分标准填补了市场空白,如《电子束处理印染和造纸工业废水技术规范》(T/CNS 8—2018)作为全球电子束处理工业废水应用领域的首个技术标准,已于2018年5月30日起正式实施。但由于我国团体标准起步较晚且标准研制过程复杂,核技术应用领域的标准制定和完善工作仍需积极推进。在监管方面,由于核技术研发与应用涉及安全资质问题,核技术应用监管涉及生态环境部(国家核安全局)、交通部等多个部门,监管资源和技术力量分散,影响了监管效率和安全水平。随着核技术应用范围的逐渐扩大,监管要求不断细化,核技术应用的监管法规仍有待进一步完善。

(二) 自主创新能力仍需增强

我国核技术研发的原始创新能力仍显不足。一是核技术基础设施的数量和性能存在不足。核领域的科学原理探索与关键技术突破通常依赖同步辐射光源和散裂中子源等大科学装置。虽然我国在核技术相关大科学装置建设方面处于国际领先水平,但大多数设施属于跟踪模仿,技术指标先进却不领

先，缺乏原创性和独有性，导致核技术突破指标受限；研究堆的数量和束流指标先进性仍有待进一步提升。二是关键技术的科研投入不足。科学技术发展到当下阶段，待解决的技术难题往往具备高难度和高复杂性，因此需要更充足的研发资金和更长的研发周期，而科研院所的经费主要依赖于政府财政拨款，社会资本和企业投入相对较少。这种单一的经费来源结构使得科研院所的资金压力较大，同时也限制了科研项目的规模和数量，难以满足核技术快速发展对资金的大量需求。此外，核技术领域的部分高端仪器仍以进口为主，自主可控的研发能力相对不足；核技术应用关键材料、高精尖制备工艺和核心器件等仍落后于国际水平。三是技术的数字化与智能化转型有待加强。随着工业4.0和数字化时代的到来，核技术应用需结合大数据分析、人工智能、物联网等技术，实现核科技研发模式从传统经验驱动向数据智能驱动升级，如建立基于数字孪生的核设施运维系统、开发量子计算辅助的放射性药物分子设计平台和构建区块链技术支持的核材料追踪溯源体系等，以实现核技术研发数字化转型目标。

（三）复合型人才依然短缺

随着核技术应用产业向多学科领域的广泛渗透，复合型人才供给不足成为制约产业发展的核心瓶颈。以核医学领域为例，2024年，在全国核医学从业人员中，具备核技术与医学交叉背景的化学师（303人）、物理师（170人）仅占从业人员总数的3.02%，远低于医师（6748人）、技师（4461人）等岗位占比^[26]。在培养模式层面，校企联合培养机制尚未形成复合型人才系统化培养方案。例如，高校和企业培养目标设定上存在重理论轻实践、重应用轻基础的价值分歧，导致课程体系与产业需求出现匹配偏差。此外，校企双导师制在实施中面临评价标准不统一的问题，高校侧重学术成果考核，企业则关注技术转化效能，这种“二元评价体系”使学生产生职业发展困惑，不利于人才复合能力的培养。

（四）产业内生动力仍显不足

整体来看，我国核技术应用产业发展仍未能充分满足市场需求，主要原因是企业的创新主体功能

尚未充分发挥。一方面，由于核技术应用技术开发通常依赖核安全资质，企业通常难以掌握产品开发的源头技术，这对于技术突破和产业创新具有限制影响。另一方面，核技术应用的商业模式仍主要依赖传统的基础设施投资和政府支持，缺乏足够的市场化驱动和风险管理机制，加上核技术应用产业的投资回报存在较大不确定性，往往使企业缺乏足够的资金支持和风险承受能力。政府资金和科研机构的技术支持虽在一定程度上促进了核技术的持续进步与创新突破，但核技术应用如果过度依赖政府和科研机构，可能会导致技术发展无法快速响应市场变化，进而影响创新活力与效率。

（五）“产学研”合作深度仍需强化

核技术应用产业创新平台和集群项目在一定程度上促进了核技术应用的“产学研”合作，推动了核技术应用创新融合，但在科技成果转化机制和持续激发科研人员创新创造活力方面仍存在不足^[27,28]。一是科技成果“三权”下放未能缓解成果创造人的转化忧虑。具备国有资产属性的核技术成果，在成果转化过程中要承担保值增值责任。虽然已明确提出混合所有制改革试点，建立尽职免责机制，但由于免责条件较为模糊、实施细则则难落地，导致部分单位和人员仍对转化决策持谨慎态度，影响了政策的实际效果。二是成果转化过程中的人员激励政策与评价体系不健全。科研人员在成果转化过程中的收益分配与后续技术支持的奖励政策在实践中仍面临具体操作问题。与传统的科研成果评价和职称晋升机制相比，成果转化贡献在科研人员的职业发展中未能充分体现，这使得许多科研人员更倾向于专注学术研究，而忽视了成果的实际应用转化，造成了科研与产业的脱节现象。三是人才培养体系与产业需求脱节，人才流动机制不畅。现有人才培养模式培养出来的人才在知识结构和技能水平上与企业岗位要求存在一定差距，缺乏核技术应用中涉及的工艺设计、设备操作与维护等实践内容。此外，科研院所与企业之间的人才流动存在障碍，在人力资源上无法实现优势互补和共享，限制了核技术应用领域“产学研”深度融合和创新发展。近年来，中核集团、中广核集团等积极推进企业改革，尝试通过健全管理体系、完善激励机制、优化服务体系、推动试点项目等方式，激发科研人员成果转化

的动力，但相关措施在实际实施过程中可能出现政策解读不同、实施细则不同，甚至存在利益分化等阻碍，政策落实道阻且长。

五、推动核技术应用高质量发展的对策建议

（一）完善核技术应用产业发展的顶层规划与标准法规

一是立足长远、统筹全局，加强核技术应用产业发展中长期规划研究制定工作。由于核技术应用属于高技术壁垒、高复杂工艺及强监管产业，核技术应用短期规划可能导致项目在执行过程中出现资源不足、方向转变和人才短缺现象，增加实施中的不确定性和资源浪费风险，无法满足核技术应用的长期发展需求。因此，建议在短期行动方案基础上，明确中长期目标，进行全局性、战略性顶层设计，指导核技术应用产业在各个领域的长期发展。

二是分层次、分批次构建标准体系。建议分别从国家标准、团体标准角度出发，建立覆盖核医学、核农学、工业探伤等细分领域的标准体系。优先制定高需求、高效益、高风险领域的技术规范。对现有标准进行定期评估，重点补充新兴技术的空白标准。

三是制定“核技术应用跨部门监管责权清单”，明确分工边界与协作流程；分级分类实施核设施差异化监管，在高风险场景实行“中央直管+属地协管”模式，将低风险场景下放至地方。开发核技术监管大数据平台，整合辐射监测、设备运行、人员资质等数据，利用人工智能算法对异常操作进行实时预警。

（二）强化核技术应用的高质量科技供给

一是优化核技术应用基础设施建设与运行管理机制。聚焦国际前沿，结合我国核技术应用战略需求，新建一批独创独有的核技术应用大科学装置。增加装置运行资金投入，不仅包括运维经费，还应涵盖设备更新改造资金和运维人员奖励经费，充分激发运维人员的积极性，确保核技术应用基础设施的持续、稳定运行。构建核技术应用基础设施共享服务体系，提升核技术应用装置在高校和企业基础科研中的使用效能。建立和健全装置运行数据共享机制、任务统筹与协调机制，优化资源配置，确保

各项科研任务的高效衔接和顺利进行。积极引入大数据、云计算、人工智能等技术，加快推进核技术应用的数字化转型。

二是增强核技术应用研发投入与人才培养力度。通过设立国家重大科技专项或重点研发计划，针对核成像、核探测、核分析等前沿领域，引导科研力量开展技术攻坚。加强对核技术应用关键材料、核心部件和高端仪器的研发投入，打破国外技术垄断。针对核技术应用产业链上的薄弱环节，开发具有自主知识产权的核心技术，推动国产化技术或设备工艺替代。在人才培养方面，建议教育部组织高校和企业联合制定“核技术+跨学科”课程体系，共建核技术应用实验室和实习基地，强化多学科理论与多层次实践的结合教学。设立核技术应用“高校-企业”联合培养专项基金及核技术应用人才培养专项奖学金，吸引优秀学生投身核技术应用领域，潜心钻研，并在实际项目中提升解决问题的能力；为核技术应用专业毕业生开辟就业绿色通道，推动人才与产业的精准对接。同时，积极搭建国际交流合作平台，开展双边或多边核技术人才交流项目，吸引国外核技术领域的优秀人才与团队来华工作，提升我国核技术应用产业的国际竞争力。

（三）巩固核技术应用产业发展基础

一是强化企业科技创新主体地位。优化核安全资质审批流程，引导核技术应用企业深度参与科研机构的前沿技术研究，打通从基础研究到产品开发的全流程。健全以需求和问题为导向的科研立项机制，强化从企业实践和产业应用中明确研究方向、凝练研究任务。推广“企业出题、政府立题、高校/科研院所答题”的科研项目组织机制。推动重大研发任务更多由产业界出题，支持企业主动牵头或参与国家科技攻关任务，特别是支持有能力的民营企业牵头承担国家重大技术攻关任务。

二是加强政策对产业发展的引导和保障。鼓励金融机构开发适用于核技术应用的金融产品，为核技术相关企业提供低息贷款、科技保险、创新基金等；建立核技术应用创新风险补偿机制，对因创新失败产生的部分损失给予一定比例的补偿，提升企业风险承受能力，激发企业自主创新的积极性。引导社会资本向核技术应用产业倾斜，设立核技术应用产业专项资金，对具有战略意义的创新项目给予

直接资金支持。同时，针对有出口潜力的核技术应用企业，提供政策性出口信用保险、出口补贴等措施，帮助企业进入国际市场。

(四) 促进核技术应用高质量成果转化

一是加强核技术应用在原理探索、概念验证、技术攻关、中试熟化等方面进行的全链条及一体化布局建设。通过建设一批国家级核技术创新中心和区域性中试熟化基地等平台载体，强化其公共研发服务、共性技术供给与工程化验证能力。同时，配套稳定的研发投入与精准的政策支持，着力破解中试熟化等关键环节的瓶颈，确保技术从基础理论到实际应用的顺利过渡和最终成功。

二是规范科技成果转化激励，激发科研人员创新创造活力。在人才评价和科技奖励中增加科技成果转化绩效权重，深化职务科技成果权属改革，推动核技术应用科技成果的“单列管理”，明确科研人员在科技成果转化过程中的权益，激发其将科研成果转化为实际应用的动力。建立和健全核技术应用科技成果转化机制，打造集项目申报、资金保障、技术孵化、市场对接于一体的核技术应用专业化服务平台，强化要素集成，提升转化效率，加速推进核技术成果产业化进程。

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: March 17, 2025; **Revised date:** April 16, 2025

Corresponding author: Hu Xiaomian is a research fellow from the Institute of Applied Physics and Computational Mathematics. His major research field is nuclear physics engineering technology. E-mail: hu_xiaomian@iapcm.ac.cn

Funding project: China Academy of Engineering Project: “Research on the Industrial Development Strategy for Nuclear Fission and Fusion Technologies” (2025-HZ-11), “Research on Innovative Development Strategy of Inland Nuclear Power and Nuclear Technology Application” (2023-HYZD-03)

参考文献

- [1] 中国核学会. 2018—2020核技术应用学科发展报告[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2021.
Chinese Nuclear Society. 2018—2020 report on the development of nuclear technology application disciplines [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2021.
- [2] 中国核能行业协会. 中国核技术应用产业发展报告(2025)[R]. 北京: 中国核能行业协会核技术应用专业委员会, 2025.
China Nuclear Energy Association. Report on the development of

- China's nuclear technology application industry (2025) [R]. Beijing: Nuclear Technology Application Specialized Committee of China Nuclear Energy Association, 2025.
- [3] 韩昱. 央企围绕新质生产力发力布局 多个产业链共链行动启动 [N]. 证券日报, 2024-11-25(A02).
Han Y. Central enterprises around the new quality productivity force layout multiple industry chain common chain action start [N]. Securities Daily, 2024-11-25(A02).
- [4] 张鑫. 核技术产业的重要性应用现状与发展策略 [J]. 现代企业, 2024 (7): 45—47.
Zhang X. Importance, application status and development strategy of nuclear technology industry [J]. Modern Enterprise, 2024 (7): 45—47.
- [5] 国家原子能机构. 医用同位素中长期发展规划(2021—2035年) [EB/OL]. (2021-06-25)[2025-03-17]. <https://www.caea.gov.cn/n6760338/n6760342/c6831058/content.html>.
National Atomic Energy Agency. Medium and long-term development plan for medical isotopes (2021—2035) [EB/OL]. (2021-06-25)[2025-03-17]. <https://www.caea.gov.cn/n6760338/n6760342/c6831058/content.html>.
- [6] 国家原子能机构, 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 中华人民共和国教育部, 等. 核技术应用产业高质量发展三年行动方案(2024—2026) [EB/OL]. (2024-10-31)[2025-03-17]. <https://www.caea.gov.cn/n6760339/n6760347/c10625020/content.html>.
National Atomic Energy Agency, National Development and Reform Commission, Ministry of Education of the People's Republic of China, et al. Three-year action program for high-quality development of nuclear technology application industry (2024—2026) [EB/OL]. (2024-10-31)[2025-03-17]. <https://www.caea.gov.cn/n6760339/n6760347/c10625020/content.html>.
- [7] 李晓红. 推动科技创新和产业创新深度融合 [J]. 中国信息界, 2025 (5): 1—3.
Li X H. Promoting the deep integration of technological innovation and industrial innovation [J]. China Information World, 2025 (5): 1—3.
- [8] 任保平, 司聪. 以科技创新与产业创新的深度融合推动形成新质生产力研究 [J]. 经济学家, 2025 (2): 76—86.
Ren B P, Si C. Research on promoting the formation of new quality productive forces by deep integration of science and technology innovation and industrial innovation [J]. Economist, 2025 (2): 76—86.
- [9] 邓丽妹. 科技创新和产业创新深度融合研究 [J]. 特区实践与理论, 2025 (1): 19—25.
Deng L S. Research on the deep integration of scientific and technological innovation and industrial innovation [J]. Practice and Theory of SEZS, 2025 (1): 19—25.
- [10] 闫灵通, 孙合杨, 冯向前. 核技术在文物保护和科技考古研究中的应用 [J]. 现代物理知识, 2023, 35(6): 33—37.
Yan L T, Sun H Y, Feng X Q. Application of nuclear technology in cultural relics protection and scientific and technological archaeological research [J]. Modern Physics, 2023, 35(6): 33—37.
- [11] 梁劼, 高美须. 核技术在农业上应用现状和展望 [J]. 核农学报, 2024, 38(1): 1—10, 229.
Liang Q, Gao M X. Status and prospect of nuclear application for food and agriculture [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences,

- 2024, 38(1): 1–10, 229.
- [12] 王丽. 美国核技术应用产业发展模式研究 [J]. 现代工业经济和信
息化, 2023, 13(7): 55–56, 60.
Wang L. A study on the development model of nuclear technology
application industry in the United States [J]. *Modern Industrial
Economy and Informationization*, 2023, 13(7): 55–56, 60.
- [13] 张鑫. 核技术应用产业“走出去”面临的挑战与思考 [J]. 现代企
业, 2024 (8): 161–163.
Zhang X. Challenges and reflections on “going global” of nuclear
technology application industry [J]. *Modern Enterprise*, 2024 (8):
161–163.
- [14] 黄青华, 杨帆, 黄杏元, 等. 江西省核技术应用产业发展现状与
战略机遇 [J]. 现代企业, 2024 (10): 73–75.
Huang Q H, Yang F, Huang X Y, et al. Development status and
strategic opportunities of nuclear technology application industry
in Jiangxi Province [J]. *Modern Enterprise*, 2024 (10): 73–75.
- [15] 徐琳. 无损检测技术在制造过程中的应用 [J]. 集成电路应用,
2024, 41(9): 38–40.
Xu L. Application of non destructive testing technology in manu-
facturing process [J]. *Application of IC*, 2024, 41(9): 38–40.
- [16] 杜进, 黄旭虎, 宋志浩, 等. 中国放射性药物的发展现状及趋
势 [J]. 原子能科学技术, 2024, 58(S2): 231–240.
Du J, Huang X H, Song Z H, et al. Current status and future per-
spective of radiopharmaceuticals in China [J]. *Atomic Energy Sci-
ence and Technology*, 2024, 58(S2): 231–240.
- [17] 黄标. 核技术应用的辐射安全与防护分析 [J]. 中国资源综合利
用, 2021, 39(2): 143–145.
Huang B. Analysis of radiation safety and protection in nuclear
technology application [J]. *China Resources Comprehensive Utili-
zation*, 2021, 39(2): 143–145.
- [18] 沈云鹏, 王建龙. 电子束辐照处理废水研究及进展 [J]. 环境科
学学报, 2023, 43(12): 35–49.
Shen Y P, Wang J L. Electron beam radiation technology for
wastewater treatment [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023,
43(12): 35–49.
- [19] Delker A, Fendler W P, Kratochwil C, et al. Dosimetry for (177)
Lu-DKFZ-PSMA-617: A new radiopharmaceutical for the treat-
ment of metastatic prostate cancer [J]. *European Journal of Nuclear
Medicine and Molecular Imaging*, 2016, 43(1): 42–51.
- [20] Novartis. Novartis continues strong momentum of sales growth
with margin expansion, reaches key innovation milestones in 2024
[EB/OL]. (2025-01-31)[2025-04-05]. [https://www.novartis.com/
sites/novartis_com/files/q4-2024-media-release-en.pdf](https://www.novartis.com/sites/novartis_com/files/q4-2024-media-release-en.pdf).
- [21] 刘逸飞, 曲蕾, 徐帅帅, 等. 生长抑素类似物 PET/CT 显像在神经
内分泌肿瘤中的应用现状与进展 [J]. 医学影像学杂志, 2025,
35(2): 139–142.
Liu Y F, Qu L, Xu S S, et al. The current status and progress of
PET/CT imaging of somatostatin analogs in neuroendocrine tu-
mors [J]. *Journal of Medical Imaging*, 2025, 35(2): 139–142.
- [22] 谷晓芳, 贺丽萍, 杨鹏飞, 等. 硼中子俘获治疗技术发展现状 [J].
中国医疗设备, 2024, 39(8): 152–158.
Gu X F, He L P, Yang P F, et al. Development status of boron neu-
tron capture therapy technique [J]. *China Medical Devices*, 2024,
39(8): 152–158.
- [23] Cui X Y, Li Z, Kong Z R, et al. Covalent targeted radioligands po-
tentiate radionuclide therapy [J]. *Nature*, 2024, 630(8015): 206–213.
- [24] 弗若斯特沙利文公司. 中国放射性药物产业现状与未来发展蓝
皮书 2023 [R]. 北京: 弗若斯特沙利文公司, 2023.
Frost & Sullivan. Blue book on the current status and future devel-
opment of the radiopharmaceutical industry in China [R]. Beijing:
Frost & Sullivan, 2023.
- [25] 四川乐山: 培育新质生产力, 塑造发展新动能新优势 [N]. 人民
日报, 2024-12-26(19).
Leshan, Sichuan: Cultivating new quality productivity, shaping new
momentum and new advantages for development [N]. *People’s
Daily*, 2024-12-26(19).
- [26] 中华医学会核医学分会. 2024 中国核医学现状报告 [R]. 北京:
中华医学会核医学分会, 2024.
Chinese Medical Association Nuclear Medicine Branch. 2024 re-
port on the status of nuclear medicine in China [R]. Beijing: Chi-
nese Medical Association Nuclear Medicine Branch, 2024.
- [27] 黄宁. 国有资产管理体制与科技成果转化制度的冲突和协调 [J].
科技管理研究, 2023, 43(16): 22–30.
Huang N. Conflict and coordination between the state-owned as-
sets management system and the transformation system of scienti-
fic and technological achievements [J]. *Science and Technology
Management Research*, 2023, 43(16): 22–30.
- [28] 张向南. 深化科技体制改革激发创新创造活力 [N]. 衡水日报,
2024-11-12(A01).
Zhang X N. Deepen the reform of science and technology system
to stimulate the vigor of innovation and creation [N]. *Hengshui
Daily*, 2024-11-12(A01).