

中国绵阳研究堆及其科学平台研究进展

郭玉川 钱达志 魏洪源 屠小青
(中国工程物理研究院 核物理与化学研究所 绵阳 621999)

摘要 中国绵阳研究堆(China Mianyang Research Reactor, CMRR)是建设于四川省绵阳市的一座多用途高通量研究堆。围绕反应堆中子源高效利用,CMRR 现已逐步建成包括材料辐照效应研究、放射性同位素研发、中子科学研究的三大科学平台。CMRR 堆采用常温、常压、深水池淹没设计,确保反应堆在各类事故下的绝对安全。反应堆的倒中子阱结构,在堆芯活性区形成最大快中子注量率 $3.4 \times 10^{14} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,重水箱反射层形成最大热中子注量率 $2.0 \times 10^{14} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,为材料辐照考核、同位素研发及中子科学研究提供充分的实验空间。本文概括性介绍近年来 CMRR 堆在材料辐照效应研究、放射性同位素研发、中子科学研究的主要研究进展。

关键词 中国绵阳研究堆, 材料辐照, 同位素研发, 中子科学研究

中图分类号 TL37

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.250213

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.250213

Research progress of China Mianyang Research Reactor and its scientific platform

GUO Yuchuan QIAN Dazhi WEI Hongyuan TU Xiaoqing

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

Abstract China Mianyang Research Reactor (CMRR) is a multi-purpose and high-flux research reactor, which is built at Mianyang city of Sichuan province. Focusing on the efficient application of reactor neutron resources, three scientific platforms are gradually built on CMRR, which can carry out material irradiation effect research, radioactive isotope production, neutron science research, etc. CMRR reactor adopts the design of normal temperature, normal pressure and deep-pool submergence to ensure the absolute safety of reactor in various accidents. The anti-neutron trap reactor core is designed to form the peak fast neutron flux rate of $3.4 \times 10^{14} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ in reactor active region, and the peak thermal neutron flux rate of $2.0 \times 10^{14} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ in the heavy water tank with sufficient experimental space provided for material irradiation and neutron scientific research. In this paper, the basic parameters, structure design, layout of CMRR and main research progress of CMRR reactor in material irradiation effect study, radioactive isotope production, neutron science research are comprehensively and systematically summarized.

Key words China Mianyang Research Reactor, Material irradiation, Radioisotope production, Neutron science research

高品质、高通量研究堆是开展包括先进燃料及核材料辐照考核^[1-2]、中子无损检测^[3-5]、放射性医用同位素研制^[6-8]、中子科学研究^[9-11]等多方向,涵盖技术研发、科学研究、产业发展等多方面的综合性大型

核设施,是国家科技发展与创新的重要基础平台。

为满足日益增长的国内高品质反应堆中子源需求,在四川省绵阳市建设完成一座高性能、多用途的大型池式研究堆,即中国绵阳研究堆(China

第一作者: 郭玉川, 男, 1994 出生, 2023 年于清华大学获博士学位, 研究领域为反应堆热工水力

通信作者: 钱达志, E-mail: qdz1968@vip.sina.com

收稿日期: 2025-05-20, 修回日期: 2025-06-26

First author: GUO Yuchuan, male, born in 1994, graduated from Tsinghua University with a doctoral degree in 2023, focusing on reactor thermal hydraulics

Corresponding author: QIAN Dazhi, E-mail: qdz1968@vip.sina.com

Received date: 2025-05-20, revised date: 2025-06-26

Mianyang Research Reactor, CMRR)。CMRR 的堆功率为 20 MW, 2012 年通过国家验收, 2013 年 9 月冷源正式投入使用^[11]。该反应堆充分借鉴国外成熟研究堆设计经验^[12-13], 采用基于 U_3Si_2 -Al 燃料的板状燃料组件构成紧凑堆芯。反应堆采用倒中子阱原理设计, 使快、热中子通量峰在空间上实现分区, 堆芯活性区的最大快中子注量率 $3.4 \times 10^{14} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 重水箱内最大热中子注量率 $2.0 \times 10^{14} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[14], 反应堆的主要技术参数如表 1 所示。

表 1 CMRR 堆主要技术参数^[14-15]
Table 1 Main technical parameters of the CMRR reactor^[14-15]

参量 Parameter	参数 Value
反应堆类型 Reactor type	池式研究堆 Pool-type research reactor
组件类型 Assembly type	板状组件 Plate-type assembly
燃料类型 Fuel type	U_3Si_2 -Al
流道类型 Flow channel type	矩形流道 Rectangular channel
流动类型 (运行阶段) Flow state (operating stage)	由上而下强迫循环 Top-down forced circulation
流动类型 (停堆阶段) Flow state (shutdown stage)	由下而上自然循环 Down-top natural circulation
冷却剂 Coolant	轻水 Light water
慢化剂 Moderator	轻水 Light water
反射层 Reflector	重水箱 Heavy water tank
峰值快中子注量率 Peak fast neutron flux rate / $\text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	3.4×10^{14}
峰值热中子注量率 Peak thermal neutron flux rate / $\text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	2.0×10^{14}
堆芯入口水温 Core inlet water temperature	35 °C
堆芯出口水温 Core outlet water temperature	42 °C
一回路总流量 Flow rate of primary loop / $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	2 500
二回路总流量 Flow rate of secondary loop / $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	3 200

经过长期的关键技术攻关与反应堆配套设施建设, 目前已建成包括燃料及材料辐照效应研究、放射性同位素生产、中子科学研究三大科学平台, 在先进核能燃料及材料研发、重要医用同位素国产化、中子散射科学研究等方面发挥了重要作用。

1 材料辐照效应研究平台

随着核电站向高效率、长寿命和高安全性方向发展以及面向先进核能体系研发需求, 材料在辐射环境下的性能稳定性也将面临更大挑战^[16-17]。依托

研究堆中子辐照资源, 开展先进燃料及材料辐照考核, 可为材料基础科学研究与工程考核提供技术支持, 对我国新型自主核能体系发展至关重要。

为满足材料辐照效应研究需求, CMRR 堆内布置有多个垂直辐照孔道。依据辐照考核温度控制需求, 已相继研制出包括通水型辐照装置、常温密封型辐照装置、特殊封装与温度控制辐照装置。典型辐照装置如图 1、图 2 所示。

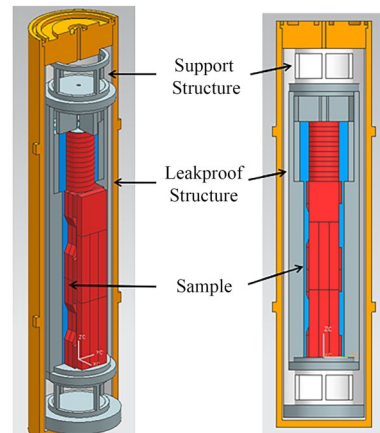


图 1 典型辐照装置结构设计示意图 (彩图见网络版)
Fig.1 Diagram of typical structure design of irradiation device (color online)

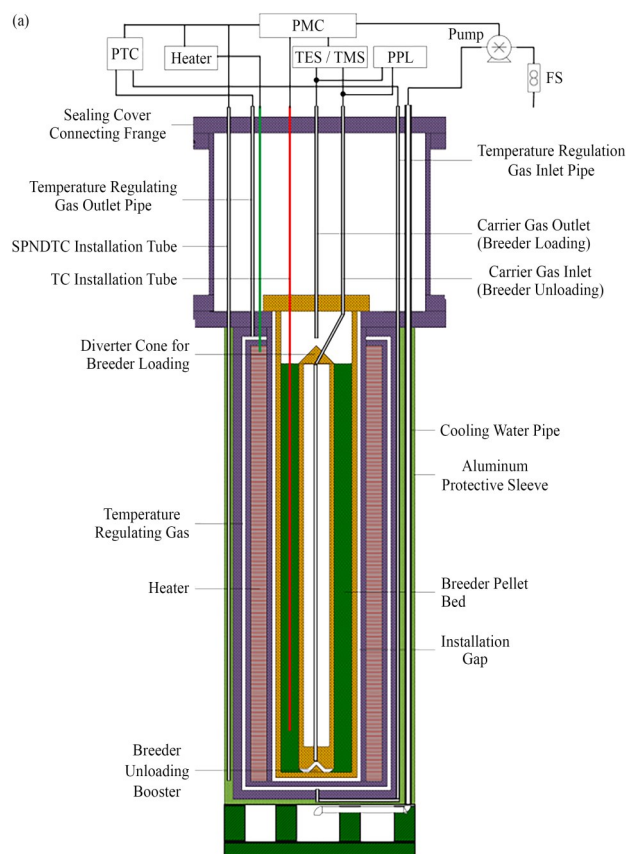


图 2 加工完成的典型辐照装置照片
Fig.2 Snapshot of typical irradiation device after processing

依托建设完成的材料辐照效应研究平台, 已完成包括事故容错燃料元件 (Accident Tolerant Fuel, ATF)^[18]、U-10Zr 合金燃料^[19]、铝基碳化硼^[20]、高纯铝^[21]、低活化铁素体/马氏体钢 (Reduced Activation Ferritic/Martensitic Steel, RAFM)^[22]等新型燃料及材料入堆辐照。其中, 中广核研制的新型 ATF 燃料正开展入堆辐照, 该项工作成功入选中国核领域十大科技进展。

此外, 依托国家磁约束核聚变能发展研究专项计划, 基于 CMRR 堆辐照孔道, 建设了旨在验证聚变堆候选固态增殖剂的堆内在线辐照产氦、释氦和提氦的性能考核实验研究平台 (图 3)^[23]。该实验平台可用于考核氦增殖剂在中子辐照下的氦性能, 并用于聚变包层的在线产氦、提氦、氦测量、氢氦分离和氢同位素浓缩等关键工艺技术研究。依托该平台, 完成了对 Li_4SiO_4 (7.5% ^6Li)、 Li_4SiO_4 (93% ^6Li) 和

Li_2TiO_3 (7.5% ^6Li) 三种不同增殖材料在 300~750 °C 温度范围的辐照实验,有力支撑了聚变堆包层的工程研发^[24]。



(b)

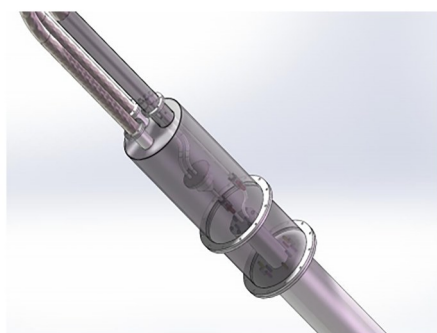


图3 在线产氚性能考核实验装置^[24](彩图见网络版)

(a) 考核装置剖面图, (b) 考核装置细节设计

Fig.3 Online tritium production performance testing experimental device^[24] (color online)

(a) Sectional view of the testing device, (b) Detail design of the testing device

2 放射性同位素研发平台

基于放射性医用同位素及其药物的核医学,在恶性肿瘤、心脑血管等疾病的诊断与治疗方面具有不可替代的作用,拥有巨大的社会效益。

当前,我国无论是接受核医学诊疗的人口数量,

还是核医学技术产业本身,都与发达国家相差甚远。关键原因在于种类众多的医用放射性同位素,如 ^{131}I 、 ^{177}Lu 、 $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{125}I 、 ^{89}Sr 等严重依赖进口,供应量与价格受制于人^[25]。

基于此,核物理与化学研究所围绕 CMRR 堆逐步建设完成医用同位素研发平台。针对 ^{99}Mo 、 ^{131}I 、 ^{177}Lu 、 ^{90}Y 、 ^{161}Tb 等重要医用同位素辐照生产需求,开展了核素制靶、分离、提取、纯化、检测等关键技术攻关,并配套建设了热室群、工作箱群、生产厂房等配套设施与系统,实现了相关医用同位素自主化生产:

1) 采用二氧化碲干法蒸馏技术实现了从原料到医用碘 [^{131}I] 化钠口服液成品国产化(图4),率先实现了我国 ^{131}I 自主化稳定供给,单批次生产能力达到 1.11×10^{13} Bq、年产能可达 5.55×10^{14} Bq,已治疗甲癌患者近 2 万例^[26]。



图4 碘 [^{131}I] 化钠口服液产品照片(彩图见网络版)

Fig.4 Snapshot of sodium iodide [^{131}I] oral solution (color online)

2) 自主研发了新型 Yb/Lu 分离专用树脂,国内率先建成全自主化百居里级无载体 ^{177}Lu 生产线,产品质量全面满足欧洲药品管理局 (European Medicines Agency, EMA) 标准,填补了国内空白,打破了国际垄断,已自用和供给国内多家研究机构和医院,显著促进了我国创新药研发进程。依托自主化 ^{177}Lu ,开展 ^{177}Lu -DOTATATE 3 类新药(临床适应症为胃肠胰神经内分泌肿瘤)研发(图5),现已完成 3 期临床试验并正注册申报,预计 2025 年底作为国内首例 ^{177}Lu 标记药物正式上市^[26]。



图5 ^{177}Lu -DOTATATE 注射液产品照片

Fig.5 Snapshot of ^{177}Lu -DOTATATE injection

3) 已建成铀靶裂变制备 ^{99}Mo 的生产平台, ^{99}Mo 年产量达 7.4×10^{13} Bq/年,现已完成两次试生产, ^{99}Mo 总回收率约70%,产品放化纯达标($\geq 99\%$), ^{99}Mo 产品质量满足药品原料液要求(图6)。同时具备年产10 000支 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器(规格为18.5 GBq/支)的供给能力,其淋洗产品高锝[$^{99\text{m}}\text{Tc}$]酸钠注射液已于2024年7月获药品文号[国药准字H20244390]^[27]。



图6 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器产品照片
Fig.6 Snapshot of ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ generation

4) 已突破冷微球获取及质控、微球精确震动分装、微球活度准确测量、辅助给药装置设计与优化等钇[^{90}Y]玻璃微球制备全部关键技术,完成符合药品生产质量管理规范(Good Manufacturing Practice, GMP)厂房生产要求的钇[^{90}Y]玻璃微球注射液中试生产线建设,具备 7.4×10^{11} Bq/次生产能力,获得的钇[^{90}Y]玻璃微球各项技术指标均达到国外同类产品水平,其适应症为国内高发癌肿——肝癌,该产品一旦上市,将产生巨大的临床应用价值。

5) 以 $^{160}\text{Gd}_2\text{O}_3$ 作为辐照靶料,两级镧系树脂联用作为分离工艺,在国内首次获得居里级 ^{161}Tb 核素^[28],并率先向16家医院、高校实现居里级 ^{161}Tb 的供货试用。

经过持续多年的能力建设与技术攻关,依托CMRR中子辐照平台,中国工程物理研究院核物理与化学研究所已建成较完善的、覆盖放射性核素与药物研制、生产、转化全链条的研发平台,集 ^{131}I 、 ^{177}Lu 、 ^{99}Mo 、 ^{161}Tb 等多品种医用同位素供给与 ^{177}Lu -DOTATATE、高锝[$^{99\text{m}}\text{Tc}$]酸钠注射液、钇[^{90}Y]玻璃微球等多款诊疗药物研制于一体的放药综合中心。

3 中子科学平台

依托CMRR堆建成的中子科学平台,已被世界 neutron 源名录 Neutron-sources.org 收录^[29],是目前国内最先投入使用、运行时间最长、谱仪数量最多、种类最为齐全的综合性中子科学平台。

2013年,该科学平台完成首期6台中子散射谱仪和2台中子成像装置建设并投入使用,入选为2013~2015年度中国十大核科技进展^[11]。目前,已

陆续建成包括自旋回波小角中子散射谱仪、超小角中子散射谱仪在内的5台中子谱仪,已拥有总计13台中子散射谱仪和2台无损检测装置,CMRR堆中子科学平台总体布局如图7所示,具体谱仪与装置列于表2中。

表2 CMRR中子科学平台谱仪及装置
Table 2 Spectrometer and device in neutron science platform of CMRR

序号 Serial number	谱仪及装置 Spectroscopic instrument
1	高分辨中子衍射谱仪(High-Resolution Neutron Diffractometer, HRND)
2	中子应力分析射仪(Residual Stress Neutron Diffractometer, RSND)
3	高压中子衍射谱仪(High-Pressure Neutron Diffractometer, HPND)
4	大尺度中子衍射谱仪(Large Scale Neutron Diffractometer, LSND)
5	中子小角散射谱仪(Small-Angle Neutron Spectrometer, SANS)
6	飞行时间极化中子反射谱仪(Time-of-Flight & Polarized Neutron Reflectometer, TPNR)
7	中子标准测试束线(Neutron Standard Test Beamline, NSTB)
8	自旋回波小角中子散射谱仪(Spin Echo Small Angle Neutron Scattering Spectrometer, SESANS)
9	纵向中子共振型自旋回波谱仪(Longitudinal Neutron Resonance Spin Echo Spectrometer, LNRSET)
10	热中子三轴谱仪(Thermal Neutron Triple Axis Spectrometer, TTAS)
11	超小角中子散射谱仪(Ultra-Small Angle Neutron Spectrometer, USANS)
12	中子衍射工程应力谱仪(High-temperature Engineering Tensile Spectrometer, HETU)
13	超长小角中子散射谱仪(Ultra-long Small-angle Neutron Spectrometer, LUOSHU)
14	热中子照相装置(Thermal Neutron Radiography Facility, TNR)
15	冷中子照相装置(Cold Neutron Radiography Facility, CNR)
16	冷中子深度分析仪(Cold Neutron Depth Profiler, DP)
17	瞬发伽马中子活化分析仪(Prompt Gamma Neutron Activation Analysis, PGNA)

3.1 中子散射实验研究

中子具有不带电荷、强穿透力和磁矩、对轻元素敏感等特点,是研究材料结构和动力学演化、内部残余应力、磁结构信息等的理想工具。这些特点使中子散射技术在物理、化学、材料、生物、工程等领域发

挥着其他手段无法取代的作用^[30-31]。依托建成的中子科学平台,目前已陆续开展:

- 1) 依托中子应力分析谱仪的高温合金涡轮盘残余应力分析,获得高温合金三维宏观残余应力^[32];
- 2) 依托高压中子衍射谱仪的 sp^3 碳基材料制备工艺研究,明确了制备反应的具体路径^[33];
- 3) 依托高分辨中子衍射谱仪的Na离子电池材

料研究,获得 Na_3OX 材料具有的结构容忍性,支撑全固态Na离子电池研究^[34];

- 4) 依托飞行时间极化中子反射谱仪的磁性多层膜材料测量,获得多层膜共振频率与交换偏置效应的关联性^[35];

建设完成的部分先进中子谱仪如图8~11所示。

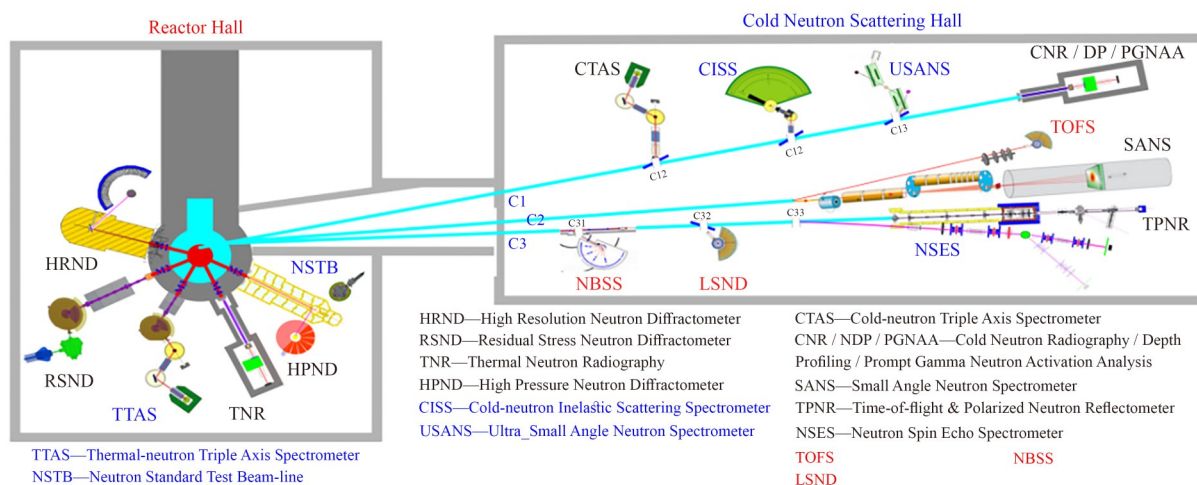


图7 中国绵阳研究堆中子科学平台谱仪布局(彩图见网络版)
Fig.7 The layout of instruments in neutron science platform of CMRR (color online)



图8 中子应力谱仪实物图^[36](彩图见网络版)
Fig.8 Snapshot of residual stress neutron diffractometer^[36] (color online)



图10 冷中子三轴谱仪实物图^[38](彩图见网络版)
Fig.10 Snapshot of cold neutron triple-axis spectrometer^[38] (color online)

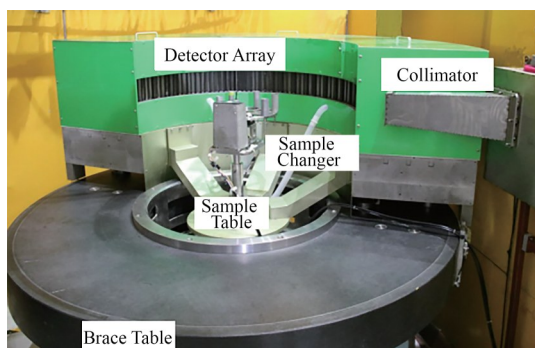


图9 高分辨中子衍射谱仪实物图^[37](彩图见网络版)
Fig.9 Snapshot of high resolution neutron diffractometer^[37] (color online)



图11 高压中子衍射谱仪实物图^[39](彩图见网络版)
Fig.11 Snapshot of high pressure neutron diffractometer^[39] (color online)

3.2 中子成像研究

利用中子束穿透物体时的衰减情况,探测物体内部宏观及亚宏观结构及缺陷。由于中子与物质相互作用的特殊性质,中子成像适合重金属包裹下的轻材料检测和材质分布、同位素鉴别、放射性材料检测等,在军事、核工业、航天、生物、农业和医学等领域有广泛应用。

依托CMRR堆,已建成热中子成像装置与冷中子成像装置(图12、13)^[40-41]。依托建成的成像装置,已先后开展了典型结构部件(图14)^[40]、U-10Zr合金燃料(图15)^[42]、发动机叶片残余型芯(图16)^[43]的中子无损检测,为先进核能研发、国防工业发展提供了先进的测量研究手段。

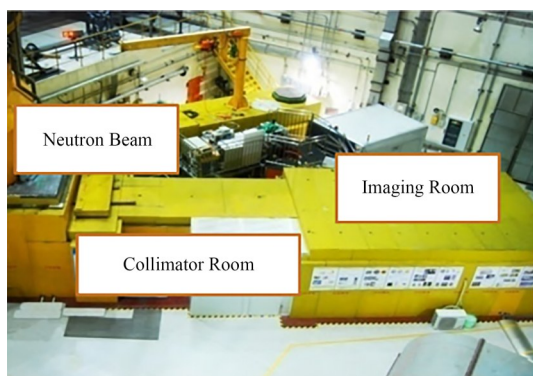


图12 热中子照相装置示意图^[40](彩图见网络版)
Fig.12 Schematic diagram of the thermal neutron imaging device^[40] (color online)

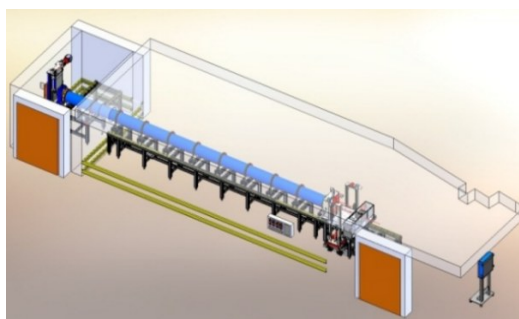


图13 冷中子照相装置示意图^[41]
Fig.13 Schematic diagram of the cold neutron imaging device^[41]

4 结语

目前,CMRR堆配套设施已基本建成,可开展包括燃料和材料辐照考核、放射性医用同位素生产与中子散射科学研究等工作。长期稳定的反应堆及其 neutron 束流,能为我国先进核能自主研发、核技术产业化与核能科学基础研究奠定了坚实基础。

未来几年,CMRR将持续提升反应堆稳定运行

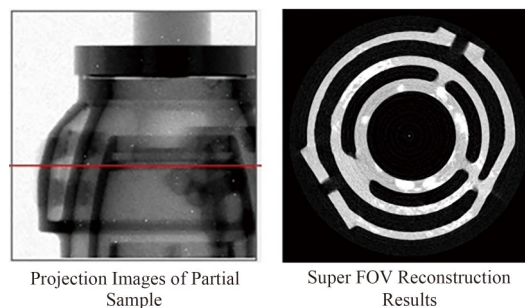


图14 典型结构部件中子照相检测图像^[40]
Fig.14 Results of neutron radiography for typical structural components^[40]

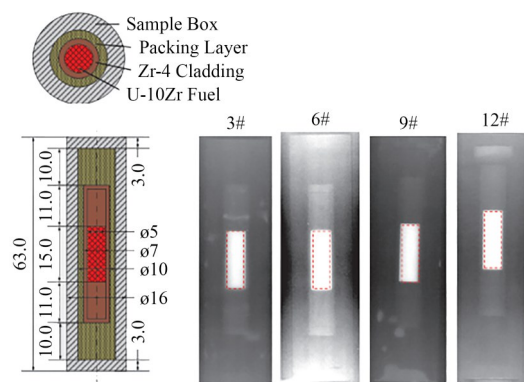


图15 U-10Zr合金燃料辐照后中子照相检测^[42](彩图见网络版)
Fig.15 Neutron radiography inspection of U-10Zr alloy fuel after irradiation^[42] (color online)



图16 叶片残余型芯中子照相检测图像^[43]
Fig.16 Inspection image of leaf residual core by neutron radiography^[43]

天数,提升反应堆有效利用率;在燃料与材料辐照考核方面,为满足面向新质反应堆辐照需求,将加快提升反应堆辐照与辐照后检测能力;在国产医用同位素研发方面,将提升已有医用同位素产能,生产更多类型医用同位素;在中子科学应用方面,将不断推动大科学装置的共建共享。欢迎国内外科院所、大学、企事业单位及其他学术组织利用CMRR堆及其科学平台共同开展基础研究和应用研发。

作者贡献情况 郭玉川负责基于CMRR堆已开展工作收集与材料整理,负责文章撰写;钱达志负责论

文总体框架设计,负责论文修改与最终定稿;魏洪源负责配合论文修改与最终定稿;屠小青负责配合文章撰写与文章校对。

参考文献

- Desandre C, Porte P. Irradiation and fundamental research reactors[R]. 1992: 338-347.
- Gillemot F. Study of irradiation effects at the research reactor[J]. *Strength of Materials*, 2010, **42**(1): 78 - 83. DOI: 10.1007/s11223-010-9191-7.
- 郭广平, 陈启芳, 邬冠华. 中子照相技术及其在无损伤检测中的应用研究[J]. *失效分析与预防*, 2014, **9**(6): 388 - 393. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6214.2014.06.0013. GUO Guangping, CHEN Qifang, WU Guanhua. Review of neutron radiographic technology and its applications in NDT[J]. *Failure Analysis and Prevention*, 2014, **9**(6): 388 - 393. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6214.2014.06.0013.
- Berger H. Advances in neutron radiographic techniques and applications: a method for nondestructive testing[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2004, **61**(4): 437 - 442. DOI: 10.1016/j.apradiso.2004.03.066.
- Richards W J, Barrett J R, Springgate M E, *et al.* Neutron radiography inspection of investment castings[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2004, **61**(4): 675 - 682. DOI: 10.1016/j.apradiso.2004.03.122.
- Jeffrey K, Parsonnet V. Cardiac pacing, 1960 - 1985: a quarter century of medical and industrial innovation[J]. *Circulation*, 1998, **97**(19): 1978 - 1991. DOI: 10.1161/01.cir.97.19.1978.
- 汪进, 魏世平, 金鸣, 等. 同位素电池研发与应用进展[J]. *核科学与工程*, 2024, **44**(1): 224-232. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2024.01.029. WANG Jin, WEI Shiping, JIN Ming, *et al.* The progress in the study and application of radioisotope batteries[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2024, **44**(1): 224-232. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2024.01.029.
- 张华明, 罗顺忠, 刘国平, 等. 中国工程物理研究院同位素技术研究与应用进展[J]. *同位素*, 2011, **24**(S1): 116 - 120. ZHANG Huaming, LUO Shunzhong, LIU Guoping, *et al.* Research and application progress of isotope technology in China Academy of Engineering Physics[J]. *Journal of Isotopes*, 2011, **24**(S1): 116 - 120.
- McIntyre G J, Holden P J. Neutron scattering at the OPAL research reactor[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, **746**: 012001. DOI: 10.1088/1742-6596/746/1/012001.
- Pham Ngoc Son, Cao Dong Vu, Vuong Huu Tan, *et al.* An overviews of reactor neutron beam applications and some results at Dalat research reactor[R]. 2021.
- 孙光爱, 刘栋, 龚建, 等. 中国绵阳研究堆CMRR中子散射平台及应用[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2021, **51**(9): 89 - 99. DOI: 10.1360/SSPMA-2021-0096. SUN Guang'ai, LIU Dong, GONG Jian, *et al.* The neutron scattering platform of China Mianyang Research Reactor (CMRR) and recent applications[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2021, **51**(9): 89 - 99. DOI: 10.1360/SSPMA-2021-0096.
- 丁文杰, 王少华, 高娇, 等. 板状燃料组件流道部分堵塞的安全边界研究[J]. *强激光与粒子束*, 2022, **34**(5): 056003. DOI: 10.11884/HPLPB202234.210508. DING Wenjie, WANG Shaohua, GAO Jiao, *et al.* Safety boundary of flow channel partial blockage in plate-type fuel assembly[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, **34**(5): 056003. DOI: 10.11884/HPLPB202234.210508.
- Sakurai F, Horiguchi Y, Kobayashi S, *et al.* Present status and future prospect of JRR-3 and JRR-4[J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2002, **311**(1 - 2): 7 - 13. DOI: 10.1016/S0921-4526(01)01048-1.
- 马振泽. CMRR多功能研究堆的安全特性分析[C]. 中国工程物理研究院科技年报, 成都: 四川科学技术出版社, 2000. MA Zhenze. Analysis of safety characteristics of CMRR multi-purpose research reactor[C]. *Annual Report of Science and Technology, China Academy of Engineering Physics*, Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2000.
- 段世林. CMRR堆一回路冷却系统流动阻力特性分析[C]. 中国工程物理研究院科技年报, 成都: 四川科学技术出版社, 2000. DUAN Shilin. Analysis of flow resistance characteristics in the primary cooling system of CMRR[C]. *Annual Report of Science and Technology, China Academy of Engineering Physics*, Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2000.
- 徐海龙, 黄丽, 张文, 等. 抗辐照材料研究进展[J]. *稀有金属材料与工程*, 2023, **52**(5): 1661 - 1672. XU Hailong, HUANG Li, ZHANG Wen, *et al.* Progress of irradiation-resistance materials[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2023, **52**(5): 1661 - 1672.
- 薛飞, 王忆, 刘向兵, 等. 核电材料辐照损伤的多尺度高

- 通量计算模拟[J]. 装备环境工程, 2022, **19**(1): 001-010. DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.01.001.
- XUE Fei, WANG Yi, LIU Xiangbing, *et al.* Radiation damage of nuclear power materials: a review of the multi-scale, high-throughput, simulations[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, **19**(1): 001-010. DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.01.001.
- 18 我国将开展未来核燃料辐照性能考核[N]. 上海大中型电机, 2018(4): 29.
China will conduct irradiation performance assessment of future nuclear fuels[N]. Shanghai Large and Medium-sized Electric Motors, 2018(4): 29.
 - 19 Sun Y, Huo H Y, Wu Y, *et al.* Swelling behavior detection of irradiated U-10Zr alloy fuel using indirect neutron radiography[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2016, **837**: 23 - 27. DOI: 10.1016/j.nima.2016.08.059.
 - 20 袁姝, 冯琦杰, 郭海兵, 等. 铝基碳化硼材料堆内辐照方案设计[C]. 第八届北京核学会核应用技术学术交流会议论文集, 2012.
YUAN Shu, FENG Qijie, GUO Haibing, *et al.* Design of irradiation scheme for aluminum matrix boron carbide materials[C]. Proceedings of the 8th Beijing Nuclear Society Nuclear Application Technology Academic Exchange Conference, Atomic Energy Science and Technology, 2012.
 - 21 Ye X P, Hu J B, Gu Y Q, *et al.* Effects of pre-stress on the mechanical properties and microstructure of neutron-irradiated high-purity aluminum[J]. Journal of Nuclear Materials, 2023, **573**: 154126. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2022.154126.
 - 22 Huang Q Y, Wang X Y, Sun S H, *et al.* Development of reduced activation ferritic/martensitic steels in China[J]. Journal of Nuclear Materials, 2022, **568**: 153887. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2022.153887.
 - 23 龙兴贵. 反应堆在线辐照产氚实验考核平台研究进展[C]. 第二届中国氚科学与技术学术交流会. 第二届中国氚科学与技术学术交流会论文集, 2017.
LONG Xingguo. Progress in the development of online irradiation tritium production experimental evaluation platform for reactors[C]. Proceedings of the 2nd China Tritium Science and Technology Academic Exchange Conference, 2017.
 - 24 Li R D, Yang X, Wang G B, *et al.* An in-pile experimental loop for the irradiation of tritium breeding ceramics in China Mianyang Research Reactor (CMRR) [J]. Fusion Engineering and Design, 2021, **164**: 112192. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2020.112192.
 - 25 李琦, 杨玥. 全球放射性医用同位素生产与需求现状分析[C]. 中国核学会2021年学术年会. 中国核科学技术进展报告, 2021. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2021.067002.
LI Qi, YANG Yue. Current status of global medical radioisotope production and demand[C]. The 2021 Academic Annual Conference of the Chinese Nuclear Society. Progress Report on Nuclear Science and Technology in China, 2021. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2021.067002.
 - 26 彭述明, 杨宇川, 杨夏, 等. 反应堆产医用同位素及药物的创新发展研究[J]. 中国工程科学, 2024(2): 224 - 233. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2024.02.009.
PENG Shuming, YANG Yuchuan, YANG Xia, *et al.* Innovative development of reactor-produced radionuclides and radiopharmaceuticals[J]. Chinese Engineering Science, 2024(2): 224 - 233. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2024.02.009.
 - 27 彭述明, 杨宇川, 谢翔, 等. 我国堆照医用同位素生产及应用现状与展望[J]. 科学通报, 2020, **65**: 3526 - 3537. DOI: 10.1360/TB-2020-0374.
PENG Suming, YANG Yuchuan, XIE Xiang, *et al.* Current status and prospects of reactor produced medical radioisotopes in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, **65**: 3526 - 3537. DOI: 10.1360/TB-2020-0374.
 - 28 赵鹏, 卓连刚, 郭啸宇, 等. 利用镧系树脂制备无载体¹⁶¹Tb[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2022, **42**(6): 5. DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20220217-00049.
ZHAO Peng, ZHUO Liangang, GUO Xiaoyu, *et al.* Preparation of no-carrier-added ¹⁶¹Tb by lanthanide resin [J]. Chinese Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging, 2022, **42**(6): 5. DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20220217-00049.
 - 29 Sun G G, Zhang C S, Chen B, *et al.* A new operating neutron scattering facility CMRR in China[J]. Neutron News, 2016, **27**(4): 21 - 26. DOI: 10.1080/10448632.2016.1233018.
 - 30 刘栋, 孙光爱, 彭述明. 中子散射技术在化学研究中的应用[J]. 中国科学: 化学, 2023, **53**(11): 2237 - 2249. DOI: 10.1360/SSC-2023-0117.
LIU Dong, SUN Guang'ai, PENG Shuming. Applications of neutron scattering techniques in investigations of chemistry[J]. Scientia Sinica (Chimica), 2023, **53**(11): 2237 - 2249. DOI: 10.1360/SSC-2023-0117.

- 31 孙嘉程, 陈喜平, 谢雷, 等. 中国绵阳研究堆高压中子衍射谱仪在材料研究中的应用[J]. 高压物理学报, 2024(3): 114 - 123. DOI: 10.11858/gywlxb.20230790.
SUN Jiacheng, CHEN Xiping, XIE Lei, *et al.* Application of the high-pressure neutron diffraction spectrometer at the Mianyang Research Reactor in material research[J]. Chinese Journal of High Pressure, Physics, 2024(3): 114 - 123. DOI: 10.11858/gywlxb.20230790.
- 32 Zhang Z W, Feng Y F, Tan Q, *et al.* Residual stress distribution in Ni-based superalloy turbine discs during fabrication evaluated by neutron/X-ray diffraction measurement and thermomechanical simulation[J]. Materials & Design, 2019, **166**: 107603. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.107603.
- 33 Wang Y J, Dong X, Tang X Y, *et al.* Pressure-induced Diels - alder reactions in C_6H_6 - C_6F_6 cocrystal towards graphane structure[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2019, **58**(5): 1468 - 1473. DOI: 10.1002/anie.201813120.
- 34 Sun Y L, Wang Y C, Liang X M, *et al.* Rotational cluster anion enabling superionic conductivity in sodium-rich antiperovskite Na_3OBH_4 [J]. Journal of the American Chemical Society, 2019, **141**(14): 5640 - 5644. DOI: 10.1021/jacs.9b01746.
- 35 Mao M, Zhou R, Shen J, *et al.* Exchange bias adjust resonance frequency in FeNi/FeMn nanofilm based on polarized neutron reflectometer[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2020, **507**: 166853. DOI: 10.1016/j.jmmm.2020.166853.
- 36 Li J, Wang H, Sun G G, *et al.* Neutron diffractometer RSND for residual stress analysis at CAEP[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2015, **783**: 76 - 79. DOI: 10.1016/j.nima.2015.02.026.
- 37 Zhang J, Xia Y, Wang Y, *et al.* High resolution neutron diffractometer HRND at research reactor CMRR[J]. Journal of Instrumentation, 2018, **13**(1): T01009. DOI: 10.1088/1748-0221/13/01/t01009.
- 38 Song J M, Luo W, Liu B Q, *et al.* Kumpeng: a cold neutron triple-axis spectrometer at CMRR in China[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, **968**: 163929. DOI: 10.1016/j.nima.2020.163929.
- 39 Xie L, Chen X P, Fang L M, *et al.* Fenghuang: High-intensity multi-section neutron powder diffractometer at CMRR[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, **915**: 31 - 35. DOI: 10.1016/j.nima.2018.10.002.
- 40 王胜, 李航, 罗昕, 等. 研究堆直接引出裂变中子的超视场成像技术研究[J]. 核技术, 2023, **46**(3): 030201. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.030201.
WANG Sheng, LI Hang, LUO Xin, *et al.* Super field of view neutron imaging by fission neutrons elicited from research reactor[J]. Nuclear Techniques, 2023, **46**(3): 030201. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.030201.
- 41 唐科, 霍合勇, 李航, 等. 冷中子照相装置及初步实验[C]. 中国电子学会, 中国核学会核电子学与核探测技术分会. 第十七届全国核电子学与核探测技术学术年会论文集. 2014: 396 - 402.
TANG Ke, HUO Heyong, LI Hang, *et al.* Cold neutron radiography facility and preliminary experiments[C]. Chinese Institute of Electronics, Proceedings of the 17th National Conference on Nuclear Electronics and Nuclear Detection Technology, 2014: 396 - 402.
- 42 孙勇, 霍合勇, 吴洋, 等. 辐照后 U-10Zr 合金中子间接成像装置研制与实验检测[J]. 核科学技术与应用, 2017, **10**(1): 115 - 121.
SUN Yong, HUO Heyong, WU Yang, *et al.* Development and experimental testing of neutron indirect imaging device for irradiated U-10Zr alloy[J]. Nuclear Science and Technology and Application, 2017, **10**(1): 115 - 121.
- 43 王倩妮, 郭广平, 顾国红, 等. 航空发动机叶片残余型芯中子照相检测[J]. 失效分析与预防, 2021(1): 76 - 82. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6214.2021.01.008.
WANG Qianni, GUO Guangping, GU Guohong, *et al.* Neutron radiography detection of residual core in turbine blades[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2021(1): 76 - 82. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6214.2021.01.008.