

文章编号: 1007-4627(2017)03-0275-09

HIAF及CiADS项目进展与展望

肖国青, 徐珊珊, 王思成

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

摘要: 强流重离子加速器(HIAF)及加速器驱动嬗变研究装置(CiADS)是“十二五”期间国家优先安排建设的16项中的重大科技基础设施。本文介绍了HIAF及CiADS项目意义、科学目标、装置构成及主要特点,对项目实施进展进行了阶段性总结,并对未来发展进行了展望。

关键词: 强流重离子加速器; 加速器驱动嬗变研究装置; 重离子; 加速器; 嬗变

中图分类号: TL56 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.34.03.275

1 引言

为增强我国原始创新能力,实现重点领域跨越、保障科技长远发展,实现从科技大国迈向科技强国的目标,国务院于2013年2月23日颁布实施《国家重大科技基础设施建设中长期规划(2012—2030年)》(国发[2013]8号)。规划明确指出:“十二五”时期,在我国科技发展急需、具有相对优势和科技突破先兆显现的领域中,综合考虑科学目标、技术基础、科研需求和人才队伍等因素,优先安排16项重大科技基础设施建设,其中包括:强流重离子加速器装置(High Intensity heavy-ion Accelerator Facility, HIAF)^[1]和加速器驱动嬗变研究装置(China initiative Accelerator Driven System, CiADS)^[2]。HIAF及CiADS项目法人单位均为中国科学院近代物理研究所,建于广东省惠州市黄埠镇,广东省提供配套支持。2015年底,HIAF及CiADS项目建议书获得国家发改委立项批复,其中:HIAF项目批准经费15.0137亿元(含中国科学院匹配5000万元),建设周期7年^[1, 3];CiADS项目批准经费17.995亿元(含中国科学院匹配5000万元),建设周期6年^[2, 4]。

2 HIAF装置

重离子加速器是用人工方法产生高速离子束流的装置,是探索基本相互作用、物质结构和宇宙演化的重要工具,也是研发关乎经济社会发展和国家安全的先进核技术的平台。高流强、高能量、高束团功率是重离子

加速器的发展趋势,束流指标愈先进就愈有可能引领相关科学研究并取得重大成果。实现高能量的最佳途径是同步加速器,典型代表是欧洲大型强子对撞机(Large Hadron Collider, LHC)^[5];实现高流强的最佳路线是直线加速器,典型代表是在建的美国稀有同位素束流装置(Facility for Rare-isotope Beams, FRIB)^[6];实现高束团功率的最佳方案是环形同步加速器,典型代表是在建的德国反质子和离子研究装置(Facility for Antiproton and Ion Research, FAIR)^[7]。在今后10年内,德国FAIR、美国FRIB和法国的在线放射性离子产生系统(Système de Production d'Ions Radioactifs en Ligne-2, SPIRAL2)^[8]等国际上新一代重离子加速器装置陆续投入运行,与之相比,我国同步建设的HIAF装置,在设计上集成了新一代重离子加速器装置的优点,能够提供高流强、宽能量范围、种类丰富的稳定核和放射性离子束流以及高功率重离子束团。建成后,HIAF与国际上同类装置比较,能够提供最强的中低能重离子束流、产生最高功率的短脉冲高能重离子束团,开展高精度储存环物理实验(如图1)^[9, 10]。

HIAF的主要科学技术目标是认识原子核内有效相互作用、理解宇宙中重元素的来源、解决交叉应用学科辐照效应相关的关键技术问题等,具体详述如下。

(1) **认识原子核内有效相互作用。**原子核是由强相互作用将质子和中子聚合在一起的量子多体系统。目前,对核内长程强相互作用的认知有限,只能假定各种有效相互作用形式,采用不断修正的唯象模型描述原子

收稿日期: 2017-08-01; 修改日期: 2017-09-05

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA3000000); 国家自然科学基金重点项目(11735017); 国家自然科学基金重大研究计划项目(91426301, 91426303); 国家杰出青年科学基金资助项目(11525523); 国家重点研发计划(2016YFA0400500); 国家自然科学基金国家(地区)合作与交流项目(11611130016)

作者简介: 肖国青(1962-), 男, 河北承德人, 研究员, 博士生导师, 从事核物理及核技术应用研究; E-mail: xiaogq@impcas.ac.cn.

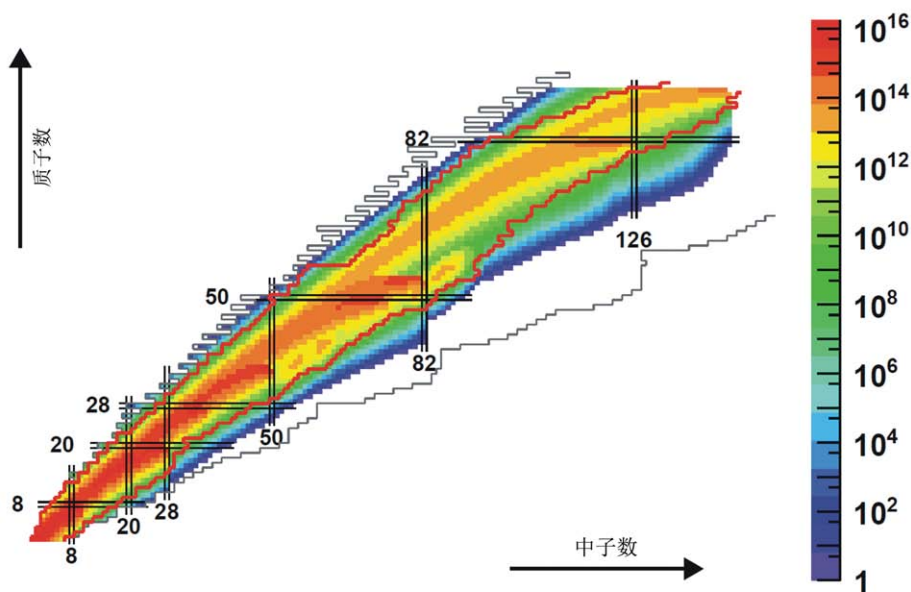


图 1 (在线彩图) 依据 HIAF 设计指标, 计算的核素最佳产额分布
不同颜色代表每天能够产生的核素数量, 红色实线表示已知质量核素的边界线, 黑色锯齿状实线为理论预言的质子和中子滴线。

核的结构和性质。远离稳定线原子核的特点是价核子的束缚能低、连续态的耦合影响大、同位旋效应显著, 可能导致核内有效相互作用发生显著变化, 凸现某种成分、呈现新的相互作用形式^[11, 12]。我们将研究原子核幻数和壳层结构在远离稳定线核区的演化、奇特原子核的晕结构和集团结构、弱束缚核参与的反应机制, 确定有效相互作用中三体力、张量力和同位旋相关的成分, 探索核内有效相互作用的新形式, 发展描述弱束缚核性质的理论。此外, 利用极强低能重离子束流, 尝试合成新元素、研究超重元素化学性质、探索理论预言的超重核稳定岛^[1, 3]。

(2) **理解宇宙中从铁到铀重元素的来源。**宇宙大爆炸初期只产生了氢、氦和少量的锂, 其他元素是在各种天体场所通过核过程生成的。目前, 人们已理解了铁以下元素合成的机制和天体场所。天体物理学界普遍认为快中子俘获过程应该产生宇宙中约一半的从铁到铀的元素、以及原子量大于 209 的全部元素。但是, 尚不清楚快中子俘获过程发生的天体环境和场所, 也不确定核合成的具体路径。美国物理学界将“从铁到铀的元素是如何产生的”列为本世纪待解决的 11 个重大物理问题之一^[11, 12]。我们将产生位于快中子俘获路径上的丰中子核素, 系统测量它们的质量和寿命以及相关反应率, 利用实验数据模拟重元素的丰度分布, 通过比较模拟和观测结果, 探索快中子俘获的路径、时间标度、物理环境和天体场所, 理解宇宙中从铁到铀重元素的来源^[1, 3]。

(3) **解决与粒子辐射相关的关键技术。**重离子在物

质里的能量沉积率高、辐照效应强。依托 HIAF, 建造离子辐照效应研究平台, 研究重离子在生物体、半导体和材料中的辐照效应和机制, 解决生物、医学以及材料等领域与辐照效应相关的技术问题, 促进我国社会经济相关领域的发展^[1, 3]。

HIAF 由加速器系统、实验终端系统以及相关配套设施组成, 涉及多个关键硬件系统, 如图 2 所示。加速器系统包括强流超导离子源 (SECR)、强流超导直线加速器 (iLinac)、增强器 (BRing), 以及连接各部分之间的束流传输线、实验终端、配套设施等。HIAF 总体参数及特点见表 1。

我们将产生远离稳定线原子核, 以精确系统测量远离稳定线原子核质量为重点, 并利用其他实验方法获取弱束缚核结构和反应数据, 研究原子核壳层结构在非稳定核区的演变、晕结构和集团奇特结构、弱束缚核反应机制、同位旋对称性等, 探索原子核内有效相互作用的新形式, 发展和完善描述弱束缚核性质的理论; 尝试合成新元素, 研究超重元素的化学性质, 探索理论预言的超重核稳定岛; 模拟重元素的丰度分布, 比较模拟和观测结果, 探索重元素合成的路径、时间标度、物理环境和天体场所, 理解从铁到铀重元素的起源。为此, 我们将设计建造低能核结构谱仪、放射性束流线和外靶实验终端、高精度环形谱仪、电子离子复合共振谱仪、强流离子束辐照终端等实验测量装置。表 2 给出了拟建测量装置的构成、性能、先进性及技术可行性。

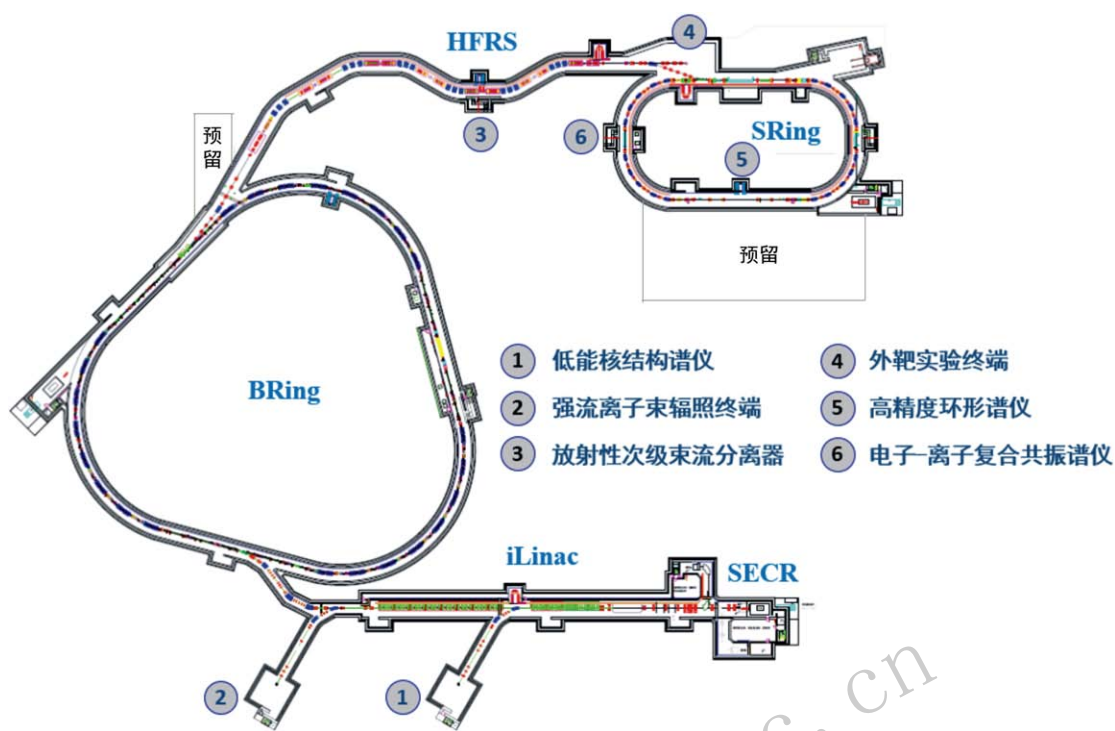


图 2 (在线彩图) HIAF总体布局图

表 1 HIAF的总体参数及特点

HIAF 分系统	周长/m	离子能量	流强	特点
SECR ^[13]	/	14 keV/u	1.7 emA (²³⁸ U ³⁴⁺)	第四代强流超导离子源; 微波工作频率40~60 GHz。
iLinac	105	17 MeV/u (²³⁸ U ³⁴⁺) 48 MeV/u(H ₂ ⁺)	1.0 emA (²³⁸ U ³⁴⁺) 0.6 emA (H ₂ ⁺)	(1) 超导直线加速器, 工作频率81.25、162.5 MHz; (2) 提供质子及重离子; (3) 最大质荷比A/Z = 7。
BRing	530.8	最大磁刚度34 Tm 800 MeV/u(²³⁸ U ³⁴⁺) 9.3 GeV (p)	3.0×10 ¹⁰ (²³⁸ U ³⁴⁺) 2.0×10 ¹² (p)	(1) 大接受度, 双向涂抹注入; (2) 束团压缩, 短脉冲束快引出; (3) 长周期均匀慢引出; (4) 磁场上升率6~10 T/s。
HFRS	152	最大磁刚度15 Tm 1.5 GeV/u (A/Z = 2) 1.0 GeV/u (²³⁸ U ⁹²⁺)	3.0×10 ¹⁰ / ²³⁸ U ³⁴⁺) 1.0×10 ⁷⁻⁸ ppp(放射性 次级束流)	1. 高磁刚度; (2) 大接受度; 3. 大孔径超导磁铁; (4) 高分辨本领。
SRing ^[14]	273.5	最大磁刚度15 Tm 1.5 GeV/u (A/Z = 2) 1.0 GeV/u (²³⁸ U ⁹²⁺)	1.0×10 ⁷ ppp(放射性次 级束流) 10 ^{9~10} ppp(高电荷态 稳定重离子束)	(1) 多功能实验环, 可以开展多种原子物理、 原子核物理实验; (2) 多运行模式, 多种实验探测器; (3) 大孔径二极铁磁铁; (4) 用电子冷却与随机冷却手段制备高流强、 高品质的放射性束; (5) 高质量测量分辨率: 采用双TOF测量方 法, 高阶项校正方法。

表 2 实验测量装置的构成、性能、先进性及可行性

HIAF装置	构成	科学目标和性能	先进性	可行性	
低能核结构谱仪	(1) 充气反冲核分离器	差分真空抽气系统、转靶系统、二极磁铁、小角度偏转铁、四极透镜、气体系统、目标核素离子收集测量系统。	利用熔合蒸发反应产生缺中子核素； 探索核素和元素存在极限； 分离和传输效率大于40%； 单原子核鉴别和测量。	缺中子核和超重核合成、核结构研究、超重元素性质研究先进实验平台； 与国际上同类装置相比，性能相当。	已有同类装置，技术成熟，拟建装置性能更高。
	(2) 丰中子核分离器	转靶系统、气体单元、六极离子导向器、射频四极冷却聚束器、中性化池与激光共振电离装置、质量分析器、多反射飞行时间质谱仪、彭宁离子阱、衰变谱学终端、共线激光谱学终端等。	利用重核间多核子转移反应，产生、鉴别、分离丰中子重核素和极丰中子超重核素； 探索超重核稳定岛、模拟快中子俘获过程； 具有质量数和核电荷数选择能力； 分离和传输效率0.1%~5%、 分离时间小于100 ms。	独具特色的丰中子重核素和超重核素(元素)合成和性质研究、超重原子结构研究综合实验平台； 国际上首台利用多核子转移反应研究丰中子重核素和超重核素的装置，国际领先。	技术路线独创，完成关键部件设计，完成方案国际评估。与美国MSU和日本RIKEN联合研制。
放射性束流线和放外靶验终端	核素产生初级靶系统、预分离器、主分离器、离子鉴别测量系统、实验测量装置等。	利用高能炮弹碎裂反应、 ^{238}U 弹核裂变反应产生远离稳定线核素，制备放射性离子束流；发现奇异结构现象、研究弱束缚核反应机制等； 核素分离传输效率大于10%， 传输时间小于100 μs 。	产生、分离、选择不稳定原子核的先进实验平台； 国际上能量最高的放射性束流线之一，与德国FAIR的高能放射性束流线Super-FRS性能相当。	已研制并运行着两条同类放射性束流装置，技术成熟，拟建装置性能更高。	
高精度环形谱仪	(1) 储存环等时性质量谱仪	工作在等时性模式下的储存环、两套飞行时间(TOF)探针。每套探针包括：探测器系统、真空系统、电源系统、二极磁铁、控制系统、数据获取系统。	精确测量离子在储存环中的回旋周期和速度，从而确定原子核的质量；研究原子核结构、对称性、天体环境中核过程；单离子灵敏； 测量效率大于30%； 原子核质量测量精度 $\sim 10^{-7}$ 。	精确测量短寿命原子核质量国际领先实验平台； 在国际上，将引领储存环质谱术。	已掌握建造探测器技术。将在CSR上完成双TOF等时性谱仪原理验证。
	(2) 储存环肖特基谱仪	纵向肖特基探针、横向肖特基探针、数据获取系统。	精确测量短寿命原子核的质量、寿命、和奇异衰变模式；研究原子核结构、对称性、天体环境中核过程； 单离子灵敏；测量效率大于30%； 质量精度 $\sim 10^{-8}$ ； 寿命测量极限 $\sim 10 \mu\text{s}$ 。	国际上测量原子核质量、寿命、奇异衰变模式最先进的实验平台； 首次将肖特基探针与储存环等时性工作模式相结合，引领国际储存环核谱学研究。	已研制了单离子灵敏肖特基探针样机，将在CSR上完成谱仪原理验证。
	(3) 储存环核反应谱仪	气体靶、差分真空系统、靶区探测轻离子的硅望远镜系统、靶区测量反应亮度的探测系统、直线段下游以及二极铁后测量类炮弹碎片的探测系统、数据获取系统。	基于逆运动学，测量(非)弹性散射和转移反应截面、核天体反应率； 研究原子核奇特结构、核反应机制、天体环境中核过程； 高效率、极低本底； 离子能量分辨好于1%、位置分辨好于1 mm。	极低本底条件下核反应研究先进平台，开展利用传统实验方法难以实现的核反应研究； 与拟建的FAIR上储存环核反应谱仪性能相当。	与GSI合作研制工作在极高真空条件下探测器。GSI已有同类装置，技术成熟。
电子-离子复合共振谱仪	低温电子靶：电子枪、收集器、引导和约束电子运动的磁系统、真空、高压； 磁谱仪； 高位置分辨复合离子探测器。	测量原子核基态自旋、电荷分布半径，检验强库仑场中QED效应； 快速电子能量调节范围： $0 \sim 10 \text{ keV}$ ； 质心系能量测量精度： $10^{-4} \sim 10 \text{ meV}$ ； 探测效率100%、位置分辨0.27 mm。	利用双电子共振复合方法，精细测量远离稳定线核素离子的(超)精细谱先进平台； 与拟建的FAIR上电子-离子复合共振谱仪性能相当。	在CSR上建立了同类装置，技术成熟，拟建装置性能更高。	
强流离子束辐照终端	离子束流配送系统、X-Y束流扫描系统、能量梯度衰减装置、应力/温度可控样品台、数据采集系统。	核能材料辐照效应及评价研究； 样品表面和纵向均匀辐照； 应力 $0 \sim 30 \text{ MPa}$ 、温度 $150 \sim 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ 可控； 辐照剂量 $\sim 0.1 \text{ dpa/h}$ 。	核能装置结构材料评价与筛选平台，建立自主知识产权核能材料快速评价与筛选的方法和标准； 国际领先水平。	已研制多台离子束流辐照效应装置，关键技术成熟	

HIAF 的国际竞争力: 能够提供最强的低能重离子束流、可开展高精度储存环物理实验。为了早出成果、出重大成果,基于HIAF优势,我们计划了两个DAY-ONE实验。

(1) **新元素合成。** 依托强流超导直线加速器,利用充气反冲核分离器,通过 $^{54}\text{Cr}+^{243}\text{Am}$ 反应尝试合成119号新元素。理论预言,利用该反应系统产生119号元素的截面约为0.001 pb。根据HIAF的设计束流指标,预期约50天可能产生一个119号元素。强流超导直线加速器和充气反冲核分离器将先期建成并投入运行,我们拟安排半年束流时间,争取实现新元素合成的重大突破。

(2) **短寿命原子核质量精确测量。** 待HIAF完全建成后,我们将从BRing引出高能 ^{86}Kr 束流,利用碎裂反应产生 ^{78}Ni 周围极丰中子核。放射性束流线选择目标核素、并将其注入SRing。利用双TOF探测器等时性质量谱仪精确测量 ^{78}Ni 周围核素的质量,提取单核子和双核子分离能,研究 $N=50$ 中子幻数随中子数的演化规律;约束快中子俘获初时阶段的核合成路径和时间标度,探索从铁到铀重元素的来源。该实验几乎利用了HIAF所有的核心设备,能够检验装置的整体能力。

中国科学院近代物理研究所和国内外相关单位经过4年多预研,已完成HIAF的方案设计及优化;开展了关键硬件技术攻关和样机研制,如超导ECR离子源、超导直线加速腔、超导二极磁铁、快Ramping薄壁真空室、磁合金加载高频腔等;完成了重点及难点研究项目的实验验证,如随机冷却实验研究;对部分关键实验终端的核心设备在现有装置兰州重离子冷却储存环上进行了测试研究,如质量测量双TOF探测器在CSR_e的测试研究等。在过去的两年中,各工作组邀

请相关领域的国内外专家,组织召开了一系列专题研讨会,深入研讨了实验测量装置的技术路线和建设方案、评估了关键技术的成熟度,逐步优化了实验测量装置的技术方案^[1, 3]。

HIAF建成后将为核物理和核天体物理基础研究创造国际领先水平的条件;为重离子束应用研究提供先进的实验平台;为核能开发、核安全及核技术应用提供理论、方法、技术和人才支撑。依托HIAF,将使我国重离子科学研究从“紧跟”走向“并行”、并逐步实现“引领”,形成在国际上具有重大影响的重离子科学研究中心。

3 CiADS装置

发展清洁、高效、安全、可靠的核裂变能,是解决未来能源供应、保障我国经济社会可持续发展的战略选择。然而,核裂变能可持续发展必须解决乏燃料的安全处理处置问题,这是我国乃至国际核能界都无法回避的重大问题,也是尚未解决的世界性挑战。加速器驱动次临界系统(Accelerator Driven Sub-critical System, ADS)的中子能谱硬、通量大、能量分布宽,嬗变长寿命核素能力强,可大幅降低核废料的放射性危害,实现核废料的最少化,被国际公认为是核废料处理最有前景的技术途径^[15-17]。

ADS系统由加速器、散裂靶和反应堆三大分系统组成。其工作原理是利用加速器产生的高能强流质子束轰击重核产生宽能谱、高通量中子作为外源来驱动次临界堆芯中裂变材料发生持续的链式反应,使得长寿命放射性核素最终变为非放射性的或短寿命的核素,并维持反应堆运行(图3)。

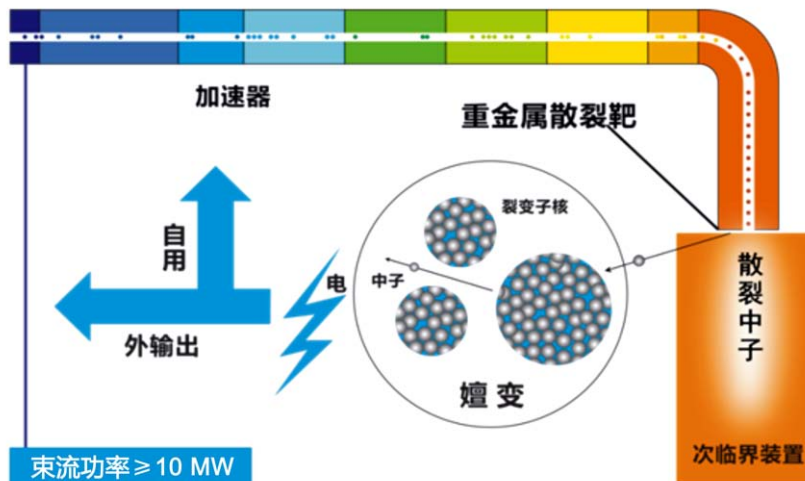


图3 (在线彩图) ADS原理示意图

目前,国际上尚未建成ADS装置。欧盟各国、美、日、俄等核能科技发达国家均制定了ADS中长期发展路线图,正处在从关键技术攻关逐步转入建设集成系统的ADS原理研究装置阶段,表3列出了国际上主要

的ADS研究装置及其设计参数。我国从20世纪90年代起开展ADS概念研究,在国家科技部、国家自然科学基金委员会及中国科学院等基金资助项目支持下开展了前期研究工作^[18, 19]。

表 3 国际ADS设计参数一览表(部分)

项目	加速器功率/MW	K_{eff}	堆功率/MW	中子通量/ (n/cm ² /s)	靶	燃料	
欧盟	MYRRHA	2.4 (600 MeV/4 mA)	0.955	85	10 ¹⁵	铅铋	MOX
	AGATE	6 (600 MeV/10 mA)	0.95~0.97	100	快, ~10 ¹⁵	钨	MOX
	EFIT	16 (800 MeV/20 mA)	~0.97	数百	快, ~10 ¹⁵	铅(无窗)	MA
俄罗斯	INR	0.15 (500 MeV/10 mA)	0.95~0.97	5	快	钨	MA/MOX
	NWB	3 (380 MeV/10 mA)	0.95~0.98	100	快, 10 ¹⁴ ~15	铅铋	UO ₂ /UN U/MA/Zr
	CSMSR	10 (1 GeV/10 mA)	0.95	800 cascade scheme	中间5 × 10 ¹⁵	铅铋	Np/Pu/MA 熔盐
日本	JAERI-ADS	27 (1.5 GeV/18 mA)	0.97	800	快	铅铋	MA/Pu/ZrN
韩国	HYPER	15 (1 GeV/10~16 mA)	0.98	1000	快	铅铋	MA/Pu

中国科学院于2011年针对第一阶段任务启动了战略性先导科技专项“未来先进核裂变能-ADS嬗变系统”(简称“ADS先导专项”),现已实现ADS强流超导质子直线加速器、重金属散裂靶、次临界反应堆三大系统关键技术突破:建成了国际首台ADS超导质子直线加速器示范样机,初步调试连续波束流达到25 MeV/0.17 mA,脉冲束流达到26.1 MeV/12.6 mA,指标达到国际领先水平,成为国际同行开展合作的研究平台;原创提出了颗粒流散裂靶概念,完成分项关键技术验证并建成国际首台颗粒流散裂靶原理样机,引致国际跟踪研究;建成国际首台ADS研究专用铅基临界/次临界双模式运行零功率装置并投入实验运行;建成规模化的铅铋合金技术综合实验回路;建成冷态铅基堆关键设备集成验证装置。ADS先导专项的实施为CiADS的建设奠定了技术基础^[2, 4, 20]。

CiADS的主要科学目标为:建成一台用于加速器驱动嬗变研究的ADS装置,能够基于此装置开展超导直线加速器、高功率散裂靶、次临界反应堆等系统稳定、可靠、长期运行的策略研究;研究各系统在耦合运行时对系统影响的特性,渐次进行从低功率到高功率的耦合运行,最终实现超导直线加速器、高功率散裂靶、次临界反应堆三大系统高功率耦合的技术突破;基于CiADS装置开展次锕系元素嬗变原理性实验、嬗变中子学、材料辐照特性等方面的研究;在CiADS装置设计、建设、调试、运行、实验的过程中,发展具有自

主知识产权的ADS系统设计软件,积累装置运行数据和基础科学数据,为最终设计建设加速器驱动嬗变工业示范装置奠定基础。

如图4所示,CiADS采用“超导直线加速器+高功率散裂靶+次临界反应堆”组合的技术路线,设计遵循高安全性、高可靠性和工程可达性,技术具备扩展到工业级的潜力。超导直线加速器由质子源、低能段传输线、射频四极加速器系统(RFQ)、中能段传输线、超导加速段、高能传输线和束流收集终端构成;高功率散裂靶采用原创性的固态颗粒流靶,可以有效解决高功率热移除问题,具备MW以上的工作能力,并具有升级到更高功率的潜力,具有良好的发展前景;次临界反应堆:采用液态铅铋作为冷却剂,主容器为中心留有散裂靶通道的半池式半回路式异形结构,能够在结构上同时实现与散裂靶的耦合和实体隔离,对堆芯结构设计具有低功率密度、高自然循环的特性,能够保证事故工况下次临界系统的安全^[2, 4]。

CiADS工程建设的总体目标是:建成国际上第一台加速器驱动的嬗变系统,发展和掌握强流质子加速器、高功率中子散裂靶、次临界快中子反应堆的单项核心技术,突破加速器散裂靶反应堆高功率耦合的技术瓶颈,实现ADS的原理和工程技术验证。CiADS的总体设计指标是:ADS系统耦合运行热功率(含加速器束流功率和次临界反应堆热功率)小于等于10 MW^[2, 4]。CiADS设计指标如表4所列。

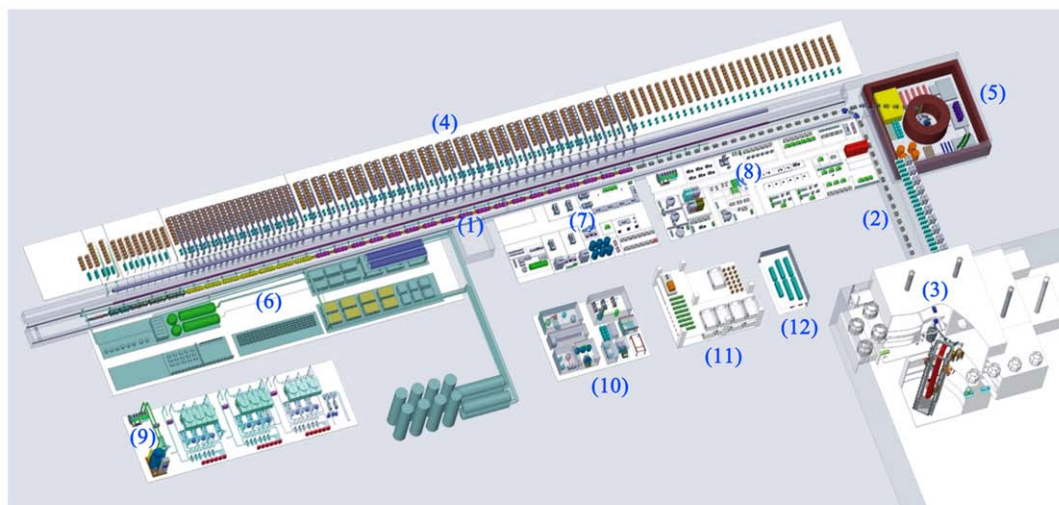


图4 (在线彩图) CiADS装置构成及布局

(1) 超导直线加速器; (2) 束靶耦合段; (3) 反应堆及散裂靶装置区; (4) 加速器设备厅; (5) 束流收集终端与散裂靶热试实验调试区; (6) 低温中心; (7) 加速器装配调试及工艺实验大厅; (8) 超导综合测调和维护大厅; (9) 冷却设备大厅; (10) 散裂靶及堆芯热工测调与维护区; (11) 辐化材料测试大厅; (12) 中心变电站。

表4 CiADS设计指标

CiADS项目		设计参数
ADS系统	总功率(包层+加速器)	10 MW
超导直线加速器	加速粒子	质子
	束流能量	250~500 MeV
	束流功率	2.5 MW
高功率散裂靶	可承受束流功率	≥ 2.5 MW
次临界堆芯/包层	加速器驱动下的次临界堆芯功率	> 7.5 MW

CiADS建成后将是世界上首个兆瓦级ADS, 将引领世界ADS研究的发展, 并逐步建成国际上设施最先进、涉及领域最全、以工业应用为目标的世界级ADS研究中心。

4 HIAF及CiADS项目实施进展

目前, 国家发改委已委托中国国际工程咨询公司完成对HIAF及CiADS项目可行性研究报告的专家审查; 广东省发改委已委托广州市国际工程咨询公司完成配套工程的可行性研究报告的专家审查。HIAF及CiADS项目可行性研究报告批复所需支持性函件中: 选址意见书、社会稳定风险评估、节能审查、环境评估报告审批过程文件、配套资金证明均已取得。用地预审材料已正式上报国土资源部。

根据工作计划进度安排, 已同步启动HIAF及CiADS项目初步设计工作。目前, HIAF及CiADS项目主体工程已完成装置区总平面规划图初步设计, 正

在开展工艺系统初步设计和工程概算编制。

同时, 根据国家核安全局及行业相关技术专家意见, 针对HIAF及CiADS项目的特殊性, 参考核电类项目, 制定了“2+N”的公众沟通方案, 完成了公众沟通第一阶段工作。科普宣传工作将根据项目建设需要持续开展, 目前装置的模型在广东省惠州市区办公地点长期展示, 随时供市民参观了解。

5 未来发展及展望

HIAF及CiADS项目计划于2017年11月底获得初步设计技术方案及概算批复, 力争2017年底开工建设, 两项目建成后将成为国际上具有重大影响的重离子科学研究中心及ADS研发中心。同时, HIAF及CiADS项目在设计中充分考虑了将来升级的空间和能力: HIAF在Bring引出口预留了开展高能量密度、核物质性质、超核等研究的实验终端。后期增建高能压缩环和高能电子加速器, 可以产生短脉冲重离子束、极化质子束、极化电子束, 为开展高能量密度物理研究以及高亮度、双极化电子重离子/质子碰撞实验提供先进平台; CiADS在建设方案和参数设计中保证了足够的灵活性, 为装置建成后开展各类实验研究保留了变化的能力。

除了HIAF及CiADS项目外, 中科院在广东还有建在东莞大朗镇的散裂中子源, 大亚湾和江门中微子实验项目。当前, 国家提出要提速粤港澳大湾区建设, 我们将组织有关研究所同高校、研究机构、企业一起, 围绕粤港澳大湾区发展布局, 共同推动粤港澳科创中心

建设, 研究综合性国家科学中心建设方案, 打造世界级重大科技基础设施集群, 代表国家在更高层次上参与全球科技竞争与合作。

致谢 感谢国家发展改革委员会、国家自然科学基金委员会、科技部等国家部委, 广东省、惠州市政府及各职能部门, 中国科学院高能物理研究所、合肥物质科学研究院、清华大学、北京大学等兄弟院校, 以及中国核工业集团、中广核集团等企业在项目推进过程中给予的大力支持和帮助; 感谢中国科学院近代物理研究所同仁对项目建设给予的支持和理解; 感谢 HIAF 及 CIADS 项目团队的努力工作和辛勤付出。

参考文献:

- [1] XIAO Guoqing, ZHAO Hongwei, XIA Jiawen, *et al.* Feasibility Study Report of the High Intensity Heavy-ion Accelerator Facility[R]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)
(肖国青, 赵红卫, 夏佳文, 等. 强流重离子加速器可行性研究报告[R]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2017.)
- [2] XU Hushan, HE Yuan, PAN Weimin, *et al.* Feasibility Study Report of the China initiative Accelerator Driven System[R]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)
(徐珊珊, 何源, 潘卫民, 等. 加速器驱动嬗变研究装置可行性研究报告[R]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2017.)
- [3] XIAO Guoqing, ZHAO Hongwei, XIA Jiawen, *et al.* Preliminary Design Report of the High Intensity Heavy-ion Accelerator Facility[R]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)
(肖国青, 赵红卫, 夏佳文, 等. 强流重离子加速器初步设计报告[R]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2017.)
- [4] XU Hushan, HE Yuan, PAN Weimin, *et al.* Preliminary Design Report of the China Initiative Accelerator Driven System[R]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, in press. (in Chinese)
(徐珊珊, 何源, 潘卫民, 等. 加速器驱动嬗变研究装置初步设计报告[R]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 印刷中.)
- [5] EVANS L, BRYANT P. Journal of Instrumentation, 2008, **3**(08): S08001.
- [6] WEI J, ARENIUS D, BERNARD E, *et al.* The FRIB Project – Accelerator Challenges and Progress[C]. HI-ATC2012, Chicago, USA, 2012: 51.
- [7] GUTBROD H H, AUGUSTIN I, EICKHOFF H, *et al.* FAIR-Baseline Technical Report, Executive Summary, 2006.
- [8] ARNOULD M, LEWITOWICZ M, EMLING H, *et al.* The Spiral 2 Project, Tours Symposium on Nuclear Physics VI, Sep 2006, Tours, France. AIP Press, 2007: 91.
- [9] MA X, WEN W Q, XIAO G Q, *et al.* Nucl Instr Meth B, 2017, **408**: 169.
- [10] YANG J C, XIA J W, XIAO G Q, *et al.* Nucl Instr Meth B, 2013, **317**: 263.
- [11] U.S. Department of Energy. The 2015 Long Range Plan for Nuclear Science, Reaching For The Horizon, 2015.
- [12] Writing Group of Development Strategies of Nuclear Physics and Plasma Physics. Development Strategies of China Science Disciplines: Frontier Subjects and Development Strategies of Nuclear Physics and Plasma Physics (Vol. 1: Volume of Nuclear Physics[M]. Beijing: Science Press, 2017. (in Chinese)
(核物理与等离子体物理发展战略研究编写组. 中国学科发展战略: 核物理与等离子体物理—学科前沿与发展战略(上册: 核物理卷)[M]. 北京: 科学出版社, 2017.)
- [13] SUN L, ZHAO H W, GUO J W, *et al.* Challenges for the Next Generation ECRIS[C]//Proceedings of HIAT2015, Yokohama, Japan.
- [14] WU B, YANG J C, XIA J W, *et al.* Nuclear Instr Meth A, 2017, in press.
- [15] OECD/NEA, Accelerator-driven systems (ADS) and fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles, 2002.
- [16] KADI Y, REVOL J P. Design of an Accelerator-driven System for the Destruction of Nuclear Waste, LNS0212002, 2001.
- [17] STANCULESCU A. Accelerator Driven Systems (ADS) and Transmutation of Nuclear Waste: Options and Trends, LNS015022, 2000.
- [18] HE Zuoxiu. World Sci-Tech R&D, 1996, **6**: 1. (in Chinese)
(何祚庥. 世界科技研究与发展, 1996, **6**: 1.)
- [19] DING Dazhao, FANG Shouxian, HE Zuoxiu. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 1997(2): 116. (in Chinese)
(丁大钊, 方守贤, 何祚庥. 中国科学院院刊, 1997(2): 116.)
- [20] Team of Strategic Priority Program on ADS. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2015(3): 393. (in Chinese)
(中科院ADS研究团队. 中国科学院院刊, 2015(3): 393.)

HIAF and CiADS National Research Facilities: Progress and Prospect

XIAO Guoqing¹⁾, XU Hushan, WANG Sicheng

(*Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 73000, China*)

Abstract: High Intensity heavy-ion Accelerator Facility (HIAF) and China initiative Accelerator Driven System (CiADS) are among 16 national research facilities built as a priority during China's Twelfth Five Year Plan. In this paper, the scientific feasibility, structures and the features of HIAF and CiADS are briefly summarized. Meanwhile, their present construction progresses are reported and their developments in the near future are outlined.

Key words: HIAF; CiADS; heavy-ion; accelerator; transmutation

<http://www.npr.ac.cn>

Received date: 1 Aug. 2017; **Revised date:** 5 Sep. 2017

Foundation item: Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences(XDA3000000); Key Program of National Natural Science Foundation of China(11735017); Major Program of National Natural Science Foundation of China(91426301, 91426303); National Natural Science Fund for Distinguished Young Scholars(11525523); National Key R&D Program of China(2016YFA0400500); Project of International Cooperation and Exchanges NSFC(11611130016)

1) E-mail: xiaogq@impcas.ac.cn.