

Study on the Development of Accelerator Driven System (ADS) and Its Spallation Target

Yachen Xu¹, Fangliang Kang², Xuanyu Sheng³

¹Research Center of Advanced Energy Equipment Technology, Tianjin Research Institute for Advanced Equipment, Tsinghua University, Tianjin

²Chongqing Bureau of Naval Equipment Department, Chengdu Sichuan

³Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing

Email: xyx@tsinghua-tj.org, shengxy@tsinghua-tj.org

Received: Jul. 8th, 2016; accepted: Jul. 24th, 2016; published: Jul. 29th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

ADS (Accelerator Driven System) has been universally regarded as the most promising approach to dispose the long-lived nuclear waste. This system takes the spallation neutrons as the external neutron source to drive and maintain the operation of the subcritical blanket system and has the inherent safety. Spallation target is the most important part of accelerator-driven subcritical system, playing a role in coupling neutrons created through spallation process to reactor. With increasing of the beams power, the material of spallation target becomes particular critical. Granular material as the spallation target proposed by the Institute of Modern Physics (IMP) of the Chinese Academy of Sciences has the advantages of both solid and liquid targets, and can endure dozens of megawatt level of the future ADS commercial devices.

Keywords

Nuclear Power, Nuclear Waste, ADS, Spallation Target

加速器驱动次临界系统(ADS)及其散裂靶的研究现状

徐雅晨¹, 亢方亮², 盛选禹³

¹清华大学天津高端装备研究院先进能源装备技术研究所, 天津

²海装重庆局, 四川 成都

³清华大学核能与新能源技术研究院, 北京

Email: xyc@tsinghua-tj.org, shengxy@tsinghua-tj.org

收稿日期: 2016年7月8日; 录用日期: 2016年7月24日; 发布日期: 2016年7月29日

摘要

加速器驱动次临界系统(ADS)被国际公认是最有前景的核废料嬗变技术, 该系统以加速器产生的高能强流质子束轰击靶核产生散裂中子作为外源中子驱动和维持次临界堆运行, 具有固有安全性。中子散裂靶起着将散裂反应中产生的中子耦合到反应堆的重要作用, 是ADS系统中最为重要的一部分, 随着束流功率不断增高, 靶材的选取变得尤为重要, 其中由中科院近代物理研究所提出的颗粒流散裂靶结合了固态靶和液态靶的优点, 具有承受未来ADS商业化装置需要耦合束流功率数十MW的能力。

关键词

核能, 乏燃料, ADS, 散裂靶

1. 引言

环境污染已经成为我国经济和社会可持续发展的一个重要问题, 尤其是以煤炭为主要燃料的火力发电已经成为大气污染的主要来源, 严重制约着国民经济的可持续发展。发展新能源与可再生能源已刻不容缓, 目前, 我国已经大力提高能源构成中的水利发电、风力发电、太阳能发电、核电等可再生能源及清洁能源的份额。本文主要研究了核能的发展, 其中乏燃料处理已经成为了重要问题, 加速器驱动次临界系统(ADS)是处理乏燃料的有效手段, 受到国内外的广泛重视。

2. 核能是我国可持续发展的保障

2.1. 核能是清洁能源

能源是一个国家经济发展的保障, 也是制约社会可持续发展的重要因素[1]。目前, 我国以化石燃料包括煤、石油、天然气等作为主要能源, 然而化石燃料消费所带来大量温室气体等有害物质的排放已经成为环境污染的主要来源[2], 单一的化石燃料消费结构必然面临能源供应的危机, 为了解决这些问题, 我国已经大力发展新型的清洁能源——核能[3]-[6]。2005年我国明确提出了积极发展核电的战略方针, 根据2007年国务院颁布的《核电中长期发展规划》, 到2020年, 核电运行装机容量将达到58GW, 在建核电容量约30GW, 核电在总发电量中所占比重将提高到4%左右[7][8]。根据对国家中长期能源发展和前景的分析, 中国工程院在《2050年我国的能源需求》咨询报告中指出, 到2050年, 我国核电占一次能源的比重要求提高至12.5% (占电力装机容量的20%), 作为中国经济发展能源的必然选择, 核能发展必将迎来蓬勃发展的新局面[9]-[11]。

2.2. 核废料处理面临考验

人们在享受核电带来的巨大好处的同时, 也不得不面对核电产生的核废料尤其是长寿命核废料的处理及处置难题[12]-[14], 这将成为我国核电事业能否持续发展不可缺少的一环。以一座百万千瓦的反应堆

估算, 每年卸出乏燃料约 25 吨, 其中包括可循环利用的 ^{235}U 和 ^{238}U 约 23.75 吨、钚约 200 公斤、中短寿命的裂变产物约 1 吨、次锕系核素(MA, Minor Actinides)约 20 公斤、长寿命裂变产物(LLFP, Long-Lived Fission Product)约 30 公斤。随着我国压水堆核电站装机容量的增长, 核废料的积累将快速增加, 如果 2030 年核电站装机容量达到 8000~10,000 万千瓦, 届时乏燃料累计存量将达到 2 万~2.5 万吨, 其中所含钚 160~200 吨, MA 16~20 吨, LLFP 24~30 吨。对乏燃料的潜在生物危害性分析表明, 乏燃料的远期风险主要决定于其中的镎、镅、锔等次锕系元素和长寿命裂变产物, 其衰变达几十万年, 才能将放射毒素降低到天然铀矿的水平。如果不对这些乏燃料进行处理, 不但不利于我国核能可持续发展, 而且会和环境带来极大的安全隐患, 因此, 必须对乏燃料进行处理, 降低其放射性, 减少对环境的危害[4] [8]-[10] [15]。

目前国际上对乏燃料的处理主要有两种方式, 即“一次通过”方式和“闭式循环”方式[4]。“一次通过”方式也叫“直接处理”方式, 是指反应堆卸出的乏燃料经过适当的冷却、包装和固化处理后, 直接进行地质埋藏处置。其优点是简单、廉价和安全; 缺点是核资源利用率低(小于 1%)、核废料体积大和安全处置的时间长, 例如美国死亡谷的尤卡山。“闭式循环”方式也叫“后处理”方式, 是指对适当冷却的乏燃料进行后处理, 回收可利用的铀和钚返回到反应堆中进行核燃料的再循环, 提高核资源利用率; 对分离出来的裂变产物和次锕系元素进行适当的固化处理和地质埋藏处理[9] [10] [16]-[18]。核废料中的中短寿命的裂变产物(如: ^{137}Cs 、 ^{90}Sr)的衰变时间较短, 而长寿命的裂变产物(如: ^{99}Tc 、 ^{129}I)和放射性毒性大的次锕系元素(如: ^{237}Np 、 ^{243}Am 、 ^{245}Cm)的衰变时间较长, 可达几百年甚至上万年。显然, 上面提到的两种核废料处理方法不能完全杜绝由于长时间的地质变化而造成核泄漏给人类带来危害, 因此, 非常需要开发一种可利用的技术来实现高放废物的嬗变, 使其成为短寿命的核素或者变成没有放射性的稳定物质[19] [20]。

随着加速器技术的快速发展, 核物理学家提出分离-嬗变(Partition-Transmutation)战略来处理核废料, 其核心是在闭式循环的后处理分离基础上, 进一步利用核嬗变反应将长寿命、高放射性核素转化为中短寿命、低放射性的核素[21]-[23]。经过嬗变处理后的长寿命高放射性核废料可在大约 700 年内降低到普通铀矿的放射性水平, 与闭式循环模式相比, 经过嬗变后仍需地质深埋处理的核废料体积可再减小五倍以上。可以发现中子嬗变方法不仅可以快速降低核废料的放射性, 而且可以提高燃料的利用率, 因此目前国际已经倾向于使用中子嬗变来处理核废料[4]。

3. 有效处理核废料的装置 ADS

加速器驱动次临界系统(ADS)最早由 Rubbia [24]等人在上世纪 90 年代以“能量放大器”的概念提出, 由强流质子加速器、散裂靶和次临界反应堆构成, 由加速器产生质子束轰击设在次临界堆中的重金属散裂靶, 通过散裂反应持续产生次级中子, 为次临界堆提供外源中子以驱动反应堆内的裂变反应, ADS 原理如图 1 所示[25]-[30]。散裂中子能谱比快堆更硬、更宽(从热中子到 GeV 量级), 可使几乎所有的有阈裂变核素进行焚烧; 通过慢化可达 $10^{16}\text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 热中子通量(或更高), 基本上所有的放射性裂变产物都可以进行嬗变。ADS 系统中, 加速器和散裂靶提供的可控外部中子源使次临界堆更有效、安全的运行[4] [5] [31]-[35]。

ADS 系统由 4 个重要的特点[4]: 1) 优良的系统安全性。一旦切断外缘中子的驱动, 次临界系统内的核反应随即停止, 具有固有安全性; 2) 强大的嬗变能力。能量 1GeV 的质子在重金属靶上产生约数十个中子加上次临界堆数十倍的放大效应, 因此 ADS 系统在原理上具有强大的核废料嬗变能力; 3) 好的中子经济性。加速器打靶直接产生的散裂中子能谱分布很宽, 中子经济性明显好于其他已知的临界堆; 4) 高的支持比。由于能谱更硬、中子余额更多, 一个优化设计的 ADS 系统其支持比可达 10 左右(即一个约 80 万千瓦的 ADS 系统可以嬗变 10 个左右百万千瓦规模的压水堆核电站产生的长寿命放射性废料),

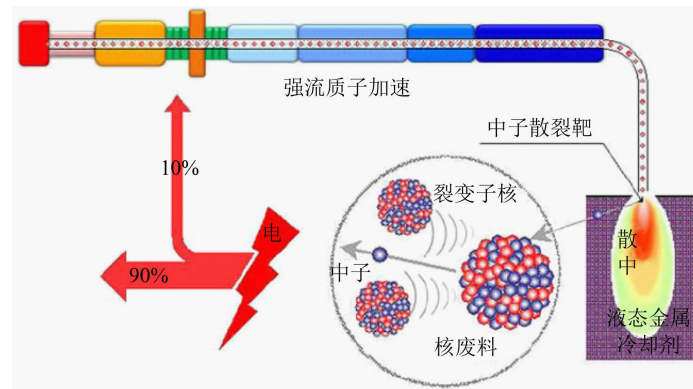


Figure 1. Schematic diagram of ADS
图 1. ADS 原理示意图

而快堆由于受到运行稳定性的要求只能嬗变约 2~5 个压水堆的核废料。

由上述几点可见，在各种嬗变系统中，ADS 是强有力的核废料嬗变器，是我国核裂变能可持续发展值得探索的新科技途径，其研究成果将明显提高核能系统的资源效益和环境效益。

4. 国内外 ADS 研究进展

4.1. 国外对 ADS 的研究计划

自上世纪 90 年代初以来，ADS 开始成为国际核科技研究的热点。国际核科技界认为 ADS 是一个有前途的新一代核能开发的技术路线。国际原子能机构把它列入新型核能系统中，称为“新出现的核废物嬗变及能量产生的核能系统”，目前已把它纳入国际原子能机构的快堆与 ADS 技术工作组的年会内容。国际上关于 ADS 的学术交流、研讨会及科技合作日益活跃与频繁。欧盟各国、美、日、俄等核能科技发达国家均规划了 ADS 中长期发展路线[4] [7]。

欧盟把 ADS 作为核废料处理处置的核心，以 1986 年诺贝尔物理学奖获得者 Rubbia C 教授为首的顾问组提出和制定了 EUROTRANS 计划，其中有超过 40 个大学和研究所参与，扩展了原来的 XADS 计划。按 2000 年统计，投入人力约 400 人/年，研究范围涉及强流加速器技术、中高能核数据、中子学设计程序研究、热工水力设计程序研究、散裂靶物理，以及工业规模验证装置设计等[8]。法国的 MUSE 计划是建设大型快中子零功率实验装置并开展 ADS 中子学研究[9]；瑞士保罗谢勒研究所提出 MEGAPIE 计划是利用强流质子加速器开展 MW 量级液态 LBE 散裂靶的研究[10] [11]；法国的 IPH 和意大利的 TRASCO 研究了强流质子加速器[16]；比利时核能研究中心的 MYRRHA 计划建造以 LBE 为靶[17]，同时作为冷却剂的快中子次临界系统，其目标为建设 50~100 MWt 反应堆、600 MeV/3 mA 强流加速器[18]；德国卡尔斯鲁厄铅研究室实施的 KALLA 计划是要建造一个大型的铅铋回路系统来研究铅铋特性[19]；欧盟的 SPIRE 计划研究在中子和质子的混合能谱中，马氏体钢的散裂和辐照效应该项目由欧洲的 10 个科学机构紧密配合开展[20]；CONFIRM 计划是由欧洲七个研究机构组成，在 2000 年通过欧盟的批准，该计划持续了 4 年的时间，这个项目主要研究针对于 ADS 项目中所使用的氮化铀的辐照性能[20]；欧盟的 FUTURE 计划主要目的在于研究次锕系元素氧化物混合燃料制成适用于 ADS 均匀或者复合燃料用于辐照实验的可行性[23]。欧盟各国 ADS 研究开发工作的特点是充分利用现有的核设施，共同合作开展实验研究，其中比较突出的是利用法国的大型快中子零功率实验装置开展 ADS 中子学研究的 MUSE 计划、利用瑞士 PSI 的强流质子加速器开展 MW 级液态 Pb-Bi 冷却的散裂靶研究的 MEGAPIE 计划，利用法国凤凰快中子反应堆开展含 MA 或 LLFP 的燃料元件在中子辐照条件下行为研究等[20]。

美国在 1999 年率先制订了加速器嬗变核废料的 ATW 计划[23]，由于美国早先致力于加速器生产氙的 APT 计划，在强流质子加速器方面有较多的技术储备，有利 ATW 计划的实施。次临界堆芯研究设计过多种热中子和快中子系统方案，最后选中快中子次临界堆芯。从 2001 年开始实施先进加速器技术应用的 AAA 计划，全面开展 ADS 相关的研究，并计划在 2010 年左右建成一座加速器驱动的实验装置 ADTF，用于证实 ADS 安全性、加速器与散裂靶及次临界增殖系统之间耦合的有效性、嬗变性能和可运行性。费米实验室计划建造的高能强流质子加速器 Project-X，也将做部分 ADS 相关研究。橡树岭阿拉莫斯国家实验室同时提出了 SMART 计划，也将研究核废物的嬗变方案。此外，美国与俄罗斯合作已建成了实用规模的 LBE 液态合金回路，并在结构材料腐蚀控制问题上取得进展，同时还开展了工业规模的 ADS 工程概念设计，公开发表钠冷、LBE 冷和气冷 3 个设计研究。

俄罗斯理论与实验物理研究所和美国 LANL 在上世纪 90 年代合作开展 ADS 开发工作。1998 年俄联邦原子能工业部决定启动 ADS 开发计划。以理论实验物理研究所(ITEP)和物理与动力工程研究所(IPPE)为代表，有 10 多个单位参加的工作组，拟订研究计划，在 ISTC 的支持下，协同开展工作。工作内容涉及 ADS 相关核参数的实验研究；理论研究与计算机软件开发；ADS 实验模拟试验装置的优化设计；1 GeV、30 mA 质子直线加速器的发展；先进核燃料循环的理论与实验研究等。俄罗斯比较重视 ADS 系统的新概念研究，典型的有快-热耦合固体燃料 ADS 次临界装置概念设计和快-热熔盐次临界装置概念设计等[36]。

白俄罗斯的 YALINA 计划是一个次临界的快热耦合堆，初步实现了为 ADS 系统内部中子学研究提供了实验的平台，并取得了一些数据，从而提供了技术方面的支持。该计划分析了强的空间不均匀性对中子学通量流强分布的影响，以及 ADS 源位置差异对中子通量的影响，为进一步 ADS 项目的开展提供了必要的参考性依据[19]。

日本 1988 年启动了处置核废料的 OMEGA 计划，该计划由日本原子能研究所(JAERI)、日本燃料循环发展研究所(JNC 前身称为 PNC)和中央电力工业研究所(CRIEPI)这三个核能科学工程研究设计单位为主负责实施。除了广泛开展 ADS 相关的基础研究外，主要以工程概念设计研究带动相关的以工程实现为目标的技术开发研究。在研究比较了临界焚烧炉 ABR 和 ADS 的性能之后，认为 ADS 是 MA 嬗变的最佳选择，因此 OMEGA 计划后期的研究工作集中在 ADS 的开发研究上，先后完成了钠冷却固体钨靶和 LBE 冷却液体靶两个工业规模级、820 MW 热功率的概念设计。日本同时还开展了具有工业规模的散裂靶和次临界堆融为一体的熔盐 ADS 概念设计研究。围绕这些工业概念设计还开展了分离流程、燃料加工和后处理、LBE 工艺和专用核数据库及计算程序研究开发工作。此外，日本已经实施中子科学计划 J-PARC，由日本原子能所和高能所(JAERI-KEK)联合建造强流质子加速器，用以驱动全尺寸的 ADS 系统，使用 Pb-Bi 液态合金靶，分三个阶段实施：第一阶段束功率 200 kW，次临界堆芯用 20%²³⁵U 氧化物为燃料，裂变功率可达 50 kW，用强迫空气冷却；第二阶段束功率提高到 2 MW，次临界堆芯功率拟提高到 500 kW，用自然循环 LBE 液态合金冷却；第三阶段以实证 ADS 工艺安全和嬗变性能为目的，束功率拟提高到 50 MW，次临界第一个堆芯仍用 20%²³⁵U 的氧化物燃料，第二个堆芯拟用专用于工业实用 ADS 系统的氮化物燃料[36]。

除此之外，韩国和印度等国也有相应的 ADS 研究计划。国际上部分 ASD 装置的设计参数见表 1。

总的来看，国际上 ADS 是很活跃的核能研究开发领域，不仅列入国家级中长期发展计划，而且差不多整个核能研究机构和有关的工业部门都参与开发研究，其共同特点是：充分利用已有核能研究开发设施开展实验工作，其中以欧盟和俄罗斯最为明显；重视国际合作，以欧盟、美国、日本和韩国共同参加的中子学研究的 MUSE 计划和散裂靶的 MEGAPIE 计划最具代表性；各国都有建设 ADS 集成实验装置的计划，如欧盟的 XADS 和 MYRRHA，俄罗斯的 SAD 和美国的 ADTF 等；各国都结合本国核能发展的实际情况，开展工业规模实用化的 ADS 系统设计研究，而且都设想在 2030 年左右建成原型装置。

Table 1. Parameters design of the partial ADS devices [9]-[11] [16]-[20] [23] [36]
表 1. 部分 ASD 装置的设计参数[9]-[11] [16]-[20] [23] [36]

地区	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	AGATE	6 (600 MeV/10 mA)	0.95~0.97	100	快, $\sim 10^{15}$	钨	MOX
	MYRRHA	2.4 (600 MeV/4 mA)	0.955	85	10^{15}	铅铋	MOX
	EFIT	16 (800 MeV/20 mA)	~ 0.97	数百	快, $\sim 10^{15}$	铅铋(无窗)	MA
	XT-ADS-A/B	3.6 (600 MeV/3~6 mA)	0.95~0.97	80	快, $\sim 10^{15}$	铅铋/钢	U/Pu/MOX
	XT-ADS-C	1.75 (350 MeV/5 mA)	0.95	50	快, 3×10^{15}	铅铋(无窗)	U/Pu/MOX
俄罗斯	CSMSR	10 (1 GeV/10 mA)	0.95	800 级联方案	中, 5×10^{15}	铅铋	Np/Pu/MA 熔盐
	INR	0.15 (500 MeV/10 mA)	0.95~0.97	5	快	钨	MOX/MA
	NWB	3 (380 MeV/10 mA)	0.95~0.98	100	快, 10^{14-15}	铅铋	UO ₂ /UN U/MA/Zr
日本	JAERI-ADS	27 (1.5 GeV/18 mA)	0.97	800	块	铅铋	MA/Pu/ZrN
韩国	HYPER	15 (1 GeV/10~16 mA)	0.98	1000	块	铅铋	MA/Pu

4.2. 我国对 ADS 的研究进展[4] [7]-[9] [11] [18]-[20]

本模板可直接用于论文及其文字的编排, 有的页边距、行距、字体都严格符合规定, 请勿修改! 尤其是页边距, 由于期刊在后期制作过程中需要在页眉、页脚添加各种信息, 所以所有论文务必确保现有的页边距不被修改, 页面空白不被占用。

我国在 1996~1999 年间在中国核工业集团公司和国家自然科学基金会的支持下开展了 ADS 研究概念研究和物理可行性研究。1999 年在科技部的国家重点基础研究发展规划项目(“973 计划”)中立项, 开展为期 5 年的“ADS 物理和技术基础研究”, 由中国原子能科学研究所和中国科学院高能物理研究所共同承担。

“ADS 嬗变系统”的最终目标是建成可用于工业推广的核废料 ADS 嬗变示范装置, 如图 2 所示, 计划分为三步: 1) 围绕 ADS 系统技术路线的选择开展研究, 包括建成加速器、散裂靶、反应堆系统各自集成的子系统装置。2) 完成 ADS 实验装置, 指标为质子束流功率(0.6~1.0) GeV/10 mA、堆功率约 100 MWt。3) 完成示范装置建设, 指标为质子束流功率约 1.5 GeV/10 mA、堆功率 1000 MWt。

与先进核能国家比较, 我国的 ADS 研究起步较晚, 投入较少, 研究资源缺少。但由于充分利用了承担单位的技术积累、很好地借鉴了国外的先进经验并且充分发挥了科研人员的积极性和创造性, 目前我国的 ADS 研究已经有了长足进步。国内研究工作的主要进展包括: 建立了快-热耦合的 ADS 次临界实验平台——“启明星”1 号; 建成了输出能量为 3.5 MeV、输出脉冲流强为 43 mA 的强流质子 RFQ 加速器; 建成了输出能量为 75 keV、输出流强大于 65 mA 的强流 ECR 离子源; 建立和配套了 ADS 中子学研究专用计算机软件系统并开展了 ADS 工程概念优化方案计算; 建成了 ADS 专用中子和质子微观数据评价库; 创造性地进行了专用材料的辐照效应研究及其与液态金属冷却剂(钠和 Pb-Bi 合金)的相容性研究; 在核废料核素的中子学价值、ADS 特有的辐射防护问题、ADS 系统的热工水力问题等方面, 也开展了一系列的探索性的研究, 取得了积极成果。

5. 散裂靶是 ADS 的重要组成部分

散裂靶是 ADS 系统中最为重要的一部分, 起着将散裂反应中产生的中子耦合到反应堆的重要作用, 因此, 在 ADS 系统的研究中, 中子散裂靶的研究是一个重要的课题[4] [6] [15] [37]。

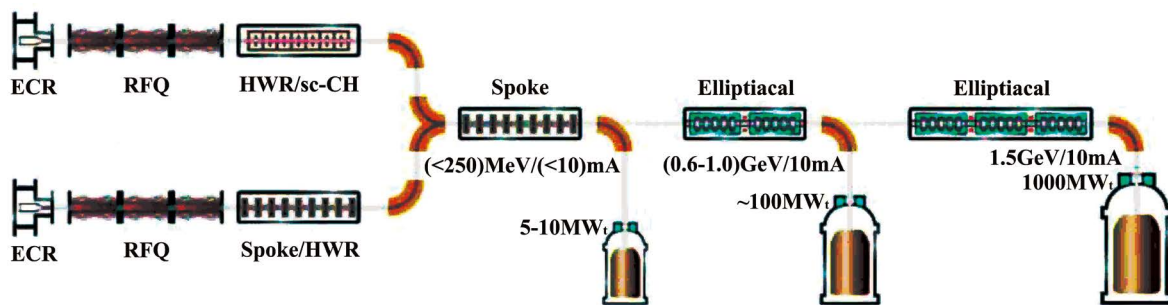


Figure 2. Technology roadmap of ADS
图 2. ADS 系统的发展路线图

5.1. 散裂靶的分类[16] [38]-[40]

目前 ADS 散裂靶的形式主要分为以下三大类：第一、固态散裂靶件。最早期的散裂中子源概念在 20 世纪 80 年代就已经出现了，那时候最先被尝试使用的是以固态材料作为散裂中子源的散裂靶。运用高能质子束轰击散裂靶材料产生中子的研究最早开始于 20 世纪 80 年代的德国散裂中子源项目(SNQ)，其主要目的为建造一个高通量的中子源，用于热中子相关的散射性能测试。在 SNQ 项目的支持下，研究人员设计了一种能够接 5.5 MW 中子水平射入的旋转靶件，其产生中子的散射材料为固体材料。在德国的 SNQ 项目之后，瑞士继续开展了固态散裂中子源的研究，并启动了研究计划 SING。此项目的主要目的在于在完成相关设计的基础上，建造一个能够投入运行，实际产生散裂中子的外中子源。实验中产生的中子将会用于热中子及快中子的能谱测量，于此同时，SING 亦用于为液态靶的建造积累工程经验。按照初期的设计，SINQ 的额定功率为 1 MW，但在实际运行中考虑到要面对安全等诸多因素，运行功率只达到了 0.7 MW。

第二、液态无窗散裂件。液态无窗散裂靶是近年来新提出的一种高功率 ADS 系统散裂靶解决方案，由于其采用了无靶窗的设计方案，使得靶系统能够承受较高能量的质子束轰击，可以使中子的产额大大增加。但无窗散裂靶的缺点也同样明显：1) 设计和建造的难度较高。在设计无窗靶时要求其在运行过程中能够长时间在真空质子束管和靶系统冷却剂之间形成非常稳定的自由界面，这需要设计人员在工程设计阶段要对靶系统内冷却剂的流动情况进行充分的模拟和论证，进行非常精细的设计和铸造。2) 运行非常不稳定。即使在自由液面形成之后，一个微小的扰动就可以将其完全破坏，使得 ADS 系统的运转发生中断。基于以上两点原因，目前世界上尚无已建成的液态无窗散裂靶实验装置。

第三、液态有窗散裂靶件。针对固态散裂靶中结构材料的能量移出、散裂材料损伤和靶体结构复杂、庞大等问题和液态无窗散裂靶的不稳定性、无法保证加速器安全运行问题，液态有窗散裂靶作为一种可行的替代方案逐渐进入了 ADS 系统研究人员的视野。典型的兆瓦级液态散裂靶系统(MEGAPIE)于 1996 年被提出。2001 年欧盟加入后，推动并资助了长达五年的 MEGAPIE-TEST 项目。MEGAPIE 项目的目的在于建造当时世界上第一个兆瓦级的液态散裂中子源，验证液态散裂靶的可行性、安全特性以及为将来在 ADS 中的应用积累工程经验。MEGAPIE 散裂靶的成功运行说明了液态金属散裂靶的工程可行性，也证明了液态有窗散裂靶在高能质子束束流轰击下的安全性。此项目从设计、验证、校验到最后的顺利运转，在 ADS 的设计和建造史上具有里程碑意义。

5.2. 基于颗粒流的新型散裂靶[37] [41]

中科院近代物理研究所从未来先进核裂变能可持续发展的根本需求出发，面向未来 ADS 商业化和未来先进核燃料循环过程优化需要解决的关键科学问题，开展了具有前瞻性的 ADS 设计程序以及新原理新

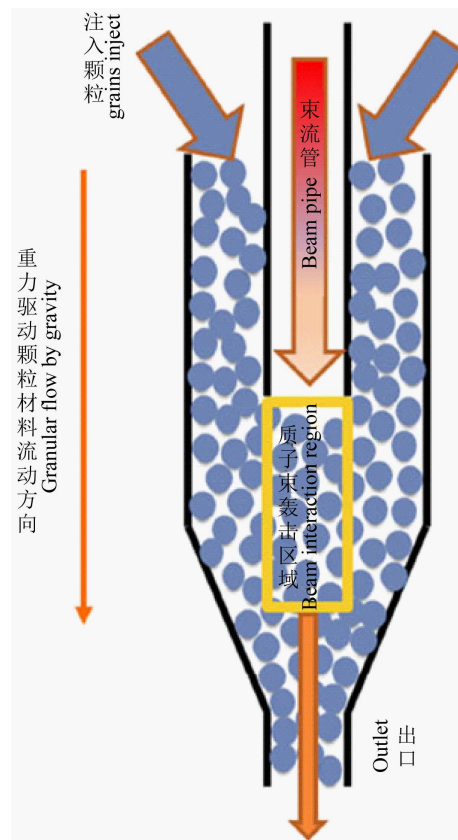


Figure 3. Schematic diagram of granular flow spallation target

图 3. 颗粒流散裂靶示意图

概念装置相关探索。在目前国内外高功率散裂中子源、第四代反应堆以及 ADS 研究成果的基础上，原创性地提出了一种颗粒流散裂靶设计(如图 3 所示)开展了 ADS 系统的设计研究。

对于颗粒流散裂靶设计，颗粒通常选择为中子产额高、熔点高、热容大的钨基材料。其基本工作原理是：流动的颗粒既是散裂靶材料又是冷却介质，颗粒经过高能质子束流轰击产生宽能谱中子，并通过流动将束流沉积热带出靶区。我们知道目前在 PSI 的 SINQ 上运行的固体靶可以承受 1.2 MW 的束流功率、MEGAPIE 的 LBE 靶达 0.8 MW，美国 SNS 的液态汞靶最高运行功率 1.4 MW，未来欧洲散裂中子源 ESS 旋转固体靶设计功率 5 MW、处于工程设计建设阶段的 MYRRHA 液态靶 2.4 MW。与这些靶相比，理论上颗粒流散裂靶可以承载更大的束流功率($\sim 100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$)，同时颗粒流本身也易于抑制普通流体中存在的各种流体力学不稳定性。因此，流化固体颗粒靶具有承受未来 ADS 商业化装置需要耦合束流功率数十 MW 的能力。颗粒流散裂靶设计结合了固态靶和液态靶的优点，通过固体小球的流动实现了靶区外的冷却，规避了液态铅铋合金靶放射产物毒性高、温度-材料腐蚀效应严重以及固态靶热移除难等缺点，受到同领域专家积极评价和关注。

6. 结论

ADS 作为核废料的嬗变器已经成为国际核科技研究的热点，是核裂变能可持续发展值得探索的新科技途径，其研究成果将明显提高核能系统的资源效益和环境效益。散裂靶是 ADS 系统中最为重要的一部分，起着将散裂反应中产生的中子耦合到反应堆的重要作用，随着束流功率不断增高，靶材的选取变得

尤为重要,目前中科院近代物理研究所原创性地提出了颗粒流散裂靶,其结合了固态靶和液态靶的优点,具有承受未来 ADS 商业化装置需要耦合束流功率数十 MW 的能力。

参考文献 (References)

- [1] 潘自强, 马忠海, 李旭彤, 毋涛, 修炳林. 我国煤电链和核电链对健康、环境和气候影响的比较[J]. 辐射保护, 2001, 21(3): 129-145.
- [2] 夏秀芳. 温室效应的影响与我国的应对措施[J]. 和田师范专科学校学报, 2011, 30(2): 20-21.
- [3] 华贲. 产业结构、能效及一次能源构成对能源强度的影响分析[J]. 中外能源, 2010, 15(5): 1-7.
- [4] 詹文龙, 徐瑚珊. 未来先进核裂变能-ADS 嬗变系统[J]. 中国科学院院刊, 2012, 27(3): 375-380.
- [5] 赵仁恺. 中国核电的可持续发展[J]. 中国工程科学, 2000, 2(10): 33-41.
- [6] 肖新建. 2011 年中国核电发展状况、未来趋势及政策建议[J]. 中国能源, 2012, 34(2): 18-23.
- [7] 陈建琪. ADS 散裂靶产物的放射性分析[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 中科院近代物理研究所, 2015.
- [8] 张苏雅拉吐. ADS 散裂靶相关核数据测量装置的建立及钨评价中子核数据的基准检验[D]: [博士学位论文]. 兰州: 中科院近代物理研究所, 2015.
- [9] 赵子甲. ADS 散裂靶中子学分析与设计优化[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- [10] 于涛. 加速器驱动次临界系统(ADS)束流瞬变动态响应的微机仿真研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2005.
- [11] 党同强. 铅铋反应堆放射性源项计算与剂量评估研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.
- [12] 史永谦. 核电站乏燃料对生物圈的影响及 ADS 对策[J]. 原子核物理评论, 2007, 24(2): 151-155.
- [13] 罗上庚. 核废物的安全和环境影响[J]. 安全与环境学报, 2001, 1(2): 16-20.
- [14] 谢运棉. 核废物处置及其环境影响(一)[J]. 环境工程, 1991, 9(3): 56-58.
- [15] 袁涛, 王晓宇, 粟再新, 等. 核废物处理途径的探讨[J]. 科学技术与工程, 2004, 4(10): 861-867.
- [16] 胡晨. ADS 液态无窗散裂靶件水力实验和数值研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [17] 许晓伟. ADS 有窗散裂靶流场可视化实验及模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 中科院近代物理研究所, 2015.
- [18] 孙明. 加速器驱动次临界堆物项安全分级方法研究[D]: [硕士学位论文]. 深圳: 深圳大学, 2015.
- [19] 李石磊. 铅铋反应堆系统安全分析程序的开发[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2007.
- [20] 王龙. 先进核反应堆用铅铋合金热物理性能实验研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.
- [21] 唐国有, 陈金象, 施兆民. 与核能有关的中子数据和核反应研究[J]. 核物理动态, 1996, 13(2): 13-15.
- [22] 张玉山. 长寿命核废物嬗变处理的研究综述[J]. 原子核物理评论, 1997, 14(4): 251-258.
- [23] 王悦. 钠冷快堆嬗变长寿命高放射性废物物理特性初步分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [24] Rubbia, C., Rubio, J.A., Buono, S., Carminati, F., Fietier, N., Galvez, J., Geles, C., Kadi, Y., Klapisch, R., Mandrillon, P., Revol, J.P. and Roche, C. (1995) Conceptual Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier. Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier, CERN/AT/95-44 (ET).
- [25] Herrera-Martínez, A. (2004) Transmutation of Nuclear Waste in Accelerator-Driven Systems. PhD Thesis, University of Cambridge, Cambridge.
- [26] Mueller, A.C. (2009) Prospects for Transmutation of Nuclear Waste and Associated Proton Accelerator Technology. *The European Physical Journal-Special Topics*, **176**, 179-191. <http://dx.doi.org/10.1140/epjst/e2009-01157-8>
- [27] Salvatores, M., Slessarev, I. and Uematsu, M. (1994) A Global Physics Approach to Transmutation of Radioactive Nuclei. *Nuclear Science and Engineering*, **116**, 1-18.
- [28] Bowman, C.D., Arthur, E.D., Lisowski, P.W., et al. (1992) Nuclear Energy Generation and Waste Transmutation Using an Accelerator-Driven Intense Thermal Neutron Source. *Nuclear Instrument & Methods in Physics Research A*, **320**, 336-367. [http://dx.doi.org/10.1016/0168-9002\(92\)90795-6](http://dx.doi.org/10.1016/0168-9002(92)90795-6)
- [29] Liu, P., Chen, X., Boccaccini, C.M., Maschek, W., Smith P. and Sobolev, V. (2007) Accelerator Driven Systems for Transmutation: Safety Considerations and Analyses of EFIT Type Cores. *International Conference on Power Engineering-2007*, Hangzhou, 23-27 October 2007, 1127-1133.

- [30] Abderrahima, H.A., Kupschusa, P., Malambua, E., *et al.* (2001) MYRRHA: A Multipurpose Accelerator Driven System for Research & Development. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, **463**, 487-494. [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002\(01\)00164-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002(01)00164-4)
- [31] Rubbia, C., Aleixandre, J. and Andriamonje, S. (2001) A European Roadmap for Developing Accelerator Driven Systems (ADS) for Nuclear Waste Incineration. ENEA Report.
- [32] Mishima, K., Unesaki, H., Misawa, T., *et al.* (2007) Research Project on Accelerator-Driven Subcritical System Using FFAG Accelerator and Kyoto University Critical Assembly. *Journal of Nuclear Science and Technology*, **44**, 499-503. <http://dx.doi.org/10.1080/18811248.2007.9711314>
- [33] Ishida, S. and Sekimoto, H. (2010) Applicability of Dynamic Programming to the Accelerator-Driven System (ADS) Fuel Cycle Shuffling Scheme for Minor Actinide (MA) Transmutation. *Annals of Nuclear Energy*, **37**, 406-411. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2009.11.017>
- [34] Sasa, T., Tsujimoto, K., Takizuka, T. and Hideki, T. (2001) Code Development for the Design Study of the OMEGA Program Accelerator-Driven Transmutation Systems. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, **463**, 495-504. [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002\(01\)00166-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002(01)00166-8)
- [35] Kurata, Y., Takizuka, T., Osugi, T. and Takano, H. (2002) The Accelerator Driven System Strategy in Japan. *Journal of Nuclear Materials*, **301**, 1-7. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-3115\(01\)00731-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-3115(01)00731-0)
- [36] 赵志祥, 夏海鸿. 加速器驱动次临界系统(ADS)与核能可持续发展[J]. 中国核电, 2009, 2(3): 202-211.
- [37] 中国科学院“未来先进核裂变能-ADS 嬗变系统”战略性先导科技专项研究团队. 直面挑战 追梦核裂变能可持续发展——“未来先进核裂变能——ADS 嬗变系统”战略性先导科技专项及进展[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(4): 527-534.
- [38] 仇弱翔. 一体化铅铋散裂靶结构设计与分析[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
- [39] 赵雷. 中国散裂中子源质子加速器束流相位及能量测试系统的设计与实现[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.
- [40] Cho, C., Tak, N. and Lee, J.C.A.Y. (2007) CFD Analysis of the HYPER Spallation Target. *Annals of Nuclear Energy*, 761-772.
- [41] Yang, L. and Zhan, W.L. (2015) New Concept for ADS Spallation Target: Gravity-Driven Dense Granular Flow Target. *Science China Technological Sciences*, **58**, 1705-1711. <http://dx.doi.org/10.1007/s11431-015-5894-0>

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>