

CNIC-01468  
CNNC-0002

# 加速器驱动放射性洁净核能系统 概念研究论文集

主编 赵志祥

系统

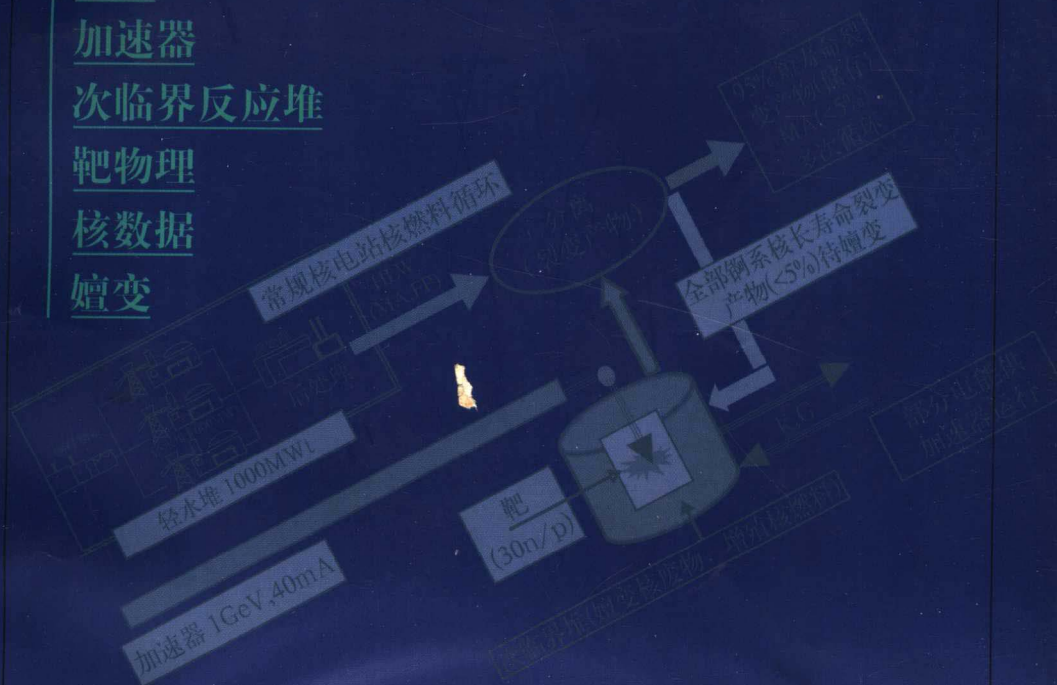
加速器

次临界反应堆

靶物理

核数据

嬗变



原子能出版社

CNIC-01468  
CNNC-0002

# 加速器驱动放射性洁净核能系统 概念研究论文集

赵志祥 主编

原子能出版社  
北京

## 图书在版编目 (CIP) 数据

中国核科技报告 CNIC-01468, CNNC-0002: 加速器驱动放射性洁净核能系统概念研究论文集/赵志祥等编著. —北京: 原子能出版社, 2000. 6

ISBN 7-5022-2165-4

I. 中… II. 赵… III. 核技术-研究报告-中国 IV. TL61

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 17563 号

## 内 容 简 介

本文集收集 29 篇论文, 内容涉及 ADS 系统的物理基础与科学可行性、强流加速器物理、次临界堆物理、核数据和化学分离与嬗变等。

本文集可作为上述领域研究人员的参考书, 对大专院校核反应堆工程、核能发电工程、高放废物处置、加速器应用等专业学生也有参考价值。

原子能出版社出版发行

责任编辑: 李曼莉

社址: 北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码: 100037

中国文联印刷厂印刷 新华书店经销

开本 148×210 mm 1/16 印张 12.5 字数 400 千字

2000 年 6 月北京第一版 2000 年 6 月北京第一次印刷

印数: 1—700

定价: 26.00 元

## 编 者 的 话

加速器驱动的次临界反应堆（即 ADS 系统）作为核裂变能可持续发展的一种创新的技术路线在 20 世纪 80 年代后期以来受到国际核能科技界的普遍重视，进入 90 年代后这方面的研究工作逐渐形成热点，有关的专题国际会议十分频繁，正在形成系列，并渗入相关的科学会议中成为议题。在美国、日本、欧洲和韩国，以 ADS 前期研究的成果为基础已经形成了进一步开发这一核能系统的几大研究计划。

1994 年底，何祚庥先生提出应注意这方面的研究动向，并介绍了诺贝尔奖获得者 C. Rubbia 关于能量放大器的第一篇文章。1995 年 4 月，在原中国核工业总公司科技局（中国核工业集团公司科技与国际合作部）的支持下，中国原子能科学研究院及核工业研究生院的一些同志成立了 ADS 概念研究课题组，开始了以 ADS 系统物理可行性和次临界堆芯物理特性为重点的研究工作，并逐渐将研究内容向强流加速器物理和靶物理方面扩展。这项工作后来也得到了国家自然科学基金委员会和中国科学院基础局的支持，研究队伍扩大到高能物理研究所和北京大学的部分同志。

收入这本文集的 29 篇论文基本代表了 ADS 概念研究课题组从 1995 年 4 月到 1999 年 12 月期间的主要研究成果，其内容涉及 ADS 系统的物理基础与科学可行性、强流加速器物理、次临界堆物理、散裂靶物理、核数据和化学分离与嬗变等领域。这些

论文是从完成于不同时期的论文或报告中选出的，因此深度各不相同，有些对同一问题的讨论也有变化，这反映了我们工作的进程。希望这本文集能得到有关研究领域专家的批评、指正，也希望对本课题有兴趣的同仁起一个导引的作用。

借此机会向对此项工作给予了极大支持和帮助的原中国核工业总公司科技局（中国核工业集团公司科技与国际合作部）、中国科学院基础局、国防科工委科技质量司和国家自然科学基金委员会深表谢意。

中国原子能科学研究院

赵志祥

2000年5月

# 核能可持续发展的创新技术路线（代序）

丁大钊 王方定

中国原子能科学研究院，北京，102413

妥善处理资源开发与利用、环境保护及社会经济发展间的关系是实现可持续发展战略的根本课题。社会经济的发展很大程度上依赖于能源供应。而自工业革命以来，以化石能源为主的传统能源构成的缺陷越来越突现。在世纪之交，人类面临着开发利用高效、清洁、安全及可再生能源的重大科学技术问题。一个国家的能源构成反映了该国的科学技术水平，能源构成的多样性也是一个国家能源安全的保障。下世纪将出现多样性的能源构成。传统化石能源向洁净化方向发展；可再生能源向高效方向发展，但受自然条件的制约，其开发程度会有限度。从高效与洁净两个指标来衡量，核能为最有前途的一种选择。以能量密度比较，裂变材料所蕴藏的能量比相同质量的化石材料高数百万倍；以废物量比较，核电站所排放的总废物量比相同发电量的煤电站少数十万倍，而其中只有不到百分之一是真正待处置的“废物”。

核能来自重原子核的裂变或轻原子核的聚变。聚变能的开发尚处在基础研究阶段。按一项能源新技术的开发应用要遵循基础研究、原理验证、技术验证、示范运行（安全性及经济性验证），然后进入商用的过程来考察，聚变能的应用当在 21 世纪后期，所以 21 世纪的核能必然仍是指裂变能的应用。

裂变能的开发已有半个多世纪，其大规模应用亦已有二十余年，现已成为能源构成中的重要组成部份。核电份额约占世界电力供应的 20%，某些国家已达 1/3，在法国甚至达到 75%。按国际原子能机构的

统计，近几年来核电份额还将在原有基础上增长 10% 以上，其中半数将建在发展中或初步发达的国家内。

核能的研究与开发是一个多学科、综合性的巨大的科学技术体系。概略地讲，可以分成产能系统与核燃料循环系统两大部分。现在商业运行的核电站的产能系统——反应堆都是利用热中子诱发铀-235 核裂变的轻水或重水反应堆；核燃料循环系统中的乏燃料后处理技术则采用有机溶剂萃取法（简称水法）。这些都是从有关军用技术演化、发展成的相对较成熟的技术，可以称之为“第一代核能系统”。随着核能大规模应用的经验积累及认识的深化，核科技界的同仁们都认识到它并非“优化”的核能源技术路线，还存在着若干限制其持续发展的“根本性”问题有待解决。这些问题可归纳为：

(1) 充分利用可裂变核资源，使铀-238 高效地转化为易裂变核钚-239 或开发利用钍-232 资源。

(2) 通过在中子场中核反应的途径，使可能危害环境的长寿命核废物（次量锕系核素及某些裂变产物）嬗变为短寿命的废物，以达到核废物“减量”及降低放射性毒性的目的。

(3) 提高核反应堆的安全性，甚至达到根本上杜绝临界事故可能性的目标。

这三个问题的解决将使核资源得到充分的利用，核废料对环境的潜在危害降至最低限度，并提高公众对核能的接受程度，从而使核能成为一种可持续发展的能源供应。从现实需要讲，开发新一代核能系统，取代在 21 世纪二三十年代将达到其寿期的一大批第一代核能系统，以及处理这些核电站积累的相当数量的核废料是核科技界与工业界亟待研究解决的问题。

核工业界正在开发的技术可以称为“改进”的技术路线。例如把

核电站卸出的乏燃料中经后处理分离出的铀、钚同位素制成混合氧化物燃料，再在热中子反应堆中循环利用，把铀资源利用率提高一倍；采用非能动的安全系统，提高压水堆的安全性、降低堆芯熔化概率。利用快中子反应堆把铀-238 转化为钚-239，以增殖核燃料，理论上可把铀资源利用率提高六十倍。快中子反应堆增殖核燃料虽然在技术上已经验证，但其实用还尚待时日，尤其是核燃料的倍增周期较长，在某些情况下可能需三十年之久。利用快中子反应堆嬗变核废料中的次量锕系核素的可行性研究亦正在开展。但由于受临界堆固有特性的影响，次量锕系核素的装载量有限度，这就限制了它嬗变核废料的能力。在核燃料循环系统中，乏燃料水法后处理必需把物料稀释成大体积的硝酸溶液，加入氧化-还原剂及支持剂，经有机溶液及硝酸溶液反复萃取、洗涤及反萃才能达到分离和纯化的目的。正在研究的不同的流程，具有不同的分离效率及达到不同的纯化度。但从根本上讲，水法后处理必然会大大增加物料的容积，可达百倍以上，这将对放射性废物的最后处置带来很多问题。

由此可见，“改进”的技术路线不能适应核能可持续发展的需要。核科技界应研究、开发一种“创新”的技术路线。对创新的核能技术路线总的要求可概括为：具有高效的增殖核燃料或在产能系统中形成自持的核燃料供应的能力，以达到充分利用铀资源的目的；系统本身产生的放射性废物量少，而且在产能的同时具有嬗变外加核废料的能力，以达到核废料减量的目的；燃后乏燃料后处理流程不仅应适应深燃耗元件的要求，而且应达到总废物减容的目的；产能系统具有本征的安全性，除了采用非能动安全措施以进一步降低堆芯熔化概率外，应能从根本上杜绝临界事故的可能性。

“创新”的技术路线要求对核能系统在概念上有根本性的改革与



突破。现有的产能系统是建立在临界堆基础上的；现有的后处理系统是建立在水法-萃取法基础上的。创新的概念则是建立在外中子源驱动的次临界堆产能系统及高温化学——干法后处理的基础上。

在临界堆内，中子倍增因数略大于 1，因此能自持地发生裂变链式反应。在次临界堆内中子倍增因数小于 1，经几代中子引发核裂变后，中子数的增长为一有限的定数，必须有外源中子驱动才能维持裂变链式反应。由于外源中子驱动，与临界堆相比次临界堆内的中子经济学有本质的不同，使之具有比临界堆更有利于转换、增殖核燃料及嬗变核废料的效益。

反应堆内中子经济学可以简略地归结为“中子数平衡”，即系统内产生的中子数与消耗的中子数相等。在临界堆内中子产生数正比于每次裂变的平均中子数，消耗的中子数包括：维持裂变链式反应必须的 1 个中子、系统内所有的寄生吸收、从系统泄漏的中子数及可用于转换（增殖）核燃料或嬗变核废料的中子数（这部分称中子余额）。不同的反应堆内中子余额不同，热中子反应堆内中子余额远小于 1，因此不能增殖核燃料；快中子反应堆内中子余额大于 1，因而具有增殖核燃料能力，也可以把中子余额用于嬗变核废料而不增殖核燃料。在外源中子驱动的次临界堆内中子产生数应附加由外源中子诱发的裂变中子，等效于其中子余额大于临界堆所具有的，从而有利于提高核燃料增殖及嬗变核废料的能力。例如在热中子系统内，可能形成自持的核燃料库存；在快中子系统内，则可能同时兼具核燃料增殖及核废料嬗变的能力。在这种系统内，中子余额的增量与次临界度有关，近似反比于中子倍增系数。当然中子余额增量的加大是以减低系统产能能力为代价的。由于这是靠外中子源驱动运行的系统，取消外源则系统内链式反应自动熄灭，因此杜绝了临界事故发生的可能性。

创新的核能产能系统将是外源中子产生器、次临界反应堆及耦合二者的结合部件构成的混合系统。这种系统在设计时可取核燃料增殖、核废料嬗变及产能能力的折衷，或设计为优化于某一性能下运行的专用系统。这种系统将满足核燃料增殖、核废料嬗变及具有固有安全性的要求。

核燃料高温化学的干法后处理可在无水条件下、强辐照场中运行，将适应处理新型产能系统的深燃耗的要求，而且无需加入大量的水、酸及有机溶液，因而减少物料流，这将使设备简化和尺寸减小，节约投资。由于流程中无慢化中子的介质，如水、有机溶剂等，因此可增大临界质量，便于加大锕系元素的操作量亦是其优点。它的发展前景是相当乐观的。

核能这一创新路线的研究、开发，将集中 20 世纪后期以来核科学技术的研究成果，并在实践上依托已开发及近期内可能在工业上实现的成果为基础。

在产能系统中，产生外源中子的驱动器是关键，这种驱动器必须是可稳定运行的、高效的中子产生器。中能质子散裂反应是已知产生中子能量代价最经济的核反应。估计一台连续波运行的 1 GeV, 20 mA 的质子加速器可满足一个 1000 MWt 量级的核能系统的需要；在优化设计下，以快中子次临界堆为核心的混合系统可具有年嬗变八至十台相同功率商用压水堆电站排放的长寿命次锕系核素的能力，并把这类核废料转化为附加的“可利用”核资源。从工程上讲，加速器与次临界堆结合不破坏二者各自结构的完整性，其结合部件是束流导出及中子产生靶系统，三者相对独立，可分别维修。核聚变研究者曾提出利用能量增益系数大于 1（例如  $G \approx 2$ ）的小型核聚变反应器作为混合系统的驱动器——所谓聚变-裂变混合堆的概念。但核聚变尚处在基础

研究阶段，还不存在稳定运行的“连续波”的  $G < 1$  的聚变反应器；在混合堆系统内，中子余额首先应满足产氙的需要，余下的才可用于增殖核燃料或嬗变核废料；聚变反应器与高功率裂变包层是一个不可分的整体，工程上实现的可能性还不可预见。二者相比，加速器驱动核能系统是现实与有前途的途径。它将是 21 世纪前期国际核能科技界研究开发新一代核能的主攻方向，通称为 ADS。

在干法后处理中可有几种选择，例如熔融盐电解法、熔盐萃取法及氟化挥发法等。熔融盐电解法的依据是每种金属元素在一定介质中形成具有一定电位的离子对，通过适当调节电解槽电位，可有选择地将不同的铀系元素从金属相转移到离子相，把它们分别在阴极上析出，裂变产物则残留在熔盐中，从而达到不同铀系元素与裂变产物有效分离的目的。与其他方法相比较，这方法更有前途，且已经一定的原理性验证试验。

与传统的临界堆及水法后处理相比较，ADS 及与之适应的干法后处理有很多优点，可以解决核能可持续发展所面对的各种障碍。当然存在着挑战性的科学技术问题有待解决，核科学界面临着许多科学技术的创新课题。就现已认识到的可列举以下五方面：

(1) 中能强流质子加速器的研究 ADS 要求 1 GeV, 20 mA 量级具有高于 85% 运行效率的连续波加速器。当前实验室中最高水平是 1 GeV, 1 mA 具有约 40% 运行效率的脉冲加速器，与上述要求的差距是明显的。虽然在原理上为达到 ADS 所要求的目标无根本性的障碍，但就低束流损失、高能量转换率、高使用率及方便的可维修性等诸方面要求而言，应在加速器物理、结构、功率源及各部件研制等许多课题进行深入的研究。

(2) 次临界堆的研究 ADS 系统是有源系统，在连续波加速器驱

动下，它是一个以  $10^{-8} \sim 10^{-7}$  s 为间隔的脉冲式“宏观稳态”运行的空间与能谱参量不可分离的系统。因此，在物理上它与无外源的临界堆稳态系统是不同的，将有一系列新的堆物理问题有待研究。由于外中子源引致的堆功率空间分布不均匀性及新型高效导热剂的开发等一系列工程问题，也是面临的新课题。尤其是外源中子产生靶件是一个高热负荷的元件，甚至可能比堆元件的热负荷还高，其导热与冷却是解决加速器与反应堆耦合并使系统稳定工作的关键之一。

(3) 核物理研究 ADS 系统的核过程比临界堆要复杂。粗略地讲，至少应对下述三方面进行精确的定量研究：外源中子场的空间及能量分布；上限达 100 MeV 的中子核反应截面；在深燃耗条件下各种铀系核素（包括某些寿命不长的核素）的中子核反应截面研究。

(4) 放射化学研究 在 ADS 中，嬗变铀系元素要求后处理流程中铀、钚元素的分离与回收率大于 99.98%，锆和铪应大于 99.99% 的工业规模干法后处理流程尚待解决。为满足高度分离要求的熔融盐和熔融金属体系中分离的级联技术尚待开发；适应不同性能（金属或陶瓷等）原始燃料与主工艺接口的流程也待研究。这些问题均应在实验室研究的基础上开展后继的工艺验证才能解决。

(5) 材料研究 为适应高温、高辐照及强腐蚀条件下的运行工况，有一些关键的材料问题是过去未遇到的，例如强流束引出窗材料、高效的反应堆导热剂与其他材料的相容性问题、适应强腐蚀的熔盐后处理过程的合金材料等。

总之 ADS 产能及干法后处理核燃料循环系统的研究、开发面临着多学科具有重大学术价值与实用价值的挑战性课题。它必将推动各门学科向新的领域探索，而其成果将汇集成新一代核能系统的建立，它已成为 20 世纪 90 年代以来国际核科技界的研究热点。目前美、法、

日等重要核能国家都在按 ADS 的技术路线,启动各自符合其国家利益的研究、开发计划;西班牙、瑞典等中等核能国家则把研究重点放在核废料嬗变上;韩国是缺能源国家,虽然现在核电份额已占 30%,但仍对核能开发有很高的期待,其 ADS 研究颇有后来居上之势;西欧亦有研究把 ADS 用于钍资源利用的计划。可以预期在 21 世纪 30 年代 ADS 核能系统将成为经技术验证的新一代核能系统,并在其基础上取代基于 20 世纪中期科学技术基础上建立的现行核能系统,使核能成为 21 世纪内一种可持续发展的重要能源。

## **Introduction to an Innovative Scientific and Technical Option for Sustainable Development of Nuclear Energy**

DING Dazhao WANG Fangding  
China Institute of Atomic Energy, Beijing, 102413

## 本文集各大部分负责编辑情况

|              |       |
|--------------|-------|
| I. 系统:       | 孙凤春编辑 |
| II. 加速器:     | 郭向阳编辑 |
| III. 次临界反应堆: | 武 洁编辑 |
| IV. 靶物理:     | 李曼莉编辑 |
| V. 核数据:      | 李曼莉编辑 |
| VI. 化学分离和嬗变: | 武 洁编辑 |

This report is subject to copyright. All rights are reserved. Submission of a report for publication implies the transfer of the exclusive publication right from the author (s) to the publisher. No part of this publication, except abstract, may be reproduced, stored in data banks or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the publisher, China Nuclear information Centre, and/or Atomic Energy Press. Violations fall under the prosecution act of the Copyright Law of China. The China Nuclear Information Centre and Atomic Energy Press do not accept any responsibility for loss or damage arising from the use of information contained in any of its reports or in any communication about its test or investigations.

# 目 录

## I. 系统

- 1.1 未来核能利用的方案探讨
  - 加速器驱动放射性洁净核能系统 ..... 丁大钊 (3)
- 1.2 加速器驱动次临界堆堆芯物理概念研究..... 赵志祥等 (17)
- 1.3 Research on Amplification Multiple of Source Neutron  
Number for ADS ..... LIU Guisheng et al. (28)
- 1.4 加速器驱动游泳池反应堆物理分析 ..... 徐晓勤 (38)
- 1.5 加速器驱动 RCNPS 次临界反应堆初步分析 ..... 徐晓勤等 (47)
- 1.6 关于加速器驱动洁净核能系统原理验证装置的几点考虑... 丁大钊 (53)
- 1.7 加速器驱动次临界堆的安全和控制特性的初步研究..... 段天英等 (70)
- 1.8 Proposal for a Verification Facility of  
ADS in China ..... GUAN Xialing et al. (79)

## II. 加速器

- 2.1 High Power Proton Accelerator for Nuclear  
Power Plant ..... FANG Shouxian and FU Shinian (95)
- 2.2 强流束传输中束晕的形成 ..... 傅世年等 (108)
- 2.3 周期场中强束流的特性研究 ..... 欧阳华甫等 (121)
- 2.4 洁净核能系统的 7 MeV 质子 RFQ 初步物理设计 ..... 罗紫华 (131)
- 2.5 质子直线加速器设计研究 ..... 郁庆长 (144)
- 2.6 紧凑型强流微波离子源特性研究 ..... 崔保群等 (154)

## III. 次临界反应堆

- 3.1 加速器驱动次临界装置的燃耗分析 ..... 刘桂生等 (161)
- 3.2 关于洁净核能系统中的反应堆工程技术问题..... 罗璋琳等 (167)
- 3.3 关于 ADS 系统中次临界堆对加速器可靠性的要求  
及其原理验证研究 ..... 罗璋琳等 (184)



- 3.4 Study for  $^{228}\text{Th}$  Reduction in Thermal Reactor with  
Th-U Fuel Cycles ..... XU Xiaoqin (196)

#### IV. 靶物理

- 4.1 散裂中子靶能量沉积研究 ..... 樊胜等 (203)  
4.2 150 MeV 质子入射固态金属靶性质研究 ..... 樊胜等 (211)  
4.3 ADS 散裂靶辐射损伤研究 ..... 樊胜等 (219)  
4.4 Calculations of Nucleon Emission and Energy Deposition  
of Spallation Neutron Sources Induced by Intermediate  
Energy Protons ..... SHEN Qingbiao et al. (231)

#### V. 核数据

- 5.1 Analysis of Proton-induced Reactions on  $^{208}\text{Pb}$  with Incident  
Energy 590 MeV and 322 MeV ..... FAN Sheng et al. (245)  
5.2 中能质子引起散裂反应的碎片分布研究 ..... 樊胜等 (260)  
5.3 Theoretical Calculations of Proton Reaction Cross Sections  
in a Lead Target with Energy  $E_p \leq 300$  MeV ... ZHOU Jinfeng et al. (270)  
5.4 Systematics of Nucleon-Nucleon Total, Elastic and Inelastic  
Scattering Cross Sections and Elastic Scattering Angular  
Distributions up to 10 GeV ..... SHEN Qingbiao (292)  
5.5 Calculation of Proton Induced Reaction on  $^{209}\text{Bi}$  in Energy  
Region from 7 to 250 MeV ..... GAO Bo et al. (301)

#### VI. 化学分离与嬗变

- 6.1 分离与嬗变概念中的分离综述 ..... 张丕禄等 (315)  
6.2 加速器驱动次临界系统嬗变少钢系核素 ..... 徐晓勤 (329)