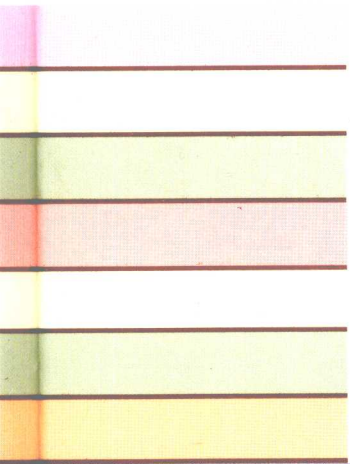


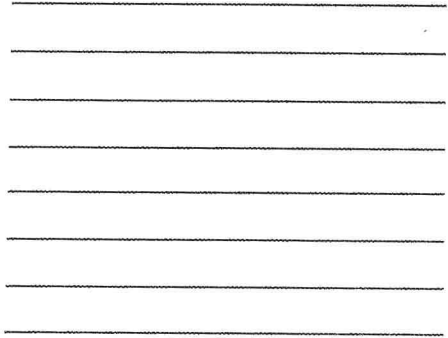


国际 科学技术前沿 报告 *2011*

张晓林 张志强 主编



科学出版社



国际 科学技术前沿 报告 2011

张晓林 张志强 主编

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书从基础科学、生命科学与生物技术、资源环境科学与技术、战略高技术等四大科学技术领域,选择钍基核燃料循环、土壤污染修复、系统生物学、生物炼制、极地研究、地质灾害、太赫兹研究、无线传感器网络、高端洁净煤发电、稀土永磁材料和微机电系统研究等 11 个科技创新前沿领域、前沿学科、热点问题或技术领域,逐一对其进行国际研究发展态势的系统分析,全面剖析这些领域国际科技发展的整体进展状况、研究动态与发展趋势、国际竞争发展态势,并提出我国开展相关领域研究的对策建议,为我国这些领域的科技创新发展的战略决策提供重要决策依据,为有关科研机构开展这些科技领域的研究部署提供国际发展的参考背景。

本书中的前沿和热点问题,选题新颖,针对性强,资料翔实,对策建议可操作性强,适合政府科技管理部门和科研机构的管理者、科技战略研究人员和相关学科领域的研究人员以及大学师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

国际科学技术前沿报告 2011 / 张晓林, 张志强主编. —北京: 科学出版社, 2011. 11

ISBN 978-7-03-032534-1

I. ①国… II. ①张… ②张… III. ①科学技术—技术发展—研究报告—世界—2011 IV. ①N110.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 206822 号

责任编辑: 郭勇斌 李 爽 卜 新 / 责任校对: 钟 洋

责任印制: 赵德静 / 封面设计: 黄华斌

编辑部电话: 010-64035853

E-mail: houjunlin@mail.sciencep.com

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 11 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2011 年 11 月第一次印刷 印张: 38 3/4 插页: 12

印数: 1—1 500 字数: 958 000

定价: 138.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《国际科学技术前沿报告 2011》 研究组

组 长：张晓林 张志强

成 员：张 薇 冷伏海 刘 清

高 峰 邓 勇 曲建升

房俊民 张 军 赵亚娟

徐 萍 陈 方 梁慧刚

张 静

前 言

中国科学院国家科学图书馆作为服务于基础科学、资源环境科学、生命科学、战略高技术以及重大产业与技术创新、边缘交叉科学发展的国家级科技信息服务机构，以服务科技决策一线和科技研究一线为己任，在全面建设支撑科技创新的信息资源与服务体系的同时，逐步建立起全方面、多层次、集成化和协同化的支持科技规划和科技决策的战略情报研究服务体系，跟踪监测国际科技战略与政策，系统分析科技领域发展态势，深入调研重大科技进展和重要科技政策，全面评价国际和领域的科技竞争力，并逐步建立系统的世界科技态势监测分析服务机制。

中国科学院国家科学图书馆根据中国科学院科技创新的战略布局，发挥其系统整体化优势，按照统筹规划、系统布局、分工负责、整体集成、长期积累、协同保障的原则，组建面向国家和中国科学院科技创新的宏观战略决策、面向中国科学院科技创新基地和学科领域科技创新决策的多层次战略情报研究服务体系：总馆负责基础科学以及交叉和重大前沿、空间光电与大科学装置、现代农业科技等创新基地的战略情报研究，兰州分馆负责资源环境科学以及生态与环境、资源与海洋科技创新基地的战略情报研究，成都分馆负责部分战略高技术以及信息科技、先进工业生物技术科技创新基地的战略情报研究，武汉分馆负责部分战略高技术以及先进能源、先进制造与新材料科技创新基地的战略情报研究，上海生命科学信息中心负责生命科学以及人口健康与医药科技创新基地的战略情报研究。科技前沿跟踪、决策需求导向、专业战略分析、政策咨询研究、服务体系建设的机制和发展措施，促进了学科领域科技战略研究与科技决策咨询中心的快速成长和发展。

中国科学院国家科学图书馆部署总馆、兰州分馆、成都分馆、武汉分馆、上海生命科学信息中心等单位的战略情报研究团队围绕各自分工关注的科技创新领域的科技发展态势选择相应科技创新领域的前沿科技问题或热点科技领域开展国际发展态势分析研究，于2007年、2008年、2009年完成《国际科学技术前沿报告》各自年度研究报告。这些年度研究报告均呈送中国科学院院内部门、研究所和院外相关科技管理部门参考。2010年完成的《国际科学技术前沿报告2010》在提交科技创新管理部门参考的同时，还公开出版，供广大科

技人员参考。

中国科学院国家科学图书馆 2011 年继续部署总馆和各分馆及上海生命科学信息中心的情报研究团队选择相应科技创新领域的前沿学科、热点问题或重点技术领域,开展国际发展态势分析研究,完成这些领域的分析研究报告 11 份。总馆完成《钍基核燃料循环国际发展态势分析》、《土壤污染修复国际发展态势分析》、《太赫兹科学研究与应用国际发展态势分析》,兰州分馆完成《极地研究国际发展态势分析》、《地质灾害研究国际发展态势分析》,成都分馆完成《生物炼制领域国际发展态势分析》、《无线传感器网络国际发展态势分析》,武汉分馆完成《高端洁净煤发电技术国际发展态势分析》、《稀土永磁材料研究国际发展态势分析》、《微机电系统研究国际发展态势分析》,上海生命科学信息中心完成《系统生物学领域国际发展态势分析》。本书将这 11 份前沿学科、热点问题或重点技术领域的国际发展态势分析研究报告汇编为《国际科学技术前沿报告 2011》,正式出版,供科技创新决策部门和科研人员参考。

围绕有效支撑和服务国家“十二五”科技创新发展和中国科学院“创新 2020”科技战略决策的新需求,适应数字信息环境和数据密集型科研的新趋势,中国科学院国家科学图书馆的科技战略研究咨询工作将进一步面向需求、面向前沿、面向决策,着力推动建设科技战略情报研究的新型业务发展模式,着力推动开展专业型、计算型、战略型、政策型和方法型战略情报分析和科技战略决策咨询研究,进一步强化科技战略研究服务的针对性和前瞻性,深化科技战略分析研究的层次,提升科技战略分析研究的决策咨询水平。

中国科学院国家科学图书馆的战略情报研究服务工作一直得到中国科学院院领导和院规划战略局、相关专业局、相关职能局、科技战略路线图研究专家组,以及科技部、国家自然科学基金委员会等部门领导和专家的大力支持和指导,得到其他各个领域专家学者的指导和参与,在此特别表示感谢。衷心希望我们的工作能够继续得到中国科学院和国家有关部门领导和战略研究专家的大力指导、支持和帮助。

国际科学技术前沿报告研究组

2011 年 4 月 6 日

目 录

前言

1 钚基核燃料循环国际发展态势分析	1
1.1 引言	1
1.2 钚基核燃料的重要实验研究现状与发展战略	2
1.3 钚基核燃料循环论文统计与主题挖掘分析	9
1.4 钚基核燃料循环发明专利分析与主题挖掘	24
1.5 钚基核燃料循环的研发趋势分析	33
1.6 对我国钚基核燃料循环研发的几点建议	34
2 土壤污染修复国际发展态势分析	36
2.1 国内外土壤污染修复相关法律政策	37
2.2 国内外土壤污染修复研究计划与项目布局	40
2.3 土壤污染修复相关研究论文分析	50
2.4 土壤污染修复相关专利分析	64
2.5 土壤污染修复相关国际会议内容分析	72
2.6 结论与建议	75
3 系统生物学领域国际发展态势分析	79
3.1 引言	81
3.2 系统生物学规划研究机构及相关数据库分析	83
3.3 系统生物学技术的研究和应用现状	106
3.4 系统生物学研究面临的挑战	130
3.5 结论与建议	132
4 生物炼制领域国际发展态势分析	136
4.1 引言	136
4.2 国际生物炼制领域重要政策规划与举措	138
4.3 国际生物炼制研究专利分析	155
4.4 国际生物炼制领域主要技术和代表性产品的研究进展	173
4.5 展望与建议	181
5 极地研究国际发展态势分析	187
5.1 引言	188
5.2 极地研究计划与主要国家极地研究	191
5.3 极地研究文献计量分析	202
5.4 极地研究国际前沿态势	211



5.5	中国极地研究进展、启示与建议	225
6	地质灾害研究国际发展态势分析	231
6.1	引言	232
6.2	国际地质灾害研究战略与计划	235
6.3	地质灾害研究进展	245
6.4	地质灾害研究文献计量分析	259
6.5	地质灾害研究专利分析	279
6.6	地质灾害研究前沿与重点	289
6.7	加强我国地质灾害研究的建议	292
7	太赫兹科学研究与应用国际发展态势分析	299
7.1	引言	299
7.2	主要国家和国际组织发展战略及重要计划	305
7.3	太赫兹研究论文的科学计量分析	332
7.4	太赫兹专利技术分析	348
7.5	太赫兹科学与应用的研究特点与发展趋势分析	360
7.6	启示与建议	363
8	无线传感器网络国际发展态势分析	367
8.1	引言	368
8.2	各国无线传感器网络发展动态与战略部署	371
8.3	无线传感器网络重点技术领域及其发展态势分析	391
8.4	无线传感器网络应用	406
8.5	无线传感器网络标准建设	416
8.6	结论与建议	424
9	高端洁净煤电发电技术国际发展态势分析	428
9.1	引言	429
9.2	主要国家和地区洁净煤电发电战略与计划	431
9.3	高端洁净煤电发电技术研究重点与趋势分析	440
9.4	高端洁净煤电发电技术标准信息分析	489
9.5	高端洁净煤电发电技术优势比较	508
9.6	对中国发展高端洁净煤电发电技术的建议	516
10	稀土永磁材料研究国际发展态势分析	521
10.1	引言	522
10.2	稀土材料政策环境分析	523
10.3	稀土永磁材料产业发展和新应用分析	538
10.4	稀土永磁材料技术进展与前沿研究	547
10.5	稀土永磁 SCI 论文统计分析	554
10.6	稀土永磁专利统计分析	561
10.7	结论与建议	570



11 微机电系统研究国际发展态势分析	575
11.1 引言	575
11.2 世界部分国家/地区支持推动 MEMS 发展的举措	577
11.3 MEMS 技术发展现状	581
11.4 MEMS 产业发展现状	588
11.5 MEMS 发展瓶颈——封装	595
11.6 MEMS 文献计量分析	597
11.7 发展建议	606

彩图

1 钍基核燃料循环国际发展态势分析

冷伏海¹ 刘小平¹ 李泽霞¹ 黄龙光¹ 王 林¹ 王海燕¹ 周丽英²

(1. 中国科学院国家科学图书馆; 2. 中国农业大学图书馆)

钍基核燃料循环的研发工作已经进行 50 多年, 取得了大量的试验研究成果, 但其规模远小于铀燃料和铀-钍燃料循环的研究。美国、英国、德国、印度、日本、俄罗斯、荷兰等国都在进行这方面的研究工作。有关国家还在实验堆中进行了将钍燃料辐照至高燃耗的研究, 并且有几座实验堆部分或完全装载了钍基燃料。

本章对钍基核燃料循环方式、钍燃料元件类型及制造、有关钍基核燃料的重要实验研究、动力堆和轻水增殖堆使用钍基核燃料的实验研究、基于钍燃料循环的先进反应堆概念、钍与加速器次临界系统、印度钍燃料循环计划、加拿大的钍燃料研究计划、挪威发布的钍基燃料研究报告进行了系统调研和分析, 同时对钍基核燃料循环领域的科学论文和专利文献进行了定量分析。

综合定性调研和定量分析, 建议我国应该面向世界科学前沿, 结合中国国情, 加强整体规划, 制定我国钍基核燃料循环研究的国家发展战略, 进一步拓展国际合作内涵, 规划优先发展的基础实验研究, 部署钍燃料元件制造技术、钍燃料反应堆裂变产物及其放射性物质处理技术方面的前瞻性研究。

1.1 引言

核能开发是我国的一项既定政策, 发展核能离不开核燃料。能取代急剧减少的²³⁵U 的核燃料之一是²³³U, 它需要由²³²Th 通过核反应转换而来。钍是一种天然放射性金属, 在地壳中的储量是铀的 3~5 倍。将辐照后的钍燃料从反应堆中卸出, 分离出²³³U, 然后将²³³U 作为燃料用于另外的反应堆中, 产生核能, 此途径称为钍-铀燃料循环。钍-铀燃料循环在热中子反应堆中有可能实现核燃料自持或近增殖, 与铀-钍燃料循环比较, 钍-铀燃料循环产生较少的次锕系核素, 钍基燃料在反应堆内可允许更高的燃料芯块温度和更深的燃耗, 钍基核燃料对各种堆型的适应性较好, 无需对现有反应堆的燃料组件和堆芯几何尺寸及相应的结构材料等做重大改变, 但钍-铀燃料循环工艺尚不成熟, 还没有建立工业体

系,至今尚未真正用于世界各国的核能生产。

在反应堆中将可转换核素²³²Th 转变为易裂变核素²³³U 后,²³³U 的利用可以按“一次通过”(Once-through)燃料循环或闭式燃料循环(Closed Fuel Cycle)两种方式进行。

20 世纪 90 年代初,美国前海军堆计划首席科学家 Radkowsky 提出了一种在轻水堆中进行的“一次通过”式的钍燃料循环,称做 RTF(Radkowsky Thorium Fuel)循环。之后,国际上开展的钍基核燃料循环研究都是基于“一次通过”的循环方式,只有印度坚持研究开发钍燃料的闭式循环方式,但规模不大。所以,钍基核燃料闭式循环的研究开发,总体上仍属于 20 世纪 50~60 年代水平。2006 年 2 月美国提出了“全球核能合作伙伴”(GNEP)战略,正式提出了恢复闭式燃料循环方案,从而明确否定了其多年来一直坚持的乏燃料“一次通过”的燃料循环方式。

钍基核燃料和用于各种反应堆的钍燃料元件之间存在较大差异。除了熔盐增殖堆使用液态混合氟化物作为燃料和主要冷却剂以外,其他所有反应堆均使用固体燃料,这种固体燃料是一种微小的“陶瓷燃料微球体”、“陶瓷燃料球芯块”或“金属合金燃料棒”。制造二氧化钍和氧化钍基混合氧化燃料元件的技术主要包括“粉-球”路线、“振动溶胶”路线、“溶液-凝胶微球体”制粒工艺和渗透技术。

1.2 钍基核燃料的重要实验研究现状与发展战略

1.2.1 有关钍基核燃料的重要实验研究

国际上开展的有关钍基核燃料的重要实验研究排在前三位的是高温气冷堆、动力堆和轻水增殖堆。另外,还有几个快中子反应堆使用钍基核燃料的实验研究,如表 1-1 所示。

表 1-1 国际钍基核燃料重要实验

国家	反应堆	研究内容
德国	于利希(Julich) AVR 核实验堆	1967~1988 年,该反应堆以 15 兆瓦热功率运行了 750 周,其中约 95% 的时间是采用钍基燃料,燃料由约 10 万个弹球大小的燃料元件组成,共使用了约 1360 千克钍(与高浓铀混合),最大燃耗达到 150 000 兆瓦 _d /吨
澳大利亚、丹麦、瑞典、挪威、瑞士、英国	英国温弗里斯(Winfrith) 120 兆瓦的 Dragon 反应堆	Dragon 是经济合作与发展组织与欧洲原子能共同体在 1964~1973 年的合作项目。在 Dragon 反应堆中使用 10:1 的钍、高浓铀混合钍燃料元件接受了 741 个满功率的辐照。钍-铀燃料被用于“增殖和换料”,因此生成的 ²³³ U 不断以相同的速度替代 ²³⁵ U,燃料能够在反应堆中使用约 6 年
美国	通用原子公司的桃花谷(Peach Bottom)高温石墨慢化氦冷堆	1967~1974 年,高温石墨慢化氦冷堆在 110 兆瓦热功率条件下,使用高浓缩铀和钍燃料运行
加拿大	加拿大原子能公司的 CANDU 堆	1987 年,在三个研究堆和一个预商用反应堆中使用二氧化铀含量高达 30% 的二氧化钍燃料运行,大多数用 1%~3% 的二氧化铀(高浓缩铀)

续表

国家	反应堆	研究内容
印度	Kamini 中子源研究堆, 毗邻一座 40 兆瓦 _t 的快中子增殖试验堆 (使用二氧化钍燃料)	1996 年投入运行的 Kamini 中子源研究堆以从另一座反应堆的二氧化铀燃料中回收的 ^{233}U 为燃料
荷兰	一座水均匀悬浮反应堆	20 世纪 70 年代中期, 该反应堆采用高浓缩铀/钍燃料, 燃料在溶液中循环使用, 并不断进行回收处理, 以获取裂变产物, 从而获得高的钍转换率, 并以 1 兆瓦热功率运行 3 年时间

1.2.2 动力堆使用钍基核燃料的实验研究

在将钍基燃料用于动力堆方面, 世界各国已取得了许多经验。其中, 一些是以高浓缩铀作为主要燃料, 国际钍基燃料动力堆实验如表 1-2 所示。

表 1-2 国际钍基燃料动力堆实验

国家	反应堆	实验内容
德国	从 AVR 堆发展而来热功率 300 兆瓦的 THTR 堆	1983 ~ 1989 年, 该反应堆使用约 67.4 万个燃料球。其中, 半数钍/高浓缩铀燃料 (其他是石墨慢化剂和一些中子吸收剂), 不断进行负载回收, 燃料平均通过反应堆堆芯 6 次
美国	美国唯一钍燃料商业机组圣弗兰堡 (Fort St. Vrain) 高温 (700℃) 石墨慢化氦冷反应堆	1976 ~ 1989 年, 该机组从德国的 AVR 发展而来, 是一座高温 (700℃) 石墨慢化氦冷反应堆 (热功率 842 兆瓦、电功率 330 兆瓦), 使用钍/高浓缩铀燃料。燃料球由碳化钍和碳化钍/ ^{235}U 制成, 表面涂敷氧化硅和热解碳层, 用于容纳裂变产物, 燃料以六角柱 (棱柱) 的形式排列。该机组使用的燃料中含有近 25 吨钍, 燃耗达到 170 吉瓦 _d /吨
美国	希平港 (Shippingport) 机组	希平港 (Shippingport) 机组中对钍基燃料在传统压水堆 (PWR) 中的应用情况进行了研究
印度	Kakrapar 加压重水堆	钍作为能源应用于两个 Kakrapar 加压重水堆 (PHWR) 的初始反应堆堆芯
德国	电功率 60 兆瓦的林根 (Lingen) 沸水堆	德国电功率 60 兆瓦的林根 (Lingen) 沸水堆 (BWR) 也使用过钍-铀基燃料试验组件

1.2.3 轻水增殖堆使用钍基核燃料的实验研究

轻水增殖堆 (LWBR) 是 PWR 重要的潜在应用, 并在美国希平港 (Shippingport) 反应堆中成功进行了论证。该轻水增殖堆的堆芯划分为点火区和转换区, 在此区域内, 燃料颗粒中存在一种二氧化钍和二氧化铀的混合物, 该混合物的 98% 含有 ^{233}U 。二氧化铀

5% ~6% 存在于点火区，1.5% ~3% 存在于增殖区。在堆芯寿期初始阶段，反射区只有氧化钍存在。因为在那时每次分裂²³⁵U 不能释放足够的中子，而且²³⁹Pu 捕获太多中子，以至于压水堆不能增殖，所以使用²³³U。钍基核燃料轻水增殖堆实验论证过程如表 1-3 所示。

表 1-3 钍基核燃料轻水增殖堆实验论证过程

时间	内容
1957 年 12 月	美国希平港着手第一个大规模的核能反应堆发电的商业应用
1965 年	原子能组织开始设计反应堆 ²³³ U/钍堆芯
1976 年	能源研究和发展组织（现为能源组织的一部分）建立了先进的轻水增殖堆应用计划来评估轻水增殖堆的商业应用
1977 年 8 月至 1982 年 10 月	LWBR 概念也曾在希平港反应堆进行过测试但最终关闭。在这期间，该测试运行高于 29 000 有效满功率小时，有效性 76%，输出总电量 2.1 × 10 ³ 万千瓦时。检查反应堆堆芯发现，1.39% 之多的裂变燃料一直活跃在堆芯生命期，这表明增殖已经产生

1.2.4 国际上钍基核燃料循环的研究重点与进展分析

1.2.4.1 基于钍燃料循环的先进反应堆概念

世界各国对钍基燃料的研究开发经验表明，由于钍基燃料良好的中子经济性，它可用于各种已有的反应堆（包括轻水堆、重水堆、高温气冷堆和快堆），而无需改变堆芯设计。目前，国际上正在开展的基于钍燃料循环的先进反应堆概念研究如表 1-4 所示。

表 1-4 国际钍燃料循环先进反应堆概念

反应堆	实验过程与原理	国家/机构	研究进展
轻水堆（尤其是压水堆）	轻水堆采用基于氧化铀的燃料，燃料棒中含有氧化钍/氧化铀颗粒。美国、俄罗斯合作在俄罗斯 VVER-1000 堆上开展的钍燃料处置多余武器级铀的研究	美国、俄罗斯	压水堆是目前世界上广泛采用的最成熟的一种堆型（约占 60%），钍燃料的燃耗可高达 100 吉瓦 _d /吨以上，驱动燃料和增殖燃料的换料周期分别为 3 年和 10 年。如果实行闭式燃料循环，则压水堆燃料的高燃耗可以减少循环次数
高温气冷堆（棱柱形燃料元件）	燃气轮机－模块化氦反应堆（GT-MHR），GT-MHR 堆芯可以使用各种不同的燃料，包括高浓缩铀/钍， ²³³ U/钍和钍/钍等多种燃料	美国通用原子公司	高温气冷堆取得了良好的运行记录。以美国为首的第四代核能系统将超高温气冷堆作为候选核能系统之一。目前高温堆使用的颗粒包覆燃料在进行后处理时的难度很大，这种燃料适合于“一次通过”的循环方式，需要开发适于后处理的新型燃料。法国在高温气冷快堆发展计划的实验技术示范堆（ETDR）研究中，正在考虑设计适于后处理的新型燃料芯块
高温气冷堆（球床燃料元件）	南非的球床模块反应堆* 技术处于世界领先地位，该堆有使用钍燃料的潜力。床模块反应堆的开发建立在德国有关 AVR 与高温钍反应堆以及在中国和南非的反应堆之上	南非	

续表

反应堆	实验过程与原理	国家/机构	研究进展
Radkowsky 钍反应堆	Radkowsky 教授提出“点火区/转换区”的概念,提出的“一次通过”式 Radkowsky 钍燃料循环具有防扩散功能 Radkowsky 带领团队建造了希平港工厂及其 Radkowsky 钍反应堆 (RTR)	美国海军	1996 年,美国能源部的防扩散计划启动了一项开发与验证 Radkowsky 钍燃料循环概念的研究项目。该项目由能源部出资,由布鲁克黑文国家实验室指导技术开发工作,由俄罗斯的库恰图夫研究所 (RRC-KI) 负责验证性工作。1995~2001 年,国际原子能组织实施了协调研究计划 (CRP),该计划目标是防止核扩散
熔盐堆	“双流体”设计可以从裂变燃料盐中分离出钍。消除了分离氟化钍 (沸点 1680℃) 以及高温蒸馏得到的铀系元素氟化物带来的技术挑战	法国、俄罗斯、美国和国际组织	最近几年,法国、俄罗斯、美国和经合组织等都在重新研究和评估钍燃料在熔盐堆中的应用。但熔盐堆燃料回路的高放射性水平带来的维修问题,设备与管线的腐蚀问题等,尚需得到进一步解决
CANDU 重水堆使用钍基燃料	钍基燃料闭式循环,其中包括乏燃料处理、 ^{233}U 回收、钍循环利用。循环中向钍中加入少量易裂变材料,以启动并维持链式反应,并使 ^{232}Th 通过中子俘获及随后的 β 衰变生成 ^{233}U 。在后续的循环中,最初的驱动燃料将逐步被再循环的 ^{233}U 所取代	加拿大原子能公司	近期,钍资源丰富的国家可在 CANDU 堆中使用“一次通过式”燃料循环,以便获得钍基燃料循环技术方面的经验,并在乏燃料中积累 ^{233}U 战略资源。相对于使用天然铀燃料而言,在 CANDU 堆中使用“一次通过式”钍-低浓铀燃料循环可将铀的利用率提高到 30%。这将为使用者提供一种防止未来铀供应短缺的低成本资源保障策略,并为未来实现“闭式”燃料循环奠定基础
先进重水堆 (AHWR)	大部分堆芯将是次临界的,使用氧化钍- ^{233}U 氧化物和钍- ^{239}Pu 氧化物的化合物,该系统的 ^{233}U 可实现自给自足。反应堆堆芯初始全部是钍- ^{239}Pu 氧化物,当 ^{233}Pu 可用时,每个装配点的燃料的 30% 使用的是同轴环排列的钍- ^{233}U 氧化物。其设备的设计寿命为 100 年,燃料能源的利用率达到 65%,约 75% 的能量来自钍	印度	由于重水的中子慢化比为轻水的 80 倍左右,所以重水堆的中子经济性远好于轻水堆。重水堆的主要问题是能耗太低 (20~24 吉瓦 _d /吨),导致闭式燃料循环次数太多。印度正在开展先进重水反应堆的研究工作。与加拿大的 ACR 设计类似,电功率 300 兆瓦。的 AHWR 设计也用轻水冷却
快中子增殖反应堆	一个建在 Kalpakkam 的 500 兆瓦 _e ,快中子增殖反应堆设计为由钍转换成 ^{233}U	印度	快中子增殖反应堆 (FBR) 与先进重水反应堆 (AHWR) 一样在印度的核动力三阶段计划中占有重要的一席之地

续表

反应堆	实验过程与原理	国家/机构	研究进展
液态氟铀反应堆	利用在液体铀盐转换区增殖的 ²³³ U。堆芯的熔融氟化盐中有可裂变的 ²³³ U氟化物。铀四氟化物存在于含有锂和铍的氟化盐中，由于堆芯的热量而熔化。新产生的 ²³³ U形成可溶解的四氟化铀，转换区溶液充溢的氟气作用可使其转换为气态六氟化铀，不会与铀四氟化物发生化学反应。铀的六氟化物从溶液中释放出来后被俘获，在还原柱内由氢气作用分解成可溶四氟化铀，直接进入堆芯，作为裂变燃料	美国	在美国，索伦森等经常在美国能源会议上宣传推广铀这种绿色核燃料。美国著名气候学家詹姆斯·汉森在给奥巴马总统的公开信中特别提到，铀将成为潜在燃料来源。《2009 铀能源独立及安全法案》（Thorium Energy Independence and Security Act of 2009）提交到美国国会，通过后，美国能源部获得 2.5 亿美元用于铀的研究

* 由于融资困难，南非政府已决定关闭该国的球床模块反应堆（PBMR）。不过，美国的下一代核电厂（NGNP）项目也有 PBMR 的研发设计任务，并且以西屋公司为首的研发团队在南非项目的基础上提出 200 兆瓦_{th}热电联发电厂要领设计 PBMR-CG

1.2.4.2 铀与加速器驱动次临界系统

近年来，各国都在研究加速器驱动次临界系统（表 1-5），并具有具体目标。美国、欧洲和日本的加速器驱动系统的主要目标是，通过燃烧铀和锕系元素与长寿命裂变产物的嬗变，将核能系统的固有安全性引入核废料处置，并为其提供长期的解决方案。但 ADS 必须解决加速器及其整个系统的长期稳定可靠运行及其可维护性等一系列具有挑战性的问题。

表 1-5 国际加速器铀燃料研究实验

	目标	研究内容
印度	从丰富的铀资源中获得安全高效的 ²³³ U增殖，并保证核能源的可持续性	在加速器驱动系统中，加速器产生的高能质子撞击重靶核（铅、铅-铋或其他材料）发生散裂反应，从而产生高能中子。这些中子可以直接进入含有铀的次临界反应堆中，从而生成 ²³³ U，并使其发生裂变。因此，加速器驱动系统可以实现自持续链式裂变反应，这种反应可以很容易地被中止，可以用于发电或消除铀/钚燃料循环中产生的锕系元素
韩国原子能研究所	为次临界系统开发基础技术，并在 2006 年以后建立小规模试验设施	韩国计划在韩国原子能研究所的混合动力提取反应堆（HYPER）中开展加速器驱动系统研究。混合动力提取反应堆的超燃料循环概念利用熔盐形式的铀发电，并改变超铀元素。在这种燃料循环中，超铀元素中的裂变钚同位素将被焚化，产生能量，并由铀产生随后用做裂变材料的 ²³³ U
欧洲粒子物理研究所		卡洛鲁比亚教授领导的研究团队提出采用基于回旋加速器的混合系统，利用铀燃料循环产生核能。该概念减少了对废核燃料中较高锕系元素含量的担忧，利用相当丰富的廉价铀，是一个非常具有吸引力的选择



1.2.5 各国家钍燃料研究战略与计划

1.2.5.1 印度钍燃料循环计划

印度由于钍资源非常丰富，将钍资源用于大规模能源生产以作为核动力计划的一个重要目标。1970 年分离出了首批²³³U 后，印度便建立了世界上第一座使用钍的反应堆——格格拉帕尔（Kakrapar）1 号机组。格格拉帕尔 1 号和 2 号机组都装载了 500 千克钍燃料，以便改善其运行实绩。格格拉帕尔 1 号机组是世界上第一座使用钍而不是贫铀实现堆芯功率展平的反应堆。1995 年，格格拉帕尔 1 号机组使用钍燃料实现了约 300 天的满功率运行，而格格拉帕尔 2 号机组实现了 100 天的满功率运行。印度计划在盖加（Kaiga）1 号和 2 号机组以及拉贾斯坦（Rajasthan）3 号和 4 号机组中使用钍基燃料。目前，印度正在开发先进的钍基燃料循环技术，并将计划建造 9 座以钍为燃料的核电厂，使之成为世界上唯一一个同时计划建造 9 座以钍为燃料的核电厂的国家。

印度的核电三阶段设想是在 20 世纪 50 年代由该国核计划之父、物理学家 Homi Bhabha 提出的。从英国剑桥大学学成回国，Bhabha 就围绕解决印度目前商业反应堆燃料的铀矿资源贫乏这一问题来开展工作与设想。他试图独辟蹊径利用该国巨大的钍资源，如果在外面包覆一个中子供应设备，就可当做核燃料使用。

印度的铀储量约占世界总量的 0.8%，对于印度目前建造的反应堆的容量来说是非常不足的。印度拥有约 29 万吨钍，约占世界钍储量的 32%，印度的钍储量是铀的 6 倍（戴波，2006）。

印度基于钍技术的核电计划集中开发可以使用钍燃料的快中子增殖堆。印度核电发展三个阶段计划的第三阶段，即先进重水堆将燃烧²³³U 和钍，在可持续“闭合”循环中将钍资源转化为铀，该阶段已在实验室规模下进行过验证。

然后对乏燃料进行后处理，以回收易裂变材料进行再循环。上述第三个阶段的另一种选择是，在继续实施 PHWR 和 FBR 计划的同时，采用次临界加速器驱动系统（ADS）。

目前，英国加入印度钍研究计划，利用英国工程与物理研究理事会和印度原子能部联合资助的总额超过 200 万英镑的资金进行五个核能项目研究。

但是，印度未来的能源不会仅仅依赖于钍。

1.2.5.2 加拿大钍燃料研究计划

加拿大原子能公司在 20 世纪 50 年代的 CANDU 堆开发计划中就已开始将钍作为一种有前景的核燃料。钍被加拿大原子能公司视为 CANDU 堆燃料循环愿景的一个组成部分，可用于降低铀消耗量。以钍为燃料的 CANDU 堆对那些钍资源丰富但铀资源贫乏的国家尤其具有吸引力，因为这种反应堆可帮助其实现能源自给。加拿大原子能公司一直将钍基燃料循环作为其 CANDU6、先进 CANDU6 以及 ACR-1000 反应堆的候选方案。

- 燃料循环愿景。

最具吸引力的 CANDU 堆钍基燃料循环将是闭式循环，包括乏燃料后处理以及对回收

的 ^{233}U 和钍进行循环利用。在这种循环中,需要向钍中加入少量易裂变材料。加拿大原子能公司估计,一旦达到均衡的燃料循环条件,在目前可使用钍基燃料的 CANDU6 堆的产能中,将有高达 80% 来自钍基燃料。如果使用中子经济性得到提高的优化设计,来自钍基燃料的能量会更多。易裂变驱动燃料可使用低浓铀或是从轻水堆乏燃料中提取的钚或铀来制造。从长远来看,快堆产生的钚或 ^{233}U 也可被制成驱动燃料。

- 近期战略。

加拿大原子能公司目前正在考虑的钍基燃料配置包括:①非均匀的钍-低浓铀燃料棒束;②均匀的钚/钍混合物;③混合棒束的钍基燃料(一些燃料芯块中含有二氧化钍,而另一些芯块中含有二氧化铀)。

- 长期战略。

就长期而言,加拿大原子能公司建议使用与近自给的均衡型钍基燃料循环相配套的 CANDU 堆。通过近自给的均衡型钍基燃料循环,能够增殖出足够的 ^{233}U ,使燃料循环能无限期地持续下去,从而将对其他易裂变材料的需求降至最低。这种包括后处理在内的“闭式”燃料循环在未来将能为运营商带来真正的经济效益。在未来,CANDU 堆与快堆的协同作用将使 CANDU 堆能够使用快堆产生的易裂变材料。

加拿大原子能公司正展望 CANDU 堆机组能达到自给自足的平衡的钍燃料循环,而且一些快速增殖反应堆提供钚。加拿大原子能公司正与中核集团秦山第三核电有限公司、中核北方核燃料元件公司、中国核动力研究设计院合作,在中国秦山联合发展和论证钍燃料的利用,并进行在 CANDU 堆中全面应用的经济和技术可行性研究。

1.2.5.3 挪威的钍基燃料战略研究

挪威研究委员会 2008 年向政府提交了一份题为《将钍作为能源资源——挪威的机遇》的研究报告。报告指出,由于目前已掌握的关于利用钍基燃料发电以及这种资源的地质分布的资料太少,因此还不能确定钍资源对挪威的潜在价值。

挪威政府在 2007 年年初要求挪威研究委员会开展相关研究,为评判挪威在长期能源发展框架中纳入钍资源的机遇和风险打下坚实的知识基础,并评估挪威使用钍基燃料发电的可行性。为此,挪威研究委员会于 2007 年 3 月组建了钍报告委员会(TRC)。

报告表示,根据美国地质勘探局提供的资料,挪威的钍资源总量为 17 万吨,仅次于澳大利亚(30 万吨)和印度(29 万吨),居世界第三位。这些资源蕴涵的能量总量是挪威迄今为止从石油中提取能量总量的约 100 倍。

报告还表示,由于缺少相关数据,因此对于任何使用钍基燃料的核能系统而言,进行有意义的成本估算几乎是不可能的。目前可以明确的是,钍基核燃料费用在整个发电成本结构中所占的比重将比较小,与铀燃料费用相当甚至更低。开发钍基核能系统的主要经济挑战是相关研发工作能否获得充足的资金。

报告建议,“应当认识到核能对可持续能源未来的潜在贡献”。此外,挪威钍报告委员会表示,应当对挪威的钍资源现状展开调查,以“评估挪威岩石中的钍是否是可用于未来发电的经济资产”。钍报告委员会还建议,应该鼓励在 Halden 研究堆中开展钍基燃料试验。

报告还建议挪威应当加强国际合作。例如,参加欧洲原子能共同体和第四代反应堆国