

# 钍的核能利用研究<sup>\*</sup>

中国科学院学部

(北京 100864)

关键词 钍, 利用

## 一 钍的核能利用特点及存在的问题

### 1 钍的核能利用前提条件

铀-235、钚-239 和铀-233 都是易裂变核材料,但其中只有铀-235 是天然存在的(天然铀中铀-235 的含量也只有 0.712%),钚-239 和铀-233 在自然界中并不存在,它们需分别由天然存在的铀-238 和钍-232 通过核反应转换而来。

天然铀中大量为铀-238 (含量为 99.285%以上)。铀-238 在反应堆中俘获中子后,可转换为易裂变的钚-239。钚-239 参与裂变,也产生核能,并释放中子。这是铀的核能利用途径,称铀-钚燃料循环。铀-钚燃料循环工艺较成熟,早已用于世界各国的核能生产。

天然钍(钍-232)可通过俘获中子,转换为易裂变的铀-233,这与铀-238 转换为钚-239 的性质相似。天然钍与天然铀不同的是,天然铀中含有易裂变的铀-235,而天然钍中没有易裂变的材料,所以,钍资源的核能利用要依赖于易裂变核素铀-235 或钚-239 裂变产生的中子被钍-232 所俘获,使钍-232 变成铀-233,铀-233 裂变,产生核能。此

途径称为钍-铀燃料循环,它至今尚未真正用于世界各国的核能生产。

### 2 钍的核能利用的优点

由于钍-232 的热中子俘获截面大约为铀-238 的 3 倍,故在相同条件下,钍-232 转换为铀-233 的转换率比铀-238 转换为钚-239 的转换率要高。而且,由于在热中子反应堆中铀-233 裂变产生的次级中子数比铀-235 和钚-239 都多,故中子经济性也较好。因此,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。而铀-钚循环在热中子反应堆中的转换率总小于 1,不能实现增殖。

与铀-钚燃料循环比较,钍-铀燃料循环产生较少的次锕系核素(MA)。次锕系核素是具有高毒性和长寿命的放射性核素。所以,钍基反应堆中积累的次锕系核素毒性低于铀基反应堆累积的次锕系毒性。

作为核燃料芯块的二氧化钍( $\text{ThO}_2$ )与二氧化铀( $\text{UO}_2$ )相比较, $\text{ThO}_2$  具有较好的化学和辐照稳定性、较高的热导率、较低的热膨胀系数以及耐高温性能(熔点 3 300 摄氏度)。这表明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。

钍基燃料对各种堆型的适应性较好,世界各国对钍基燃料的研究开发经验表明,钍基燃料可在现有的各种热堆中使用,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。

<sup>\*</sup> 本文为咨询报告摘要。咨询研究组成员:中国科学院院士欧阳予、徐光宪、赵仁恺、何祚庥、赵忠贤、王大中,中国工程院院士朱永、李冠兴,研究员吴宗鑫、徐、顾忠茂、焦荣洲,教授包伯荣,博士刘学刚,项目组秘书徐昌华高工

收稿日期:2007 年 6 月 28 日

### 3 钍的核能利用及钍-铀燃料循环的难点和存在的问题

如前所述,天然钍中不含有易裂变物质,不像天然铀那样含有易裂变的铀-235,所以钍的核能利用必须依赖于铀的利用。

钍-铀循环过程中,钍在反应堆中受辐照产生铀-233的同时,也伴随产生同位素铀-232子体,它有强 $\gamma$ 辐射。这种强 $\gamma$ 辐射就给反应堆乏燃料的贮存、运输、后处理、最终处置和燃料的再加工带来困难,这将加大后处理和燃料元件制造等的放射性防护难度,从而增加生产成本。

在钍基乏燃料后处理过程的首端,由于 $\text{ThO}_2$ 化学性质非常稳定,必须在 $\text{HNO}_3$ 中引入少量HF后才能溶解乏燃料,这样加剧了对设备和管线的腐蚀。对于钍基乏燃料的后处理,迄今只有上世纪50年代中期美国开发的一个不太成熟的THOREX流程,且只有少数国家开展过该流程的实验或中试规模研发,取得的研究数据和经验甚少,离商业应用尚有相当距离。

### 4 铀燃料循环与钍燃料循环的比较

根据对乏燃料的处理处置方式的不同,铀燃料循环可以分成两种。一种是采用“一次通过”方式,核燃料一次通过反应堆后卸出,经过一定时间的暂存后不进行后处理,就进行地质埋藏处置。另一种是采用“闭式循环”方式,对卸出的乏燃料暂存后进行后处理,将其中易裂变和可转换的核材料回收再利用,并对高放裂变产物和次锕系元素进行处置。

采用“一次通过”的燃料循环方式不需要建造乏燃料后处理和燃料再循环设施。但是,对铀燃料来说,“一次通过”方式对天然铀资源的利用率不超过1%,并且需要处置的乏燃料体积大,处置费用高,长期风险大。而采用“闭式循环”方式既可以大大减少乏燃料的累积量,又可和增殖快堆结合,将铀

资源的利用率提高到60%左右。

对于钍燃料循环,根据对乏燃料的处理处置方式的不同,也可以将燃料循环方式分成“一次通过”和“闭式循环”两种方式。前者仅是用钍代替部分天然铀在反应堆中利用,暂存乏燃料,不分离利用乏燃料中的铀-233;后者将钍基乏燃料进行后处理,回收铀-233复用。从长远来看,“闭式循环”方式可以大大提高钍资源的利用率、减少乏燃料累积。但是也必须看到,也可首先将乏燃料暂存,作为钍资源核能利用的第一步,然后再考虑钍基燃料的后处理和闭式循环问题。利用钍资源,首先应当先解决怎样用的问题,然后才是提高利用率的问题。

## 二 国际国内钍的核能利用研究的回顾与展望

### 1 国外钍的核能利用研究的回顾与展望

国际上钍的核能利用的研究开发,大体上可以分为3个阶段:

上世纪60—70年代:由于核电站的快速发展,为扩大核燃料的供应来源,美、欧等发达国家对钍的利用开展了大量的研究开发。70年代的石油危机,更促进了核能的发展。在此期间,美国、日本、印度、英国、加拿大等国在不同程度上,在各种实验堆和动力堆中使用过钍燃料。

80—90年代:由于不断发现新的铀矿和铀产品价格下降,以及1986年切尔诺贝利核事故对核能利用的负面影响,多数国家中止了钍燃料利用的研究开发。唯有印度始终坚持钍燃料循环的研究开发。

90年代以后:一些发达国家又重新对钍燃料产生了兴趣。他们重视钍-铀燃料循环的主要目的可归结为3点。一是钍-铀燃料循环可有效地消耗武器钚及民用钚。二是钍-铀燃料循环产生的长寿命次锕系核素(MA)要比铀-钚循环少得多。三是钍-铀循

环产生的核燃料铀-233 含一定量铀-232, 其子体放射出高能  $\gamma$  射线, 有利于防止核扩散。

回顾国际上钍的核能利用可以看到, 钍一直被认为是一种潜在的核燃料。它的核能利用既有优点, 也有难点。钍的核能利用研究总是时起时伏, 时高时低。与铀-钚燃料循环相比, 钍-铀燃料循环离工业化还远。

## 2 我国钍的核能利用研究的回顾与展望

我国早在 1965 年在上海嘉定曾召开全国钍的利用会议, 各单位有分工, 后因“文化大革命”而中断。但国内有关单位在这一领域的工作仍时起时伏, 坚持了近 40 年。这主要是因为很多人意识到我国有丰富的钍资源, 应该重视钍燃料的利用。国内已做的工作可归结为 3 个部分。

(1) 钍热中子增殖堆方案研究。1970—1977 年, 清华大学核研院曾开展钍增殖堆试验研究, 目标是研究钍的热中子增殖堆, 当时提出建一座熔盐试验堆核电站。此后改为从事钍-铀循环的高转换率的高温气冷堆的研究。

1970—1972 年, 上海核工院曾研究过钍-铀燃料循环的熔盐反应堆核电站方案, 后因技术难度太大, 改为压水堆核电站方案。

(2) 钍铀燃料的水法后处理研究。1967—1968 年, 中科院上海原子核所曾从辐照金属钍中用溶剂萃取法分离出纯铀-233 样品, 这是国内首次制得的克级铀-233 样品。1972 年中国原子能科学研究院与中科院上海原子核所合作进行钍基燃料后处理研究, 最终在原子能院热室内进行钍燃料后处理的热验证。1975—1976 年, 清华大学核研院对氦冷钍增殖堆的钍铀燃料进行了后处理研究。1986—1991 年, 清华大学承担国家“863”高温气冷堆项目论证, 曾考虑采用钍-铀燃料, 对高温气冷堆钍-铀燃料的后

处理进行了探索研究。

(3) 钍-铀燃料循环的基础研究。1980 年, 中科院上海原子核所建立了钍-铀燃料循环研究组, 专门从事钍的核能利用研究, 主要做了下列工作: 在高通量堆内辐照  $\text{ThO}_2$  并研究其产生的铀-233, 研究了铀-232 与中子注量及快/热中子的关系; 钍-铀栅零功率堆实验; 压水堆中进钍方式的理论探讨。

综上所述, 我国钍的核能利用已有一定的研究基础。面对蓬勃发展的核电事业, 考虑到我国丰富的钍资源, 应对钍的核能利用进行适当研究。

## 三 对我国核能用钍的考虑

我国一直在建设和充实铀-钚燃料循环这条主线, 并已明确采用闭式燃料循环以合理利用资源和处理、处置高放核废物, 在这方面已取得相当进展, 但离产业化仍还有相当大的距离。从核电发展的现实需要出发, 急需使这条主线充实完善, 实现产业化, 这是我们在燃料循环上首先要保证的。

但在保证实现铀-钚燃料循环产业化的同时, 也应进行钍的核能利用的研究开发, 并适当进行钍-铀燃料循环的研究。对钍的利用如果处理得好, 不仅不会影响铀-钚燃料循环的进展, 而且会有助于它的完善和充实。

我国的钍-铀燃料循环的技术基础还相当薄弱, 在相当长时间内还将处于研究和某些技术的开发阶段, 还谈不上使闭式钍-铀燃料循环产业化。但这并不意味着我们不能试用钍作核燃料。如果在某些反应堆内试用钍作燃料研究开发成功, 而且有使用价值的话, 则可将其乏燃料暂作较长时间的贮存, 待将来有条件后再做后处理。因此, 应对在我国已有的、在建的和要发展的反应堆中核能用钍问题进行认真的可行性研究。对钍-

(转至 302 页)



中国科学院

长期处于比较分散的科学管理格局,往往导致任何单一行政部门难以深入研究跨部门的国家层面的宏观环境问题。中科院虽有长期的环境基础和应用研究的知识积累与队伍,有多学科交叉与综合、不受部门利益制约、客观公正的优势,但由于国家体制机制的原因,我院开展环境研究的相关支撑条件

建设受到很大限制,以目前我院所具有的支撑条件难以满足开展重大研究的需求,因此需要主动联合产业部门和地方政府及其相关部门,加强协调与合作,摒弃狭隘的部门利益,开展国家层面或地区层面上的联合、交叉与综合研究,为国家经济、社会发展服务。

## Development and Considerations on CAS Eastern Coast Environment Research

Zhuang Xuliang Zhou Ju Yang Ping Niu Dong Feng Renguo

(Bureau of Sciences and Technology for Resources & Environment, CAS, Beijing 100864)

As serious ecological and environmental problems have been produced with the rapid economic development along the Eastern coastal area of China, it is very urgent to conduct systematic studies on environmental problems in this area. This paper analyzes the present status of the ecological and environmental problems and summarizes the basis of the previous research work by CAS in this area. It also proposes the key research directions that are to be carried on urgently. Strategic considerations on the structural adjustments of CAS environmental studies are also suggested in this paper.

Keywords eastern coastal part of China, ecology and environment, development strategy

庄绪亮 男,中科院资环局生态与环境处处长。2001年7月于中科院生态环境研究中心获得环境科学专业博士学位。2001—2004年在生态环境研究中心工作,主要从事生态与环境科技的管理工作,并进行环境生物技术领域的研究。

(接 305 页)

铀燃料循环的有关问题,也应进行前瞻性的研究。

鉴于在压水堆中部分以钍替代铀可显著节约天然铀的用量,而压水堆核电机组是我国发展核电的主力堆型,将批量建造。因此,应着重对压水堆用钍的可行性进行深入研究,并安排必要的研究和技术攻关工作。

从长远着想,若将来钍的利用规模甚大时,就应考虑闭式燃料循环,对钍基乏燃料进行后处理,并提取其中的铀-233,制成新

燃料组件回堆使用。因此,应对钍-铀闭式燃料循环适当进行前瞻性研究。与此相应,在快堆增殖层中用钍生产铀-233的研究也应同步进行。

我国包头的白云鄂博主东矿是铁、稀土和钍共生的世界少有的大型矿藏,长期以来的开采方式只是提取铁和部分稀土,而钍和其它稀土作为尾料弃而不管,既污染环境,又浪费核能资源,这与可持续发展的理念是背道而驰的,应尽快解决这个问题。