

# 加速器驱动的放射性洁净核能系统

包伯荣 吴明红

(上海大学化学与化工学院 上海 201800)

张家骅

(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

**摘要** 叙述了核能发展中遇到的主要问题,介绍了国内外对加速器驱动的放射性洁净核能系统的研究计划。特别阐述了钍资源在这一领域中的应用。

**关键词** 加速器,反应堆,核能,钍

## 1 核能发展中遇到的主要问题

据国际原子能机构1994年底的统计,世界上核电平均占总发电量的23.16%。其中,美国占21.98%,日本占30.70%,法国占75.29%,加拿大占19.07%,瑞典占51.13%,英国占25.79%,俄罗斯占11.39%,西班牙占34.97%,韩国占35.48%。我国核电的比例还比较小,仅占1.49%<sup>[1]</sup>。从70年代开始,世界上核电站的建设速度开始放慢,核能建设正遇到挑战。目前的核电站基本上是热中子裂变堆型,采用低浓缩铀作燃料。这种核能系统面临以下几方面的问题。

(1) 资源利用率低,因为它主要消耗<sup>235</sup>U,而占天然铀中99.275%的<sup>238</sup>U只利用极小部分。在最理想情况下(即进行后处理及铀-钚多次循环),铀资源的利用率只能达到1.5%,若计及各种损耗,则一般只能利用到1%左右。比铀资源丰富几倍的钍资源还无法得到利用。

(2) 在燃料中产生大量的“少数锕系元素”(MA)及“裂变产物”(FP),其中一些核素的半衰期长达 $10^6$ a以上,成为危害生物圈的潜在因素,其最终处置问题尚未解决。

(3) 目前全世界乏燃料中<sup>239</sup>Pu已达1000t左右,它可用于军事目的,故有核扩散的潜在危险。

针对上述问题,自80年代后期以来,国际核能科技界形成了一些新的研究方向:放化分离与核反应堆嬗变结合处置高放废物(P-T法),钍资源利用的新技术路线探索和加速器驱动的嬗变技术(ADTT),直到1993年西欧核子中心主任、诺贝尔奖金获得者鲁比亚(C.Rubbia)提出了能量放大器的概念,将世界上这一领域的研究推向高潮<sup>[2]</sup>。

## 2 加速器驱动的放射性洁净核能系统

在粒子物理实验中,经常采用量能器测量高能粒子的能量。典型的量能器是由多层重金属(如铅、铁)和多层取样探测器(如液闪体、丝室)相间叠成的夹心式结构。当高能粒子通过它时,能量将沉积在探测器的夹层中,而产生的次级带电粒子由夹层中的探测器测量,由此可以确定入射高能粒子的能量。实验发现,量能器测量到的质子能量沉积与相同能量的电

子相比有丢失。其原因是质子与物质的相互作用不同于电子，后者为电磁簇射过程，前者为核级联过程，会产生次级中子，而探测器对中子不灵敏，因而引起测量中能量沉积的丢失。但当量能器中重金属改用可裂变材料U、Th时，实验上却发现了过补偿作用，这是由量能器中产生的热量引起的，有时甚至可达30%—50%。我们可以把这种能量的过补偿看作是一种能量的放大作用。鲁比亚由此得到启发，设想如果设计一个特殊的量能器，使得有尽可能高的过补偿，然后将量能器中的热能转化为电功率提供使用，则可以构成一个称为“能量放大器”(EA)的新型核能系统，这种核能系统又称为加速器驱动的放射性洁净核能体系。鲁比亚所设想的能量放大器主要是利用一台束功率为7MW(1GeV, 7mA)的中能强流质子加速器驱动一座由5t <sup>232</sup>Th(或<sup>238</sup>U)装料的K<sub>eff</sub>=0.85的次临界装置，装置内热中子注量率为10<sup>14</sup>/cm<sup>2</sup>·s。经过一年运行后，可获得稳定的含量达1.5% <sup>233</sup>U(或0.3% <sup>239</sup>Pu)的裂变核“存量”，而使该装置在10年内稳定地运行在增益G(热功率/束功率)=40(Th-U循环)或G=30(U-Pu循环)水平上。

加速器驱动的放射性洁净核能体系(RCNPS)体现了20世纪核科学技术二大装置(加速器与反应堆)的紧密结合。它的构成框图见图1。由图1可见，向系统输入的是电能和原始核燃料(<sup>232</sup>Th或<sup>238</sup>U)，系统输出的是电能和低放废物，符合“洁净”的要求。此体系由四大部分构成。

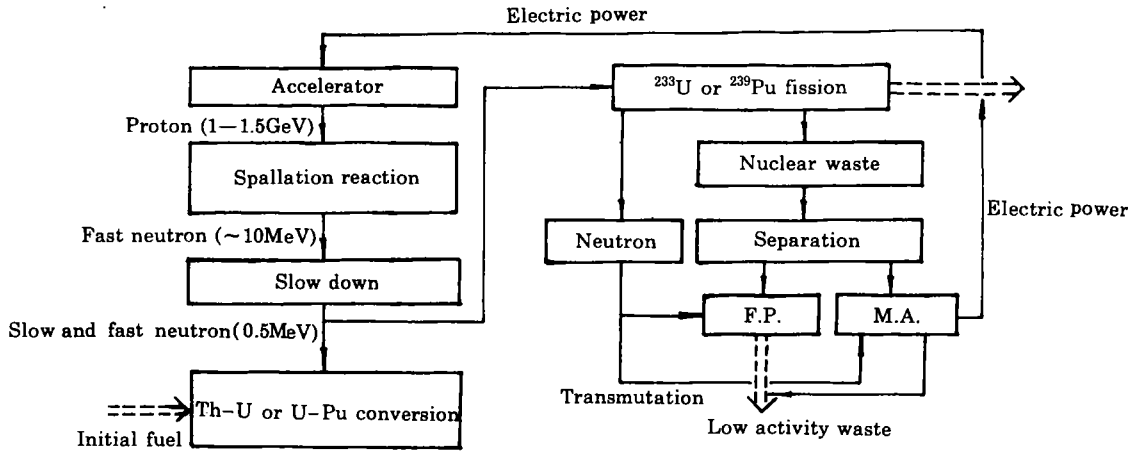
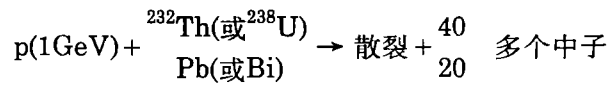


图1 RCNPS构成框图  
Fig.1 Concept figure of RCNPS

(1) 驱动器。它由一个中能强流加速器构成，由它产生的质子打在重靶上通过散裂反应产生快中子，即



如质子能量倍增，则产生的中子数也倍增。

(2) 中子产生器。它是驱动器与次临界反应堆的耦合部，关键是选择特定性能和构形的靶材料。

(3) 次临界反应堆。这是系统的“心脏”。它由燃料组件、慢化剂、冷却剂、结构材料等

组成, 并保持  $K_{\text{eff}} < 1$ 。经过中子的倍增, 形成稳定的中子通量。在次临界装置中增殖裂变材料、输出能量、嬗变长寿命放射性废物、处置武器级钚等。

(4) “原址”的放化分离设施。在线实时或离线就近处理次临界装置的MA和FP, 让它们返回堆中而被嬗变。

RCNPS的优点是:(1)固有的安全性, 当加速器停止运行时, 次临界装置即“熄灭”, 不存在临界事故问题;(2)资源利用率大大提高, 特别为  $^{232}\text{Th}$ - $^{233}\text{U}$ 燃料循环开辟了新的途径, 如果设计适当, 这个系统可运行相当长时间(5—10a)不换料, 因此该系统有高的负荷因子;(3)次临界装置中所产生的MA和FP经“原址”放射化学分离后, 在适当条件下, 在系统中被嬗变, 没有向生物圈扩散的问题;(4)系统的前端和末端不会产生武器级的核材料, 有防扩散能力。

### 3 发展状况

近10年来, 世界各国, 特别是发达国家对RCNPS进行了不少工作, 取得了很好的结果。我们将美国ATW计划、日本OMEGA计划、法国SPIN计划、俄罗斯TNS验证装置及西欧核研究中心(CERN)的EA设计<sup>[3-5]</sup>汇总如下。

装置类型	ATW		OMEGA		SPIN	TNS	EA	
	能谱 堆型	热 熔盐	快			热 重水慢化	热	快 固体组件, 铅冷
加速器指标	(p) 1.5GeV 125mA 0.8GeV 250mA		(p) 1.5GeV	(p) 1.5GeV		(D) 15MeV	(p) 1GeV	(p) 1GeV 20mA
中子注量率/cm <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup>		10 <sup>16</sup>	39mA	25mA		1mA	7mA	
$K_{\text{eff}}$			0.89	0.92		$3 \times 10^{11}$	$1 \times 10^{14}$	$3 \times 10^{15} - 4 \times 10^{15}$
G		15	14	21.3		0.96	0.85	0.98
嬗变能力	(等效半衰期) MA < 0.01a FA < 15a		MA(燃烧能力) 250kg/a (10座1GW热堆废料)			1.42	Th-U ~ 40 U-Pu ~ 30	“Dirty”Pu等效 半衰期 ~ 10a
系统研究	物理概念, 经济分析		工程概念		物理概念		物理概念, 经济分析	
加速器	LAMPF 0.8GeV 1mA GTA 24MeV 50mA ATW APT		BTA 10MeV 10mA ETA 1.5GeV 10mA		利用SIN及 SA TURNE		二级等时性回旋加速器	

美国ATW计划全称为Accelerator Transmutation of Waste(废物的加速器嬗变), 它的主要目标是嬗变在燃料中的长寿命废物和处置武器级钚。他们以已运行20余年的LAMPF技术为依托, 要求建造束功率达200MW (0.8GeV, 250mA)的中能强流加速器。它采取热中子熔盐堆作为系统的“心脏”, 在堆中的中子注量率达 $10^6/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 。主体构想如图2所示。堆本体分三区, 中间区为高温(700℃)的U熔盐, 产生能量; 外区为低温(70℃)的Th-U转换区; 内区为低温的废物嬗变区。各区间都有“在线”放化分离工艺流程, 使各种核素向应属的区域馈送。其能量增益因子 $G = 15$ , 嬗变能力以等效半衰期表示: MA约为0.01a, FP < 15a。

日本的OMEGA计划从1988年开始。分放化分离工艺流程和嬗变装置(包括加速器和反应堆)二大部分。预计在1998年作放化分离流程的热试验,2000年建成1.5GeV、10mA的ETA(工程试验加速器)。反应堆取快中子次临界装置。有固体组件及熔盐堆二种形式,G值分别为14及21.3,均有年嬗变250kg MA的能力。

俄罗斯的TNS是一个概念验证装置,其最终目的是用重水慢化热中子次临界装置实现Th-U循环。TNS验证装置是一台15MeV加速器提供的1mA氦束轰击Be靶产生 $10^{13}/s$ 快中子,堆本体用D<sub>2</sub>O作慢化剂和载热剂,热中子注量率为 $10^{11}/cm^2 \cdot s$ 。在 $K_{eff}=0.95-0.97$ 之间运行,输出功率为21.3kW, $G=1.42$ 。

对于法国的SPIN计划了解甚少。目前除放化分离工艺研究外,利用Orsay的Saturne加速器及瑞士的SIN加速器进行一些基础核反应数据的测量与检验工作。

欧洲核子研究中心于1993年提出能量放大器(EA)的概念,并对热中子能量放大器(T-EA)进行了概念设计。1994年他们又提出采用快中子能量放大器(F-EA)代替T-EA,而U-Pu循环和Th-U循环则明确采用后一循环。在其设计中,用一个三级回旋加速器产生12.5mA 1GeV的质子,液态铅作中子产生靶和冷却剂,固体栅元结构的ThO<sub>2</sub>-<sup>233</sup>UO<sub>2</sub>燃料,这样构成的一个单元可以输出675MW的电功率,由三个单元和一台备用的加速器组成一个电站,可输出2000MW的电功率。设备造价约为7.5亿美元,电站造价(包括征地等费用)约为26.5亿美元,加上每年运行费后,折成电价为2美分/kWh。

自1995年以来,中国原子能科学研究院与中国科学院高能物理研究所分别在RCNPS次临界反应堆及强流质子加速器方面进行了调研。1996年9月和1997年3月由中国高等科学技术中心在北京组织召开了“洁净核能系统研讨会”。1997年7月又召开了会议主题为加速器驱动洁净核能系统的第78次香山科学会议。中国原子能科学研究院重点研究了RCNPS次临界反应堆,对鲁比亚提出的T-EA和F-EA进行了进一步研究。结果认为对于T-EA可采用重水慢化压力管式次临界堆型、<sup>232</sup>Th-<sup>233</sup>U燃料循环, $K_{eff}$ 可达0.97, $G=150$ ,该系统可充分利用钍资源,具有较好的固有安全性。而F-EA可采用铅或钠冷快中子次临界系统。Th-U或U-Pu循环均可。特别是铅作为冷却剂代替钠应引起关注。还可采用T-EA和F-EA结合,即外区为慢堆,用钍燃料及重水慢化压力管式堆,外区为快堆,用U-Th燃料或U-Pu燃料均可。中国科学院高能物理研究所对用于RCNPS的强流质子直线加速器进行了研究。初步研究了建造核能开发所需的束流功率比现有水平高10-100倍的1GeV、10-100mA的质子强流加速器的可能性及存在问题。清华大学核能技术研究院也对RCNPS表示较大兴趣,他们认为要在RCNPS中真正采用Th-U循环,必须累积一定数量的<sup>233</sup>U。因此有必要用转换堆将<sup>232</sup>Th转化为<sup>233</sup>U,将积累的<sup>233</sup>U用到近增殖堆中去

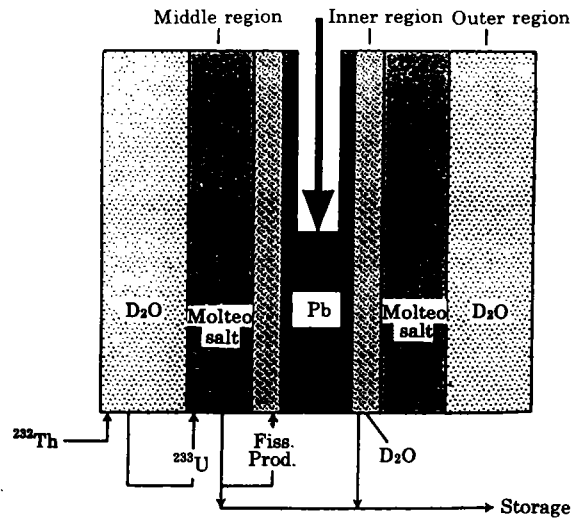


图2 ATW堆构想

Fig.2 Concept design of ATW reactor

(见图3)。

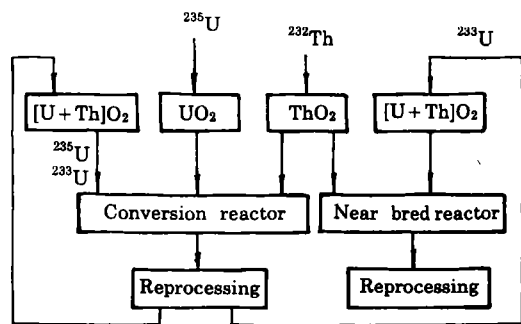


图3  $^{233}\text{U}$ 的积累与应用

Fig.3 Accumulation and application of  $^{233}\text{U}$

年的工作，取得了一系列成果，为最终实现钍燃料在我国的应用打下了良好的基础。我们相信随着我国核能事业的不断发展，我国在加速器驱动的放射性洁净核能系统及钍燃料的应用方面也必将取得更大的进展。

从以上讨论可见，在RCNPS的讨论中，人们普遍认为Th-U燃料循环比U-Pu燃料循环更可取。这是因为钍燃料比铀燃料至少有三个优点：(1) 资源丰富，我国钍资源约为 $35 \times 10^4\text{t}$ ，为铀资源的5—6倍，国外一般为3—4倍；(2)  $^{232}\text{Th}$ - $^{233}\text{U}$ 循环可作成热中子近增殖堆或增殖堆；(3) 由于钍离开超铀元素Np、Pu、Am、Cm远，因此长寿命超铀元素废物大大减少。有人估计钍燃料产生的高放废物的放射性比铀燃料降低4个数量级。中国科学院上海原子核研究所张家骅先生为首的研究组在Th-U燃料循环这一领域进行了近20

### 参 考 文 献

- 1 Highlights of Activities 95 IAEA. 1995
- 2 F.Carminati, et al. CERN/AT/93-47(ET); C.Rubbia, A Outline of Seminar at CERN, 1993
- 3 中国原子能科学研究所, 核工业研究生部. 放射性洁净核能系统研讨会报告文集. 1996
- 4 方守贤编. 加速器驱动核能系统报告文集. 65卷, 北京: 中国高等科学技术中心, 1996. 12
- 5 丁大钊, 方守贤, 何祚麻, 等. 中国科学院院刊, 1996, (3):212

## Nuclear energy systems driven by proton accelerator

BAO Borong WU Minghong

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 201800)

ZHANG Jiahua

(Shanghai Institute of Nuclear Research, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

### Abstract

Main problems in recent nuclear energy development are pointed out. Present status of the nuclear energy systems driven by high intensity proton accelerator (RCNPS) and research projects on RCNPS in some countries including China are reviewed. Application of the thorium-uranium fuel cycle in RCNPS is also evaluated.

**Key words** Accelerator, Reactor, Nuclear energy, Thorium