

(14) = 67 - 272, 277

核能与核数据

加速器驱动的嬗变技术及应用

——一个关于核能发展的热门话题

郭俊盛

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

TL411.1

摘要 当前的核电技术存在着资源利用率低、排出高放射性长寿命废物以及运行的安全性等问题。利用加速器驱动次临界堆的嬗变技术,不仅可以产生“洁净”的核电,还可以对高放射性核废物进行嬗变处理,同时又能对核材料进行核燃料的增殖或生产,是新一代核能利用的发展方向。

关键词 加速器次临界堆 嬗变 洁净核能

分类号 TL43

1 引言

自世界上第一座核电站于1954年投入运行以来,核电工程已取得了很大进展,截止90年代初期,世界上30多个国家已有400多座核电站在运行,并且还有200多座正在建造。目前世界上核电的发电量为400 GW,约占总电量的17%,一些发达国家如美、日、法等,核能约占22%~75%,而我国仅占1.5%。核电比较清洁有效,因而从发展看,核能显然是解决人类能源问题的根本途径。但是它存在着资源利用率低,排出高放射性核废物以及核电站运行的安全性等问题,使得世界核电的发展目前处在一个低谷期。

目前从核电站排放出的核废料基本上分为三类:锕系元素、裂变产物以及被活化的结构材料^[1]。

锕系废料天然存在的有Ac、Th、Pa和U等,较高的锕系($Z > 92$)是来自核燃料在堆中的中子俘获。²³⁷Np、²⁴³Am和²⁴⁵Cm等的寿命很长,核燃料裂变时产生的裂变产物包括原子序数由30~65的36种元素的300多种同位素,其中具有长寿命高产额的裂变产物有⁹⁹Tc、¹²⁰I、⁹³Zr和¹⁵⁵Cs等,而⁹⁰Sr和¹³⁷Cs具

有相对短的使用寿命,裂变产物中有些是在裂变过程中直接产生的,而另外一些可能是由母体衰变生成的^[2]。

从50年代第一座核电站投入运行至今,40多年来民用和军用核电及核材料生产堆已经给人类留下了大量的放射性废物。根据估计^[1],一个1 MW的热堆每年使用30 t核燃料(浓缩到3%的²³⁵U)时,将产生:U(浓缩到~1%) 28.7 t, Pu 0.3 t, 裂变产物 1 t (包括21 kg的Np、Am和Cm);在移去燃料棒和结构材料后经过两年,留下的活性为:裂变产物 3×10^7 Ci, 结构材料 5×10^5 Ci;经过再处理后,这些活性将占有的体积为:中放射性废物 约1 000 m³, 高放射性废物 约3 m³, 结构材料 约12 m³。

当未除去锕系元素时,约 3×10^7 Ci的总活性在100年内将衰变10倍,在1 000年内衰变 10^5 倍,而剩余的活性将在 10^6 年内缓慢的衰变。各国为了处理这些核废料,花费了大量的人力和财力,在废物问题得到彻底解决之前,民众反对核能特别是发达国家将毫不置疑的会继续下去,这对核电的发展也无疑是一个重大障碍。

寻找洁净能源是一个世界性问题,当前

利用重核裂变的核能仍不失为进一步能源开发的主导方向。人们曾期待聚变能的开发将一劳永逸地解决人类的能源问题,但自50年代以来尽管已耗费了数百亿美元致力于可控热核反应的研究,但迄今仍处于原理研究阶段,离实用化还相当遥远。

一个由加速器驱动的嬗变概念的提出和相应技术的发展,给人们带来了最有现实意义的希望,因为它的实现完全可以克服和解决目前工业应用的核电技术所存在的问题^[3]。简单来说,这种核能系统是由一台强流中能质子加速器与一台次临界反应堆相结合构成的。这种加速器驱动的次临界堆方案通过质子引起的强中子流与堆芯物质的作用使其产生各种嬗变,它不仅可以提供“洁净”的核能,而且还可以对高放核废料进行嬗变处理,将长寿命的废料嬗变为短寿命或稳定的物质,同时还可借助中子引起的嬗变对核材料进行核燃料的增殖和生产,因此它具有放射性污染低、运行安全可靠、资源利用率高以及不产生高放核废料等用途多样化的优点。

2 基本原理与概念性设计

2.1 基本原理

现有核电站均是依靠热中子维持链式反应的自持式反应堆,只有当反应堆中每一代裂变产生的中子总数 $A(n)$ 和消耗掉的中子总数 $F(n)$ (引起裂变、被吸收、泄漏等) 相等时链式反应才能维持:

$$\text{中子有效增殖系数 } k_{\text{eff}} = \frac{A(n)}{F(n)}$$

当 $k_{\text{eff}} = 1$ 时,称为临界状态,中子循环达到平衡,形成自持的链式反应; $k_{\text{eff}} > 1$,称为超临界状态,则中子数将不断增长,当堆启动或功率提升时即为该状态,否则将引起超临界事故; $k_{\text{eff}} < 1$,为次(亚)临界状态,中子数逐渐减少直至链式反应完全熄灭,当降

低堆功率或停堆时即使用该条件。

如果有“外”中子源不断注入一个 $k_{\text{eff}} < 1$ 的反应装置,那么这一衰减中的链式反应可由外中子源的补充而使其反应得以长期地维持。因此,如果设计一台中能强流质子加速器与一台次临界反应堆相结合,由加速器发出的质子束轰击放置在堆芯的重金属靶,借助散裂反应而产生高通量的中子流,它作为一个外中子源将中子不断地补充给这台次临界堆,使其维持正常运行,这就是加速器驱动核堆技术的基本原理。图1为该技术的原理图^[4]。在次临界堆中只要切断其外中子源(例如切断加速器束流),则链式反应将迅速熄灭,这也是该技术固有的核安全性。

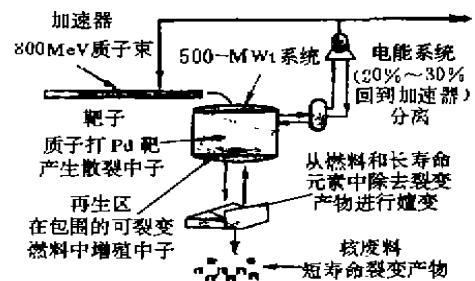


图1 加速器嬗变系统的原理图

一般情况下,这种装置把反应堆的 k 值设计为 $0.80 \sim 0.99$,而对加速器的功率要求是,引出的质子束流强度为几十~几百 mA,质子能量为 $200 \sim 2000$ MeV;堆中的散裂中子源应能提供 $10^{14} \sim 10^{17}$ neutrons/cm²·s 的中子通量。

2.2 散裂中子源

外中子源的设计是关系到加速器驱动嬗变技术能否实现的关键之一。通常是将散裂中子源的靶子做成圆柱形插入堆芯中,它是由重金属材料 Pb、Bi、W 或 U 构成,其尺寸一般为直径几十 cm 到 1 m,长度为几十 cm 到 1.5 m,有时也将它制成熔融状态在堆芯中以循环流动形式来增加中子产额。

根据实验表明,一个中能质子(约 1

GeV) 轰击重原子核(如 Pb、W、Bi 和 U 等) 可以放出约 10~25 个中子。如果考虑质子可以在靶中引起第二次、第三次反应, 并且所产生的中子也能引起次级反应等, 那么能量为 1 GeV 的质子可以在直径几十 cm、长度为几十 cm 的靶中产生约 20~50 个中子。由质子轰击重靶产生的中子产额与质子能量和流强有关, 也与靶材料及其几何尺寸有关。以圆柱形 Pb 靶($\phi 10$ cm, 长 60 cm) 为例, 中子产额 Y 可以用下列关系式表示^[6]:

$$Y = 14.2 \times 10^{16} \cdot (E - 0.12) \cdot I,$$

E 为质子能量(GeV), I 为质子流强(mA), 0.12 (GeV) 为阈能。

国际上许多实验室已对散裂中子源进行了很多卓有成效的研究, 图2给出了质子束流入射在一个直径为 50 cm、长 100 cm 的钨靶上每秒每瓦产生的中子数和每个质子产生的中子数与质子束能量的关系^[4]。

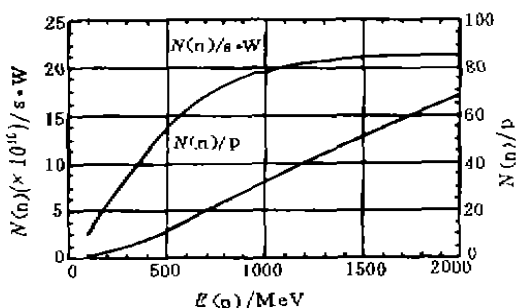


图2 中子数与质子束能量的关系

2.3 对加速器的基本要求

早在70年代初, 人们已经想到加速器在能源开发方面的应用, 提出了用强流质子直线加速器来产生核燃料和提供核能, 但由于受当时加速器技术水平的限制, 使得研究工作并无实质性进展, 经过20余年的努力改进, 目前加速器技术虽然已有了突飞猛进的发展, 但用于核能开发所需的束流功率比现有水平还要高10~100倍, 这对当代的加速器技术是一个挑战, 新的核能开发诱人的发展前景

鼓励人们不懈的致力于加速器技术的改进和发展, 美国 Los Alamos 实验室的 LAMPF 质子直线加速器目前已经达到了 800 MeV 和 20 mA 的可喜结果。鉴于过去取得的经验和技术的积累, 人们深信将加速器的功率提高到驱动次临界堆正常运行的水平是完全能够作到的, 有人估计在今后10余年内应可能达到这一目标。

对加速器最基本和最主要的要求是高能部分的束流损失率应降到 $10^{-6}/m$ 以下^[7,8], 因为如此强的中能质子束与加速管道相撞将会使管壁材料等高度活化, 从而带来维护与维修的困难^[9]。也有人对 1.0 GeV、200 mA 质子加速器的束流损失指标定为 0.2 nA/m, 这确实是对现行加速器技术的一个严重挑战。另外, 束流的径向尺寸也是一个很重要的指标, 因为它直接影响到束流的损失。尽可能消除束流光点的“晕”效应和“尾巴”效应, 也成为提高加速器技术的一个重要研究课题。因此, 能否满足对束流损失率的要求, 是今后能否建造出适用于驱动嬗变系统的中能强流质子加速器的关键^[1]。

3 用途及优点

这种强流中能质子加速器与次临界反应堆的结合, 再加上相应的化学分离与处理技术, 可以用来嬗变现有的核废料, 可以产生无长寿命高放废料排出的“洁净”核电, 还可以增殖和生产核燃料。实际上, 这三个方面在技术上是紧密相关的, 往往在一个装置内加入混合装料来完成两个或两个以上的用途。

3.1 核废物的嬗变

锕系废物是通过俘获和裂变两步过程嬗变的。在高 neutron 通量下, 锕系核吸收两个中子的几率较高, 这时锕系废物(如 ^{237}Np) 首先俘获一个中子而转变为其子核。这个子核在

衰变为非裂变同位素之前受第二个中子作用而发生裂变，产生多个中子，因此铀系废料在这里扮演了一个净中子产生器或核燃料的角色。强流中子除了能够快速嬗变那些长寿命裂变产物如⁹⁹Tc 和¹²⁹I 到短寿命或稳定同位素外，对于那些危险性更大的具有较短寿命的⁹⁰Sr 和¹³⁷Cs 等，也可以在高通量中子作用下使它们具有比天然衰变更快的嬗变率。图3给出了两类核废物(铀系废物和裂变产物)在高通量中子作用下发生嬗变的例子^[1]。

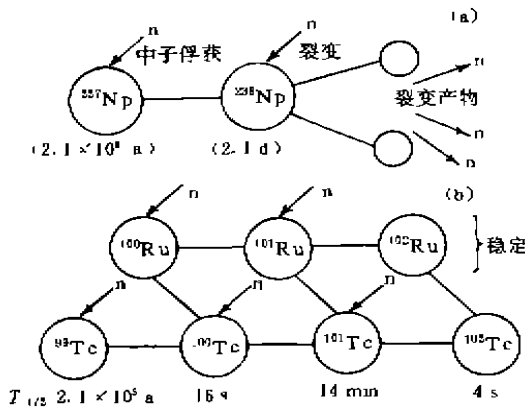


图3 两步中子吸收导致裂变(a)和长寿命裂变产物连续俘获中子转变成稳定同位素(b)事例

由于在核废物的嬗变过程中还释放出能量，所以可将嬗变废物的焚烧炉与获得额外的核能利用结合起来。例如，一台由 Los Alamos 提议的加速器驱动的嬗变装置，它的加速器可提供 1.6 GeV 和 250 mA 的质子，与 $k = 0.95$ 的反应堆配合，每年可嬗变约 2 450 kg 的高放铀系废物，以及将 250 kg 的⁹⁹Tc 和¹²⁹I 转变成稳定核素，而这些废物相当于 7.5 个轻水反应堆所排放的总量^[6]，另外这种装置除了加速器本身所消耗的约 900 MW 的电能外，还可能有 1 000 MW 的电能提供给电网。图4给出了美国 Los Alamos 实验室用于嬗变核废物(ATW)装置的一种概念设计^[1]。

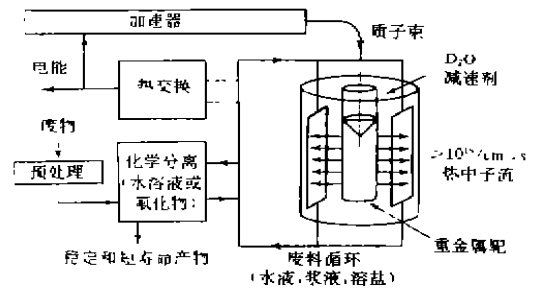


图4 用于嬗变核废物的加速器与反应堆的组合

靶子产生的散裂中子被包围的 D₂O 减速剂慢化，铀系材料不断地通过增殖区，同时还可以产生电能。

3.2 产生“洁净”的核电

这种加速器驱动的嬗变技术可以用来提供“洁净”的核电而不排出高放射性长寿命的核废物。因为它可以剩余足够的中子来嬗变自己产生的高放废物，这些废物在强中子流辐照下通过中子引发的各类反应将核最终转变成稳定的或短半衰期的产物，它们不仅对人类无害，而且还有一定的医用和工业价值。在一典型的驱动堆中，自身消耗的电功率仅占它所产生的电能的约 20%，而大部分电能则提供给工业电网^[2,5]。

3.3 核燃料的增殖和核材料的生产

外中子源可以将非裂变材料²³²Th 和²³³U 等转变为可裂变的核燃料²³³U 和²³⁹Pu 等。接着再把它们燃烧变成电能，而在现行的自持堆中，由于钍与贫铀的中子太贫，只可有次临界而达不到临界条件，无法用作核燃料，但在驱动堆中就可使²³²Th 和²³⁸U 等得到充分利用，极大地提高了自然资源的利用率。另外，很明显，这种装置也可以很容易地用于另一种核原料——氙的生产，这可以由慢化的散裂中子将³He 或⁶Li 转化为氙来实现，但是由于生产³H 和上面提到的增殖²³⁹Pu 与武器联系在一起，所以人们忌讳谈及这些问题。

如果单从发电的角度考虑,它虽然比常规的核电系统多一台技术指标有相当难度的强流加速器,而且还要消耗掉约3%~5%的电功率,但它解除了 $k_{eff}=1$ 所带来的种种限制,排除了任何超临界事故的可能,使其运行长期安全可靠;另外,它缓解了对浓缩铀的要求,可以使诸如 ^{232}Th 的资源独立的得到开发和利用,利用“自生”的 ^{233}U ,达到很深的燃烧程度,大幅度提高了对钍等资源的利用率;同时,也省却了对当前核废物处理的大量人力和财力等。若将以上在资源、环境、安全等方面的效益综合起来看,即使需要增加一台中能强流加速器,仍然可以获得巨大的经济效益。据国外文献给出的估计,若以

煤的发电价格为1,则常规的核电(以法国为例)价为0.63,而加速器驱动的核电价则为0.37^[5]。

加速器驱动的嬗变系统的优点是显而易见的,它不仅处理现存的高放射性核废物,而且弥补和克服了现有核电设备排放大量核废物以及运行中出现超临界的不安全性等的不足和缺点,因此它的设计思路和功能,为新一代核能的开发铺平了道路。

4 发展前景

从80年代末期以来,世界上一些核电大国如美、日、法、俄罗斯及西欧等国,均十分

表1 当前正在计划的加速器嬗变系统

快堆型系统		k_{eff}	加速器功率
实验室	靶/堆芯		
JAERI (日本)	W Target, MA Metallic Fuel MA Molten Salt fuel	0.89 0.92	1.5G, 39 mA 1.5 GeV, 25 mA
BNL (美国)	Pb Target, MA MOX Fuel Pb Target, MA Particle fuel MA Oxide Fuel Lattice (PHOENIX, 8 Modules)	0.98~0.99 0.98~0.99 0.90	1.5 GeV, 2~5 mA 1.5 GeV, 4~8 mA 1.5 GeV, 104 mA
CEA (法国)	MA Molten Salt Fuel Pu Molten Salt fuel	>0.95 >0.85	1.5 GeV, 75 mA 1.5 GeV, 270 mA
热堆型系统			
LANL (美国)	Solid Target, Slurry Fuel D ₂ O Blanket (4 Modules) Pb Target, Molten Salt Fuel Graphite Blanket (8 Modules)	0.95	1.6 GeV, 250 mA 0.8 GeV, 90 mA
RIT (日本)	Pb/Th/ ⁷ Li Molten Salt Fuel		1.5 GeV, 5~100 mA
ENEA	Pb Target, Molten Salt		1.6 GeV, 200 mA
ITEP (俄罗斯)	W/Pb-Bi Target, Molten Salt H ₂ O Blanket	0.97	1 GeV, 100 mA

重视对加速器驱动嬗变技术的研究,而在研究中都把开发的重点放在强流加速器及散裂中子源的研制上。从当前国际上发展的动向看,建造一台能量为 1 GeV 和流强 10 mA 的质子加速器,在技术上已逐渐趋于成熟。人们清楚地看到,实现加速器驱动嬗变装置的关键是强流质子加速器,而强流质子加速器的关键是解决束流损失问题。以目前最有成效的 LAMPF 装置为例,它的高能部分的束流损失率可控制在 0.2 nA/m 以下,这相当于平均束流为 600 μ A 时的束流相对损失率为 2×10^{-4} ,那么当平均束流为 250 mA 时,要求束流的相对损失率应保持在 5×10^{-7} 的水平,这确实是加速器专家们面临的一个难题。

尽管对加速器的要求如此之高,但根据近 20 年加速器技术的快速发展,估计今后十余年内十分有希望解决这些难题,因为 LAMPF 的成功给予了人们去探索建造更高强流质子加速器的信心;另外,仅从提供电能的目的来看,只要有一台功率达到 10 MW (1 GeV 和 10 mA) 的质子加速器就能使这一系统投入运行并带来巨大的经济效益和社会效益。从现有的技术水准看,建造一台功率为几十 MW 的加速器原则上已没有太大困

难。另外,如果对加速器的要求并不十分苛刻的话,那么除直线加速器外,等时性回旋加速器也是有希望的候选者,它的优点是加速器规模小、造价较低、工程技术较成熟和运行较容易等。瑞士 PSI 研究所的回旋加速器 (590 MeV 和 1 mA 束流功率为 0.6 MW) 自 1974 年运行以来已积累了不少经验,表 1 列举了当前世界上正在计划的加速器驱动的嬗变系统及其特性^[7]。

在新能源的开发研究中,今后几十年还只能限于重核的裂变能,而加速器驱动的核能系统的提出,是近 30~40 年在核物理、核化学、反应堆和加速器技术获得综合性巨大进展所凝结的成果,除加速器技术外,其它各组成部分均已有了坚实的理论和实验基础。目前,这种系统所具有的各种优点强烈地吸引着世界核国家将其作为开发新一代核能系统的发展方向。

我们有理由认为,随着人们的不断追求、不断努力的投入和开发,加速器驱动嬗变技术的实现将为期不远,预期短者 20 年,长者 30 年将有可能见到投入运行的驱动堆。

致谢 感谢魏宝文院士在物理思路上的启发和指导以及乔庆文研究员的有益讨论。

参 考 文 献

- 1 Lengeler H. Nuclear Waste Transmutation Using High-intensity Proton Linear Accelerators. CERN AT/93-02 (D1), 1993, 999~1 019
- 2 戴光曦. 加速器驱动的核电站——干净现实的核能源. 核物理动态, 1996, 13(4): 53~58; 加速器驱动的核电站. 科技导报, 1996, 8: 32~39
- 3 Bowman C D. Overview of the Los Alamos Accelerator-driven Transmutation Technology Program. Proc of 1994 Inter Conf on Accelerator-driven Transmutation Technologies and Applications. Las Vegas, 1994
- 4 Lawrence G P. Transmutation and Energy Production with High Power Accelerators, Proc 1995 Particle Accelerator Conf and Inter Conf on High-energy Accelerators, 1996, IEEE, 35~39
- 5 丁大钊, 方守贤, 何祚麻. 加速器驱动的核电站亟待开发和研究. 中国科学院刊, 1997, 12(2): 116~123
- 6 Klein H. Spallation Neutron Sources. Proc of 1994 Linac Conf, 1994, 322~327
- 7 Motoharu Mizumoto. Accelerators for Nuclear Waste Transmutation. *ibid*, 317~321
- 8 Jameson R A, Lawrence G P, Schriber S O. Accelerator-driven Transmutation Technology for Energy Production and Nuclear Waste Treatment. 3rd European Accel Conf, Berlin, 1992, 230~234
- 9 Lawrence G P. Critical Design Issues of High Intensity Proton Linacs. Proc 1994 European Particle Accel Conf, London, 1994, 236~240 (下转第 277 页)

- at WNR. Pro Int Conf on Nucl Data for Sci Tech, Gatlinburg, 1994, 154~156
- 6 Nauchi Y, Baba M, Matsuyama S *et al.* Development of Wide Range Charged Particle Spectrometer for Ten's MeV Neutron. JAERI-Conf, 1996, 96~008, 152~154
- 7 Ito N, Baba M, Matsuyama S *et al.* Large Solid Angle Spectrometer for the Measurements of Differential (n , Charged-particle) Cross Sections. Nucl Instr Methods, 1994, A337, 474~485
- 8 Goverdovski A A, Khryachkov V A, Ketterov V V *et al.* (n , α) Reaction Studies Using a Gridded Ionization Chamber. Pro Int Conf on Nucl Data for Sci Tech, Gatlinburg, 1994, 117~123

Progress on Measurement of DDX of α -particles Emission Induced by Neutrons

Ye Bangjiao Fan Yangmei Han Rongdian

(*Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026*)

Abstract The main experimental groups in the world for measuring double-differential cross sections (DDX) of α -particles emission induced by neutron and two kinds of main spectrometers used are reviewed in the point of experimental view. Progress on experimental measurement of DDX in present stage is compared and development trend in future is discussed.

Key words nuclear data fast neutron double-differential cross section α -particle

Classifying number O571.55

(上接第272页)

Accelerator-driven Transmutation Technologies and Applications

—A popular topic on development of nuclear energy

Guo Junsheng

(*Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000*)

Abstract The existing nuclear power system has many problems, such as low utilization ratio of natural resources, output of long life radioactive nuclear wastes and safety of operation etc. The transmutation technology by using accelerator-driven sub-critical reactor can generate not only 'clean' nuclear power, but also can transmutate nuclear wastes and proliferate and produce nuclear fuels. It will be a direction to develop new nuclear power.

Key words accelerator sub-critical reactor transmutation clean nuclear power

Classifying number TL43