

洁净核能源技术和 D-Li 强中子源的应用设想¹

王铁山 郭俊盛

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘 要 在讨论国际科学界普遍关注的加速器驱动核动力装置技术,及其在未来洁净核能源开发和利用核嬗变方法处理核废料等方面的应用意义和可行性的同时,从我国的实际出发,提出了立足国内,利用中能(40 MeV)、强流(2×125 mA)质子加速器作 D-Li 超强中子源,开展零功率加速器驱动核裂变装置技术的原理性研究和核嬗变、聚变材料、抗核加固及核物理研究,以及生产放射性同位素的初步设想.

关键词 洁净核能源 加速器 D-Li 强中子源 核裂变 核嬗变

分类号 TL413、TL58

核能是指通过核裂变、核聚变和核嬗变(包括核衰变)等核过程产生的能量^[1~4]. 虽然核聚变能被认为是人类永久解决能源问题的根本途径^[4],但至今只有核裂变能得到了工业化的应用,是目前真正意义上的应用核能源^[3,4]. 由于存在燃料利用率低、潜在环境危害大、运行安全系数不理想和支持工业体系庞大等不利因素,不符合人类对环境资源可持续发展的要求^[3,4]. 尽管如此,核能的开发和利用仍被认为是从根本上解决未来能源问题的最有效途径^[1~4]. 目前核电已占全世界总发电量的 23%^[3],在全球范围内,尤其是在广大发展中国家,对核电的需求仍在迅速增长. 在 21 世纪和更远的将来,核能将成为人类赖以生存和发展的最为重要的能源.

但是随着人们对资源和环境意识的增强,未来能源必须具有安全、高效、经济、低污染、高资源储量和高利用率等特点^[1,4]. 核聚变能基本具备上述主要特点,但因受技术的限制,人们对其是否能够在 50 或 100 年以后得到大规模应用尚存疑问^[6]. 因此,目前应立足于提高和完善核裂变及核嬗变能的应用技术,以满足能源可持续发展的需要^[4,5].

为了提高资源利用率,应开发能够燃烧 ^{238}U 和 ^{232}Th 的新型反应装置^[4]. 为了提高反

应装置运行的安全性,要求其最好能工作在次临界状态($K < 1$)下^[3,4]. 为了提高燃料利用率并减少核废物,应利用核嬗变技术提高燃料转化系数(~ 1),减少燃料更换周期,进而提高燃料的燃烧深度,同时也要注意利用核嬗变放出的能量^[1~5,7,8]. 正是基于上述考虑,科学界提出了加速器驱动核动力系统的研究方案^[6,7],并认为这一方案是解决 21 世纪乃至更长时期的洁净核能源的发展方向.

1 加速器驱动核动力装置原理及技术

加速器驱动核动力装置的概念最早出现于 60 年代,由于受当时科学技术水平的制约,不具备实施该项研究的可能性. 自 80 年代后期以来,由于对未来洁净核能源的需求、聚变技术开发的不乐观前景的改观和加速器技术的飞速发展,国际上对加速器驱动核动力装置的研究再次提到了议事日程,并已成为科学界普遍关注的焦点问题^[1~5,7,8].

1.1 工作原理

加速器驱动核动力装置的基本工作原理是:利用加速器提供的中能带电离子打靶产生的超强快中子源作为核裂变装置的外中子源,诱发 ^{235}U 、 ^{233}U 、 ^{239}Pu 、 ^{238}U 、 ^{232}Th 或其

它核燃料产生的链式裂变反应放出的能量(见图 1)^[1~4]. 裂变反应装置工作在次临界($K < 1$)状态下, 外中子源的强度通过链式反应可被放大到 $1/(1-K)$ 倍^[3]. 当外中子源的强度高于一一定值时, 通过裂变反应放出的能量转化成电能后可大于系统运行所需能量, 进而可实现正功率输出. 同时还可以利用该装置产生的强中子场实现对长寿命放射性废料的嬗变, 并获得有用的能量^[5,7,8].

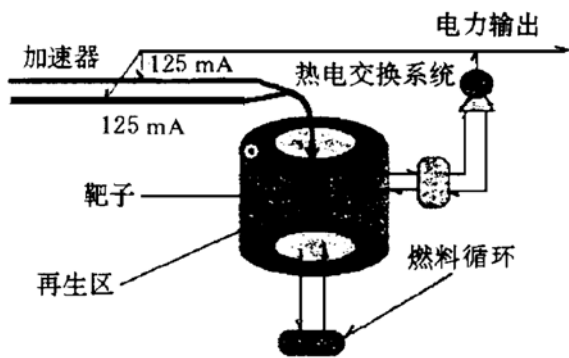


图 1 加速器驱动核动力装置示意图

1.2 技术实现

加速器驱动核动力系统实质上是核科学领域的两大基本技术, 即核反应堆技术和加速器技术的有机结合. 因为其所用的反应堆及其支持条件(技术)目前已较为成熟, 所以系统的研制涉及的最核心问题是研制强流、高输运效率的高能加速器和重金属熔融靶的技术开发.

以利用强流质子加速器打重金属靶作中子源的方案为例. 若要实现系统的正功率输出, 加速器的束流能量应在 1 GeV 以上, 束流强度应达到 $n \times 10$ mA; 而且在中高能区 ($E > 50$ MeV), 允许的束流损失应小于 $0.1 \sim 1$ nA/m, 其所对应的束流损失率必须小于 $10^{-6} \sim 10^{-9}/\text{m}$ ^[7]. 要实现这样的技术指标, 必须要在现有的技术水平上有重大突破.

装置中的超重金属靶需要承受高达 $n \times 10$ MW 的强大束流轰击, 考虑到靶子的散热问题, 必须选用熔融态的重金属靶, 使其高速流动, 并在流出的过程中对其进行快速放

化分离, 分离出其中的放射性裂变产物后将重金属熔融靶重新注入到反应装置循环使用^[7,8]. 这涉及靶材料、快速散热、重金属熔融的高速循环使用、高放射性状态下的化学分离等技术难题^[1~5]. 目前尚处于最初的探索阶段. 同样, 要解决上述技术问题, 需要相当长时期的探索、攻关, 以实现技术上的重大突破.

1.3 技术可行性讨论

目前在美国洛斯阿拉莫斯国家实验室(LANL)和瑞士 PSI 实验室分别建成了 800 MeV、1 mA (LAMPF) 和 590 MeV、1.5 mA (回旋加速器) 的强流质子加速器^[4,7], 同时各发达国家都在加大力度开展加速器和靶技术的研究, 分别提出了各自的研究计划(日本的 OMEGA 计划^[5], 欧洲的 ADEP 方案^[7] 和美国的 ADTT 方案^[7]等). 目前普遍认为, 在未来的 5~10 年内建成 1 GeV、 $n \times 10$ mA 的强流质子加速器是可能的, 而且在技术上会比建造大型磁约束核聚变装置容易^[1]. 主要原因是:(1)目前国际上已有制造能量在 1 GeV 以上, 束流在 mA 水平的中能加速器的成熟技术^[1,4,7]. (2)目前的加速器的脉冲束流可达数十毫安($n \times \text{mA}$)的水平, 经进一步开发使平均束流强度达到该水平是完全可能的^[1,4,7]. (3)目前在 LANL 的 LAMPF 上获得了在 1 mA 束流强度下连续工作数月, 保持束流损失率低于 $2 \times 10^{-7}/\text{m}$ 的惊人结果^[6]; 在 PSI 的回旋加速器上也取得了在 1 mA 工作状态下, 束流损失率小于 $2 \times 10^{-4}/\text{m}$ 的水平^[7]. 距离强流工作状态下的束流能损率要求还有 1~2 个数量级的差距. 进一步的提高, 有很大的困难, 但经过努力是可能实现的.

1.4 综合效益评估

加速器驱动核动力装置可突破传统的核反应堆只能燃烧浓缩铀 (^{235}U , 丰度仅为 0.75%) 的限制, 直接利用外部快中子源诱发

^{238}U (丰度为 99.25%)、 ^{232}Th 等天然储量丰富的核燃料裂变, 使可利用燃料资源储量增加 2~3 个数量级^[1~3]. 同时由于外中子源的补充, 可有效地提高燃料转化系数(~ 1), 加长燃料更换周期, 从而使燃料的燃烧深度提高数倍(甚至十倍以上), 既可以大大提高资源的利用率^[1~4], 又可以减少长寿命核废物的产生^[4,5,7,8].

系统工作于强快中子场中, 中子在诱发裂变的同时, 也通过核嬗变反应减少了长寿命的核废物的形成. 因此其放射性污染排放量仅与同功率核聚变装置、煤电装置相当, 而比目前运行的同功率核动力堆低 2~4 个数量级^[4]. 同时, 由于系统由加速器驱动, 且工作于次临界状态, 具有固有安全保障, 因此, 更易于控制, 且不可能出现超临界爆炸事故.

系统使用的加速器本身是一个强有力的科学研究工具. 利用它可以开展聚变堆材料、核物理、中子物理和核固体物理等方面的研究, 还具有通过核嬗变处理核废物、生产同位素等多项用途^[1,4,7]. 从装置本身的造价来看, 要比同功率普通的核动力堆贵, 但比大型核聚变装置低廉. 综合前述资源、环境、安全和社会效益考虑, 加之减少了支持工业的规模, 加速器驱动核动力装置的生产成本应低于或相当于普通核电.

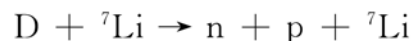
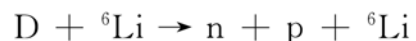
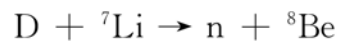
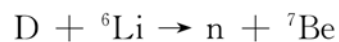
2 D-Li 强中子源的应用设想

由于加速器驱动核动力装置开发的巨大科学意义和社会效益, 世界科学界给予了极大的关注, 尤其是欧、美、日、俄等国都已制定了各自的研究计划, 投入巨资启动该项技术的开发和研究^[1,2,7,8], 我国也在酝酿着开展该领域的探索性研究^[3~5]. 但是由于科学技术水平和经济实力的差距, 我国现阶段尚不具备开发与国外规模相近的实验装置的能力

和条件, 但在原理和基本技术上进行同步跟踪和可行性探索是十分必要的. 因此, 应以原理性研究和基本技术积累为目标, 建立我国自己的多用途实验研究装置. 作者以为, 以加速器驱动核动力装置的原理性研究为主要目的, 同时兼顾聚变堆材料、核嬗变和其它核物理、中子物理等研究和生产急需的放射性同位素; 充分利用有限的投入, 开展多方面的科学研究; 考虑到现实技术积累和经济实力, 建立以中能强流加速器(40 MeV, 2×125 mA)为基础的 D-Li 聚变反应超强快中子源综合性实验装置较为切实可行.

2.1 D-Li 强中子源

D-Li 强中子源是利用经加速器加速到一定能量的强流氘束轰击液态锂金属靶, 并通过下述反应产生的强中子辐射^[6]:



实际使用的氘离子束能量通常在 10~40 MeV, 当离子束流足够强(100 mA 以上)时, 中子源强可达到大约 10^{17} n/s 以上, 而且, D-Li 中子的空间分布是强烈前倾的. 32 MeV 氘离子束打锂靶(D+Li)产生的中子能谱如图 2 所示^[6]. 从图中可见, 此时 0° 方向上中子的平均能量约为 13 MeV. 如此高强度的快中子可以用来研究材料在高剂量中子辐照下的辐射损伤和性质变化, 为聚变堆内壁材料研究提供数据. 由于 D-Li 中子能量远高于 ^{238}U 和 ^{232}Th 等天然重金属的诱发裂变反应阈值, 故可以用来直接轰击天然铀、钍靶, 诱发占天然铀丰度 99.25% 的 ^{238}U 和占天然钍含量 100% 的 ^{232}Th 发生裂变, 直接燃烧. 同时, 也可以利用该中子源开展核嬗变研究和应用工作.

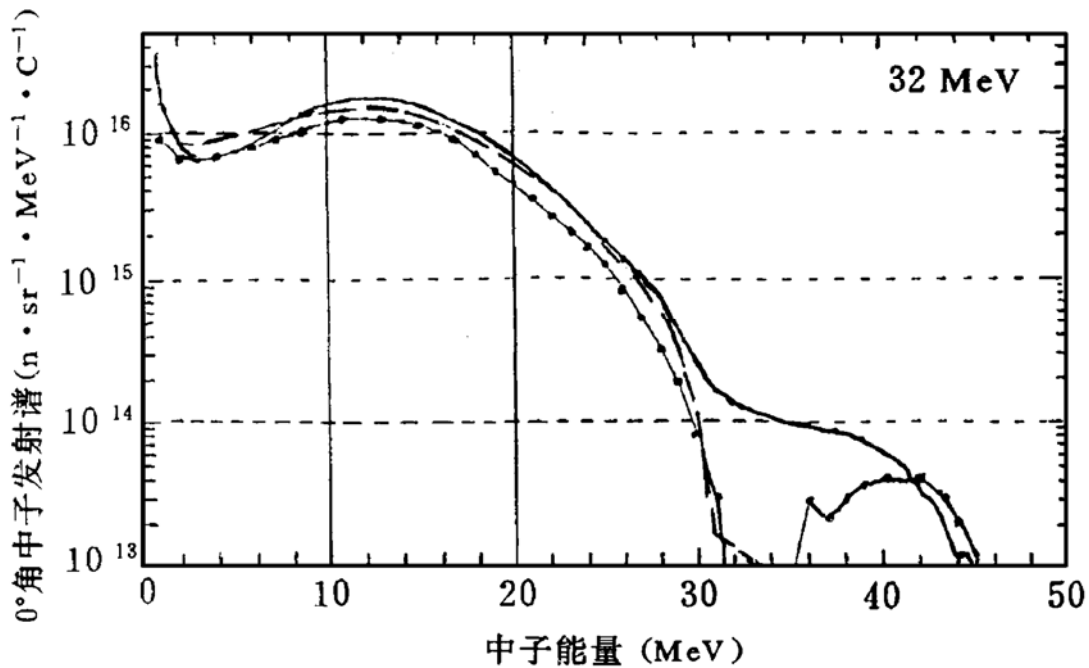


图 2 D-Li 中子源在 0°角方向上出射的中子能谱
 — JAERI 的测量结果, - - - Mann 的测量结果, --- Sugimoto 的计算结果.

2.2 技术可行性讨论

目前美国 LANL 正在建一台 40 MeV、200 mA 的直线加速器(APDF), 作为将来处理核废料、钷和生产氙的 1 GeV、15 mA 加速器的注入器. 日本、美国和俄罗斯等国正在联合筹建(实施)以开展聚变材料研究为主要目的的 40 MeV、250 mA 直线加速器 D-Li 强中子源(IFIMIF)计划^[6].

在技术上, 国内已有 30~35 MeV、0.3~0.35 mA 回旋和直线质子加速器各一台. 达到所需加速能量不存在问题. 关键是如何将束流提高到 125 mA 以上, 这一问题的解决只是量的积累, 其难度较小, 可借鉴国外的最新技术得以实现. 由于加速器能量较低, 其反应方式和强度均与高能(GeV)时有本质的区别, 因此对束流的损失率要求可以大大降低, 现有技术基本可以实现.

液态锂金属靶技术是该方案的最重要环节之一. 目前已有国外的数据和应用经验可以借鉴^[6], 能够通过我国科学家的通力合作在近期内得到解决, 其它问题均是我国基本掌握的常规反应堆及其辅助技术. 因此, 在

我国当前的科技条件下, 实施该方案总体上没有不可克服的技术难题.

同时, 我国目前已具有一定的经济实力来集中力量开展一些国际前沿的大科学工程项目研究, 因此这一方案的实施既具有科学技术基础、也基本符合当前中国的国情.

3 两种方案(设想)的比较

D-Li 强中子源驱动核动力研究装置方案与国内外 1 GeV、10 mA 质子加速器驱动核动力装置的主要性能比较(估算值)如表 1 所示.

与国内外的其它方案相比, D-Li 中子源方案具有以下特点:

(1) 在技术路线上, 本方案以降低加速器能量、增大束流强度的办法大大地降低了研制的难度, 回避了对束流损失率的过于苛刻的要求.

(2) 液态锂靶的结构简化、体积小和易于冷却, 同时技术难度也大大降低. 对液态锂金属靶, 国外已有较多研究, 并有实际应用的先例^[6], 在技术上可得到借鉴, 更易于

实施. 而重金属熔融靶所涉及的问题非常复杂, 目前仍在探索之中, 结果难以预测.

(3) 液态锂金属靶的应用回避了铀(铅)熔融靶中散裂产物的快速分离问题, 又可实现对重金属熔融靶的原理性研究, 可为将来开发重金属熔融靶做技术储备.

(4) 40 MeV D+Li 模拟实验很容易实

施, 利用已有的实验装置即可开展, 而 GeV 质子打重金属靶的模拟实验目前国内尚无条

件开展.
(5) D-Li 方案的中子能量高, 可作为外中子源, 诱发占天然铀含量 99.25% 的 ^{238}U 和占天然钍含量 100% 的 ^{232}Th 发生裂变, 直接燃烧天然铀钍.

表 1 两种加速器驱动核动力装置方案主要性能参数比较^[4,6]

方案	能量 (MeV)	束流 (mA)	靶材料	中子产额 10^{17}n/s	燃料	倍增因子 K	热功率 (MW)	电功率 (MW)	系统自耗 (MW)	输出功率 (MW)
p-U	1 000	10 p	^{208}Pb	~12.5	^{238}U	0.98	~857	~280	~30	~250
D-Li	40	2×125 d	^6Li	~1.2	^{238}U	0.98	~82	~27	~25	0~5

(6) 该系统是多功能研究装置. 除开展加速器驱动核动力装置研究外, 还可开展聚变堆材料研究、嬗变核废物、生产放射性同位素和从事核物理及中子物理研究等多项工作. 实现一机多用, 可减少大工程项目, 提高投资效益.

(7) 该装置本身也可作为更高能量加速器的注入器, 既为将来的大功率加速器驱动核动力装置做技术积累, 又为未来的开发预留了空间. 在时机成熟时, 可进一步升级^[7].

(8) D-Li 强中子源方案的技术难度的减小和加速器能量的降低, 使工程造价会大大降低, 达到我国目前可能承受的水平.

该方案的不足之处是, 只能在零功率或负功率下开展对加速器驱动核动力装置的原理性研究, 难以实现正功率输出. 但由于加速器驱动核动力装置技术在世界范围都尚处于概念性研究阶段, 结合我国的实际, 选择这样一个方案是最为稳妥和可行的.

4 结束语

加速器驱动核动力装置技术开发是当前国际学术界最为关注的未来大科学课题之一^[1~5,7,8]. 目前世界上提出的多种开发方案虽具有科学上的先进性, 但耗资巨大, 技术

难度也十分大^[1~5,7,8]. 这些方案在我国当前的技术水平和经济实力下难以实施.

本文提出的利用 40 MeV、 2×125 mA 强流加速器 D-Li 强中子源驱动核裂变装置的方案, 以流强的优势弥补能量的不足, 以 D+Li 聚变反应替代 p+U(Pb) 碎裂反应的强中子源作为反应堆外中子源, 从而避开了国外方案中的关键难点, 并可大大减少所需投资. 总体设想立足于我国国情, 有其现实可行性, 应该对其做进一步的论证、充实和完善.

我国若能建立该综合实验系统, 可兼顾到加速器驱动核动力装置和聚变材料等多方面的研究. 一方面可利用该强中子源作外源开展零功率状态下的加速器驱动核动力装置的原理性研究和聚变材料等研究, 另一方面可通过对该加速器的研制为更高能量的强流直线加速器的研制作技术储备, 同时也为进一步将其能量提高到 1 GeV 以上, 开展正功率加速器驱动核动力装置预留发展空间.

参 考 文 献

- 1 Rubbia C. Status of the Energy Amplifier. Proc of 2nd Inter Conf on Accelerator-driven Transmutation Technology and Applications, Kalmer, Sweden, June 1996,

- 35
- 2 Jameson R A, Lawrence G P, Schriber S O. Accelerator-driven Transmutation Technology for Energy Production and Nuclear Waste Treatment. Proc of 3rd European Acc Conf, Berlin, 1992, 230
 - 3 戴光曦. 加速器驱动的核电站——干净的核能源. 核物理动态, 1996, 13(4): 53~58
 - 4 丁大钊, 方守贤, 何祚庥. 加速器驱动的核电站亟待开发与研究. 中国科学院院刊, 1997, 2: 116
 - 5 张玉山. 长寿命核废物嬗变处理的综述. 原子核物理评论, 1997, 14(4): 251~258
 - 6 前川洋. 核融合材料开发用强中子源. 特别讲座, 大阪大学, 日本, NoV 1996
 - 7 Lawrence G P. Transmutation and Energy Production with High Power Accelerators. IEEE, 0-7803-3053-6, 1996, 35
 - 8 Bowman C D. Overview of the Los Alamos Accelerator-driven Transmutation Program. Proc of 1994 Inter Conf on Accelerator-driven Transmutation Technology and Application, Las Vegas, July 1994

Clean Nuclear Power Technology and Proposal of Application of High Intensity D-Li Fast Neutron Source

Wang Tieshan Guo Junsheng

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

Abstract The accelerator-driven nuclear power technology, as one of the most important scientific projects in the world, is evaluated. Some of its applications on transmuting nuclear waste, producing fission-energy and doing scientific researches are also discussed. A proposal of using high intensity D-Li fast neutron source as driven source of a zero power accelerator-driven fission facility is outlined for the principle research and multi application purposes based on the present scientific and economic situations in China.

Key words clean nuclear energy accelerator D-Li neutron source nuclear fission nuclear transmutation

(上接第 149 页)

Study of Integral Split Ring Radio Frequency Quadruple (ISR RFQ) Accelerators

Lu Yuanrong Li Weiguo Guo Jufang Ren Xiaotang

Yu Jingxiang Fang Jiaxun Chen Chia-erh

(Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract The status of the ISR RFQ accelerators in Peking University is described. The structure of ISR RFQ accelerator, beam dynamics calculation results by PARMTEQ, RF systems, beam transport lines and the beam test evolutions of a 26 MHz 300 keV ISR RFQ accelerator are also presented, respectively. The beam test results for N^+ , O^+ , O^- particles are analyzed in detail. At last, the development of 1 MeV 26 MHz ISR RFQ accelerator is introduced briefly.

Key words integral split ring radio frequency quadruple radio frequency system beam test