

文章编号: 1007- 4627(2000)04-0251-04

加速器驱动反应堆的靶实验及核废料嬗变与焚化*

戴光曦

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 对加速器辅助驱动次临界核反应堆的最近研究进展, 特别是靶实验结果, 进行了评述. 通过对靶实验首次全产物截面的测定, 达到了剥离反应与裂变反应二者产物的完全识别.

关键词: 散裂反应; 嬗变; 焚化; 中子俘获

中图分类号: TL249 文献标识码: A

1 引言

目前, 各国对加速器辅助驱动次临界反应堆进行了各种研究. 从原理上讲, 这种混合堆是可行的^[1,2], 但是需要一些数据, 特别是作为补充中子源的靶系统, 以及在高能质子束轰击下的散裂反应与裂变反应的测量结果. 在 GSI 的实验中, 采用大型碎片分离与核素鉴别装置(FRS)^[3]测量了 1 GeV/u ²⁰⁸Pb, ²³⁸U + p 和 800 MeV/u ¹⁹⁷Au + p 等反应系统^[4].

除了能源应用外, 对当前来自核反应堆、其它核工艺和过时核武器系统有大量核废料需要处理. 用这种加速器驱动反应堆, 把要处理的核废料作嬗变辐照或是焚化裂变, 则是一劳永逸的根治方法. 嬗变是中子俘获再 β 衰变, 将裂片废料(如 ⁹⁹Tc, ¹²⁹I 和 ¹³⁵Cs) 变成短寿命或稳定核素. 焚化裂变是中子俘获裂变, 它是消灭超铀同位素的唯有方法. 在驱动堆中进行焚化还可得到附加的次级中子和核能等副产品.

2 驱动堆用作下世纪新能源及核废料嬗变的焚化炉

图1显示了加速器驱动次临界反应堆装置的示意图. 从图可见, 用天然钍和铀作核燃料并配以高能强流质子加速器就可给出电功率. 同时, 这种混合堆还提供一条道路来把长寿命裂变产物核嬗变成短寿命或稳定的核, 并通过裂变反应焚化超铀同位

素, 每年全世界产生高放射性核废料上万吨, 现在已经总计达到 160 kt, 表1列出了这些需要嬗变与焚化的核素和它们的放射性质.

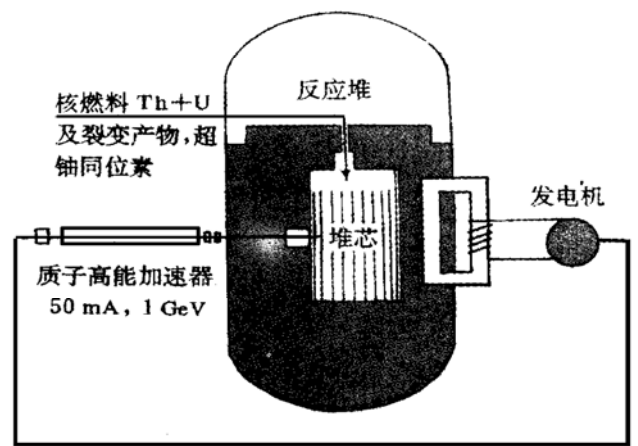


图1 加速器驱动次临界反应堆的原理图

混合堆的能量增益用 G 表示, 中子倍增因子为 k , 则定量给出的 G 是堆产出的功率和质子束需要的功率之比值, 后者考虑发电机与加速器的效率, 如现代技术, 可估计出均为 0.4. 这样就有半经验公式:

$$G \approx 0.3k / (1 - k).$$

从而给出了对得失相抵的情况, 当 $G \approx 1$, 次临界的值 $k = 0.77$. 通常要求 $G \approx 5$, 则 $k = 0.94$. 对于近临界状况 $k = 0.98$, 则增益 $G = 15$.

混合堆的安全性是无容置疑的. 由于系统工作在次临界状态, 这里靶中子起到通常的延时中子的

* 收稿日期: 2000-03-06

作者简介: 戴光曦(1936-), 男(满族), 北京人, 研究员, 从事实验核物理研究.

表1 超铀与裂变核废料特性*

核素	半衰期 (a)	剂量因子 (Sv·Bq ⁻¹)	活度 (Bq·kg ⁻¹)	辐射比能 (Sv·kg ⁻¹)
⁹⁹ Tc	2.111×10 ⁵	7.8×10 ⁻¹⁰	6.3×10 ¹¹	4.9×10 ²
¹²⁹ I	0.157×10 ⁸	1.1×10 ⁻⁷	6.5×10 ⁹	0.7×10 ³
¹³⁵ Cs	0.230×10 ⁷	2.0×10 ⁻⁹	4.2×10 ¹⁰	0.8×10 ²
²³⁷ Np	0.214×10 ⁷	1.1×10 ⁻⁷	2.6×10 ¹⁰	0.3×10 ⁴
²³³ U	0.159×10 ⁶	2.5×10 ⁻⁷	3.6×10 ¹¹	0.9×10 ⁵
²³⁸ Pu	0.877×10 ²	2.3×10 ⁻⁷	6.3×10 ¹⁴	1.4×10 ⁸
²³⁹ Pu	0.241×10 ⁵	2.5×10 ⁻⁷	2.3×10 ¹²	0.6×10 ⁶
²⁴⁰ Pu	0.656×10 ⁴	2.5×10 ⁻⁷	8.3×10 ¹²	2.1×10 ⁶
²⁴¹ Pu	0.143×10 ²	4.7×10 ⁻⁹	3.8×10 ¹⁵	1.8×10 ⁷
²⁴² Pu	0.373×10 ⁶	2.4×10 ⁻⁷	1.5×10 ¹¹	0.4×10 ⁵
²⁴¹ Am	0.433×10 ³	2.0×10 ⁻⁷	1.3×10 ¹⁴	0.3×10 ⁸
²⁴³ Am	0.737×10 ⁴	2.0×10 ⁻⁷	7.4×10 ¹²	1.5×10 ⁶
²⁴³ Cm	0.291×10 ²	2.0×10 ⁻⁷	1.9×10 ¹⁵	0.4×10 ⁹
²⁴⁴ Cm	0.181×10 ²	1.6×10 ⁻⁷	3.0×10 ¹⁵	0.5×10 ⁹
²⁴⁵ Cm	0.850×10 ⁴	3.0×10 ⁻⁷	6.3×10 ¹²	1.9×10 ⁶

* 裂变产物核主要进行 β 衰变, 而超铀核主要进行 α 衰变, 在衰变率相同时前者比后者放射能小很多。

作用, 从而使混合堆运转. 一旦质子束断掉, 靶中子束立刻关闭, 堆中核反应立即停止.

图1中建议的束流强度为50 mA, 但目前最高仅达到1.5 mA, 同时还要求束流保持长时期的稳定. 消除这个差距还有一段艰难的路程, 但是前景是诱人的. ²³²Th 比²³⁸U 的天然丰度多5倍, 是²³⁵U 丰度的700倍. 用²³²Th 作燃料可形成有钍-铀循环, 即先由²³²Th 俘获中子并衰变成²³³U 再进行链式反应. 这就为人类能源的彻底解决提供了前景. 现今世界核电占总电功率的五分之一, 它们主要建立在²³⁵U 基础上的. 如果取代²³⁵U 而用²³⁸U 作混合堆燃料, 也有铀-钍循环, 则无需增加采铀矿设备并可省掉铀同位素分离等庞大设备, 可将目前核电功率增加100倍. 所以它应是21世纪的新能源.

3 逆运动学原理用于靶实验

进行散裂反应与裂变反应的靶实验是十分必要的, 特别是40多种10年到1万年长寿命同位素的产出截面与动能. 这些数据决定着混合堆中靶材料的选择、反应产物对靶材料的腐蚀性、使用期限与老化过程、制作设计和更换工艺等.

虽然混合堆中靶中子源是用高能质子轰击重靶铅或钨, 但是为了进行散裂与裂变反应产物碎片的同时测定, 可采用重炮弹轰击轻靶的逆运行学反应, 例如1 GeV/u ²⁰⁸Pb, ²³⁸U + p 和 800 MeV/u ¹⁹⁷Au + p 等反应系统进行测量. 这些反应系统与 1 GeV 或800 MeV 质子轰击铅、铀和金的系统在质心系中是等同的, 尽管使加速器的负荷提高约200倍. 这种逆运动学反应是为了用物理电磁谱仪测定众多反应产物的需要而采用的一种不可替代的方法. 所以提高加速器的负荷, 是为尔后分析类弹产物起了预加速的作用.

大型碎片分离与核素鉴别的装置FRS的设计是基于分析单核能为1 GeV/u 的碎片, 其原理图显示在图2中. 从图可见, 它由4组偏转聚束单元组成, 每个单元由二极磁场与进出口上的四极磁透镜所组成. 每个二极磁场偏束30°. 总的偏束长度为75 m. 谱仪的磁场安排使之消色差地将分析离子束聚焦在谱仪的出口处. 换言之, 具有相同荷质比的离子不管其动量和初始入射角有何差异均被聚焦到出口平面上的一小面积上. 为此还在谱仪中部的平面上放置劈形铝降能片, 使单种核素离子在出口处聚到直

径仅几厘米的小面积上^[5]. 每核子动能约1 GeV/u 的被分析核素离子穿过靶箔探测器窗膜后已被全剥离了, 即荷质比为 A/Z . 同时, 在离子飞行路径上还放置了能量、时间和位置探测器, 以测量被分析

离子的飞行时间、能损和聚焦位置, 从而得到核电荷、核质量与动能等的数据. 用这种谱仪对离子进行跟踪分析, 即使对十分稀有的产物也不会丢失. 整个谱仪的穿透率高达90%.

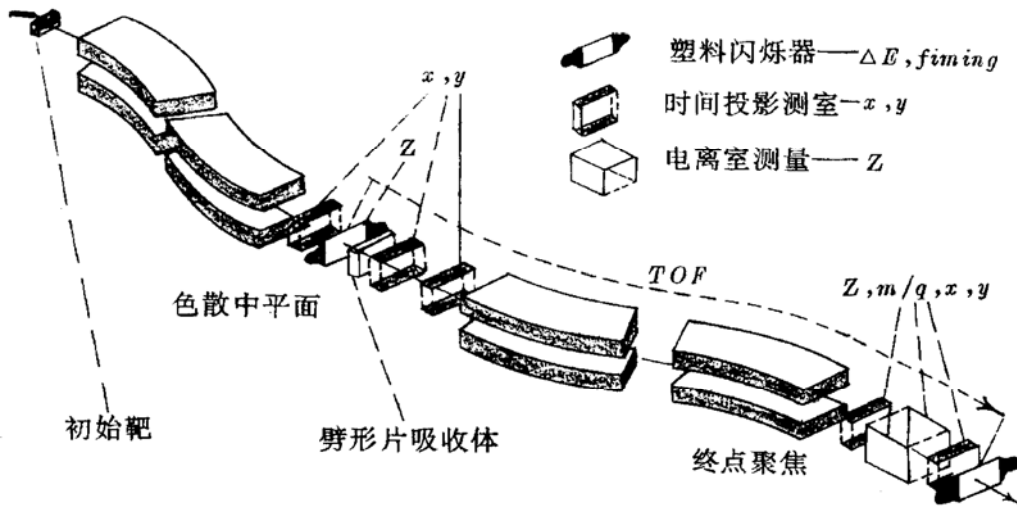


图2 大型碎片分离与核素鉴别的装置

4 碎片的分离

800 MeV/u $^{197}\text{Au} + \text{p}$ 反应系统, 用FRS 测到原始反应产物的同位素就高达750种, 并测到它们的产生截面如图3所示. 在这近1 000种核素中可将其明显分成两组, 即近弹核的散裂反应产物和裂变

反应产生的碎片, 二者在 $Z=56-58$ 分开, 高 Z 组来源于散裂反应. 散裂反应的产物, 是周边反应或表面蒸发反应产生的, 这样高能质子进入重核周边很可能出现局部高温气化. 这时激发弹核通过蒸发比质子更多的中子来退激, 所以产物核常常是缺中子或富质子核素. 从图3(a)可见, 核素分布在 β 稳定线上方高出5-7个质子(对给定中子数来说). 最大截面的核素是 ^{195}Au 和 ^{196}Au , 它们经非常轻微的擦边碰撞, 是弹核仅损失1个或2个中子形成的. 另一组产物显示于图3(b)中, 是沿着 β 稳定线分布的裂变反应碎片, 峰位在 $Z=38$ 和 $N=48$ 左右. 显然它们来源于 ^{197}Au 核的对称与非对称裂变, 其核素分布在考虑裂片中子蒸发后, 其碎片分布大体与之相符. 这组裂变反应产物对应于近心碰撞, 但是其峰位碎片的截面比起剥离反应的低近百倍, 所以800 MeV/u $^{197}\text{Au} + \text{p}$ 反应系统其主要反应道是散裂反应. 对这种反应的测量数据目前与现存理论差别很大, 所以靶实验不仅有混合堆的应用意义, 对高能质子轰击重靶的反应机理的研究也有重要意义.

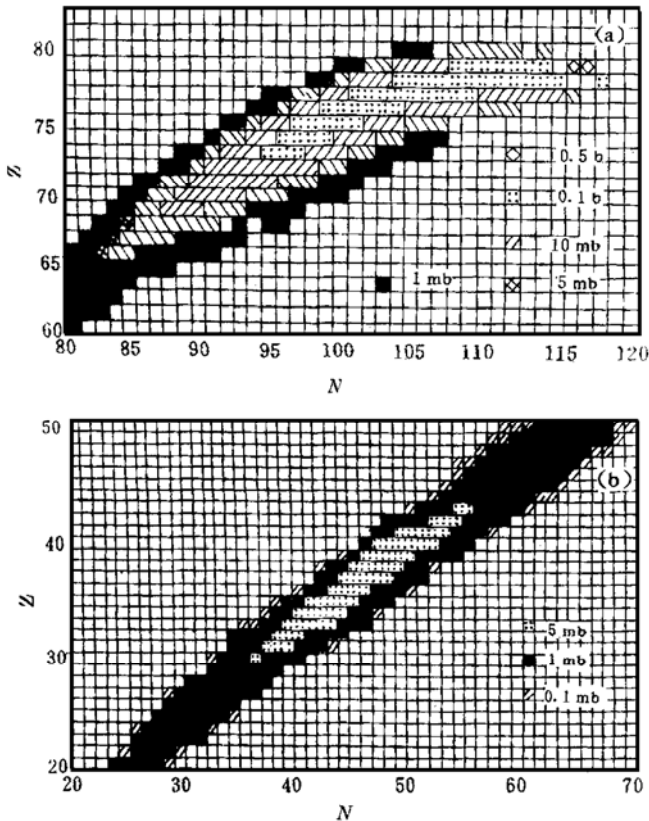


图3 800 MeV/u $^{197}\text{Au} + \text{p}$ 核反应产物中与(a)散裂反应相关的部分 和与(b)裂变产物相关的部分

5 结束语

煤与石油燃料的大量使用造成南极臭氧空洞和地球臭氧层的薄化, 这种温室效应已经给人类的气象生存环境带来危害. 21世纪的能源应该使用安全的核能源, 特别应对加速器辅助驱动的核电站加大科学研究的力度.

参 考 文 献:

- [1] Bowman C D, Arthur E D, Lisowski P W *et al.* Nuclear Energy Generation and Waste Transmutation Using an Accelerator-driven Intense Thermal Neutron Source[J]. Nucl Instr & Meth, 1992, A320: 336– 367.
- [2] 戴光曦. 加速器驱动的核电站——干净现实的核能源[J]. 核物理动态, 1996, 13(4): 53– 58.
- [3] Schmidt K H, Heinz A, Clerc *et al.* Low-energy Fission Studies of Neutron-deficient Projective Fragments of ^{238}U [J]. Phys Lett B, 1994, 325: 313– 316.
- [4] Gross K D. Nuclear Waste Transmutation and Incineration [Z]. GSI-Nachrichten, 2/99: 14.
- [5] 戴光曦. 实验原子核物理学[M]. 北京: 原子能出版社, 1995, 389– 390.

Target Experiment, Radioactive Wastes Transmutation and Incineration of Nuclear Reactor Driven by Accelerator

DAI Guang-xi

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

Abstract: The recent progresses in accelerator-driven nuclear subcritical nuclear reactor, especially in target experimental data have been reviewed. The data contained all the isotopes producing cross-sections. The reaction products were identified whether they came from the spallation or fission reaction .

Key words: spallation reaction; transmutation; incineration; neutron capture

(上接第234页)

projectile ions in accelerator mass spectrometry (AMS) has been developed. After analysis in the routine AMS system, the ions are stopped in an appropriately chosen target in steat of an ion detector and induced X-ray are detected for identification of ions by atomic number. For the application of AMS to higher mass isotopes with mass number > 20 using small accelerator, the characteristic X-rays technique is better than the energy loss method for identification of atomic isobars. For analysis of heavy isotopes, a detection system of projectile X-ray has been set up at the China Institute of Atomic Energy for identification of isobars in the AMS. Some of results in recent measurement of ^{64}Cu and ^{79}Se were reported here. The ^{64}Cu ions were separated from its isobars, ^{64}Ni and ^{64}Cu , and ^{79}Se ions were separated from ^{79}Br .

Key words: projectile X-ray detection; isobar identification; accelerator mass spectrometry