



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 1945751 B

(45) 授权公告日 2010.05.12

(21) 申请号 200610145858.2

(22) 申请日 2006.11.21

(73) 专利权人 中国原子能科学研究院  
地址 102413 北京市 275 信箱 65 分箱

(72) 发明人 史永谦 夏普 罗璋琳 赵志祥  
丁大钊 李义国 朱庆福 夏海鸿  
李吉根 王佐卿 张巍 曹健  
罗皇达 权艳慧

(51) Int. Cl.

G21B 1/01 (2006.01)

G21F 9/34 (2006.01)

G21G 1/06 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 1591700 A, 2005.03.09, 全文.

CN 1813313 A, 2006.08.02, 全文.

JP - 特开平 8-146175 (A), 1996.06.07, 全文.

史永谦等. ADS 次临界实验装置——启明星 1 #. 原子能科学技术 39 5. 2005, 39(5), 447-450.

于涛等. ADS 原理验证装置快热耦合次临界堆设计. 核科学与工程 26 1. 2006, 26(1), 56-63-66.

于涛等. ADS “启明星”次临界实验平台物理方案初步设计. 原子能科学技术 38 6. 2004, 38(6), 530-532.

于涛等. ADS 次临界实验装置设计方案验证. 核动力工程 25 4. 2004, 25(4), 337-339.

史永谦等. ADS 次临界实验装置——启明星 1 #. 中国原子能科学院年报. 2004, 26-28.

审查员 曲新兴

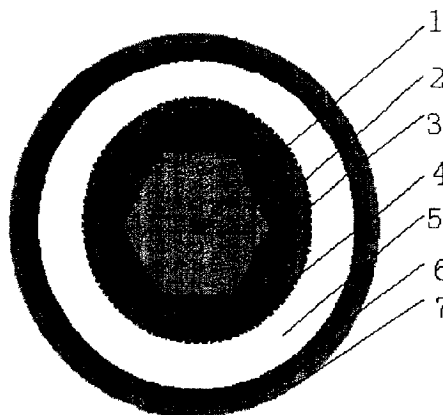
权利要求书 1 页 说明书 3 页 附图 1 页

(54) 发明名称

加速器驱动的快-热耦合次临界反应堆

(57) 摘要

本发明公开了一种加速器驱动的次临界反应堆。其从中心向外依次为靶区、快中子能谱区、热中子能谱区、反射层区、屏蔽层区、不锈钢外壳，特别是靶区使用加速器加速的质子与主靶核发生散裂反应产生的中子作为中子源；快中子能谱区所使用的可裂变材料是天然铀或低富集度铀；热中子能谱区使用的是富集度为 3~4% 的 UO<sub>2</sub>；在快中子能谱区与热中子能谱区自然形成超热中子区，嬗变 LLFP。该种次临界反应堆不仅实现了快-热耦合，嬗变 MA、LLFP，还可产能，真正实现了加速器驱动洁净核能系统的概念。



1. 一种快-热耦合次临界反应堆,从中心向外依次为靶区(1)、快中子能谱区(2)、热中子能谱区(4)、反射层区(5)、屏蔽层区(6)、不锈钢外壳(7),在快中子能谱区(2)与热中子能谱区(4)形成超热中子能谱区(3),靶区(1)使用加速器加速的质子与主靶核发生散裂反应产生的中子作为中子源;快中子能谱区(2)所使用的可裂变材料是天然铀或低富集度铀;热中子能谱区(4)使用的是富集度为3~5%的 $UO_2$ ,其元件根数根据 $K_{eff}$ 在0.90~0.98之间的需要而定,其特征在于:用超热中子能谱区(3)嬗变LLFP。

## 加速器驱动的快-热耦合次临界反应堆

### 技术领域

[0001] 本发明公开了一种用中子照射嬗变放射性废物的装置,具体涉及一种加速器驱动的次临界反应堆。

### 背景技术

[0002] 在反应堆的乏燃料中,存在着大量放射性物质,毒性大,而且半衰期很长,很多可长达  $10^4 \sim 10^7$  年,潜在的危害性极大。

[0003] 国际上有两种方案处理这些乏燃料,一种是以美国为首的所谓一次通过方式,即乏燃料经过较长时间的存放冷却,作为高放废物直接进行深地质埋藏;另一种是以法国等国为首的将乏燃料经过短时间的存放后,进行后处理,回收铀和钚,将回收后丢掉的铀和钚、全部其它锕系核素(简称 MA)以及全部裂变产物(包括长寿命裂变产物,简称 LLFP)作为高放废物经固化进行深地质埋藏。尽管后一种方案比前一种方案风险小得多,它仍存在着远期放射性风险问题,资源也存在一定的浪费。

[0004] 在《现代物理知识》1994年第5期,郁忠强在“能量放大器”一文中公开了西欧核子中心主任、诺贝尔奖获得者鲁比亚(C. Rubbia)领导的小组所提出的一个提供干净核能的新概念:利用高能强流质子加速器(能量  $1 \sim 1.6\text{GeV}$ ,平均流强  $\sim 7\text{mA}$ )产生的高能质子束,在物质中形成核级联过程而产生大量的中子,天然钍( $^{232}\text{Th}$ )俘获中子而转变为裂变元素  $^{233}\text{U}$ ,  $^{233}\text{U}$  又裂变产生中子维持链式反应。他们将这个装置称为能量放大器。装置启动后,裂变元素在天然钍中的比例很快可以达到相对稳定,形成一个长期稳定的能量产出。装置运行于次临界状态和相对高的中子通量( $\sim 10^{16}\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )以确保增值过程的稳定持续和设备无临界危险。其废料中长寿命的锕系元素很少,大大简化了核废料的处置难题,而且不产生武器级的核燃料,避免了核扩散的担忧。这种用加速器加速的高能质子与重靶核发生散裂反应产生的中子作为外中子源来驱动次临界反应堆的系统,国际上称为 ADS。但该文献所提供的 ADS 系统仅是一种新概念,在技术和工艺上有较大难度,因为按目前的加速器技术,要建一台能量为  $1 \sim 1.6\text{GeV}$ ,平均流强达  $150\text{mA}$  的质子加速器不是一件容易的事。中子通量为  $10^{16}\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  数量级的反应堆工艺技术上也是一个新课题。另外,ADS 如果用热中子次临界反应堆可产生核能,设计好可烧掉全部的 LLFP,但不能烧掉 MA;ADS 如果用快中子次临界反应堆可产生核能,设计好可烧掉全部的 MA,但不能完全烧掉 LLFP,因为 MA 的嬗变是靠快中子而 LLFP 的嬗变是靠超热中子。总之,两种堆型(快中子反应堆和热中子反应堆)各有优缺点。

[0005] 另外,在中国专利 03152870.8 中,中国科学院等离子体物理研究所公开了基于可裂变材料中子增殖的次临界核废料处理与核燃料生产的方法,该方法是通过聚变反应或者高能质子与靶材料发生的散裂反应产生外源中子,这些外源中子进入长寿命放射性锕系元素处理区,与锕系元素处理区中锕系元素发生裂变反应,同时与其中的可裂变钚 239 或铀 233 发生裂变反应生产大量的新中子;这些中子部分进入可裂变燃料增殖区中,与其中贫铀或者天然铀或者天然钍发生中子俘获反应,生成可裂变的钚 239 或铀 233,以供给锕系元

素处理区的再循环使用,或者输出作其它用途;从可裂变燃料增殖区泄漏的中子进入裂变产物处理区,与其中混合在中子慢化剂中的放射性裂变产物发生俘获反应,使长寿命高毒性的裂变产物转变成稳定无毒性或者短寿命低毒性的裂变产物,各个区中产生的热量采用冷却剂冷却,各区之间采用结构材料分隔,整个系统采用屏蔽材料屏蔽。该技术方案相对于鲁比亚等人提出的概念而言更加细化,但依旧还只是一个概念,并存在如下问题:1) 在外中子源产生区使用 D-T 聚变反应堆或者由高能质子散裂反应提供外中子源,不仅成本高,而且不易控制,难以实现。2) 裂变产物处理区利用可裂变燃料增殖区慢化后的低能中子与裂变产物发生俘获反应来处理长寿命的裂变产物废料。实际上,裂变产物处理区可利用的低能中子已很少,能否达到预期的目的很难确定。另外,裂变产物处理区只能用于处理长寿命的裂变产物废料,不能产能,浪费了燃料。

#### [0006] 技术方案

[0007] 本发明就是根据鲁比亚 (C. Rubbia)、中国科学院等离子体物理研究所等人所提供的洁净核能的概念,提供一种既能同时燃烧掉 MA、LLFP,又能产能的快-热耦合次临界反应堆。

[0008] 一种快-热耦合次临界反应堆,从中心向外依次为靶区、快中子能谱区、热中子能谱区、反射层区、屏蔽层区、不锈钢外壳。关键在于靶区是使用加速器加速的质子与主靶核发生散裂反应产生的中子作为中子源;快中子能谱区所使用的可裂变材料是天然铀或低富集度铀;热中子能谱区使用的是低富集度铀,用以产能。同时,在快中子能谱区与热中子能谱区之间自然形成超热中子区。

[0009] 本发明所提供的快-热耦合次临界反应堆,其内部为快中子次临界反应堆,其外部是热中子次临界反应堆,弥补了两种堆型各自的缺点,用内部的快中子次临界反应堆来嬗变 MA,用内部的快中子次临界反应堆和用外部的热中子次临界反应堆耦合形成的超热中子区来嬗变 LLFP。另外内部的快中子次临界反应堆还可对加速器产生的中子源起到放大作用,这样一来,外部的热中子次临界反应堆就可得到比纯外部的中子源要强的中子源来驱动,使热中子次临界反应堆发出更多的核电或减轻对加速器的要求。快次临界反应堆作为外中子源的放大器,可放大倍数为  $A = \frac{sl}{1-k}$ ,其中 s 为外中子源强度, l 为中子在反应堆中的寿命, k 为快次临界反应堆的有效增殖因子,用天然铀为快区的 k 约为 0.5,则可放大外源两倍,如果功率一定,则可对加速器的速流降低要求 1/2,可大大降低对加速器的要求。如果利用低富集度铀代替天然铀,则可提高次临界有效增殖因子  $k_s$ ,使外中子源的放大倍数更大。

[0010] 总之,本发明所提供的快-热耦合次临界反应堆弥补了在 ADS 中的快中子次临界反应堆和热中子次临界反应堆两种堆型在嬗变 MA 和 LLFP 各自的缺点并兼备发电功能,发电量的 1/3 可用于加速器的用电。同时,实现了 ADS 使用低富集度铀的要求。

#### 附图说明

[0011] 图 1 为装置横向剖面图;

[0012] 图 2 为装置纵向剖面图。

## 实施例

[0013] 下面将结合实施例对本发明的技术方案作进一步解释。

[0014] 如图 1 所示,一种快-热耦合次临界反应堆,从中心向外依次为靶区 1、快中子能谱区 2、热中子能谱区 4、反射层区 5、屏蔽层区 6、不锈钢外壳 7。中间设置铅缓存区 8。快中子能谱区 2 与热中子能谱区 4 之间耦合形成超热中子能谱区 3。

[0015] 如图 2 所示,各区的结构如下。

[0016] 靶区 1:在快中子能谱区 2 的中心取出 7 根元件形成一个直径为 40 ~ 60mm,最佳设计为 50mm 的空腔作为靶区,中子源铅靶管长为 500mm。若高能强流质子加速器产生的能量为 1GeV,平均流强 ~ 1mA 的高能质子束轰击铅靶将产生  $1.2 \sim 1.9 \times 10^9$  n/s 的中子源。

[0017] 快中子能谱区 2:所有元件装在一个六面体的铝块内,铝块直径为 195 ~ 220mm,最佳设计为 200mm。栅距为 25mm,平均中子能量为 700KeV。天然铀或低富集度铀燃料元件外径为 22mm,芯体直径为 20mm,芯体长 1000mm,总长 1035mm,密度 18.6g/cm<sup>3</sup>。包壳材料为铝。燃料元件插在铝件中,元件根数为 264 根。

[0018] 热中子能谱区 4:厚度为 150mm,燃料元件插在聚乙烯慢化剂内,按照三角形排列。燃料元件使用富集度为 3 ~ 5% 的 UO<sub>2</sub>,元件外径为 8mm,芯体直径为 6.55mm,芯体长 700mm,元件密度 10.4465g/cm<sup>3</sup>。燃料元件包壳厚 0.65mm,材料为 Zr-2 合金。每根元件芯重 753g,间距为 12mm。元件根数根据需要而定,使  $K_{\text{eff}}$  在 0.90 ~ 0.98 之间。

[0019] 反射层区 5:材料为聚乙烯,密度为 0.937g/cm<sup>3</sup>,径向厚度 > 15 ~ 25cm,轴向厚度 > 15 ~ 25cm。

[0020] 屏蔽层区 6:含硼聚乙烯,厚度 > 25cm。

[0021] 不锈钢外壳 7:厚 10cm。

[0022] 同时,在快中子能谱区 2 与热中子能谱区 4 之间自然形成超热中子区 3,嬗变 LLFP。

[0023] 本发明所提供的技术方案,在快中子能谱区 2 除燃料元件外,用铝模拟快区钠冷材料,在热中子能谱区 4 除燃料元件外,用聚乙烯模拟慢化剂材料—水,结构简单、实用。不仅实现了快-热耦合,嬗变 MA、LLFP,还可产能,实现了真正意义上的加速器驱动洁净核能系统(即 ADS)的概念。

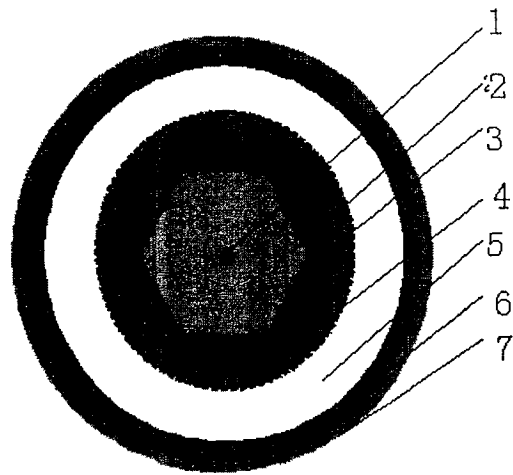


图 1

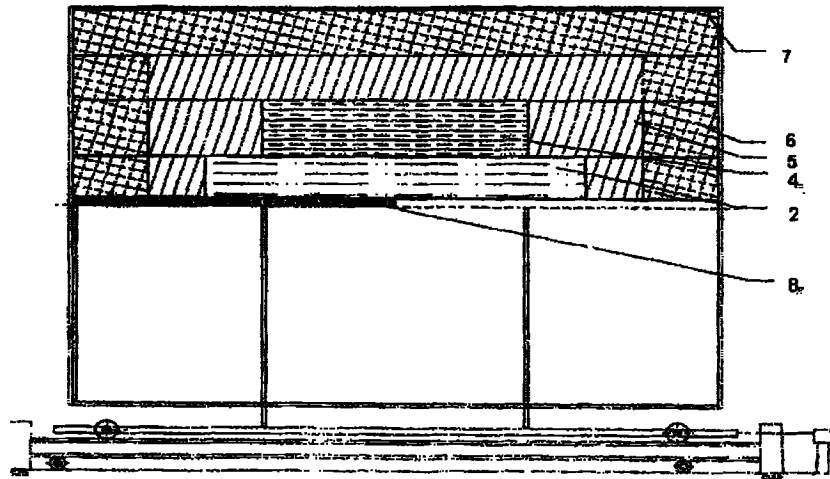


图 2