



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105027223 B

(45)授权公告日 2018.07.17

(21)申请号 201380053031.7
 (22)申请日 2013.09.12
 (65)同一申请的已公布的文献号
 申请公布号 CN 105027223 A
 (43)申请公布日 2015.11.04
 (30)优先权数据
 61/699,864 2012.09.12 US
 (85)PCT国际申请进入国家阶段日
 2015.04.10
 (86)PCT国际申请的申请数据
 PCT/US2013/059445 2013.09.12
 (87)PCT国际申请的公布数据
 W02014/043335 EN 2014.03.20
 (73)专利权人 标识技术有限责任公司
 地址 美国弗吉尼亚州
 (72)发明人 克劳迪奥·菲利波内
 弗朗西斯科·文内里
 (74)专利代理机构 中原信达知识产权代理有限
 责任公司 11219
 代理人 沈同全 车文
 (51)Int.Cl.
 G21C 1/32(2006.01)
 G21C 7/28(2006.01)

G21C 15/04(2006.01)
 G21C 9/033(2006.01)
 G21C 3/30(2006.01)
 G21C 7/08(2006.01)
 G21C 13/02(2006.01)
 G21C 19/00(2006.01)
 G21D 5/02(2006.01)
 F28F 1/42(2006.01)
 F28D 7/10(2006.01)
 F28D 7/00(2006.01)
 F22B 1/12(2006.01)
 F22B 1/06(2006.01)
 F22B 37/00(2006.01)

(56)对比文件

JP 特开2001-188093 A,2001.07.10,
 JP 特开2011-89973 A,2011.05.06,
 US 2011/0206173 A1,2011.08.25,
 US 2011/0268241 A1,2011.11.03,
 KR 10-1089843 B1,2011.12.05,
 CN 202274790 U,2012.06.13,
 CN 1526143 A,2004.09.01,
 CN 1568526 A,2005.01.19,
 CN 1756675 A,2006.04.05,

审查员 华艳

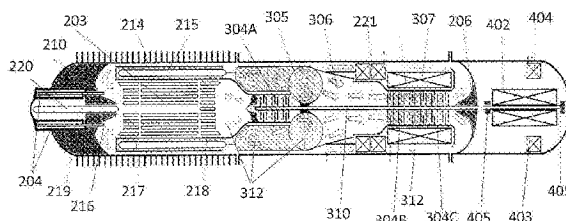
权利要求书5页 说明书13页 附图21页

(54)发明名称
 模块化的能够运输的核发电机

(57)摘要

本发明总体上涉及利用模块化、紧凑的、可运输的、硬化核发电机生成电力和过程热,该核发电机是可快速部署的且可快速取回的,包括被完全集成在容纳核芯的单个压力容器内的动力转换和发电装备。所得到的可运输的核发电机不需要高成本的场所准备,且可以完全可操作地运输。可运输的核发电机需要相对于其它核发电机明显减少的紧急撤离区域,因为其可以构造成利用防熔化传导式陶瓷芯来操作,该防熔化传导式

陶瓷芯允许甚至在完全缺失冷却剂情况下进行衰变热去除。



CN 105027223 B

1. 一种能够运输的核发电机,包括:

反应堆动力模块,所述反应堆动力模块容纳核芯、控制系统和冷却剂流动反向结构,其中所述反应堆动力模块燃烧核燃料以在冷却剂中产生热能,所述热能被提供给集成的动力转换模块和发电模块;

动力转换模块,所述动力转换模块包括涡轮机械装备和热交换器,其中所述动力转换模块从所述反应堆动力模块接收来自所述冷却剂的所述热能并产生被提供给发电模块的机械能;以及

发电模块,所述发电模块包括快速电动发电机、电子控制器和不间断电源,其中所述发电模块接收来自所述动力转换模块的机械能并发电,

其中所述反应堆动力模块、所述动力转换模块和所述发电模块被构造成热-液压地连接到彼此以形成作为单个容器的能够操作的核反应堆,

其中所述冷却剂流动反向结构被构造成提供低流体动态阻力,且提供芯结构支撑,同时借助于传导热传递机构来确保来自所述芯的衰变热能传递到所述能够运输的核发电机的外部翅片。

2. 根据权利要求1所述的能够运输的核发电机,其中所述反应堆动力模块、所述动力转换模块和所述发电模块能够被分别制造和运输并且被进一步构造成被组装成以水平构造或竖直构造操作。

3. 根据权利要求1所述的能够运输的核发电机,其中所述反应堆动力模块、所述动力转换模块和所述发电模块被进一步构造成经由越过热传递表面的自然冷却剂循环而被动地冷却。

4. 根据权利要求1所述的能够运输的核发电机,其中所述反应堆动力模块、所述动力转换模块和所述发电模块被进一步构造成在不需要外部管道或装备的情况下作为独立的单元操作。

5. 根据权利要求1所述的能够运输的核发电机,其中所述反应堆动力模块包括防熔化的导热陶瓷核芯。

6. 根据权利要求1所述的能够运输的核发电机,进一步包括冷却剂路径,所述冷却剂路径由具有低流体动态阻力的内部翅片限定,所述内部翅片提供芯结构支撑,同时确保衰变热能通过传导热传递机构从所述芯传递到所述外部翅片,其中所述冷却剂路径被构造成即使在完全缺失冷却剂时也将衰变热能安全地和被动地传递到包围所述能够运输的核发电机的环境。

7. 根据权利要求1所述的能够运输的核发电机,其中所述反应堆动力模块进一步包括以下反应控制系统中的至少一个:

(1) 在中子反射器中的控制棒或旋转控制滚筒,包含被构造成为了安全以吸收模式被动地接合的中子吸收和反射材料;

(2) 芯内控制棒的阵列;

(3) 紧急关停系统,所述紧急关停系统通过被动系统将中子毒物注射到所述芯中。

8. 根据权利要求1所述的能够运输的核发电机,进一步包括作为用于所述动力转换模块的冷却剂的惰性气体,其中所述冷却剂能够是CO₂、氦气、氩气或另外的其它惰性气体。

9. 根据权利要求1所述的能够运输的核发电机,其中所述反应堆动力模块、所述动力转

换模块和所述发电模块被进一步构造成执行再生布雷顿循环以发电。

10. 根据权利要求1所述的能够运输的核发电机,进一步包括:

初级环路,所述初级环路被完全封闭在所述反应堆动力模块中;

在所述初级环路中循环的水,所述在初级环路中循环的水作为冷却剂和减速剂;

一个或多个集成的分离热交换器,所述分离热交换器被构造成提供在所述反应堆动力模块中的所述初级环路和所述动力转换模块中的次级环路之间的热联接;

在所述次级环路中循环的水,所述在次级环路中循环的水接收来自所述初级环路的热能以产生过热蒸汽,

其中所述次级环路中的水将热能以过热蒸汽的形式传递到所述动力转换模块中的集成的涡轮机械以根据兰金动力循环发电,并且

其中在所述涡轮机械中膨胀之后,蒸汽被排放到集成的冷凝器,所述冷凝器将热能被动地传递到所述动力转换模块的内部和外部延伸的冷却翅片以使所述蒸汽冷凝。

11. 根据权利要求10所述的能够运输的核发电机,进一步包括一个或多个泵,所述泵再加压冷凝的蒸汽并将所产生的过冷水在所述集成的分离热交换器的次级侧的入口处泵送到所述次级环路中。

12. 根据权利要求1所述的能够运输的核发电机,进一步包括:

初级环路,所述初级环路被完全封闭在所述反应堆动力模块中;

液态金属,所述液态金属作为通过再循环泵在所述初级环路中主动地循环的冷却剂;

一个或多个集成的分离热交换器,所述分离热交换器被构造成提供在所述反应堆动力模块中的所述初级环路和所述动力转换模块中的次级环路之间的热联接;

气体或水,所述气体或水作为所述次级环路中的工作流体,

其中当气体用作所述工作流体时,所述涡轮机械被构造成满足再生布雷顿动力循环的需求,并且

其中当水用作所述工作流体时,所述涡轮机械被构造成满足兰金动力循环的需求。

13. 根据权利要求1所述的能够运输的核发电机,进一步包括:

形成所述动力转换模块中的所述涡轮机械的旋转部件;

形成所述发电模块的电动发电机的旋转部件;

旋转轴,所述旋转轴以直接机械联接的形式连接形成所述动力转换模块中的所述涡轮机械的旋转部件和形成所述发电模块的电动发电机的旋转部件,使得形成所述涡轮机械的旋转部件和形成电动发电机的旋转部件以共同的速度旋转,

其中所述旋转轴的转速通过所述动力转换模块的热-液压装置、加载条件和调节所述电动发电机的电子控制系统的设置来确定,并且

其中发电机电力的频率能够通过集成的电子调节电路来控制。

14. 根据权利要求13所述的能够运输的核发电机,其中:

所述电动发电机在所述能够运输的核发电机的操作期间发电,

所述电动发电机能够用作电动机以在启动期间和关停之后驱动所述动力转换模块的涡轮机械,并且

能够在启动期间通过不间断电源或外部电源来向所述电动发电机提供启动动力。

15. 根据权利要求1所述的能够运输的核发电机,其中所述反应堆动力模块被进一步构

造成使得能够通过去除包含新鲜的或用过的核燃料的反应堆动力模块并用具有新鲜的核燃料的新反应堆动力模块更换所述包含新鲜的或用过的核燃料的反应堆动力模块来执行补充燃料操作。

16. 根据权利要求1所述的能够运输的核发电机,进一步包括如下热交换器,所述热交换器用于产生低等级过程热和/或高等级过程热以分配到专用于脱盐、生物燃料加工、区域供热或其它工业应用的装备。

17. 一种发电的方法,包括:

提供能够运输的核发电机,所述能够运输的核发电机包括反应堆动力模块、动力转换模块和发电模块,所述反应堆动力模块、所述动力转换模块和所述发电模块被构造成热-液压地联接到彼此以形成被完全容纳在单个容器中的能够操作的核反应堆,所述反应堆动力模块容纳核芯、控制系统和冷却剂流动反向结构,其中所述冷却剂流动反向结构被构造成提供低流体动态阻力,且提供芯结构支撑,同时借助于传导热传递机构来确保来自所述芯的衰变热能传递到所述能够运输的核发电机的外部翅片;

以下列模式中的一种模式操作所述能够运输的核发电机:

(1) 利用惰性气体作为工作流体的情况下,根据再生布雷顿动力循环来发电;

(2) 当利用水作为工作流体时,根据兰金动力循环来发电。

18. 根据权利要求17所述的方法,进一步包括:以水平构造或竖直构造操作所述能够运输的核发电机。

19. 根据权利要求17所述的方法,进一步包括:利用以下构件来操作所述能够运输的核发电机:

包括所述核芯的所述反应堆动力模块;

集成的热交换器,所述热交换器由被构造成提供被动冷却的内部翅片和外部翅片形成;以及

紧急关停系统,如果所述核发电机的除了所述紧急关停系统之外的其它反应控制系统失效则所述紧急关停系统通过被动系统将中子毒物注入到所述芯中。

20. 一种对能够运输的核发电机补充燃料的方法,所述能够运输的核发电机包括反应堆动力模块、动力转换模块和发电模块,所述反应堆动力模块、所述动力转换模块和所述发电模块被构造成热-液压地联接到彼此以形成能够操作的核反应堆,所述反应堆动力模块容纳核芯、控制系统和冷却剂流动反向结构,其中所述冷却剂流动反向结构被构造成提供低流体动态阻力,且提供芯结构支撑,同时借助于传导热传递机构来确保来自所述芯的衰变热能传递到所述能够运输的核发电机的外部翅片,

所述方法包括:

去除具有新鲜或用过的核燃料的第一反应堆动力模块;以及

利用具有新鲜核燃料的第二反应堆动力模块更换所述第一反应堆动力模块。

21. 根据权利要求5所述的能够运输的核发电机,其中所述防熔化的导热陶瓷核芯进一步包括:

单块的燃料元件,所述单块的燃料元件包括被密封在SiC球粒中的三结构各向同性裂变燃料。

22. 根据权利要求21所述的能够运输的核发电机,其中所述SiC球粒是利用纳米渗透和

瞬变共晶相烧结过程产生的结构。

23. 根据权利要求21所述的能够运输的核发电机,其中所述单块的燃料元件包括被密封到SiC元件或SiC复合元件中的三结构各向同性裂变燃料SiC球粒。

24. 根据权利要求21所述的能够运输的核发电机,其中所述SiC球粒进一步包括包围加燃料区域的未加燃料SiC的层。

25. 根据权利要求21所述的能够运输的核发电机,其中所述SiC球粒进一步包括铀、钚、钍或其它裂变同位素的氧化物、碳化物、碳氧化物或氮化物。

26. 根据权利要求21所述的能够运输的核发电机,其中所述SiC球粒进一步包括被并入所述SiC球粒中的可燃的有毒稀土氧化物,所述有毒稀土氧化物包括氧化钬或氧化钷。

27. 根据权利要求21所述的能够运输的核发电机,其中所述防熔化的导热陶瓷核芯进一步包括非燃料涂覆颗粒,所述非燃料涂覆颗粒包括可燃的毒物。

28. 根据权利要求21所述的能够运输的核发电机,其中所述防熔化的导热陶瓷核芯进一步包括燃料元件,所述燃料元件包括具有SiC纤维的单向纤维增强的纳米渗透和瞬变共晶相烧结SiC的复合结构。

29. 根据权利要求21所述的能够运输的核发电机,其中所述SiC球粒进一步包括高密度无孔SiC涂层。

30. 根据权利要求21所述的能够运输的核发电机,其中:

所述单块的燃料元件包括矩形块、六边形块或四分之一圆板,并且

其中所述单块的燃料元件包括为冷却剂提供流动路径的孔。

31. 根据权利要求30所述的能够运输的核发电机,进一步包括:

中子反射器元件,所述中子反射器元件包括碳或SiC,

其中所述中子反射器元件被几何构造成对应于所述单块的燃料元件的几何构造。

32. 根据权利要求30所述的能够运输的核发电机,其中所述单块的燃料元件紧密地隔开以便消除在所述单块的燃料元件之间的间隙,从而提高传导式陶瓷芯的导热性且提高芯被动热传递性能。

33. 根据权利要求21所述的能够运输的核发电机,其中所述防熔化的导热陶瓷核芯进一步包括:

压力板,所述压力板被设置在所述芯的入口和出口处,

其中所述压力板包括为冷却剂提供流动路径的匹配的冷却剂孔,并且

其中所述压力板被构造成提供将所述芯保持在压缩下的压缩力。

34. 根据权利要求21所述的能够运输的核发电机,其中所述防熔化的导热陶瓷核芯进一步包括:

燃料棒,所述燃料棒包含以氧化物、氮化物或金属的形式的核裂变材料,具有金属或陶瓷涂覆层且成束布置。

35. 根据权利要求34所述的能够运输的核发电机,其中所述束被几何布置为以便具有相对于冷却剂的有利的热传输性能。

36. 根据权利要求21所述的能够运输的核发电机,其中所述防熔化的导热陶瓷核芯进一步包括以球形砾形式的松散燃料元件。

37. 根据权利要求21所述的能够运输的核发电机,其中所述防熔化的导热陶瓷核芯被

构造成即使在不存在冷却剂时也允许被动冷却。

38. 根据权利要求21所述的能够运输的核发电机,其中所述防熔化的导热陶瓷核芯进一步包括由SiC-Gd²⁰³和Er²⁰³制成的控制棒和控制棒套筒。

39. 根据权利要求21所述的能够运输的核发电机,其中所述防熔化的导热陶瓷核芯进一步包括由纤维增强的复合材料制成的控制棒通道。

40. 根据权利要求21所述的能够运输的核发电机,其中所述单块的燃料元件包括局部切口以允许在所述能够运输的核发电机受到严重动力应力或冲击的情况下所述单块的燃料元件的受控碎裂而没有向所述SiC球粒中传播的裂纹。

模块化的能够运输的核发电机

技术领域

[0001] 本发明总体上涉及利用模块化、紧凑的、能够运输的、硬化核发电机生成电力和过程热,该核发电机是可快速部署的且可快速取回的,该核发电机包括完全集成在容纳核芯的单个压力容器内的动力转换和发电装备。

背景技术

[0002] 核发电机自然地涉及在关停之后产生衰变热能的核芯。通常,在很多因素之中,在关停之后产生的衰变热能的量与以核芯为特征的燃料动力生成历史和动力密度成比例。为了避免核燃料在芯的任何位置中的过热,必须利用冗余的热传递机构将衰变热能从芯传递走,该热传递机构通常由容器外部的系统和设计成容纳芯的结构来支撑。这些冗余的冷却系统包括复杂管道网络,该复杂管道网络将芯热-液压地联接到热交换器,该热交换器位于容纳芯的容器外部并专用于将来自芯的热能传递到环境(即,最终热阱)。穿过这些热交换器的冷却剂可利用电驱动的再循环器(即,泵、鼓风机)主动地循环,并且利用由专用于给穿过相对复杂的管道网络的冷却剂定路线或重定路线的阀调节的多个热交换器来表示冗余度。可替代地,借助于重力驱动的自然循环机构,基于当加热或冷却时冷却剂密度改变的事实,冷却剂可以被动地循环穿过类似地复杂的管道网络,该复杂的管道网络将芯热-液压地联接到额外的芯热交换器。现代核反应堆依赖于可以被动地、主动地或被动地和主动地两者的组合地操作的冗余芯衰变热去除系统。

[0003] 为了去除衰变热能,采用“主动”安全特征的反应堆设计广泛地依赖于电力来在停止之后使芯维持在安全温度。为了确保在所有时间的安全操作和衰变热能去除,这些设计需要通过至少连接到两个场外电网提供的电力和由专用的冗余现场紧急柴油发电机(EDG)提供的紧急电力。

[0004] 另一方面,某些类型的被动安全特征仅依赖于通常储存在相对于芯定位在较高高度的罐或水结构中的水的重力和大存量。需要在芯和冷却剂储存结构之间的高度差异以使冷却剂经历自然循环虹吸并有效地从芯去除衰变热能。对于基于储存的冷却剂的被动安全特征,足够地提供长期衰变热去除的能力高度地依赖于冷却剂存量和在各种环境温度和湿度条件下重力驱动的芯冷却机构的有效性。通常,随着环境温度增加,被动地产生对流芯冷却的能力逐渐受损。结果是,基于储存的冷却剂存量的被动衰变热去除对于在温和气候中操作的核发电机是最适合的。

[0005] 因为被动和主动安全系统通常在容纳芯的容器外部形成,所以结果是冗余管道、阀、热交换器以及泵/鼓风机和辅助动力和控制电缆网络(即,提供用于主动系统的机动-电力和控制所需要的)的复杂系统。专用于从芯去除热能的管道和热-液压装置(即,热交换器)和电动装备(即,泵)的复杂系统通常定义为核电厂配套设施。大部分核发电机(大的和小的)的核电厂配套设施基本上引起大的设施占用空间,对可以部署核发电机的场所强加限制,以及明显地增加以核发电机设施为特征的资本成本。

[0006] 商业操作的反应堆的核芯通常由水冷却且装载有核燃料元件,该核燃料元件涂覆

有在存在高温水/蒸汽的情况下氧化的材料。因为芯可例如由于冷却剂缺失、或主动或被动系统衰变热去除系统的失效、导致生成氢气的在涂覆材料和水/蒸汽之间的化学反应,而经历过热。氢气随后积聚且最终自燃,从而造成严重的安全挑战。结果是,核电厂配备有冗余氢气管理装备,例如以执行受控的点火并防止大量氢气积聚。然而,该另外的安全特征进一步增加复杂性、增加操作成本并且可能不是可管理的,如多次核事故(例如在日本的 Fukushima Daiichi 核电站发生的事故)证明的。用于确保主动、被动或主动和被动的组合安全系统的且执行其安全功能的冗余度的水平通常是基于假定设计基础事故情况的概率风险判定的结果。并非所有可能的事故情况被考虑,因为超出设计基础的事故情况的发生的可能性是非常低的。不幸的是,尽管冗余度和对于放射性从芯到环境的逃逸的多个工程设计屏障,但是甚至对于符合安全操作的大部分现代化规章指导的核发电站(即, Fukushima Daiichi 发电站),已经发生了芯崩溃、氢气爆炸、密封泄漏和大的放射性散落物,因而证明灾难性事故(如由超出设计基础的事故情况触发的那些事故)具有不能接受的安全和经济冲击,即使它们发生的可能性非常低。超出设计基础的事故情况可能由极端的地震、海啸、气候有关的、恐怖分子/敌对事件代表。

[0007] 小模块化反应堆设计当与大的现代反应堆设计相比以较小的、模块化且更容易可运输的部件为特征。然而,在没有首先在部署场所处被热-液压(和电)地联接的情况下,这些部件或者模块不能操作。这些模块化部件的联接通过与构造在包括芯的容器外部的复杂管道网络、阀、被动和/或主动芯冷却系统(核电厂配套设施)互连而发生。结果是,不管小模块化反应堆的尺寸如何,基于小的模块化反应堆设计的电站的部署和安装需要几个月进行场所准备、核电厂配套设施的安装和所有辅助设备的联接。实际上,一旦小模块化反应堆系统被联接,基于整体小的反应堆的电站占用空间和紧急撤离区域仍保留相当大的,甚至对于产生适度的或非常低的额定功率的小模块化反应堆设计来说也是如此。一旦组装,小的模块化反应堆设计不能被运输或取回且因此不能够容易地部署,在没有经历模块化部件的拆卸和用于拆分核电厂配套设施的几个月的情况下,它们也不能被从场所取回,对于多个分离的和可能放射性的小模块化反应堆部件的去除来说,通常具有很长的关停过程。

发明内容

[0008] 鉴于前述内容,继续需要一种真实可运输的、完全可操作的、紧凑的模块化核发电机系统和用于安全地生产电能的方法,具有提供过程热的选择,能够在任何气候条件下、在具有安全地应付极端环境应激事件(包括严重的地震和洪水事件)的能力的任何场所并且以固有地减小假定的设计基础的后果以及超出设计基础的事故情况的方式安全地操作。

[0009] 鉴于上述内容,公开了一种可运输的硬化紧凑的模块化核发电机。公开的发电机由容纳在容器中的核芯形成,该容器包括集成的动力转换和动力发生装备,不需要额外容器的核电厂配套设施,并且包括如下特征,即,在所有事故情况(包括超出设计基础的事故情况和设计基础攻击情况)下被动地确保芯冷却。

[0010] 根据现场特定电需求(和过程热需求),可运输的、硬化的、紧凑的模块化核发电机,为简化在后面称为可运输的核发电机,可以构造成利用各种芯构造、材料、冷却剂和减速剂操作,以便利用被构造成利用各种热动态动力循环(即,布雷顿、兰金)操作的集成的动力转换装备和被构造成调节电压和频率以匹配现场特定电需求的动力发生装备来将由芯

产生的热能转换成电和过程热。

[0011] 在某些构造中,当利用被构造成经由气体布雷顿循环转换热能的动力转换模块操作时,可运输的核发电机可以提供从10MWt至40MWt(兆瓦热)的额定功率,具有约45%的效率。在该示范性构造下,单个可运输的核发电机代表能够产生4.5MWe至18MWe(兆瓦电)的动力发生单元。因为可运输的核发电机可以利用被动冷却经由越过其热传递表面的自然空气循环来操作,所以其能够与多个可运输的核发电机单元群集以便匹配现场特定的电和/或过程热需求。因为可运输的核发电机是可容易运输的和可容易取回的,所以其适合于各种应用,例如,其可以用于在偏远区域或未附接电网的地方的电力生成和过程热应用。另外的应用可以包括用于各种基于陆地或人工岛工业过程(采矿、油气提取、军事安装)、船舶推进和作为在关键大功率电网相互连接处的快速电网后备系统的动力生成。

[0012] 在一个示范性构造中,可运输的核发电机由三个主要模块形成:(1)可交换的反应堆动力模块,其容纳芯、控制系统和冷却剂流动反向结构,(2)动力转换模块,其包括涡轮机械装备和热交换器,以及(3)发电模块,其包括快速电动发电机、电子控制器和在启动操作期间使用的不间断电源(即,电池)。一旦通过密封凸缘热-液压联接,三个模块形成被动地与周围环境交换热能的单个硬化容器。形成动力转换模块的涡轮机械系统的旋转装备机械地联接到单个轴,该单个轴也机械地联接到被集成在发电模块的电动发电机中的旋转部件的轴,因此所有旋转装备匹配以利用磁轴承在相同速度下无摩擦地旋转。每一个模块可以独立地运输,或者所有三个完全地组装成允许可运输的核发电机容易操作的单个容器。可运输的核发电机的完全组装的或分离的模块运输科根据运输标准(即,利用标准运输装备)执行。当完全组装地运输时,可运输的核发电机代表可快速部署的和可快速取回的完全可操作的电力发电机。

[0013] 在一个示范性构造中,可运输的核发电机模块可以利用密封和锁定凸缘联接以便形成水平操作的单个硬化压力容器。在具有重新定向的外部 and 内部的可运输的核发电机热传递翅片的另一构造中,可运输的核发电机可以竖直地操作。所有三个模块包括由内部和外部翅片形成的高度集成的热交换器,该内部和外部翅片构造成对内部部件提供支撑同时通过形成多个内部和外部结构肋充分地增强整个结构。与集成的涡轮机械和电动发电机装备组合的集成的热交换器允许在不需要外部核电厂配套设施的情况下操作,从而明显地减少了总体占用空间、易损性和冷却剂损失情况的可能性。可运输的核发电机可以采用多种类型的芯,包括防熔化的传导式陶瓷芯。可运输的核发电机冷却剂流动路径构造成确保热能高效转换成电能。这些冷却剂路径通过定位具有低流体动态阻力的内部翅片来获得,该内部翅片提供芯结构支撑,同时确保通过传导热传递机构将来自芯的衰变热能传递到可运输的核发电机外部翅片。在该构造中,甚至在完全缺失冷却剂时,可运输的核发电机芯可以安全地和被动地向可运输的核发电机周围的环境传递衰变热能。现在更详细地描述形成单个容器可运输的核发电机的三个模块。

[0014] 在一个构造中,反应堆动力模块集成以富含裂变材料(即,铀或钚)加燃料的反应堆芯、中子反射器、多个反应控制系统、用于使冷却剂有效地通过反应堆动力模块循环的流动通道和将反应堆动力模块联接到动力转换模块的热-液压系统。反应堆动力模块容器可以优选地由C-C复合材料或合适的金属材料制成。芯可以是具有满足额定功率需求的材料组分和热传递特性的任何合适的芯。

[0015] 优选的芯构造包括具有嵌入到碳化硅 (SiC) 中以形成燃料元件的陶瓷微封装燃料的传导式陶瓷芯。

[0016] 在一个示范性构造中,可运输的核发电机配备有包括单块的三结构各向同性加燃料 (MTF) 元件的“防熔化”芯。在该构造中,芯由燃料元件制成,该燃料元件利用在被密封到 SiC 或 SiC 复合物元件中的 SiC 球粒中的 TRISO 燃料 (在后面称为全陶瓷微封装 (FCM) 燃料) 或者利用被分布在 MTF 元件中的三结构各向同性 (TRISO) 颗粒来制造。可以使用在球粒和/或块中产生具有足够的结构强度和耐辐射性的 SiC 的任何烧结的、紧凑的或其它 SiC 制造过程。在一个优选构造中,可以使用纳米渗透和短暂共晶相 (NITE) SiC 烧结过程。球粒可以具有未加燃料的 SiC 层以包围加燃料区域。

[0017] 在 TRISO 颗粒中使用的裂变燃料可以是铀、钚、钍或其它裂变同位素的氧化物、碳化物、碳氧化物或氮化物。可燃烧的有毒稀土氧化物比如氧化钷或氧化钆可以并入 SiC 陶瓷压实物中。可燃烧的毒物也可能被包含在与形成球粒的燃料颗粒混合的特别涂覆的颗粒中。TRISO 颗粒的高密度无孔 SiC 涂层、FCM 燃料球粒的致密 SiC 基质和燃料元件中的 SiC 以同时为耐辐射、热传导的和与高温操作兼容的形式对裂变产物迁移和分散提供多个屏障。

[0018] 在另一示例中,可运输的核发电机可以装载有导热陶瓷芯,其中传导式陶瓷芯包括 MTF 元件或块和类似地构造的反射器元件或块 (例如,由碳或 SiC 复合材料制成)。在该构造中,MTF 设计成和定尺寸成避免在操作期间过量的热应力。一个示例是在图 24 和图 24A 中表示的四分之一圆的 10cm 厚板。其它示例是六边形或矩形燃料块。在所有构造中,燃料和反射器块或元件包含使冷却剂流动的孔。在所有构造中,具有匹配的冷却剂孔的压力板可以被包括在芯的入口和出口处以保持芯始终处于压缩下。传导式陶瓷芯基质的导热性也通过消除在燃料压实物和块之间的间隙以及减少块之间的间隙来提高,从而降低燃料温度并在所有事故情况下支持可运输的核发电机芯被动热传递能力。

[0019] 芯反应可以通过在反射器中吸收中子并防止它们再进入芯以及通过吸收芯中子来控制。在可运输的核发电机中,芯反应通过操作以下构件来控制: (1) 在反射器中的控制棒或旋转控制滚筒,其包含以被动地接合的方式在安全吸收模式中布置的中子吸收和反射材料; (2) 芯内控制棒的阵列; (3) 紧急关停系统,如果其它系统失效则该紧急关停系统通过被动系统将中子毒物注入芯中。控制滚筒可以以被几何地布置成允许或多或少的中子根据旋转位置而逃逸或反射回到芯中的吸收和反射材料为特征。中子吸收材料可以是基于 SiC 或基于 C 的陶瓷,具有硼或稀土中子捕获材料,同时中子反射器部分可以利用以合适的高温兼容形式的铍或其它材料,具有有利的中子反射性能。这些反应控制特征可以独立地操作,且各自能够完全或部分地控制芯反应以调节动力和实现反应堆关停。

[0020] 可以利用其它反应堆芯构造,比如包含以氧化物、氮化物、金属或其它的形式的核裂变材料的燃料棒,具有金属或陶瓷涂覆层且以对于冷却剂介质合适的束布置。也可以使用合适几何形状的松散的燃料元件,比如球形砾。

[0021] 在一个构造中,可运输的核发电机芯使用惰性气体作为动力转换模块的冷却剂和工作流体。在该构造中,冷却剂可以是 CO₂、氦气或其它优选的惰性气体 (比如,氩气)。在该示例中,可运输的核发电机芯产生热能,同时与各种集成的热交换器组合的涡轮机械有助于执行再生布雷顿循环,实现高动力转换效率。

[0022] 在另一构造中,可运输的核发电机芯使用水作为冷却剂且部分地作为在被完全封

闭在反应堆动力模块中的初级环路中循环的减速剂。初级环路中的压力利用集成的增压器调节。一个或多个集成的分离热交换器提供在反应堆动力模块中的初级环路和动力转换模块中的次级环路之间的热联接。在次级环路中循环的水从分离热交换器(即,蒸汽发生器)的初级环路侧接收热能以便将热动力学状态从过冷液体改变为过热蒸汽。在次级环路中的水不与在初级环路中循环的水混合。在该构造中,可运输的核发电机芯热能以过热蒸汽的形式被传递到动力转换模块中的涡轮机械。在涡轮机械中膨胀之后,蒸汽被排放到集成冷凝器,该集成冷凝器将热能被动地传递到动力转换模块的内部和外部延伸的冷却翅片。随着蒸汽冷凝,其被一组泵再加压且通过在分离热交换器的次级侧的入口处泵送过冷水来重新设置次级环路。

[0023] 在另一构造中,可运输的核发电机初级环路可以包括液态金属,该液态金属利用再循环泵主动地或被动地循环,用于将热能传递到一个或多个分离热交换器的次级侧。在该可运输的核发电机芯构造中,次级侧可以联接到利用涡轮机械的动力转换模块或者利用涡轮机械和冷凝器的动力转换模块,该涡轮机械被设计成满足利用气体作为工作流体的再生布雷顿动力循环的需求,该涡轮机械和冷凝器被设计成满足以水作为工作流体的兰金动力循环需求。

[0024] 独立于动力转换模块构造,利用设计成支持兰金或布雷顿动力循环需求的部件,动力转换模块直接地联接到发电模块,因为形成动力转换模块中的涡轮机械的旋转部件和形成发电模块的电动发电机的旋转部件直接地机械地联接到旋转轴以便以相同速度旋转。轴的转速通过动力转换系统的热-液压、装载条件和调节电动发电机的电子控制系统的设置来确定。发电机动力的频率和其它电参数可以通过集成的电子调节电路来控制。

[0025] 在一个构造中,发电模块中的动力发电机可以被切换成作为电动机操作以在启动期间和在关停之后驱动动力转换模块的涡轮机械。在该构造中,启动动力可以通过一组电池(即,不间断电源)或外部电源(比如,小柴油发电机组)来提供。

[0026] 在大部分构造中,联接被集成在动力转换模块和发电模块中的所有旋转部件的轴可以利用磁轴承联接到对应模块的静止结构。为了确保所有模块的完全分离和独立,动力转换模块和发电模块在联接时利用柔性联接器机械地联接轴。

[0027] 在其它构造中,假如需要发电模块的旋转部件从动力转换模块旋转部件分离,或者假如特定的应用需要在这两个模块的旋转部件之间的不同转速,可以设想离合器。以下的论述强调关键的和一般的可运输核发电机特征。

[0028] 在所有构造中(即,利用气体或液体作为冷却剂和/或工作流体),可运输的核发电机给出高部件水平模块性和集成性以提供可快速地部署的和可快速取回的非常紧凑的可运输的动力生成单元。可运输的核发电机以当联接时形成单个容器的三个预构造的模块为特征。每一个模块可以是大量产生的、容易独立运输的或完全组装的和可操作的。反应堆动力模块可以在再加燃料循环或者假如紧急(即,军事操作)需要例如,经由航空提升(即,C17航空运输或重型提升直升机运输)快速取回芯的末尾进行热交换。

[0029] 形成三个模块的可运输的核发电机部件依赖于现有的技术(来自各种商业应用的涡轮机械和来自快速交流电动发电机技术的具有磁轴承的电动发电机)或在各种国家实验室和国际地开发和测试的成熟技术(例如,FCM燃料)。反应堆动力模块包含、支撑、保护和冷却核芯,动力转换模块包括涡轮机械(用于气体冷却的可运输的核发电机构造的涡轮机和

压缩机装备)、适合于选择的冷却剂和热动力学动力循环(即,再生或部分布雷顿或兰金)的集成的热交换器(即,同流换热器、预冷器和中间冷却器),并且发电模块包含启动器/发电机单元。

[0030] 完全组装的可运输的核发电机可以构造成以最小的场所准备水平地操作或者对于地下安装竖直地操作。在所有构造中,可运输的核发电机允许全反应堆或单独模块的快速部署和启动,以及快速取回。再加燃料可以通过交换包含用过的芯的“使用过的”反应堆动力模块与包含新的芯的新的模块来执行。假如在动力转换模块或发电模块中形成了故障,则它们的更换将通过简单地交换故障模块与新的或工厂修整的模块来执行。

[0031] 根据选择的工作流体,可运输的核发电机不需要复杂的管道网络和装备,其通常形成所有小的模块化反应堆设计的核电厂配套设施。可运输的核发电机完全集成且准备在部署之后立即产生动力。如果可运输的核发电机构造成用于水平操作,则所产生的动力发电机允许在以地震活动、船载和需要关键动力的多种其它应用为特征的场所容易部署。反应堆动力模块、动力转换模块和发电模块可以设计成单独地和独立地固定到标准运输、可操作的和储存平台,具有与民事和军事运输标准相符的很多种运输选择。

[0032] 可运输的核发电机不需要大的水体来用于其被动冷却,并且可以利用局部水或干的、不可蒸发的或简单的环境空气作为其最终热阱。在不正常的情形中,可运输的核发电机将能够仅依赖于通过传导热传递(在完全不存在芯冷却剂时)从芯到带翅片的模块的壁的被动衰变热能去除,以及向可运输的核发电机周围的环境空气的被动对流热传递。当与可运输的核发电机的其余部分分离以再加燃料时,反应堆动力模块能够仅基于辐射和环境空气对流机构进行被动衰变热去除。

[0033] 当可运输的核发电机构造成基于兰金循环转换利用动力转换模块操作时,其提供利用能够用于支持各种过程热应用的高温废热的选择。在该构造中,可运输的核发电机可以配备有如下热交换器,该热交换器用于产生待分配到专用于脱盐、生物燃料加工、区域供热或其它工业应用的装备的低等级过程热和/或高等级过程热。

[0034] 发电模块可以构造成在加热和加压可运输的核发电机初级环路的同时在由集成的电池组(即,由发电模块包括的)代表的不间断电源或者小外部柴油-发电机的支持下开始涡轮机械。完全组装的可运输的核发电机单元代表能够启动、关停、正常操作同时在瞬间和紧急条件期间被动地维持安全燃料温度限度的动力设备。

[0035] 本发明的其它装置、设备、系统、方法、特征和优点将在检查以下附图和详述时对本领域技术人员是明显的或将变得明显。旨在,所有这样的另外系统、方法、特征和优点被包括在本说明书内、在本发明的范围内,且受所附权利要求保护。

附图说明

[0036] 通过参考以下附图可以更好地理解本发明。附图中的部件未必按比例绘制,而是着重于示出本发明的原理。在附图中,遍及不同的视图,附图标记表示相对应的部分。

[0037] 图1是示范性可运输的核发电机框图的顶部透视横截面图,表示了示范性实施方式反应堆动力模块、动力转换模块和发电模块的边界。

[0038] 图2是示范性可运输的核发电机框图的顶部透视横截面图,显示了单个容器,该单个容器包括用于可运输的核发电机的水平或竖直操作的所有装备。

[0039] 图3是图1中显示的示例性实施方式的侧视图,示出以提供用于被动冷却、结构硬化和屏蔽特征的增大的热传递区域的方式形成的外部可运输的核发电机翅片。

[0040] 图4和图5示出图1中显示的可运输的核发电机的示例性实施方式的气体冷却构造的横截面图和功能图。

[0041] 图6是图1中显示的可运输的核发电机的版本的示例性实施方式的内部的详细横截面示意图。

[0042] 图7是图1和图6中显示的可运输的核发电机的反应堆动力模块的示例性实施方式的横截面透视图。

[0043] 图8和图9示出分别作为可运输的核发电机反应堆动力模块的示例的没有顶部芯反射器和具有顶部芯反射器的反应堆动力模块的透视图。

[0044] 图10、图10A和图10B是低背压集成热交换器的示例性实施方式的透视图,该低背压集成热交换器用作由图6中示出的动力转换模块包括的“同流换热器”。

[0045] 图11是图6示出的和图10、图10A和图10B显示的低背压集成热交换器的完全组装的示范性构造的透视图,该低背压集成热交换器提供在离开涡轮机械的工作流体和从压缩机返回的流体之间的分离。

[0046] 图12是图11中示出的完全组装的低背压集成热交换器的示例性实施方式的透视图,示出了由在进入图10中显示的热交换器的入口的流体和从动力转换模块的中间冷却器区段返回的流体之间的分离流动模式引起的热传递,从而执行对热能进行同流换热的功能,否则在涡轮机械的排放处浪费热能,该涡轮机械专用于图1和图6中显示的可运输的核发电机的示例性实施方式的流体的膨胀。

[0047] 图13是专用于远程和液压热反应堆动力模块交换的装置的示例性实施方式的透视图,并且该装置执行在运输或储存的准备期间反应堆动力模块的密封。

[0048] 图14和图15是示出示范性顺序的透视图,采用该顺序将反应堆动力模块从完全组装的可运输的核发电机拆分并执行用于反应堆动力模块(芯)交换的远程液压模块拆分和密封或者执行动力转换模块的一侧上的维修。

[0049] 图16是示出与运输标准相符并配备有引导件的示范性可运输的核发电机平台的透视图,允许在运输和操作期间固定模块并允许在部署场所处无需重型提升起重机的情况下为了快速联接或拆分而滑动模块。

[0050] 图17是示出图16中显示的示范性运输可运输的核发电机平台的透视图,具有增加的屏蔽件和被动冷却结构以执行快速反应堆动力模块热取回(在关停之后短时间)。

[0051] 图18是图1中显示的示范性可运输的核发电机框图的修改版本的顶部横截面图,其中包括用于可运输的核发电机的水平(或竖直)操作的所有装备的单个容器构造成利用由至少一个分离热交换器分离的初级环路和次级环路以水作为兰金动力循环的冷却剂和工作流体来操作。可运输的核发电机的该构造还可以应用于液态金属冷却的反应堆动力模块,该液态金属冷却的反应堆动力模块借助于分离热交换器从动力转换模块分离并允许利用布雷顿或兰金动力循环。

[0052] 图19和20分别是图18中显示的示范性可运输的核发电机框图的顶部视图和功能图。

[0053] 图21是图18中显示的可运输的核发电机的版本的示例性实施方式的内部的详细

横截面示意图。

[0054] 图22是提供被固定在标准运输平台上以用于快速部署和准备在任何部署场所产生动力的示范性完全组装的可运输的核发电机的尺度指示的透视图。

[0055] 图23和图23A是被固定在用于快速“热”反应堆动力模块运输(即,紧急场所提取)的标准运输平台上的可运输的核发电机的示范性反应堆动力模块的透视图,此处显示有附加的被动冷却特征和可膨胀的屏蔽件以确保在热芯去除情况下的放射性屏蔽。

[0056] 图24和图24A是形成能够甚至在完全缺失冷却剂时被动地冷却的防融化芯的优选的传导式陶瓷芯元件和全陶瓷微封装燃料元件的透视图。

具体实施方式

[0057] 本文公开的可运输的核发电机示例性构造在为各种需要电能和过程热的应用提供安全的、可快速运输的和可操作的核发电机系统的背景下进行说明。本领域技术人员将理解,可能地在没有利用具有高的操作成本和污染物排放的柴油发电机的其它替代的位置处,将可运输的核发电机集成模块可以构造成用于具有可靠的和连续的电力需求的任何动力要求的应用。可运输的核发电机可以构造成具有不同的翅片形状以加强从可运输的核发电机内部到环境(最终热阱)的被动热传递机构。

[0058] 图1是示例性可运输的核发电机100的框图的顶部透视截面图,指示了示范性实施方式的反应堆动力模块200、动力转换模型300和发电模块400的边界。图2是示例性可运输的核发电机框图的顶部透视截面图,显示了通过联接三个模块(反应堆动力模块、动力转换模块和发电模块)形成的并且包括所有用于水平或竖直操作的集成装备的单个容器可运输的核发电机100。

[0059] 图3是图1中显示的示例性实施方式的侧视图,示出每一个模块包括在反应堆动力模块上的外部翅片208、在动力转换模块上的外部翅片208、208A和在发电模块上的外部翅片208。翅片208、208A以如下方式形成,即为可运输的核发电机100的被动冷却、结构硬化和屏蔽特征提供增大的热传递面积。

[0060] 参考图1和图2,可运输的核发电机100由三个主要模块形成。可交换的反应堆动力模块200容纳芯203、控制和芯关停系统204、芯控制和反射器系统205、冷却剂流动反向结构206(图7中详细显示)和被动芯热传递结构207。反应堆动力模块通过密封和支撑凸缘201联接到动力转换模块300。动力转换模块300利用密封凸缘301密封到反应堆动力模块,并包括涡轮机械装备304、低背压热交换器(“同流换热器”305、“预冷器”306和“中间冷却器”307)、流动反向结构309(类似于206)和轴310,该轴310机械地联接到动力转换模块300和发电模块400的所有旋转部件。动力转换模块300利用凸缘301密封和联接到发电模块400。发电模块400利用密封凸缘401密封到动力转换模块300并包括具有嵌入式电子控制器的快速电动机402、在启动操作期间使用的不间断电源403(即电池)、发电机集成冷却系统/热交换器404、具有对接和柔性联接结构以与涡轮机械304的旋转轴机械地联接的密封磁轴承405。一旦通过密封凸缘201-301、301-401热-液压地联接,三个模块形成利用翅片208和208A与周围环境进行被动交换热能的单个硬化容器100。除提供热传递特征以确保热能从模块内部传递到可运输的核发电机100外部环境,翅片208和延伸的翅片208A还具有结构硬化和屏蔽特征。由在反应堆动力模块200中的隔板209形成的压力边界允许不同冷却剂和由初级压

力边界311代表的环境与由容纳控制系统204和205的腔室210代表的第二压力边界的分离。类似地,在发电模块400中的隔板406允许电动发电机环境407与由内部动力转换模块300代表的环境311的密封和分离。形成动力转换模块300的涡轮机械系统304的旋转装备机械地联接到单个轴310,该单个轴310也机械地联接到发电模块400的电动发电机402中集成的旋转部件的轴,因此所有旋转部件被匹配成利用无摩擦磁轴承405(仅在涡轮机械系统304和发电机马达402的一侧处显示)以相同速度旋转。

[0061] 每一个模块可独立地被运输,或者所有三个完全组装的和形成完全可操作的可运输的核发电机容器100。所有模块通过压力和电缆线路配件端口211对接。这些端口允许冷却剂装填或排放操作、各种电功能(即,控制棒驱动或旋转控制和反射器机构)的监控和控制。另外,配件端口211允许从电动发电机402到在部署位置处的电网的电总线连接。

[0062] 可运输的核发电机100的完全组装的或者分离的模块运输可以根据运输标准执行(即,利用标准运输装备)。当完全组装地运输时,可运输的核发电机100代表可快速地部署和取回的完全可操作的电力发电机。

[0063] 在一种构造中,形成代表每一个模块的压力容器的材料可以利用作为反射器且也作为压力边界(压力容器)的碳和碳化硅的复合结构。轻质的低中子吸收容器的使用将允许如下选择,即使用外部中子反射机构来改进小尺寸芯203(图1)的中子有效利用。

[0064] 在图1中显示的一个示范性构造中,可运输的核发电机模块可以利用密封和锁定凸缘201-301和301-401来联接以便形成水平操作的单个硬化压力可运输的核发电机容器100。在另一构造中,如图2中显示的,通过重新定向外部可运输的核发电机100的热传递翅片208B、208C和208D,可运输的核发电机可以构造成竖直地操作。所有模块包括由内部翅片212、207、305、306、307和404形成的高度集成的热交换器,例如图1和图2中显示的。当可运输的核发电机100重新定向为竖直操作或在地下设施内操作时,这些集成的热交换器热联接到图1中的外部翅片208和208A且联接到翅片208B、208C和208D(图2)。每一个模块中的所有内部翅片可以构造成对内部部件提供支撑同时当它们形成多个结构肋时增强整个可运输的核发电机结构,因此硬化整个可运输的核发电机容器100,且作为冷却剂流动通道。

[0065] 在一种构造中,除构造成将中子吸收材料216插入芯203的区域内/抽出芯203的区域内中子吸收材料216的控制驱动机构204之外以及除了构造成将中子吸收材料插入基本上在芯203中心处的区域内的中心控制棒驱动机构219之外,可运输的核发电机100反应堆控制机构可以包括例如图4中显示的控制驱动机构205,该控制驱动机构205构造成通过在中子反射器214的区域内插入中子吸收材料215/抽出在中子反射器214的区域内中子吸收材料215来控制中子吸收材料215。

[0066] 在另一构造中,除构造成将中子吸收材料216插入芯203的区域内/抽出芯203的区域内中子吸收材料216的控制驱动机构204之外以及除了构造成将中子吸收材料220插入芯203的基本上中心位置内/将中子吸收材料220从芯203的基本上中心位置抽出的中心控制驱动机构219之外,可运输的核发电机100反应堆控制机构可以包括控制驱动机构221(图6),该控制驱动机构221构造成通过将中子吸收材料215插入中子反射器214的区域内/抽出中子反射器214的区域内中子吸收材料215来控制中子吸收材料215。

[0067] 在另一构造中,如图7中所示,可运输的核发电机100反应堆可以构造成利用包括反应堆控制机构的反应堆动力模块200,该反应堆控制机构包括旋转滚筒213,该旋转滚筒

213在一侧上包含中子吸收材料且在每一个旋转滚筒的相反侧上包含中子散射材料(反射器)。旋转滚筒213包括磁联接器,该磁性联接器通过以中子吸收材料面向芯203的方式旋转滚筒来总是被动地定向滚筒,因此迫使芯203的亚临界条件。当旋转控制滚筒213利用电磁控制(即,螺线管、电磁、马达辅助的或气动致动,这在该图7中没有显示)旋转时,旋转滚筒将中子反射部位暴露给芯203,从而增加其临界性。在电力损失的情况下,旋转控制滚筒总是以中子吸收侧面向芯203的方式被动地定向它们自己,从而迫使关停条件。即使可运输的核发电机容器100从其支撑平台移位并旋转,例如,作为由敌对事件引起的爆炸的结果,该构造也保持有效。

[0068] 如图5、6、8、9和21中显示的,芯203的入口和出口区段(关于冷却剂流动方向)分别被中子反射器217和218面向。另外,反应堆动力模块包括紧急关停系统,如果所有其它控制系统失效,则该紧急关停系统通过被动系统在芯中注入中子毒物。

[0069] 为概括处理反应堆控制的方面,用于芯203的反应控制可以在一种构造中通过在反射器214中的控制棒215(包含以在安全吸收模式中被动地接合的方式布置的吸收和反射材料)以及通过驱动多个芯内控制棒216来执行。在另外的构造中,除提供另外独立的芯203关停机构的紧急中子毒物注入之外,用于芯203的反应控制可以通过驱动芯内控制棒216、中心控制棒220和旋转控制滚筒213或者这些构造的组合来执行。控制棒材料可能是基于SiC或基于C的陶瓷,具有硼或稀土吸收材料和作为反射器材料的铍。

[0070] 参考图1,在反应堆动力模块200内的集成的热交换器212可以构造成对控制棒驱动机构204和205提供被动冷却。参考图1、2和5,集成的热交换器207可以构造成经由在内芯203和反应堆动力模块200的外部翅片208(图1和图3)或208B(图2)之间的传导热传递来被动地去除来自芯203的衰变热。集成的热交换器207可构造成甚至在完全缺失冷却剂的情况下从芯203传递衰变热能。在某些构造中,例如图7中所示,芯203可以由燃料元件形成,该燃料元件被热联接到形成高度热传导路径207的材料。参考图4和图5,动力转换模块300包括一系列集成的热交换器。这些热交换器可以构造成用作同流换热器305、预冷器306和中间冷却器307,与布雷顿动力循环热动态构造一致。另外,被完全集成到专用模块中的集成的热交换器由被集成到发电模块400中的电动发电机集成的热交换器404代表。

[0071] 在图1、2、3、4和5的单个容器100中集成的可运输的核发电机的一个优选构造中,动力转换模块300容纳涡轮机械系统304和集成的热交换器硬件以将在反应堆动力模块200中产生的热转换成被联接到旋转轴310中的机械动力。为了在相同轴310上联接旋转的涡轮机械,且在由动力转换模块300代表的包围物中,并且假定气体312(图5)作为具有恰当热-物理特性的工作流体,通过流过反应堆动力模块中的芯302产生的高温气体312进入气体涡轮机304A。

[0072] 参考图5和图6,在涡轮机304A的各个阶段中膨胀之后,气体进入被定义为同流换热器305的集成的热交换器,并且在进入压缩机的低压侧304B和压缩机的高压侧304C之前进入预冷器306(同时气体流过集成的中间冷却器热交换器307),在利用低阻力流动反向结构206(图1)使流动方向反向之前,在同流换热器305的热侧上流动,并最终通过进入反应堆动力模块200中的芯203的冷侧而重新设定布雷顿气体循环。预冷器306和中间冷却器305可以构造为气体-空气或者气体-液体的热交换器,该热交换器经由翅片208和延伸的翅片208A(图3)被动地将残余废热传递到最终热阱。在该构造中,反应堆冷却气体312和布雷顿

工作气体312可以是相同的。气体312可以是CO₂、氦气、氩气或具有满足热动力学和芯需求的热-物理性能的其他流体。

[0073] 在再生的布雷顿循环构造中,可运输的核发电机动力转换效率可以是约45%。旁通阀313允许根据电力需求由离开芯的实质上短循环的气体312执行负载跟随。

[0074] 由于轴310机械地联接到发电模块400和动力转换模块300中的涡轮压缩机,所以电动发电机402可以构造成进行启动操作以便使用被集成在不间断电源单元403中的电池来将发电机转换成马达且使用马达402作为涡轮机械的驱动器以用作启动和关停时的气体循环系统。

[0075] 在一种构造中,轴310可以利用磁轴承405联接到动力转换模块和发电模块的静止元件,该磁轴承405具有在可运输的核发电机控制系统内的电力突然损失以及电子控制器或电-磁轴承线圈故障的情况下接合的保护轴承。为了允许动力转换模块从发电模块分离(即,在单独的模块运输期间),轴310可以由两个分离轴形成,该两个分离轴由在模块联接凸缘301-401的位置处的柔性高速连接器联接。集成的涡轮机械和电动发电机装备允许在不需外部核电厂设备的情况下操作,从而充分地减少总体占用空间、易损性和冷却剂损失情况的可能性。

[0076] 参考图7、8和9,反应堆动力模块200可以利用几种类型的芯203,包括防熔化的传导式陶瓷芯。

[0077] 在图7中显示的一个示范性构造中,芯203由具有各种几何形状的燃料元件221形成。燃料元件221可以构造成包括冷却剂流动路径222以便确保在流动路径内循环的同时被传递到冷却剂的热能的高效转换。冷却剂流动路径222构造成允许流体流过燃料元件221和/或允许控制机构被插入芯203或从芯203抽出。

[0078] 在芯203的一种构造中,为了增强传导热传递机构,冷却路径207可以通过将燃料元件221与翅片热联接而获得,该翅片形成传导式冷却路径207,因为它们提供从芯203内部位置通过内部翅片207A一直到外部翅片208的热传递管道。翅片207A可以构造成将离开同流换热器305的气体流引到流动反向结构206中,同时提供芯203内部的结构支撑和热传递路径以将来自芯的热能(即,衰变热)被动地传递到翅片208。流动反向结构206可以构造成提供低流体动态阻力,且提供芯结构支撑,同时借助于传导热传递机构来确保来自芯的衰变热能传递到可运输的核发电机外部翅片208。因此,芯203可以安全地和被动地甚至在完全缺失冷却剂时将衰变热能传递到围绕可运输的核发电机的环境。

[0079] 图10、10A和10B是被集成到动力转换模块300中的低背压同流换热器集成的热交换器的示例性实施方式的透视图。如图10、10A和10B中所示,工作流体,气体312,在一侧进入同流换热器305,执行全360度循环并离开同流换热器(在一个示范性构造中对称的)。以该方式,气体312在没有与热接触同流换热器305的外表面的流体混合的情况下与同流换热器305的内表面进行热能交换。

[0080] 图11是被集成在动力转换模块300中的低背压集成同流换热器305热交换器的完全组装的示范性构造的透视图。该构造提供在离开涡轮机械的工作流体312A(热气体)和从图5和图6中描述的压缩机304C返回的流体312B(冷气体)之间的分离。

[0081] 图12是图11中的完全组装的低背压集成同流换热器305热交换器的示范性实施方式的透视图,示出由在进入热换热器305的入口的流体312A(图10中显示)和从动力转换模

块的中间冷却器区段307返回的流体312B之间的分离流动模式引起的热传递,从而执行对热能进行同流换热的功能,否则由于热交换器305的独特几何形状在具有最小背压的涡轮机械的排放处浪费热能。图13是如下装置的示例性实施方式的透视图,该装置构造成交换“热”反应堆动力模块且专门在准备运输或存储中执行反应堆动力模块的密封。如该图中显示的,模块交换装置500的示例性实施方式利用待与凸缘503联接的凸缘505执行反应堆动力模块200的密封和动力转换模块300的拆分。当凸缘503和505被联接时,它们抵住图1中显示的凸缘201和301密封。在机构502插入密封反应堆动力模块200的闭合区段501的同时,液压地激活的紧固件501拆分凸缘201和301。图14和图15是示出通过交换装置500以从完全组装的可运输的核发电机单个容器100拆分反应堆动力模块200并利用密封凸缘501密封反应堆动力模块200所采用的示范性顺序的透视图。

[0082] 图16是示出示范性模块化运输平台600的透视图,该平台600符合运输标准且配备有引导件601以允许在运输和操作期间固定模块200、300和400。在该构造中,模块可以滑动以在部署位置处不需要重型起重机的情况下快速联接或拆分。

[0083] 图17是示出图16中显示的示范性可运输的核发电机运输平台600的透视图,具有增加的屏蔽件700和被动冷却结构701以允许快速的反应堆动力模块200“热”取回(在关停之后很短时间取回芯)。在该实施例中,整个可运输的核发电机单个容器100,或者仅反应堆动力模块200可以被淹没以便在反应堆动力模块200在关停之后相对较短时间被运输时增加热传递。在该构造中,芯继续被动地冷却,同时可膨胀的屏蔽件700可以被水填充以便形成厚的水墙以在快速芯取回期间减弱辐射场。

[0084] 图18是图1中显示的示范性可运输的核发电机框图的修改版本的侧截面图,其中单个容器构造成利用水804作为关于典型的加压水反应堆(PWR)的初级环路中循环的芯203冷却剂来操作,该单个容器包括用于可运输的核发电机的水平(或竖直)操作的所有装备。在形成兰金动力循环的次级环路中的工作流体805也是水。在该构造中,可运输的核发电机包括由分离热交换器分离的初级环路和次级环路,该分离热交换器的初级侧802通过水804接收来自芯203的热能,该水804通过经由反应堆冷却剂泵801进行的强迫对流而循环。

[0085] 参考图18、19、20和21,在利用作为冷却剂和工作流体的水操作的可运输的核发电机的示范性构造中,反应堆冷却剂泵801可构造为在如图18中所示的干头部或腔室210上或者在图21中所示的环形夹套上定位的密封泵。初级环路中的压力利用包括加热器800B和喷射器800A的增压器800(图21)来调节。在该构造中的控制和被动衰变热去除系统类似于图1-7中描述的那些。

[0086] 由流动路径805代表的次级环路利用分离热交换器802和803接收来自初级环路的热能。利用供水泵808使水循环通过热交换器803的次级侧。随着蒸汽流出分离热交换器803的次级侧,该蒸汽在涡轮机械806中膨胀,其中蒸汽能被转换成被传递到发电模块400和发电机402的机械能。如在图1-7中描述的那些一样,涡轮机械806和快速发电机402利用轴310和在动力转换模块300与发电模块400之间的分离机构机械地联接。随着蒸汽在涡轮机械806的排放处排出,该蒸汽在冷凝器807中冷凝之前进入集成的热交换器再热器809(图19和20),因而重新设定布雷顿动力循环。

[0087] 如图1-7中描述的那些一样,冷凝器807利用具有重力驱动热交换器机构的翅片208将热能传递到环境。来自芯203的短期衰变热去除可以在没有电力的情况下通过利用

UPS 403来执行。对于其中芯203可以由防熔化的陶瓷材料形成的构造中,甚至在完全缺失冷却剂的情况下,由传导机构实现的被动冷却确保了芯的温度低于安全界限。包括在不同的压力边界下操作的初级环路和次级环路的可运输的核发电机构造也可以利用液态金属冷却的反应堆动力模块,该液态金属冷却的反应堆动力模块借助于分离热交换器与动力转换模块分离,并允许在次级环路中利用布雷顿或兰金动力循环。

[0088] 图22是提供示范性完全组装的可运输的核发电机的尺度指示的透视图,该完全组装的可运输的核发电机被固定在标准运输平台900上以快速部署并准备在任何部署场所(包括具有荒芜和极端环境条件的场所)产生动力。

[0089] 图23和图23A是被固定在用于快速“热”反应堆动力模块运输(即,紧急场所提取)的标准运输平台900上的可运输的核发电机的示范性反应堆动力模块的透视图,显示了具有附加的被动冷却特征701和可膨胀的屏蔽件700以确保在热芯去除情况下的放射屏蔽。

[0090] 图24和图24A是形成防熔化芯的优选的传导式陶瓷芯区段221和全陶瓷的微封装(FCM)燃料元件901的透视图,该防熔化芯甚至可以在完全缺乏冷却剂的情况下被动地冷却。FCM燃料利用低中子吸收陶瓷复合材料,例如碳化硅(SiC)。SiC复合物相对于在反应堆中使用的石墨具有很多优点,因为它们与高温下的水和空气具有非常低的反应动力学,不会产生碳尘,没有在辐照之后来自低温下的快速能量释放的维格纳效应,具有良好的耐辐射性,其表现出在辐照下非常小的尺寸变化,并且甚至在非常高的温度下对裂变产品扩散提供无孔的不可透过的屏障。

[0091] 在一种构造中,芯203可以由燃料元件901和221形成,该燃料元件901和221由具有SiC纤维以确保韧性的单向纤维增强NITE烧结SiC的复合结构制成。芯203抑制件和热管道以及所有流动路径220A和控制棒通道222也由纤维增强的复合物制成。例如,图6中显示的集成的同流换热器热交换器305可以利用SiC PC(印刷电路)气体-气体热交换器形成,其设计成配合在围绕涡轮机械的可利用的环形空间中以便提供紧凑性、有效性和低背压。芯203中的其它SiC结构包括由SiC-Gd²⁰³和Er²⁰³的烧结混合物制成的控制棒以及控制棒套筒。最后,压力容器可以由预应力的SiC复合物制成。在某些构造中,燃料元件221可以提供局部切口906和905以允许燃料元件221的受控碎裂而没有通过压实部902或燃料元件901传播的裂纹,假如这些元件受到例如由爆炸(由敌对事件引起的)造成的严重动力应力。以该方式,且由于灾难攻击的结果,燃料块或元件221可能沿着受控的局部切口906或905碎裂,从而甚至在最严重的超出设计基础的事故或攻击情况下保持燃料元件901完好。该特征允许芯或其碎裂的燃料块221包含所有挥发物且明显地缓解严重芯破坏情况的后果。因为在严格设计基础下和超出设计基础的事故或攻击情况下所有放射性挥发物保持陷在燃料元件901内,因此可运输的核发电机不需要如由所有SMR和大反应堆需要的撤离计划区域。

[0092] 本领域技术人员将理解可如何形成所述特征的组合来达到可能在附图中没有具体显示的示范性实施方式。

[0093] 应理解,在不偏离本发明的范围的情况下可以改变本发明的各种方面或细节。此外,前述说明仅用于示出的目的,且不用于限制的目的,本发明由权利要求限定。

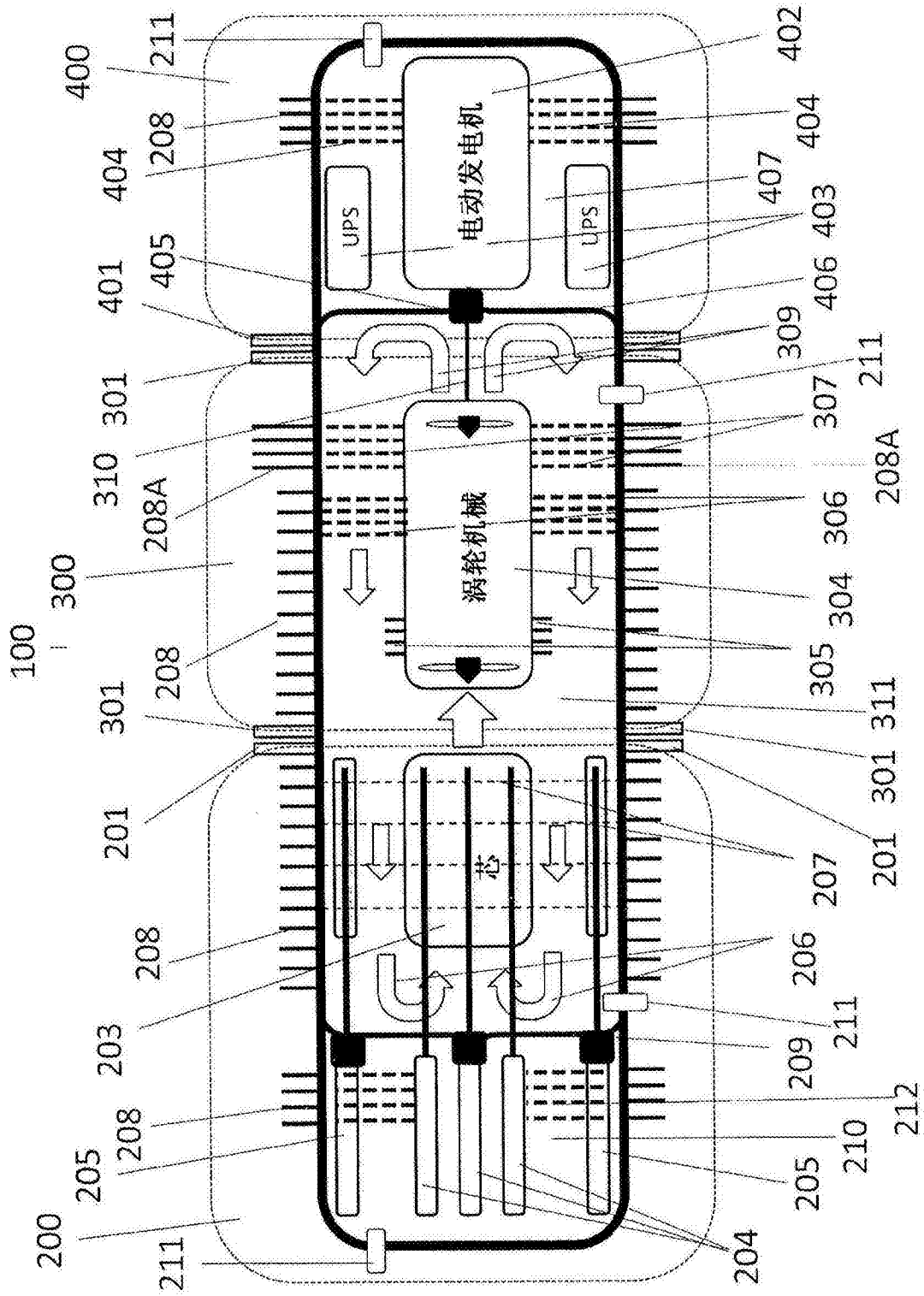


图1

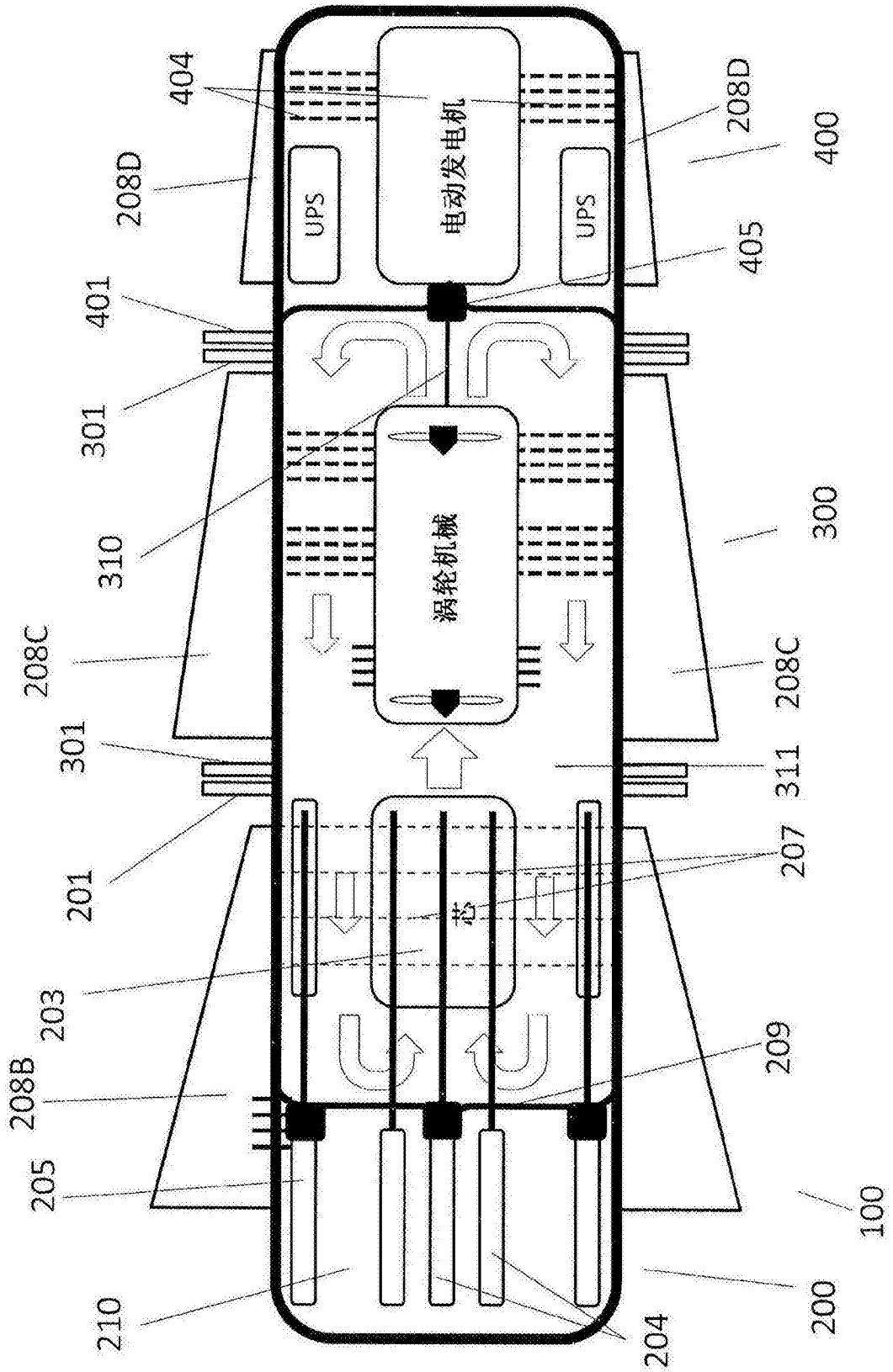


图2

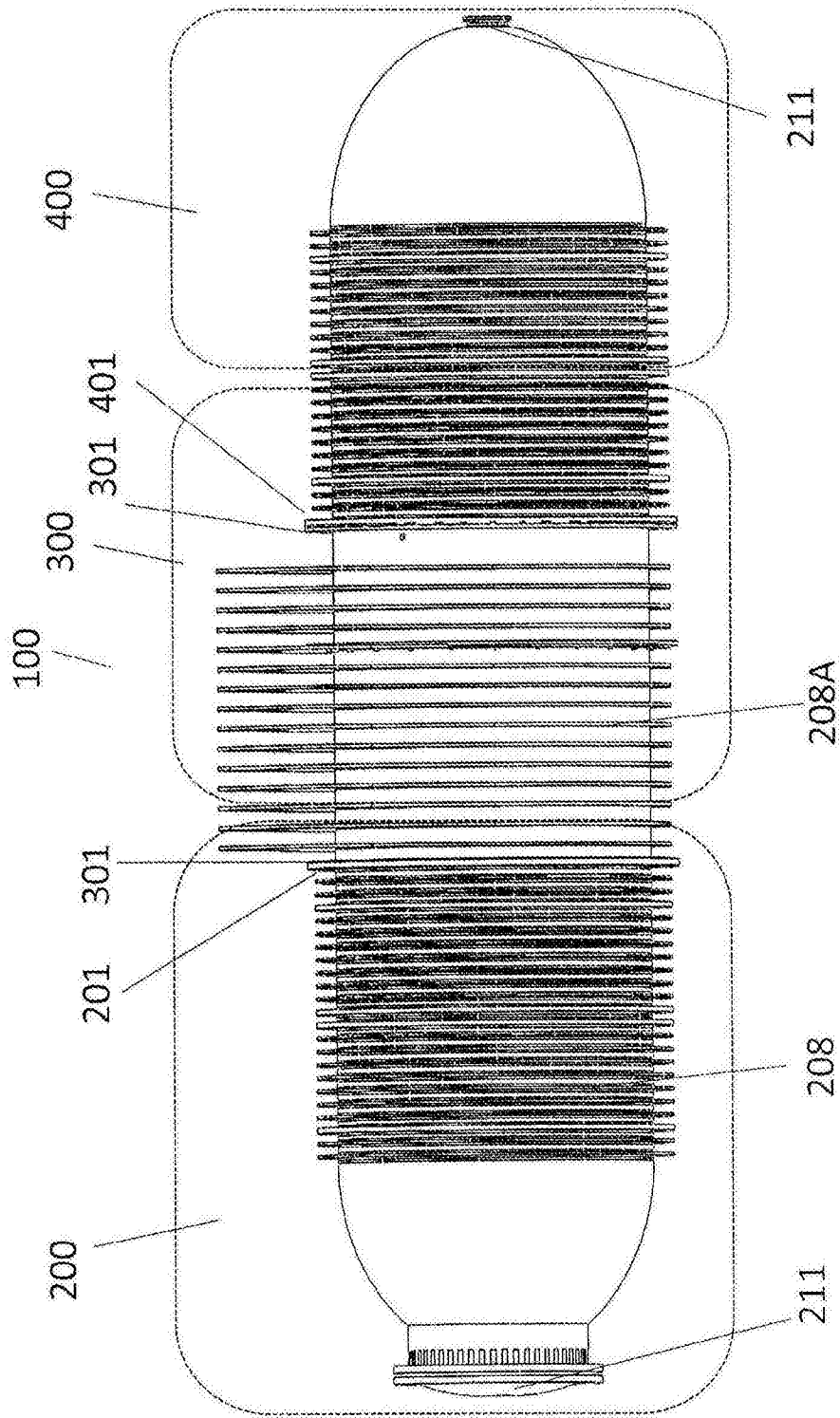


图3

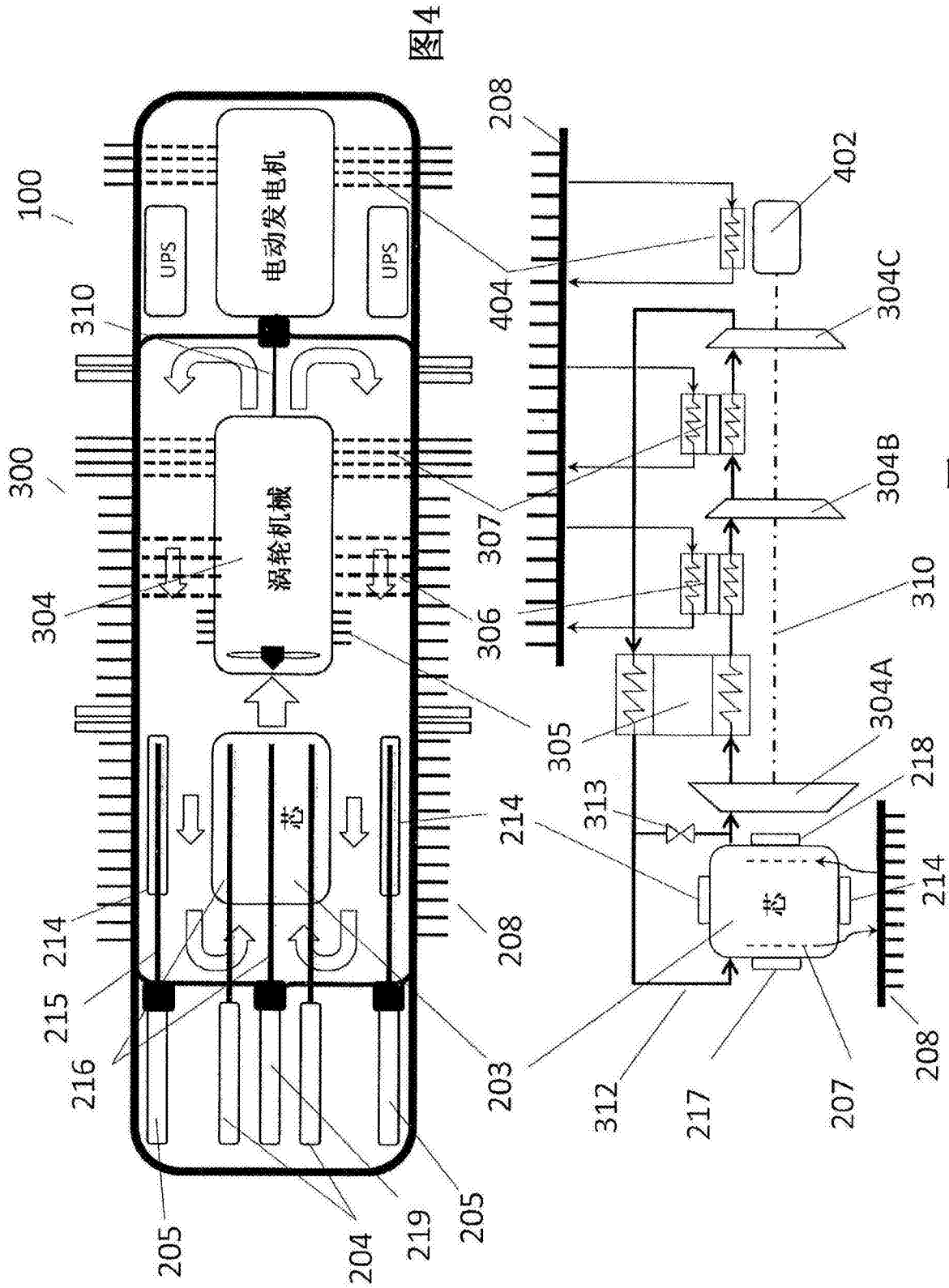


图4

图5

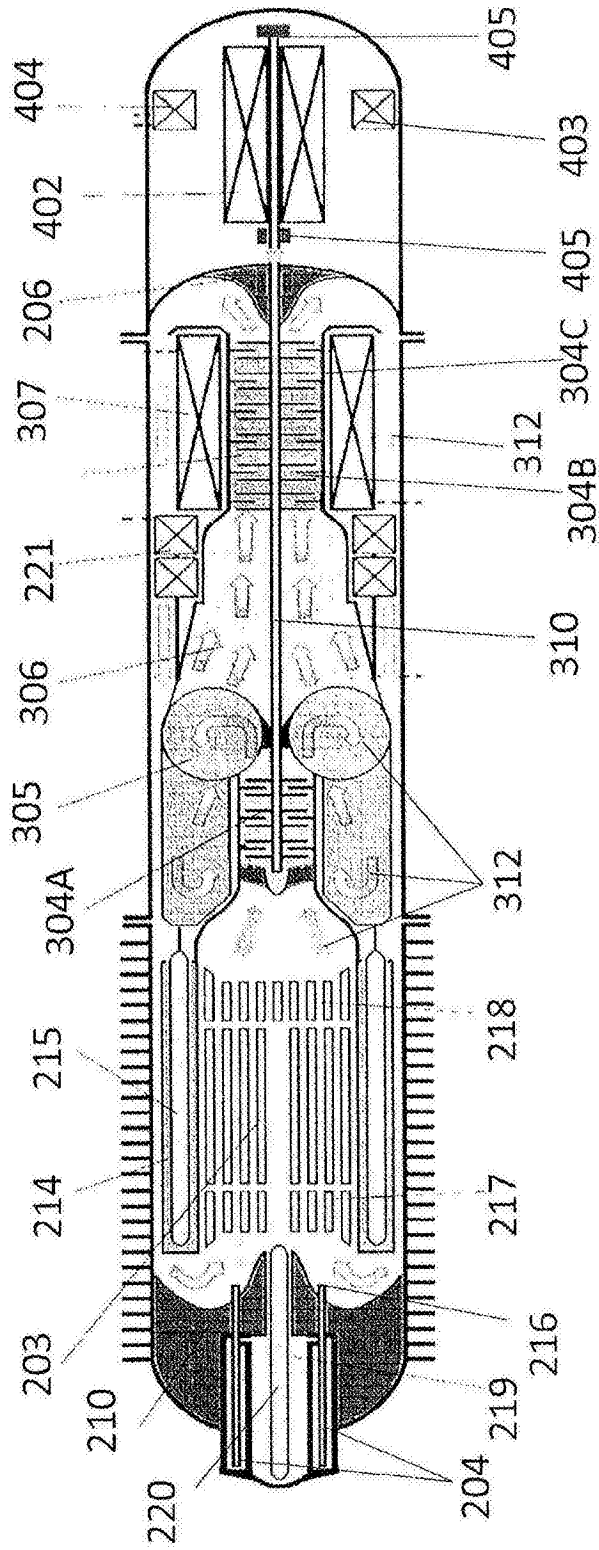


图6

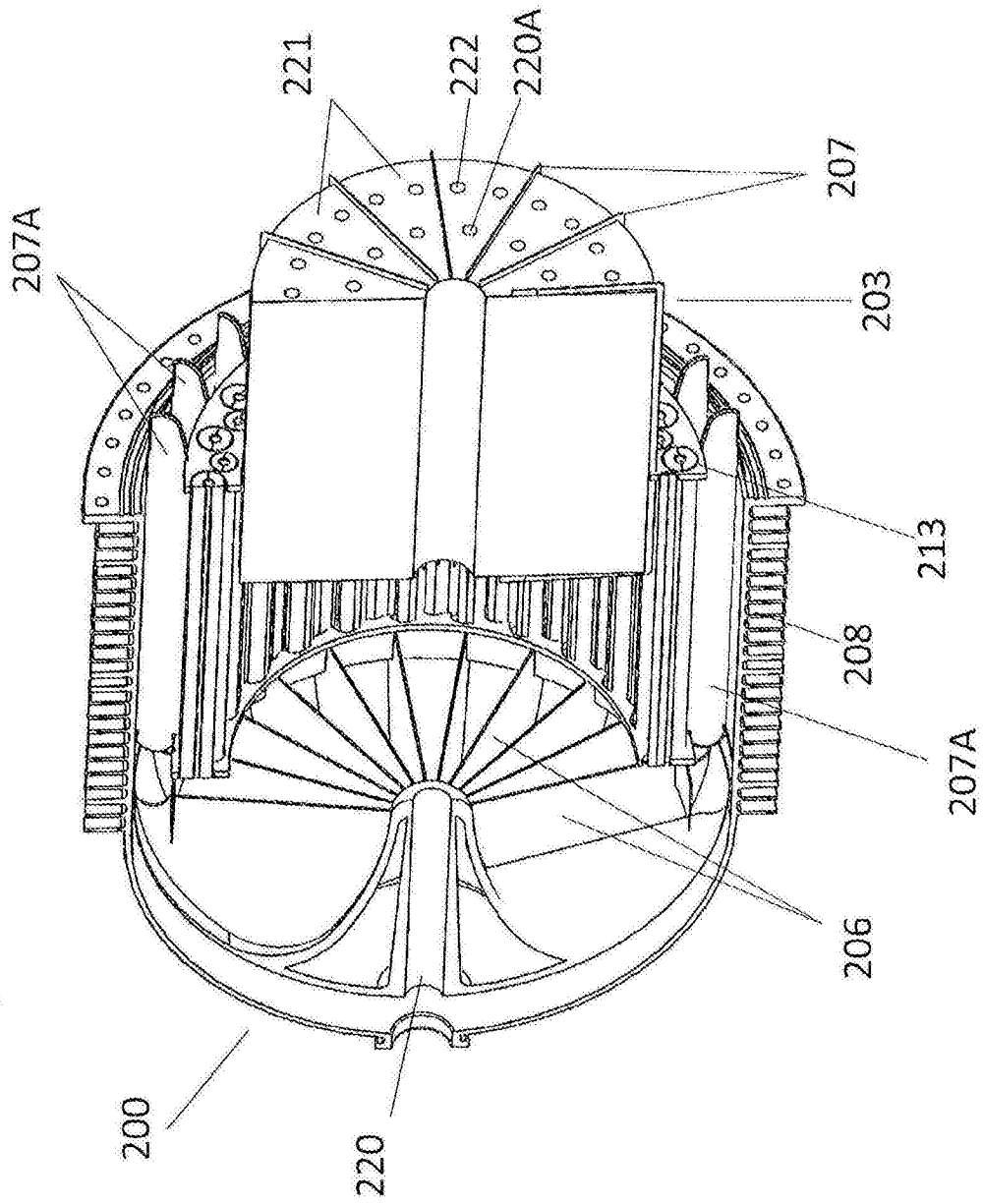


图7

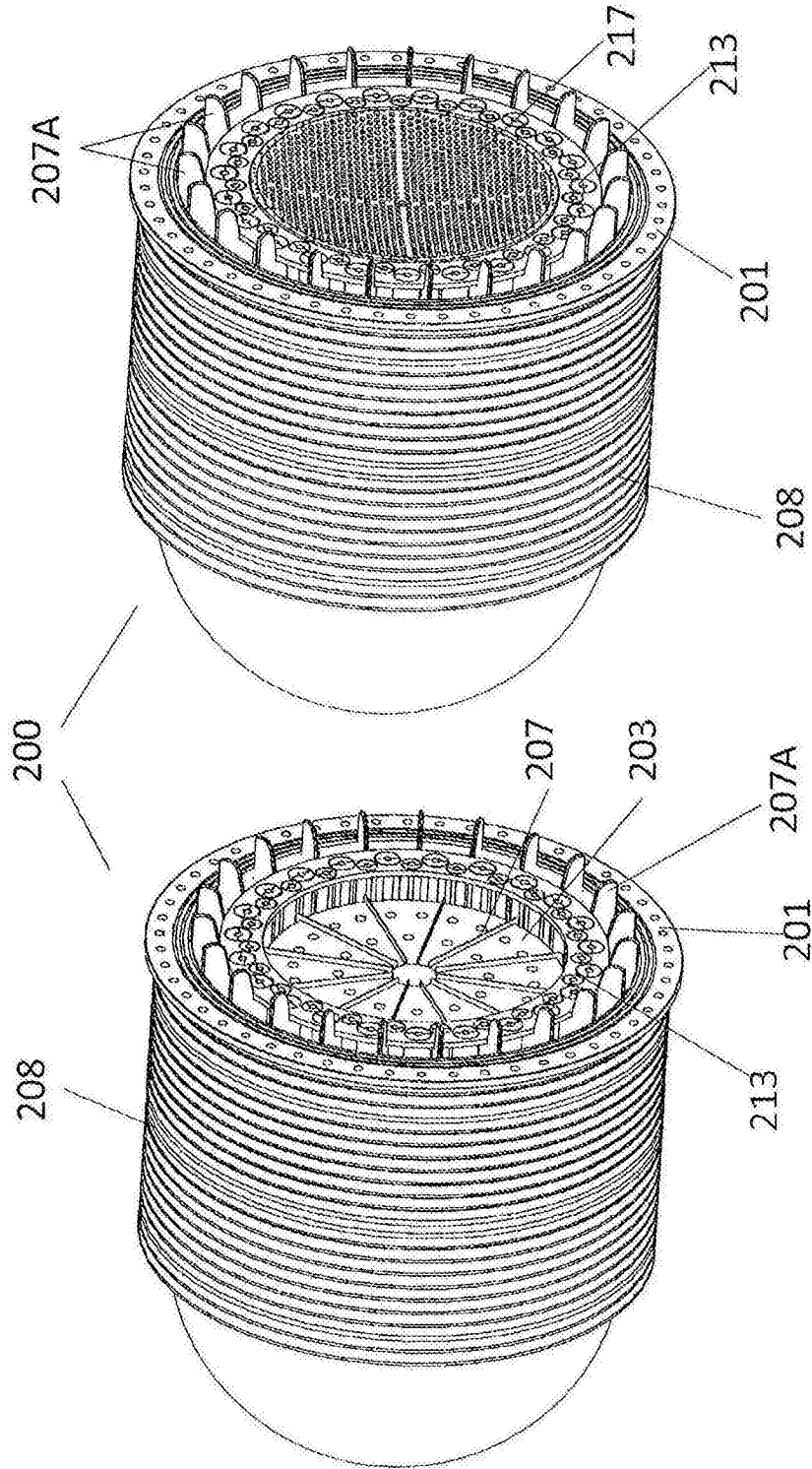


图9

图8

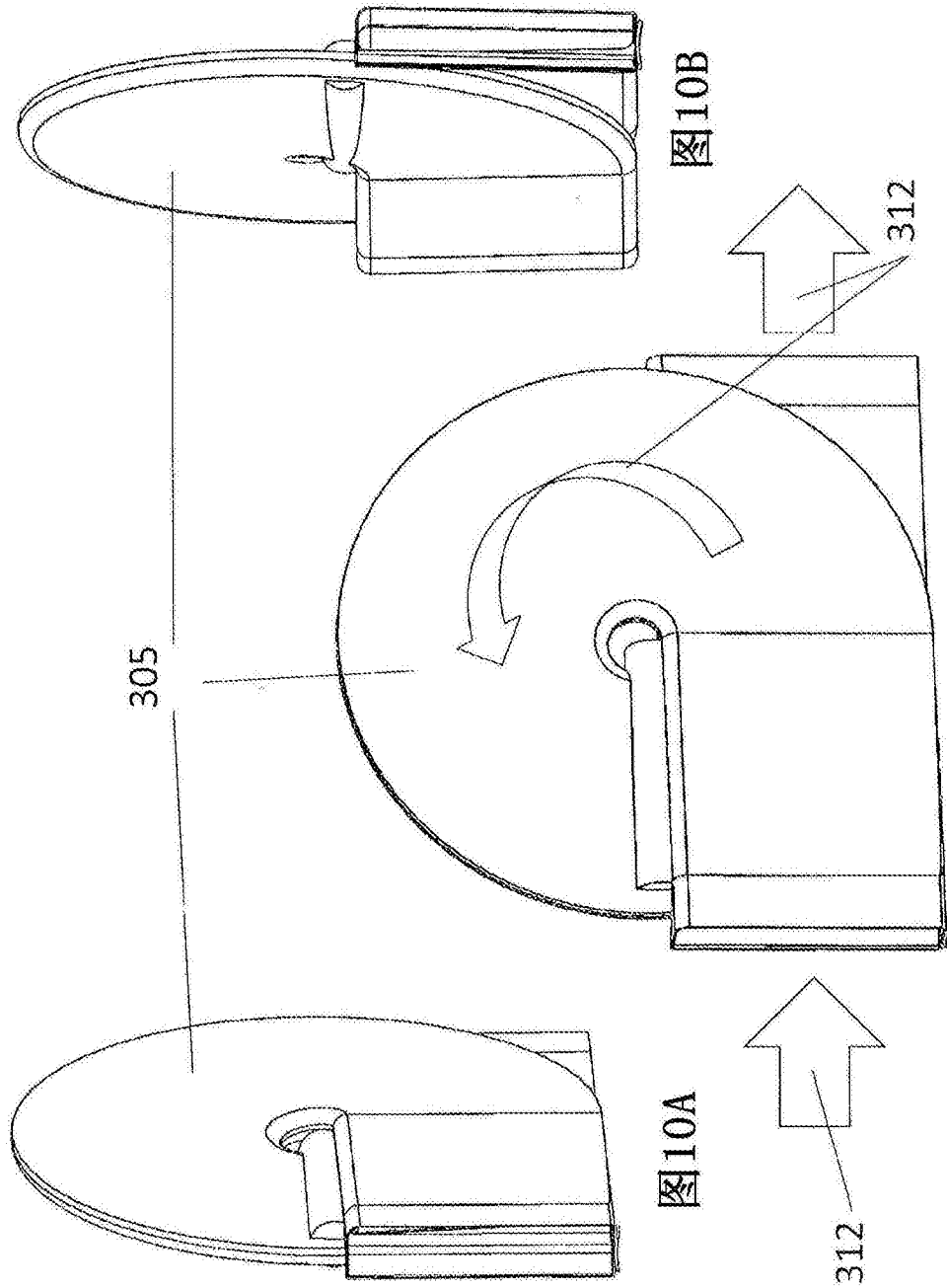


图10

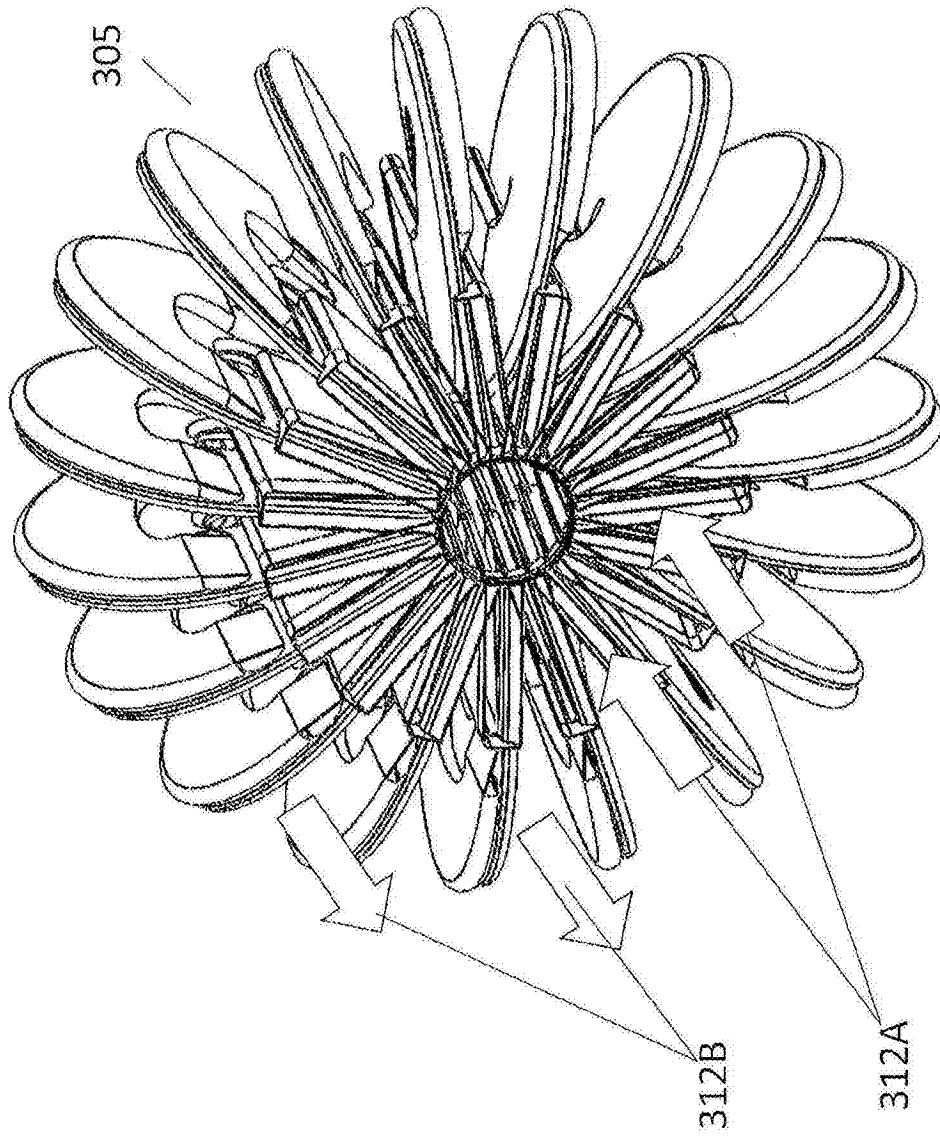


图11

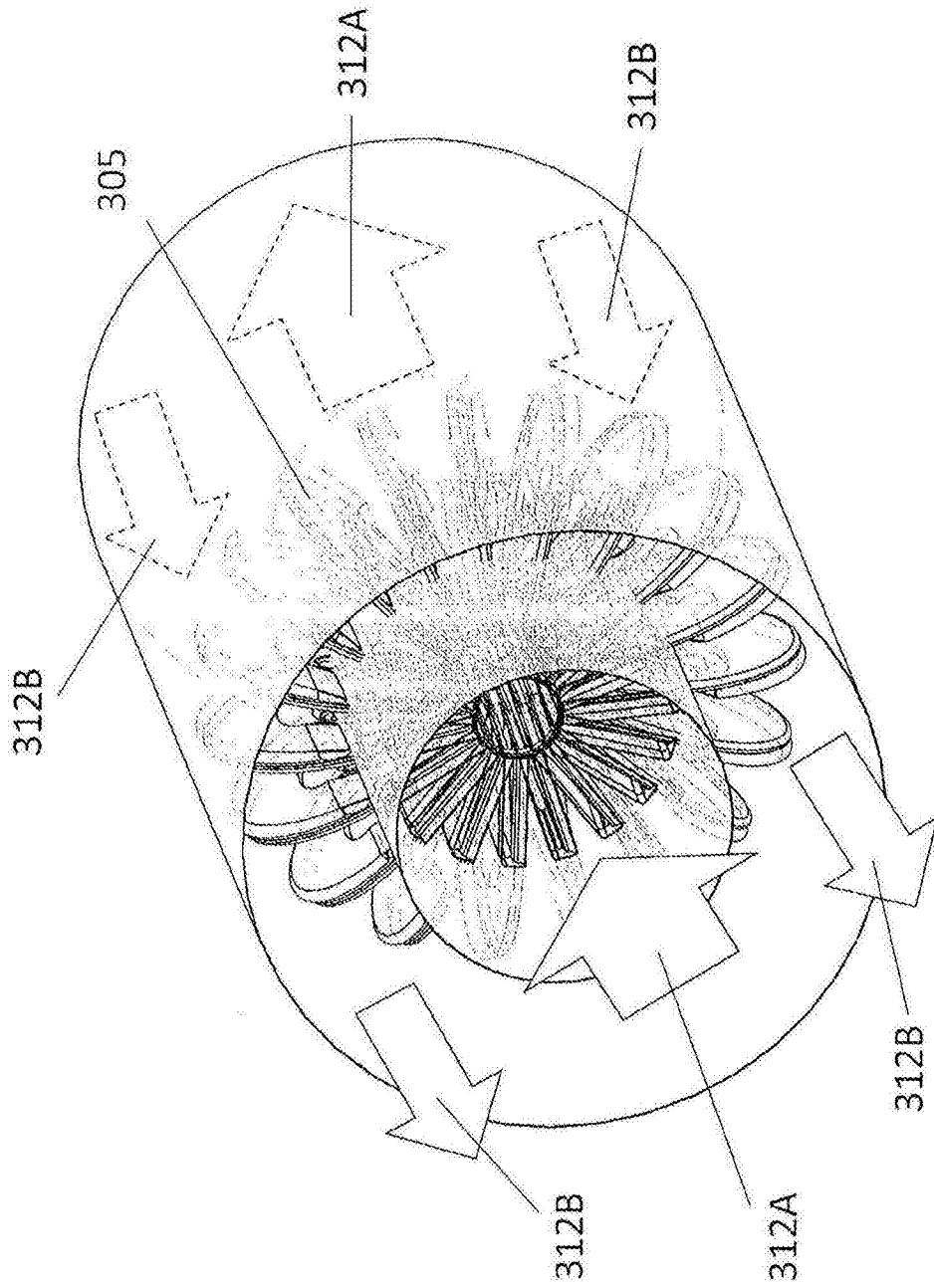


图12

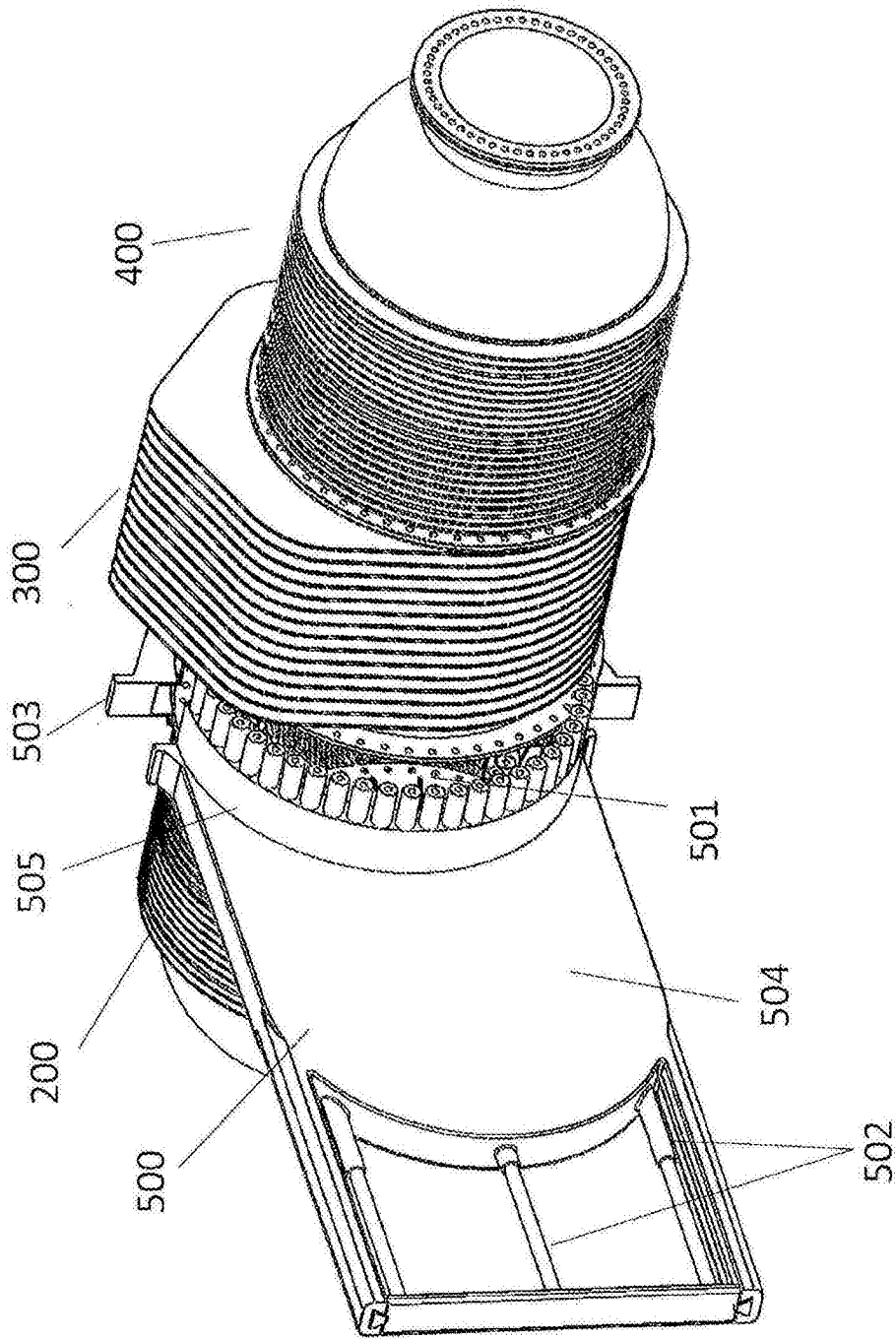


图13

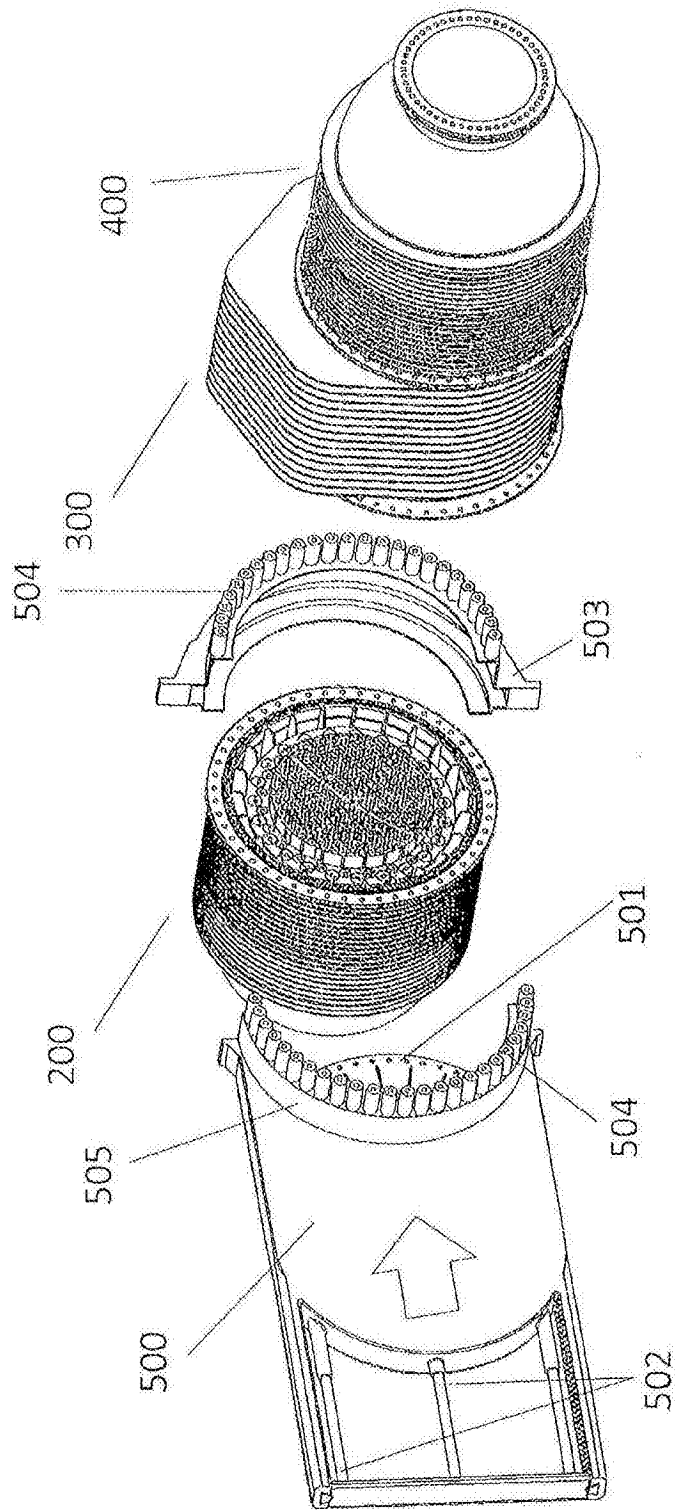


图14

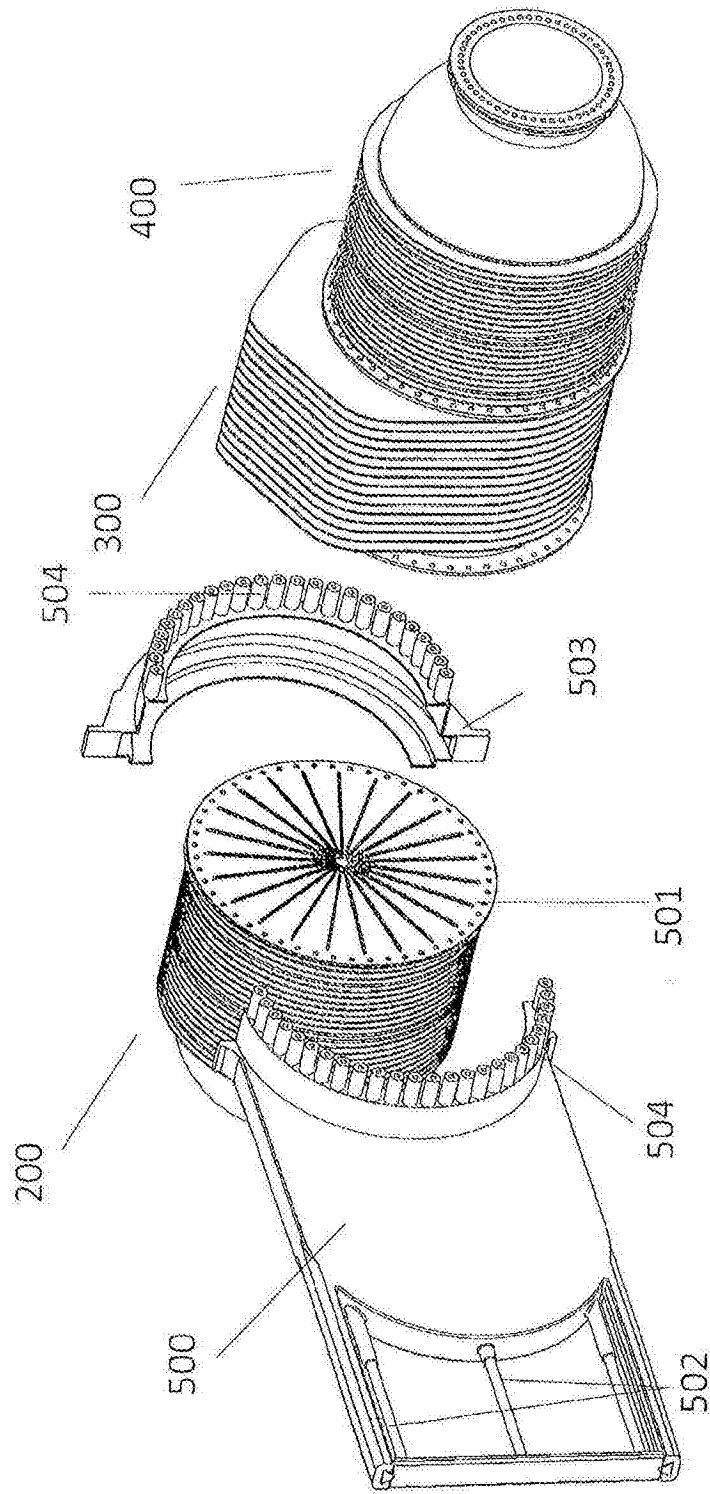


图15

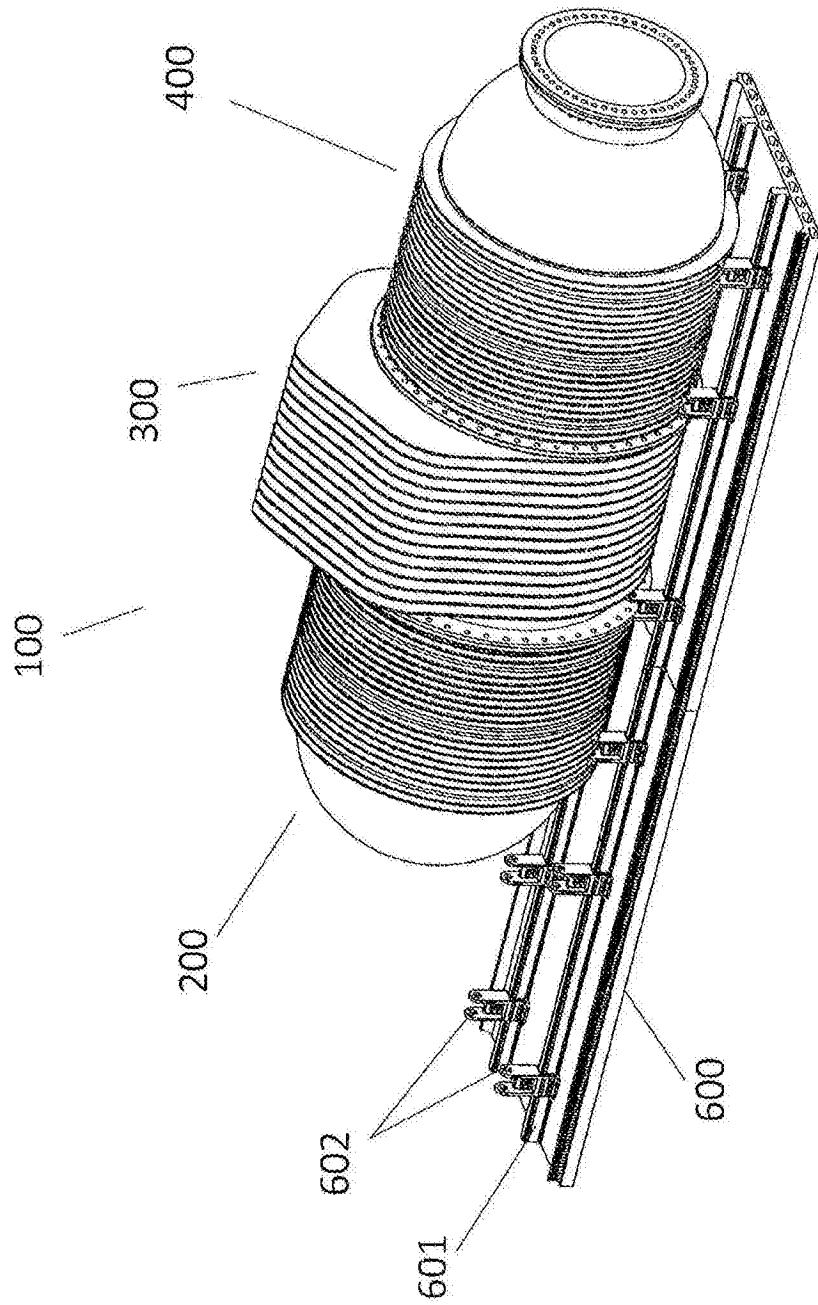


图16

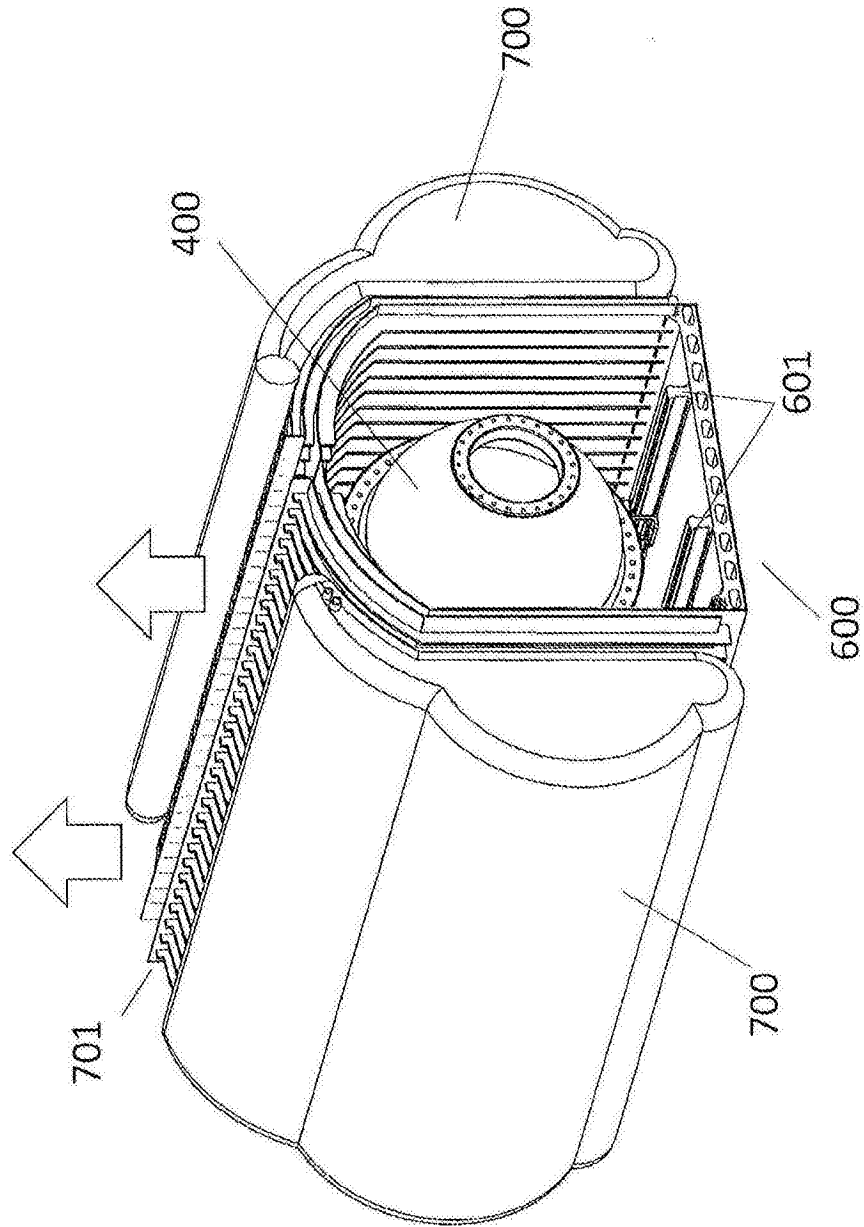


图17

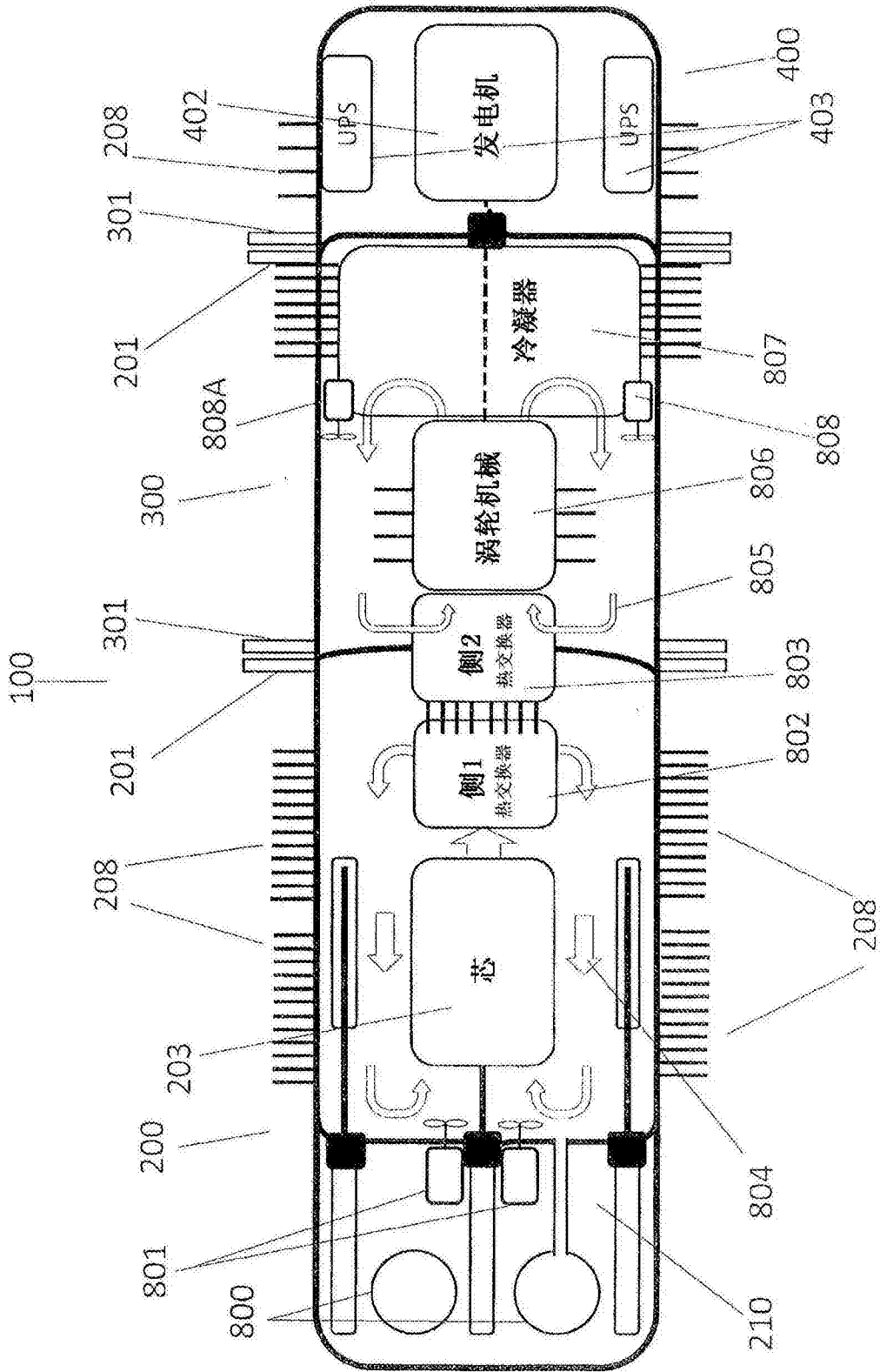
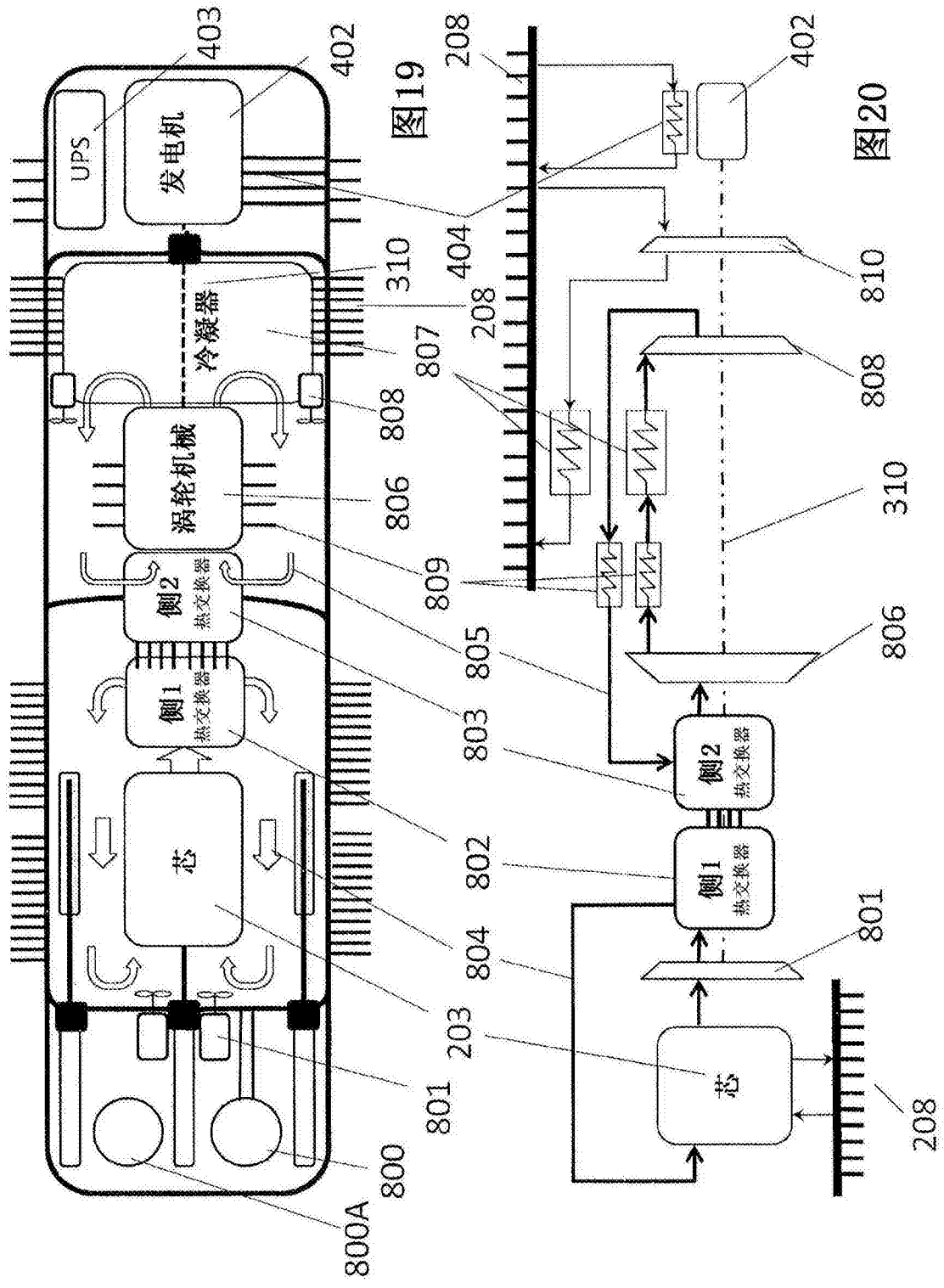


图18



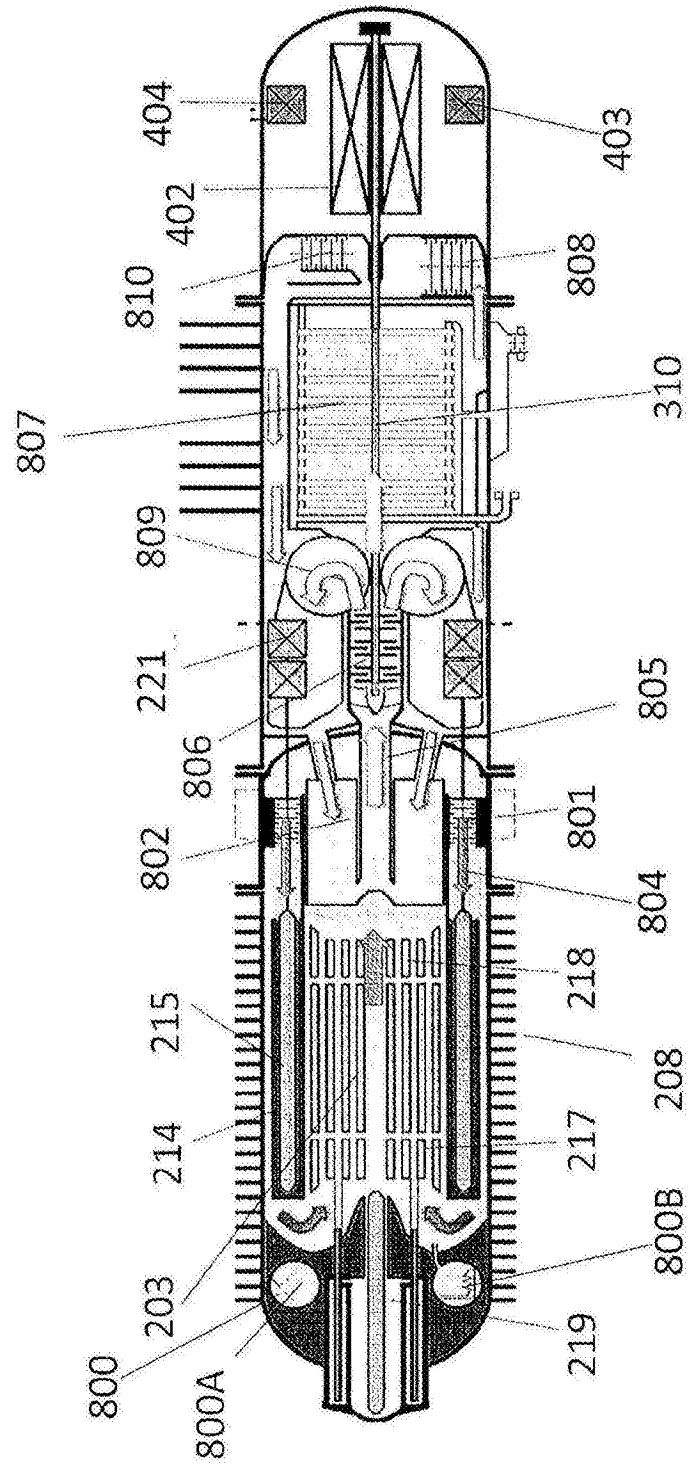


图21

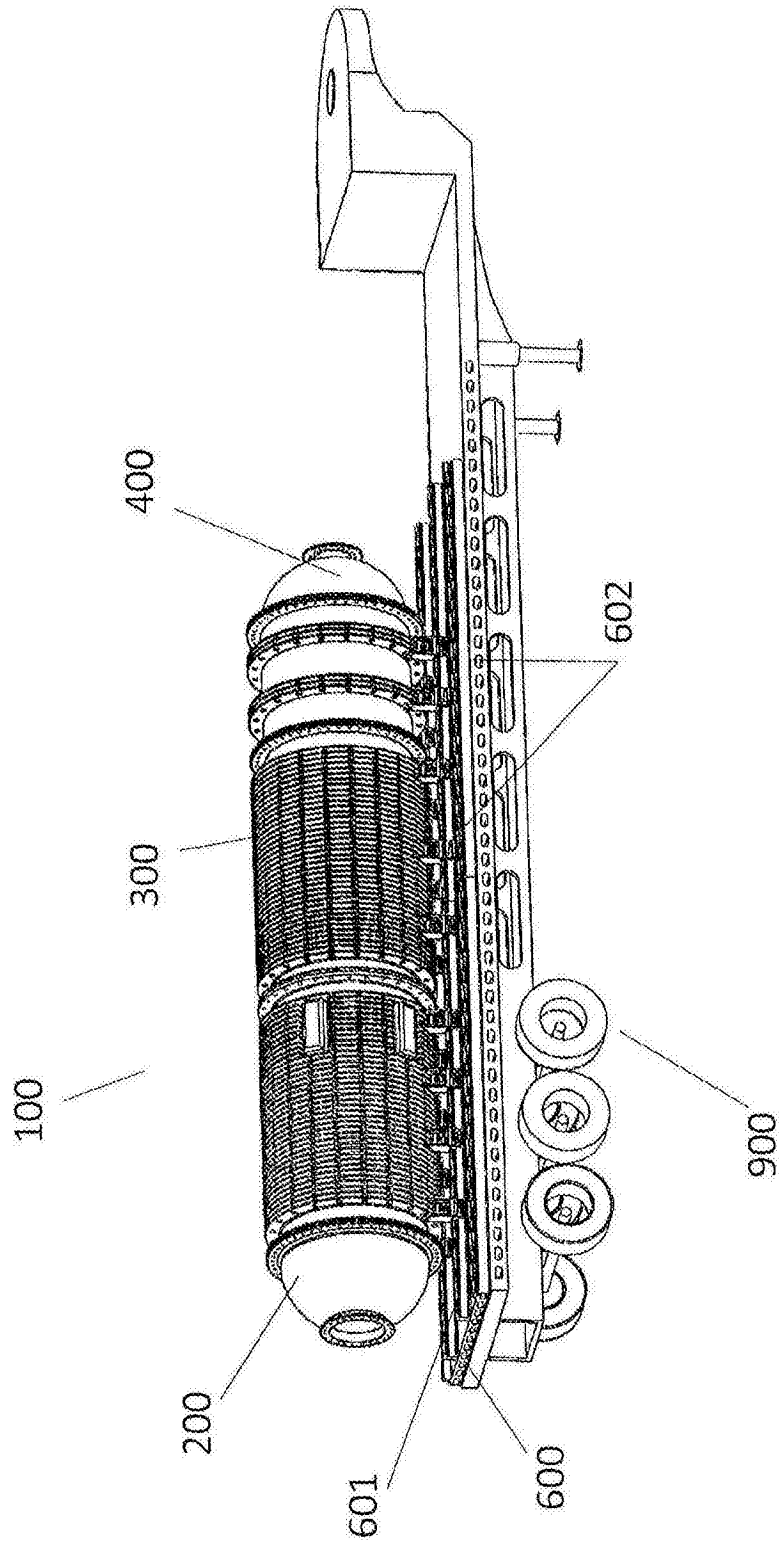


图22

