



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105359219 B

(45)授权公告日 2017. 11. 21

(21)申请号 201480038608.1

(22)申请日 2014.05.28

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 105359219 A

(43)申请公布日 2016.02.24

(30)优先权数据
61/828,017 2013.05.28 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2016.01.05

(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/US2014/039847 2014.05.28

(87)PCT国际申请的公布数据
W02014/193992 EN 2014.12.04

(73)专利权人 SMR发明技术有限公司
地址 美国新泽西州马尔顿市霍尔泰克道1号

(72)发明人 克里希纳·P·辛格
约瑟夫·拉杰库马尔

(74)专利代理机构 北京京万通知识产权代理有限公司 11440
代理人 许天易

(51)Int.Cl.
G21C 15/18(2006.01)

(56)对比文件
CN 101836262 A, 2010.09.15,
CN 87106445 A, 1988.04.06,
JP 2009-150846 A, 2009.07.09,
US 5217682 A, 1993.06.08,
US 4765946 A, 1988.08.23,
US 2002101951 A1, 2002.08.01,
US 3929567 A, 1975.12.30,
US 5499277 A, 1996.03.12,

审查员 黄伟

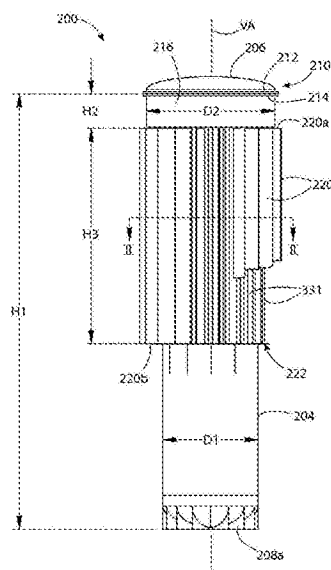
权利要求书2页 说明书17页 附图20页

(54)发明名称

冷却剂丧失反应堆冷却系统

(57)摘要

一种具有无源冷却功能的核反应堆冷却系统,其可在反应堆停堆事件(LOCA)期间使用,而无需使用电力。所述系统包括带有核燃料堆芯的反应堆容器,所述核燃料堆芯位于反应堆井内。安全壳容器内贮水槽流体连接到反应堆井上并装有冷却储水。在冷却剂丧失期间,贮水槽向反应堆井注入冷却水。最后,由反应堆衰变热加热的水蒸发产生蒸汽。蒸汽流向安全壳容器内热交换器并凝结。所述冷凝液在闭式流动环路系统中返回到反应堆井中,在该环路中,根据水的相变和密度变化,流动循环仅通过重力进行。在一个实施方式中,热交换器可以是一排安装在内部安全壳容器壁上的散热管道,所述安全壳容器被散热器所包围。



1. 一种无源式反应堆冷却系统,其能够在冷却剂丧失事故后使用,所述系统包括:
与散热器热联通的安全壳容器;
设置在所述安全壳容器内的反应堆井;
至少部分地设置在所述反应堆井中的反应堆容器,所述反应堆容器装有加热所述反应堆容器内的一次冷却剂的核燃料堆芯;
设置在所述安全壳容器内并与所述反应堆井流体相通的贮水槽,所述槽装有冷却储水;以及
设置在所述安全壳容器内的热交换器,所述热交换器经由闭式流动环路与所述反应堆井流体相通,在所述闭式流动环路中,经由重力驱动液体流动;
其中,在一次性冷却剂失去后,所述贮水槽配置成可操作地向所述反应堆井注入冷却水,所述冷却水通过来自所述燃料堆芯的热量而转换成蒸汽并通过所述闭式流动环路流到所述热交换器。
2. 根据权利要求1所述的系统,其中,所述蒸汽在所述热交换器内凝结形成冷凝液,以及所述冷凝液经由重力流回到所述反应堆井。
3. 根据权利要求1或2所述的系统,其中,所述热交换器包括一排整体连接到所述安全壳容器的散热管道。
4. 根据权利要求1或2所述的系统,其中,所述散热器包括装有环绕所述安全壳容器的水的环形储存器。
5. 根据权利要求4所述的系统,其中,所述环形储存器中的水的温度低于所述蒸汽的温度,从而冷凝所述蒸汽。
6. 根据权利要求4所述的系统,其中,所述环形储存器在所述安全壳容器和外部安全壳容器外壳结构之间形成。
7. 根据权利要求2所述的系统,其中,所述闭式流动环路包括:
流体连接所述反应堆井和热交换器顶部的蒸汽进气管道,以及
流体连接所述热交换器和贮水槽的冷凝液排出管道。
8. 根据权利要求1所述的系统,其中,所述反应堆井和贮水槽在设置于所述安全壳容器中的混凝土整料中形成。
9. 根据权利要求1所述的系统,其中,所述贮水槽通过至少一个其内设置有倾泄阀的流动管路流体连接到所述反应堆井,所述倾泄阀配置成通过从关闭位置转到打开位置来控制冷却水至所述反应堆井的流量。
10. 根据权利要求1所述的系统,进一步包括位于所述反应堆容器外表面上的隔热衬里组件,所述衬里组件包括多个彼此间隔开的金属衬里,所述衬里之间形成空气间隙。
11. 根据权利要求10所述的系统,进一步包括设置在所述反应堆容器外表面处的顶部流孔喷嘴,所述反应堆容器与在所述衬里和所述反应堆井之间形成的所述空气间隙流体相通,
其中,所述顶部流孔喷嘴配置成可操作地排空在所述衬里组件内产生的蒸汽并将所述蒸汽排放到所述反应堆井。
12. 根据权利要求11所述的系统,其中,所述顶部流孔喷嘴包括配置成覆盖所述喷嘴的挡板,所述挡板能够在打开位置和关闭位置之间枢转地移动。

13. 根据权利要求10所述的系统,进一步包括设置在所述反应堆容器的下封头的外表面处的底部流孔喷嘴,其与在所述衬里和所述反应堆井之间形成的所述空气间隙流体相通,

其中,所述底部流孔喷嘴配置成可操作地使所述反应堆井中的冷却水进入所述衬里组件中。

14. 根据权利要求13所述的系统,其中,所述底部流孔喷嘴包括配置成覆盖所述喷嘴的挡板,所述挡板能够在打开位置和关闭位置之间枢转地移动。

15. 一种在冷却剂丧失后用来被动冷却核反应堆的方法,所述方法包括:

将设置在安全壳容器内部反应堆井中装有核燃料堆芯和一次冷却剂的反应堆容器定位;

至少部分地向与所述反应堆井流体连接的贮水槽内注入冷却水;

将来自所述贮水槽的冷却水排放到所述反应堆井内;

用所述燃料堆芯加热所述冷却水;

将所述冷却水至少部分地转换为蒸汽;

将所述蒸汽积聚到所述反应堆井内;

使所述蒸汽流过热交换器;

在所述热交换器内凝结所述蒸汽以形成冷凝液;以及

使所述冷凝液流到所述反应堆井中;

其中,所述冷却剂蒸汽和冷凝液在所述热交换器和反应堆井之间通过闭式流动环路循环。

16. 根据权利要求15所述的方法,其中,所述蒸汽在设置于所述反应堆容器外表面上的隔热衬里组件内产生,所述衬里组件经由流孔喷嘴同所述反应堆井流体联通,所述流孔喷嘴设置在所述反应堆容器的顶部和底部处。

17. 根据权利要求15所述的方法,其中,所述热交换器包括一排整体连接到所述安全壳容器上的散热管道。

18. 根据权利要求15所述的方法,其中,所述冷凝步骤进一步包括所述热交换器将所述蒸汽热量排放到环形储存器,所述环形储存器装有环绕所述安全壳容器的水。

冷却剂丧失反应堆冷却系统

[0001] 相关专利申请的交叉引用

[0002] 本申请要求2013年5月28日提交的序列号为No.61/828,017美国临时专利申请的权益,该申请的全文通过引用并入本文。

发明领域

[0003] 本发明涉及核反应堆,特别涉及发生冷却剂丧失和反应堆停堆时使用的无源式反应堆冷却系统。

[0004] 发明背景

[0005] 核反应堆安全壳容器定义为向核电厂的核蒸汽供应系统(NSSS)提供环境隔离的外壳(enclosure),在这种系统中,利用核裂变来产生增压蒸汽。商用核反应堆要求封装在一种保压结构(pressure retaining structure)中,这种结构能够承受假设电厂设施遭遇最严重事故后造成的温度和压力。反应堆及其安全壳容器假设最严重能量释放事故通常有两种。

[0006] 对安全壳容器完整性具有潜在风险的一种热事件是,核电站的核蒸汽供应系统(NSSS)的所有排热路径均丧失,迫使反应堆“紧急停堆”。全厂断电(station black-out)就是这样的一种事故。反应堆内产生的衰变热必须排出,以保护反应堆,防止出现升压失控。

[0007] 另一种热事件是冷却剂丧失(LOCA),在这种热事件下,反应堆冷却剂系统(RCS)的压力安全边界破裂,导致闪水(flash)迅速释放到安全壳容器空间内。反应堆冷却剂(一次冷却剂)在突然降压后会出现爆闪(violently flash),造成安全壳容器空间内压力和温度的快速升高。安全壳容器内空间成为空气和蒸汽的混合区。通常,冷却剂丧失(LOCA)的发生被推断为是装有一次冷却剂水的反应堆冷却剂系统管路破裂所致。冷却剂丧失的直接后果是反应堆冷却剂系统(RCS)的迅速降压和大量一次冷却剂水逸出直到RCS内部压力与安全壳容器内压力均衡为止。核电站设计成在出现RCS减压事故后立即停堆,抑制反应堆的临界性并停止链式反应。然而,从RCS逸入安全壳容器的一次冷却剂的大量热量和堆芯内衰变热的不断产生都是会引起安全壳容器压力出现剧增的能量来源,而安全壳容器压力足够高时会威胁其保压能力。

[0008] 最近,管理机构也已经对安全壳容器结构提出要求能承受来自坠毁飞机的冲击。安全壳容器结构通常都是建造成巨大的钢筋混凝土穹顶来承受冷却剂丧失(LOCA)造成的内部压力。尽管其混凝土壁很厚可以承受飞机的撞击,但遗憾的是,它还是一个良好的隔热器,需要泵浦的排热系统(采用热交换器和泵)来将其不需要的热量排放到外部环境中(将升压降到最小或排除衰变热)。然而,这种排热系统依靠一种结实耐用的动力源(例如,厂外或本地柴油发电机)来为这些泵提供动力。日本福岛在海啸之后随即出现全厂断电事故,这清醒地提醒人们用泵是多么的愚蠢。现有技术中的上述缺陷要求提供一种改进的核反应堆安全壳容器系统。

[0009] 需要的是一种有效的能量排出系统,将冷却剂丧失(LOCA)发生后出现的安全壳容器的内部压力在尽可能短的时间内恢复到正常状态。为了确保这种系统能够赋予其应有的

功能而不会失效,人们进一步期望这种系统应该是依靠重力操作的(即,系统不依靠可用电源来驱动任何泵或电动机)。

发明内容

[0010] 提供了一种冷却剂丧失(LOCA)发生后和整个反应堆停堆时使用的无源式核反应堆冷却系统,该系统可克服上述缺陷。该冷却系统配置成可形成一种完全无源式装置来排出反应堆的衰变热,无需依赖需要可用电源的泵和电动机,也不存在使用电动机和泵的缺陷。在一个实施方式中,冷却系统完全依靠重力和不断变化的流体密度来提取和引导冷却水流过带有热交换器的系统。如果出现冷却剂丧失引起全厂停电或另一种假设事故情况下,其中核燃料堆芯的正常排热路径失去时,诸如,因为一次冷却剂管路管子断裂或其它事件所致时,该冷却系统设计成可无源地从反应堆中提取衰变热量。

[0011] 在一个配置中,无源式冷却系统利用反应堆井中的储备冷却水作为一种载体,通过连接到反应堆安全壳容器壁上的热交换器,提取和排来自反应堆的衰变热。冷却水在反应堆井和热交换器之间的闭式流动环路中通过重力流动,以便通过安全壳容器壁将热量排放到外部散热器(heat sink)中。在一个实施方式中,该散热器可以是一种充有冷却水的环形储存器(annular reservoir),冷却水环绕安全壳容器。

[0012] 在进一步实施方式中,如本文进一步描述,可提供一种冷却水的安全壳容器内辅助储存器(例如,贮槽),其与反应堆井流体连接,以便提供冷却水补充源或储备用水。冷却系统的闭式流动环路可以在反应堆井与辅助储存器热交换器和热交换器之间循环冷却水。

[0013] 在一个实施方式中,冷却剂丧失后可使用的一种无源式反应堆冷却系统包括与散热器热联通的安全壳容器,位于安全壳容器内的反应堆井,至少部分地位于反应堆井内的反应堆容器,所述反应堆容器装有可对反应堆容器中的一次冷却剂进行加热的核燃料堆芯,位于安全壳容器内并与反应堆井流体相通的贮水槽,所述贮水槽装有冷却储水,和位于安全壳容器内的热交换器,所述热交换器通过闭式流动环路与反应堆井流体联通。一次冷却剂失水后,贮水槽配置成可操作地向反应堆井注入冷却水,该冷却水被来自燃料堆芯的热量转换成蒸汽并流过闭式流动环路到热交换器。在一个实施方式中,蒸汽在热交换器内凝结形成冷凝液,以及冷凝液通过重力流回到反应堆井。

[0014] 在一个实施方式中,热交换器包括一排整体连接到安全壳容器上的散热管道。

[0015] 在另一个实施方式中,冷却剂丧失后可使用的一种无源式反应堆冷却系统包括与散热器热联通的安全壳容器,位于安全壳容器内的反应堆井,至少部分地位于反应堆井内的反应堆容器,所述反应堆容器装有核燃料堆芯和被核燃料堆芯加热的一次冷却剂,位于安全壳容器内并与反应堆井流体相通的贮水槽,所述贮水槽装有冷却储水,和位于安全壳容器内的热交换器,所述热交换器通过大气压力闭式流动环路与反应堆井流体联通。一次冷却剂失水后,贮水槽配置成可操作地向反应堆井注入冷却水。充水的反应堆井内的冷却水被燃料堆芯加热并转换成蒸汽,该蒸汽流过闭式流动环路到热交换器并冷凝形成冷凝液,以及冷凝液流回到反应堆井。在一个实施方式中,该热交换器包括一排整体连接到安全壳容器上的散热管道。

[0016] 提供了一种冷却剂丧失后无源式冷却核反应堆的方法。该方法包括:将位于安全壳容器内部反应堆井内装有核燃料堆芯和一次冷却剂的反应堆容器定位;至少部分地向与

反应堆井流体连接的贮水槽内注入冷却水；将来自贮水槽的冷却水排放到反应堆井内；用燃料堆芯对所述冷却水加热；将所述冷却水至少部分地转换为蒸汽；将蒸汽积聚到所述反应堆井内；使所述蒸汽流过热交换器；在热交换器内凝结蒸汽以形成冷凝液；以及使冷凝液流到反应堆井中，其中，所述冷却剂蒸汽和冷凝液在热交换器和反应堆井之间通过闭式流动环路循环。在一个实施方式中，蒸汽在位于反应堆容器外表面上的隔热衬里组件内部生成，所述衬里组件通过流孔喷嘴 (flow-hole nozzles) 与反应堆井流体联通，所述流孔喷嘴位于反应堆容器的底部和顶部。衬里组件可包括多个彼此隔开的衬里。冷凝步骤可进一步包括热交换器，将蒸汽热量排放到装有水的环形储存器中，而该水环绕在安全壳容器周围。热交换器可包括一排在环形储存器附近整体连接到安全壳容器上的散热管道。

[0017] 根据本公开内容的其它方面，本发明进一步提供了核反应堆安全壳容器系统，该系统克服了上述装置中的缺陷，用来将因为热事件而释放到环境中的热量排放到安全壳容器内。安全壳容器系统通常包括采用钢或另一种韧性材料制成的内部安全壳容器和外部安全壳容器外壳结构 (CES)，从而形成双壁安全壳容器系统。在一个实施方式中，在安全壳容器和安全壳容器外壳结构之间提供一种充水环形空间 (annulus)，提供环形冷却储存器。安全壳容器可包括多个纵向传热翅片，这些翅片采用“鳍片”方式从安全壳容器处 (大体) 径向向外延伸。为此，安全壳容器不仅用作反应堆的主要结构保护层，而且配置成可起热交换器作用，与起散热器作用的环形储存器一起使用。为此，如本文进一步所述，有利的是，在热能释放事故期间，诸如冷却剂丧失或反应堆紧急停堆期间，当需要时，安全壳容器提供一种被动 (非泵浦的) 排热系统，来散热和冷却反应堆。

[0018] 在根据本公开内容的一个实施方式中，核反应堆安全壳容器系统包括一种安全壳容器，配置成可置放核反应堆，围绕安全壳容器的安全壳容器外壳结构 (CES)，以及安全壳容器和安全壳容器外壳结构 (CES) 之间形成的环形储存器，用来从安全壳容器空间提取热能。如果安全壳容器内部出现热能释放事故时，安全壳容器产生的热量会被传输到环形储存器中，后者开始工作冷却安全壳容器。在一个实施方式中，环形储存器装有用来冷却安全壳容器的水。一部分安全壳容器可以包括大体径向传热翅片，设在环形储存器内并在安全壳容器和安全壳容器外壳结构 (CES) 之间延伸，以提高将热量散到充水的环形储存器内。当安全壳容器内部发生热能释放事故时，环形空间内的一部分水会蒸发并以水蒸气的形式通过安全壳容器外壳结构 (CES) 环形储存器排放到大气中。

[0019] 该系统的实施方式进一步包括辅助空气冷却系统，其包括多个垂直进气管道，沿周缘间隔配置在环形储存器安全壳容器周围。空气管道与环形储存器和安全壳容器外壳结构 (CES) 外部的环境空气形成流体相通。当安全壳容器内部发生了热能释放事故且环形储存器中的水通过蒸发而基本排空时，空气冷却系统可通过在储存器空间到外部环境之间提供通风路径而开始工作。于是，通风系统便可视为辅助系统，能够继续对安全壳容器进行无休止地冷却。

[0020] 根据另一个实施方式，核反应堆安全壳容器系统包括配置成可置放核反应堆的安全壳容器，环绕安全壳容器的安全壳容器外壳结构 (CES)，在安全壳容器和安全壳容器外壳结构 (CES) 之间形成的用来冷却安全壳容器的充水环形空间，以及从安全壳容器向外伸出并位于环形空间内的多个大体径向翅片。如果安全壳容器内部出现热能释放事故时，通过与安全壳容器外表面和其大体径向翅片的直接接触，安全壳容器产生的热量被传输到环形

空间内的充水储存器中,从而冷却安全壳容器。在一个实施方式中,当安全壳容器内部发生热能释放事故以及环形空间内的水因为蒸发而基本排尽时,空气冷却系统开始工作通过空气管道将外部环境空气抽入环形空间内,以自然对流形式对安全壳容器内产生的热量进行冷却(其会随着时间而成倍下降)。环形区域内的水的存在完全包围了安全壳容器,从而保持安全壳容器内温度分布一致,防止在热能释放事故或事件期间出现安全壳容器扭曲变形。

[0021] 在另一个实施方式中,核反应堆安全壳容器系统包括带有配置成置放核反应堆的圆筒形壳体的安全壳容器,环绕安全壳容器的安全壳容器外壳结构(CES),安全壳容器壳体和安全壳容器外壳结构(CES)之间形成的用来冷却安全壳容器的环形储存器,从安全壳容器向外伸出进入环形空间内的多个外部(大体)径向翅片,以及包括多个垂直进气管道的空气冷却系统,所述进气管道沿周缘间隔配置在环形储存器内安全壳容器周围。空气管道与环形储存器和安全壳容器外壳结构(CES)外部环境空气形成流体相通。在安全壳容器内部发生热能释放事故的情况下,安全壳容器产生的热量经由(大体)径向安全壳容器壁与其内部和外部翅片一起传输到环形储存器中,环形储存器开始工作冷却安全壳容器。

[0022] 根据本公开内容的核反应堆安全壳容器系统的优点和方面包括如下:

[0023] 安全壳容器结构和系统,配置成可无源地(例如,不依靠有源部件,诸如泵、阀门、热交换器和电动机)遏制上述严重能量释放事件;

[0024] 安全壳容器结构和系统,继续自动无限期地工作(例如,人工干预不受时间限制);

[0025] 安全壳容器结构,采用内部和外部加强筋(翅片)加固,配置成可承受抛射物碰撞,诸如坠毁的飞机,而不会失去其主要功能(即,压力和放射性(如果有的话)保持和热排放);以及

[0026] 安全壳容器,装备有通过安全壳容器结构可以随时拆除(或安装)主要设备的设施。

[0027] 附图简要说明

[0028] 下面参照附图介绍本发明的说明性实施方式的特性,其中相同的部件采用相同的标识:

[0029] 图1为根据本公开内容的装有翅片的主反应堆安全壳容器的侧视图,该安全壳容器构成了核反应堆安全壳容器系统的组成部分,一些翅片下部局部被切掉以便露出垂直支柱和周向加强筋;

[0030] 图2为沿II-II线剖开的安全壳容器的横向剖面图;

[0031] 图3为图2所示部分III的详图;

[0032] 图4为核反应堆安全壳容器系统的纵向剖面图,示出了图1所示安全壳容器和外部安全壳容器外壳结构(CES),在安全壳容器和外壳之间形成充水的环形储存器;

[0033] 图5为穿过安全壳容器和安全壳容器外壳结构(CES)的纵向剖面图;

[0034] 图6为核反应堆安全壳容器系统的侧视图,示出了安装后地面以上的外部安全壳容器外壳结构(CES)部分;

[0035] 图7为安全壳容器系统的俯视平面图;

[0036] 图8为沿图7所示的线VIII-VIII剖开的安全壳容器系统的纵向剖面图,示出了核反应堆安全壳容器系统的地面以上和地面以下部分;

[0037] 图9为主反应堆安全壳容器的侧视图,示出了各种截面切口,以便能看到安全壳容器内部的设备以及附加细节;

[0038] 图10为安全壳容器系统的俯视平面图;

[0039] 图11为沿图10的XI-XI线剖开的安全壳容器的纵向剖面示意图;

[0040] 图12为沿图10的XII-XII线剖开的安全壳容器的纵向剖面图;

[0041] 图13为沿图9的XIII-XIII线剖开的安全壳容器的横向剖面图;

[0042] 图14为沿图9的XIV-XIV线剖开的安全壳容器的横向剖面图;

[0043] 图15为沿图9的XV-XV线剖开的安全壳容器的横向剖面图;

[0044] 图16为核反应堆安全壳容器系统的局部纵向剖面图,示出了辅助散热系统;

[0045] 图17为安全壳容器的等距视图,安全壳容器(大体)径向翅片的下部被局部切掉,以便露出垂直支柱和周向加强筋;

[0046] 图18为图16所示散热系统的局部纵向剖面图,示出了连接到安全壳容器的壳体上的上下环形集管(ring headers)和管道;

[0047] 图19为核反应堆安全壳容器系统的整体横剖面 and 充水环形储存器的使用的示意图,用来在热能释放事件期间散热和冷却安全壳容器;

[0048] 图20示出了本公开内容的反应堆容器和反应堆冷却系统的相关部分,用来在冷却剂丧失(LOCA)情况下冷却反应堆堆芯;

[0049] 图21示出了用来冷却反应堆堆芯的整个反应堆冷却系统和安全壳容器结构;

[0050] 图22为侧面横剖面图,示出了反应堆井和反应堆容器的下部,所示带有隔热衬里系统和流孔喷嘴配置;

[0051] 图22A和22B为图22的详图,示出了流孔喷嘴;以及

[0052] 图23的示意图给出了一次冷却剂和二次冷却剂流过反应堆容器和蒸汽发生器的情况。

[0053] 所有附图都是示意性的,并不一定成比例。本文所参照的一张图(例如,图22)带有相关的子部分(例如,图22A和22B),应视为对整个图和子部分的引用,除非另有说明。

[0054] 实施方式的具体说明

[0055] 下面参照说明性实施方式说明和描述本发明的特性和益处。说明性实施方式的如下介绍应结合附图阅读,这些附图被视为整个书面说明的组成部分。为此,本公开内容显然不应限定在这些说明性实施方式上,这些实施方式说明了一些可能的非限定性的特征结合形式,这些特性可能独立存在或以特性其它结合形式存在。

[0056] 在介绍本文所公开的实施方式中,任何有关方向和方位的参照都仅仅是为了便于介绍,决不是限定本发明的范围。相对术语,诸如“下面的”,“上面的”,“水平的”,“垂直的”,“在…上方”,“在…下方”,“上”,“下”,“顶部”和“底部”以及其派生词(例如,“水平地”,“向下地”,“向上地”等)都应视为是指当时所述的或所讨论之附图所示的标称方向。这些相对术语都只是为了叙述方便,并不要求装置应严格按术语所指具体方向来制造或操作使用。术语,诸如“依附”、“附着”、“连接”、“联接”、“互联”以及类似术语系指结构件通过中间结构件直接或间接地彼此相互固定或连接的一种关系,以及移动或刚性的连接形式或连接关系,除非另有明确描述。

[0057] 参照图1—图15,示出了根据本公开内容的核反应堆安全壳容器系统100。系统100

通常包括诸如安全壳容器200的内部安全壳容器结构和外部安全壳容器外壳结构 (CES) 300, 一起构成安全壳容器-外壳组件200-300。安全壳容器200和安全壳容器外壳结构 (CES) 300为垂直伸长型和垂直定向, 并形成垂直轴线VA。

[0058] 在一个实施方式中, 安全壳容器-外壳组件200-300配置成埋入地下, 至少部分在地面以下 (另见图6至图8)。安全壳容器-外壳组件200-300可以通过混凝土基底301来支撑, 后者包括底板302和自底板向上垂直延伸的侧壁303, 形成顶部基垫 (base mat) 304。如图所示, 侧壁303可以沿周缘封闭安全壳容器200, 其中, 安全壳容器的下部可以置于侧壁内部。在一些实施方式中, 侧壁303可以在安全壳容器200置于底板302上之后浇筑 (底板可先浇筑和放置), 从而将安全壳容器200下部完全置于基底内部。如图所示, 在一些实施方式中, 基底的壁303的终点在地面以下, 为安全壳容器-外壳组件200-300防止抛射物撞击 (例如, 坠毁的飞机等) 提供了附加保护。从俯视图看去, 基底301可以采用任何合适配置, 包括 (但不限于) 多边形 (例如, 矩形、六边形、圆形等)。

[0059] 在一个实施方式中, 安全壳容器200的重量主要由安全壳容器位于其上的底板302支撑, 安全壳容器外壳结构 (CES) 300可由基垫304来支撑, 基垫在基底301侧壁303的顶部形成。可以使用其它合适的安全壳容器和安全壳容器外壳结构 (CES) 支持装置。

[0060] 继续参照图1至图15, 安全壳容器200可以是伸长型容器, 包括空心的圆筒形壳体204, 带有形成外径D1的圆形的横截面, 上封头206, 以及下封头208。在一个实施方式中, 安全壳容器200 (即壳体和封头) 都可采用合适的坚固和韧性的便于焊接的金属板和棒材制成 (例如, 低碳钢)。在一个实施方式中, 低碳钢壳体204厚度为至少1英寸。可以使用其它合适的金属材料, 包括各种合金。

[0061] 上封头206可以通过法兰接头210而连接到壳体204上, 法兰接头包括位于上封头下端或底部上的第一环形法兰212, 和位于壳体上端或顶部的第二匹配环形法兰214。法兰接头210可以为螺栓接头, 选择进一步为装配后密封焊接, 在邻接法兰212和214之间进行沿周缘延伸的环形密封焊接。

[0062] 安全壳容器200的上封头206可以是一种ASME (美国机械工程师学会) 穹顶形法兰连接的和碟状的封头以增加结构强度 (即保持内部压力和抗外部撞击); 然而, 也可以使用其它可能的配置, 包括扁平上封头。同样, 下封头208也是一种穹顶形的碟状封头, 或者在其它可能的实施方式中为扁平形封头。在一个安全壳容器结构中, 下封头208可以通过封头的整个直边 (SF) 部分直接焊接到壳体204的下部或下端, 所述直边部分与壳体的直径相同。在一个实施方式中, 安全壳容器200的底部可包括连接到下封头208上的带加强筋的支架208a或类似结构, 以帮助安全壳容器在基底301底板302上的稳定并可向其提供水平支撑, 如下将详细介绍。

[0063] 在一些实施方式中, 安全壳容器的壳体204的顶部216可以直接是壳体的加大部分, 形成箱体以支撑和容纳用来在安全壳容器内移动设备、燃料等的回转式吊车 (图中未示)。这样, 吊车就可进入安全壳容器的内部周缘并可将设备紧靠安全壳容器200周缘放置, 使得安全壳容器结构更紧凑。因此, 在一个配置中, 安全壳容器200的地面以上部分是一种类似于蘑菇形状的结构。

[0064] 在一个可能的实施方式中, 安全壳容器200的加大的顶部216的外径D2大于安全壳容器的壳体204邻接下部218其余部分的外径D1。在一个非限定性示例中, 顶部216的直径D2

比壳体204下部218直径D1大近乎10英尺。壳体204的顶部216的合适高度H2可选择为使回转式吊车拥有工作间隙,该间隙可小于安全壳容器200总高度H1的50%。在一个非限定性示例中,与安全壳容器总高度H1为200英尺相比,安全壳容器200顶部大约10英尺(H2)可以通过加大顶部直径216来形成。安全壳容器200的顶部216在上端与法兰214相端接,即在与安全壳容器上封头206的法兰连接处。

[0065] 在一个实施方式中,安全壳容器200顶部加大部分216的直径D2小于安全壳容器外壳结构(CES)300的内径D3,以提供(大体)径向间隙或二次环形空间330(例如,见图4)。这样,如果安全壳容器外壳结构(CES)受到抛射物撞击时,在安全壳容器外壳结构(CES)300和安全壳容器顶部216之间提供一种缓冲空间或缓冲区。此外,环状空间330进一步明显形成了主环形空间313(安全壳容器外壳结构(CES)300和安全壳容器200的壳体之间)和封头空间318之间的流动路径,所述封头空间位于安全壳容器外壳结构(CES)穹顶316和安全壳容器200上封头206之间,以便蒸汽和/或空气从安全壳容器外壳结构(CES)排出,下面将详细介绍。为此,辅助环形空间330与主环形空间313和封头空间318流体相通,而封头空间则又与穿过穹顶316的通风口317流体相通。在一个实施方式中,辅助环形空间330的(大体)径向宽度小于主环形空间313。

[0066] 参照图1-图4,在一些实施方式中,安全壳容器外壳结构(CES)300可以是双壁结构,该结构带有由两个(大体)径向间隔隔开并互连的同心壳体310(内)和311(外)形成的侧壁320,无钢筋或带有钢筋混凝土312置于二者之间的环形空间内。同心壳体310,311可采用任何合适的强固的材料制成,诸如(但不限于)便于焊接的韧性金属板(例如,低碳钢)。可以使用其它合适的金属材料,包括各种合金。在一个实施方式中(但不限于),双壁安全壳容器外壳结构(CES)300可以是厚度6英尺以上的混凝土312,确保足够能够承受高能抛射物撞击,诸如客机撞击。

[0067] 安全壳容器外壳结构(CES)300包围着安全壳容器的壳体204并(大体)径向地与壳体204隔开,从而形成主环形空间313。在一个实施方式中,环形空间313可以充水以形成散热器,用来在安全壳容器内部出现热能释放事故时接收和排放来自安全壳容器200的热量。在一个实施方式中,这种充水的环形储存器优选围绕安全壳容器壳体204上部周缘沿周向延伸整整360度,所述壳体204位于混凝土基底310上方。图4示出了充水环形空间313的横截面,为了清晰起见,该图未示出外部(大体)径向翅片(radial fins)221。在一个实施方式中,环形空间313内充的水从底端314的基垫304处流到安全壳容器外壳结构(CES)300的同心壳体310、311的大约顶端315,在安全壳容器外壳结构(CES)的安全壳容器壳体204和内同心壳体310之间形成环形冷却储存器。在一些实施方式中,这种环形储存器使用合适的防腐材料涂层或衬里,诸如铝、不锈钢,或合适的防腐涂料。在一个代表性示例中(但不限于),环形空间313大约10英尺宽,大约100英尺高。

[0068] 在一个实施方式中,安全壳容器外壳结构(CES)300包括钢质穹顶316,厚度适当,并经过加强坚固可抵抗撞击飞机和其它入射的抛射物。穹顶316采用坚固法兰接头318可拆除地固定到同心壳体310,311上。在一个实施方式中,安全壳容器外壳结构(CES)300在所有外露的地面以上部分上整个被安全壳容器外壳结构(CES)300包围,该结构优选足够高,可保护安全壳容器防止飞机危害或类似抛射物撞击,保持安全壳容器周围环形空间313内的水团(water mass)的结构完整性。如图所示,在一个实施方式中,安全壳容器外壳结构

(CES) 300垂直向地面以下延伸相当一部分距离,直到基垫304顶部。

[0069] 安全壳容器外壳结构 (CES) 300可进一步包括至少一个防雨通风口317,其与穹顶316下方的封头空间318和充水环形空间313流体联通,使得水蒸汽能够流动、逸出和排放到大气环境中。在一个实施方式中,通风口317可以位于穹顶316中央。在其它实施方式中,可提供多个通风口,在穹顶316周围(大体)径向间隔配置。在一些实施方式中,通风口317可以采用一小段管路来形成,该管路被任何合适配置的防雨罩来覆盖,这样,既可使蒸汽从安全壳容器外壳结构 (CES) 逸出,但又将浸水降到最小。

[0070] 在一些可能的实施方式中,穹顶316和安全壳容器200上封头206之间的封头空间318可用能量吸收材料或结构来填充,将对来自坠毁(下落)冲击(例如,客机等)对安全壳容器外壳结构 (CES) 穹顶316所引起的碰撞载荷降到最小。在一个示例中,封头空间局部或全部使用了多个紧密填充的波浪形或波纹状的可变形铝板,以形成褶皱区域,这有助于吸收并排放作用在穹顶316上的冲击力。

[0071] 主要参照图1-5和图8-17,基垫304下方混凝土基底301内的安全壳容器200被埋部分可以带有无外部特征的普通壳体204。然而,基垫304上方的安全壳容器外壳204各部分都可包括多个纵向外部(大体)径向加强筋或翅片220,这些部件(大体)平行于安全壳容器-外壳组件200-300的垂直轴线VA而轴向延伸。外部纵向翅片220在安全壳容器壳体204周缘沿周向间隔隔开并从安全壳容器处(大体)径向向外延伸。

[0072] 加强筋220具有多个有利功能,包括(但不限于):(1)加强安全壳容器的壳体204,(2)防止发生地震时环形空间313内的储水过度“来回晃荡(sloshing)”,以及(3)重要的是,在安全壳容器内出现流体/蒸汽释放情况下,能起传热“翅片”的作用,将通过壳体204传导而吸收的热量排放到环形空间313的环境中。

[0073] 为此,在实现传热效率最大化的一个实施方式中,纵向翅片220垂直延伸充水环形空间313的近乎整个高度,覆盖了安全壳容器200的有效传热表面(即,未埋入混凝土基底内的部分),将安全壳容器200热量传输到储存器中,如下将进一步介绍。在一个实施方式中,外部纵向翅片220带有上水平端220a和下水平端220b,上水平端220a的终点在安全壳容器200较大直径顶部216的下方或底部处或其附近,下水平端220b的终点在混凝土基底301的基垫304处或其附近。在一个实施方式中,外部纵向翅片220的高度H3等于或大于安全壳容器的壳体的总高度的一半。

[0074] 在一个实施方式中,纵向翅片220的上水平端220a为自由端,并不永久地连接(或焊接)到安全壳容器200或其结构上。纵向翅片220的下水平端220b的至少一部分可对接地接触和坐落在水平周缘加强筋222上,后者焊接到安全壳容器的壳体204的外表面上,有助于支撑纵向翅片220的重量并将作用在纵向加强筋至壳体焊接点上的应力减到最小。周缘加强筋222呈环形,可围绕安全壳容器的壳体204的周缘延伸整整360度。在一个实施方式中,周缘加强筋222位于混凝土基底301的基垫304上,将纵向翅片220的载荷传输到基底上。纵向翅片220的侧向范围或宽度向外伸出,并伸过周缘加强筋222的外周缘边缘。为此,在这个实施方式中,只有每个加强筋220的下水平端220b的内部接触周缘加强筋222。在其它可能的实施方式中,周缘加强筋222可以(大体)径向地向外延伸,延伸到足以使每个纵向加强筋220的整个下水平端220b落座在周缘加强筋222上。在一些实施方式中,下水平端220b可焊接到周缘加强筋222上,以进一步增强和加固纵向翅片220。

[0075] 外纵向翅片220可以采用钢(例如,低碳钢)或其它合适金属材料制成,包括合金,都可在其中一个纵向延伸侧面焊接到安全壳容器的壳体204的外部。每个加强筋220的相对的纵向延伸侧面位于安全壳容器外壳结构(CES) 300内同心壳体310内部附近,但优选不用永久固定在其上,将起散热翅片作用的加强筋的传热表面实现最大。在一个实施方式中,外纵向翅片220(大体)径向向外延伸过安全壳容器220的较大直径顶部216,如图所示。在一个代表性示例中,但不限于此,钢质加强筋220的厚度可以为大约1英寸。根据情况,可使用其它合适厚度的加强筋。为此,在一些实施方式中,加强筋220的径向宽度是加强筋厚度的10倍以上。

[0076] 在一个实施方式中,纵向翅片220的方向与安全壳容器的壳体204构成斜角A1,如图2-3和图5清楚所示。该方向形成了一种皱褶区域,该区域围绕安全壳容器200的周缘延伸360度,从而与外部安全壳容器外壳结构(CES) 300配合而更好地抗击抛射物的撞击作用。为此,导致安全壳容器外壳结构(CES)的壳体210,211向内变形的撞击会折弯纵向翅片220,在这个过程中,纵向翅片220会优选分布撞击力,而不会直接传送到并折断内部安全壳容器的壳体204,而这种情况在加强筋方向与安全壳容器壳体204为90度时则很可能会出现。在其它可能的实施方式中,根据安全壳容器外壳结构(CES) 300的构造和其它因素,加强筋220与安全壳容器壳体204成垂直配置是合适的。

[0077] 在一个实施方式中,参照图6-8,带有外部(大体)径向翅片220并受其保护防止抛射物撞击的安全壳容器壳体204各个部分都可延伸到地面以下,防止抛射物撞击安全壳容器外壳结构(CES) 300或刚刚进入地面以下的结构部分。为此,在基底301垂直延伸侧壁303顶部处形成的基垫304则可位于地面以下若干英尺,翅片220下端终点就在基底处,从而改善核反应堆安全壳容器系统的抗撞击性。

[0078] 在一个实施方式中,安全壳容器200可选择包括多个沿周向间隔隔开的内部(大体)径向翅片221,其连接到壳体204的内表面上(如图2和3的虚线所示)。内部翅片221从安全壳容器的壳体204处(大体)径向向内延伸并沿合适高度的垂直方向纵向延伸。在一个实施方式中,内部(大体)径向翅片221的高度大体上与充水环形空间313的高度相同并从基垫304处延伸到壳体204的大约顶部。在一个实施方式中,但不限于此,内部翅片221的方向大体上垂直(即90度)于安全壳容器壳体204。可以使用其它合适的角度和倾斜方向。内部翅片的作用是,如果出现安全壳容器增压事故(例如,LOCA或反应堆紧急停堆),增加可利用的热传输表面面积和结构上增强安全壳容器壳体抗击外部撞击(如抛射物)或安全壳容器200内压力上升。在一个实施方式中,但不限于此,内部翅片221可以采用钢制成。

[0079] 参照图1至图15,多个垂直结构支柱331连接到安全壳容器壳体204外表面上,以帮助支撑安全壳容器200的较大顶部216,该部分周边(大体)径向向外悬臂伸出,伸过壳体204。支柱331沿安全壳容器壳体204周缘隔开配置。在一个实施方式中,支柱331可以采用钢质空心结构件来形成,例如,但不限于,横截面为C形的构件(即,结构槽钢),这些构件焊接到安全壳容器壳体204外表面上。通过使用连续或间断焊接工艺,诸如针脚焊接(stitch welds),沿每个支柱331高度,可将槽钢的两个平行腿(parallel legs)垂直地焊接到安全壳容器壳体204上。

[0080] 支柱331从安全壳容器较大直径顶部216的底部/下方垂直向下延伸并可在其顶端处焊接到该底部/下方上,所述较大直径顶部用来容纳回转吊车。支柱331的低端支撑在或

焊接到周缘加强筋222上,该加强筋在安全壳容器埋入部分附近连接混凝土基底301的基垫304。支柱331帮助将来自回转吊车和安全壳容器300顶部216的一部分静载荷或重量向下传输到基底上。在一个实施方式中,支柱内部的空心部分可充有混凝土(带或不带螺纹钢筋),协助加强和进一步支撑静载荷或重量。在其它可能的实施方式中,可以使用其它结构钢形状,包括填充的或未填充的箱型梁、工字梁、管材、角钢等。纵向翅片220可沿(大体)径向方向比支柱331更向外延伸,纵向翅片与加强筋220一样起结构作用而不是起传热作用。在某些实施方式中,加强筋220的(大体)径向宽度是支柱的(大体)径向宽度的至少两倍。

[0081] 图11-15示出了安全壳容器200的各种横截面(纵向和横向),其内装有设备。在一个实施方式中,安全壳容器200可以是小型模块式反应堆(SM)系统的组成部分,诸如霍尔泰克国际股份有限公司(Holtec International)的SMR-160。所述设备通常包括核反应堆容器500和蒸汽发生器502,核反应堆容器位于湿井(wet well)504内并形成在其内装核燃料堆芯和循环一次冷却剂的内部空间,蒸汽发生器则流体连接到反应堆上并循环二次冷却剂,构成兰金发电循环的组成部分。例如,2013年10月25日提交的PCT国际专利申请(No.PCT/US 13/66777)介绍了这样一种系统,该申请全文通过引用在此并入本文。可提供其它装置和设备以形成一个完整的蒸汽发生系统。

[0082] 2013年4月25日提交的国际PCT申请(No.PCT/US 13/38289)对蒸汽发生器502进行了更为全面的介绍,该申请全文通过引用并入本文。正如该申请所述以及本申请图11,12和24所示,蒸汽发生器502可以垂直走向,并可轴向伸长,类似于浸没式管束热交换器620。蒸汽发生器502可以包括一套管式热交换器,垂直堆砌配置,用来通过重力驱动无源式流动装置来提取来自一次冷却剂的反应堆衰变热。

[0083] 图23示出了在反应堆和发电站正常运行期间,电站涡轮发电机组(T-G)提供可利用电源的情况下,一次冷却剂(液态水)和二次冷却剂(液体供给水和蒸汽)流过反应堆容器和蒸汽发生器的循环流动环路。为了本文讨论,流体连接的蒸汽发生器502和反应堆容器500之间的一次冷却剂流形成了第一闭式流动环路。在一个实施方式中,一次冷却剂流在反应堆容器500内被核燃料堆芯501加热时,依靠冷却剂的温度和相应密度的变化情况,被重力驱动,然后,当热量传输到兰金循环的二次冷却剂回路时,在蒸汽发生器502内被冷却,兰金循环带动涡轮发电机组。一次冷却剂的不断变化的不同温度所形成的压力水头(即,热时为低密度和冷时为高密度)在反应堆容器-蒸汽发生容器系统内引导流动或循环,如方向流动箭头所示。

[0084] 一般来讲,关于第一闭式流动环路,一次冷却剂由核燃料堆芯501加热并沿立管224向上流动。来自反应堆容器500的一次冷却剂然后流过反应堆容器500和蒸汽发生器502之间的一次冷却剂流体接头273,并进入蒸汽发生器。一次冷却剂在位于立管337中央内向上流动到蒸汽发生器顶部的稳压器380处。一次冷却剂改变方向并通过蒸汽发生器502管侧向下流动,通过流体接头273而返回到反应堆容器500处,在流体接头处,冷却剂进入环形下降环腔(downcorner)222,形成一次冷却剂的流动环路。

[0085] 蒸汽发生器502可包括三个垂直堆砌的传热部分,从下往上,预热器部分351、蒸汽发生器部分352、和过热器部分350(例如,见图11,12和23)。二次冷却剂在蒸汽发生器502容器的壳侧流动。液态供给水形式的二次冷却剂来自兰金循环的涡轮-发电机组(T-G),进入预热器部分351内底部的蒸汽发生器,并向上流过蒸汽发生器部分352,转换为蒸汽。蒸汽向

上流入过热器部分350并达到过热状态。从那儿,过热的蒸汽被提取并流向涡轮发电机组(T-G)而发电。

[0086] 辅助散热系统

[0087] 现在,主要参照图2-3,图16,和图18,安全壳容器200可进一步包括辅助散热系统340,该系统包括独立的一套或一排散热管道341(HDD)。在一个实施方式中,辅助散热系统340和相关的散热管道341可构成无源式反应堆芯冷却系统的组成部分,下面将详细介绍,并如图22和图23所示。

[0088] 散热管道341包括多个内部纵向管道(即,流动管道),围绕安全壳容器壳体204的周缘周向隔开配置。管道341与垂直轴线VA平行垂直延伸,并在一个实施方式中,这些管道连接到壳体204的内表面上。管道341可采用金属制成,诸如钢,并可焊接到壳体204内部。在一个可能的配置中,但不限于此,管道341可包括垂直走向的C形结构槽钢(横截面)或管材的半截面,以便槽钢两个支腿或管子都可在其整个高度上滚焊到壳体204上,从而形成密封的垂直流动管道。因此,在这个实施方式中,散热管道中的流体(液体或蒸汽相)直接接触反应堆安全壳容器200,通过安全壳容器而将热量最大限度地传输到环形储存器(主环形空间313)中的水里,储存器形成了反应堆安全壳容器200和散热管道的散热器。只要管道中输送的流体接触至少一部分内部安全壳容器的壳体204来将热量传输至充水环形空间313,就可提供这种类型结构的其它合适形状和配置的散热管道341。

[0089] 在其它可能的但并不是最佳的可接受实施方式中,散热管道341可采用完全管状壁流动管道来形成(例如,全周向管截面,而不是半截面),这些都焊接到内部安全壳容器的壳体204上。在这些类型的结构中,管道341内所输送的流体将首先通过管道的壁间接地传输热量给反应堆安全壳容器的壳体204,而后再输送到充水的环形空间313。

[0090] 根据冷却流经管道的流体所要求的传热表面面积,可提供任何合适数量和配置形式的管道341。管道341可均匀地或非均匀地间隔配置在安全壳容器的壳体204的内部,且在一些实施方式中,成组的管束可以沿周向分布在安全壳容器的周围。根据管道所输送的流体流量和传热考虑因素,管道341可以带有任何合适的横截面尺寸。

[0091] 管道341的敞开的上下端部341a,341b都可流体连接到共用的上进水环形集管(ring header)343和下出水环形集管344上。环形集管343,344垂直彼此隔开,以合适高度设置在安全壳容器200的内部,从而使管道341内垂直流动流体和安全壳容器的壳体204之间的热量传输在主动传热区内最大化,该传热区由安全壳容器各个部分构成,所述各个部分带有位于主环形空间313内的外纵向翅片220。为了利用主充水环形空间313来进行传热,上下环形集管343,344都可分别位于安全壳容器的壳体204的内部,邻近于环形空间的顶部和底部。

[0092] 在一个实施方式中,如图所示,环形集管343,344都可采用弧形弯曲的钢管的半截面形成,按所示方式直接焊接到安全壳容器的壳体204的内表面上。在其它实施方式中,环形集管343,344都可采用弧形弯曲管子的整个截面来形成,以任何合适方式由壳体204的内部来支撑并与其相连接。

[0093] 在一个实施方式中,散热系统340流体地连接到蒸汽源上,后者从安全壳容器200内部的水团产生,以排出反应堆芯的放射性物质衰变热。由管道341所封闭的安全壳容器表面用作传热表面来将管道内部的蒸汽的潜热送到安全壳容器200的壳体204,用来通过外部

纵向翅片220和充水环形空间313来进行冷却。在使用时,蒸汽进入进水环形集管343并分配到穿过集管的管道341的敞开进水端。蒸汽进入管道341并沿安全壳容器的壳体204内部高度在其内向下流动,蒸汽经历从蒸汽到液体的相变。冷凝的蒸汽通过管道中的重力排出,被下面的环形集管344收集,蒸汽从该集管处返回到蒸汽源,在一个实施方式中,同样优选采用重力进行。应该注意的是,在上述过程中没有涉及到或不需要任何泵。

[0094] 应该清楚的是,在某些实施方式中,提供了不止一组或一排散热管道341,这些管道配置在由安全壳容器形成的安全壳容器空间内的内部安全壳容器200的内表面上。

[0095] 辅助空气冷却系统

[0096] 根据本公开内容的另一个方面,如果由于某种原因主环形空间313内的储水在热反应堆相关事件期间要排空时(例如,LOCA或反应堆紧急停堆),提供了一种辅助或备用的无源式空气冷却系统400,以便启用自然对流对安全壳容器200进行空气冷却。参照图8,空气冷却系统400可由多个垂直进气管道401组成,这些管道在主环形空间313内围绕安全壳容器200沿周向间隔配置。每个空气管道401包括进气口402,其穿过安全壳容器外壳结构(CES)300的侧壁320,通向外部大气环境,以吸入环境冷却空气。进气口402优选位于安全壳容器外壳结构侧壁320的上端附近。空气管道401在环形空间313内部垂直向下延伸,其端部在基底的基垫304上方不远距离处(例如,大约1英尺),以便空气从管道的敞开低端逸出。

[0097] 通过使用空气导管401,配合环形空间313建立自然对流冷却空气流路。如果主环形空间313内的冷却水量因为热事件而蒸发排空时,自动启动自然对流空气冷却,因为环形空间内部的空气将继续被安全壳容器200加热。经过加热的空气在主环形空间313内上升,流过二次环形空间330,进入封头空间318,并通过通风口317而流出安全壳容器外壳结构(CES)300的穹顶316(见方向流动箭头,图8)。上升的经加热的空气在朝向主环形空间313的底部造成空气压力下降,足够通过空气管401而向下吸取外部环境空气,从而建立了自然循环模式,继续冷却被加热的安全壳容器200。有利的是,这种无源式空气冷却系统和循环可以继续无限期地冷却安全壳容器200。

[0098] 应该注意的是,主环形空间313起的作用是安全壳容器200内部产生的热量的最终散热器。另外,该环形储存器内的水的作用是将吊车所有垂直支柱331(如前所述)的温度保持在基本同一温度上,从而始终确保吊车轨道(图中未示)的水平,这些轨道安装在安全壳容器200的较大部分216内。

[0099] 下面结合图19简要介绍反应堆安全壳容器系统100作为热交换器的使用原理。该图为反应堆安全壳容器系统100的简化示意图,此处为了清晰起见,没有示出所有的装置设备和结构部件,旨在说明系统所执行的主动传热和排热程序。

[0100] 在冷却剂丧失(LOCA)情况下,高能流体或液态冷却剂(其通常为水)会逸出而进入安全壳容器200所形成的安全壳容器环境中。液体瞬间闪蒸为蒸汽,水蒸气会与安全壳容器内部的空气混合而后流向安全壳容器200侧壁或壳体204的内表面(因为环形空间313内的水的缘故,安全壳容器的壳体会比较冷)。水蒸气然后在垂直壳体壁上凝结,将其潜热留给安全壳容器结构金属上,后者通过纵向翅片220和环形空间内壳体204的裸露部分再将热量排放到环形空间313内的水中。环形空间313内的水加热并最终蒸发形成水蒸气,水蒸气在环形空间内上升并通过辅助环形空间330、封头空间318离开安全壳容器外壳结构(CES)300,最终经由通风口317而进入大气环境中。

[0101] 在某些实施方式中,由于环形空间313内的储水器位于安全壳容器环境的外部,储水量可以使用外部装置(如果有的话)而很容易地补充,以便补偿水的蒸发损失。然而,如果不能提供或没有补充水,那么,环形空间313内水柱的高度会开始下降。当环形空间313内的水位降低时,安全壳容器200也开始对水位上方环形空间内的空气加热,从而将一部分热量排放到空气中,空气上升并经由通风口317随水蒸气一起从安全壳容器外壳结构(CES)300排出。当水位下降到一定程度,即空气管401的敞开底端(例如,见图8)暴露于水线上方时,那么,新鲜的外部环境空气会从上述的空气管401被吸入而开始自然对流空气循环模式,从而继续冷却安全壳容器200。

[0102] 在一个实施方式中,提供了一些预备措施(例如,进水管路)穿过安全壳容器外壳结构(CES)300用于环形空间313内的水补充,尽管为确保适当散热是不需要的。该环形储水器内的储水量被计量为使得安全壳容器200内产生的衰变热量会充分下降,从而一旦水量排空时,安全壳容器能够只通过空气冷却就可排出其所有热量。安全壳容器200优选具有充分的排热能力,通过迅速排放热能,以限定安全壳容器内水蒸气混合物的压力和温度(在其设计极限内)。

[0103] 如果出现全厂停电事故,反应堆芯会被强制进行“紧急停堆”,无源式堆芯冷却系统将会对堆芯的蒸汽形式的衰变热量排放,蒸汽会被引向散热系统340的上进气环形集管343,如上所述(例如,见图16和图18)。然后,蒸汽向下流过内部纵向管道网341,与安全壳容器的壳体204内表面接触,内表面封装在散热管道内部,蒸汽通过排放其潜热而凝结到安全壳容器结构金属上,在纵向翅片220提供的传热协助下,安全壳容器金属结构进而排放热量至环形空间内的水中。环形储水器(主环形空间313)内的水最终加热蒸发。安全壳容器200通过适当加热和然后通过蒸发和空气冷却的结合形式,以及然后进一步最终只通过所述自然对流空气冷却方式而将热量排放到环形空间。如上所述,反应堆安全壳容器系统100设计并配置成,一旦环形空间313内的有效水量被完全排空时,仅通过空气冷却也足以将衰变热量排出。

[0104] 在上述两种情景下,排热可以无限期地继续,直到替代装置可以使电厂恢复使用。系统不仅可以无限期地使用,而且,这种使用是完全无源的,无需使用任何泵或操作手干预。

[0105] 无源式反应堆冷却系统

[0106] 根据本发明的另一个方面,提供了一种无源式重力驱动核反应堆冷却系统600,以排放冷却剂丧失后反应堆停堆(例如,“紧急停堆”)期间反应堆的衰变热量。冷却系统并不依靠那些需要可利用电源的泵和电动机,也没有因使用泵和电动机而带来的缺陷。为此,反应堆冷却系统600可在核电站停电期间方便使用。

[0107] 参照图20和图21,在一个实施方式中,无源式反应堆冷却系统600是一种大气压力闭环流动系统,在一个实施方式中,包括三个流体连接的主要部件或分系统,即,(i)反应堆井620,(ii)一套或一排独立的散热管道341(HDD),整体连接到安全壳容器内壁上(如上所述),以及(iii)装有冷却储水的安全壳容器内反应堆贮水槽630。在反应堆停堆和冷却剂丧失期间,反应堆冷却系统600配置成可利用从贮水槽注入反应堆井620内的冷却水来提取由燃料堆芯所产生的热能,在缺少可利用电源的情况下,燃料堆芯会持续无限期地产生热量,如下将详细介绍。虽说图20和图21示出了注水情况下的反应堆井620,应该注意的是,在冷

却剂丧失发生前,在反应堆正常发电工作方式期间,反应堆井是干的和空的。

[0108] 参照图20至图23,装有核燃料堆芯501的反应堆容器500位于由整料(monolith)621所形成的反应堆井620内。整料621在内部安全壳容器200内部形成(图21详图所示)。反应堆容器500通常由垂直伸长圆筒形壳体(侧壁)和封闭的下封头505构成。为此,如图所示,反应堆容器500为垂直走向,反应堆容器的大部分高度或长度都位于反应堆井内部。反应堆井620是一种环绕反应堆容器500的空的环形空间,在反应堆正常发电运行期间,该空间是干的和未充水的。反应堆容器500的下封头505在反应堆井620的底部上方,彼此隔开。反应堆井620的顶部可用关闭结构来部分地或全部地封闭。在一个实施方式中,关闭结构可用环形的反应堆支撑法兰至少部分地构成,该法兰沿反应堆容器500的周围沿周向延伸。环形支撑法兰可用整料621来支撑。如果需要对顶部完全密封时,可提供附加的结构和其它构件(例如,金属、混凝土、密封装置、垫片等)以补充支撑法兰632并密封反应堆井顶部630,以便更好地获取反应堆井内的蒸汽,将其引向辅助散热系统340,如下进一步介绍。

[0109] 反应堆井620的外壁可以采用一层或多层不锈钢衬里700来隔断,在层与层之间形成小间隙或空气间隙(例如,见图22,22A,22B)。为了对反应堆井空间进行进一步冷却,在一些实施方式中,在层间空间内循环冷却水。不锈钢衬里用来阻止对形成反应堆井的整料621进行全面加热。

[0110] 参照图20和图22(包括子部分A和B),反应堆容器500的外表面也可采用衬里组件来隔热,衬里组件包括一层或多层金属衬里701,层间带有小空隙或空气间隙,用来阻断反应堆正常运行期间反应堆堆芯501所产生的热量外流。在一些非限定性示例中,衬里可优选为不锈钢或铝;然而,可以使用其它适合反应堆井环境的金属。优选地,在一个实施方式中,衬里701可以完全围绕周缘和反应堆容器500整个高度延伸,所述高度系指位于反应堆井620内部分,包括反应堆容器下封头505下方部分。因此,位于反应堆井内的反应堆容器500的整个周缘都可使用衬里701,这样,在反应容器500外表面和最外侧衬里510之间设置多个衬里。

[0111] 由衬里701组成的隔热衬里组件可包括一排一个或多个流孔,可由位于反应堆容器500上侧壁(壳体)区域和反应堆井620内的顶部流孔喷嘴702构成,在一个实施方式中,优选位于穿过反应堆容器的第一管子下方。喷嘴702与反应堆井620内形成的隔热衬里组件和空间内的空气间隙(小空隙)流体相通。因此,顶部的流孔喷嘴702位于反应堆容器侧壁外表面上,但并不与反应堆容器500的内部以及其内的一次冷却剂形成流体相通。虽然在一些实施方式中喷嘴702可以连接到用于支撑的反应堆容器外表面上,但喷嘴也可配置成与如上所述反应堆容器外部的侧衬里701组件形成的空气间隙实现流体相通。例如,在一个实施方式中,这个可以通过提供在衬里701之间空气间隙附近喷嘴702上的侧向孔来实现。顶部流孔喷嘴702配置成可操作地排放在衬里组件内部流动的蒸汽并可将蒸汽排放到反应堆井中,如下将进一步介绍。

[0112] 顶部流孔喷嘴702可以围绕反应堆容器沿周向间隔配置。在一个非限定性实施方式中,在近乎同一高度上使用了四个顶部流孔喷嘴702。可以提供顶部流孔喷嘴702的其它配置形式和数量。

[0113] 对于反应堆容器500下封头505附近的容器衬里701,也可提供一个或多个底部流孔喷嘴703。在一个实施方式中,可提供一个较大的喷嘴703,在弧形的反应堆容器下封头

505上的最低点处,该喷嘴与反应堆容器500中心线CL同心对准。喷嘴703可以采用与顶部流孔喷嘴702相同方式来被支持、设定成和配置,以便形成与底部衬里701和反应堆井620之间空气间隙(小空隙)流体相通。因此,喷嘴703的制作和使用类似于顶部流孔喷嘴702,由反应堆容器500内部和其内的一次冷却剂支持,但并不与之流体相通。底部流孔喷嘴703配置成可操作地允许来自贮水槽630内反应堆井中的冷却水进入隔热衬里组件的下部,如下进一步介绍。

[0114] 顶部流孔喷嘴702可以带有这些关闭挡板704,当反应堆容器500和衬里701之间空隙充有空气时,设计用来在反应堆正常运行期间保持关闭状态(例如,见图22A)。挡板和喷嘴的结合形成翻板阀(flap valve)。挡板704均可枢轴地移动并在其顶端通过枢轴705连接到各自喷嘴702上。可以提供任何合适类型的枢轴,诸如,但不限于,销接头或自铰链(self-hinge),其中挡板采用挠性材料制成,诸如耐高温的聚合物。挡板704可以采用任何合适金属或非金属材料制成。挡板704的垂直走向和重量通过重力使其相对于喷嘴702自由端而保持在关闭位置。在其它实施方式中,包括阀体和挡板的市场上已有的翻板阀可安装在顶部流孔喷嘴702自由端上,以提供相同的功能。

[0115] 在反应堆容器500和衬里701之间的空隙填充有空气时,在反应堆正常运行期间,底部的流孔喷嘴703也通常都被挡板706所关闭(例如,见图22B)。在一个实施方式中,挡板706可以通过带有漂浮浮子(buoyant float)709的浮动装置而保持关闭,浮子709采用连杆臂(linkage arm)708刚性连接到挡板一端。挡板706和连杆臂708组件采用枢轴707枢转地联接到底部喷嘴703上,诸如,但不限于,在一个实施方式中,销接头。挡板706优选采用刚性金属或非金属材料制成,为的是在关闭位置时相对于喷嘴703自由端而保持其形状和密封状态。

[0116] 在运行时,当反应堆井620在反应堆正常运行期间为空的时,重力向下作用在浮子709上。于是,促使浮子709和挡板706组件逆时针方向转动而迫使挡板顶在喷嘴703的自由端上。当冷却剂丧失期间贮水槽630水注入反应堆井620内时,如下将详细介绍,上升的水会使得浮子709向上顺时针方向转动。与此同时,挡板顺时针向下转动打开喷嘴703,水进入反应堆容器500金属壳体壁和不锈钢衬里701之间的空气间隙内。

[0117] 在无源式反应堆冷却系统600启动后,当贮水槽630内的冷却水W进入到衬里701之间的空气间隙并与金属反应堆容器500壁接触时,水蒸发产生蒸汽而升高空气间隙内压力。这种压力累积迫使顶部流孔喷嘴702的挡板704打开并释放蒸汽堆积进入到反应堆井620内,后者随后被引向辅助散热系统340的散热管道341,如本文进一步介绍。于是,冷却水W通过底部流孔喷嘴703的打开的挡板706而进入衬里701并通过顶部流孔喷嘴702以蒸汽形式从衬里组件被排出。

[0118] 现在参照图20和图21,整料621进一步形成了大型安全壳容器内冷却水贮水槽630(即,在内部反应堆容器200内,也可参看图1-图19)。贮水槽630储备有冷却水W并流体连接到反应堆井620上,在冷却剂丧失时,将其储备水倾入反应堆井620内。在一个实施方式中,贮水槽630通过上下流动管道633流体连接到反应堆井620上,在上下流动管道内装有倾泄阀用来控制流量。可提供至少一个带有倾泄阀631的流动管道633;然而,在一些实施方式中,可提供两个以上带有倾泄阀的流动管路。倾泄阀可以按全开或全闭方式操作,或者,如果需要,也可选择部分打开方式控制。在反应堆正常发电运行期间,倾泄阀可以为正常关闭

状态,防止冷却水W通过流动管道而注入到反应堆井620内。倾泄阀631可以通过电气或气动阀门操作器来自动打开。在一个实施方式中,倾泄阀631可以配置成当阀门失电时为“故障打开”使用方式,以便自动向反应堆井620内注入冷却水W。

[0119] 在一些优选的非限定性实施方式中,冷却水槽630的容量至少与反应堆井62容量一般大或比其大,以优化反应堆堆芯的冷却并补充反应堆井内的任何冷却水W,在反应堆井顶部并非有意完全封闭和/或紧密密封或可能损坏的设计方案中,冷却水会以蒸汽形式进入安全壳容器空间内而失去。

[0120] 下面主要参照图20-22,介绍使用无源式反应堆冷却系统600的一种方法。如本公开内容上面所述,在出现冷却剂丧失的情况下,安全壳容器内的压力和温度会上升。当安全壳容器压力(或温度)达到预定阈值时,使得贮水槽630和反应堆井620相联通的倾泄阀631打开,冷却水W迅速传输到并填充反应堆井。反应堆容器500的隔热衬里701保护其防止出现快速淬火(以及高热应力)。在反应堆井620内的水接近衬里组件701内的顶部流孔喷嘴702时(直到当时反应堆容器通过衬里热传输到反应堆井水而正在经受有限的冷却),然后,冷的冷却水W开始填充衬里和反应堆容器之间的小空隙,从而大大加速反应堆堆芯501和反应堆容器衰变热的提取。

[0121] 在经过一段时间后,反应堆井620内存水池的温度达到沸点温度并开始沸腾。由此而产生的蒸汽通过浮动行动经由进气管路603而上升到辅助散热系统340的一排散热管道341上,如上所述并如图16,18和21所示。这些管道341对在反应堆井池内产生的蒸汽进行凝结并将冷凝液经由排出管603返回到反应堆井620,蒸汽潜热被送到外部环形储存器313内,环形储存器内的水的温度低于蒸汽从而形成与安全壳容器200热联通的散热器。于是,来自逸出的反应堆冷却系统一次冷却剂水的热量(例如,通过一次冷却剂管路破裂)从而被安全壳容器带走,尽管并不是很有效,因为水/气混合物上升并接触安全壳容器的内表面(其装有大型外部和内部翅片220,221,如图3所示和上面所述),便于热量提取。

[0122] 应该注意的是,由于蒸汽和冷凝液密度在不断变化,只要通过重力便可很方便地驱动散热管道341和反应堆井620之间蒸汽和冷凝液的流动,无需泵和可利用的电源。因此,散热管道341优选位于内部的安全壳容器200上,其位置高于反应堆630和反应堆井蒸汽提取点。由进出管路603往返于散热管道341的蒸汽和冷却液流可采用合适阀门625来控制(见图20),该阀门可采用通/断方式操作或进行调节。阀门625可以配置成当阀门失电时来按“故障打开”方式操作,阀门可以带有电气或气动阀门操作器。这样,可实现对反应堆冷却系统600在散热管道341和反应堆井620之间的闭式流动环路便可自动打开和启动。

[0123] 向散热管341输送蒸汽的进气管路603可以流体连接到反应堆井620的顶部,有效地获取积聚蒸汽。排出的冷凝液返回管路603可以流体连接到贮水槽630的顶部,以便有效地获取积聚蒸汽。因此,反应堆井620和散热管道341之间的反应堆冷却系统600的大气闭式流动环路流过贮水槽630(见图21)。

[0124] 如果出现冷却剂丧失时,由于内部的安全壳容器200和外部的安全壳容器外壳结构300之间的环形储存器313内的储水蒸发,从而可以随时补充。然而,如果不能补充,那么,随着储存器313中储水的逐渐下降,通过使用上述无源式空气冷却系统400,采用通风动作开始将热量排放到空气。一旦储存器313中的所有水都蒸发,安全壳容器结构会继续只通过空气冷却来排热。在经过一段长时间的水冷却之后,空气冷却足以将所有衰变热排出。同

样,这种无源式的重力驱动排热过程因为不断变化的空气密度来驱动,这个排热过程继续无限期地对反应堆进行冷却。

[0125] 应该清楚的是,上述方法的数种不同形式都可用来操作使用无源式反应堆冷却系统600。

[0126] 尽管上述介绍和附图代表了一些示例性系统,但应该清楚的是,可以对其进行各种补充、修改和取代,但都没有脱离所附权利要求的等同形式的精神和范围。特别是,所属领域技术人员都很清楚,本发明可以采用其它形式、结构、配置、比例、尺寸进行实施,以及使用其它构件、材料、和部件来执行,但都没有脱离本发明的精神或主要特性。此外,也可以对本文所述的方法/工艺进行各种改动。所属领域技术人员会进一步清楚,本发明可与结构、配置、比例、尺寸、材料,和部件的许多改进形式一起使用,以及在实施本发明时使用,这些都特别适合于特定环境和使用要求,但都没有脱离本发明的原则。因此,本文所公开的实施方式在所有方面都应视为说明性的,而不是限定性的,本发明的范围是由所附权利要求和其等同项来确定的,而不是限定在上述说明或实施方式。相反,所附权利要求应该被宽泛地解释为包括了所属领域技术人员可能会进行的本发明的其它变异形式和实施方式,而没有脱离本发明等同项的范围。

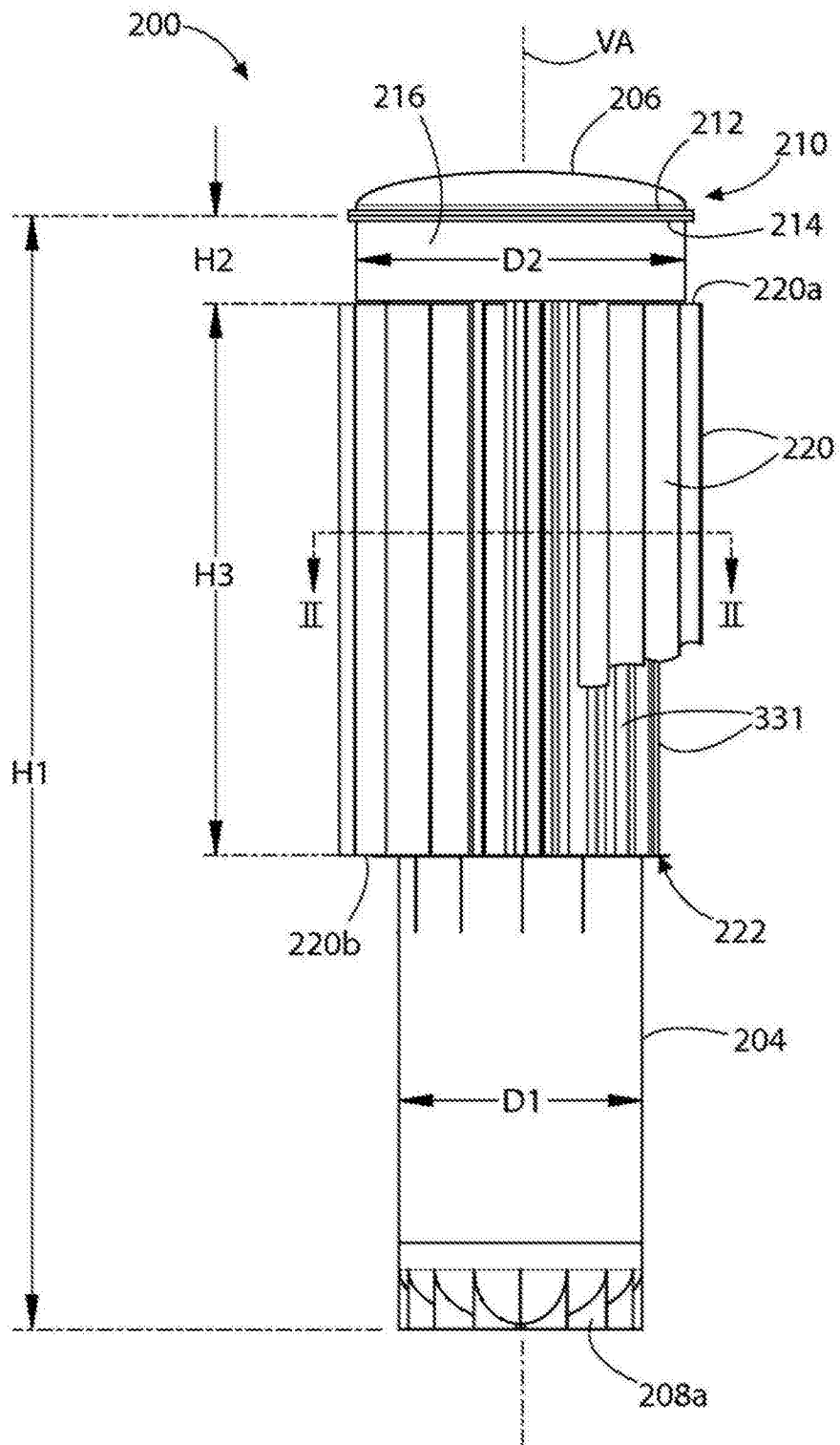


图1

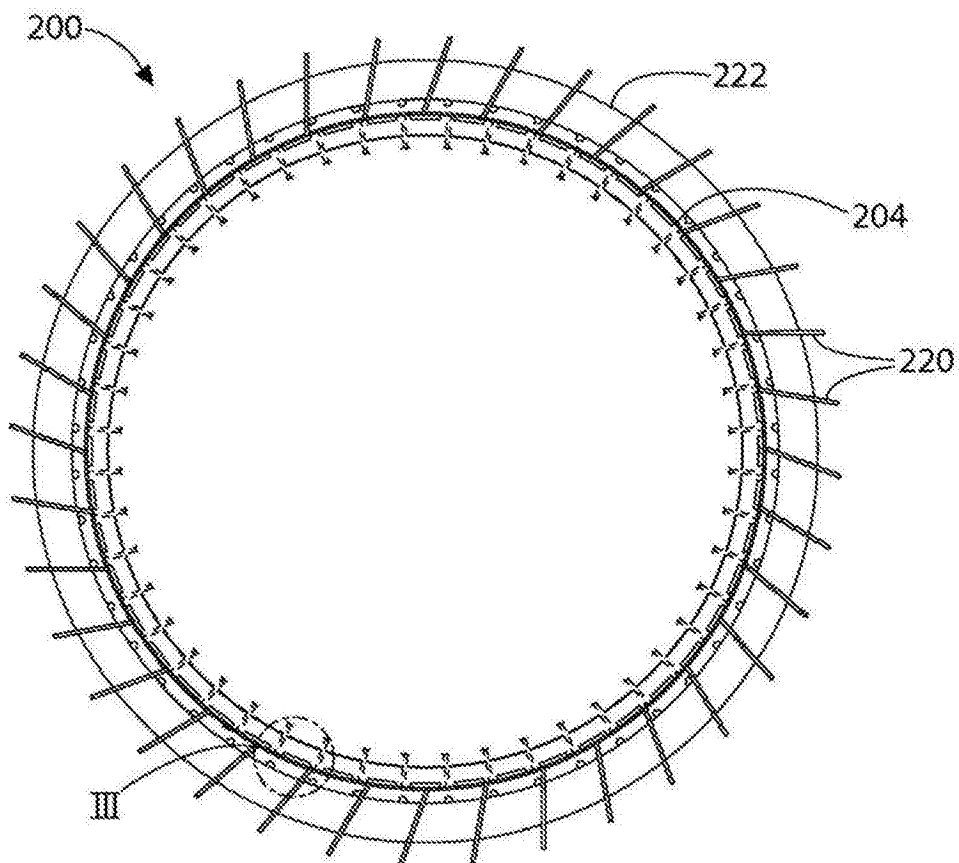


图2

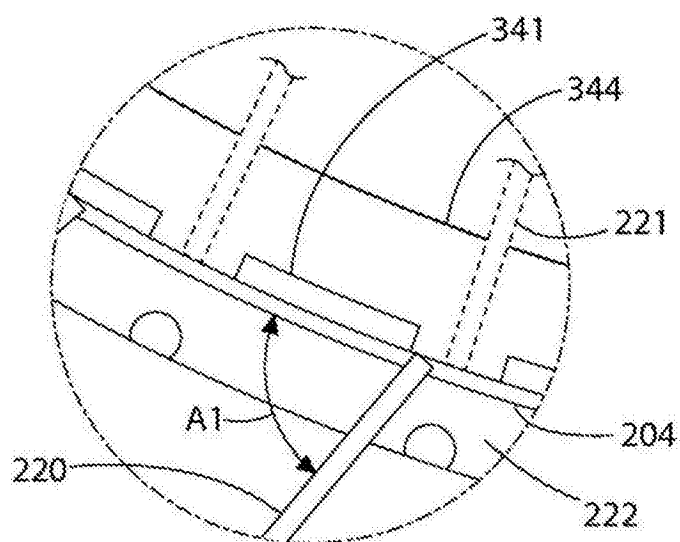


图3

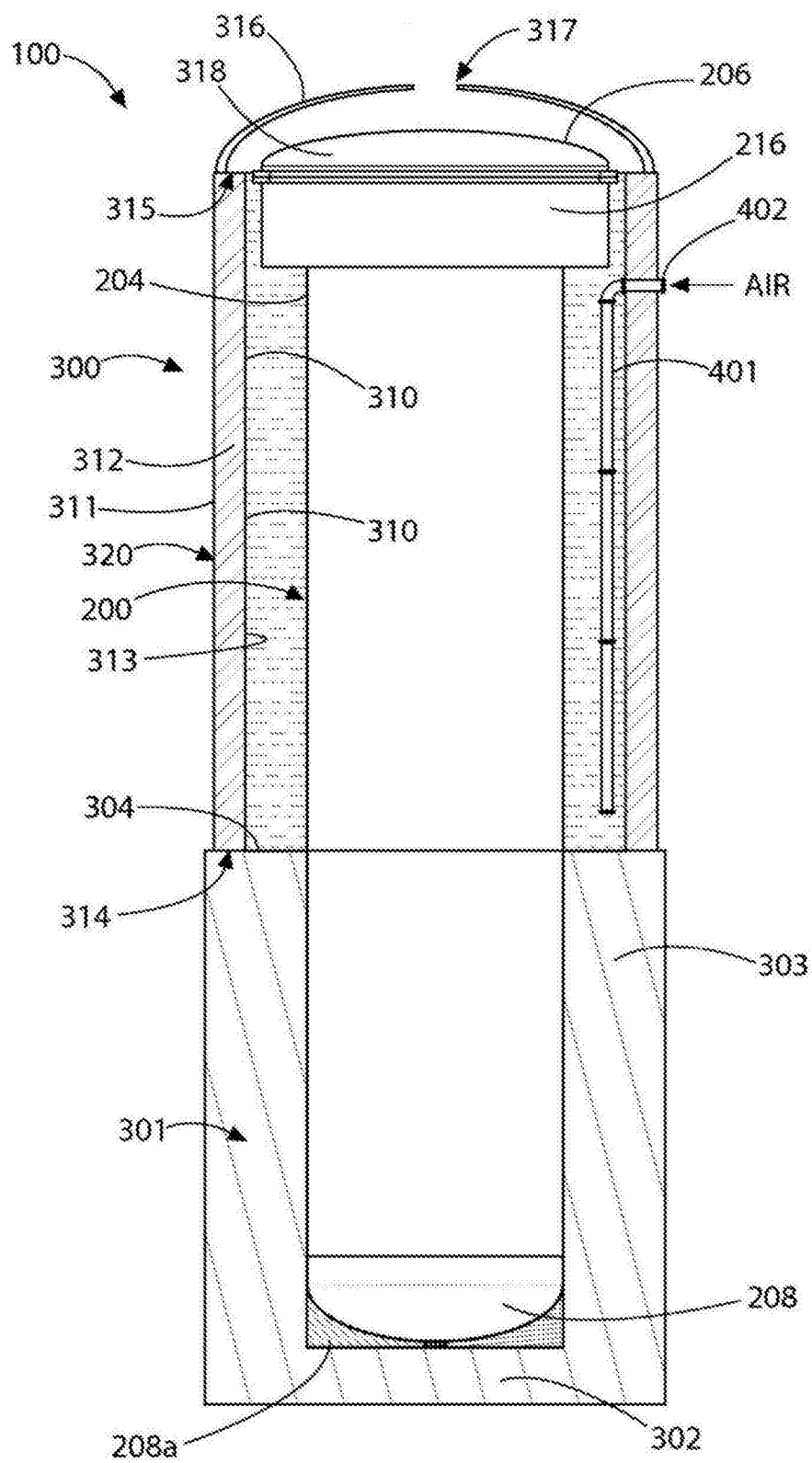


图4

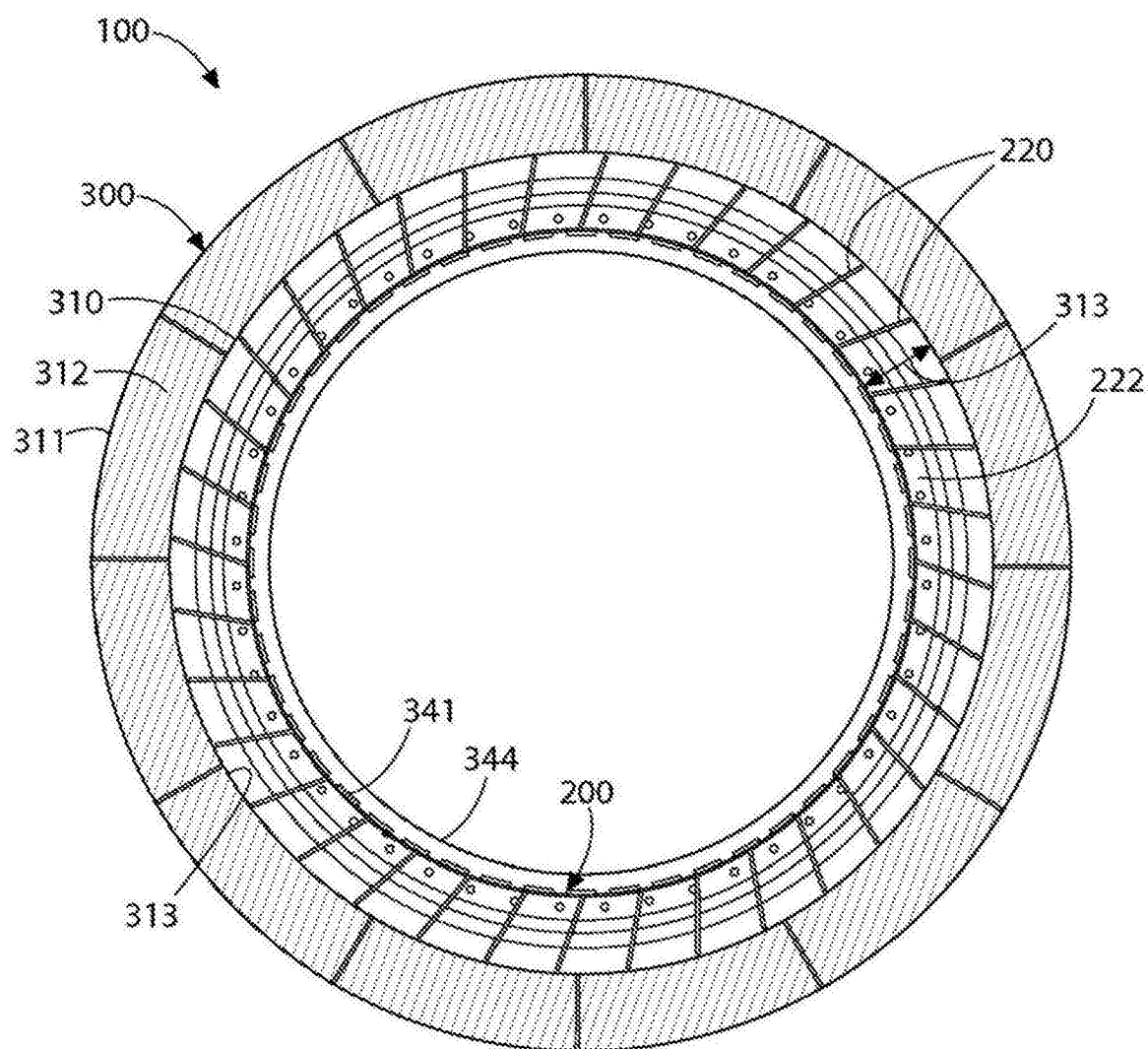


图5

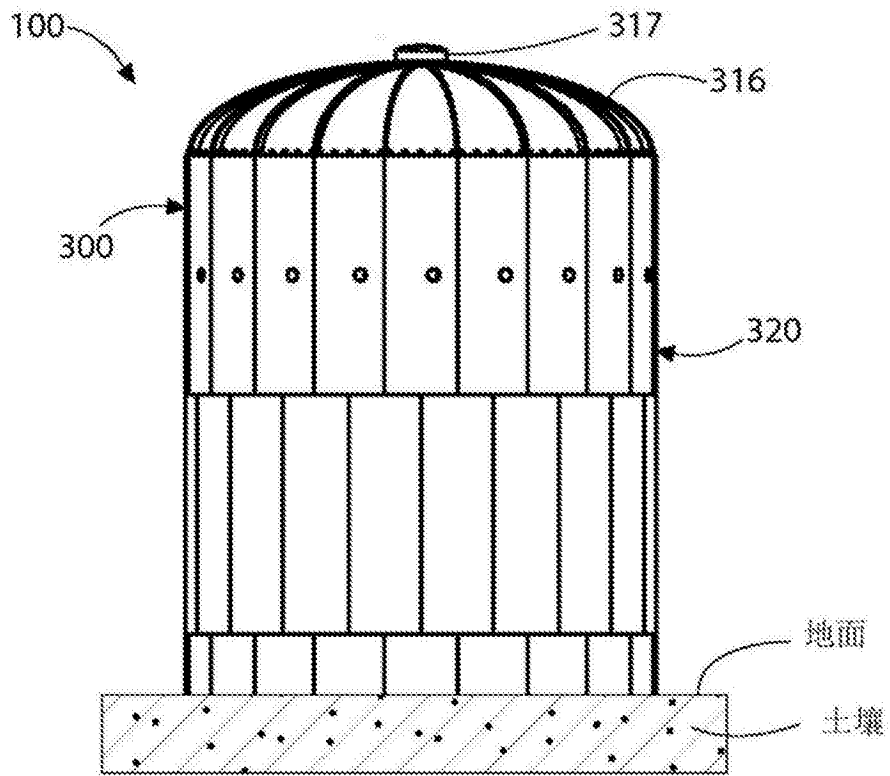


图6

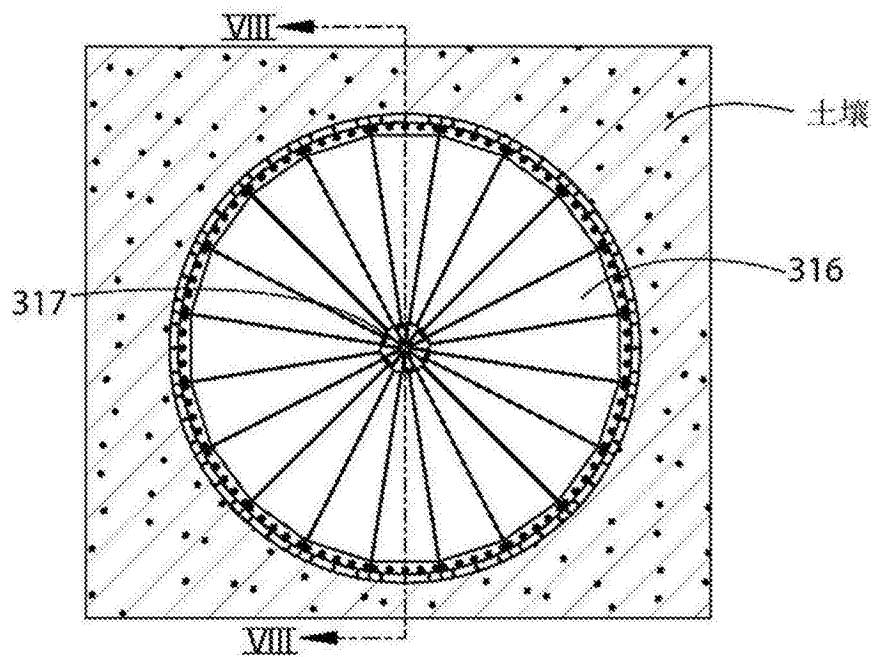


图7

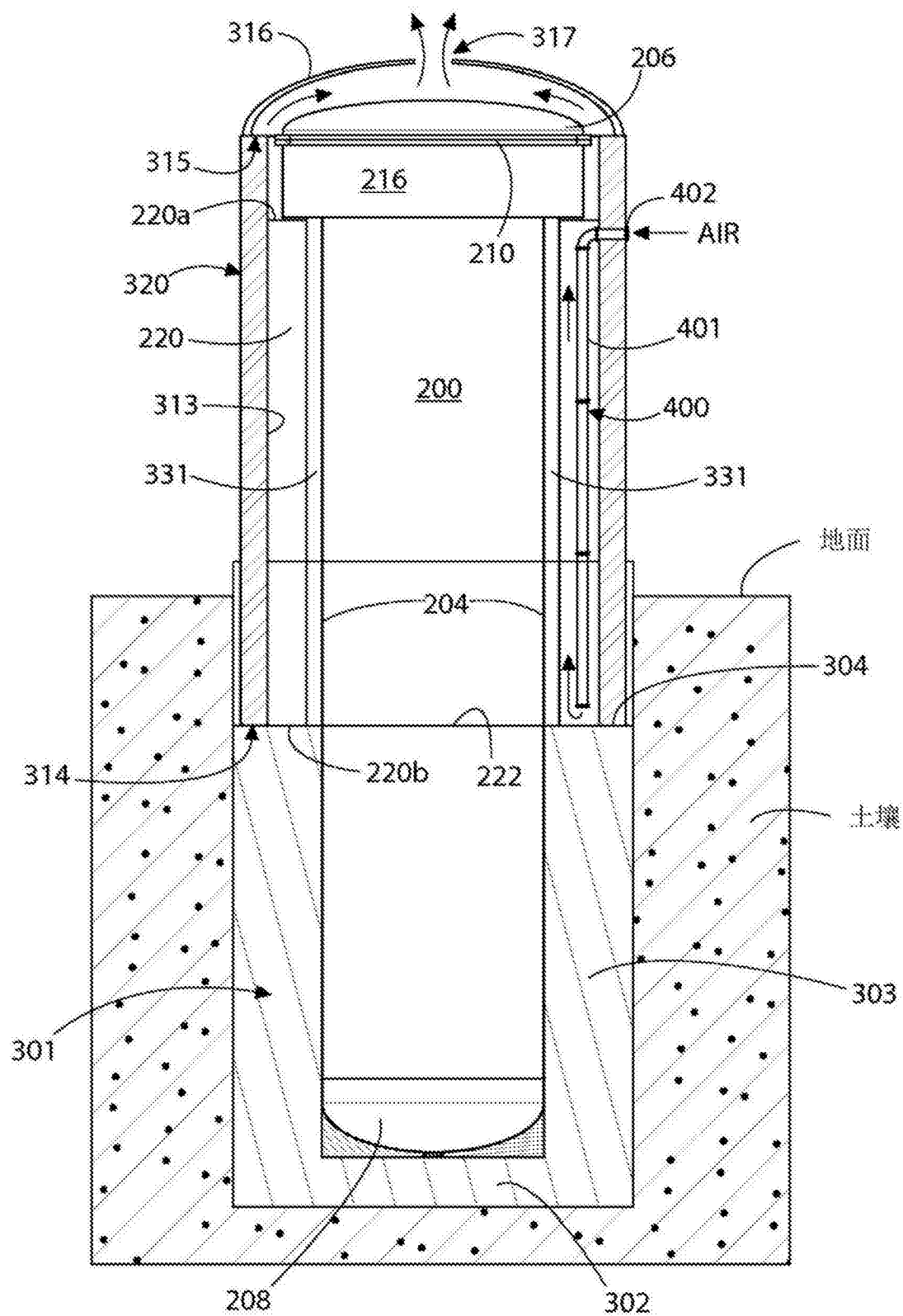


图8

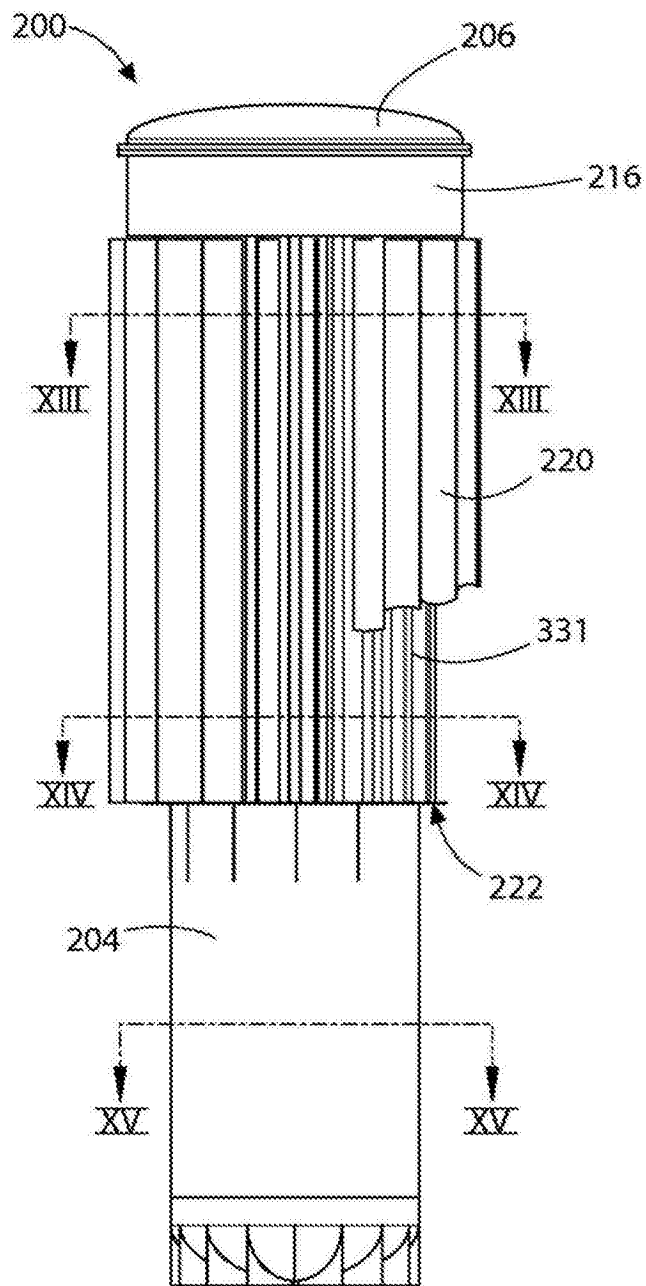


图9

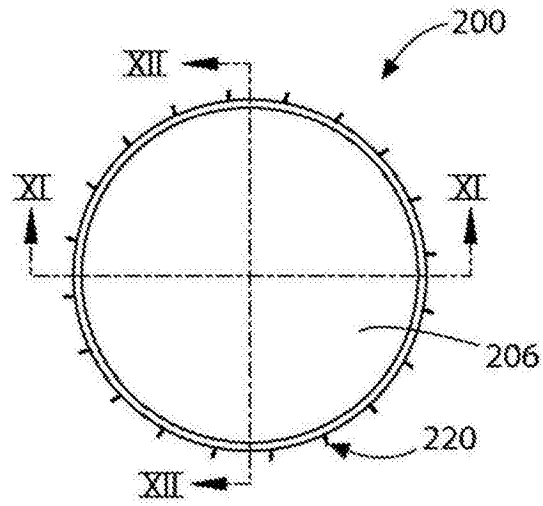


图10

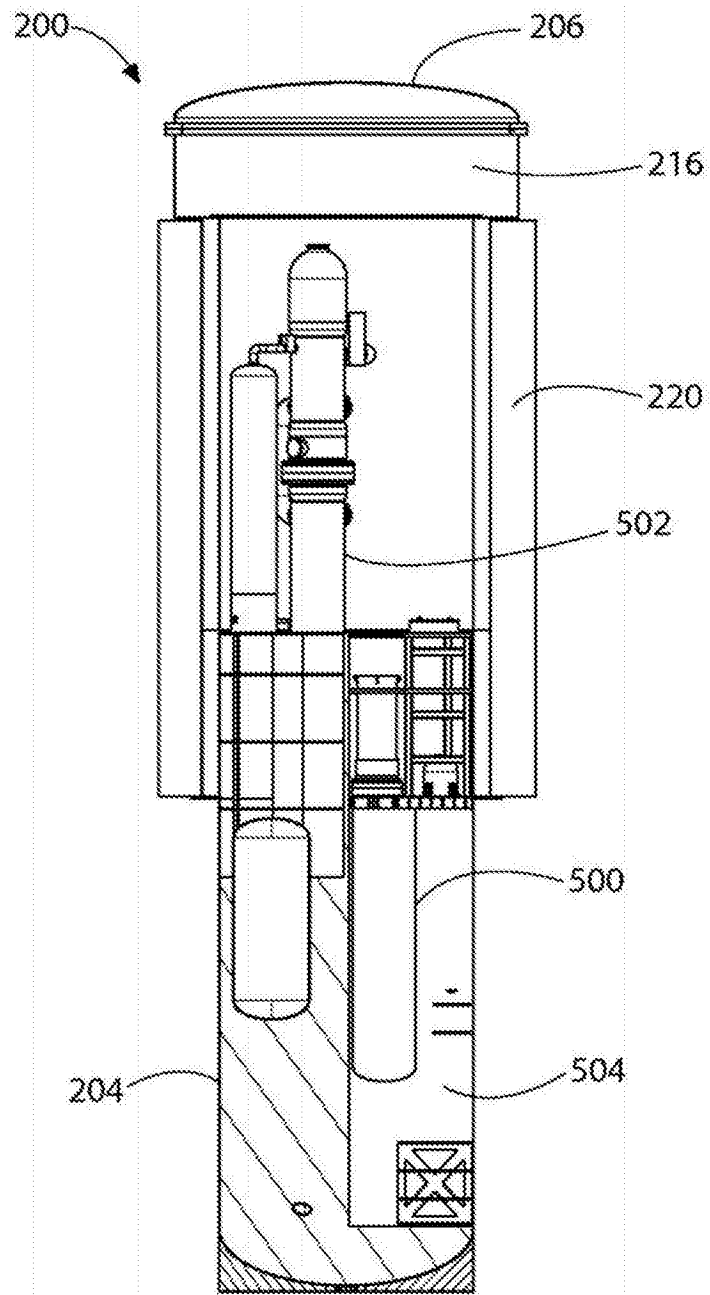


图11

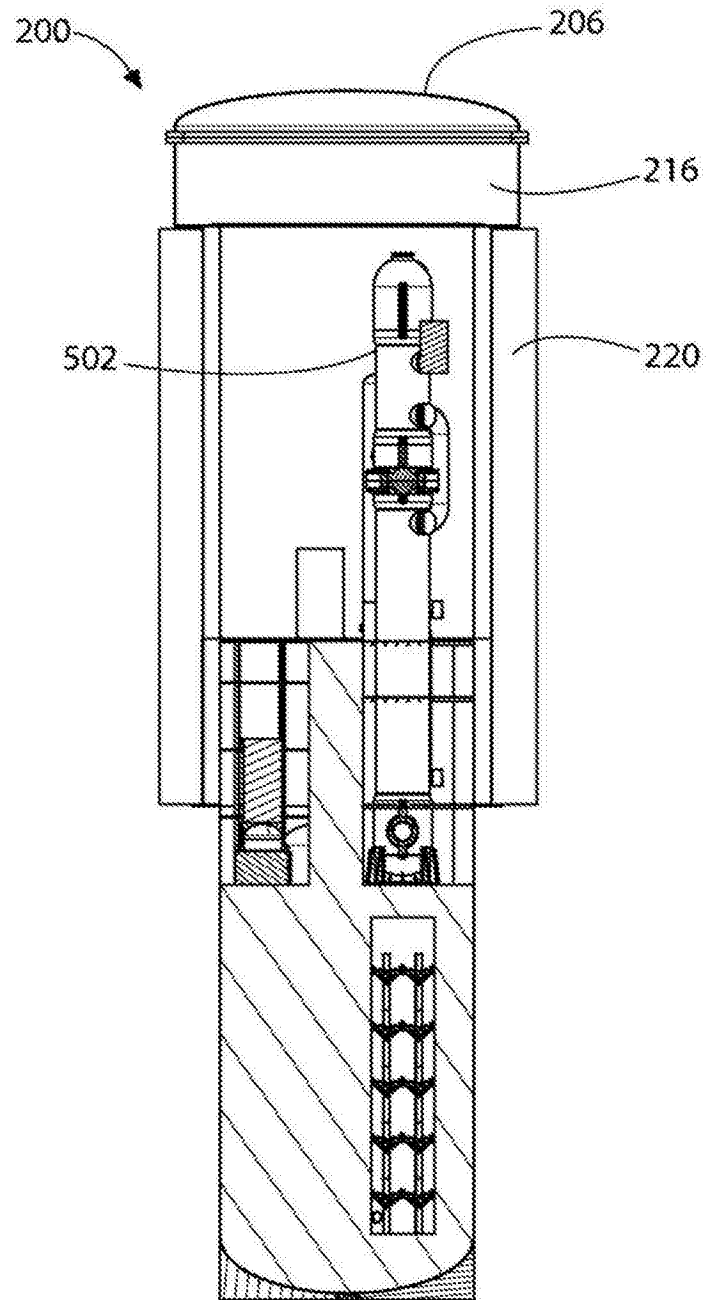


图12

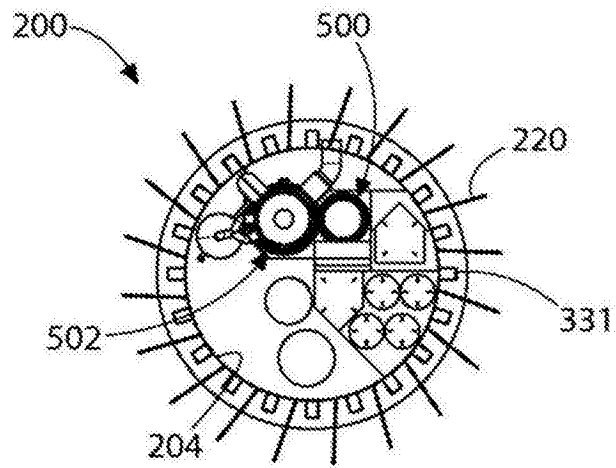


图13

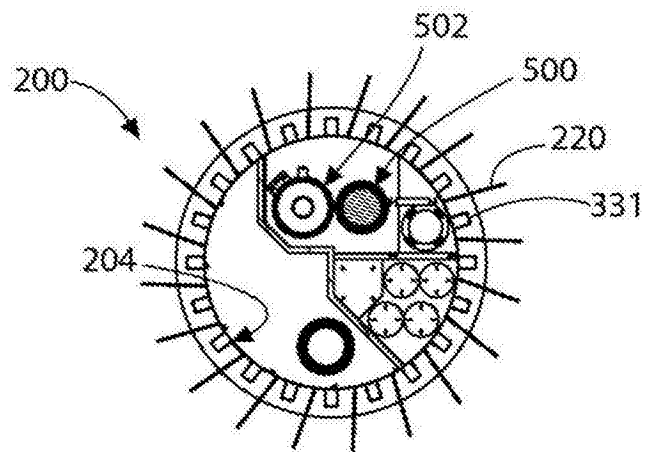


图14

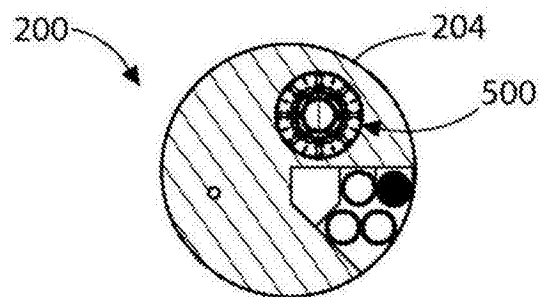


图15

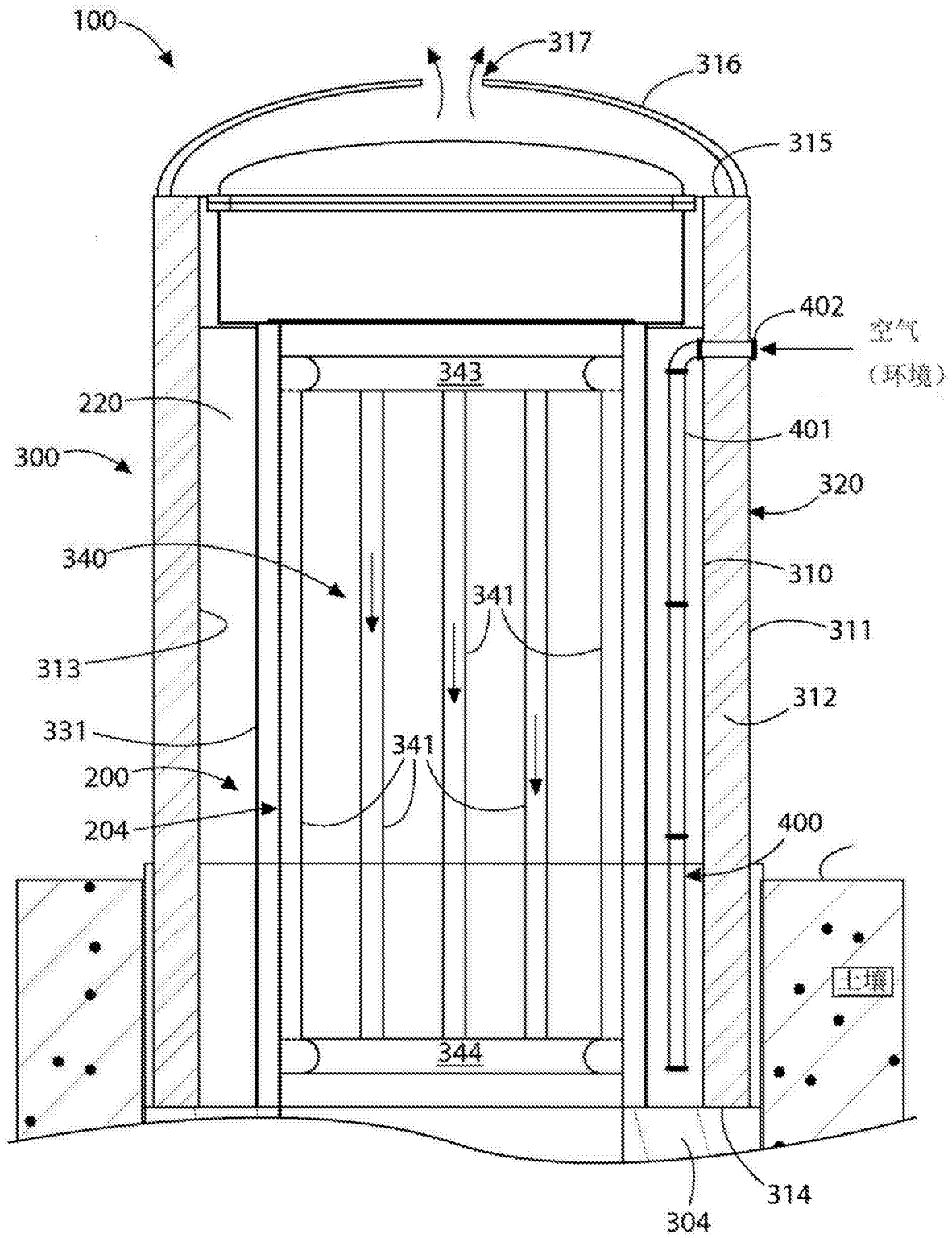


图16

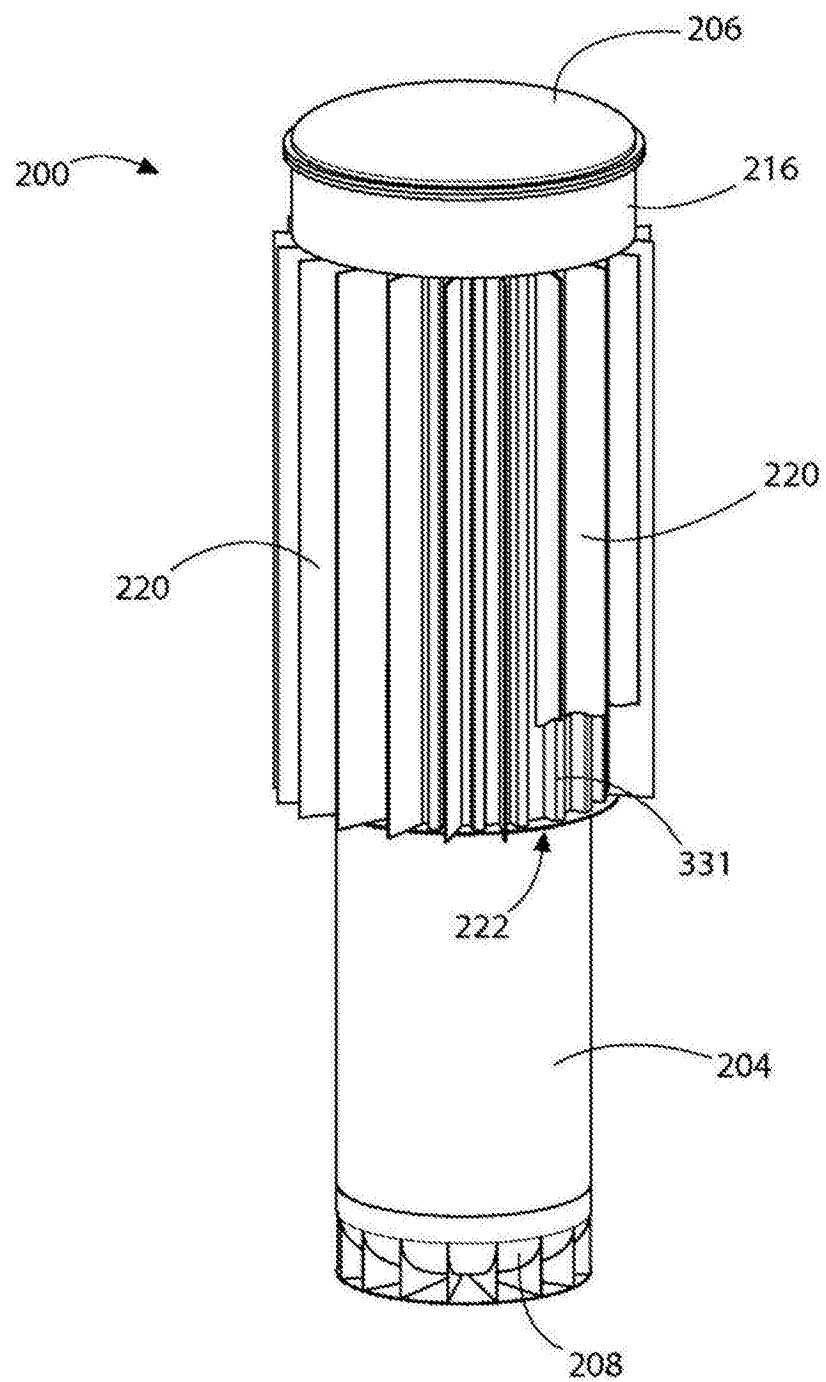


图17

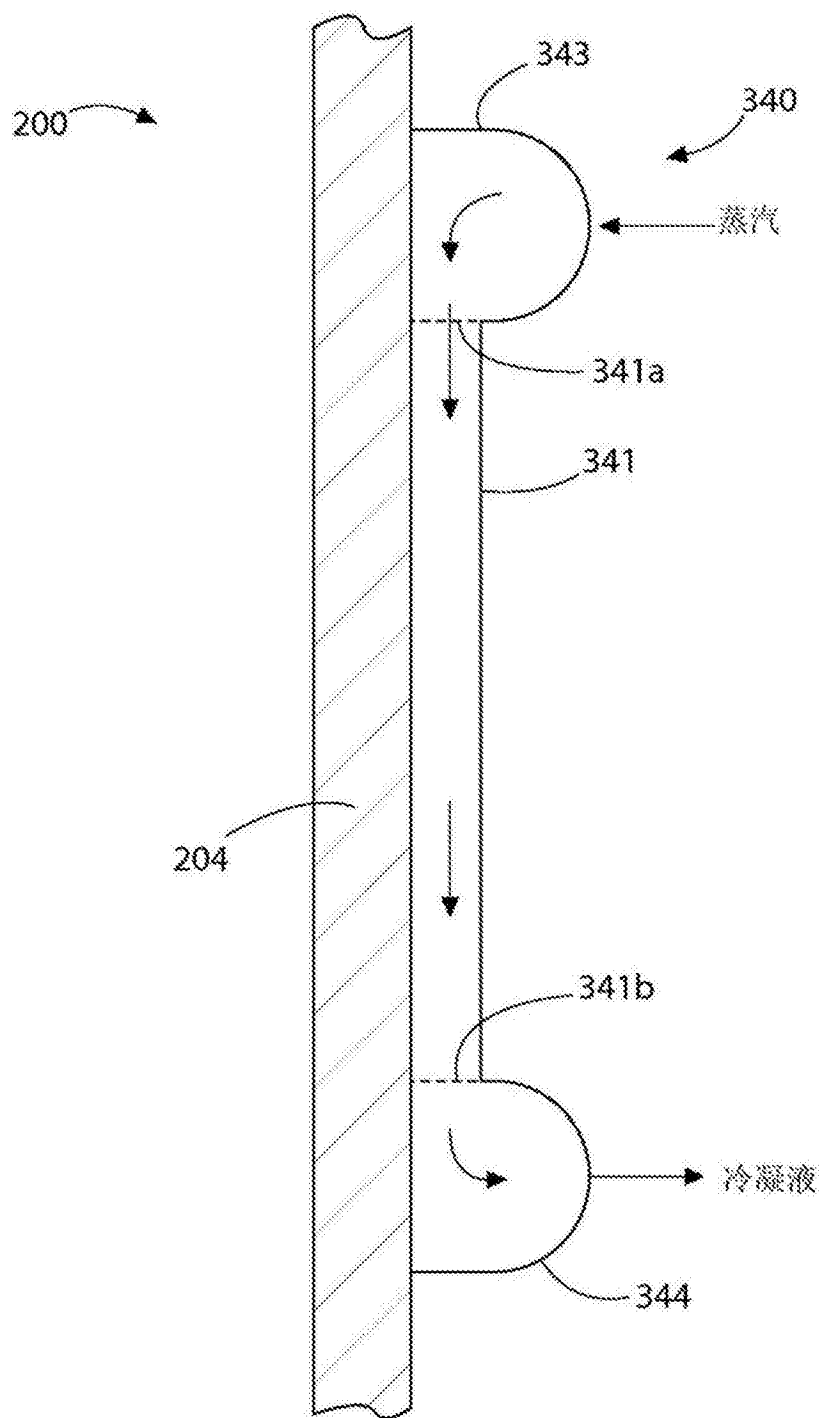


图18

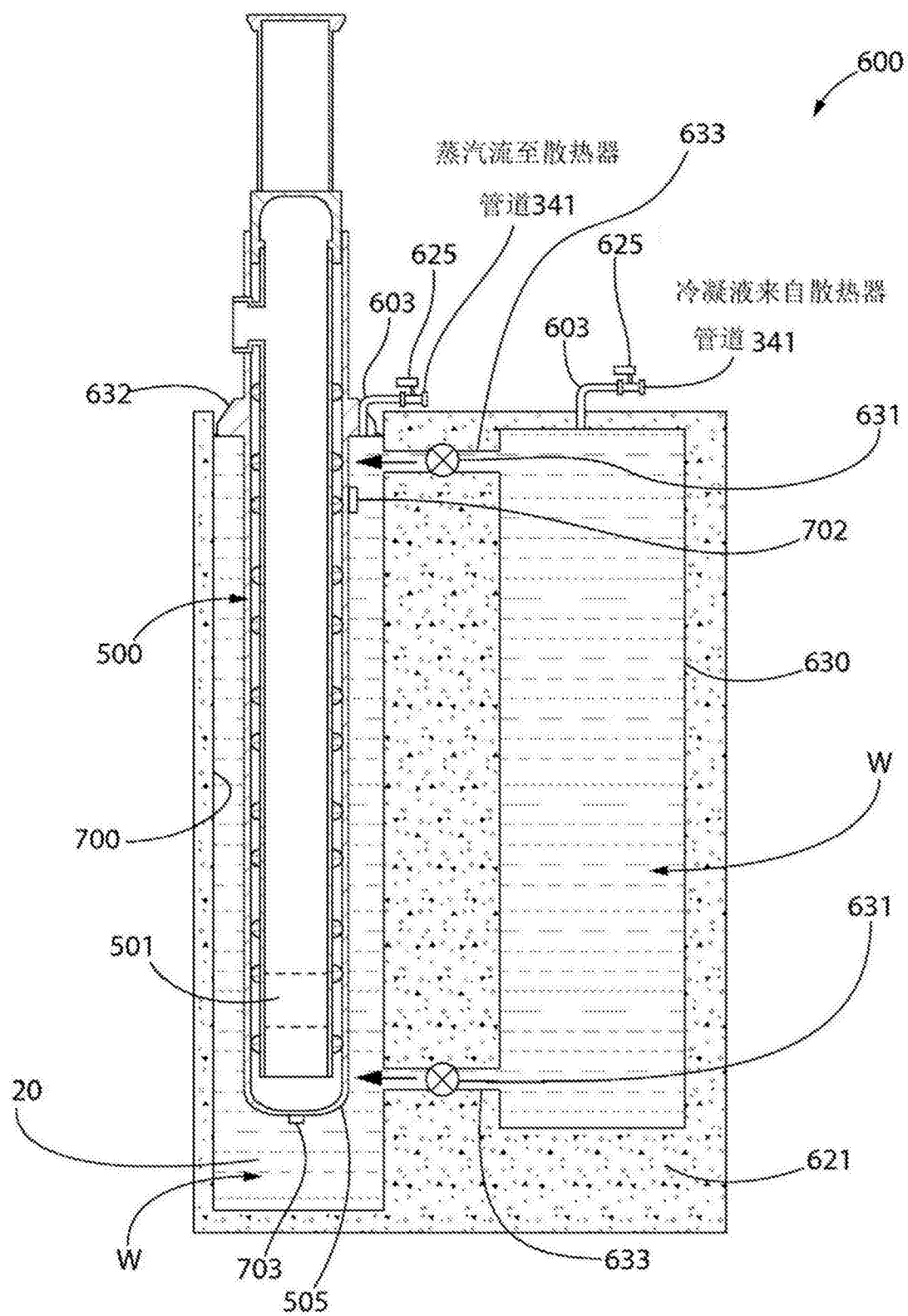


图 20

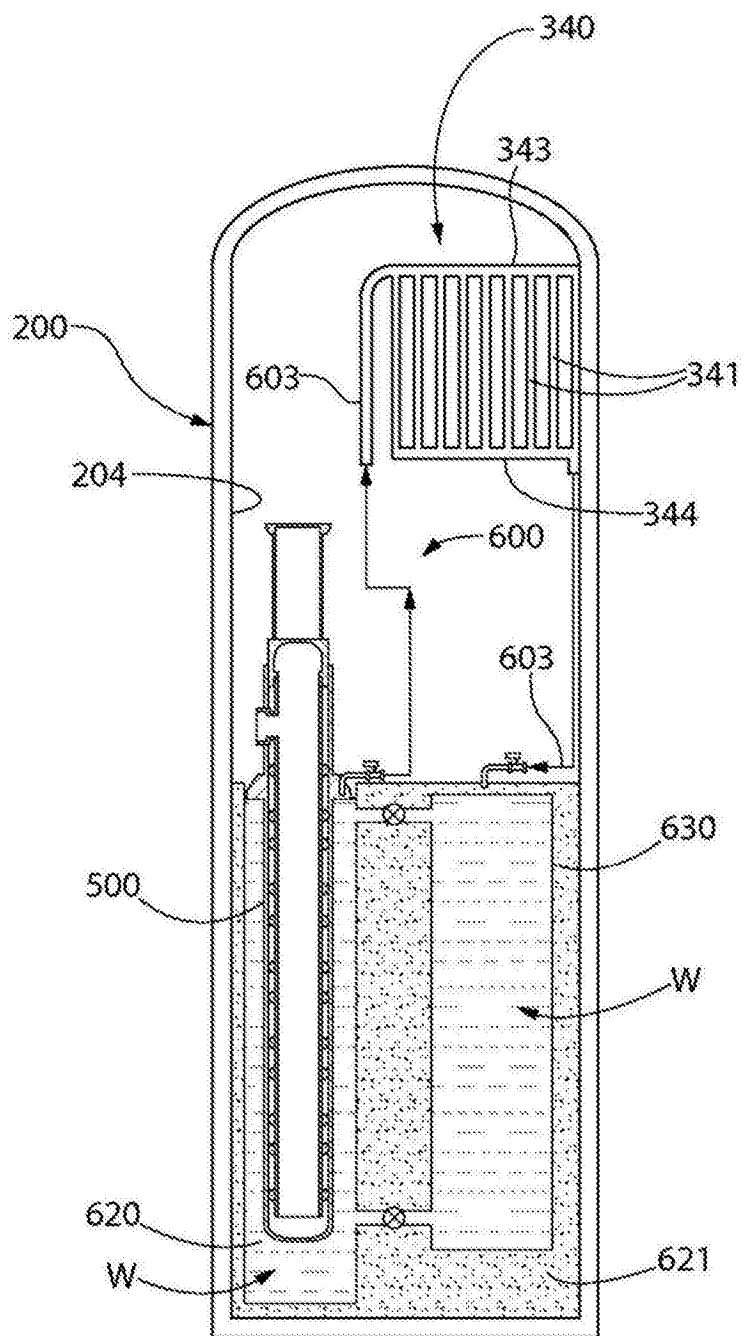


图21

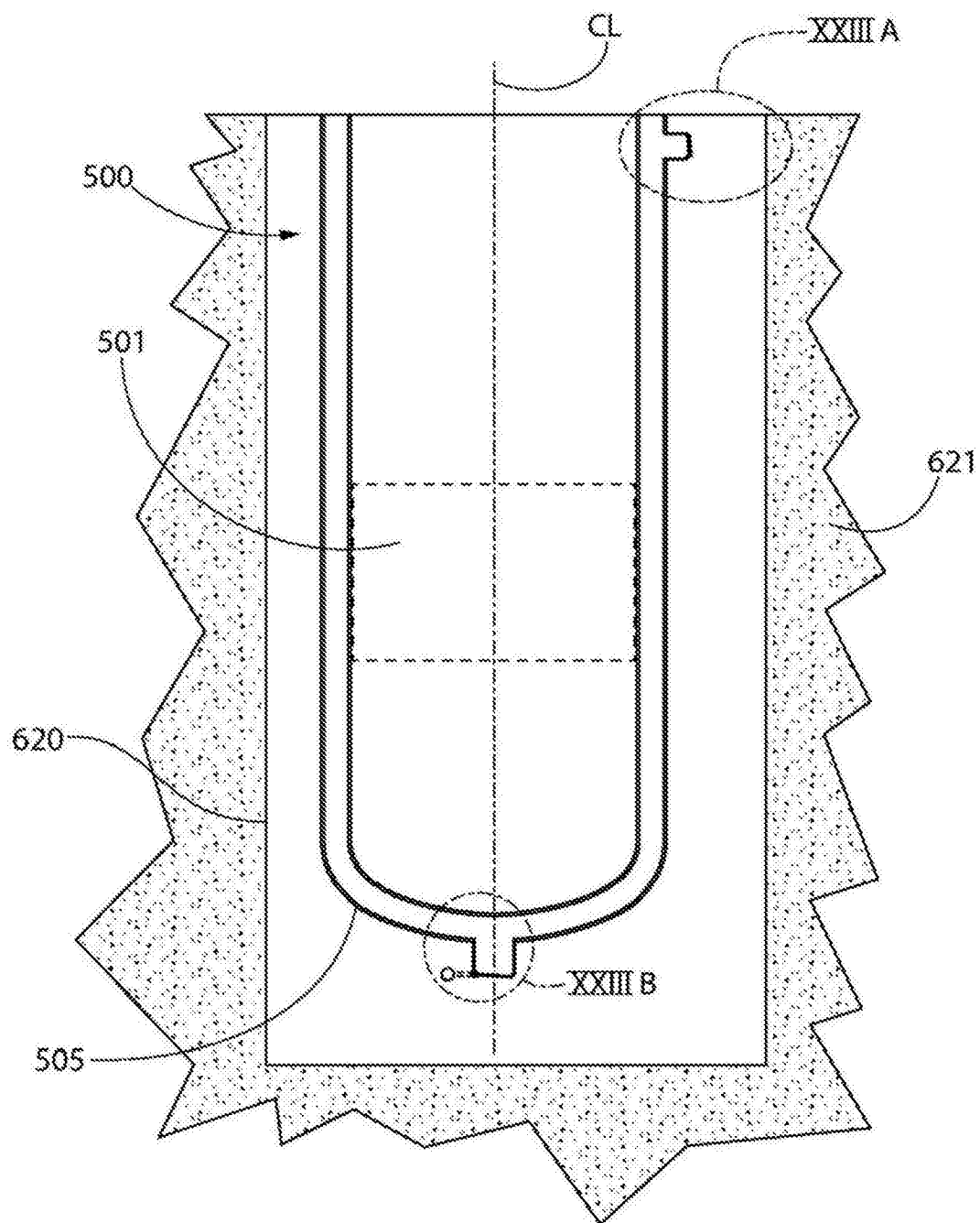


图22

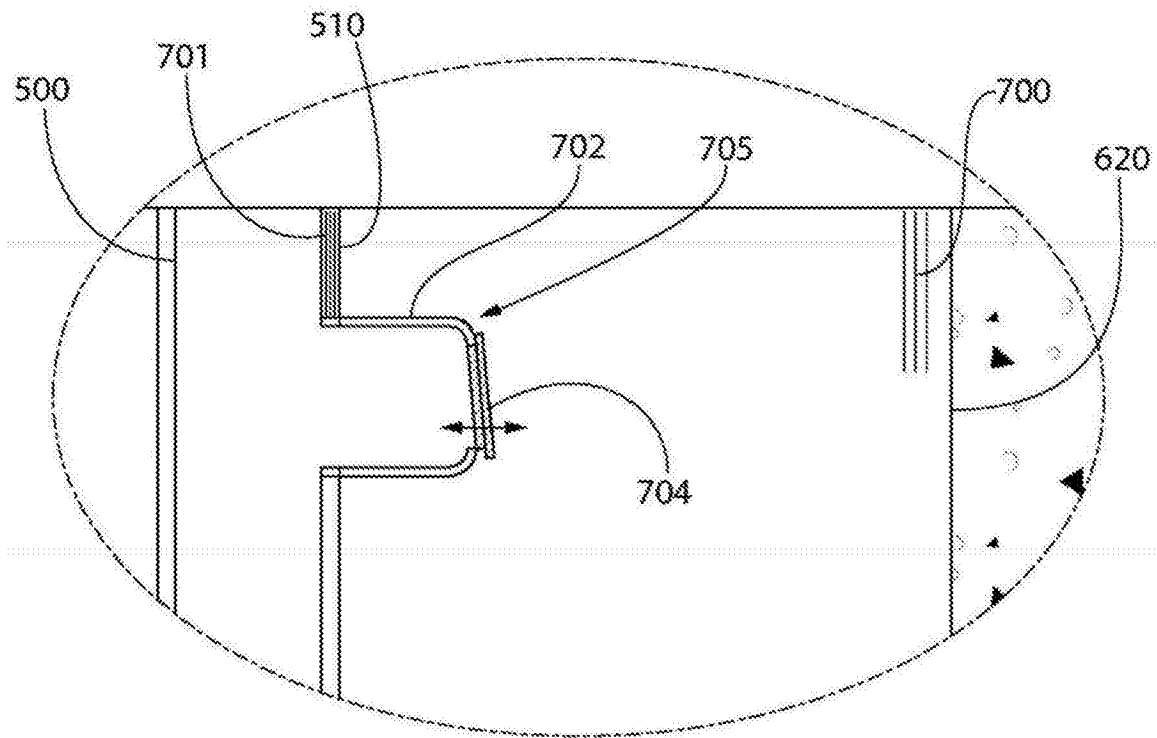


图22A

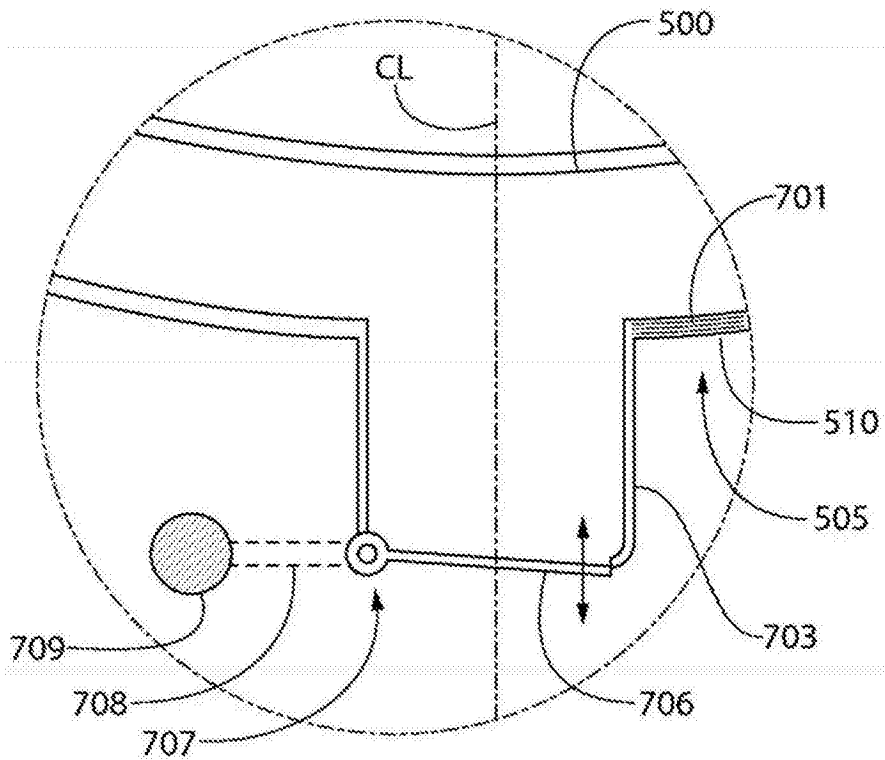


图22B

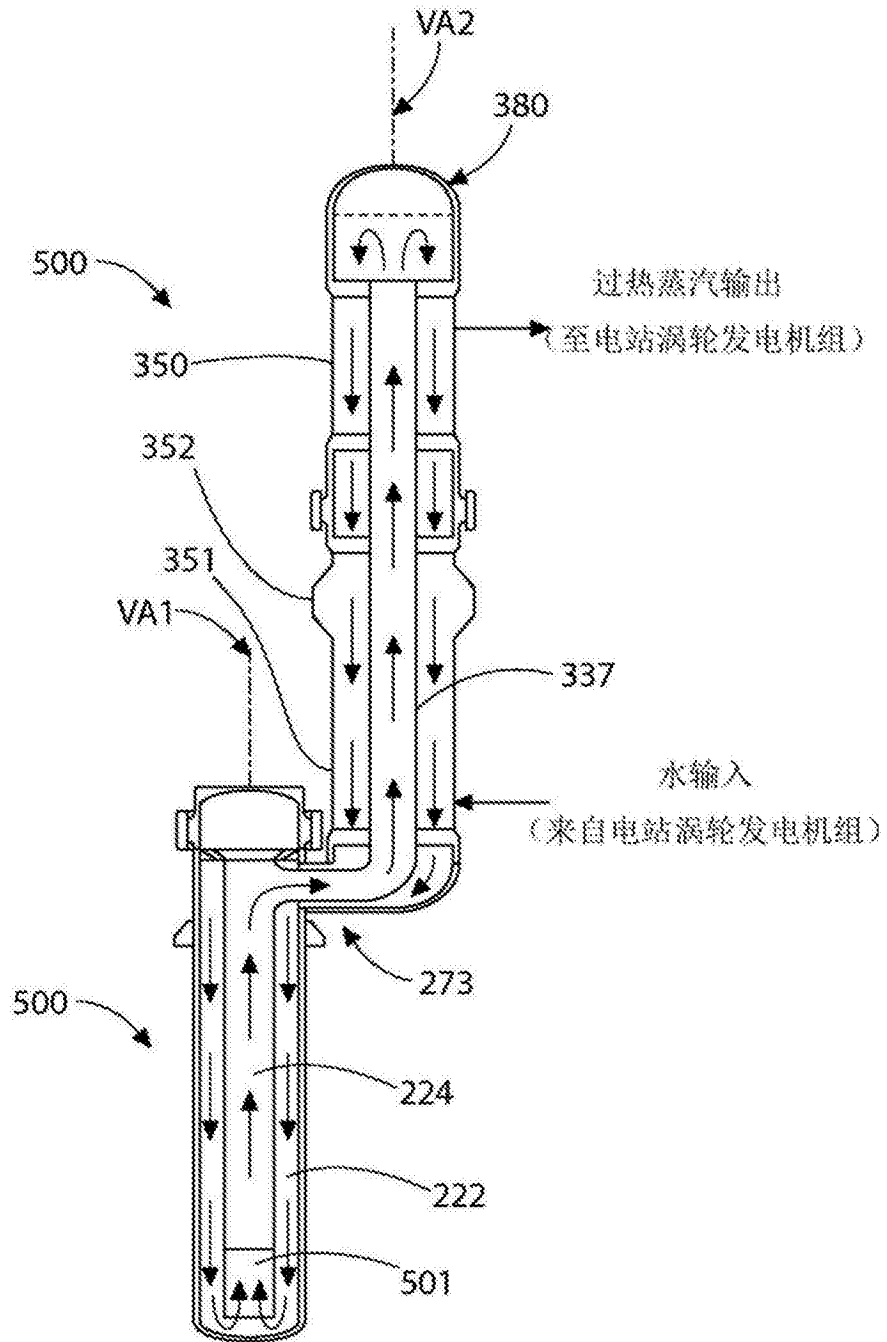


图23