



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105359220 B

(45)授权公告日 2017. 11. 28

(21)申请号 201480038609.6

约瑟夫·拉杰库马尔

(22)申请日 2014.05.28

(74)专利代理机构 北京京万通知识产权代理有限公司 11440

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 105359220 A

代理人 许天易

(43)申请公布日 2016.02.24

(51)Int.Cl.

G21C 15/18(2006.01)

(30)优先权数据

61/827,943 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/US2014/039842 2014.05.28

(87)PCT国际申请的公布数据

W02014/193988 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

(56)对比文件

CN 103000233 A, 2013.03.27,
CN 103000233 A, 2013.03.27,
CN 102194533 A, 2011.09.21,
CN 202948738 U, 2013.05.22,
CN 202948738 U, 2013.05.22,
JP 2006138744 A, 2006.06.01,
US 4765946 A, 1988.08.23,
CN 102903404 A, 2013.01.30,
CN 202549316 U, 2012.11.21,
CN 102867550 A, 2013.01.09,

审查员 黄伟

(72)发明人 克里希纳·P·辛格

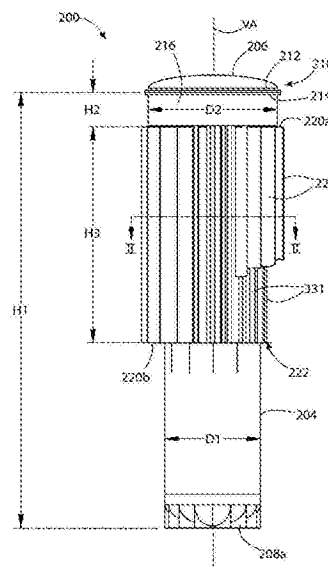
权利要求书2页 说明书17页 附图20页

(54)发明名称

无源式反应堆冷却系统

(57)摘要

一种具有无源冷却性能的核反应堆冷却系统,可在无需可利用的电力情况下,在反应堆停堆事件期间使用。在一个实施方式中,所述系统包括带有核燃料堆芯的反应堆容器和流体连接到其上的蒸汽发生器。一次冷却剂在反应堆容器和蒸汽发生器之间的流动环路中循环以便对蒸汽发生器中的二次冷却剂进行加热以生成蒸汽。蒸汽流向装有冷却水的热交换器,其中,浸没式管束就浸入在该冷却水中。蒸汽在热交换器中冷凝并回到蒸汽发生器形成闭式流动环路,在这个环路中,由于加热和冷却循环时的密度变化,二次冷却剂流被自然重力驱动。在其它实施方式中,冷却系统配置成可使用浸没式管束热交换器来直接提取和冷却一次冷却剂。



1. 一种无源式核反应堆停堆冷却系统,包括:

反应堆容器,其容纳核燃料堆芯,所述反应堆容器包含有由所述燃料堆芯加热的一次冷却剂;

蒸汽发生器,其流体连接到所述反应堆容器并包含有液态二次冷却剂;

所述一次冷却剂在所述反应堆容器和蒸汽发生器之间的第一闭式流动环路内循环,所述一次冷却剂将热量传输到所述蒸汽发生器内的所述二次冷却剂中并产生二次冷却剂蒸汽;

热交换器,包括液态三次冷却剂储水和管束,所述管束浸没在所述三次冷却剂中;

所述二次冷却剂在所述浸没式管束和所述蒸汽发生器之间的第二闭式流动环路中经由重力流循环;

其中,所述二次冷却剂蒸汽从所述蒸汽发生器提取并在所述第二闭式流动环路中流到所述管束中,冷凝形成冷凝液,以及所述冷凝液流回到所述蒸汽发生器;

其中,所述二次冷却剂蒸汽将热量传输到所述热交换器内的液态三次冷却剂储水中,并产生三次冷却剂蒸汽;

其中,所述反应堆容器、蒸汽发生器,和热交换器都共同位于金属反应堆安全壳内部;

其中,所述三次冷却剂蒸汽从所述热交换器中提取并在第三闭式流动环路中流向一排散热管道,冷凝形成液态三次冷却剂,以及所述液态三次冷却剂流回到所述热交换器,从而补充了所述液态三次冷却剂储水量;

其中,所述散热管道整体连接到所述反应堆安全壳上,所述三次冷却剂蒸汽经由所述散热管道将热量传输到所述反应堆安全壳,并冷凝成液态三次冷却剂。

2. 根据权利要求1所述的系统,其中,从所述蒸汽发生器提取蒸汽的部位高于所述冷凝液流回到所述蒸汽发生器的部位。

3. 根据权利要求1所述的系统,其中,所述反应堆容器、蒸汽发生器,和热交换器都是垂直伸长形状。

4. 根据权利要求2或3所述的系统,进一步包括装有包围所述反应堆安全壳外壳的水的储存器。

5. 根据权利要求4所述的系统,其中,所述储存器中的水的温度低于所述三次冷却剂蒸汽的温度,从而形成冷凝所述三次冷却剂蒸汽的散热器。

6. 根据权利要求5所述的系统,其中,所述储存器为环形形状,并在所述反应堆安全壳和外部安全壳外壳结构之间形成。

7. 一种无源式核反应堆停堆冷却系统,包括:

反应堆容器,其容纳有核燃料堆芯,所述反应堆容器装有由所述燃料堆芯加热的一次冷却剂;

热交换器,其包括冷却水储水和管束,所述管束浸没在所述冷却水中;

所述一次冷却剂在所述浸没式管束和所述反应堆容器之间的第一闭式流动环路中经由重力流循环;

其中,所述一次冷却剂将热量传输到所述热交换器中的冷却水储水中并在流回到所述反应堆容器前被冷却;

其中,所述一次冷却剂加热所述热交换器内的所述冷却水储水中并产生蒸汽;

其中,所述蒸汽从所述热交换器中提取,并在第二闭式流动环路中流向一排散热管道,冷凝并流回到所述热交换器,从而补充了液态相的所述冷却水储水;

其中,所述散热管道整体连接到反应堆安全壳上,所述蒸汽经由所述散热管道将热量传输到所述反应堆安全壳并冷凝;其中,所述反应堆容器和热交换器共同位于金属反应堆安全壳内部。

8. 根据权利要求7所述的系统,进一步包括装有包围所述反应堆安全壳外壳的水的储存器,其中,所述储存器中的水的温度低于形成用于冷凝所述蒸汽的散热器的蒸汽的温度。

9. 根据权利要求8所述的系统,其中,所述储存器呈环形并在所述反应堆安全壳和外部安全壳外壳结构之间形成。

10. 一种无源冷却停堆后的核反应堆的方法,所述方法包括:

通过核燃料堆芯加热反应堆容器中的一次冷却剂;

用所述加热的一次冷却剂加热蒸汽发生器中的二次冷却剂以产生二次冷却剂蒸汽;

从所述蒸汽发生器中提取所述二次冷却剂蒸汽;

使所述提取的二次冷却剂蒸汽流过浸没在压力容器中的冷却水储水中的管束;

冷凝所述二次冷却剂蒸汽形成二次冷却剂冷凝液;以及

使所述二次冷却剂冷凝液返回到所述蒸汽发生器;

用所述二次冷却剂蒸汽加热所述压力容器中的所述冷却水;

将一部分所述冷却水转换为蒸汽相;

从所述压力容器中提取所述冷却水蒸汽;

使所述提取的冷却水蒸汽流过连接到与散热器热联通的反应堆安全壳内的散热管道;

冷凝所述冷却水蒸汽;以及

将所述冷凝的冷却水返回到所述压力容器中以补充所述冷却水储水;

其中,所述二次冷却剂蒸汽和冷凝液循环流过所述管束和蒸汽发生器之间的第一闭式流动环路。

11. 一种无源冷却停堆后的核反应堆的方法,所述方法包括:

采用核燃料堆芯加热反应堆容器中的一次冷却剂;

从所述反应堆容器中提取所述加热的一次冷却剂;

使所述加热的一次冷却剂流过浸没在压力容器中的冷却水储水中的管束;

冷却所述加热的一次冷却剂以降低其温度;以及

使所述冷却的一次冷却剂返回到所述反应堆容器中;

用一次冷却剂蒸汽加热所述压力容器中的所述冷却水;

将一部分所述冷却水转换为蒸汽相;

从所述压力容器中提取所述冷却水蒸汽;

使所述提取的冷却水蒸汽流过连接到与散热器热联通的反应堆安全壳上的散热管道;

冷凝所述冷却水蒸汽;以及

使所述冷凝的冷却水返回到所述压力容器中以补充所述冷却水储水;

其中,所述一次冷却剂循环流过所述管束和反应堆容器之间的第一闭式流动环路。

无源式反应堆冷却系统

[0001] 相关专利申请的交叉引用

[0002] 本申请要求2013年5月28日提交的美国临时专利申请序列号为61/827,943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,特别涉及反应堆和反应堆安全壳系统,所述安全壳系统带有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。商用核反应堆要求被封装在一种保压结构(pressure retaining structure)中,这种结构能够承受电厂设施假设遭遇最严重事故后造成的温度和压力。反应堆及其安全壳所能假设的最严重能量释放事故有两种。

[0006] 首先,冷却剂丧失事故(LOCA)之后发生的事件,包括核电厂核蒸汽供应系统(NSSS)迅速释放的大量热能,这是安全壳空间内反应堆冷却剂突然释放所致。反应堆冷却剂在突然降压后会出现爆闪(violently flash),造成安全壳空间内压力和温度的快速升高。安全壳内空间成为空气和蒸汽的混合区,通过认定反应堆冷却剂输送管突然破裂而可肯定地推断出这是冷却剂丧失事故(LOCA)。

[0007] 对安全壳完整性具有潜在风险的另一个热事件情况是,其中,核电厂的核蒸汽供应系统(NSSS)的所有排热路径均丧失,迫使反应堆“紧急停堆(scram)”。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被排出,以保护反应堆防止出现升压失控。

[0008] 最近,管理机构也已经对安全壳结构提出要求能承受来自撞击飞机的碰撞。安全壳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事故造成的内部压力。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系统。

[0009] 除了上述安全壳冷却问题外,核反应堆在其停堆后继续产生相当大量的热能。图20所示为轻水反应堆在紧急停堆(即在迅速插入控制棒或其它装置后出现的链式反应的突然停止)后出现的典型的热生成曲线。如上所述,在当今反应堆设计中,反应堆衰变热是通过装置的剩余热排除(RHR)系统来排除的,这种系统利用了一系列泵和热交换器来将热能输送到由装置所保持的合适的冷却水源上。从图20中可以看出,反应堆衰变热开始随着时间而成倍衰减,但是,如果所产生的热量不排除的话,其依然对反应堆的安全有着相当大的威胁(正如福岛情况那样,为提取反应堆热量而需要的泵失效了,因为在海啸推动的汹涌海

浪中泵电动机被淹没)。福岛灾难的鲜明教训是强制流动(依靠泵)系统在极端环境条件下的致命弱点。

[0010] 人们希望能有一种改进的反应堆冷却系统。

发明内容

[0011] 根据本公开内容的反应堆冷却系统提供了一种完全无源式装置,用来排除反应堆衰变热,无需依赖泵和电动机,也不会出现所述的电动机和泵需要可利用电源的缺陷。在一个实施方式中,冷却系统完全依靠重力和流体的不同密度来引导流过冷却系统。在一个实施方式中,这种重力驱动系统可以配置成并称之为浸没式管束冷却系统(SBCS),方便使用(在任何方面,这种任意称谓都不是表示限定意义)。在全厂停电或另一种假设事故情况下,其中经由电站兰金循环的核燃料堆芯的正常排热路径失去时,该冷却系统设计成可无源地从反应堆一次冷却剂中提取热量。

[0012] 在一个实施方式中,无源式核反应堆停堆冷却系统包括反应堆容器和蒸汽发生器,反应堆容器内装核燃料堆芯并容纳核燃料堆芯加热的一次冷却剂,蒸汽发生器流体连接到反应堆容器上并容纳液态的二次冷却剂。一次冷却剂在反应堆容器和蒸汽发生器之间的第一闭式流动环路中循环,一次冷却剂将热量传输到蒸汽发生器内的二次冷却剂并产生二次冷却剂蒸汽。热交换器包括液态三次冷却剂(liquid third coolant)储水和管束,该管束浸没在三次冷却剂中。二次冷却剂在浸没式管束和蒸汽发生器之间的第二闭式流动环路中通过重力流来循环。二次冷却剂蒸汽从蒸汽发生器中提取并在第二闭式流动环路中流到管束,冷凝形成冷凝液,冷凝液流回到蒸汽发生器。

[0013] 在另一个实施方式中,无源式核反应堆停堆冷却系统包括反应堆容器和热交换器,反应堆容器内装核燃料堆芯并容纳核燃料堆芯加热的一次冷却剂,热交换器则包括冷却水和管束,该管束浸入在冷却水中。一次冷却剂经由重力流在浸没式管束和反应堆容器之间的第一闭式流动环路中循环,其中,一次冷却剂将热量传输到热交换器的冷却水中,并在流回到反应堆容器前被冷却。

[0014] 在另一个实施方式中,提供了一种在停堆后无源冷却核反应堆的方法。该方法包括:利用核燃料堆芯对反应堆容器中的一次冷却剂进行加热;用加热的一次冷却剂对蒸汽发生器中的二次冷却剂进行加热以产生二次冷却剂蒸汽;从蒸汽发生器中提取二次冷却剂蒸汽;使被提取的二次冷却剂蒸汽流过浸没在压力容器内冷却水中的管束;冷凝二次冷却剂蒸汽形成二次冷却剂冷凝液;以及将二次冷却剂冷凝液返回到蒸汽发生器,其中,二次冷却剂蒸汽和冷凝液在管束和蒸汽发生器之间的第一闭式流动环路中循环。在一个实施方式中,所述方法进一步包括:通过二次冷却剂蒸汽对压力容器中的冷却水进行加热;将一部分冷却水转换成蒸汽相;从压力容器中提取冷却水蒸汽;使提取的冷却水蒸汽流过连接到反应堆安全壳上的散热管道,散热管道与散热器(heat sink)之间为热联通;对冷却水蒸汽进行冷凝;以及将冷凝的冷却水返回到压力容器以补充冷却储水。

[0015] 提供了停堆后无源冷却核反应堆的另一种方法。该方法包括:利用核燃料堆芯对反应堆容器中的一次冷却剂进行加热;从反应堆容器中提取经加热的一次冷却剂;使经过加热的一次冷却剂流过浸没在压力容器内冷却水中的管束;对经加热的一次冷却剂进行冷却以降低其温度;以及将冷却的一次冷却剂返回到反应堆容器中,其中,一次冷却剂在管束

和反应堆容器之间的第一闭式流动环路中循环。在一个实施方式中,所述方法进一步包括:利用二次冷却剂蒸汽对压力容器中的冷却水进行加热;将一部分冷却水转换成蒸汽相;从压力容器中提取冷却水蒸汽;使提取的冷却水蒸汽流过连接到反应堆安全壳上的散热管道,散热管道与散热器之间为热联通;对冷却水蒸汽进行冷凝;以及将冷凝的冷却水返回到压力容器以补充冷却水量。

[0016] 根据其它方面,本发明进一步提供了核反应堆安全壳系统,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内。安全壳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和外部的安全壳外壳结构(CES),从而形成双壁安全壳系统。在一个实施方式中,在安全壳和安全壳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”方式从安全壳处(大体)径向向外延伸。为此,安全壳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,诸如冷却剂丧失事故或反应堆紧急停堆期间,当需要时,安全壳提供一种无源(非泵浦的)排热系统,来散热和冷却反应堆。

[0017] 在根据本公开内容的一个实施方式中,核反应堆安全壳系统包括一种安全壳,配置成可置放核反应堆,围绕安全壳的安全壳外壳结构(CES),以及安全壳和安全壳外壳结构(CES)之间形成的环形储存器,用来从安全壳空间提取热能。如果安全壳内部出现热能释放事故时,安全壳产生的热量会被传输到环形池中,后者开始工作冷却安全壳。在一个实施方式中,环形储存器装有用来冷却安全壳的水。一部分安全壳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和安全壳外壳结构(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外壳结构(CES)环形储存器排放到大气中。

[0018] 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,沿周缘间隔布置在环形储存器安全壳周围。空气管道与环形储存器和安全壳外壳结构(CES)外部的环境空气形成流体相通。当安全壳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,能够继续对安全壳进行无休止地冷却。

[0019] 根据另一个实施方式,核反应堆安全壳系统包括配置成可置放核反应堆的安全壳,环绕安全壳的安全壳外壳结构(CES),在安全壳和安全壳外壳结构(CES)之间形成的用来冷却安全壳的充水环形空间,以及从安全壳向外伸出并位于环形空间内的多个大体径向翅片。如果安全壳内部出现热能释放事故时,通过与安全壳外表面和其大体径向翅片的直接接触,安全壳产生的热量被传输到环形空间内的充水储存器中,从而冷却了安全壳。在一个实施方式中,当安全壳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,从而保持安全壳内温度分布一致,防止在热能释放事故或事件期间出现安全壳扭曲变形。

[0020] 在另一个实施方式中,核反应堆安全壳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,环绕安全壳的安全壳外壳结构(CES),安全壳壳体和安全壳外壳结构

(CES) 之间形成的用来冷却安全壳的环形储存器,从安全壳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布置在环形储存器内安全壳周围。进气管道与环形储存器和安全壳外壳结构(CES)外部环境空气形成流体相通。在安全壳内部发生热能释放事故的情况下,安全壳产生的热量经由(大体)径向安全壳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。

[0021] 根据本公开内容的核反应堆安全壳系统的优点和方面包括如下:

[0022] 安全壳结构和系统,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;

[0023] 安全壳结构和系统,继续自主无限期地工作(例如,人工干预不受时间限制);

[0024] 安全壳结构,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,诸如撞击飞机,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

[0025] 安全壳,装备有通过安全壳结构可以随时拆除(或安装)主要设备的设施。

[0026] 附图简要说明

[0027] 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,附图如下:

[0028] 图1为根据本公开内容的装有翅片的主反应堆安全壳的侧视图,该安全壳构成了核反应堆安全壳系统的组成部分,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;

[0029] 图2为沿II-II线剖开的安全壳的横向剖面图;

[0030] 图3为图2所示部分III的详图;

[0031] 图4为核反应堆安全壳系统的纵向剖面图,示出了图1所示安全壳和外部安全壳外壳结构(CES),在安全壳和外壳之间形成充水的环形空间;

[0032] 图5为穿过安全壳和安全壳外壳结构(CES)的纵向剖面图;

[0033] 图6为核反应堆安全壳系统的侧视图,示出了安装后地面以上的外部安全壳外壳结构(CES)部分;

[0034] 图7为安全壳系统的俯视平面图;

[0035] 图8为沿图7所示的线VIII-VIII剖开的安全壳系统的纵向剖面图,示出了核反应堆安全壳系统的地面以上和地面以下部分;

[0036] 图9为主反应堆安全壳的侧视图,示出了各种截面切口,以便能看到安全壳内部的设备以及附加细节;

[0037] 图10为安全壳系统的俯视平面图;

[0038] 图11为沿图10的XI-XI线剖开的安全壳的纵向剖面示意图;

[0039] 图12为沿图10的XII-XII线剖开的安全壳的纵向剖面图;

[0040] 图13为沿图9的XIII-XIII线剖开的安全壳的横向剖面图;

[0041] 图14为沿图9的XIV-XIV线剖开的安全壳的横向剖面图;

[0042] 图15为沿图9的XV-XV线剖开的安全壳的横向剖面图;

[0043] 图16为核反应堆安全壳系统的局部纵向剖面图,示出了辅助散热系统;

[0044] 图17为安全壳的等距视图,安全壳(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；

[0045] 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的壳体上的上下环形集管(ring headers)和管道；

[0046] 图19为核反应堆安全壳系统的整体横剖面 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；

[0047] 图20为曲线图，示出了在紧急停堆之后轻水堆的典型热量产生曲线；

[0048] 图21为根据本公开内容的浸没式管束热交换器(SBHX)的示意图；

[0049] 图22的示意图给出了冷却反应堆芯的反应堆冷却系统和相应方法的第一个实施方式；

[0050] 图23的示意图示出了冷却反应堆芯的反应堆冷却系统和相应方法的第二个实施方式；以及

[0051] 图24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。

[0052] 所有附图都是示意性的，并不一定成比例。

[0053] 实施方式的具体说明

[0054] 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。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。为此，本公开内容显然不应限定在这种说明性实施方式上，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。

[0055] 参照图1-图15，示出了根据本公开内容的核反应堆安全壳系统100。系统100通常包括诸如安全壳200的内部安全壳结构和外部安全壳外壳结构(CES) 300，一起构成安全壳-外壳组件200-300。安全壳200和安全壳外壳结构(CES) 300为垂直伸长型和垂直定向，并形成垂直轴线VA。

[0056] 在一个实施方式中，安全壳-外壳组件200-300配置成埋入地基中，至少部分在地面以下(另见图6至图8)。安全壳-外壳组件200-300可以通过混凝土基底301来支撑，混凝土基底301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304。如图所示，侧壁303可以沿周缘封闭安全壳200，其中，安全壳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-外壳组件200-300防止抛射物撞击(例如，撞击飞机等)提供了附加保护。从俯视图看去，基底301可以采用任何合适构型，包括(但不限于)多边形(例如，矩形、六边形、圆形等)。

[0057] 在一个实施方式中,安全壳200的重量主要由安全壳位于其上的底板302支撑,安全壳外壳结构(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和安全壳外壳结构(CES) 支持装置。

[0058] 继续参照图1至图15,安全壳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。可以使用对应适当厚度的其它合适的金属材料,包括各种合金。

[0059] 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。

[0060] 安全壳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构型,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。

[0061] 在一些实施方式中,安全壳的壳体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的内部周缘并可将其设备紧靠安全壳200周缘放置,使得安全壳结构更紧凑。因此,在一个构型中,安全壳200的地面以上部分是一种类似于蘑菇形状的结构。

[0062] 在一个可能的实施方式中,安全壳200的加大的顶部216的外径D2大于安全壳的壳体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可选择为能使回转式吊车间拥有工作间隙,该间隙可小于安全壳200总高度H1的50%。在一个非限定性示例中,与安全壳总高度H1为200英尺相比,安全壳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200的顶部216在上端与法兰214相端接,即在与安全壳上封头206的法兰连接处。

[0063] 在一个实施方式中,安全壳200顶部加大部分216的直径D2小于安全壳外壳结构(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,如果安全壳外壳结构(CES)受到抛射体撞击时,在安全壳外壳结构(CES) 300和安全壳顶部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(安全壳外壳结构(CES) 300和安全壳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外壳结构(CES)穹顶316和安全壳200上封头206之间,以便蒸汽和/或空气从安全壳外壳结构(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。

[0064] 参照图1-图4,在一些实施方式中,安全壳外壳结构(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可采用任何合适的坚固的材料制成,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体撞击,诸如客机撞击。

[0065] 安全壳外壳结构(CES)300包围着安全壳的壳体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,用来在安全壳内部出现热能释放事故时接收和排放来自安全壳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处流到安全壳外壳结构(CES)300的同心壳体310、311的大约顶端315,在安全壳外壳结构(CES)的安全壳壳体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。

[0066] 在一个实施方式中,安全壳外壳结构(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体。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外壳结构(CES)300包围,该结构优选足够高,可保护安全壳防止飞机危险或类似抛射体撞击,保持安全壳周围环形空间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。

[0067] 安全壳外壳结构(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)径向间隔布置。在一些实施方式中,通风口317可以采用一小段管路来形成,该管路被任何合适构型的防雨罩来覆盖,这样,既可使蒸汽从安全壳外壳结构(CES)逸出,但又将浸水降到最小。

[0068] 在一些可能的实施方式中,穹顶316和安全壳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,将对来自撞击(下落)投放(例如,客机等)对安全壳外壳结构(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。

[0069] 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-外壳组件200-300的垂直轴线VA而轴向延伸。外部纵向翅片220在安全壳壳体204周缘沿周向间隔开并从

安全壳处(大体)径向向外延伸。

[0070] 加强筋220具有多个有利功能,包括(但不限于):(1)加强安全壳的壳体204,(2)防止发生地震时环形空间313内的储水过度“来回晃动”,以及(3)重要的是,在安全壳内出现流体/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。

[0071] 因此,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等于或大于安全壳的壳体的总高度的一半。

[0072] 在一个实施方式中,纵向翅片220的上水平端220a为自由端,并不是永久地连接(或焊接)到安全壳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。

[0073] 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。

[0074] 在一个实施方式中,纵向翅片220的方向与安全壳的壳体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200的周缘延伸360度,从而与外部安全壳外壳结构(CES)300配合而更好地抗击抛射体的撞击作用。为此,导致安全壳外壳结构(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的壳体204,而这种情况在加强筋方向与安全壳壳体204为90度时则很可能会出现。在其它可能的实施方式中,根据安全壳外壳结构(CES)300的构造和其它因素,加强筋220与安全壳壳体204成垂直布置是合适的。

[0075] 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

射体撞击的安全壳壳体204各个部分都可延伸到地面以下,防止抛射体撞击安全壳外壳结构(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系统的抗撞击性。

[0076] 在一个实施方式中,安全壳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壳体抗击外部撞击(如抛射体)或安全壳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。

[0077] 参照图1至图15,多个垂直结构支柱331连接到安全壳壳体204外表面上,以帮助支撑安全壳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沿安全壳壳体204周缘隔开布置。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垂直地焊接到安全壳壳体204上。

[0078] 支柱331从安全壳较大直径顶部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。

[0079] 图11-15示出了安全壳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(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。

[0080] 辅助散热系统

[0081] 现在,主要参照图2-3,图16,和图18,安全壳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610(HDD)。在一个实施方式中,辅助散热系统340和

相关的散热管道610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。

[0082] 散热管道610包括多个内部纵向管道341(即,流动管道),围绕安全壳壳体204的周缘周向隔开布置。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。在一个可能的构型中,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200,通过安全壳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安全壳的壳体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布置的散热管道341。

[0083] 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),这些都焊接到内安全壳的壳体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的壳体204,而后再输送到充水的环形空间313。

[0084] 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布置形式的管道341。管道341可均匀地或非均匀地间隔布置在安全壳的壳体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的周围。根据管道所输送的流体流速量和传热考虑因素,管道341可以带有任何合适的横截面尺寸。

[0085] 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200的内部,从而使管道341内垂直流动流体和安全壳的壳体204之间的热量传输在有源传热区内最大化,该传热区由安全壳各个部分构成,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的壳体204的内部,邻近于环形空间的顶部和底部。

[0086] 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。

[0087] 在一个实施方式中,散热系统340流体地连接到蒸汽源上,该蒸汽源从安全壳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并沿安全壳的壳体204内部高度在其内向下流动,蒸汽经历从蒸汽(水蒸气)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。

[0088] 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610,这些管

道布置在由安全壳形成的安全壳空间内的内安全壳200的内表面上。

[0089] 辅助空气冷却系统

[0090] 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200沿周向间隔布置。每个空气管道401包括进气口402,其穿过安全壳外壳结构(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。

[0091] 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200。

[0092] 应该注意的是,主环形空间313起的作用是安全壳200内部产生的热量的最终散热器。另外,该环形池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200的较大部分216内。

[0093] 下面结合图19简要介绍反应堆安全壳系统100作为热交换器的使用原理。该图为反应堆安全壳系统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有源传热和排热程序。

[0094] 在冷却剂丧失事故(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200所形成的安全壳环境中。液体瞬间闪蒸为蒸汽,水蒸气会与安全壳内部的空气混合而后流向安全壳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离开安全壳外壳结构(CES)300,最终经由通风口317而进入大气环境中。

[0095] 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,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200。

[0096] 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。该环形储存器内的储水量是计量的,这样,安全壳200内产生的衰变热量会充分下降,从而一旦水量排空时,安全壳能够只通过空气冷却就可排出其所有热量。安全壳200优选具有充分的排热能力,通过迅速排放热能,以限定安全壳内水蒸气混合物的压力和温度(在其设计极限内)。

[0097] 如果出现全厂停电事故,反应堆芯会被强制进行“紧急停堆”,无源无源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结构金属上,在纵向翅片220提供的传热协助下,安全壳金属结构进而排放热量至环形空间内的水中。环形储存器(主环形空间313)内的水最终加热蒸发。安全壳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。

[0098] 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。

[0099] 无源式反应堆冷却系统

[0100] 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,以排放反应堆停堆(例如,“紧急停堆”)期间反应堆的衰变热量,无需依赖泵和电动机,也没有泵和电动机的缺陷。在一个实施方式中,无源式核反应堆停堆冷却系统600可以包括浸没式管束冷却系统602(SBCS),通常包括图21-23所示的部件。

[0101] 浸没式管束冷却系统602优选为一种闭环增压流动系统,包括三个主要部件或子系统,即(i)浸没式管束热交换器620(SBHX), (ii)独立的一套或一排散热管道610(HDD),整体连接到安全壳内壁上(如上所述),以及(iii)带有过热器或反应堆压力容器500的蒸汽发生器,以下详细介绍。蒸汽和冷凝气流路在如下所述的这些部件之间形成。浸没式管束冷却系统602配置成可利用蒸汽发生器的二次蒸汽来提取反应堆停堆期间闭环过程中燃料堆芯所产生的热能,在缺少可用电力源的情况下,能够无限期地继续。

[0102] 2013年4月25日提交的国际PCT申请(PCT/US13/38289)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,垂直堆砌布置,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。

[0103] 图24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。

[0104] 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。一次冷却剂在中心定位的立管337中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。

[0105] 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24)。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。

[0106] 现在参照图21-23,浸没式管束热交换器620包括压力容器621,其限定有纵向轴线LA并带有限定有内腔626的空心圆筒形壳625,在壳的相对两端624,627上是相对的上下封头622,623。封头622,623可以是任何合适形式和构型,包括扁平、圆形、半圆形等。内腔626在上下封头622,623之间完全延伸。在一个实施方式中,如图所示,压力容器621可以是轴向伸长形状,呈垂直取向,以促进重力流。优选地,热交换器620安装在反应堆容器500上方的安全壳结构200的内容器202内,相对靠近在蒸汽发生器502。热交换器620和蒸汽发生器502的紧密连接将蒸汽管路和冷凝管路布设长度降到最短(另见图11和图13)并保持水平空间,从而将安全壳200所需直径减到最小,以容纳反应堆容器500、蒸汽发生器502、以及热交换器。可以提供任何合适的结构底座650以便安装和支撑来自内安全壳200的热交换器620,优选容器内采用结构钢和/或混凝土平台或地板,足够支撑热交换器的重量。

[0107] 冷却水W(液体)的储量(即,容量)保持在热交换器压力容器621内,后者起散热器的作用,用来在反应堆停堆期间冷却二次冷却剂,下面将详细介绍。为此,冷却水W用作三次冷却剂的散热器,其初始温度小于停堆期间二次冷却剂的初始温度。

[0108] 浸没式管束热交换器620可以是较大的圆筒形压力容器621,其内安装相对较小的热交换器管束630,如图21所示。在一个示例中,但不限于此,压力容器621的外径大约10英尺,高度大约20英尺,而安装在其内的管束630可以是圆形,横向形状,直径大约4英尺,高度小于压力容器的高度。可以提供其它合适的尺寸。为此,在这个实施方式中的管束630实际上并没有填满压力容器621的整个内腔626。

[0109] 优选地,与上端624和上封头622相比,管束630的位置可以更靠近底端627和下封头623,(例如,见图21)。这种位置设计有助于确保管束630保持基本上在其大部分或优选全部高度上浸没在压力容器621内存放的储水W中。为此,在一些实施方式中,管束630四周各个部分都被液态冷凝液完全包围并浸没其中。管束630可以升高并在热交换器压力容器625

下封头623的上方彼此隔开,以提供管束下方足够的水深,允许水在压力容器壳侧管束下方流动。为固定式支撑管束组件630,可以在压力容器625内部使用结构支架和框架的任何合适的配置形式。

[0110] 压力容器621可以采用任何合适的金属制成,能够承受预期来自蒸汽发生器502的蒸汽和工作压力。在一些实施方式中,压力容器621采用防腐材料制成,诸如(但不限于)不锈钢。可以使用其它防腐金属材料。

[0111] 管束630位于压力容器621的内腔626内。在一个非限定性构型中,管束630组件可包括形成顶部管板632的进气空间631,形成底部管板634的出气空间633,底部管板与顶部管板隔开,以及多个在二者之间延伸并流体连接到顶部和底部管板上的管子635。管板632,634均分别包括多个流体开口636,637,这些开口与进气空间和出气空间631,633和管子635流体相通。在流路的使用和介绍中,流体进入进气空间631并流过开口636而进入管子635的一端,经开口637从管子635的另一端流出而进入出气空间633,并流出该出气空间。

[0112] 在一个实施方式中,管束630的管子635可以是轴向伸长式,垂直取向,如图所示。然而,也可以是其它取向,诸如水平,并也可在水平和垂直取向之间完成一定角度。管子635可以是任何合适的形状,包括(但不限于)直的,曲线形的,诸如螺旋弯曲(例如,见图21)或另一种曲线构型,或者其它合适的形状。在一个优选的实施方式中,管子可以是曲线形状,其使得可利用传热表面面积达到最大,无需像直管那样表面面积相同但高度却很高。可以使用任何合适直径的管子和管子布置/方式。例如,可以提供单排或多排管子635;数量至少部分地取决于热交换器620的传热要求。在一个实施方式中,管束630可以为一般圆形,呈横截面。

[0113] 管子635可以采用任何合适优选防腐金属制成,其具有适合某种用途的导热传输特性。可以使用的管子材料的一些非限定性示例包括不锈钢、铝、钛、防腐钢合金, Inconel®, Monel®,或其它材料。

[0114] 进气和出气空间631和633都可包括任何合适形状的大体空心的外本体,构成压力边界和敞开的内部空间。管板632,634可以是任何合适的厚度和形状,在平面上,包括平面和弧形(例如,如果所述空间是同管子截面的形状)和在俯视图的情况下(例如,圆的横截面管束时为圆形)。管板和空间都可采用任何合适的防腐金属或金属合金制成,其中一些示例在上面结合管子635可能使用的材料时已经提到了。

[0115] 浸没式管束热交换器620可以通过合适的蒸汽和冷凝管路603以各种方式与蒸汽发生器502、反应堆容器500,和散热管道610流体互通和连接在其上,如图22和图23所示。管路603配置成建立流路,如这些图所示。任何合适的管子和材料都可用于管路603,其部分地取决于管子走向是用来输送冷凝液还是蒸汽和预期的相关使用温度和压力。例如,在一些实施方式中(但不限于此),管路优选可以是防腐金属制成,例如不锈钢或钢合金。所属领域技术人员完全可以想到选择和设计合适的管路和相关的装置设备,诸如装设阀门。显然,如图22和图23所示,建立重力驱动的流程不涉及到任何泵。

[0116] 下面简要介绍反应堆冷却系统600的使用原理。在假设的反应堆停堆期间,诸如全厂停电或类似事件时,其中,涡轮发电机停止发电,且没有正常的非安全有源系统,主蒸汽和主供水隔离阀(图中未示)首先关闭以便将蒸汽发生器502与兰金循环的安全壳之外的发电部分隔断。为此,以所属领域技术人员所熟知的方式,隔离阀关断了从蒸汽发生器502到

涡轮-发电机组 (T-G) 的蒸汽流和从 T-G 机组返回到蒸汽发生器的供给水流, 不再赘述。在关闭主隔离阀之前, 多余蒸汽首先被排入大气环境中。关闭主隔离阀则启动了反应堆堆芯冷却系统 600。公开了两个可能的使用冷却系统 600 的工作情景或方法, 这些将在下面进一步详细介绍, 如果出现停堆情况下, 这些方法无源地 (即, 不使用电力) 继续冷却反应堆, 以便通过使用浸没式管束冷却系统 602 去除衰变热。

[0117] 在图 22 所示的用来冷却反应堆的第一个使用环境或方法的情况下, 蒸汽发生器 502 在蒸汽发生器容器上半部分壳侧上产生的蒸汽 (通过停堆的反应堆产生的剩余衰变热) 被提取并引向浸没式管束热交换器 620, 在这里, 其在浸没式管束热交换器 620 的管子 635 内部凝结 (另见图 21)。冷凝的蒸汽释放其潜热给存放包围管束 630 的浸没式管束热交换器压力容器 621 壳侧内的储水 W (三次冷却剂)。

[0118] 在一个实施方式中, 管束 630 可完全浸没在热交换器 620 内的储水 W 中, 以便水在管子 635 外部提供冷却介质来冷凝蒸汽。在一个实施方式中, 管束 630 优选可位于纵轴 LA 附近, 与浸没式管束热交换器 620 的轴向中心线对准, 从而让水 W 在四周均匀地包围管束, 促进了管束中所有管子 635 的均匀冷却。然而, 管束的其它安装位置也是可以的。蒸汽流入和收集的冷凝液的流出都可被控制并可通过适当设计装设阀门, 管路, 或其它流量控制装置 (例如, 孔口等) 无源地予以保持, 使用时这些都不依赖电力或另一种动力源。

[0119] 在热交换器管束 630 的管子一侧, 从蒸汽发生器 502 处提取的蒸汽可从任何方便位置处进入到热交换器压力容器 621 内。在一个实施方式中, 蒸汽进气管路 603 可以侧向进入压力容器壳体 625, 管路可在热交换器压力容器 621 内延伸到管束 630 的进气空间 631 内, 在这里, 其与之流体相连。其它蒸汽进气部位也可以使用, 诸如 (但不限于) 通过上封头 622。

[0120] 管束 630 的下空间 633 内收集的冷凝液而后经由管路 603 回到蒸汽发生器 502 的壳的一侧, 只依靠自然重力流动。冷凝液排出管路 503 可以位于朝向热交换器压力容器 621 的底部 627 或其附近, 并可重新引回进入喷射点处的蒸汽发生器 502 内 (例如, 预热器部分 351), 喷射点低于蒸汽发生器蒸汽提取点 (例如, 过热器部分 350), 该蒸汽提供给浸没式管束热交换器 620。在蒸汽发生器 502 和浸没式管束热交换器 620 管子一侧 (即, 管束 630) 之间建立第二闭式流动环路。在下空间 633 和压力容器的壳体 625 之间的压力容器 621 内部, 设置相应的管路, 其然后连接到冷凝液排出管路 503, 后者连接到蒸汽发生器 503 上。

[0121] 继续参照图 22 所示的第一使用情景或方法, 浸没式管束热交换器压力容器 621 壳侧内管子 635 外部的储水 W (与管束 630 管子一侧上的冷凝液流体隔断和分开) 由管束内部的冷凝蒸汽加热, 管束将热量传输到水中。水 W 在反应堆停堆事故期间用作冷却二次冷却剂的散热器。为此, 水 W 起三次冷却剂的作用, 在停堆期间, 其初始温度小于二次冷却剂的初始温度。在反应堆停堆过程期间水 W 逐渐加热。在经过一段时间后, 水 W 达到沸点温度, 此时一部分水转换为蒸汽。蒸汽积聚在上封头 622 下方的压力容器水线 L 上方形成的蒸汽空间内。

[0122] 为了冷却储水 W (三次冷却剂), 该储水是用来凝结管束 630 内部二次冷却剂蒸汽冷凝的冷却液体, 积聚在壳一侧上的蒸汽被提取并经由合适管路 603 引向辅助散热系统 340 的散热管道 610 上, 如上详述。蒸汽流过散热管道 650 并以上述方式冷凝。具体来讲, 环形储存器 (主环形空间 313) 内的水的温度低于三次冷却剂蒸汽的温度, 从而形成凝结三次冷却剂蒸汽的散热器, 该蒸汽将热量传输到储存器中。冷凝液然后经由合适管路 603 返回到浸没式管束热交换器 620, 并进入压力容器 621 的壳一侧, 在那儿, 其被再次引入储水 W 中。这种冷却

系统有助于基本上保持水位,使管束630保持浸没在水线L下方的储水W中。该系统通过使用散热管道610凝结蒸汽而进一步形成了蒸汽和冷凝液的第三闭式流动环路,该环路与第二闭式环路不同并与之隔开,第二环路在浸没式管束热交换器620管子一侧和蒸汽发生器502上形成。总之,本文所述的第一和第二闭式流动环路的功能是分别对一次冷却剂和二次冷却剂进行冷却。第三闭式流动环路对浸没式管束热交换器620的冷却流体进行冷却(即,储水W形成的水的散热器),与管束630相比,该环路有助于间接冷却二次冷却剂。

[0123] 在图23所示的另一个用来冷却反应堆的第二使用情景或方法中,反应堆容器500内的一次冷却剂被浸没式管束热交换器620直接冷却,而不用由反应堆衰变热在蒸汽发生器502内继续产生的蒸汽。在这个过程中,一旦蒸汽和供给水隔离阀关闭,来自反应堆压力容器的立管224的热的一次冷却剂(“热段”)经由管路603被直接引向浸没式罐式热交换器620内管束630的管子一侧(见图23和图24)。一次冷却剂通过将其热量排放到浸没式管束热交换器620壳一侧的储水W内而得到冷却,其方式非常类似于图22所示和上述方式,与此同时,在管子635内部向下流动。差别是在整个冷却过程中以及在反应堆容器500内循环时一次冷却剂总是保持基本液态。这种冷却由于在浸没式管束热交换器620的进气口处的热的一次冷却剂和热交换器出口处的冷的一次冷却剂之间的密度差而形成的浮力压头(buoyancy head),而形成了自然循环流。较冷的一次冷却剂经由合适的管路603被输送并重新返回到反应堆容器500的环形下降环腔222区域(“冷段”)。浸没式管束热交换器620相对于反应堆容器500位置较高,将一次冷却剂引向热交换器的管路603的尺寸可设计成确保有足够的自然循环流,将堆芯的热量排放到热交换器内的壳的一侧的储水W中。

[0124] 在上述的用来冷却反应堆的第一和第二方法中,当衰变热产生处于最高时,在假设的反应堆停堆的早期阶段,浸没式管束热交换器620的内腔626内的储水量W优选足以将反应堆堆芯的衰变热通过壳一侧水的适当加热(经由一次冷却剂)而被排放。这可通过适当设定浸没式管束热交换器压力容器621的储存水量和尺寸来部分地实现。

[0125] 下面简要介绍安全壳结构的反应堆冷却系统600和空气冷却系统400的操作相互关系。如上所述,在热交换器620管束630内部冷凝蒸汽时未使用的剩余热量会因为对储水W加热而在热交换器的壳一侧产生蒸汽。该壳一侧的蒸汽被引向散热管道610,在这里,蒸汽通过将其潜热排放到安全壳结构(例如,内安全壳200)而凝结。安全壳200将热量排放到本文所述的无源式反应堆安全壳保护系统的安全壳结构和安全壳外壳结构300之间的环形空间313内的水中(最终排放到散热器或大气环境中)。来自散热管道610的冷凝蒸汽然后回到收集歧管(下排气环形集管344,如图16和图18所示),歧管然后只需通过重力将冷凝液引回到浸没式管束热交换器620。当内安全壳200和外安全壳外壳结构300之间的环形空间313内的冷却水蒸发时,暴露的内安全壳200会加热排放到空气中,此时,空气通过自然对流而充满了环形空间313。进气管道401提供新鲜空气(通过吸入),这些进气管在主环形空间313内围绕安全壳200而沿周向间隔布置(例如,见图16和上述介绍)。在一旦环形空间313内的所有水都蒸发,安全壳200则会通过空气冷却独立排放热量。经过一定时间的水冷却后(排放了相当大一部分反应堆衰变热),空气冷却则足以将所有的衰变热排出。因为浸没式管束冷却系统602为闭环自然流动系统,该冷却过程可以无限期地继续下去。

[0126] 应该清楚的是,上述两种方法的不同形式和结合形式都可用来在无动力的反应堆停堆事件期间无源地冷却反应堆。

[0127] 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、布置、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、布置、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,所附权利要求应该视为广义地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,但都没有脱离本发明等同项的范围。

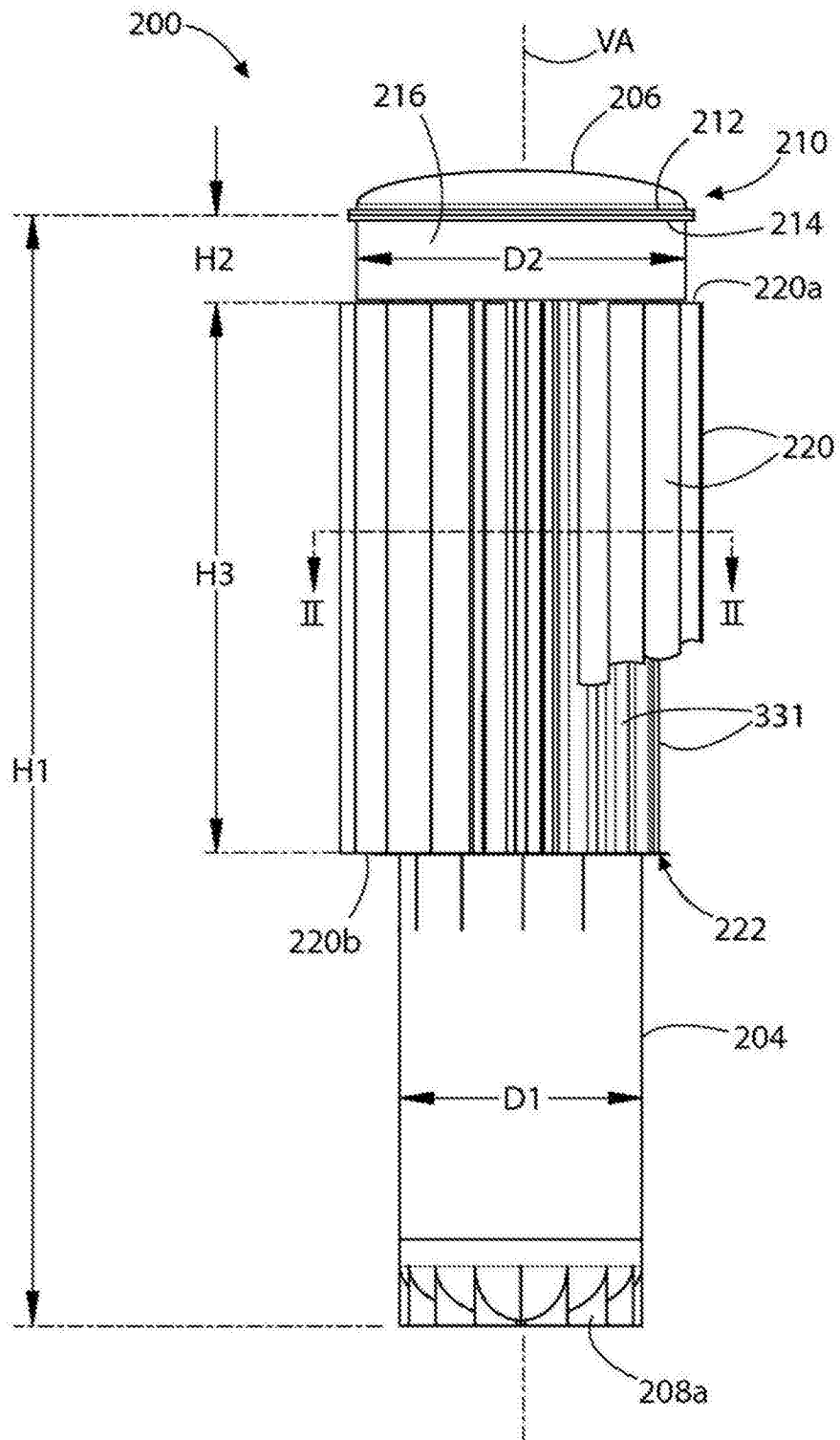


图1

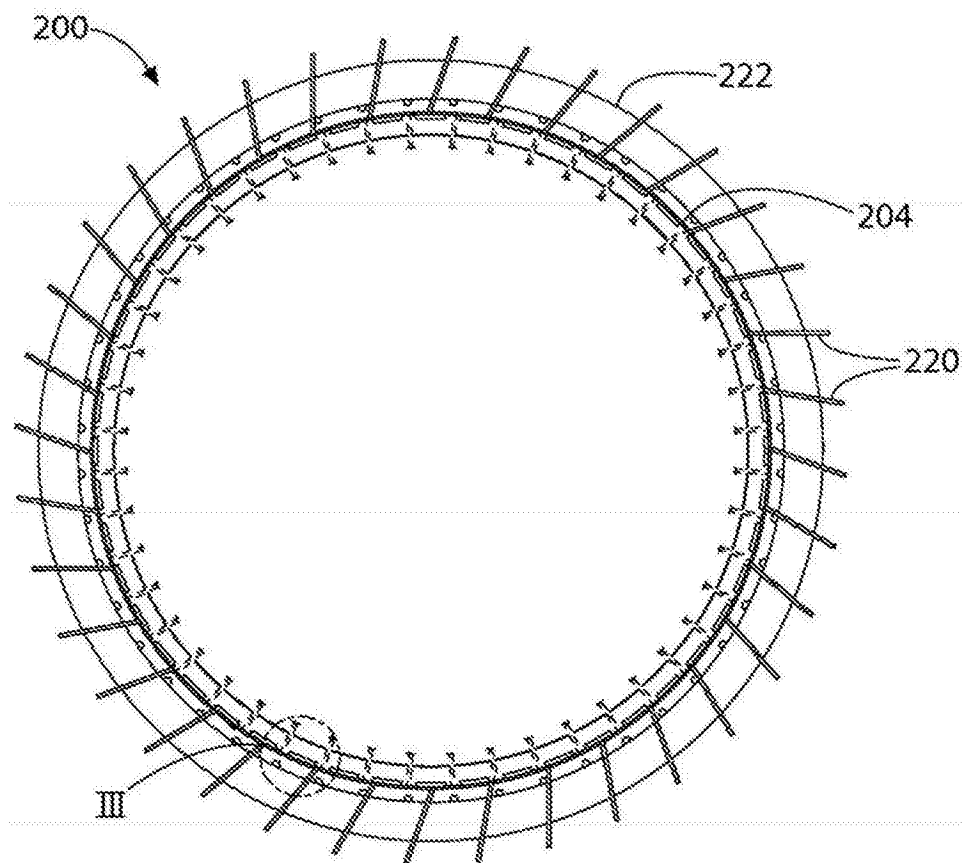


图2

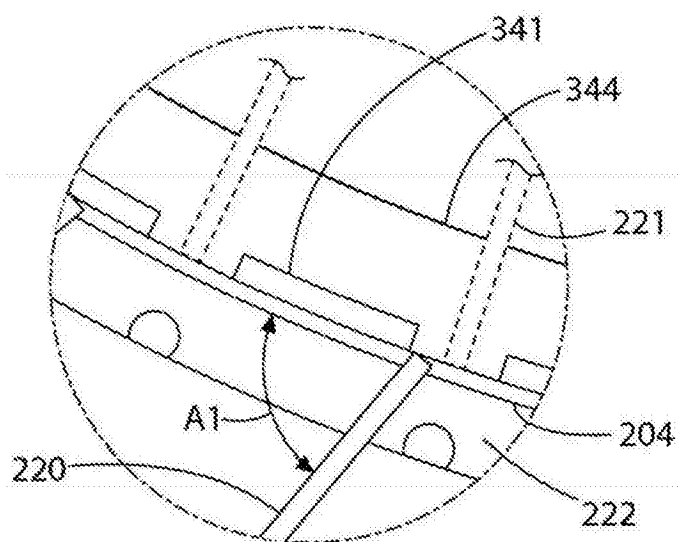


图3

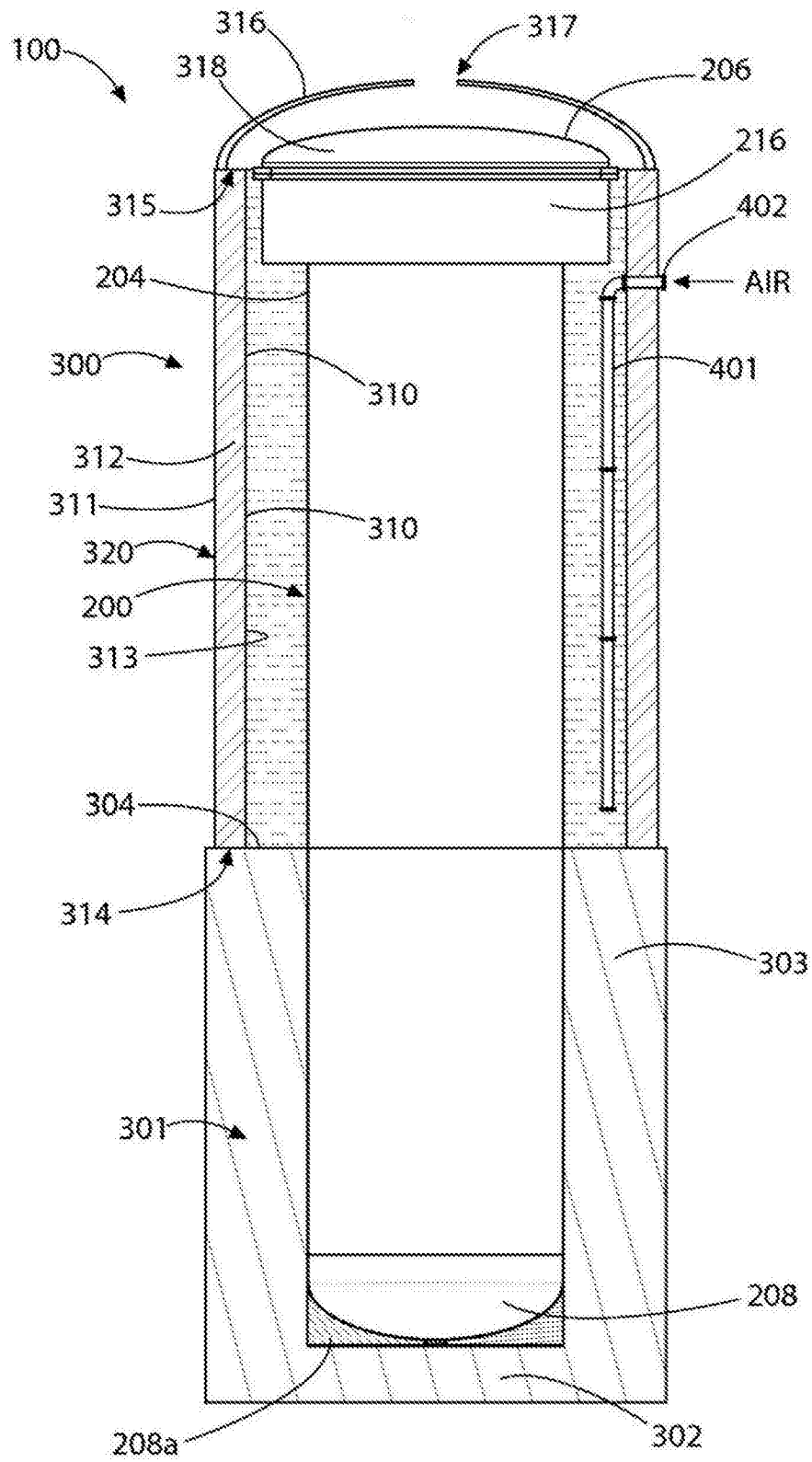


图4

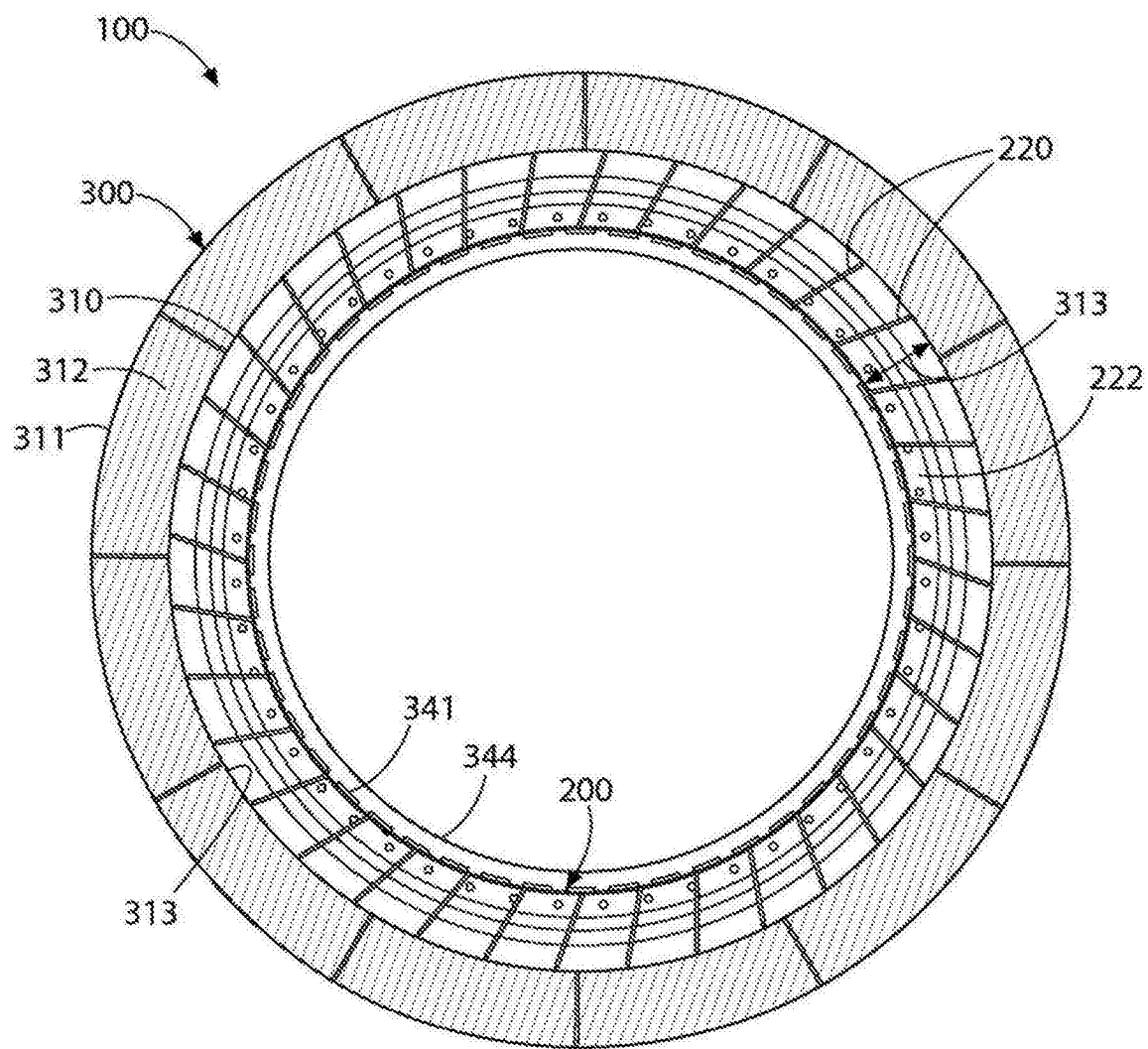


图5

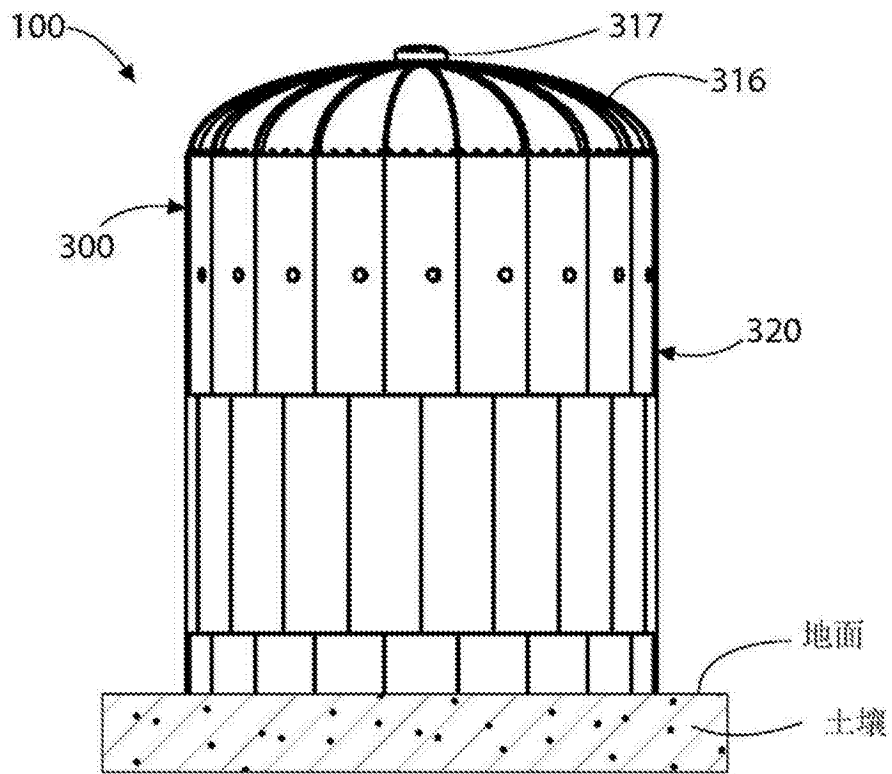


图6

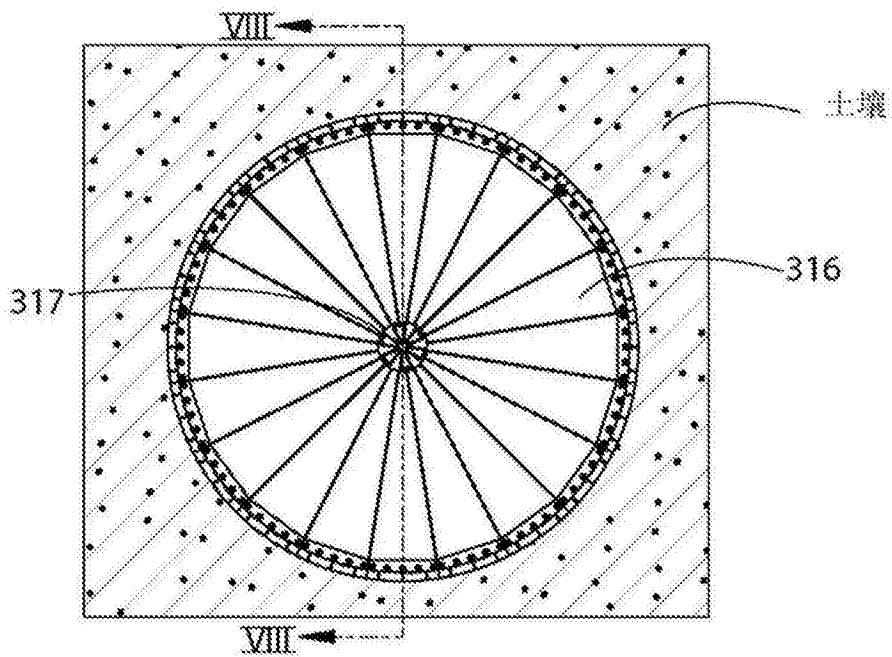


图7

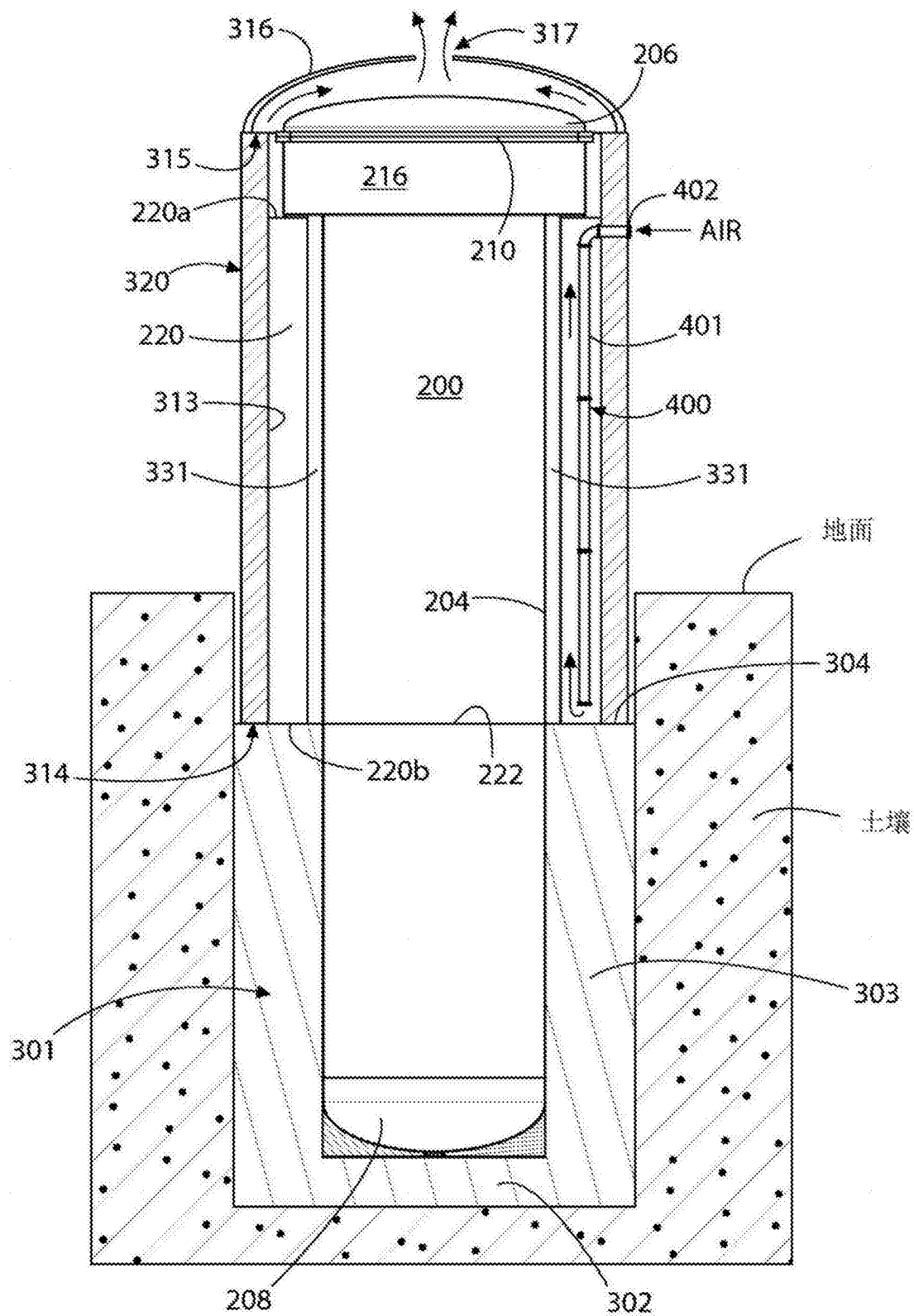


图8

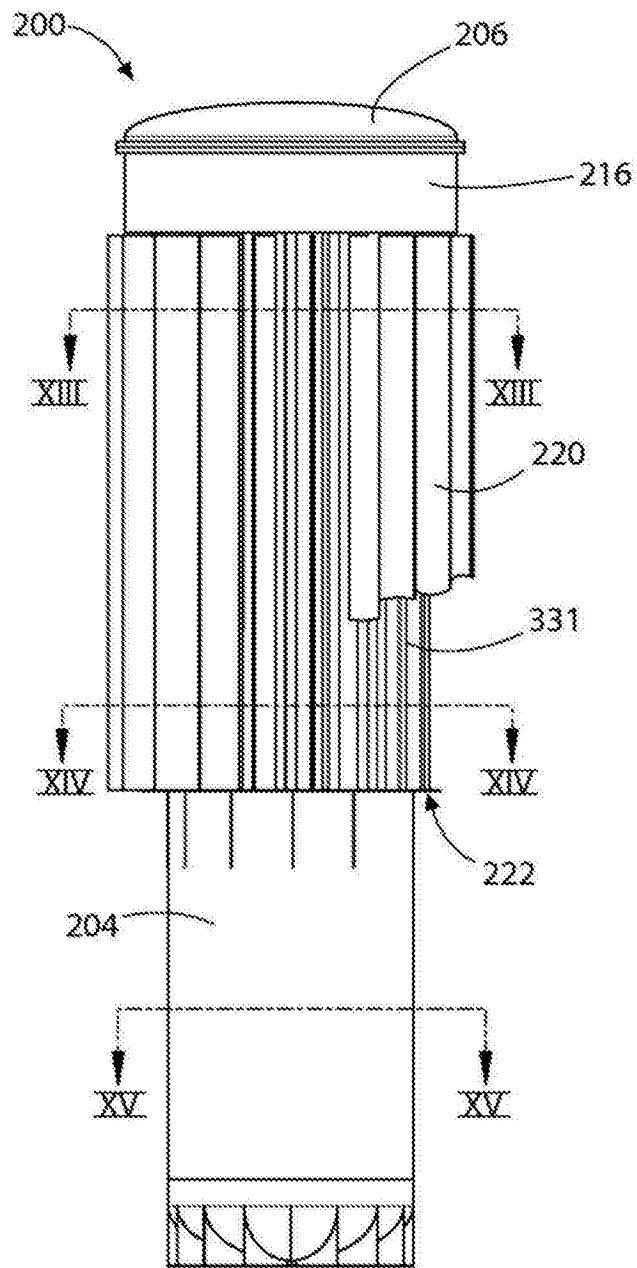


图9

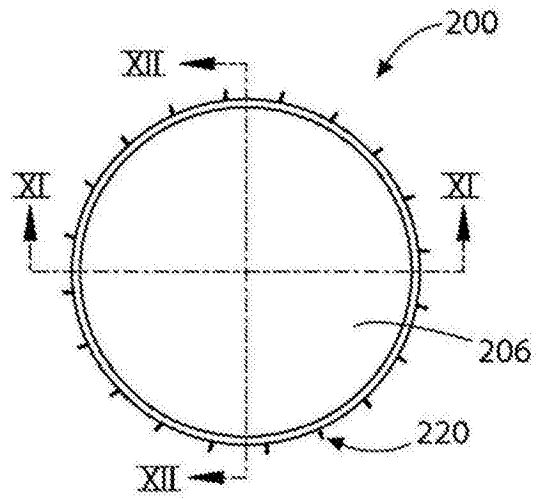


图10

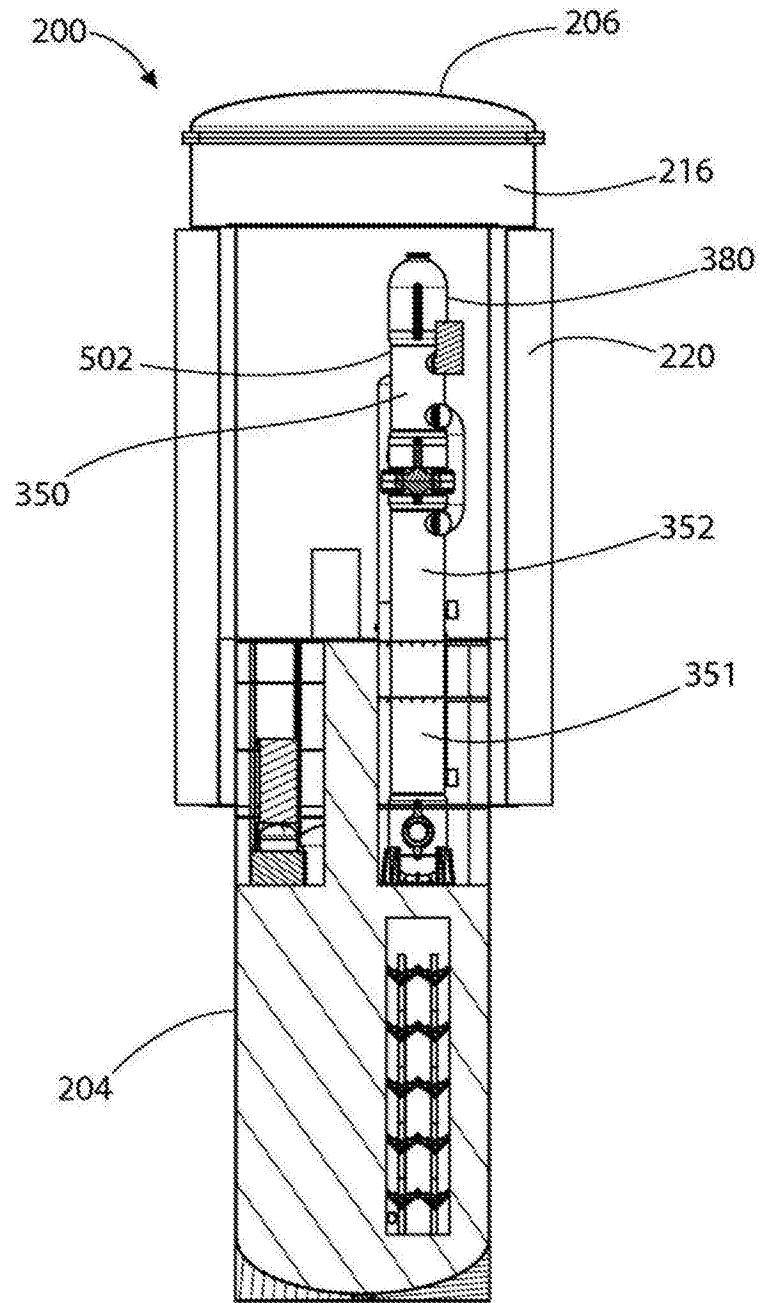


图12

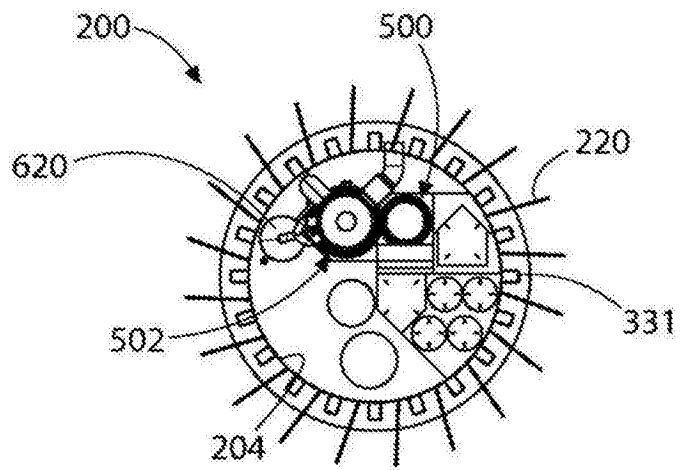


图13

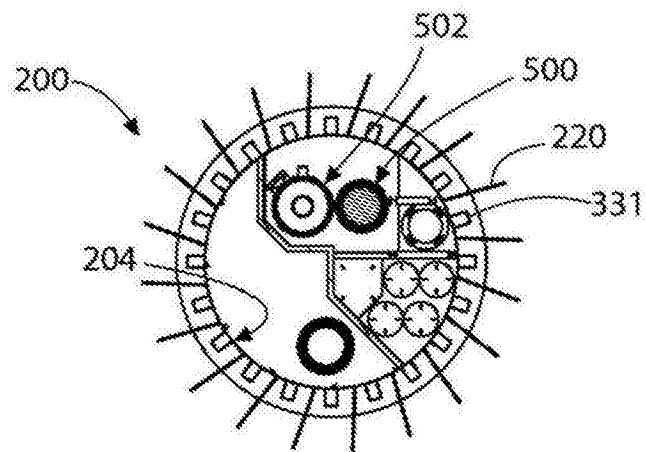


图14

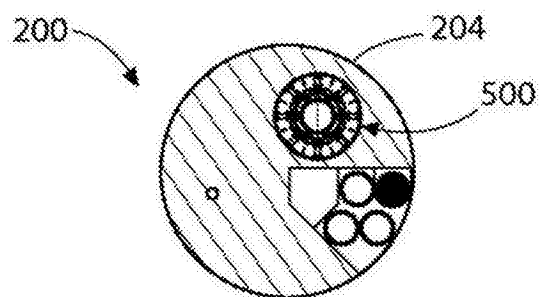


图15

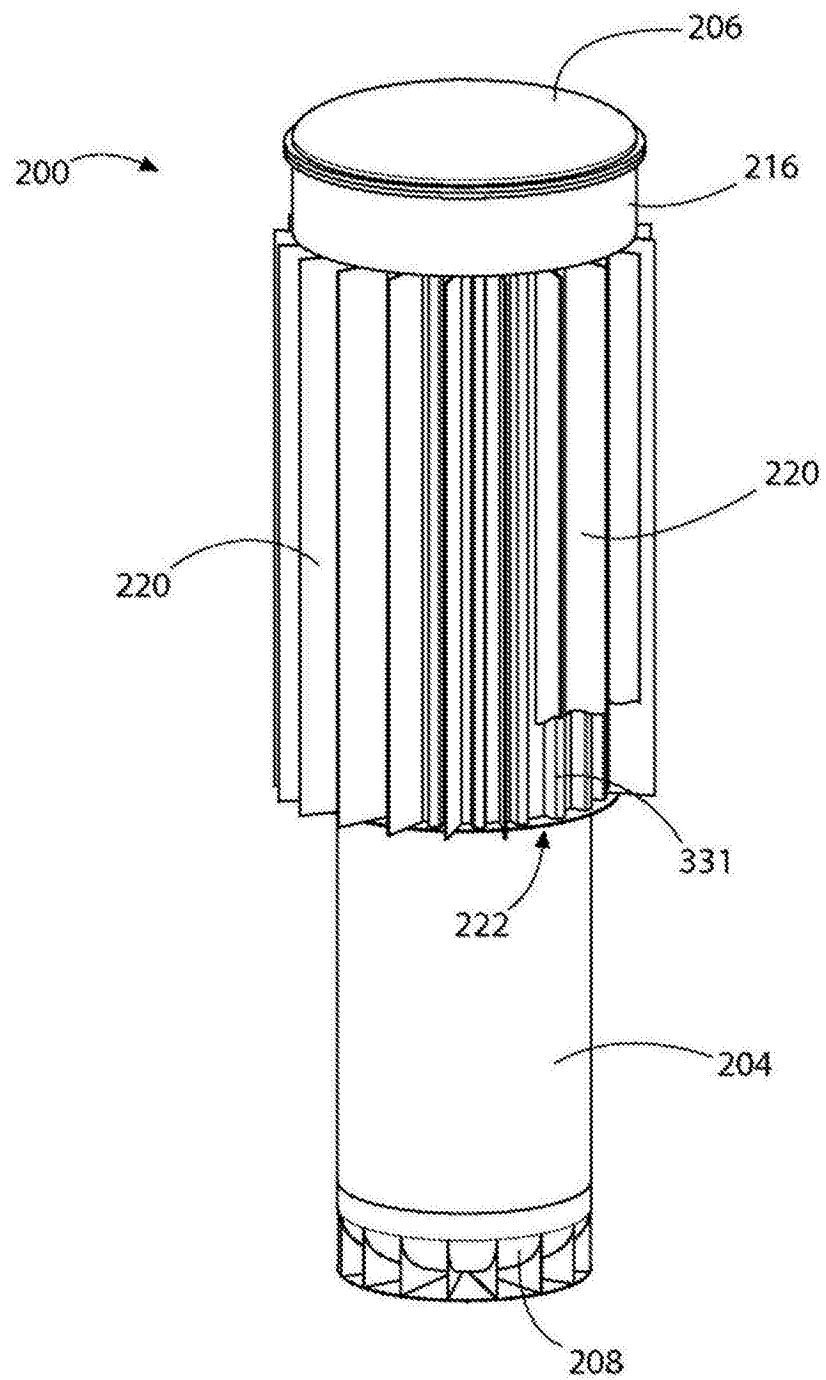


图17

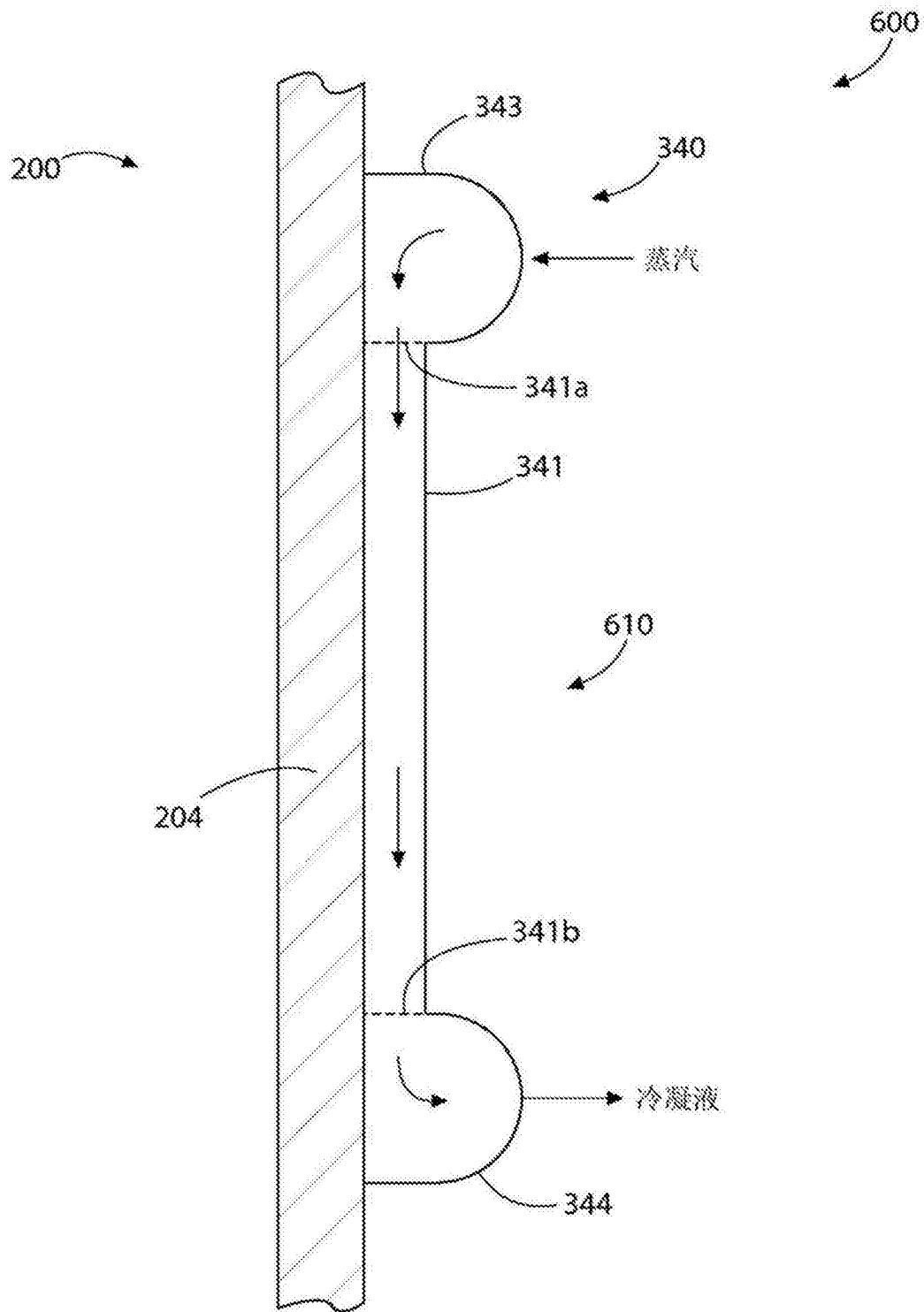


图18

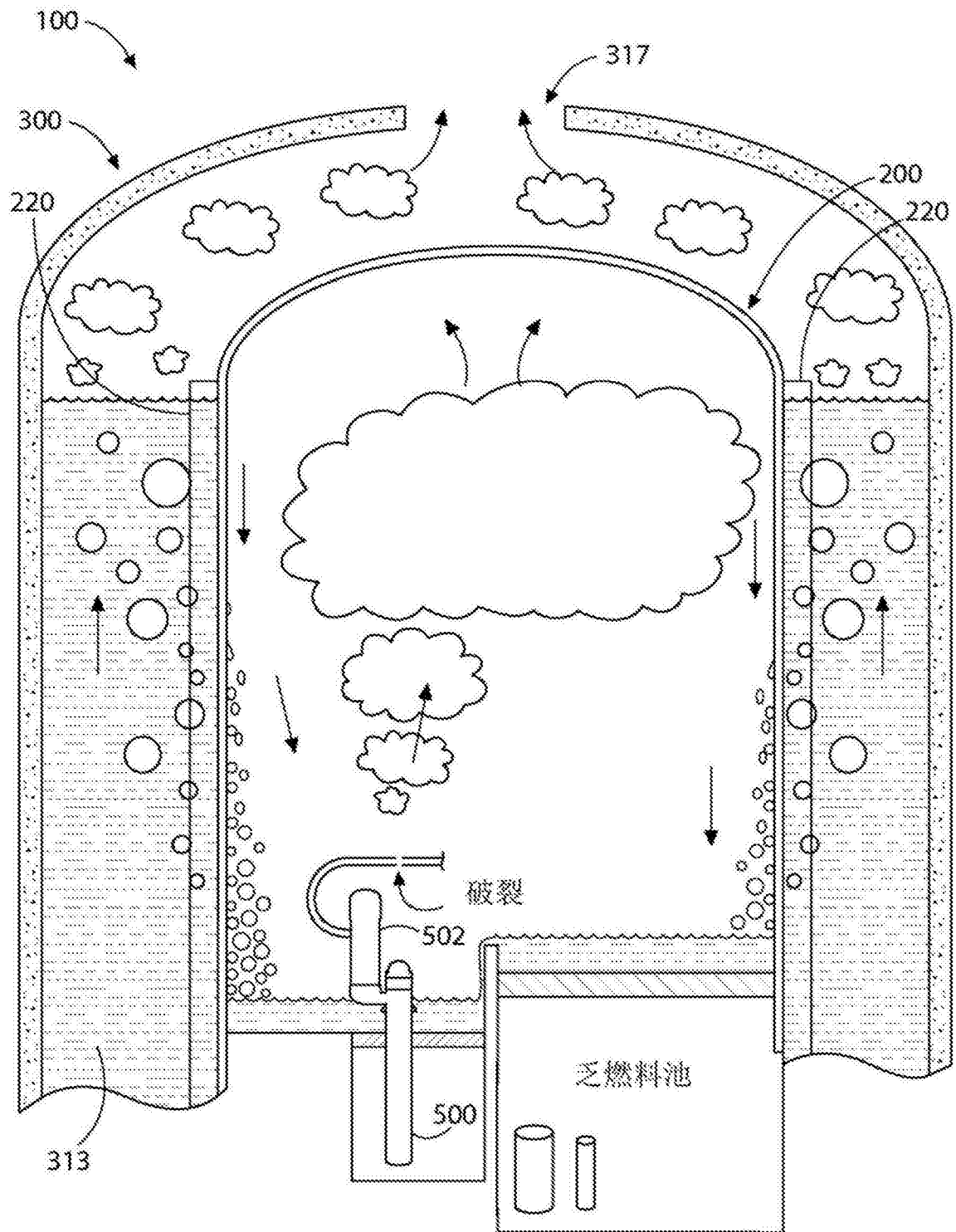


图19

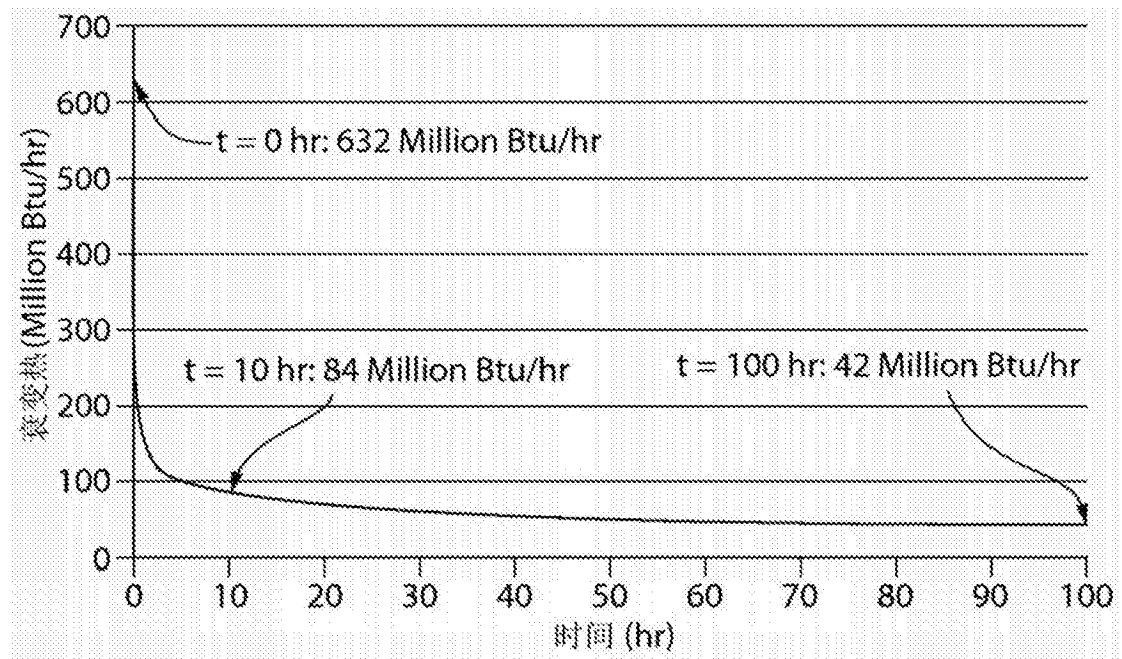


图20

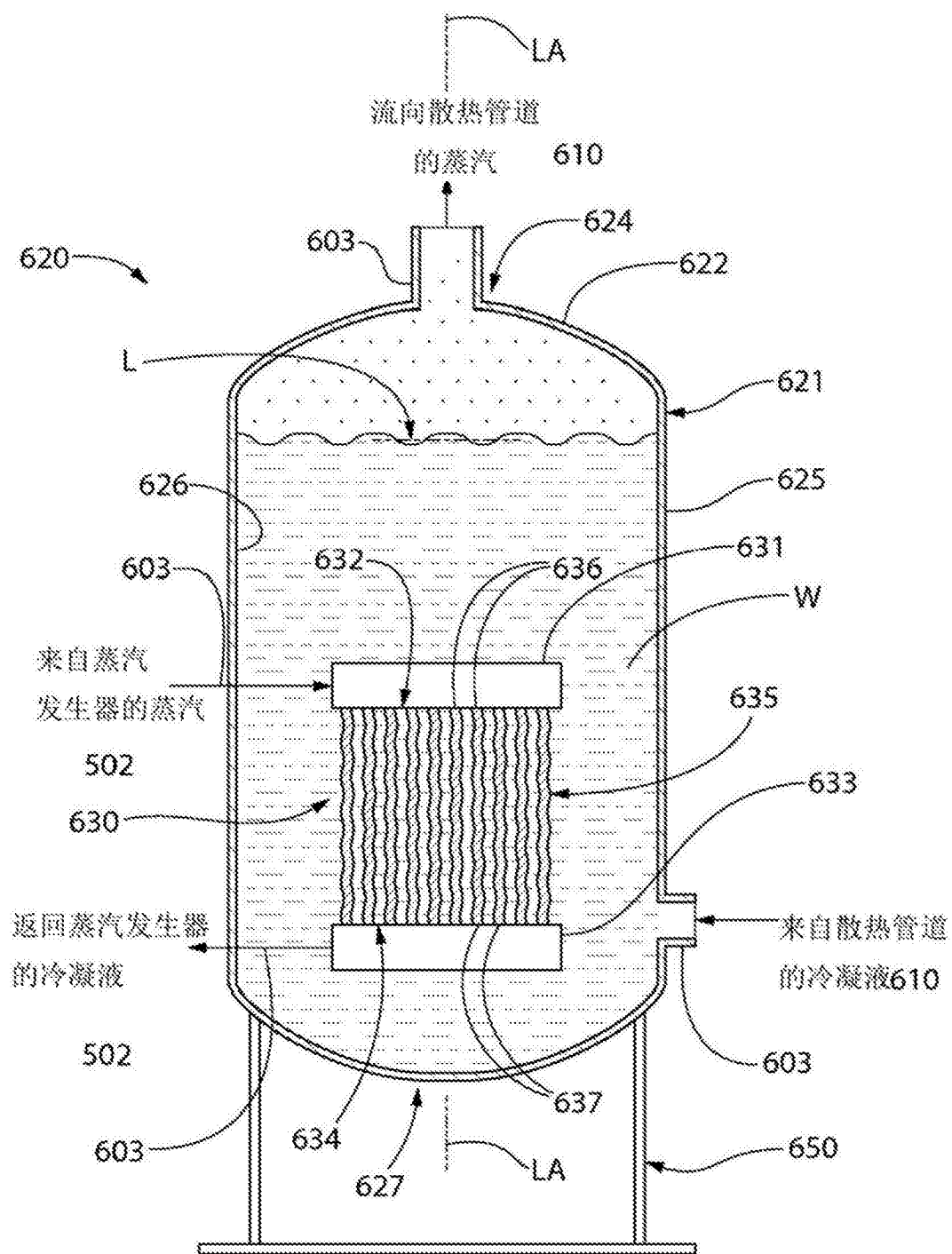


图21

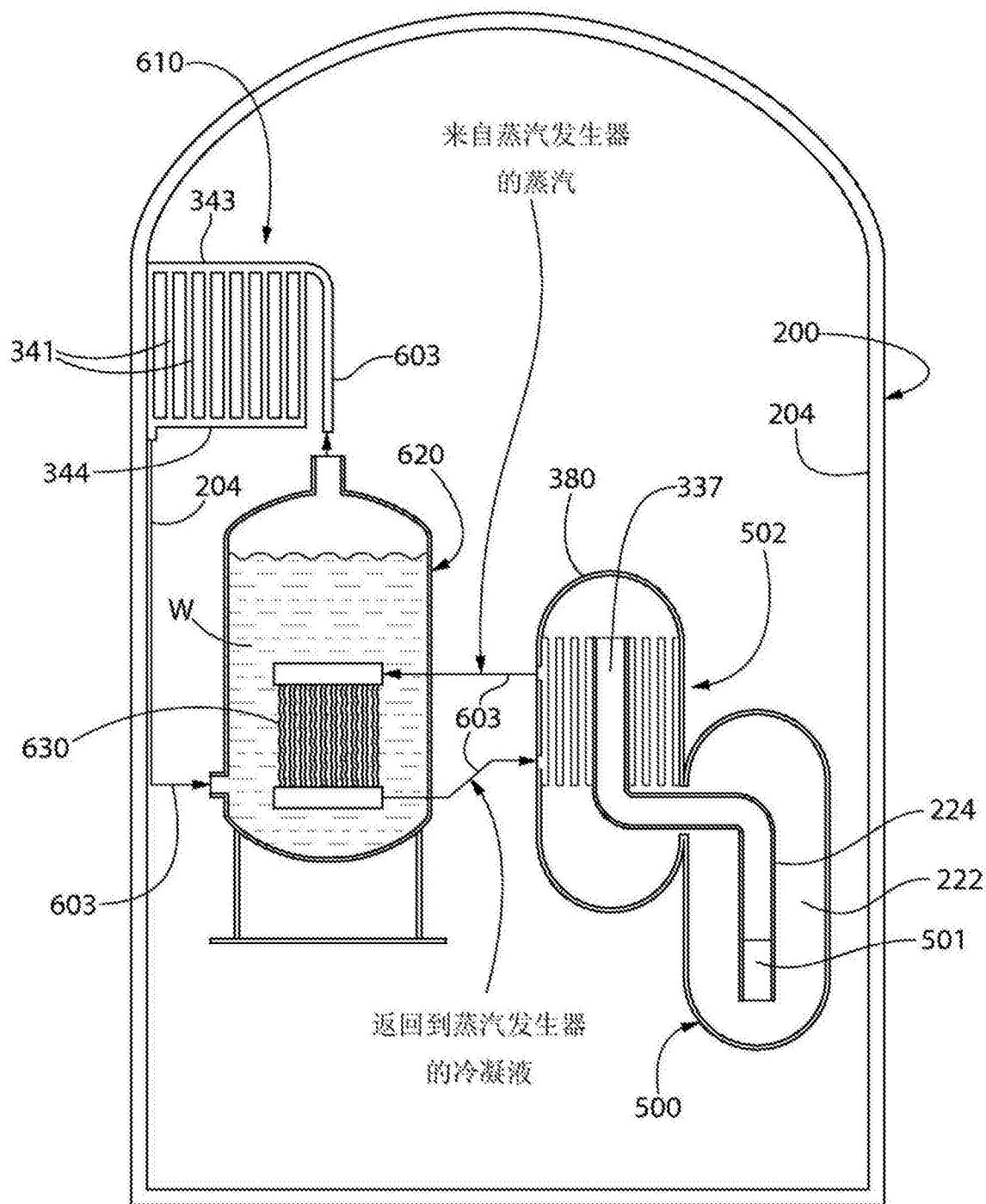


图22

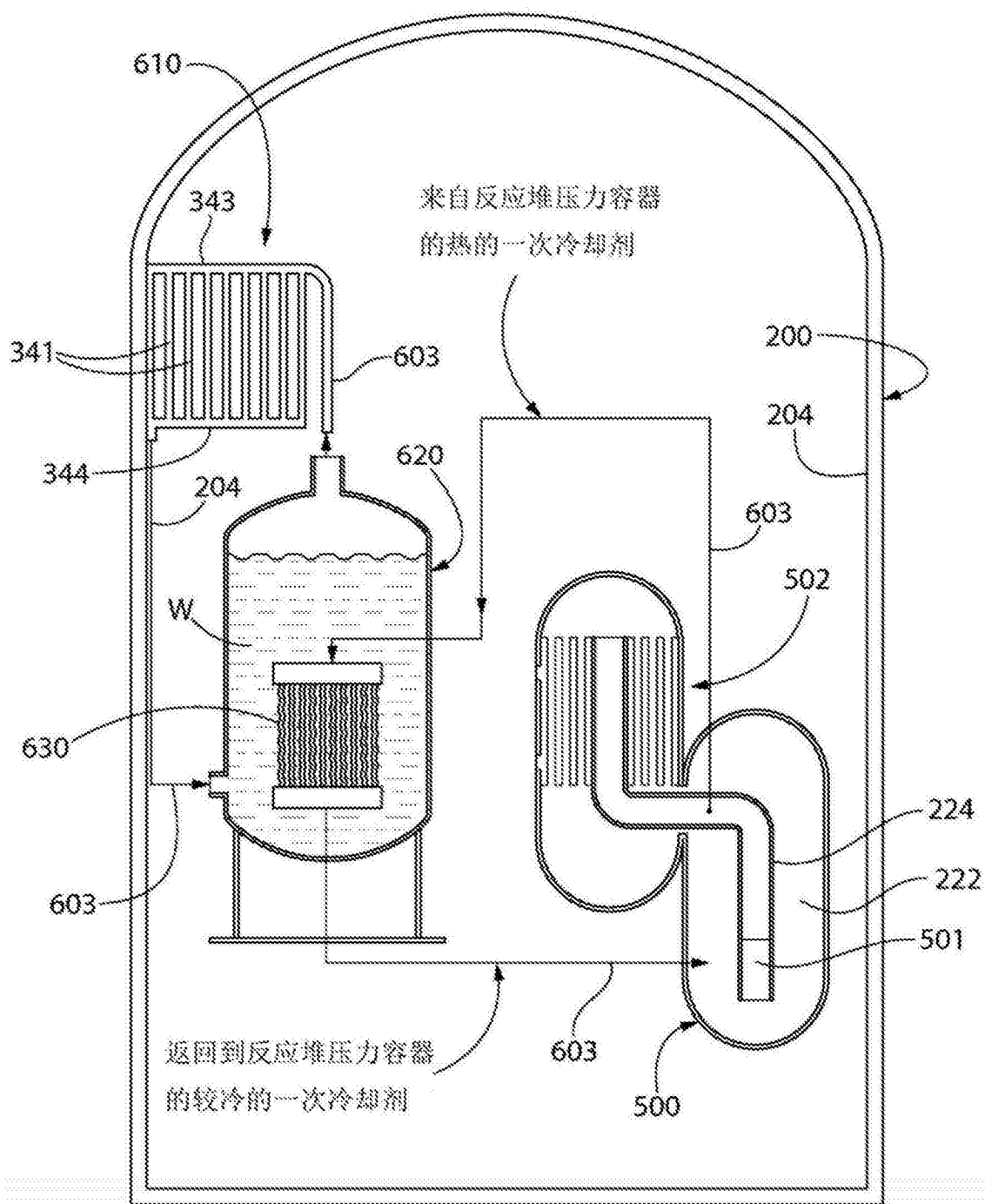


图23

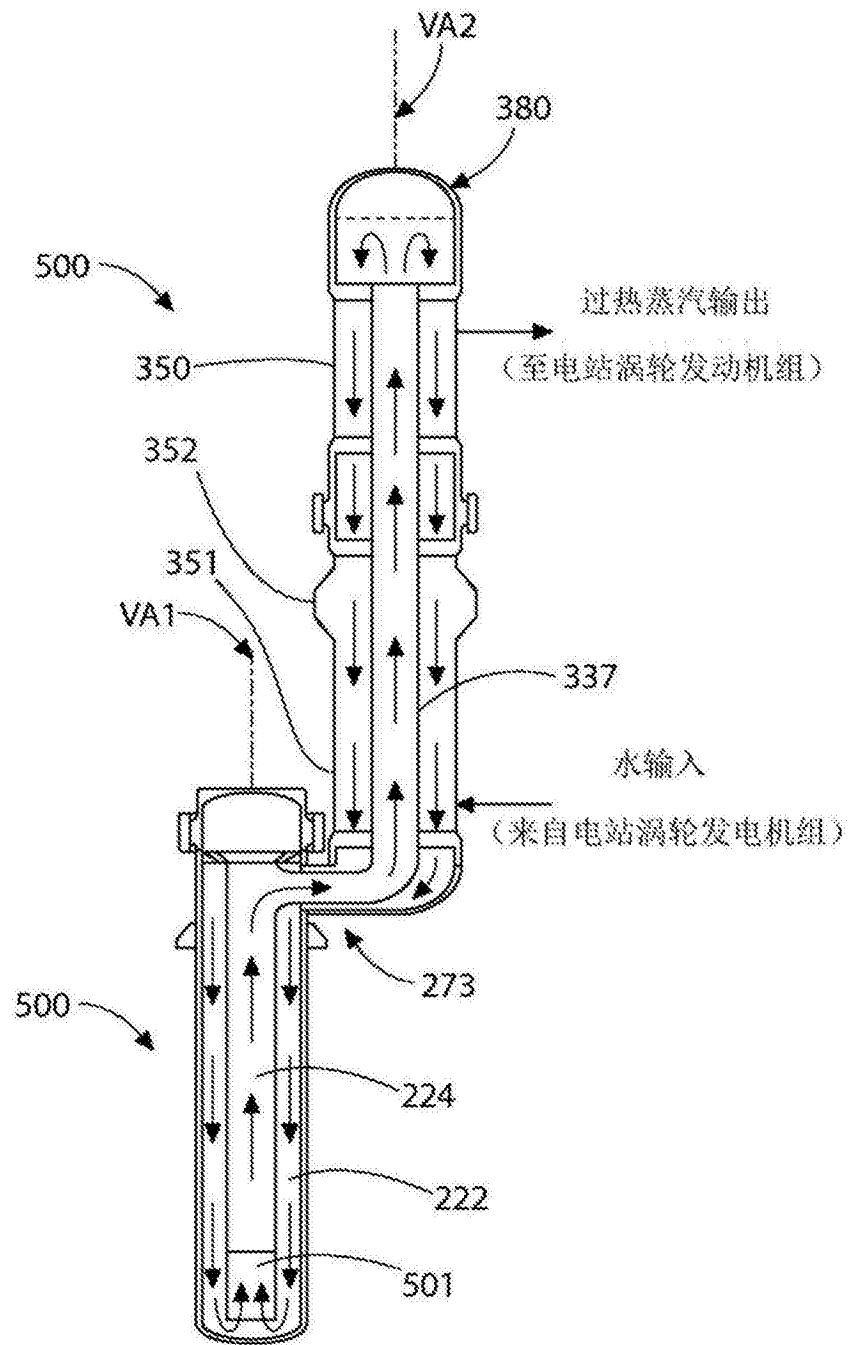


图24