

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6442489号
(P6442489)

(45) 発行日 平成30年12月19日(2018.12.19)

(24) 登録日 平成30年11月30日(2018.11.30)

(51) Int. Cl.	F I
G 2 1 C 15/18 (2006.01)	G 2 1 C 15/18 M
G 2 1 C 1/00 (2006.01)	G 2 1 C 15/18 R
	G 2 1 C 1/00
	G 2 1 C 15/18 W

請求項の数 11 (全 28 頁)

(21) 出願番号	特願2016-516791 (P2016-516791)	(73) 特許権者	514272173
(86) (22) 出願日	平成26年5月28日(2014.5.28)		エスエムアール・インベンテック・エルエルシー
(65) 公表番号	特表2016-523355 (P2016-523355A)		アメリカ合衆国、ニュージャージー・08053、マールトン、ワン・ホルテック・ドライブ
(43) 公表日	平成28年8月8日(2016.8.8)	(74) 代理人	100114188
(86) 国際出願番号	PCT/US2014/039842		弁理士 小野 誠
(87) 国際公開番号	W02014/193988	(74) 代理人	100119253
(87) 国際公開日	平成26年12月4日(2014.12.4)		弁理士 金山 賢教
審査請求日	平成29年5月23日(2017.5.23)	(74) 代理人	100124855
(31) 優先権主張番号	61/827, 943		弁理士 坪倉 道明
(32) 優先日	平成25年5月28日(2013.5.28)	(74) 代理人	100129713
(33) 優先権主張国	米国 (US)		弁理士 重森 一輝

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 受動的反応炉冷却システムおよび方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

受動的核反応炉停止冷却システムであって、

核燃料炉心を収容する反応炉容器であって、前記核燃料炉心により加熱される一次冷却材を格納する、反応炉容器と、

前記反応炉容器に流体連結し、液体二次冷却材を格納する、蒸気発生器と、

前記反応炉容器と前記蒸気発生器との間の第1の閉鎖流ループ内を循環する前記一次冷却材であって、前記蒸気発生器内の前記液体二次冷却材に熱を伝え、二次冷却材蒸気を生成する、前記一次冷却材と、

液体三次冷却材のインベントリ及び管束を含む熱交換器であって、前記管束が前記液体三次冷却材中に浸漬する、熱交換器と、

前記浸漬された管束と前記蒸気発生器との間の第2の閉鎖流ループ内を、重力流を介して循環する、前記二次冷却材蒸気と、を備え、

前記二次冷却材蒸気が前記蒸気発生器から抽出され、前記第2の閉鎖流ループ内を流れて前記管束に入り、凝縮して凝縮液を形成し、前記凝縮液が前記蒸気発生器に流れ戻り、

前記反応炉容器、蒸気発生器、及び熱交換器が一般に、シェルを有する金属反応炉格納容器の内部に配置され、

前記二次冷却材蒸気が、前記熱交換器内の前記液体三次冷却材のインベントリに熱を伝え、三次冷却材蒸気を生成し、

10

20

前記三次冷却材蒸気が前記熱交換器から抽出され、第3の閉鎖流ループ内を流れて放熱器導管のレイに入り、凝縮して液体三次冷却材を形成し、前記液体三次冷却材が前記熱交換器に流れ戻り、それにより前記液体三次冷却材のインベントリを補充し、

前記放熱器導管が前記金属反応炉格納容器の前記シェルの内面に一体的に取り付けられ、前記三次冷却材蒸気が前記金属反応炉格納容器の前記シェルに前記放熱器導管を介して熱を伝え、凝縮して液体三次冷却材になる、前記システム。

【請求項2】

蒸気が、前記凝縮液が前記蒸気発生器に戻る場所よりも高い場所で前記蒸気発生器から抽出される、請求項1に記載の前記システム。

【請求項3】

前記反応炉容器、蒸気発生器、及び熱交換器が全て、鉛直方向に細長い形状である、請求項1に記載の前記システム。

【請求項4】

前記金属反応炉格納容器を包囲する水を格納するリザーバを更に備える、請求項1に記載の前記システム。

【請求項5】

前記リザーバ内の前記水が、前記三次冷却材蒸気の温度よりも低い温度を有し、前記三次冷却材蒸気を凝縮させるためにヒートシンクを形成する、請求項4に記載の前記システム。

【請求項6】

前記リザーバが環状形状を有し、前記金属反応炉格納容器と外側格納エンクロージャ構造との間に形成される、請求項4または5に記載の前記システム。

【請求項7】

受動的核反応炉停止冷却システムであって、

核燃料炉心を収容する反応炉容器であって、前記核燃料炉心により加熱される一次冷却材を格納する、反応炉容器と、

冷却水のインベントリ及び管束を含む熱交換器であって、前記管束が前記冷却水中に浸漬する、熱交換器と、

前記浸漬された管束と前記反応炉容器との間の第1の閉鎖流ループ内を、重力流を介して循環する、前記一次冷却材と、を備え、

前記一次冷却材が、前記熱交換器内の前記冷却水のインベントリに熱を伝え、前記反応炉容器に流れ戻る前に冷却され、

前記反応炉容器及び熱交換器が一般に、金属反応炉格納容器の内部に配置され、

前記一次冷却材が、前記熱交換器内の前記冷却水のインベントリを加熱し、蒸気を生成し、

前記蒸気が前記熱交換器から抽出され、第2の閉鎖流ループ内を流れて放熱器導管のレイに入り、凝縮し、前記熱交換器に流れ戻り、それにより液相内に前記冷却水のインベントリを補充し、

前記放熱器導管が金属反応炉格納容器に一体的に取り付けられ、前記蒸気が前記金属反応炉格納容器に前記放熱器導管を介して熱を伝え、凝縮する、前記システム。

【請求項8】

前記金属反応炉格納容器を包囲する水を格納するリザーバを更に備え、前記リザーバ内の前記水が、前記蒸気の温度よりも低い温度を有し、前記蒸気を凝縮させるためにヒートシンクを形成する、請求項7のいずれかに記載の前記システム。

【請求項9】

前記リザーバが環状形状を有し、前記金属反応炉格納容器と外側格納エンクロージャ構造との間に形成される、請求項8に記載の前記システム。

【請求項10】

停止後に核反応炉を受動的に冷却するための方法であって、

反応炉容器内の一次冷却材を核燃料炉心で加熱することと、

10

20

30

40

50

蒸気発生器内の液体二次冷却材を前記加熱された一次冷却材で加熱して、二次冷却材蒸気を生成することと、

前記蒸気発生器から前記二次冷却材蒸気を抽出することと、

圧力容器内の冷却水のインベントリ中に浸漬された管束を通して前記抽出された二次冷却材蒸気を流すことと、

前記二次冷却材蒸気を凝縮させて二次冷却材凝縮液を形成することと、

前記二次冷却材凝縮液を前記蒸気発生器に戻すことと、

前記二次冷却材蒸気によって前記圧力容器内の前記冷却水を加熱することと、

前記冷却水の一部を蒸気相に変換することと、

前記圧力容器から前記蒸気相を抽出することと、

ヒートシンクと熱連通する金属反応炉格納容器に取り付けられた放熱器導管を通して抽出された前記蒸気相を流すことと、

前記蒸気相を凝縮させることと、

前記凝縮された冷却水を前記圧力容器に戻して、前記冷却水のインベントリを補充することと、を含み、

前記二次冷却材蒸気及び凝縮液が、前記管束と蒸気発生器との間の第1の閉鎖流ループを回って循環する、前記方法。

【請求項11】

停止後に核反応炉を受動的に冷却するための方法であって、

反応炉容器内の一次冷却材を核燃料炉心で加熱することと、

前記反応炉容器から前記加熱された一次冷却材を抽出することと、

圧力容器内の冷却水のインベントリ中に浸漬された管束を通して前記加熱された一次冷却材を流すことと、

前記加熱された一次冷却材を冷却してその温度を下げることと、

前記冷却された一次冷却材を前記反応炉容器に戻すことと、

二次冷却材蒸気によって前記圧力容器内の前記冷却水を加熱することと、

前記冷却水の一部を蒸気相に変換することと、

前記圧力容器から前記蒸気相を抽出することと、

ヒートシンクと熱連通する金属反応炉格納容器に取り付けられた放熱器導管を通して抽出された前記蒸気相を流すことと、

前記蒸気相を凝縮させることと、

前記凝縮された冷却水を前記圧力容器に戻して、前記冷却水のインベントリを補充することと、を含み、

前記一次冷却材が、前記管束と反応炉容器との間の第1の閉鎖流ループを回って循環する、前記方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

関連特許出願の相互参照

本出願は、2013年5月28日に出願された米国仮特許出願第61/827,943号の利益を主張し、その全体が参照により本明細書に組み込まれる。

【0002】

本発明は、核反応炉に関し、より具体的には、反応炉停止運転のための受動的反応炉冷却システムを伴う、反応炉及び反応炉格納システムに関する。

【背景技術】

【0003】

核反応炉のための格納施設は、核分裂を利用して加圧蒸気を生成する、プラントの核蒸気供給システム(NSSS)に対する環境的隔離を提供するエンクロージャとして定義される。商業的核反応炉は、施設に関して想定し得る最も深刻な事故から結果として生じる温度及び圧力に耐えることができる、圧力保持構造内に封入されることが必要とされる。

10

20

30

40

50

反応炉及びその格納施設に関して想定し得る最も深刻なエネルギー放出事故は、2つの種類のものであり得る。

【0004】

第1に、冷却材喪失事故（LOCA）に続き、格納空間内での反応炉の冷却材の突然の放出による、プラントの核蒸気供給システム（NSSS）からの熱エネルギーの急速な大量放出を伴う事象。突然減圧された反応炉冷却材は、激烈に減圧沸騰し、格納空間内の圧力及び温度の急速な上昇を結果としてもたらすことになる。格納施設内の空間は空気及び蒸気の混合状態になる。LOCAは、反応炉冷却材を運搬するパイプの突然の破損を推定することで、確実に想定することができる。

【0005】

格納施設の完全性に対する潜在的リスクの、別の第2の熱的事象は、プラントの核蒸気供給システム（NSSS）からの全ての熱遮断経路が失われ、反応炉を「緊急停止」に追い込むようなシナリオである。全電源喪失が、そのような事象である。反応炉内で発生する崩壊熱は、反応炉を無制御の圧力上昇から保護するために除去されねばならない。

【0006】

より直近では、格納構造はまた、墜落する飛行機からの衝撃に耐えることも監督機関から求められている。格納構造は典型的には、LOCAからの内部圧力に耐えるように、大規模な鉄筋コンクリートのドームとして建造されている。格納構造の厚いコンクリート壁は飛行機の衝撃に耐えることが可能であるかもしれないが、残念ながら良好な断熱体でもあり、その不要な熱を外部環境に排除するためのポンプ式排熱システム（熱交換器及びポンプを採用する）を必要とする（圧力上昇を最小化するため、または崩壊熱を除去するため）。しかしながら、そのような放熱システムは、ポンプに電力を供給するための強力な電源（例えば、外部または構内のディーゼル発電機）に依存する。津波に引き続くFukushimaでの全電源喪失は、ポンプに依存することの愚かさを突きつける警告である。現状技術における上の弱点により、改善された核反応炉格納システムが希求される。

【0007】

前述の格納冷却問題の他にも、核反応炉は、停止された後に相当量の熱エネルギーを生成し続ける。図20は、緊急停止（すなわち、制御棒の急速な挿入、または他の手段による連鎖反応の突然の休止）に続く軽水炉の典型的な発熱曲線を示す。現行の反応炉の設計においては、上述のように、反応炉の崩壊熱は、ポンプ及び熱交換器のシステムを活用して、熱エネルギーをプラントによって維持される冷却水の好適な源に運搬する、プラントの残留熱除去（RHR）システムによって除去される。図20に見ることができるように、反応炉の崩壊熱は時間と共に指数関数的に減弱し始めるが、発生した熱が除去されなかった場合、反応炉の安全性を脅かすのに大変有意なままである（津波によって引き起こされた水の波浪での、その電気モータの浸漬によって、反応炉の熱を抽出するために必要であったポンプが故障したFukushimaの場合のように）。Fukushimaの大惨事は、極限環境条件下での強制流（ポンプ依存）システムの脆弱性における厳しい教訓を提供した。

【0008】

改善された反応炉冷却システムが所望される。

【発明の概要】

【0009】

本開示に従う反応炉冷却システムは、上に説明されたように、利用可能な電力供給を必要とするポンプ及びモータへのいかなる依存及びそれらの欠点を伴わない、反応炉の崩壊熱を排除するための完全に受動的な手段を提供する。一実施形態において、本冷却システムは、本冷却システムを通る流れを誘発するために、もっぱら重力及び相違する流体密度に依存する。一実施形態において、この重力駆動システムは便宜上、浸漬束化冷却システム（SBCS）として構成及び言及される（この恣意的な名称は、いかなる点においても制限的ではない）。本冷却システムは、全電源喪失、または発電所のランキンサイクルを介した燃料炉心からの通常の排熱経路が失われる、別の想定される事故シナリオの事象に

10

20

30

40

50

において、反応炉一次冷却材から熱を受動的に抽出するように設計される。

【0010】

一実施形態において、受動的核反応炉停止冷却システムは、核燃料炉心を内部に収容し、燃料炉心によって加熱される一次冷却材を格納する反応炉容器と、反応炉容器に流体連結し、液体二次冷却材を格納する蒸気発生器とを含む。一次冷却材は、反応炉容器と蒸気発生器との間の第1の閉鎖流ループ内を循環し、蒸気発生器内の二次冷却材に熱を伝え、二次冷却材蒸気を生成する。熱交換器は、液体三次冷却材のインベントリ及び管束を含み、管束は三次冷却材中に浸漬する。二次冷却材は、浸漬された管束と蒸気発生器との間の第2の閉鎖流ループ内を、重力流を介して循環する。二次冷却材蒸気は、蒸気発生器から抽出され、第2の閉鎖流ループ内を流れて管束に入り、凝縮して凝縮液を形成し、凝縮液は蒸気発生器に流れ戻る。

10

【0011】

別の実施形態において、受動的核反応炉停止冷却システムは、核燃料炉心を内部に収容し、燃料炉心によって加熱される一次冷却材を格納する反応炉容器と、冷却水のインベントリ及び管束を含み、管束が冷却水中に浸漬する熱交換器とを含む。一次冷却材は、浸漬された管束と反応炉容器との間の第1の閉鎖流ループ内を、重力流を介して循環し、一次冷却材は、熱交換器内で冷却水のインベントリに熱を伝え、反応炉容器に流れ戻る前に冷却される。

【0012】

別の実施形態において、停止後に核反応炉を受動的に冷却するための方法が提供される。本方法は、反応炉容器内の一次冷却材を核燃料炉心で加熱することと、蒸気発生器内の二次冷却材を加熱された一次冷却材で加熱して、二次冷却材蒸気を生成することと、蒸気発生器から二次冷却材蒸気を抽出することと、圧力容器内の冷却水のインベントリ中に浸漬された管束を通して抽出された二次冷却材蒸気を流すことと、二次冷却材蒸気を凝縮させて二次冷却材凝縮液を形成することと、二次冷却材凝縮液を蒸気発生器に戻すことと、を含み、二次冷却材蒸気及び凝縮液は、管束と蒸気発生器との間の第1の閉鎖流ループを通過して循環する。一実施形態において、本方法は、二次冷却材蒸気による、圧力容器内の冷却水の加熱と、冷却水の一部を蒸気相に変換することと、圧力容器から冷却水蒸気を抽出することと、ヒートシンクと熱連通する反応炉格納容器に取り付けられた放熱器導管を通して抽出された冷却水蒸気を流すことと、冷却水蒸気を凝縮させることと、凝縮された冷却水を圧力容器に戻して、冷却水のインベントリを補充することと、を更に含む。

20

30

【0013】

停止後に核反応炉を受動的に冷却するための別の方法が提供される。本方法は、反応炉容器内の一次冷却材を核燃料炉心で加熱することと、反応炉容器から加熱された一次冷却材を抽出することと、圧力容器内の冷却水のインベントリ中に浸漬する管束を通して加熱された一次冷却材を流すことと、加熱された一次冷却材を冷却してその温度を下げることと、冷却された一次冷却材を反応炉容器に戻すことと、を含み、一次冷却材は、管束と反応炉容器との間の第1の閉鎖流ループを通過して循環する。一実施形態において、本方法は、二次冷却材蒸気による、圧力容器内の冷却水の加熱と、冷却水の一部を蒸気相に変換することと、圧力容器から冷却水蒸気を抽出することと、ヒートシンクと熱連通する反応炉格納容器に取り付けられた放熱器導管を通して抽出された冷却水蒸気を流すことと、冷却水蒸気を凝縮させることと、凝縮された冷却水を圧力容器に戻して、冷却水のインベントリを補充することと、を更に含む。

40

【0014】

他の態様によれば、本発明は、熱的事象によって格納施設内の環境に放出された熱を排除するための前述の配列の欠陥を克服する、核反応炉格納システムを更に提供する。格納システムは概して、鋼または別の延性材料で形成され得る内側格納容器と、外側格納エンクロージャ構造(CES)とを含み、それにより二重壁格納システムを形成する。一実施形態において、水充填環状部が、格納容器と格納エンクロージャ構造との間に提供され、環状冷却リザーバを提供し得る。格納容器は、容器から「フィン」の様式で(略)半径方

50

向外向きに延在する、複数の縦方向伝熱フィンを含み得る。したがって格納容器は、反応炉のための一次構造格納施設としてだけでなく、ヒートシンクとして振る舞う環状リザーバを伴う熱交換器として機能するように構成され、かつ運転可能である。したがって、本明細書において更に記載されるように、格納容器は有利なことに、熱を放散し反応炉を冷却するために、LOCAまたは反応炉緊急停止等の熱エネルギー放出事故の際に必要なに応じて、受動的（すなわち、非ポンプ式）排熱システムを提供する。

【0015】

本開示による一実施形態において、核反応炉格納システムは、核反応炉を収容するために構成された格納容器と、格納容器を包囲する格納エンクロージャ構造（CES）と、格納空間から熱エネルギーを抽出するために格納容器と格納エンクロージャ構造（CES）との間に形成される環状リザーバとを含む。格納容器内部での熱エネルギー放出事態の際に、格納容器によって発生する熱は、格納容器を冷却するように運転する環状リザーバに伝えられる。一実施形態において、環状リザーバは、格納容器を冷却するための水を格納する。格納容器の一部は、環状リザーバ内に配置され、格納容器と格納エンクロージャ構造（CES）との間に延在して、水充填環状リザーバへの熱の放散を向上する略半径方向の伝熱フィンを含み得る。熱エネルギー放出事態が格納容器内部で起こる場合、環状部内の水の一部が蒸発し、格納エンクロージャ構造（CES）の環状リザーバを通過して水蒸気の形態で大気に排出される。

【0016】

本システムの実施形態は更に、環状リザーバ内に、格納容器周囲の円周方向に距離を空けて配置される複数の鉛直方向の吸気路を含む、補助空気冷却システムを含み得る。空気路は、環状リザーバと、格納エンクロージャ構造（CES）の外にある外部周囲空気と流体連通する。熱エネルギー放出事態が格納容器内部で起こり、環状リザーバ内の水が蒸発によって実質的に枯渇した場合、空気冷却システムが、リザーバ空間から外部環境への通風路を提供することにより運転可能となる。したがってこの換気システムは、永久的に格納施設を冷却し続けることができる二次システムと見なすことができる。

【0017】

別の実施形態によれば、核反応炉格納システムは、核反応炉を収容するために構成された格納容器と、格納容器を包囲する格納エンクロージャ構造（CES）と、格納容器と格納エンクロージャ構造（CES）との間に形成される、格納容器を冷却するための水充填環状部と、格納容器から外向きに突出し環状部内に配置される複数の略半径方向のフィンとを含む。格納容器内部での熱エネルギー放出事態の際に、格納容器によって発生する熱は、格納容器の外部表面、及び略半径方向であるそのフィンとの直接接触を通じて、環状部内の水充填リザーバに伝えられ、したがって格納容器を冷却する。一実施形態において、熱エネルギー放出事態が格納容器内部で起こり、環状部内の水が蒸発によって実質的に枯渇した場合、空気冷却システムが、空気路を通じて環状部内に外部周囲空気を引き込んで、格納施設内で発生する熱（時と共に指数関数的に減少する）を、自然対流により冷却するように運転可能である。格納容器を完全に包囲する環状部位内の水の存在が、格納容器内における一定の温度分布を維持して、熱エネルギー放出事態または事故の際の格納容器の歪みを防止することになる。

【0018】

別の実施形態において、核反応炉格納システムは、核反応炉を収容するために構成された円筒シェルを含む格納容器と、格納容器を包囲する格納エンクロージャ構造（CES）と、格納容器のシェルと格納エンクロージャ構造（CES）との間に形成される、格納容器を冷却するための水を格納する環状リザーバと、格納容器から環状部内へ外向きに突出する、複数の外部（略）半径方向フィンと、環状リザーバ内において格納容器周囲の円周方向に距離を空けて配置される複数の鉛直方向の吸気路を含む空気冷却システムとを含む。空気路は、環状リザーバと、格納エンクロージャ構造（CES）の外にある外部周囲空気と流体連通する。格納容器内部での熱エネルギー放出事態の際に、格納容器によって発生する熱は、格納容器を冷却するように運転する格納容器の内部及び外部フィンに沿って

、(略)半径方向の格納壁を介して環状リザーバに伝えられる。

【0019】

本開示に従う核反応炉格納システムの利点及び態様は、以下を含む。

【0020】

上に記載されたような深刻なエネルギー放出事象を受動的に封じ込めることができるように(例えば、ポンプ、弁、熱交換器、及びモータ等の動的な構成要素への依存なしに)構成された格納構造及びシステム。

【0021】

無期限で自律的に働き続ける(例えば、人の介入のための時間制限がない)格納構造及びシステム。

10

【0022】

その一次機能(すなわち、圧力及び放射性核種(もしあれば)の保持及び排熱)を失わずに、墜落する飛行機等の投射物の衝撃に耐えるように構成される内部及び外部リブ(フィン)で補強される格納構造。

【0023】

格納構造を通して主要機器の容易な取り外し(または設置)を可能にする設備を備える格納容器。

【図面の簡単な説明】

【0024】

本発明の例証の実施形態の特色について、同様の要素には類似の標識が付される以下の図面を参照しながら説明する。

20

【0025】

【図1】核反応炉の一部を形成する、本開示によるフィンを付けられた一次反応炉格納容器の側面立面図であり、いくつかのフィンの下部は、鉛直支柱及び円周方向リブを現すために部分的に取り払われている。

【図2】I I - I I線による、図1の横断面図である。

【図3】図2の細目I I Iの詳細である。

【図4】図1の格納容器及び外側格納エンクロージャ構造(C E S)を、容器とエンクロージャとの間に形成される水充填環状リザーバと共に示す、核反応炉格納システムの縦断面図である。

30

【図5】格納容器及び格納エンクロージャ構造(C E S)を通る縦断面図である。

【図6】地表面上の視認できる外側格納エンクロージャ構造(C E S)を伴って設置された、核反応炉格納システムの側面立面図である。

【図7】図6の上部平面図である。

【図8】核反応炉格納システムの地表面よりも上方の部分、及び下方の部分の両方を示す、図7のV I I I - V I I I線による、その縦断面図である。

【図9】格納容器に収容される機器、及び格納容器の追加的な詳細を明らかにするための様々な断面切断部を示す、一次反応炉格納容器の側面立面図である。

【図10】図9の上部平面図である。

【図11】図10のX I - X I線による、図9の縦断面図である。

40

【図12】図10のX I I - X I I線による、図9の縦断面図である。

【図13】図9のX I I I - X I I I線による、図9の横断面図である。

【図14】図9のX I V - X I V線による、図9の横断面図である。

【図15】図9のX V - X V線による、図9の横断面図である。

【図16】補助放熱システムを示す、核反応炉格納システムの部分的縦断面図である。

【図17】鉛直支柱及び円周方向リブを現すために、格納容器の(略)半径方向のフィンの下部が部分的に取り払われている、格納容器の等角図である。

【図18】格納容器のシェルに取り付けられた上部及び下部リングヘッド、ならびに導管を示す、図16の放熱システムの一部の縦断面図である。

【図19】核反応炉格納システムの概略断面と、熱エネルギー放出事象の際に熱を放散し

50

格納容器を冷却するための水充填環状リザーバの運転との概略図である。

【図 2 0】緊急停止事象に続く軽水炉の典型的な発熱曲線を示すグラフである。

【図 2 1】本開示による浸漬束状熱交換器 (S B H X) の概略図である。

【図 2 2】反応炉冷却システムの第 1 の実施形態、及び反応炉炉心を冷却するための対応する方法を示す概略図である。

【図 2 3】反応炉冷却システムの第 2 の実施形態、及び反応炉炉心を冷却するための対応する方法を示す概略図である。

【図 2 4】反応炉容器及び蒸気発生器を通る、一次及び二次冷却材の流れを示す概略図である。

【 0 0 2 6 】

全ての図面は概略的であり、必ずしも一定の縮尺ではない。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 2 7 】

本発明の特色及び利点は、例証的实施形態への参照によって本明細書において例証及び説明される。例証的实施形態のこの説明は、添付の図面と併せて読み取られることを意図するものであり、これらの図面は書面の説明全体の一部と見なされるべきである。本明細書に開示される実施形態の説明において、方向または配向に対する任意の言及は、単に説明の簡便性のために意図されるものであり、本発明の範囲を制限することをいかなる方法においても意図するものではない。「下部」、「上部」、「水平」、「鉛直」、「上方」、「下方」、「上」、「下」、「頂部」、及び「底部」等の相対的な用語、ならびにそれらの派生語（例えば、「水平に」、「下向きに」、「上向きに」等）は、考察中の図面において説明されるような、または示されるような名目上の配向を指すように解釈されるべきである。これらの相対的な用語は、単に説明の簡便性のためのものであり、装置が、用語によって示される厳密な特定の配向で構築または運転されることを必要とするわけではない。「取り付け」、「添着」、「接続」、「連結」、「相互接続」、及び類似のもの等の用語は、明示的に別途記載されない限り、構造が直接的、または介在構造を通して間接的に、互いに固定または取り付けられる関係性、ならびに移動可能または固定式の、取り付けまたは関係性の両方を指す。したがって、本開示は明示的に、単独で、または特色の他の組み合わせで存在し得る特色の、ある可能な非制限的組み合わせを例証するそのような例証的实施形態に制限されるべきではない。

【 0 0 2 8 】

図 1 ~ 1 5 を参照すると、本開示に従う核反応炉格納システム 1 0 0 が示される。本システム 1 0 0 は概して、格納容器 - エンクロージャアセンブリ 2 0 0 - 3 0 0 を集合的に画定する、格納容器 2 0 0 等の内側格納構造と、外側格納エンクロージャ構造 (C E S) 3 0 0 とを含む。格納容器 2 0 0 及び格納エンクロージャ構造 (C E S) 3 0 0 は、鉛直方向に細長く配向されており、鉛直軸 V A を画定する。

【 0 0 2 9 】

一実施形態において、本格納容器 - エンクロージャアセンブリ 2 0 0 - 3 0 0 は、地表面よりも下方の地盤に少なくとも部分的には埋められるように構成される (図 6 ~ 8 も参照) 。本格納容器 - エンクロージャアセンブリ 2 0 0 - 3 0 0 は、底板 3 0 2 と、この板から立ち上がって上部基礎マット 3 0 4 を形成する、鉛直方向に延在する側壁 3 0 3 とから構成されるコンクリート基礎 3 0 1 によって支持されてもよい。側壁 3 0 3 は、示されるように格納容器 2 0 0 を円周方向に封入し得、格納容器の下部は側壁の内部に位置付けられ得る。一部の実施形態において、側壁 3 0 3 は、底板 3 0 2 (最初に流し込まれ、据え付けられ得る) 上への格納容器 2 0 0 の配置後に流し込まれ、それにより基礎内に格納容器 2 0 0 の下部を完全に包埋してもよい。一部の実施形態において、基礎壁 3 0 3 は、本格納容器 - エンクロージャアセンブリ 2 0 0 - 3 0 0 のための、投射物の衝撃 (例えば、墜落する飛行機等) からの追加的な保護を提供するために、示されるように地表面より下で終結してもよい。基礎 3 0 1 は、限定されるものではないが、多角形 (例えば、矩形、六角形、円形等) を含む、上部平面図における任意の好適な構成を有し得る。

10

20

30

40

50

【 0 0 3 0 】

一実施形態において、格納容器 2 0 0 の重量は格納容器が上に載る底板 3 0 2 によって主に支持され得、格納エンクロージャ構造 (C E S) 3 0 0 は、基礎 3 0 1 の側壁 3 0 3 の頂上に形成される基礎マット 3 0 4 によって支持され得る。他の好適な容器及び格納エンクロージャ構造 (C E S) 支持配列が使用されてもよい。

【 0 0 3 1 】

図 1 ~ 1 5 を引き続き参照すると、本格納構造容器 2 0 0 は、外径 D 1 を画定する円形横断面を伴う中空の円筒シェル 2 0 4 と、頂部ヘッド 2 0 6 と、底部ヘッド 2 0 8 とを含む、細長い容器であり得る。一実施形態において、本格納容器 2 0 0 (すなわち、シェル及びヘッド) は、容易に溶接可能である好適に強固かつ延性の金属板及び棒材 (例えば、低炭素鋼) から作製され得る。一実施形態において、低炭素鋼シェル 2 0 4 は、少なくとも 1 インチの厚さを有し得る。様々な合金を含む、対応する適当な厚さの他の好適な金属性材料が使用されてもよい。

10

【 0 0 3 2 】

頂部ヘッド 2 0 6 は、頂部ヘッドの下端または底部に配置される第 1 の環状フランジ 2 1 2 と、シェルの上端または頂部に配置される第 2 の嵌合環状フランジ 2 1 4 とから構成されるフランジ継手 2 1 0 を介して、シェル 2 0 4 に取り付けられ得る。フランジ継手 2 1 0 は、ボルト継手であってもよく、このボルト継手は、隣接するフランジ 2 1 2 と 2 1 4 との間で作製される、円周方向に延在する環状漏れ止め溶接で、組み立て後に任意に更に漏れ止め溶接されてもよい。

20

【 0 0 3 3 】

格納容器 2 0 0 の頂部ヘッド 2 0 6 は、構造強度 (すなわち、内圧保持及び外部衝撃抵抗性) を付与するための A S M E (米国機械学会) のドーム型フランジ皿型ヘッドであってもよいが、平坦頂部ヘッドを含む他の可能な構成が使用されてもよい。底部ヘッド 2 0 8 は、類似にドーム型皿型ヘッドであるか、あるいは他の可能な実施形態においては平坦であってもよい。格納容器の一構造において、底部ヘッド 2 0 8 は、シェルの直径に整合するヘッドの統合式直線フランジ (S F) 部分を介して、シェル 2 0 4 の下部または下端に直接溶接されてもよい。一実施形態において、格納容器 2 0 0 の底部は、本明細書において更に説明されるように、基礎 3 0 1 の板 3 0 2 上の格納容器の安定化及びその水平支持の提供に役立つような、リブ付きの支持台 2 0 8 a または底部ヘッド 2 0 8 に取り付けられる類似の構造を含んでもよい。

30

【 0 0 3 4 】

一部の実施形態において、格納容器シェル 2 0 4 の頂部 2 1 6 は、格納容器内部の機器、燃料等を動かすためのポール起重機 (図示せず) を支持及び収容するためのハウジングを形成する、シェルの直径方向に拡大された区分であってもよい。この頂部 2 1 6 は、格納容器の周囲の正に内部への起重機の接近を提供し、格納容器 2 0 0 の周囲に非常に近い機器の配置を可能にし、格納容器構造を小型にすることになる。それ故に、一構成において、格納容器 2 0 0 の地表面上の部分は、キノコ型の構造に似る場合がある。

【 0 0 3 5 】

可能な一実施形態において、格納容器 2 0 0 の拡大された頂部 2 1 6 は、隣接する格納容器シェル 2 0 4 の下部 2 1 8 の残部の外径 D 1 よりも大きい外径 D 2 を有し得る。非制限的な一実施例において、頂部 2 1 6 は、シェル 2 0 4 の下部 2 1 8 の直径 D 1 よりもおよそ 1 0 フィート大きい直径 D 2 を有し得る。シェル 2 0 4 の頂部 2 1 6 は、作業空間のためのゆとりを伴ってポール起重機を収容するために選択される好適な高さ H 2 を有してもよく、この高さ H 2 は、格納容器 2 0 0 の総高 H 1 の 5 0 % 未満であり得る。非制限的な一実施形態において、2 0 0 フィートの格納容器の総高 H 1 と比較して、格納容器 2 0 0 の頂部およそ 1 0 フィート (H 2) は、拡大された直径の頂部 2 1 6 で形成され得る。格納容器 2 0 0 の頂部 2 1 6 は、格納容器の頂部ヘッド 2 0 6 へのフランジ接続におけるフランジ 2 1 4 での上端で終結し得る。

40

【 0 0 3 6 】

50

一実施形態において、格納容器 200 の直径方向に拡大された頂部 216 は、(略)半径方向の間隙または二次環状部 330 を提供するために、格納エンクロージャ構造 (CES) の内径 D3 よりも小さい直径 D2 を有する (例えば、図 4 を参照)。これは、格納エンクロージャ構造 (CES) への投射物の衝撃の到来の際に、格納エンクロージャ構造 (CES) 300 と格納容器頂部 216 との間に空間のクッションまたは緩衝領域を提供する。更に、環状部 330 は、本明細書において更に説明されるように、格納エンクロージャ構造 (CES) から蒸気及び/または空気を排出するために、一次環状部 313 (格納エンクロージャ構造 (CES) 300 のシェルと格納容器 200 との間) と、格納エンクロージャ構造 (CES) ドーム 316 と格納容器 200 の頂部ヘッド 206 との間のヘッド空間 318 との間に、流路を更に有意に作り出す。したがって、二次環状部 330 は、一次環状部 313 及びヘッド空間 318 と流体連通し、このヘッド空間 318 は一方で、ドーム 316 を貫通する通気孔 317 と流体連通する。一実施形態において、二次環状部 330 は、一次環状部 313 よりも小さい (略) 半径方向の幅を有する。

10

【0037】

図 1 ~ 4 を参照すると、格納エンクロージャ構造 (CES) 300 は、一部の実施形態において 2 つの (略) 半径方向に距離を空けて配置され、かつ相互接続される同心シェル 310 (内側) 及び 311 (外側) によって形成され、それらの間の環状空間内に設置された無筋コンクリートまたは鉄筋コンクリート 312 を伴う側壁 320 を有する二重壁構造であり得る。同心シェル 310、311 は、例えば、限定されるものではないが、容易に溶接可能である延性の金属板 (例えば、低炭素鋼) 等の任意の好適に強固な材料で作製され得る。様々な合金を含む、他の好適な金属性材料が使用されてもよい。一実施形態において、限定されるものではないが、二重壁格納エンクロージャ構造 (CES) 300 は、旅客機からの衝撃等の高エネルギー投射物の衝撃に耐える適切な能力を確保する、6 フィート以上の厚さのコンクリート 312 を有してもよい。

20

【0038】

格納エンクロージャ構造 (CES) 300 は、格納容器シェル 204 を取り囲み、シェル 204 から (略) 半径方向に離間され、それにより一次環状部 313 を作り出す。環状部 313 は一実施形態において水で充填されて、格納容器内部での熱エネルギー放出事態の場合において格納容器 200 から熱を受け取り放散するためのヒートシンクを作り出す。この水充填環状リザーバは好ましくは、一実施形態において、コンクリート基礎 301 の上に置かれる格納容器シェル 204 の上部の周囲で完全に 360 度円周方向に延在する。図 4 は、外部 (略) 半径方向フィン 221 を明確さのためにこの図においては伴わない、水充填環状部 313 の断面を示す。一実施形態において、環状部 313 は、底端 314 の基礎マット 304 から、ほぼ格納エンクロージャ構造 (CES) 300 の同心シェル 310、311 の頂端 315 まで水で充填されて、格納容器シェル 204 と格納エンクロージャ構造 (CES) の内シェル 310 との間に環状冷却水リザーバを形成する。この環状リザーバは、一部の実施形態において、アルミニウム、ステンレス鋼、または腐食保護のための好適な保存剤等の、好適な耐食材料でコーティングされるか、または覆われる。代表的な一実施例において、限定されるものではないが、環状部 313 は幅約 10 フィート、かつ高さ約 100 フィートであってもよい。

30

40

【0039】

一実施形態において、格納エンクロージャ構造 (CES) 300 は、好適な厚さであり、墜落する飛行機及び他の入射する投射物に対して強化するように補強されている鋼製ドーム 316 を含む。ドーム 316 は、頑強なフランジ継手 318 によって、シェル 310、311 に取り外し可能に締結され得る。一実施形態において、格納エンクロージャ構造 (CES) 300 は、全ての露出する地表面上の部分を、格納エンクロージャ構造 (CES) 300 によって完全に包囲されており、この格納エンクロージャ構造 (CES) 300 は、飛行機の災害または同等の投射物に対する格納容器のための保護を提供して、格納容器を包囲する環状部 313 内の水塊の構造的統合性を保存するために好ましくは十分に高い。一実施形態において、示されるように、格納エンクロージャ構造 (CES) 300

50

は、基礎マット304の頂部までの距離の実質的な部分にわたって、地表面よりも鉛直方向下方に延在する。

【0040】

格納エンクロージャ構造(CES)300は更に、水蒸気の大気への流出、漏出、排出を可能にするために、ドーム316の真下のヘッド空間318及び水充填環状部313と流体連通する、少なくとも1つの雨除け通気孔317を含んでもよい。一実施形態において、通気孔317は、ドーム316の中央に配置されてもよい。他の実施形態において、複数の通気孔が、ドーム316の周囲に(略)半径方向に距離を空けて提供されてもよい。一部の実施形態において、通気孔317は、格納エンクロージャ構造(CES)から蒸気を漏出させるが、水の進入を最小化する任意の好適な構成の雨除けによって覆われる、短い配管部分で形成されてもよい。

10

【0041】

一部の可能な実施形態において、ドーム316と格納容器200の頂部ヘッド206との間のヘッド空間318は、墜落する(落下する)投射物(例えば、旅客機等)から格納エンクロージャ構造(CES)ドーム316にかかる衝撃荷重を最小化するためのエネルギー吸収材料または構造で充填されてもよい。一実施例において、複数の敷き詰められた波状または波型の変形可能なアルミニウム板が、ヘッド空間の一部または全てにおいて配置されて、クランブルゾーンを形成し、これがドーム316への衝撃力を吸収及び放散するのに役立つことになる。

【0042】

20

主に図1~5及び8~17を参照すると、基礎マット304より下方のコンクリート基礎301内の格納容器200の埋められた部分は、外部の特色を伴わない簡素なシェル204を有してもよい。しかしながら、基礎マット304より上方の格納容器シェル204の部分は、本格納容器-エンクロージャアセンブリ200-300の鉛直軸VAに対して(略)平行な軸方向に延在する、複数の縦方向の外部(略)半径方向リブまたはフィン220を含み得る。外部縦方向フィン220は、格納容器シェル204の周囲に円周方向に距離を空けて配置され、格納容器から(略)半径方向外向きに延在する。

【0043】

リブ220は、限定されるものではないが、(1)格納容器シェル204を硬化すること、(2)震動事象の発生の際に環状部313内の水リザーブの過剰な「液面揺動」を防止すること、ならびに(3)格納容器内での流体蒸気放出事象の状況下で、伝熱「フィン」として有意に振る舞って、シェル204を通じた環状部313の環境への伝導によって吸収された熱を放散することを含む、多数の有利な機能を提供する。

30

【0044】

したがって、伝熱有効性を最大化するための一実施形態において、本明細書において更に説明されるように、縦方向フィン220は、格納容器200の有効伝熱表面(すなわち、コンクリート基礎中に埋められていない部分)を覆う水充填環状部313の略全高にわたって鉛直方向に延在して、格納容器200から水リザーバに熱を伝える。一実施形態において、外部縦方向フィン220は、格納容器200の大径頂部216の下側もしくは底部において、またはその近くで終結する上部水平端220aと、コンクリート基礎301の基礎マット304において、またはその近くで終結する下部水平端220bとを有する。一実施形態において、外部縦方向フィン220は、格納容器のシェルの総高の2分の1以上である高さH3を有してもよい。

40

【0045】

一実施形態において、縦方向フィン220の上部水平端220aは、格納容器200または他の構造に永続的に取り付けられて(例えば、溶接されて)いない遊離端である。縦方向フィン220の下部水平端220bの少なくとも一部は、格納容器シェル204の外面に溶接される水平円周方向リブ222に当接して接触し、その上に載って、縦方向フィン220の重量を支持し、縦方向リブとシェルとの溶接への応力を最小化するのに役立つ。円周方向リブ222の形状は環状であり、格納容器シェル204の外周の周囲全体

50

で完全に360度延在し得る。一実施形態において、円周方向リブ222は、縦方向フィン220の荷重を基礎に伝える、コンクリート基礎301の基礎マット304上に載るように配置される。縦方向フィン220は、円周方向リブ222の外周縁を越えて外向きに突出する横方向の範囲または幅を有し得る。したがって、この実施形態において、各リブ220の下部水平端220bの内側部分のみが、円周方向リブ222に接触する。他の可能な実施形態において、円周方向リブ222は、各縦方向リブ220の下部水平端220bの略全体が円周方向リブ222上に載るように、(略)半径方向外向きに十分に遠くまで延在し得る。一部の実施形態において、下部水平端220bは、縦方向フィン220を更に強化及び硬化するために円周方向リブ222に溶接されてもよい。

【0046】

外部縦方向フィン220は、鋼(例えば、低炭素鋼)、または合金を含む他の好適な金属性材料で作製されてもよく、フィンそれぞれ、縦方向に延在する側面のうちの1つで格納容器シェル204の外側に溶接される。各リブ220の反対側の縦方向に延在する側面は、格納エンクロージャ構造(CES)300の内シェル310の内側に近接して位置するが、放熱フィンとして振る舞うリブの伝熱表面を最大化するために、好ましくは内シェル310の内側に永続的に添着はされない。一実施形態において、外部縦方向フィン220は、示されるように、格納容器200の大径頂部216を越えて(略)半径方向外向きに延在する。代表的な一実施例において、限定されるものではないが、鋼リブ220は約1インチの厚さを有し得る。他の好適なリブの厚さが、適切に使用され得る。したがって、一部の実施形態において、リブ220は、リブの厚さの10倍を超える半径方向幅を有する。

【0047】

一実施形態において、縦方向フィン220は、図2~3及び5において最良に示されるように、格納容器シェル204に対して斜角A1で配向される。この配向は、格納容器200の円周周囲で360度延在するクランプゾーンを形成して、外側格納エンクロージャ構造(CES)300と協働して機能することで投射物の衝撃に良好に抵抗する。したがって、格納エンクロージャ構造(CES)シェル210、211の内向きの変形を引き起こす衝撃は縦方向フィン220を屈曲させ、縦方向フィン220はその過程で、格納容器シェル204に対して90度に配向されるリブでは起こる可能性があった内部格納容器シェル204の破断、及び内部格納容器シェル204への直接的な伝達を好ましくは伴わずに、衝撃力を分散させる。他の可能な実施形態において、格納エンクロージャ構造(CES)300の構造及び他の因子に応じて、格納容器シェル204に対するリブ220の垂直な配列が、適切であり得る。

【0048】

一実施形態において、図6~8を参照すると、外部(略)半径方向のフィン220を有し、それにより投射物の衝撃から保護される格納容器シェル204の一部は、格納エンクロージャ構造(CES)300の地表面、または僅かに地表面より下方での投射物の打撃に対する保護を提供するために、地表面より下方に延在してもよい。したがって、フィン220がその下端で終結する、基礎301の鉛直方向に延在する側壁303の頂部に形成される基礎マット304は、核反応炉格納システムの衝撃抵抗性を向上させるために、地表面の数フィート下方に位置付けられてもよい。

【0049】

一実施形態において、格納容器200は任意に、シェル204の内面に取り付けられる、複数の円周方向に離間された内部(略)半径方向フィン221を含んでもよい(図2及び3において破線で示される)。内部フィン221は、格納容器シェル204から(略)半径方向内向きに延在し、好適な高さの鉛直方向で縦方向に延在する。一実施形態において、内部(略)半径方向フィン221は、水充填環状部313の高さと略同延の高さを有してもよく、基礎マット304からほぼシェル204の頂部まで延在してもよい。一実施形態において、限定されるものではないが、内部フィン221は、格納容器シェル204に対して略直交して(すなわち、90度に)配向されてもよい。他の好適な角度及び斜め

10

20

30

40

50

の配向が使用されてもよい。内部フィン、利用可能な伝熱表面積の増加と、外部衝撃（例えば投射物）、または格納施設昇圧事象（例えば、L O C A もしくは反応炉緊急停止）の場合における格納容器 2 0 0 内での内部圧力増加に対する、格納容器シェルの構造的補強との両方を行うように機能する。一実施形態において、限定されるものではないが、内部フィン 2 2 1 は鋼で作製されてもよい。

【 0 0 5 0 】

図 1 ~ 1 5 を参照すると、複数の鉛直構造支柱 3 3 1 は、シェル 2 0 4 を越えて（略）半径方向外向きに片側のみ固定して突出する周辺側面を有する、格納容器 2 0 0 の直径方向により大きい頂部 2 1 6 を支持するのに役立つように、格納容器シェル 2 0 4 の外面に取り付けられてもよい。支柱 3 3 1 は、格納容器シェル 2 0 4 の周囲で円周方向に距離を空けて配置される。一実施形態において、支柱 3 3 1 は、鋼の中空構造部材、例えば限定されるものではないが、断面が C 字型の部材（すなわち構造用チャンネル）で形成されてもよく、この中空構造部材は格納容器シェル 2 0 4 の外面に溶接される。チャンネルの 2 つの平行な脚部は、連続溶接またはステッチ溶接等の断続溶接のいずれかを用いて、各支柱 3 3 1 の高さにわたって格納容器シェル 2 0 4 に鉛直方向に溶接されてもよい。

10

【 0 0 5 1 】

支柱 3 3 1 は、ポール起重機を収容する格納容器の大径頂部 2 1 6 の底部 / 下側から鉛直方向下向きに延在し、支柱の上端でそこに溶接されてもよい。支柱 3 3 1 の底端は、格納施設の埋められた部分付近でコンクリート基礎 3 0 1 の基礎マット 3 0 4 に係合する円周方向リブ 2 2 2 上に載置されるか、または溶接される。柱 3 3 1 は、静荷重、または起重機及び格納容器 3 0 0 の頂部 2 1 6 からの重量の一部を基礎に伝えるのに役立つ。一実施形態において、支柱内部の中空空間は、硬化、及び静荷重または重量の更なる支持に役立つように、コンクリート（鉄筋ありまたは鉄筋なし）で充填されてもよい。他の可能な実施形態において、充填されたまたは充填されていない箱型梁、I 型梁、管形、山形等を含む他の構造用鋼の形状が使用されてもよい。縦方向フィン 2 2 0 は、リブ 2 2 0 としての伝熱の役割よりもむしろ構造的役割を果たす支柱 3 3 1 よりも、（略）半径方向で外向きに更に延在してもよい。ある特定の実施形態において、リブ 2 2 0 は、支柱の（略）半径方向幅の少なくとも 2 倍である（略）半径方向幅を有する。

20

【 0 0 5 2 】

図 1 1 ~ 図 1 5 は、格納容器 2 0 0 の様々な断面（縦断面及び横断面の両方）を格納容器 2 0 0 内に示される機器と共に示す。一実施形態において、格納容器 2 0 0 は、H o l t e c I n t e r n a t i o n a l の S M R - 1 6 0 等の小型モジュール式反応炉（S M R）システムの一部であってもよい。機器は概して、ウェットウェル 5 0 4 内に配置され、かつ核燃料炉心を内部に収容し一次冷却材を循環させる内側空間を画定する、核反応炉容器 5 0 0 と、反応炉に流体連結され、ランキン発電サイクルの一部を形成し得る二次冷却材を循環させる蒸気発生器 5 0 2 とを含み得る。そのようなシステムは、例えば 2 0 1 3 年 1 0 月 2 5 日に出願された P C T 国際特許出願第 P C T / U S 1 3 / 6 6 7 7 7 号において記載され、これはその全体が参照により本明細書に組み込まれる。他の付属品及び機器が、完全な蒸気発生システムを作り出すために提供され得る。

30

【 0 0 5 3 】

補助放熱システム

40

【 0 0 5 4 】

ここで主に図 2 ~ 3、図 1 6、及び図 1 8 を参照すると、格納容器 2 0 0 は更に、放熱器導管 6 1 0（H D D）の離散的なセットまたはアレイを備える補助放熱システム 3 4 0 を含んでもよい。一実施形態において、補助放熱システム 3 4 0 及び関連付けられる放熱器導管 6 1 0 は、下において更に詳細に記載され、図 2 2 及び 2 3 において示される受動的反応炉炉心冷却システムの一部を形成し得る。

【 0 0 5 5 】

放熱器導管 6 1 0 は、格納容器シェル 2 0 4 の円周の周囲で円周方向に距離を空けて配置される複数の内部縦方向導管 3 4 1（すなわち、流管路）を含む。導管 3 4 1 は、鉛直

50

軸VAに対して平行に鉛直方向に延在し、一実施形態においてシェル204の内面に取り付けられる。導管341は、鋼等の金属で作製されてもよく、シェル204の内側に溶接される。可能な一構成において、限定されるものではないが、導管341は、チャンネルまたはパイプ/管の平行な脚部がそれぞれ、その全高にわたってシェル204にシーム溶接されて、密封された鉛直方向の流管路を画定するように、鉛直方向に配向されたC字型の構造用チャンネル(断面)、または配置されるパイプ/管の半断面で構成されてもよい。それ故に、この実施形態における放熱器導管内の流体(液相または蒸気相)は、反応炉格納容器200に直接接触して、容器を通り環状リザーバ(一次環状部313)内の水への伝熱を最大化し、これが反応炉格納容器200及び放熱器導管に関するヒートシンクを形成する。導管内で運ばれる流体が内側格納容器シェル204の少なくとも一部に接触して、水充填環状部313に熱を伝えるのであれば、他の好適な形状及び構成の放熱器導管341が、この形式の構造について提供されてもよい。

10

【0056】

可能ではあるが、好ましさが低い許容可能な他の実施形態において、放熱器導管341は、内側格納容器シェル204に溶接される、完全に管状の壁に囲まれた流管路(例えば、円周方向管またはパイプの半断面ではなく全断面)から形成され得る。これらの形式の構造において、導管内で運ばれる流体は、まず導管の壁を通じて反応炉格納容器シェル204に、次いで水充填環状部313に間接的に熱を伝えることになる。

【0057】

導管を通して流れる流体を冷却するために必要とされる伝熱表面積に応じて、任意の好適な数及び配列の導管341が提供されてもよい。導管341は格納容器シェル204の内側に均一に、または不均一に距離を空けて配置されてもよく、一部の実施形態においては、グループ化された導管の群が格納容器の周りに円周方向に分散されてもよい。導管341は、導管で運搬される流体の流量と伝熱の考慮事項とに応じて、任意の好適な断面寸法を有してもよい。

20

【0058】

導管341の開口上端及び開口下端341a、341bはそれぞれ、共通の上部リングヘッド343及び下部出口リングヘッド344に流体接続される。一次環状部313内に外部縦方向フィン220を有する格納容器の部分により画定される動的伝熱ゾーンにおいて、導管341内部を鉛直方向に流れる流体と格納容器のシェル204との間での熱の伝達を最大化するために、環状形状のリングヘッド343、344が、鉛直方向に距離を置いて配置され、格納容器200の内側に好適な高さで位置付けられる。一次水充填環状部313を伝熱に利用するために、上部リングヘッド及び下部リングヘッド343、344はそれぞれ、環状部の頂部及び底部に隣接して、かつその付近で格納容器シェル204の内側に配置されてもよい。

30

【0059】

一実施形態において、リングヘッド343、344はそれぞれ、示される様式で格納容器シェル204の内面に直接溶接される、示されるような弓状に湾曲した鋼パイプの半断面で形成されてもよい。他の実施形態において、リングヘッド343、344は、シェル204の内側で支持され、かつこの内側に任意の好適な手段で取り付けられる弓状に湾曲した配管の全断面で形成されてもよい。

40

【0060】

一実施形態において、放熱システム340は、放射性物質の崩壊熱を反応炉炉心から排除するために、格納容器200内部の水塊から発生し得る蒸気の源に流体接続される。導管341で封入された格納施設表面は、外部縦方向フィン220及び水充填環状部313を介して冷却するために導管内部の蒸気の潜熱を格納容器200のシェル204に伝導する伝熱表面としての役割を果たす。運転時には、蒸気は入口リングヘッド343に入り、ヘッドを貫通する導管341の開口入口端に分配される。蒸気は導管341に入り、格納容器シェル204の内側の高さにわたって導管341内を下向きに流れ、蒸気(蒸発気)から液体への相変化を経る。凝縮した蒸気は重力により導管内を流下し、下部リングヘッ

50

ダ 3 4 4 により収集され、一実施形態においてこの蒸気は、好ましくは同じく重力により下部リングヘッド 3 4 4 から蒸気の源に戻される。前述の工程においては、ポンプが関与しないか、または必要とされないことに留意されたい。

【 0 0 6 1 】

ある特定の実施形態において、放熱器導管 6 1 0 の 2 つ以上のセットまたはアレイが提供され、容器によって画定される格納空間内の内側格納容器 2 0 0 の内部表面上に配列され得ることが理解されるであろう。

【 0 0 6 2 】

補助空気冷却システム

【 0 0 6 3 】

本開示の別の態様によれば、一次環状部 3 1 3 内の水インベントリが、何らかの理由で、反応炉に関連する熱的事象（例えば、L O C A または反応炉緊急停止）中に枯渇した場合に、格納容器 2 0 0 の自然対流による空気冷却を開始するように、二次または予備受動的空気冷却システム 4 0 0 が提供される。図 8 を参照すると、空気冷却システム 4 0 0 は、一次環状部 3 1 3 内において格納容器 2 0 0 の周りに円周方向に距離を空けて配置される複数の鉛直方向の吸気路 4 0 1 で構成されてもよい。各空気路 4 0 1 は、格納エンクロージャ構造（C E S）3 0 0 の側壁 3 2 0 を貫通し、かつ周囲冷却空気を引き込むために外部の大気へ開口した入口 4 0 2 を含む。入口 4 0 2 は好ましくは、格納エンクロージャ構造の側壁 3 2 0 の上端付近に位置付けられる。空気路 4 0 1 は、環状部 3 1 3 の内部を鉛直方向下向きに延在し、管路の開口した底端から空気が漏出できるように、基礎の基礎マット 3 0 4 よりも少し上方（例えば、およそ 1 フィート）で終結する。

【 0 0 6 4 】

空気路 4 0 1 を使用することにより、環状部 3 1 3 との協働で自然対流冷却空気流路が確立される。一次環状部 3 1 3 内の冷却水インベントリが熱的事象の際に蒸発によって枯渇した場合には、環状部内部の空気が格納容器 2 0 0 によって加熱され続けるため、自然対流によって空気冷却が自動的に開始する。加熱された空気は、一次環状部 3 1 3 内を上昇し、二次環状部 3 3 0 を通過してヘッド空間 3 1 8 に入り、通気孔 3 1 7 を通って格納エンクロージャ構造（C E S）3 0 0 のドーム 3 1 6 を出る（図 8 の流れ方向矢印を参照）。上昇する加熱された空気は、空気路 4 0 1 を通して外部環境を下向きに引き込むのに十分な一次環状部 3 1 3 底部に向かう気圧の低下を作り出し、それにより、加熱された格納容器 2 0 0 を冷却し続ける自然な空気循環パターンを作り出す。有利なことに、この受動的空気冷却システム及び循環は、無期限にわたって続いて、格納容器 2 0 0 を冷却し得る。

【 0 0 6 5 】

一次環状部 3 1 3 は、格納容器 2 0 0 の内部で発生する熱に対する最終ヒートシンクとして振る舞うことに留意されたい。この環状リザーバ内の水はまた、（先に説明した）全ての起重機鉛直支柱 3 3 1 の温度を本質的に同じ温度で維持するように振る舞い、したがって格納容器 2 0 0 のより大きな部分 2 1 6 に載置される起重機用レール（図示せず）の水平度を常に確保する。

【 0 0 6 6 】

ここで、熱交換器としての反応炉格納システム 1 0 0 の運転について最初に図 1 9 を参照しながら簡潔に説明する。この図は、本システムにより実施される動的な伝熱及び排除プロセスを説明する上での明確性のために、本明細書で説明した付属品及び構造の全てを伴わない反応炉格納システム 1 0 0 の簡略化された図表示である。

【 0 0 6 7 】

冷却材喪失事故（L O C A）の場合、高エネルギー流体または液体冷却材（典型的には水であり得る）は、格納容器 2 0 0 により形成された格納環境内に流入する。液体は瞬時に減圧沸騰して蒸気となり、蒸気は格納施設内部の空気と混合し、（格納施設のシェルが環状部 3 1 3 内の水により更に低温になるので）格納容器 2 0 0 の側壁またはシェル 2 0 4 の内面へ移動する。次いで蒸気は、格納構造の金属に対して潜熱を失うことにより、鉛

10

20

30

40

50

直方向のシェル壁上で凝縮し、この格納構造の金属は一方で、縦方向フィン 220 と環状部内部のシェル 204 の露出した部分とを通して、環状部 313 内の水に熱を排除する。環状部 313 内の水は加熱され、最終的には蒸発して蒸気を形成するが、この蒸気は環状部内を上昇し、格納エンクロージャ構造 (CES) 300 から出て、二次環状部 330、ヘッド空間 318、及び最後には通気孔 317 を通って大気へと至る。

【0068】

環状部 313 内の水リザーバは格納容器環境の外部に位置するため、一部の実施形態においては、水の蒸発損失を補うために利用可能であれば、外部手段を用いて水インベントリを簡単に補充し得る。しかしながら、補充水が提供されないか、または利用可能でない場合、環状部 313 内の水柱の高さは低下し始める。環状部 313 内の水位が低下するにつれて、格納容器 200 は水位よりも上方の環状部内の空気も加熱し始め、それにより空気に一部の熱を排除し、この空気は上昇し、通気孔 317 を通じて格納エンクロージャ構造 (CES) 300 から水蒸気と共に排出される。水位が十分に低下して、それにより空気路 401 の開口した底端が水位線よりも上方に露出するとき (例えば、図 8 を参照)、新鮮な外部の周囲空気が上に記載されるように空気路 401 から引き込まれ、格納容器 200 を冷却し続ける自然対流空気循環パターンを開始することになる。

【0069】

一実施形態において、十分な放熱を保証するために必要なわけではないが、環状部 313 内への水補充のために、設備 (例えば、入水口ライン) が格納エンクロージャ構造 (CES) 300 を貫通して提供される。この環状リザーバ内の水インベントリの塊は、水インベントリが枯渇した時点で格納施設が空気冷却のみで全てのその熱を排除できるように、格納容器 200 内で生成される崩壊熱が十分に減少するような大きさとされる。本格納容器 200 は好ましくは、熱エネルギーを迅速に排除することによって、格納容器内部での蒸気混合物の圧力及び温度を (設計制限内に) 制限するのに十分な排熱能力を有する。

【0070】

全電源喪失の場合、反応炉炉心は強制的に「緊急停止」され、受動的炉心冷却システムが、本明細書で既に説明した放熱システム 340 の上部入口リングヘッダ 343 (例えば、図 16 及び図 18 を参照) に蒸気が導かれる形態で炉心の崩壊熱を排除する。次いで、内部縦方向導管 341 網を通して下向きに流れる蒸気は、放熱導管内に封入された格納容器シェル 204 の内面に接触して、格納構造の金属に潜熱を排除することにより凝縮し、この格納構造の金属は一方で、縦方向フィン 220 により提供される伝熱補助を介して環状部内の水へ熱を排除する。環状リザーバ (一次環状部 313) 内の水は、加熱されて最終的には蒸発する。格納容器 200 は、顕熱加熱により、更に蒸発と空気冷却との組み合わせにより、更に最終的には本明細書に記載されるように自然対流空気冷却のみにより、環状部に熱を排除する。上述したように、反応炉格納システム 100 は、環状部 313 内の有効な水インベントリが完全に枯渇した時点で崩壊熱を排除するのに空気冷却のみで充分であるように設計及び構成される。

【0071】

これらの前述のシナリオの両方において、プラントを稼働状態に戻すための代替手段が利用可能になるまで、排熱は無期限に続けることができる。システムが無期限に運転するのみならず、この運転は、いかなるポンプの使用または作業員による介入を伴わない完全に受動的なものである。

【0072】

受動的反応炉冷却システム

【0073】

本発明の別の態様によれば、ポンプ及びモータへのいかなる依存及びそれらの欠点を伴わない、反応炉停止 (例えば「緊急停止」) の際に反応炉の崩壊熱を排除するための受動的重力駆動核反応炉冷却システムが提供される。一実施形態において、受動的核反応炉停止冷却システム 600 は、図 21 ~ 23 に概略的に示される構成要素を含む、浸漬束状冷却システム 602 (SBCS) を備え得る。

【 0 0 7 4 】

浸漬束状冷却システム 6 0 2 は、好ましくは、3つの主要部分またはサブシステム、すなわち (i) 浸漬束状熱交換器 6 2 0 (S B H X) と、(i i) 格納構造の内壁に一体的に接続される放熱器導管 6 1 0 (H D D) の離散的なセットまたはアレイ (上で詳細に説明した) と、(i i i) 本明細書で更に説明されるような、過熱器または反応炉圧力容器 5 0 0 を伴う蒸気発生器 5 0 2 と、から構成される、閉鎖ループ加圧流システムである。蒸気及び凝縮液流路は、下に説明されるように、これらの構成要素の間に確立される。浸漬束状冷却システム 6 0 2 は、蒸気発生器内の二次蒸気を活用して、電力の動作可能な源の不在下で無期限に継続し得る反応炉停止の際の閉鎖ループプロセス内で、燃料炉心によって発生する熱エネルギーを抽出するように構成される。

10

【 0 0 7 5 】

蒸気発生器 5 0 2 については、2 0 1 3 年 4 月 2 5 日に出願された国際 P C T 出願第 P C T / U S 1 3 / 3 8 2 8 9 号においてより完全に説明されており、その全体が参照により本明細書に組み込まれる。本明細書に記載され、本出願の図 1 1、1 2、及び 2 4 において示されるように、蒸気発生器 5 0 2 は、浸漬束状熱交換器 6 2 0 と同様に鉛直方向に配向され、軸方向に細長くてよい。蒸気発生器 5 0 2 は、重力駆動受動的流手段によって反応炉の崩壊熱を一次冷却材から抽出するように構成される、鉛直に積み重ねて配列される管状熱交換器のセットから構成されてもよい。

【 0 0 7 6 】

タービン発電所 (T - G) 設備によって生成される利用可能な給電による反応炉及び発電所の通常運転中の、反応炉容器及び蒸気発生器を通る一次冷却材 (液体水) ならびに二次冷却材 (液体給水及び蒸気) の循環流ループを、本明細書の図 2 4 に示す。流体連結された蒸気発生器 5 0 2 と反応炉容器 5 0 0 との間の一次冷却材流は、本考察の目的に関する第 1 の閉鎖流ループを形成する。一実施形態において、一次冷却材流は、核燃料炉心 5 0 1 によって反応炉容器 5 0 0 内で加熱されるにつれて、冷却材の温度及び対応する密度の変化に応じて重力によって推進され、タービン発電機設備を駆動するランキンサイクルの二次冷却材ループに熱が伝えられるにつれて、蒸気発生器 5 0 2 内で冷却される。一次冷却材の変化する異なる密度 (すなわち、熱い - 低密度、及び冷たい - 高密度) によって作り出される圧力ヘッドは、流れ方向矢印によって示されるように、反応炉容器 - 蒸気発生器システムを通る流れまたは循環を誘発する。

20

30

【 0 0 7 7 】

概して、第 1 の閉鎖流ループに関して、一次冷却材は核燃料炉心 5 0 1 によって加熱され、立上がり柱 2 2 4 中を上向きに流れる。反応炉容器 5 0 0 からの一次冷却材は次いで、反応炉容器 5 0 0 と蒸気発生器 5 0 2 との間の一次冷却材流体連結部 2 7 3 を通って流れ、蒸気発生器に入る。一次冷却材は、中央に配置される立上がりパイプ 3 3 7 内を、蒸気発生器の頂部の加圧器 3 8 0 まで上向きに流れる。一次冷却材は方向を逆転し、蒸気発生器 5 0 2 の管側を通して下に流れ、流体連結部 2 7 3 を通って反応炉容器 5 0 0 に戻り、ここで一次冷却材は環状下降管 2 2 2 に入って一次冷却材流ループを完成させる。

【 0 0 7 8 】

蒸気発生器 5 0 2 は、3つの鉛直方向に積み重ねられた伝熱部分、下から上に向かって予熱器部分 3 5 1、蒸気発生器部分 3 5 2、及び過熱器部分 3 5 0 を含み得る (例えば、図 1 1、1 2、及び 2 4 を参照)。二次冷却材は、蒸気発生器 5 0 2 容器のシェル側を流れる。ランキンサイクルのタービン発電機 (T - G) 設備からの液体給水形態である二次冷却材は、予熱器部分 3 5 1 の底部において蒸気発生器に入り、蒸気発生器部分 3 5 2 を通って上向きに流れ、蒸気に変換される。蒸気は過熱器部分 3 5 0 内まで上向きに流れ、過熱状態に達する。そこから過熱された蒸気は抽出され、T - G 設備に流れて電力を生産する。

40

【 0 0 7 9 】

ここで図 2 1 ~ 2 3 を参照すると、浸漬束状熱交換器 6 2 0 は、縦軸 L A を画定し、内部空洞 6 2 6 と、シェルの対向端 6 2 4、6 2 7 上の向かい合う頂部ヘッド及び底部ヘッ

50

ド 6 2 2、6 2 3 とを画定する円筒シェル 6 2 5 を有する、圧力容器 6 2 1 を含む。ヘッド 6 2 2、6 2 3 は、平坦、球状、半球状等を含む、任意の好適な形式及び構成であり得る。内部空洞 6 2 6 は、完全に頂部ヘッド及び底部ヘッド 6 2 2、6 2 3 の間において延在する。圧力容器 6 2 1 は、形状が軸方向に細長く、示されるように一実施形態において重力流を促進するために鉛直配向を有する。好ましくは、熱交換器 6 2 0 は、格納構造 2 0 0 の内側容器 2 0 2 の内部で、反応炉容器 5 0 0 の上方、かつ蒸気発生器 5 0 2 に比較的近接して載置及び配置される。熱交換器 6 2 0 と蒸気発生器 5 0 2 との近接した連結は、蒸気及び凝縮液配管の連長を最小化し（図 1 1 及び 1 3 も参照されたい）、水平空間を節約し、それにより反応炉容器 5 0 0、蒸気発生器 5 0 2、及び熱交換器を収容するために格納容器 2 0 0 について必要とされる直径を最小化する。内側格納容器 2 0 0 からの熱交換器 6 2 0 を載置及び支持するための任意の好適な構造用基礎 6 5 0 が、好ましくは容器内の構造用鋼、及び/またはコンクリート基盤もしくは床から、熱交換器の重量を適切に支持するように提供されてもよい。

10

【 0 0 8 0 】

冷却水 W（液体）のリザーブまたはインベントリ（すなわち、容積）は、本明細書において更に説明されるような反応炉停止事象の際に二次冷却材を冷却するためのヒートシンクとして作動する、熱交換器圧力容器 6 2 1 内に保持される。したがって、冷却水 W は、停止中の二次冷却材の初期温度よりも低い初期温度を有する三次冷却材のヒートシンクとして働く。

【 0 0 8 1 】

20

浸漬束状熱交換器 6 2 0 は、図 2 1 に示されるように、内部に配置される比較的小さい熱交換器管束 6 3 0 を収容する、相対的に大きい円筒形の圧力容器 6 2 1 であってもよい。一実施例において、限定されるものではないが、圧力容器 6 2 1 はおよそ 10 フィートの外径とおよそ 20 フィートの高さを有し得るが、一方でその中に収容される管束 6 3 0 は、横断形状が円形であり、およそ 4 フィートの直径と圧力容器の高さよりも低い高さを有し得る。他の好適な寸法が提供され得る。したがって、この実施形態の管束 6 3 0 は、圧力容器 6 2 1 の空洞 6 2 6 全体を実質的に充填するわけではない。

【 0 0 8 2 】

好ましくは、管束 6 3 0 は、頂端 6 2 4 及び頂部ヘッド 6 2 2 よりも底端 6 2 7 及び底部ヘッド 6 2 3 に近く位置付けられ得る（例えば、図 2 1 を参照されたい）。この位置付けは、管束 6 3 0 が、圧力容器 6 2 1 内に貯蔵される液体水 W のインベントリ中に、その高さの大部分、または好ましくはその全てが実質的に浸漬するままであることを確保するのに役立つ。したがって、一部の実施形態において、管束 6 3 0 は、全ての側面及び部分において液体凝縮液によって完全に包囲され、その中に浸漬する。管束 6 3 0 は、束の真下に十分な水深を提供して容器のシェル側上における管束の真下の流れを許容するように、持ち上げられ、熱交換器圧力容器 6 2 5 の底部ヘッド 6 2 3 の上方に距離を空けて配置されてもよい。管束アセンブリ 6 3 0 をしっかりと支持するための、圧力容器 6 2 5 内部の構造用支持及び受けの任意の好適な配列が使用され得る。

30

【 0 0 8 3 】

圧力容器 6 2 1 は、蒸気発生器 5 0 2 から予測される蒸気圧力及び運転圧力に耐えることができる任意の好適な金属で作製され得る。一部の実施形態において、圧力容器 6 2 1 は、限定されるものではないがステンレス鋼等の耐食材料で形成され得る。他の耐食金属性材料が使用されてもよい。

40

【 0 0 8 4 】

管束 6 3 0 は、圧力容器 6 2 1 の空洞 6 2 6 内に配置される。非制限的な一構成において、管束 6 3 0 アセンブリは、頂部管板 6 3 2 を画定する入口流プレナム 6 3 1 と、底部管板 6 3 4 を画定し、頂部管板から距離を空けて配置される出口流プレナム 6 3 3 と、頂部及び底部管板の間で延在し、それらに流体連結する複数の管 6 3 5 とを含んでもよい。管板 6 3 2、6 3 4 はそれぞれ、複数の流れ開口部 6 3 6、6 3 7 をそれぞれ含み、これらは入口流プレナム及び出口流プレナム 6 3 1、6 3 3、ならびに管 6 3 5 と流体連通す

50

る。流路の運転及び説明において、流れは入口流プレナム 6 3 1 に入り、開口部 6 3 6 を通って管 6 3 5 の一方の端部に入り、管 6 3 5 の反対側の端部から開口部 6 3 7 を通って出口プレナム 6 3 3 へ出て、出口プレナムを離れる。

【 0 0 8 5 】

一実施形態において、管束 6 3 0 の管 6 3 5 は、示されるように、軸方向に細長く、鉛直方向に配向されてもよい。しかしながら、水平配向、及び水平と鉛直との間の角度のついた配向等の、他の配向が可能である。管 6 3 5 は、限定されるものではないが、直線式、螺旋状の渦巻き式（例えば図 2 1 を参照）もしくは別の曲線式構成等の曲線式、または他の適切な形状を含む、任意の好適な形状を有し得る。好ましい一実施形態において、管は、利用可能な伝熱表面積を最大化する曲線式の形状を、同じ表面積を有する直線式の管ほどの高さを必要とすることなしに有し得る。任意の好適な直径の管、及び管の配列 / パターンが使用されてもよい。例えば、管 6 3 5 の単一または複数の列が提供されてもよく、この数は熱交換器 6 2 0 についての伝熱要件に少なくとも部分的に依存する。一実施形態において、管束 6 3 0 は、横断面においてほぼ円形の形状を有し得る。

10

【 0 0 8 6 】

管 6 3 5 は、所与の用途にとって好適な伝導性伝熱特性を有する、任意の好適な、好ましくは耐食金属から形成されてもよい。使用され得る管の材料の、いくつかの非制限的な例としては、ステンレス鋼、アルミニウム、チタン、耐食鋼合金、Inconel（登録商標）、Monel（登録商標）、またはその他が挙げられる。

【 0 0 8 7 】

入口及び出口流プレナム 6 3 1 及び 6 3 3 はそれぞれ、圧力境界及び開口内側プレナムを形成する、任意の好適な形状の実質的に中空の外側体を備える。管板 6 3 2、6 3 4 は、任意の好適な厚さと、平面及び弓形を含む面内の形状（例えば、プレナムがパイプ部分のような形状の場合）、ならびに上部平面における形状（例えば、丸い断面の管束については円形）とを有し得る。管板及びプレナムは、任意の好適な耐食金属または金属合金で形成されてもよく、これらのいくつかの例については、管 6 3 5 にとって可能な材料に関して上述した。

20

【 0 0 8 8 】

浸漬束状熱交換器 6 2 0 は、図 2 2 及び 2 3 に示される好適な蒸気及び凝縮液配管 6 0 3 によって、蒸気発生器 5 0 2、反応炉容器 5 0 0、及び放熱器導管 6 1 0 と、様々な方法で流体相互接続及び流体連結され得る。配管 6 0 3 は、これらの図において示される流路を確立するように構成される。配管及び材料の任意の好適な形式が配管 6 0 3 について使用されてもよく、これは配管の連続が、凝縮液または蒸気の運搬、ならびに予測されるそれらの関連付けられる使用温度及び圧力のためのものであるかどうか部分的に依存し得る。一部の実施形態において、例えば限定されるものではないが、配管は好ましくは、ステンレス鋼または鋼合金等の耐食金属で作製され得る。適切な配管及びバルブ等の関連する付属品を選択及び設計することは、十分に当業者の領域内である。とりわけ、図 2 2 及び 2 3 において示される重力駆動である流路を確立するために、ポンプは全く関与していない。

30

【 0 0 8 9 】

ここで、反応炉冷却システム 6 0 0 の運転について簡潔に説明する。全電源喪失等の想定される反応炉停止事象、またはターボ発電機からの発電が中止され、通常の非安全動的システムが利用不能である類似の事象の際、主蒸気及び主給水隔離バルブ（図示せず）がまず閉鎖されて、蒸気発生器 5 0 2 をランキンサイクルの更なる格納発電部分から隔離する。したがって、隔離バルブは、蒸気発生器 5 0 2 からタービン発電機（T - G）設備への蒸気流を遮断し、蒸気発生器へ戻る給水流は、更なる精緻化を伴わない当業者に公知の様式で T - G 設備から戻される。余剰蒸気はまず、主隔離バルブを閉鎖する前に大気中に廃棄され得る。主隔離バルブの閉鎖が、反応炉炉心冷却システム 6 0 0 を活性化する。本冷却システム 6 0 0 を採用するための 2 つの潜在的な運転シナリオまたは方法が、下において更に詳細に開示及び説明され、これらは受動的に（すなわち電力を伴わずに）停止事

40

50

象の際の反応炉を冷却し続けて、浸漬束状冷却システム 6 0 2 を用いて崩壊熱を除去する。

【 0 0 9 0 】

図 2 2 に示される反応炉を冷却するための第 1 の運転シナリオまたは方法において、（今しがた停止した反応炉から発生する残留崩壊熱による）蒸気発生器容器の上半分のシェル側における蒸気発生器 5 0 2 内で生成された蒸気は、抽出され、浸漬束状熱交換器 6 2 0 へ送られ、ここで蒸気は浸漬束状熱交換器 6 2 0 の管 6 3 5 の内部で凝縮する（図 2 1 も参照されたい）。凝縮する蒸気は、その潜熱を、管束 6 3 0 を包囲する浸漬束状熱交換器圧力容器 6 2 1 のシェル側に貯蔵される水 W（三次冷却材）の容積またはインベントリに与える。

10

【 0 0 9 1 】

一実施形態において、管束 6 3 0 は熱交換器 6 2 0 内部の水 W のインベントリに完全に浸漬し、それによりこの水が、蒸気を凝縮するための冷媒を管 6 3 5 の外部において提供する。一実施形態において、管束 6 3 0 は好ましくは、全ての側面において水 W で管束を均等に包囲して、束内の全ての管 6 3 5 の均一な冷却を促進するために、浸漬束状熱交換器 6 2 0 の軸方向中心線と一致する縦軸 L A の付近に配置され得る。しかしながら、管束の他の載置位置も可能である。蒸気の流入及び収集された凝縮液の流出は、バルブ、配管、または運転に関して電気もしくは別の動力源に依存しない他の流れ制御装置（例えば、開口部等）の適切な設計によって、受動的に制御及び維持され得る。

【 0 0 9 2 】

熱交換器管束 6 3 0 の管側において、蒸気発生器 5 0 2 から抽出される蒸気は、任意の便宜的な場所において熱交換器圧力容器 6 2 1 に入り得る。一実施形態において、蒸気入口配管 6 0 3 は、横方向に圧力容器シェル 6 2 5 を貫通してもよく、配管は、熱交換器圧力容器 6 2 1 の内部で、配管が流体連結される管束 6 3 0 の入口プレナム 6 3 1 まで延在してもよい。限定されるものではないが、頂部ヘッド 6 2 2 を通る蒸気入口等の、他の場所が使用されてもよい。

20

【 0 0 9 3 】

管束 6 3 0 の下部プレナム 6 3 3 において収集された凝縮液は次いで、自然重力流のみによって、配管 6 0 3 を介して蒸気発生器 5 0 2 のシェル側に戻される。凝縮液出口配管 5 0 3 は、熱交換器圧力容器 6 2 1 の底部 6 2 7 に向かう、またはその大体の付近に配置されてもよく、浸漬束状熱交換器 6 2 0 に供給される、蒸気発生器からの蒸気の抽出点（例えば過熱器部分 3 5 0）よりも低い注入点（例えば予熱器 3 5 1 部分）において蒸気発生器 5 0 2 内に再導入される。第 2 の閉鎖流ループは、蒸気発生器 5 0 2 と、浸漬束状熱交換器 6 2 0 の管側（すなわち、管束 6 3 0）との間に確立される。適切な配管が、下部プレナム 6 3 3 と容器のシェル 6 2 5 との間で圧力容器 6 2 1 の内部に通されてもよく、これは次いで蒸気発生器 5 0 3 に接続される凝縮液出口配管 5 0 3 に連結される。

30

【 0 0 9 4 】

図 2 2 に示される第 1 の運転シナリオまたは方法を引き続き参照すると、浸漬束状熱交換器圧力容器 6 2 1 のシェル側の管 6 3 5 の外部の水 W のインベントリ（管束 6 3 0 の管側の凝縮液から流体隔離及び分離される）は、管束内部の蒸気を凝縮することにより加熱され、管束はその熱を水に伝える。水 W は、反応炉停止事象の際、二次冷却材を冷却するためのヒートシンクとして振る舞う。したがって、水 W は、停止中の二次冷却材の初期温度よりも低い初期温度を有する三次冷却材として働く。水 W は、反応炉停止プロセスの際、漸進的に加熱される。ある期間の後、水 W は、水インベントリの一部が蒸気に変換される沸点温度に達する。蒸気は、頂部ヘッド 6 2 2 の真下の圧力容器 6 2 1 内の水位線 L より上方に形成される蒸気空間に蓄積される。

40

【 0 0 9 5 】

管束 6 3 0 内部で二次冷却材蒸気を凝縮するための冷却流体を提供する、水 W（三次冷却材）のインベントリを冷却するために、シェル側に蓄積された蒸気は抽出され、好適な配管 6 0 3 を介して、上に詳細に説明された補助放熱システム 3 4 0 の放熱器導管 6 1 0

50

へ通される。蒸気は放熱器導管 6 1 0 を通って流れ、既に説明された様式で凝縮される。特に、環状リザーバ（一次環状部 3 1 3）内の水は、三次冷却材蒸気の温度よりも低い温度を有し、リザーバに熱を伝える三次冷却材蒸気を凝縮させるためにヒートシンクを形成する。次いで、凝縮液は、好適な配管 6 0 3 を介して浸漬束状熱交換器 6 2 0 に戻され、圧力容器 6 2 1 のシェル側に入り、ここで凝縮液は水 W のインベントリ内に再導入される。この冷却システムは、実質的に水位を維持して、管束 6 3 0 を水位線 L より下の水 W 中に浸漬させ続けるのに役立つ。このシステムは更に、放熱器導管 6 1 0 を用いて蒸気及び凝縮液の第 3 の閉鎖流ループを形成して、蒸気を凝縮し、この第 3 の閉鎖流ループは、浸漬束状熱交換器 6 2 0 の管側及び蒸気発生器 5 0 2 において形成される第 2 の閉鎖流ループとは別個であり、それから隔離される。要するに、本明細書に記載される第 1 及び第 2 の閉鎖流ループは、それぞれ、一次冷却材及び二次冷却材を冷却するように機能する。第 3 の閉鎖流ループは、浸漬束状熱交換器 6 2 0 の冷却流体を冷却し（すなわち、水 W のインベントリにより形成される水のヒートシンク）、これは管束 6 3 0 に関する二次冷却材の冷却に間接的に寄与する。

【 0 0 9 6 】

図 2 3 に示される反応炉を冷却するための代替的な第 2 の運転シナリオまたは方法において、反応炉容器 5 0 0 内の一次冷却材は、反応炉崩壊熱により蒸気発生器 5 0 2 内で生成され続ける蒸気を用いるよりもむしろ、浸漬束状熱交換器 6 2 0 によって直接冷却される。このプロセス配列において、蒸気及び給水隔離バルブが閉鎖された時点で、反応炉圧力容器の立上がり柱 2 2 4（「ホットレグ」）からの熱い一次冷却材は、配管 6 0 3 を介して、浸漬束状熱交換器 6 2 0 の管束 6 3 0 の管側に直接通される（図 2 3 及び 2 4 を参照されたい）。一次冷却材は、管 6 3 5 内部を下向きに流れながら、図 2 2 に示され上に説明された様式に非常に類似する様式で、浸漬束状熱交換器 6 2 0 内のシェル側水 W にその熱を排除することによって冷却されることになる。差異は、一次冷却材がこの冷却プロセス全体の間、及び反応炉容器 5 0 0 を通って循環するときも、常時実質的に液体状態のままである点である。この冷却は、浸漬束状熱交換器 6 2 0 への入口における高温の一次冷却材と、熱交換器の出口における低温の一次冷却材との間の密度の差異によって作り出される浮力ヘッドによる自然循環を作り出す。より低温の一次冷却材は、好適な配管 6 0 3 を介して通され、反応炉容器 5 0 0 の環状下降管 2 2 2 領域（「コールドレグ」）に再導入される。浸漬束状熱交換器 6 2 0 の反応炉容器 5 0 0 に対してより高い高さ、一次冷却材を熱交換器に通す配管 6 0 3 の大きさは、炉心からの熱を熱交換器内のシェル側水 W に排除するための適切な自然循環流の存在を確保するように設計され得る。

【 0 0 9 7 】

上に記載された反応炉を冷却するための第 1 及び第 2 の方法の両方において、浸漬束状熱交換器 6 2 0 の空洞 6 2 6 内の水 W の量は、好ましくは、崩壊熱の発生がその最大の段階にある、想定される反応炉停止事象の初期相において、シェル側水の顕熱加熱を通じて、（一次冷却材を介して）反応炉炉心からの崩壊熱を除去するのに十分な量である。これは、貯蔵容積及び浸漬束状熱交換器圧力容器 6 2 1 の大きさを適切にサイズ決定することによって部分的には達成され得る。

【 0 0 9 8 】

反応炉冷却システム 6 0 0、及び格納構造の空気冷却システム 4 0 0 の運転上の相互作用について簡潔に説明する。上に説明された通り、熱交換器 6 2 0 の管側 6 3 0 の内部の蒸気を凝縮する際に使用されない熱の残りは、水 W のインベントリを加熱することによる熱交換器のシェル側における蒸気の生成に繋がる。このシェル側蒸気は、放熱器導管 6 1 0 に通され、ここで蒸気はその潜熱を格納構造（例えば、内側格納容器 2 0 0）に排除することにより凝縮する。格納容器 2 0 0 は、格納構造と、本明細書に記載される受動的反応炉格納保護システムの格納エンクロージャ構造 3 0 0 との間の環状部 3 1 3 内の水に（そして最終的には最終ヒートシンクまたは大気に）熱を排除する。放熱器導管 6 1 0 からの凝縮した蒸気は次いで、収集多岐管（図 1 6 及び 1 8 に示される下部出口リングヘッダ 3 4 4）に流し戻され、この収集多岐管は一方で、凝縮液を浸漬束状熱交換器 5 2 0 に重

10

20

30

40

50

力のみによって送り返す。内側格納容器 200 と外側格納エンクロージャ構造 300 との間の環状部 313 内の冷却水インベントリが蒸発すると、露出した内側格納容器 200 は、環状部を現在占有している空気に自然対流によって熱を排除する。空気の新鮮な供給は、一次環状部 313 内に、格納容器 200 周囲で円周方向に距離を空けて配置される吸気路 401 によって（吸引作用で）提供される（例えば、図 16 及び前述の説明を参照されたい）。いったん環状部 313 内の全ての水が蒸発すると、格納容器 200 は、空気冷却のみによって熱を排除し続けることになる。長期間の水冷却（反応炉崩壊熱の相当な部分を除去する）の後の空気冷却は、全ての崩壊熱を除去するのに充分である。浸漬束状冷却システム 602 は閉鎖ループ自然流システムであるため、冷却プロセスは無期限に継続することができる。

10

【0099】

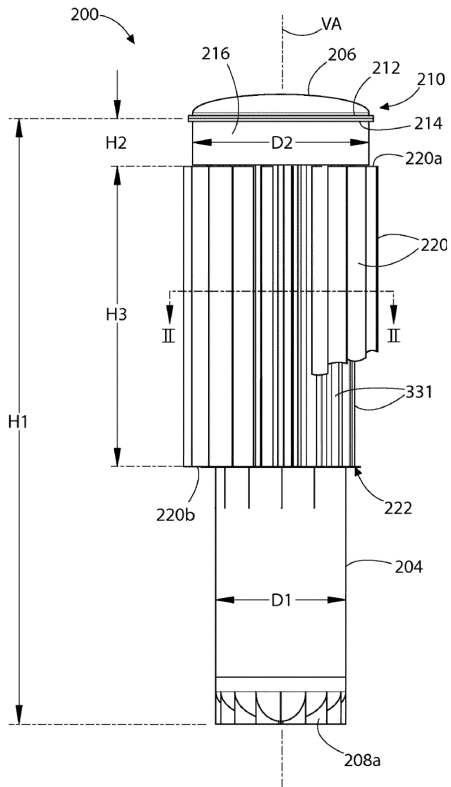
前述の 2 つの方法の変形及び組み合わせが、無動力反応炉停止事象の際に反応炉を受動的に冷却するために使用され得ることが理解されるであろう。

【0100】

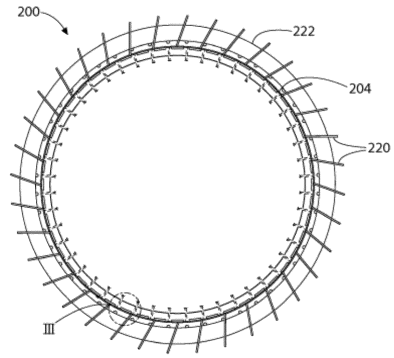
前述の説明及び図面はいくつかの例示的システムを表しているが、添付の特許請求の範囲の等価物の趣旨、ならびに範囲及び種類から逸脱することなく、本発明に様々な追加、修正、及び置換を行ってもよいことが理解されるであろう。特に、本発明の趣旨または本質的な特徴から逸脱することなく、他の形態、構造、配列、比率、大きさで、他の要素、材料、及び構成要素を用いて本発明を具体化し得ることが、当業者には明らかであろう。加えて、本明細書に記載される方法／プロセスにおける多数の変形を作成してもよい。当業者であれば更に、本発明の原理から逸脱することなく特定の環境及び運転要件に特に適合する、本発明の実施に際して使用される構造、配列、比率、大きさ、材料、及び構成要素、ならびにその他の多くの修正を伴って本発明が使用され得ることを認識するであろう。それ故に、現在開示されている実施形態は、あらゆる点において例示的であり、限定的ではないと見なされるべきであり、本発明の範囲は、添付の特許請求の範囲及びその等価物により定義され、前述の記載または実施形態に制限されるものではない。むしろ、添付の特許請求の範囲は、本発明の他の変形形態及び実施形態を含むように広義に解釈されるべきであり、これらの形態は本発明の等価物の範囲及び種類から逸脱することなく当業者によって作成され得る。

20

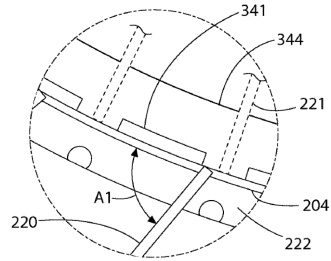
【 図 1 】



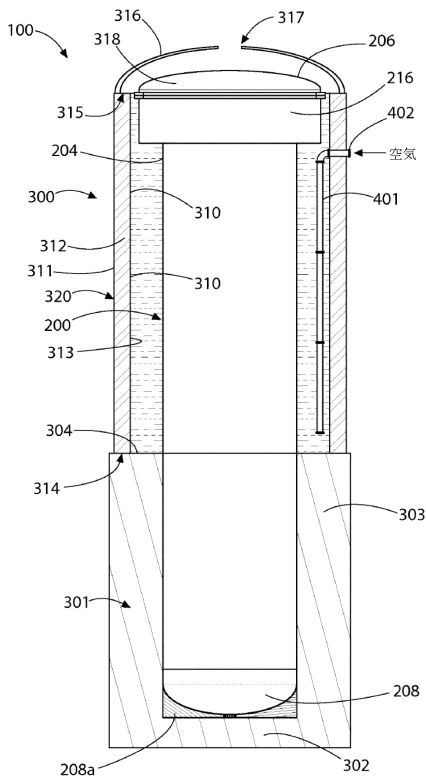
【 図 2 】



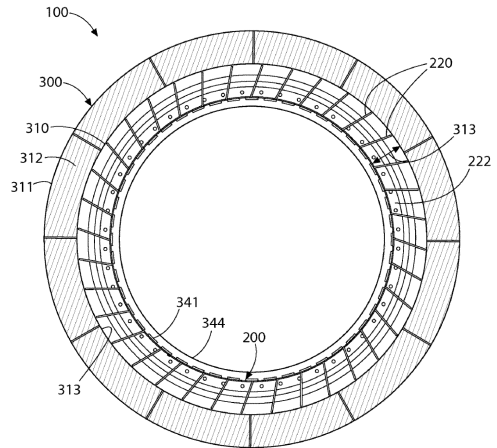
【 図 3 】



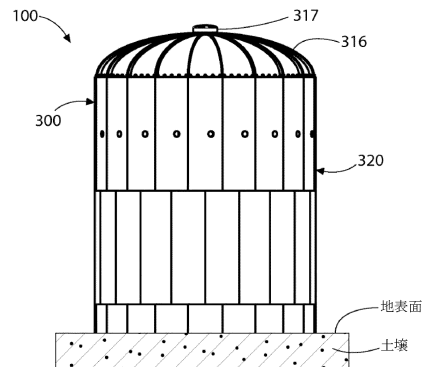
【 図 4 】



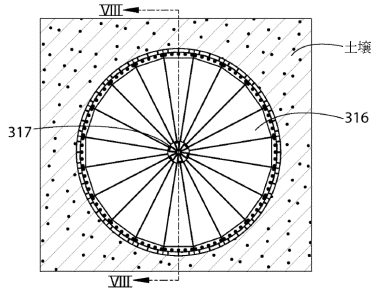
【 図 5 】



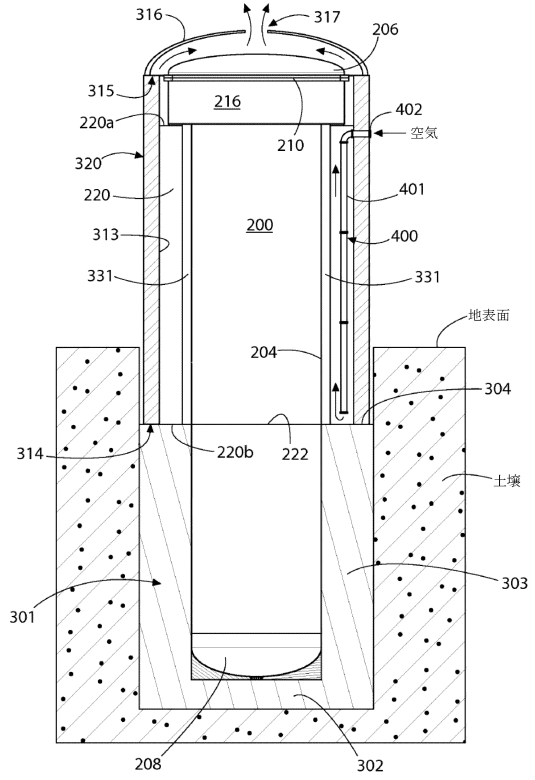
【 図 6 】



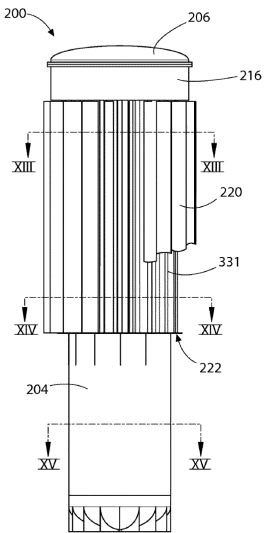
【 図 7 】



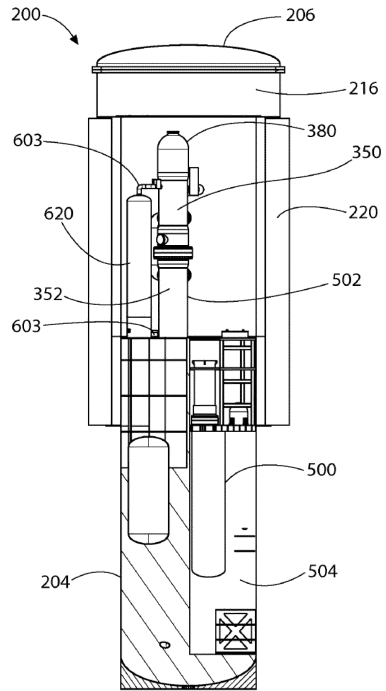
【 図 8 】



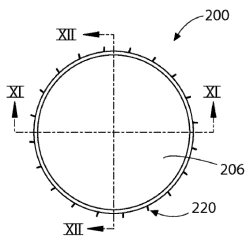
【 図 9 】



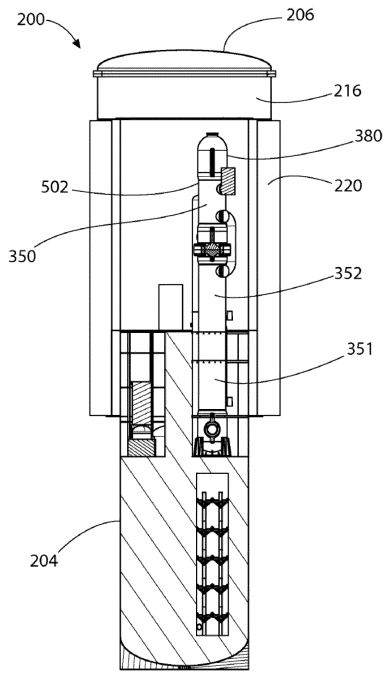
【 図 11 】



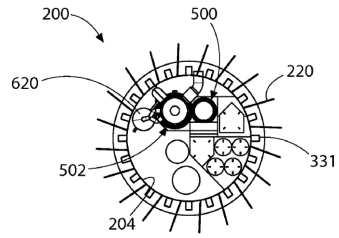
【 図 10 】



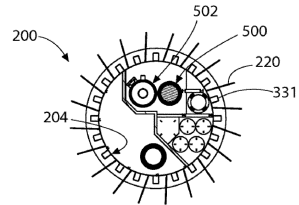
【図12】



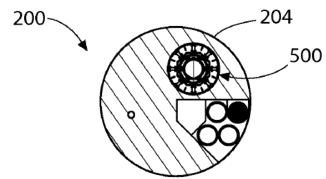
【図13】



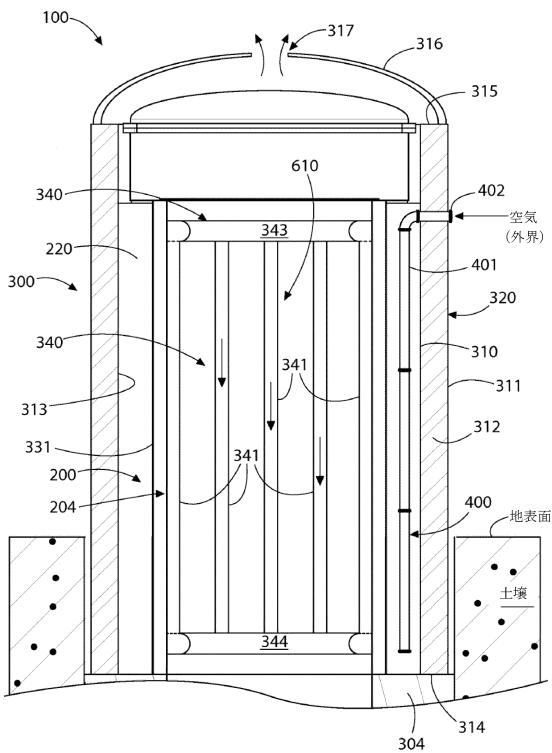
【図14】



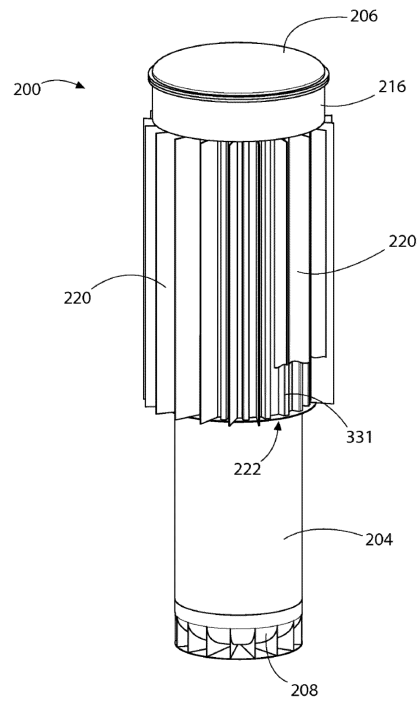
【図15】



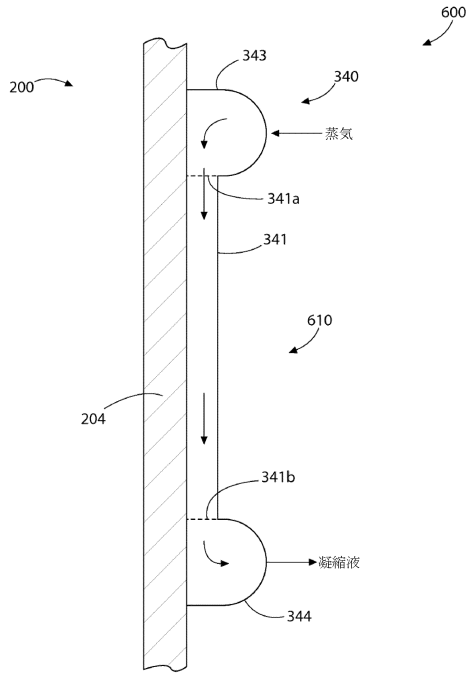
【図16】



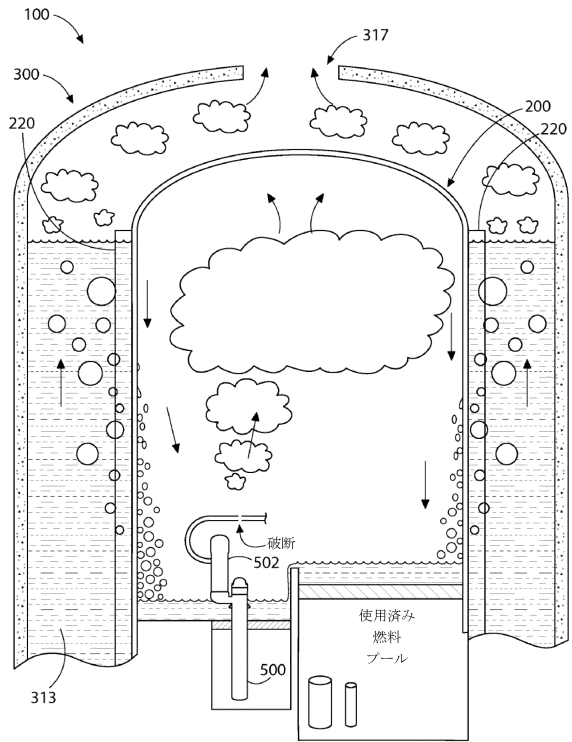
【図17】



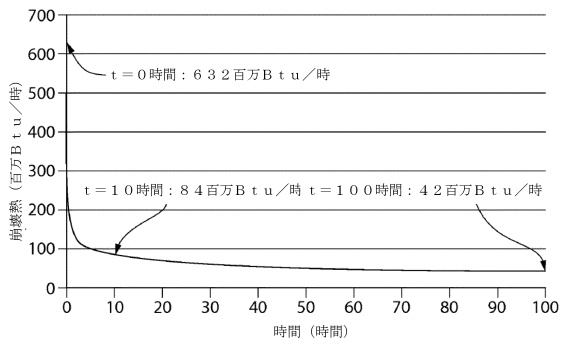
【図18】



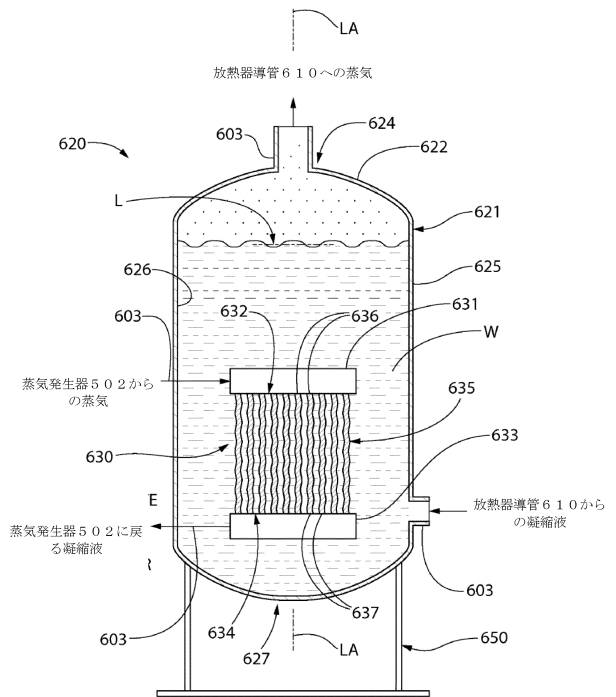
【図19】



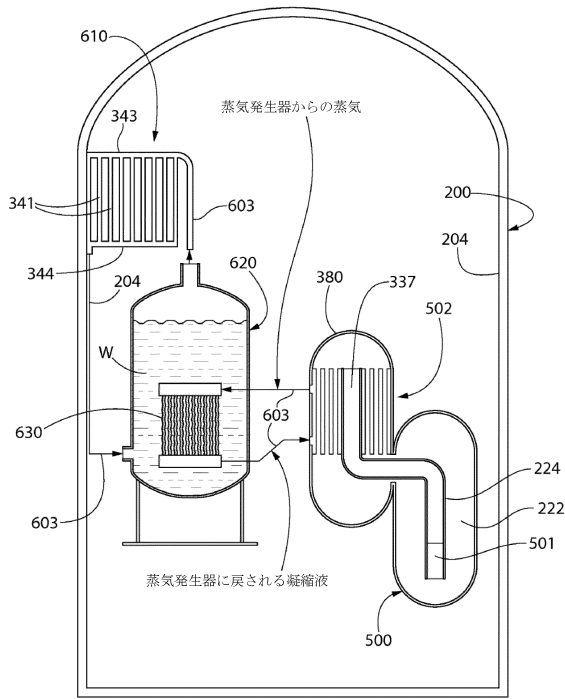
【図20】



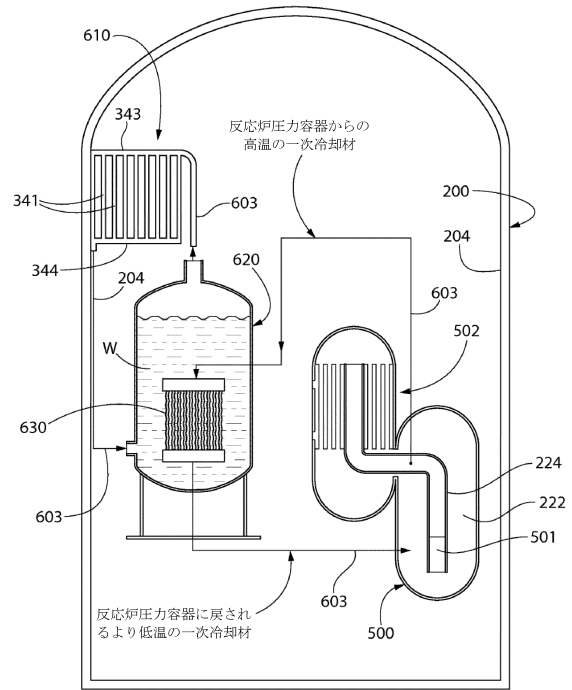
【図21】



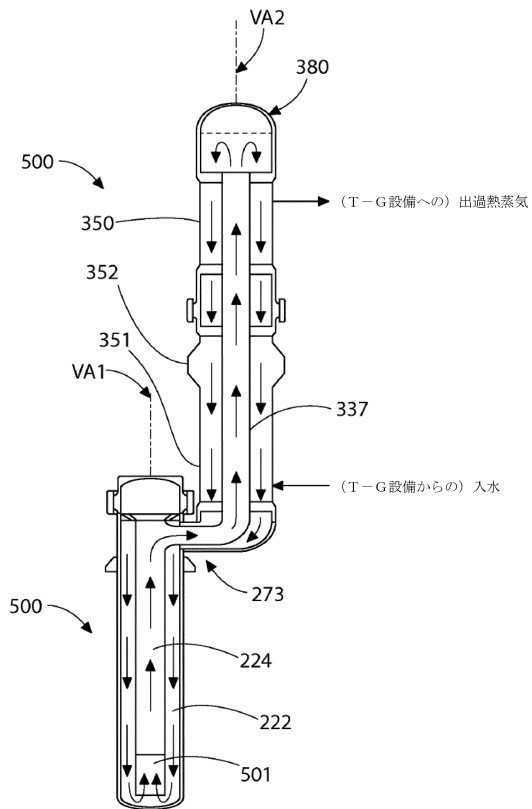
【図 2 2】



【図 2 3】



【図 2 4】



フロントページの続き

- (74)代理人 100137213
弁理士 安藤 健司
- (74)代理人 100143823
弁理士 市川 英彦
- (74)代理人 100151448
弁理士 青木 孝博
- (74)代理人 100183519
弁理士 櫻田 芳恵
- (74)代理人 100196483
弁理士 川崎 洋祐
- (74)代理人 100203035
弁理士 五味淵 琢也
- (74)代理人 100185959
弁理士 今藤 敏和
- (74)代理人 100160749
弁理士 飯野 陽一
- (74)代理人 100146318
弁理士 岩瀬 吉和
- (74)代理人 100127812
弁理士 城山 康文
- (72)発明者 シン, クリシュナ・ピー
アメリカ合衆国、フロリダ・33455、ホープ・サウンド、ゴメス・ロード・202
- (72)発明者 ラジクマール, ジョセフ
アメリカ合衆国、ニュージャージー・08053、マールトン、コネストガ・ドライブ・100、
アパートメント・202

審査官 藤本 加代子

- (56)参考文献 特開昭62-187291(JP, A)
特表平06-510117(JP, A)
特開平10-090468(JP, A)
特開平07-181279(JP, A)
特開2010-085282(JP, A)
特開2002-122689(JP, A)
米国特許第04765946(US, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G21C 15/18
G21C 1/00
G21C 9/00
G21C 13/00