

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6633647号
(P6633647)

(45) 発行日 令和2年1月22日 (2020.1.22)

(24) 登録日 令和1年12月20日 (2019.12.20)

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

請求項の数 24 (全 32 頁)

(21) 出願番号	特願2017-552881 (P2017-552881)	(73) 特許権者	500002490
(86) (22) 出願日	平成28年4月15日 (2016.4.15)		コリア アトミック エナジー リサーチ
(65) 公表番号	特表2018-513374 (P2018-513374A)		インスティテュート
(43) 公表日	平成30年5月24日 (2018.5.24)		大韓民国 305-353 テジョン、ユ
(86) 国際出願番号	PCT/KR2016/003932		ソンーク、テドクーデロ 989ボンーキ
(87) 国際公開番号	W02016/167593		ル、111
(87) 国際公開日	平成28年10月20日 (2016.10.20)	(74) 代理人	100098914
審査請求日	平成29年10月23日 (2017.10.23)		弁理士 岡島 伸行
(31) 優先権主張番号	10-2015-0054557	(72) 発明者	イ, スンージェ
(32) 優先日	平成27年4月17日 (2015.4.17)		大韓民国 34057 テジョン, ユソン
(33) 優先権主張国・地域又は機関	韓国 (KR)		ーク, テドクーデロ 989ボンーキル,
			111
		審査官	藤原 伸二

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 自己診断事故対処無人原子炉及びその作動方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

原子炉炉心を収容する原子炉容器、蒸気管および給水管が連結された蒸気発生器を含む原子炉駆動系と、

原子炉駆動系を収容するエネルギー放出空間 (Energy Release Space、E R S)、上側に形成された通路によって前記エネルギー放出空間と連通し冷却材を収容するエネルギー吸収空間 (Energy Absorbing Space、E A S)、前記エネルギー放出空間および前記エネルギー吸収空間と隔離されるように形成され、前記原子炉駆動系と連結される残熱除去部および前記エネルギー吸収空間と連結される流通路が設けられ、前記原子炉駆動系から放出される熱を冷却材に伝達し、冷却材に吸収された熱を外部に伝達して廃棄するエネルギー伝達空間 (Energy Transfer Space、E T S) に分けられてなる原子炉安全系とを含み

10

、
前記残熱除去部は、前記エネルギー吸収空間と連結される流通路によって供給される冷却材を用いる二相流動熱伝達現象 (two-phase heat transfer mechanism) により熱伝達が行われる熱交換部と、内部に冷却材および前記熱交換部を収容し下部が開放して冷却材の流通が可能になるように形成される密閉容器部と、前記密閉容器部を囲むように設けられて冷却材が収容および流通される外筒部とを含み、

前記熱交換部は、それぞれ前記原子炉駆動系内を介して循環して当該原子炉駆動系から供給された熱を放出する高温流体および前記高温流体から放出される前記熱を吸収し、当該熱を外部に伝達して廃棄することが可能である低温流体が流通される一対の熱交換器と

20

、前記流通路によって供給される冷却材を前記一对の熱交換器に噴射する装置とを含み、前記流通路によって供給される冷却材が前記一对の熱交換器に噴射されて前記二相流動熱伝達現象が発生するようになっており、

前記熱交換部により沸騰して発生した冷却材蒸気によって前記密閉容器部内の前記熱交換部が配置された位置に飽和蒸気圧を有する空間が形成されるようになることを特徴とする、自己診断事故対処無人原子炉。

【請求項 2】

前記熱交換部は、

前記原子炉駆動系と連結されて前記原子炉駆動系内を介して循環する冷却材が流通される第 1 熱交換器と、前記第 1 熱交換器と密接して配置されて前記第 1 熱交換器内に流通する冷却材から熱を吸収する第 2 熱交換器とを含み、

前記第 1 熱交換器により沸騰して発生した冷却材蒸気によって前記密閉容器部内の前記熱交換部が配置された位置に飽和蒸気圧を有する空間が形成され、

飽和蒸気圧を有する空間上で前記エネルギー吸収空間と連結される流通路によって供給される冷却材が前記第 1 熱交換器および前記第 2 熱交換器に噴射されて二相流動熱伝達現象が発生するようになることを特徴とする、請求項 1 に記載の自己診断事故対処無人原子炉。

【請求項 3】

原子炉炉心 1 5 1 を収容する原子炉容器 1 5 2 と、蒸気管 1 5 4 および給水管 1 5 5 が連結された蒸気発生器 1 5 3 とを含む原子炉駆動系と、

内部の第 1 空間 V 1 に気体および前記原子炉駆動系を収容する第 1 格納容器 1 1 0 と、前記第 1 格納容器 1 1 0 と密接して配置され内部に水平隔壁 1 2 5 が設けられて、内部空間が下部の第 2 空間 V 2 と上部の第 3 空間 V 3 とに分けられるようになり、前記第 2 空間 V 2 に冷却材を収容する第 2 格納容器 1 2 0 と、一側先端が前記第 1 空間 V 1 に配置され、他側先端が前記第 2 空間 V 2 と連通され、格納容器貫通弁 1 1 1 v が設けられる格納容器貫通管 1 1 1 と、一側先端が前記第 3 空間 V 3 に配置され、他側先端が前記第 1 空間 V 1 と連通され、冷却材注入弁 1 1 2 v が設けられる冷却材注入管 1 1 2 と、前記第 3 空間 V 3 に設けられ、前記原子炉駆動系と連結されて前記原子炉駆動系から放出される熱を冷却材に伝達し、冷却材に吸収された熱を外部に伝達する残熱除去装置 1 3 0 とを含む原子炉安全系とを含み、

前記残熱除去装置 1 3 0 は、前記第 2 空間 V 2 と連結される流通路によって供給される冷却材を用いる二相流動熱伝達現象 (two - phase heat transfer mechanism) によって熱伝達が行われる熱交換部と、内部に冷却材及び前記熱交換部を収容し、下部が開放して冷却材の流通が可能になるように形成される密閉容器部と、前記密閉容器部を囲むように設けられて冷却材が収容及び流通される外筒部とを含み、

前記熱交換部は、それぞれ前記原子炉駆動系内を介して循環して当該原子炉駆動系から供給された熱を放出する高温流体および前記高温流体から放出される前記熱を吸収し、当該熱を外部に伝達して廃棄することが可能である低温流体が流通される一对の熱交換器と、前記流通路によって供給される冷却材を前記一对の熱交換器に噴射する装置とを含み、前記流通路によって供給される冷却材が前記一对の熱交換器に噴射されて前記二相流動熱伝達現象が発生するようになっており、

前記熱交換部によって沸騰し発生した冷却材蒸気によって前記密閉容器部内の前記熱交換部が配置された位置に飽和蒸気圧を有する空間が形成されるようになることを特徴とする、自己診断事故対処無人原子炉。

【請求項 4】

前記原子炉安全系は、

前記残熱除去装置 1 3 0 が、前記原子炉駆動系と連結され前記原子炉駆動系内の冷却材を流通させて熱を発散する 1 次熱交換器 1 3 1 と、前記 1 次熱交換器 1 3 1 と密接して配置され、残熱吸収用冷却材を流通させて熱を吸収する 2 次熱交換器 1 3 2 と、前記第 2 空間 V 2 と連結されて供給される冷却材を前記 1 次熱交換器 1 3 1 に噴射する冷却材噴射管

10

20

30

40

50

1 3 3 と、内部に冷却材が収容される密閉容器の形状を有し、上部に前記 1 次熱交換器 1 3 1 および前記 2 次熱交換器 1 3 2 が収容配置され、下部に前記第 2 空間 V 2 と連通されて冷却材が流通される冷却材流通路 1 3 4 a が形成される熱交換容器 1 3 4 と、前記冷却材流通路 1 3 4 a の下部先端が冷却材に浸される冷却材の水位を確保するように前記熱交換容器 1 3 4 を囲むように設けられ、冷却材が収容および流通される熱交換容器外筒 1 3 5 とを含み、

前記 1 次熱交換器 1 3 1 により沸騰して発生した冷却材蒸気によって前記熱交換容器 1 3 4 内の前記 1 次熱交換器 1 3 1 および前記 2 次熱交換器 1 3 2 が配置された位置に飽和蒸気圧を有する空間が形成され、

飽和蒸気圧を有する空間上に前記冷却材噴射管 1 3 3 によって供給される冷却材が、前記 1 次熱交換器 1 3 1 および前記 2 次熱交換器 1 3 2 に噴射されて二相流動熱伝達現象が発生するようになることを特徴とする、請求項 3 に記載の自己診断事故対処無人原子炉。

【請求項 5】

前記原子炉安全系は、

一側先端は前記第 2 空間 V 2 の下部と連通し、他側先端は前記蒸気発生器 1 5 3 と連通し、

前記第 2 空間 V 2 の圧力が前記蒸気発生器 1 5 3 内の圧力より高いときに、前記第 2 空間 V 2 内の冷却材を前記蒸気発生器 1 5 3 に供給し、補助給水弁 1 1 6 v が設けられる補助給水管 1 1 6 をさらに含むことを特徴とする、請求項 4 に記載の自己診断事故対処無人原子炉。

【請求項 6】

前記原子炉安全系は、

前記 1 次熱交換器 1 3 1 の上部に設けられ、

前記熱交換容器 1 3 4 内の飽和蒸気圧を有する空間に蒸気を補助供給するように、前記補助給水弁 1 1 6 v の開放時に同時に開放して前記熱交換容器 1 3 4 内に蒸気を供給する補助蒸気放出弁 1 3 1 v をさらに含むことを特徴とする、請求項 5 に記載の自己診断事故対処無人原子炉。

【請求項 7】

前記原子炉安全系は、

一側先端は前記第 1 空間 V 1 の上部と連通し、他側先端は前記第 3 空間 V 3 の上部と連通し、

前記第 3 空間 V 3 内の圧力を加圧するように、前記第 1 空間 V 1 内の蒸気を前記第 3 空間 V 3 に流通させ、蒸気放出弁 1 1 3 v が設けられる蒸気放出管 1 1 3 をさらに含むことを特徴とする、請求項 4 に記載の自己診断事故対処無人原子炉。

【請求項 8】

前記原子炉安全系は、

一側先端が前記原子炉駆動系内の前記蒸気発生器 1 5 3 から前記 1 次熱交換器 1 3 1 に冷却材を流入させる流路上に連結され、他側先端が前記格納容器貫通管 1 1 1 に連結され、

前記第 2 空間 V 2 内の圧力を加圧するように、前記蒸気発生器 1 5 3 内の蒸気を前記格納容器貫通管 1 1 1 を介して迂回させて前記第 2 空間 V 2 に流通させ、蒸気迂回弁 1 1 4 v が設けられる蒸気迂回管 1 1 4 をさらに含むことを特徴とする、請求項 4 に記載の自己診断事故対処無人原子炉。

【請求項 9】

前記熱交換容器外筒 1 3 5 は、

前記熱交換容器 1 3 4 に相当する形状を有し、且つ前記熱交換容器外筒 1 3 5 の内壁と前記熱交換容器 1 3 4 の外壁との間隔が所定の間隔を維持して離隔するように、前記熱交換容器 1 3 4 より大きく形成および配置され、

上部が開放し下部が閉鎖して、上部への冷却材の流通が可能になるように形成されることを特徴とする、請求項 4 に記載の自己診断事故対処無人原子炉。

【請求項 10】

前記熱交換容器外筒 135 は、

前記熱交換容器外筒 135 に充填された冷却材を放出して、前記熱交換容器外筒 135 がサイホン (siphon) の役割を果たすように、下部に熱交換容器外筒弁 135 v が設けられることを特徴とする、請求項 9 に記載の自己診断事故対処無人原子炉。

【請求項 11】

前記原子炉安全系は、

一側先端が前記第 1 空間 V 1 の下部と連通し、他側先端が前記冷却材注入管 112 と連通し、

前記第 1 空間 V 1 内の圧力を減圧するように、前記第 1 空間 V 1 内の蒸気を前記冷却材注入管 112 に流通させ、格納容器減圧弁 115 v が設けられる格納容器減圧管 115 をさらに含むことを特徴とする、請求項 4 に記載の自己診断事故対処無人原子炉。

10

【請求項 12】

前記原子炉駆動系は、

前記原子炉容器 152 に連結されて外部から冷却材の供給を受け、前記原子炉容器 152 内に冷却材を補充供給する冷却材補充管 156 をさらに含むことを特徴とする、請求項 4 に記載の自己診断事故対処無人原子炉。

【請求項 13】

前記原子炉駆動系は、

前記第 3 空間 V 3 内の冷却材を前記蒸気発生器 153 にさらに供給するように、前記 1 次熱交換器 131 の下部の流路上に設けられ、且つ前記熱交換容器 134 の内部に配置される第 1 循環弁 136 v 1 と、前記熱交換容器 134 の外部に配置される第 2 循環弁 136 v 2 とをさらに含むことを特徴とする、請求項 4 に記載の自己診断事故対処無人原子炉。

20

【請求項 14】

前記原子炉駆動系は、

前記原子炉容器 152 に設けられて前記原子炉容器 152 内の蒸気を前記第 1 空間 V 1 または前記格納容器貫通管 111 に排出させる原子炉容器安全弁 157 をさらに含むことを特徴とする、請求項 4 に記載の自己診断事故対処無人原子炉。

【請求項 15】

前記原子炉は、

前記第 1 格納容器 110 および前記第 2 格納容器 120 が水面下に配置されるように形成されることを特徴とする、請求項 4 に記載の自己診断事故対処無人原子炉。

30

【請求項 16】

請求項 4 に記載の原子炉を動作する方法であって、

前記原子炉駆動系が停止されるステップと、前記蒸気管 154 に設けられた蒸気管隔離弁 154 v および前記給水管 155 に設けられた給水管隔離弁 155 v が閉鎖するステップとを含む隔離ステップと、

前記原子炉駆動系内の冷却材が蒸発して生成された蒸気が前記 1 次熱交換器 131 に流入されるステップと、前記 1 次熱交換器 131 に流入された蒸気が前記 1 次熱交換器 131 を通過して凝縮し冷却材が生成され、生成された冷却材が前記原子炉容器 152 に再流入されて循環するステップとを含む 1 次熱交換器循環ステップと、

40

前記熱交換容器 134 内に収容された冷却材が前記 1 次熱交換器 131 に流入された蒸気と熱交換して加熱および沸騰するステップと、前記 1 次熱交換器 131 の周辺で冷却材が沸騰して生成された蒸気が前記熱交換容器 134 の上部に集まって飽和蒸気圧を有する空間を形成するステップと、飽和蒸気圧空間が前記 1 次熱交換器 131 および前記 2 次熱交換器 132 が配置された位置まで拡張するステップとを含む飽和蒸気圧空間形成ステップと、

前記冷却材噴射管 133 によって供給された冷却材が前記 1 次熱交換器 131 の外面に噴射されて接触するステップと、前記 1 次熱交換器 131 の外面に接触した冷却材が前記

50

1 次熱交換器 1 3 1 内の蒸気から熱を吸収して蒸発し、前記 1 次熱交換器 1 3 1 内の蒸気が凝縮して冷却材が生成されるステップと、前記 1 次熱交換器 1 3 1 の外面で蒸発して生成された蒸気が前記 2 次熱交換器 1 3 2 の外面に接触するステップと、前記 2 次熱交換器 1 3 2 の外面に接触した蒸気が前記 2 次熱交換器 1 3 2 内の冷却材に熱を放出して冷却材が凝縮し、前記 2 次熱交換器 1 3 2 内の冷却材が蒸発して蒸気が生成されるステップとを含む二相流動熱伝達ステップと、

前記 2 次熱交換器 1 3 2 内の蒸気が外部に放出されるかまたは外部の別の熱交換器に流入されるステップと、前記 2 次熱交換器 1 3 2 に外部冷却材が流入されるかまたは外部の別の熱交換器で凝縮して生成された冷却材が再流入されて循環されるステップとを含む残熱除去ステップとを含むことを特徴とする、自己診断事故対処無人原子炉の作動方法。

10

【請求項 1 7】

前記原子炉安全系は、

一側先端は前記第 2 空間 V 2 の下部と連通し、他側先端は前記蒸気発生器 1 5 3 と連通し、前記第 2 空間 V 2 の圧力が前記蒸気発生器 1 5 3 内の圧力より高いときに、前記第 2 空間 V 2 内の冷却材を前記蒸気発生器 1 5 3 に供給し、補助給水弁 1 1 6 v が設けられる補助給水管 1 1 6 をさらに含み、

前記原子炉の作動方法は、

前記第 2 空間 V 2 の圧力が前記蒸気発生器 1 5 3 内の圧力より高くなるステップと、前記補助給水弁 1 1 6 v が開放するステップと、前記第 2 空間 V 2 内の冷却材が前記蒸気発生器 1 5 3 に供給されるステップとを含む冷却材補助給水ステップをさらに含むことを特徴とする、請求項 1 6 に記載の自己診断事故対処無人原子炉の作動方法。

20

【請求項 1 8】

前記原子炉安全系は、

前記 1 次熱交換器 1 3 1 の上部に設けられ、前記熱交換容器 1 3 4 内の飽和蒸気圧を有する空間に蒸気を補助供給するように、前記補助給水弁 1 1 6 v の開放時に同時に開放して前記熱交換器容器 1 3 4 内に蒸気を供給する補助蒸気放出弁 1 3 1 v をさらに含み、

前記原子炉の作動方法は、

前記冷却材補助給水ステップによって前記蒸気発生器 1 5 3 に補助供給された冷却材が蒸発して蒸気が生成されるステップと、前記補助蒸気放出弁 1 3 1 v が開放して前記蒸気発生器 1 5 3 内の蒸気が前記熱交換容器 1 3 4 内に供給されて飽和蒸気圧を有する空間をさらに形成するステップとを含む飽和蒸気圧空間補助蒸気供給ステップをさらに含むことを特徴とする、請求項 1 7 に記載の自己診断事故対処無人原子炉の作動方法。

30

【請求項 1 9】

前記原子炉安全系は、

一側先端が前記原子炉駆動系内の前記蒸気発生器 1 5 3 から前記 1 次熱交換器 1 3 1 に冷却材を流入させる流路上に連結され、他側先端が前記格納容器貫通管 1 1 1 に連結されて、前記第 2 空間 V 2 内の圧力を加圧するように、前記蒸気発生器 1 5 3 内の蒸気を前記格納容器貫通管 1 1 1 を介して迂回させて前記第 2 空間 V 2 に流通させ、蒸気迂回弁 1 1 4 v が設けられる蒸気迂回管 1 1 4、前記原子炉容器 1 5 2 に設けられて、前記原子炉容器 1 5 2 内の蒸気を前記第 1 空間 V 1 または前記格納容器貫通管 1 1 1 に排出させる原子炉容器安全弁 1 5 7 から選択される少なくとも一つをさらに含み、

40

前記原子炉の作動方法は、

前記原子炉駆動系内で発生した蒸気が、前記格納容器貫通弁 1 1 1 v の開放、前記蒸気迂回弁 1 1 4 v の開放または前記原子炉容器安全弁 1 5 7 の開放から選択される少なくとも一つの動作により前記格納容器貫通管 1 1 1 に流入されるステップと、前記格納容器貫通管 1 1 1 を介して流入された蒸気による加圧によって前記第 2 空間 V 2 の冷却材が前記冷却材噴射管 1 3 3 に流入されるステップと、前記冷却材噴射弁 1 3 3 v が圧力によって開放し、冷却材が前記冷却材噴射管 1 3 3 を介して前記 1 次熱交換器 1 3 1 および前記 2 次熱交換器 1 3 2 に噴射されるステップとを含む冷却材加圧噴射ステップをさらに含むことを特徴とする、請求項 1 6 に記載の自己診断事故対処無人原子炉の作動方法。

50

【請求項 20】

前記原子炉安全系は、

一側先端は前記第 1 空間 V 1 の上部と連通し、他側先端は前記第 3 空間の上部と連通し、前記第 3 空間 V 3 内の圧力を加圧するように、前記第 1 空間 V 1 内の蒸気を前記第 3 空間 V 3 に流通させ、蒸気放出弁 1 1 3 v が設けられる蒸気放出管 1 1 3 をさらに含み、

前記原子炉の作動方法は、

前記二相流動熱伝達ステップによって前記 2 次熱交換器 1 3 2 の表面で凝縮して生成された冷却材が前記冷却材流通路 1 3 4 a を介して前記第 3 空間 V 3 に排出されて収容されるステップと、前記蒸気放出弁 1 1 3 v が開放して前記第 1 空間 V 1 内の蒸気の一部が前記第 3 空間 V 3 に流入されるかまたは前記第 3 空間 V 3 内の冷却材の水位が上昇して、前記第 1 空間 V 1 および前記第 3 空間 V 3 内の圧力がバランスを取るようになるステップと、前記冷却材注入弁 1 1 2 v が前記第 1 空間 V 1 と前記第 3 空間 V 3 との水頭差によって開放し、前記第 3 空間 V 3 に収容された冷却材が前記冷却材注入管 1 1 2 に流入されるステップと、前記冷却材注入管 1 1 2 を介して前記第 1 空間 V 1 に流入された冷却材が前記原子炉容器 1 5 2 に直接接触して冷却を行うステップとを含む冷却材直接冷却ステップをさらに含むことを特徴とする、請求項 16 に記載の自己診断事故対処無人原子炉の作動方法。

10

【請求項 21】

前記原子炉安全系は、

一側先端が前記第 1 空間 V 1 の下部と連通し、他側先端が前記冷却材注入管 1 1 2 と連通し、前記第 1 空間 V 1 内の圧力を減圧するように、前記第 1 空間 V 1 内の蒸気を前記冷却材注入管 1 1 2 に流通させ、格納容器減圧弁 1 1 5 v が設けられる格納容器減圧管 1 1 5 をさらに含み、

前記原子炉の作動方法は、

前記冷却材直接冷却ステップの後に、前記第 1 空間 V 1 に流入されて前記原子炉容器 1 5 2 に直接接触した冷却材が前記原子炉容器 1 5 2 から熱を吸収して蒸発し蒸気が発生するステップと、前記原子炉容器 1 5 2 から熱を吸収して発生した蒸気が前記第 1 空間 V 1 に充填されて前記第 1 空間 V 1 内の圧力が上昇するステップと、前記格納容器減圧弁 1 1 5 v が圧力によって開放し、第 1 空間 V 1 内の蒸気が前記格納容器減圧管 1 1 5 を介して前記冷却材注入管 1 1 2 に流入されるステップとを含む格納容器減圧ステップをさらに含むことを特徴とする、請求項 20 に記載の自己診断事故対処無人原子炉の作動方法。

20

30

【請求項 22】

前記原子炉安全系は、

前記熱交換容器外筒 1 3 5 が、前記熱交換容器 1 3 4 に相当する形状を有し、且つ前記熱交換容器外筒 1 3 5 の内壁と前記熱交換容器 1 3 4 の外壁との間隔が所定の間隔を維持して離隔するように前記熱交換容器 1 3 4 より大きく形成および配置され、上部が開放し下部が閉鎖して上部への冷却材の流通が可能になるように形成され、且つ前記熱交換容器外筒 1 3 5 に充填された冷却材を放出して前記熱交換容器外筒 1 3 5 がサイホン (siphon) の役割を果たすように、下部に熱交換容器外筒弁 1 3 5 v が設けられ、

前記原子炉の作動方法は、

前記冷却材直接冷却ステップによって、前記熱交換器容器外筒 1 3 5 に冷却材が充填されて水位が上昇するステップと、前記熱交換器容器外筒弁 1 3 5 c が開放するステップと、前記第 3 空間 V 3 と前記熱交換器容器外筒 1 3 5 との水位が同一になるまで、サイホン原理によって前記熱交換器容器外筒 1 3 5 に充填された冷却材が前記第 3 空間 V 3 に排出されるステップとを含む冷却材の水位調節ステップをさらに含むことを特徴とする、請求項 20 に記載の自己診断事故対処無人原子炉の作動方法。

40

【請求項 23】

前記原子炉駆動系は、

前記原子炉容器 1 5 2 に連結され外部から冷却材の供給を受けて前記原子炉容器 1 5 2 内に冷却材を補充供給する冷却材補充管 1 5 6 をさらに含み、

50

前記原子炉の作動方法は、

前記冷却材補充管 1 5 6 を介して外部から供給された冷却材が前記原子炉容器 1 5 2 内に補充されるステップを含む冷却材補充ステップをさらに含むことを特徴とする、請求項 1 6 に記載の自己診断事故対処無人原子炉の作動方法。

【請求項 2 4】

前記原子炉駆動系は、

前記第 3 空間 V 3 内の冷却材を前記蒸気発生器 1 5 3 にさらに供給するように、前記 1 次熱交換器 1 3 1 の下部の流路上に設けられ、且つ前記熱交換容器 1 3 4 の内部に配置される第 1 循環弁 1 3 6 v 1 と、前記熱交換容器 1 3 4 の外部に配置される第 2 循環弁 1 3 6 v 2 とをさらに含み、

10

前記原子炉の作動方法は、

前記第 1 循環弁 1 3 6 v 1 および前記第 2 循環弁 1 3 6 v 2 を介して前記第 3 空間 V 3 から供給された冷却材が前記蒸気発生器 1 5 3 に補充されるステップを含む冷却材蒸気発生器補充ステップをさらに含むことを特徴とする、請求項 1 6 に記載の自己診断事故対処無人原子炉の作動方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0 0 0 1】

本発明は、自己診断事故対処無人原子炉に関し、より詳細には、原子炉に異常が発生したときに、運転員が操作しなくても被動的に過剰に発生した熱を冷却することを可能とし、かかる安全措置のための冷却動作が、別の制御指示なく、原子炉の構造および圧力などの環境条件の変化に応じて完全に被動的に行われるようにし、さらに、既存の原子炉安全系に比べてより簡単な構造からなる冷却系を有する原子炉に関する。特に、ここで、かかる冷却系が、既存の熱交換器よりもはるかに迅速な熱交換を実現することができ、また、飽和蒸気圧を用いることで別の制御手段なく熱交換制御が被動的に容易に行われるようにする、自己診断事故対処無人原子炉に関する。

20

【背景技術】

【0 0 0 2】

原子力発電は、核分裂の際に発生するエネルギーを用いてタービンを回し電気エネルギーを生成する方式からなるものであり、図 1 は、一般的な原子力発電の原理を簡略に図示している。原子炉容器内の核燃料が核分裂するにつれて発生した夥しい熱エネルギーは、原子炉容器内の冷却材に伝達され、冷却材は、図 1 に濃い色の矢印で示されているように、原子炉容器から排出され、熱交換器を経てまた原子炉容器に流入される方向に循環する。冷却材が有している熱エネルギーは、熱交換器を通過して蒸気発生器に伝達され、蒸気発生器内の水は、熱エネルギーによって高温高压の蒸気に相変化を起こす。このように発生した高温高压の蒸気は、図 1 の淡い色の矢印で示されているように、タービンに供給され、この蒸気の力によってタービンが回転し、タービンと連結されている発電機とともに回転することで発電が行われる。タービンを回転することからエネルギーを消失した蒸気は、また相変化を起こし水になるが、この水は、図 1 の淡い色の矢印で示されているように、蒸気発生器に再流入されることでまた循環が行われる。

30

40

【0 0 0 3】

上述のように、原子炉では、夥しい熱エネルギーが発生し、原子炉で事故が発生して正常に作動しない場合、この熱エネルギーによって原子炉施設自体が破壊される大型事故が発生する恐れがある。そのため、原子炉には、原子炉の損傷が発生した場合、原子炉を急速に冷却するための様々な安全系が必須として設けられる。かかる安全系は、原子炉の各部に冷却材を補充供給する形および冷却材を適切な流路に沿って循環させて、原子炉の各部から熱を吸収し、最終には外部のヒートシンク (heat sink) に廃棄する形で行われる。この際、原子炉の各部と直接接触していた冷却材は、環境を汚染する放射能物質を含有しているため、この冷却材自体が直接外部に排出されてはならず、安全系は、単に熱のみを外部に廃棄するように構成されなければならない。このように原子炉安全系から外部の

50

ヒートシンクに熱を廃棄するための熱交換器を、原子炉技術分野では、通常、残熱除去用熱交換器と称することがある。

【0004】

既存の残熱除去用熱交換器は、簡略には、図2のような形を有する。図2に図示されているような既存の残熱除去用熱交換器は、高温流体が流れる流路1が内部に冷却材を収容するプール(pool)の形態からなり、ヒートシンクの役割をする水槽2内に設けられた形態からなり得る。かかる構成により、残熱除去用熱交換器は、流路1内を流れる高温流体から水槽2内の冷却材に熱が伝達され、結果として、高温流体の冷却が行われる。高温流体の熱が前記流路1の周辺の冷却材に伝達されるにあたり、対流による熱伝達が行われるか、また高温流体の温度が非常に高い場合には、前記流路1の周辺の冷却材が沸騰することで熱伝達が行われることがある。

10

【0005】

ところで、かかる残熱除去の際に、益々、より迅速で効率的な冷却が求められており、既存の残熱除去用熱交換器において、熱交換速度および効率をより改善すべきであると当業者らが求め続けてきた。また、既存の原子炉安全系の場合、ほとんどが制御指示を受けたときに作動が行われるため、運用において不都合と危険の要素があり、既存には原子炉の安全系構造自体が非常に複雑で多重になっており、設備構築、運用および制御が困難であるという問題があった。したがって、既存の安全系よりも冷却効率を向上させることができ、運転員が別に制御操作をする必要がなく、完全に被動的に作動することが可能であり、さらに既存の原子炉安全系に比べてより簡単な構造からなる、原子炉安全系に対する

20

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

したがって、本発明は、上述のような従来技術の問題を解決するために導き出されたものであり、本発明の目的は、原子炉に異常が発生したときに、運転員が操作しなくても被動的に過剰に発生した熱を冷却することを可能とし、かかる安全措置のための冷却動作が、別の制御指示なく、原子炉の構造および圧力などの環境条件の変化に応じて完全に被動的に行われるようにし、さらに既存の原子炉安全系に比べてより簡単な構造からなる、自己診断事故対処無人原子炉を提供することにある。本発明の他の目的は、二相流動熱伝達現象(two-phase heat transfer mechanism)を用いて熱交換が行われるようにし、かかる二相流動熱伝達による熱交換が効果的に行われるように、流路が三次元的に配置される最適化した構造を有する噴射式熱交換器を導入して熱交換能を極大化し、かつ飽和蒸気圧を用いることで別の制御手段なく熱交換制御が被動的に容易に行われるようにする、自己診断事故対処無人原子炉を提供することにある。

30

【課題を解決するための手段】

【0007】

上述のような目的を達成するための本発明の自己診断事故対処無人原子炉は、原子炉炉心を収容する原子炉容器、蒸気管および給水管が連結された蒸気発生器を含む原子炉駆動系と、原子炉駆動系を収容するエネルギー放出空間(Energy Release Space、ERS)、上側に形成された通路によって前記エネルギー放出空間と連通し冷却材を収容するエネルギー吸収空間(Energy Absorbing Space、EAS)、前記エネルギー放出空間および前記エネルギー吸収空間と隔離されるように形成され、前記原子炉駆動系と連結される残熱除去部および前記エネルギー吸収空間と連結される流路が設けられ、前記原子炉駆動系から放出される熱を冷却材に伝達し、冷却材に吸収された熱を外部に伝達して廃棄するエネルギー伝達空間(Energy Transfer Space、ETS)に分けられてなる原子炉安全系とを含み、前記原子炉駆動系内の圧力変化および冷却材が漏れたか否かに応じて変化する熱水力条件に応じて前記原子炉安全系内の冷却材が選択的に流通されて前記原子炉駆動系を冷却し、前記残熱除去部は、前記エネルギー吸収空間と連結される流路によって供給される冷却材を用いる二相流動熱伝達現象(two-phase heat transfer mechanism)により熱

40

50

伝達が行われる熱交換部と、内部に冷却材および前記熱交換部を収容し下部が開放して冷却材の流通が可能になるように形成される密閉容器部と、前記密閉容器部を囲むように設けられて冷却材が収容および流通される外筒部とを含み、前記熱交換部により沸騰して発生した冷却材蒸気によって前記密閉容器部内の前記熱交換部が配置された位置に飽和蒸気圧を有する空間が形成されるようになることができる。

【0008】

より具体的な実施例として、本発明の自己診断事故対処無人原子炉は、原子炉炉心151を収容する原子炉容器152と、蒸気管154および給水管155が連結された蒸気発生器153とを含む原子炉駆動系と、内部の第1空間V1に気体および前記原子炉駆動系を収容する第1格納容器110と、前記第1格納容器110と密接して配置され内部に水平隔壁125が設けられて、内部空間が下部の第2空間V2と上部の第3空間V3とに分けられるようになり、前記第2空間V2に冷却材を収容する第2格納容器120と、一側先端が前記第1空間V1に配置され、他側先端が前記第2空間V2と連通され、格納容器貫通弁111vが設けられる格納容器貫通管111と、一側先端が前記第3空間V3に配置され、他側先端が前記第1空間V1と連通され、冷却材注入弁112vが設けられる冷却材注入管112と、前記第3空間V3に設けられ、前記原子炉駆動系と連結されて前記原子炉駆動系から放出される熱を冷却材に伝達し、冷却材に吸収された熱を外部に伝達する残熱除去装置130とを含む原子炉安全系とを含み、前記原子炉駆動系内の圧力変化および冷却材が漏れたか否かに応じて変化する熱水力条件に応じて前記原子炉安全系内の冷却材が選択的に流通されて前記原子炉駆動系を冷却し、前記残熱除去装置130は、前記原子炉駆動系と連結され前記原子炉駆動系内の冷却材を流通させて熱を発散する1次熱交換器131と、前記1次熱交換器131と密接して配置されて残熱吸収用冷却材を流通させて熱を吸収する2次熱交換器132と、前記第2空間V2と連結されて供給される冷却材を前記1次熱交換器131に噴射する冷却材噴射管133と、内部に冷却材が収容される密閉容器の形状を有し、上部に前記1次熱交換器131および前記2次熱交換器132が収容配置され、下部に前記第2空間V2と連通されて冷却材が流通される冷却材流通路134aが形成される熱交換容器134と、前記冷却材流通路134aの下部先端が冷却材に浸される冷却材の水位を確保するように前記熱交換容器134を囲むように設けられ、冷却材が収容および流通される熱交換容器外筒135とを含み、前記1次熱交換器131により沸騰して発生した冷却材蒸気によって前記熱交換容器134内の前記1次熱交換器131および前記2次熱交換器132が配置された位置に飽和蒸気圧を有する空間が形成され、飽和蒸気圧を有する空間上に前記冷却材噴射管133によって供給される冷却材が、前記1次熱交換器131および前記2次熱交換器132に噴射されて二相流動熱伝達現象が発生するようになることができる。

【0009】

また、本発明の自己診断事故対処無人原子炉の作動方法は、上述のような原子炉を動作する方法であって、前記原子炉駆動系が停止されるステップと、前記蒸気管154に設けられた蒸気管隔離弁154vおよび前記給水管155に設けられた給水管隔離弁155vが閉鎖するステップとを含む隔離ステップと、前記原子炉駆動系内の冷却材が蒸発して生成された蒸気が前記1次熱交換器131に流入されるステップと、前記1次熱交換器131に流入された蒸気が前記1次熱交換器131を通過して凝縮し冷却材が生成され、生成された冷却材が前記原子炉容器152に再流入されて循環するステップとを含む1次熱交換器循環ステップと、前記熱交換容器134内に収容された冷却材が前記1次熱交換器131に流入された蒸気と熱交換して加熱および沸騰するステップと、前記1次熱交換器131の周辺で冷却材が沸騰して生成された蒸気が前記熱交換容器134の上部に集まって飽和蒸気圧を有する空間を形成するステップと、飽和蒸気圧空間が前記1次熱交換器131および前記2次熱交換器132が配置された位置まで拡張するステップとを含む飽和蒸気圧空間形成ステップと、前記冷却材噴射管133によって供給された冷却材が前記1次熱交換器131の外面に噴射されて接触するステップと、前記1次熱交換器131の外面に接触した冷却材が前記1次熱交換器131内の蒸気から熱を吸収して蒸発し、前記1次

熱交換器 1 3 1 内の蒸気が凝縮して冷却材が生成されるステップと、前記 1 次熱交換器 1 3 1 の外面で蒸発して生成された蒸気が前記 2 次熱交換器 1 3 2 の外面に接触するステップと、前記 2 次熱交換器 1 3 2 の外面に接触した蒸気が前記 2 次熱交換器 1 3 2 内の冷却材に熱を放出して冷却材が凝縮し、前記 2 次熱交換器 1 3 2 内の冷却材が蒸発して蒸気が生成されるステップとを含む二相流動熱伝達ステップと、前記 2 次熱交換器 1 3 2 内の蒸気が外部に放出されるかまたは外部の別の熱交換器に流入されるステップと、前記 2 次熱交換器 1 3 2 に外部冷却材が流入されるかまたは外部の別の熱交換器で凝縮して生成された冷却材が再流入されて循環されるステップとを含む残熱除去ステップとを含むことができる。

【発明の効果】

10

【0010】

本発明によると、既存の熱交換器に比べてはるかに迅速な熱交換を可能にするという大きな効果がある。より具体的に説明すると、本発明の三次元熱交換器は、既存の熱交換器が、単に対流および伝導といった基本的な熱伝達原理を用いて熱交換を行ったこととは異なり、二相流動熱伝達現象 (two-phase heat transfer mechanism) を用いて熱交換が行われるようにすることから、既存の熱交換器に比べてはるかに迅速な熱交換を実現することができる。

【0011】

また本発明によると、かかる二相流動熱伝達による熱交換がより効果的に行われるように、高温媒体が流通される流路／低温媒体が流通される流路／冷却材が噴射される流路が三次元的に密接して配置される構造にすることで、上述のような二相流動熱伝達の効率をより向上させるという大きな効果がある。すなわち、本発明は、単に二相流動熱伝達原理のみを用いて熱交換を行うだけでなく、これらの効率を向上させることができる三次元構造を熱交換器構造に導入することで、熱交換速度および熱交換効率を極大化するという大きな効果がある。

20

【0012】

特に、本発明によると、冷却材が充填され密閉された空間内に二相流動熱伝達を用いる熱交換器が配置されるようにすることで、熱交換器の作動時に発生する蒸気が迅速且つ効果的に凝縮されるようになる。したがって、かかる二相流動熱伝達の際に必ず発生する冷却材の蒸気圧によって熱交換空間およびこれと連結された空間内の圧力が過剰に増加することを防止できるという効果がある。さらに、かかる構造自体によって熱交換器の作動および停止と、冷却材の水位調節が自然に連動して行われることから、別の作動および停止のための制御などを行う必要がなく、運用上の有利性が極大化するという大きな効果もある。

30

【0013】

さらに、本発明の熱交換器は、既存の原子炉冷却のために使用された熱交換器に比べて熱交換速度および熱交換効率はるかに高いことから、本発明の熱交換器を原子炉の冷却に適用する場合、原子炉冷却効率をはるかに向上させることができるという効果がある。それだけでなく、上述のように熱交換器収容空間内の圧力の増加を防止するため、本発明の熱交換器を原子炉安全系に適用する場合、原子炉格納容器内の過剰な圧力上昇を抑制する効果も得ることができる。

40

【0014】

また本発明によると、安全系が完全被動式になることから原子炉損傷が発生した時に別の制御指示をすることなく迅速な冷却が行われるようにして事故危険性を最小化できるという効果がある。最も、本発明は、従来の被動式原子炉安全系とは全く異なる、熱水力的作動概念に基づく新たな構造を有しており、この新たな構造に基づいて様々な事故条件に応じて適した冷却動作を多様に行うことができる。特に、本発明の原子炉安全系構成は、既存の原子炉安全系構成と比較すると、著しく単純化した構造を有することから、これにより、既存に比べて原子炉を設計し構築するにあたり、困難性を著しく低減することができる、構築が完了した原子炉を運営するにあたり、容易性および便宜性が比にならないくら

50

いに向上するという大きな効果がある。これにより、設計、構築、運用、制御などにかかる時間、人力、費用などの資源を節約する効果も非常に大きいことは言うまでもない。

【0015】

また、本発明の原子炉安全系構成は、既存とは異なるだけでなく、従来の原子炉安全系とは異なり、二相流動熱伝達方式を用いて原子炉の高温エネルギーを迅速に吸収し、外部（海水などのヒートシンク）に廃棄するように構成されることで、冷却速度が著しく迅速になり、結果として、絶対的な冷却能力も大幅に向上する効果もある。さらに、ヒートシンクとして作用する冷却材に吸収された熱を外部、すなわち無限のヒートシンクに再度廃棄するように構成されることで、結果として、残熱除去時間を無限に拡張するという大きな効果がある。

10

【0016】

それだけでなく、冷却動作を行うにあたり、実質的に能動的な（すなわち、外部から運転員が制御指示を下したときに作動する）制御手段が全くなく、全般的な構造自体ははるかに単純化しており、従来に比べて製作および運用などにおいて便宜性ははるかに向上するという効果がある。能動的な制御や駆動に必要な別の動力源を必要としないという点で運用の際に不要なエネルギーの無駄を低減する経済的効果があることは言うまでもない。さらに、本発明は、上述のように、原子炉の形状が既存に比べて単純なだけでなく（既存に比べて冷却能力に優れるため）、従来の安全系を備える原子炉に比べてはるかに体積が小さい空間に設備が可能であり、これにより、原子炉の運営および建設経済性もはるかに向上できるという大きな効果がある。

20

【図面の簡単な説明】

【0017】

【図1】一般的な原子力発電原理を示す図である。

【図2】既存の残熱除去用熱交換器の構成を示す図である。

【図3】本発明の原子炉の構造概念を示す図である。

【図4】本発明の原子炉の作動原理を示す図である。

【図5】本発明の原子炉の二相流動熱伝達原理を示す図である。

【図6】本発明の原子炉の飽和蒸気圧空間形成の原理を示す図である。

【図7】本発明の原子炉の実施例を示す図である。

【図8】本発明の原子炉の作動方法を示す図である。

30

【発明を実施するための形態】

【0018】

以下、上述のような構成を有する本発明に係る自己診断事故対処無人原子炉について添付の図面を参照して詳細に説明する。

【0019】

1. 原子炉の概念的構造および作動原理

図3は本発明の原子炉の構造概念を図示し、また、図4は図3に図示されているような本発明の概念的な原子炉構造での作動原理を図示している。

【0020】

本発明の原子炉は、原子炉駆動系が事故などで停止したときに迅速且つ効果的に冷却を行うことができる原子炉安全系を有する。これにより、本発明の原子炉において原子炉駆動系はいかなる形態からなってもよく、具体的には、一般的に大型原子炉に使用される形態、すなわち、原子炉炉心を収容する原子炉容器と蒸気発生器とが別に離隔して設けられる形態の原子炉駆動系であってもよく、または小型原子炉に使用される形態、すなわち、原子炉容器内に蒸気発生器が収容されて一体型をなす原子炉駆動系であってもよい。前記原子炉駆動系がいかなる形態に形成されても（すなわち、大型原子炉用または小型原子炉用でも関係なく）、前記原子炉駆動系は、原子炉炉心を収容する原子炉容器、蒸気管および給水管が連結された蒸気発生器は基本的に含む。

40

【0021】

本発明の原子炉の安全系は、図3に図示されているように、エネルギー放出空間（Ener

50

gy Release Space、E R S）、エネルギー吸収空間（Energy Absorbing Space、E A S）、エネルギー伝達空間（Energy Transfer Space、E T S）の三つに大別される。エネルギー放出空間 E R S には原子炉駆動系が収容され、エネルギー吸収空間 E A S には冷却材が収容される。エネルギー吸収空間 E A S は、図示されているように、上側に形成された通路によって前記エネルギー放出空間 E R S と連通するように形成される。また、エネルギー伝達空間 E T S は、前記エネルギー放出空間 E R S および前記エネルギー吸収空間 E A S と隔離されるように形成されているが、その内部に前記原子炉駆動系と連結される残熱除去部および前記エネルギー吸収空間と連結される流通路が設けられており、前記原子炉駆動系から放出される熱を冷却材に伝達し、冷却材に吸収された熱を外部に伝達して廃棄するようになる。

10

【0022】

このように形成される本発明の原子炉安全系は、前記原子炉駆動系内の圧力変化および冷却材が漏れたか否かに応じて変化する熱水力条件に応じて前記原子炉安全系内の冷却材が選択的に流通されて前記原子炉駆動系を冷却するようになる。図4により、かかる本発明の概念的原子炉の構成での作動原理についてより具体的に説明する。

【0023】

図4の（A）は図3に図示されているような本発明の原子炉の概念的構成での普段の状態を図示したものであり、原子炉が正常に作動している時には原子炉をさらに冷却する必要がないため、図4の（A）の状態がそのまま維持される。すなわち、この場合、前記エネルギー吸収空間 E A S および前記エネルギー伝達空間 E T S での冷却材は移動していない状態である。

20

【0024】

図4の（B）は原子炉が事故などの発生によって停止し、過熱が放出し始める状態での冷却材の移動を図示した図である。まず、図4の（B）に図示されているように、原子炉駆動系の過熱によって前記エネルギー放出空間 E R S 内の圧力が高くなると（この際、前記エネルギー放出空間 E R S 内の空気だけで加圧が行われることもあり、または、原子炉駆動系で冷却材の漏れが発生し、漏れた冷却材が蒸発して生成された蒸気によってさらに加圧が行われることもある）、前記エネルギー放出空間 E R S の上側に形成された通路を介して前記エネルギー吸収空間 E A S 内の冷却材が圧力を受ける。これにより、矢印で示されているように、前記エネルギー吸収空間 E A S 内の冷却材が前記エネルギー伝達空間 E T S に供給される。

30

【0025】

一方、前記エネルギー伝達空間 E T S 内には、上述のように、残熱除去部および流通路が設けられている。前記残熱除去部は、図3に図示されているように、前記エネルギー吸収空間と連結される流通路によって供給される冷却材を用いる二相流動熱伝達現象（two-phase heat transfer mechanism）により熱伝達が行われる熱交換部と、内部に冷却材および前記熱交換部を収容し、下部が開放して冷却材の流通が可能になるように形成される密閉容器部とを含む。より具体的には、前記熱交換部は、前記原子炉駆動系と連結されて前記原子炉駆動系内を介して循環する冷却材が流通される第1熱交換器と、前記第1熱交換器と密接して配置されて前記第1熱交換器内に流通する冷却材から熱を吸収する第2

40

【0026】

この際、前記熱交換部により沸騰して発生した冷却材蒸気により、前記密閉容器部内の前記熱交換部が配置された位置に飽和蒸気圧を有する空間が形成される。より具体的には、前記第1熱交換器により沸騰して発生した冷却材蒸気によって前記密閉容器部内の前記熱交換部が配置された位置に飽和蒸気圧を有する空間が形成され、飽和蒸気圧を有する空間上で前記エネルギー吸収空間と連結される流通路によって供給される冷却材が、前記第1熱交換器および前記第2熱交換器に噴射されて二相流動熱伝達現象が発生することで、二相流動熱伝達現象による熱伝達がより効果的に行われることになる（二相流動熱伝達原理および飽和蒸気圧空間形成については、以降、より詳細に説明する。）。すなわち、図

50

4の(B)の場合、冷却材がエネルギー吸収空間E A Sからエネルギー伝達空間E T Sに移動して、原子炉駆動系の間接冷却を行うことになる。

【0027】

図4の(C)は過熱がさらに発生し、図4の(B)のような間接冷却だけでは十分な冷却が行われない状態での冷却材移動を図示した図である。図4の(B)に図示されているように、冷却材がエネルギー吸収空間E A Sからエネルギー伝達空間E T Sに移動して原子炉駆動系の冷却が行われる過程が継続すると、時間が経つにつれてエネルギー伝達空間E T S内の冷却材の水位は上昇し続け、エネルギー吸収空間E A S内の冷却材の水位は下降し続ける。この際、エネルギー伝達空間E T S内の冷却材の水位がある水準以上に上昇すると、エネルギー伝達空間E T S内に存在した冷却材が、図4の(C)に図示されているように、エネルギー放出空間E R Sに移動する。エネルギー放出空間E R Sに移動された冷却材は、原子炉駆動系と直接接触し、これにより、冷却材が原子炉駆動系から熱を直接吸収することになる。すなわち、図4の(C)の場合、冷却材がエネルギー伝達空間E T Sからエネルギー放出空間E R Sに移動して、原子炉駆動系の直接冷却を行うことになる。

10

【0028】

上述のように、図4の(B)、(C)いずれの場合において、窮極的には、原子炉駆動系から放出される熱が冷却材に伝達されることで原子炉駆動系の冷却が行われる。このように、本発明では、原子炉駆動系での圧力変化、冷却材が漏れたか否か、また、これに応じて変化する各空間での圧力変化、冷却材の水位などの熱水力条件に応じて、原子炉安全

20

【0029】

I I. 二相流動熱伝達の原理および飽和蒸気圧空間形成の原理

ここで、本発明の原子炉では、特に、二相流動熱伝達現象(two-phase heat transfer mechanism)を用いて熱伝達が行われるようにする。図5は本発明の原子炉において使用される二相流動熱伝達現状の原理を説明するための図である。

【0030】

既存のほとんどの熱交換器での基本的な熱交換原理は、外部と隔離した流路内に熱交換媒体が通過するように形成し、流路壁面を挟んで流路内部の熱交換媒体が流路外部の他の熱交換媒体とが直接互いに熱交換を行うことで、熱伝達を起こすものである。すなわち、例えば、流路の中に高温の冷却水が流れ、流路の外に低温の空気が流れるように形成され、高温の冷却水が有している熱を低温の空気が吸収するように構成される空冷式熱交換器の形態が最も広く使用される。または、他の例としては、壁を挟んで一方には高温のオイルが流れ、他方には低温の冷却水が流れるように形成され、高温のオイルが有している熱を低温の冷却水が吸収するように構成される異種熱交換器の形態も広く使用される。しかし、本発明での熱交換部は、これとは全く異なる原理にしたがって熱交換を行う。

30

【0031】

図5に図示されているように、二相流動熱伝達現象(two-phase heat transfer mechanism)を用いる本発明の熱交換部は、高温の熱交換媒体が流れる放出用チューブ(図5では左側のチューブ)、低温の熱交換媒体が流れる吸収用チューブ(図5では、右側のチューブ)、また、この二つのチューブに他の熱交換媒体(図5では、冷却水もしくは他の液体であってもよい)を噴射するノズルの三つを基本的に必要とする。

40

【0032】

放出用チューブ内には高温の熱交換媒体が流れており、吸収用チューブ内には低温の熱交換媒体が流れている。既存の熱交換器の場合には、かかる二つのチューブを密着させることで、チューブの壁面を介して高温側から低温側に熱が伝達されるようにしたが、二相流動熱伝達現象を用いる本発明の熱交換部では、そうすることなく、二つのチューブを適切な間隔で離隔して置く。

【0033】

ノズルは放出用チューブ側に設けられ、放出用チューブに冷却水を噴射する。冷却水が

50

噴射されその水滴が放出用チューブの外面に接近または接触すると、冷却水の水滴が放出用チューブ内の高温の熱交換媒体が有している熱を瞬間的に吸収し迅速に蒸発する。すなわち、放出用チューブの外面では冷却水の水滴によって急激に多量の蒸発熱が吸収されることで急冷される現象が生じ（Tube outside Quenching）、放出用チューブの内部では高温の熱交換媒体が冷却水の水滴の蒸発熱として自分が有していた熱を奪われて放出し冷却されて凝縮する現象が生じる（Tube inside Condensation）。

【0034】

上述のように、放出用チューブの周辺で冷却水はすべて蒸発し蒸気状態になるが、この蒸気は、放出用チューブと離隔して配置されている吸収用チューブと接触することになる。この際、吸収用チューブには、低温の熱交換媒体が流れているため、蒸気が吸収用チューブの外面に接近または接触すると、蒸気は吸収用チューブ内の低温の熱交換媒体に瞬間的に熱を奪われて凝縮することで吸収用チューブの外面に露が結ぶ。すなわち、吸収用チューブの外面では、蒸気が低温の熱交換媒体に熱を奪われて凝縮することで凝縮水になり、チューブの外面に露が結ぶか流れ落ちる現象が生じ（Tube outside Condensing）、吸収用チューブの内部では低温の熱交換媒体が蒸気から熱を吸収することで蒸発する現象が生じる（Tube inside Evaporation）。

【0035】

このように、二相流動熱伝達現象では、放出用チューブおよび吸収用チューブが互いに離隔しており、且つノズルから噴射される別の熱交換媒体（図5の例示では冷却水）が、ノズルから液体状に噴射されて放出用チューブの周辺で蒸発して気体状態になった後、吸収用チューブの周辺で凝縮してまた液体状態に戻る方式に、熱交換媒体が、気相 - 液相の二つの相（two - phase）に変化しながら熱伝達を行う。かかる二相流動熱伝達方式は、既存の熱伝達方式に比べてはるかに迅速で効果的に熱伝達が行われるようにするという研究が最近発表されている。

【0036】

本発明は、まさにこのような二相流動熱伝達方式を用いて冷却材の熱吸収が行われるようにすることで、既存の原子炉安全系に比べてはるかに迅速で効果的な冷却を実現することができる。

【0037】

図6は本発明の原子炉の飽和蒸気圧空間形成の原理を図示している。図6では、図3に図示されている残熱除去部をより概略的に図示している。本発明の残熱除去部に設けられる熱交換部は、図2に図示されている既存の残熱除去用熱交換器と比較すると、第一に、高温流体が流通される流路（図6では第1熱交換器）の他に低温流体が流通される流路（図6では第2熱交換器）および流通路がさらに設けられるという点、また、第二に、高温流体が流通される流路をその内部に収容する冷却材収容構造が変わるという点において異なる。

【0038】

基本的には、本発明の噴射式熱交換器は、最初には、図6の（A）に図示されているような状態で運用され得る。図6の（A）状態は、図5の（A）状態に相当し、この状態で第1熱交換器に高温流体が流通されると、一旦、図2に図示されている既存の残熱除去用熱交換器と同様、高温流体が流通される第1熱交換器の周辺の冷却材に熱が伝達されて冷却材が沸騰することで高温流体の冷却が行われる。

【0039】

一方、既存の残熱除去用熱交換器の場合には、図2に図示されているように冷却材が収容された水槽が単純に上部が開放された筐体状になるため、高温流体が流通される流路周辺で冷却材が沸騰する場合、気泡は上昇して大気中に拡散する。ところで、本発明の場合、この冷却材収容構造が既存とは異なるが、具体的には、本発明の冷却材収容構造は、密閉容器部と水槽からなり、高温流体が流通される第1熱交換器が収容される密閉容器部は、下部が開放し、上部が閉鎖した形態に形成され、密閉容器部の下部に上部が開放した筐体状の水槽が設けられる。すなわち、既存の残熱除去用熱交換器の水槽に密閉容器部がさ

らに設けられる形態であってもよい。この際、図示されているように、密閉容器部には、最初の状態では内部に空間がなく液体状の冷却材がいっぱい充填されているようにする。

【0040】

かかる状態で第1熱交換器の周辺の冷却材が沸騰すると、（既存には気泡が開放している上側に上昇して大気中に散布し消失するだけであったが）本発明では密閉容器部の上部が閉鎖しているため気泡が消失されず密閉容器部の上部に集まる。蒸気の生成が継続すると、結局、図6の（B）のように密閉容器部の上部には飽和蒸気圧を有する蒸気で充填される空間が形成される（付け加えると、図6の（B）状態は図5の（B）状態に相当する）。液体状態の冷却材は、飽和蒸気圧空間が形成されただけ押され、すなわち、図6の（B）の淡い色の矢印で示されているように、密閉容器部内の水位は下がり、密閉容器部 - 水槽間の水位は上がることになる。

10

【0041】

このように冷却材が蒸発して形成された蒸気が飽和蒸気圧を有していっぱいになった空間に高温流体が流通される第1熱交換器、低温流体が流通される第2熱交換器、冷却材を噴射する流通路が収容されている状態で、二相流動熱伝達現象（two-phase heat transfer mechanism）によって第1熱交換器内の高温流体から第2熱交換器内の低温流体への熱伝達が行われ得る。

【0042】

二相流動熱伝達現状の原理について説明した図5と対比すると、図6での第1熱交換器（高温流体流通）が図5での放出用チューブに相当し、図6での第2熱交換器（低温流体流通）が図5での吸収用チューブに相当し、図6での流通路が図5でのノズルに相当する。すなわち、図6のような構造では上述のような二相流動熱伝達の原理による高温流体から低温流体への熱伝達がスムーズに行われ得る。

20

【0043】

二相流動熱伝達は、上述のように冷却材の蒸発熱および凝縮熱を用いて熱伝達が生じるようにするため、一般的な流体での熱伝達、すなわち対流熱伝達に比べて効率が著しく高い。すなわち、かかる二相流動熱伝達方式は、既存の熱伝達方式に比べてはるかに迅速で効果的に熱伝達を実現することができる。

【0044】

一方、上述のように本発明の熱交換器で使用する二相流動熱伝達では、流通路（図5でのノズルに相当）から噴射された冷却材が第1熱交換器（図5での放出用チューブに相当）の周辺で蒸発し、第2熱交換器（図5での吸収用チューブに相当）の周辺で凝縮する現象を用いて熱伝達が行われ、そのため、第1熱交換器および第2熱交換器の周辺に冷却材蒸気ができるだけ多いほど有利である。逆に言えば、第1熱交換器および第2熱交換器の周囲に空気のような非凝縮気体の割合が高いほど二相流動熱伝達効率が低下する。

30

【0045】

しかし、図6に図示されているような本発明の熱交換器では、本来気体が充填された空間がなかった状態（図6の（A）状態）で冷却材の沸騰によって気体、すなわち冷却材蒸気が充填された空間ができ、したがって、この空間は冷却材蒸気が飽和蒸気圧を形成し充填される空間になる。換言すれば、図6の（B）状態で、密閉容器部内液体状態の冷却材の水位の上側空間に位置する第1熱交換器および第2熱交換器の周辺は、非凝縮気体の割合が最小化した状態になり、これにより、図6の（B）状態で二相流動熱伝達効率は最大化する。

40

【0046】

すなわち、まとめると、本発明では、

■最初には、図6の（A）のような状態、すなわち、高温流体が流通される第1熱交換器が冷却材に完全に浸った状態であり、このときには、冷却材の沸騰による高温流体の冷却が行われる（既存の残熱除去用熱交換器と類似）。

【0047】

■冷却材の沸騰が継続すると、冷却材蒸気が密閉容器部の上部空間に充填され、図6の

50

(B)のように飽和蒸気圧を有する冷却材蒸気で充填された空間が形成される。このときには、冷却材蒸気で充填された空間では第1熱交換器 - 第2熱交換器の間に二相流動熱伝達によって高温流体の冷却が行われる。また、第1熱交換器の下側一部は液体状態の冷却材に浸っていてもよく、ここでは、図6の(A)と同じ原理で冷却材の沸騰による高温流体の冷却が行われる。

【0048】

すなわち、高温流体の冷却のために単純に冷却材の沸騰のみを用いた既存の残熱除去用熱交換器とは異なり、本発明では、液体状態の冷却材に浸されている部分では冷却材の沸騰を依然として用いており、蒸気に露出している部分では、二相流動熱伝達を用いて冷却を行うことから、既存に比べてはるかに向上した冷却効率および速度を実現することができる。それだけでなく、本発明の残熱除去部の構造的な特性上、二相流動熱伝達が起こる空間には冷却材蒸気が飽和した状態で充填されることから、二相流動熱伝達が起こる空間に非凝縮気体(空気など)が混合しており、熱伝達効率が低下するという悪影響の原因が根本的に除去され、結果として、二相流動熱伝達効率が最大値まで極大化することができる。

10

【0049】

I I I . 原子炉の具体的構造および作動方法

先に図3および図4により本発明の原子炉の概念的な構成および原理について説明しており(I. 項目参照)、図5および図6により本発明の原子炉で使用する主要原理である二相流動熱伝達原理および飽和蒸気圧空間形成の原理について説明した(I I . 項目参照)。以下では、本発明の原子炉についてより具体的で詳細な実施例として説明する。図7は本発明の原子炉の実施例として、図7の実施例において本発明の原子炉は、また原子炉駆動系および原子炉安全系からなる。

20

【0050】

[原子炉駆動系]

原子炉駆動系は、原子炉炉心151を収容する原子炉容器152と、蒸気管154および給水管155が連結された蒸気発生器153を含むが、上述のように、原子炉容器内に蒸気発生器が設けられる一体型形態であってもよく、または原子炉容器の外に蒸気発生器が設けられる形態であってもよいなど、原子炉駆動系は、図示されているものに限定されず、他のある形態からなってもよい。原子炉駆動系の各部の動作についてより詳細に説明すると以下のとおりである。

30

【0051】

前記原子炉炉心151は、原子炉の中心部であり、核燃料の原子核が中性子と結合し二つに分離される核分裂を起こし熱エネルギーが発生する部分である。すなわち、一般的に前記原子炉炉心151とは、原子炉の核燃料である燃料棒の束を称する。また、一般的に前記原子炉炉心151には原子炉出力制御棒が設けられるが、原子炉出力制御棒は、前記原子炉炉心151に上下移動自在に挿入して設けられ、その挿入程度に応じて核燃料の核分裂程度を調節することで、結果としては前記原子炉100の出力自体を制御する役割をする。

【0052】

前記原子炉容器152は、外部と密閉されるように形成されて前記原子炉炉心151を収容する。上述のように、原子炉出力制御棒は、上下移動が可能になるように制御される必要があるため、一般的に上端部の一部が前記原子炉容器152の外部に露出するように設けられ、かかる観点で前記原子炉炉心151は自然に前記原子炉容器152の下側に配置される。この際、前記原子炉容器152内には冷却材が収容され、前記原子炉炉心151で発生する熱エネルギーが冷却材に吸収されるようにする。冷却材は、前記原子炉炉心151から発生する熱エネルギーを吸収することで前記原子炉炉心151を冷却する役割をするだけでなく、冷却材が吸収した熱を外部に伝達することで窮極的に発電が行われるようにする冷却材の役割をする(これについては、以下、蒸気発生器153の部分でより詳細に説明する)。冷却材としては、一般的に、冷却水、すなわち水が使用され、以下、

40

50

より詳細に説明されるが、原子炉安全系が作動する時に普段閉鎖した状態に形成される循環流路が開放するなど、各部に流通される熱交換媒体が混ざることがあり、原子炉の各部のいずれに使用される熱交換媒体または冷却材はいずれも冷却水に一貫して使用されることが一般的である。

【0053】

前記蒸気発生器153は、熱交換器の形態に形成されて前記原子炉容器152の内部に設けられる。前記蒸気発生器153の内部には熱交換媒体として作動する冷却材が流通され、前記蒸気発生器153周辺の前記原子炉容器152内の冷却材から熱の伝達を受ける。これにより、前記蒸気発生器153の内部に流通される冷却材は、熱を吸収して蒸発が起こり、このように高温高圧の気体状態になった冷却材は、蒸気管154に排出されてタービンを作動させる。タービンを作動させた後、凝縮された冷却材はまた給水管155を介して前記蒸気発生器153に供給されることで循環が行われる。前記蒸気管154および前記給水管155には、それぞれ蒸気管隔離弁154vおよび給水管隔離弁155vが設けられ、非常事態に外部との遮断が行われるようにする。

10

【0054】

このように正常な作動が行われている際、前記原子炉容器152の内部の冷却材は、自然に循環対流を行う。より具体的には、次のとおりである。前記原子炉炉心151から発生した熱エネルギーが冷却材に吸収されると、高温になった冷却材は上昇する。前記原子炉炉心151の上側に配置された前記蒸気発生器153に高温の冷却材が到達すると、前記蒸気発生器153内の冷却材と高温の冷却材が熱交換を起こす。すなわち、前記蒸気発生器153内の冷却材が高温の冷却材から熱を吸収するものである。したがって、高温の冷却材は、前記蒸気発生器153を通過して温度が下がり、そのため下降が行われる。このように下降した冷却材はまた前記原子炉炉心151から発生した熱エネルギーを吸収することになり、したがって、自然的な循環対流が形成される。

20

【0055】

上述の原子炉の駆動系は、既存の大型または小型（一体型）原子炉にも共通して設けられる事項である。上述のように構成された駆動系が作動することで原子炉で電力を生成することになり、正常作動時にはかかる駆動系だけでも作動に問題がない。しかし、前記原子炉容器152に損傷が発生して前記原子炉容器152内の冷却材が漏れると、前記原子炉炉心151で発生した熱エネルギーを十分な量の冷却材で吸収することができず、そのため、前記原子炉炉心151の周辺の温度が過剰に上昇して部品が溶けるなど、より大きい損傷が発生する恐れがある。原子炉の場合、放射能漏れなど環境に及ぼす影響が非常に大きいため安全性が何よりも重要であり、そのため、前記原子炉容器152に損傷が発生して冷却材の漏れが生じた時に、前記原子炉容器152などを迅速に冷却する安全系を必ず備える必要がある。

30

【0056】

この際、上述のように、かかる安全系が人間の操作などの別の制御指示を受けたときに作動する場合、原子炉の運転者が席をはずすかまたは自分が傷害を受けるなどの問題によって事故が発生した時に適時に制御指示を下すことができなかった場合、事故危険性がおびただしく拡散する。また、電子制御などの自動制御動作が行われるシステムの場合にも、原子炉損傷によって発生する高熱によってシステム損傷が発生するため、正しく動作することができない恐れがある。したがって、原子炉損傷および冷却材漏れが発生した時にそれ自体の物理的環境変化に応じて機械的に動作が行われる被動式安全系が設けられることが必ず必要となる。従来にもかかる被動式安全系に対する研究が多く行われてきたことは言うまでもない。ところで、従来の被動式安全系の場合、以下のような問題が残っているのが事実である。

40

【0057】

先ず、従来の被動式安全系は体積が相当大きいため、建設上または経済的制約が相当高く、これを解消するための設計を行うために相当な時間、人力などの資源が消費された。特に、最近、その需要が徐々に拡大している小型原子炉の場合には、従来の被動式安全系

50

を適用する場合、十分な冷却効率が得られず、設計の困難性が上昇する問題があった。さらに、これによって実際原子炉を建設する過程で空間、材料、費用などの資源がさらに無駄になることは言うまでもなく、建設された原子炉を運用する間にもメンテナンスなどに時間、人力、費用などの資源がさらに無駄になるしかなかった。

【0058】

本発明では、かかる問題を解消するために、一つのシステムとして様々な原子炉事故発生状況に適切に対処できるようにするだけでなく、安全系（すなわち、原子炉を冷却するための装置）が完全被動式になり、運転員の別の制御指示を全く必要としないことから、原子炉損傷が発生した時に迅速な冷却が行われるようにする。特に、本発明の原子炉は、既存とは異なり、二相流動熱伝達方式を主に用いて冷却を行い、また、事故が発生した時に様々な空間に分けられた格納容器内で冷却材が適切に移動される過程で冷却が行われるようにすることで、既存に比べてはるかに迅速且つ効果的な冷却を行うことができる。それだけでなく、本発明の構成は、既存の被動式安全系に比べてはるかに構成が単純であり、結果として、原子炉の体積を大幅に低減することができ、したがって、最近その需要が徐々に拡大しつつある小型原子炉に適用するにも非常に好適である。

10

【0059】

[原子炉安全系]

図7の実施例において前記原子炉安全系は、最も大きくは第1格納容器110および第2格納容器120からなり、これに冷却材の移動のために格納容器貫通管111、冷却材注入管112などが設けられ、残熱除去のための残熱除去装置130が設けられる。

20

【0060】

前記第1格納容器110は、内部の第1空間V1に気体および前記原子炉駆動系を収容する。すなわち、前記第1格納容器110内の空間、すなわち、前記第1空間V1は、上述の本発明の原子炉の概念的構造（図3、I. 項目参照）でのエネルギー放出空間ERSに相当する。

【0061】

前記第2格納容器120は、前記第1格納容器110と密接して配置され、内部に水平隔壁125が設けられて内部空間が下部の第2空間V2と上部の第3空間V3とに分けられてなり、前記第2空間V2に冷却材を収容する。この際、前記第2格納容器120の下部の第2空間V2は、上述の本発明の原子炉の概念的構造（図3、I. 項目参照）でのエネルギー吸収空間EASに相当する。また、前記第2格納容器120の上部の第3空間V3は、上述の本発明の原子炉の概念的構造（図3、I. 項目参照）でのエネルギー伝達空間ETSに相当する。

30

【0062】

このように前記原子炉安全系を構成する前記第1格納容器110および前記第2格納容器120は、内部にエネルギー放出空間ERS、エネルギー吸収空間EAS、エネルギー伝達空間ETSを形成して、前記原子炉駆動系内の圧力変化および冷却材が漏れたか否かに応じて変化する熱水力条件に応じて前記原子炉安全系内の冷却材が選択的に流通されて前記原子炉駆動系を冷却することになる。この際、前記原子炉安全系内の冷却材が各空間にスムーズに流通されるように様々な通路が設けられるが、最も基本的には格納容器貫通管111、冷却材注入管112が設けられる。

40

【0063】

前記格納容器貫通管111は、一側先端は前記第1空間V1に配置され、他側先端は前記第2空間V2と連通され、格納容器貫通弁111vが設けられる。前記格納容器貫通管111は、上述の本発明の原子炉の概念的構造（図3、I. 項目参照）での通路に相当する。一方、前記冷却材注入管112は、一側先端は前記第3空間V3に配置され、他側先端は前記第1空間V1と連通され、冷却材注入弁112vが設けられる。

【0064】

前記格納容器貫通管111により、前記第1空間V1 - 前記第2空間V2の間の冷却材または蒸気の移動が、前記冷却材注入管112によって前記第3空間V3 - 前記第1空間

50

V 1 の間の冷却材または蒸気の移動が行われる（一方、以降、より詳細に説明するが、前記第 2 空間 V 2 - 前記第 3 空間 V 3 の間の冷却材の移動は、冷却材噴射管 1 3 3 によって行われる。）。このときの冷却材または蒸気の移動は、前記第 1、2、3 空間 V 1、V 2、V 3 内の冷却材の状態（液相／気相）、圧力差、水頭差などによって別の制御装置の能動的な動作を全く必要とせず自然に行われるようになる。すなわち、前記原子炉駆動系内の圧力変化および冷却材が漏れたか否かに応じて変化する熱水力条件に応じて前記原子炉安全系内の冷却材が選択的に流通されて前記原子炉駆動系を冷却する動作が自然に実現する。

【0065】

前記残熱除去装置 1 3 0 は、前記第 3 空間 V 3 に設けられ、前記原子炉駆動系と連結されて前記原子炉駆動系から放出される熱を冷却材に伝達し、冷却材に吸収された熱を外部に伝達する。前記残熱除去装置 1 3 0 の構成についてより具体的に説明すると、前記残熱除去装置 1 3 0 は、1 次熱交換器 1 3 1 と、2 次熱交換器 1 3 2 と、冷却材噴射管 1 3 3 と、冷却材流通路 1 3 4 a を備える熱交換容器 1 3 4 と、熱交換容器外筒 1 3 5 とを含む。

10

【0066】

前記 1 次熱交換器 1 3 1 は、前記原子炉駆動系と連結されて前記原子炉駆動系内の冷却材を流通させて熱を発散する。この際、前記 1 次熱交換器 1 3 1 は、上述の本発明の原子炉の概念的構造（図 3、4、I．項目参照）および本発明の主要原理（図 5、6、I I．項目参照）での第 1 熱交換器または放出用チューブに相当する。

20

【0067】

前記 2 次熱交換器 1 3 2 は、前記 1 次熱交換器 1 3 1 と密接して配置されて残熱吸収用冷却材を流通させて熱を吸収する。この際、前記 2 次熱交換器 1 3 2 は、上述の本発明の原子炉の概念的構造（図 3、4、I．項目参照）および本発明の主要原理（図 5、6、I I．項目参照）での第 2 熱交換器または吸収用チューブに相当する。

【0068】

前記冷却材噴射管 1 3 3 は、前記第 2 空間 V 2 と連結されて供給される冷却材を前記 1 次熱交換器 1 3 1 で噴射する。この際、前記冷却材噴射管 1 3 3 は、上述の本発明の原子炉の概念的構造（図 3、4、I．項目参照）および本発明の主要原理（図 5、6、I I．項目参照）での流通路またはノズルに相当する。

30

【0069】

前記熱交換容器 1 3 4 は、内部に冷却材が収容される密閉容器の形状を有し、上部に前記 1 次熱交換器 1 3 1 および前記 2 次熱交換器 1 3 2 が収容配置され、下部に前記第 2 空間 V 2 と連通し冷却材が流通される冷却材流通路 1 3 4 a が形成されてなる。この際、前記冷却材噴射管 1 3 3 は、上述の本発明の原子炉の概念的構造（図 3、4、I．項目参照）および本発明の主要原理（図 6、I I．項目参照）での密閉容器部に相当する。

【0070】

前記熱交換容器外筒 1 3 5 は、前記冷却材流通路 1 3 4 a の下部先端が冷却材に浸される冷却材の水位を確保するように前記熱交換容器 1 3 4 を囲むように設けられて冷却材が収容および流通されるようになる。この際、前記熱交換容器外筒 1 3 5 は、上述の本発明の主要原理（図 6、I I．項目参照）での水槽に相当する。ただし、図 6 に現われた水槽の場合、単に冷却材を収容している役割を果たすだけであるが、前記熱交換容器外筒 1 3 5 の場合、その形状的特徴によって冷却材の水位調節がさらにスムーズに行われるようにする効果がある。

40

【0071】

前記熱交換容器外筒 1 3 5 の構造についてより詳細に説明すると、以下のとおりである。前記熱交換容器外筒 1 3 5 は、基本的に前記熱交換容器 1 3 4 に相当する形状からなり、前記熱交換容器 1 3 4 を囲むように形成される。より具体的には、前記熱交換容器外筒 1 3 5 は、前記熱交換容器外筒 1 3 5 の内壁と前記熱交換容器 1 3 4 の外壁との間隔が所定の間隔を維持して離隔するように、前記熱交換容器 1 3 4 より大きく形成および配置さ

50

れる。また、前記熱交換容器外筒 135 は、上部が開放し、下部が閉鎖して上部に冷却材の流通が可能になるように形成される。

【0072】

このように前記熱交換容器外筒 135 が前記熱交換容器 134 を囲んでいることで、前記熱交換容器 134 から排出された冷却材は、前記熱交換容器 134 の外壁と前記熱交換容器外筒 135 の内壁との間の空間に最初に充填されることになる。この際、前記熱交換容器外筒 135 の下部は閉鎖しているため、この空間に充填された冷却材の水位が前記熱交換容器外筒 135 の開放した上部まで高くなるまでには、冷却材はこの空間から離脱することができない。すなわち、前記熱交換容器 134 内で飽和蒸気圧空間が形成されるにつれて前記熱交換容器 134 から排出された冷却材は、前記熱交換容器 134 の外壁 - 前記熱交換容器外筒 135 の内壁の間の空間にそのまま充填されることで、前記熱交換容器 134 内の冷却材の水位との水頭差があまり大きくならないように形成されることができ、適切な冷却材の水位を確保することができる。

10

【0073】

前記熱交換容器外筒 135 が設けられていない場合、前記熱交換容器 134 から排出された冷却材は、前記第 3 空間 V3 内に広がることになり、したがって、冷却材の水位があまり高く形成されない。前記熱交換容器 134 の下部に前記第 3 空間 V3 内の空間を一部区画するように垂直隔壁などの構造物を立ててもよいが、それでも前記第 3 空間 V3 の体積を考慮すると、前記熱交換容器 134 から排出された冷却材の絶対量自体が相当足りないため、前記第 3 空間 V3 に流れ出た冷却材の水位と前記熱交換容器 134 内の冷却材の水位との水頭差が相当大きく形成されることが明らかである。ところで、このように水頭差の大きい空間が互いに連通されている場合、かかる水頭差が維持されるためには、各空間同士の圧力差が非常に大きくなる必要がある。すなわち、このように水頭差が大きい環境では、前記熱交換容器 134 内で飽和蒸気圧空間が形成されて形成される圧力により冷却材が排出される過程がスムーズに行われなことがあり得る。

20

【0074】

しかし、前記熱交換容器外筒 135 が設けられる場合、前記熱交換容器 134 から排出された冷却材が前記熱交換容器 134 - 前記熱交換容器外筒 135 の間の空間に優先して充填され、この空間はそれ自体の体積があまり大きくないため（冷却材が前記第 3 空間 V3 に排出される場合と比較すると、相対的に）はるかに少ない量の冷却材でもはるかに高い水位を簡単に達成することができる。すなわち、前記熱交換容器 134 内の冷却材の水位および前記熱交換容器 134 - 前記熱交換容器外筒 135 の間の空間内冷却材の水位は、相対的にさらに少ない水頭差を有してバランスを取ることができる。したがって、前記熱交換容器 134 内で飽和蒸気圧空間の形成および冷却材の排出がより安定して且つスムーズに行われることができる。

30

【0075】

すなわち、上述の本発明の原子炉の概念的構造（図 3、4、I. 項目参照）および本発明の主要原理（図 5、6、II. 項目参照）で説明したように、本発明の原子炉では、

■前記 1 次熱交換器 131 により沸騰して発生した冷却材蒸気によって前記熱交換容器 134 内の前記 1 次熱交換器 131 および前記 2 次熱交換器 132 が配置された位置に飽和蒸気圧を有する空間が形成され、

40

【0076】

■飽和蒸気圧を有する空間上で前記冷却材噴射管 133 によって供給される冷却材が前記 1 次熱交換器 131 および前記 2 次熱交換器 132 に噴射されて二相流動熱伝達現象が発生するようになる。

【0077】

これにより、上述のように、二相流動熱伝達原理によって既存の原子炉安全系に比べてはるかに迅速で効果的な冷却を実現できるだけでなく、かかる二相流動熱伝達現象が常に飽和蒸気圧空間で行われるようにすることで、二相流動熱伝達効率を最大値まで極大化することができる。

50

【0078】

[原子炉安全系作動方法]

上述のような構成を有する、図7に図示されているような実施例による本発明の原子炉の作動方法についてステップ別に具体的に説明する。図8は図7の実施例による本発明の原子炉の作動方法についてステップ別に図示した図である。

【0079】

図8の(A)は原子炉が正常に作動している時の状態である。すなわち、原子炉駆動系で過熱が発生しないため、原子炉炉心151から発生する熱は、いずれも給水管155に供給されてきた蒸気発生器153内の冷却材を蒸発させるために使用される。また、蒸気発生器153内の蒸気は、いずれも蒸気管154を介して排出され、外部の発電機を回転させて電力を発生させるために使用される。この場合には、原子炉安全系は作動せず、初期の状態を維持しているが、本発明の原子炉安全系での初期状態は、前記第3空間V3に冷却材が充填されており、また、前記残熱除去部130のうち前記熱交換容器134に冷却材が空間なしにいっぱい充填されている状態である。

10

【0080】

原子炉安全系の作動が開始されるということは、すなわち、原子炉駆動系を意図的に停止したか、または事故などによって原子炉駆動系が非正常動作をするようになったことを意味する。すなわち、原子炉安全系の作動が開始する前には、常に、前記原子炉駆動系が停止されるステップと、前記蒸気管154に設けられた蒸気管隔離弁154vおよび前記給水管155に設けられた給水管隔離弁155vが閉鎖するステップとを含む隔離ステップが前提として行われる。

20

【0081】

上述のように原子炉の異常作動が発生した時に原子炉炉心151では過熱が発生し、前記蒸気発生器153と外部装置(電力発生装置)との隔離が行われると、前記蒸気発生器153および原子炉容器152内の冷却材が急激に蒸発する。また、原子炉容器152の損傷が発生して冷却材が漏れた場合、前記第1空間V1内に漏れた冷却材も急激に蒸発して多量の蒸気が発生する。このように発生した蒸気が誘発した原子炉駆動系内の圧力変化によって、前記原子炉安全系内の冷却材の移動が開始する。図8の(B)は、上述のように原子炉駆動系内の圧力変化に応じて原子炉安全系内の冷却材が移動されることで原子炉の冷却が行われている状態を図示した図である。図8の(B)に示されているような状態で原子炉安全系の作動は、1次熱交換器循環ステップと、飽和蒸気圧空間形成ステップと、二相流動熱伝達ステップと、残熱除去ステップとを含む。

30

【0082】

1次熱交換器循環ステップは、以下のような手順で行われる。まず、前記原子炉駆動系内の冷却材が蒸発して生成された蒸気が前記1次熱交換器131に流入される。次に、前記1次熱交換器131に流入された蒸気が前記1次熱交換器131を通過して凝縮して冷却材が生成され、生成された冷却材が前記原子炉容器152に再流入されて循環が行われる。図7の実施例では前記1次熱交換器131が原子炉駆動系のうち蒸気発生器153と連結されていると図示されており、すなわち、この場合には、前記1次熱交換器131には前記蒸気発生器153内の蒸気が流入されることになる。一方、前記1次熱交換器131に連結される流路に前記原子炉容器152または前記第1空間V1と連通される流路が設けられるようにしてもよい。この場合、前記1次熱交換器131には前記蒸気発生器153内の蒸気だけでなく前記原子炉容器152内の蒸気または前記第1空間V1内の蒸気も流通されて冷却されるようにしてもよい。

40

【0083】

前記第1熱交換器131内に高温の蒸気が流入されれば、前記第1熱交換器131の周辺の冷却材と高温の蒸気が熱交換することで1次的に蒸気が冷却する。これは、図2に示されているような既存の残熱除去用熱交換器での冷却方法に相当する。ところが、かかる既存の方法では十分迅速に大量の蒸気を冷却することができないため、本発明では、二相流動熱伝達原理を用いて蒸気を冷却する(二相流動熱伝達ステップ)。さらに、二相流動

50

熱伝達効率をさらに極大化するために飽和蒸気圧空間を形成するように装置が行われる（飽和蒸気圧空間形成ステップ）。このステップについて説明すると、以下のとおりである。

【0084】

飽和蒸気圧空間形成ステップは以下のような手順で行われる。まず、前記1次熱交換器循環ステップで説明したように、前記1次熱交換器131に蒸気が流入されると、前記熱交換容器134内に収容された冷却材が前記1次熱交換器131に流入された蒸気と熱交換して加熱および沸騰する（このステップでも蒸気は冷却され続けていることが言うまでもない）。このように前記1次熱交換器131の周辺で冷却材が沸騰して生成された蒸気は、気泡状に形成され、密度差によって前記熱交換容器134の上部に集まることになる。時間が経つにつれて気泡が集まる量が多くなると、結局、この気泡は、前記熱交換容器134の上部に飽和蒸気圧を有する空間を形成することになる。さらに時間が経つにつれて、このように気泡が集まってなる飽和蒸気圧空間が前記1次熱交換器131および前記2次熱交換器132が配置された位置まで拡張する。この時点で、前記1次熱交換器131および前記2次熱交換器132は冷却材蒸気が飽和されている空間上に配置された状態となり、すなわち、前記1次熱交換器131および前記2次熱交換器132の周辺空間内には非凝縮気体がなくなる。

10

【0085】

二相流動熱伝達ステップは、以下のような手順で行われる。上述のように飽和蒸気圧空間が形成された状態で、まず前記冷却材噴射管133によって供給された冷却材が前記1次熱交換器131の外面に噴射されて接触する。図5、II.項目を参照すると、前記冷却材噴射管133は図5のノズルに相当し、前記1次熱交換器131は図5の放出用チューブに相当する。そうすると、前記1次熱交換器131の外面に接触した冷却材が、前記1次熱交換器131内の蒸気から熱を吸収して蒸発し、前記1次熱交換器131内の蒸気が凝縮して冷却材が生成される。次に、前記1次熱交換器131の外面で蒸発して生成された蒸気が、前記2次熱交換器132の外面に接触する。図5、II.項目を参照すると、前記2次熱交換器132は、図5の吸収用チューブに相当する。前記2次熱交換器132の外面に接触した蒸気が前記2次熱交換器132内の冷却材に熱を放出して冷却材に凝縮し、前記2次熱交換器132内の冷却材が蒸発して蒸気が生成される。

20

【0086】

このように本発明の原子炉安全系では、二相流動熱伝達原理を用いて冷却を行うため、既存の一般的な熱交換原理による冷却に比べてはるかに迅速で高効率の冷却を行うことができるという大きな利点がある。それだけでなく、本発明は以下のような利点もある。かかる二相流動熱伝達原理による熱伝達において空間内非凝縮気体の割合が高いほど熱伝達効率が低下するが、上述のように前記1次熱交換器131および前記2次熱交換器132は、飽和蒸気圧形成ステップによって自然に形成された冷却材蒸気に飽和された空間（すなわち、飽和蒸気圧空間）内に配置されており、かかる二相流動熱伝達効率が極大化するものである。

30

【0087】

残熱除去ステップは、以下のような手順で行われる。前記2次熱交換器132内の冷却材は前記1次熱交換器132内を通過する蒸気と二相流動熱伝達原理による熱交換をすることで熱を吸収し蒸気になる。この蒸気が有する熱を外部に廃棄することで、最終的に残熱を除去する。具体的には、まず、前記2次熱交換器132内の蒸気が外部に放出されるか、または外部の別の熱交換器に流入されるようにし、次に前記2次熱交換器132で外部冷却材が流入されるかまたは外部の別の熱交換器で凝縮して生成された冷却材が再流入されて循環することで残熱除去が行われ得る。さらに、前記2次熱交換器132から排出された冷却材が流れる流路上には、前記第3空間V3内に設けられる補助2次熱交換器132aがさらに設けられていることで、（以下より詳細に説明するが）安全系駆動過程で前記第3空間V3内に充填された冷却材によって外部に離脱する前に予め一部冷却が行われるようにしてもよい。

40

50

【0088】

図3または図7などの例示において、本発明の原子炉は、前記第1格納容器110および前記第2格納容器120が水面下に配置されるように形成されるように示されている。すなわち、本発明の原子炉を海水や貯水場のような、無限に近い熱容量を有するヒートシンク (heat sink) 内に直接設置することができる。かかる場合、前記2次熱交換器132の流入端および排出端を海水または貯水場の水が充填されている空間に直接開放されているように形成することができる。そうすると、前記2次熱交換器132内の蒸気は排出端を介して気泡形態に放出されることで便利に熱を廃棄することができ、前記2次熱交換器132で蒸気が排出されるだけ流入端を介して前記2次熱交換器132に海水または貯水場の水が流入されることで新たに熱交換を行うことができる。

10

【0089】

図面上には示されていないが、上述のように前記2次熱交換器132が外部の別の熱交換器と連結されているようにしてもよいことは言うまでもない。このときには外部の別の熱交換器が海水や貯水場のようなヒートシンクに設けられるようにする。この場合、前記2次熱交換器132内の蒸気は排出端を介して外部の別の熱交換器に流入され、別の熱交換器がヒートシンクに熱を廃棄することで蒸気が冷却して液相の冷却材に凝縮し、このように凝縮した冷却材が前記2次熱交換器132の流入端を介して再流入され循環することで残熱除去が行われるようになる。

【0090】

これに加え、付加的に、前記原子炉安全系に補助給水管116がさらに設けられて冷却材補助給水ステップがさらに行われてもよい。より詳細に説明すると、前記補助給水管116は、一側先端が前記第2空間V2の下部と連通し、他側先端は前記蒸気発生器153と連通するように形成され、前記補助給水管116上には補助給水弁116vが設けられる。この際、前記冷却材補助給水ステップは、前記第2空間V2の圧力が前記蒸気発生器153内の圧力より高くなると、前記補助給水弁116vが開放し、前記第2空間V2内の冷却材が前記蒸気発生器153に供給される過程で行われる。

20

【0091】

また、この場合、さらに付加的に、前記原子炉安全系に補助蒸気放出弁131vがさらに設けられて飽和蒸気圧空間補助蒸気供給ステップがさらに行われてもよい。より詳細に説明すると、前記補助蒸気放出弁131vは、前記熱交換容器134内の飽和蒸気圧を有する空間に蒸気を補助供給するように、前記1次熱交換器131の上部に設けられる。この際、前記飽和蒸気圧空間補助蒸気供給ステップは、前記冷却材補助給水ステップによって前記蒸気発生器153で補助供給された冷却材が蒸発されて蒸気が生成されると、前記補助蒸気放出弁131vが開放して前記蒸気発生器153内の蒸気が前記熱交換器容器134内に供給されて飽和蒸気圧を有する空間をさらに形成する過程で行われる。このように飽和蒸気圧空間に蒸気がさらに供給されることで前記1次熱交換器131 - 前記2次熱交換器132の間の二相流動熱伝達がさらに効率的に行われることができる。

30

【0092】

一方、先に、本発明の原子炉では原子炉駆動系で発生した過熱による蒸気が前記1次熱交換器131に流入され、前記冷却材噴射管133を介して供給される冷却材の噴射による1次熱交換器131 - 2次熱交換器132間の二相流動熱伝達を介して、冷却および凝縮されて原子炉駆動系に戻り循環が行われる動作について説明した。この際、前記冷却材噴射管133を介して供給される冷却材は、外部から別に供給する冷却材であり得ることは言うまでもない。しかし、装置構成および運用をより簡単にし、また、別の制御指示なく完全被動式動作が行われるようにするために、前記冷却材噴射管133を介して冷却材が供給される動作もまた熱水力条件の変化に応じて自然に起こるようにすることが好ましい。このようにするために、前記原子炉安全系は、蒸気迂回管114と、原子炉容器安全弁157とをさらに含み得る。

40

【0093】

前記蒸気迂回管114は、一側先端が前記原子炉駆動系内の前記蒸気発生器153から

50

前記１次熱交換器１３１に冷却材を流入させる流路上に連結され、他側先端が前記格納容器貫通管１１１に連結されて設けられ、前記蒸気迂回管１１４には蒸気迂回弁１１４ｖが設けられる。前記蒸気迂回管１１４が存在しないと、前記蒸気発生器１５３内の冷却材蒸気はいずれも前記１次熱交換器１３１に流通されて冷却に用いられるが、原子炉作動異常が生じた場合には原子炉内の温度が非常に急上昇し、これによって前記蒸気発生器１５３内の冷却材の蒸発速度および蒸気発生量も急激に増加するため、前記蒸気発生器１５３および前記１次熱交換器１３１内の圧力が過剰に高くなる恐れがある。かかる場合、前記蒸気迂回管１１４を介して前記蒸気発生器１５３内の蒸気を前記格納容器貫通管１１１を介して迂回させて前記第２空間Ｖ２で流通させると、前記蒸気迂回管１１４に迂回された蒸気は、前記第２空間Ｖ２内の圧力を加圧する役割を果たすことになる。

10

【００９４】

前記原子炉容器安全弁１５７は、図示されているように、前記原子炉容器１５２に設けられて前記原子炉容器１５２内の蒸気を前記第１空間Ｖ１または前記格納容器貫通管１１１で排出させる役割をする。

【００９５】

以下、熱水力条件の変化に応じて前記冷却材噴射管１３３に冷却材が供給される冷却材加圧噴射ステップについて具体的に説明する。付け加えると、上述のように前記蒸気迂回管１１４および前記原子炉容器安全弁１５７をさらに備えたときに、前記冷却材加圧噴射ステップがよりスムーズに行われ得るが、前記蒸気迂回管１１４および前記原子炉安全弁１５７が存在しない場合にも以下に説明される冷却材加圧噴射ステップを実現するにはそれほど問題がない。すなわち、前記蒸気迂回管１１４および前記原子炉安全弁１５７は、設けられればさらに良いが設けられなくても冷却材加圧噴射ステップを行うのにそれほど問題はない。

20

【００９６】

冷却材加圧噴射ステップは、以下のような手順で行われる。まず、前記原子炉駆動系内で発生した蒸気が、前記格納容器貫通弁１１１ｖの開放、前記蒸気迂回弁１１４ｖの開放または前記原子炉容器安全弁１５７の開放から選択される少なくとも一つの動作により前記格納容器貫通管１１１に流入される。すなわち、前記蒸気迂回管１１４や前記原子炉安全弁１５７が設けられないとしても、前記原子炉容器１５２から前記第１空間Ｖ１に冷却材が漏れた場合には、前記第１空間Ｖ１に漏れた冷却材が急激に蒸発して前記第１空間Ｖ１内の圧力を急激に上昇させるため、圧力によって自然に前記格納容器貫通弁１１１ｖが開放して前記格納容器貫通管１１１を介して前記第１空間Ｖ１から前記第２空間Ｖ２に蒸気が流れ込み、前記第２空間Ｖ２を加圧することになる。この際、前記格納容器貫通弁１１１ｖは、前記第１空間Ｖ１から前記第２空間Ｖ２への流れのみを許容するチャッキ弁形態であることが好ましいことは言うまでもない。

30

【００９７】

一方、原子炉作動異常が発生したとしても前記原子炉容器１５２から前記第１空間Ｖ１に冷却材が漏れなかった場合には、前記蒸気迂回管１１４や前記原子炉安全弁１５７なしには前記第２空間Ｖ２の加圧が行われたい。この際、前記蒸気迂回管１１４は、前記格納容器貫通管１１１に連結されているため、前記蒸気迂回管１１４が設けられる場合、前記蒸気発生器１５３内の蒸気が前記格納容器貫通管１１１を介して前記第２空間Ｖ２に流入され、スムーズな加圧が行われ得る。また、前記原子炉安全弁１５７は、図示されているように、蒸気を前記第１空間Ｖ１に排出させるか、または前記格納容器貫通管１１１に排出させるようになっており、蒸気が前記第１空間Ｖ１に排出される場合、冷却材が漏れた時と同じ原理で前記格納容器貫通管１１１を介して前記第２空間Ｖ２に流れ、蒸気が前記格納容器貫通管１１１に排出される場合、蒸気もまた自然に前記第２空間Ｖ２に流れる。

40

【００９８】

このように蒸気が前記格納容器貫通弁１１１ｖの開放、前記蒸気迂回弁１１４ｖの開放または前記原子炉容器安全弁１５７の開放から選択される少なくとも一つの動作により前記格納容器貫通管１１１に流入されると、前記格納容器貫通管１１１を介して流入された

50

蒸気による加圧によって前記第2空間V2の冷却材が前記冷却材噴射管133に流入される。このように前記冷却材噴射管133に冷却材が流入されると、前記冷却材噴射弁133vが圧力によって開放し、冷却材が前記冷却材噴射管133を介して前記1次熱交換器131および前記2次熱交換器132で噴射が行われ、上述の二相流動熱伝達ステップが行われる。

【0099】

上述のように、前記冷却材噴射管133に供給される冷却材が必ず前記原子炉安全系のどこかに収容されていた冷却材でなければならないのではなく、また冷却材の供給動作が別の制御指示に従って行われてもよい。しかし、本発明において、特に前記冷却材加圧噴射ステップが行われる場合、前記冷却材噴射管133に供給される冷却材は、前記第2空間V2に収容されていた冷却材であり、またこの供給動作は原子炉過熱によって発生した原子炉駆動系での圧力変化によって生じる。すなわち、この場合、別の冷却材供給や能動的な制御指示などが不要であり、したがって、運用上の便利性及び即刻な状況対処感性がはるかに向上する。

10

【0100】

このように、本発明の原子炉では、常に図8の(A)のような状態を維持して、原子炉過熱発生の際に図8の(B)のような状態に変化することで、圧力および熱水力条件の変化による自然な冷却材の移動を介して原子炉駆動系の冷却が行われる。より具体的には、冷却材が蒸気状態で第3空間V3内の残熱除去装置130に移動することで第1空間V1の熱を廃棄し、また第2空間V2の冷却材が第3空間V3に移動することで熱伝達がスムーズに行われるようにする。

20

【0101】

このように第2空間V2の冷却材が第3空間V3に移動し続けることで冷却が行われるが、時間が経つにつれて最終的には第2空間V2の冷却材がいずれも第3空間V3に移動されることになる。この際、冷却動作が中断されないように、本発明の原子炉ではかかる状態になる前に冷却材のさらに他の移動が生じるようにし、この過程で原子炉駆動系の直接冷却がさらに行われるようにする。図8の(C)が、まさに、かかる原子炉駆動系が直接冷却する状態を図示している。

【0102】

冷却材直接冷却ステップは、以下のような手順で行われる。まず、前記二相流動熱伝達ステップによって前記2次熱交換器132の表面で凝縮して生成された冷却材が前記冷却材流通路134aを介して前記第3空間V3に排出されて収容される（前記飽和蒸気圧空間形成ステップにおいて、前記熱交換容器134の上部に飽和蒸気でいっぱいになった空間が形成されることによってその体積だけ押された冷却材も前記冷却材流通路134aを介してともに排出されることは言うまでもない）。すなわち、前記冷却材噴射管133を介して前記熱交換容器134内に流入された冷却材は、蒸発および凝縮して、二相流動熱伝達に用いられた後、最終的には凝縮して液相の冷却材状態で前記第3空間V3に充填されることになる。

30

【0103】

このように前記第3空間V3に冷却材が充填されて、前記第3空間V3内の冷却材の水位が上昇すると、前記第3空間V3内の空間の圧力が次第に大きくなる。すなわち、原子炉過熱発生初期には前記第1空間V1の圧力が最も高く、相対的に前記第3空間V3の圧力は低い状態であるが、時間が経つにつれて原子炉がある程度冷却して、前記第1空間V1の圧力は次第に低くなり、前記第3空間V3内の冷却材の水位の上昇によって前記第3空間V3内の圧力は次第に高くなる。

40

【0104】

さらに、前記原子炉安全系には、一側先端は前記第1空間V1の上部と連通し、他側先端は前記第3空間の上部と連通する蒸気放出管113がさらに含まれてもよい。前記蒸気放出管113には蒸気放出弁113vが設けられ、前記蒸気放出弁113vが開放した時に、前記第3空間V3内の圧力を加圧するように、前記第1空間V1内の蒸気を前記第3

50

空間V 3に流通させる。すなわち、前記第1空間V 1内の圧力が増加する時に前記蒸気放出弁1 1 3 vが開放するが、そうすると、前記第1空間V 1内の蒸気の一部が前記第3空間V 3に直接流入され、これもまた前記第1空間V 1の圧力を低減するとともに前記第3空間V 3の圧力を高める役割をする。かかる過程が継続すると、ある臨界時点に達した時に前記第1空間V 1および前記第3空間V 3内の圧力がバランスをとることになる。

【0105】

このように前記第1空間V 1および前記第3空間V 3内の圧力がバランスを取ると、これからは相対的に低い位置に存在する前記第1空間V 1に比べて相対的に高い位置に存在する前記第3空間V 3内に存在する冷却材の水頭差が動作発生の要因となる。すなわち、この状態になると、前記冷却材注入弁1 1 2 vが前記第1空間V 1と前記第3空間V 3との水頭差によって開放し、前記第3空間V 3に収容された冷却材が前記冷却材注入管1 1 2に流入される。このように前記冷却材注入管1 1 2を介して前記第1空間V 1に流入された冷却材は、図8の(C)に図示されているように、前記原子炉容器1 5 2に直接接触して冷却を行う。

10

【0106】

上述のように冷却材が前記第3空間V 3から前記第1空間V 1に流入されるためには、前記第3空間V 3に冷却材が高い水位に収容されているほど有利である。このようになるために、前記原子炉安全系で前記熱交換器容器外筒1 3 5に充填された冷却材を放出して前記熱交換器容器外筒1 3 5がサイホン(siphon)の役割を果たすように、下部に熱交換器容器外筒弁1 3 5 vが設けられるようにして、冷却材の水位調節ステップがさらに行われるようにすることが好ましい。

20

【0107】

この際、前記冷却材の水位調節ステップは、以下のような手順で行われることができる。まず、前記冷却材直接冷却ステップによって、前記熱交換器容器外筒1 3 5に冷却材が充填されて水位が上昇する。この際、前記熱交換器容器外筒弁1 3 5 cが開放すると、前記第3空間V 3と前記熱交換器容器外筒1 3 5との水位が一致するまでサイホン原理によって前記熱交換器容器外筒1 3 5に充填された冷却材が前記第3空間V 3に排出される。これにより、前記第3空間V 3に冷却材がより充填されることができ、したがって、前記冷却材直接冷却ステップを誘導する第3空間-第1空間水頭差をさらに高めることができる。すなわち、結果として、前記冷却材の水位調節ステップによって前記冷却材直接冷却ステップがよりスムーズに行われることができる。

30

【0108】

すなわち、原子炉過熱発生初期には図8の(B)のような状態になることで、原子炉駆動系内の冷却材が残熱除去装置1 3 0に移動して二相流動熱伝達によって熱を廃棄し、また原子炉駆動系に戻り循環することで間接冷却が行われ、ある程度時間が経った後には図8の(C)のような状態になることで冷却材が原子炉容器1 5 2の外面に直接接触し直接冷却が行われることになる。

【0109】

このように冷却材が原子炉容器1 5 2の外面に直接接触すると、冷却材が原子炉容器1 5 2から熱を吸収して蒸発することになり、この蒸気が前記第1空間V 1内に充填されることによって前記第1空間V 1内の圧力がまた上昇する。上述のように前記第1空間V 1および前記第3空間V 3内の圧力バランスが取られると、前記第3空間V 3に充填されていた冷却材が前記第1空間V 1に流れ込むが、このように前記第3空間V 3の冷却材が前記第1空間V 1に流れ込むことで水頭差が低減すると同時に前記第1空間V 1内の圧力がまた高くなると、自然に冷却材直接冷却ステップが中断される。また、かかる過程で前記第2空間V 2に充填されていた冷却材は(間接冷却過程で)前記第3空間V 3-(直接冷却過程で)前記第1空間V 1に順に移動し、結局、冷却材の水位が低くなり、一方、前記第1空間V 1内の冷却材の水位は高くなる。したがって、ある臨界時点を過ぎると、前記第1空間V 1および前記第2空間V 2内の冷却材水頭差により前記第1空間V 1の冷却材が前記格納容器貫通管1 1 1を介して前記第2空間V 2に流れ込み、前記第2空間V 2が

40

50

またある程度充填される。

【0110】

かかる状態は原子炉過熱放生初期状態に近い状態である。したがって、前記第1空間V1内の圧力によって前記第2空間V2内の冷却材が前記冷却材噴射管133を介して前記残熱除去装置130に供給され、供給された冷却材を用いた1次熱交換器131 - 2次熱交換器132の間の二相流動熱伝達によって原子炉駆動系が間接冷却する過程、すなわち、図8の(B)の過程が繰り返して行われる。この図8の(B)の過程が行われるにつれてまた図8の(C)の状態に近くなると、冷却材の直接冷却過程が再度行われ、圧力および熱水力条件の変化に応じて、図8の(B) - 図8の(C)の過程が繰り返して交差して行われて、原子炉から発生した過熱が完全に除去されることができる。

10

【0111】

一方、かかる過程で前記第1空間V1が過圧されることを防止するために、前記原子炉安全系は、格納容器減圧管115をさらに備えてもよい。前記格納容器減圧管115は、一側先端が前記第1空間V1の下部と連通し、他側先端が前記冷却材注入管112と連通するように設けられ、また格納容器減圧弁115vが設けられる。前記格納容器減圧管115は、前記第1空間V1内の圧力を減圧するように前記第1空間V1内の蒸気を前記冷却材注入管112で流通させる役割を果たすが、この際、前記原子炉の作動方法は格納容器減圧ステップをさらに含んでもよい。

【0112】

格納容器減圧ステップは、以下のような手順で行われる。まず、前記冷却材直接冷却ステップの後に、前記第1空間V1に流入されて前記原子炉容器152に直接接触した冷却材が前記原子炉容器152から熱を吸収して蒸発して蒸気が発生する。前記原子炉容器152から熱を吸収して発生した蒸気が前記第1空間V1に充填されて前記第1空間V1内の圧力が上昇する。そうすると、前記格納容器減圧弁115vが圧力によって開放し、第1空間V1内の蒸気が前記格納容器減圧管115を介して前記冷却材注入管112に流入されることで、前記第1空間V1内の過圧が減圧されることになる。

20

【0113】

この過程で、前記格納容器減圧管115上には、格納容器減圧管熱交換器115aがさらに設けられているようにすることができる。この場合、前記第1空間V1内の蒸気が前記格納容器減圧管熱交換器115aを通過して予め冷却して前記冷却材注入管112に流入され得る。前記冷却材注入管112内の冷却材は、結果として前記第1空間V1にまた流れ込み、前記原子炉容器152の下部と直接接触して直接冷却を行うことになり、このように前記格納容器減圧管115上に前記格納容器減圧管熱交換器115aを備えることで蒸気を予め冷却して置くことがさらに好ましい。

30

【0114】

付加的に前記原子炉容器152には冷却材を補充する冷却材補充管156がさらに設けられてもよい。上述のような冷却過程で、前記原子炉容器152内の冷却材は、前記原子炉容器152から漏れた後、冷却動作のために原子炉安全系内の様々な装置を循環するが、換言すれば、結局、前記原子炉容器152内の冷却材は益々減少する一方である。前記冷却材補充管156は、前記原子炉容器152に連結されて外部から冷却材の供給を受けて前記原子炉容器152内に冷却材を補充供給する。すなわち、前記冷却材補充管156が設けられる場合、前記冷却材補充管156を介して外部から供給された冷却材が、前記原子炉容器152内に補充される冷却材補充ステップが行われることができる。

40

【0115】

また、さらに付加的に、前記原子炉駆動系には、第1循環弁136v1および第2循環弁136v2がさらに設けられ、前記蒸気発生器153に冷却材をさらに供給することで原子炉内の循環がさらにスムーズに行われるようにできる。より詳細には、前記第1循環弁136v1および前記第2循環弁136v2は、前記1次熱交換器131の下部の流路上に設けられるが、このうち、前記第1循環弁136v1は前記熱交換容器134の内部に配置され、前記第2循環弁136v2は前記熱交換容器134の外部に配置される。こ

50

の場合、前記第1循環弁136v1および前記第2循環弁136v2が開放すると、前記第1循環弁136v1および前記第2循環弁136v2を介して前記第3空間V3から供給された冷却材が前記蒸気発生器153に補充されるようにする冷却材蒸気発生器補充ステップが行われてもよく、これにより、原子炉内の冷却材の循環がよりスムーズに行われ得る。

【0116】

本発明は、上述の実施例に限定されず、適用範囲が様々であることは言うまでもなく、請求の範囲で請求する本発明の要旨を逸脱することなく当該本発明が属する分野において通常の知識を有する者であれば、誰でも様々な変形実施が可能であることは言うまでもない。

10

【産業上利用可能性】

【0117】

本発明によると、設計、構築、運用、制御などにかかる時間、人力、費用などの資源を節約する効果が非常に大きく、原子炉の運営および建設経済性もはるかに向上できるという大きな効果がある。

【符号の説明】

【0118】

- 100 (本発明の) 原子炉
- 110 第1格納容器
- 111 格納容器貫通管
- 111v 格納容器貫通弁
- 112 冷却材注入管
- 112v 冷却材注入弁
- 113 蒸気放出管
- 113v 蒸気放出弁
- 114 蒸気迂回管
- 114v 蒸気迂回弁
- 115 格納容器減圧管
- 115v 格納容器減圧弁
- 115a 格納容器減圧管熱交換器
- 116 補助給水管
- 116v 補助給水弁
- 120 第2格納容器
- 125 水平隔壁
- 130 残熱除去装置
- 131 1次熱交換器
- 132 2次熱交換器
- 131v 補助蒸気放出弁
- 132a 補助2次熱交換器
- 133 冷却材噴射管
- 134 熱交換容器
- 134a 冷却材流通路
- 135 熱交換容器外筒
- 135v 熱交換容器外筒弁
- 136v1 第1循環弁
- 136v2 第2循環弁
- 150 原子炉駆動系
- 151 原子炉炉心
- 152 原子炉容器
- 153 蒸気発生器

20

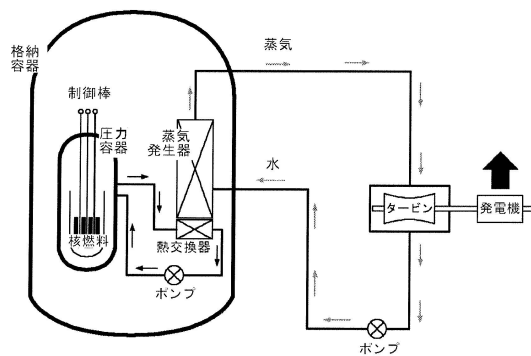
30

40

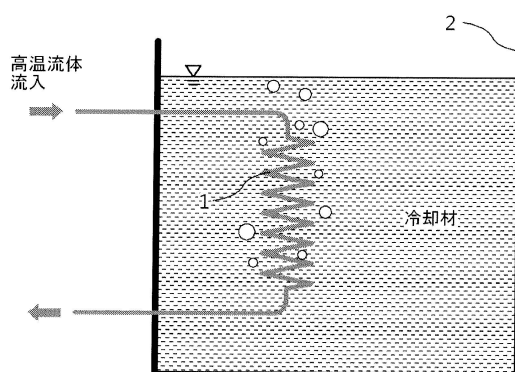
50

- 1 5 4 蒸気管
- 1 5 4 v 蒸気管隔離弁
- 1 5 5 給水管
- 1 5 5 v 給水管隔離弁
- 1 5 6 冷却材補充管
- 1 5 7 原子炉容器安全弁

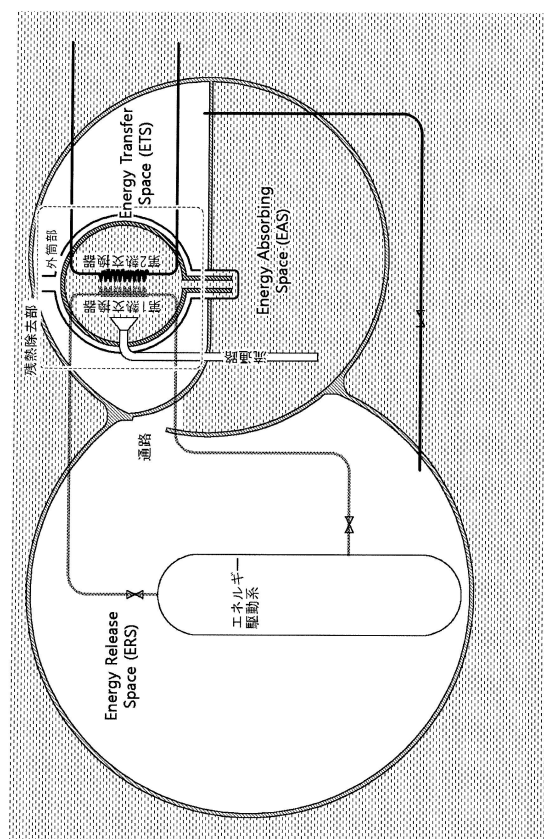
【図 1】



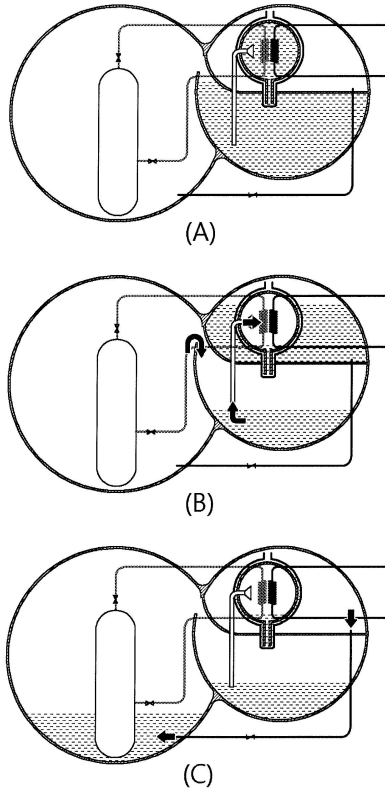
【図 2】



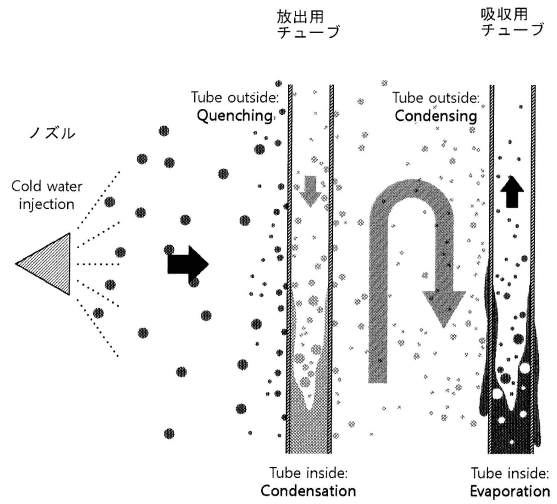
【図 3】



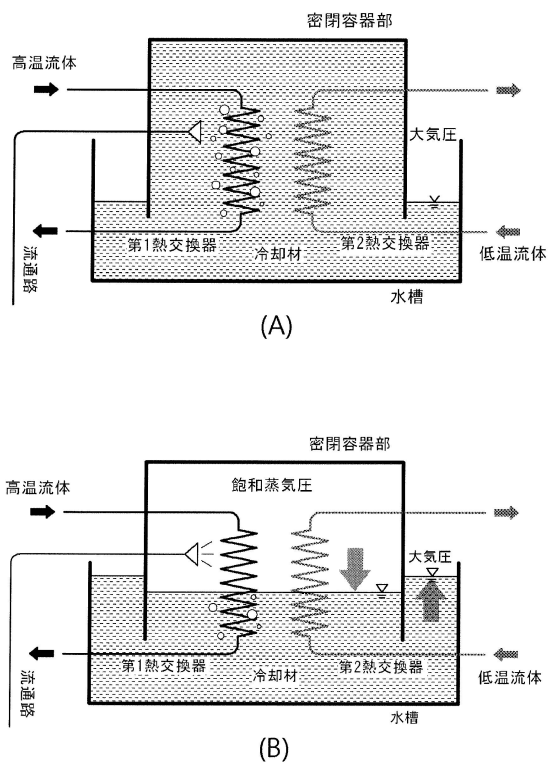
【図 4】



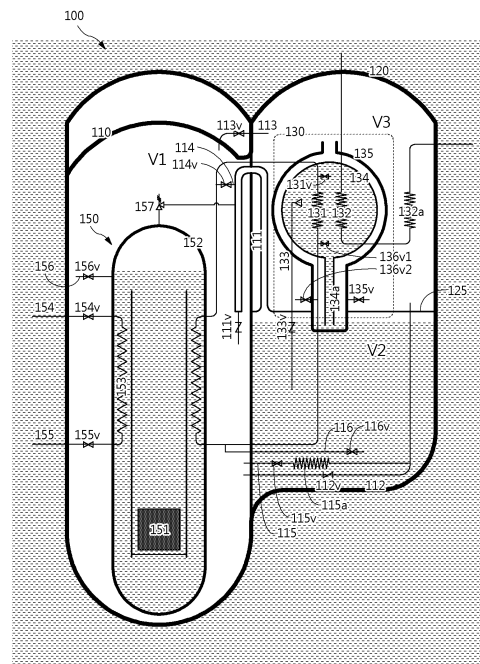
【図 5】



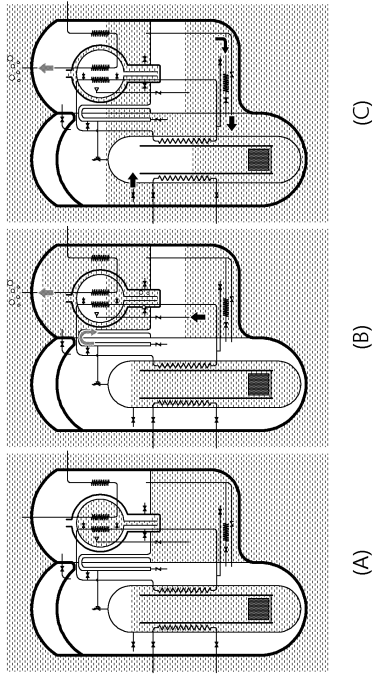
【図 6】



【図 7】



【図 8】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開2002-156485 (JP, A)
特表2012-509465 (JP, A)
特開2006-138744 (JP, A)
特開2001-228280 (JP, A)
国際公開第2013/188128 (WO, A1)
国際公開第2013/081148 (WO, A1)
特開2014-181928 (JP, A)
特開平08-184691 (JP, A)
特表2015-509192 (JP, A)
米国特許出願公開第2015/0016581 (US, A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G21C 15/02
G21C 15/12
G21C 15/18
G21C 9/00-9/06