(19)日本国特許庁(JP)　(12)公開特許公報(A)　(11)特許出願公開番号
特開2012-208070
(P2012-208070A)
(43)公開日　平成24年10月25日(2012.10.25)

(51)Int.Cl.			F I			テーマコード（参考）
G21D	1/00	(2006.01)	G21D	1/00	Y	
G21D	3/08	(2006.01)	G21D	3/08	G	

審査請求 未請求　請求項の数 14　ＯＬ　（全 21 頁）

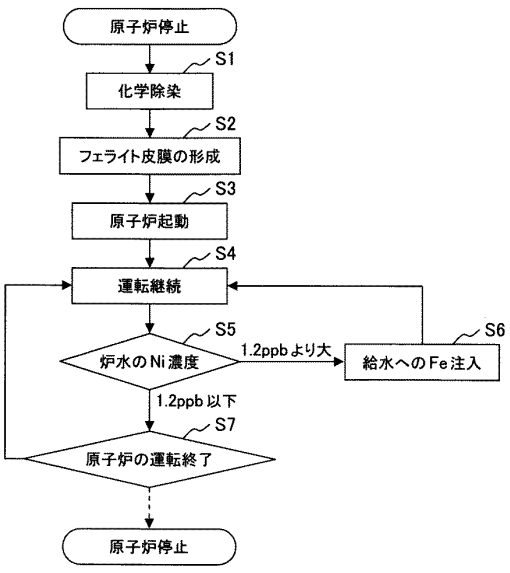
(21)出願番号　特願2011-75318(P2011-75318)
(22)出願日　平成23年3月30日(2011.3.30)

(71)出願人　507250427
日立ＧＥニュークリア・エナジー株式会社
茨城県日立市幸町三丁目１番１号
(74)代理人　110000350
ポレール特許業務法人
(72)発明者　細川　秀幸
茨城県日立市大みか町七丁目２番１号　株式会社日立製作所エネルギー・環境システム研究所内
(72)発明者　伊藤　剛
茨城県日立市大みか町七丁目２番１号　株式会社日立製作所エネルギー・環境システム研究所内
(72)発明者　長瀬　誠
茨城県日立市幸町三丁目１番１号　日立ＧＥニュークリア・エナジー株式会社内

(54)【発明の名称】原子力プラント構成部材の線量低減方法

(57)【要約】
【課題】フェライト皮膜への放射性核種の取り込みをさらに抑制できる原子力プラント構成部材の線量低減方法を提供する。
【解決手段】原子力プラントの定期検査の期間において、例えば、再循環系配管の内面にフェライト皮膜を形成する（Ｓ２）。定期検査の終了後、原子炉を起動し（Ｓ３）、定格出力で原子炉の運転を継続する（Ｓ４）。原子炉に接続された浄化系配管から炉水をサンプリングし、炉水のＮｉ（II）イオン濃度を測定する。測定されたＮｉ（II）イオン濃度が１．２ｐｐｂよりも大きいとき、鉄酸化物を給水に注入し（Ｓ６）、鉄酸化物を含む給水を原子炉内の炉水に混合する。炉心内の燃料棒の外面に固定化された鉄酸化物が炉水内のＮｉ（II）イオンを取り込むため、炉水のＮｉ（II）イオン濃度が低減される。この結果、フェライト皮膜に取り込まれる極微量のＣｏ－６０イオンがさらに低減される。
【選択図】図１

図 1



【特許請求の範囲】
【請求項１】
原子力プラントの運転停止後において、前記原子力プラントの構成部材の表面にフェライト皮膜を形成し、前記原子力プラントの運転時において、前記構成部材の表面に形成された前記フェライト皮膜に接触する炉水のＮｉ（II）イオン濃度を１．２ｐｐｂ以下にすることを特徴とする原子力プラント構成部材の線量低減方法。
【請求項２】
前記構成部材が前記原子力プラントの原子炉に接続されて前記炉水が流れる配管系であって、前記フェライト皮膜の形成が前記配管系の内面に行われる請求項１に記載の原子力プラント構成部材の線量低減方法。
【請求項３】
前記フェライト皮膜に接触する炉水のＮｉ（II）イオン濃度が１．２ｐｐｂよりも大きいとき、前記炉水に鉄を注入して前記Ｎｉ（II）イオン濃度を１．２ｐｐｂ以下に低減する請求項１または２に記載の原子力プラント構成部材の線量低減方法。
【請求項４】
前記炉水への前記鉄の注入は、前記原子力プラントの原子炉に接続された給水配管に設けられた第１浄化装置をバイパスした前記鉄を含む給水を前記原子炉に供給する請求項３に記載の原子力プラント構成部材の線量低減方法。
【請求項５】
前記炉水への前記鉄の注入は、前記原子力プラントの原子炉に接続された給水配管に接続された鉄注入装置によって行われる請求項３に記載の原子力プラント構成部材の線量低減方法。
【請求項６】
前記原子力プラントの原子炉に連絡される浄化系配管に並列に設けられた複数の浄化装置のうち１つの前記浄化装置により前記炉水に含まれる前記Ｎｉ（II）イオンを除去し、前記炉水のＮｉ（II）イオン濃度が１．２ｐｐｂよりも大きいとき、他の前記浄化装置にも前記炉水を供給して前記他の浄化装置においても前記Ｎｉ（II）イオンを除去する請求項１または２に記載の原子力プラント構成部材の線量低減方法。
【請求項７】
原子力プラントの運転停止後において、前記原子力プラントの構成部材の表面にフェライト皮膜を形成し、前記原子力プラントの運転時において、流動している炉水が接触している前記フェライト皮膜を表面に形成している前記構成部材の線量率の増加速度を１ｍＳｖ／ｈ／年以下にすることを特徴とする原子力プラント構成部材の線量低減方法。
【請求項８】
前記構成部材が前記原子力プラントの原子炉に接続されて前記炉水が流れる配管系であって、前記フェライト皮膜の形成が前記配管系の内面に行われる請求項７に記載の原子力プラント構成部材の線量低減方法。
【請求項９】
前記フェライト皮膜を表面に形成している前記構成部材の線量率の増加速度が１ｍＳｖ／ｈ／年よりも大きいとき、前記炉水に鉄を注入して前記線量率の増加速度を１ｍＳｖ／ｈ／年以下に低減する請求項７または８に記載の原子力プラント構成部材の線量低減方法。
【請求項１０】
前記炉水への前記鉄の注入は、前記原子力プラントの原子炉に接続された給水配管に設けられた第１浄化装置をバイパスした前記鉄を含む給水を前記原子炉に供給する請求項９に記載の原子力プラント構成部材の線量低減方法。
【請求項１１】
前記炉水への前記鉄の注入は、前記原子力プラントの原子炉に接続された給水配管に接続された鉄注入装置によって行われる請求項９に記載の原子力プラント構成部材の線量低減方法。

【請求項１２】
前記原子力プラントの原子炉に連絡される浄化系配管に並列に設けられた複数の浄化装置のうち１つの前記浄化装置により前記炉水に含まれる前記Ｎｉ（II）イオンを除去し、前記フェライト皮膜を表面に形成している前記構成部材の線量率の増加速度が１ｍＳｖ／ｈ／年よりも大きいとき、他の前記浄化装置にも前記炉水を供給して前記他の浄化装置においても前記Ｎｉ（II）イオンを除去する請求項７または８に記載の原子力プラント構成部材の線量低減方法。
【請求項１３】
前記構成部材の表面への前記フェライト皮膜の形成は、鉄（II）イオン、及び鉄（II）イオンを鉄（III）イオンに酸化する酸化剤を含むｐＨが５．５～９．０の範囲内にある皮膜形成液を、前記構成部材の前記表面に接触させることによって行われる請求項１ないし１２のいずれか１項に記載の原子力プラント構成部材の線量率低減方法。
【請求項１４】
前記構成部材の前記表面に接触させる前記皮膜形成液は、６０℃～１００℃の範囲内の温度に調節されている請求項１３に記載の原子力プラント構成部材の線量率低減方法。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、原子力プラント構成部材の線量低減方法に係り、特に、沸騰水型原子力プラントに適用するのに好適な原子力プラント構成部材の線量低減方法に関する。
【背景技術】
【０００２】
例えば、沸騰水型原子力発電プラント（以下、ＢＷＲプラントという）は、原子炉圧力容器（ＲＰＶと称する）内に炉心を内蔵した原子炉を有する。再循環ポンプ（またはインターナルポンプ）によって炉心に供給された炉水は、炉心内に装荷された燃料集合体内の核燃料物質の核分裂で発生する熱によって加熱され、一部が蒸気になる。この蒸気は、原子炉からタービンに導かれ、タービンを回転させる。タービンから排出された蒸気は、復水器で凝縮され、水になる。この水は、給水として原子炉に供給される。給水は、原子炉内での放射性腐食生成物の発生を抑制するため、給水配管に設けられたろ過脱塩装置で主として金属不純物が除去される。
【０００３】
放射性腐食生成物の元になる腐食生成物は、ＲＰＶ及び再循環系配管等のＢＷＲプラントの構成部材の接水部から発生するため、主要な一次系の構成部材には腐食の少ないステンレス鋼及びニッケル基合金などの不銹鋼が使用されている。また、低合金鋼製のＲＰＶは内面にステンレス鋼の肉盛りが施され、低合金鋼が、直接、炉水と接触することを防いでいる。炉水とは、原子炉内に存在する冷却水である。さらには、炉水の一部を原子炉浄化系のろ過脱塩装置によって浄化し、炉水中に僅かに存在する金属不純物を積極的に除去している。
【０００４】
しかし、上述のような腐食対策を講じても、炉水中における極僅かな金属不純物の存在が避けられないため、一部の金属不純物が、金属酸化物として、燃料集合体に含まれる燃料棒の表面に付着する。燃料棒表面に付着した金属不純物（例えば、金属元素）は、燃料棒内の核燃料物質の核分裂により放出される中性子の照射によって原子核反応を起こし、コバルト６０，コバルト５８，クロム５１，マンガン５４等の放射性核種になる。
【０００５】
これらの放射性核種は、大部分が酸化物の形態で燃料棒表面に付着したままである。しかしながら、一部の放射性核種は、取り込まれている酸化物の溶解度に応じて炉水中にイオンとして溶出したり、クラッドと呼ばれる不溶性固体として炉水中に再放出されたりする。炉水中の放射性物質は、原子炉に接続された原子炉浄化系によって取り除かれる。原子炉浄化系で除去されなかった放射性物質は炉水とともに再循環系などを循環している間

に、原子力プラントの構成部材（例えば、配管）の炉水と接触する表面に蓄積される。その結果、構成部材の表面から放射線が放射され、定検作業時の従事者の放射線被曝の原因となる。

【０００６】

その従業者の被曝線量は、各人毎に規定値を超えないように管理されている。近年この規定値が引き下げられ、各人の被曝線量を可能な限り低くする必要が生じている。

【０００７】

そこで、配管の炉水と接触する表面への放射性核種の付着を低減する方法、及び炉水中の放射性核種の濃度を低減する方法が様々検討されている。例えば、特開２００６－３８４８３号公報、特開２００７－１９２７４５号公報及び特開２００７－２４６４４号公報には、原子力プラント構成部材の炉水と接触する表面にフェライト皮膜であるマグネタイト皮膜を形成し、その構成部材への放射性核種の付着を抑制する方法が提案されている。構成部材の炉水と接触する表面へのフェライト皮膜の形成によって、原子力プラントの運転後において、その構成部材の表面に放射性核種が付着することが抑制される。この放射性核種付着抑制方法では、鉄（II）イオンを含むギ酸水溶液，過酸化水素及びヒドラジンを含み、常温から１００℃の範囲に加熱された処理液を、その構成部材表面に接触させてその表面にフェライト皮膜を形成する。

【０００８】

特開２０００－１０５２９５号公報には、酸化除染及び還元除染を含む化学除染が記載されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【０００９】

【特許文献１】特開２００６－３８４８３号公報

【特許文献２】特開２００７－１９２７４５号公報

【特許文献３】特開２００７－２４６４４号公報

【特許文献４】特開２０００－１０５２９５号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【００１０】

特開２００６－３８４８３号公報に記載された原子力プラント構成部材への放射性核種の付着抑制方法は、フェライト皮膜を形成して原子力プラント構成部材の腐食を抑制し、腐食皮膜の成長に伴って生じる放射性核種の付着を抑制して原子力発電プラントの再循環配管の表面線量率を著しく低減することができる。発明者らは、特開２００６－３８４８３号公報に記載された方法により原子力プラント構成部材の表面にフェライト皮膜を形成した場合において、表面線量率をさらに低減するために、詳細な検討を行った。この結果、炉水のニッケルイオン濃度がその表面線量率に影響を与えることを新たに見出した。炉水のニッケルイオン濃度によっては、極微量ではあるがフェライト皮膜への放射性核種への放射性核種の取り込みが認められた。

【００１１】

本発明の目的は、フェライト皮膜への放射性核種の取り込みをさらに抑制することができる原子力プラント構成部材の線量低減方法を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【００１２】

上記した目的を達成する本発明の特徴は、原子力プラントの運転停止後において、この原子力プラントの構成部材の表面にフェライト皮膜を形成し、原子力プラントの運転時において、その構成部材の表面に形成されたフェライト皮膜に接触する炉水のＮｉ（II）イオン濃度を１．２ｐｐｂ以下にすることにある。

【００１３】

原子力プラントの構成部材の表面に形成されたフェライト皮膜に接触する炉水のＮｉ（

II）イオン濃度を１．２ｐｐｂ以下にするので、そのフェライト皮膜への放射性核種の取り込み量をさらに低減することができる。

【発明の効果】

【００１４】

本発明によれば、原子力プラント構成部材の表面に形成されたフェライト皮膜への放射性核種の取り込みをさらに抑制することができる。

【図面の簡単な説明】

【００１５】

【図１】本発明の好適な一実施例である実施例１の原子力プラント構成部材の線量低減方法において実施される工程を示すフローチャートである。

【図２】実施例１の原子力プラント構成部材の線量低減方法が適用される沸騰水型原子力プラントの構成図である。

【図３】図３に示される皮膜形成装置の詳細構成図である。

【図４】原子力プラント構成部材へのＣｏ－６０付着量のＮｉイオン濃度依存性を示す説明図である。

【図５】本発明の他の実施例である実施例２の原子力プラント構成部材の線量低減方法が適用される沸騰水型原子力プラントの構成図である。

【図６】本発明の他の実施例である実施例３の原子力プラント構成部材の線量低減方法において実施される工程を示すフローチャートである。

【図７】実施例３の原子力プラント構成部材の線量低減方法が適用される沸騰水型原子力プラントの構成図である。

【図８】本発明の他の実施例である実施例４の原子力プラント構成部材の線量低減方法において実施される工程を示すフローチャートである。

【発明を実施するための形態】

【００１６】

発明者らは、特開２００６－３８４８３号公報に記載されたフェライト皮膜の放射性核種の付着抑制性能のさらなる向上を目指してＣｏ－６０付着実験を行った。表面を研磨した、ステンレス鋼製の試験片（第１試験片という）、及びフェライトの一種であるマグネタイト皮膜を表面に形成したステンレス鋼製の試験片（第２試験片という）を、ＢＷＲを模擬した水素注入条件（この条件をＨＷＣ条件という）、Ｎｉイオンを添加し、所定時間の間、浸漬した。試験片取り出し後、それぞれの試験片へのＣｏ－６０付着量を測定し、Ｃｏ－６０付着量のＮｉイオン濃度依存性を調べた。その結果を図４に示す。図４の縦軸は、研磨したステンレス鋼の試験片（第１試験片）の表面へのＣｏ－６０付着量に対する、マグネタイト皮膜を表面に形成した試験片（第２試験片）におけるマグネタイト皮膜の表面へのＣｏ－６０付着量の比（Ｃｏ付着量比）を表している。図２に示された結果から、高温高圧純水のＮｉイオン濃度の低下とともにマグネタイト皮膜を表面に形成した試験片のＣｏ－６０付着量が、マグネタイト皮膜を付与していない、ステンレス鋼製の研磨試験片のＣｏ－６０付着量に比べて少なくなっていることが分かる。この結果について、発明者らは以下のように考察した。

【００１７】

ステンレス鋼製の試験片表面へのマグネタイト皮膜の形成は、特開２００６－３８４８３号公報に記載されたように、行われる。すなわち、フェライト皮膜、具体的には、マグネタイト皮膜の形成に必要な成分である鉄（II）イオン、鉄（II）イオンを酸化する過酸化水素、及びフェライト化反応を促進するｐＨ調整剤であるヒドラジンを含む水溶液を、第２試験片の母材であるステンレス鋼材の表面に接触させることにより行われる。第２試験片となるこのステンレス鋼材の表面で（１）式に示す反応が生じ、その表面にフェライトの一種であるマグネタイトの皮膜が形成される。

【００１８】

$$3Fe^{2+} + H_2O_2 + 6OH^- \rightarrow Fe_3O_4 + 4H_2O \quad \cdots\cdots (1)$$

形成された皮膜のマグネタイトの構造は、Ｆｅ（III）［Ｆｅ（II）Ｆｅ（III）］O_4

で表される。大括弧の部分は酸素の八面体構造の中心に位置する金属イオンを示しており、マグネタイトではこの部分にＦｅ（II）イオンが存在している。このマグネタイト皮膜を形成した第２試験片を、Ｎｉイオンを含む高温の模擬炉水に浸漬した場合に、マグネタイト皮膜内のＦｅ（II）イオンと高温の模擬炉水に含まれるＮｉ（II）イオンの間で（２）式に示すイオン交換反応を起こす可能性がある。

【００１９】

$$Fe_3O_4 + Ni^{2+} = NiFe_2O_4 + Fe^{2+} \quad \cdots\cdots(2)$$

模擬炉水のＮｉ（II）イオン濃度が高くなると、（２）式の反応は左から右に進み易くなる。実験結果ではＮｉ（II）イオン濃度が高くなるほどＣｏ－６０付着量が増加したことから、Ｃｏ－６０の付着は（２）式の反応の進行に伴って生じるものと考えられる。従って、形成されたマグネタイト皮膜へのＣｏ－６０付着を出来るだけ低く抑えるためには、発明者らは、炉水のＮｉ（II）イオン濃度を低くすれば良いという新たな知見、具体的には図２に示された実験結果に基づいて、炉水のＮｉ（II）イオン濃度を１．２ｐｐｂ以下にすれば良いという新たな知見を得た。

【００２０】

炉水のＮｉ（II）イオン濃度を低減する方法として、以下に示す３つの方法がある。第１の方法は原子炉に供給される給水のＮｉ（II）イオン濃度を下げることであり、第２の方法は原子炉浄化系の容量を増やすことである。そして、第３の方法は、炉心に装荷された燃料集合体に含まれる燃料棒の被覆管外面へのＮｉ（II）イオンの固定化を促進させることによって炉水のＮｉ（II）イオン濃度を下げる方法である。

【００２１】

炉水のＮｉ（II）イオン濃度は、給水によって持ち込まれるＮｉ（II）イオンの量、原子炉浄化系で除去されるＮｉ（II）イオンの量、燃料棒の被覆管外面に$NiFe_2O_4$として固定化されて炉水から除去されるＮｉ（II）イオンの量のバランスによって決まる。これら３つのＮｉ（II）イオン量のうち、給水によって持ち込まれるＮｉ（II）イオン量と原子炉浄化系で除去されるＮｉ（II）イオン量のバランスは、（３）式の微分方程式によって表される。

【００２２】

$$(Ci \cdot vi - C \cdot vo) \cdot dt = V \cdot dC \quad \cdots\cdots(3)$$

ここで、Ｃｉは給水のＮｉ（II）イオン濃度、ｖｉは給水流量、Ｃは炉水のＮｉ（II）イオン濃度、ｖｏは原子炉浄化系内を流れる炉水の流量、Ｖは原子炉圧力容器内の保有水量、ｔは原子炉起動後の経過時間である。

【００２３】

初期条件である「時間ｔが０で炉水のＮｉ（II）イオン濃度Ｃが０」を用いて（３）式を解くと、（４）式が得られる。

【００２４】

$$C = (1 - \exp(-(vo/V) \cdot t)) \cdot Ci \cdot vi/vo \quad \cdots\cdots(4)$$

時間ｔが経過して炉水のＮｉ（II）イオン濃度Ｃが平衡濃度に達すると、炉水のＮｉ（II）イオン濃度Ｃは給水のＮｉ（II）イオン濃度Ｃｉの（ｖｉ／ｖｏ）倍になる。給水に含まれるＮｉ（II）イオンの発生源は給水配管の腐食生成物であり、この腐食性生物の発生量は、給水流量ｖｉ及び原子炉浄化系内を流れる炉水流量ｖｏと同様に、ＢＷＲプラントの運転後において、運転員が積極的に制御することは出来ない。ＢＷＲプラント設計時及びＢＷＲプラント建設時であれば、給水に含まれるＮｉ（II）イオンの発生を低減する対策としては、給水配管の耐食性を向上させる金属材料の選定、給水配管の内面処理、及び原子炉浄化系の容量増加の設計等がある。

【００２５】

ＢＷＲプラント運転後における炉水のＮｉ（II）イオン濃度低減対策としては、例えば、特許第３２８９６７９号公報に記載されているように、給水に鉄を注入して原子炉圧力容器内に供給し、炉水中のＮｉ（II）イオンを$NiFe_2O_4$として炉心に存在している燃料棒の被覆管外面に固定化する方法がある。特許第３２８９６７９号公報では、注入に

より炉水に含まれた鉄酸化物が燃料棒の被覆管外面での炉水の沸騰に伴ってその外面に析出することにより、被覆管外面に鉄酸化物の層が形成され、この鉄酸化物の層に炉水中のＣｏ－６０を$CoFe_2O_4$として閉じ込め、炉水のＣｏ－６０濃度を低減させている。同時に、炉水に含まれるＮｉ（II）イオンも、（２）式及び下記に示す（５）式の反応によって$NiFe_2O_4$として上記の鉄酸化物の層に閉じ込めることが出来る。

【００２６】

$$Fe_2O_3 + Ni^{2+} + H_2O = NiFe_2O_4 + 2H^+ \quad \cdots\cdots (5)$$

これにより、炉水のＮｉ（II）イオン濃度を低減させることが出来る。

【００２７】

前述した「炉水のＮｉ（II）イオン濃度が低いほど、マグネタイト皮膜のＣｏ－６０付着抑制効果を高めることが出来る」という新たな知見において、前述した炉水のＮｉ（II）イオン濃度の低減策を適用することが出来る。

【００２８】

以上に述べた検討結果を反映した、本発明の実施例を、以下に説明する。

【実施例１】

【００２９】

本発明の好適な一実施例である実施例１の原子力プラント構成部材の線量低減方法を、図１，図２及び図３を用いて説明する。本実施例は、原子力プラント構成部材の線量低減方法を原子力プラントであるＢＷＲプラントに適用した例である。

【００３０】

ＢＷＲプラントは、図２に示すように、原子炉１、タービン３、復水器４、再循環系、原子炉浄化系及び給水系等を備えている。原子炉格納容器１１内に設置された原子炉１は、炉心１３を内蔵する原子炉圧力容器（以下、ＲＰＶという）１２を有し、ＲＰＶ１２内にジェットポンプ１４を設置している。炉心１３には複数の燃料集合体（図示せず）が装荷されている。各燃料集合体は、核燃料物質で製造された複数の燃料ペレットを充填した複数の燃料棒を含んでいる。再循環系は、ステンレス鋼製の再循環系配管２２、及び再循環系配管２２に設置された再循環ポンプ２１を有する。給水系は、復水器４とＲＰＶ１２を連絡する給水配管１０に、復水ポンプ５、復水浄化装置６、低圧給水加熱器８、給水ポンプ７及び高圧給水加熱器９を、復水器４からＲＰＶ１２に向ってこの順に設置して構成される。水素注入装置１６が、復水器４と復水ポンプ５の間で給水配管１０に接続されている。復水浄化装置６をバイパスするバイパス配管（鉄注入配管）８２の両端が、給水配管１０に接続される。流量調節弁９０がバイパス配管８２に設けられる。原子炉浄化系は、再循環系配管２２と給水配管１０を連絡する浄化系配管２０に、浄化系ポンプ２４、再生熱交換器２５、非再生熱交換器２６及び炉水浄化装置２７を、上流から下流に向かってこの順に設置して構成される。浄化系配管２０は、炉水浄化装置２７の下流において、再生熱交換器２５に接続される。さらに、浄化系配管２０は、再循環ポンプ２１より上流で再循環系配管２２に接続される。開閉弁８９が設けられたサンプリング配管８５が、例えば、浄化系ポンプ２４の上流で、浄化系配管２０に接続される。原子炉１は、原子炉建屋（図示せず）内に配置された原子炉格納容器１１内に設置されている。サンプリング配管８５は再循環系配管２２に接続してもよい。

【００３１】

ＲＰＶ１２内の冷却水（以下、炉水という）は、再循環ポンプ２１で昇圧され、再循環系配管２２を通ってジェットポンプ１４のノズル（図示せず）からジェットポンプ１４のベルマウス（図示せず）内に噴出される。ノズルの周囲に存在する炉水も、ノズルから噴出される噴出流の作用により、ベルマウス内に吸引される。ジェットポンプ１４から吐出された炉水は、炉心１３に供給され、燃料棒内の核燃料物質の核分裂で発生する熱によって加熱される。加熱された炉水の一部が蒸気になる。この蒸気は、ＲＰＶ１２内に設けられた気水分離器（図示せず）及び蒸気乾燥器（図示せず）にて水分が除去された後に、ＲＰＶ１２から主蒸気配管２を通ってタービン３に導かれ、タービン３を回転させる。タービン３に連結された発電機（図示せず）が回転され、電力が発生する。

【００３２】
タービン３から排出された蒸気は、復水器４で凝縮され、水になる。この水は、給水として、給水配管１０を通りＲＰＶ１２内に供給される。給水配管１０を流れる給水は、復水ポンプ５で昇圧され、復水浄化装置６で不純物が除去され、給水ポンプ７でさらに昇圧され、低圧給水加熱器８及び高圧給水加熱器９で加熱される。抽気配管１５で主蒸気配管２，タービン３から抽気された抽気蒸気が、低圧給水加熱器８及び高圧給水加熱器９にそれぞれ供給され、給水の加熱源となる。
【００３３】
炉心に供給された炉水は、核燃料物質の核分裂に伴って発生する放射線の照射を受けて放射線分解を起こし、過酸化水素及び酸素などの酸化性化学種を生ずる。この酸化性化学種を含む炉水が構成部材と接触したとき、酸化性化学種の作用により構成部材の腐食電位が上昇する。このため、構成部材の応力腐食割れに対する環境緩和対策として、水素注入装置１６から給水配管１０内を流れる給水に水素を注入してＲＰＶ１２内の炉水にこの水素を供給する。この水素が炉水に含まれる酸化性化学種を反応することにより、炉水の酸化性化学種濃度が低減され、結果的に、構成部材の腐食電位が低下する。給水に水素を注入しながら行う原子炉の運転を水素注入水質運転（ＨＷＣ：Hydrogen Water Chemistry）、水素注入を行わない原子炉の運転を通常水質運転（ＮＷＣ：Normal Water Chemistry）と呼んでいる。
【００３４】
再循環系配管２２内を流れる炉水の一部は、浄化系ポンプ２４の駆動によって浄化系配管２０内に流入し、再生熱交換器２５及び非再生熱交換器２６で冷却された後、炉水浄化装置２７で浄化される。浄化された炉水は、再生熱交換器２５で加熱されて浄化系配管２０及び給水配管１０を経てＲＰＶ１２内に戻される。
【００３５】
ＢＷＲプラントは、１つの運転サイクルでの運転が終了した後に停止される。この運転停止後に、ＢＷＲプラントに対して定期検査が実施される。この定期検査が終了した後、ＢＷＲプラントが再度起動される。この定期検査の期間中において、炉心１３内の一部の燃料集合体が新燃料集合体と交換される。すなわち、炉心内の一部の燃料集合体が、使用済燃料集合体としてＲＰＶ１２から取り出され、燃焼度ゼロの新燃料集合体が炉心１３に装荷される。
【００３６】
ＢＷＲプラントの運転が停止されている定期検査の期間中において、フェライト皮膜の一種であるマグネタイト皮膜が、ＲＰＶ１２に接続された配管系（例えば、再循環系配管２２及び浄化系配管２０等）の炉水と接触する内面に形成される。このマグネタイト皮膜の配管系の内面への形成には、仮設の設備である皮膜形成装置３０が用いられる。皮膜形成装置３０の循環配管３５が、ＢＷＲプラントの運転が停止された後、皮膜形成対象物である、例えば、再循環系配管２２に接続される。皮膜形成装置３０は、マグネタイト皮膜の形成後、具体的には、マグネタイト皮膜の形成に使用した皮膜形成溶液に含まれた薬剤の処理が終了した後、ＢＷＲプラントの運転開始前に再循環系配管２２から取り外される。皮膜形成装置３０は、ＢＷＲプラントの運転が停止されている定期検査の期間中において、再循環系配管２２の内面に形成した放射性核種を含む酸化皮膜の溶解除去、及び酸化皮膜溶解除去後の配管内面へのマグネタイト皮膜の形成、及びこのマグネタイト皮膜の形成に使用された皮膜形成溶液（廃液）の処理に用いられる。
【００３７】
皮膜形成装置３０の詳細な構成を、図３を用いて説明する。サージタンク３１、循環配管３５、鉄（II）イオン注入装置８１、酸化剤注入装置８０、ｐＨ調整剤注入装置７９、フィルタ５４、加熱器５６、分解処理装置６７、カチオン交換樹脂塔６３及び混床樹脂塔６５を備えている。開閉弁５０、循環ポンプ５１、弁５２、加熱器５６、弁５８、５９、６０、サージタンク３１、循環ポンプ３２、弁３３及び開閉弁３４が、上流よりこの順に循環配管３５に設けられている。

【００３８】
配管６９が、弁５２をバイパスするように両端で循環配管３５に接続される。弁５３及びフィルタ５４が配管６９に設けられる。加熱器５６及び弁５８をバイパスする配管７０の両端が循環配管３５に接続され、冷却器６１及び弁６２が配管７０に設置される。両端が循環配管３５に接続されて弁５９をバイパスする配管７１に、カチオン交換樹脂塔６３及び弁６４が設置される。両端が配管７１に接続されてカチオン交換樹脂塔６３及び弁６４をバイパスする配管７２に、混床樹脂塔６５及び弁６６が設置される。
【００３９】
弁６８及び分解処理装置６７が設置される配管７３が、弁６０をバイパスして循環配管３５に接続される。分解処理装置６７は、内部に、例えば、ルテニウムを活性炭の表面に添着した活性炭触媒を充填している。弁３６及びエゼクタ３７が設けられる配管７４が、弁３３と循環ポンプ３２の間で循環配管３５に接続され、さらに、サージタンク３１に接続される。化学除染の対象となる配管（例えば、再循環系配管２２）の内面の汚染物を酸化溶解するための過マンガン酸、さらには配管内の汚染物を還元溶解するためのシュウ酸をサージタンク３１内に供給するためのホッパ（図示せず）がエゼクタ３７に設けられている。化学除染の対象となる配管は、皮膜形成対象の配管（例えば、再循環系配管２２）である。
【００４０】
鉄（II）イオン注入装置８１は、薬液タンク４７，弁４１，注入ポンプ４４及び注入配管７５を有する。薬液タンク４７は、注入ポンプ４４及び弁４１が設けられた注入配管７５によって循環配管３５に接続される。薬液タンク４７は、鉄をギ酸で溶解して調製した２価の鉄（II）イオンを含む薬剤（第１の薬剤）の水溶液が充填されている。この水溶液はギ酸を含んでいる。なお、鉄を溶解させる薬剤としては、ギ酸に限らず、鉄（II）イオンの対アニオンとなる有機酸または炭酸を用いることができる。
【００４１】
酸化剤注入装置８０は、薬液タンク４８，注入ポンプ４５，弁４２及び注入配管７６を有する。薬液タンク４８は、注入ポンプ４５及び弁４２が設置された注入配管７６によって循環配管３５に接続されている。薬液タンク４８には、酸化剤（第２の薬剤）である過酸化水素水溶液が充填されている。
【００４２】
ｐＨ調整剤注入装置７９は、薬液タンク４０，注入ポンプ３９，弁３８及び注入配管７７を有する。薬液タンク４０は、注入ポンプ３９及び弁３８が設置された注入配管７７によって循環配管３５に接続される。薬液タンク４０はｐＨ調整剤（第３の薬剤）であるヒドラジン水溶液を充填する。
【００４３】
弁５７を設けた配管７８が、注入配管７６に接続され、さらに、分解処理装置６７の上流で配管７３に接続される。サージタンク３１は、最初に、処理に用いられる水が充填されている。薬液タンク４７及びサージタンク３１には、それぞれの内部に存在する溶液に含まれる酸素を除去するために、窒素またはアルゴンなどの不活性ガスをその溶液内にバブリングする、またはタンクの気層部をパージする不活性ガス注入装置（図示せず）を接続することが好ましい。
【００４４】
酸化剤注入装置８０の注入配管７６と循環配管３５の第２接続点、及びｐＨ調整剤注入装置７９の注入配管７７と循環配管３５の第３接続点は、鉄（II）イオン注入装置８１の注入配管７５と循環配管３５の第１接続点よりも下流に配置され、皮膜形成対象箇所にできるだけ近い位置に配置することが好ましい。このように、鉄（II）イオン注入装置８１、酸化剤注入装置８０及びｐＨ調整剤注入装置７９が循環配管３５に接続されているので、鉄（II）イオン注入装置８１により循環配管３５に鉄（II）イオンを注入した後、酸化剤注入装置８０及びｐＨ調整剤注入装置７９のそれぞれの注入ポンプを起動することによって、循環配管３５内を流れる鉄（II）イオンを含む水溶液に酸化剤及びｐＨ調整剤を添

加することができる。ｐＨ調整剤注入装置７９の注入配管７７と循環配管３５の第３接続点よりも下流で、ｐＨ計８４が循環配管３５に設置される。

【００４５】

分解処理装置６７は、鉄（II）イオンの対アニオンとして使用する有機酸（例えば、ギ酸）、及びｐＨ調整剤であるヒドラジンを分解する。つまり、鉄（II）イオンの対アニオンとしては、廃棄物量の低減化を考慮して水及び二酸化炭素に分解できる有機酸、または気体として放出可能で廃棄物を増やさない炭酸を用いている。

【００４６】

皮膜形成装置３０を用いた本実施例の皮膜形成装置３０を用いて再循環系配管２２内にマグネタイト皮膜を形成し、形成されたマグネタイト皮膜のＣｏ－６０付着抑制効果を最大限引き出すために、本実施例では図１に示された各工程が実施される。本実施例におけるＢＷＲプラント構成部材の、炉水と接触する表面へのマグネタイト皮膜の形成は、ＢＷＲプラントの運転を停止した後の、例えば、ＢＷＲプラントの定期検査（保守点検）の期間内で行われる。

【００４７】

既設のＢＷＲプラントを対象に行われる本実施例の原子力プラント構成部材の線量低減方法を、図１に示す工程に基づいて、具体的に説明する。本実施例の原子力プラント構成部材の線量低減方法における、皮膜形成装置３０を用いた皮膜形成工程は、ＢＷＲプラントの運転が停止されている定期検査の期間中において行われる。

【００４８】

まず、皮膜形成対象物である配管系の内面に対して化学除染を実施する（ステップＳ１）。既設のＢＷＲプラントは、フェライト皮膜（例えば、マグネタイト皮膜）の形成を行う定期検査の前において、少なくとも１つの運転サイクルでの運転を経験している。この既設のＢＷＲプラントでは、ＲＰＶ１２内の炉水と接触する配管系（例えば、再循環系配管２２及び浄化系配管２０）の内面に、放射性核種を含む酸化皮膜が形成されている。配管系の表面線量率を低下させるためには、マグネタイト皮膜を形成する前に、皮膜形成対象物である配管系の内面から放射性核種を含む酸化皮膜を除去することが望ましい。マグネタイト皮膜は、放射性核種を含む酸化被膜の上ではなく、この酸化皮膜が除去され配管系の内面に直接形成する。ステップＳ１の一例は、化学的な処理によりその酸化皮膜を、皮膜形成対象物である配管系の内面から取り除く処理である。

【００４９】

ステップＳ１における化学除染を実施する場合には、皮膜形成装置３０が、皮膜形成対象物の配管系、例えば、再循環系配管２２に接続される。皮膜形成装置３０の再循環系配管２２への接続作業を説明する。

【００５０】

再循環系配管２２に接続された浄化系配管２０には弁２３が設けられている。この弁２３のボンネットを開放して浄化系配管２０の浄化系ポンプ２４側を閉鎖する。弁２３のフランジに循環配管３５の一端を接続する。循環配管３５の他端は、再循環ポンプ２１よりも下流で再循環系配管２２、例えば、再循環系配管２２に接続された枝管（ドレン配管または計装配管などを切り離した枝管）に接続される。このようにして、皮膜形成装置３０が再循環系配管２２に接続される。

【００５１】

ステップＳ１で実施する化学除染は、公知の方法（特開２０００－１０５２９５号公報参照）であるが、簡単に説明する。まず、開閉弁５０，弁５２，５８，５９，６０及び３３、及び開閉弁３４を開き、他の弁を閉じた状態で、循環ポンプ３２，５１を起動して、再循環系配管２２内にサージタンク３１内の水を循環させる。そして、加熱器５６によって加熱して、循環する水の温度を約９０℃まで昇温させる。エゼクタ３７に連絡されたホッパから供給された過マンガン酸カリウムが、弁３６を開くことによって配管７４内を流れる水により、サージタンク３１内に供給される。サージタンク３１内で、過マンガン酸カリウムにより酸化除染液が生成される。この酸化除染液は、循環配管３５を通って再循

環系配管２２内に供給され、再循環系配管２２の内面に形成されている酸化皮膜などの汚染物を溶解する。このようにして、再循環系配管２２の内面の酸化除染が行われる。

【００５２】

酸化除染終了後、酸化除染液に残留する過マンガン酸イオンは、上記のホッパからサージタンク３１に注入されるシュウ酸によって分解される。サージタンク３１内に更にシュウ酸を供給することによって還元除染液が生成される。還元除染液のｐＨ調整のため、弁３８を開いて薬液タンク４０からヒドラジンを循環配管３５内に供給する。ヒドラジンを含む還元除染液が、循環ポンプ３２により再循環系配管２２内に供給され、再循環系配管２２の内面に形成されている酸化皮膜等の汚染物を還元溶解する。還元除染時に、弁６４を開くと共に弁５９の開度を調整し、還元除染液の一部をカチオン交換樹脂塔６３に導く。再循環系配管２２の内面から還元除染液中に溶出してきた金属陽イオンが、カチオン交換樹脂塔６３内のカチオン交換樹脂に吸着され、除去される。

【００５３】

還元除染の終了後、弁６８を開いて循環配管３５内を流れる還元除染液の一部を分解処理装置６７に供給する。分解処理装置６７は、薬液タンク４８から配管７８を通して供給される過酸化水素、及び活性炭触媒の作用によって還元除染液に含まれるシュウ酸及びヒドラジンを分解する。シュウ酸及びヒドラジンの分解後、弁５８を閉じて加熱を停止し、除染液を冷却器６１で冷却して、例えば、６０℃まで低下させる。６０℃になった除染液が、弁６４を閉じて弁６６を開くことにより、混床樹脂塔６５に供給される。混床樹脂塔６５は、分解処理装置６７で分解されなかった、除染液に含まれる不純物を除去する。

【００５４】

皮膜形成対象物の表面にフェライト皮膜を形成する（ステップＳ２）。このでは、フェライト皮膜の一種であるマグネタイト皮膜の形成について説明する。

【００５５】

ステップ１の化学除染が終了した後、すなわち、皮膜形成装置３０による最後の浄化運転が終了した後、以下の弁操作が行われる。弁５３を開いて弁５２を閉じ、フィルタ５４への通水を開始する。弁５９を開いて弁６６を閉じることにより、混床樹脂塔６５への通水を停止する。さらに、弁６２を閉じ、弁５８を開いて加熱器５６によって循環配管３５内の水を所定温度まで加熱する。皮膜形成対象である再循環系配管２２に供給される皮膜形成水溶液の温度調整が行われる。弁５０，６０，３３，３４は開いており、弁３６，４１，３８，４２，５７，６２，６４，６６，６８は閉じている。加熱された皮膜形成水溶液は、循環配管３５及び再循環系配管２２により形成される閉ループの経路内を循環する。

【００５６】

フィルタ５４への通水は水中に残留している微細な固形物を除去するためである。この固形物が残留していると、皮膜形成対象箇所へのフェライト皮膜の形成の際に、その固形物の表面にもフェライト皮膜が形成され、薬剤が無駄に使用されることになる。上記の固形物の除去によって、皮膜形成水溶液（皮膜形成液）に含まれる薬剤を有効に使用できる。フィルタ５４への通水を除染中に実施した場合には、溶解した高い放射能の放射性核種を含む固形物によってフィルタ５４の線量率が高くなりすぎる恐れがある。このため、フィルタ５４への通水は除染終了後に行う。上記固形物の除去が終了した時点で、弁５２を開いて弁５３を閉じる。

【００５７】

皮膜形成水溶液の上記の所定温度は、１００℃程度が好ましいが、これに限定されない。要は原子炉の運転時に炉水に含まれる放射性核種が、皮膜形成対象箇所に生成されるフェライト皮膜に取り込まれない程度に、その皮膜の結晶等の膜構造が緻密に形成できればよいのである。したがって、皮膜形成水溶液の温度は少なくとも２００℃以下が好ましく、下限は常温（２０℃）でもよいが、フェライト皮膜の生成速度が実用範囲になる６０℃以上が好ましい。１００℃以上では皮膜形成水溶液の沸騰を抑制するため、加圧しなければならず仮設設備の耐圧性が要求されるようになり設備が大型化するため好ましくない。

皮膜形成水溶液の温度は、６０℃～１００℃の範囲の温度にすることが望ましい。皮膜形成水溶液の温度を２００℃以下にすることによって、皮膜形成対象の配管系、例えば、再循環系配管２２の炉水と接触する内面に緻密なマグネタイト皮膜を形成することができる。

【００５８】

皮膜形成対象箇所にマグネタイト皮膜を形成させるためには、鉄（II）イオンが皮膜形成対象物である、ＢＷＲプラントの構成部材の表面（例えば、再循環系配管２２の内面）に吸着される必要がある。しかし、皮膜形成水溶液に含まれる鉄（II）イオンは、（６）式に基づいて溶存酸素により鉄（III）イオンに酸化される。鉄（III）イオンは、鉄（II）イオンに比べて溶解度が低いため、（７）式の反応により水酸化第二鉄として析出してしまい、マグネタイト皮膜の形成に寄与しなくなってしまう。そこで、皮膜形成水溶液中の溶存酸素を除去するため、前述したように、不活性ガスのバブリング、真空脱気あるいは気層部のパージを行うことが好ましい。

【００５９】

$$4Fe^{2+} + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4Fe^{3+} + 4OH^- \quad \cdots\cdots (6)$$

$$Fe^{3+} + 3OH^- \rightarrow Fe(OH)_3 \quad \cdots\cdots (7)$$

循環配管３５内を循環する水の温度が所定温度（例えば、１００℃）に達した後、鉄（II）イオンを含む薬剤（水溶液）を循環配管３５内に注入する。すなわち、弁４１を開いて注入ポンプ４４を駆動し、鉄をギ酸で溶解して調製して得られた鉄（II）イオン及びギ酸を含む薬剤を、薬液タンク４７から循環配管３５内を流れる皮膜形成水溶液（最初の状態では、水）に注入する。酸化剤である過酸化水素を循環配管３５内に注入する。弁４２を開いて注入ポンプ４５を駆動することにより、薬液タンク４８内の過酸化水素水溶液が、注入配管７６を通して、循環配管３５内を流れる、鉄（II）イオンを含む皮膜形成水溶液に注入される。過酸化水素は、再循環系配管２２の内面に吸着された鉄（II）イオン、及び皮膜形成水溶液内の鉄（II）イオンを、鉄（III）イオンに酸化する。後者の鉄（II）イオンが鉄（III）イオンに酸化されることにより、皮膜形成水溶液は鉄（II）イオン及び鉄（III）イオンを含むことになる。続いて、ｐＨ調整剤であるヒドラジンを循環配管３５内へ注入する。弁３８を開いて注入ポンプ３９を駆動することによって、薬液タンク４０内のヒドラジン水溶液が、注入配管７７を通って、循環配管３５内を流れる、鉄（II）イオン、鉄（III）イオン及び過酸化水素を含む皮膜形成水溶液（皮膜形成液）に注入される。皮膜形成水溶液のｐＨが５．５～９．０の範囲内の値になるように、ヒドラジンの循環配管３５内への注入量が調節される。皮膜形成水溶液のｐＨが５．５～９．０の範囲内に調節されるため、マグネタイトが、鉄（II）イオン及び鉄（III）イオンに対する（８）式の反応により再循環系配管２２の内面に形成される。

【００６０】

$$Fe^{2+} + 2Fe^{3+} + 2H_2O = Fe(III)[Fe(II)Fe(III)]O_4 + 8H^+ \quad \cdots\cdots (8)$$

制御装置（図示せず）は、ｐＨ計８４によって計測された皮膜形成水溶液のｐＨ計測値に基づいて注入ポンプ３９の回転速度を制御し、循環配管３５内に注入するヒドラジンの注入量を調整する。この制御によって、皮膜形成水溶液のｐＨが５．５～９．０の範囲内に調節される。本実施例では、皮膜形成水溶液のｐＨが７．０に調節される。

【００６１】

循環ポンプ３２、５１が駆動されているので、ヒドラジン、鉄（II）イオン及び過酸化水素を含むｐＨが７．０で温度が１００℃の皮膜形成水溶液が、循環配管３５により、開閉弁３４を介して再循環系配管２２内に供給される。この皮膜形成水溶液と接触する再循環系配管２２の内面全面でマグネタイト皮膜の生成反応が生じ、その全面に亘ってマグネタイト皮膜が形成される。

【００６２】

その皮膜形成水溶液が、再循環系配管２２内を流れて、循環配管３５の開閉弁５０側へと戻される。戻された皮膜形成水溶液に、鉄（II）イオン及びギ酸を含む薬剤が薬液タン

ク４７から、過酸化水素が薬液タンク４８から、ヒドラジンが薬液タンク４０からそれぞれ注入される。この皮膜形成水溶液が再び再循環系配管２２内に導かれる。

【００６３】

皮膜形成対象の配管系の内面へのフェライト皮膜の形成が完了したかの判定が行われる。この判定は、フェライト皮膜の形成処理開始、すなわち、鉄（II）イオン及びギ酸を含む薬剤の注入が開始されて酸化剤及びｐＨ調整剤の注入が開始された後の経過時間で行われる。所定の時間、皮膜形成液を循環した後、循環を停止する。これによって、再循環系配管２２の内面へのマグネタイト皮膜の形成作業が終了する。

【００６４】

配管系の内面へのマグネタイト皮膜の形成作業が終了したとき、皮膜形成水溶液に含まれている薬剤の分解が実施される。再循環系配管２２の内面へのフェライト皮膜の形成に使用された皮膜形成水溶液は、フェライト皮膜の形成が終了した後においても、ヒドラジン及び有機酸であるギ酸を含んでいる。皮膜形成水溶液に含まれたヒドラジン及びギ酸は、還元除染剤であるシュウ酸の分解と同様に、分解処理装置６７で分解される。薬剤の分解処理では、弁６０，６８の開度を調整し、循環配管３５内の皮膜形成水溶液の一部を分解処理装置６７に供給する。弁５７を開くことにより、過酸化水素が、薬液タンク４８から配管７８を通して分解処理装置６７に供給される。ヒドラジン及びギ酸は、分解処理装置６７内で過酸化水素及び活性炭触媒の作用により分解される。ギ酸は（９）式の反応により二酸化炭素と水に、ヒドラジンは（１０）式の反応により窒素と水にそれぞれ分解する。

【００６５】

$$HCOOH + H_2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O \quad \cdots\cdots(9)$$

$$N_2H_4 + 2H_2O_2 \rightarrow N_2 + 4H_2O \quad \cdots\cdots(10)$$

薬剤の分解を実行している期間において、皮膜形成水溶液は、循環ポンプ３２、５１の駆動によって循環配管３５の一端から再循環系配管２２の一端に供給され、再循環系配管２２内を通って循環配管３５の他端に戻される。

【００６６】

分解処理装置６７に皮膜形成水溶液を供給する前に、弁５３を開けて弁５２を閉じ、皮膜形成水溶液をフィルタ５４に供給する。皮膜形成水溶液に含まれたマグネタイト粒子がフィルタ５４によって除去される。マグネタイト粒子の除去後、弁５９、６４の開度を調整して皮膜形成水溶液の一部をカチオン交換樹脂塔６３に供給する。皮膜形成水溶液に含まれる鉄（II）イオン及びヒドラジニウムイオンがカチオン交換樹脂塔６３によって除去される。皮膜形成水溶液に含まれているギ酸及びカチオン交換樹脂塔６３で除去し切れなかったヒドラジンの分解は、前述したように、分解処理装置６７を用いて行われる。

【００６７】

ヒドラジンとギ酸ではギ酸の方が分解し難いので、分解処理装置６７による薬剤の分解がある程度進むと、循環している皮膜形成水溶液のｐＨが低下し始める。この皮膜形成水溶液のｐＨが４以下になると、再循環系配管２２の内面に形成したフェライト皮膜が溶解する可能性が生じる。このため、ｐＨ計８４で計測されたｐＨの値が４以下にならないように、弁３８を開けて注入ポンプ３９を起動し、薬液タンク４０内のヒドラジンを皮膜形成水溶液に注入する。ヒドラジンを注入しながら残留したギ酸、注入したヒドラジンの分解を進めるとギ酸の濃度も徐々に下がってくるので、ｐＨ４を維持するヒドラジン注入量は徐々には少なくなる。ギ酸の濃度が少なくなって来るとヒドラジンを注入しなくてもｐＨ４以上を維持できるようになるので、最終的にはヒドラジン注入無しでギ酸の分解を行う。

【００６８】

ヒドラジン及びギ酸を分解処理装置６７で上記のように気体及び水に分解することによって、カチオン交換樹脂塔６４によるヒドラジン、及び混床樹脂塔６５によるギ酸の除去を大幅に低減できるので、これらのイオン交換樹脂の廃棄物量を著しく低減できる。

【００６９】

皮膜形成装置３０の、皮膜形成対象の配管系からの取り外しを行う。皮膜形成水溶液に含まれている薬剤の分解が終了した後、再循環系配管２２に連絡されている循環配管３５の両端が、浄化系配管２０、及び再循環系配管２２に接続された枝管から取り外される。浄化系配管２０に設けられたバルブ２８、及びその枝管等が元通りに復旧される。これにより、ＢＷＲプラントの運転が開始できる状態になる。再循環系配管２２の内面に形成されたフェライト皮膜は、ＢＷＲプラントの起動まで、そのままの状態に保たれる。

【００７０】

定期検査が終了した後、原子炉を起動する（ステップＳ３）。中央制御室に設置された操作盤に設けられた原子炉モードスイッチが起動に入れられ、炉心１３に挿入された複数の制御棒（図示せず）が順番に引き抜かれる。原子炉１のある運転サイクルにおける運転が開始される。制御棒の引き抜きの進行に伴って、やがて、原子炉１が臨界に達する。炉心１３に装荷された各燃料集合体に含まれた核燃料物質が核分裂を起こし、炉水の核加熱が開始される。原子炉の昇温昇圧が行われる。この昇温昇圧工程では、制御棒が炉心からさらに引き抜かれて核燃料物質の核分裂が増大し、炉水の温度が上昇して蒸気が発生する。昇温昇圧工程により、原子炉圧力が定格圧力まで上昇し、炉水温度も定格温度（例えば、２８０℃）まで上昇する。炉心１３では核燃料物質の核分裂によって中性子線及びガンマ線が発生する。中性子線及びガンマ線は炉水の放射線分解を誘発して、炉水中に過酸化水素及び酸素を生じさせる。昇温昇圧工程が終了した後、制御棒の引き抜き、及び炉心流量の増大によって、原子炉出力が定格出力（１００％出力）まで、上昇される。原子炉出力が定格出力に保持されて、原子炉の運転が継続される（ステップＳ４）。

【００７１】

炉水のＮｉ（II）イオン濃度の判定が行われる（ステップＳ５）。原子炉出力が定格出力なっている状態で、浄化系配管２０内を流れる炉水が、開閉弁８９を開き、サンプリング配管８５によって、所定の時間間隔で定期的にサンプリングされる。サンプリングされた炉水のＮｉ（II）イオン濃度が、分析装置８６によって測定される。測定されたＮｉ（II）イオン濃度が、設定値である１．２ｐｐｂ以下であるかが判定される。

【００７２】

ステップＳ５の判定結果が「ＮＯ」であるとき、すなわち、測定されたＮｉ（II）イオン濃度が１．２ｐｐｂよりも大きいと判定されたとき、給水への鉄酸化物の注入が行われる（ステップＳ６）。給水への鉄酸化物の注入は、バイパス配管８２を通して行われる。復水器４から給水配管１０に排出される給水は、復水器４で生じた腐食生成物である鉄酸化物を含んでいる。通常は、バイパス配管８２に設けられた流量調節弁９０を全閉状態にして、復水器４から給水配管１０に排出される給水の全量を復水浄化装置６に供給し、この給水に含まれた鉄酸化物を復水浄化装置６で除去している。このため、復水浄化装置６から排出された給水によりＲＰＶ１２内に持ち込まれる鉄酸化物の量は、実質的に皆無になる。

【００７３】

測定されたＮｉ（II）イオン濃度が１．２ｐｐｂよりも大きいと判定されたときには、運転員によって流量調節弁９０が開けられ、復水ポンプ５で昇圧された、鉄酸化物を含む給水の一部が、バイパス配管８２を通って、復水浄化装置６よりも下流で給水配管１０に導かれ、復水浄化装置６から流出した給水に混合される。このため、鉄酸化物が添加された給水が、給水配管１０により、ＲＰＶ１２内に導かれ、炉水に混合される。鉄酸化物を含む炉水が炉心に供給されたとき、この鉄酸化物が炉心に装荷された燃料集合体に含まれた各燃料棒の被覆管の外面に析出し、この外面に鉄酸化物層が形成される。炉心に供給された炉水に含まれるＮｉ（II）イオンが、炉心内の各燃料棒の外面（被覆管の外面）に形成された鉄酸化物層内の鉄酸化物と（２）式及び（５）式の反応を生じて鉄酸化物層に取り込まれ、鉄酸化物層に固定される。この結果、炉水のＮｉ（II）イオン濃度が低下する。

【００７４】

ＲＰＶ１２に供給される鉄酸化物の量は、流量調節弁９０の開度を制御することにより

、調節される。分析装置８６で測定された炉水のＮｉ（II）イオン濃度が１．２ｐｐｂよりも大きい状態では、測定された炉水のＮｉ（II）イオン濃度と１．２ｐｐｂの差（Ｎｉ（II）イオン濃度の１．２ｐｐｂからの増大値）が大きくなるほど、流量調節弁９０の開度を大きくして、バイパス配管８２を通過する給水量を多くしてＲＰＶ１２に導かれる鉄酸化物の量を増大させる。分析装置８６で測定した炉水のＮｉ（II）イオン濃度を制御装置に入力して、この制御装置が測定した炉水のＮｉ（II）イオン濃度に基づいて流量調節弁９０の開度を制御しても良い。

【００７５】

ステップＳ５の判定結果が「ＹＥＳ」であるとき、すなわち、測定されたＮｉ（II）イオン濃度が１．２ｐｐｂ以下であると判定されたとき、原子炉の運転を終了するかを判定する（ステップＳ７）。ステップＳ７では、原子炉１の運転期間がこの原子炉１が運転されている運転サイクルの期間に到達したかが判定される。原子炉１の運転期間がその運転サイクルの期間に到達したとき、この運転サイクルでの原子炉１の運転が終了したと判定され、ＢＷＲプラントの運転が停止される。ステップＳ７において、原子炉１の運転期間がその転サイクルの期間に到達しないと判定されたときには、ステップＳ４，Ｓ５及びＳ７の工程が繰り返されて実行される。繰り返されたステップＳ５において測定されたＮｉ（II）イオン濃度が１．２ｐｐｂよりも大きいと判定されたときには、ステップＳ６における給水への鉄酸化物の注入が、前述したように行われる。

【００７６】

本実施例によれば、再循環系配管２２の内面に形成されたマグネタイト皮膜の作用によって、ＢＷＲプラントの構成部材である再循環系配管２２の母材と炉水の接触が制限され、再循環系配管２２への放射性核種であるＣｏ－６０の付着が抑制される。更に、炉水のＮｉ（II）イオン濃度を１．２ｐｐｂ以下に抑制するので、再循環系配管２２の内面に形成されたマグネタイト皮膜そのものへのＣｏ－６０の付着も抑制できる。すなわち、本実施例によれば、炉水のＮｉ（II）イオン濃度を１．２ｐｐｂ以下に抑制しない場合において原子炉の運転中に再循環系配管２２の内面に形成されたマグネタイト皮膜に取り込まれる極微量のＣｏ－６０をさらに低減することができる。この結果、炉水のＮｉ（II）イオン濃度を１．２ｐｐｂ以下にすることによって、再循環系配管２２の表面線量率を、再循環系配管２２の内面にマグネタイト皮膜を形成した場合に比べてさらに低減することができる。

【００７７】

炉水のＮｉ（II）イオン濃度が１．２ｐｐｂよりも大きくなったときには、ＲＰＶ１２内の炉水に鉄酸化物を注入するため、この鉄酸化物により燃料棒の外面に形成される鉄酸化物層に、炉水に含まれるＮｉ（II）イオンを固定化することができる。したがって、炉水のＮｉ（II）イオン濃度を１．２ｐｐｂ以下に抑制することができる。

【００７８】

本実施例では、鉄（II）イオン、及び鉄（II）イオンを鉄（III）イオンに酸化する酸化剤を含むｐＨが５．５～９．０の範囲内にある皮膜形成水溶液（皮膜形成液）を、好ましくは、６０℃～１００℃の範囲内の温度に調節して、皮膜形成対象物である配管系（例えば、再循環系配管２２）の内面に接触させるので、その配管の内面に緻密なマグネタイト皮膜を形成することができる。

【００７９】

本実施例では、バイパス配管８２に設けた流量調節弁９０の開度を制御してＲＰＶ１２内の炉水に注入する酸化物の量を調節している。流量調節弁９０を設けたバイパス配管８２の替りに、復水浄化装置６の下流で給水配管１０に接続した鉄注入装置を設けても良い。炉水のＮｉ（II）イオン濃度が１．２ｐｐｂよりも大きくなったときには、その鉄注入装置から、復水浄化装置６の下流における給水配管１０に鉄酸化物を注入する。この結果、流量調節弁９０の開度を制御する場合と同様に、炉水のＮｉ（II）イオン濃度を低減することができる。

【００８０】

皮膜形成装置３０の循環配管３５の両端を浄化系配管２０に接続して、フェライト皮膜であるマグネタイト皮膜を浄化系配管２０の内面に形成してもよい。

【実施例２】

【００８１】

本発明の他の実施例である実施例２の原子力プラント構成部材の線量低減方法を、図５を用いて説明する。本実施例は、原子力プラント構成部材の線量低減方法を原子力プラントであるＢＷＲプラントに適用した例である。

【００８２】

本実施例における原子力プラント構成部材の線量低減方法は、実施例１において実施されるステップＳ１～Ｓ５及びＳ７の各工程が実施される。しかし、本実施例では、実施例１におけるステップＳ６において、給水への鉄注入の替りに、原子炉浄化系の処理容量の増加を行っている。

【００８３】

この原子炉浄化系の処理容量の増加を実現するＢＷＲプラントの構成を、図５を用いて説明する。図５に示すＢＷＲプラントは、実施例１の原子力プラント構成部材の線量低減方法が適用される図２に示されたＢＷＲプラントの原子炉浄化系に、浄化系配管２０Ａ、浄化系ポンプ２４Ａ、再生熱交換器２５Ａ、非再生熱交換器２６Ａ、炉水浄化装置２７Ａ及び開閉弁８３を追加した構成を有する。図５に示されたＢＷＲプラントの他の構成は図２に示されたＢＷＲプラントと同じである。

【００８４】

浄化系配管２０Ａの一端が、浄化系ポンプ２４より上流側の浄化系配管２０に接続され、浄化系配管２０Ａの他端が、再生熱交換器２５より下流側で、再生熱交換器２５で加熱された炉水を給水配管１０に導く浄化系配管２０に接続される。開閉弁８３、浄化系ポンプ２４Ａ、再生熱交換器２５Ａ、非再生熱交換器２６Ａ及び炉水浄化装置２７Ａが、上流から下流に向かってこの順番で浄化系配管２０Ａに設置されている。浄化系配管２０Ａは、炉水浄化装置２７Ａの下流において、再生熱交換器２５Ａに接続される。

【００８５】

分析装置８６で測定された炉水のＮｉ（II）イオン濃度が１．２ｐｐｂ以下である場合には、開閉弁８３が全閉されて浄化系ポンプ２４Ａが停止されており、炉水は浄化系ポンプ２４の駆動によって供給される炉水浄化装置２７で浄化される。このため、炉水に含まれるＮｉ（II）イオンは、炉水浄化装置２７で除去され、炉水浄化装置２７Ａで除去されない。

【００８６】

ステップＳ５で分析装置８６によって測定された炉水のＮｉ（II）イオン濃度が１．２ｐｐｂよりも大きいと判定されたとき、ステップＳ６において原子炉浄化系の処理容量の増加が行われる。測定された炉水のＮｉ（II）イオン濃度が１．２ｐｐｂよりも大きいとき、運転員が、制御装置（図示せず）に開閉弁８３の弁開指令及び浄化系ポンプ２４Ａのポンプ起動指令を入力する。制御装置は、弁開指令に基づいて開閉弁８３を開き、ポンプ起動指令に基づいて浄化系ポンプ２４Ａを起動する。再循環系配管２２から浄化系配管２０に流入した炉水は、駆動している浄化系ポンプ２４によって炉水浄化装置２７に供給されると共に、浄化系ポンプ２４Ａの駆動により浄化系配管２０Ａを通して炉水浄化装置２７Ａに供給される。これにより、炉水に含まれたＮｉ（II）イオンは、炉水浄化装置２７だけでなく炉水浄化装置２７Ａによっても除去される。

【００８７】

炉水浄化装置２７ＡによるＮｉ（II）イオンの除去能力は、炉水浄化装置２７によるＮｉ（II）イオンの除去能力と同じである。このため、炉水浄化装置２７及び２７Ａで炉水に含まれるＮｉ（II）イオンを除去することにより、炉水からＮｉ（II）イオンを除去する能力は、炉水浄化装置２７単独使用の場合に比べて２倍になる。炉水浄化装置２７及び２７Ａの使用により、炉水のＮｉ（II）イオン濃度は、炉水浄化装置２７単独使用の場合に比べて１／２に低下する。

【００８８】
炉水浄化装置２７及び２７Ａへの炉水の供給により、炉水のＮｉ（II）イオン濃度が１．２ｐｐｂ以下になったと、ステップＳ５で判定されたとき、運転員は、制御装置に弁閉指令及びポンプ停止指令を入力する。制御装置は、弁閉指令に基づいて開閉弁８３を全閉状態にし、ポンプ停止指令に基づいて浄化系ポンプ２４Ａを停止する。炉水の炉水浄化装置２７Ａへの供給が停止され、炉水は炉水浄化装置２７だけで浄化される。そして、ステップＳ７において、原子炉１の運転期間がこの原子炉１が運転されている運転サイクルの期間に到達したと判定されたとき、ＢＷＲプラントの運転が停止される。
【００８９】
本実施例は、実施例１で生じる各効果を得ることができる。
【００９０】
本実施例では、炉水浄化装置を並列に２系統設けているが、この炉水浄化装置を並列に３系統以上設けてもよい。
【００９１】
上記の制御装置が、分析装置８６で測定した炉水のＮｉ（II）イオン濃度を入力し、このＮｉ（II）イオン濃度が１．２ｐｐｂより大きくなったときに、上記したように、開閉弁８３を開き、浄化系ポンプ２４Ａを起動し、炉水浄化装置２７ＡによるＮｉ（II）イオンの除去によりそのＮｉ（II）イオン濃度が１．２ｐｐｂより大きい状態から１．２ｐｐｂ以下になったときに、開閉弁８３を全閉にし、浄化系ポンプ２４Ａを停止する制御を行ってもよい。
【実施例３】
【００９２】
本発明の他の実施例である実施例３の原子力プラント構成部材の線量低減方法を、図６及び図７を用いて説明する。本実施例は、原子力プラント構成部材の線量低減方法を原子力プラントであるＢＷＲプラントに適用した例である。
【００９３】
本実施例における原子力プラント構成部材の線量低減方法は、実施例１においてステップＳ５をステップＳ５Ａに替えている。実施例１で実施されるステップＳ１～Ｓ４，Ｓ６及びＳ７の各工程は、本実施例でも実施される。本実施例で実施されるステップＳ５Ａは、炉水のＮｉ（II）イオン濃度ではなく、ＢＷＲプラントの構成部材、例えば、配管の線量に基づいて、炉水への鉄酸化物の注入の要否を判定している。
【００９４】
本実施例の原子力プラント構成部材の線量低減方法を実現するＢＷＲプラントの構成を、図７を用いて説明する。図７に示すＢＷＲプラントは、実施例１の原子力プラント構成部材の線量低減方法が適用される図２に示されたＢＷＲプラントにおいて、サンプリング配管８５の替りに、放射線検出器８７及び信号処理装置８８を設けた構成を有する。図７に示されたＢＷＲプラントの他の構成は図２に示されたＢＷＲプラントと同じである。放射線検出器８７を、例えば、ＢＷＲプラントの構成部材である再循環系配管２２に設置する。信号処理装置８８は放射線検出器８７に接続される。
【００９５】
ステップＳ１～Ｓ４の各工程が本実施例でも実施される。放射線検出器８７は、再循環系配管２２から放射される放射線を検出し、放射線検出信号を信号処理装置８８に出力する。信号処理装置８８は、入力した放射線検出信号に基づいて再循環系配管２２の線量を求める。信号処理装置８８は、所定の時間間隔で周期的に求めた線量の経時変化、すなわち、再循環系配管２２の配管線量率の増加速度を求める。ステップＳ５Ａで得られた配管線量率の増加速度が１ｍＳｖ／ｈ／年よりも大きいと判定されたとき、ステップＳ６において、実施例１と同様な炉水への鉄酸化物の注入が行われる。
【００９６】
ステップＳ６における鉄酸化物の炉水への注入により、実施例１と同様に、炉水に含まれるＮｉ（II）イオンが燃料棒の外面に固定されて炉水のＮｉ（II）イオン濃度が低下す

る。これにより、マグネタイト皮膜によるＣｏ－６０付着抑制作用が回復され、再循環系配管２２の配管線量率の増加速度が１ｍＳｖ／ｈ／年以下に低下する。

【００９７】

ステップＳ５Ａにおいて再循環系配管２２の配管線量率の増加速度が１ｍＳｖ／ｈ／年以下であると判定されたときは、ステップＳ７の判定が実施例１と同様に行われる。すなわち、ステップＳ７において、原子炉１の運転期間がその転サイクルの期間に到達しないと判定されたときには、ステップＳ４，Ｓ５Ａ及びＳ７の工程が繰り返されて実行される。繰り返されたステップＳ５Ａにおいて得られた配管線量率の増加速度が１ｍＳｖ／ｈ／年よりも大きいと判定されたときには、ステップＳ６における給水への鉄注入が、前述したように行われる。原子炉１の運転期間がその運転サイクルの期間に到達したとき、ステップＳ７では、この運転サイクルでの原子炉１の運転が終了したと判定され、ＢＷＲプラントの運転が停止される。

【００９８】

本実施例も、実施例１で生じる各効果を得ることができる。

【００９９】

実施例２においてサンプリング配管８５の替りに放射線検出器８７及び信号処理装置８８を設けることにより、図５に示された、炉水浄化装置を並列に２系統設けているＢＷＲプラントにおいても、本実施例を適用することができる。ステップＳ５Ａにおいて、再循環系配管２２の配管線量率の増加速度が１ｍＳｖ／ｈ／年よりも大きいと判定されたときには、ステップＳ６において、実施例２と同様に、開閉弁８３を開き、浄化系ポンプ２４Ａを起動する。ステップＳ５Ａで、再循環系配管２２の配管線量率の増加速度が１ｍＳｖ／ｈ／年以下であると判定されたときには、開閉弁８３を全閉状態、浄化系ポンプ２４Ａを停止状態にする。

【実施例４】

【０１００】

本発明の他の実施例である実施例４の原子力プラント構成部材の線量低減方法を、図８を用いて説明する。本実施例は、原子力プラント構成部材の線量低減方法を原子力プラントであるＢＷＲプラントに適用した例である。

【０１０１】

実施例１～３は、いずれも、少なくとも１つの運転サイクルでの運転を経験したＢＷＲプラントにおいて、皮膜形成対象物である配管系の内面にフェライト皮膜を形成している。

【０１０２】

本実施例の原子力プラント構成部材の線量低減方法は、新設のＢＷＲプラントの配管系の内面にフェライト皮膜を形成する点で、前述の各実施例と異なっている。本実施例で用いられる皮膜形成装置は、実施例１で用いる皮膜形成装置３０において弁３６，５２，５３，５８，５９，６４，６６、配管７０～７２，６９，７４、エゼクタ３７、フィルタ５１、冷却器６１、カチオン交換樹脂塔６３及び混床樹脂塔６５を除去した構成を有する。本実施例で用いる皮膜形成装置の他の構成は皮膜形成装置３０と同じである。本実施例では、新設のＢＷＲプラントの建設が終了し、このＢＷＲプラントの試運転が開始される前に、その皮膜形成装置を用いて皮膜形成対象物であるプラント構成部材の表面に、図８に示すステップＳ２により、フェライト皮膜を形成する。このフェライト皮膜の形成を以下に説明する。

【０１０３】

まず、新設のＢＷＲプラントの建設が終了し、このＢＷＲプラントの最初の試運転が開始される前に、ステップＳ２において、本実施例で用いられる皮膜形成装置の循環配管３５の両端が、実施例１における皮膜形成装置３０と同様に、ＢＷＲプラントの再循環系配管２２に連絡される。新設のＢＷＲプラントでは、再循環系配管２２の内面に放射性物質が付着していないので、再循環系配管２２に対して化学除染を行う必要がない。このため、本実施例は、図１に示す手順のステップＳ１の化学除染を実施しないで、本実施例で用

いられる皮膜形成装置によりステップＳ２のフェライト皮膜の形成工程が実施される。

【０１０４】

この皮膜形成の工程が終了した後、実施例１で実行されたステップＳ３～Ｓ７の各工程が実施される。

【０１０５】

本実施例は、実施例１で生じる各効果を得ることができる。

【０１０６】

実施例２及び３のそれぞれを、新設のＢＷＲプラントに適用する場合には、実施例２及び３におけるステップＳ１の化学除染の工程を実施する必要はない。

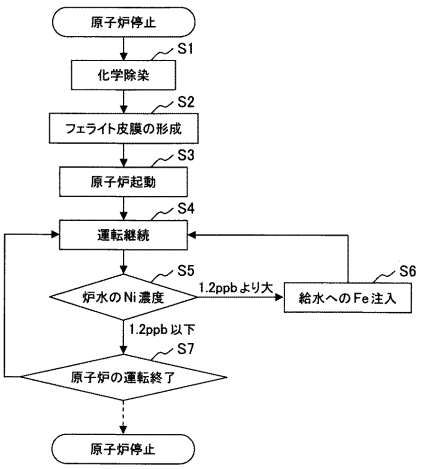
【符号の説明】

【０１０７】

１…原子炉、３…タービン、４…復水器、１０…給水配管、１２…原子炉圧力容器、１３…炉心、２０，２０Ａ…浄化系配管、２１…再循環ポンプ、２２…再循環系配管、２７，２７Ａ…炉水浄化装置、３０…皮膜形成装置、３１…サージタンク、３２，５１…循環ポンプ、３５…循環配管、３９，４４，４５…注入ポンプ、４０，４７，４８…薬液タンク、５４…フィルタ、５６…加熱器、６１…冷却器、６３…カチオン交換樹脂塔、６５…混床樹脂塔、６７…分解処理装置、７７…ｐＨ調整剤注入装置、８０…酸化剤注入装置、８１…鉄（II）イオン注入装置、８２…バイパス配管、８３…開閉弁、８４…ｐＨ計、８５…サンプリング配管、８６…分析装置、８７…放射線検出器、８８…信号処理装置。

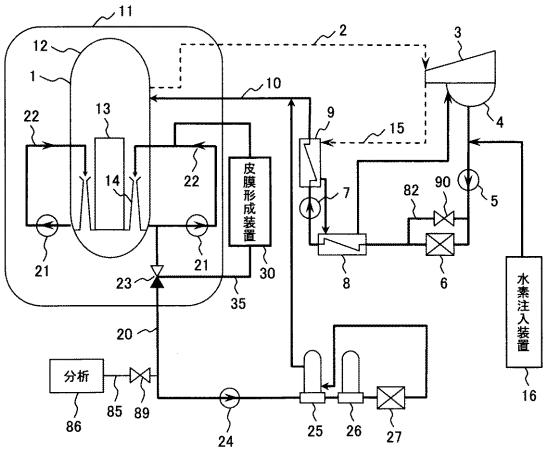
【図１】

図 1



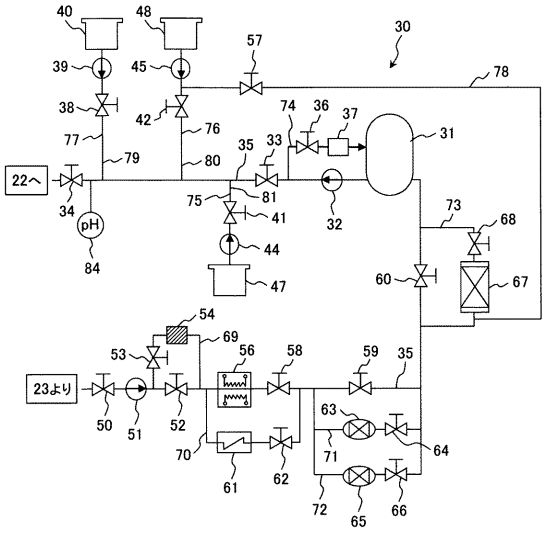
【図２】

図 2



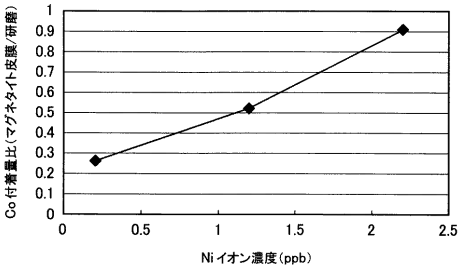
【図３】

図 3



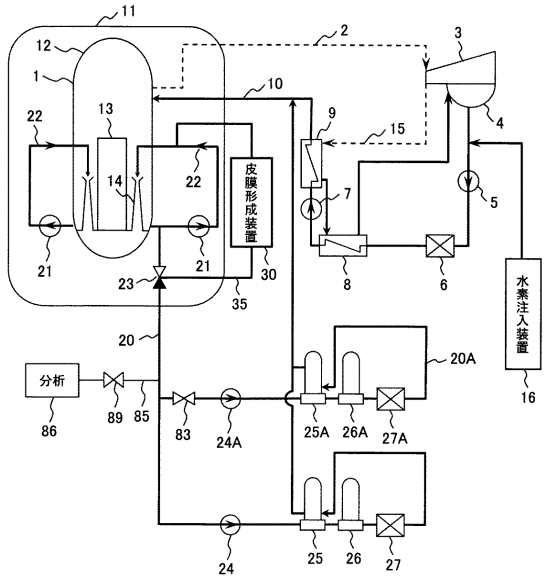
【図４】

図 4



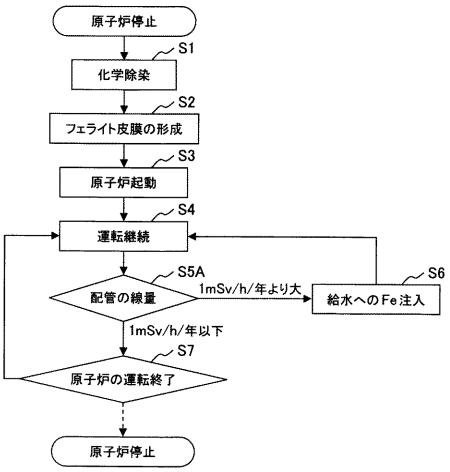
【図５】

図 5



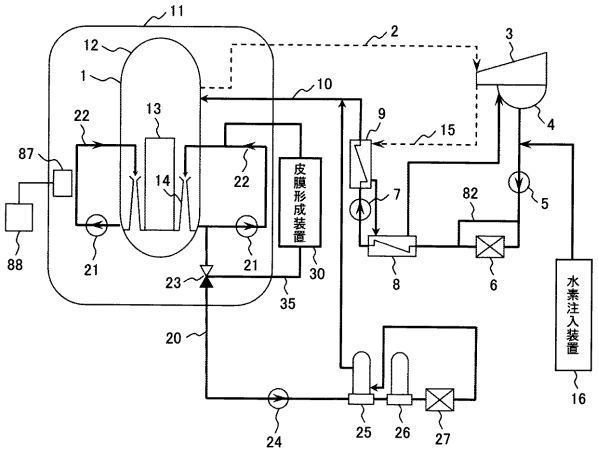
【図６】

図 6



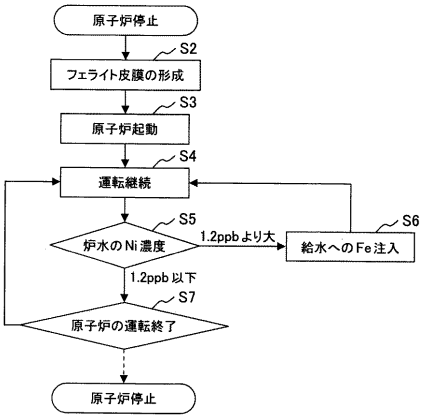
【図７】

図 7


11
12
1
2
3
10
22
13
9
15
4
87
14
22
皮膜形成装置
7
82
5
88
21
21
23
30
8
6
水素注入装置
35
20
16
24
25
26
27

【図８】

図 8


原子炉停止
S2
フェライト皮膜の形成
S3
原子炉起動
S4
運転継続
S5
炉水のNi濃度
1.2ppbより大
S6
給水へのFe注入
1.2ppb以下
S7
原子炉の運転終了
原子炉停止