

高浜発電所3号炉及び4号炉

蒸気発生器取替えの概要について

2023年4月

関西電力株式会社

枠囲みの範囲は機密情報を含んでいるため公開できません。

目 次

1. はじめに	1-1
2. 設計方針と設計改良項目	2-1
3. 取替用蒸気発生器の設計	3-1
3.1 構造の概要	3-1
3.2 設計の評価	3-7
3.3 改良設計の評価	3-8
4. 変更に伴うプラント性能及び他設備への影響について	4-1
4.1 プラント性能への影響	4-1
4.2 他設備への影響	4-1
5. 蒸気発生器取替工法の概要	5-1

1. はじめに

高浜発電所 3 号炉及び 4 号炉の蒸気発生器（以下「SG」という。）については、最新 3 ループプラントに準拠した最新設計の SG に取り替えることで、伝熱管の材質改善を図り、伝熱管の応力腐食割れ（以下、「SCC」という。）対策を行う。

以下に取替用 SG の設計の考え方について述べる。

2. 設計方針と設計改良項目

わが国の SG は第 2-1 図に示すように、これまでに主として 8 種類の伝熱管損傷を経験しているが、原因究明及び SG 取替えを含めた各種対策を講じた結果、現在の SG 伝熱管損傷に対する主要な課題は、SG 取替えを実施していない一部プラントの SG における管板拡管部・拡管境界部の SCC になっている。これに加え、高浜発電所 3 号炉及び 4 号炉の SG では、経年的に蓄積した伝熱管外面のスケールに起因した伝熱管の外面減肉を経験しており、長期的な信頼性を確保するという観点から、SG を取り替える。

取替用 SG には、伝熱管損傷防止のために先行プラントの SG で採用された各種損傷対策を取り入れることとし、国内外プラントで採用されている最新の設計を採用する。また、取替えにより、これまでに蓄積した外面減肉事象の原因となるスケールが一掃される。

なお、取替用 SG の設計に際しては、プラント性能に関わる基本条件は変えないものとして、現状 SG と同一の設計条件とする。

以下に、取替用 SG で採用する主な設計改良点を示す。

(1) 伝熱管材料の改良

特殊熱処理を施した ASME SB-163 ニッケル・クロム・鉄合金（以下「TT600 合金」という。）から、より耐食性に優れた特殊熱処理を施した原子力発電用規格ニッケル・クロム・鉄合金 690 (GNCF690CM)（以下「TT690 合金」という。）に変更する。

なお、伝熱管材料を変更することにより、伝熱管の熱伝導率が低下するが、伝熱面積を増加させることによってこれを補償し、取替え前と同等の伝熱性能を有するようになる。

(2) 振止め金具の改良

伝熱管 U 字部の流体力による振動を抑制するため、振止め金具を 2 本組から 3 本組にして伝熱管支持点数を増やし、支持状態の改善を図る。

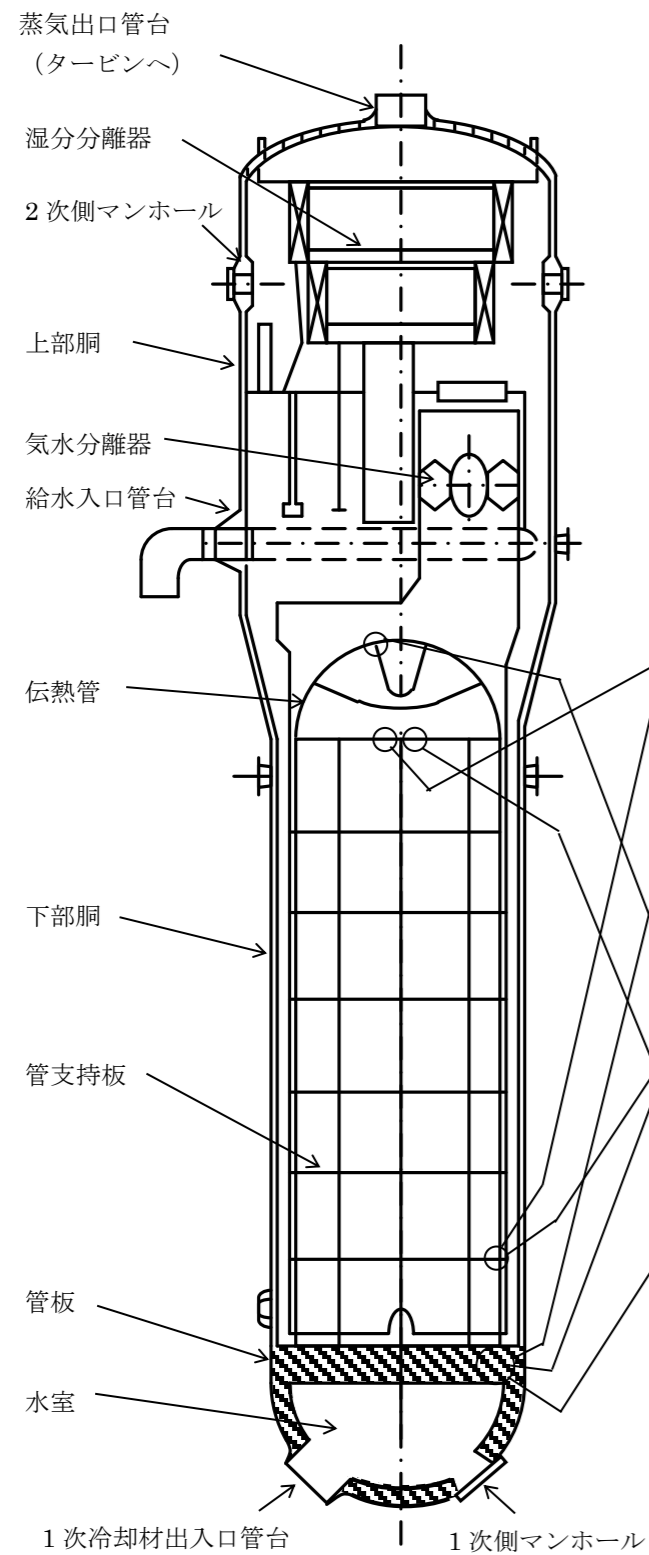
(3) 小型気水分離器及び一段型湿分分離器の採用

SG からの発生蒸気中の湿分をより一層低減するため、湿分除去性能に優れた小型気水分離器と一段型湿分分離器を組み合わせる使用することにより、SG からの発生蒸気中の湿分をより一層低減させ、主蒸気管やタービンの信頼性向上を図る。

(4) 給水内管へのスプレイチューブの採用

SG 器内への異物持込低減対策として、小径の穴を側面に空けたスプレイチューブを採用することにより、SG 器内への異物持込みの低減を図る。

以上の取替用 SG の主要設計改良項目を第 2-1 表に、振止め金具、気水分離器及び湿分分離器、給水内管給水口の取替前後の形状比較を第 2-2 図に示す。



(用語)

AVT (All volatile Treatment) : 全揮発性薬品処理

IGA(Inter Granular Attack) : 粒界腐食損傷

SCC(Stress Corrosion Crack) : 応力腐食割れ

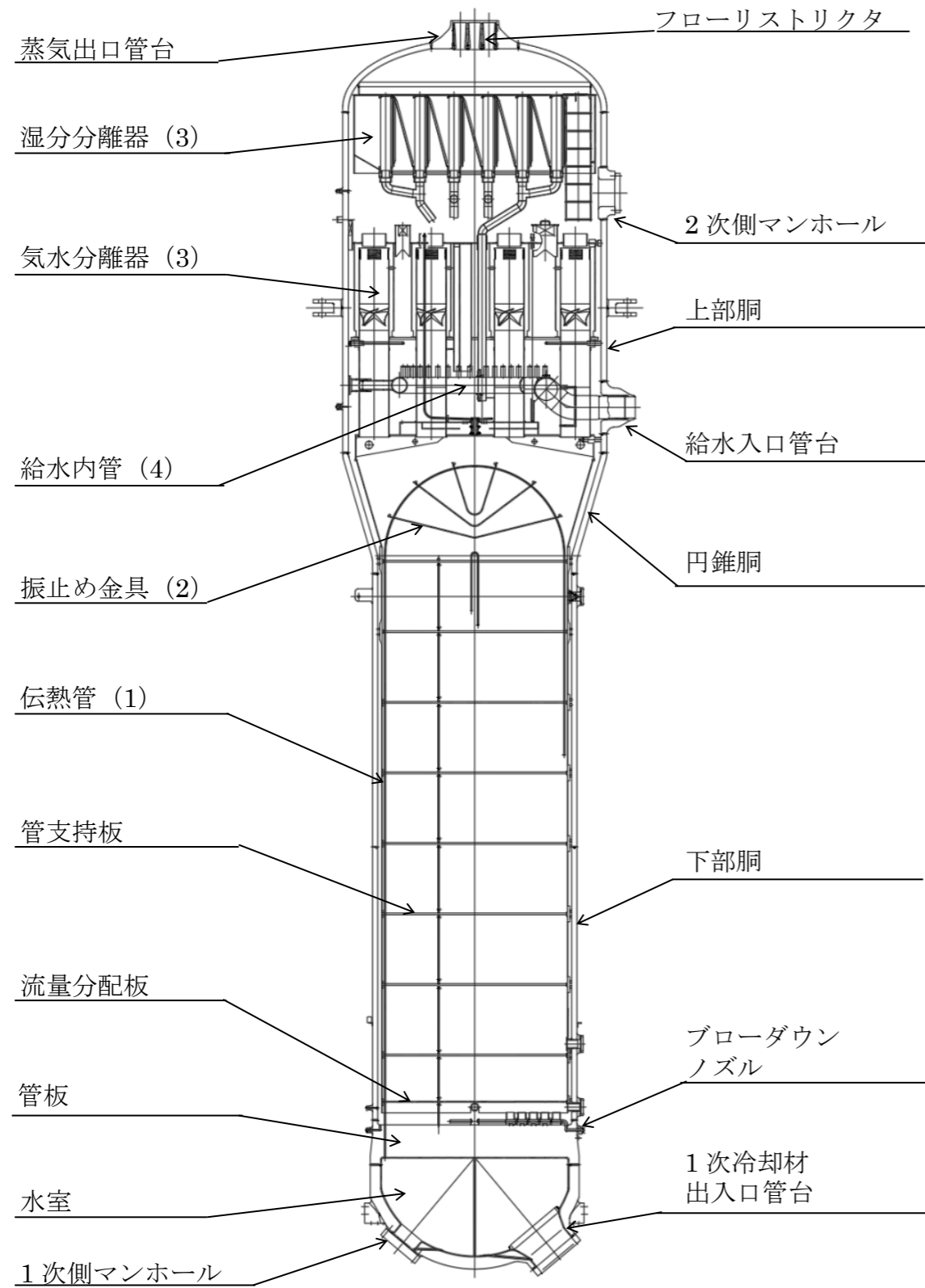
国内の損傷事例	
りん酸ナトリウムの濃縮による減肉 (2次側)	
環境支配型 残留ナトリウムによるクレビス部損傷 (2次側管板内)	
応力腐食割れ 残留応力による小曲げUベント部損傷 (1次側Uベント部)	
応力腐食割れ 拡管不良等に起因する残留応力による拡管部損傷 (1次側拡管部)	
残留ナトリウムによる管板上部及び管支持板クレビス部粒界腐食損傷 (2次側)	
混入塩分の濃縮によるピットティング (2次側)	
管列の不整列による、振止め金具部のフレットニング損傷 (2次側)	
振止め金具挿入不良による、最上段管支持板部の疲労損傷	
海外の損傷事例 (上記以外)	
管支持板の腐食によるデンテイング (2次側)	

黒部は今回の主な設計改良項目を示す。

蒸気発生器の設計改良	
伝熱管材料の改善 (TT690 合金材採用)	IGA 及び SCC に対する耐力増加
小曲げ U ベント部の応力除去焼鈍	U ベント部 SCC 防止
管支持板の材料改善 (SB42→SUS405)	デンテイング防止
管支持板の管穴形状改善 (丸穴→四つ葉型) (*1)	管支持板部クレビス損傷の防止
新拡管法の採用 液圧+全厚ローラ拡管 →液圧+1 ステップローラ拡管	拡管部の信頼性向上
2次側熱流動の改善 (流量分配板の設置、循環比の増加等)	スラッジ堆積部及びクレビス部損傷防止
振止め金具の改善 (隙間、本数、材料)	流体振動・摩耗の防止
品質保証活動の改善 教育、設計、製作、調達、試験及び検査を通しての体系的な品質保証システムの確認	
2次系水処理方法の改善	
AVT 処理	ヒドラジン濃度の変更 (高ヒドラジン運転) アンモニア濃度の増加 (高 pH 処理) 腐食雰囲気低減
復水脱塩装置の設置	不純物等の持込防止

(*1) 高浜 3/4 号炉は現状四つ葉型であるが、耐震性向上のため改良四つ葉型に変更する。

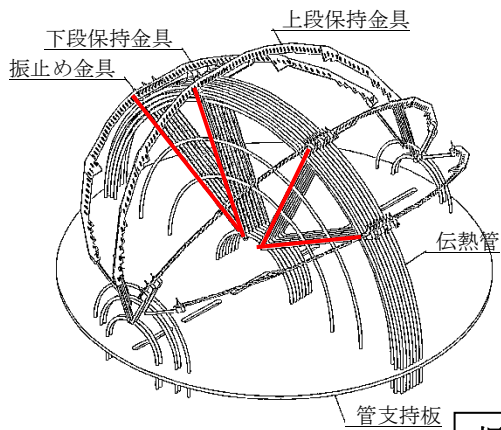
第 2-1 図 SG 伝熱管の損傷事例と対策



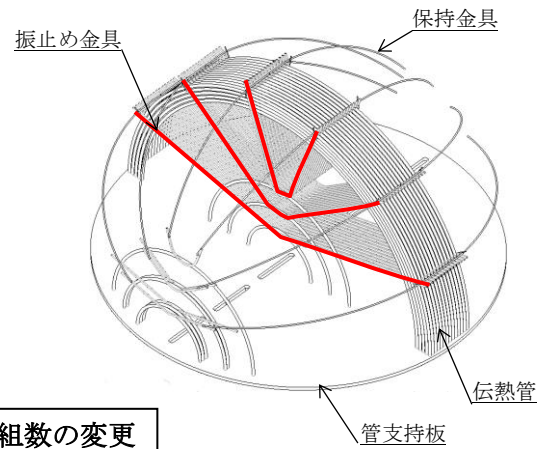
取替用 SG 全体組立図

	項目	改良要求	取替用 SG 設計対応
(1)	伝熱管材料の改良	IGA 及び SCC に対する耐力増加 (耐食性の向上)	より耐食性に優れた TT690 合金を使用する。
(2)	振止め金具の改良	伝熱管 U 字部の流体力による振動の抑制	振止め金具の組数を 2 本組から 3 本組にして、伝熱管の支持点を増やす。
(3)	小型気水分離器及び一段型湿水分離器の採用	SG 出口蒸気湿分の低減 (SG 出口側機器への湿分影響の緩和)	湿分除去性能に優れた小型気水分離器と一段型湿水分離器を組み合わせ使用する。
(4)	給水内管へのスプレイチューブの採用	器内への異物持込低減	J チューブから給水口径が小径化されるスプレイチューブを使用する。

第 2-1 表 取替用 SG の主要設計改良項目



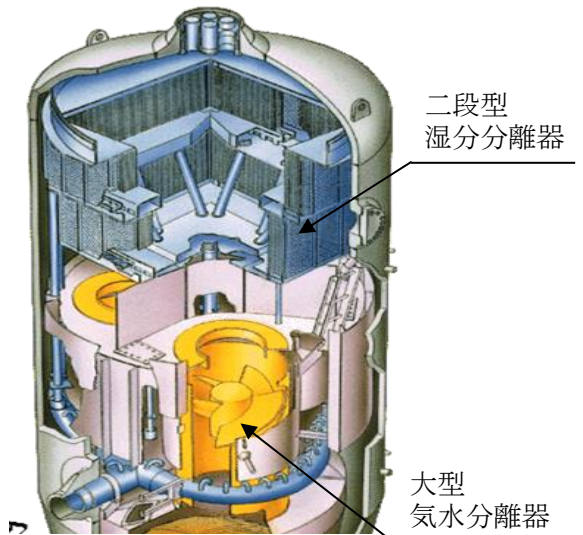
現状 SG



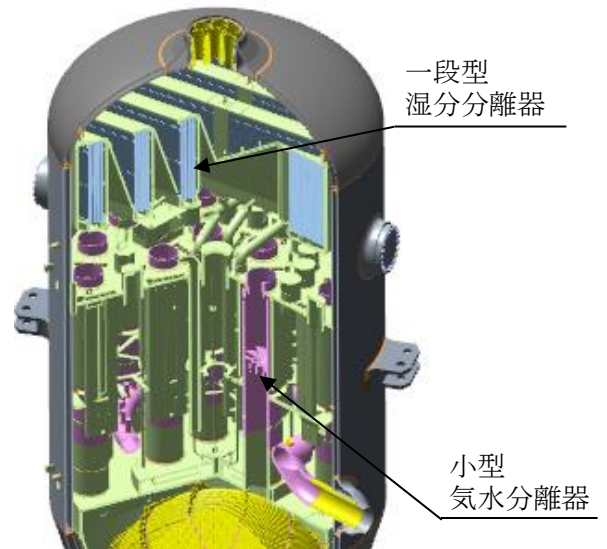
取替用 SG

振止め金具の組数の変更
2本組→3本組

(a) 振止め金具

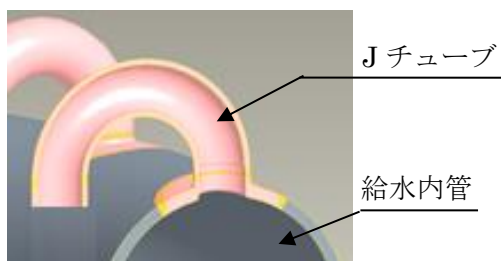


現状 SG

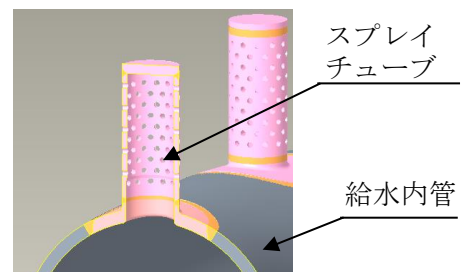


取替用 SG

(b) 気水分離器及び湿分分離器



現状 SG



取替用 SG

(c) 給水内管給水口

第 2-2 図 現状 SG と取替用 SG の主要な改良項目の比較

3. 取替用蒸気発生器の設計

3.1 構造の概要

高浜発電所 3 号炉及び 4 号炉の取替用 SG については、プラント性能に関わる基本条件は変えないが、TT690 合金伝熱管採用による熱伝導率の低下を伝熱面積の増加によって補償する。また、湿分除去性能の向上のために小型気水分離器及び一段型湿分分離器を採用する。この結果、現状の 51F 型 SG に対し、取替用は 54FⅡ型 SG となる。

54FⅡ型 SG は、この伝熱面積の増加を伝熱管長の延長によって行うため、取替用 SG (54FⅡ型 SG) の高さは、取替え前 (51F 型 SG) より若干高くなる。

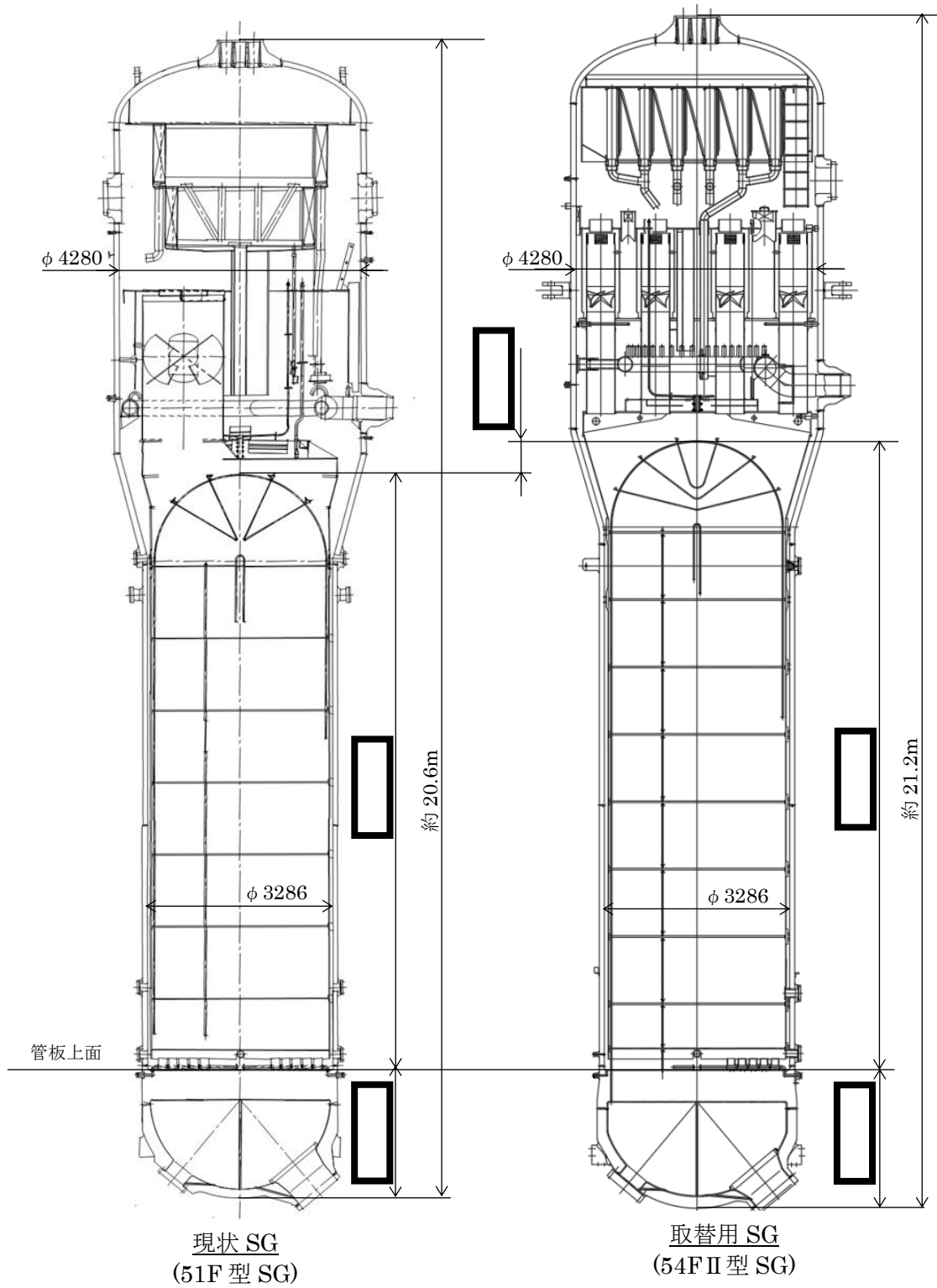
なお、54FⅡ型のベースとなる 54F 型 SG は、高浜 1 号炉、美浜 3 号炉、大飯 2 号炉、伊方 1 号炉、玄海 2 号炉、伊方 2 号炉、川内 1 号炉及び川内 2 号炉の取替用 SG、泊 3 号炉の建設 SG に採用された国内最新型 SG であり、また、小型気水分離器及び一段型湿分分離器は美浜 1 号炉の取替用 SG 他に採用されており、これらプラントでの良好な運転実績等から、高浜発電所 3 号炉及び 4 号炉の取替用 SG に 54FⅡ型 SG を採用することは妥当なものとする。

現状 SG と取替用 SG との主要仕様の比較を第 3-1 表に、主要構造・材料の比較を第 3-2 表に、SG 形状比較図を第 3-1 図に示す。

第 3-1 表 現状 SG と取替用 SG の主要仕様の比較

	現状 SG	取替用 SG
SG 型式	51F 型	54FII 型
蒸気流量	1,737 ton/h/1 基当り	同 左
蒸気圧力	5.44 MPa・abs	同 左
熱出力	887 MWt/1 基当り	同 左
1 次冷却材流量	15.2×10 ⁶ kg/h/1 基当り	同 左
伝熱能力		
熱貫流率		
1 次側圧損		
1 次冷却材体積		
2 次側保有水量		

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第 3-1 図 SG 形状比較図

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

次に取替用 SG の機能を述べる。

各 1 次冷却材回路に、たて置 U 字管式の SG を 1 基ずつ設け、各 SG はタービンを全出力運転するのに必要な蒸気流量の約 1/3 ずつを供給する。

SG は、1 次側水室、U 字形伝熱管、2 次側蒸発部及び気水分離部から構成されている。

1 次冷却材は、1 次冷却材入口管台から SG 下部の入口水室に入り、伝熱管 (U 字管) を経て出口水室に至り、1 次冷却材出口管台から出る。出入口両水室は仕切板で分離している。

SG 2 次側への給水は、伝熱管上端のすぐ上の位置から給水管を通じて行い、給水は、伝熱管外筒と胴の間の円環水路を再循環水と混合しながら下降した後、管板上面で方向を変えて、伝熱管束の間を上昇しながら 1 次冷却材との熱交換により加熱され、一部が蒸気となる。

次に、上昇する蒸気と水の混合物は、気水分離器に入り、スワールベーンを通過して蒸気と飽和水に分離され、飽和水は再循環水として、再び給水とともに下方に向かって循環する。次に蒸気は、湿水分離器を通過し、通常の負荷で湿分 0.25wt% 以下の蒸気となる。湿水分離器を出た蒸気は、蒸気出口管台部に設けられた流量制限器 (フローリストラクタ) を通り、主蒸気管を通してタービンへ供給される。フローリストラクタは、主蒸気流量検出のための差圧取出しを目的とするが、さらに主蒸気管破断時には過剰な蒸気流出を抑制する。

SG 伝熱管は U 字形細管であり、管板に取り付け、シール溶接される。

伝熱管の直管部は 8 枚の管支持板で支持し、U 字部は振止め金具で支持される。管支持板はステンレス製の鋼板であり、管支持板と伝熱管との隙間部での不純物の濃縮を抑制するため、管穴形状は四つ葉型としている。

伝熱管の振止め金具は、伝熱管の U 字部の流体力による振動を抑制するものである。

伝熱管の振止め金具は、長方形の断面を持つ V 字型ステンレス製の棒鋼であり、これは伝熱管の間に所定の深さまで挿入される。この振止め金具は、伝熱管との接触に際して線接触となるので、接触力が分散されて点接触のような局所的な接触力を与えない。また、接触部分は線状なので、伝熱管との間隙に蒸気が停滞することはない。

振止め金具は保持金具に溶接され、保持金具は抜け出すことがないように、最外周列の伝熱管を抱き込む形に取り付けられる。また、振止め金具及び保持金具は、伝熱管には溶接されない。

SG 本体は、低合金鋼製で、1 次冷却材と接する水室内面はステンレス鋼、管板はニッケル・クロム・鉄合金で内張りされる。伝熱管には、耐食性に優れている TT690 合金が用いられる。

SG は、供用期間中検査において内面の検査が可能なように、1 次側、2 次側ともにマンホールを設け、渦流探傷試験による伝熱管の検査等が可能な構造としている。SG

の溶接部の供用期間中検査範囲に対して、保温材は取り外し可能な構造としている。

製作中及び供用期間中において、SG 本体については超音波探傷試験等により、また伝熱管については渦流探傷試験等により、その健全性が確認される。さらに、製作中の振止め金具の挿入状態についても、据付検査により確認される。

SG 2 次側の水質管理は、腐食抑制のため溶存酸素、塩素等の含有量の制限及び pH 調整を実施することとしている。

また、SG 2 次側の水質管理を行うために、管板の直上に設ける 2 個のブローダウンノズルから必要に応じて連続、又は間欠的にブローダウン設備へブローする。

3.2 設計の評価

(1) 熱交換・熱除去

取替用 SG は、定格出力運転時において必要な熱伝達能力を持った伝熱面積を有することにより、1 次冷却材から 2 次側への適切な熱交換ができる設計とすることとしている。また、取替用 SG の伝熱面積は、原子炉停止後の 1 次冷却材からの適切な熱除去ができる十分な余裕を有することとしている。

(2) 構造強度

SG は、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び事故時の荷重の組合せに対して必要な強度及び機能を有する設計とすることとしている。

また、SG は S クラスとし、敷地の解放基盤表面における水平方向及び鉛直方向の地震動として策定される基準地震動 S_s に基づいた動的解析から求まる地震力に対して安全機能が保持されることを確認することとしている。また、弾性設計用地震動 S_d による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方の地震力に耐えられる設計とする。

(3) 材料選定

SG は、圧力、温度等の種々の厳しい条件下で安全機能を維持できる材料を選定することとしている。

(4) 試験検査

SG は、その健全性を確認するために、1 次側及び 2 次側ともにマンホールを設け、供用期間中検査ができる設計としている。また、保温材は溶接部の供用期間中検査ができるように取り外し可能な構造とすることとしている。

上記の設計は、安全設計審査指針及び技術基準に基づくこととしており、妥当なものとする。

3.3 改良設計の評価

(1) 伝熱管材料の改良

現状の伝熱管材料は、TT600 合金であるが、最新プラント同様に、より耐食性に優れた TT690 合金を採用する。この TT690 合金は、塩化物イオン、アルカリ、酸、純水いずれの環境下でも優れた耐食性を有しており、大飯 3 号炉及び 4 号炉以降の建設プラントや取替用 SG の伝熱管材料に採用されている。また、SG 伝熱管補修用のプラグ材料としても採用されている。

これらのプラントでの近年の良好な運転実績等から、この設計（材料）は妥当なものとする。

(2) 振止め金具の改良

伝熱管の耐流動振動性を向上するため最新プラント同様に、新型振止め金具を採用する。新型振止め金具は組数を 2 組から 3 組に増加させ、伝熱管の支持点を増やし支持状態が改善されており、大飯 3 号炉及び 4 号炉以降の建設プラントや取替用 SG に採用されている。新型振止め金具は、現状 SG で取替えた改良型振止め金具と同等の性能を有する。

これらのプラントでの近年の良好な運転実績等から、この設計は妥当なものとする。

a. 振止め金具の本数及び挿入深さ

振止め金具の組数を 2 組から 3 組に増加させ、かつ、現状の SG に比べ下部振止め金具をより深い位置まで挿入するので、流力弾性振動発生に対し大きな余裕を有している。

b. 振止め金具の断面形状

過去に伝熱管摩耗損傷を生じた振止め金具に比べ、幅・厚さを大きくして公称隙間を小さくすることにより、支持状態が改善されると共に、伝熱管への押付け面圧が軽減されている。

なお、振止め金具の材料としては、現状 SG で取替えた改良型振止め金具と同じ耐摩耗性を有するフェライト系ステンレス鋼（SUS405）が採用されている。

(3) 小型気水分離器及び一段型湿分分離器の採用

現状の SG は大型気水分離器を採用しているが、取替用 SG はタービン等の SG の下流側設備への腐食環境の低減のために、小型気水分離器を採用する。気水分離器径を小径化することで遠心力を増加させることにより湿分除去性能を向上させることができる。また、湿分除去性能を向上させた波型流路のベーンを採用し、また配置を改善することで全高を抑えた一段型湿分分離器を採用する。

この設計は、美浜 1 号炉取替用 SG 他に採用されており、その運転実績等から、妥当なものとする。

(4) 給水内管へのスプレイチューブの採用

現状の SG は、給水内管から器内への給水口には J チューブを採用しているが、SG 外から 2 次側器内への異物持込低減対策として、チューブ側面に J チューブの内径よりも十分に小さい径の多孔穴を有するスプレイチューブを採用する。この設計は、美浜 1 号炉取替用 SG に採用されており、その運転実績等から、妥当なものとする。

4. 変更に伴うプラント性能及び設備への影響について

4.1 プラント性能への影響

以下のプラント性能に関わる条件については SG 取替前後で変えない設計としている。

- ・ 胴側最高使用圧力
- ・ 管側最高使用圧力
- ・ 1 次冷却材流量
- ・ 主蒸気運転圧力（定格出力時）
- ・ 主蒸気運転温度（定格出力時）
- ・ 蒸気発生量（定格出力時）

4.2 他設備への影響

(1) 1 次冷却設備への影響

SG の取替えに際して、1 次冷却材管を切断し、溶接にて復旧する。この復旧に際しては、関係法令、規格、基準等に準拠して行い、原子炉冷却材圧力バウンダリの健全性を確保する。

以上より、1 次冷却設備への影響はない。

(2) 主蒸気・主給水管への影響

SG の取替えに際して、主蒸気・主給水管を切断し、切断部は、すべて新管を使用し溶接にて復旧する。この復旧に際しては、関係法令、規格、基準等に準拠して行い、主蒸気・主給水系統の健全性を確保する。

以上より、主蒸気・主給水管への影響はない。

(3) 建屋構造への影響

SG の取替えに際して、SG 全高が取替え前より若干高くなり、SG 側の主給水管台位置が上方に移動することから、SG 壁を貫通している主給水管貫通部（スリーブ）の位置を変更する。

この主給水管貫通部位置変更による建屋構造への影響については、関係法令、規格、基準等に準拠して行い、建屋構造の健全性を確保する。

以上より、建屋構造の健全性への影響はない。

(4) 蒸気発生器支持構造物への影響

蒸気発生器支持構造物は、上部支持構造物、中間胴支持構造物、下部支持構造物により構成されている。SG の取替えに際して、支持構造物との取合部は支持構造

物側で適切に調整（設置）するため、支持構造物に要求される機能に影響はない。

この蒸気発生器支持構造物の調整（設置）に際しては、関係法令、規格、基準等に準拠して行い、蒸気発生器支持構造物の健全性を確保する。

以上より、蒸気発生器支持構造物の健全性への影響はない。

5. 蒸気発生器取替工法の概要

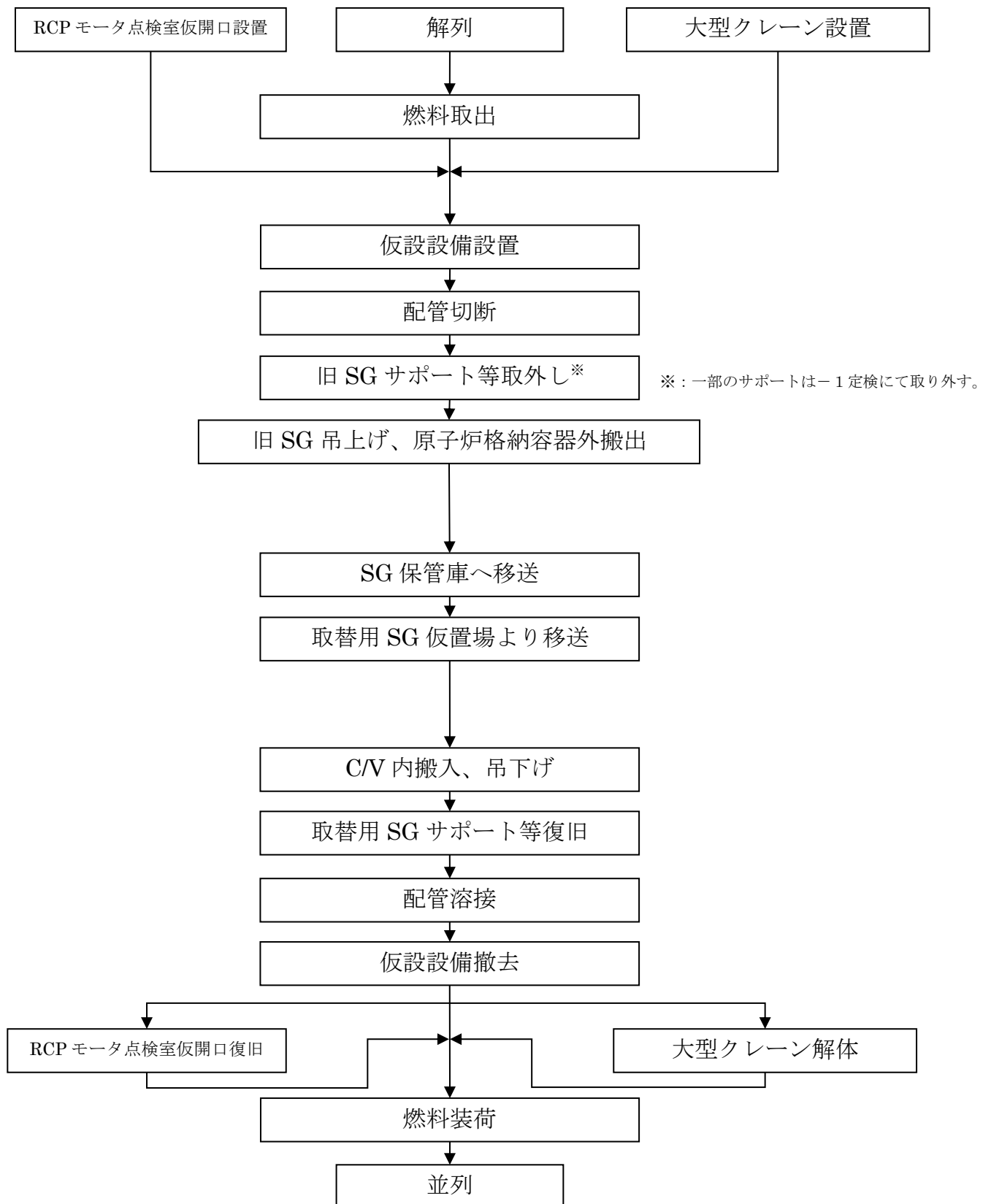
SG の取替期間中、炉心内の全燃料を取出し、使用済み燃料ピットに保管する。

旧 SG は、SG に接続している 1 次冷却材管、主蒸気・主給水管及び計装配管等を切断し、「原子炉格納容器」(以下、「C/V」という。)の既設機器搬入口及び 1 次冷却材ポンプ(以下「RCP」という。)モータ点検室仮開口を利用して搬出する。なお、新 SG の据付け・溶接作業時の被ばく低減のため、1 次冷却材管内面を除染する。

旧 SG 取替え時は、C/V 内では既設ポーラクレーンの容量・揚程が不足するため、ポーラクレーンのガーダ上へ仮設揚重設備(ワイヤージャッキトロリ)を設置して吊り上げ搬出する。C/V 外においては、仮設大型クレーンを設置して旧 SG を吊り上げ、移送車両への積載を行う。旧 SG は、移送車両により SG 保管庫へ搬入し貯蔵保管する。

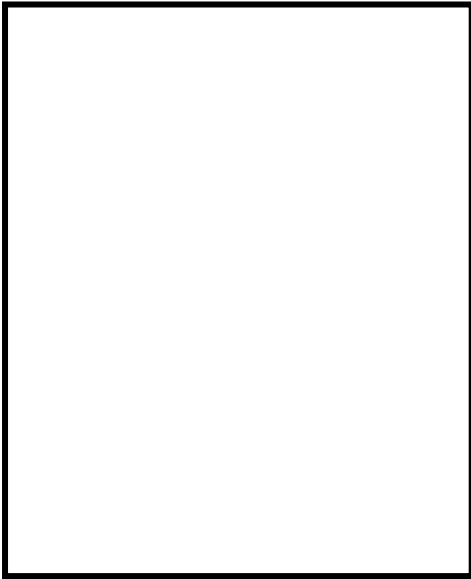
新 SG は、旧 SG 搬出の逆手順にて RCP モータ点検室仮開口から C/V 内に搬入し、第 5-1 図の手順に基づき据え付けたのち、支持構造物等を復旧する。

SG 取替手順の概略を第 5-1 図に、SG 取替工法概念を第 5-2 図に示す。

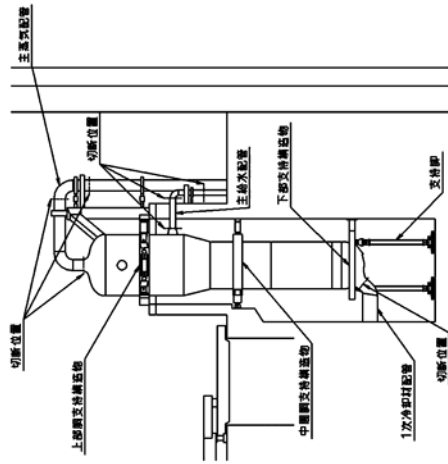


第 5-1 図 SG 取替手順図

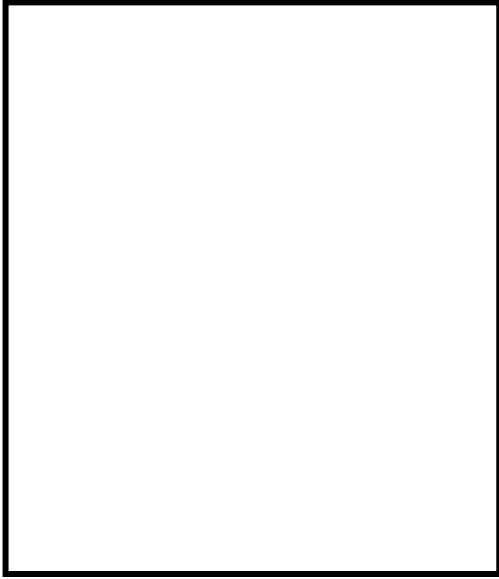
1. 仮設備設置



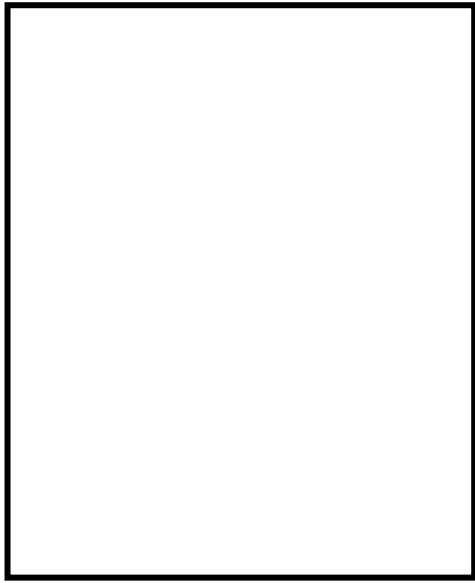
2. 配管切断・支持構造物撤去



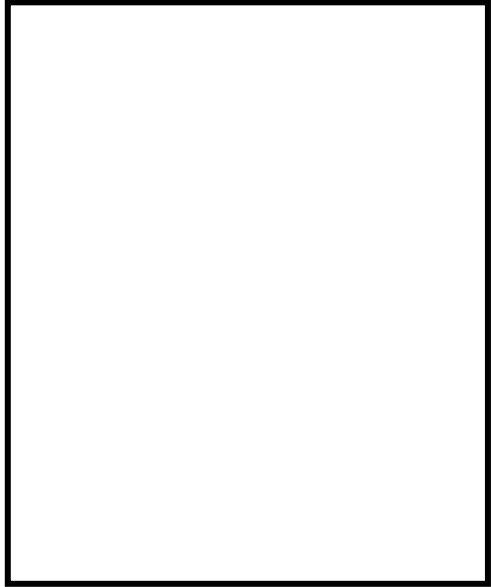
3. 旧蒸気発生器吊上げ



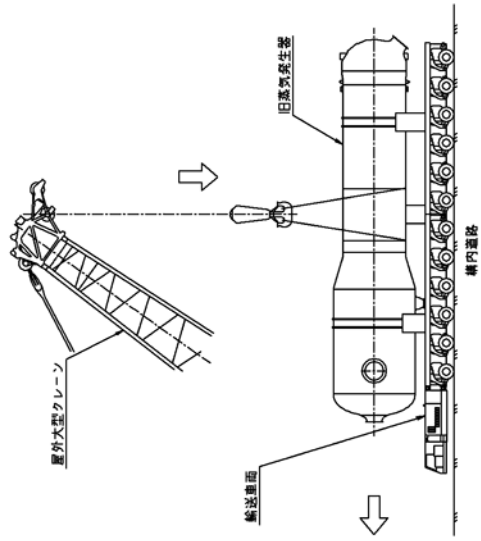
4. 旧蒸気発生器反転



5. 旧蒸気発生器搬出

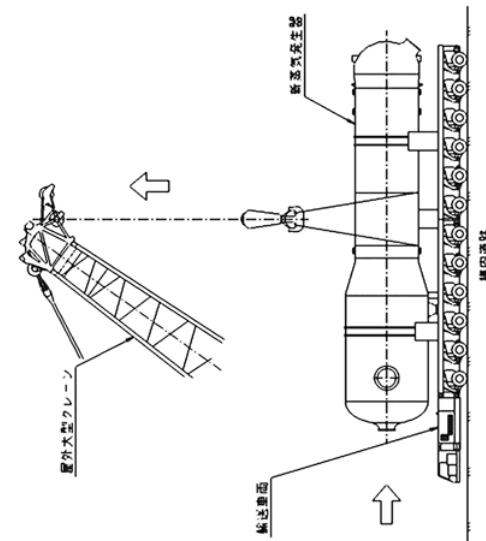
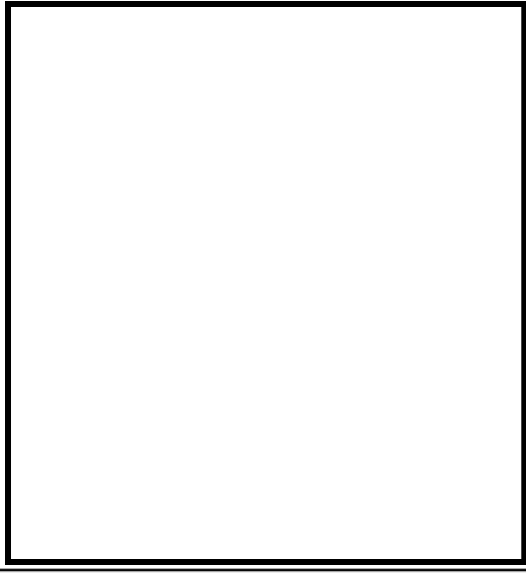
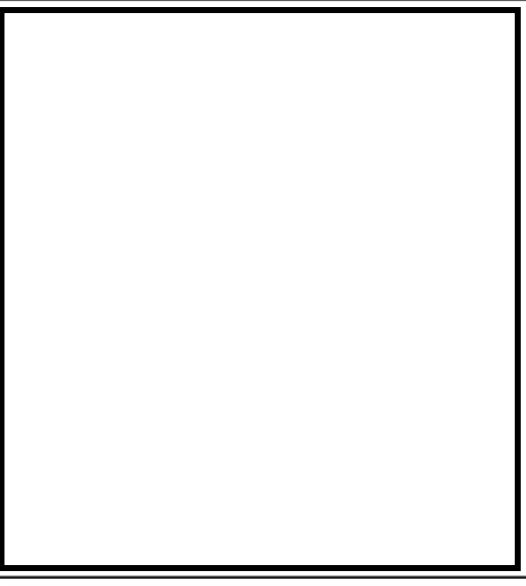
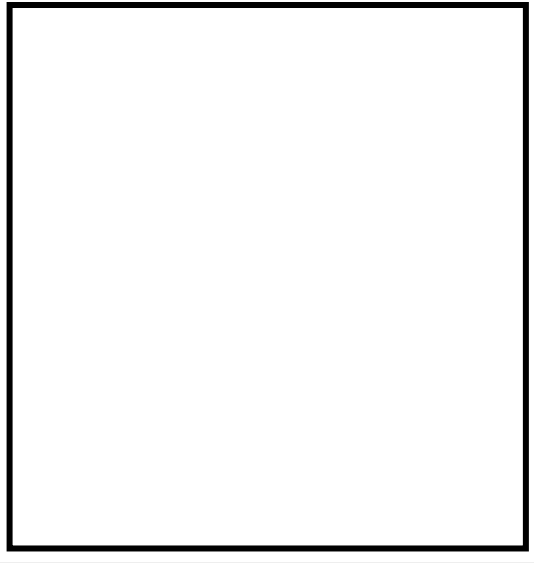
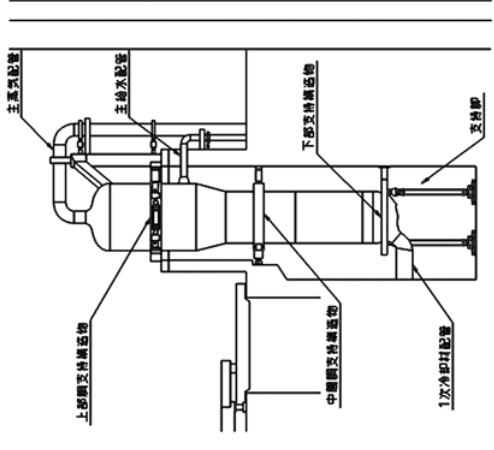
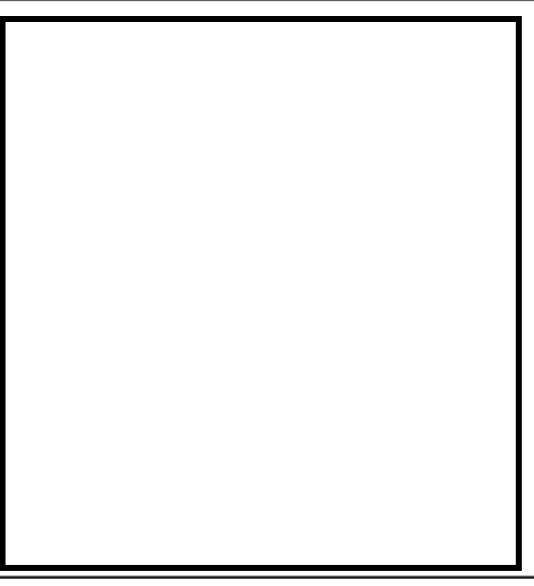


6. 旧蒸気発生器構内輸送



第 5-2 図(1/2) SG 取替工法概念図

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

<p>7. 新蒸気発生器構内輸送</p> 	<p>8. 新蒸気発生器搬入</p> 	<p>9. 新蒸気発生器反転</p> 
<p>10. 新蒸気発生器吊込み</p> 	<p>11. 配管接続・支持構造物復旧</p> 	<p>12. 仮設備撤去</p> 

第 5-2 図(2/2) SG 取替工法概念図

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。