

プラントのシステム設計

System Design of the Plant

原子力発電プラントは、石油代替エネルギー及び経済性の観点から、その重要性はますます高くなってきている。これに応じた信頼性の高いプラントを作るためには、原子炉蒸気発生設備、タービン発電機設備、プラント補助設備などのシステム及びその構成機器のそれぞれが、信頼性の高い性能をもつ必要がある。

本稿では、改良標準化ベースプラントである東京電力株式会社福島第二原子力発電所2号機の原子炉蒸気発生設備、及びタービン設備のシステム設計の概要と被ばく低減について紹介する。

今野泰宏* Yasuhiro Konno
新藤紀一** Toshikazu Shindō
永井洋次*** Yōji Nagai
平賀義彦* Yoshihiko Hiraga

1 緒言

原子力発電への期待の高まる中で、信頼性の高いプラントを安定して稼働させてゆくために、自主技術による軽水炉の信頼性向上、稼働率向上及び従業員の被ばく低減を目指した軽水炉改良標準化の検討が進められてきた。東京電力株式会社福島第二原子力発電所2号機（以下、福島第二・2号機と略称する。）は、改良標準化ベースプラントとして、各種の改良策を検討した項目、自主技術開発項目などを積極的に適用している。これらは、原子炉炉心、システム設計、プラント配置計画、機器改良など広い範囲に及んでいるが、このうちシステム設計、及び被ばく低減に焦点を絞って以下に紹介する。

2 プラントシステムの概要

福島第二・2号機の主要システム構成は、図1に示すように原子炉を中心とした蒸気発生設備と、タービン発電機及び給水加熱器を中心としたタービン設備に大別される。図2に定格出力時の原子炉熱平衡線図を示す。また、プラントの主要仕様を表1に示す。従来プラントに比べて下記の改良を実施した。

- (1) 改良型原子炉格納容器、給水鉄クラッドの発生防止と除去及び耐応力腐食材料などの改良標準化計画の成果の適用
- (2) 上下2領域改良炉心などの燃料健全性向上及び原子炉再循環系機器の国産化などの自主開発技術の採用

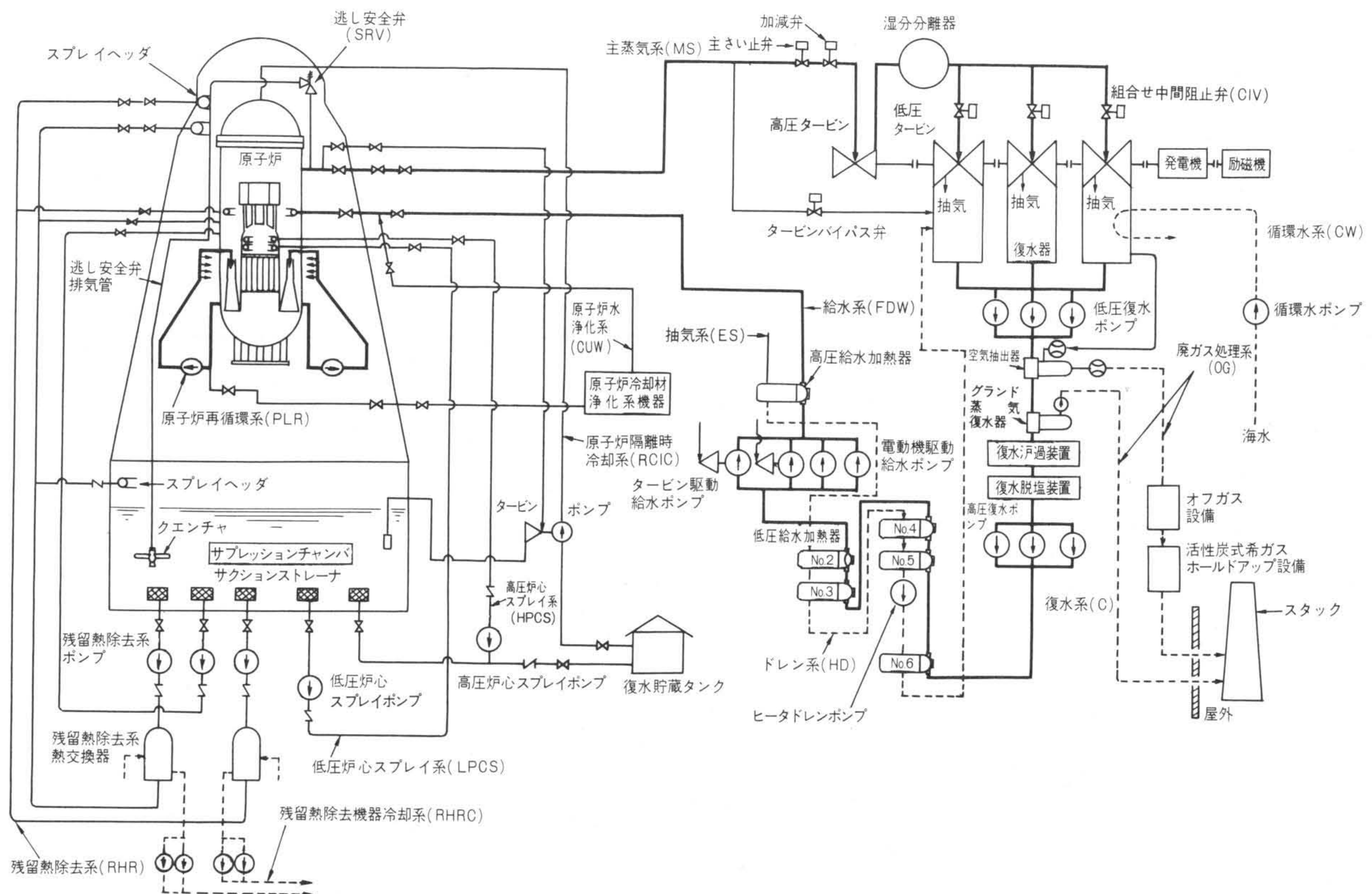


図1 主要システム概要 原子炉システムは、MARK-II改良型原子炉格納容器を採用したBWR-5型、タービン設備システムは4in翼タービンを中心とした非再熱復水サイクルで構成している。

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所日立工場 工学博士 *** 日立製作所電力事業部

3 システムの特徴

3.1 原子炉システム

原子炉システムは、米国GE社標準のBWR-5型（沸騰水型原子炉5型）を基本とし、原子炉格納容器にはMARK-II改良型を採用している。原子炉の性能は熱出力3,293MW、蒸気ゲージ圧70.7kg/cm²及び蒸気温度286°Cである。

以下に原子炉システムの中で特徴のある原子炉冷却材再循環系、非常用炉心冷却系及び原子炉冷却材浄化系について紹介する。

3.1.1 PLR系（原子炉冷却材再循環系）

原子炉蒸気発生設備の主要機器は、原子炉压力容器、原子

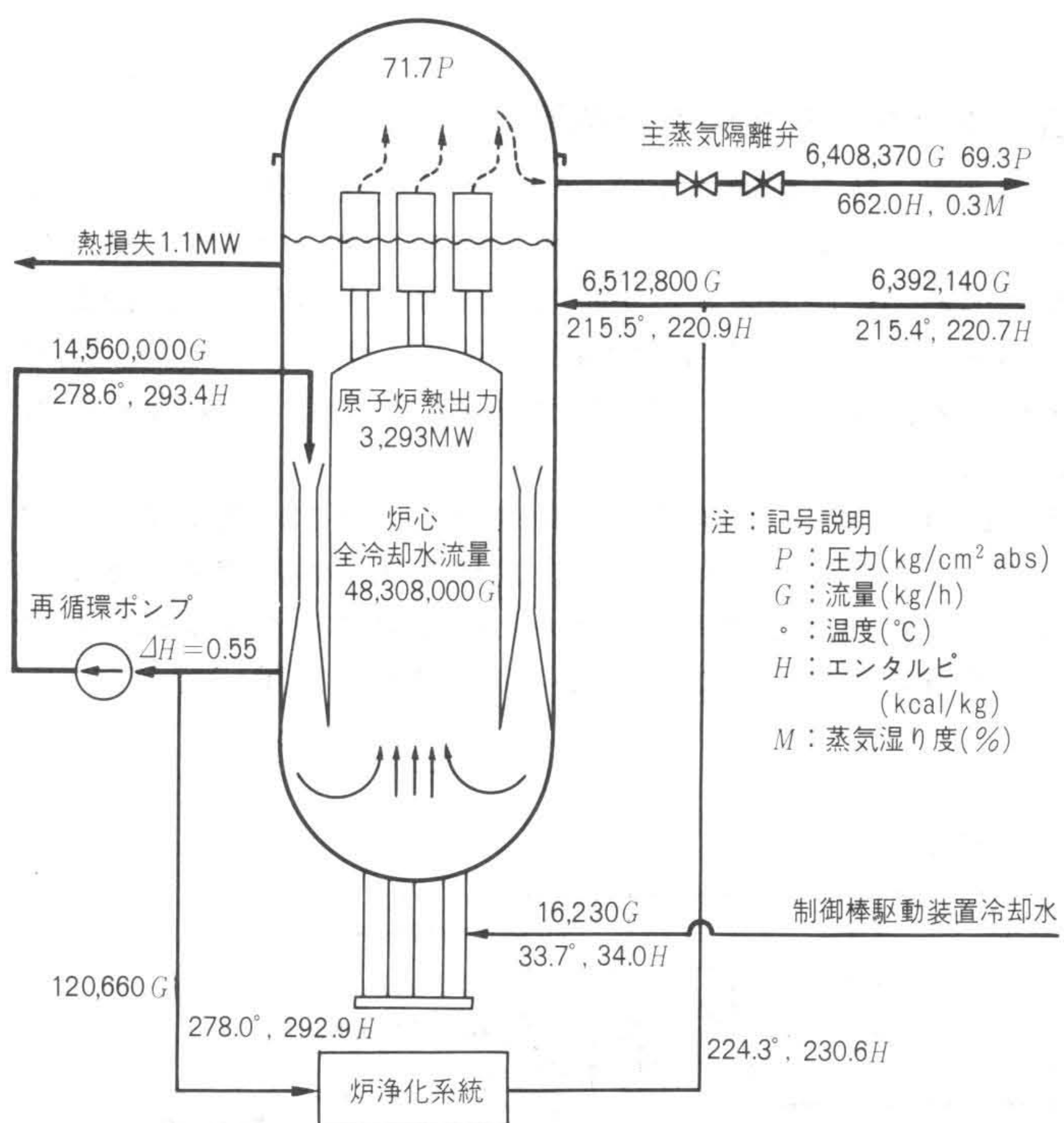


図2 原子炉熱平衡線図 原子炉冷却材浄化系流量が給水流量の2%で、熱出力3,293MWのときに6,408t/hの主蒸気量を供給する。

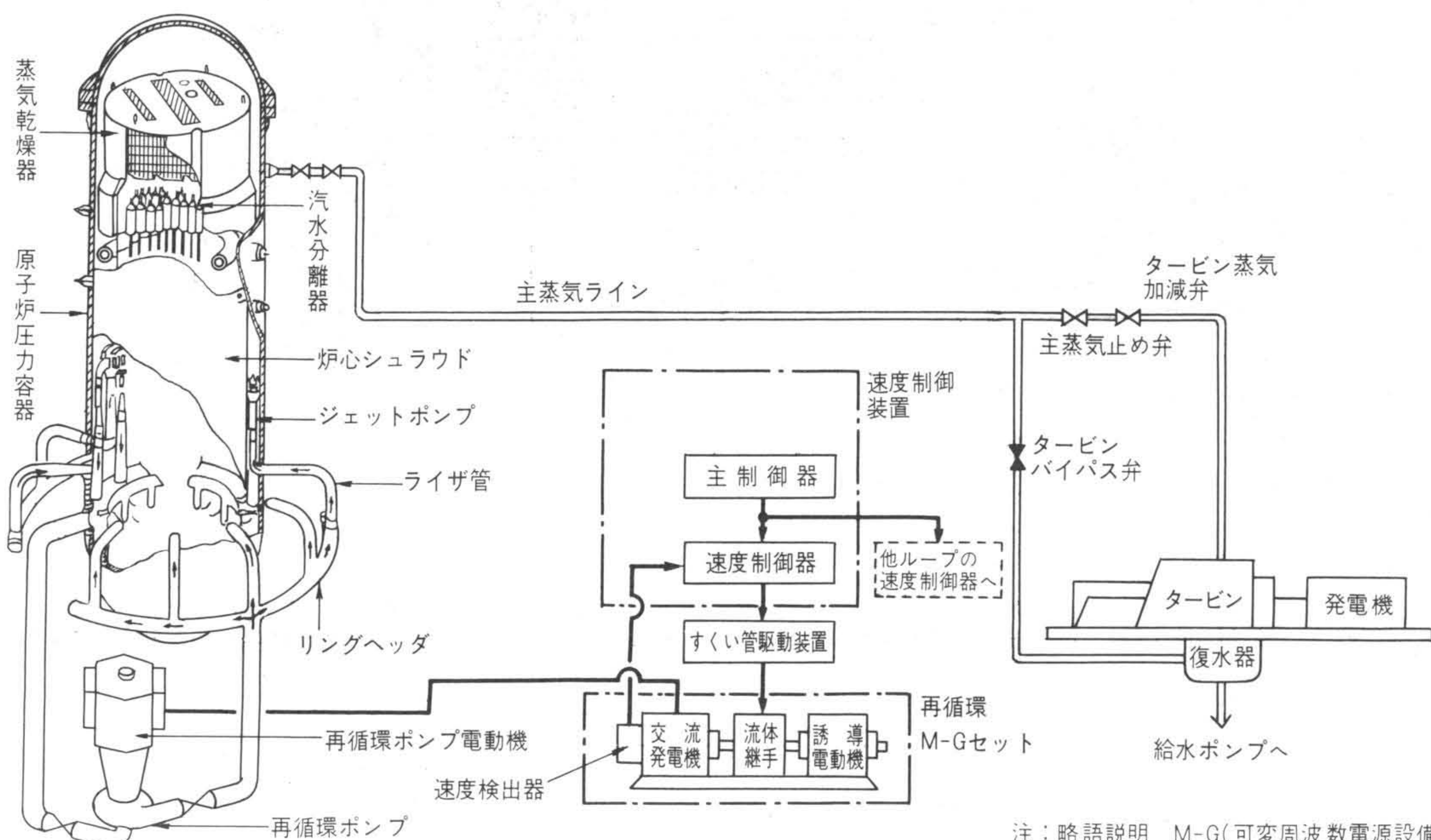


図3 原子炉冷却材再循環系統概要図 再循環系はA、B2系統で構成される。再循環ポンプ駆動用電動機は、M-Gセットにより周波数制御が行なわれるため、駆動機効率が良い。全機器が国産化された。

表1 プラントの主要仕様 各所に改良標準化項目を適用し、電気出力1,100MW級の改良標準化のベースプラントとして、高信頼性、高稼働率への改善を図っている。

大項目	小項目	仕様
炉心、燃料	炉心燃出力	3,293MW
	電気出力	1,100MW
	炉心流量	48.3×10 ³ t/h
	蒸気ゲージ圧	70.7kg/cm ²
	蒸気温度	286°C
	燃料集合体(8行8列)	764
原子炉压力容器	制御棒本数	185本
	胴部内径×高さ	6.42m×22m
原子炉格納容器	設計ゲージ圧	87.9kg/cm ²
	型式	銅製圧力抑制型(MARK-II改良型)
原子炉再循環系	ループ数	2
	ジェットポンプ台数	20台
	再循環ポンプ流量	9,630m ³ /h
主蒸気系	逃し安全弁台数	18台
	主蒸気流量	6.41×10 ³ t/h
非常用炉心冷却系	高圧炉心スプレイ系(系統数)	1
	高圧炉心スプレイ流量	369/1,462m ³ /h
	低圧炉心スプレイ系(系統数)	1
	低圧炉心スプレイ流量	1,443m ³ /h
	低圧注入系(系統数)	3
	低圧注入流量	1,692m ³ /h
原子炉補助系	自動減圧系弁数	7台
	残留熱除去系(系統数)	2
	残留熱除去流量	1,692m ³ /h
	原子炉隔離時冷却系(系統数)	1
	原子炉隔離時冷却流量	142m ³ /h
	原子炉冷却材浄化系(系統数)	1
タービン系	タービン型式	TC6F-41
	発電機容量	1,300MVA
	タービン制御方式	EHC
復水給水系	給水加熱器	高圧 1段×3系列 低圧 5段×3系列
	給水ポンプ	タービン駆動 50%容量×2台 電動機駆動 25%容量×2台
	復水ポンプ	高圧 50%容量×3台 低圧 50%容量×3台
	復水ろ過装置	12(予備1)塔
	復水脱塩装置	10(予備1)塔
	復水器型式	表面接触一折流半区分
復水器系	復水器数量	1
	復水器チューブ材質	チタン
	循環水ポンプ	33%容量×3台
	ボール洗浄装置	一式

炉冷却材再循環ポンプ及びジェットポンプであり、図3に示すようにPLR系(原子炉冷却材再循環系)を構成している。表2にPLR系の構成機器及びその主な仕様を示す。

原子炉の出力を制御する方式の一つである炉心流量制御方式には、先行プラントで実績がある流体継手を使用した可変周波数制御方式を採用した。M-G(可変周波数電源設備)セットは、流体継手を介して駆動用電動機と可変周波数交流発電機を連結したもので、このM-Gセットにより定格炉心流量の約20～105%の範囲で原子炉再循環ポンプの回転数を変えることができる。原子炉再循環ポンプ駆動電動機は定格47Hz、最大48Hzで連続運転を可能なものとしている。PLR系の構成機器には、従来のプラントでは再循環ポンプ、流体継手などに輸入品が使用されてきたが、より高い信頼性と制御性を満たすため国産化体制を確立し、福島第二・2号機からこれらの機器を国産化した¹⁾。これは電気出力1,100MW級の日立標準となるものであり、ポンプ駆動用電動機及び再循環M-Gセットは日立製である。

3.1.2 ECCS (非常用炉心冷却系)

ECCSにはBWR-5型から取り入れられた専用のディーゼル発電機を電源とし、系統の独立した高圧炉心スプレイ系1

表2 原子炉冷却材再循環系機器の主要仕様 再循環ポンプ、同駆動用電動機は初めて国産化された。再循環M-Gセットは流体継手の開発により、1,100MW級プラントではすべての機器の国産化が達成された。

機 器 名		項 目	仕 様
再 循 環 ポ ン プ		吐 出 し 量	160.5m ³ /min
		揚 程	231.6m
		軸 動 力	5,320kW
		回 転 数	1,395rpm
ポンプ駆動用電動機		出 力	5,770kW
		電 圧	6,740V
		周 波 数	48Hz
再循環M-Gセット	交 流 発 電 機	出 力	7,160kVA
		力 率	0.85
		電 圧	6,740V
		周 波 数	48Hz
	流 体 継 手	出 力	6,400kW
		入 力 軸 速 度	990rpm
		出 力 軸 速 度	960rpm
	誘 導 電 動 機	出 力	7,280kW
		回 転 数	990rpm
電 圧		6,600V	

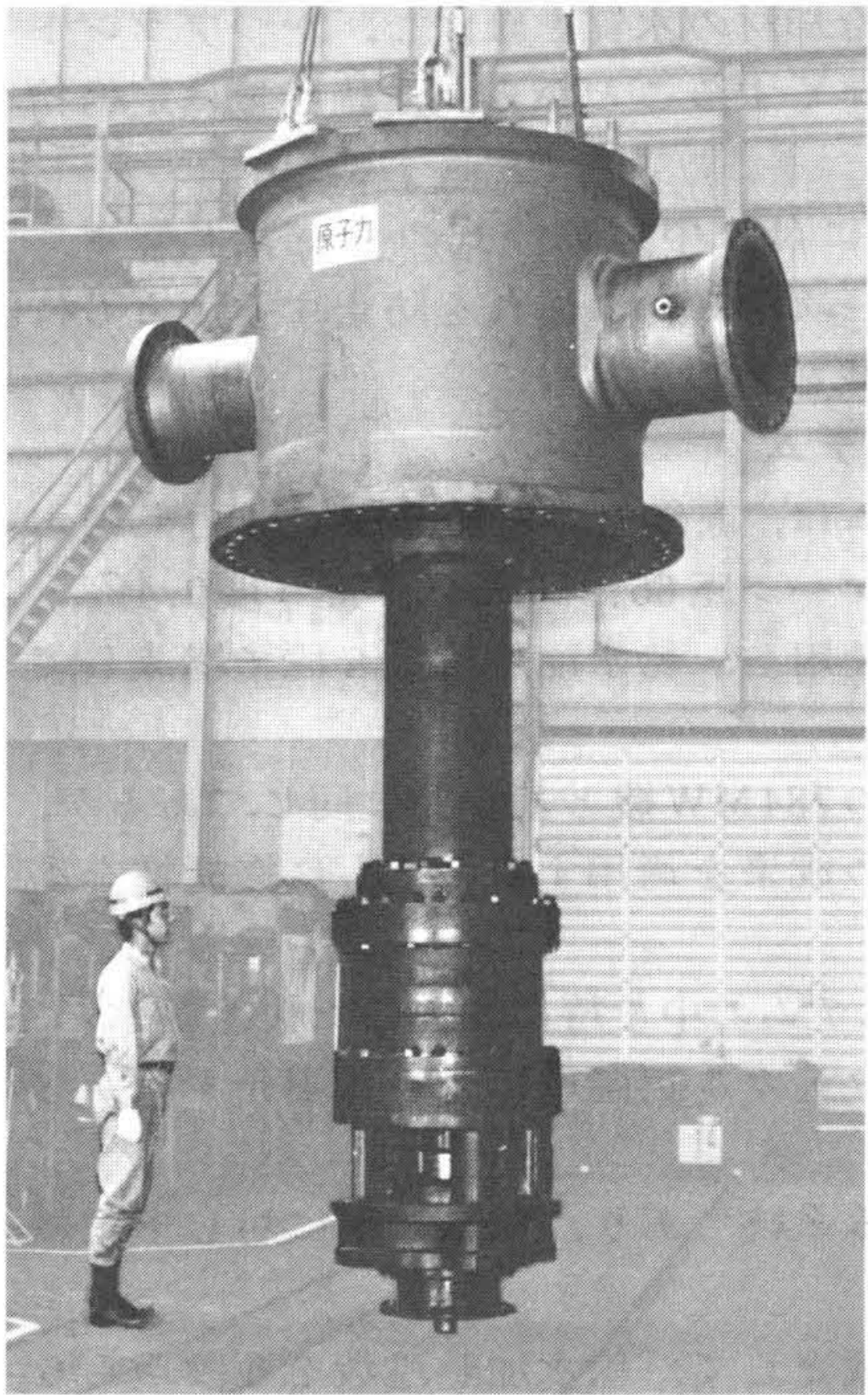


図5 軸長短縮型残留熱除去系ポンプ 両面吸込インデューサ方式とし、ポンプ段数を従来の10段から3段にすることによって軸長を短縮し、建家ベースマット厚さ内にポンプバレルを収めている。

系統、その他に低圧炉心スプレイ系1系統、低圧注水系3系統及び自動減圧系を備えている。系統概要を図4に示す。非常用ディーゼル発電機を含めて電源も3区分構成とし、ECCSの5系統のうち単一故障を考えても任意の3系統の稼働でECCS機能を満たすように構成されている。ここで実施された改善内容を下記に示す。

(1) 残留熱除去(低圧注水)ポンプの軸長短縮

両面吸込インデューサ方式とし軸長短縮を図った。図5に残留熱除去ポンプの外観を示す。

(2) ECCSポンプ室水あふれ対策

建屋排水管はポンプ室内を通過させず、万一配管が破断した場合でもポンプ室は健全に保たれるようにしている。

3.1.3 CUW系(原子炉冷却材浄化系)

CUW系は原子炉運転圧力を減圧しないで浄化できる高圧型汙過脱塩器方式を採用し、浄化系周りの系統構成を簡略とした。汙過脱塩器はプレッシャプリコート型でパウデックスを

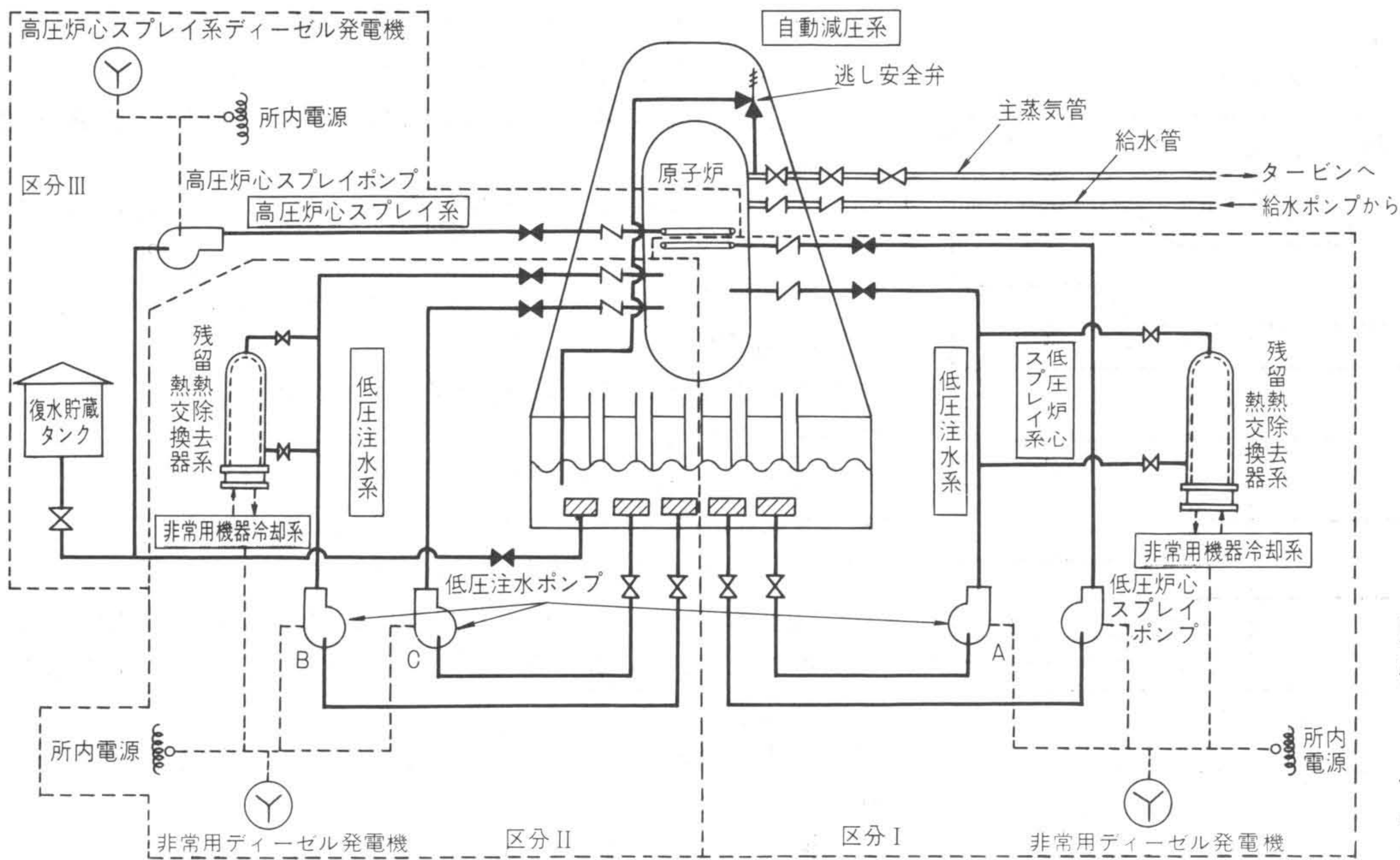


図4 非常用炉心冷却系統の概要 3台の非常用ディーゼル発電機を中心とし、その各々は電源を含めて3区分に独立して構成されている。単一故障を想定してもいずれかの3系統が機能を維持でき、炉心冷却能力を満たしている。

使用している。原子炉冷却材の水質を確保し、かつプラント熱損失をできるだけ少なくすることから、系統容量は定格給水流量の約2%とした。

浄化系用循環ポンプには水中電動機式のキャンド型ポンプを採用し、外部への一次冷却材の漏れを防止するとともに定期検査時の被ばく低減を図った。

3.2 タービン設備システム

タービン設備システムは、電気出力1,100MW、非再熱復水サイクル、主蒸気条件ゲージ圧66.8kg/cm²、湿り度0.4%、復水器細管はチタンを使用し、給水加熱段数6段で構成している。

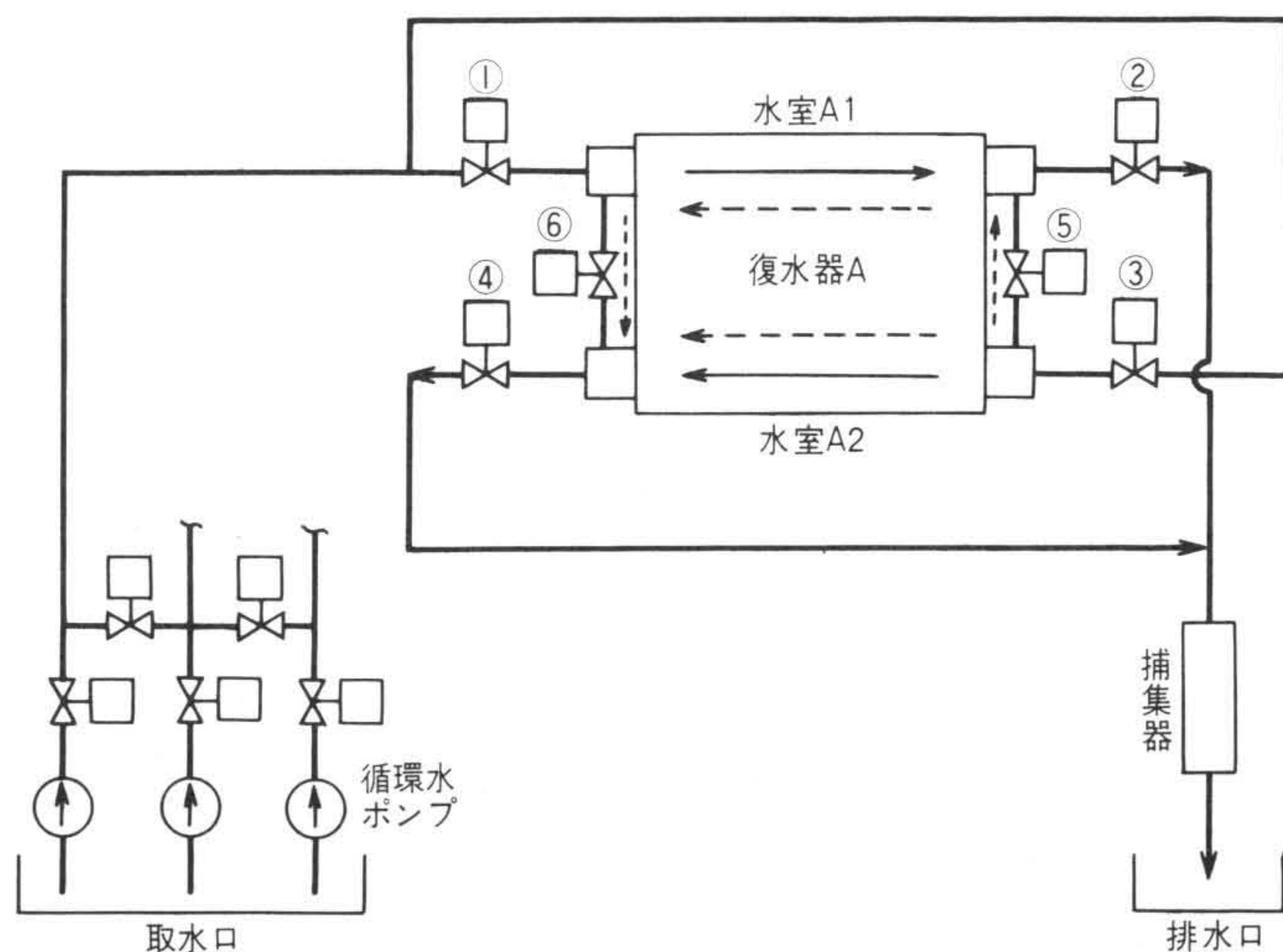
主要システムは先行の784MW機と基本的に同じであるが、軽水炉改良標準化計画の成果を適用するとともに機能性を重視している。

以下にタービン系システムの中で特に改善した復水給水系、循環水系及びタービンローカル制御系について紹介する。

3.2.1 復水給水系

原子炉に直接影響する系統であり、従来技術に対し下記の改善を実施した。

- (1) プラント性能向上策として、給水加熱段数を5段から6段へ増加
- (2) 水質向上策として、混床式汚過脱塩装置の上流にプリコー



注：——→ (通常時) ---→ (A1逆洗時)

(a) 循環水系系統構成

弁 状 態	正常	A1 逆洗移行過程	A1 逆洗中	A1 復帰過程	復帰
① 開閉	開	開	閉	開	開
② 開閉	閉	閉	開	閉	閉
③ 開	閉	閉	閉	開	開
④ 開	開	開	開	開	開
⑤ 開閉	閉	閉	閉	閉	閉
⑥ 開閉	開	開	開	開	開

(b) 復水器逆洗切換タイムチャート(水室A1)

図6 復水器逆洗方式 復水器水室の逆洗は、6弁の切換により行なわれる。各弁の操作はタイムチャートに示すように、正常→逆洗→復帰と自動制御され、経済的な運転ができる。

注：—— (運転系統)
--- (待機系統)

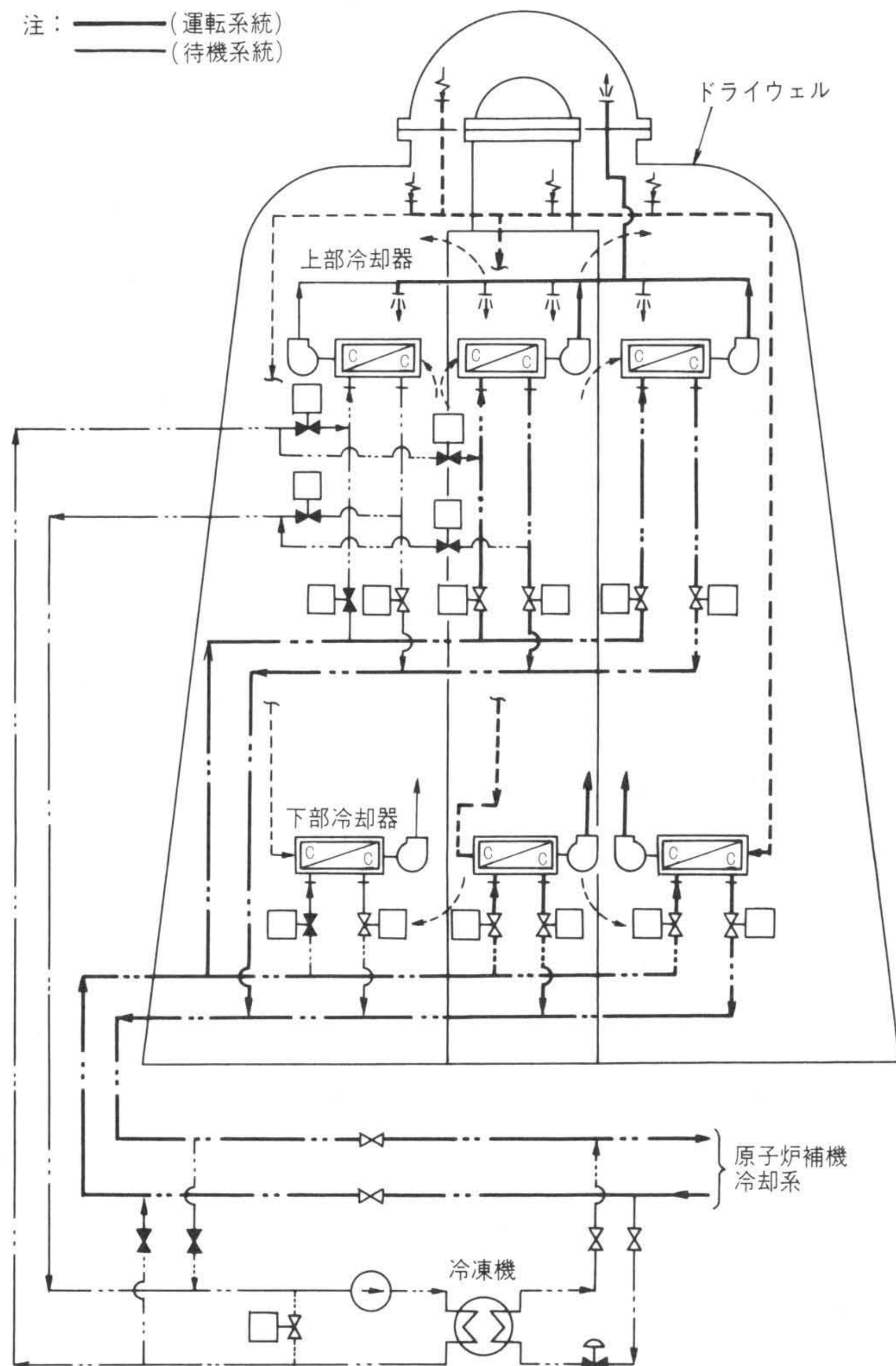


図7 ドライウェル内空調システム構成 冷却器を上下2段に設置して、温度分布の均一化を図った。冷却媒体を補機冷却水又は冷凍機冷水とすることで、通常時運転モード、除湿時運転モード及び定期検査時運転モードを選択できる。

ト式汚過脱塩装置を設置した二重復水汚過方式の採用

- (3) 原子炉への鉄クラッド低減策として、原子炉給水流量との比例酸素注入制御設備の設置
- (4) プラントの起動、停止時の給水制御系の改善及び原子炉給水ノズルの熱疲労減少策として、給水調整小弁の設置
- (5) 原子炉水位変動抑制策として、給水ポンプ再循環制御方式の改善
- (6) プラント起動時の原子炉への鉄クラッド流入防止策として、クリーンアップ系統の設置
- (7) 高圧復水ポンプ運転法改善として、再循環系の設置

3.2.2 循環水系

復水器冷却用海水の系統内リークイン防止のために、下記の改善を実施した。

- (1) 復水器冷却管に耐食性に優れたチタン管の採用
- (2) 復水器逆洗方式は経済性のある6弁切替方式を採用

図6に逆洗方式の概要を示す。

- (3) 復水器ボール洗浄装置を設置し、ボール捕集器は大型化による効率向上、その他を考慮し先行機の6台から3台に削減
- (4) 復水器冷却水温度は、プラント定格負荷で復水器逆洗運転時でも計画値保持可能
- (5) 復水器逆洗とボール洗浄装置の完全自動運転の採用

3.2.3 タービンローカル制御系

タービンローカル制御系は従来空気式の現場制御装置が多く採用されていたが、中央制御室での操作及び監視を行なうため電気式とし、その制御装置としてはデジタル式を採用し、より複雑な制御演算を可能とした。

対象範囲は湿分分離器ドレンタンク水位制御系、給水加熱器水位制御系、蒸化器制御系、復水器ホットウェル水位制御系などである。

3.3 プラント補助設備

プラント補助設備のシステム設計は発電所固有の影響によるところも多いが、福島第二・2号機で特長のある原子炉補機冷却系、及び換気空調系について紹介する。

3.3.1 RCW系（原子炉補機冷却系）

RCW系としては中間淡水ループによる完全独立型冷却方式を採用した。常用系補機冷却系は、原子炉及びタービン系補機、廃棄物処理系補機の2群から成り、非常用系補機冷却系は3群から成り、各々完全独立型である。原子炉補機冷却系では万一にも原子炉一次系の炉水が系外に漏れないように、中間淡水ループを設けた二重としている。常用系及び非常用系補機冷却系とも中間淡水ループ圧力を一次側及び海水側圧力よりも高圧とすることで、一次側機器への海水混入又は海水への放射性流体の漏れがないようにシステム設計上の配慮がなされている。このことから、熱交換器建屋を非管理区域とすることができ、保守点検性の向上、被ばく低減が期待できる。なおその他の改善項目を下記に示す。

- (1) 常用補機冷却海水系に渦流フィルタの採用
- (2) 海水熱交換器の海生物生長抑制として逆洗弁に替え淡水洗浄ラインの設置
- (3) 非常用補機冷却海水系排水ラインに、放水路閉そく時の対策としてラプチャディスクの設置

3.3.2 HVAC系（換気空調系）

HVAC系は系統の機能、放射能汚染の有無、配置及び電源の分離などを考慮した系統構成、分離のシステム設計となっている。その主な特長として下記が挙げられる。

- (1) 常用・非常用電気品室の換気系の分離設置
- (2) ドライウェル冷却系機器を合理的な配置に改善

通常時運転、除湿時運転及び定期検査時運転モードに適した系統構成とした。

- (3) タービン建屋のHVAC系は運転床と運転床外とに分離し、運転床の増風による環境改善

特に、ドライウェル冷却系の冷却器配置は、上部、下部の2段に分け、ドライウェル内の温度分布の均一化を図っている。

図7にドライウェル冷却系の構成概要と通常時運転モードを示す。

4 水質管理と被ばく低減

BWRプラントの場合、給水系で発生した鉄及びコバルトなどの腐食生成物は、原子炉内へ持ち込まれる。この持ち込まれた腐食生成物の一部は原子炉冷却材浄化系で除去されるが、大部分は燃料被覆管表面に付着し、中性子により放射化される。放射化された腐食生成物の一部は溶出及び脱離し、配管などの内表面に再付着し配管表面線量率を上昇させる。

このような溶出、付着などの腐食反応は、水と構造材との電気化学的反応によって制御されるため、腐食生成物の発生を抑制するとともに、腐食反応の媒体である水質を管理することが重要である。

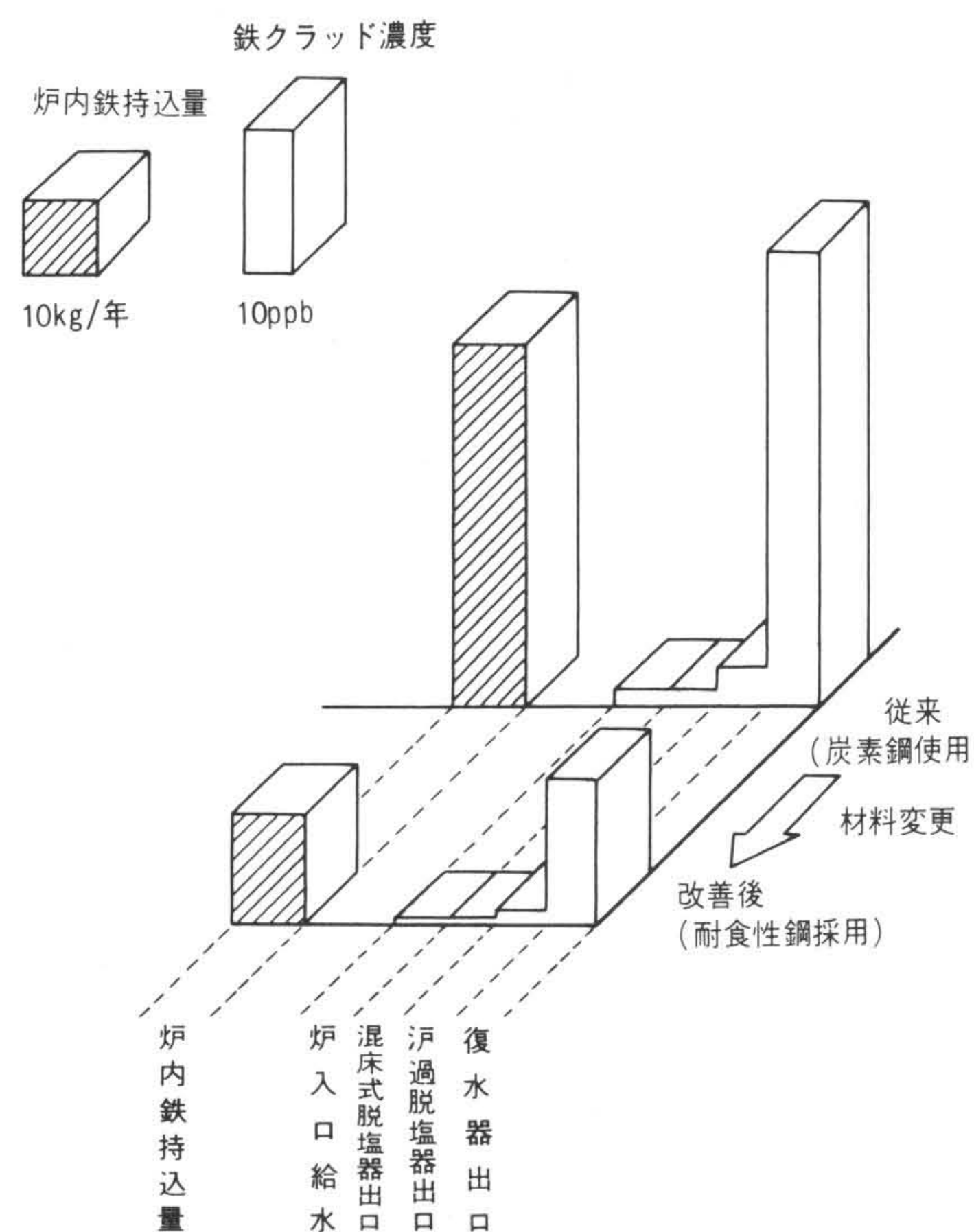


図8 炉内鉄持込量の改善効果 復水器などの材料を炭素鋼から耐食性鋼に変更することによって、復水及び給水鉄クラッド濃度が $\frac{1}{2}$ に低下される。それに伴い炉内鉄持込量も低下する。

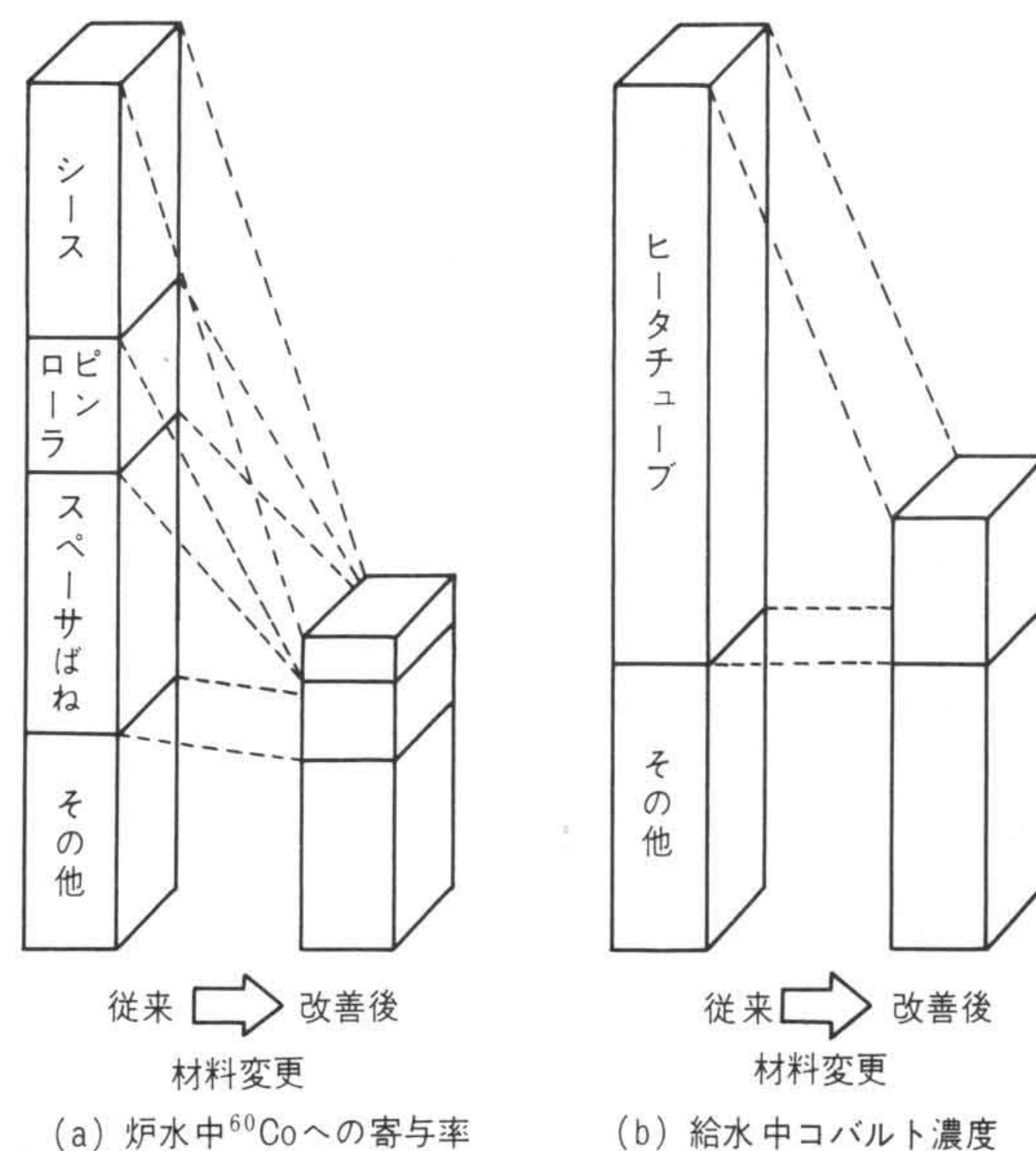


図9 コバルト低減対策とその効果 低コバルト材採用により、給水コバルトイオン濃度は $\frac{1}{2}$ に、炉内構造材からの ^{60}Co 溶出量は $\frac{1}{3}$ に低減される。

4.1 被ばく低減改良項目

線量率低減のための効果的な方法として、(1) 給水鉄濃度低減による炉内鉄持込量の減少、(2) 給水Co濃度低減及び炉内構造材からのCo溶出低減、の2点が挙げられる²⁾。

一次冷却系で発生する鉄クラッド（鉄酸化物の微粒子が水に懸濁した状態）のほとんどは給復水系配管及び復水器などの構造材料である炭素鋼の腐食によるものである。復水浄化系の上流で発生する鉄クラッドのかなりの部分は復水炉過脱塩装置によって除去されるが、一部は給水系で発生する鉄ク

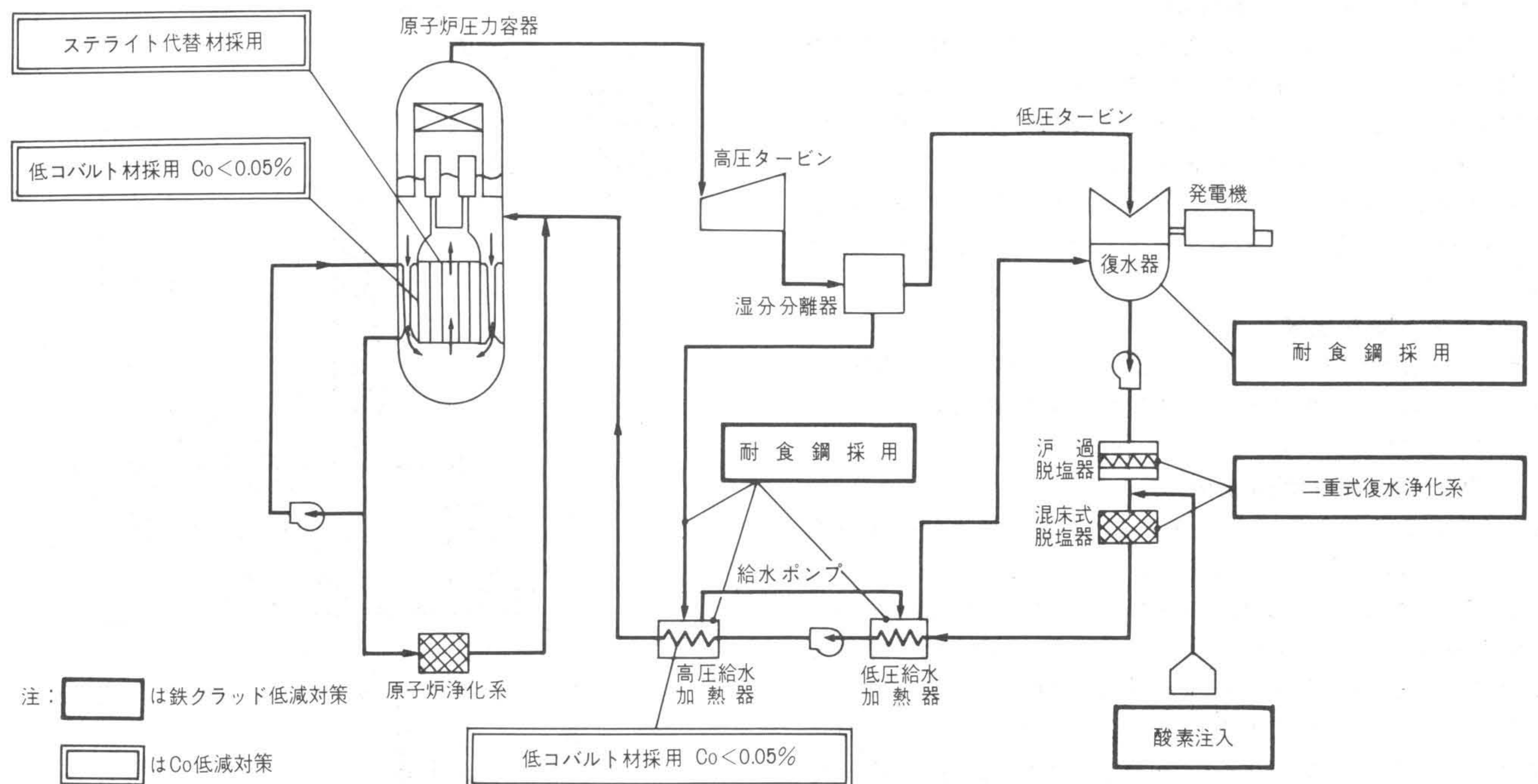


図10 低放射能システム 改良標準化項目の適用及び構成材料対策を行なうことにより、年間被ばく線量の改善を図った。

ラッドとともに炉内に持ち込まれる。現状では、炉内に持ち込まれる鉄クラッド濃度は目標としている1ppbに到達しているが、線量率低減の見地からは、更にクラッド発生量を低減することが望ましい。このため、復水の鉄クラッド濃度を高めている部分に耐食性鋼を採用した。材料変更による効果を図8に示すが、復水鉄クラッド濃度は耐食性鋼の採用により従来の約 $\frac{1}{3}$ に減少し10ppbとなる。それに伴い給水鉄クラッド濃度も $\frac{1}{3}$ の0.3ppbに低下する。

一方のCo発生抑制についても、材料変更により対処した。一次冷却系構造材からのCo発生に寄与する割合は、その構造材のCo含有率、接水表面積、溶出速度及びプラント運転年数によって変化するが、従来のBWRプラントデータに基づき計算評価できる。図9にCo発生源と計算発生量を示すが、給水系までの構造材からの溶出量が多いものは、接水面積が多い給水加熱器チューブのステンレス鋼であり、炉内の構造材からの溶出に関しては、制御棒ピン、ローラのステライト合金、制御棒のシースのステンレス鋼及び燃料集合体スペーサばねのインコネル材である。したがって、Co含有量50%であ

るステライト合金はCoを含有しないニッケル基合金、ステンレス鋼とインコネル材は低Co材を採用することにより、 ^{60}Co 濃度を $\frac{1}{3}$ 程度にすることができるとしている。

4.2 プラント水質管理状況

福島第二・2号機は、図10に示すように低減対策を適用したプラントである。線量率低減対策採用状況及び水質データを既設プラントのそれとを比較した。表3に示すように、一次系冷却水中の鉄濃度及び炉水 ^{60}Co 放射能について、既設プラントデータとの相対比で示しているが、概略低減対策の予想値とほぼ同様の値を示している。

復水鉄濃度は耐食性鋼採用により従来の $\frac{1}{3}$ 以下となり、それに伴い給水鉄濃度も $\frac{1}{3}$ 以下となっている。また、炉水Co濃度に関しても約 $\frac{1}{3}$ となっており、目標値が達成されている。

したがって、本プラントでの線量率も既設プラントに比べ十分低い値となることが期待される。

5 結 言

改良標準化ベースプラントとして建設された福島第二・2号機について、そのシステム設計及び被ばく低減対策の特長、並びに改良実施状況について紹介した。本プラントの試運転で、当初システム設計の段階で検討し、計画した項目についての貴重な運転データが得られたので、これらを解析、評価し、今後のプラントのシステム設計に反映して、よりいっそうの技術開発に努めていく考えである。

最後に、システム設計から運転データの検討に至るまで、終始熱心な御指導をいただいた東京電力株式会社の関係各位に対し深謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 小林，外：原子炉冷却材再循環系機器の国産化と信頼性向上，日立評論，64，8，567～572（昭57-8）
- 2) 三木，外：低線量を目指した沸騰水型原子炉一次冷却系のシステム設計，日立評論，64，8，563～566（昭57-8）

表3 線量率低減対策採用と一次系水質の関係 耐食鋼採用及び復水浄化系二重化により、鉄クラッド濃度、炉水クラッド濃度が既設プラントの $\frac{1}{3}$ 以下となっている。

項	目	既設プラント	福島第二・2
線量率 低減対策	鉄クラッド 低減対策	1. 耐食鋼 ×**	○**
		2. 二重式復水浄化系 ×	○
		3. 酸素注入 ○	○
	コバルト 低減対策	4. 低コバルト材	
		(1) ヒータチューブ ×	○
		(2) スペーサばね △**	○
一次系* 水 質	鉄クラッド	(3) 制御棒シース ×	○
		5. ステライト代替材	
		(1) 制御棒ピンローラ △	○
	コバルト	6. 復水鉄クラッド濃度	$< \frac{1}{3}$
		7. 給水鉄クラッド濃度	$< \frac{1}{3}$
		8. 給水コバルト濃度	$< \frac{1}{2}$
		9. 炉水コバルト放射能	$\approx \frac{1}{3}$

注：* 相対比で表示

** 記号説明 ○(採用)，△(第4サイクルから採用)，×(不採用)