

## 浜岡原子力発電所5号機特集

日本における軽水炉は米国からの技術導入により始まりましたが、導入初期には数多くのトラブルにより稼働率が低迷したため、自主技術を確認し安定運転を維持できるよう軽水炉の信頼性向上や作業員の放射線被ばくの低減等を目指して国の改良標準化計画が昭和50年にスタートしました。改良標準化計画は第一次から第三次まで実施され、第一次、第二次においては作業員の被ばく低減や定期点検日数の短縮等の成果を上げました。そして、次なるステップとして昭和56年からスタートした第三次改良標準化計画と電力共同研究による官民一体となった開発推進体制のなかで、世界の沸騰水型軽水炉(BWR: Boiling Water Reactor)の優れた実証技術を集大成し、安全性・信頼性、経済性、低被ばく性等を更に高い水準とすべく改良型沸騰水型軽水炉(ABWR: Advanced Boiling Water Reactor)が開発されました。

一方、電力需要が着実に増加するものと見込まれる中で、当社における原子力発電の比率は低く原子力発電の着実な推進が課題となっていました。浜岡5号機では、これを踏まえつつ供給安定性や経済性などを総合的に勘案し当社で初めて、ABWRを採用しました。ABWRとしては東京電力柏崎刈羽6、7号機に続き国内3基目となります。浜岡5号機の誕生で浜岡原子力発電所のトータル電気出力は4,997MWとなり、国内で2番目に大きい原子力発電所となります。ここでは、ABWRの代表的な技術のほか、柏崎刈羽6、7号機以降の技術進歩を踏まえ浜岡5号機で採用した数々の新技術等について紹介します。



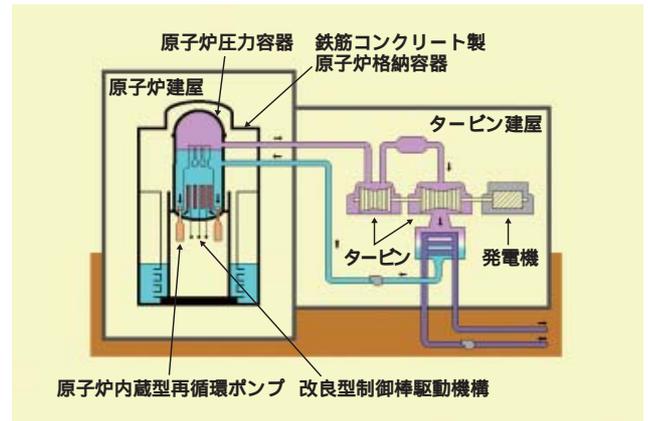
第1図 浜岡5号機全景

### 浜岡5号機の主要諸元

浜岡5号機は、原子炉熱出力3,926MW、電気出力1,380MWの改良型沸騰水型軽水炉(ABWR)で、先行ABWRプラントから更に改良を加え、国内最大の電気出力を誇ります。第1表に浜岡5号機と4号機の主要諸元比較を示します。

第1表 浜岡5号機と4号機の主要諸元比較

	浜岡5号機	浜岡4号機
原子炉形式	改良型沸騰水型軽水炉(ABWR)	沸騰水型軽水炉(BWR-5)
原子炉熱出力	3,926MW	3,293MW
電気出力	1,380MW	1,137MW
原子炉格納容器	鉄筋コンクリート製格納容器	鋼製格納容器
タービン形式	くし型6流排気復水式再熱式(52インチ翼タービン)	くし型6流排気復水式再熱式(43インチ翼タービン)
主発電機容量	1,570MVA	1,280MVA



第2図 改良型沸騰水型軽水炉(ABWR)

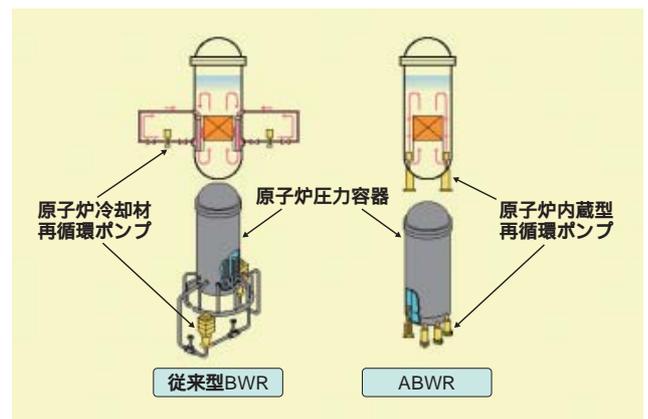
### ABWRの代表的な技術

ここでは、浜岡4号機のような従来型BWRの技術から大幅に改良されているABWRの特徴的な技術(ABWR標準技術)について、いくつか紹介します。

#### ① 原子炉内蔵型再循環ポンプ(RIP: Reactor Internal Pump)の採用

原子炉冷却材再循環系は、通常運転時に炉心へ原子炉冷却材(水)を再循環させ炉心から発生する熱を除去するとともに、再循環させる水の流量を調整することにより原子炉出力を制御する設備です。

従来型BWRの原子炉冷却材再循環系では、冷却材は原子炉圧力容器から外部再循環配管へ取り出され2台の再循環ポンプで昇圧された後、再び原子炉圧力容



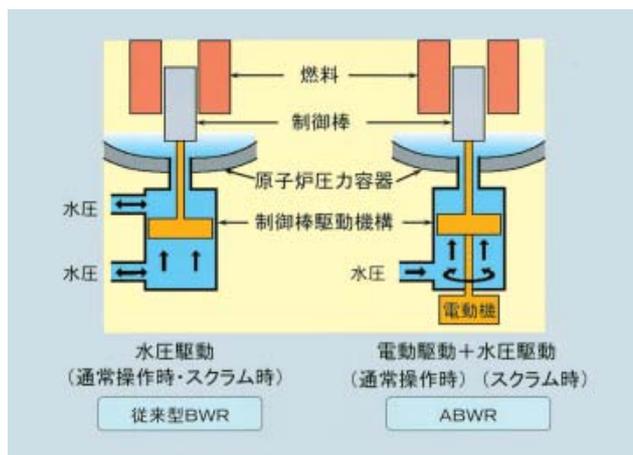
第3図 原子炉内蔵型再循環ポンプ(RIP)

器へ戻る方式としていました。これに対しABWRでは、原子炉圧力容器内に10台の小型の再循環ポンプを内蔵した原子炉内蔵型再循環ポンプ(RIP)を採用し、原子炉圧力容器内で直接冷却材を循環させる方式としています。RIPの採用で従来型BWRにあった外部再循環配管がなくなることにより、炉心位置より下部に大口径配管がなくなり、配管破断による原子炉冷却材喪失事故の可能性が低減できる、原子炉格納容器内点検作業における作業員の放射線被ばくが低減できるといった特長を持っています。

## 2 改良型制御棒駆動機構(FMCRD: Fine Motion Control Rod Drive)の採用

制御棒駆動機構は、通常操作時に炉心内の制御棒の挿入位置を変化させることにより原子炉出力を制御する機能と、緊急時に制御棒を急速に挿入させることにより原子炉を緊急停止(スクラム)する機能を備えた設備です。

従来型BWRの制御棒駆動機構では、通常操作時、緊急時とも水圧で制御棒を駆動する方式としていましたが、ABWRでは、改良型制御棒駆動機構(FMCRD)を採用し、通常操作時には電動で駆動し、緊急時には水圧で駆動する方式としています。FMCRDの採用で制御棒を電動で駆動できるようになったことから、通常操作時の制御棒駆動を微調整することが可能となり運転性が向上する、緊急時に水圧で制御棒を急速に挿入すると同時に電動機も制御棒の挿入方向に駆動し、スクラムによる原子炉の停止機能をバックアップする、制御棒の複数本同時操作が可能となりプラント起動・停止時間が短縮(例えば、制御棒の引抜開始から原子炉の臨界まで浜岡4号機の約半分の時間に短縮)できるといった特長を持っています。



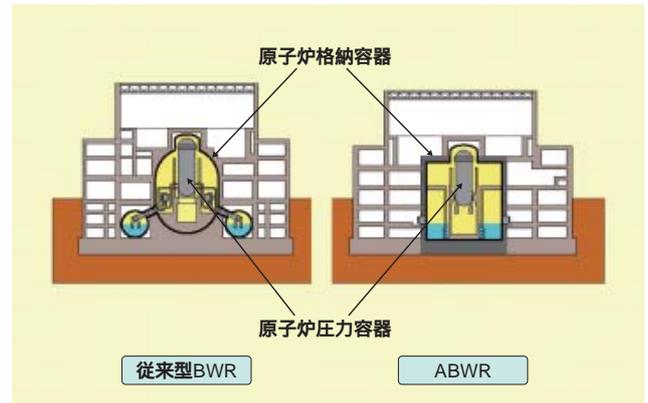
第4図 改良型制御棒駆動機構(FMCRD)

## 3 鉄筋コンクリート製原子炉格納容器(RCCV: Reinforced Concrete Containment Vessel)の採用

原子炉格納容器は、万が一原子炉圧力容器につながっている配管が切れて原子炉内の水や蒸気が流出する

ような事故が起きた場合にも、原子炉から放出される放射性物質を閉じ込める機能を備えた設備です。

従来型BWRの原子炉格納容器は鋼板製の格納容器で、その外側に放射線を遮へいするコンクリート壁を備えた構造ですが、ABWRでは、強度、放射線遮へい機能を受け持つ鉄筋コンクリートと、気密保持機能を受け持つ鋼製ライナの内張りで構成された鉄筋コンクリート製原子炉格納容器(RCCV)を採用しています。RCCVの採用で原子炉建屋と一体の構造とすることにより、低重心化が可能となり耐震性が向上しています。

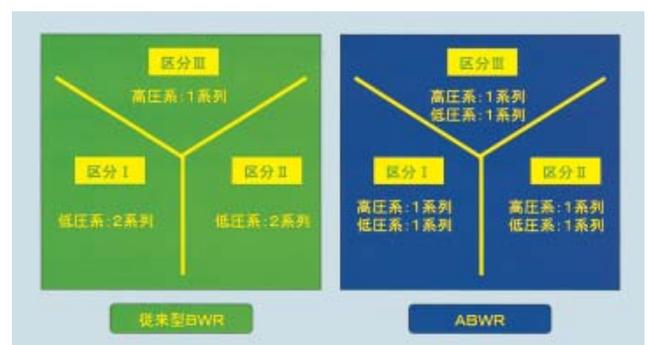


第5図 鉄筋コンクリート製原子炉格納容器(RCCV)

## 4 非常用炉心冷却系の区分の見直し

非常用炉心冷却系(ECCS: Emergency Core Cooling System)は、上で述べたような原子炉内の水や蒸気が流出する事故が起きた場合にも、燃料の重大な損傷を防止し、原子炉内の余熱(核分裂生成物の崩壊により発生する熱)を長期にわたって取り除く機能を備えた設備です。

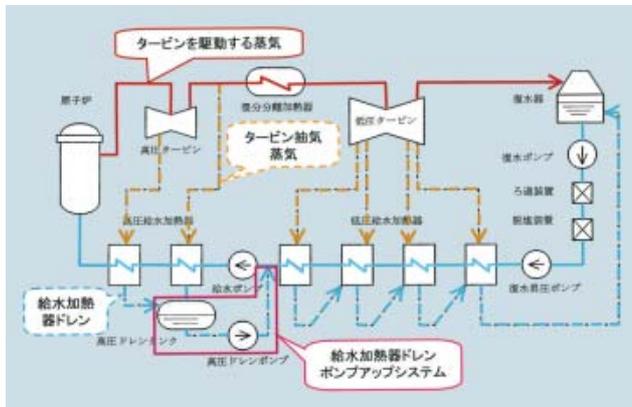
ECCSは従来型BWR、ABWRともに、ポンプ等が故障したり外部電源が喪失したりした場合でも、所要の安全機能を果たすことができるように多重性を持たせるとともに、一つの系統の故障が他の系統の故障を誘引して安全機能を失わないよう、物理的に区分、区分 および区分 に分離した設計としています。従来型BWRでは、区分 , に低压系のECCSを、区分 に高压系のECCSを配しているのに対し、ABWRでは、各区分に高压系、低压系のECCSを配し、安全性・信頼性を向上しています。



第6図 非常用炉心冷却系の区分の見直し

### 5 給水加熱器ドレンポンプアップシステムの採用

従来型BWRでは、復水・給水を加熱するタービン抽気蒸気の凝縮水(給水加熱器ドレン)を全量復水器に回収する方式としていました。ABWRでは給水加熱器ドレンポンプアップシステムを採用し、当該ドレンをドレンポンプで昇圧して直接復水配管に回収する方式とすることで、給水加熱器へ入る復水・給水の温度を上げタービン抽気蒸気量の低減を図っています。本システムの採用により、原子炉で発生する蒸気量が同じでもタービンを駆動するのに使われる蒸気量を増加させることが可能になることから、プラント効率が向上し浜岡4号機に比べて約6MW電気出力が向上しています。



第7図 給水加熱器ドレンポンプアップシステム

### 6 中央制御室新型監視制御システムの採用

従来型BWRの中央制御室制御盤は主盤と副盤で構成され、機器毎に設置されたハードスイッチ等により運転操作を行う方式としており、プラント情報はCRTモニターや運転員同士の会話により共有されています。ABWRでは新型監視制御システムを採用することにより、従来型BWRの主盤、副盤の機能のうち通常監視操作およびスクラム時の操作に関する機能をオペレーターコンソール(主盤)で実現し、フラットディスプレイ



第8図 中央制御室新型監視制御システム

によるタッチ操作の採用により盤をコンパクト化している、大型表示盤の採用により主要なプラント情報を運転員全員が容易に共有できる、警報の重要度により警報の場所、大きさ、色を整理するとともに、各系統の個々の警報を集約し詳細な警報はフラットディスプレイで確認する方式とすることで認知性が向上しているといった特長を持っています。

## 浜岡5号機の新技术

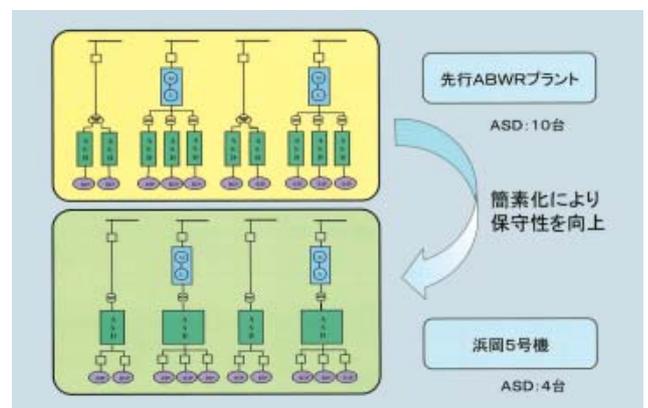
浜岡5号機では、前項で述べたABWRの標準技術をベースに、先行ABWRプラント以降の技術進歩を踏まえて、安全性・信頼性の確保を大前提として高効率化やコストダウンを図った数々の新技术を採用しています。採用した新技术については、機器の製作、据付、試運転の適切な段階において設計の妥当性を確認しています。ここでは、これらの新技术のいくつかを紹介します。

### 1 RIP電源構成の簡素化

RIPは、可変周波数電源装置(RIP - ASD : Adjustable Speed Drive)というインバータ式の電源供給装置によりポンプの速度を制御しています。

先行ABWRプラントでは、RIP1台毎に1台のASDを設置しているためASDはポンプ台数と同じ10台で構成され、常用4母線に割り振って2台×2母線、3台×2母線の構成にて電源が供給されています。浜岡5号機では、大容量でコンパクトなASDが実用化されたため、ASDを母線毎に統合しASD1台につき2台または3台のRIPを駆動することにより、ASDを4台構成としてシステムを簡素化し保守性を向上しています。

本システムの設計の妥当性を検証するため、試運転段階において複数台ポンプの制御性評価やRIPトリップ(自動停止)時の過渡評価等を実施し、原子炉の安全性に問題ないことを確認しています。



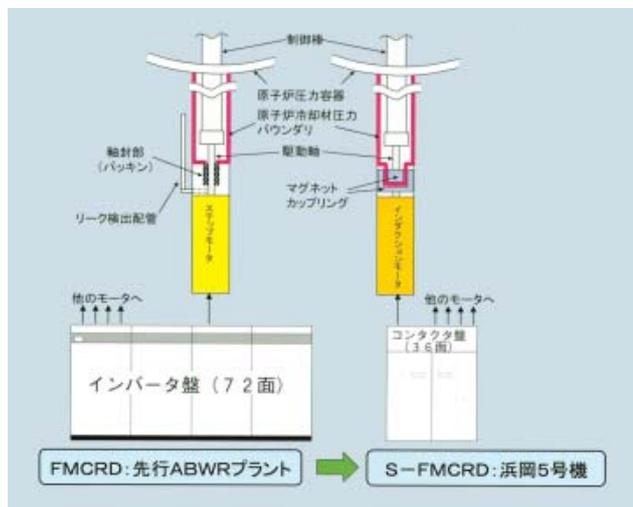
第9図 RIP電源構成の簡素化

### 2 シールレス型FMCRD(S - FMCRD)の採用

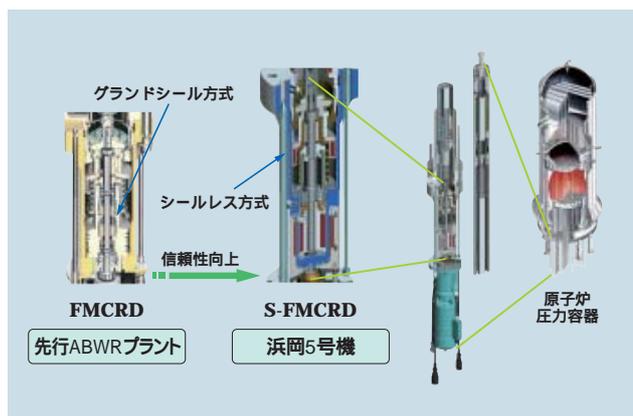
浜岡5号機では、電力共通研究にて確立した技術であるシールレス型FMCRD(S - FMCRD : Sealless -

FMCRD)を採用しています。先行ABWRプラントのFMCRDは、駆動軸が原子炉冷却材圧力バウンダリ(原子炉冷却材の圧力障壁となる部分)を貫通する軸封部をパッキンによりシールするグランドシール方式としていました。これに対しS-FMCRDは、永久磁石を用いて非接触で駆動力を伝えることができるマグネットカップリングを採用しシールレス方式とすることにより、原子炉冷却材の漏えいの可能性を低減し信頼性を向上しています。また、駆動電動機を先行ABWRプラントのステップモータ方式からインダクションモータ方式に変更することにより、電源設備をインバータ盤からコンタクタ盤へ簡素化し経済性を向上しています。

新設計検証としては連続駆動特性やスクラム特性等を評価することとしていましたが、原子炉格納容器の耐圧試験を実施した後のS-FMCRD駆動試験において、数体の制御棒が駆動できない事象が起きました。原因は、駆動電動機をインダクションモータ方式に変更したことに伴い追加した減速機内に、原子炉格納容器の耐圧試験圧力がこもったことに起因する事象であることがわかりました。対策として減速機に均圧穴を設け圧力がこもらないようにし、それをモックアップ試験によって検証しました。このように、機器が必ずしも設計で意図したとおりに動かないことがあります。製作、据付、試運転の各段階で適切に対策を講じています。



第10図 シールレス型FMCRD(S-FMCRD)

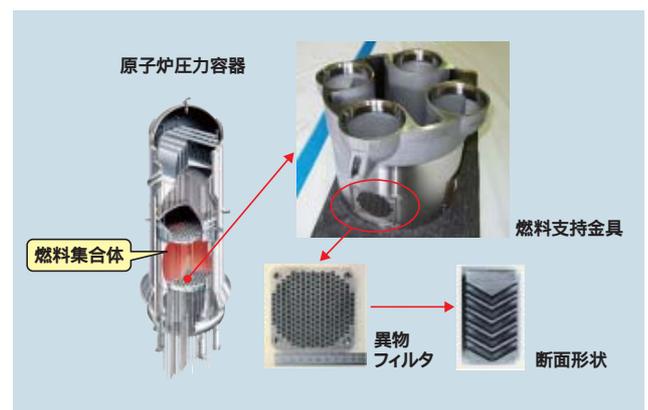


第11図 S-FMCRDの構造

### 3 燃料損傷対策(異物フィルタ付き燃料支持金具の採用)

BWRにおける燃料損傷の主な原因の一つは、原子炉内に持ち込まれたワイヤなどの異物が燃料集合体内に侵入、捕捉されフレッティング(機械的な振動により互いにこすれ合い摩耗する現象)を起こすことによるものです。ABWRは、RIPの採用に伴い原子炉圧力容器底部の形を平らな皿形としており、従来型BWRの半球形に比べ、異物が原子炉内に入った場合、原子炉内の水の流れに乗って巻上がりやすく燃料集合体内に侵入する可能性が相対的に高いと考えられています。

浜岡5号機では、異物が燃料集合体内に侵入するのを防止するために、燃料支持金具(燃料集合体の重量を支えるとともに燃料集合体内に冷却水を導く機能を持つ)の冷却水取込口に異物を捕捉するための異物フィルタを設けた異物フィルタ付き燃料支持金具を採用し、燃料の健全性を向上しています。設計検証として、試運転においてフィルタの健全性評価、目詰まりによる炉心圧損評価、異物捕捉性能評価を実施し問題ないことを確認しています。



第12図 異物フィルタ付き燃料支持金具

### 4 燃料取替機の高速度化

原子力発電所では、通常年一回のプラント定期点検で燃料集合体の一部を取り替えます。燃料取替作業は原子炉内で使用した燃料の燃料プールへの移送や燃料プール内新燃料の原子炉内への移送を行う作業で、燃料取替機を使って行います。燃料取替機は、燃料集合体を深さ方向と横方向へ移動させる機能と回転させる機能を持っています。

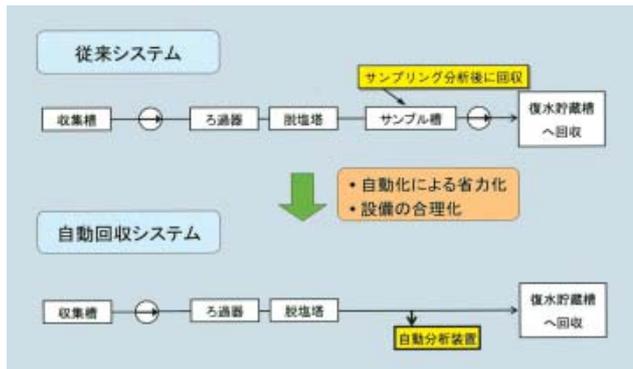
燃料取替作業は、定期点検工程上のクリティカルパス(定期点検を次工程へ進めるためのホールドポイントとなる作業)となっており、この作業を短縮できればその分プラント定期点検が短縮できます。浜岡5号機では、燃料取替機を高速化することで燃料取替作業を短縮し、これによりプラント定期点検の更なる短縮を可能にしました。例えば、深さ方向、横方向の移動速度の向上、従来の一但停止工程の連続動作化などの高速化

技術により、プラント定期点検を約1日短縮することが可能になっています。

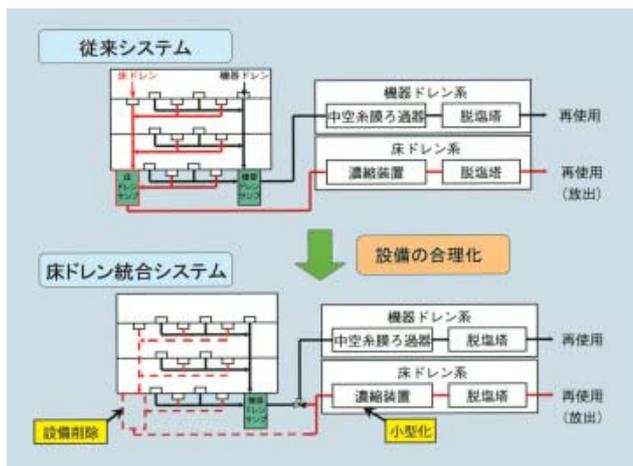
### 5 液体廃棄物処理設備のコンパクト化

浜岡5号機の液体廃棄物処理設備は、様々な新システムを採用することによりコンパクト化を図っています。例えば、機器から発生する廃液(機器ドレン)を処理した水は、従来では処理水のサンプル採取および分析を運転員や分析員が行っていましたが、浜岡5号機ではこれを自動化して省力化を図るとともに、サンプル採取を行うためのサンプル槽やサンプルポンプ等の設備一式を削除して合理化を図っています。また、漏れ水など床に発生した廃液(床ドレン)は、従来では機器ドレンとは別の系統に収集していましたが、浜岡5号機では運転プラントにおける機器ドレンの処理実績等を踏まえ、床ドレンの収集先を機器ドレンの収集先に統合したシステムとし床ドレン収集系統の設備一式を削除して合理化を図っています。

液体廃棄物処理設備のコンパクト化により、同設備を収容する補助建屋の容積を約4000m<sup>3</sup>低減することができました。



第13図 機器ドレン処理水自動回収システム



第14図 床ドレン統合処理システム

### 6 高効率タービンの採用

浜岡5号機のタービンは、国内BWRでは初めてとなる高効率タービンを採用し熱効率を高めることにより、

電気出力の向上を図っています。タービンの動翼の長さは、ABWRの蒸気流量に適した52inch(1.3m)とし、タービンを駆動する蒸気がよりスムーズに流れるように、形状をなぎなた状にカーブさせて回転力を上げた新型翼を採用しました。このほか、タービン内部のシール性能の向上、タービン排気室形状の改良などにより、先行ABWRプラントと同じ蒸気量で定格電気出力を約20MW向上させています。



第15図 新型タービン翼

### 炉内構造物応力腐食割れ(SCC: Stress Corrosion Cracking)対策

SCCは、腐食性の環境におかれた金属材料に引張応力が作用して生じる割れ現象であり、材料、応力、環境の3要因が重畳した場合に発生します。

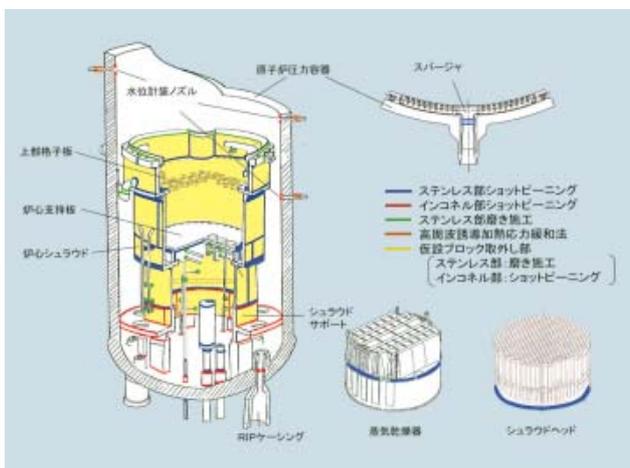
浜岡5号機における炉内構造物のSCC対策としては、当初計画では、材料面の対策としてSCCに強いとされる低炭素ステンレス鋼を使用するとともに、応力面の対策として溶接等による引張の残留応力を圧縮応力に改善する技術(応力改善技術)のうち磨き施工を炉内の主要構造物溶接部にのみ適用することとしていました。しかしながら近年、国内の複数プラントの炉内構造物において、SCCに強いとされてきた低炭素ステンレス鋼のSCC事象が次々と報告されました。原因は、これまでの材料の溶接熱鋭敏化(材料が溶接の熱によりSCCに対して感受性を持つようになること)に起因したSCCとは異なり、機器製作時の機械加工等による材料表面の硬化層に起因したSCCであると推定されています。浜岡5号機では、このような材料面での新たなSCC要因が判明した事態を受けて、応力改善技術とし



第16図 残留応力改善技術

て磨き施工に加えショットピーニングや高周波誘導加熱応力緩和法を適切に組み合わせるとともに、その適用範囲を炉内構造物の広範囲に拡充し、SCCが発生する3要因のうち応力要因を取り除く対策を強化しました。この新たなSCC要因が報告された頃、浜岡5号機は炉内構造物据付工事の真っ最中であったことから、応力改善の施工は大半を浜岡現地で行いました。機器によっては現地施工が困難なものもあり、工場へ送り返して施工した後再度現地へ搬入したものもありました。このほか、材料表面が硬化しにくい機械加工条件の適用や表面硬化層の除去処理を適切に組み合わせ、材料要因についてもできる限り排除しました。

今後、適切に点検を実施し、炉内構造物の健全性を確保していくこととしています。



第17図 炉内構造物のSCC対策

## 見学者に配慮した設計

浜岡5号機では、一般の見学者が容易に原子炉建屋、タービン建屋のオペレーションフロアや中央制御室を見学できるように配慮した設計としています。例えば、原子炉建屋とタービン建屋における見学者用ギャラリーの窓ガラスは、当初計画では普通強化ガラスを使用することとしていました。普通強化ガラスであっても当該ギャラリー内の放射線の線量は非管理区域(クリーンエリア)とできるレベルでしたが、より安心して見学いただけるよう自然界と同レベルまで放射線の線量を下げることとし、普通強化ガラスに替えて鉛遮へいガラスを採用することとしました。製作した鉛ガラス



見学者ギャラリーの窓ガラスに鉛遮へいガラスを設置

見学者ギャラリーへのアクセスにエスカレータを設置

第18図 見学者に配慮した設計

1枚の大きさは、視認性の向上を図り世界最大級としています。このほかにも、見学者専用の出入口を設けて見学者と従事者の動線を分離した設計やエスカレータを設置するなど高齢者や身障者に配慮したバリアフリー設計を採用しています。

## 浜岡5号機の建設工法

### 1 大ブロック化工法の採用

ブロック化工法は、現地での機器の据付け作業を軽減するため、機器をいくつかのブロックに分割しそのブロック毎に完成品に近い状態まで工場で組み立てて輸送し現地据付けを行う工法です。浜岡5号機では、従来から採用されてきたブロック化工法を更に大型化することにより現地据付作業の一層の省力化を図りました。



第19図 大ブロック化工法の適用例(復水器)

### 2 機器先入れ工法の採用

浜岡5号機では、建屋全域にわたり3次元CADシステムを用いた建屋配置計画を行い、更にタービン建屋では、機器先入れのために行う足場解体範囲について事前に建築会社、機器メーカー一体となったシミュレーションを行うなど精度の高い作業調整を実施することにより、ほとんどの機器の据付エリアにおいて建屋建築工事と同時期に機器の先入れを行い、現地据付作業の一層の効率化を図りました。



第20図 3次元CADシステムによる作業効率化