

浜岡原子力発電所5号機における新設計機器・システム

Application of Improved Systems and Components to Hamaoka Nuclear Power Station Unit No. 5

志甫 栄治
SHIHO Eiji

佐々木 則夫
SASAKI Norio

木村 芳幸
KIMURA Yoshiyuki

中部電力(株)浜岡原子力発電所5号機(以下、浜岡5号機と略記)は電気出力1,380MWeの改良型沸騰水型(ABWR)原子力発電プラントであり、1999年3月16日に第1回工事認可(着工)を受けて2005年1月の運転開始に向けて建設に着手した。

浜岡5号機は、先行ABWRである東京電力(株)柏崎刈羽6号機の設計をベースとし、信頼性向上、経済性の向上(設備合理化)を目的として、新設計の機器、システムを開発し適用している。

Construction work has begun on Hamaoka Nuclear Power Station Unit No. 5 of Chubu Electric Power Co., Inc. This is a 1,380 MWe advanced boiling water reactor (ABWR), the commercial operation of which is scheduled for January 2005. The design of the plant is based on that of Kashiwazaki-Kariwa NPS Unit No. 6 of The Tokyo Electric Power Co., Inc., the world's first ABWR. However, various newly designed and improved systems and components have been applied to improve the reliability and economics of the plant.

1 まえがき

浜岡5号機は、ABWR標準プラントの位置付けで、鉄筋コンクリート製格納容器(RCCV)内機器配置や、原子炉内蔵型再循環ポンプ(RIP: Reactor Internal Pump)などの先行ABWR柏崎刈羽6号機の設計を踏襲しているほか、いっそうの信頼性、経済性の向上を目指して、設備の合理化やパワーエレクトロニクス、最新の計算機などの新技術を導入した新設計のシステム、機器を開発し適用してABWRプラントとしての最適化を図っている。浜岡5号機の技術的特長を図1に示す。

電気出力は、タービン効率改善とともに熱的裕度を最適

化してABWRとしては最大出力の1,380MWeとした。

炉心には新型のステップⅢ燃料(9×9燃料)を用いた新改良型濃縮度多種類炉心(A-IMEC: Advanced Improved Mixed Enrichment Core)を採用し燃料経済性の向上を図った。

主要な原子炉設備の新設計システム・機器としては、最新のパワーエレクトロニクス技術を採用し経済性向上、設備の合理化を図ったRIP電源設備の4台化、マグネットカップリングとインダクションモータを使用して信頼性向上、経済性向上を目的に採用を検討している新型制御棒駆動機構(S-FMCRD)、および最新の計算機技術適用による経済性向上と先行運転経験を反映し運転・監視性の改善を目的に

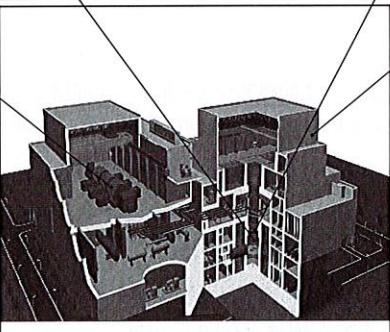
改良炉心 燃料サイクルコスト低減 ◆ステップⅢ燃料の採用 ◆新改良型濃縮度多種類炉心(A-IMEC)	インターナルポンプ(RIP) 単純化・経済性向上 ◆RIP電源設備合理化(RIP電源設備4台化)	改良型制御棒駆動機構(FMCRD) 運転性・信頼性向上 ◆新型FMCRDの採用(検討中) (マグネットカップリング、インダクションモータ)
出力計画 ◆電気出力 1,380MWe ◆高効率タービンの採用 ◆熱的裕度の最適化		
廃棄物処理設備 設備縮小、経済性向上 ◆コンパクトRW(放射性廃棄物処理設備)システム採用 ◆ロータリフィルタ ◆小型濃縮装置 ◆縦型ポンプ		
鉄筋コンクリート製格納容器(RCCV) 建設工期短縮、耐震性向上 ◆原子炉複合建屋 一体RCCV構造		
計測・制御設備 運転性・監視性向上 ◆新型制御盤の改良(A-PODIA) ◆計算機システム機能分散化		
電気設備 新技術採用・適正化 ◆発電機負荷開閉器採用 ◆中型高出力ディーゼル機関の採用		

図1. 浜岡5号機の技術的特長 信頼性向上、経済性向上を目的として採用した設備、システム、機器を示す。

Major new technical features applied to Hamaoka NPS Unit No. 5

開発している新型中央制御盤(A-PODIA)の導入などが挙げられる。

その他の設備の新技術としては、非常用電源設備に中型高出力ディーゼル機関(機関出力約5,800kW, 720rpm)を原子力用として試験検証して適用したこと、廃棄物処理設備に当社先進技術であるロータリフィルタ方式の洗濯・シャワー廃液処理装置を適用したこと、床ドレンと機器ドレンの統合処理システムの採用、小型濃縮装置、縦型ポンプなど新技術を採用した東芝型コンパクト放射性廃棄物処理システムなどが挙げられる。

浜岡5号機の主要なプラント基本仕様を柏崎刈羽6号機と比較して表1に示す。

以下に、新設計機器・システムのうち、RIP駆動用電源装置および新型FMCRDについて詳述する。

表1. 浜岡5号機 主要プラント仕様
Specifications of Hamaoka NPS Unit No.5

系 統	項 目	浜岡5号機	先行ABWR
出力	電気出力	1,380MWe	1,356MWe
炉心燃料	燃料集合体数	872体	同左
	初装荷燃料	ステップⅢ燃料	ステップⅡ燃料
	初装荷炉心	A-IMEC	MEC
制御棒	制御棒本数	205本	同左
	駆動機構	電動型制御棒駆動機構(S-FMCRD検討中)	同左
原子炉	再循環ポンプ形式	RIP	同左
	ポンプ台数	10台	同左
	RIP用電源台数	4台	10台
格納容器	原子炉格納容器	RCCV	同左
電気設備	ディーゼル機関	中型高出力機関×3	高速機関×3
廃棄物処理	廃棄物処理設備型	単独 (コンパクトRWシステム)	共用
	洗濯方式	水洗(ロータリフィルタ方式)	ドライクリーニング

2 RIP 駆動用電源装置 (ASD : Adjustable Speed Drive)

パワーエレクトロニクス分野における制御、デバイス技術の進歩によって、近年産業用交流可変速駆動システムに適用されている中性点クランプ(NPC : Neutral Point Clamped)方式インバータの採用を中心としたシステム構成とすることにより、先行機と同等の信頼性を確保しつつ先行機比約50%の省設備化を図ることができた。

2.1 NPC インバータの採用

NPC方式は、直流回路に2個のコンデンサを直列に接続し、中性点を0電位にクランプすることで3レベルの出力電圧を得る方式である。この方式では、主回路素子にかかる電圧を直流回路の1/2にできるため、同じ素子を使用した場合、先行機方式に比較して2倍の出力電圧を得ることが

できる。これにより、先行機方式で設置されていた昇圧用の出力変圧器を削除することが可能となった。NPCインバータの回路構成を図2に示す。なお、制御回路は先行機同様二重化構成を採用し、信頼性向上を図っている。

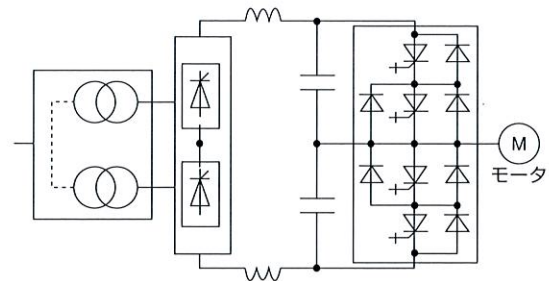


図2. NPCインバータの回路構成 NPC方式の採用で、従来方式に比べ2倍の出力電圧が得られる。
Configuration of neutral point clamped (NPC) inverter

2.2 水冷方式の採用

インバータ装置の主回路はサイリスタやダイオードなどの半導体素子に電流が流れることで熱が発生する。この熱を外部に放出する方式として、従来大容量インバータ主回路の冷却には強制風冷方式が採用され、専用の大型空調設備が必要であったが、これに近年産業用大容量機で実績のある水冷方式を採用することにより空調設備が不要となった。水冷方式の主回路モジュールを図3に示す。

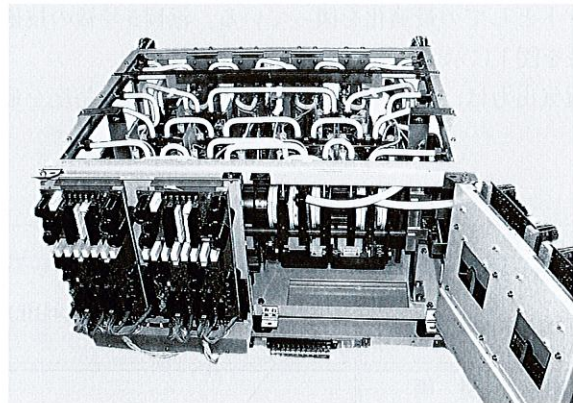


図3. 主回路モジュール 主回路素子の冷却を水冷方式とした。
Liquid-cooled gate-turnoff (GTO) inverter module

なお、装置内に流す水は純水を用い、専用の装置によりその純度を一定レベル以下に維持している。水冷装置のシステム構成を図4に示す。

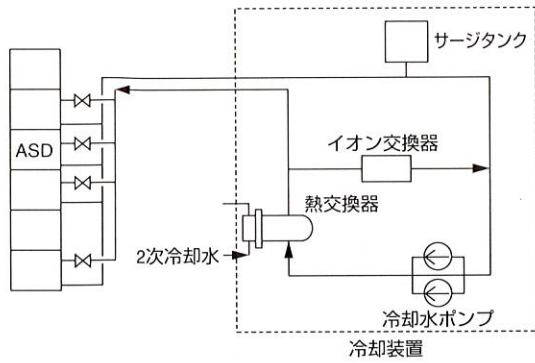
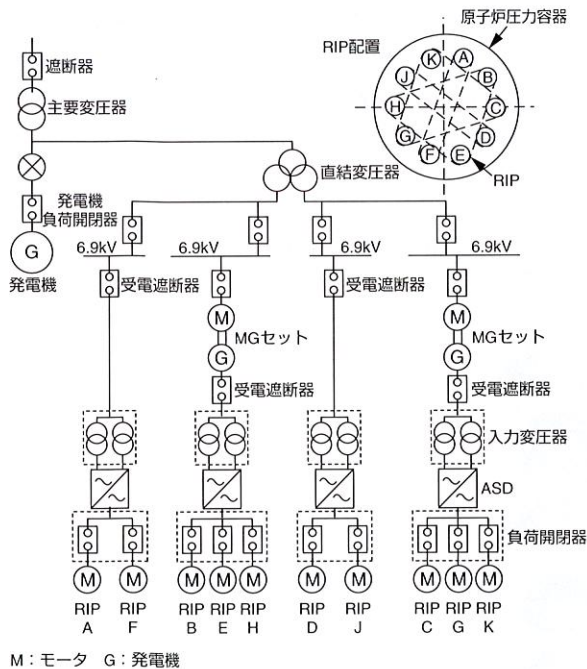


図4. 水冷システムのシステム構成 クローズドループ構成で、イオン交換器により水の導電率は一定レベル以下に維持される。
Configuration of coolant system

2.3 複数台駆動方式の採用

先行機ASDは10台あるRIPに1台ずつ設置される構成とされていたが、素子の大容量化や水冷方式の採用により、コンパクトで大容量な装置設計が可能となった。これにより、主回路特性が負荷に依存しない電圧型インバータの特質を活かし、図5に示すように、所内常用母線1母線に2台または3台ずつ接続されているRIPを1台のASDで駆動する方式を採用した。個々のRIPは負荷開閉器により1台ごとに停止操作が可能である。

図6は、複数台運転状態での制御特性の1例をシミュレーションモデルを用いて解析したものであるが、良好な制御特性を得ている。



M: モータ G: 発電機

図5. ASDのシステム構成 ASDシステムと所内電源系との接続関係を示す。
Configuration of adjustable speed drive (ASD)

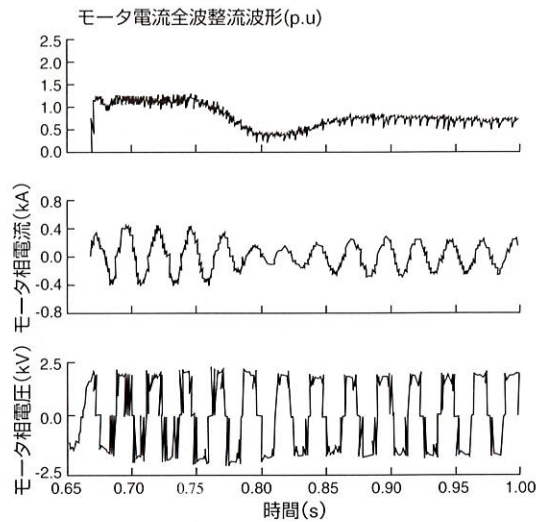


図6. 制御特性 瞬時停電/制御切替時の再起動特性を示す。
Re-startup characteristics after momentary voltage drop and controller switchover

3 S-FMCRDの適用(計画中)

ABWRの特長の一つとして改良型制御棒駆動機構(FMCRD)を採用している点が挙げられる。FMCRDでは、通常時の出力制御を電動機(ステップモータ)を用いた電動駆動により行うことで、従来の制御棒駆動機構に比べてより微細な駆動を可能にしている。

図7に示すように、電動機を適用したため駆動軸にグラ

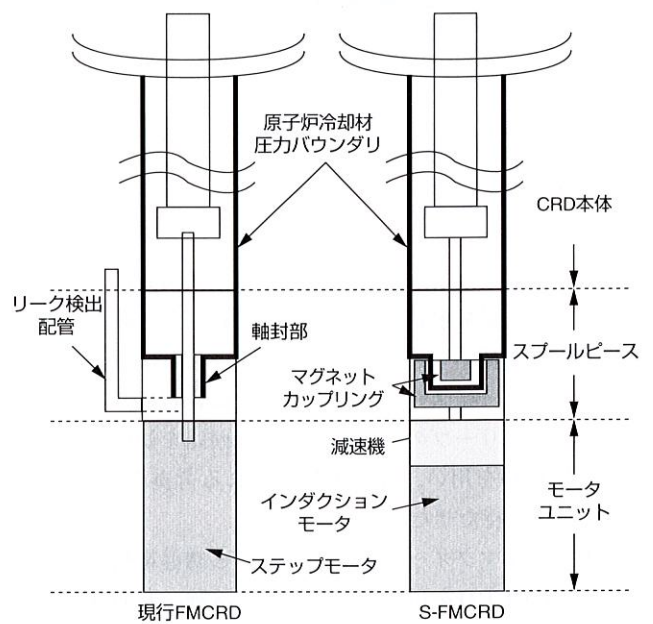


図7. FMCRDの構造比較 S-FMCRDはマグネットカップリングの採用で軸封部をなくし、信頼性の向上を図っている。
Comparison of conventional and sealless fine-motion control rod drives (FMCRDs)

ンドパッキンによる軸封部を設けており、これを点検・交換することが必要である。また、ステップモータの駆動にはインバータが必要である。

そこで、磁力により隔壁越しに電動機の回転トルクを伝達するマグネットカップリングを用いて、軸封部をなくしたシールレス構造とするとともに、システムの簡素化を目的として、インバータを必要とするステップモータに代わり、簡単なON/OFF制御で駆動可能な誘導電動機(インダクションモータ)を用いたS-FMCRDを開発し、適用を計画している。

マグネットカップリングは、永久磁石を用いた非接触のトルク伝達機構である。マグネットカップリングの基本構造を図8に示す。このマグネットカップリングの特長は、電動機の駆動トルクを磁力により非接触で伝達できることである。マグネットカップリングの OUTER 磁石を電動機により駆動すると、隔壁を介し磁力が INNER 磁石に伝達され、INNER 磁石が追従して回転する。この回転をボールネジを介して直線運動に変換し、制御棒が上下動する。原子炉冷却材圧力バウンダリは隔壁により完全に隔離されることから、圧力バウンダリからの漏えいを考慮する必要がなくなった。

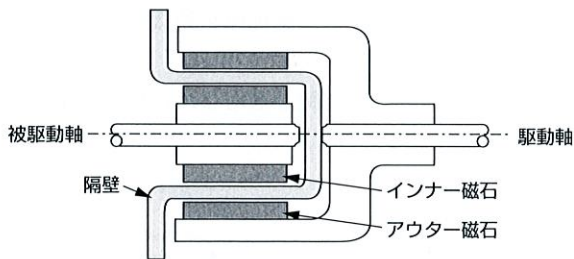


図8. マグネットカップリングの基本構造 隔壁を介して相対した磁石により駆動トルクを伝達する。
Schematic diagram of magnetic coupling

マグネットカップリングに使用する永久磁石は、最大エネルギー積、耐放射線性および経年劣化などの観点から希土類コバルト磁石の $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ を選定し、さらに磁石が水につからないようにスリーブにより完全に密封できる構造とした。このスリーブの材料には、磁気回路を妨げないように非磁性材料を用い、設計上想定される荷重を考慮して、十分な強度を持たせた。

このようなマグネットカップリングと誘導電動機を組み合わせたS-FMCRDを用いて、各種性能試験、寿命試験などを実施し、実用化の確認を得た。S-FMCRDの主要仕様を現行FMCRDと比較して表2に示す。また、このマグネッ

トカップリングを組み込んだ、試験用に試作したモータユニットおよびスプールピースの外観を図9に示す。

表2. FMCRD主要仕様
Specifications of FMCRDs

項目	S-FMCRD	現行FMCRD
連続駆動速度(mm/s)	28±5	30±3
最小駆動幅(mm)	36.6	18.3
制御方法	ON/OFF (速度制御なし)	インバータによる速度制御

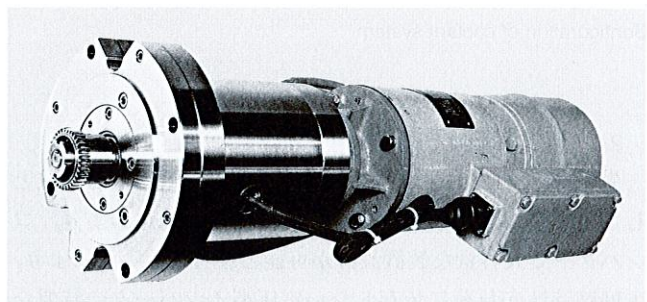


図9. スプールピースおよびモータユニット試作品 マグネットカップリングを組み込んだS-FMCRD用スプールピースとモータを示す。
Spool piece and motor assembly

4 あとがき

浜岡5号機は先行機である柏崎刈羽6号機の設計を基本としつつ、信頼性向上、経済性向上の観点から新設計を随所に取り入れた最新鋭ABWRプラントである。今後は中部電力(株)と協力しつつ、2005年1月の商業運転開始に向け、詳細設計、製造を進めていく。



志甫 栄治 SHIHO Eiji

電力システム社 原子力事業部 原子力技術部部长。
原子力プラントのプロジェクト業務、品質保証業務に従事。
日本機械学会会員。
Nuclear Energy Div.



佐々木 則夫 SASAKI Norio

電力システム社 磁気エンジニアリングセンター 原子力機器設計部部长。原子力プラントの機器設計・開発に従事。
日本機械学会会員。
Isogo Nuclear Engineering Center



木村 芳幸 KIMURA Yoshiyuki

電力システム社 磁気エンジニアリングセンター 原子力電気計装設計部部长。原子力プラントの電気計装システムの計画・開発に従事。電気学会、日本原子力学会会員。
Isogo Nuclear Engineering Center