

軽水炉の建設

Construction of New Boiling Water Reactors

志賀 重範 前川 治 永井 公夫

■ SHIGA Shigenori

■ MAEKAWA Osamu

■ NAGAI Kimio

東芝が建設を担当した中部電力(株)浜岡原子力発電所5号機が2005年1月に営業運転を開始した。世界で3機目の改良沸騰水型原子力発電所(ABWR)である。また、東北電力(株)東通原子力発電所1号機は既に燃料装荷を完了し起動試験を進めている。当社はこれらのプラントの建設経験を生かして海外展開の準備を進めている。

The Hamaoka Nuclear Power Station Unit No. 5 of Chubu Electric Power Co., Inc. was put into commercial operation in January 2005, becoming the third advanced boiling water reactor (ABWR) in the world. Moreover, the Higashidori Nuclear Power Station Unit No. 1 of Tohoku Electric Power Co., Inc. is now at the startup test stage.

Toshiba is currently deploying ABWRs for the international market based on the improved design and construction experience obtained with these domestic nuclear power plants.

1 まえがき

世界最初のABWRである東京電力(株)柏崎刈羽6号機が、1996年11月に営業運転を開始して約8年が経過した。東芝は、新技術を積極的に採用した第2世代ABWRである中部電力(株)浜岡5号機の原子炉設備を担当し、これが2005年1月に営業運転を開始した。また、東北電力(株)東通1号機は2004年12月に燃料装荷を開始し、現在起動試験を進めている。両プラントは先行機の特長を生かしつつ、経済性と信頼性を更に改善する新技術を取り入れている。

ここでは、最新の軽水炉に取り入れられた新しい技術を紹介するとともに、これらの建設経験を生かした当社の海外展開について述べる。

2 浜岡5号機の建設

2.1 概要

ABWRは、安全性、経済性、運転性、信頼性など多くの点で優れた最新鋭の原子力発電所であり、世界初のABWRとして東京電力(株)柏崎刈羽6/7号機が安定した商業運転を行っている。これに引き続く中部電力(株)浜岡5号機の建設に際してはABWRを更に魅力あるものとするため、最先端の技術を取り入れている。

ここでは、営業運転を開始した浜岡5号機(電気出力138万kW)の最先端技術について述べる。

2.2 新技術の採用

2.2.1 S-FMCRDの採用 制御棒駆動機構は原子炉の出力を制御し、非常時には原子炉を緊急停止させるため

の装置であり、柏崎刈羽6/7号機ではABWR用に開発した改良型制御棒駆動機構(FMCRD)を採用し、通常時の出力を同期電動機によって制御している。電動機の駆動力は直接制御棒の駆動軸に伝達される構造で圧力隔壁を駆動軸が貫通しているため、この部分のグランドパッキンの点検及び交換が必要である。また、同期電動機を駆動するためのインバータシステムを設けている(図1(左))。

浜岡5号機では、軸封部に磁気力によって圧力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適用することによって、グランドパッキンをなくし、保守性及び信頼性を向上させた。併わせて同期電動機に代えて誘導電動機を採用し、同等の駆動特性と信頼性を備える簡素化さ

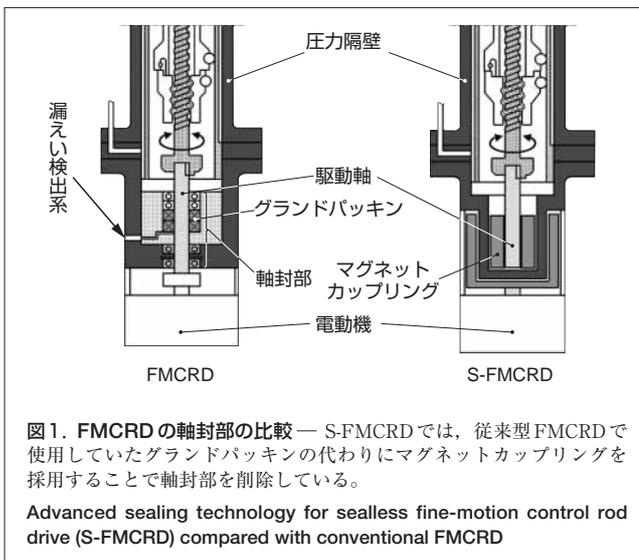


図1. FMCRDの軸封部の比較 — S-FMCRDでは、従来型FMCRDで使用していたグランドパッキンの代わりにマグネットカップリングを採用することで軸封部を削除している。

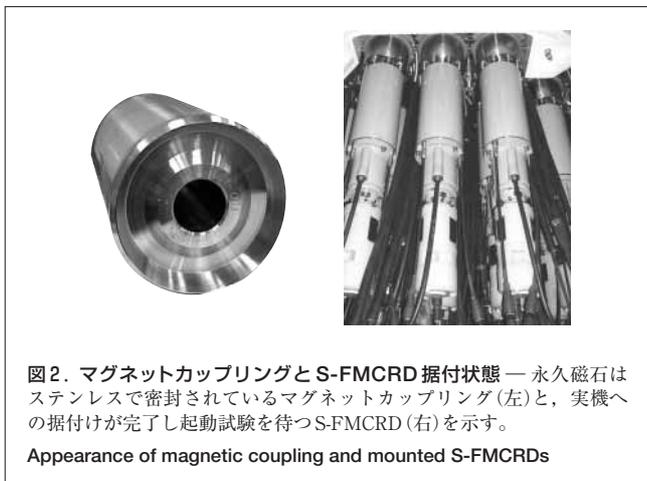
Advanced sealing technology for sealless fine-motion control rod drive (S-FMCRD) compared with conventional FMCRD

れた駆動システムを実現した(図1(右))。

このマグネットカップリングは、次のような利点を備えている。

- (1) 耐熱，耐放射線性に優れた永久磁石 (Sm₂Co₁₇)
- (2) 小型で大きなトルク伝達力 (49 Nm 以上) の長期間 (30年以上) 保持
- (3) 磁気回路を閉回路とすることによる漏れ磁束の抑制
- (4) 30年以上にわたるメンテナンスフリー化

このマグネットカップリングと誘導電動機を組み合わせた新型 FMCRD を S-FMCRD (Sealless-FMCRD) と名づけ、浜岡5号機に初めて適用し、商業運転前の各種試験において優秀な駆動性能を備えていることを確認した(図2)。

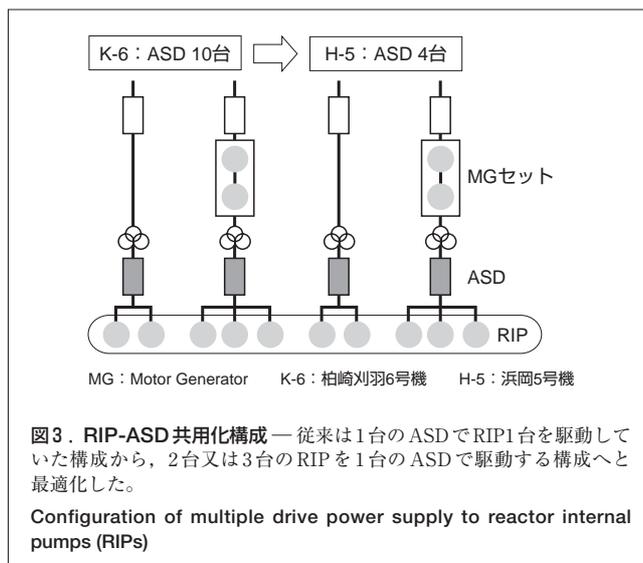


2.2.2 RIP-ASD 共用化の採用 冷却材再循環用

インターナルポンプ (RIP) 駆動電源システムの主要構成機器に可変周波数電源装置 (ASD) がある。先行 ABWR では、10 台の RIP に ASD をそれぞれ 1 台ずつの構成としている。

浜岡5号機では、最新の素子大容量化技術や水冷技術を適用して ASD を大容量化するとともに、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生かして、1 台の ASD で 2 台又は 3 台の RIP を駆動する方式を採用した。更に、インバータの方式に、高い出力電圧を確保できる中性点クランプ (NPC : Neutral Point Clamped) 方式を採用することによって、出力変圧器をなくし、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。

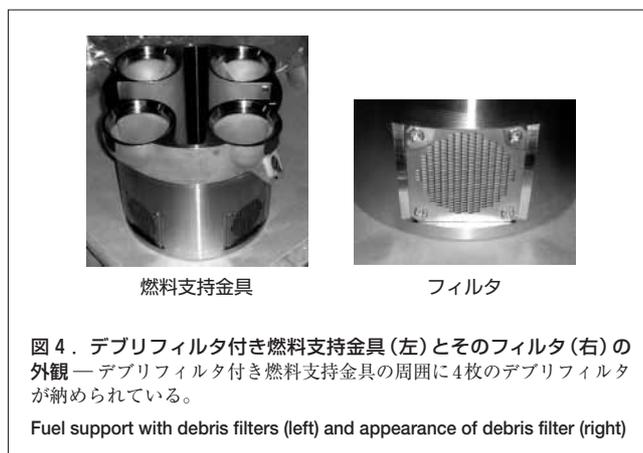
この ASD 共用化システム採用にあたっては、1 台のインバータで複数台の電動機を駆動する運転制御特性についてシミュレーションモデルによる設計評価を、また、工場検証設備で、2 台の RIP 運転時の性能確認試験を行い、十分な機能を備えていることを確認した。更に、商業運転前の各種試験により 10 台の RIP 運転状態での性能確認試験を行い、RIP 駆動電源システムとして優秀な性能を持つことを確認した(図3)。



2.2.3 デブリフィルタ付き燃料支持金具及びシングルビーム型炉心支持板の採用

異物 (デブリ) 侵入による燃料破損事象対策として、燃料支持金具にデブリフィルタを設けた設計を採用した。フィルタ孔の構造は、燃料破損の原因となるワイヤ状のデブリを確実に捕捉 (ほそく) できる性能を備えている(図4)。

また、クロスビーム型であった炉心支持板の補強ビームにシングルビーム型を採用することにより、溶接線の減少による信頼性向上を図るとともに、先行機に比べ炉心差圧の低減と炉心流量の安定性改善が得られることが起動試験結果などで示された。



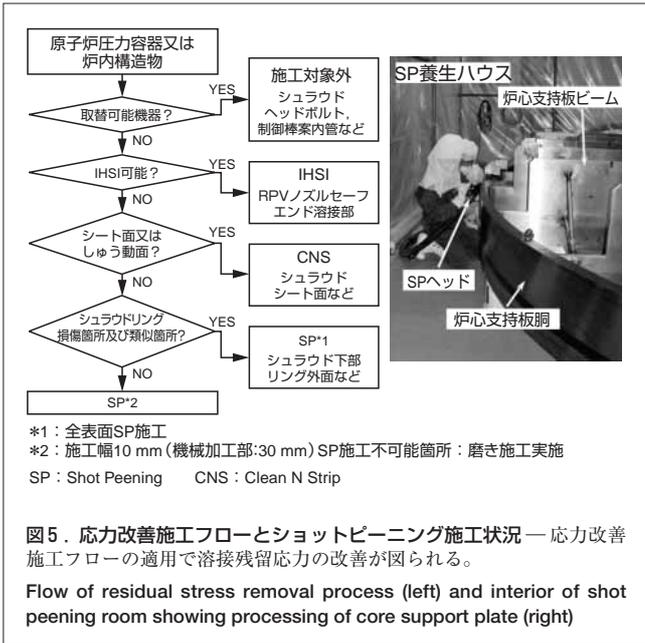
2.2.4 応力腐食割れ (SCC) 対策

最近のステンレス鋼 SUS316L 製シュラウドの SCC は、強機械加工を受けた素材の表層部が硬化し、これに溶接残留応力が作用することにより発生することが確認されている。この防止対策として、浜岡5号機のシュラウドでは次の耐 SCC 性の向上を図った。

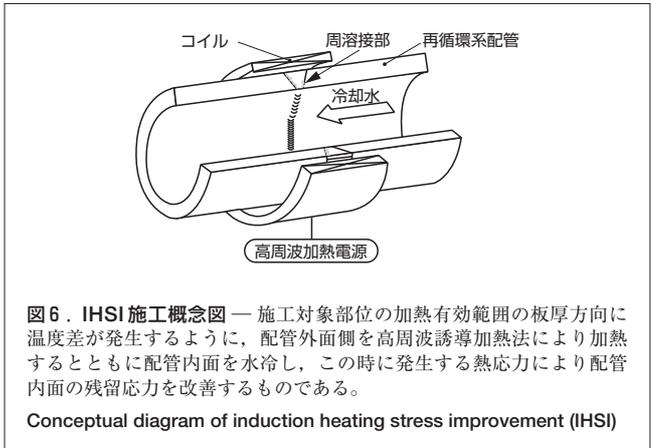
- (1) 製造手順の見直しによる高残留応力部の除去

- (2) 機械加工条件の最適化による加工硬化の緩和
- (3) 溶接残留応力改善施工の追加(溶接部及び熱影響部に対するショットピーニング、クリーンNストリップ及びIHSI(後述)の施工, 図5)

また、原子炉压力容器(RPV)鋼材監視試験と同様な考え方で、残留応力改善施工を施した試験片を炉内に装荷し、実機環境下での応力改善特性の長期経年変化データを採取することにより、SCC対策の有効性を検証するとともに、取得データを炉内構造物の長期保全計画へ反映する計画である。



更に最近、複数の運転プラントの再循環系配管の溶接部近傍内面にSCCによるひび割れが発見され、更なる対策が必要となったことを受けて、東通1号機の再循環系配管では、予防保全対策として応力因子の改善(引張残留応力の低減)を図ることとし、残留応力改善効果が高くかつ建設工上で適用しやすい高周波誘導加熱応力改善法(IHSI: Induction Heating Stress Improvement)を採用した。東通1号機では、再循環系配管のほとんどの周溶接継手に、引張残留応力の低減効果が見込める狭開先継手を採用しており、IHSIによる効果とあいまって、より効果的に残留応力の改善が図られている(図6)。



3.2.2 建設技術(全天候型工法) 東通地域は寒冷地で降雪量が多いことから、冬期における作業効率低下対策として天候に左右されない全天候型工法を採用し、冬期工事における天候の影響を取り除いた。また、屋内には本設天井クレーンを早期設置することにより、建設現場を工場化して生産性の向上、作業環境の改善、工期の短縮及び現地据付工事の効率化を図った。次に、全天候型工法採用に伴う工期短縮について述べる。

- (1) 冬期作業環境改善による工期短縮 当初、風雪による影響で12月から3月の現場稼働率は約50%と予測されたが、全天候型工法採用により75%以上にすることができた。その結果、2001年及び2002年の冬期2回の屋外工事稼働率向上により約2か月の工期短縮効果を得た。なお、タービン建屋への全天候型工法適用はBWR建設では国内初めての採用である。
- (2) 天井クレーン早期稼働で2.5か月工期短縮 従来、タービン建屋では主タービン組立開始時期に天井クレーンを設置していたが、全天候型工法を採用することで天井クレーン稼働開始を2年前倒しすることが可能となった。その結果、天井クレーンを用いた大型一体搬入が可能となり、復水器下部本体を配管入り2分割大型

3 東通1号機の建設

3.1 概要

東通原子力発電所は東北電力(株)の2番目の原子力立地点であり、国内では約10年ぶりの新規立地点である。

東通1号機(沸騰水型原子炉(BWR5型)、電気出力110万kW)は、東通原子力発電所の初号機として2004年12月に燃料装荷を開始し、2005年10月の営業運転開始に向けて順調に建設が進んでいる。当社は主契約者として、原子炉設備、タービン・発電機設備、廃棄物処理設備などプラント一式を担当している。ここでは、BWR5型原子力発電所の集大成として、東通1号機に適用した主な信頼性向上技術と建設技術について述べる。

3.2 信頼性、経済性向上に向けた取組み

3.2.1 再循環系配管 SCC 対策(高周波誘導加熱応力改善法) 再循環系配管に用いられているオーステナイト系ステンレス鋼の溶接熱影響部のSCC発生防止対策として従来プラントと同様に316(LC)低炭素系ステンレス鋼を採用している。

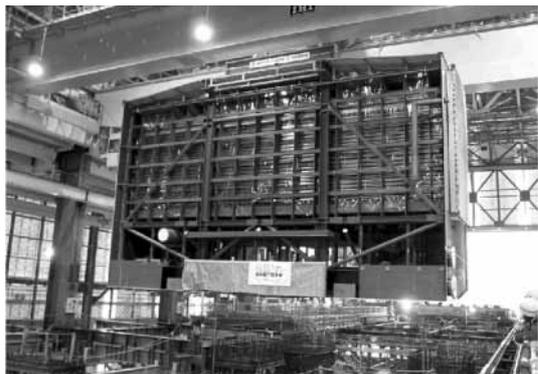


図7. 復水器下部本体搬入状況—復水器下部本体を大型ブロック化してタービン建屋内へ直接据付している。

Installation of lower body of condenser

ブロック化して建屋内へ直接据え付けることで、復水器工事を2.5か月短縮できた(図7)。

4 海外展開

米国では2001年5月にブッシュ大統領が発表した“新エネルギー政策”の下、政府及び民間レベルで、20年以上途絶えたままの新規原子力発電所建設の再開を目指して、前向きな検討が進められている。ABWRは、既に米国で設計認証を取得済みであり、米国の原子力カルネッサンスにおいて最初の新設原子力発電所に採用される可能性がもっとも高い原子炉である。

米国エネルギー省(DOE)が発表した“原子力2010年計画”の一環として、当社は現在、DOEの資金補助を受けて、米国



図8. TVAベルフォンテ・サイトABWR計画案—ABWR2基の建設計画について、米国政府の資金補助を受けて、建設性と経済性の検討をTVA及び米国協力会社と共に進めている。

Plan view of ABWR construction at TVA Bellefonte site

の有力電力会社であるテネシー峡谷開発公社(TVA)のアラバマ州のベルフォンテ・サイトにABWR2基を建設する場合の経済性と建設性をゼネラル・エレクトリック社などの米国企業と検討中である。この検討が米国における20年ぶりの原子力発電所建設につながることを期待している(図8)。

5 あとがき

ここでは、当社における軽水炉の建設状況と今後の海外展開の概要について述べた。当社では、これまでの軽水炉の建設経験を踏まえて更に安全性、経済性、運転性、信頼性に優れた次期国内原子力発電所の建設を進めていく。

文 献

- (1) Takahashi, M., et al. Latest technologies applied to the advanced boiling water reactor (ABWR) A history of the development and manufacturing stage (ICONE12-49235), 12TH International Conference on Nuclear Engineering, April 25 - 29, 2004.
- (2) Takahashi, M., et al. Status of pre-operating tests for the latest ABWR in Hamaoka Nuclear Power Plant Unit No.5 (ICONE12-49333), 12TH International Conference on Nuclear Engineering, April 25 - 29, 2004.



志賀 重範 SHIGA Shigenori

電力・社会システム社 原子力事業部 原子力技術部長。
軽水炉の機器設計、システム設計業務に従事。

日本原子力学会会員。

Nuclear Energy Systems & Services Div.



前川 治 MAEKAWA Osamu

電力・社会システム社 原子力事業部 原子力機器設計部長。原子炉構成機器の設計に従事。米国機械学会会員。

Nuclear Energy Systems & Services Div.



永井 公夫 NAGAI Kimio

電力・社会システム社 原子力事業部 原子力プラント設計部長。BWRプラントのプラント設計業務に従事。日本機械学会、日本原子力学会会員。

Nuclear Energy Systems & Services Div.