

沸騰水型原子力発電所の今後の建設に向けて

Construction of Boiling-Water-Reactor Power Plants

深沢 昌樹
M. Fukasawa

水町 渉
W. Mizumachi

利光 聰
S. Toshimitsu

当社は、長年にわたり沸騰水型原子力発電所(BWR)の国産化、改良・開発を推進し着実に実績を重ねてきた。本年(1995年)7月にBWR-5型の集大成である東北電力㈱女川2号機を完成し、現在は改良型BWR(ABWR)の初号機である東京電力㈱柏崎刈羽6・7号機を建設中である。これらの建設と並行して次期BWRの計画に取り組んでいる。次期BWRでは安全性の維持はもちろんあるが、特に経済性を高めることが最大の課題であり、建設費・運転費を低減するため新技術、運転建設経験に基づく改良、工事の効率化などの検討を進めている。また、軽水炉主流の時代が2010年以降も継続し長期化することに備え、将来の時代にふさわしい次世代BWRの研究・開発も要素技術を中心に着実に進めている。

Toshiba has been promoting the development and improvement of boiling-water reactors (BWRs) in Japan over a period of many years. The Onagawa Nuclear Power Station Unit No. 2 of Tohoku Electric Power Co., Inc. started commercial operation in July this year, and the world's first advanced BWRs (ABWRs), the Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Station Units No. 6 and No. 7 of The Tokyo Electric Power Co., Inc., are currently under construction. In addition to these plant construction projects, Toshiba is dedicating itself to the plans for the next scheduled BWR in which the enhancement of economy is the most important aspect, and is concentrating all possible efforts on accomplishing this target.

This paper introduces Toshiba's activities in relation to the next scheduled BWR, including some new technologies being developed for the next-generation reactor of the future.

1 まえがき

当社は、1960年代のBWRの導入から国産化、国の改良標準化などを通じて改良・開発を進め、信頼性・使いやすさ・経済性の向上に努めてきた。

本年7月に商業運転を開始した東北電力㈱女川2号機は82.5万kWのBWR-5型で、当社として8基目の第二次改良標準化プラントであるBWR-5であり、これまでの経験の集大成を目指したものである。現在は、第三次改良標準化プラントであるABWRの初号機となる東京電力㈱柏崎刈羽6・7号機の建設に、1996年末の営業運転開始を目指して注力しているところである。当社のBWRの建設の実績を図1に示す。

女川2号機の建設実績、柏崎刈羽6・7号機の建設状況について別稿で詳述するので、ここではサイトの建設と平行して注力している次期プラントに向けての準備と次世代に向けてのBWRの開発の状況を紹介する。

2 次期プラントに向けての準備

原子力発電の経済的な優位性の維持向上のため、次期プラ

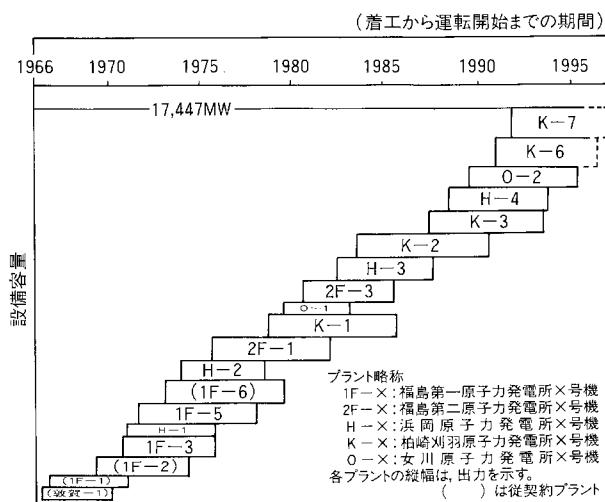


図1. 当社のBWR建設の実績 当社はすでに17基のBWRを建設し、現在ABWR2基を建設中である。

Toshiba's experience in BWR and ABWR construction

ントに対しては安全性・信頼性を維持しつつ、発電原価低減のための建設費・運転費の低減、稼働率の向上の施策を盛り込むことが最重要と考え注力している。

このため設計・製造・調達・工事全体にわたる効率化を一段と加速するとともに、標準化のリピートメリットを越える新技術および建設・運転実績に基づく改良技術の採用、国際調達を含めた調達の合理化などに取り組んでいる。

2.1 建設・運転の経験実績の反映

柏崎刈羽 6・7号機は ABWR の初号機であり特に慎重に工事を進めてきたが、実績によりさらに効率化・合理化を図るべく、工事の進捗(ちょく)に合わせ次号機への反映事項を整理してきた。以下に 2, 3 の例を示す。

インターナルポンプ (RIP) については水力部の精密機器加工を行った結果、きわめて均一な水力特性が得られた。この成果を試験時間の短縮に反映することが可能である。

コンクリート格納容器のライナについても工事経験からさらに据付用ジグなどの合理化を図れる見通しを得ている。

近年の BWR-5 の運転実績から最近のプラントでは、種々の対策によりクリーンプラントが達成され、機器ドレンと床ドレンの水質差が小さくなっている。また、高性能なろ過処理装置(中空糸膜フィルタ)の採用により、従来は分離収集していた排水系を統合することが可能となった。復水脱塩塔に前置する中空糸膜フィルタは、運転実績と改良膜の採用により従来の処理流速より高速な設計ができ、フィルタ塔数の削減が可能となった。

2.2 新技術による改良

建設中の ABWR についても計画時点から約 10 年以上経過しており、新しい技術も発掘されている。

パワーエレクトロニクスの分野では、制御技術の向上と半導体素子の高圧・大容量化を背景に開発された NPC (Neutral Point Clamped) 方式のインバータを ABWR インターナルポンプの可変周波数の駆動電源装置に適用することを検討している。

NPC 方式によれば 3 レベル電圧制御 (P, 0V, N) を行うことにより出力電圧を高圧化できるため、従来方式で設置されていた昇圧用の出力変圧器を削減できる。また、現在は電源盤は風冷としているが、主な発熱部であるパワー素子を直接水で冷却することにより空調機器を削減できる。図 2 に NPC インバータの回路と外観を示す。

電源台数についても、現在は 10 台のポンプに 1 台ずつ可変周波数電源を設けているが、これを 2 台、3 台の組として 4 台とすることも検討している。

このほか電気・制御の分野では、ABWR の制御棒駆動機構をグループに分け、常駆動をグループごと一つの駆動電源で切り換えて行い、駆動電源の数を大幅に低減するシステムの合理化や機能分散がされ、小型・高性能化した計算機のプロセス計算機への応用などを進めている。

タービンシステムでは、火力プラントで適用を進めているリーンノズル、高性能動翼などを原子力タービンへ適用し、従来より約 1% の効率向上を図っている。

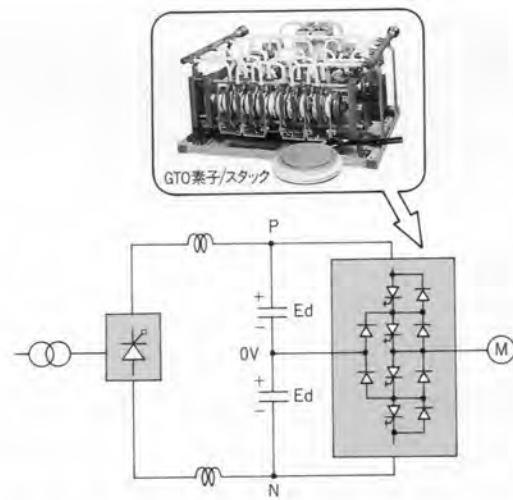


図 2. NPC インバータの回路と外観
高速・高精度・大容量で可変速のゲートターンオフ制御を実現する。
Neutral point clamped inverter

2.3 建設の効率化

工期短縮、将来の労働力不足対応などのニーズに加え、サイト条件を考慮しつつ工事の効率化を図っている。効率化のためには建築施工と協調した大ブロック工法、モジュール工法が従来に増して重要となり、大型揚重機の適用がますます効果的になる。さらに、三次元 CAD を用いた配置計画を活用した建設工事シミュレーションなどにより効率の良い最適化を図っている。

図 3 は寒冷地での全天候工法の先行鉄骨と大ブロックとの干渉チェックを行っている画面である。鉄骨鉄筋コンクリート、鋼板コンクリートなど建築側の技術動向も併せて考えると、図 4 に示すとおり一つの部屋の機器とその周りの鉄骨構造とを一体モジュールとして搬入するルームモジュール工法は有効な手段となり、将来に向けてさらに検討を進めている。



図 3. 寒冷地での全天候工法と工事シミュレーション
先行鉄骨工事と大ブロック搬入の干渉をチェックしている例。
Simulation of all-weather construction involving hanging of large block

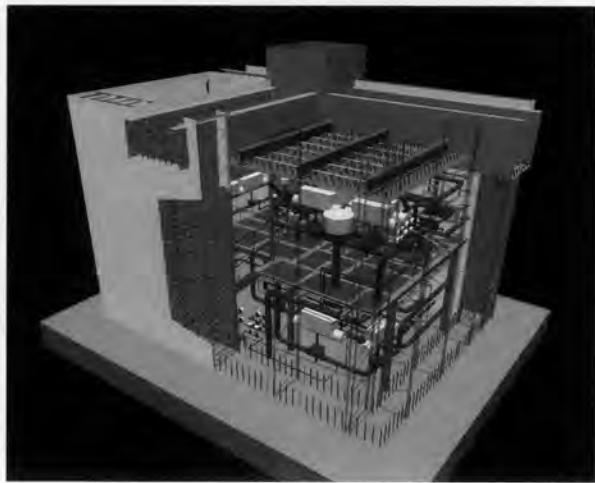


図4. ルームモジュール工法 部屋の機器と周囲の鉄骨構造とを一体モジュールとして製作し工事を効率化する。

Room module method for efficient construction

2.4 運転費の低減

2.4.1 燃料サイクル費の低減 取出燃焼度が $33 \text{ GW} \cdot \text{d/t}$ の高燃焼度化のステップI燃料から $39.5 \text{ GW} \cdot \text{d/t}$ のステップII燃料が現在採用されているが、 $45 \text{ GW} \cdot \text{d/t}$ を目ざした 9×9 格子のステップIII燃料の実用化試験を進めている。燃料の改良に合わせ、核熱設計の面でも多種類の濃縮度を初装荷炉心にも用いるなどくふうを行っている。次の2.5節で述べる炉の余裕を炉心流量調整幅の調整によるスペクトルシステム運転に活用し、さらに燃料サイクル費低減を図ることも可能である。

2.4.2 保守性の向上 運転費の低減と定期検査期間を短縮し稼働率を高めるため機器の保守性の改良を行っている。ターピンケーシングボルト、軸のカップリングボルトなどは油圧ジグ・工具を使う方式とし、作業の効率化を図っている。

ABWRの改良型制御棒駆動機構本体は、しゅう動部をなくしメンテナンスフリーであるが、下部にある通常駆動用の電動機との間の軸封部は定期的な点検が必要であった。最近は小型・軽量で高性能の磁石が開発され、図5に示すような軸封部のないマグネット方式を開発している。

2.5 出力の増加の検討

燃料設計の分野では丸セル形スペーサにより最小限界出力比(MCPR)の向上が実現され、 9×9 燃料が採用されると線出力密度の上でも余裕が出てくる。また、ABWRの再循環ポンプは、原子力工学試験センターの実証試験などを通じて約10%の流量の余裕があることが実証されている。

これらの余裕を出力密度の上昇に向けると、熱出力を現行のABWRの3,926 MWtから約10%増加することができる。これにより電気出力135万kW級ABWRの圧力容器を使用し、原子力系を一部変更することによって145~150万kWに対応でき、先行機の設計を有効に活用しつつABWRの能力を

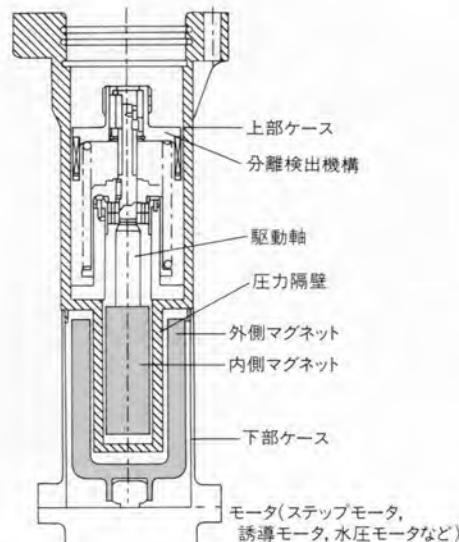


図5. マグネット方式カップリング 磁気力利用により単純化、摩擦低減もでき、軸封部がなく保守性が向上する。

Magnet coupling for fine motion control rod drive

フルに発揮させ、kW当たりの建設単価低減を目指している。

図6は、これらの関係を横軸に炉心流量、縦軸に熱出力をとて、現行のABWRの定格値で規格化して模式的に示したものである。

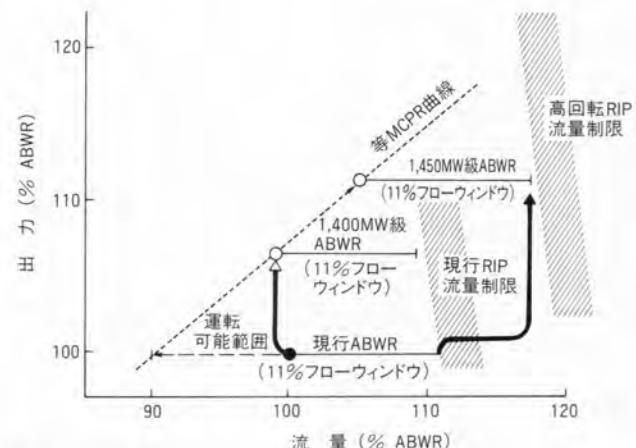


図6. 出力の増加 燃料や炉心の熱的余裕、再循環ポンプによる炉心流量の余裕を活用して定格出力を増加できる。

Increase in rated power of ABWR

3 次世代BWRの開発

BWRは現在のBWR-5、ABWRを基本とし、これに改良を加えることで発展していくと考えるが、軽水炉時代の長期化のもと、将来の社会動向、ニーズに対応するため、新技術の開発によるシーズの蓄積を図ってきた。

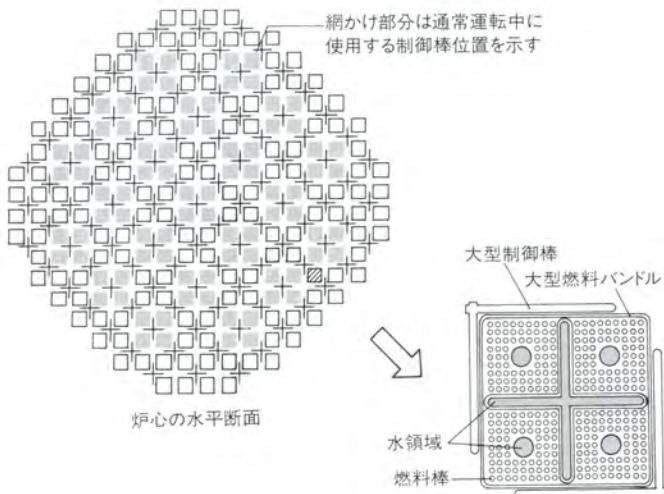


図7. 次世代炉の大型燃料炉心 大型化し数量を削減した燃料と制御棒で定期検査を短縮化し、燃料経済性も向上できる。

Cross-sectional view of large fuel bundle core

次世代 BWR の開発では、経済性向上が基本であるが、システム・機器の単純化を図り、人にやさしく、社会に受け入れられやすいプラントを目指している。開発は電力会社・メーカーの共同開発型で進めているが、当社が現在取り組んでいる技術の一端を以下に紹介する。

3.1 炉心設計

燃料設計としては、バンドル内の減速材・燃料棒の配置設計の柔軟性を高めるとともに、燃料と制御棒の数を削減し、燃料交換作業の効率化を目指した大型燃料バンドルの検討を進めている(図7)。燃料バンドルは従来のバンドルをサブバンドルとして4体合わせ、中央に十字形の非沸騰の水領域を設ける形状とし、水対ウラン比を上げることにより全MOX(混合酸化物)燃料の装荷も容易となる。制御棒は従来の約2倍の翼長の十字形制御棒とし、1体の大型バンドルを2本の制御棒で反応度制御する構成としている。

制御棒は、制御棒駆動機構の簡素化を目指し出力制御用と炉停止用の2種類に機能を分割している。出力制御用は、電動駆動として小さいステップ幅の位置制御能力をもち、出力運転時に使用し、炉停止用は大きなステップ幅の位置制御能力とスクラム機能をもち、起動停止時に使用する。

3.2 安全設計

事故後の短期対応はアクティブな系統、長期対応および過酷事故対応はパッシブな系統で受け持つ安全系を検討している。パッシブの格納容器からの崩壊熱除去系としては、建物上部に設けるプールの保有水をヒートシンクとする自然循環型を採用し、過酷事故の緩和システムにも使用する。この冷却システムについては実長高さの設備で実験を行っており、基本性能の確認を行っている。

3.3 中央監視制御システム

運転員の負担軽減、定期検査期間の短縮にこたえるため、



図8. 次世代炉の中央監視制御室 マンマシンシステムと環境の大幅な改善を図った革新的なモデルルーム。

Significantly improved central control room for future BWR

人工知能とマルチメディアを活用し、運転コンソール、保守コンソール、大型表示盤を備え、マンマシンシステムと環境改善を図った制御室を開発中である(図8)。

4 あとがき

次期 BWR プラントについては経済性向上策としての改良技術を中心に紹介したが、標準化・検査の合理化などについても幅広く検討を進めている。また、次世代 BWR については要素技術を紹介したが、今後プラント概念として構築していく。次期および次世代の BWR の開発については電力会社と密接に連携をとりながら推進させていただいているが、よりいっそうのご指導ごべんたつをお願いする次第である。

文 献

- (1) 深沢昌樹：沸騰水型原子炉の技術動向、東芝レビュー、48, 11, pp.796-798 (1993)
- (2) 水町 渉、他：将来型 BWR の研究、東芝レビュー、47, 11, pp.834-837 (1992)
- (3) 田辺 章、他：21世紀に向けた沸騰水型原子炉の開発、東芝レビュー、48, 11, pp.817-820 (1993)

深沢 昌樹 Masaki Fukasawa



1961年入社。原子力発電プラントのシステム・機械設計に従事。現在、エネルギー事業本部首席技監。Energy Systems Group

水町 渉 Wataru Mizumachi



1965年入社。原子力発電プラントの設計に従事。現在、原子力事業部原子力プラント技術部主幹。Nuclear Energy Div.

利光 聰 Satoru Toshimitsu



1972年入社。原子力発電プラントのプロジェクト業務に従事。現在、原子力事業部原子力技術部部長。Nuclear Energy Div.