

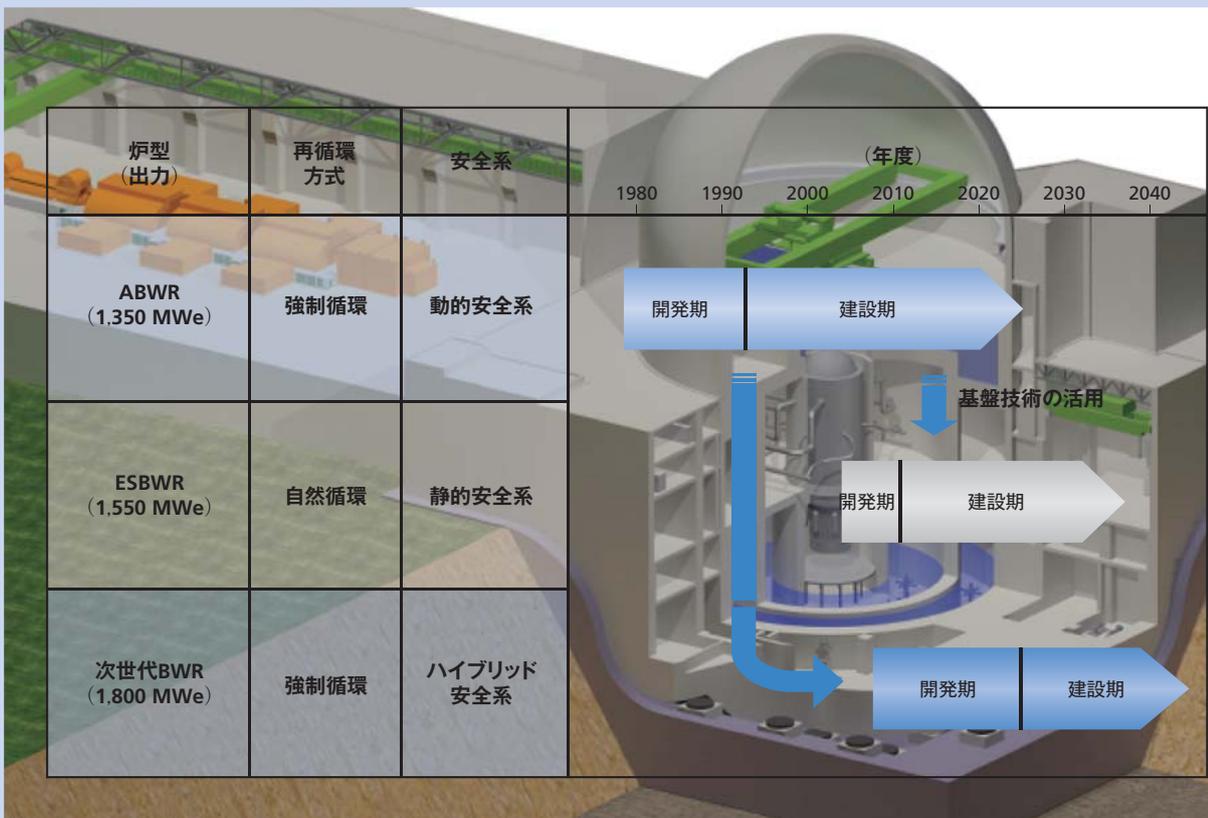
大規模建設時代に向けた次世代BWRの開発

Development of Next-generation Boiling Water Reactor

松浦 正義 青山 肇男 平子 静
Matsuura Masayoshi Aoyama Motoo Hirako Shizuka
守屋 公三明 吉村 真人
Moriya Kumiaki Yoshimura Masahito

地球温暖化対策の有力な手段として、そしてエネルギーの安定供給のための主要な電源として、多くの国で原子力の再評価が行われ、世界的に原子力発電所建設の機運が高まっている。この市場のグローバル化に対応して、日立製作所は原子力事業開始以来のパートナーであるGE社と事業統合を行い、2007年に、日本に日立GEニュークリア・エナジー株式会社、米国にGE-Hitachi Nuclear Energy Americas LLCを設立した。

日立グループには、これまでに20基を超える建設実績の蓄積がある。その間、信頼性の確保と出力の大規模化を進め、これらの集大成としてABWR（改良型沸騰水型原子炉）を完成させ、その後も連続的な建設実績を積み重ねている（図1参照）。こうした豊富な経験に基づき、日米の両社を軸に世界的な原子力の拡大のためのソリューションを提供していく。



注：略語説明 BWR (Boiling Water Reactor), ABWR (Advanced BWR), ESBWR (Economic and Simplified BWR)

図1 | 次世代BWRの開発

ABWR開発の成功実績に基づき、GE社と協同でESBWRの実用化のための設計・確認試験を実施し、さらに2030年代以降の大規模な建設時代に備え、官民一体となった国家プロジェクトとして次世代BWRの開発を進めている。

1. はじめに

現在、世界各国に「原子カルネサンス」が拡大している。この背景には、エネルギー価格の高騰、エネルギーセキュリティの重要性、地球環境問題といったエネルギーに関するグローバルな課題解決の有力な手段として、原子力発電が位置づけられたことがある。また、1979年の米国スリーマイル島原子力発電所事故以降、新規原子力発電所建設を凍結していた米国が、近年の良好な原子力発電所運転実績を背景として、当時のブッシュ政権下で原子力発電拡大に向けた政策転換がなされ、現オバマ政権においても政府主導で新規建設推進に向けたさまざまな施策を行っていることなどが挙げられる。

米国以外にも、中国、インド、そして東南アジアなど、多くの国で原子力発電所新設の計画が進められている（図2参照）。国内においても、2030年前後に、1970～1980年代に集中的に建設された原子力発電所の大規模なリプレース時代を迎える。

この世界的な原子力回帰を背景に、ABWR（Advanced Boiling Water Reactor：改良型沸騰水型原子炉）以来、20年ぶりとなる新型軽水炉開発の国家プロジェクトが2008年から8年間の計画でスタートした。このプロジェクトは、国・電気事業者・プラントメーカーが一体となって推進しており、日立グループが主要な役割を果たしている。

ここでは、原子力を取り巻く国際情勢、地球規模での環境改善の切り札として原子力を円滑に普及するための原子力発電設備開発、およびグローバル展開における取り組みについて述べる。



図2 | 原子カルネサンスの世界的な拡大
エネルギーに関するグローバルな課題の解決に有力な手段として原子力発電が位置づけられ、世界各国で原子力発電所の新設計画が進められている。

2. 原子力を取り巻く国際情勢

世界的な原子力市場の拡大機運が高まる一方で、多くの原子力発電所建設に伴う課題も指摘されている。

一点目は核不拡散問題であり、新たに原子力を導入する国が増えていくことに対して、核不拡散と原子力発電平和利用拡大を両立させる国際的な枠組み構築を進める動きがある。米国が「国際原子力エネルギー・パートナーシップ（GNEP: Global Nuclear Energy Partnership）」、ロシアが「国際核燃料センター構想」をそれぞれ提唱しており、日本も「原子力立国計画」の中で原子力産業の国際展開支援とともに、このような国際的な枠組みづくりへの積極的関与を行うとしている。

二点目は原子力発電所建設に必要な初期投資が巨額であり、新たに建設を行う事業者には投資リスクを伴うことが挙げられる。資金調達および投資回収期間にかかわる課題をどう解決していくか、また、資材や人件費の高騰、建設スケジュールの長期化といったコスト面のリスク管理も課題となる。

三点目は供給者の技術力に関する課題である。1970年代半ばから新規原子力発電所の建設件数は減少し、ここ10年間で新規建設は日本・中国・韓国といったアジアの一部の国が中心で、欧米の原子力設備供給者および建設分野の経験不足を懸念する声がある。このような状況において、継続的で着実な建設実績、主要機器の製造能力などの点で日本企業への期待は高まっていると言える。

前述したことは、拡大する原子力市場にに応じていくうえで、政府レベルでの国際協調だけではなく、原子力技術・機器の供給および建設においても、国際的連携が重要な戦略になることを示している。

3. グローバル化への取り組み

現在、世界の原子力市場はBWR（Boiling Water Reactor：沸騰水型原子炉）とPWR（Pressurized Water Reactor：加圧水型原子炉）が主要な炉型として競合している。BWRは発生した蒸気を直接タービンに移送する直接サイクル方式をとるシンプルな構造として、日本、米国を中心に発展してきた。原子力発電プラントとして多くの利点を有するBWRを、さらにグローバルに展開するためには、日立グループとGE社（General Electric Company）が戦略を共有し、経営資源を結集することが重要であると考え、共同研究の推進や設計リソースの共有、共同購買の推進、製造設備の相互利用促進を進めている。GE社の実績に裏付けられた世界展開力に、日立グループの強みである、「モノづくり力」と、国内での継続的な原子力発電所建設経験をベースとした「統合エンジニアリング力」、そして将来

の事業発展を支える「研究開発力」を加えることで、世界的な原子力の拡大のためのソリューションを提供していく。

3.1 ABWR建設経験の国際展開

日立グループは、BWRの国内初号機の建設に参加して以来40年近く、徹底したモノづくりにこだわり、独自の創意工夫を重ねながら、信頼性・安全性・経済性の向上に努め、20基を超える建設実績を蓄積してきた。1981年から1986年にかけて第三次改良標準化としてBWR各電力会社・GE社・株式会社東芝と共同で開発したABWRはわが国の技術経験を集大成して開発された炉型であり、国内では合計4基のABWRが運転中である。さらに、中国電力株式会社島根原子力発電所3号機、電源開発株式会社大間原子力発電所が建設中である。日立グループは、これらすべてのABWR建設に携わっている。この豊富な経験を生かすことにより、以下に挙げるような強みを有している。

(1) 豊富な運転実績に加え、米国においてもGEH (GE-Hitachi Nuclear Energy Americas LLC) が設計認証を取得済みであることから、許認可リスクを小さく抑えることができる。

(2) 国内の建設を通じて得られた豊富なエンジニアリングデータを有効活用することによって早期に物量が確定でき、調達コストや据付け費の変動リスクも低減できる。

(3) 大型クレーンや大型モジュールを採用した先進工法により、スケジュール面での最大リスクとなる現地の工事工程管理や現地作業者の確保といった問題を解決できる。

このような日本の最新ABWR仕様や建設経験をベースとし、米国での許認可要求や国際規格・基準に対応した世界標準ABWR (Unified ABWR) を構築するため、GEHと共同で、2008年4月に米国カリフォルニア州サンノゼに「ABWR共同設計推進事務所」を設立し、ABWRの受注をめざしており、海外での円滑なABWR建設に寄与するものとする。

3.2 大規模試験設備と高度シミュレーション技術によるESBWR性能検証

ESBWR (Economic and Simplified BWR: 高経済性・単純化沸騰水型原子炉) は、ABWRとともに世界的な原子力建設ラッシュに応える有力な炉型である。ESBWRは、BWRの特徴であるシンプルな原子炉システム概念を追求した炉であり、自然循環炉と静的安全系の採用によって動的な機器を排除し、設備物量の低減に加え、運転・保守費の低減を図った大出力の単純化炉である (図3参照)。

GE社が主体となって、2010年度中に米国の設計認可 (DC: Design Certification) をめざしており、日立グループ

は許認可対応のための機器性能解析・性能評価などの分野で協力している。

ESBWRの最大の特徴である自然循環性能は、炉心上部にチムニーを設けて流体密度差による駆動力を得ることにより、所定の炉心流量を確保するものである。チムニーは高さ約7 m、直径約6 mの大型の炉内構造物である。日立グループは、ESBWRの最も特徴的で重要な機器であるチムニーの二相流動性能・健全性・製造性を把握するため、2008年度に完成させた実温、実圧条件を再現できる多目的蒸気源試験設備 (HUSTLE: Hitachi Utility Steam Test Leading Facility) に、チムニー実寸大 (高さ7 m) の試験体を設置して、総合性能確認試験を実施した (図4参照)。

さらに、三次元二相流解析を試験データで検証し、炉心とチムニーとの一体解析により、ESBWRの自然循環性能を評価している (図5参照)。

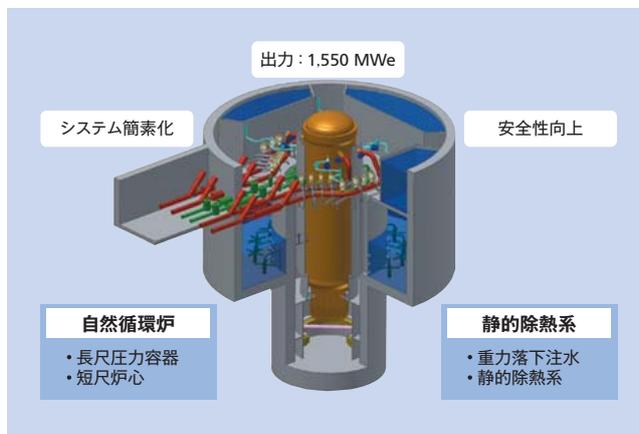
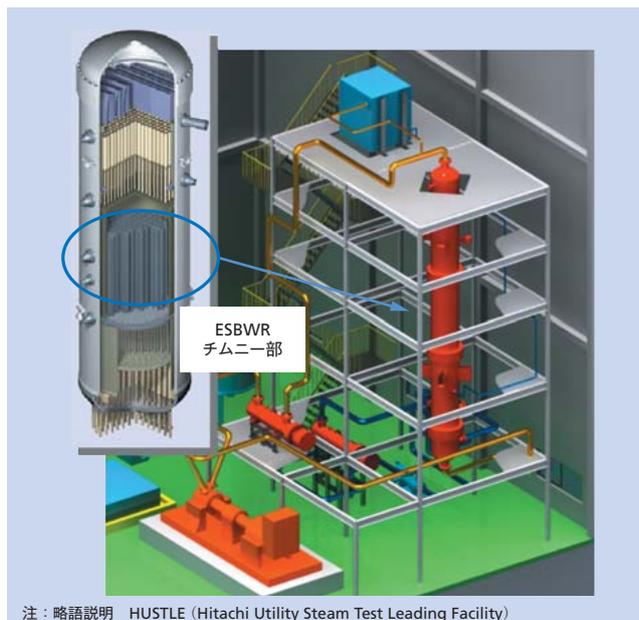


図3 ESBWRの特徴

ESBWRは、BWRの特徴であるシンプルな原子炉システムという概念を追求し、動的な機器の削減、建設費や保守費の低減などによる経済性の向上をめざしている。



注: 略語説明 HUSTLE (Hitachi Utility Steam Test Leading Facility)

図4 多目的蒸気源試験設備「HUSTLE」

ESBWRの最重要機器となるチムニーの総合性能確認試験を実施している。

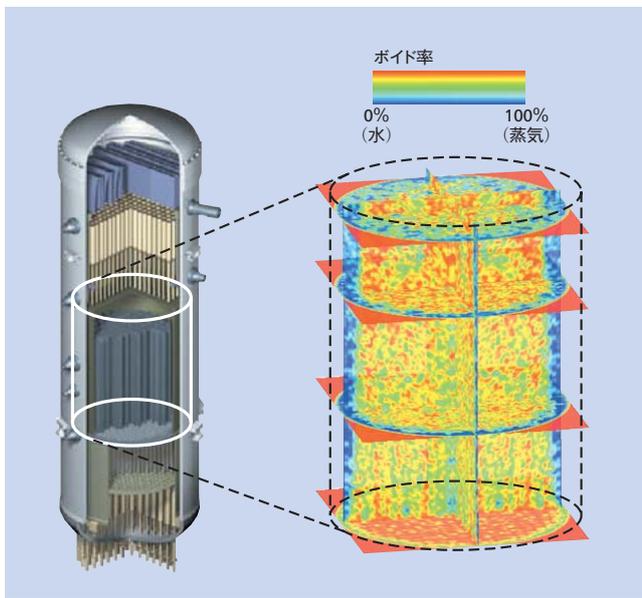
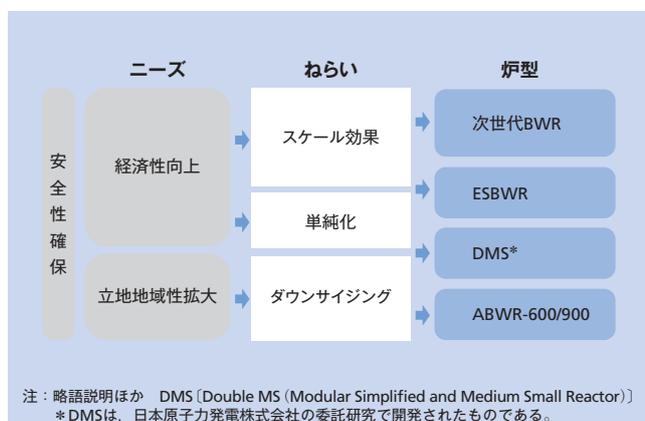


図5 | 炉心とチムニーとの一体解析
三次元二相流解析によって試験データを検証し、ESBWRの自然循環性能を評価している。

3.3 顧客ニーズに対応した炉型開発ラインアップ

わが国や欧米先進国のような、大規模な電力需要に対応し送電網が充実している地域には、高性能の大型集中電源を開発することが基調となる。一方で、電力需要の伸びは期待できるが送電容量などに制約のある地域や、電力需要の伸びは不確定で市場動向に沿った分散投資が必要と考えるユーザー向けの電源も必要である。これらのニーズに柔軟に対応できる原子力発電設備を提供することが、世界的な原子力の普及に貢献するものとする。経済性効果を追求するうえでの「スケール効果」と「単純化」に加え、今後、新興国への立地拡大に対応する「ダウンサイジング」をねらいとした、炉型開発ラインアップを図6に示す。

日立グループは、ESBWRやABWRの高度化、そして後述する国家プロジェクトにおける次世代BWR開発において大型炉の開発を推進している。また、送電容量や電力需



注：略語説明ほか DMS [Double MS (Modular Simplified and Medium Small Reactor)]
*DMSは、日本原子力発電株式会社の委託研究で開発されたものである。

図6 | 多様なニーズに対応する炉型開発
安全性確保を基軸に経済性向上と立地拡大など多様なニーズに対応した炉型開発を進めている。

要が小さな地域用の分散電源として、中型ABWR (ABWR-600, ABWR-900)を独自開発した。さらに、低出力帯のニーズに応えるために、日本原子力発電株式会社の委託研究において、400 MWeクラスの自然循環型BWRであるDMS [Double MS (Modular Simplified and Medium Small Reactor)]の開発を推進している。

4. 次世代BWRの開発

4.1 開発の基本方針

2030年前後からの国内の大規模なリプレース時代に備え、かつ世界的な原子力への期待にこの分野のリーディング国として応えるために、日立グループは、ABWR開発以来20年ぶりとなる次世代軽水炉開発の大型国家プロジェクトに取り組んでいる。電気事業者・国の指導を受けながら、財団法人エネルギー総合工学研究所を中核機関として、他のプラントメーカー(株式会社東芝・三菱重工業株式会社)・GNF-J(株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン)・ゼネコンなどの原子力産業界が一丸となって強力に推進している。

電気事業者の長年にわたる豊富な運転経験からの要求、海外の電力会社の要求、および将来の産業発展の予測に基づく2030年代以降の原子力発電設備に望まれる要件などを整理し、国内だけでなく世界の標準炉となるために、次世代BWRの基本設計方針を以下のとおり設定した。

- (1) 世界最高水準の安全性と経済性の同時達成
- (2) 建設工期の大幅短縮と立地条件によらない標準化
- (3) 使用済み燃料の大幅削減とウラン資源消費の低減
- (4) 放射性廃棄物発生量および被ばく線量の大幅低減
- (5) プラントトータルライフ(寿命80年)にわたる運用高度化

これらの基本方針に基づき、プラント概念を構築し、概念成立に必要な要素技術開発を進めている。

4.2 プラント概念と要素技術開発

日立グループは、次世代BWRの基本設計方針に基づくプラント概念を構築するうえで必要な基盤技術開発を推進している。主な開発の特徴を以下に述べる(図7参照)。

4.2.1 環境負荷低減を追求する炉心の高度化

- (1) 使用済燃料の大幅削減

現行BWRでは、燃料被覆管としてジルコニウム基合金を使用しており、取出平均燃焼度約45 GWd/t、燃料体平均最大燃焼度55 GWd/tの実績を有している。次世代BWRでは、取出平均燃焼度を70 GWd/tとして使用済燃料発生量を約3~4割に削減し、環境負荷の低減を図る。このような超高燃焼度領域では、燃料被覆管への水素吸収

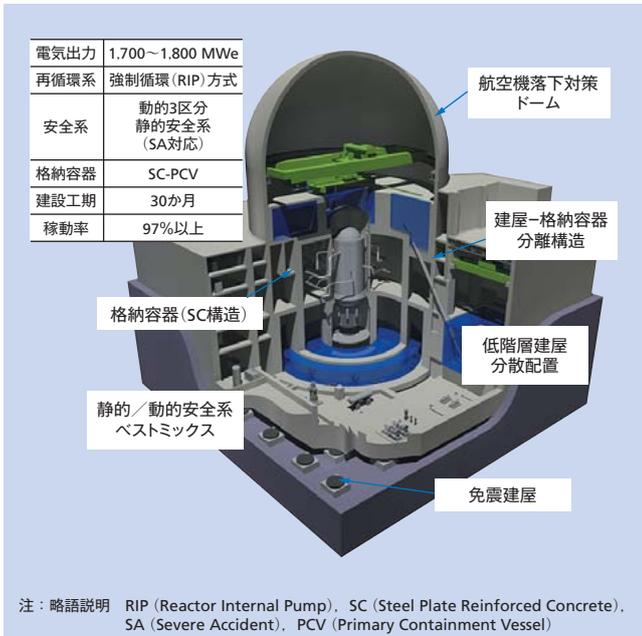


図7 | 日立グループが考える次世代BWR主要設備構成の概要
世界標準炉をめざし、基本性能や各国の共通要求を標準仕様とし、国情による要求をオプション仕様とするプラント概念を構築している。

量が増加する傾向にあり脆(ぜい)化・腐食が懸念される。日立GEニュークリア・エナジーは燃料メーカーであるGNF-Jとの共同体制の下、水素吸収を抑え、かつ腐食に強い燃料被覆管用超高燃焼度燃料材(ハイドライドフリー材)の開発を推進している。

(2) ウラン消費量の大幅低減技術

エネルギーの安定供給のためにはウラン資源消費量の低減はきわめて重要な取り組みである。次世代BWRでは、超高燃焼度化に伴う省ウラン化に加え、BWRの特徴であるスペクトルシフト効果を最大限に引き出す技術により、ウラン消費の約10%以上の低減を図る。BWRでは、炉心流量を運転サイクル初期から中期にかけて相対的に減少させて核分裂性物質である ^{239}Pu の生成を促進させ、運転サイクル末期で炉心流量を増加させて、この生成した ^{239}Pu の核分裂を促進し、単位ウラン重量当たりのエネルギーを増加させるスペクトルシフト運転を行っている。

日立グループは、従来の燃料集合体中の水ロッドに代えて、スペクトルシフトロッドと呼ぶ改良型水ロッドを用い、上述の炉心流量を変えることによるスペクトルシフト効果を拡大し、省ウラン効果を高めることができるスペクトルシフトロッドの実用化に向けた技術開発を推進している(図8参照)。

4.2.2 建設環境によらない建設工法の高度化

格納容器を内包する円筒建屋と周辺建屋との併進工事を可能とすることで、建設工程の大幅短縮を図る。標準設計としては、工期短縮のためのモジュール化が促進できるように建屋の低階層化を考えている。この構造は、格納容器

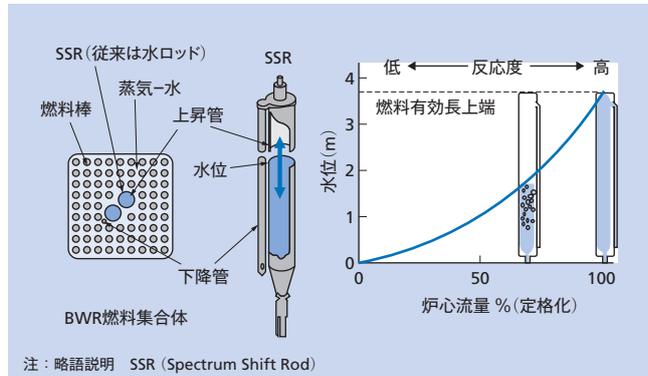


図8 | スペクトルシフトロッド燃料

炉心流量を変えることによるスペクトルシフト効果を拡大し、省ウラン効果を高めることができるスペクトルシフトロッドの技術開発を進めている。

の形状によらない自由な建屋配置設計が可能となるため、国情によるオプション仕様の取り込みが容易と考える。

SC (Steel Plate Reinforced Concrete) 構造は、鉄筋・型枠工事を大幅に削減し、かつ大ブロックモジュール工法を可能にする工法であり、世界が注目する日本の建設技術をさらに強く発展させる主要技術である。次世代BWRでは、この先進的な建設技術を核に、現行では標準的な建設工期として50か月かかるところを30か月程度へと大幅な短縮を図る。

日立グループはABWR建設を通じ、建設会社とタイアップしてSC構造を使った大ブロックモジュール工法を実現させてきた。次世代BWRでは、建設のクリティカルパスの大半を占める原子炉格納容器ほか、主要部位へのSC構造の適用を図る。このため、高温条件下でのSC構造の耐震・耐圧性能の確認が必要となる。原子炉格納容器の豊富な設計・製作技術と、これまで培った建設会社との密接な連携体制を活用し、実機で想定される高温条件下で、SC構造の性能確認のための基礎試験を推進している(図9参照)。

4.2.3 各国の環境・規制に柔軟に適合するための技術

2030年以降に世界市場で通用する原子力プラントをめざすためには、各国の規制・電力要求、立地条件に適合させたいわゆる経済性に優れたプラント概念でなければならない。これらすべての要求を合理的に達成するために、日立グループは、基本性能や各国共通の要求を標準仕様とし、国情による要求をオプション仕様として、なおかつオプション仕様の取り込みが容易な設計をめざす。

欧米では新規建設する原子炉設備に対して大型民間機衝突の影響評価を要求しつつあり、世界標準炉をめざす次世代BWRとしては、従来の原子力施設への航空機落下確率評価に加え、設備上の対応を考慮する必要がある。航空機落下対策として、建屋・軀(く)体による防護と空間的隔離による防護の両面が重要と考える。建屋・軀体による防

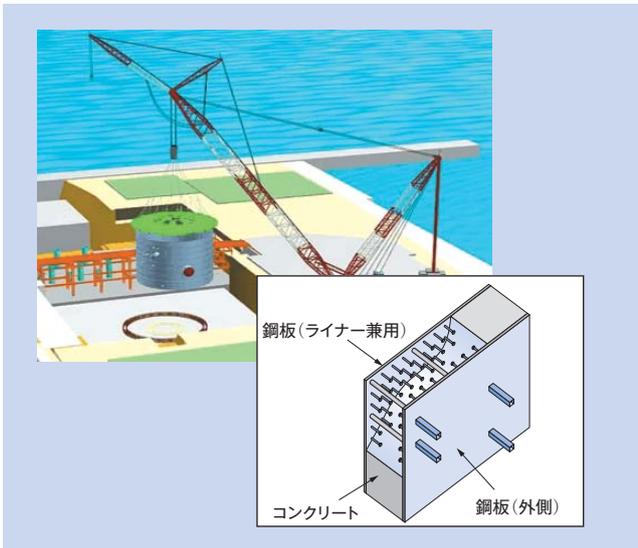


図9 | SC構造工法

鉄筋・型枠工の大幅削減を可能にするSC構造工法を原子炉格納容器ほか、主要部位に適用するための性能確認試験計画を進めている。

護としては、想定する飛来物の荷重条件から必要な壁厚を確保する設計とする。空間的隔離による防護としては、飛来経路に対し複数系統の同時損傷の可能性を考慮した安全系区分に応じた分散配置によって対応する考えである。

このほかにも、(1) プラント長寿命80年をめざすための基礎基盤となる材料・水化学の高度化、(2) 燃料の超高燃焼度と、プラント稼働率向上を目的とする運転サイクルの長期化(24か月)を同時達成するために必須となるウラン濃縮度5%超燃料を取り扱うための技術基盤の確立、(3) 地震国日本のこれまでの高度な耐震技術に加え、設計想定地震力を超えるリスク低減、プラント設計の標準化とそれによる立地拡大をめざす免震装置の開発、(4) プラントトータルライフ(設計、製作、建設、運転、保守、廃炉)の運用高度化のためのプラントデジタル化の開発を進めている。

このように、日立グループはこれまでに培った開発技術を集結させ、このプロジェクトに技術面で主導的に参画している。

5. おわりに

ここでは、原子力を取り巻く国際情勢、地球規模での環境改善の切り札として原子力を円滑に普及するための原子力発電設備開発、およびグローバル展開における取り組みについて述べた。

地球温暖化対策の有力な手段として原子力発電設備を確実に世界に普及させること、そしてBWRを世界市場に展開し、維持発展させるには、世界が真に注目・期待している日本の技術力(特に建設技術力)を磨き、きたるべき大規模建設時代に備える必要がある。

日立グループは、豊富でかつ連続的な建設実績とABWR開発での成功経験を基礎に、「原子カルネサンス」時代に応える多様なニーズに柔軟に対応したさまざまな革新的な炉型の開発を進め、大規模建設時代において円滑なる原子力普及に大きく貢献していく考えである。

参考文献

- 1) 守屋、外：21世紀における原子力発電設備の開発、日立評論、83、2、170～174(2001.2)
- 2) 木下、外：設備投資の分散性と投資額の抑制を可能にする中型ABWR*ABWR-600、日立評論、86、2、197～200(2004.2)

執筆者紹介



松浦 正義

1987年日立製作所入社、日立GEニュークリア・エナジー株式会社原子力計画部 所属
現在、原子力プラント系統設計、次世代炉開発プロジェクトマネジメントに従事
技術士(原子力・放射線部門)
日本原子力学会会員



青山 肇男

1979年日立製作所入社、電力グループ エネルギー・環境システム研究所 原子力システムプロジェクト 所属
現在、沸騰水型軽水炉 炉心システムの研究開発に従事
工学博士
日本原子力学会会員、電気学会会員



平子 静

2002年日立製作所入社、日立GEニュークリア・エナジー株式会社原子力プラント部 所属
現在、原子力プラント配置設計、概念設計に従事



守屋 公三明

1980年日立製作所入社、日立GEニュークリア・エナジー株式会社事業企画本部 所属
現在、BWR技術の改良、将来型BWRの開発に従事
日本原子力学会会員、日本物理学会会員



吉村 真人

1982年日立製作所入社、日立GEニュークリア・エナジー株式会社原子力国際技術本部 原子力海外マーケティング部 所属
現在、海外原子力プロジェクトの取りまとめに従事