

来るべき大規模建設時代に向けた次世代BWRの開発

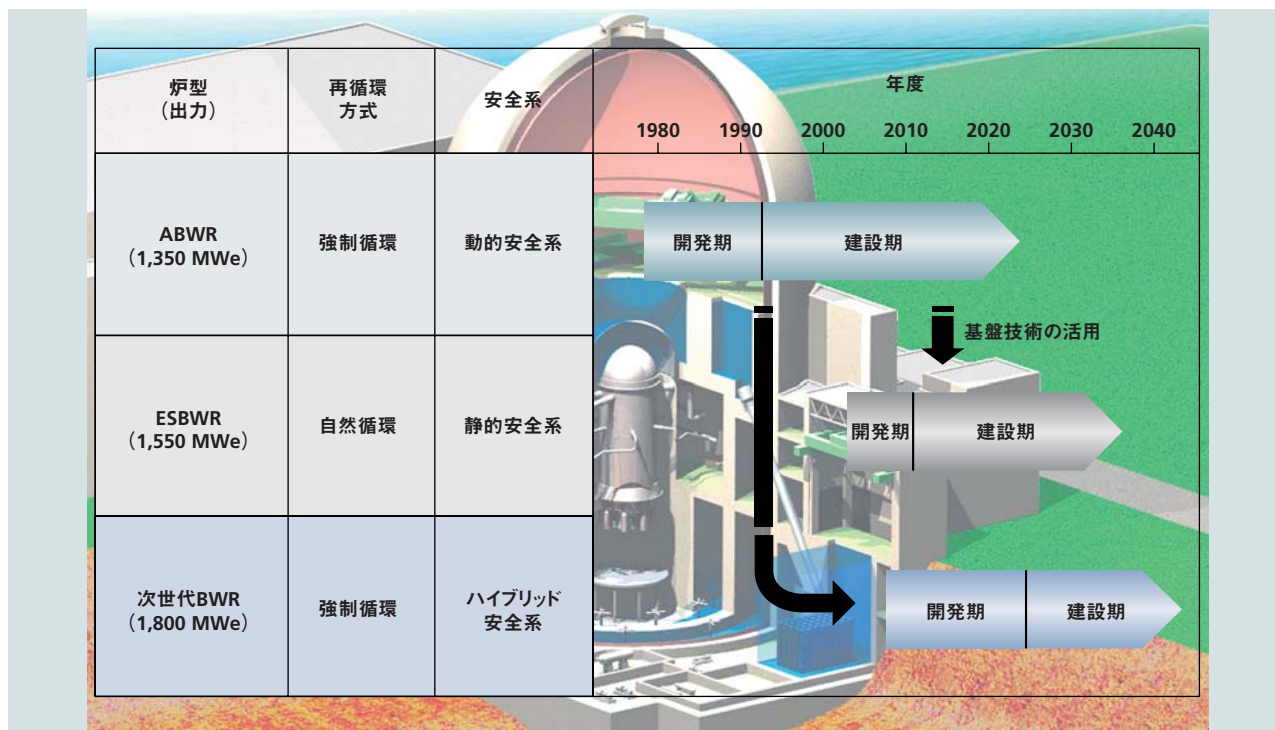
Development of Next-generation Boiling Water Reactor

松浦 正義 Masayoshi Matsuura

平子 静 Shizuka Hirako

青山 肇男 Motoo Aoyama

守屋 公三明 Kumiaki Moriya



注:略語説明 BWR (Boiling Water Reactor:沸騰水型原子炉)、ABWR (Advanced BWR:改良型沸騰水型原子炉)、ESBWR (Economic and Simplified BWR:高経済性・単純化沸騰水型原子炉)

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。

日立は、1970年に運転を開始した日本原子力発電株式会社敦賀1号機(357 MWe) BWR(沸騰水型原子炉)の建設に参加して以来、これまでに20基を超える建設実績を蓄積してきた。その間、信頼性の確保と出力の大規模化を進め、1996年～1997年に米国GE社および株式会社東芝と共同で、ABWR(改良型沸騰水型原子炉)の初号ツイン炉である東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所6号機、7号機を完成させた。これ以降、計画中のプラントも含め、国内ABWRの全基の建設・設計に携わってきた実績に基づき、顧客のニーズに応じたさまざまな型式の原子炉の開発を行っている。

今般、約20年ぶりとなる新型軽水炉開発の国家プロジェクトが開始され、主要な役割を果たすとともに、米国においてはESBWR(高経済性・単純化沸騰水型原子炉)の開発にあたり、GE社と協同で設計・確認試験を実施している。

1. はじめに

日立は、米国GE社(General Electric Company)から導入したBWR(Boiling Water Reactor:沸騰水型原子炉)技術を基に、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(Advanced BWR:改良型沸騰水型原子炉)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4基が運転中、2基が建設中と順調に建設実績を重ねている。わが国では、当面ABWRの時代が継続すると考えられる。

一方で、地球温暖化防止対策の有力な手段として、また石油・石炭などの化石燃料の安定供給に対する不安などを背景に、世界的に原子力発電所建設の機運が高まっており、日立は2007年7月にGE社と原子力事業統合を行った。GE社

とのシナジーを最大限に発揮させるとともに、世界的な多様なニーズに応える原子力発電設備の開発が重要と考える。

国内においても、2030年前後からは、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りブレース時代を迎える。この世界的な「原子力リネサンス」と呼ばれる原子力回帰を背景に、官民一体となった国家プロジェクトとして次世代軽水炉開発が2008年から8年間の計画でスタートした。

ここでは、「原子力リネサンス」時代に応えるための原子力発電設備の開発の方向性と開発の状況について述べる(図1参照)。

2. 日立BWR開発の実績

2.1 ABWRの高度化

ABWRの初号機完成以降、連続した建設実績を重ねるとともに、経済性・運転性・性能の向上をめざして高度化した主要技術・製品を以下に示す。

(1) インターナルポンプの厚肉ノズル化

原子炉圧力容器下部に設置されるインターナルポンプケーシングノズル部を厚肉化して耐震性を向上させた(北陸電力株式会社志賀原子力発電所2号機以降)。

(2) 改良型制御棒駆動装置のマグネットカップリング化／インダクションモータ化

マグネットカップリングは電動機トルクを非接触で伝える方式であり、漏洩(えい)ポテンシャルを排除し、保守性を向上させる。インダクションモータによるモータ電源系の設備簡素化により、電源盤設置容積を大幅に低減させる(中国電力株式会社島根原子力発電所3号機で採用)。

(3) 主蒸気逃がし安全弁の大容量化

弁のど部径の拡大による大容量化(16%増)を図り、弁員数を低減させた(島根原子力発電所3号機以降で採用)。

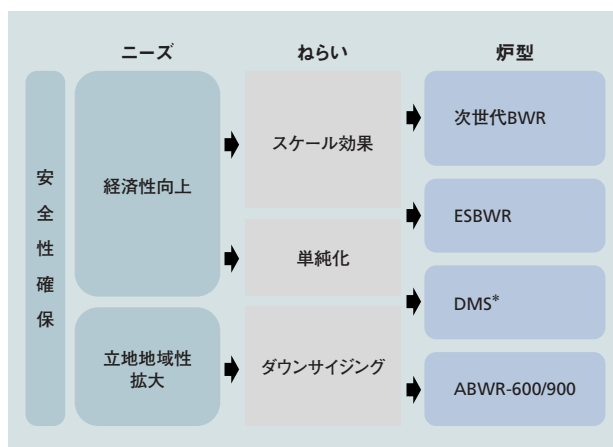
(4) 主蒸気隔離弁の低圧損化

弁座口径を接続配管内径と同程度に拡大させたボディ形状(フルボア型)を適用し、圧損を低減させた(次期ABWRで採用予定)。

このように、重要な機器の継続的な生産と高度化に向けた取り組みにより、技術の伝承、品質維持・向上を実現させている。

2.2 顧客ニーズに対応した炉型開発ラインアップ

原子力発電設備は、安全性を大前提にした経済性の追求を命題に開発を進めてきた。燃料費に比べて設備費の割合が大きな原子力発電設備では、出力規模の増加による経済性向上(スケール効果)が最も有効な手段であり、これまでのBWRの開発の歴史を踏襲した「大型化による経済性向上」をめざす開発路線は今後も継続する。一方、原子炉冷却材再循環駆動力を流体密度差のみで賄う自然循環炉や、動的な



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2 多様なニーズに対応する炉型開発

安全性確保を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。

ポンプ類を削除した静的システムを追求する単純化も、経済性向上の手段である。経済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2に示す。

(1) 大型炉

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ため、日立は電力会社と共同で1990年からABWRの改良発展炉として、ABWR-IIの開発研究に着手し、2001年にはほぼプラント概念を構築した。ABWR-IIの主要な開発仕様として燃料集合体の大型化がある。燃料格子幅を従来の1.5倍とし、燃料集合体の二つのコーナーに制御棒を配置した構成により、出力増加・高燃焼度化・MOX(Mixed Oxide:混合酸化物)燃料の有効利用など、炉心高度化と燃料体数や制御棒・制御棒駆動機構の員数削減を図っている(図3参照)。安全設備では、格納容器から静

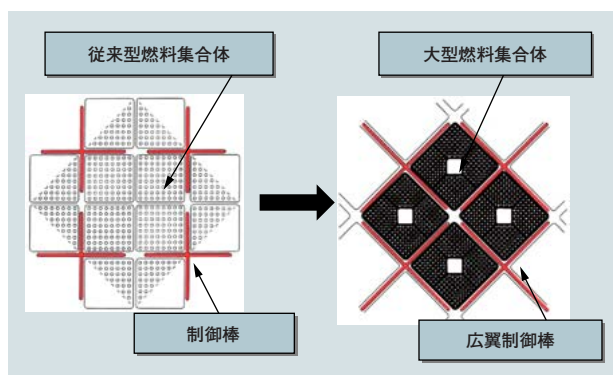


図3 燃料集合体の大型化

出力増加に対応するとともに、炉心高度化と関連設備合理化を可能にする大型燃料集合体の概念を示す。



図4 ABWR-900プラントのイメージ

送電網の制限や設備投資の分散性を考慮した電源として、中型ABWRの開発を行った。

的に崩壊熱を除去する静的格納容器除熱系を設置するなど、単純化技術を安全系の多様化の視点で取り入れることにより、苛(か)酷事故に対する耐力を強化した。ABWR-IIの開発成果は、低圧損型主蒸気隔離弁など最新ABWRへの適用が予定され、次世代BWR開発の基盤技術となる。

(2) 中小型炉

世界的に原子力発電を普及するためには、送電容量などに制約のある地域や、電力需要の伸びが不確定で市場動向に沿った分散投資を求めるユーザー向けの電源が不可欠である。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ため、送電容量や電力需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。

ABWRのダウンサイジング開発は段階的に実施した。第1ステップとして、現行ABWRの主要機器である原子炉冷却材再循環ポンプ・タービン・復水器などの員数、容量を最適に組み合わせることで、最大の経済性を追求できるプラント出力規模を検討し、電気出力600 MWe級のABWR-600を開発した。次に、燃料の高出力密度化などの出力アップレート技術を駆使することにより、出力規模を900 MWe級まで増加させたABWR-900を開発した(図4参照)。

さらに、低出力帯のニーズに応えるべく、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。

3. 国家プロジェクトの次世代BWR開発

3.1 背景と開発の基本方針

国内の大規模なリブレース時代に備え、かつ世界的な原子力発電への期待に原子力のリーディング国として応えるために、ABWRを開発して以来約20年ぶりとなる大型国家プロ

ジェクトである次世代軽水炉開発が2008年度からスタートした。国、電気事業者、メーカーなどが連携し、8年間(ただし、材料試験などの一部の技術開発はその後も継続)で総開発費600億円規模を投入する。日立は電気事業者や国の指導を得ながら、財団法人エネルギー総合工学研究所を中核機関として、株式会社東芝、三菱重工業株式会社、株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン、およびゼネコン(総合建設業)などとともに、原子力産業界一丸となって強力に推進していく。

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、国内のみならず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的大幅低減
- (5) プラントトータルライフ(寿命約80年)にわたる運用高度化

これらの基本方針に基づく、主要設備構成ならびに要素技術開発を以下に述べる。

3.2 主要設備構成

世界市場を視野に入れた原子力プラントをめざすためには、各国の規制や電力要求、立地条件に適合させたいうえで経済性に優れたプラントコンセプト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、基本性能や各国に共通する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、かつオプション仕様の取り込みが容易な設計をめざしている。主要設備構成を図5に示す。

(1) 建屋—格納容器分離構造

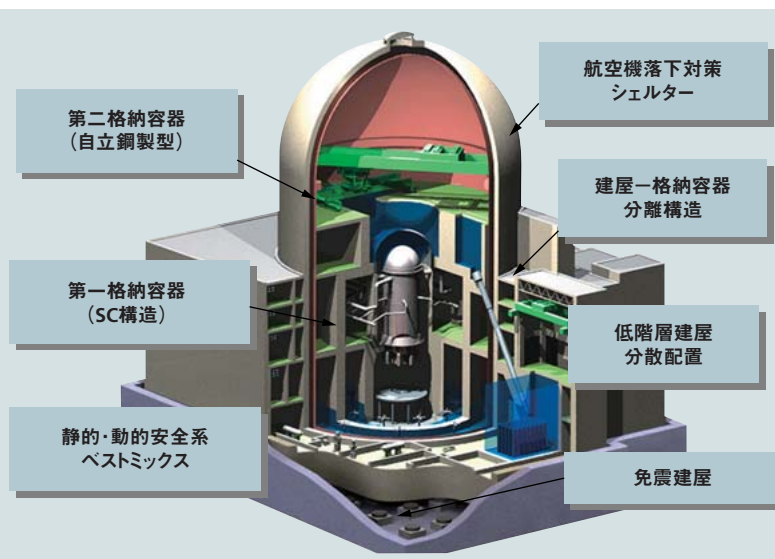
自立型鋼製格納容器を採用することにより、建屋と格納容器の併進工事を可能とし、建設工程の大幅短縮を図る。標準設計としては、工期短縮のためのモジュール化が促進できるように建屋の低階層化を考えている。この構造は、格納容器の形状によらない自由な建屋配置設計が可能となるため、国情によるオプション仕様の取り込みが容易となる。

一方、格納容器については、運転床を含む主要な構造物を格納容器内に取り込むことで、基本性能にかかわるコア配置の徹底した設計標準化を図る。また、原子炉压力容器を覆う構造躯体(く)体などにはSC(鋼板コンクリート)構造を適用し、大型ブロックモジュール化を促進させる。

(2) 二重格納容器概念と安全系構成

原子炉压力容器を覆う構造躯体は、圧力抑制室を有する構造とし、現行ABWRの鉄筋コンクリート製格納容器相当の

電気出力	1,700～1,800 MWe
再循環系	強制循環(RIP)方式
安全系	動的3区分 静的安全系 (PCCS, IC, WW)
格納容器	二重格納容器
建設工期	30か月
稼働率	97%以上



注:略語説明 RIP(Reactor Internal Pump), PCCS(Passive Containment Cooling System), IC(Isolation Condenser), WW(Water Wall), SC(Steel Plate Reinforced Concrete)

図5 日立が考える次世代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。

耐圧性能を持たせる。圧力抑制室と運転床を内包するエリアとは、格納容器の設計圧力を作動圧としてラプチャーディスクなどで分離させた構造とする。このSC構造躯体を第一格納容器とし、設計基準事故に対する耐圧バウンダリーとする。万一、設計基準事故事象を超えるような苛酷事故が生じたと仮定しても、第二格納容器となる自立鋼製型格納容器で封じ込めることができる。

安全系設備は、ポンプなどの動的機器を有する安全系により、従来のABWRと同様に早期の事故収束を図る構成とする。さらに、鋼製第二格納容器の外周の空間ギャップに水を張ることにより、ウォーターウォールを形成し、鋼製のバウンダリー壁を通して事故時に格納容器内の蓄積された熱を除去することができる。このように単純な構成により、万一、動的除熱系が機能しない場合でも長期的な除熱が可能となり、二重格納機能と合わせ、社会的受容性に優れた安全性を達成することができる。

(3) 航空機落下対策

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・躯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・躯体による防護としては、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。

以上の主要設備構成の概念に加え、大型機器の採用や

オンラインメンテナンス構成、高効率タービンなどの高性能機器の採用によって、最高水準の安全性・経済性の同時実現を図る。

3.3 要素技術開発

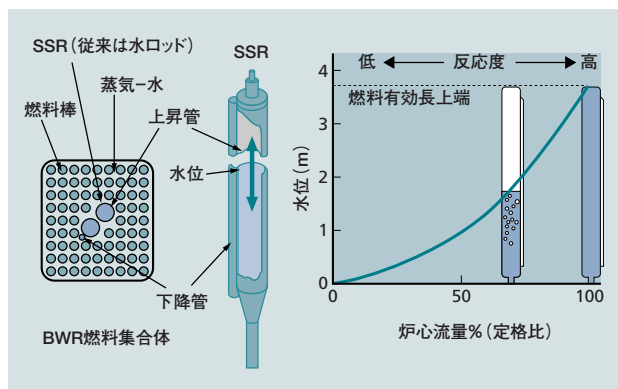
日立は、次世代BWRの基本設計方針を達成するうえで必要な基盤技術開発を推進している。主要要素開発の特徴を以下に述べる。

(1) 超高燃焼度燃料被覆管材料の開発

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。日立は燃料製造メーカーである株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパンとの共同体制の下、水素吸収を抑え、かつ腐食に強い超高燃焼度燃料被覆管材料(ハイドライドフリー材)の開発に着手した。

(2) スペクトルシフトロッド(SSR)燃料の開発

エネルギーの安定供給のために、ウラン資源消費量の低減はきわめて重要な取り組みと言える。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ってウラン消費の約10%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²³⁹Puの生成を促進させ、運転サイクル末期で炉心流量



注：略語説明 SSR (Spectrum Shift Rod)

図6 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、省ウラン効果をもたせるSSRの技術開発を進めている。

を増加させて、この生成した ^{239}Pu の核分裂を促進させ、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。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(SSR:Spectrum Shift Rod)と呼ぶ改良型水ロッドを用いることで、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、省ウラン効果をもたせるSSRの実用化に向けた技術開発に着手した(図6参照)。

(3) 新建設工法(SC構造工法)の開発

SC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大きく発展させる主要技術と考える。次世代BWRでは、この新たな建設技術を核に、現行標準的な建設工期50か月を30か月程度に大幅に短縮させることをめざす。日立はABWR建設を通じ、ゼネコンとタイアップして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。日立は、原子力格納容器の豊富な設計・製作技術と、これまで培ったゼネコン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試験計画に着手した(図7参照)。

このほかにも、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、前述の燃料の超高燃焼度とプラント稼働率向上のための運転サイクルの長期化(24か月)を同時達成に必要な条件となる、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、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、および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に着手している。

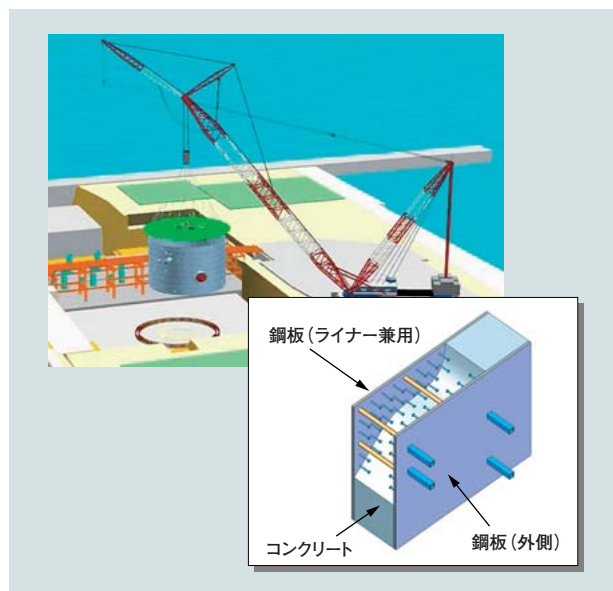


図7 SC構造工法

鉄筋・型枠工事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。

4. ESBWRの開発

4.1 特徴

ESBWR(Economic and Simplified BWR:高経済性・単純化沸騰水型原子炉)は、BWRの特徴であるシンプルな原子炉システムというコンセプトを追求した炉であり、GE社がABWRおよび日立も開発の一翼を担ったSBWR(Simplified BWR)での経験をベースにして開発した大出力プラント(1,550 MWe)の自然循環炉である。

自然循環炉心システムによって原子炉冷却材再循環ポンプを削除し、安全設備に関しては、非常用復水器・重力による炉心冷却・受動的格納容器冷却などの静的システムの採用により、ポンプなどの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8参照)。

4.2 GE社とのシナジーによる共同推進

ESBWRは、ABWRとともに本格化する米国の原子力建設ラッシュに応える有力な炉型である。GE社が主体となって米国における許認可対応を進めており、2005年8月に米国の設計認可(DC:Design Certification)を申請した。日立は、許認可対応における解析などの分野で協力しているほか、機器の設計・製造能力を生かして、炉内構造物・制御棒駆動機構・格納容器などの新設計要素のある機器の詳細設計をサポートしている。

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。チムニーは

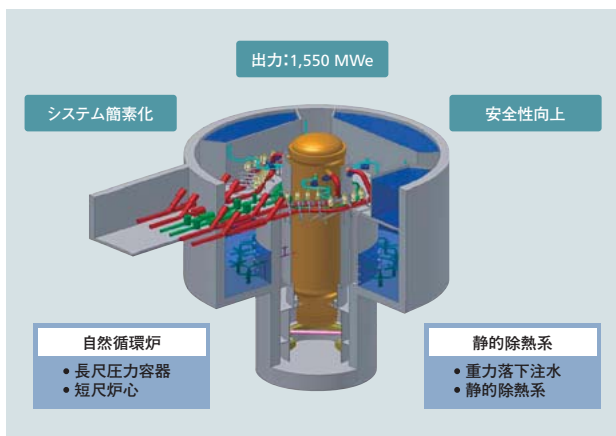


図8 ESBWRの特徴

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、動的な機器を削減し、建設費や保守費の低減といった経済性の向上をめざしている。

その名のとおり、炉心の上方に設置して炉内で発生する二相流(水と蒸気の混合流)を流すトンネルの役目を果たす。この二相流が途中で停留などすることなく整流させるために、正方格子を組んだ分割チムニー構造(正方断面のチャネル群)を採用している。日立は、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の総合性能確認試験を実施することとしている。試験は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)で実施する。このように、日立の強みである「モノづくり力」、「エンジニアリング力」、「研究開発力」を

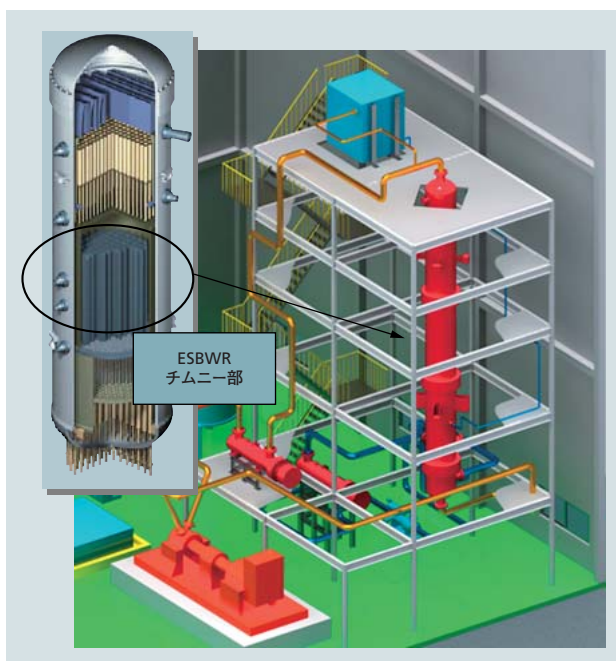


図9 多目的蒸気源試験設備「HUSTLE」

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。

ESBWRに注ぎ込み、GE社とともに実機建設に向けた着実な準備を進めている(図9参照)。

5. おわりに

ここでは、世界的な原子力発電所建設機運の高まりを背景にした、「原子力ルネサンス」時代に応えるための原子力発電設備開発の方向性と開発の状況について述べた。

地球温暖化防止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、維持発展させるためには、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、来るべき大規模建設時代に備える必要がある。

日立は、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、「原子力ルネサンス」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 日立事業所 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 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 日立事業所 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