

新型軽水炉の導入に向けた取り組み

<大型革新軽水炉 Highly Innovative ABWR>

日立GEニュークリア・エナジー(株) 近藤 貴夫・大西 由里子

1. はじめに：原子力をめぐる世界の潮流と日立GEの原子力ビジョン

1-1 原子力をめぐる世界の潮流

世界の新設プラント実績では、中国の躍進が目立っている。過去10年間の世界の新設プラントの約60%が中国での建設プロジェクトである。ロシアは古い炉のリプレースを堅調に進めながら、2020年5月には、世界初となる海上浮体式原子力発電所の商業運転も開始している。今後の新設計画も、大半を中国とロシアが占めており、さらに両国は原子力の新興国への輸出にも積極的である。他方、アメリカ、イギリス、カナダといった西側原子力推進国の実プロジェクトの計画は少数にとどまっている。

一方で、近年カーボンニュートラルに向けた動きが急速に進んでいる。既に150以上の国と地域が2050年（一部の国は2070年）のカーボンニュートラル（CN）達成を宣言しており、CN達成に向けて重要な役割を担う脱炭素エネルギーの一つとして、原子力が広く認知されている。さらに、2022年2月のロシアによるウクライナ侵攻以来、緊迫するエネルギー情勢の中で、先進国を中心に、脱炭素化とエネルギー安全保障の両立が共通認識となった。2023年12月のCOP28（国連気候変動枠組み条約第28回締約国会議）では、パリ協定で示された目標（世界の平均気温を産業革命以前との比較で+1.5℃以下に抑える）達成に向けて、世界の原子力発電所の設備容量を3倍に増加させる野心的な目標に向けた協力方針も発表され、2024年1月時点で

日本をはじめとする25ヶ国が合意した。

また、世界中で様々な次世代の新型炉の開発プログラムが始まっている。例えば米国では、原子力の国際的な主導権を回復するとして、新型炉の実証炉建設費用を補助する先進的原子炉設計の実証プログラムARDP（Advanced Reactor Demonstration Program）を2020年5月から推進している。また、米国エネルギー省（DOE：Department of Energy）はARDPの他に、SMR（Small Modular Reactors）の開発支援および認可取得の資金援助等を実施している。しかし、このようなDOEによる支援があり、クリーンで安定した電力に対する需要が増加し続けているにもかかわらず、米国内の新規原子炉の受注は限定的となっているとして、2024年6月17日にDOEはさらなる支援を行う意向を表明した⁽¹⁾。原子力産業が、ニーズと必要な投資との間で商業的に膠着状態にあることを踏まえ、DOEは上記の通り、さらにSMRの配備を加速させるための支援を準備しており、実プロジェクト推進の後押しとなることが期待される。

以上のように、原子力発電は安定したゼロエミッション電源として改めて評価されたが、同時に、西側原子力推進国においては、需要がありながらも原子力発電所を新設する難しさに直面している。

1-2 カーボンニュートラルに向けた原子力の役割

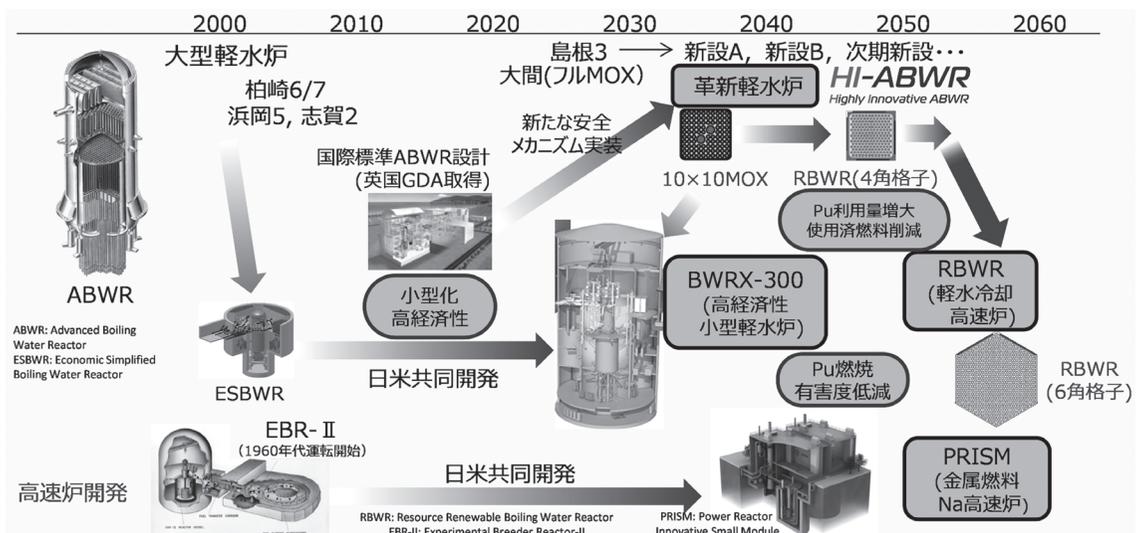
原子力の応用分野は広く、電力部門、非電力部門、そして産業・医療への貢献が期待される。

原子力発電プラントはこの内、電力部門の脱炭素化への貢献が最も大きくなる。再生可能エネルギーの大量導入に適応した調整力や、系統安定性への寄与という形での貢献も必要と考える。今後は、非電力部門の熱源としての利用、水素製造といったエネルギー転換への貢献も期待されている。また、データセンターや半導体製造のような消費電力の多い産業が拡大し、電力需要が将来的に増加する可能性があり、数十年以上にわたってゼロエミッションで安定した電力を供給できる原子力の活用が一層注目されている。

このような貢献をしていくには、原子力の信頼回復に取り組むことが重要である。国内既設炉では、新規制基準に基づく安全対策を完遂して再稼働し、安定電源としての役割を担うとともに、継続的な安全性向上の取り組みを進めている。新設炉については、社会に受け入れられる性能目標を設定し、革新的技術開発でそれを達成することが必要であり、燃料サイクルについては、プルトニウムの利活用、そして最終処分する廃棄物の減容を実現することが重要と考える。また、電源構成の中で今後も利用されるには、他電源と同等以上の経済性も必要である。

1-3 日立GEの原子力ビジョン

日立GEニュークリア・エナジー（日立GE）は、沸騰水型軽水炉（BWR）を40年以上にわたり継続的に建設してきた実績があり、これまでに培った技術を基に、さらなる安全性向上、建設コスト低減による初期投資低減、使用済燃料の放射能有害度低減を実現することで、原子炉を長期的な安定電源として活用することを原子力ビジョンとしている。この原子力ビジョンを実現する四つの新型炉（第1図参照）として、国際標準ABWRをベースに新たな安全メカニズムを組み込んだ大型革新軽水炉Highly Innovative ABWR（HI-ABWR）の実用化推進と、高経済性小型軽水炉BWRX-300、金属燃料ナトリウム冷却高速炉PRISM、軽水冷却高速炉RBWRの開発を進めている。この内、PRISMおよびRBWRは高速炉であり、使用済燃料・放射性廃棄物の削減と資源の有効活用を可能とし、燃料サイクルに多様な選択肢を提供することができる。PRISMは、米国のARDPの枠組みのもとで実証に向けた取り組みが推進されているNatrium™の原子炉システムとして採用されている。RBWRは既存のBWRシステムを用いた高速炉であり、高速中性子の段階的な利用実証と活用を可能とする。

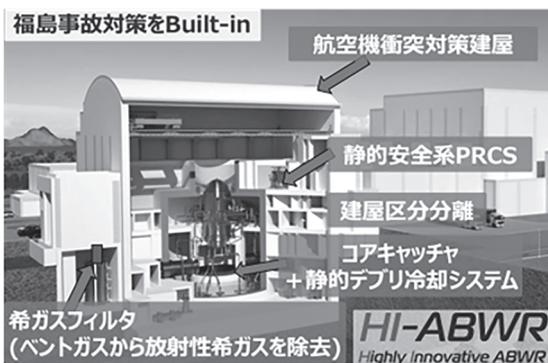


第1図 日立GEの原子力ビジョン

本稿ではこれ以降、2030年代の市場導入を目指しているHI-ABWRについて、その特長や、実用化に向けた取り組みについて記載する。

2. Highly Innovative ABWRの特徴

HI-ABWRは、建設・運転実績のあるABWRをベースに東京電力福島第一原子力発電所事故(1F事故)の教訓を設計段階から合理的に取り入れ(ビルトイン)、さらに英国と欧州の規制要求を満たす、国際標準ABWR(UK ABWR)を基に開発している。UK ABWRは、2017年に英国で設計認証を取得し⁽²⁾、1F事故後の国際的な安全規制に適合するプラントとして認められている。HI-ABWRの出力規模は1,350~1,500MWeを想定し、工学的安全系を含めて、基本システムはABWRおよびUK ABWRと同様である。自然災害・テロ・内部ハザードへの耐性を強化し、交流電源無しに事故の進展を抑制可能な静的安全系や、事故時の被ばく影響を大幅に低減する設備等、新たな安全メカニズムを取り込んでいる(第2図参照)。これらの対策を設計当初から合理的に取り込むことで、高いレベルの安全性をコストの増加を抑えつつ達成することを目指している。これらについて以下の節で説明する。



第2図 新たな安全メカニズムを搭載したHI-ABWR

2-1 自然災害・テロ・内部ハザードへの耐性強化

近年は原子力発電所への大型航空機衝突等へ

の外部ハザード対策が強化されている。外部ハザードに対しては、発生する荷重に対して原子炉建屋外壁により構造健全性を確保できるよう建屋を強化する一方、内部ハザードに対しては、原子炉建屋内部を耐火・止水性能を有する壁で区分ごとに分離する等により、共通要因故障をもたらす事象への対策を強化する。以下に各種ハザードへの対策を説明する。

(1) 航空機衝突対策

物理損傷に対しては外壁で防護し、耐震壁と共用することで建築構造を合理化し、物量増加を抑制する。さらに、防護壁範囲を抑制するため、航空機衝突対策を施した建屋内に安全上の優先度の高い設備を配置し、建屋配置の柔軟性を高める検討を実施している。火災への対策としては、建屋区分分離を活用し対象設備を防護する((4)内部火災・内部溢水防護設計を参照)。

(2) 高耐震化

重量機器の下階設置と上部スラブ低減等によるさらなる低重心化を進め、埋め戻し土や岩盤による側方拘束の活用、機器高耐震化設計等の対策をとる。

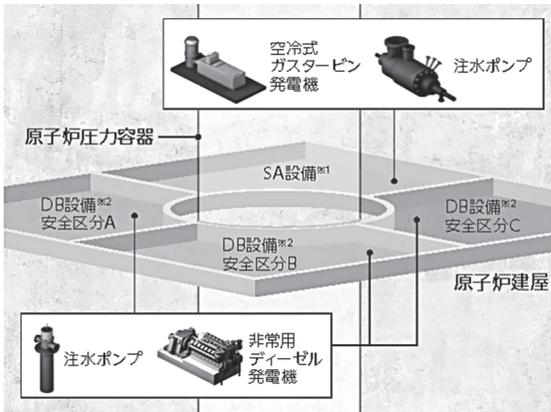
(3) 津波防護設計

基準津波に対しては、敷地レベルの嵩上げ、または防潮堤によりドライサイト化する。また、基準津波を超える津波に対しては、敷地レベル1階層の建屋外壁を水密化することで対応する。

(4) 内部火災・内部溢水防護設計

UK ABWRの区分分離の設計コンセプトを踏襲しつつ、第3図に示すように設計基準事故対処設備(DB設備)の三つの区分と、過酷事故対処設備(SA設備)の、合計4区分を、耐火・止水性能を有する壁で区分ごとに分離する。これにより、火災・溢水の影響範囲を1区分に限定し、共通要因故障をもたらす事象への対策を強化している。

なお、航空機衝突等の特定重大事故に対して、既設炉では、SA設備と同様の原子炉格納容器破損防止機能を持つ設備を、特定重大事故等対



※1 SA設備…過酷事故対処設備
 ※2 DB設備…設計基準事故対処設備

第3図 建屋区分分離

処施設（特重施設）として、DB設備・SA設備とは独立して設置している。HI-ABWRでは、(1)(4)に記載のとおりSA設備が航空機衝突対策を施した建屋内に設置され、区分分離も強化しているため、SA設備と特重施設の共用が可能と考える（なお、緊急時制御室等は独立性を維持した配置とする）。以上により既設プラントと比較してSA設備の設備数を削減することが可能と考えている。

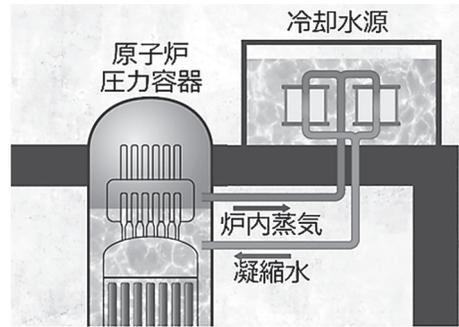
2-2 静的安全設備による事故進展抑制

交流電源無しに事故の進展を抑制可能な静的安全設備としては、以下の三つを採用する計画である。

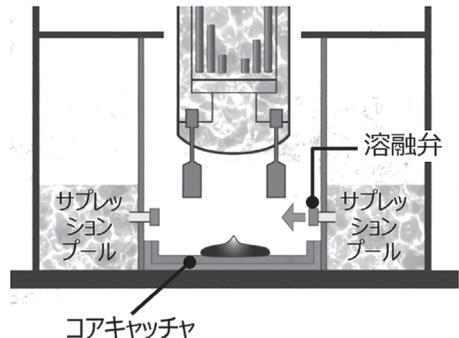
- 静的炉心冷却システム
 (PRCS : Passive Reactor Cooling System)
- コアキャッチャ+静的デブリ冷却システム
 (LDF : Lower Drywell Flooder)
- 静的格納容器過圧保護装置
 (COPS : Containment Overpressure Protection System)

PRCSの概要を第4図および以下に示す。

- 過酷事故において、炉内蒸気を自然循環力で原子炉建屋上部に設置した熱交換器に導き、タンク内の水と熱交換して崩壊熱除去する。
- 自動起動により24時間運転員操作不要。



第4図 静的炉心冷却システム (PRCS)



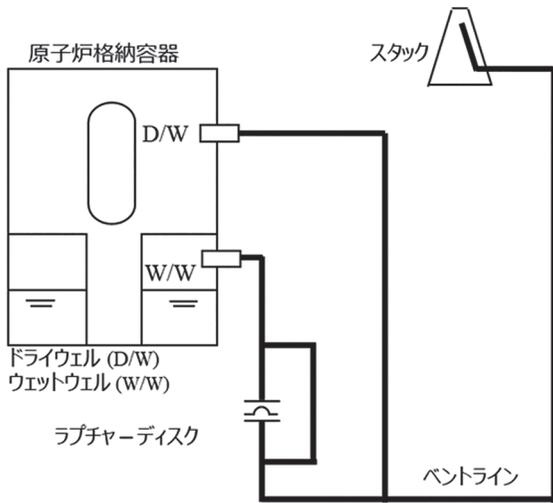
第5図 コアキャッチャ+LDF

コアキャッチャおよびLDFの概要を第5図および以下に示す。

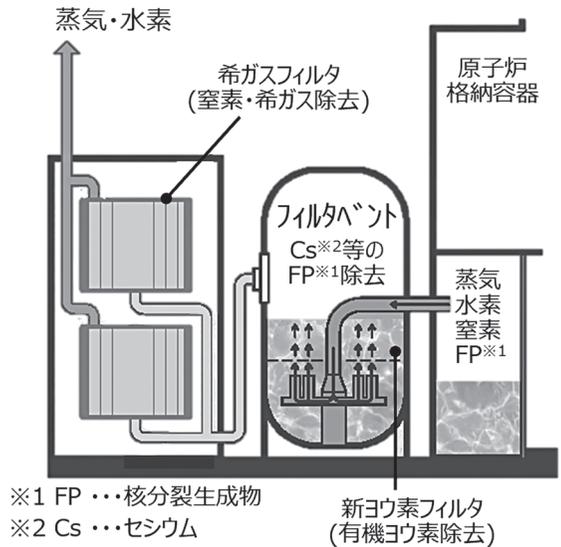
- 溶融炉心（デブリ）をコアキャッチャ（耐熱材^{注1)}で保持した後、デブリの輻射熱により溶融弁が作動し、重力駆動により冷却材を注入し、デブリを冷却する。
- サプレッションプール (S/P) を水源とし、運転員操作無しで3日間溶融炉心冷却が可能。COPSの概要を第6図および以下に示す。
- ベント配管上にラプチャーディスクを設置し、原子炉格納容器内の圧力が上昇し設定圧力に達すると自動的にベントを行う。

以上の静的安全設備は、自動化した動的設備および運転員操作を伴う動的設備のバックアップとして位置付ける。これにより、人的過誤や動的機器・サポート系の故障を排除することに

注1) 国家プロジェクト「静的デブリ冷却システムの開発 Phase II」にて耐熱材を開発し、既設プラントに適用済み。



第6図 静的格納容器過圧保護装置



第7図 放射性物質閉じ込めシステム

よりCDF・CFR-2^{注2)}を低減し、また運転員の負担を軽減する。

2-3 事故時の外部環境への影響抑制

1F事故以降、既設プラントの新規制基準対応設備として、外部環境への放射性物質放出を抑えつつ原子炉格納容器を減圧・除熱できるフィルタベントシステムが導入されている。HI-ABWRでは、排出する放射性物質をさらに低減するため、希ガスフィルタおよび新型ヨウ素除去フィルタ等を導入する。

希ガスフィルタおよび新型ヨウ素除去フィルタの概要を第7図に示す。国家プロジェクト^{注3)}(以下、国プロ)で開発中の希ガスフィルタはフィルタベントシステムの下流側に設置され、従来は除去するのが困難であった放射性希ガスの外部放出を防止する新たな技術である。新型ヨウ素除去フィルタも国プロ^{注4)}で開発中であり、除去剤としてイオン液体を利用し、従来のヨウ素除去フィルタよりも除去効率を向上できる技術である。これらの技術の採用により、過酷事故時でも住民の避難を実質的に不要とし、また、

より早期にベントして水素を排出することで水素燃焼リスクを低減できる。

2-4 事故時対応の信頼性向上

過酷事故シナリオに対して、従来は可搬設備も使用して対応する方針であったが、HI-ABWRでは基本的に恒設設備のみで事象収束を可能とする方針である。これにより人的過誤を低減して信頼性を向上するとともに早期に事象を収束させ、運転員および緊急時対策要員の負担を軽減する。可搬設備については、大規模損壊のような設計基準を大きく超える事象への対応設備とし、最適な設備構成となるよう適宜見直して柔軟性を向上させるため、自主対策設備として位置付ける。

2-5 社会ニーズに応じた柔軟な運転

再生可能エネルギー等の他電源との共存を目的として、BWRの特性を活かした熱出力制御、すなわち再循環流量および制御棒を用いた出力制御を活用することにより、日負荷追従運転(一日単位の出力調整)、周波数制御運転(短期的な出力調整)等の柔軟な運転が可能である。これらは、電力需給のバランスの維持や、系統周波数の安定に寄与する。また、運転・保守の負担低減についても、次世代中央制御室や、保全

注2) CDF: 炉心損傷頻度、CFR-2: 管理放出機能喪失頻度

3) 過酷事故時の被ばくを低減し水素・水蒸気を処理する希ガスフィルタシステムの開発

4) フィルタベントシステム用放射性物質除去技術の高

高度化のためのビルトイン設計等を検討するとともに、最新のデジタル技術の知見を生かしてプラント監視・操作や設備保全を高度化する計画である。

3. おわりに

日立GEは、社会や顧客の様々なニーズに対応するため、HI-ABWRの実用化推進ならびに、BWRX-300、PRISM、RBWRの三つの新型炉の開発を進めている。その内本稿では、カーボンニュートラルに貢献する安定電源として早期実現可能な革新軽水炉であるHI-ABWRについて紹介した。今後も、ユーザー意見の取り込み等により社会的受容性を高め、カーボンニュートラル実現に向けて、クリーンエネルギーである原子力発電で貢献していく。

<参考文献>

- (1) DOE, DE-FOA-0003392, Generation III+Small Modular Reactor Pathway to Deployment Program (June 17, 2024)
- (2) UK Advanced Boiling Water Reactor (UK ABWR) <https://www.onr.org.uk/generic-design-assessment/assessment-of-reactors/uk-advanced-boiling-water-reactor-uk-abwr/>

【筆者紹介】

近藤貴夫

日立GEニュークリア・エナジー(株) 原子力計画部
チーフプロジェクトマネージャ

大西由里子

日立GEニュークリア・エナジー(株) 原子力計画部
技師