

# 社会と共生しエネルギー安定供給を可能とする 革新軽水炉 iBR

iBR: Innovative, Intelligent and Inexpensive Boiling Water Reactor to Coexist with Local Communities and Supply Stable Power

松本 圭司 MATSUMOTO Keiji 米田 哲也 YONEDA Tetsuya 青木 保高 AOKI Yasutaka 後藤 圭太 GOTO Keita

2011年3月に発生した東日本大震災による東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の事故で、現在も多くの周辺住民が避難生活を余儀なくされている。これを受けて国内では、新規規制基準の施行に伴って既設炉には多くの動的安全設備や外部特定重大事故等対処施設(特重施設)が追加された。新設炉には更に経済性も大きな課題となっている。

東芝エネルギーシステムズ(株)は、大規模自然災害に対する深層防護を考慮した安全設計を徹底した革新軽水炉 iBR の開発を進めている。万一の過酷事故(SA)時でも、緊急避難不要かつ長期移住なし、及び外部支援なしで静的安全系による7日間のグレースピリオド(運転員の操作が不要で安全を確保できる期間)が達成可能である。また、建設実績のある改良型沸騰水型原子炉(ABWR)をベースとし、建設が容易で経済性の高いプラントを実現できる。

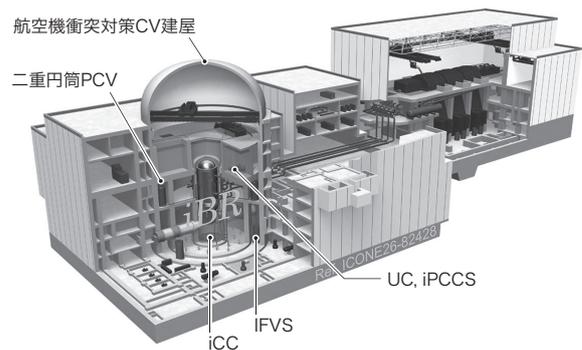
As a result of the accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, which was seriously damaged by the Great East Japan Earthquake of March 11, 2011, many residents of the surrounding area are still forced to live elsewhere as evacuees. Existing nuclear power plants in Japan are now required to implement additional safety measures, including various active safety systems and a specialized safety facility, following the enforcement of new regulatory requirements in response to this situation. Newly constructed nuclear power plants are also required to achieve further improvements in economic efficiency.

Under these circumstances, Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation is developing the iBR, an innovative, intelligent and inexpensive boiling water reactor that realizes enhanced safety through in-depth countermeasures to prevent a severe accident in the event of a large-scale natural disaster. The passive safety systems of the iBR can function as a specialized safety facility without any help from outside the station for a period of seven days, so there is no need for emergency evacuation nor for permanent relocation even in a severe accident situation. The iBR is based on the advanced boiling water reactor (ABWR), which has a proven track record, making it easy to construct and to achieve high economic efficiency.

## 1. まえがき

iBR<sup>(注1)</sup>(innovative, intelligent, inexpensive BWR(沸騰水型原子炉))は、ABWRをベースに、東芝エネルギーシステムズ(株)独自で開発・設計したプラントであり、多様性を強化した安全システム、二重円筒格納容器(二重円筒PCV)、格納容器建屋(CV建屋)内に防護され組み込まれた静的安全系を備えている(図1)。電源と安全系の多様性により、大規模自然災害発生時に長期にわたり非常用ディーゼル発電機が喪失する全交流電源喪失(SBO)に至った場合でも炉心損傷確率(CCDP)を大幅に減らすことができる。万一、SAが発生した場合でも、新たに組み込まれた静的安全メカニズムにより原子炉格納容器(PCV)を冷却し、放射性物質を除去しつつ二重円筒PCV内に閉じ込めることが可能であり、緊急避難不要かつ長期移住なしを実現している。

これにより、軽水炉として世界最高の安全性<sup>(注2)</sup>を達成している。また、新設炉では安全性に加えて経済性も求め



\*Sato, T. et al. 「iB1350 #1-A Generation III.7 Reactor iB1350 and Defense in Depth (DiD)」<sup>1)</sup>を基に作成

### 図1. iBRの概要

建設実績のあるABWRをベースに、二重円筒PCVや革新的静的安全系(ウルトラコンデンサー(UC)、革新的コアキャッチャー(iCC)、革新的静的格納容器冷却系(iPCCS)、静的放射能フィルター系(IFVS))を導入した。

Overview of iBR

(注1) 従来はiB1350という名称を使用していた<sup>1)</sup>が、電気出力800～1,600 MWのラインアップが可能であるため、出力を限定しないiBRという名称に変更した。

(注2) 2023年4月現在、軽水炉として、当社調べ。

られるが、iBRの安全システムは実績のある既存技術に基づいており、0から開発する必要のあるものは使用していない。当社が東京電力ホールディングス(株) 柏崎刈羽原子力発電所6、7号機や中部電力(株) 浜岡原子力発電所5号機(電気出力:1,350 MW級)への納入実績を持つABWRをベースとしていることから、大きな新規開発要素はなく、2030年前半に建設開始可能なプラントとなっている。

ここでは、当社が開発したiBRの概要、安全性、及び経済性について述べる。

## 2. iBRの概要

iBRの主要諸元の一例を、表1に示す。原子炉系(炉心や、炉内構造物、原子炉压力容器(RPV)など)及びタービン系は建設実績のあるABWRと同一である。PCVも、鉄筋コンクリート製(RCCV)で、ドライウェル(D/W)とウェットウェル(W/W)はABWRと同一であるが、二重円筒PCVの採用により、D/W、W/Wの外側にアウトウェル(O/W)が設けられている。O/WによりPCV体積がABWRのほぼ2倍になり、SA時に発生する水素を閉じ込め、水素によるPCVの過圧破損を防止できる。また、静的安全系であるウルトラコンデンサー(UC)、革新的コアキャッチャー(iCC)、革新的静的格納容器冷却系(iPCCS)、静的放射能フィルター系(IFVS)などがCV建屋内に設置されている。また、電気出力800~1,600 MW級のラインアップをそろえており、ベースロード電源として電気事業者のニーズに応じた電気出力を、高い安全性とともに提供可能である。

## 3. 安全性

iBRでは、図2に示すようにCV建屋内に様々な革新的静的安全系を組み込むことで、東日本大震災のような大規模自然災害によりSBOが長期間続き、万が一炉心溶融に至るSAが発生した場合でも、運転員操作が不要な期間であるグレースピリオド及びサイト外部からの支援(電源や水源の補給など)が不要な期間であるオートノミーのいずれについても7日を確保できており、かつ周辺住民の緊急避難不要、長期移住なしが実現可能となっている。水源を補給すればiPCCSによる冷却をその後も継続でき、PCV過圧防止のためのPCVベントは全く不要である。

iBRの安全系は、非常用炉心冷却系(ECCS)のポンプなど電源を駆動力とした動的安全系に、UCやiPCCSなどの圧力差を駆動力とし故障確率の低い静的安全系を組み合わせたハイブリッド安全系となっており、独立性、多様性により大規模自然災害に強い安全対策となっている。静的安全系は、駆動電源が不要で熱の最終的逃がし場(UHS)が大

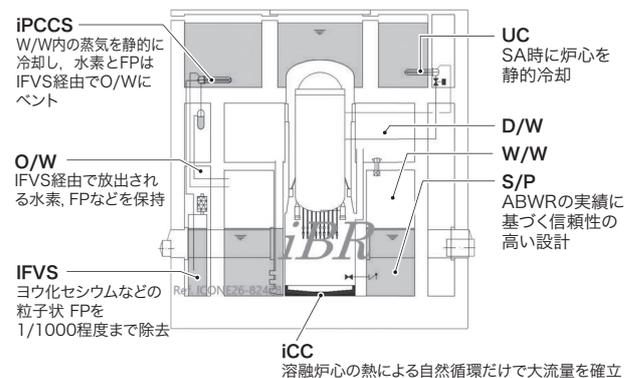
表1. ABWRとiBRの主要諸元

Main specifications of ABWR and iBR

項目	ABWR	iBR				
		800	1,000	1,356	1,600	
出力	電気出力(グロス)(MW)	1,356	800	1,000	1,356	1,600
	熱出力(MW)	3,926	2,395	2,890	3,926	4,300
炉内構造物	燃料集合体数	872	532	560	872	
	制御棒本数	205	129	137	205	
	RIP台数	10	6	6	10	
RPV	RPV高さ(m)	21.1	20.1	20.3	21.1	
	RPV内径(m)	7.1	6.1	6.2	7.1	
PCV	PCV高さ(m)	29.5	29.5		29.5	
	D/W内径(m)	29	27		29	
	O/W内径(m)	-	39		41	
	PCV最高使用圧力(kPa)	310	310		310	

RIP: RPV内蔵型再循環ポンプ(インターナルポンプ)

\*Sato, T. et al. 「iB1350 #1-A Generation III.7 Reactor iB1350 and Power Variations」<sup>2)</sup>を基に作成



S/P: サブプレッションプール

\*Sato, T. et al. 「iB1350 #1-A Generation III.7 Reactor iB1350 and Defense in Depth (DiD)」<sup>1)</sup>を基に作成

図2. iBRの静的安全系

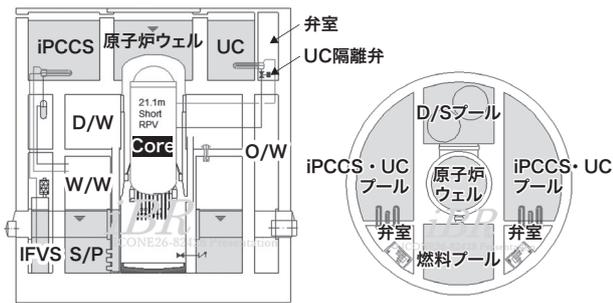
革新的静的安全系を導入することで、大規模自然災害によるSAにおいても周辺住民の緊急避難不要、長期移住なしを実現できる。

Built-in passive safety systems for iBR

気であるため大掛かりな海水冷却系などが不要で、動的安全系に比べて信頼性が極めて高い。そのため、静的安全系を使用した深層防護は、防護の壁を格段に厚くして信頼性を高めることが可能である。動的安全系を使用した場合の条件付き格納容器破損確率(CCFP)は $10^{-1}$ のオーダーが限界であるが、iBRの静的安全系を使用した場合のCCFPは3桁改善され $10^{-4}$ のオーダーまで低減できる。

以下において、iBRに導入した静的安全系のそれぞれの機能について、述べる。

iBRには二重円筒PCVを採用しており、D/W、W/Wと同様にO/Wにも耐圧性と気密性を持たせており、事故時に発生する水素や核分裂生成物(FP)を十分閉じ込めるだ



D/Sプール:蒸気乾燥器・気水分離器貯蔵プール  
 \*Sato, T. et al. 「iB1350 #1-A Generation III.7 Reactor iB1350 and Defense in Depth (DiD)」<sup>1)</sup>を基に作成

図3. iBR内へのUCとiPCCSの設置

RPVやPCVにおいて崩壊熱によって発生する蒸気を静的に凝縮することで、iPCCS・UCプールを経由して崩壊熱を大気に逃がす。

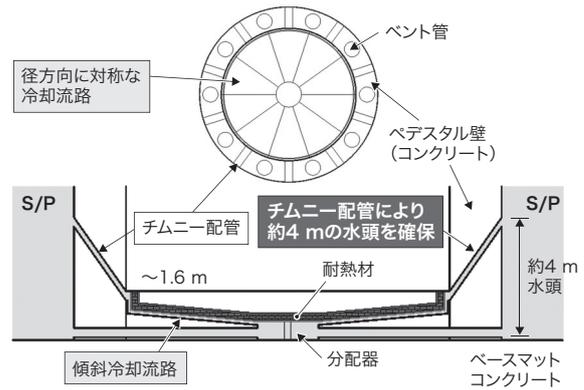
Ultra condenser (UC) and innovative passive containment cooling system (iPCCS) installed in iBR

けの空間を確保している。また、二重構造となっているため、耐震性も向上している。O/Wは、D/W及びW/Wと、iPCCS及びIFVSで接続されている。

原子炉は、異常発生時に制御棒を炉心に急速挿入することで炉停止されるが、炉心崩壊熱が長期にわたって生じるため、炉停止後も冷却による崩壊熱除去を続ける必要があり、iBRでは、静的安全系だけで炉心とPCVを独立に冷却可能な設計としている。

静的安全系の一つであるUCは、原子炉内にて炉心崩壊熱により発生する蒸気を静的に凝縮させて戻す構成であり(図3)、国内・海外で採用実績のある非常用復水器(IC)をベースに、信頼性と冷却継続期間を向上させており、長期SBO時において原子炉を7日間冷却できる。

iPCCSは、PCV内で発生した蒸気を静的に凝縮させることでPCVを7日間冷却でき、SAにおいてRPV下部の破損により落下する溶融炉心の崩壊熱を、静的な重力式コリウム冠水系(GDCF)及びサプレッションプール(S/P)にて蒸気発生させることで冷却させ、発生した蒸気をiPCCSで凝縮しS/Pに戻す構成となっている(図3)。蒸気以外の非凝縮性ガス(窒素、水素など)は、FPとともにO/Wに排出される。O/Wを排出先としているため、W/Wが高圧化しても機能停止することがない。更に、排出の過程でIFVSによりヨウ化セシウム(CsI)などの粒子状FPをスクラビングし、希ガスなどの除去されないFPはO/Wに閉じ込める。これにより、静的安全系だけで原子力発電所内の敷地境界における実効線量を20 mSv/月以下、Cs-137(セシウム137)の放出量を100 T(テラ: 10<sup>12</sup>) Bq以下に制限し、緊急避難不要、長期移住なしを達成可能である。また、これによりPCV内のガスに含まれる希ガスなどを除去しながらPCV外



Ref.ICONE26-82428

\*Sato, T. et al. 「iB1350 #1-A Generation III.7 Reactor iB1350 and Defense in Depth (DiD)」<sup>1)</sup>を基に作成

図4. iCCの構成

RPV下部に設置し、傾斜冷却流路への伝熱、及びS/P出入り口の高低差による冷却水の自然循環で、溶融炉心を静的に冷却させる。

Configuration of innovative core catcher (iCC) for iBR

部に放出するシステムは不要である。当社はPCCSの開発設計や実証試験の経験を持っており、iPCCS実証試験を計画中である。

iCCはRPV下部のD/W床に設置しており(図4)、SAにおいてRPV下部の破損で落下する溶融炉心によるコンクリートとの相互作用(MCCI)を物理的に排除している。iCCはRPV幅に余裕を持たせた伝熱面積を確保しており、傾斜冷却流路をS/P水で常時通水させておくことで、溶融炉心を捕捉し、傾斜冷却流路への伝熱で溶融炉心を静的に冷却させる。溶融炉心からの伝熱は、冷却流路のS/Pからの出入り口の高低差による自然循環でS/Pに移行し、蒸気発生させiPCCSで除熱させる。既設炉で採用している事前水張りは不要であり(ドライキャビティー方式)、径方向に対称な冷却流路とすることで、冷却水の流れに偏りが生じない設計としている。RPV直下に設置されるため確実に溶融炉心を捕捉でき、間欠的な落下にも対応可能である。このように、iCCは完全に静的であり、一体型で耐震性にも優れているため、コアキャッチャーの冷却に動的システムを使用する場合に比べると信頼性を格段に高くすることができる。当社は、様々なタイプのコアキャッチャー開発設計や実証試験の経験も持っており、iCC実証試験を計画中である。

これらの静的安全系をCV建屋内に設置し、CV建屋の上部ドームは航空機衝突に耐える壁厚とし、サイト外部からの支援を7日不要にすることで、国内の新規制基準で要求されている特重施設の機能を満足する設計にもなっている。このため、例えば、地震による道路の破損や、瓦れき類の散乱、大雪などで外部からのアクセスが困難な状況下にお

いても、7日間は外部支援が不要な設計となっている。

iBRの動的な安全系においても、ポンプや電源の多様性と独立性を確保することで、内的・外的事象に強い設計としている。ポンプは、電気駆動と蒸気駆動、電源はディーゼル発電機とガスタービン発電機、補機冷却系は海水系とエアフィンクーラーを組み合わせることで、共通原因故障に起因する炉心損傷を排除し、地震や津波を伴う大規模自然災害で外部電源や海水系が長期にわたって喪失した場合を想定した設計とした。大規模自然災害発生時のCCDPが $10^{-6}$ /回オーダー、通常運転時の内的事象による炉心損傷頻度(CDF)が $10^{-9}$ /(炉・年)オーダーと、軽水炉として世界最高の安全性を達成している。

#### 4. 経済性

iBRは、ABWRをベースに様々な静的安全系を導入して安全性を高めているが、様々な観点で経済性にも優れたプラントとなっている。以下に、経済性の観点からの長長について幾つか述べる。

国内では、東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所事故を受けて新規制基準が施行され、既設炉では重大事故等対処設備(SA設備)及び特重施設の追加設置が必要になっている。iBRは新設炉であるため、それらの安全対策設備を建設時から合理的に配置することが可能で、また航空機衝突にも耐えるCV建屋内に静的安全メカニズムを組み込むことで、よりコンパクトな建屋設計を実現している。

また、iBRは長年にわたり簡素化改良を続けてきたBWRの長所を継承しており、高压容器はRPVだけで外部再循環ループもなく、PCVも圧力抑制型のため容積やコンクリート物量を抑制できる。

電気出力についても、BWRは原子炉内を循環する冷却材流量を調整することで柔軟に変化させることができるため、電力需要の増減への追従性(負荷追従性)が高い長長があり、負荷変動の大きさや変動周期に応じた負荷追従運転方式で安定した運転経験がある。iBRはこの長長を生かした設計とすることで、ベースロード電源確保だけでなく需給調整にも柔軟に対応可能である。

このように、iBRは、安全性だけでなく経済性においても格段に優れた設計を実現しており、電力需給調整にも柔軟に対応可能で、エネルギー安定供給に貢献できるプラントである。

#### 5. あとがき

建設実績のあるABWRをベースに、二重円筒PCVと革

新的静的安全系を導入することで、軽水炉として世界最高の安全性を備え、経済性に優れたiBRを開発した。

現在、iBRは基本設計段階にあり、革新軽水炉として2030年代前半での国内建設開始に向けて、開発設計と実証試験を進めていく。なお、iBRは海外規制への適合も考慮しており、国際標準炉としても十分な可能性を持っている。

#### 謝辞

iBRは、佐藤崇氏(元東芝)の長年にわたる検討と論文活動により構築されたものであり、ここに感謝の意を表します。

#### 文献

- (1) Sato, T. et al. "iB1350 #1-A Generation III.7 Reactor iB1350 and Defense in Depth (DiD)". Proceedings of the 26th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE26). London, UK, 2018-07, American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2018, no.82428.
- (2) Sato, T. et al. "iB1350 #1-A Generation III.7 Reactor iB1350 and Power Variations". Proceedings of the 27th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE27). Ibaraki, 2019-05, ASME, 2019, no.1983.
- (3) 青木保高, ほか, "革新軽水炉 iB1350". 原子力安全部主催セミナー「新型炉の安全と安全規制」. 東京, 2022-10, 日本原子力学会, 2022, 資料5-2. <[http://www.aesj.or.jp/~safety/pdf/summerseminar/20221027\\_lecture2\\_iB1350.pdf](http://www.aesj.or.jp/~safety/pdf/summerseminar/20221027_lecture2_iB1350.pdf)>, (参照 2023-02-23).
- (4) 青木保高, ほか, "カーボンニュートラル社会の実現に向けた東芝エネルギーシステムズの革新炉開発". 2022年度 第7回ゼロカーボンエネルギー研究所コロキウム, 東京, 2022-09, 東京工業大学, 2022. <<http://www.zc.iir.titech.ac.jp/jp/events/colloquium/files/22-07.pdf>>, (参照 2023-02-23).



松本 圭司 MATSUMOTO Keiji  
東芝エネルギーシステムズ(株)  
パワーシステム事業部 原子力安全システム設計部  
日本原子力学会会員  
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



米田 哲也 YONEDA Tetsuya  
東芝エネルギーシステムズ(株)  
パワーシステム事業部 原子力技術部  
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



青木 保高 AOKI Yasutaka  
東芝エネルギーシステムズ(株)  
パワーシステム事業部 原子力システム設計部  
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



後藤 圭太 GOTO Keita  
東芝エネルギーシステムズ(株)  
パワーシステム事業部 原子力システム設計部  
日本原子力学会会員  
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.