

日本原子力学会シニアネットワーク（SNW）

第21回（2021年）シンポジウム

「脱炭素電源である原子力発電の更なる活用に向けて」

カーボンニュートラル実現に向けた 三菱重工 原子力事業の取組み

2021年9月15日

三菱重工業株式会社 原子力セグメント

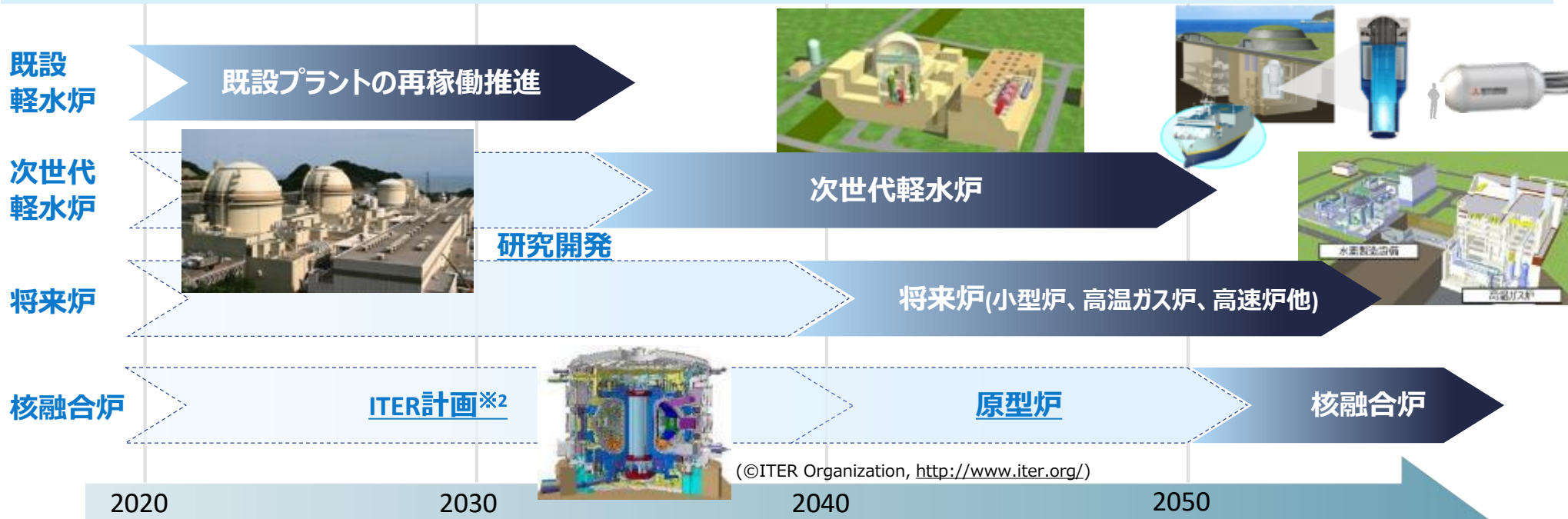
加藤 顕彦

- 1. カーボンニュートラル実現に向けた
三菱重工 原子力事業の取組み**
- 2. 次世代炉開発の取組み**
- 3. 将来炉開発の取組み**

1. カーボンニュートラル実現に向けた 三菱重工 原子力事業の取組み

カーボンニュートラルに向けた原子力事業の取組み

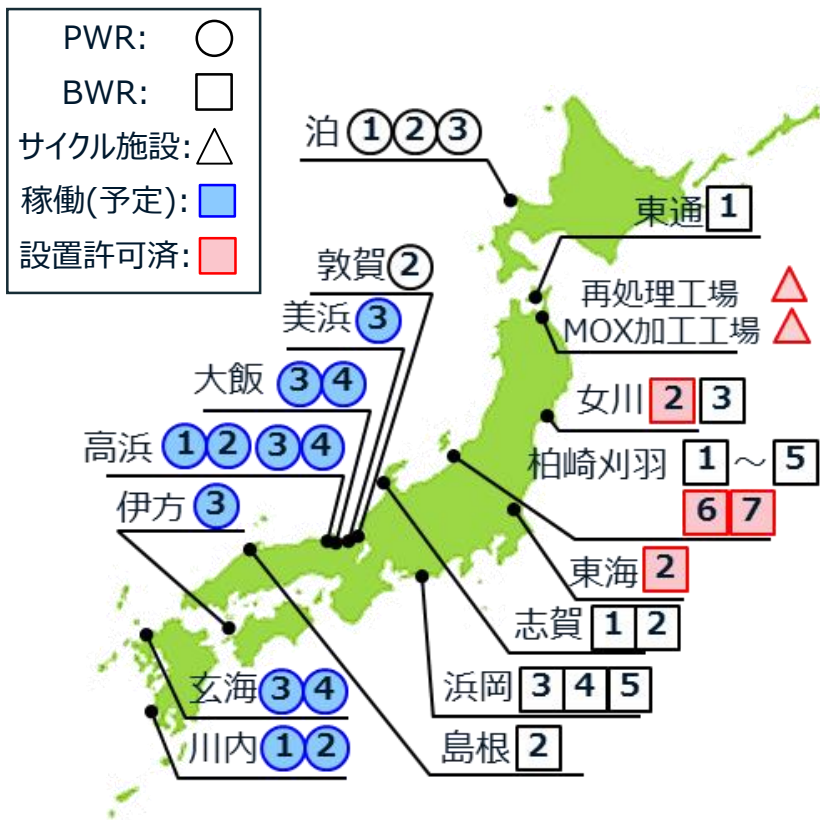
- 原子力は**カーボンフリーかつ大規模・安定電源**であり、**エネルギーセキュリティ上の観点も含め重要なベースロード電源**。2050年カーボンニュートラル(CN)の達成に向け、**将来に亘って原子力の活用は必須**
- 一方、国内では、東日本大震災以降、国民の原子力に対する信頼は低下しており、**その信頼回復が最重要課題**であり、当社は**既設プラントの再稼働支援/継続的な安全性向上**に取り組むことで**信頼回復**に努める。更に**世界最高水準の安全性を実現する次世代軽水炉の実用化**により**脱炭素社会の実現に貢献していく**
 - **【短期】既設プラント（PWR、BWR）の再稼働/特重※¹設置の推進、燃料サイクルの確立、更に次世代軽水炉により発電分野のCO₂排出を大幅削減**
 - **【中期】多様化する社会ニーズに応じて小型炉、高温ガス炉、高速炉等を開発・実用化**
 - **【長期】恒久的な“夢のエネルギー源”である核融合炉の実用化へ挑戦**



※1 特定重大事故等対処施設：プラントとは完全に独立し、航空機衝突やテロ等の際に安全に運転停止できる大規模施設

※2 ITER計画：核融合炉実験炉実現に向け7極(日,EU,米,露,中,韓,印)政府により進められている大型国際PJ

- 世界最高水準の新規制基準に適合させるべく、各種解析・評価・試験等により電力事業者殿を支援
- 国内PWRプラントならびにBWRプラントも含め、再稼働に向けて多数の安全対策*工事、特重施設の設置を推進中
※安全設備/電源設備の強化、自然ハザードに対する耐性強化(耐震補強、竜巻対策)等
- 国内初の40年超運転となる関西電力・美浜3号機の再稼働実現（2021年6月）を支援



<再稼働対応の状況>

	'15	'16	'17	'18	'19	'20	'21	'22	'23	'24	'25	'26	'27	'28	'29	'30
PWR	▼川内1 ▼川内2 ▼高浜3 ▼高浜4			▼大飯3 ▼大飯4 ▼玄海3 ▼玄海4			高浜1 ※ ▼-----▶ 高浜2 ※ ▼-----▶									
				▼伊方3			▼美浜3			泊3、泊1/2 敦賀2						
BWR																

柏崎刈羽6/7、東海2、女川2、島根2、...

※:特重工事完了後に運転再開

核燃料サイクルの確立に向けた取組み

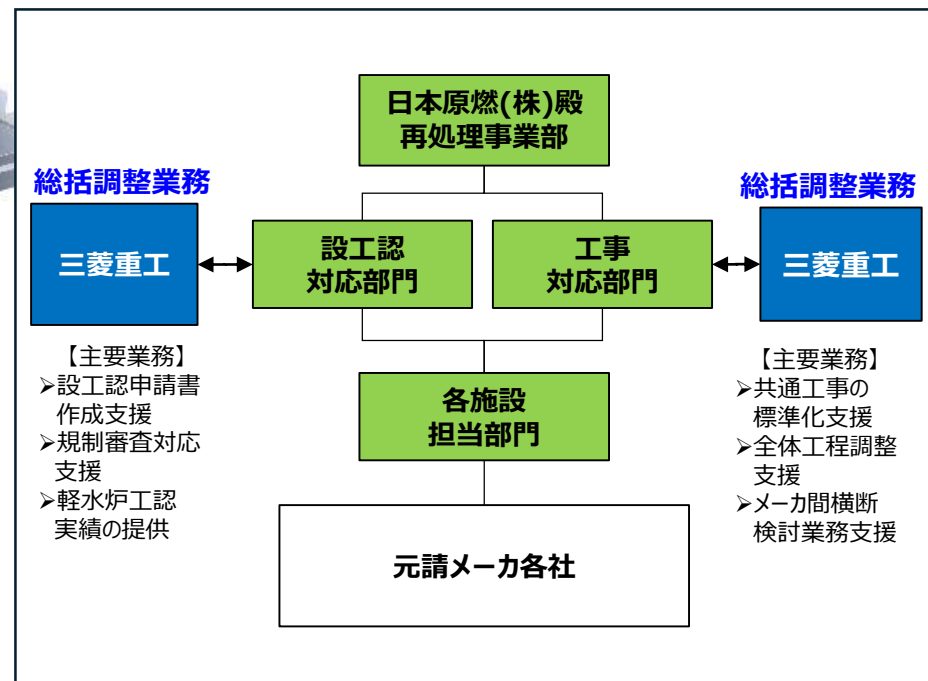
- 原子力の長期活用、エネルギーセキュリティ確保の為に、燃料サイクルの確立が必須であり、六ヶ所再処理工場、MOX燃料加工工場の早期竣工に向けて、主幹会社として工事推進中
- 使用済燃料の再処理までの中間貯蔵対策として、輸送・貯蔵兼用キャスク(設計/製造他)も積極的に対応
⇒六ヶ所施設竣工後の安全・安定運転も支援するべく、竣工後の保全計画策定を推進

【再処理工場】

【MOX燃料加工工場】



＜六ヶ所体制＞



	2020	2021	2022	2033	2024
RRP	<ul style="list-style-type: none"> 7.29事業変更許可 安全審査 12.24設工認申請 		設工認審査		
	<ul style="list-style-type: none"> 新規制対応工事 		竣工(2022/上期)		
J-MOX	<ul style="list-style-type: none"> 12.9事業変更許可 安全審査 12.24設工認申請 		設工認審査		
	<ul style="list-style-type: none"> 新規制対応工事 			竣工(2024/上期)	

※ RRP; 六ヶ所再処理工場、J-MOX; MOX燃料加工工場

2. 次世代炉開発の取組み

次世代軽水炉開発の意義

- 原子力はカーボンニュートラルの切り札であり、将来のエネルギー安定供給（セキュリティ、技術自給率）の観点から国内新增設は不可欠と認識
- 2030年代半ばの実用化を目標に、高い経済性に加え、革新技術を採用した世界最高水準の安全性を実現する次世代軽水炉の開発を推進
- 世界に誇る日本の原子力技術、産業基盤維持のためにも早期の新增設計画の具体化が必要



出力：120万kW級

世界最高水準の安全炉

- 国内24基に及ぶPWRプラント建設の集大成
- 最新の知見、革新的技術の導入
- 世界最高水準の安全性・安心を追求

超安全・安心

地震／津波／テロに高い耐性を持ち、放射性物質を閉じ込め、影響を発電所内に限定

地球に優しく

CO₂を出さず、柔軟な出力調整で再生可能エネルギーと共存

大規模な電気を安定供給

国際情勢、天候に左右されない準国産エネルギー

次世代軽水炉の特徴

➤ 地震・津波その他自然災害への耐性強化、大規模航空機衝突・テロ対策、シビアアクシデント対策等の世界最高水準の安全対策に加え、社会ニーズを踏まえて自然エネルギーとの共存性を考慮したプラント機能向上

放射性物質放出防止

万一の事故時にも、事故影響を発電所敷地内に限定

セキュリティ高度化

最先端技術を適用したサイバーセキュリティ

大型航空機衝突への対策

航空機衝突に耐える格納容器外部遮蔽壁の強靱化

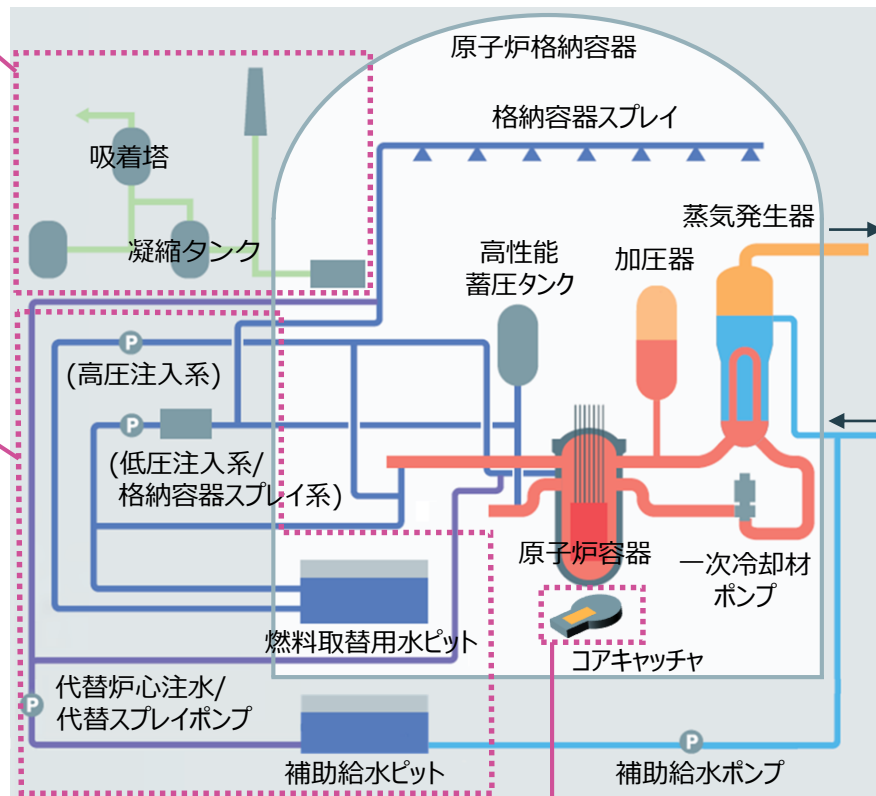
多重性・多様性

炉心冷却のための設備、電源等の多重性・多様性を強化

〔2系列 ⇒ 3系列 + シビアアクシデント (SA)専用システム〕

溶融炉心対策

炉心溶融が起きてしまった場合でも、最終障壁である格納容器を防護



耐震性・津波耐性

その他自然災害への耐性

竜巻・台風・火山等の自然災害への耐性を強化

再生可能エネルギーとの共存

出力調整機能（周波数制御、負荷追従）の強化

耐震性・津波耐性等の強化

- 福島第一原子力発電所事故の反省を踏まえ、国内の厳しい地震条件にも余裕を持った耐震設計、津波影響を受けないドライサイト設計の採用
- 建屋頑健化や火山灰侵入防止対策等により、その他の外部事象（台風や火山等）に対する耐性を大幅に強化

耐震性強化

国内の厳しい地震条件（1000gal）での耐震成立性

- 強固な岩盤に建屋を埋込むことで、耐震性を強化

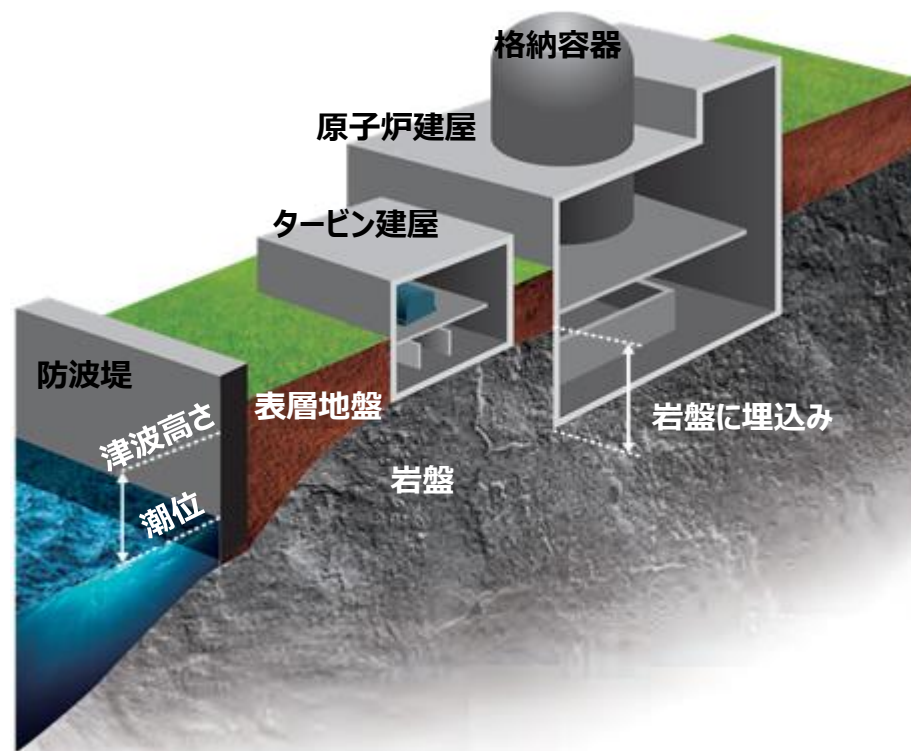
参考：東日本大震災時の福島第一原子力発電所内の最大地震動は、約450gal*

*gal：地震の揺れの大きさを表す加速度の単位

津波耐性強化

津波の侵入を防止するドライサイト設計の実現

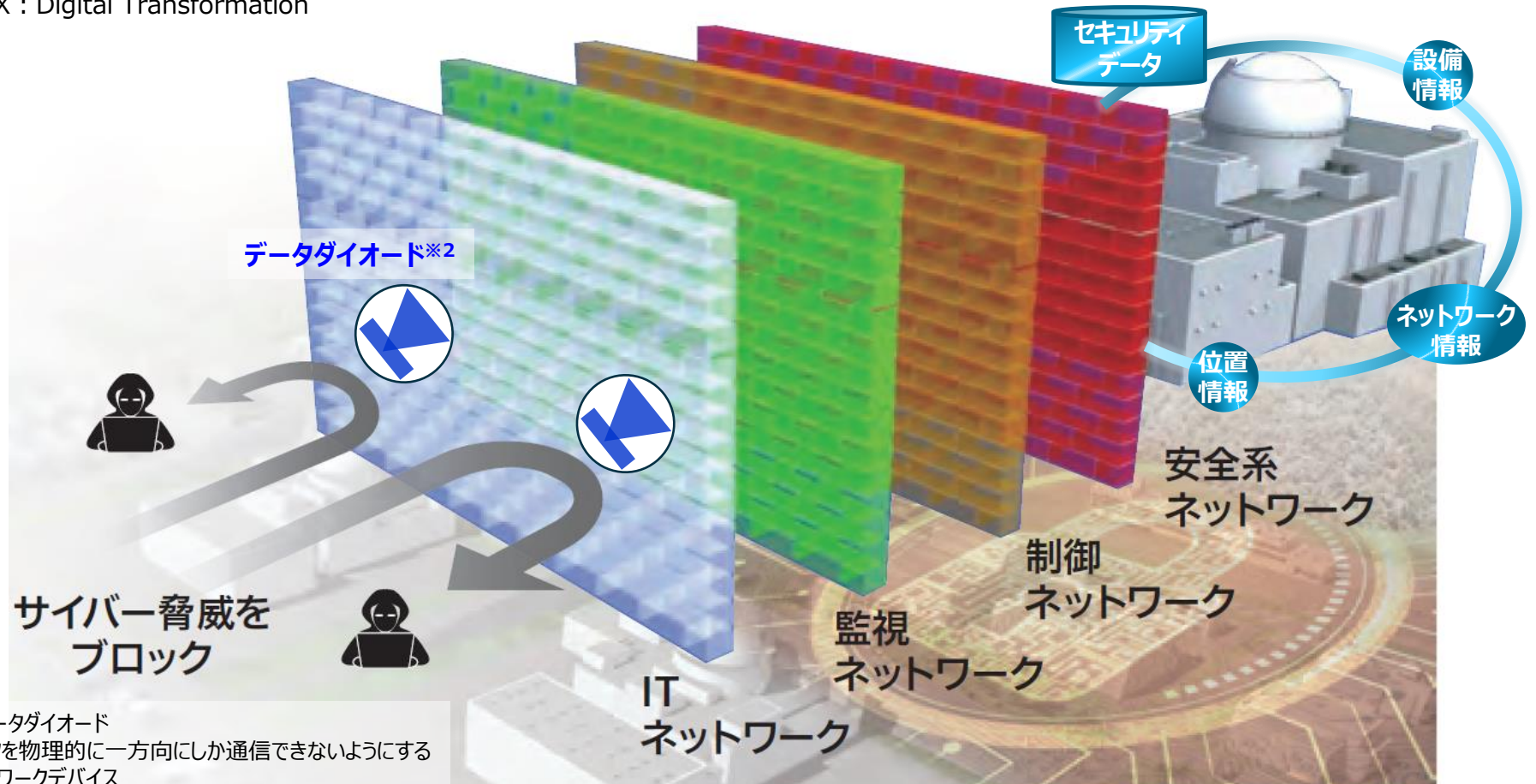
- 津波到達高さよりも高いグラウンドレベル
- 地上1階層の建屋水密化



セキュリティ高度化・テロ対策

- 最先端技術の導入により、発電所の安全運転・保守・管理に係るプラント情報等を発電所外部の重要拠点とも共有・連携するなどDX※1を推進
- 高度なセキュリティが求められる重要なシステムについては、サイバー空間で多層化構成とし、システム間の伝送を一方向とするなど、多様な手段で防護することで、プラント安全系システムへの侵入を阻止

※1 DX : Digital Transformation



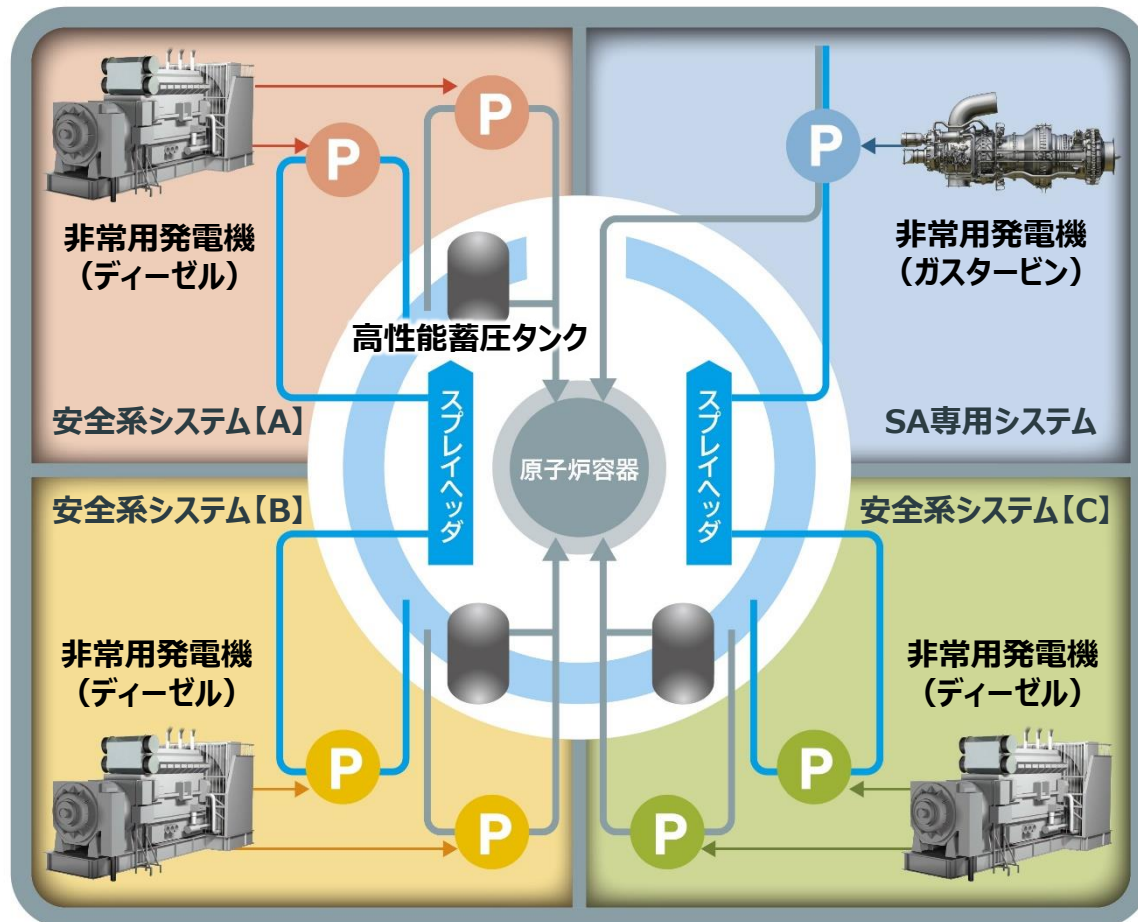
※2 データダイオード
データを物理的に一方向にしか通信できないようにするネットワークデバイス

多重性・多様性等の強化

➤ 国内の新規制基準へ完全に適合した新しい安全設計の採用、多重性・多様性強化等により、世界最高水準の安全性、信頼性を実現

故障要因の徹底排除・安全性の追求

- 安全系設備の多重性を強化
(2系列 ⇒ 3系列 + シビアアクシデント (SA) 専用システム)
- アクティブ／パッシブのベストミックス
(高性能蓄圧タンクの採用)
- 火災や内部溢水に対して重要機器の同時故障要因を徹底排除する区画分離設計
- SA専用設備・区画の採用
- 事故対応設備の多様性の強化
例：電源の多様化対策
非常用発電機 (ディーゼル駆動) と SA専用発電機 (ガスタービン駆動) を設置



格納容器閉じ込め機能強化

- 鋼製格納容器と強靱化した外部遮蔽壁の2重構造の採用、コアキャッチャ等の最新技術の導入により、大型航空機衝突（APC*）耐性や、最終障壁となる格納容器の閉じ込め機能を強化

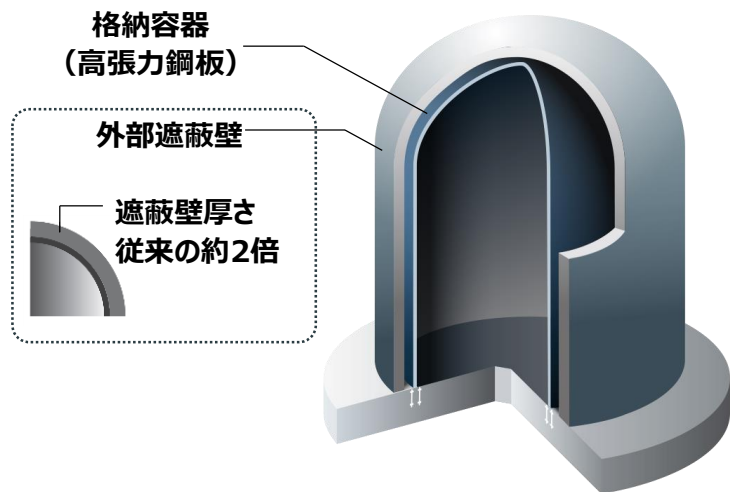
* APC : Air Plane Crash

格納容器破損防護対策

- 外部遮蔽壁と鋼製格納容器の**2重構造を採用**

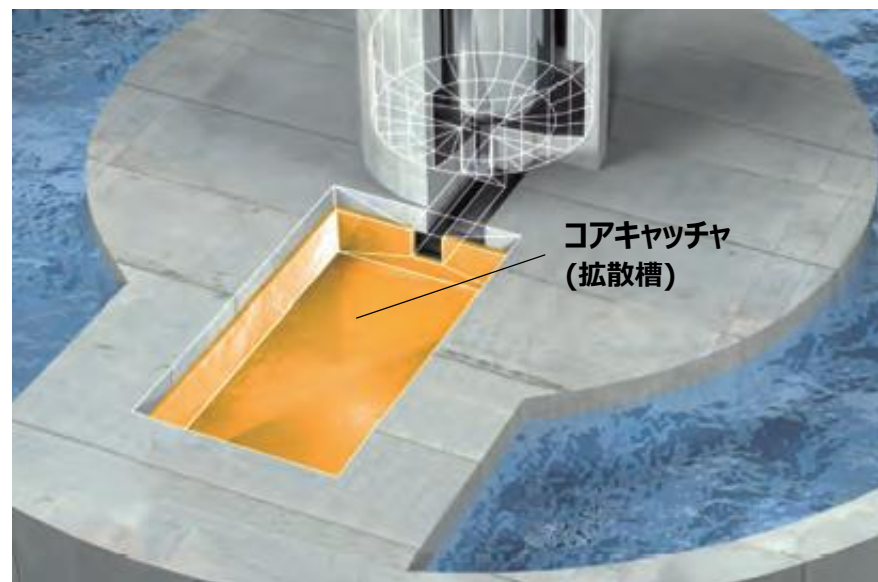
外部遮蔽壁 : 航空機衝突に耐える**強靱性**

格納容器 : 高張力鋼板採用による
耐圧・耐漏洩機能



溶融炉心対策強化

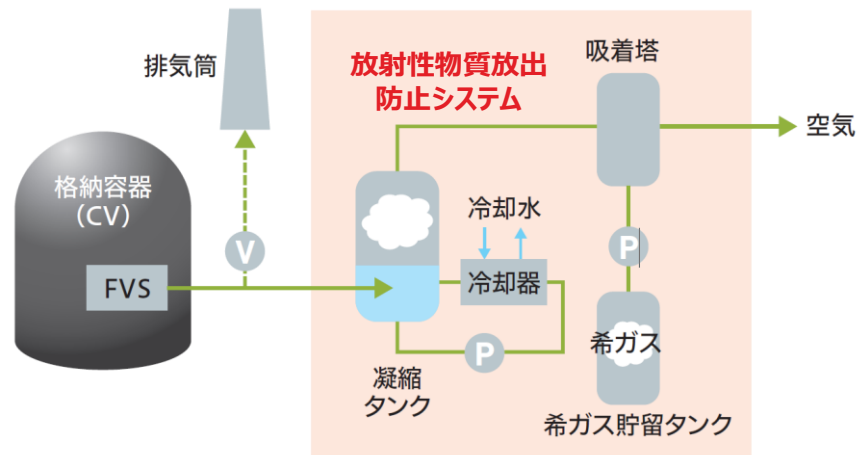
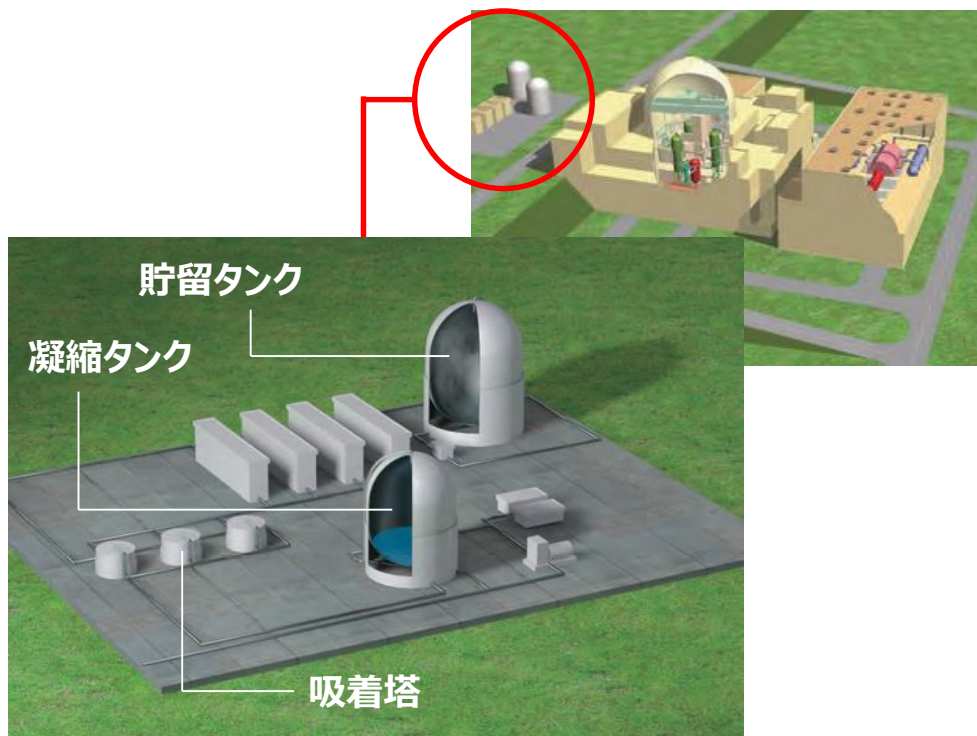
- **シビアアクシデント時専用設備（コアキャッチャ等）を設置**し、万一の炉心溶融事故時にも格納容器の破損を防止



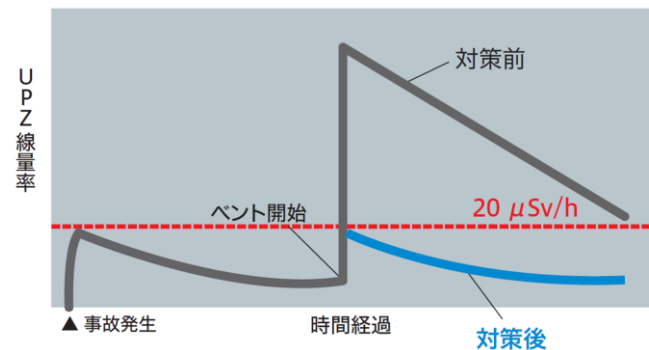
放射性物質放出防止

- 万一の事故時対応として、放射性希ガスを除去する放射性物質放出防止システムを導入
- 周辺環境への放射性物質の大量放出を防止し、事故影響を発電所敷地内に限定

世界初の放射性物質放出防止システムの導入



システム構成例

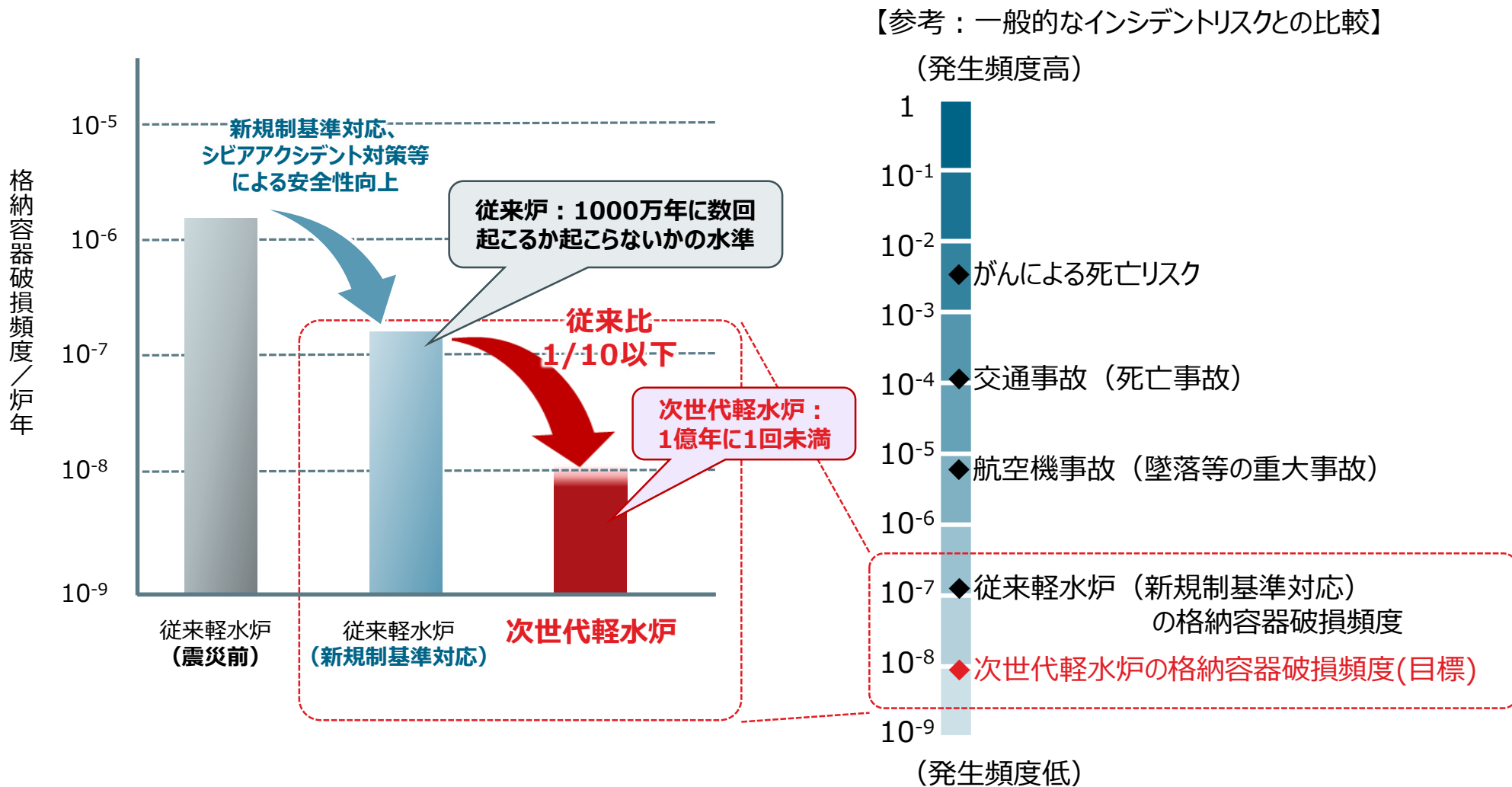


線量率の低減効果

*UPZ : Urgent Protective action Planning Zone
 (緊急時防護措置を準備する区域；国内発電炉では概ね30km圏内と設定)

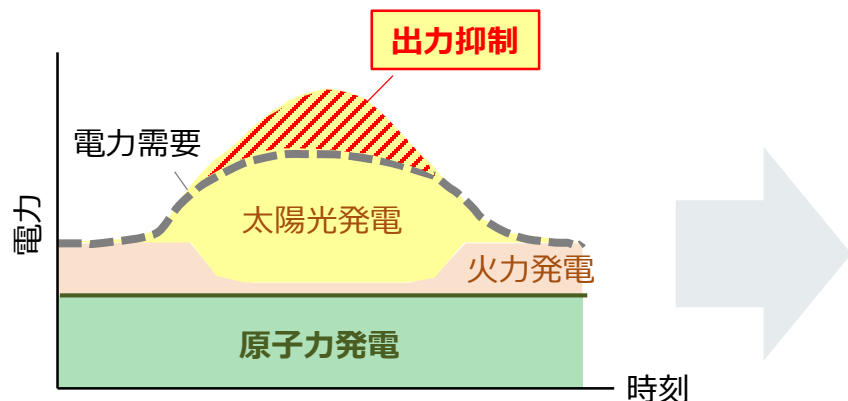
安全性の向上（格納容器破損頻度）

➤ 福島第一原子力発電所事故を踏まえた種々の安全対策、格納容器破損防護策の採用により、最終障壁である格納容器の破損頻度は従来炉と比べて大幅に低減

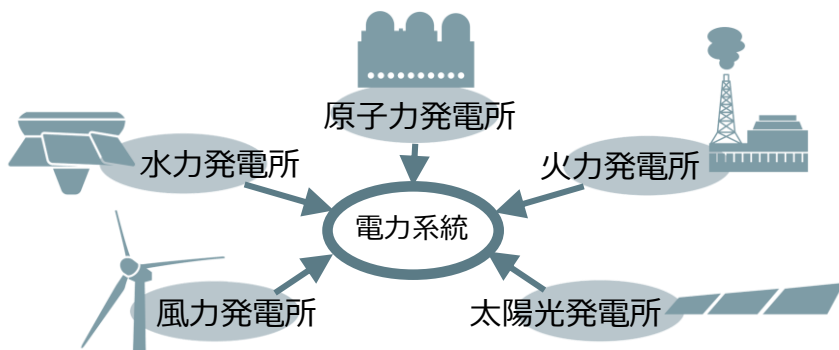


再生可能エネルギーとの共存

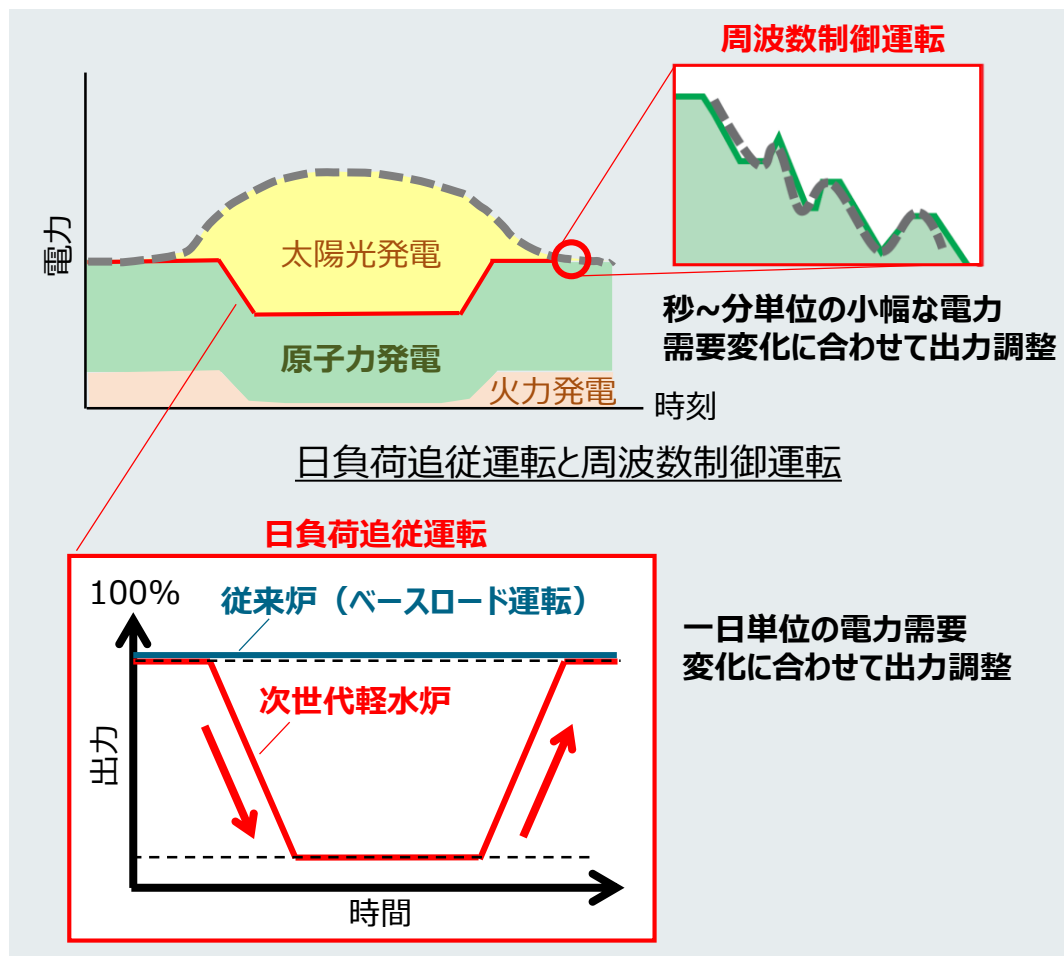
- 再生可能エネルギーとの共存性を高めるため、出力調整機能（周波数制御、負荷追従）を強化
- 再生可能エネルギーの拡大に伴う夜間・荒天時等の出力変動や電力系統不安定化等の課題に対し、カーボンフリー電源である原子力での対応も可能



ベースロード電源と太陽光発電の出力制御



再生可能エネルギーとの共存



日負荷追従運転と周波数制御運転

日負荷追従運転

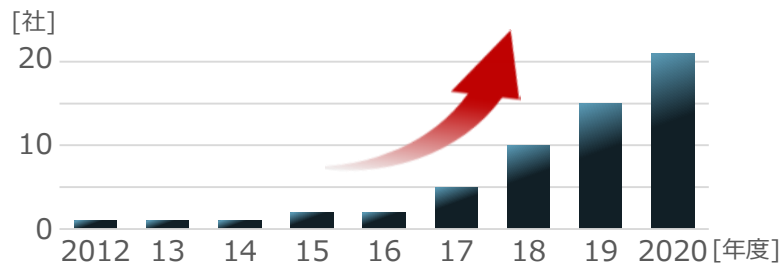
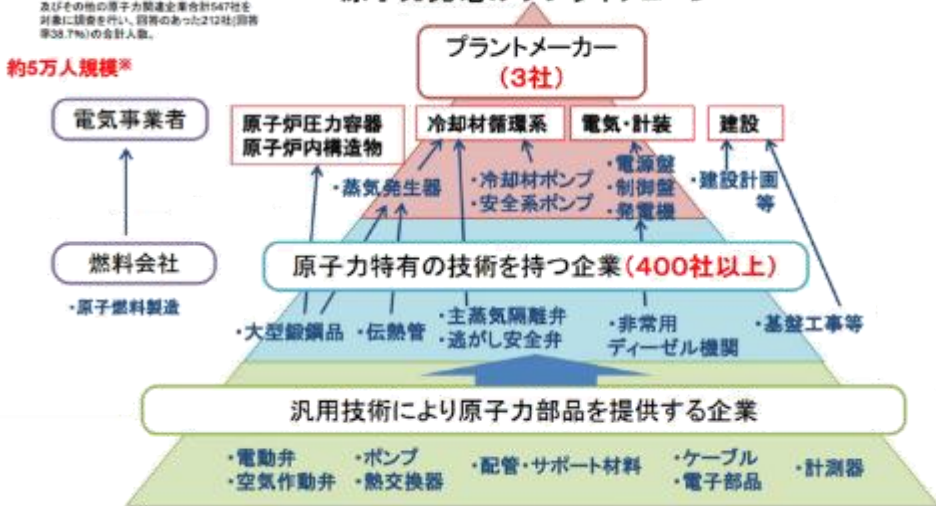
一日単位の電力需要変化に合わせて出力調整

(参考) 原子力技術を支えるサプライチェーンについて

- ▶ 原子力プラントを支える高度な技術が国内企業に集積しており、**産業基盤(技術・人材・サプライチェーン)維持の観点からも早期の新增設が必要**
 - ▶ 原子力は裾野も広く高い技術を有する分野※であり、**長期に亘り培ってきた国産の技術・品質は重要な財産**であり、他国に劣後する訳にはいかず、**新增設によってこれを維持・向上する必要あり**
- ※ 原子力特有の技術を持つ企業は**約400社以上**。東電福一事故以降厳しい経営状態が続き、事業撤退は拡大傾向

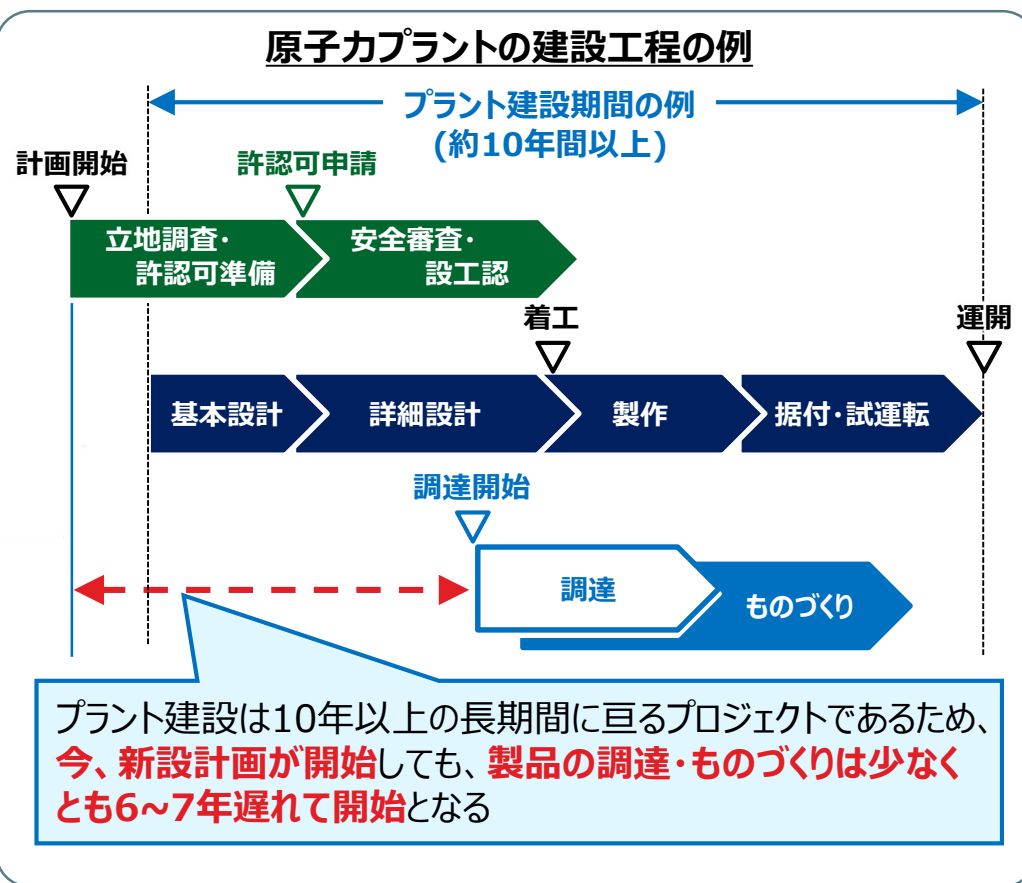
※ 社団法人原子力産業協会「原子力発電に係る産業動向調査(2019報告書)」より会員企業及びその他の原子力関連企業合計547社を対象に調査を行い、回答のあった212社(回答率38.7%)の合計人数。

原子力発電のサプライチェーン



震災後に撤退したサプライヤー数 (累計)

原子力プラントの建設工程の例



3. 将来炉開発の取組み

小型軽水炉の開発（概要）

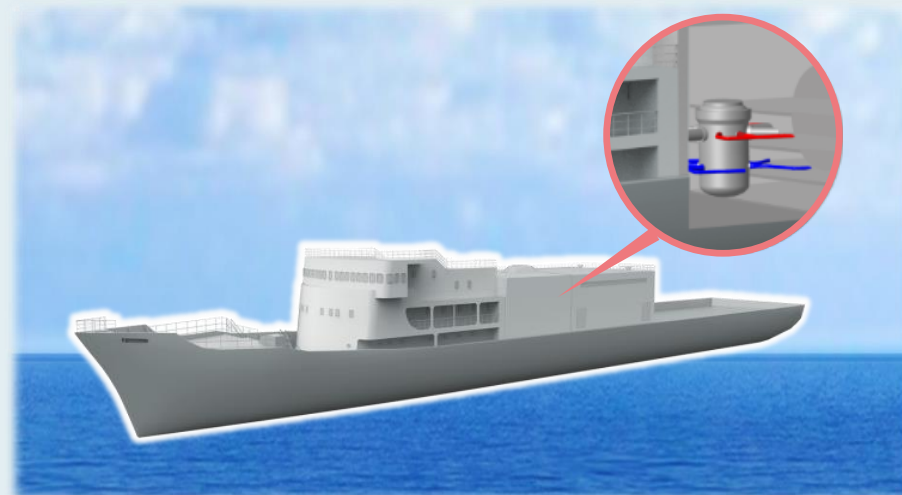
- 大規模グリッドが整備された地域等では、出力規模が大きい中・大型炉の方が発電コスト面で優位となるが、**イニシャルコストが安い分散型電源として小型炉が注目**されている
- **将来の多様化する社会ニーズ**に応じて**小規模グリッド向け発電炉**や、離島向けモバイル電源・災害非常用電源などに適用する**船舶搭載炉への展開**を見据えた**小型軽水炉開発を自社技術で推進中**

発電用小型軽水炉
(~30万kW)



- 原子炉内自然循環による炉心冷却
- 外部電源を必要としない静的安全システム
- 二重格納等を採用した安全・安心の追及
- 完全地下立地による災害/テロ耐性強化

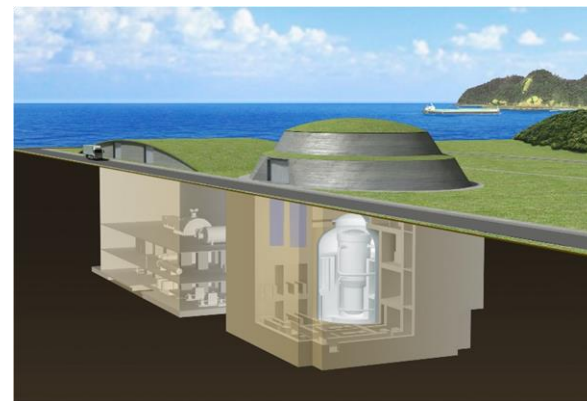
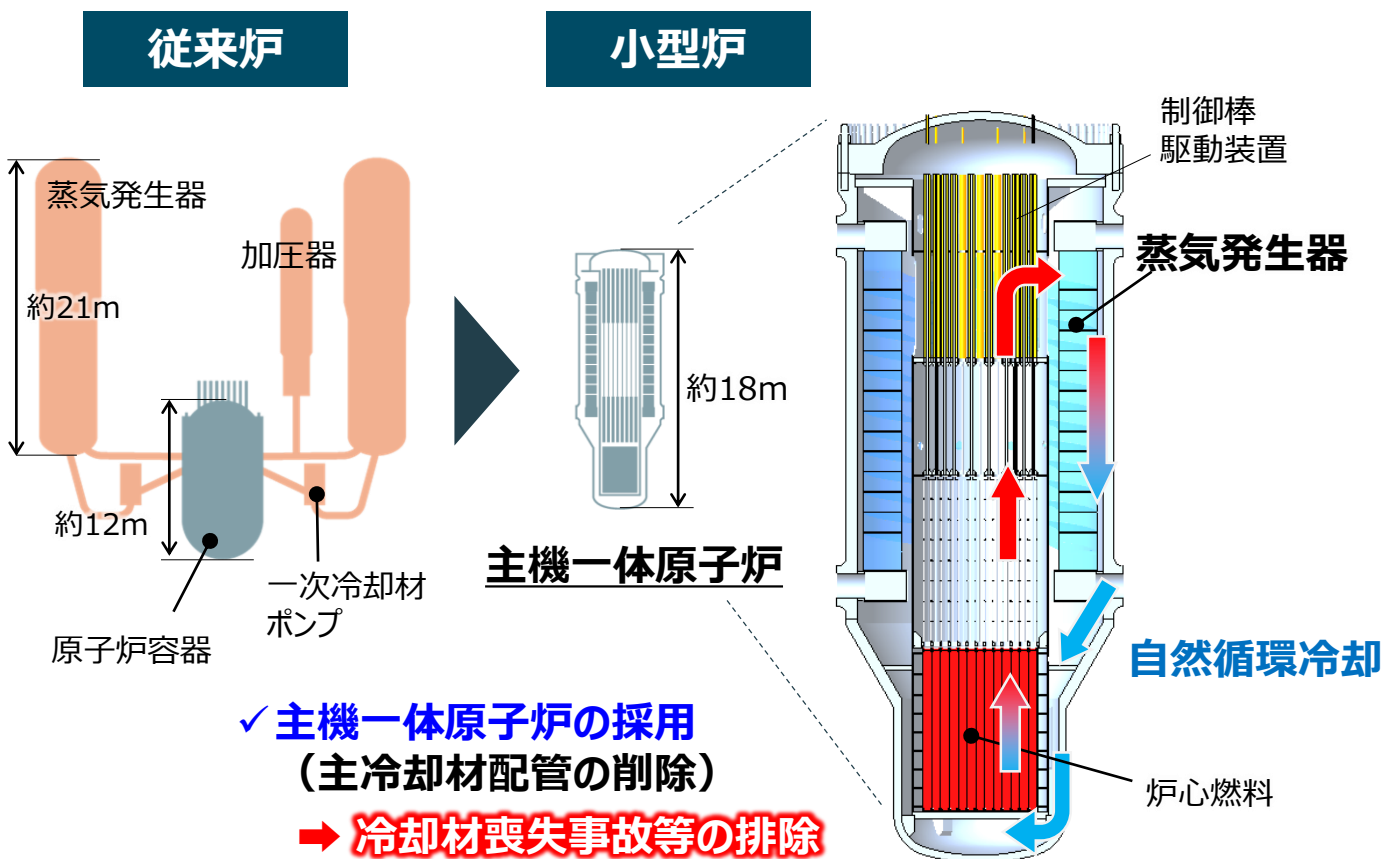
船舶搭載用小型軽水炉
(~3万kW)



- モバイル利用を実現する超コンパクト原子炉
- メンテナンスを最少化する長寿命炉心
- 海上運用を想定した揺動/傾斜対策

小型軽水炉の開発（発電用小型炉の特徴）

- **自然循環冷却**によって冷却材ポンプを不要とし、原子炉容器内に蒸気発生器等を内蔵する**一体型原子炉**を採用して主冷却材配管を削除することにより、**冷却材喪失等の事故発生を原理的に排除**
- 事故時に動的機器を使用しない**パッシブ安全システム**の採用により、**安全性を向上**
- 原子炉建屋を**完全地下立地**とすることによる**航空機衝突等への耐性強化**や、**二重格納**の採用によって**放射性物質の閉じ込め機能を強化**し、**安全・安心を徹底追及**


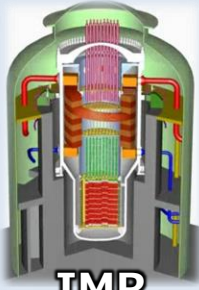

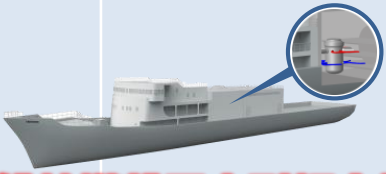


- ✓ **原子炉建屋の完全地下立地**
➔ **航空機衝突等への耐性強化**
- ✓ **二重格納の採用**
➔ **放射性物質の閉じ込め機能強化**

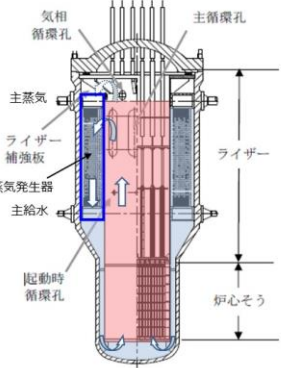
小型軽水炉の開発（開発実績）

- ▶ **国内PWR24基**の設計・建設・保守を通じて培った**三菱PWR技術**をベースに、**2000年代から一体型モジュラー炉（IMR※1）の開発**を行い、自然循環冷却試験、安全システム検証試験等によって**開発に必要な要素技術を実証**

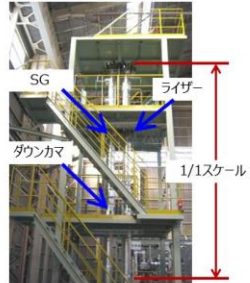
※1 IMR: **I**ntegrated **M**odular **W**ater **R**eactor
- ▶ これらの開発経験・知見に基づき、2019年度より国のイノベーション事業を活用して**多目的利用を実現する小型軽水炉を展開**

	～1990	2001～2011	2019～	2040～
国産小型軽水炉 技術開発の 実績と展開	「むつ」の 開発/運転  原子力船むつ	一体型モジュラー炉（IMR）の 開発/概念設計 (国プロ/電共研※2)  IMR ※2 経済産業省公募事業、 日本原子力発電殿委託等	多目的利用を実現する 小型軽水炉開発  発電用小型軽水炉	実用化への展開  船舶搭載用小型軽水炉

要素技術試験の実施例




気相循環孔
主循環孔
主蒸気
ライザー補強板
ライザー
蒸気発生器
主給水
起動時循環孔
炉心そう

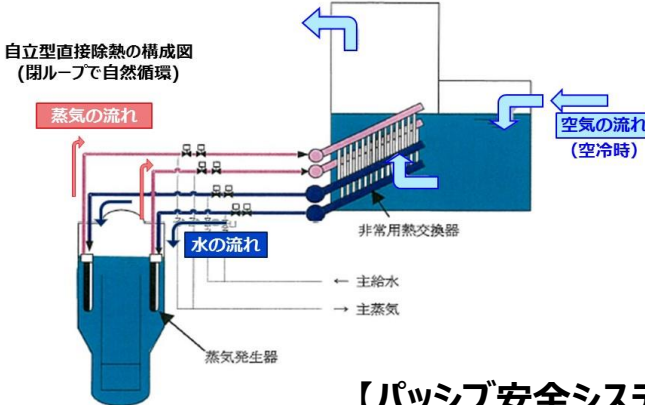


SG
ライザー
ダウンカム
1/1スケール

**高温高圧試験
(自然循環冷却)**

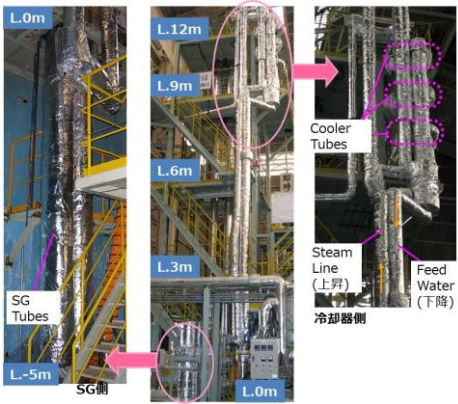


**水-空気可視化試
(流動分布)**



自立型直接除熱の構成図
(閉ループで自然循環)

蒸気の流れ
水の流れ
非常用熱交換器
主給水
主蒸気
蒸気発生器
空気の流れ (空冷時)



L.0m
L.12m
L.9m
L.6m
L.3m
L.0m
L.-5m

SG Tubes
Cooler Tubes
Steam Line (上昇)
Feed Water (下降) 冷却器側

【パッシブ安全システム検証試験】

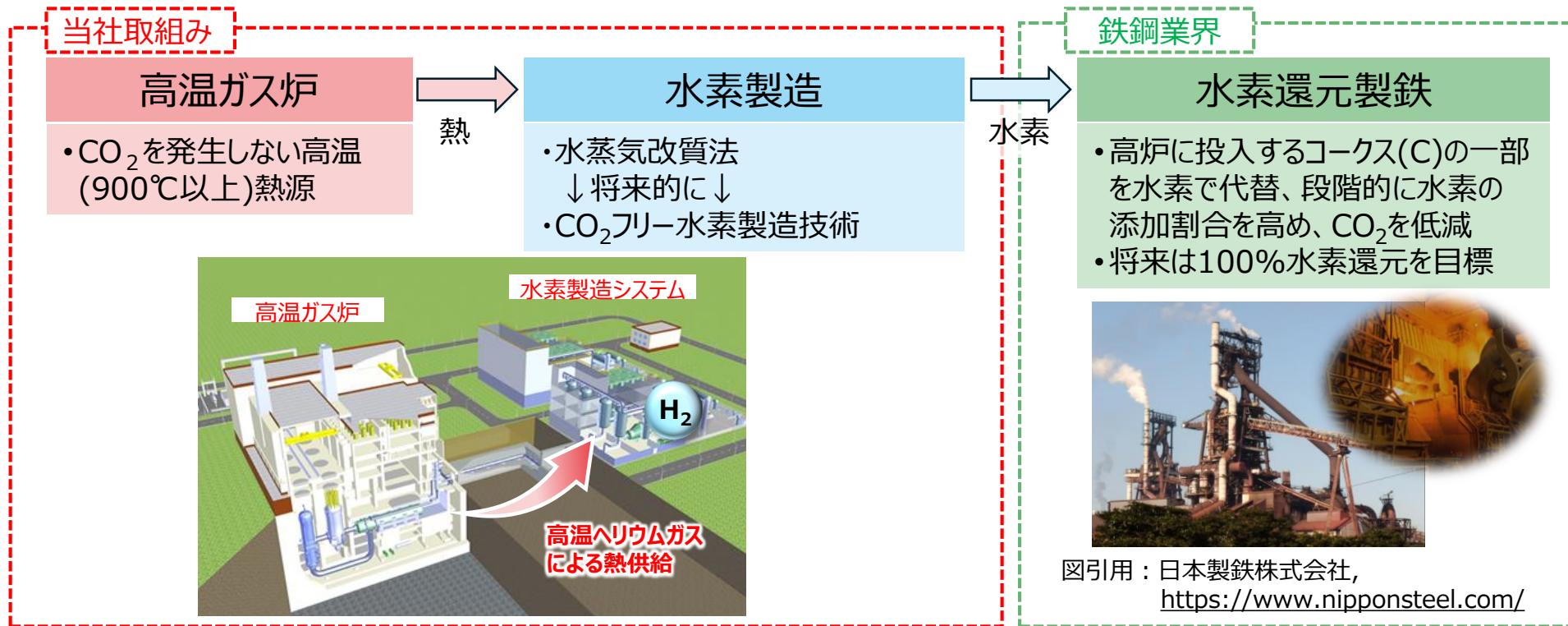
高温ガス炉の開発

- ▶ 高温ガス炉は、**超高温（900℃以上）の核熱利用※1を特徴**とし、原子力エネルギーを**高温熱源として利用可能**。また、万一の事故により冷却材を失った場合でも、炉心の熱が原子炉外表面から自然に放熱・除去され、**炉心溶融を起こさない優れた安全性（固有の安全性）**を有する

※1：日本の高温ガス炉技術は、**世界最高の950℃を達成**しており、**他国に比べて優位な技術を保有**

- ▶ 当社は水素製造に必要な熱源を供給する高温ガス炉を開発、**大量かつ安定的な水素製造を実現し、鉄鋼業界※2をはじめとした産業界の脱炭素化に貢献**

※2：鉄鋼業界では、水素還元製鉄への転換を目指した取組みが進められており、その実現には大量の水素が必要



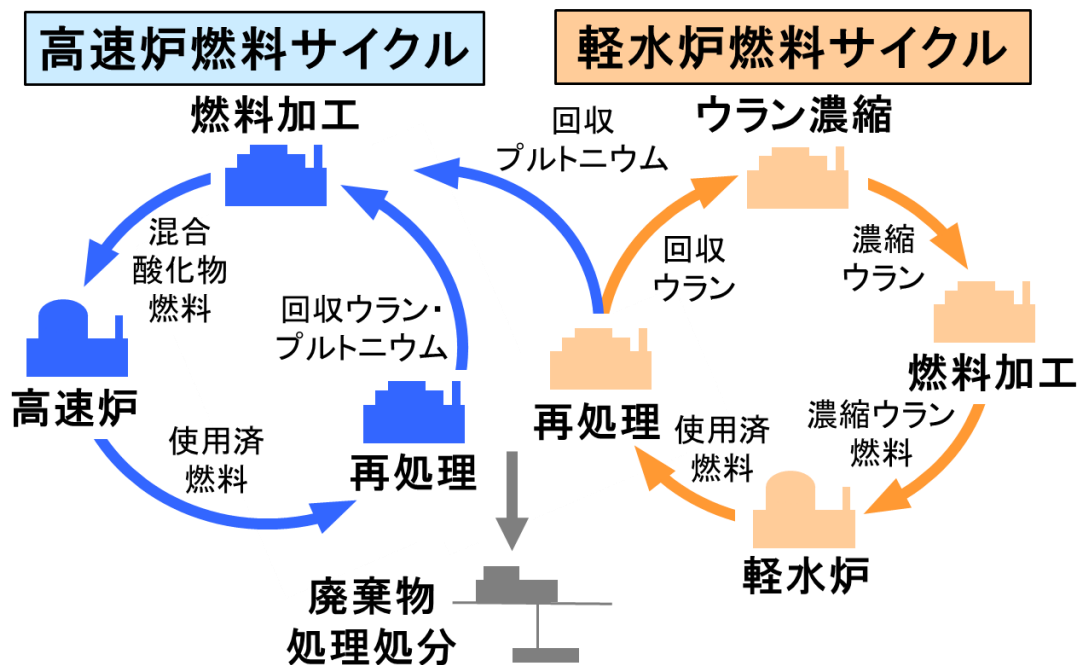
図引用：日本製鉄株式会社,
<https://www.nipponsteel.com/>

高速炉の開発

- 国は、核燃料サイクル政策の下、**資源有効利用、高レベル放射性廃棄物の減容化、有害度の低減**の観点から引き続き、**高速炉開発を推進**していく方針
- 当社は、1970年代から実験炉“常陽”、原型炉“もんじゅ”開発、建設等の国家プロジェクトに参画。2007年に**国の高速炉開発の中核企業に選定**されて以降、最も実績がある**MOX燃料※1ナトリウム冷却高速炉**を念頭に、**21世紀半ば頃の高速炉運転開始**を目標に開発を推進
- **日仏国際協力にも参画**し、ここで得た知見をベースに、厳しい地震条件などを考慮した国内にも適用可能な**日本独自のプラント概念を開発中**

※1 MOX（混合酸化物；Mixed Oxide）燃料：使用済燃料の再処理から得られるプルトニウムとウランを混合した燃料

高速炉開発の意義



高速炉プラント概念 (例)



電気出力

65万kW

燃料

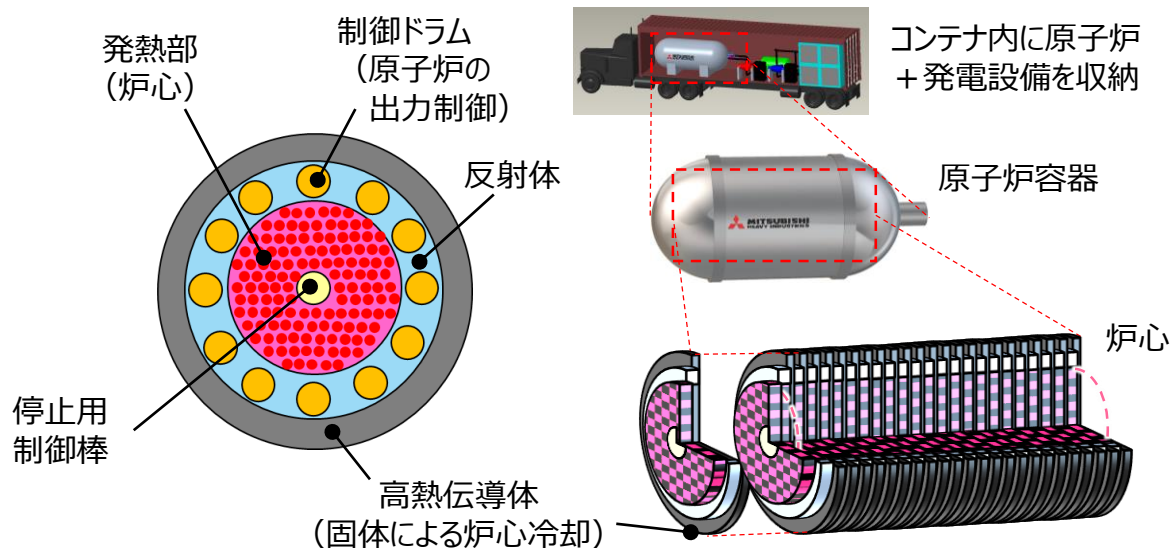
MOX燃料（混合酸化物燃料）

(経済産業省からの受託事業である“高速炉の国際協力等に関する技術開発”の成果を含みます)

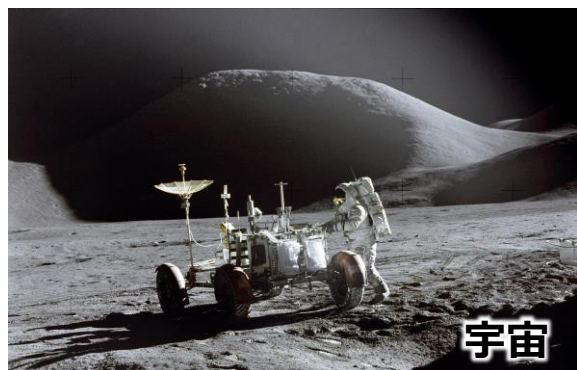
マイクロ炉の開発

- ▶ エネルギーセキュリティ（備蓄）、離島・僻地・災害地用電源、宇宙開発など**多目的利用を可能とするポータブル原子炉（コンテナ内に収納可能）**を米国と協調しながら開発中
- ▶ 燃料交換が不要で長期間の遠隔・自動運転、メンテナンスフリーを実現
- ▶ 高熱伝導体※1を用いた**全固体原子炉（環境へのリーク、事故原因を排除）**

※1 黒鉛系材料



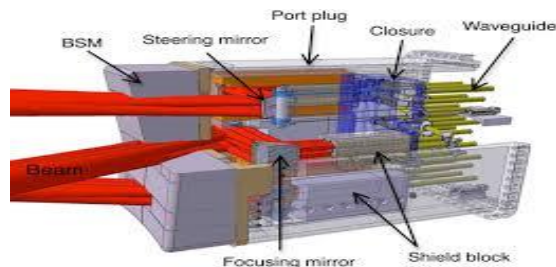
熱出力/電気出力 1MWt/～500kWe



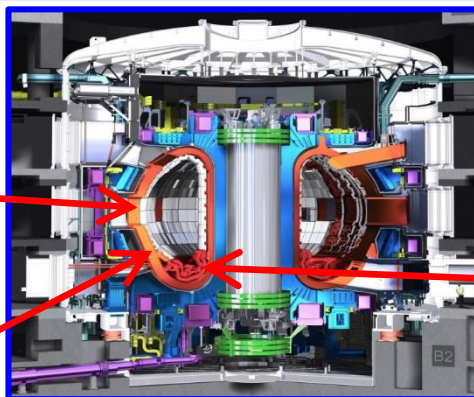
核融合炉の開発

- 2050年以降も見据えた長期的視野に立ち、“地上の太陽”とも言われ、恒久的な夢のエネルギー源である核融合炉の開発を世界の主要な先進国と共同※1で推進中
- 大型国際PJ ITER計画※2において、2025年のファーストプラズマに向けて、高度な詳細設計・製造技術を活かした主要機器の製造等を通じて引き続き貢献していく
- 更にITER計画に続いて、核融合実現に必要な原型炉概念設計等の活動にも参画中

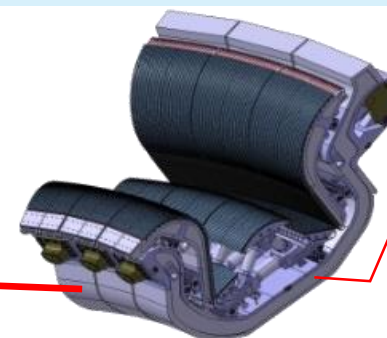
※1 : 7極(日, EU, 米, 露, 中, 韓, 印)政府、※2 : 核融合実験炉の実現に向けた大型国際PJ



水平ランチャ (プラズマ加熱装置)

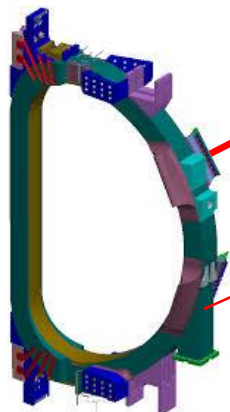


(©ITER Organization, <http://www.iter.org/>)



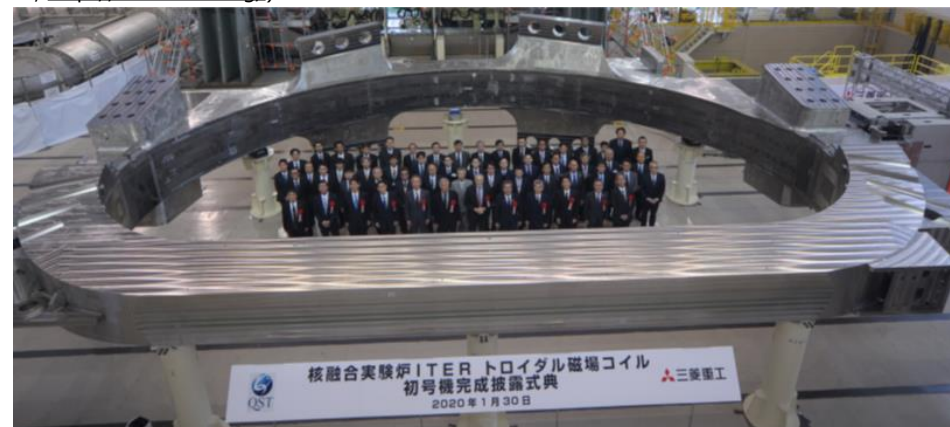
プロトタイプ
製作を受注済

ダイバータ (外側ターゲット)



世界に先駆け
初号機を出荷
(右写真：
完成式典の様子)

トロイダル磁場コイル



まとめ

- ◆ 原子力は確立した**カーボンフリー**かつ**大規模・安定電源**であり、**エネルギーセキュリティ上の観点**も含め**重要なベースロード電源**。2050年**カーボンニュートラル達成**に向け、将来に亘って**原子力の活用が必須と認識**
- ◆ **原子力の持続的活用**によって**将来のエネルギー安定供給等に貢献する**ためには、**新增設・リプレイスは不可欠**であり、世界に誇る日本の原子力技術、産業基盤を維持するためにも**早期の新設計画の具体化**が望まれる
- ◆ 三菱重工は、**既設プラントの再稼働支援/継続的な安全性向上**に取り組むことで国民の信頼回復に努め、さらに**世界最高水準の安全性を実現する次世代軽水炉の実用化により、カーボンニュートラルの実現に貢献**していく
- ◆ さらに、その先を見据えて、**将来の多様化する社会ニーズに応える小型軽水炉、高温ガス炉、高速炉、マイクロ炉の開発**や、**恒久的な夢のエネルギー源である核融合炉の実用化への挑戦**を続けていく

MOVE THE WORLD FORWARD

**MITSUBISHI
HEAVY
INDUSTRIES
GROUP**