MOVE THE WORLD FORWARD MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES GROUP

資料８

三菱革新炉開発の取組み

原子力小委員会　第１回革新炉WG

2022年4月20日

三菱重工業株式会社　原子力セグメント

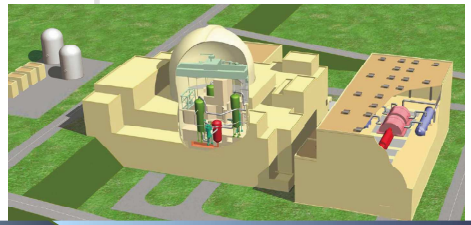
© MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. All Rights Reserved.

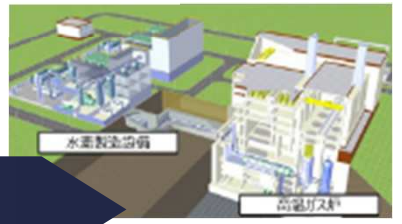
三菱重工

カーボンニュートラルに向けた原子力事業の取組み

三菱重工

- 当社は**既設プラントの再稼働支援や再稼働後の安全安定運転の実現等プラント安全性向上に努めていくと共に、燃料サイクル確立に取組む。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CO_2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





既設軽水炉他：既設軽水炉の再稼働/特重推進 燃料サイクルの確立

革新型軽水炉：次世代軽水炉 → 小型炉

研究開発

将来炉：将来炉(高温ガス炉、高速炉他)

核融合炉：ITER計画※2 → 原型炉 → 核融合炉

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

2020 2030 2040 2050

※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

© MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. All Rights Reserved.

三菱革新炉のラインナップ

三菱重工

➢ 当社は**革新型軽水炉(次世代軽水炉、軽水小型炉)に加え、社会的ニーズに応える将来炉（高温ガス炉、高速炉、マイクロ炉）**の開発も推進中

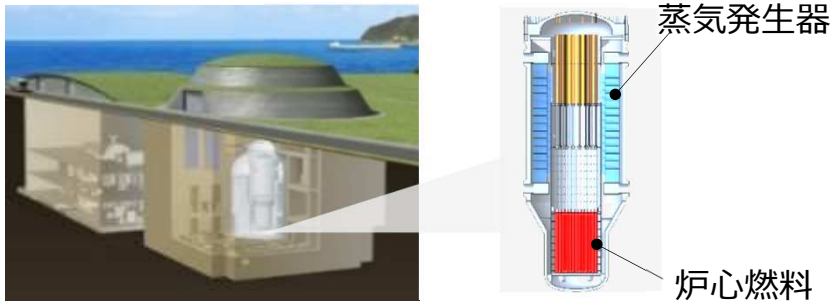
革新型軽水炉シリーズ

次世代軽水炉

✓ 既存グリッド向発電(電気出力:～120万kW)
✓ 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

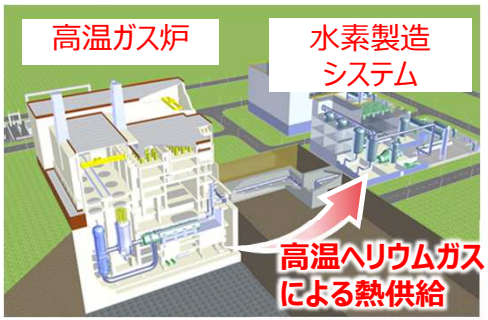
小型軽水炉

✓ 分散型、小規模グリッド向発電 (電気出力:30万kW)
✓ 安全系のフルパッシブ化、主機一体型炉他の採用



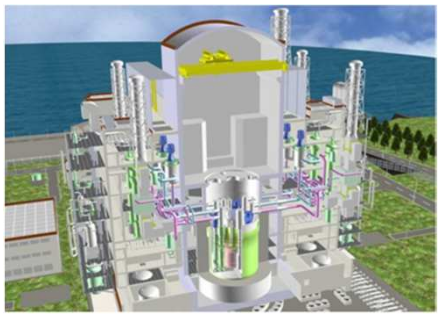
高温ガス炉

✓ 超高温（900℃以上）の核熱利用により大量かつ安定的な水素製造を実現
✓ 鉄鋼業界など産業界の脱炭素化に貢献



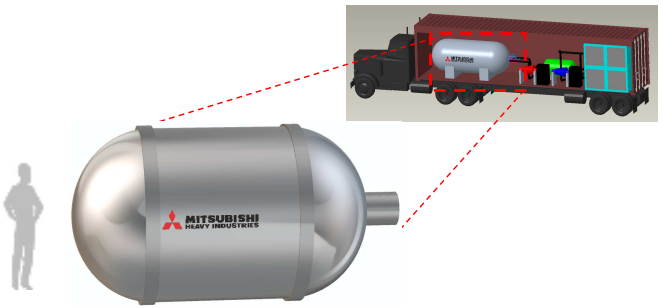
高速炉

✓ 核燃料サイクルの実現により、資源の有効活用、高レベル放射性廃棄物の減容化、有害度の低減が可能



マイクロ炉

✓ 離島・僻地・災害地用電源など多目的利用を可能とするポータブル原子炉
✓ 三菱独自設計の全固体原子炉



© MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. All Rights Reserved.

革新型軽水炉開発の意義

三菱重工

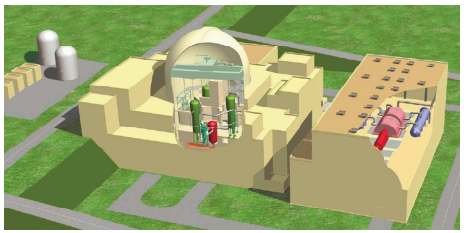
- **世界に誇る日本の原子力技術、産業基盤維持**のためにも**早期の新増設計画の具体化**が必要と認識
- 革新型軽水炉シリーズとして、**2030年代半ばの実用化を目標**に、高い経済性に加え、**革新技術を採用した世界最高水準の安全性を実現する次世代軽水炉の開発を推進。**そこで培った技術を活かして、**将来の多様化する社会ニーズに応えるべく、小型軽水炉の開発も推進**

~2020	2030	2040	2050~

現行の規制基準ベース

炉型に合わせた規制基準の整備

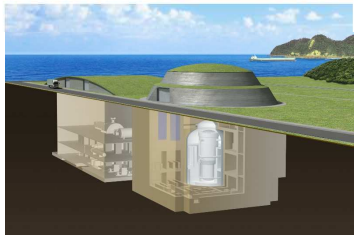
次世代軽水炉



- 万一の事故時にも放射能影響を発電所内に限定
- プルーブンな技術をベースに高い経済性を確保

将来の多様化するニーズに応えて
分散化

小型軽水炉（分散型電源）



- 主機一体型炉他の採用による物量低減

更なる安全性の向上

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

カーボンフリー

CO_2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

© MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. All Rights Reserved.

次世代軽水炉の開発 ～次世代軽水炉の特徴～（1/2）

三菱重工

➢ **地震・津波その他自然災害への対応、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、自然エネルギーとの共存等の社会ニーズを踏まえたプラント機能向上**

大型航空機衝突への対策

航空機衝突に耐えうる格納容器外部遮蔽壁の強靭化

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

耐震性向上

地下式構造(岩盤埋込)

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

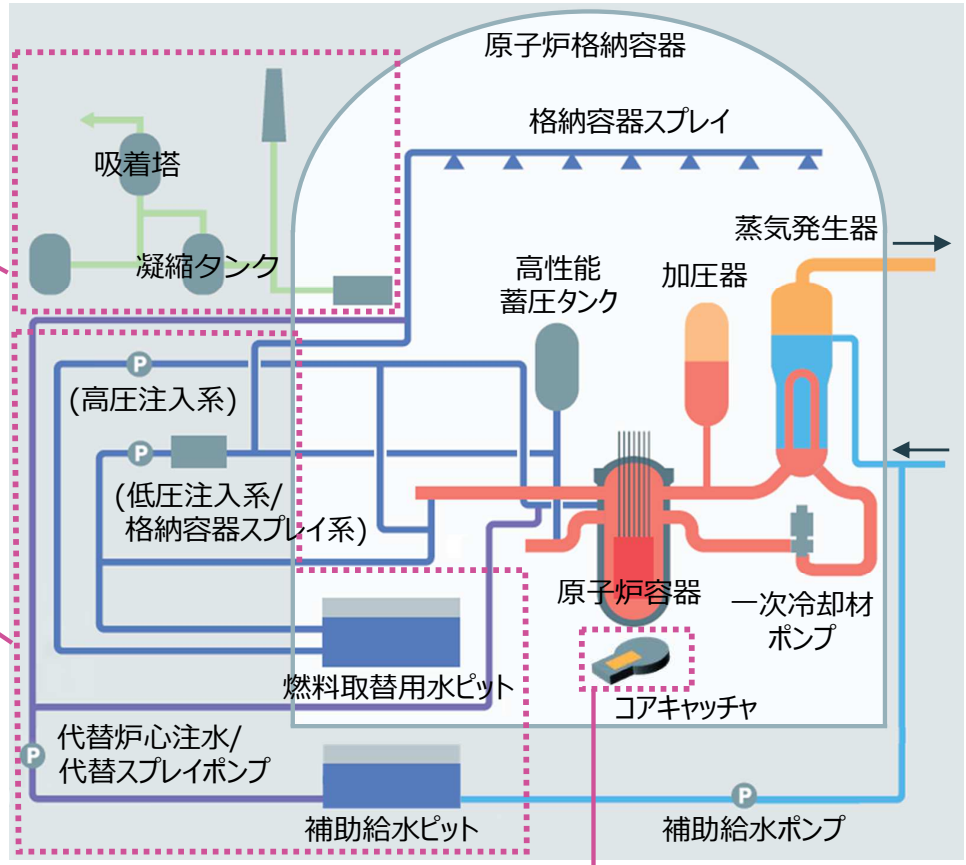
多重性・多様性

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

炉心溶融が起こってしまった場合でも、最終障壁である格納容器を防護



津波、その他自然災害への耐性

津波・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

カーボンフリー水素の供給

カーボンフリー電力による水素製造（水電解）

© MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. All Rights Reserved.

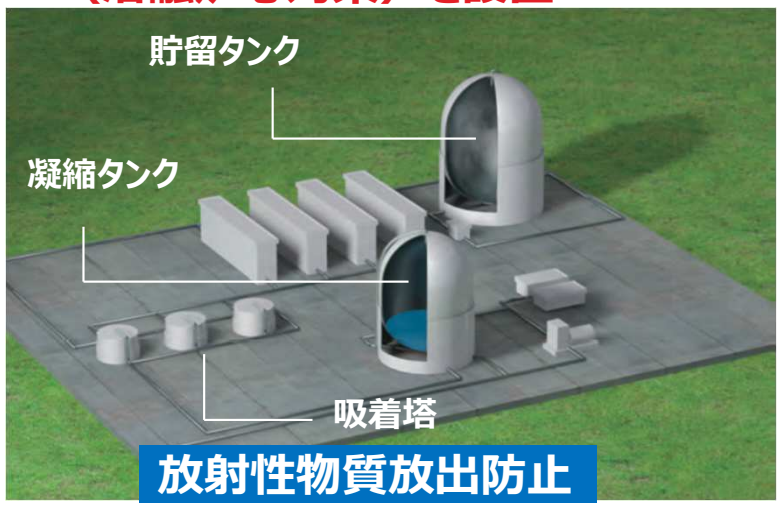
次世代軽水炉の開発　～世界最高水準の安全炉～（2/2）

三菱重工

- 新設炉ならではの安全対策・革新技術の導入により安全性を大幅に向上。
- これまで火力発電が担ってきた再エネに対応する出力調整にも貢献できるよう、出力調整機能を強化。

溶融炉心対策

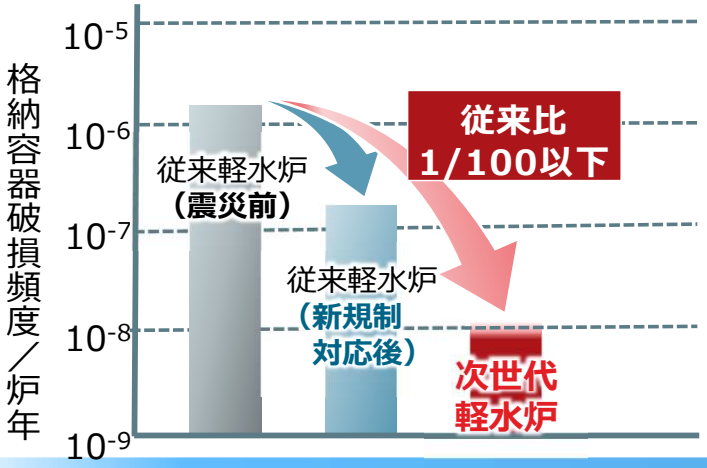
世界最新技術であるコアキャッチャ（溶融炉心対策）を設置



放射性物質放出防止

世界初となる当社独自の放射性物質(希ガス※)放出防止システムを採用

格納容器破損頻度の大幅低減



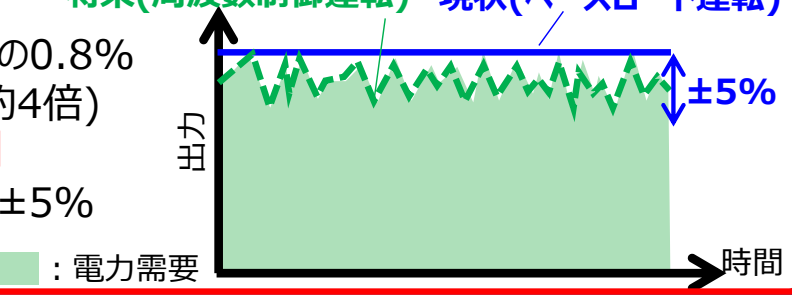
- 最終障壁となる格納容器の破損確率を**従来炉の1/100以下に低減**

出力調整機能を強化

	再エネ	火力	原子力
状現	変動電源	ベースロード＋調整電源	ベースロード電源
将来	変動電源 (発電力量増大)	調整電源 (発電力量減少)	ベースロード＋調整電源 (発電力量維持・増大)

【負荷追従性能の強化】
- 出力調整速度を既設炉の0.8%/分から3%/分に向上(約4倍)

【周波数制御性能の強化】
- 出力調整幅を±3%から±5%に向上



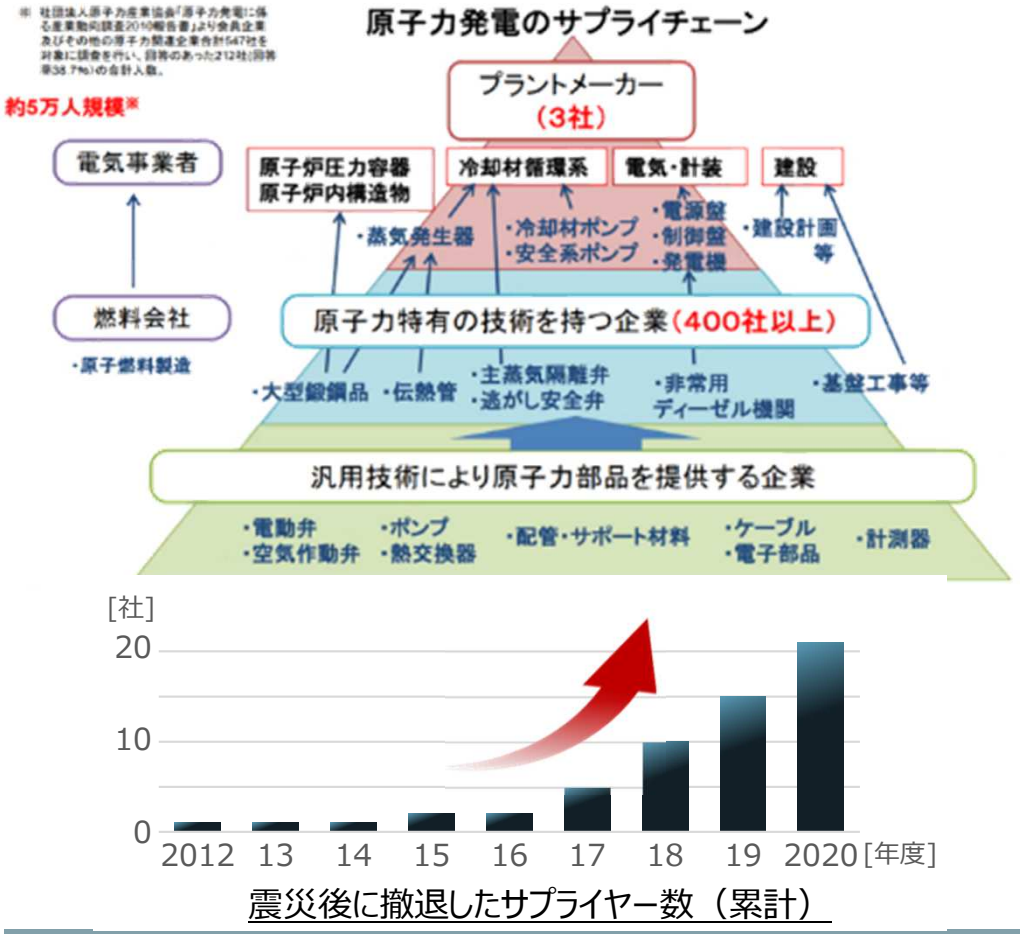
© MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. All Rights Reserved.

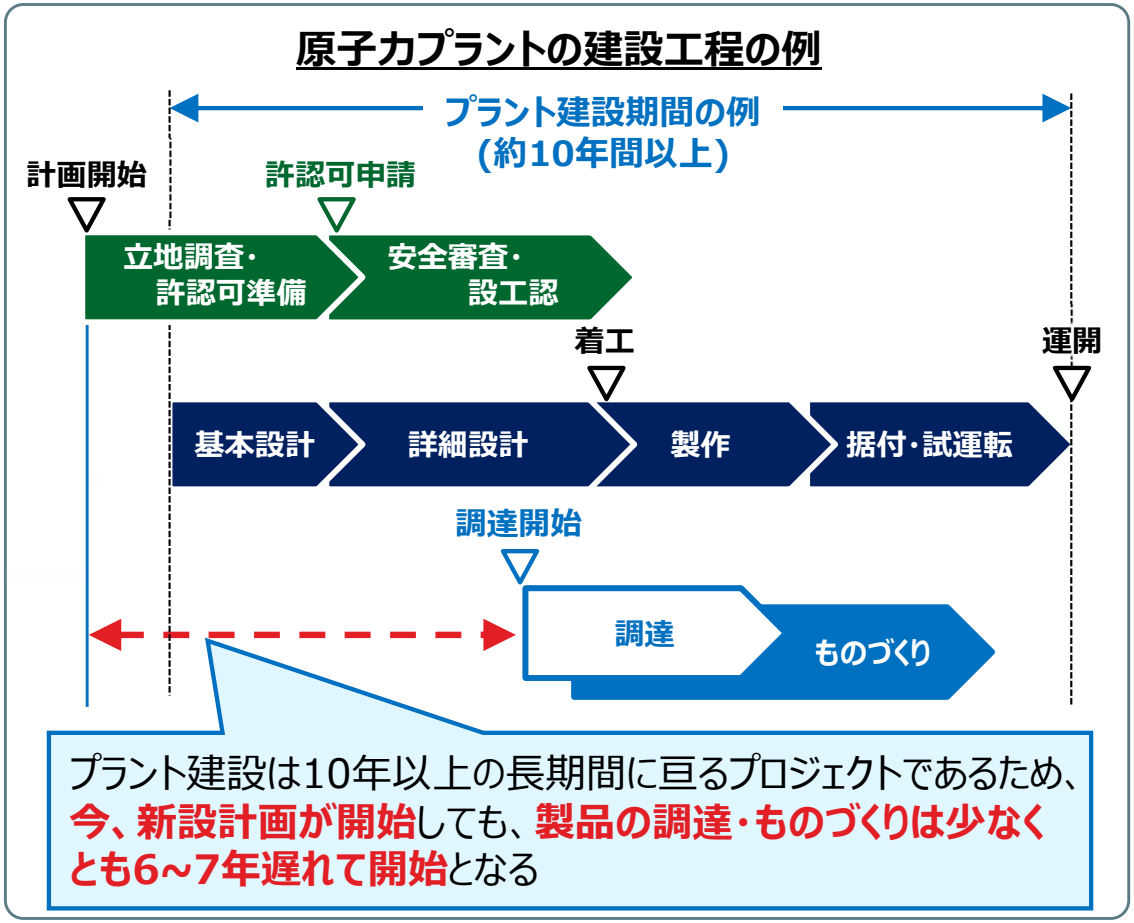
※:化学的に安定しており、一般的に除去が難しい物質(キセノン等)

【参考】原子力技術を支えるサプライチェーンについて

三菱重工

- 原子力プラントを支える**高度な技術が国内企業に集積**※1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増設が必要**
  ※1 日本は、西側諸国の中においては**最高峰の技術・サプライチェーン**を保持
- 原子力は裾野も広く高い技術を有する分野※2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、**新増設によってこれを維持・向上する必要**あり
  ※2 原子力特有の技術を持つ企業は**約400社以上**。2011年以降厳しい経営状態が続き、事業撤退は拡大傾向



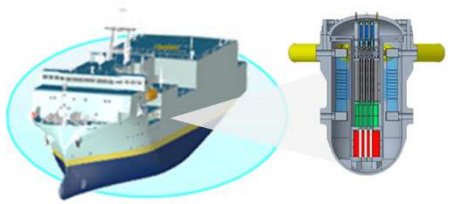
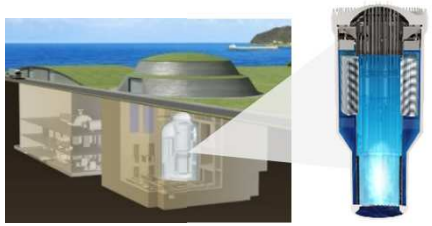
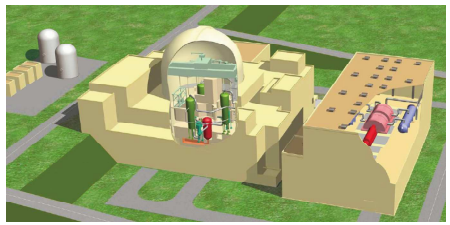
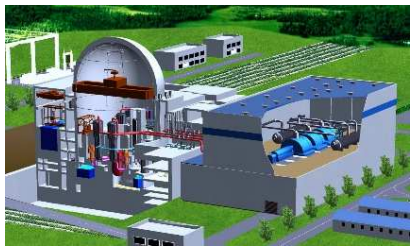


© MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. All Rights Reserved.

小型軽水炉の開発 ～小型炉の特徴～（1/3）

三菱重工

- 近年の脱炭素化/原子力活用ニーズを受け、**初期コストが安い分散電源**として**小型炉が注目**され、国内外でプラントメーカからベンチャーまで幅広く開発が進められている状況
- 小型炉は初期コストが低い特徴があるものの、**中型炉はスケールメリットにより高い経済性（低い建設/発電単価）を実現**することが可能
- 当社は、将来の**多様化する社会ニーズに応える**ため、**小規模グリッド向け発電炉**やモバイル電源等の**船舶搭載炉への適用**を見据えた**小型軽水炉を開発中**

	小中型炉			大型炉
概略図	【船舶搭載】 	【小型軽水炉】 	【次世代軽水炉】 	
電気出力	(船舶:3万kW)	30万～120万kW		160万kW
用途	モバイル電源 （島しょ地域、災害地等） 舶用動力	小規模 ← グリッド規模 → 大規模 グリッド未整備地域、分散電源		グリッド整備済地域
初期コスト	–	**低**	**中**	**高**
建設/発電単価	–	**高**	**低**	

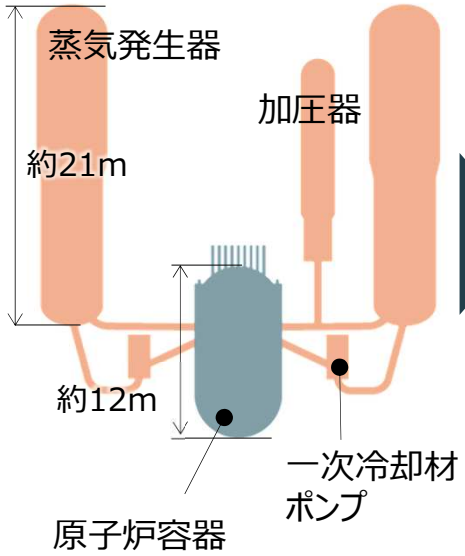
© MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. All Rights Reserved.

小型軽水炉の開発 ～小型炉の安全性～（2/3）

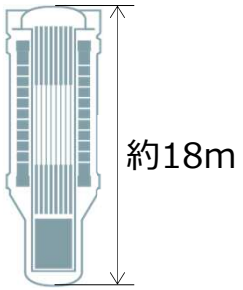
三菱重工

- **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**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**

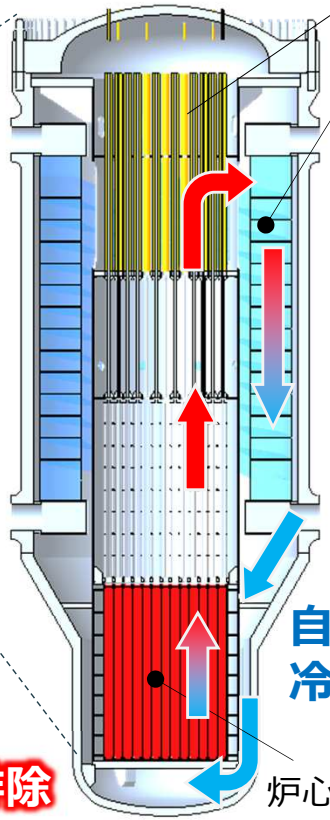
従来炉



小型炉



主機一体
原子炉

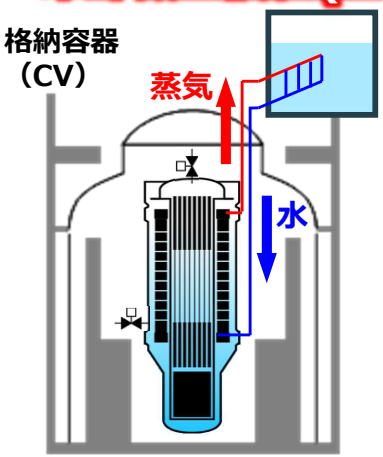


✓**主機一体原子炉の採用**
（主冷却材配管の削除）
➡ **冷却材喪失事故等の排除**

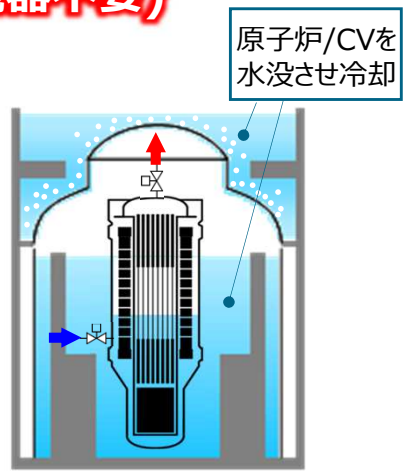
✓**原子炉建屋の地下立地**
➡ **航空機衝突等への**
耐性強化

➡ **放射性物質の閉じ込め機能強化**

✓**パッシブ安全システム**
➡**冷却機能強化(動的機器不要)**



静的SG冷却(事故時)



静的CV外壁冷却(事故時)

© MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. All Rights Reserved.

小型軽水炉の開発 ～開発実績～（3/3）

三菱重工

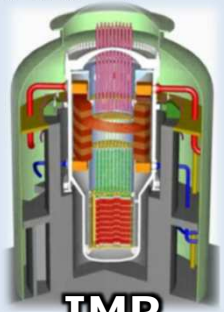
- **国内PWR24基**の設計・建設・保守を通じて培った**三菱PWR技術**をベースに、**2000年代から一体型モジュラー炉（IMR※1）の開発**を行い、自然循環冷却試験、安全システム検証試験等によって**開発に必要な要素技術を実証**
- これらの開発経験・知見に基づき、2019年度より国のイノベーション事業を活用して**多目的利用を実現する小型軽水炉の開発を推進**

※1 IMR: **I**ntegrated **M**odular Water **R**eactor

	～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	一体型モジュラー炉（IMR）の開発/概念設計（国プロ/電共研※2）	多目的利用を実現する小型軽水炉開発	実用化への展開

原子力船むつ

※2 経済産業省公募事業、日本原子力発電殿委託等

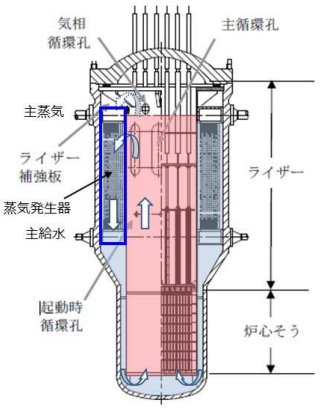


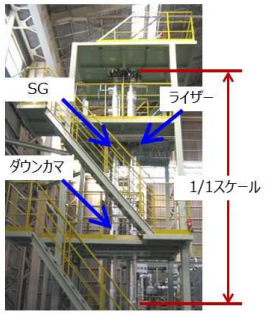
IMR

発電用小型軽水炉

船舶搭載用小型軽水炉

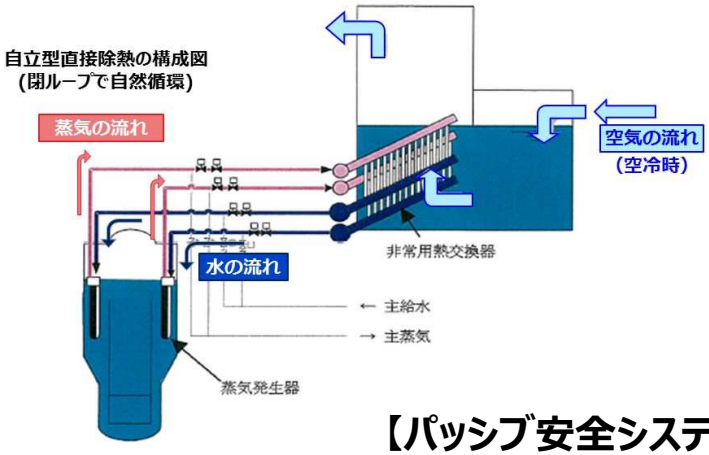
要素技術試験の実施例



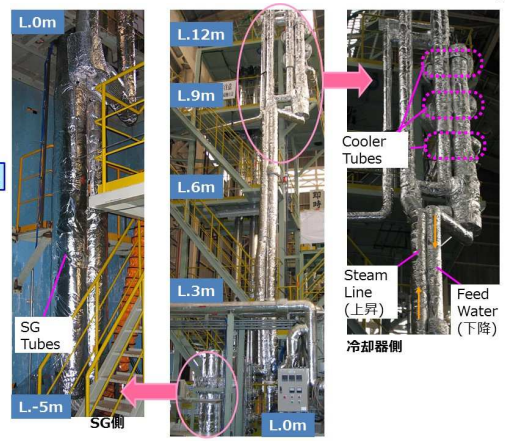


高温高圧試験
（自然循環冷却）

水-空気可視化試
（流動分布）



【原子炉自然循環冷却試験】



【パッシブ安全システム検証試験】

© MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. All Rights Reserved.

高温ガス炉の開発 (1/2)

三菱重工

- 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**高温ガス炉の固有の安全性を最大活用**し、製鉄所や化学工業地帯等の**水素の大規模需要地近傍で大量かつ安定的な水素製造を可能とするプラント**を実現し、**鉄鋼業界をはじめとした産業分野の脱炭素化に貢献**

当社取組み

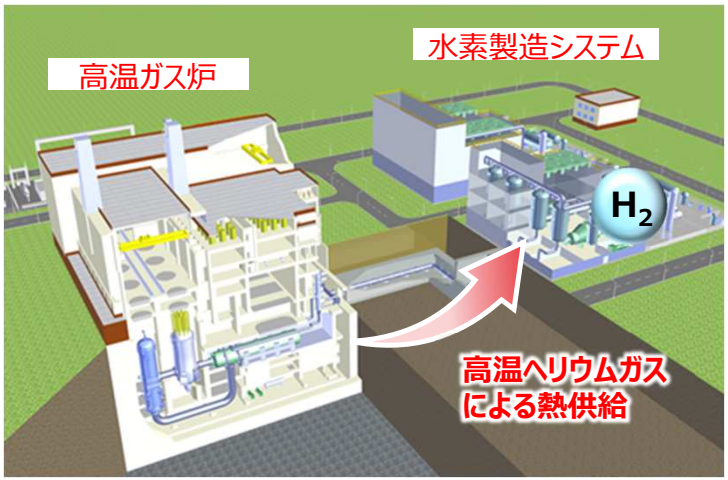
高温ガス炉

- CO_2を発生しない高温(900℃以上)熱源

熱

水素製造

- 水蒸気改質法
  ↓将来的に↓
- CO_2フリー水素製造技術

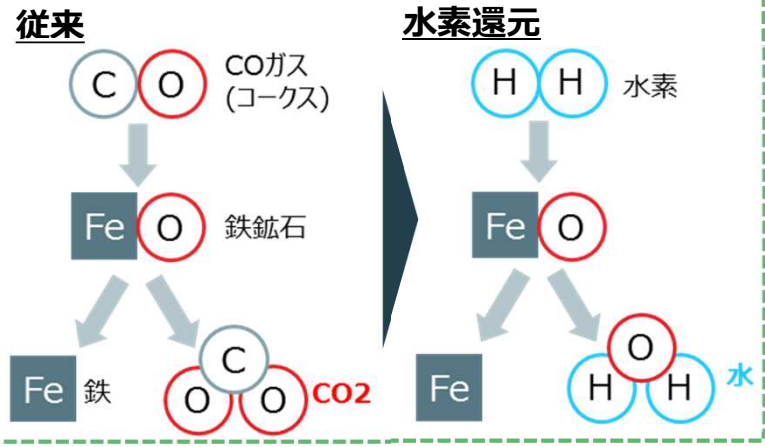


水素

鉄鋼業界

水素還元製鉄

- 高炉に投入するコークス(C)の一部を水素で代替、段階的に水素の添加割合を高め、CO_2を低減
- 将来は100%水素還元を目標



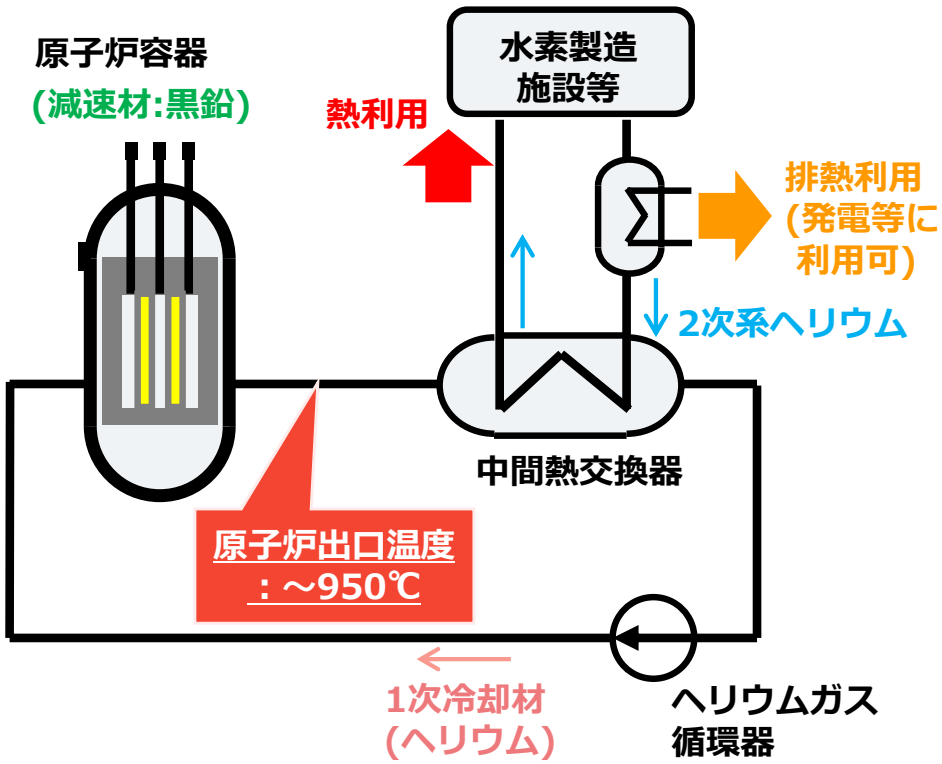
© MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. All Rights Reserved.

高温ガス炉の開発 (2/2)

三菱重工

- 当社は、**最大600MWtの炉心熱出力、超高温の炉心出口温度（～950℃）の高温ガス炉のプラントシステム概念**を構築。
- これにより**一般的な高温ガス炉に比べて約２倍の水素を製造（～28万Nm^3/h(※)）することが可能**
  （※再エネを利用した世界最大級の水素製造施設「FH2R」（福島県）における水素製造量（1,200Nm3/ｈ）の200倍以上）

【高温ガス炉プラントのシステム構成例】



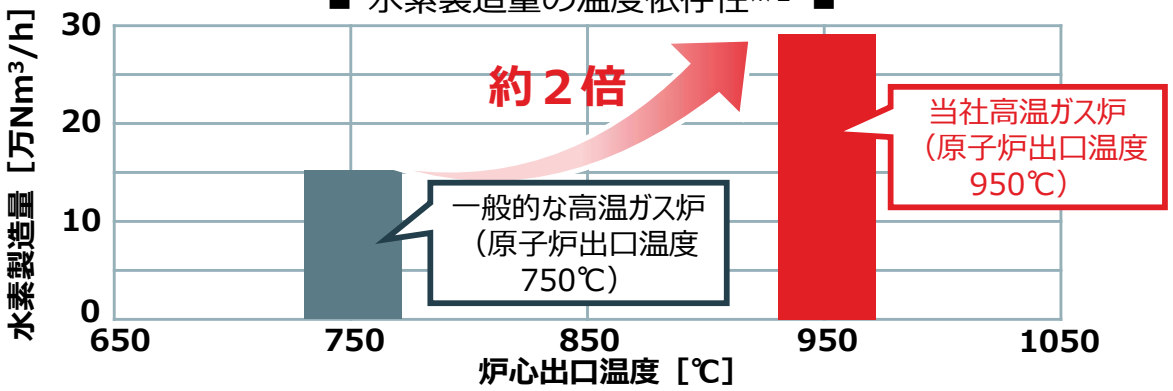
(水素製造プラントに適用する場合のシステム構成例)

【高温ガス炉プラントの主要目】

	三菱高温ガス炉	HTR-PM(中国)
冷却材	ヘリウム	ヘリウム
減速材	黒鉛	黒鉛
燃料	被覆粒子燃料(UO_2)	被覆粒子燃料(UO_2)
炉心熱出力	～600MWt	500MWt/2基
原子炉出口温度	～950℃	750℃
水素製造量	～28万Nm^3-H_2/h	— ※1

※１ 発電専用炉

■ 水素製造量の温度依存性※２ ■



※２ 高温ガス炉（600MWt）と水蒸気改質法を組み合わせた場合の評価例

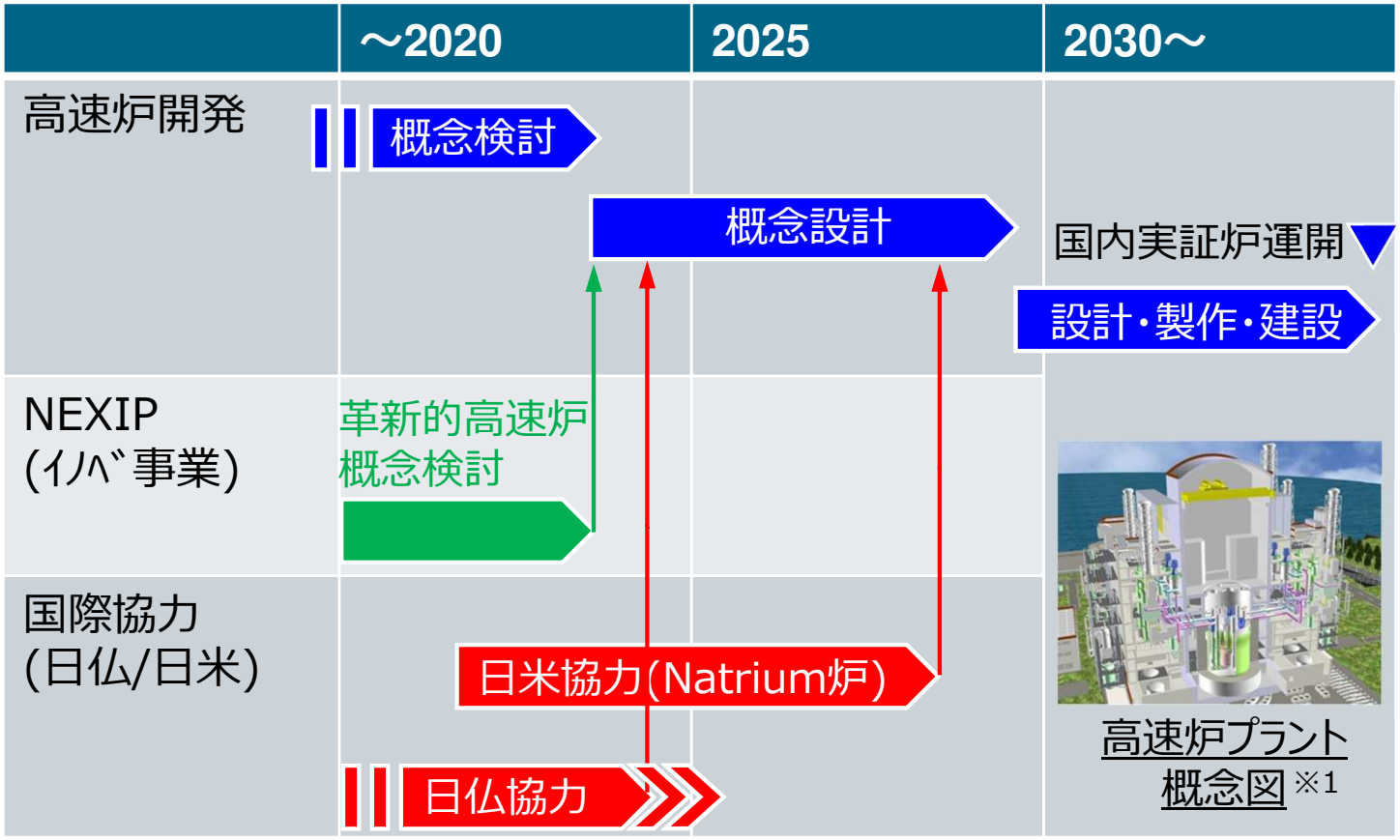
© MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. All Rights Reserved.

高速炉の開発 (1/2)

三菱重工

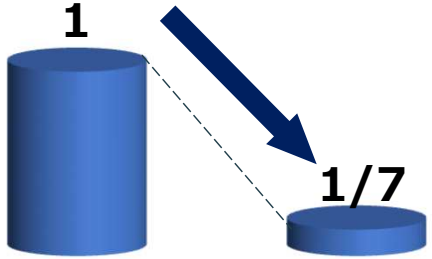
- 高速炉は、炉心冷却材として水(減速材)を使用せず、**中性子を高速状態(高速中性子)のまま活用。ウラン資源の有効活用や高レベル放射性廃棄物の減容化/有害度低減が可能**
- 当社は国の高速炉開発の中核企業として、MOX燃料ナトリウム冷却高速炉開発を引き続き推進し、**21世紀半ばまでの実証炉運転開始を目指す**
- また、**NEXIP事業**(METI事業)**や日仏/日米国際協力**(ビル・ゲイツ氏が最大出資者のテラパワー社と共同開発)**に参画**し、将来の実証炉への展開も視野に**革新的高速炉技術の開発に取組む**

＜高速炉開発工程案＞



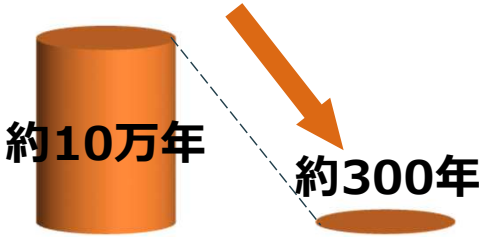
高速炉プラント概念図 ※1

高レベル放射性廃棄物の減容化/有害度低減効果



直接処分　高速炉利用

減容化の効果(体積比)



直接処分　高速炉利用

有害度低減(※2)の効果

© MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. All Rights Reserved.

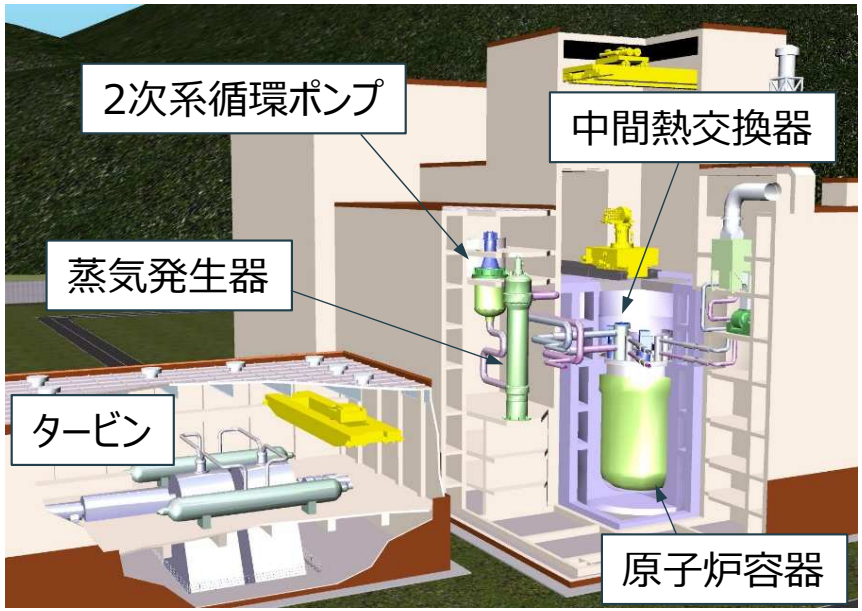
※1:本図は、経済産業省からの受託事業である"高速炉の国際協力等に関する技術開発"の成果を含みます

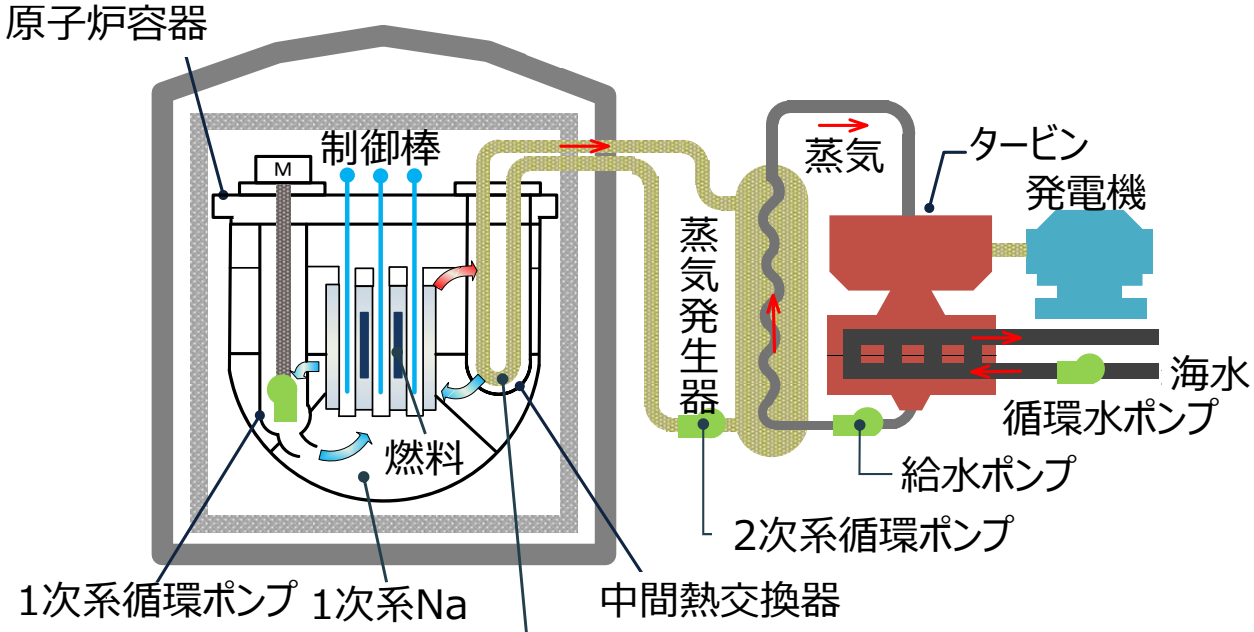
※2:天然ウランと同水準の放射能レベルまで低減する年数

高速炉の開発 (2/2)

三菱重工

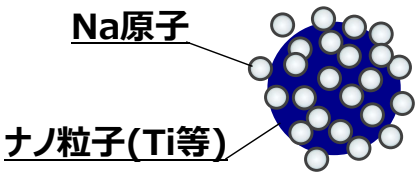
- 原子炉容器内に1次系循環ポンプ、中間熱交換器を内蔵するタンク型高速炉を採用
- 将来の多様化する社会ニーズに応えるべく、**NEXIP事業にて小型Na冷却高速炉を開発中**。2次系冷却材には**ナノ流体(冷却材Na中に金属ナノ粒子を分散)を採用。ナノ流体は万一の2次系冷却材漏洩時のNa燃焼やNa-水反応等を抑制可能**であり、国内実証炉への展開も視野に開発推進中



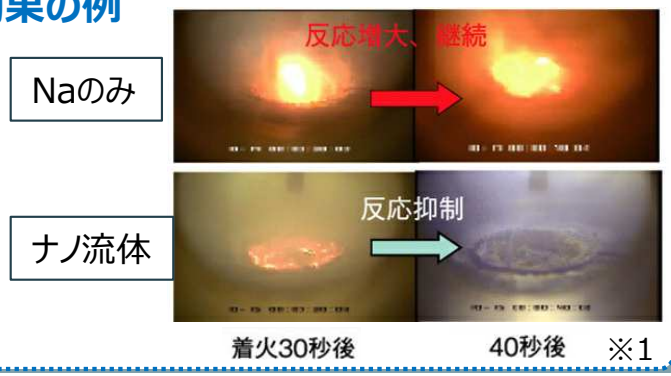


炉型	小型Na冷却高速炉(タンク型)
冷却材	Na(2次系にナノ流体採用)
熱出力	500MWt～
電気出力	200MWe～

ナノ流体によるNa燃焼抑制効果の例（Na燃焼時の様子）



2次系Na(ナノ流体)



※1

© MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. All Rights Reserved.

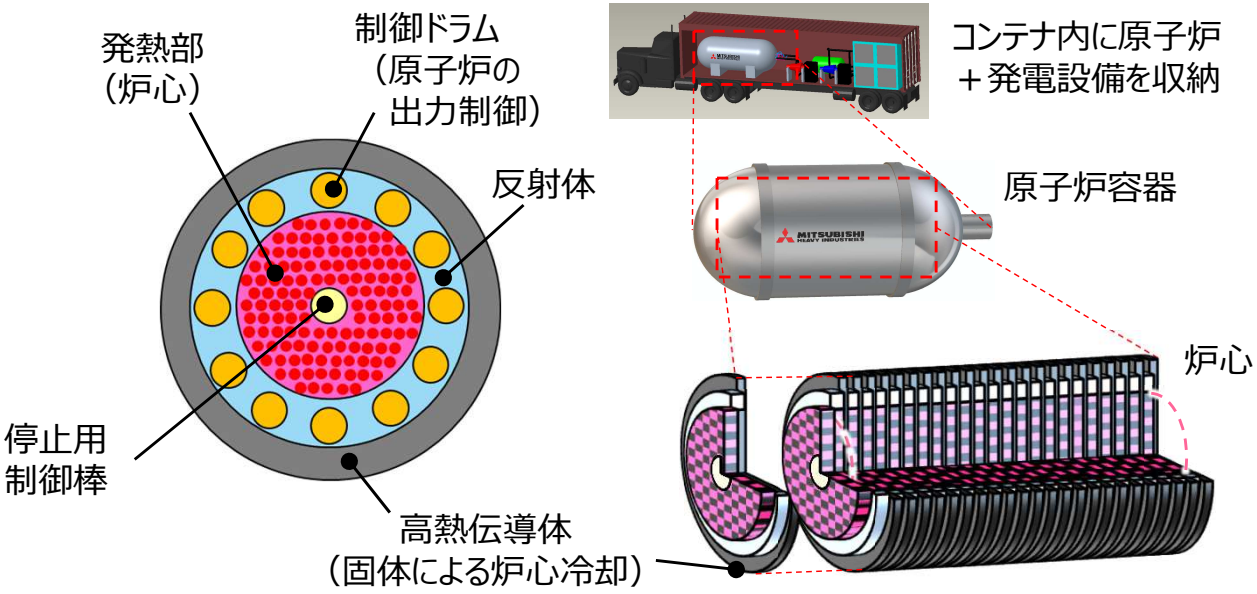
※1: 公益財団法人原子力安全研究協会　文部科学省国家課題対応型研究開発推進事業　原子力システム研究開発事業　H22革新技術創出発展型研究開発

マイクロ炉の開発

三菱重工

- 離島、僻地、災害地用電源など**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



【マイクロ炉の主要仕様】

冷却方式	1次系：高熱伝導材による熱伝導 2次系：CO_2ガス冷却
熱出力/電気出力	1MWt～/500kWe～
運転サイクル	5年以上
設計寿命	25年

© MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. All Rights Reserved.

まとめ

三菱重工

◆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、安全性の確保を大前提に将来に亘って原子力の活用が必須と認識

◆国内プラントメーカはビジネスパートナーとともに叡智を結集し、原子力プラントの高度な技術・品質を支えてきた。これは長期に亘って培ってきた日本にとって貴重な財産。裾野も広く、原子力は技術自給率維持の点からも重要な電源

◆これまでに培った技術・サプライチェーンを絶やさず、将来に亘って原子力を活用していくためにも早期のプラント新増設・リプレースが必要

◆2050年カーボンニュートラル達成に向け、先ずは既設プラントの再稼働・特重対応、燃料サイクル確立に取り組むと共に、次世代軽水炉・小型炉の開発に注力。将来の多様なニーズに応えるべく、高温ガス炉、高速炉、核融合炉の開発にも挑戦していく。

© MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. All Rights Reserved.

MOVE THE WORLD FORWARD MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES GROUP