

日本水・蒸気性質協会
水・蒸気性質シンポジウム2024
－日本のGXと水素・アンモニア利用技術の最前線－

カーボンニュートラルに向けた
高温ガス炉による水素製造について

本報告は経済産業省資源エネルギー庁 高温ガス炉実証炉開発事業 JPMT007141の成果の一部を含む

2024年10月22日

三菱重工業株式会社 原子力セグメント

先進炉技術部

松尾 健

1. カーボンニュートラルに向けた水素の重要性について
2. 三菱重工原子力事業の取組のご紹介
3. 高温ガス炉について
4. HTTRを用いた水素製造実証事業について
5. 高温ガス炉と親和性のあるカーボンフリー水素製造技術
6. まとめ

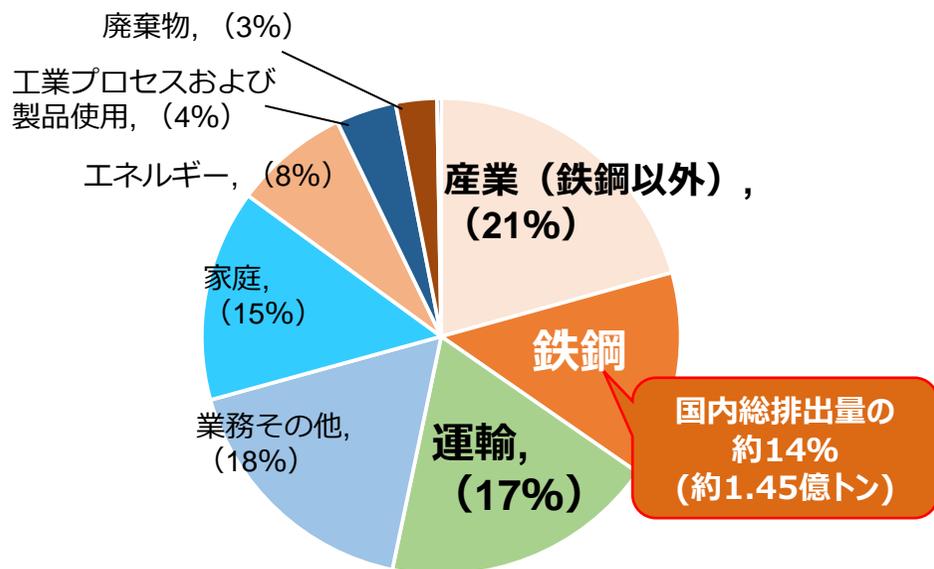
1. カーボンニュートラルに向けた水素の重要性について
2. 三菱重工原子力事業の取組のご紹介
3. 高温ガス炉について
4. HTTRを用いた水素製造実証事業について
5. 高温ガス炉と親和性のあるカーボンフリー水素製造技術
6. まとめ

1.1 カーボンニュートラルに向けた水素の重要性

- 近年ウクライナ情勢等、地政学リスクの高まりからエネルギーセキュリティの重要性が高まっており、エネルギーミックスの観点からも**脱炭素エネルギーである原子力**の利用拡大が注目される。
- 国内CO₂排出量は産業部門（鉄鋼含む）が約35%占めており、例えば鉄鋼部門ではカーボンニュートラルに向け水素還元製鉄の開発が進められており、高炉に投入するコークスの代替として水素を使用する。鉄鋼等の産業部門では24時間連続して大量水素の安定供給が必要であるため、製造ラインでの脱炭素化として化石資源を水素に置き換える場合**大量の水素を安定に供給**する必要がある。

日本のCO₂部門別排出量

日本全体 エネルギー起源CO₂排出量
約11億トン（2021年度）



数値出典：経済産業省 <https://www.env.go.jp/content/000128750.pdf>

産業界のカーボンニュートラルに向けた取組み

産業	現状の課題	今後の取組
鉄鋼業	・石炭による還元反応でCO ₂ が発生	・高炉を用いた 水素還元 ・ 直接水素還元 ・電炉技術開発
化学工業 石油石炭製品	・ナフサクラッカーの加熱でエネルギー消費 ・廃棄時の燃焼でCO ₂ が発生	・廃プラスチック・廃ゴムやCO ₂ のプラスチック原料化技術の確立 ・人工光合成によるプラスチック原料製造 ・ 熱源のカーボンフリー化
機械製造業 金属製品製造業	・製造・使用時に電力を消費	・省エネ、 電力のカーボンフリー化
窯業・土石業	・石灰石の燃焼でCO ₂ が発生 ・キルンの加熱でエネルギー消費	・石灰石燃焼時のCO ₂ 回収、CO ₂ 吸収コンクリートの開発 ・CO ₂ を用いた廃コンの原料化 ・ 熱源のカーボンフリー化
パルプ・紙・紙加工業	・パルプの加熱でエネルギー消費	・ 熱源のカーボンフリー化

出典：第25回原子力小委員会資料（一部抜粋）

https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/pdf/025_03_00.pdf

1.2 水素の大量・安定製造について

- CO₂削減において代替手段・技術が少なく、排出削減困難な**鉄鋼や化学等の産業部門**や、**輸送部門**、**発電部門**等で、水素等（アンモニア等含む）の活用が期待される。
- 水素供給の多様性から水素の輸入や再生可能エネルギーでグリーン水素の国内製造があるが、**エネルギーセキュリティ・安定供給性に課題**がある。
- エネルギーセキュリティから**準国産エネルギーの原子力で大量・安定に水素を製造することが有効**。
 軽水炉はデータセンター等、将来的に電力需要が増大するため発電に特化することが望ましく、**高温熱を供給できる高温ガス炉を水素製造に活用**することが有効。

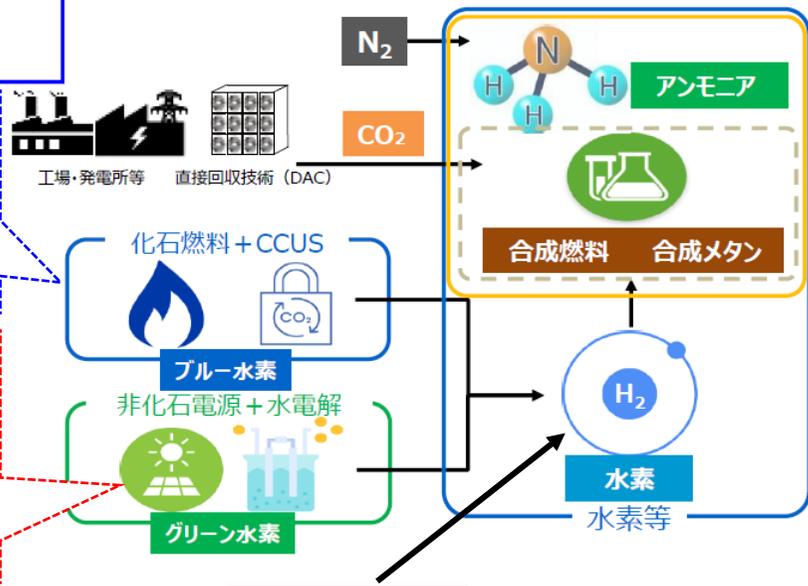


水素等の供給源及び需給先

海外水素
 水素社会の実現に向けて水素供給の多様性でメリットがあるが、水素を輸入する場合、天候やシーレーンの安全確保等に左右されるため、**エネルギーセキュリティ**において課題があり、輸送コストが高いため経済性に課題あり

太陽光発電 夜間・雨天時には発電できない。日中でも発電出力に変動あり。
 →設備利用率 約17.2%

陸上風力発電 無風・荒天時には発電できない。日中でも発電出力に変動あり。
 →設備利用率 約25.6%



発電部門
 ガス火力発電の水素転換 (専焼・混焼)、石炭火力発電のアンモニア転換 (専焼・混焼) 等

輸送部門
 FCV、船舶、航空機等における水素・アンモニア利用、既存燃料の代替 (e-fuel、e-SAF) 等

産業部門
 水素還元製鉄、自家発電炉の燃料転換、工業用バーナーの燃料転換等

民生・業務部門
 家庭用熱・発電等

原子力 (高温ガス炉)

[出典] 資源エネルギー庁資料より一部抜粋
<https://www.mlit.go.jp/maritime/content/001735440.pdf>

出典 調達価格等算定委員会資料 (令和2年2月4日) の想定値より抜粋
https://www.meti.go.jp/shingikai/santeei/pdf/20200204001_1.pdf

1.3 高温ガス炉を用いた水素製造について

- 高温ガス炉は**900℃以上の、大量かつ安定なカーボンフリーエネルギーを供給**でき、高温ガス炉の熱を水素製造に使用することによって、**大量かつ安定なカーボンフリー水素を製造することが可能**。
- 高温ガス炉に接続する水素製造の開発では、まず**商用化済のメタン水蒸気改質法を組み合わせ**て、**原子力の核熱を利用した水素製造を実証**する計画。実証では高温ガス炉の実験炉であるHTTR※を使って大量かつ安定に水素製造することを実証する。**将来的にはカーボンフリー水素製造技術と組み合わせることで、カーボンフリー水素製造技術の実現**を目指す。

※HTTR : High Temperature Engineering Test Reactor (高温工学試験研究炉)

当社取組み

高温ガス炉

- 900℃以上のカーボンフリー熱源による熱供給

熱

水素製造

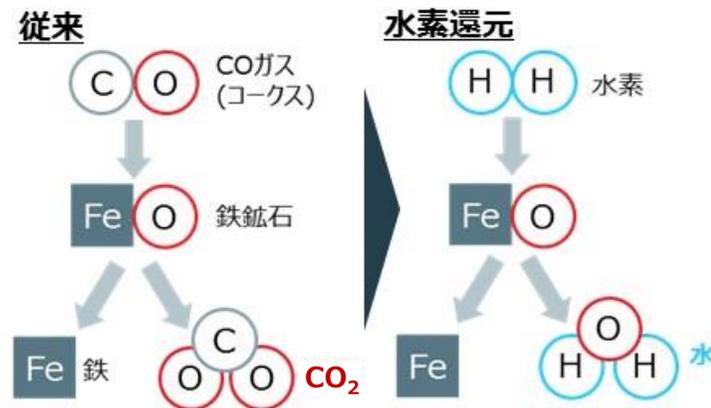
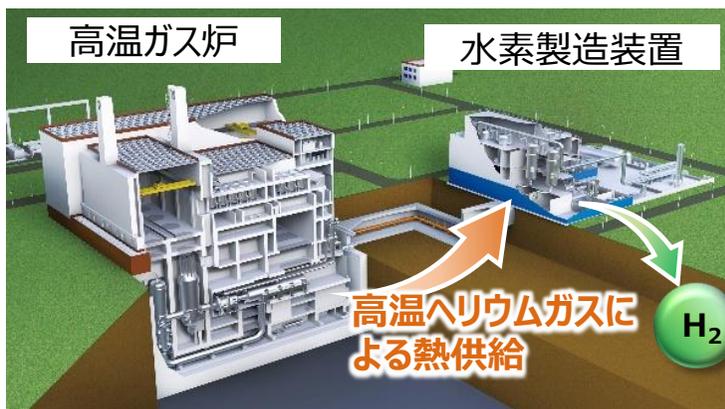
- メタン水蒸気改質法
↓
- カーボンフリー水素製造技術

水素

水素利用 (例; 鉄鋼業界)

水素還元製鉄

- 高炉に投入するコークス(C)を水素で代替
- 段階的に水素の添加割合を高めCO₂を低減
- 将来的に100%水素還元を目標



1. カーボンニュートラルに向けた水素の重要性について
2. 三菱重工原子力事業の取組のご紹介
3. 高温ガス炉について
4. HTTRを用いた水素製造実証事業について
5. 高温ガス炉と親和性のあるカーボンフリー水素製造技術
6. まとめ

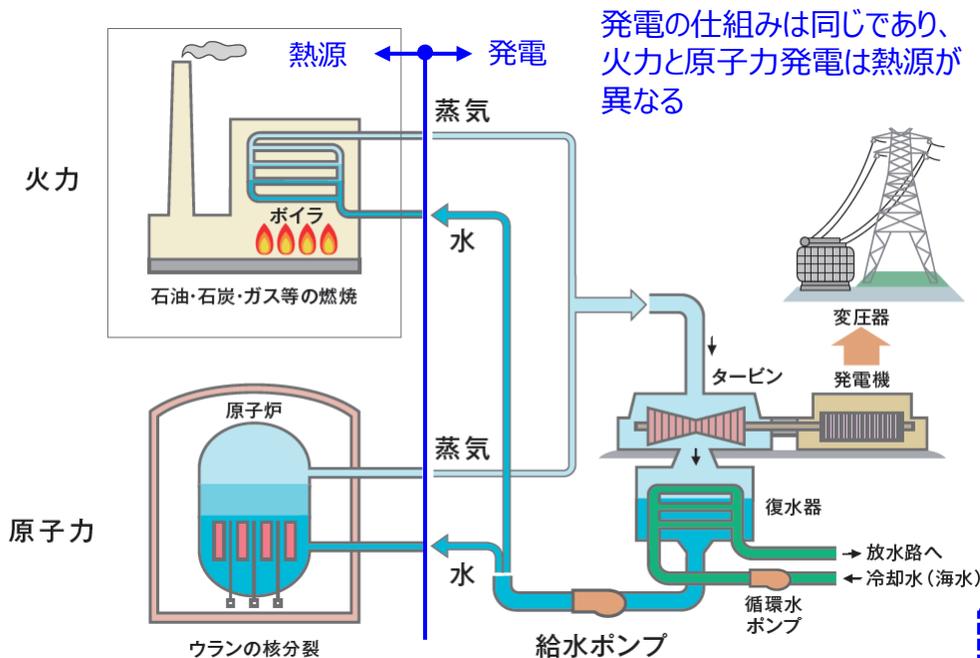
2.1 はじめに 原子力発電について

- ▶ 原子力発電は核燃料のウランが核分裂するときの核熱エネルギーで蒸気を製造し、蒸気タービンで発電。少量の核燃料で大きな熱エネルギーを取り出すことができ※、核燃料を原子炉に一度充填すると補給なしで長期間、連続で発電可能である（国内は運転サイクルとして13ヵ月運転）。

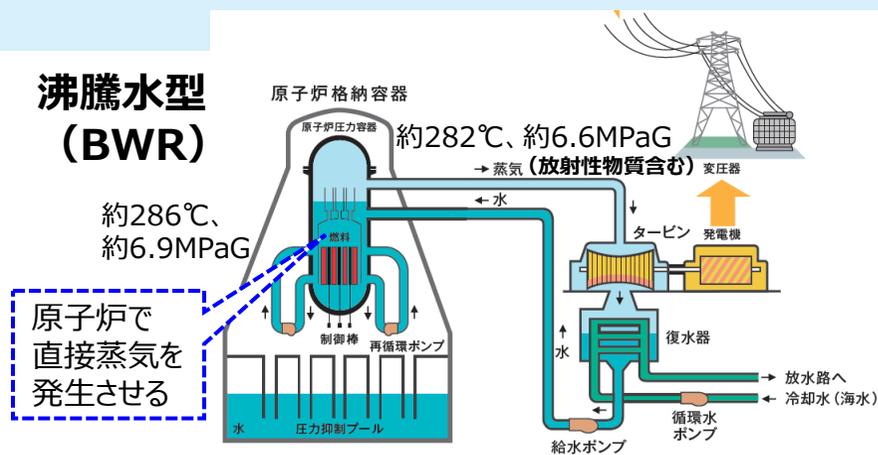
※：ウラン235は1グラムで、石炭約3トン、石油約2000リットル分のエネルギーを生み出せる

- ▶ **軽水炉**は軽水（通常の水）を減速材と冷却材として使用しており、蒸気発生の違いによって**沸騰水型（BWR）**と**加圧水型（PWR）**に分けられる。

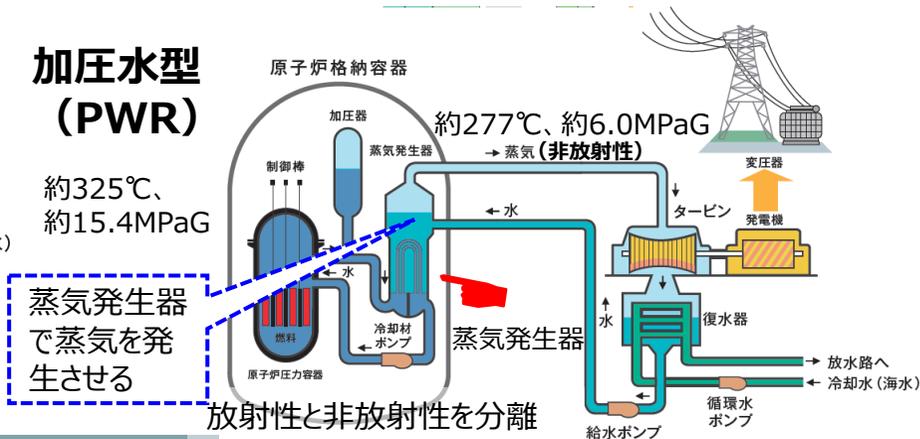
火力発電と原子力発電の違い



沸騰水型 (BWR)



加圧水型 (PWR)

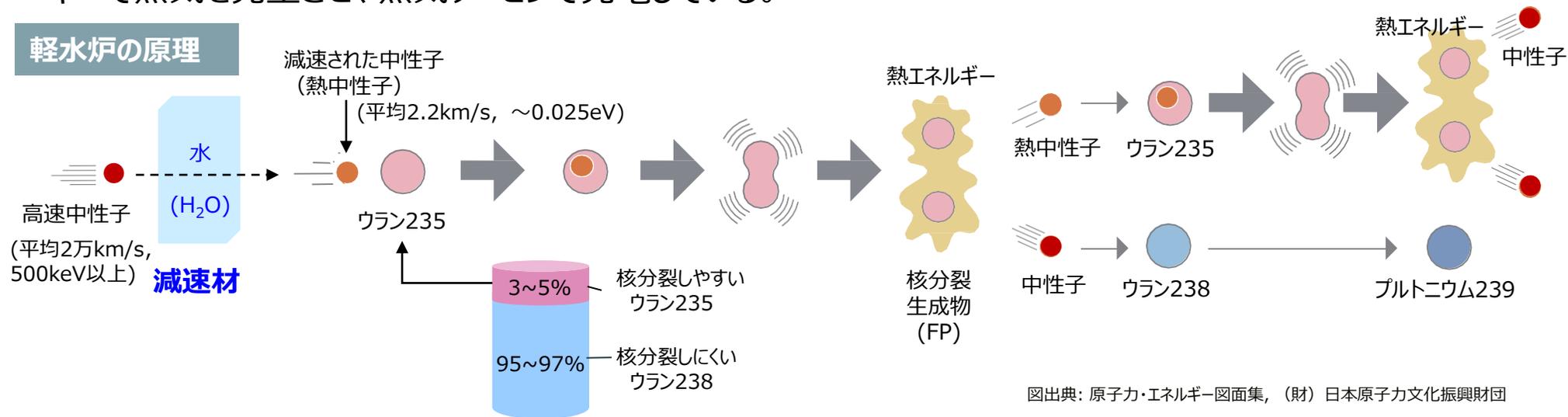


[出典] 電気事業連合会HPより
<https://www.fepc.or.jp/enterprise/hatsuden/nuclear/index.html>

【参考】核分裂について

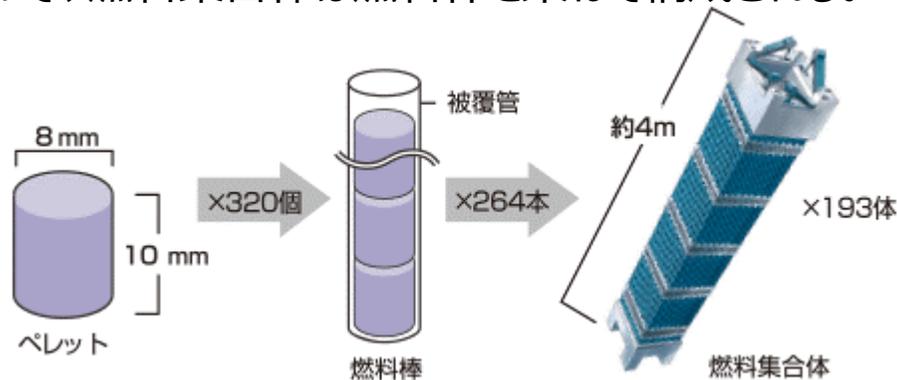
軽水炉は、**水(軽水)によって減速された熱中性子がウラン235に衝突し、核分裂**する際に生じる熱エネルギーで蒸気を発生させ、蒸気タービンで発電している。

軽水炉の原理



図出典: 原子力・エネルギー図面集, (財)日本原子力文化振興財団

原子力発電所で使われている燃料は、**核分裂しやすい(燃えやすい)ウラン235が約4%**、核分裂しにくい(燃えにくい)ウラン238が約96%であり、セラミック状に焼き固められた小さな円柱状のペレットに加工され、燃料棒はペレットを集合させたもので、燃料集合体は燃料棒を束ねて構成される。

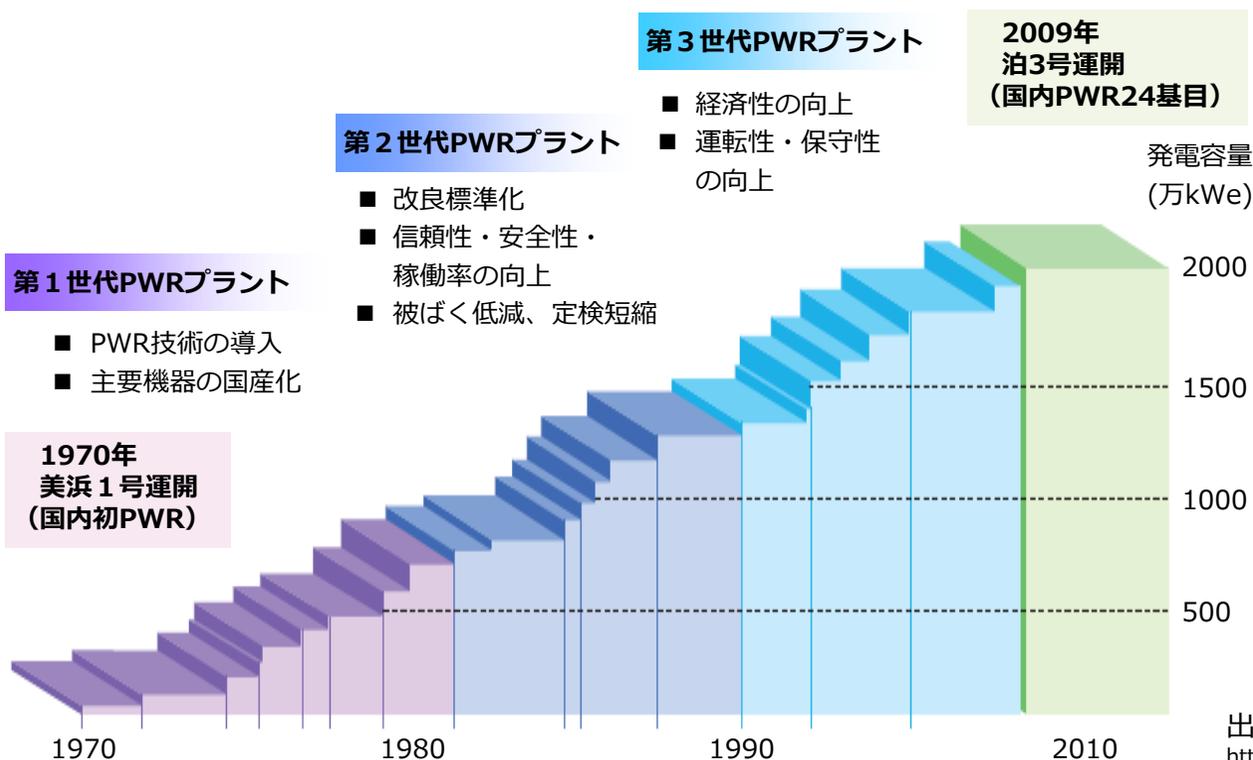


出典: 関西電力ホームページ, https://www.kepc.co.jp/energy_supply/energy/nuclear_power/whats/kakubunretsu.html

2.2 これまでの三菱重工の原子力事業実績

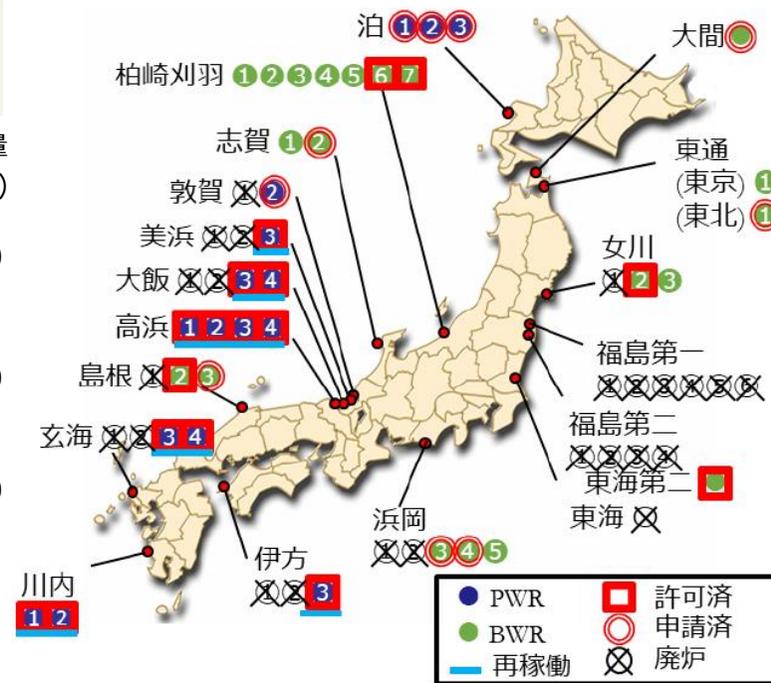
- 当社は、1970年の関西電力美浜1号運開以来、国内PWRプラント24基の全てを納入、原子力プラントの弛まぬ安全性・信頼性向上、技術革新に取り組んできた
- 東日本大震災以降は、既設プラント再稼働に向けた電力会社の新規制基準適合性審査や安全対策の取り組みを全面支援し、これまでにPWR12基の再稼働に貢献、BWRプラントの再稼働支援にも注力

■ 三菱重工のPWRプラント建設の実績



出典：三菱重工ホームページ、https://www.mhi.com/jp/products/energy/pwr_power_plant_history.html

■ 国内プラントの再稼働状況

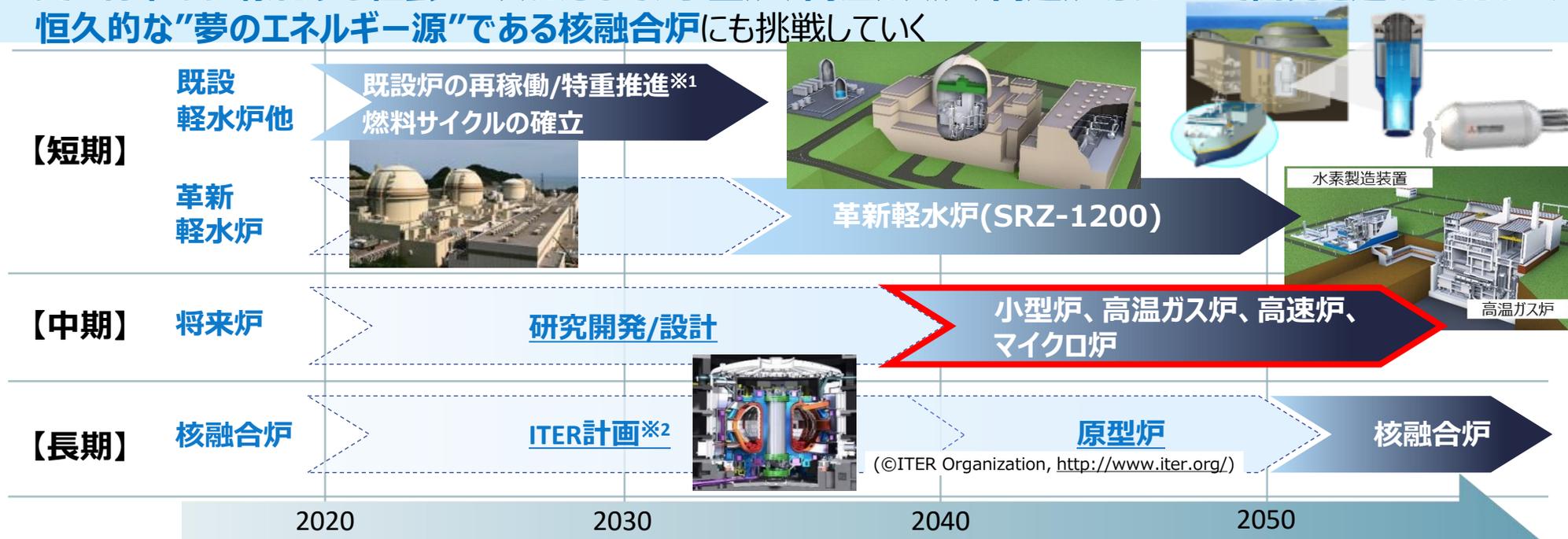


出典：第40回原子力小委員会資料 (2024.8.20)

https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/pdf/040_03_00.pdf

2.3 カーボンニュートラルに向けた革新炉の開発動向

- 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**。当社は**既設プラントの再稼働支援、再稼働後の安全安定運転の実現**に向けて**安全性向上に努めていく**と共に、**燃料サイクルの確立に取り組むことで信頼回復に努める**
- **世界最高水準の安全性を実現する革新軽水炉(SRZ-1200)の早期実用化**により**カーボンニュートラルとエネルギー安定供給の実現に向けて貢献していく**
- 更に**将来の多様化する社会ニーズ**に応じて、**小型炉、高温ガス炉、高速炉等について開発を進めるとともに、恒久的な“夢のエネルギー源”である核融合炉にも挑戦していく**

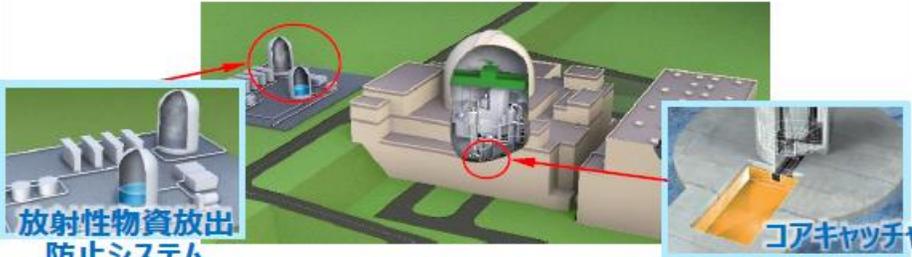
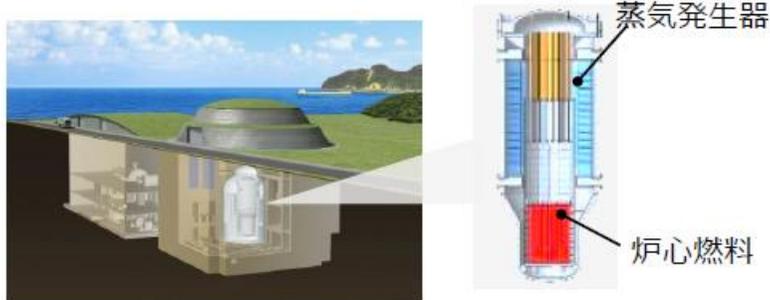


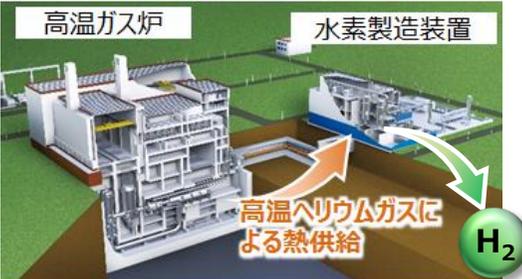
※1 特定重大事故等対処施設：プラントとは完全に独立し、航空機衝突やテロ等の際に安全に運転停止できる大規模施設

※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

2.4 三菱次世代革新炉のラインナップ

- 革新軽水炉“SRZ-1200”に加え、将来の社会的ニーズに応える将来炉（小型軽水炉、高温ガス炉、高速炉、マイクロ炉）の開発も推進中

革新軽水炉SRZ-1200	小型軽水炉
<ul style="list-style-type: none"> ✓ 既存グリッド向発電(電気出力:120万kWe) ✓ 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 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 分散型、小規模グリッド向発電（電気出力:30万kWe） ✓ 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	高速炉	マイクロ炉
<ul style="list-style-type: none"> ✓ 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 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 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 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 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 

※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”を成果を含む [出典] 原子力小委員会 第5回革新炉 WG（2022年10月24日）

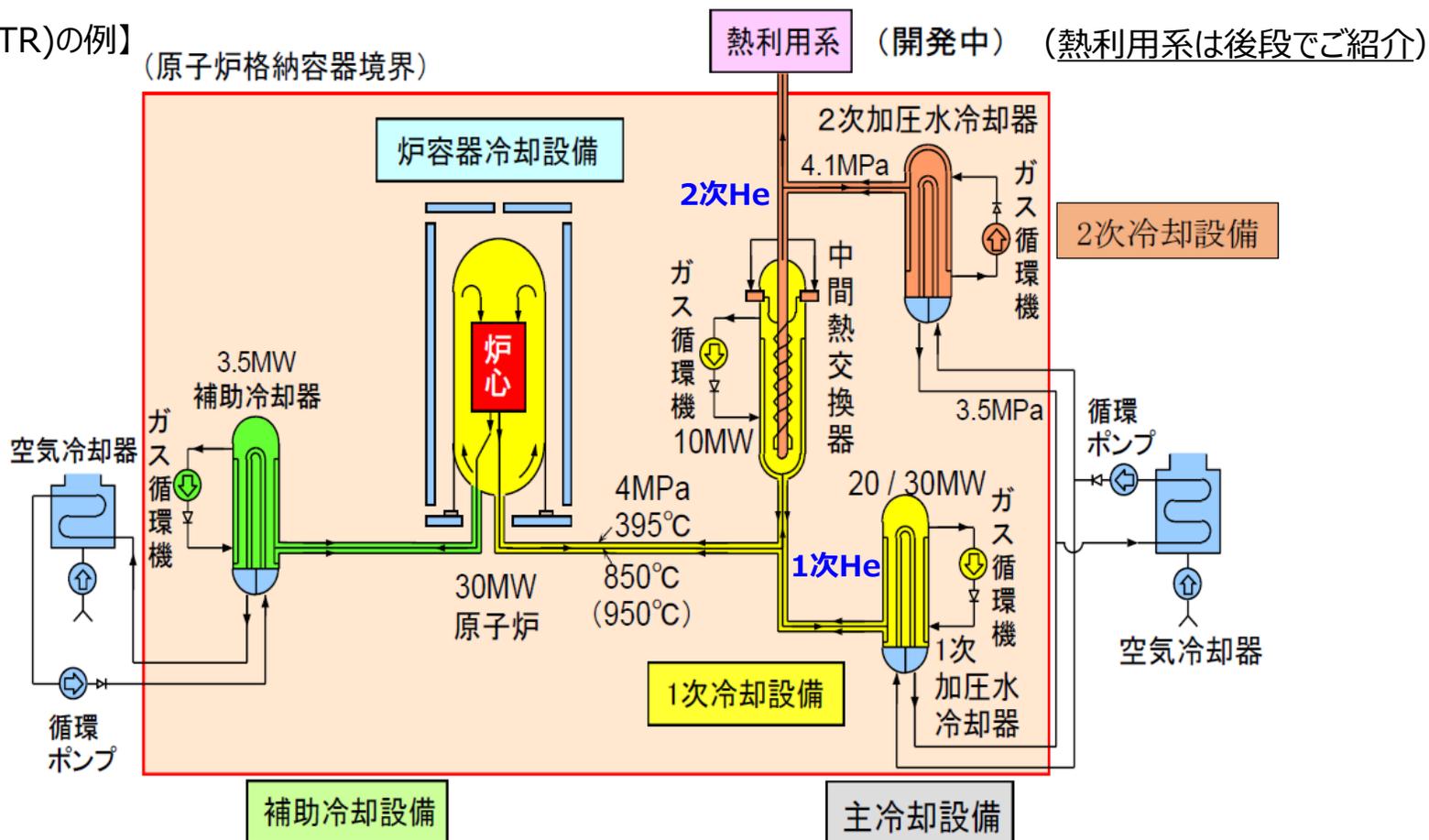
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/kakushinro_wg/pdf/005_03_00.pdf

1. カーボンニュートラルに向けた水素の重要性について
2. 三菱重工原子力事業の取組のご紹介
3. 高温ガス炉について
4. HTTRを用いた水素製造実証事業について
5. 高温ガス炉と親和性のあるカーボンフリー水素製造技術
6. まとめ

3.1 高温ガス炉について

- 高温ガス炉は**冷却材がヘリウム**、**減速材が黒鉛**の原子炉で、**最高950℃の高温**を出すことができる。
- 原子炉からの熱は1次ヘリウムを熱媒体に、中間熱交換器を介して2次ヘリウムに熱交換し、2次系に熱利用系として接続する水素製造施設等で熱利用するが、**万一の事故で冷却材を失った場合でも、炉心溶融しない優れた安全性を有している。**

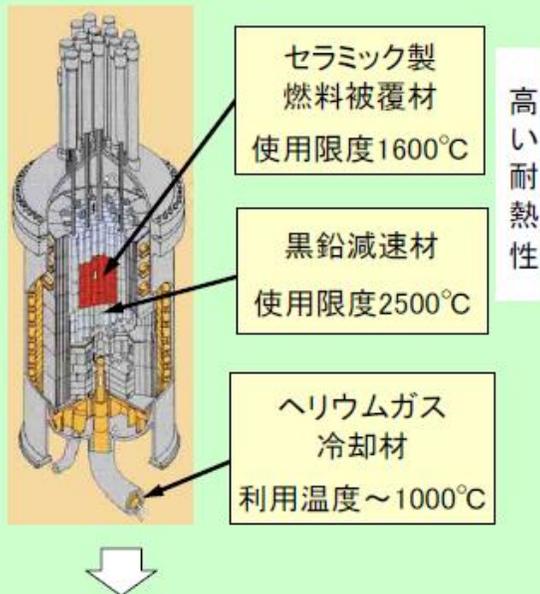
【高温工学試験研究炉(HTTR)の例】



3.2 高温ガス炉の安全性について

- 高温ガス炉は高温熱を取り出すため、冷却材として熱化学的に安定なヘリウムを使用。
- 原子炉の核燃料はセラミックスで構成された被覆粒子燃料、黒鉛炉心で構成され、高温健全性と核分裂生成物（FP：Fission Product）の保持能力に優れる
- 高温ガス炉は炉心の出力密度が低い(出力当たりの原子炉サイズが大きい)ことにより、炉心の熱を原子炉外表面から自然に放熱・除去され、①止める、②冷やす、③閉じ込める、それぞれにおいて固有の安全性を有しており、万一の事故においても炉心溶融を起こさない、安全性の高い原子炉である。

高温ガス炉の構造



安全性に優れている

出典：清水他、三菱重工技報 Vol.46 No.4 (2009)

高温ガス炉の主要目表

項目	高温ガス炉	軽水炉（参考）
原子炉出力 (炉心出力密度)	～約600MWt (約5kW/L)	～約3,000MWt (中型炉) (約70kW/L)
冷却材	ヘリウム	軽水
減速材	黒鉛	軽水
燃料型式	被覆粒子燃料	Zr金属被覆管
原子炉出口温度	～950°C	約300°C

【参考】高温ガス炉の固有の安全性 ①止める

①止める：負の反応度による核分裂反応の減少

- 燃料温度が上昇すると、ウラン238のドップラー効果により、熱中性子吸収断面積が増加
- 黒鉛温度が上昇すると、密度の減少により、高速中性子の減衰機能が低下（熱中性子減少）

→反応度が異常に印加された場合でも、原子炉出力は自動で安定する（制御棒操作無しでも）

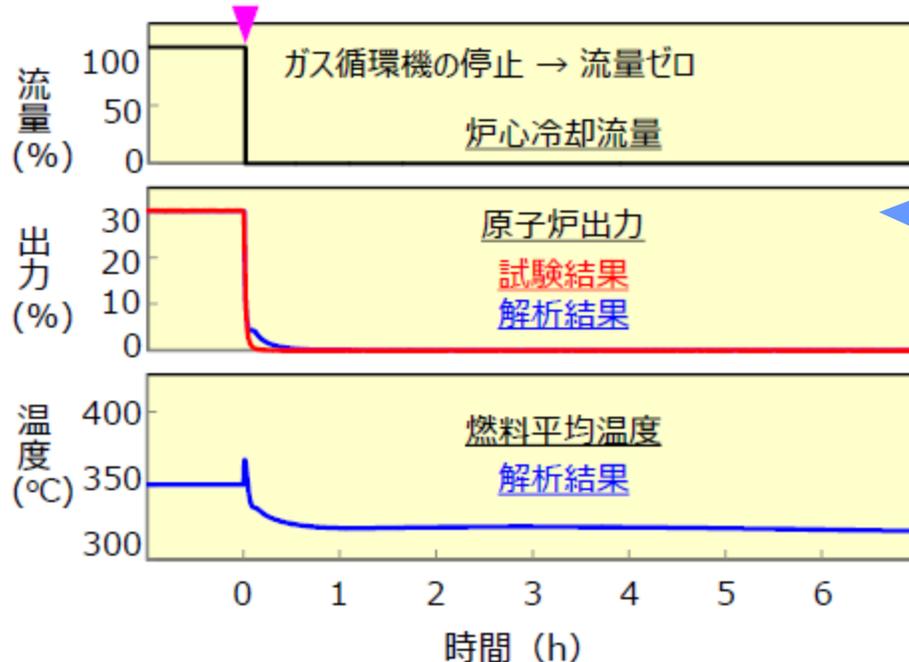
HTTRで実施された安全性実証試験結果（2010年12月実施）

＜安全性実証試験＞

定格出力30MWtの30%に相当する原子炉出力

9MWtから、1次系のヘリウム循環機を全て停止し、炉心における冷却材流量を零とすると共に、制御棒を挿入しない試験を実施。

⇒循環機停止後、**原子炉出力は速やかにほぼ零の状態へ低下し、原子炉が安定して安全な状態に静定した**ことを確認

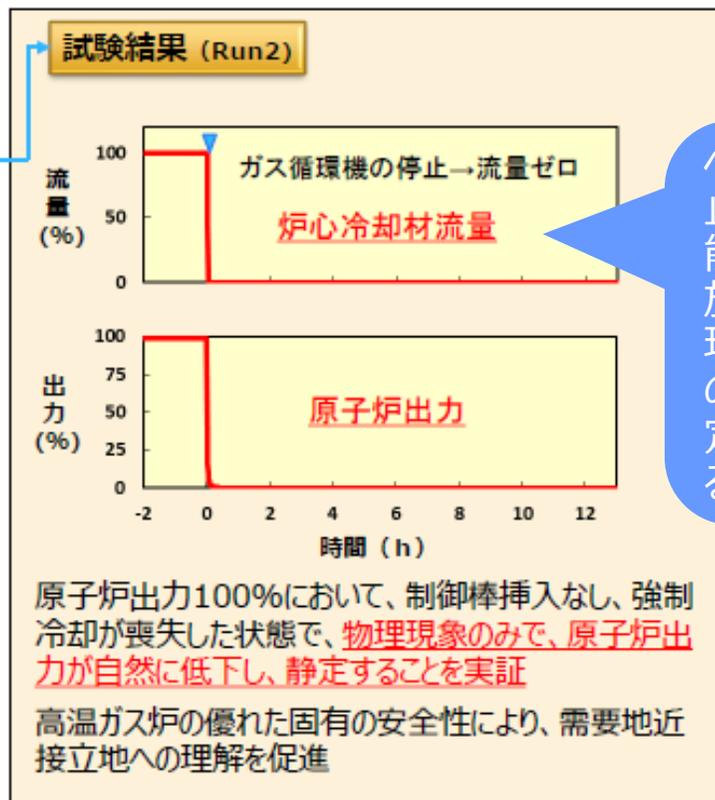
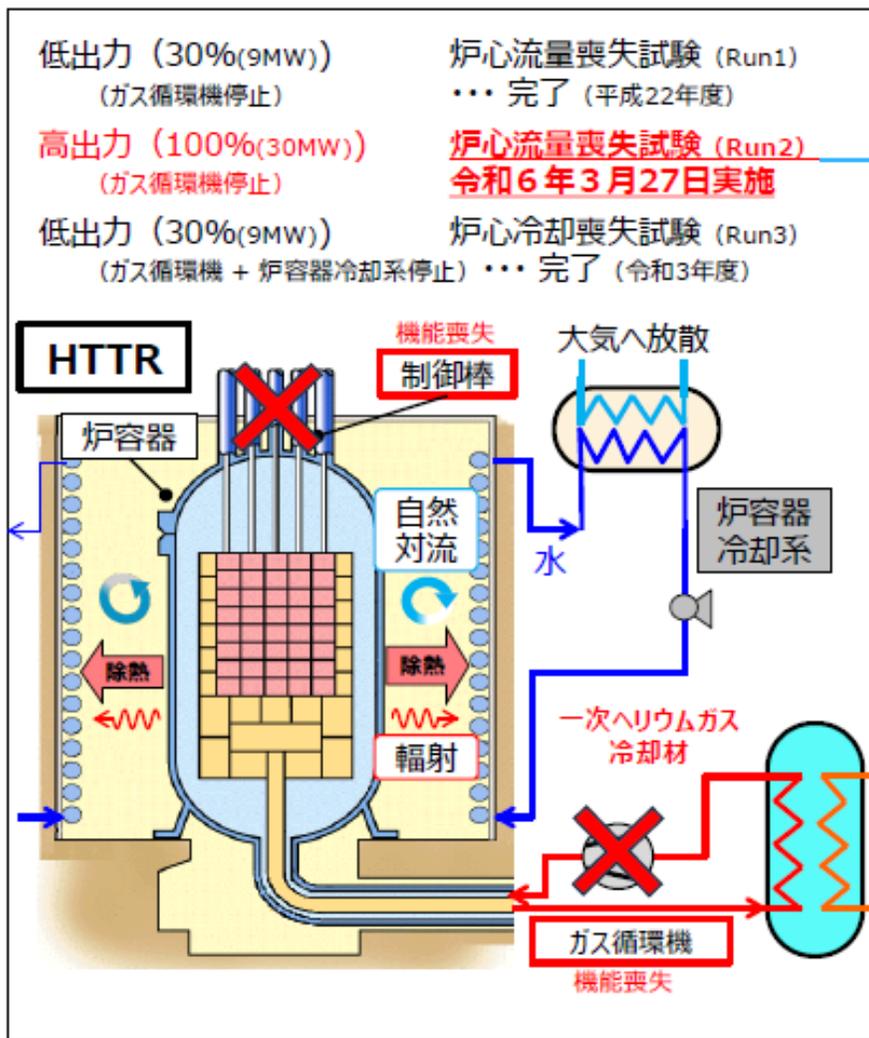


急に制御棒を引き抜いた場合（反応度印加）でも、負の反応度フィードバック特性で原子炉は安定化している。

出典：JAEAホームページより抜粋

https://www.jaea.go.jp/04/o-arai/nhc/jp/research/htr/htr_research02.html

②冷やす：炉心出力密度が小さく、黒鉛の熱伝導度が高いため、炉心外部から冷却が可能



ヘリウム循環機を停止して強制冷却機能を喪失させても、放冷等に拠る物理現象のみで原子炉の出力が低下し、安定な状態を維持できることを確認

OECD/NEA国際共同研究プロジェクト
 米、仏、独、韓、チェコ、ハンガリーが参加し、HTTRを用いた強制冷却喪失時の革新炉の性能を研究
 今後、解析による検証を行い、報告書を発刊予定

出典：JAEAホームページ, <https://www.jaea.go.jp/02/press2023/p24032801/>

【参考】高温ガス炉の固有の安全性 ③閉じ込める

③閉じ込める： 高温に強いセラミックスを用いた4重被覆燃料の使用により、1600℃の高温でもFP（Fission Product, 核分裂生成物）の閉じ込め機能を維持

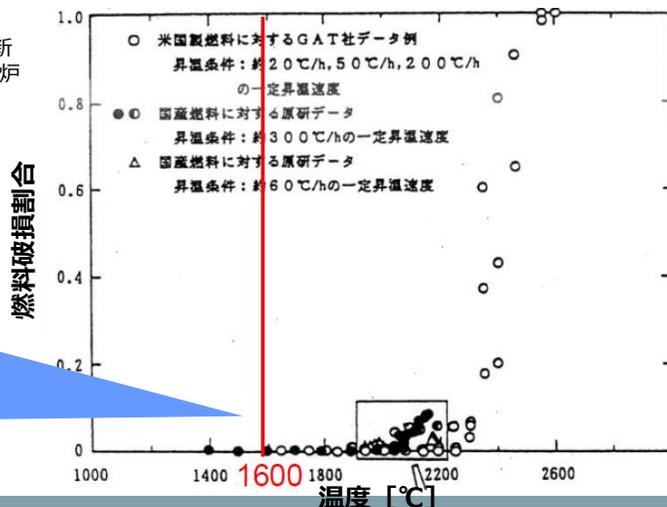
被覆粒子燃料と黒鉛ブロック炉心



被覆粒子燃料出典：水田他、“被覆燃料粒子の充填率を高めた高温ガス炉用燃料コンパクトの製作性確認と性能評価”、JAEA-Technology-2017-004

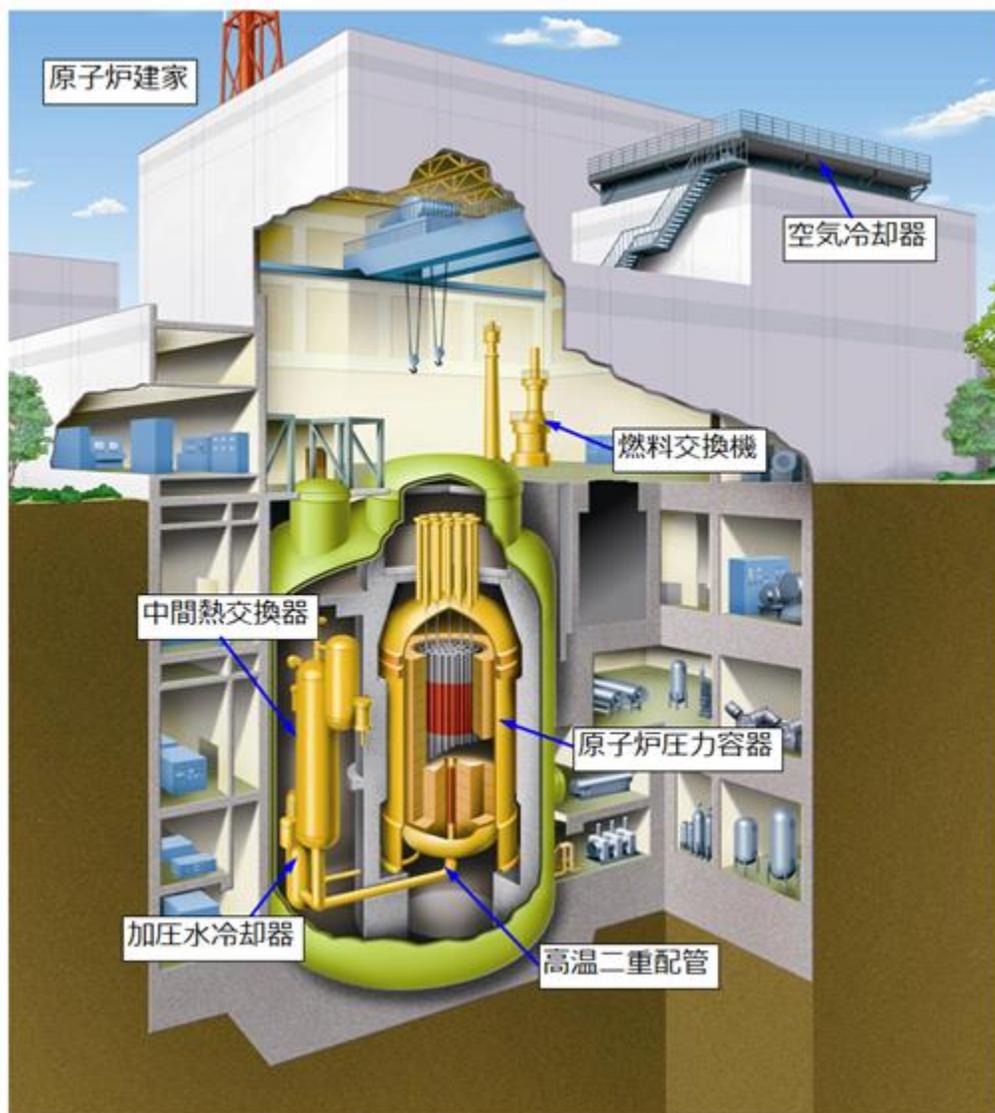
被覆粒子燃料破損データ出典：JAEA資料、“新規性基準を踏まえたHTTR(高温工学試験研究炉)の安全対策について”(2021.520)より抜粋

被覆燃料粒子の被覆層の健全性が維持できる設計限界温度として1600℃を設定



被覆層	主な機能
第1層：低密度 PyC	核分裂片損傷による被覆層破損の防止, FP ガスおよび燃焼に伴い生じる一酸化炭素(CO)のガス溜め, 燃料核のスウェリングの吸収
第2層：高密度 PyC	製造過程における第3層蒸着中の燃料核保護, 気体状FPの閉じ込め, FPとSiC層との反応の抑制
第3層：SiC	被覆燃料粒子の寸法安定性保持および構造的強度保持, 気体状FPおよび金属FPの閉じ込め
第4層：高密度 PyC	SiC層の機械的保護, SiC層が破損した場合の気体状FP閉じ込め

出典：植田他，“多様な原子燃料の概念と基礎設計”，日本原子力学会誌，Vol.63，No.8(2021)



原子炉出力	30 MW
原子炉出口温度	950℃ (最高)
1次冷却材	ヘリウム
1次冷却材圧力	4.0 MPa
出力密度	2.5 kW/L
燃料濃縮度	6% (平均)



国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 (JAEA) ホームページより抜粋

設置場所：大洗研究所 (茨城県大洗町)

高温ガス炉の概要と開発の歴史

研究開発

炉内ガスループ(UGL-1)

高温ガス炉臨界実験装置 (VHTRC)

大型構造機器実証試験ループ (HENDEL)

研究開発と概念設計

： 実用システムの原型提示：

基盤技術の確立

世界初

原子炉の建設

高温工学試験研究炉 (HTTR)

HTTRの設置目的

- 高温ガス炉原子炉技術の確立
- 熱利用技術の確立

HTTRの仕様

- 原子炉出力 …………… 30MW
- 冷却材 …………… ヘリウムガス
- 原子炉入口/出口冷却材温度 …………… 395/850, 950℃
- 炉心構造材 …………… 黒鉛
- 燃料 …………… 二酸化ウラン
- ウラン濃縮度 …………… 3~10% (平均6%)

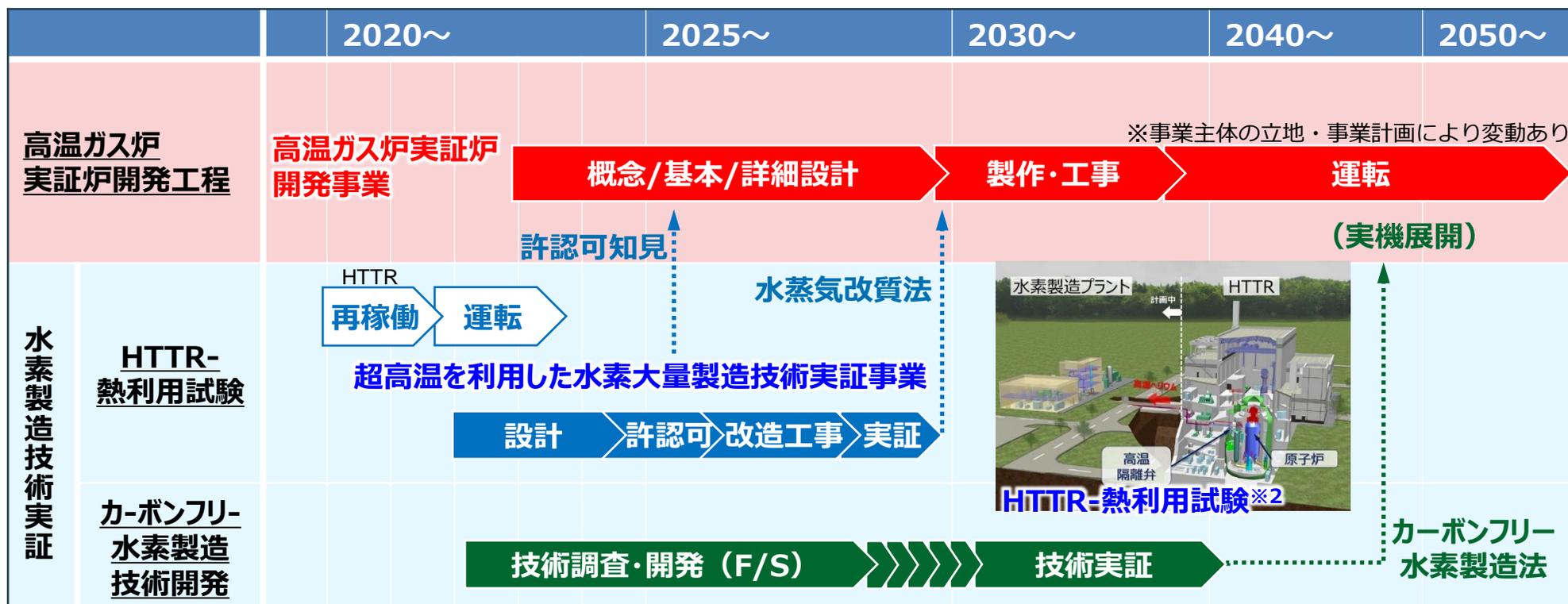
2022	安全性実証試験 (炉心冷却喪失試験)
2021	運転再開
2020	新規制基準に基づく設置変更許可取得
2014	設置変更許可申請書を原子力規制庁に提出
2010	安全性実証試験 (炉心流量喪失試験等) 950℃連続50日運転
2007	850℃連続30日運転
2004	原子炉出口950℃達成
2002	安全性実証試験 (制御棒引抜試験)
2001	定格出力 (30MW)、原子炉出口850℃達成
1998	初臨界
1997	建設
1991	建設
1990	設置許可申請～取得
1989	設置許可申請～取得
1988	詳細設計
1985	詳細設計
高温工学試験研究炉	
1984	基本設計
1981	基本設計
1980	システム総合設計
1974	システム総合設計
1973	概念設計
1969	概念設計
多目的高温ガス実験炉	

出典：日本原子力研究開発機構ホームページ

1. カーボンニュートラルに向けた水素の重要性について
2. 三菱重工原子力事業の取組のご紹介
3. 高温ガス炉について
- 4. HTTRを用いた水素製造実証事業について**
5. 高温ガス炉と親和性のあるカーボンフリー水素製造技術
6. まとめ

4.1 高温ガス炉と水素製造施設の開発工程

- ▶ 高温ガス炉実証炉開発事業：当社は2023年に**高温ガス炉実証炉開発事業の中核企業に選定**されており、「**高温ガス炉実証炉開発事業**」で実証炉設計開発に着手している。国の技術ロードマップに基づき、**2030年代後半の高温ガス炉実証炉の運転開始の実現**を目指す
- ▶ 水素製造技術実証：2022年度より国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(JAEA)とコンソーシアムで**HTTRを活用した水素製造技術実証事業（HTTR-熱利用試験）**に取り組んでおり、許認可実績等を取得すると共に、将来の**カーボンフリー水素製造技術の技術調査、技術実証**も並行して検討を進めており、これらの成果を実証炉開発に活用する



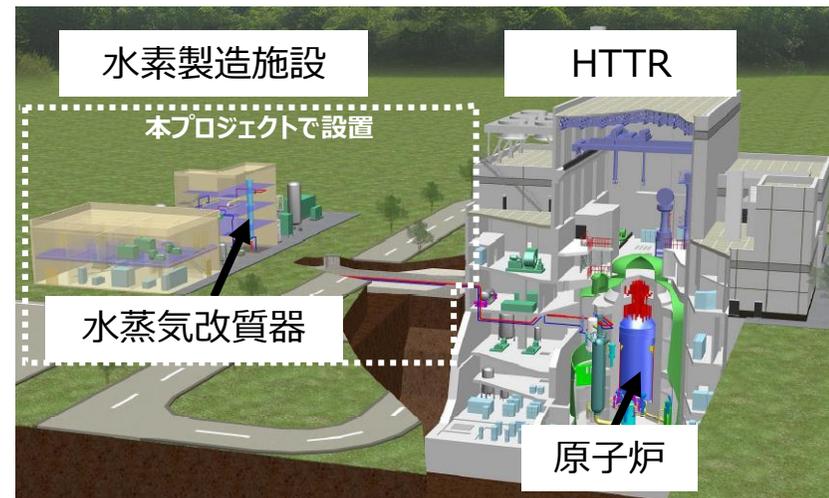
4.2 HTTRを用いた水素製造実証事業（HTTR-熱利用試験）

【目的】

脱炭素高温熱源である高温ガス炉と水素製造施設の
高い安全性を実現する接続技術を確立する

【内容】

- 高温熱源として、世界最高温度（950℃）を記録したHTTRを活用
- 高温ガス炉と水素製造施設の接続に係る安全設計及び安全評価技術の確立（原子力規制委員会からの許認可取得）
- 商用技術が確立されている天然ガス水蒸気改質法による水素製造施設をHTTRに接続し、水素製造を確証



試験イメージ

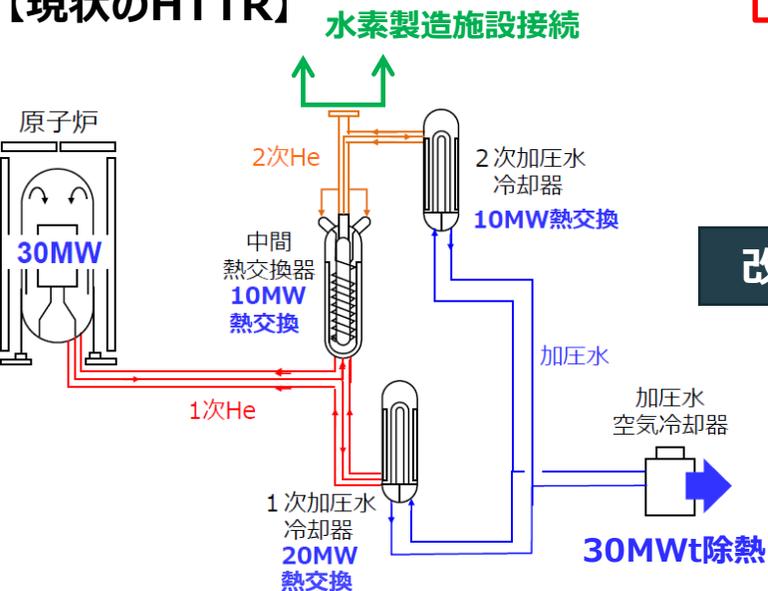
試験スケジュール（案）

	R4 2022	R5 2023	R6 2024	R7 2025	R8 2026	R9 2027	R10 2028	R11 2029	R12 2030
HTTR- 熱利用 試験	安全設計・安全評価		申請	許認可					
	HTTR改造設計/水素製造 (天然ガス水蒸気改質法) 施設設計				HTTR改造工事/水素製造施 設の製作・据付			水素製造試験	

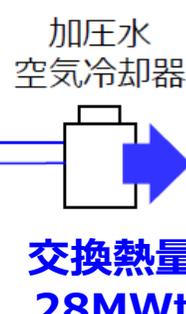
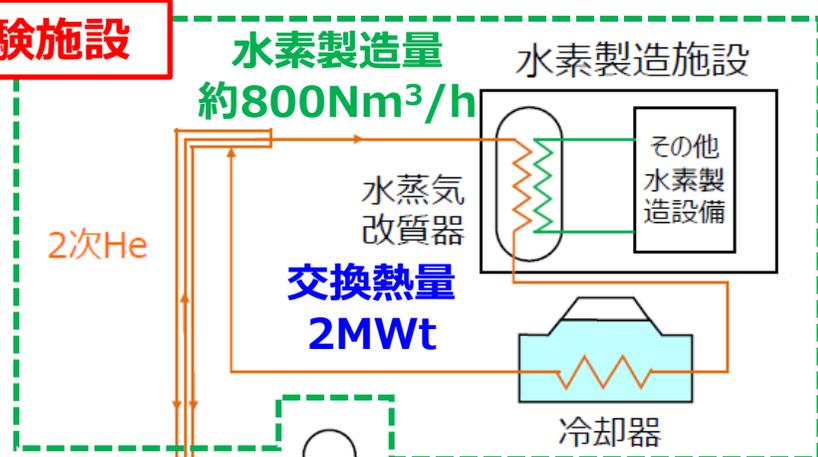
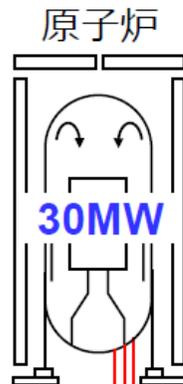
出典：H. Sato, Role of HTGR towards Carbon Neutrality, 31st International Conference on Nuclear Engineering, Prague, Czech Republic, August 2024.

4.3 HTTR-熱利用試験系統構成（水蒸気改質法の接続事例）

【現状のHTTR】



HTTR-熱利用試験施設



出典：JAEA資料より抜粋（2023.6.5） <https://www2.nra.go.jp/data/000436667.pdf>

1. カーボンニュートラルに向けた水素の重要性について
2. 三菱重工原子力事業の取組のご紹介
3. 高温ガス炉について
4. HTTRを用いた水素製造実証事業について
5. 高温ガス炉と親和性のあるカーボンフリー水素製造技術
6. まとめ

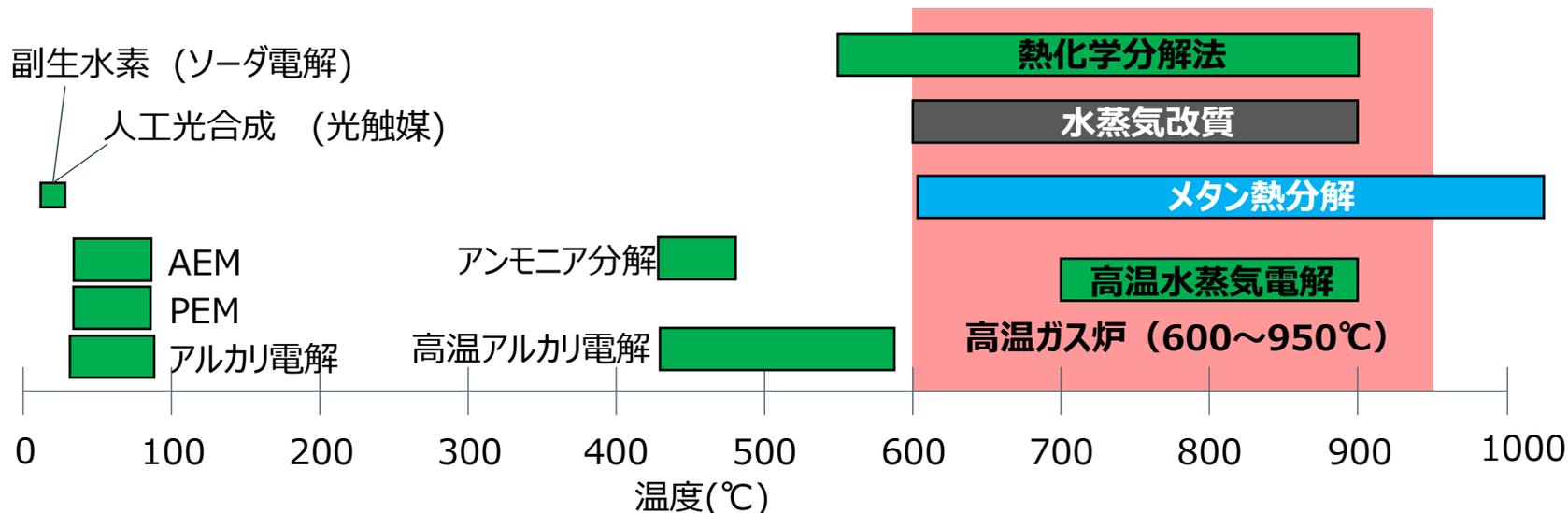
5.1 高温ガス炉と親和性のあるカーボンフリー水素製造技術(その1)

■ 高温ガス炉と親和性のある高温熱を有効利用できるカーボンフリー水素製造技術

- 熱化学分解法
- メタン熱分解
- 高温水蒸気電解
- 水蒸気改質(CO₂が発生するため、CCS※が必要) ※Carbon dioxide Capture and Storage

【凡例】

- グリーン水素：水素製造過程においてCO₂発生を伴わない水素製造プロセス
- ターコイズ水素：水素製造過程においてCO₂発生しないが、固体炭素の発生を伴う水素製造プロセス
- グレー水素：水素製造過程においてCO₂発生を伴う水素製造プロセス



本報告は経済産業省資源エネルギー庁 高温ガス炉実証炉開発事業 JPMT007141の成果の一部を含む

5.2 カーボンフリー水素技術の開発

- 高温を利用したカーボンフリー水素製造として 熱化学分解法（IS法）、メタン熱分解、高温水蒸気電解（SOEC）を候補として選定
- 高温ガス炉と親和性のある水素製造技術に対して技術コンセプトを確認し、要素技術開発を進めており、2026年までに要素技術開発及び性能確認を実施し、小規模試験を計画する。
- 2028年以降、システムレベルでカーボンフリー水素製造技術を実証するために試験装置の設計・製作に取り掛かり、2030年以降に実証試験を実施する。

【 工程・将来計画 】

	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
カーボンフリー水素候補検討	高温ガス炉と親和性のあるカーボンフリー水素を抽出 ⇒熱化学分解法（IS法）、メタン熱分解、高温水蒸気電解（SOEC）								
開発計画		計画							
要素技術・性能確認		技術コンセプト・要素技術開発・性能向上				小規模試験			
実証規模							システムレベル試験設計・製作・試験		

本報告は経済産業省資源エネルギー庁 高温ガス炉実証炉開発事業 JPMT007141の成果の一部を含む

5.3 高温ガス炉と親和性のあるカーボンフリー水素製造技術(その2)

■ 熱化学分解法(IS法)

熱化学反応を組み合わせ、熱エネルギーで水を水素と酸素に分解

■ メタン熱分解法

熱エネルギーでメタンを水素と炭素に分解。炭素は固体炭素として固定

■ 高温水蒸気電解法(SOEC)

高温水蒸気の電解により水素と酸素に分解

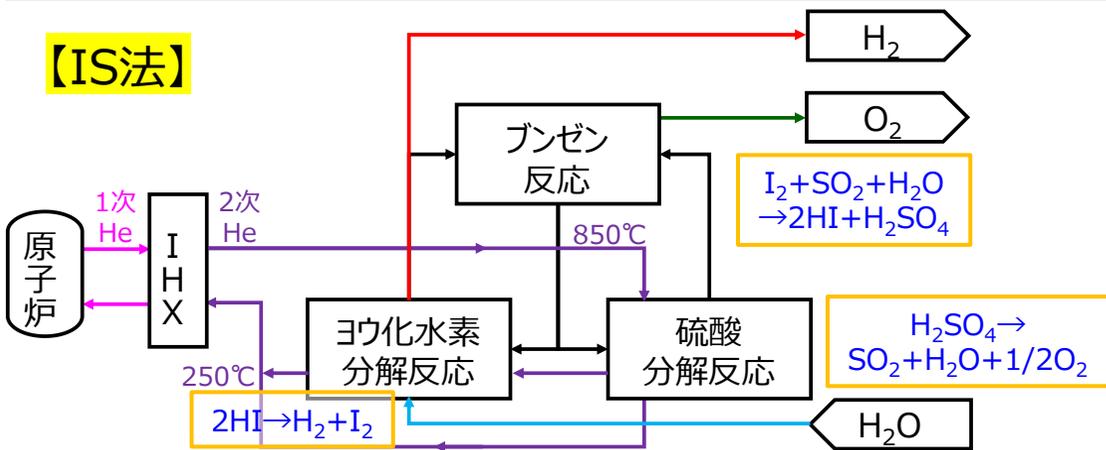
	熱化学分解法(IS法)※1	メタン熱分解法	高温水蒸気電解法(SOEC)
概要	<p>水素 H₂ 400°C 高温熱 (高温ガス炉) 900°C 酸素 O₂</p> <p>フンゼン反応 (ヨウ化水素と硫酸の生成)</p> <p>ヨウ素 (I) の循環</p> <p>ヨウ化水素 (HI) 分解反応</p> <p>水 H₂O</p> <p>硫酸分解反応</p> <p>硫酸 (S) の循環</p> <p>2HI + H₂SO₄ → I₂ + SO₂ + 2H₂O</p> <p>H₂SO₄ → 1/2O₂ + SO₂ + H₂O</p>	<p>高温熱 (高温ガス炉)</p> <p>吸熱反応</p> <p>CH₄ → 2H₂ + C</p> <p>反応器</p>	<p>高温熱 (高温ガス炉)</p> <p>吸熱反応</p> <p>高温蒸気 (700°C以上)</p> <p>2H₂O → 2H₂ + O₂</p> <p>水素極 (O²⁻)</p> <p>電解質 (O)</p> <p>酸素極 (C)</p>
	$H_2O \rightarrow H_2 + 1/2O_2$	$CH_4 \rightarrow 2H_2 + C(s)$	$H_2O \rightarrow H_2 + 1/2O_2$

※1 <https://www.jaea.go.jp/02/press2018/p19012502/>

本報告は経済産業省資源エネルギー庁 高温ガス炉実証炉開発事業 JPMT007141の成果の一部を含む

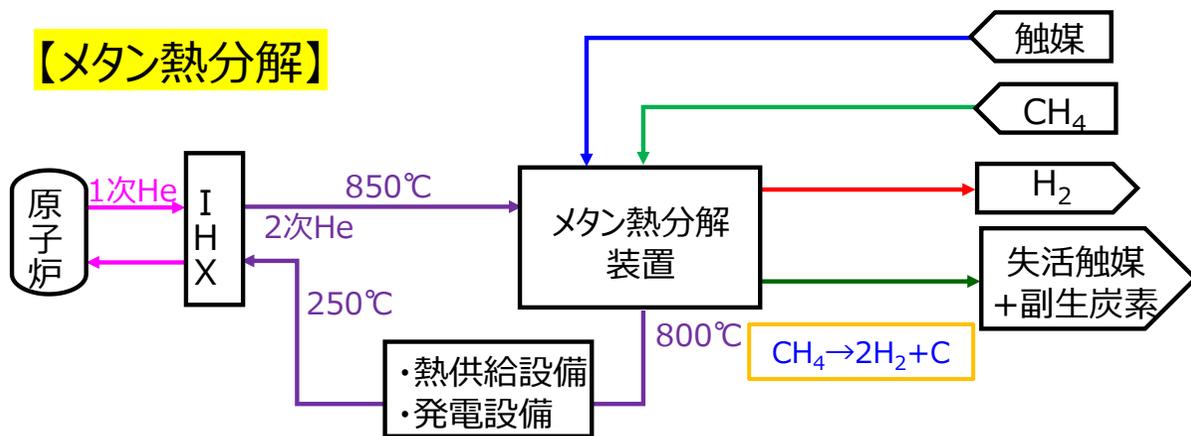
5.4 高温ガス炉に接続したカーボンフリー水素製造技術の概略系統

【IS法】



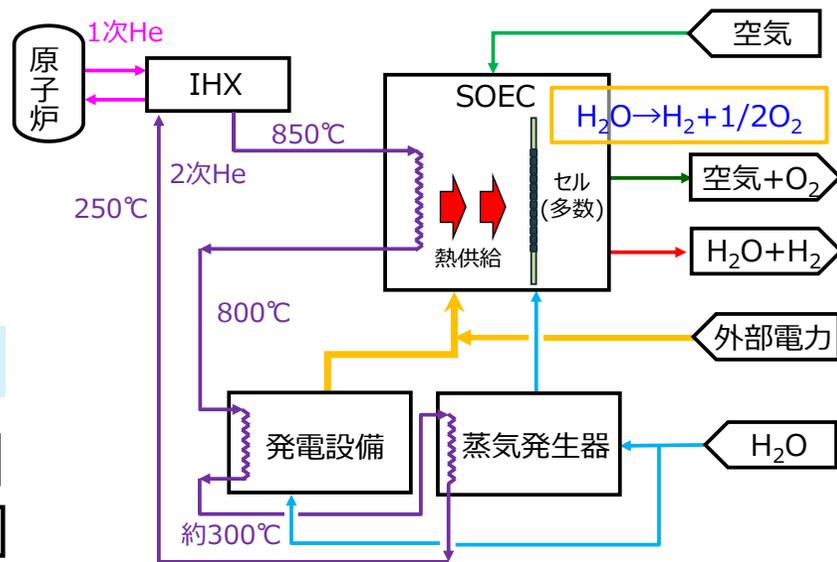
◆ 水素製造に必要なエネルギーを高温ガス炉から供給可能

【メタン熱分解】



◆ 高温熱のみで水素製造でき、排熱は熱電供給に利用

【SOEC】



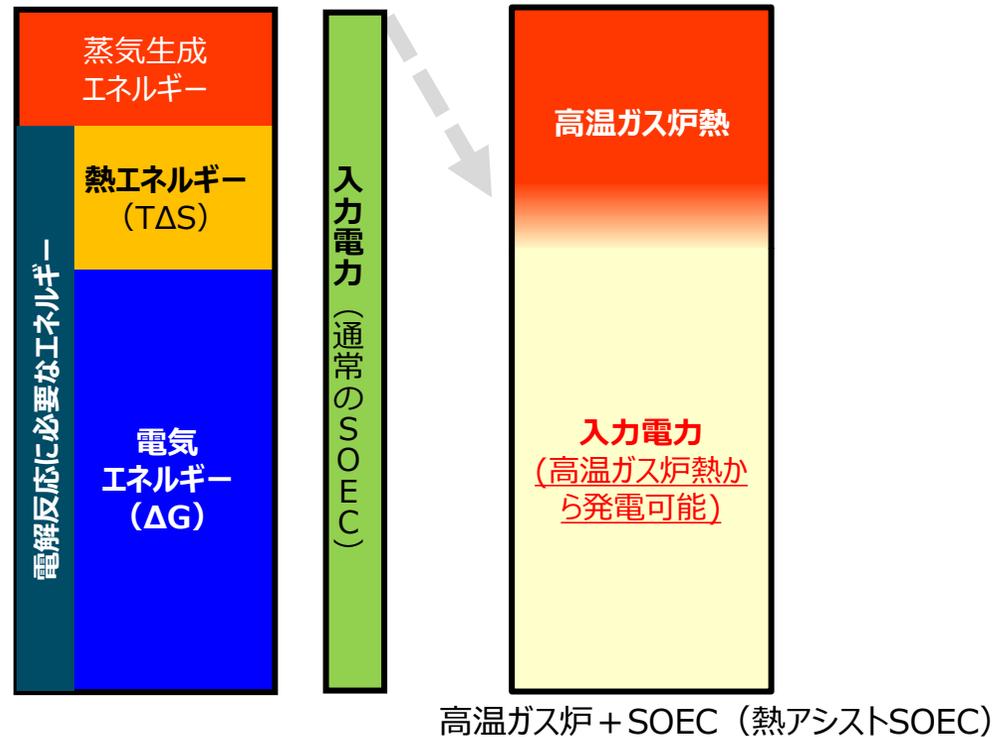
◆ 排熱を発電利用することで高温ガス炉の熱エネルギーで水蒸気電解が可能

(注)IHX：中間熱交換器

本報告は経済産業省資源エネルギー庁 高温ガス炉実証炉開発事業 JPMT007141の成果の一部を含む

5.5.1 当社の熱アシストSOECコンセプト

- 高温ガス炉に接続する熱アシストSOEC
 通常のSOECは過熱蒸気の生成※及び水分解に必要なエネルギーを**全て電気エネルギーで供給**。
※：外部から低温蒸気を供給されるシステムもあり、高温熱の回収もしている。
 熱アシストSOECの概念は、**過熱蒸気の生成に必要な熱エネルギー、及び水電解反応に必要な熱エネルギーを高温ガス炉から供給**する。さらに、システム温度を維持するためのエネルギーも高温ガス炉から供給可能。



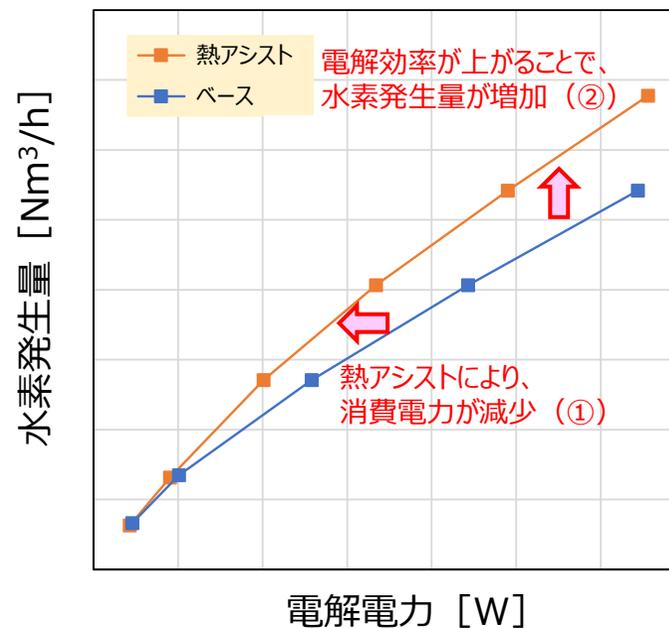
本報告は経済産業省資源エネルギー庁 高温ガス炉実証炉開発事業 JPMT007141の成果の一部を含む

■ 円筒型SOECセルスタック試験

高温熱をSOECセルスタックに供給し、**高温熱により水素発生に必要な電気エネルギーが低下し**
 (①)、**同じ電力を供給すれば、高温熱で水素製造量が増加** (②) することを確認した



単セルスタック試験装置外観
 (写真左：セルスタック、中央：電気炉、右：圧力容器)

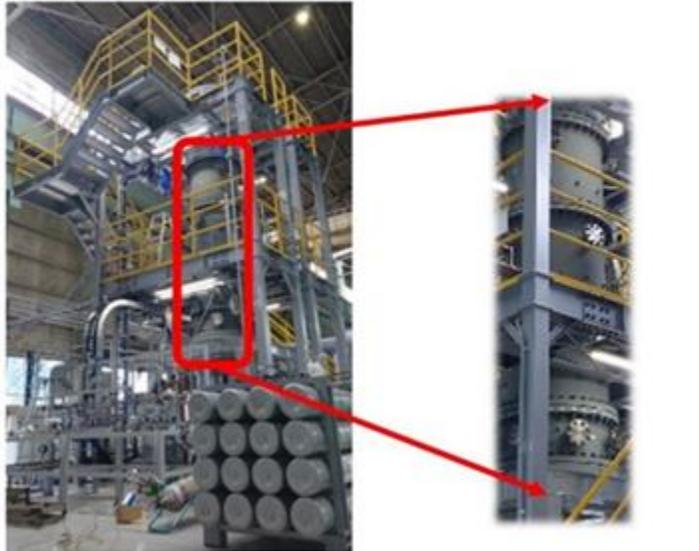


電解電力と水素発生量の関係

本報告は経済産業省資源エネルギー庁 高温ガス炉実証炉開発事業 JPMT007141の成果の一部を含む

メタン熱分解

メタン投入量 : ~ 8 Nm³/h
水素発生量 : ~ 2 Nm³/h
≒ 7kW_{-HHV} クラス



メタン熱分解連続式加圧流動床試験装置

出典：三菱重工技報（メタン熱分解試験装置及びSOECカートリッジ試験装置）
<https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/611/611030.pdf>

SOEC



SOEC試験装置

SOECカートリッジ

当社高砂水素パークに設置したSOECデモ機（400kW容量）



出典：三菱重工プレス <https://www.mhi.com/jp/news/240425.html>

1. カーボンニュートラルに向けた水素の重要性について
2. 三菱重工原子力事業の取組のご紹介
3. 高温ガス炉について
4. HTTRを用いた水素製造実証事業について
5. 高温ガス炉と親和性のあるカーボンフリー水素製造技術
6. まとめ

6. まとめ

- 2050年カーボンニュートラル実現には、主要排出部門でのCO₂削減として水素還元製鉄等の脱炭素技術の開発が進められているが、そのためにも大量、安定なカーボンフリー水素の供給が必要であり、水素大量製造と安定供給、エネルギーセキュリティの観点から原子力で水素製造することが望ましく、最高950℃の**高温熱を供給できる高温ガス炉を水素製造に活用することが有効**。
- 高温ガス炉は熱化学的に安定なヘリウムを冷却材に採用しているが、万一冷却材を失った場合でも、炉心溶融を起こさない優れた安全性を有する原子炉である。**当社は高温ガス炉実証炉開発事業の中核企業として、2030年代後半の高温ガス炉実証炉の運転開始を目指す**。
- 高温ガス炉で水素大量製造技術実証として、**商用技術が確立されているメタン水蒸気改質法による水素製造施設をHTTRに接続する計画**を推進している。また、**高温ガス炉と親和性のある水素製造装置を高温ガス炉カーボンフリー水素製造技術として適用すべく、熱アシストSOEC等の要素技術を開発に着手しており、その開発を踏まえてシステムレベルの実証を進めていく**。
- 三菱重工は、これらのプロジェクトへの参画を含め、原子力技術を通じてカーボンニュートラルエネルギーによる水素安定供給の実現や経済安全保障・循環型経済（地産地消）の実現に貢献していく。

