

エネルギーを巡る社会動向を踏まえた革新炉開発の価値

令和4年4月20日

資源エネルギー庁

- 1. カーボンニュートラル実現に向けた社会全体の変革**
2. 革新炉による貢献の可能性
3. 革新炉開発に求められる価値の評価軸

1 - 0. カーボンニュートラル（CN）に向けた社会変革

- 近年、期限付きカーボンニュートラル目標を表明する国・地域が急増し、そのGDP総計は世界全体の約90%を占める（前回COP終了時には約26%）。
- こうした中、金融市場の動きも相まって、あらゆる産業が、脱炭素社会に向けた大競争時代に突入。環境対応の成否が、企業・国家の競争力に直結することに。

カーボンニュートラルの波

<期限付きCNを表明する国地域の急増>

COP25
終了時
(2019)

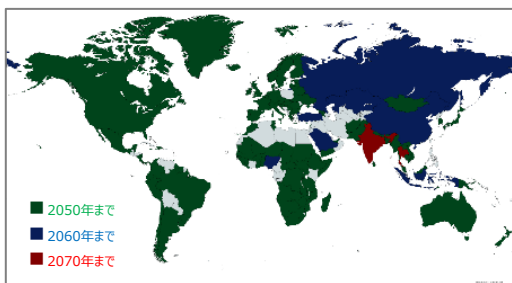
- 期限付きCNを表明する国地域は121、世界GDPの約26%を占める

COP26
終了時
(2021)

- 期限付きCNを表明する国地域は154、世界GDPの約90%を占める

(出所) World Bank, World Development Indicators, GDP (constant 2015 US\$)

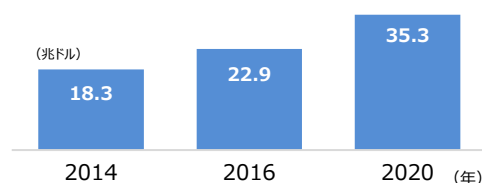
(参考) COP26終了時点のCN表明国地域



金融機関の動き

<世界的なESG投資額の急増>

- 全世界のESG投資の合計額は、2020年に35.3兆ドルまで増加



(出所) GSIA「Global Sustainable Investment Review」

<企業情報開示・評価の変化>

- 企業活動が気候変動に及ぼす影響について開示する任意枠組み「TCFD」に対し、世界で2,616の金融機関等が賛同
- また、「TCFD」は、情報開示だけでなく、インターナショナル・カーボンプライシングの設定も推奨

産業界の対応

<サプライチェーン全体の脱炭素化>

- 国内外で、サプライチェーンの脱炭素化とそれに伴う経営全体の変容（GX）が加速

海外

Microsoft	2030年まで
Apple	2030年まで

国内

リコー	2050年まで
キリン	2050年まで

カーボンニュートラル表明

<GX時代における新産業の萌芽>

- 商品価格・機能に加えてカーボンフットプリントが購買判断の基準になるような、消費行動の変容を促す新産業が発展
- また、脱炭素関連技術の開発・社会実装について、大企業のみならず、スタートアップが主導するケースも増加

環境対応の成否が、企業・国家の競争力に直結する時代（GX時代）に突入

【参考】ファイナンスを巡る動き

- 2015年に、企業活動が気候変動に及ぼす影響について開示する**任意枠組み「TCFD」**が発足。世界2,616機関が賛同し、賛同金融機関の資産額合計は194兆ドル（2021年10月）。
- さらに近年、国際会計基準（IFRS）による非財務情報開示基準策定の取組や各国内の規則見直しにより、**TCFD義務化の動きが加速**。
- また、年金・生保、アセット・マネージャー、銀行、損保等の**金融機関がネットゼロ加速のアライアンスを形成**。賛同機関は、資金供給先の排出削減をコミットし、削減計画と進捗、実績を公表。

気候関連財務情報開示義務化の動き

国際会計基準（IFRS）	● TCFDの枠組みに従い、既存のサステナビリティ関連開示基準を統合し、IFRSに盛り込む方向で検討が進展。
英国	● 2022年4月を目途に、会社法において大手非上場企業も含めてTCFDに基づく開示を義務化する見込み
日本	● 2021年6月に改訂されたコーポレートガバナンス・コードにおいて、2022年4月開始の東証プライム市場に上場する企業に対しTCFD又はその同等の開示を義務化

GFANZ (Glasgow Finance Alliance for Net Zero)

- ✓ 2021年4月設立の金融イニシアチブ。年金・生保、アセット・マネージャー、銀行、損保のアライアンスを束ね、2050年ネットゼロ実現の加速を目指す動き。元イングランド銀行総裁マーク・カーニー、マイケル・ブルムバーグが共同議長。
- ✓ 11月3日、GFANZの**参加金融機関は450以上、その金融資産合計は130兆ドル越え。これら主要な金融機関こそが今後30年で必要とされる100兆ドルを提供**できると発言。賛同機関は、ネットゼロ、2030年までの半減にコミット。賛同金融機関は5年間の詳細な削減計画を毎年公表することになる。
- ✓ 主な賛同機関：バンクオブアメリカ*、Citi *、HSBC *、ブラックロック*、第一生命*、ロックフェラー基金*、三菱UFJG、SMBC、みずほFG、アセットマネジメントOne、野村HD、DBS銀行（星）、ハナ銀行（韓） * GFANZ主導グループのメンバー

【参考】EUタクソノミーにおける原子力と天然ガスの位置づけ

- EUタクソノミーは、EUのサステナビリティ方針に資する経済活動を明示した、いわば「グリーン・リスト」。
※企業が基準に合致する旨を開示することで、「グリーン債券」の発行等を通じて資金調達しやすくなる効果がある。
- 欧州委員会は加盟国等からの意見聴取を経て、2022年2月2日付で原子力および天然ガスの取扱いに関するドラフトを承認。
- 今後、加盟国や議会等との議論を経て、4～6カ月以内に理事会・議会で可決される見込み。

補完的委任規則（complementary Delegated Act）における原子力と天然ガスの記載

以下の条件に適合する原子力・天然ガスについてはEUのサステナビリティ方針（気候変動緩和・適合）に資する。

原子力	天然ガス
・<u>2045年までに建設許可</u>を受けた新規原発。 ・<u>2040年までに延長認可</u>を受けた既設原発。 ・<u>放射性廃棄物の管理について、資金面や処分場の計画についての条件あり。</u> ＜具体的には以下のような条件を記載＞ ・放射性廃棄物の管理等の資金を確保すること ・低レベル/中レベルの放射性廃棄物の運用可能な処分施設を有すること ・2050年までに高レベル放射性廃棄物処分施設が運用開始できるよう 詳細な文書化された計画を有していること ・2025年からは事故耐性燃料(※)を実装すること 等 ※燃料被膜管に新素材を活用する等、シビアアクシデントに至る事象が発生した場合でも事故リスクを低下させる技術	<u>CO2の排出量によってはグリーンと認定</u>。 ※具体的には、 ・<u>100 g CO2/kWh未満</u>のもの、又は、 ・2030年までに建設許可を得たものであれば、 ①<u>270gCO2/kWh未満</u>であるもの、又は、②<u>20年間にわたる年間平均排出量が550kgCO2/kW以下</u>のものが対象。 さらに、既存の高排出な火力発電所の建て替えに限定する等、複数の条件あり。 ⇒日本の一番発電効率が良いガス火力でも327gCO2/kWh程度のため、<u>発電所のプラントから排出されるCO2を回収し地下に貯蔵するCCSを行う、または、水素を約50%程混焼する、もしくは稼働率を20%未満とする必要があり、極めて厳しい基準。</u>

【参考】海外企業の動き（サプライチェーンの脱炭素化）

- 製造業においても、サプライチェーン全体でのカーボンニュートラルを目指して取り組むグローバル大企業が現れ始めている。
- デジタルを活用し、サプライチェーン上のCO2排出量を可視化するサービスも活発に。

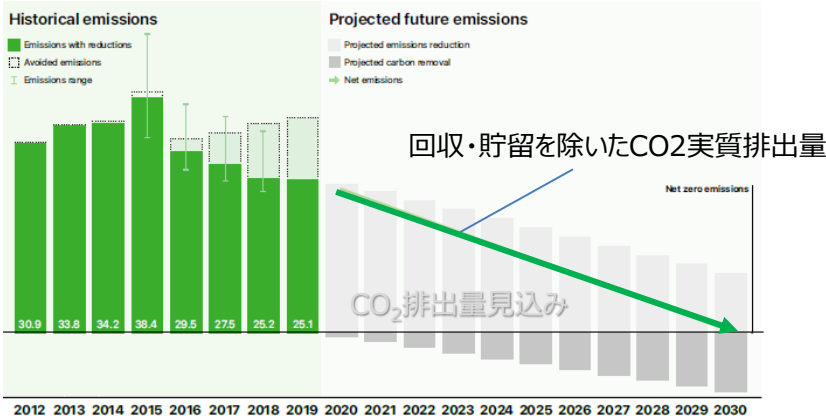
米・Apple：2030年までにサプライチェーン脱炭素化

- 2020年7月、2030年までにサプライチェーンも含めたカーボンニュートラルを目指すと発表し、サプライヤーがApple製品の製造時に使用する電力についても2030年までに再生可能エネルギー100%を目指す、との目標を掲げた。
- この要求に応じると宣言したサプライヤーは2020年7月時点で**計71社**。このうち国内企業は、半導体関連製品を供給するイビデン（株）や、液晶画面のシートを製造する恵和（株）など、**計8社**。

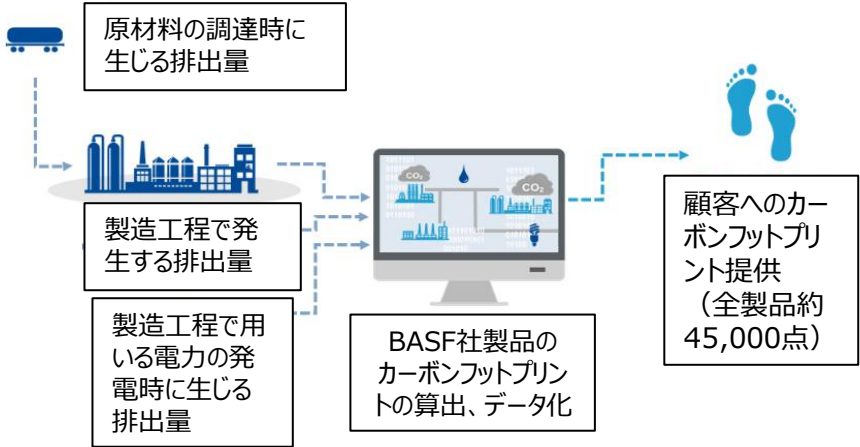
独・BASF：全製品のカーボンフットプリントを提供

- 2020年7月、製品の原材料調達から出荷までの温室効果ガス排出量（カーボンフットプリント）を算出し、顧客への提供を開始すると発表。
- 2021年末までには、全製品について、カーボンフットプリントのデータを提供できるようにする予定。
- BASF社の製品を用いて最終製品を製造するメーカーにとっては、これらのデータを用いることで、自社製品のカーボンフットプリントを算出することが容易となる。

【Apple製品の製造から廃棄・リサイクルに至るライフサイクル全体でのCO2排出量】



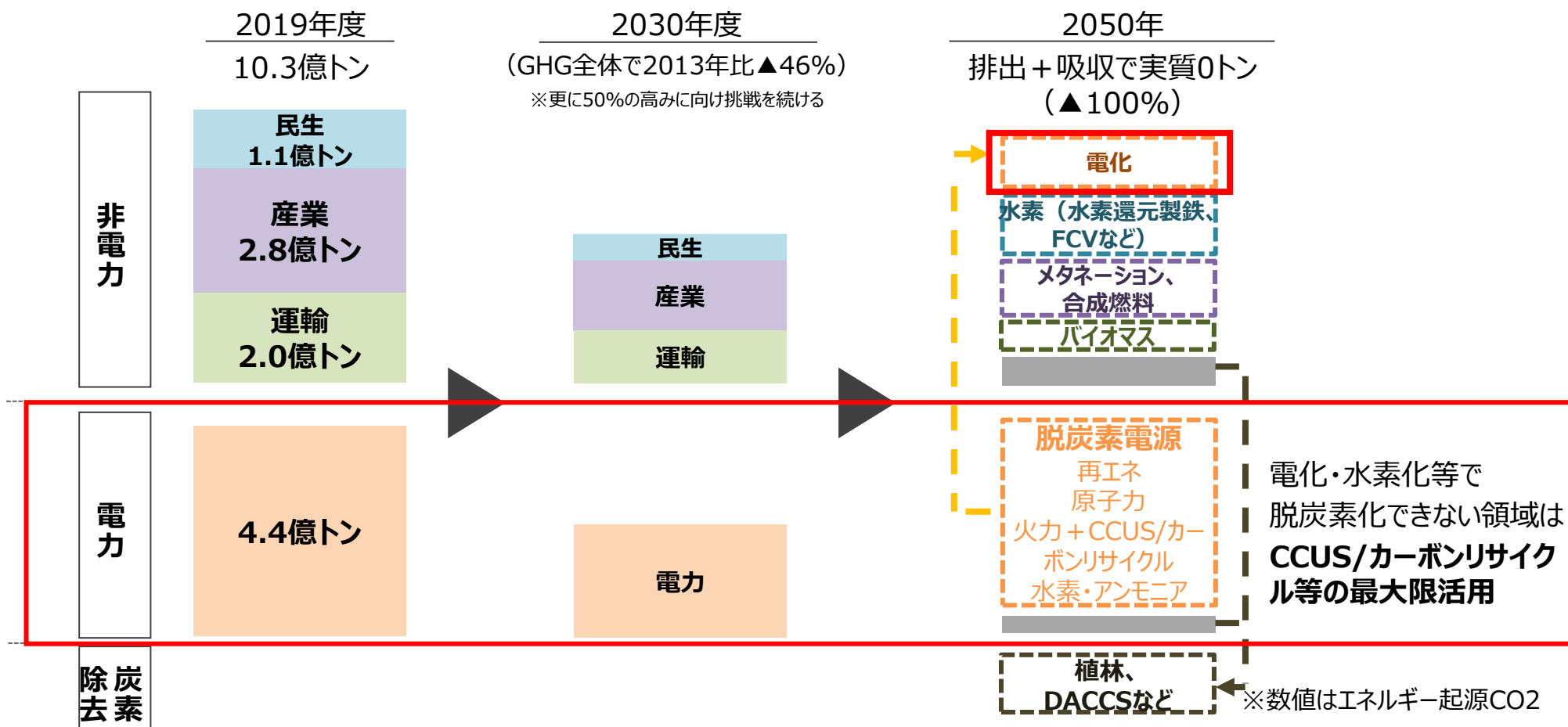
（出所） Apple「Environmental Progress Report 2019」を基に経済産業省作成



（出所） BASF「Product Carbon Footprint」を基に経済産業省作成

1 - 0. 2050年CNに向けたエネルギー構造の变革

- 社会全体でのCN実現には、①電力部門では脱炭素電源の拡大、②産業・民生・運輸部門（燃料/熱利用）では脱炭素電源による電化、水素化、メタネーション、合成燃料等を進めることが必要。
- デジタル化に伴う電力消費拡大等により、2050年に向け電力需要は現在より増大が見込まれる。



1 – 1. 2050年の電力需要量予想の例（電力需要の増大）

- 研究機関、シンクタンク等の分析によると、国内電力需要量は2030年以降、現在よりも増加。
- 最終エネルギー消費部門（産業＋業務他＋家庭＋運輸）の需要量は減少する一方で、電化率の上昇や水素生産用の需要増により、2050年は1.3兆～1.6兆kWhとなる試算。

<2050年シナリオ分析の結果 比較（標準的なシナリオを抽出）>

		RITE （参考値のケース）	国立環境研究所	自然エネルギー財団	デロイトトーマツ コンサルティング	日本エネルギー 経済研究所 （標準ケース）
分析における 想定	マクロフレーム	GDP成長率：30年まで1.6%成長 50年まで0.4%成長 （SSP2シナリオ）	GDP成長率：30年まで1.7%成長 50年まで0.5%成長 （内閣府成長実現ケース SSP2シナリオ参照）	人口減少（2050年－20%）を目安 に、需要レベルを一定の割合で減少	部門別で業種・用途ごとにサービス需 要を推計人口動態を反映	GDP成長率：年率平均1.0% マクロ経済モデルによって部門別で業種・用 途ごとにエネルギーサービス需要を推計
	技術・需要 想定	モデル内で500の技術を想定し積み上げ	モデル内において600の技術 を想定して積み上げ 民生：電化7-9割＋断熱向上 運輸：自動車8-10割電動化 ＋リモートワーク進展・物流効率改善 産業：電化・水素化 ＋マテリアル利用効率改善	民生・産業部門は マクロで需要のサービスレベルを想定、 その後モデルにより想定される技術導入で、 電化・エネルギー転換を算定 運輸はモード毎のエネルギー種別・消費と そのエネルギー転換を別途算定 高温熱需要向けグリーン水素の50%を輸入	P2GやV2G(充電のみ)等のセクターカップ リングを想定 再エネ、火力、原子力等の電力供給、 蓄電池、水素等のエネルギー貯蔵 給湯、空調等の需要をインプット	300超の需要側・供給側技術を考慮。 産業・運輸・民生部門を合計37のサービス需要 区分で表現し、需要側の技術選択に応じてエネ ルギー効率改善や燃料転換を表現。 民生ヒートポンプ給湯器のDRおよびV2Gを考慮。
エネルギー 需要分析	エネルギー消費	最終エネルギー消費：31%減 （2015年比）	最終エネルギー消費：42-49%減 （2018年比）	最終エネルギー消費：54%減 （2020年比）	最終エネルギー消費：約20%減 （2020年比）	最終エネルギー消費：42%減 （2019年比）
	電化率	46%	49-51%	－	約41%	41%
	電力需要	1.4兆kWh弱 （発電量）	1.4-1.6兆kWh （発電量）	1,470TWh （総電力需要）	1.45兆kWh （発電量）	1.3兆kWh （発電量）
	電力需要	電力最終消費は25%増 （2015年比） DACCS用の電力需要が総発電電力量の 3%程度ある	電力最終消費は横ばい 水素製造用の需要が6000億kWh程 度	[内訳]一般電力需要：679TWh、 熱需要：230TWh、運輸需要： 100TWh、 水素製造：431TWh、送電蓄電ロス 等：30TWh	電力最終消費は約11%増 （2020年比） 例えば、水素製造用の電力需要が 総発電電力量の約9%程度ある	電力最終消費は2019年比で微減 DACCS用の電力需要が2000億kWh

【参考】各国の自動車の電動化目標

● 日本国内の運輸部門のエネルギー消費の9割を占める自動車部門において、日本を含む世界各国で2030年代にかけて自動車の電動化目標を掲げる動き。

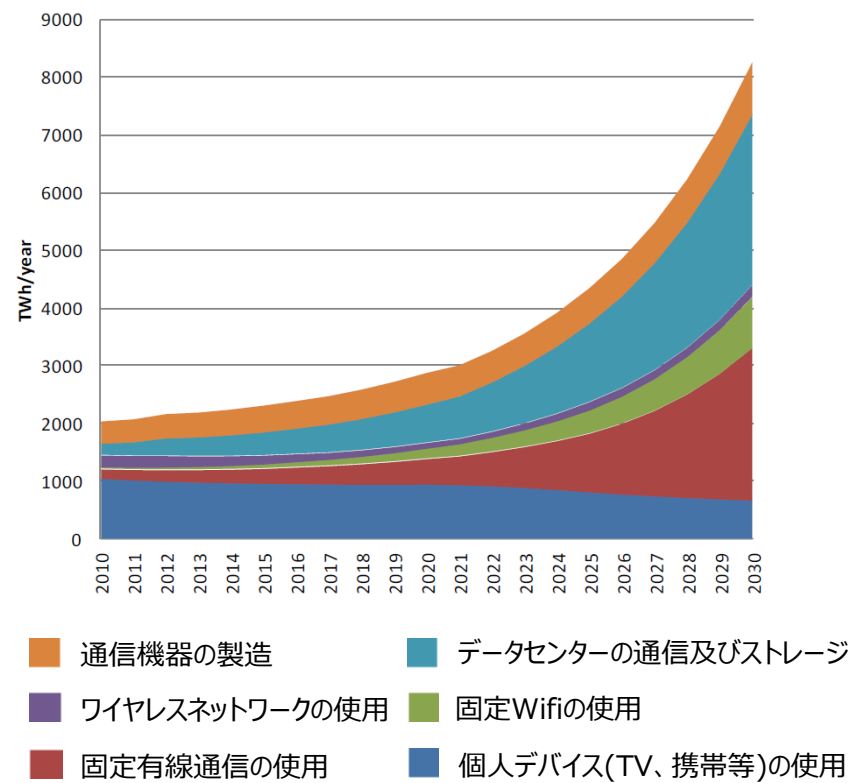
	目標年度	目標	FCV	EV	PHEV	HEV	ICE
日本 	2030	HV：30～40% EV・PHV：20～30% FCV：～3%	～3%	20-30%		30～40%	30～50%
	2035	電動車(EV/PHV/FCV/HV) 100%	100%				対象外
EU 	2035	EV・FCV：100% (注) 欧州委員会提案	100%		対象外		
米国 	2030	EV・PHV・FCV：50%	50%			50%	
中国 	2025	EV・PHV・FCV：20%	20%				
	2035	HEV50% EV・PHV・FCV：50% (注) 自動車エンジニア学会発表	50%			50%	対象外
英国 	2030	ガソリン車：販売禁止 EV:50～70%		50-70%			対象外
	2035	EV・FCV：100%	100%		対象外		
フランス 	2040	内燃機関車：販売禁止	100%		対象外		
ドイツ 	2030	EV： ストック1500万台		ストック 1500万			

【参考】消費電力量の将来予測例（通信・産業部門）

- AIや5Gなどの技術を活用したさまざまなITサービスが浸透していくことにより通信機器の使用頻度が増加、世界全体の電力消費量が今後増加するとする予測も。
- 産業部門においても、熱需要の電化や水素生産に伴う大幅な電化ポテンシャル。

2030年までの通信部門の電力消費量の推移

■今後の効率化の進展に依存するものの、2030年における通信機器における世界の電力消費量は2020年と比べ**約2.5倍**になるとする試算も。



※電力効率の改善度が最も高い、期待水準、最も低い3つのシナリオが存在。
本図は改善度合が中間に値する期待水準シナリオから引用

産業部門の将来の電化ポテンシャルの検討

■電気分解水素による、有機化学での原料代替や鉄鋼の水素還元等の間接電化も考慮した結果、10業種合計で**約8,500億kWh**との評価

業種	電力消費量 (TWh)		概要
	2016年度	ポテンシャル	
紙・パルプ	31	62	古紙パルプの乾燥工程、空調を電化。加えて、木材パルプの乾燥工程のうち黒液を使わない一部分をヒートポンプ(HP)に代替
無機化学	11	23	直接加熱、ボイラの100%を電化
有機化学	30	295	ボイラの全電化と原料代替
医薬品	3	15	ボイラのすべてを電化
石油・石炭製品	2	7	一部の蒸気駆動を電気駆動に置換
窯業・土石	18	26	ガラス溶融の20%を全電気溶融に転換
鉄鋼（高炉）	58	353	空調、ボイラ用途を電化。製造プロセスを水素還元へ転換
鉄鋼（電炉）	12	14	圧延前加熱の電化
非鉄金属	13	23	HPによるボイラ代替に加え、プロセス直接加熱の100%を電化
輸送機械	26	32	塗装工程は蒸気をすべてHPに置換。浸炭工程もすべて電気熱源による真空浸炭へ置換
合計	204	850	

【参考】脱炭素電気ニーズの高まり

- 世界で120以上の国・地域、グローバル企業などが続々とカーボンニュートラルを表明する中、企業・産業界・国のそれぞれのレベルで、脱炭素社会に向けた大競争時代に入。気候変動対策と統合的なビジネス戦略・国家戦略が、国際競争力の前提条件になりつつある。

事業活動における脱炭素化

海外に加え、日本でもサプライチェーン全体での脱炭素化を目指す動きが見られる

		目標年
海外	Microsoft (IT)	2030
	Apple (IT)	2030
国内	武田薬品工業 (製薬)	2040
	リコー (エレクトロニクス)	2050
	キリン (食料品)	2050

カーボンニュートラル

投資家の動向

世界的にESG投資（2018年：3000兆円）が伸びる中、日本でも環境ファイナンスが拡大

<世界全体のESG投資額推移（兆USD）>

年	投資額 (兆USD)
2018	18.3
2019	22.9
2020	30.7

<サステナブルファイナンス目標（うち環境関連）>

	目標金額	目標年度
3メガバンク	30兆円	2029～2030

（出典）GSIA “Global Sustainable Investment Review”
各社プレスリリース

企業価値評価への導入

企業価値評価において、脱炭素の水準を考慮する動きが見られる

<TCFD>

提言書の中で、インターナル・カーボンプライシングの設定を推奨。

<CDP>

国際的なイニシアチブであるCDPは、企業への気候変動の質問書におけるカテゴリーの1つとして、カーボンプライシングを設定し、気候変動の取組を評価。

企業

CSRの一環で環境活動を実施

ESGやSDGsなど
経営課題として対応

産業界

自社内で低炭素化へ取組

サプライチェーン全体で
脱炭素化へ取組

国

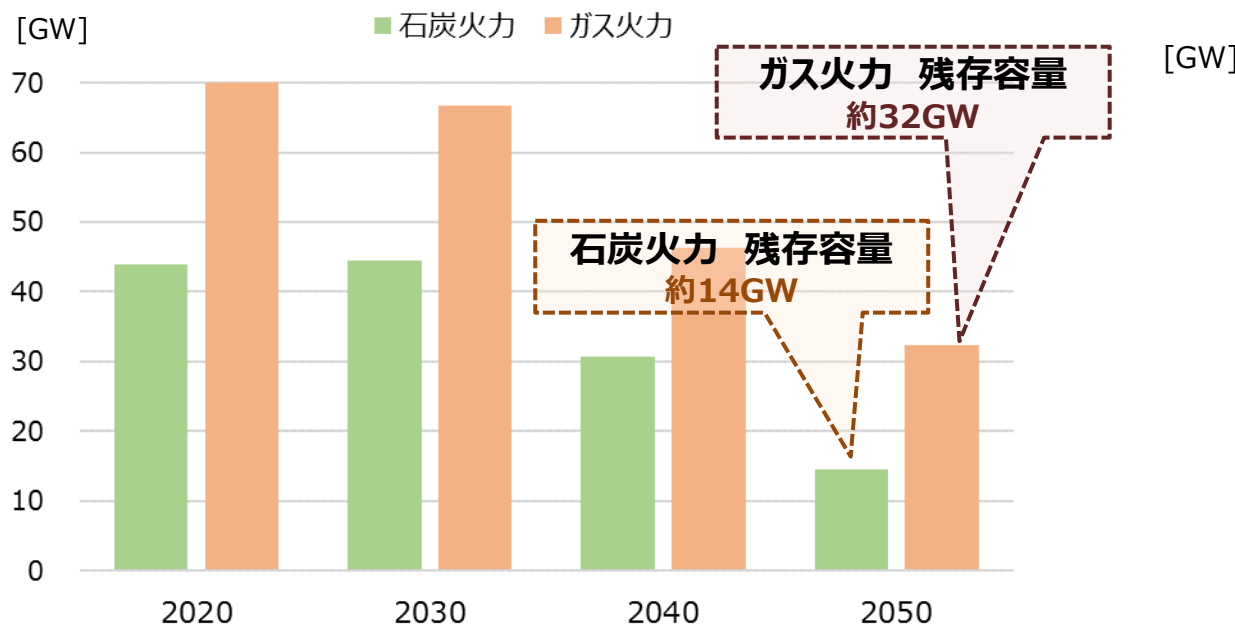
環境対応コストが低い方が
立地競争上優位

環境対応への遅れが
立地競争上不利に

【参考】設備容量が減少していく火力発電の代替の必要性

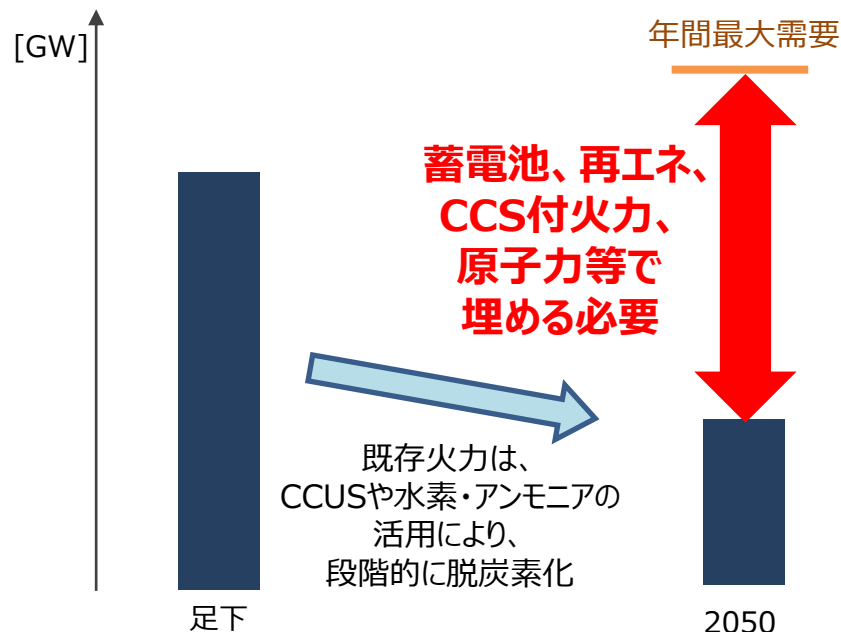
- 現在建設中の設備及び既運転の設備を対象とし、寿命を40年と想定すると、**今後の新規の新設案件がないという仮定**の下でも、**2050年時点でガス火力は約32GW、石炭火力発電は約14GWとなる。**
- また、**再エネの導入が拡大**する状況の中、火力発電は、
 - ー 太陽光や風力の出力変動を吸収し、**需給バランスを調整を行う調整力**や、
 - ー 急激な電源脱落などにおける周波数の急減を緩和し、**ブラックアウトの可能性を低減する慣性力**といった機能により、**電力の安定供給に貢献**してきた。
- 今後、こうした機能をもつ**火力を代替する技術・脱炭素化する技術（水素・蓄電池・CCUS等）の技術開発・普及や新規投資の活性化**を促進し、電源の**脱炭素化を進めていく**ことが必要。

火力発電の容量推移（寿命を40年と想定）



* 既設・建設中の火力発電設備を対象に、設備寿命を40年として算出

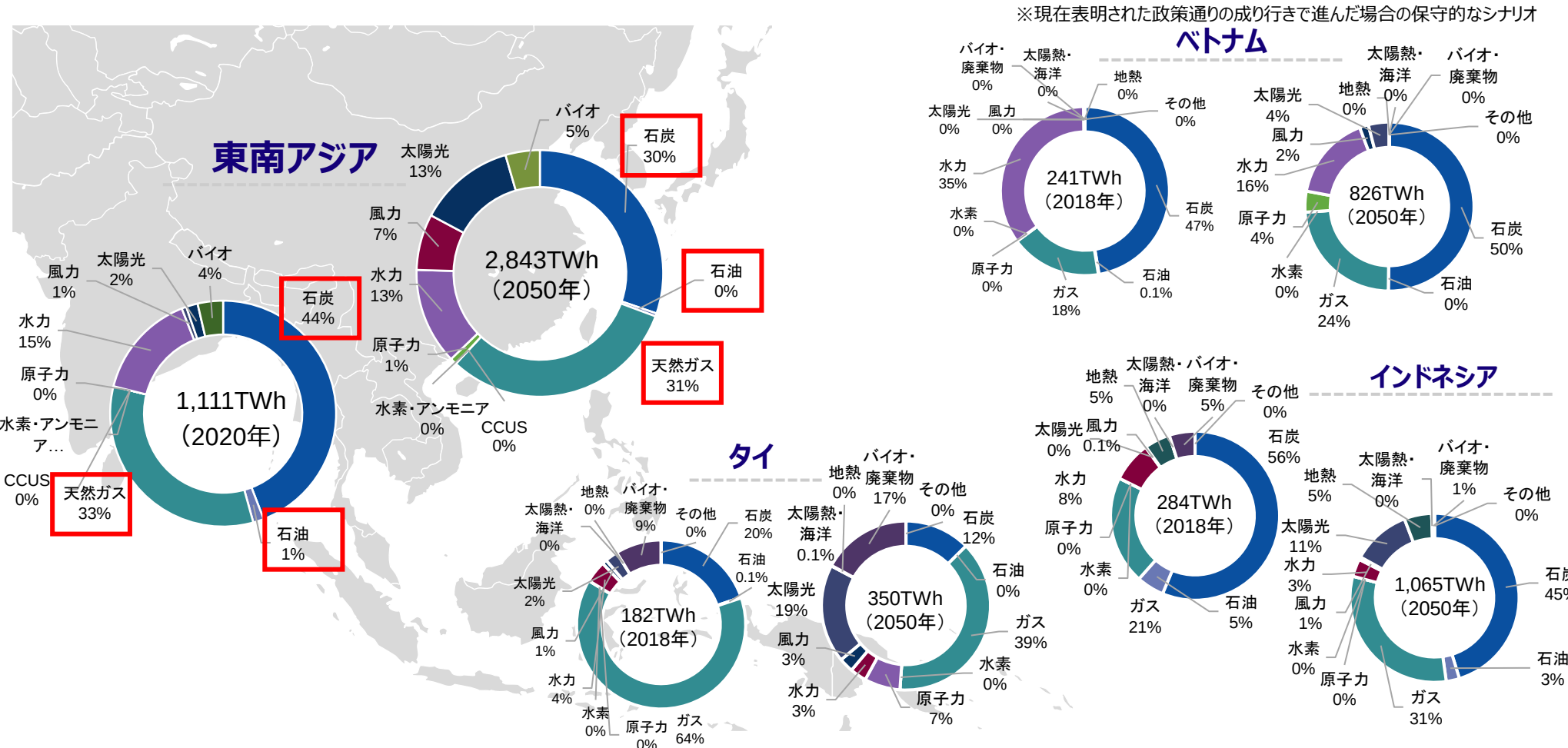
2050年における火力発電の設備容量と年間最大需要のイメージ



※令和3年4月22日総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会（第41回会合）より一部編集

【参考】電力需要増大が見込まれる東南アジアは火力頼み

- 東南アジアでは、電力需要が今後約30年間で2.5倍以上の伸び。
- 再エネの導入も拡大していくが、現行政策シナリオでは、引き続き、**化石燃料による発電が太宗**を占める見通しの中で、**火力発電の脱炭素化が課題**に。



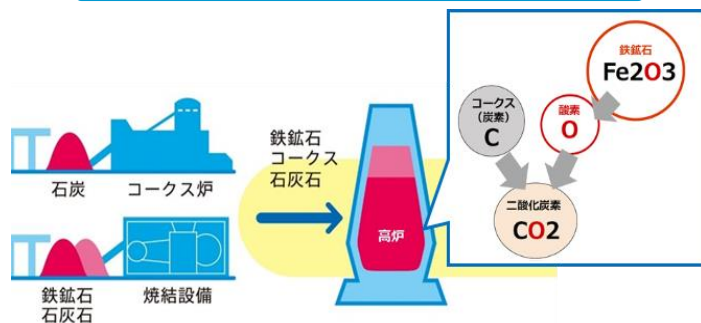
*1：各国の最新値 インド（2020年）、バングラデシュ・ネパール・スリランカ・ブータン（2019年）、パキスタン（2015年）、アフガニスタン・モルディブはデータ収集不可のため排除
出所：IEA “World Energy Outlook2021” Stated Policies Scenario、IRENA各国レポート、IEEJ Outlook 2021、ADB “energy Outlook for Asia and the pacific”（2030年目標数値は目視確認）
※令和4年3月1日 産業構造審議会 産業技術環境分科会 グリーントランスフォーメーション推進小委員会／総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 2050年カーボンニュートラルを見据えた次世代エネルギー需給構造検討小委員会 合同会合から一部編集

12

1 - 2. 製造業のCNに向けた変革

- 素材産業におけるCNに向けては、水素還元製鉄や熱・電力のカーボンフリー化が必須に。
CO₂を排出しない大量・安価かつ安定的な水素・熱・電力の供給が求められる。

CO₂発生プロセス（鉄鋼）



（出典）一般社団法人日本鉄鋼連盟資料を基に作成

CO₂発生プロセス（セメント）



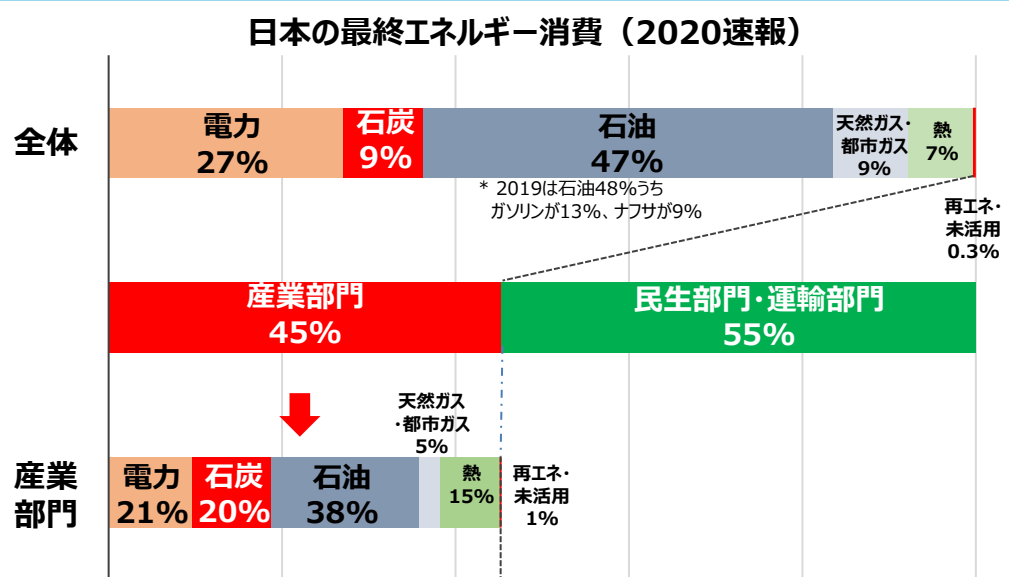
（出典）一般社団法人セメント協会資料を基に作成

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
非鉄金属製造業	・電気分解で 電力を消費	・電力のカーボンフリー化

出典：国立研究開発法人国立環境研究所「日本の温室効果ガス排出量データ」（2019年度確報値）

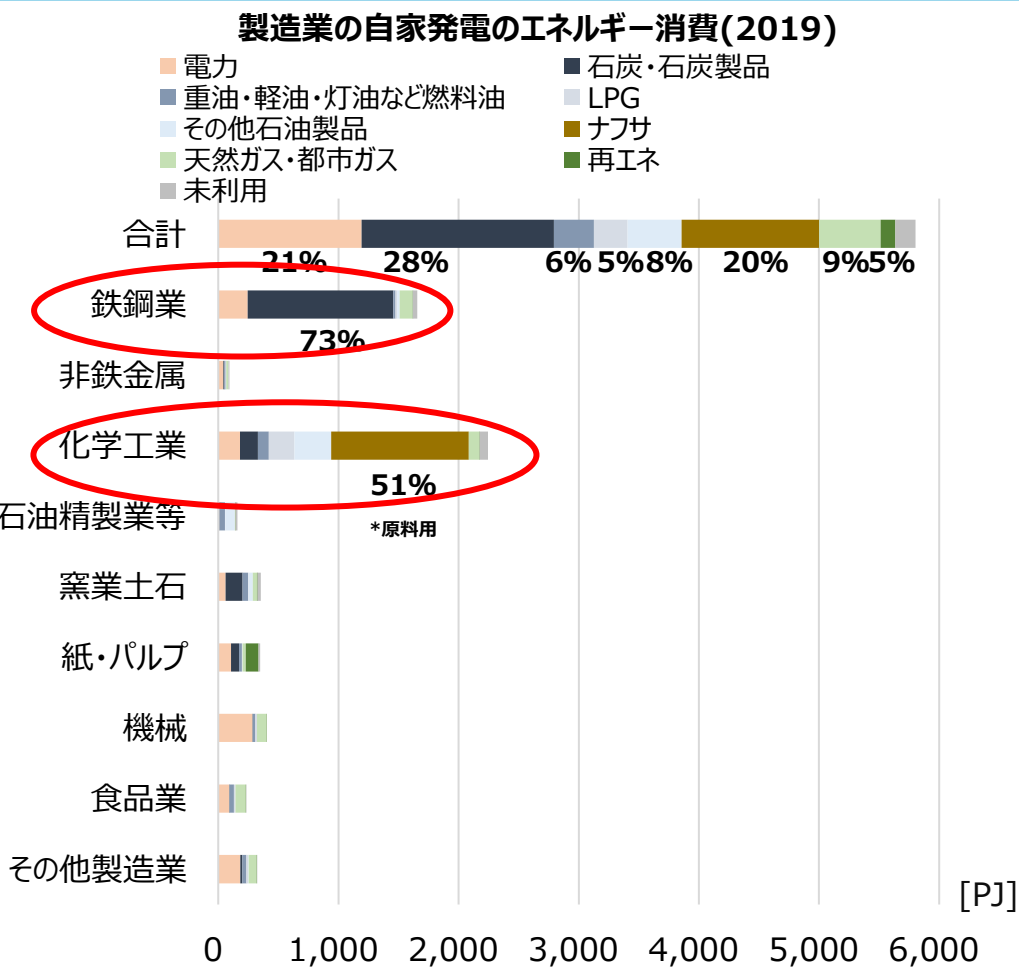
【参考】製造業における非電力（熱・燃料）需要の実態

- 日本におけるエネルギーの使い方（最終エネルギー消費）は電気が約1/4。残りは化石燃料を主体とする熱・燃料（原料含む）となっている。
- 製造業では、非電力由来の熱・燃料（原料含む）需要が大宗を占め、業種毎にエネルギー源の使い方や脱炭素コスト水準は様々。（例：化学 水素パリティコストは18.5 円/Nm³、製鉄 8.0 円/Nm³）



部門・産業別の水素パリティコスト	
	パリティコスト [円/Nm ³]
FCトラック	50.0
内航船	23.3
化学	18.5
水素発電	14.3
製鉄	8.0

※パリティコスト：
既存の燃料や原料と同じ
費用となる水素価格



(参考) 水素に係る海外動向

- EUやドイツやオランダ、豪州など多くの国で水素の国家戦略が策定されるなど、世界中で取組が本格化。
- 脱炭素化が困難な商用車（HDV）や産業分野での水素利用や、水素発電の導入、水素輸入に向けたサプライチェーンの検討等の動きが進展。

ドイツ

- 2020年6月に国家水素戦略を策定。国内再エネ水素製造能力の目標を設定（2030年5GW等）。
- 2020年6月3日に採択した経済対策において、国内の水素技術の市場創出に70億ユーロ、国際パートナーシップ構築に20億ユーロの助成を予定。
- 水電解による水素製造設備に対して、再エネ賦課金を免除。加えて、再エネ由来水素等の大規模輸入に向けたサプライチェーン構築事業（H2 Global）を実施予定。
- 大型FCトラック向けの水素充填インフラ構築を支援。

米国

- 新車販売の一定割合をZEVとする規制の下、カリフォルニア中心にFCVの導入が進展（8000台超）。2024年からは商用車もZEV規制適用開始。
- ユタ州でグリーン水素を活用した大型水素発電プロジェクトを計画。2025年に水素混焼率30%、2045年に100%専焼運転を目指す。（三菱重工がガスタービン設備を受注）
- ロサンゼルス港のゼロエミッション化に向けた構想の一環で、大型輸送セクターでの水素利用の検討が進む。
- DOEは大型FCトラックの開発を支援。
- 2022年2月に地域クリーン水素ハブや、クリーン水電解プログラムなどに総額約100億ドルを拠出することを発表

EU

- 2020年7月に水素戦略を発表。
- 2030年までに電解水素の製造能力を40GWを目指す。
- 暫定的に、低炭素水素(化石+CCUS)も活用を志向するが、長期的には再エネ水素のみを「クリーン水素」と定義。
- 水素パイプラインの整備に必要な制度改革に着手。
- 官民連携によるクリーン水素アライアンスを立ち上げ。
- 輸送分野では、HDVでの水素利用を重視。

フランス

- 2020年9月に水素戦略を改訂。
- 2030年までに電解装置6.5GWの設置を目指す。
- 水素の生産に使用する電力としては、再生可能エネルギーおよび原子力発電由来の電力を想定。
- 産業に加え、FCトラックが水素活用先の優先項目に。

中国

- 2020年に業界団体(中国汽车工程学会)が、野心的なFCVの普及目標を策定(2030年100万台)。
- 商用車中心に、約9000台が導入済(21年末)。また、水素ステーション数は世界最大の178箇所(22年1月)
- 燃料電池等のサプライチェーン整備を目的とし、中央政府がモデル都市(5都市群)を選定し、FCV等の技術開発・普及状況に応じて奨励金を与える政策を実施中

【参考】各国の水素戦略

国	政策・方針等	コスト目標	目標量	政府支援*	備考
米国	水素ショット(2021) ロードマップ(2020)	10年以内に 1ドル/kg以下 (約115円/kg)	2050年までに 国内需要ベースで 6,300万トン	2030年までに 110億ドル (約1.27兆円)	・現在の再生可能エネルギー由来水素は約5ドル(575円)/kg ・水素製造コストを80%削減 ・2050年までに二酸化炭素排出量を16%削減
カナダ	水素戦略 (2020)	2050年までに 1.50~3.50 カナダドル/kg (約135~315円/kg)	2050年までに 国内供給量 2000万トン以上	2026年までに 15億カナダドル (約1455億円)	・2025年までの中間目標として、国内エネルギーの6.2%を水素で供給、国内供給量400万トン/年以上など ・政府支援額はグリーン燃料基金全体での金額 ・水素使用用途：発電、輸出、工業、船舶、交通など
英国	10ポイント計画 (2020) 水素戦略(2021)	(情報なし)	2030年までに 電解槽容量で 5GW	2030年までに 最大5億ポンド (約775億円)	・ツイントラックアップアプローチ(グリーン水素とブルー水素の両方を支援)を採用 ・低炭素水素実現のための道筋の1つとして原子力利用の可能性にも言及
仏国	水素導入計画 (2018) 脱炭素水素開発 の国家戦略(2020)	2028年までに 2~3ユーロ/kg (約260~390円/kg)	2030年までに 電解槽容量で 6.5GW	2030年までに 70億ユーロ (約9100億円)	・2030年までの目標として、左記のほか、ヘビーモビリティのCO2排出量を600万トン削減、5~15万人の雇用を創出などを目標として設定
中国	第14次5カ年計画 (2021-2025年) (2021) 等	(情報なし)	(自治体ごと)	最大17億元 (約306億円) (目標を達成した自治体に対して)	・国家レベルでの水素技術開発に関する具体的なロードマップは作成されておらず、省ごとにロードマップを作成(一部の省) ・政府は地方自治体ごとにプロジェクトを採択・援助
ロシア	水素エネルギー開発 ロードマップ(2020) コンセプト(2021)	(2050年頃に グリーン水素がコスト 競争力を持つと予測)	2024年までに 輸出量ベースで 20万トン	(情報なし)	・ロードマップ：2024年までの主要なマイルストーンを示し、重要な分野として、再エネ・原子力を使用した水素製造など ・コンセプト：2050年までの水素エネ開発を3段階で想定。2050年には水素輸出量が1500万トンまで増加する可能性
韓国	水素経済ロードマップ (2019)	(情報なし)	2040年までに 国内需要ベースで 526万トン	7億190万ドル (約807億円) (2021年)	・燃料電池電気自動車及び燃料電池に力を入れる ・430億ドル相当の経済成長等の可能性

* 2022年1月時点のレートを参考に次のとおり換算：1ドル=115円、1カナダドル=90円、1ポンド=155円、1ユーロ=130円、1元=18円

【参考】水素産業の成長戦略「工程表」

●導入フェーズ：

1. 開発フェーズ

2. 実証フェーズ

3. 導入拡大・コスト低減フェーズ

4. 自立商用フェーズ

●具体化すべき政策手法：①目標、②法制度（規制改革等）、③標準、④税、⑤予算、⑥金融、⑦公共調達等

●地域	2021年	2022年	2023年	2024年	2025年	～2030年	～2040年	～2050年
利用						★目標(2030年時) コスト:30円/Nm ³ 量:最大300万t		★目標(2050年時) コスト:20円/Nm ³ 以下、 量:2000万t程度
●輸送	自動車、船舶、航空機及び、物流・人流・土木インフラ（鉄道）産業の実行計画を参照							
●発電	大型専焼発電の技術開発							
	水素発電の実機実証（燃料電池、タービンにおける混焼・専焼）							
	エネルギー供給構造高度化法等による社会実装促進							
	国内外展開支援（燃料電池、小型・大型タービン）							
●製鉄	COURSE50（水素活用等でCO ₂ ▲30%）の大規模実証					導入支援		脱炭素水準として設定
	水素還元製鉄の技術開発						技術確立	導入支援
●化学	水素等からプラスチック原料を製造する技術の研究開発					大規模実証	導入支援	
●燃料電池	革新的燃料電池の技術開発						革新的燃料電池の導入支援	
	多用途展開、生産設備の投資支援、導入支援							
輸送等	国際輸送の大型化に向けた技術開発					大規模実証、輸送技術の国際標準化、 港湾において輸入・貯蔵等が可能となるよう技術基準の見直し等	商用化・国際展開支援	
	商用車用の大型水素ステーションの開発・実証							
	水素ステーションへの規制改革等によるコスト削減・導入支援							
製造	水電解装置等の大型化等支援・性能評価環境整備							
●水電解	海外展開支援（先行する海外市場の獲得）							
	余剰再エネ活用のための国内市場環境整備（上げDR等）等を通じた社会実装促進						卒FIT再エネの活用等を通じた普及拡大	
●革新的技術	革新的技術（光触媒、固体酸化物形水電解、高温ガス炉等の高温熱源を用いた水素製造等）の研究開発・実証						導入支援	
分野横断	福島や発電所等を含む港湾・臨海部、空港等における、水素利活用実証						インフラ等の整備に伴う全国への利活用拡大	
	再エネ等の地域資源を活用した自立分散型エネルギーシステムの実証・移行支援・普及							
	クリーン水素の定義等の国際標準化に向けた国際連携							
	資源国との関係強化、需要国の積極的な開拓を通じた国際水素市場の確立							
	洋上風力、カーボンリサイクル・マテリアル及び、ライフスタイル関連産業の実行計画と連携							

【参考】国内外にて開発が進められている水素製造方法

- メタンを原料として水素製造する**メタン水蒸気改質法は実用化済**だが、製造の際に**CO2が発生**。
- **CO2排出ゼロの水素製造方法**については、**研究段階**の技術であるため、実現性の調査が必要。

運転温度(℃)

方法番号	名称	特徴	開発者	CO ₂	技術成熟度	課題
0	電気分解	脱炭素電源を使った場合、CO ₂ 排出ゼロ。	—	なし	実用	高効率化
1	メタン水蒸気改質法(SR法)	高温ガス炉を活用し、熱源からのCO ₂ 排出減を達成。完全なCO ₂ フリーを達成するには、CCS等で回収することが必要。	—	排出あり	実用	グリーン水素にするには、CO ₂ の処理(CCS等)が必要 燃料費により価格変動
2	水の熱化学分解法 (IS法)	ヨウ素Iと硫黄Sを利用し、約900度の熱で水を熱分解。CO ₂ 排出ゼロ。JAEAにより1997年頃から開発が進められている。	JAEA	なし	研究	高温、腐食性環境に耐える材料開発他
3	高温水蒸気電解法	高温を活用することで、電気分解の効率を向上。CO ₂ 排出ゼロ。	東芝、独Sunfire、丁Topsoe、米Fuel Cell Energy	なし	研究	低価格化、大容量化
4	メタン熱分解法	高温の液体金属中でメタンを熱分解。炭素は固形炭素の形で回収でき、CO ₂ 排出ゼロ。	米カリフォルニア大学、独カールスルーエ大学等	なし	研究	高温、腐食性環境に耐える材料開発他

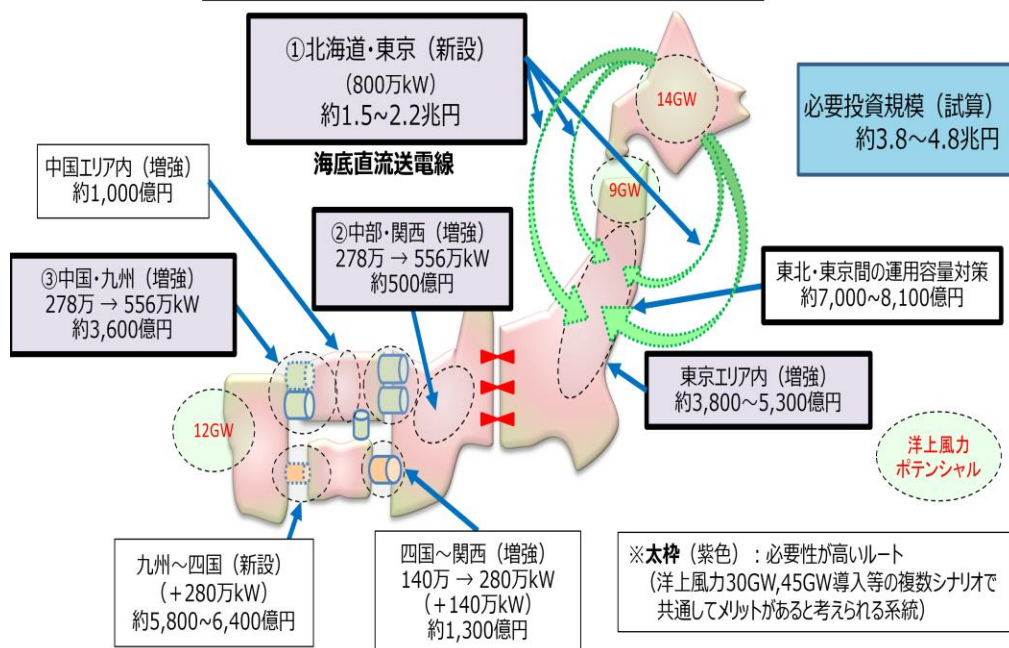
	名称	特徴	開発者	CO ₂	技術成熟度	課題
0	電気分解	脱炭素電源を使った場合、CO ₂ 排出ゼロ。	—	なし	実用	高効率化
1	メタン水蒸気改質法(SR法)	高温ガス炉を活用し、熱源からのCO ₂ 排出減を達成。完全なCO ₂ フリーを達成するには、CCS等で回収することが必要。	—	排出あり	実用	グリーン水素にするには、CO ₂ の処理(CCS等)が必要 燃料費により価格変動
2	水の熱化学分解法 (IS法)	ヨウ素Iと硫黄Sを利用し、約900度の熱で水を熱分解。CO ₂ 排出ゼロ。JAEAにより1997年頃から開発が進められている。	JAEA	なし	研究	高温、腐食性環境に耐える材料開発他
3	高温水蒸気電解法	高温を活用することで、電気分解の効率を向上。CO ₂ 排出ゼロ。	東芝、独Sunfire、丁Topsoe、米Fuel Cell Energy	なし	研究	低価格化、大容量化
4	メタン熱分解法	高温の液体金属中でメタンを熱分解。炭素は固形炭素の形で回収でき、CO ₂ 排出ゼロ。	米カリフォルニア大学、独カールスルーエ大学等	なし	研究	高温、腐食性環境に耐える材料開発他

1 - 3. 再エネ導入拡大に伴う電力ネットワークの変革

- 日本では、**洋上風力適地と需要地が偏在**しており、再エネポテンシャルへの対応、電力融通の円滑化によるレジリエンス向上に向けて、広域での系統形成計画の議論が進展。
- また、気象条件等によって出力が変動する太陽光・風力発電等については、供給と需要を一致させるため、域内での調整が不可欠。**変動再エネ導入に伴い、必要な調整力は増大していく。**
- さらに、①地域の電力供給レジリエンスの向上、②地域再エネの地産地消ビジネスの深化、③再エネの大量かつ効率的な導入といった観点から、**分散型エネルギーシステム構築**のニーズも。

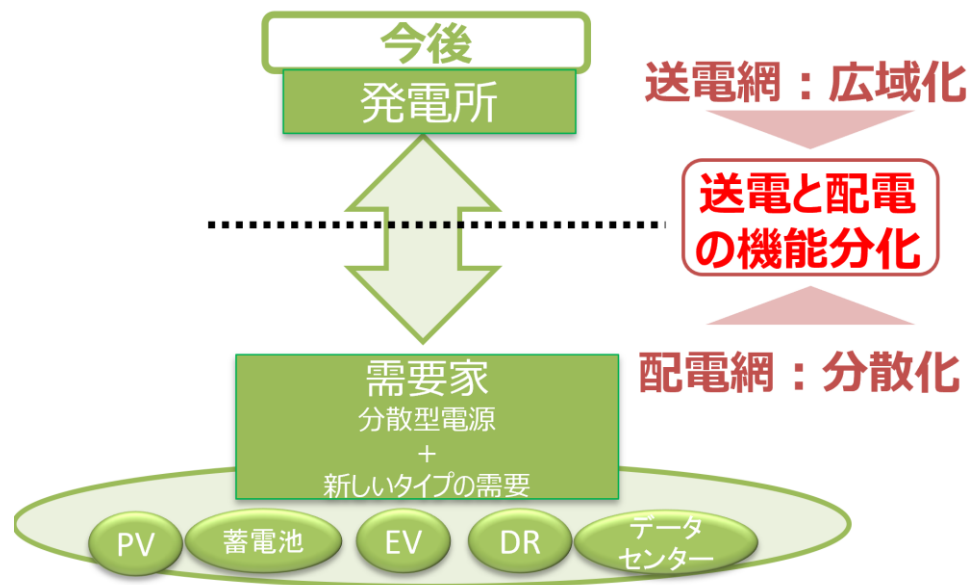
広域系統形成にかかるマスタープランの検討

中間整理の概要（電源偏在シナリオ4 5GWの例）



【出所】再生可能エネルギー大量導入・次世代ネットワーク小委員会 中間整理（第4次）
2021年10月 一部編集

分散化・デジタル化に対応したネットワーク形成の在り方



【出所】第5回 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 脱炭素化社会に向けた電力レジリエンス小委員会（2019年6月28日）一部編集

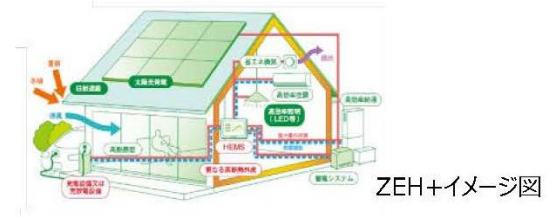
【参考】分散型電力システムの推進

- 再エネ導入コストの低下等を背景に、需給一体型モデルの更なる普及が見込まれるところ、家庭、企業、地域等の需要単位ごとに、一層の環境整備が必要。

＜「需給一体型」を中心とした分散型電源の導入加速化に向けた取組＞

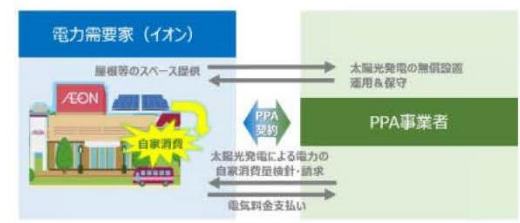
家庭

- ZEH化の更なる普及
 - ハウスメーカーの更なるZEH供給割合の向上と一般工務店におけるZEH実績積み上げ。
- 蓄エネ設備の導入加速
 - コストの高さ、等の課題が存在。



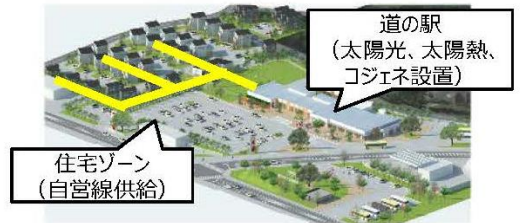
企業／公的機関

- 需要家ニーズに合わせた導入の支援
 - 需要家が、多様な導入モデルを比較検討できる環境が重要。
- オフサイト型の再エネ調達の活用
 - オンサイト型は導入量に限界あり。



地域

- 地域マイクログリッドの普及拡大
 - 関係者合意の難しさ、事業採算性等の課題が存在。
- 再エネ事業の地域との共生
 - 再エネ事業実施には、地域の理解と協力が不可欠。



災害時に電力供給するシステムの例

取組の方向性

- ZEHという選択が一般的になる施策の検討
- 定置用蓄電システムの普及拡大への対応 (→2.を参照)
- 中小企業等に対するエネルギー利用最適化支援 (再エネ提案等)
- オフサイト型コーポレートPPA等の調達手段についての検討
- 地域マイクログリッド構築の更なる支援
- 地域と共生する再エネ事業の評価・普及に向けた取組み

- 分野横断的な共創の場の提供

1－4．電力レジリエンスへのニーズの高まり

- 北海道胆振東部地域におけるブラックアウト事故や台風15号の被害を通して、大規模な災害の多い我が国における非常時のエネルギー安定供給の重要性が顕在化。
- 連系線の増強、発電・送電設備の安全投資の確保などの課題に着実に対応する必要。

北海道胆振東部地震に伴う大規模停電の教訓

◆ブラックアウトの概要

機器破損や送電線の損傷など、複数の要因により最終的にブラックアウトが発生。

- 苫東厚真火力発電所（2号機・4号機）の停止
 - 風力発電所の停止
 - 水力発電所の停止
- 苫東厚真火力発電所（1号機）
- ブラックアウトの発生

◆再発防止策

・運用上の対策

- 周波数低下リレー（UFR）の整定値の検証
- 最大規模発電所発電機の運用方法の見直し
- 太陽光・風力のUFRの整定値の検証
- 周波数制御機能（ガバナフリー、AFC等）の再評価

・設備形成上の対策

- 北本連系線の更なる増強
- 発電設備・送電設備の保安の検討

検証委員会を立ち上げ、
ブラックアウトの原因を詳細に追究、再発防止策を検討

台風15号におけるエネルギー供給事例

■地域の配電網を運用した事例

○むつざわスマートウェルネスタウン（千葉県睦沢町）

（株）CHIBAむつざわエナジーは、天然ガスコジェネと再エネ（太陽光と太陽熱）を組み合わせ、自営線（地中化）で道の駅（防災拠点）と住宅へ供給。コジェネの排熱は道の駅併設の温浴施設で活用。

2019年台風15号による大規模停電時においても、再エネと調整力（コジェネ）を組み合わせたエネルギーの面的利用システムを構築することで、災害時の早期復旧に大きく貢献。



非常時における電力ニーズ、
分散電源の重要性が顕在化

【参考】近年発生した主な災害の影響の例

平成30年台風21号（9月）

非常に強い勢力で上陸し、関西圏を中心に大規模停電が発生

停電戸数：約240万戸

（関西・中部等）

特記事項：電柱が1000本以上倒れ、復旧までに長期間を要した。



他電力からの応援

高圧発電機車40台

約500名の作業員派遣

平成30年台風24号（9月）

日本列島を縦断し、全国規模で停電が発生。

停電戸数：約180万戸

特記事項：日本列島を縦断するように進み、全国規模で停電が発生。
特に静岡県西部での停電被害が大きかった。



他電力からの応援

高圧発電機車10台

201名の作業員派遣

平成30年北海道胆振東部地震（9月）

北海道全域にわたる停電（ブラックアウト）が発生。

停電戸数：約295万戸

（北海道全域）

特記事項：地震発生後に大規模停電が発生。順次発電所を起動させ、停電を復旧させるが、厳しい需給状況により、節電を要請。



他電力からの応援

高圧発電機車151台

1,706名の作業員派遣

令和元年台風15号（9月）

千葉県を中心に大規模長期停電が発生。

停電戸数：約93万戸

特記事項：倒木・飛来物による電柱の損壊、断線が広範囲かつ多数発生したこと等により、停電が長期化。



他電力からの応援

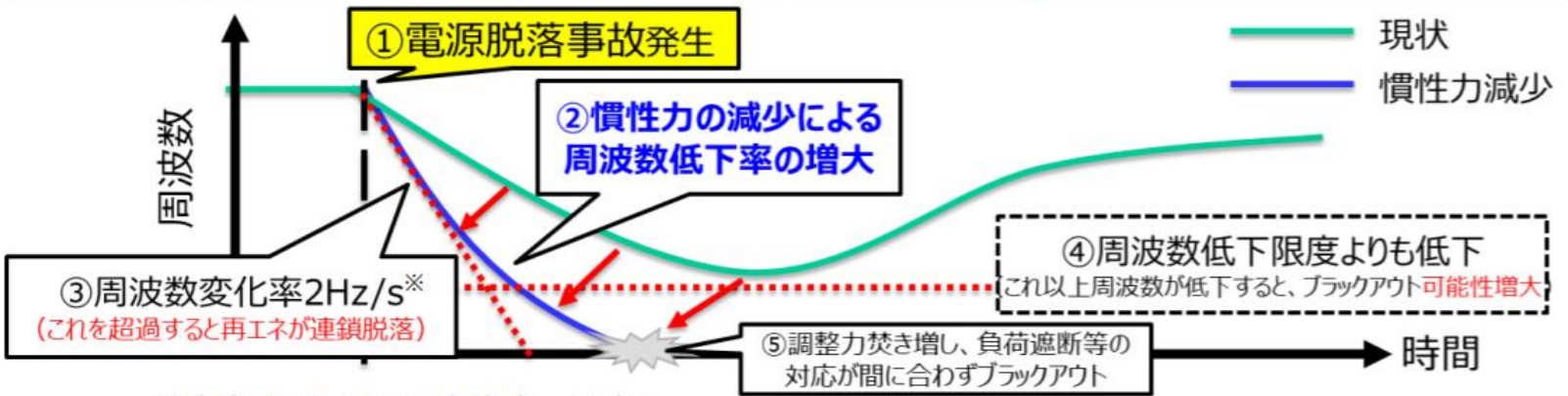
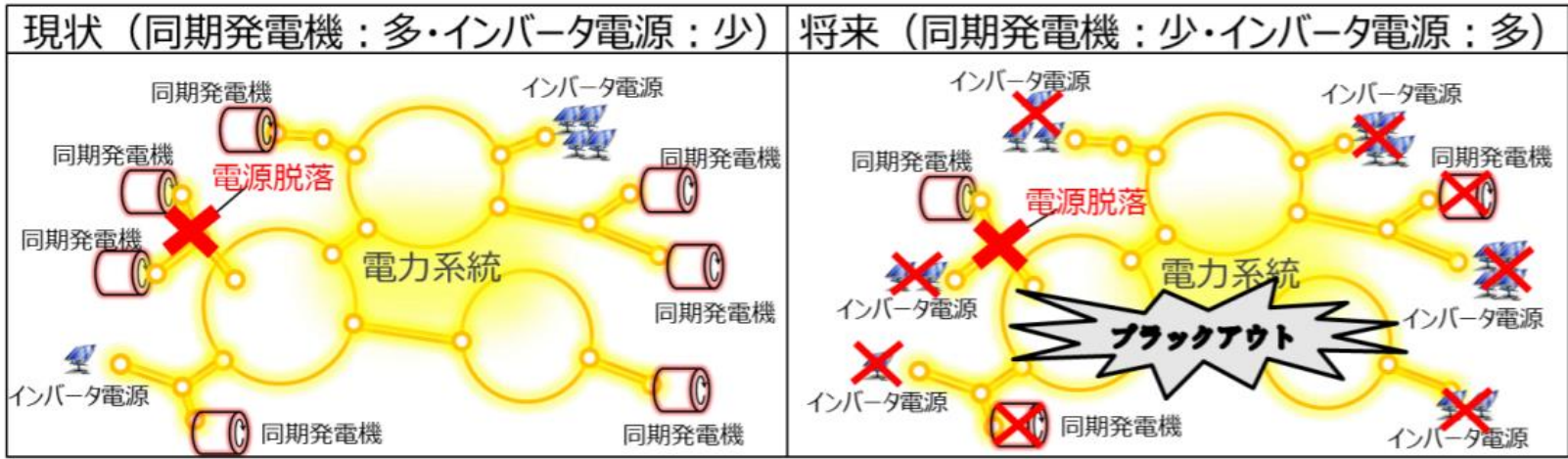
高圧発電機車238台

約4,000名の作業員派遣

鉄塔設備の倒壊（君津市）

【参考】突発的トラブル（電源離脱・落雷等）に対する安定的な電源構成

- 太陽光、風力、蓄電池などの非同期電源は、周波数や電流の急激な変化に対して、周波数を維持する機能（慣性力）を持たず、周波数変化が一定の閾値を超えると**離脱（解列）**。
- 災害やトラブル等の発生に伴い電源が離脱した際に、非同期電源の比率が高いと、電源が連鎖的に脱落する可能性。

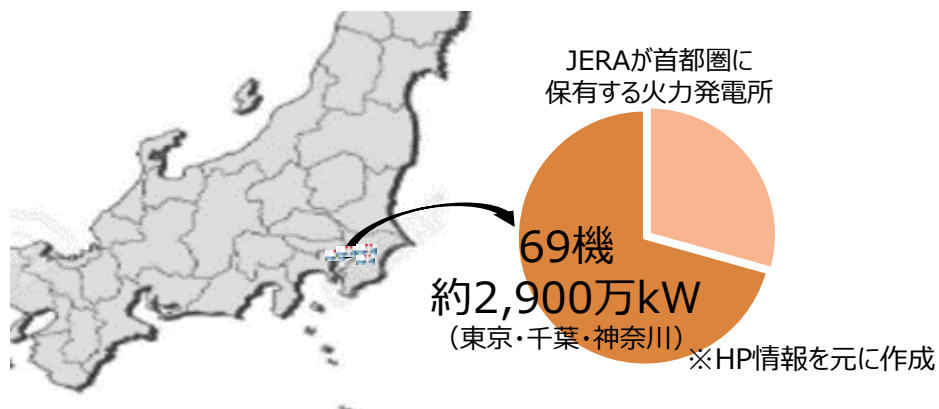


※分散型電源における事故時にも運転を継続するための要件（FRT要件）

【参考】大規模災害時のレジリエンス

- 分散型電源の導入を進める一方で、小規模／大規模電源も含め電源を日本全体で分散化させ、地域間の電力融通と併せて大規模災害時の大規模停電回避など、日本全体でレジリエンスを向上させていく必要。

首都圏震災時のレジリエンス

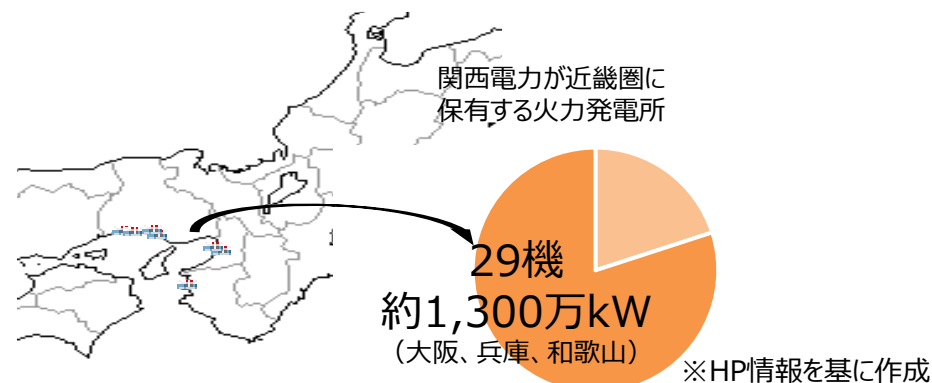


- ✓ JERAが首都圏に保有する全火力発電所の約7割（約2,900万kW）が東京湾岸に集中。

（参考）東日本大震災時、柏崎刈羽原子力発電所の4基（約500万kW）、信濃川発電所（約18万kW）などが稼働

（※）当時、計画停電（10日間）、夏季の節電要請（▲15%）を実施

近畿圏震災時のレジリエンス



- ✓ 関西電力が近畿圏に保有する全火力発電所の約8割（約1,300万kW）が大阪湾岸や瀬戸内等に集中。

（参考）阪神・淡路大震災時、高浜・大飯・美浜原子力発電所の8基（約740万kW）が稼働

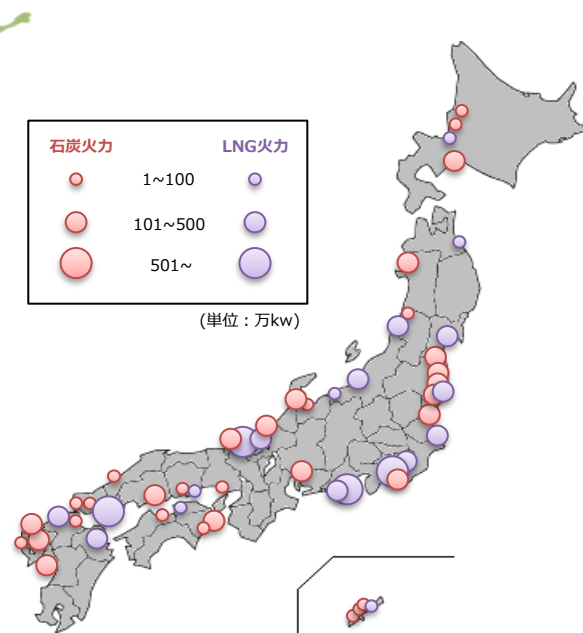
1 - 5. 地政学リスクへの対応

- 日本では太平洋ベルト等の臨海部を中心に、コンビナート等が形成され、エネルギー多消費産業を立地させてきた。また、産業需要地に近接して、大型の火力発電所を立地。
- これらのエネルギー多消費産業は、これまで日本経済を支えてきた一方で、石油、天然ガス等の化石資源の安定供給や価格のボラティリティにリスクを内在しており、米中覇権競争やウクライナ危機でこうしたリスクが顕在化。
- 中長期的に、これらの産業の競争力を維持していくためには、地政学リスクによらず、安価・安定的かつカーボンフリーでの熱・電気・水素等の供給が必要に。

コンビナートは、太平洋ベルトに存在



火力発電所は産業等の需要地に近接

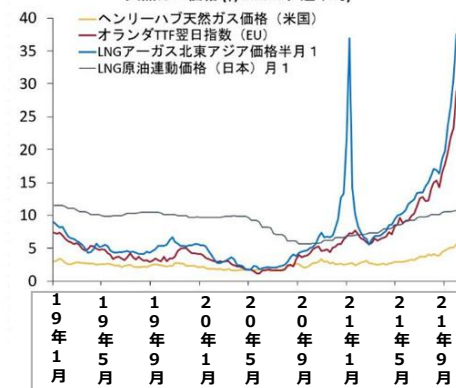


【出所】資源エネルギー庁公表の「石炭火力発電所一覧」や各社HPの情報を元に大手電力会社の石炭・LNGの火力発電設備を資源エネルギー庁にて集約

足下で資源価格は反発・上昇へ



天然ガス価格 (\$/mBtu、週平均)

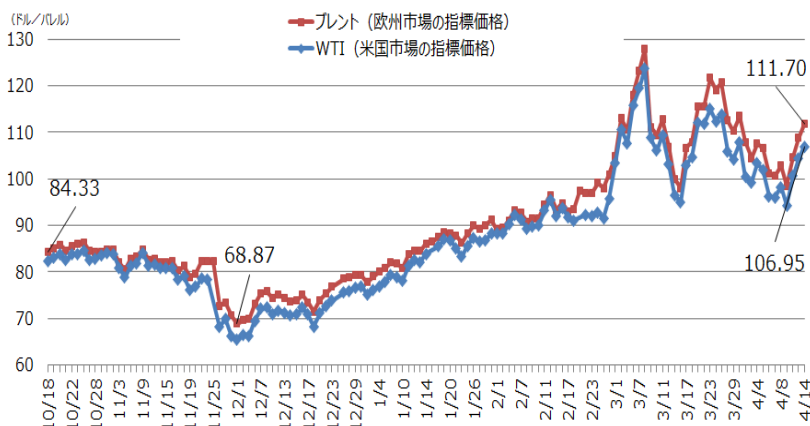


【参考】ウクライナ情勢の影響

- ウクライナ情勢を受け、欧州では、ロシアからの天然ガス輸入を削減し、**エネルギー供給源の多角化を目指した検討を開始。**
- また、**原油価格が急上昇**し、足元では**110ドル/バレル前後で推移。**

2021年後半以降の原油価格の動向

- ✓ 2021年11月にはオミクロン株の影響で70ドル/バレルを下回っていたが、ウクライナ情勢を受け、足元では110ドル/バレル前後で推移。



ウクライナ情勢を受けた各国の動き

EU ロシアからのガス輸入脱却方針を表明

EUは天然ガス輸入の半分近くをロシアに依存。3/8に、調達先の多角化や気候変動対策の加速に取り組み、今年年末までに、ロシアからの輸入を2/3減らし、2030年までに脱却する方針を発表。

英国 エネルギー安全保障戦略・原発最大8基新設の公表

4/7、英国政府は「エネルギー安全保障戦略」を発表。原子力の発電割合を2050年までに25%へ拡大し、現在の3倍以上となる24GWの導入を目指す。2024年までの今期議会中に1件（サイズウェルC）、次期議会中にSMRを含む2件の原子力プロジェクトに最終投資決定。最大8基の建設が可能に。さらに、新規建設を支援する政府機関として、Great British Nuclearを設立。

ドイツ 国内初のLNG輸入ターミナル建設

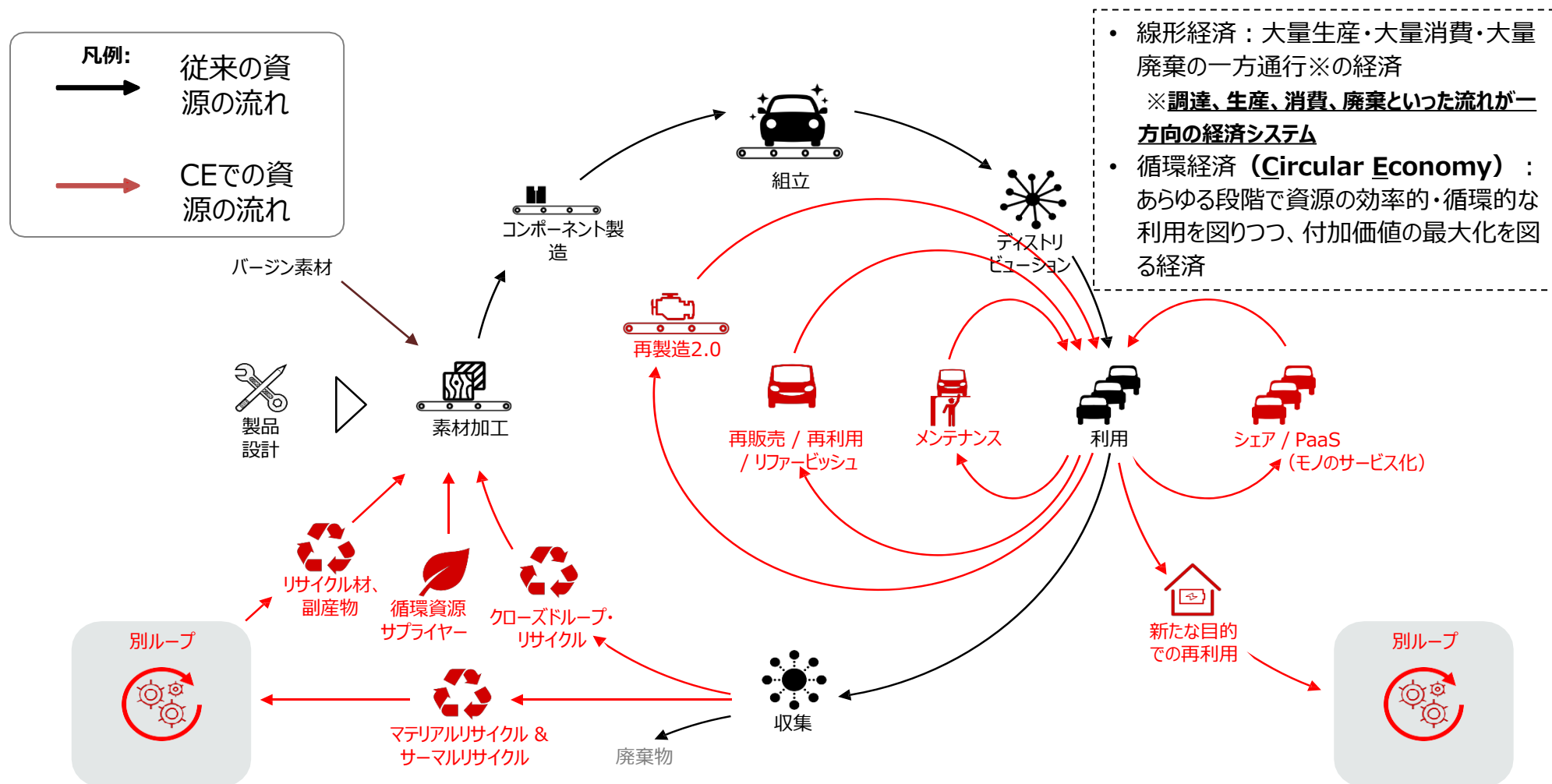
天然ガス輸入のうち、55%をロシア産に依存するドイツは、2/22にロシアからの天然ガスパイプラインである「ノルドストリーム2」のプロジェクト凍結を発表。3/5には、自国のエネルギー安全保障のため、国内初のLNG輸入ターミナルの建設していくことを発表。

ベルギー 原発閉鎖方針を転換し、2基運転延長へ

3/18、ベルギー政府は現下の地政学的状況を踏まえ、化石燃料からの脱却を強化する観点から、2025年に40年運転を迎える原子力発電所2基（ドール4号機、チアンジ13号機）の運転を10年延長する方針を決定。

1 - 6. 循環経済への移行

- 世界的な人口増加・経済成長に伴う**国際的な資源需要の増加**や、グローバルでの**廃棄物処理システムの機能不全**の発生を踏まえ、大量生産・大量消費・大量廃棄の**一方通行の経済モデルから、循環型の経済への移行**が志向されている。

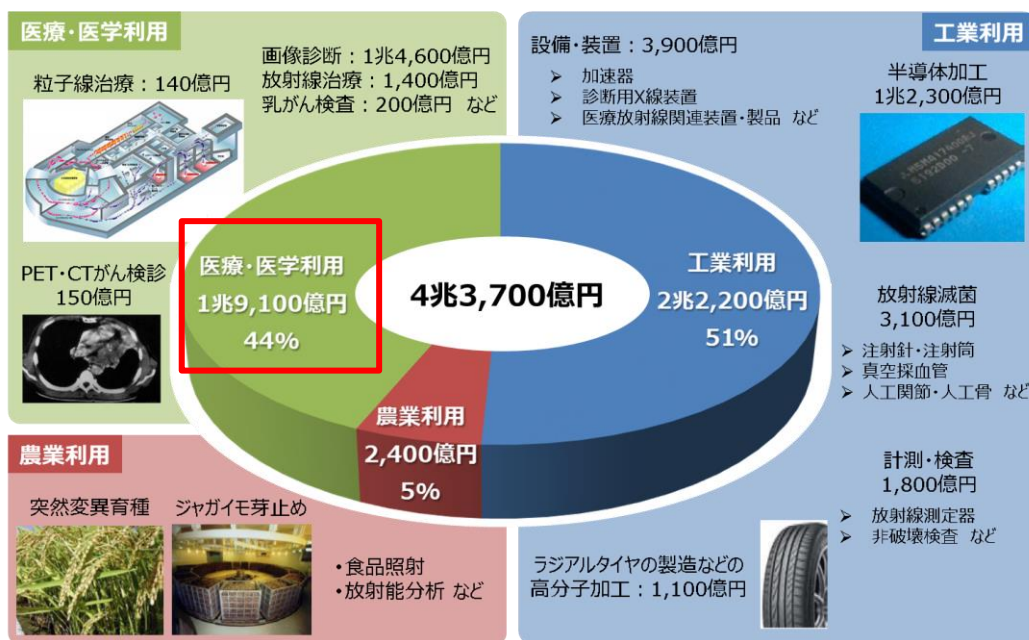


1 - 7. エネルギー分野以外へのイノベーションの波及

- エネルギー分野のイノベーションによる他分野への波及効果を期待する声も。
- 放射線は、工業、医療・医学、農業など、多岐にわたる分野での利用が可能であり、高い経済効果が見込まれる。
- 医療分野に着目すると、悪性腫瘍に対する核医学治療実績が顕著に増加傾向にあり、放射線の線源となるラジオアイソトープ（RI）の重要性が高まっている。

放射線利用の経済規模（2015年度）

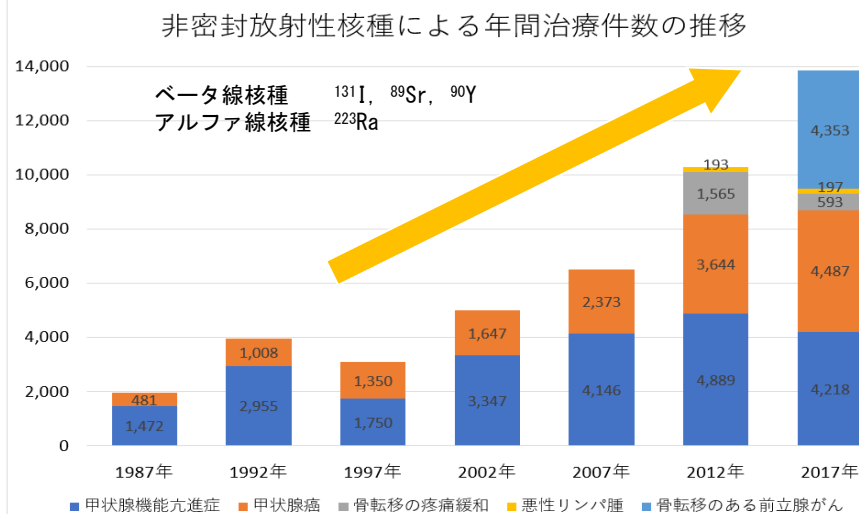
- ・分野全体で4兆3,700億円
（2005年度：4兆1,100億円）
- ・特に医療・医学利用については、10年間で30%増



（出典）第29回原子力委員会資料第1-1号 内閣府「放射線利用の経済規模調査」（2017年）

悪性腫瘍の核医学治療実績

- ・治療実績は、20年で約4.5倍
- ・特に、2016年にα線核種であるラジウム223による骨転移のある前立腺がん治療薬が承認されたことに伴い、治療実績が大きく向上



（出典）第8回全国核医学診療実態調査報告書

1. **カーボンニュートラル実現に向けた社会全体の変革**
2. **革新炉による貢献の可能性**
3. **革新炉開発に求められる価値の評価軸**

2. 革新炉による貢献の可能性

● カーボンニュートラル実現に向けた社会全体の変革に対し、革新炉による貢献の可能性を追求。

	カーボンニュートラル実現に向けた社会全体の変革	革新炉による貢献の可能性
安全性向上		● 福島事故を踏まえた安全対策、事故耐性燃料、炉型の革新安全性【2－0】
電力部門の脱炭素化	● デジタル化等により需要増大する電力の脱炭素化【1－1】 ● 脱炭素電気二エースの高まり【1－1】	● 電源の脱炭素化への貢献【2－1】
産業部門の脱炭素化	● 製造部門等における水素・熱利用【1－2】	● 高温ガス炉を活用した製造部門等における水素・熱供給【2－2】
電力ネットワーク	● 再エネ導入拡大に伴う電力ネットワークの変革【1－3】	● 負荷追従による系統安定化・再エネ導入への貢献【2－3】 ● 小型分散型・可搬型電源としての活用【2－3】
レジリエンス	● 台風・地震等の災害発生時の電力レジリエンス【1－4】	● 電力系統内の慣性力の維持【2－4】
安定供給 経済安保	● エネルギー・サプライチェーンの地政学リスク【1－5】	● 技術自給率の維持により地政学リスクの軽減【2－5】 ● 国際連携プロジェクトにおける貢献【2－5】
廃棄物問題	● 循環経済、リサイクル【1－6】	● 高速炉で有害度低減、資源の有効利用【2－6】
非エネ分野	● 医療・医学分野における放射線利用【1－7】	● 放射性同位体（RI）製造、免震技術、遠隔技術 等【2－7】

2-0. 東京電力福島第一原子力発電所事故を教訓にした安全対策

- 事故の教訓を踏まえ、既存軽水炉においては、極めて厳しい自然災害を想定し、大規模な防潮堤など、十分な対策を実施。
- 電源の喪失や水素爆発など、極めて過酷な事態が生じることも想定し、多重の備えを実施。

(事故での教訓)



地震・津波等の
想定が甘かった

津波・地震による
全ての電源喪失

水素爆発の発生
や放射性物質の
拡散

※燃料を覆うジルコニウム合金が高熱になると炉内の水蒸気（水）を分解して水素が発生

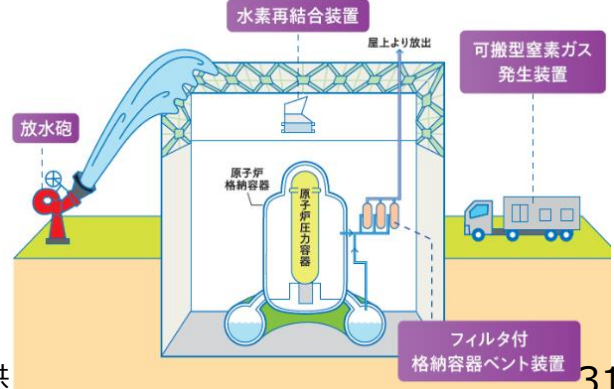
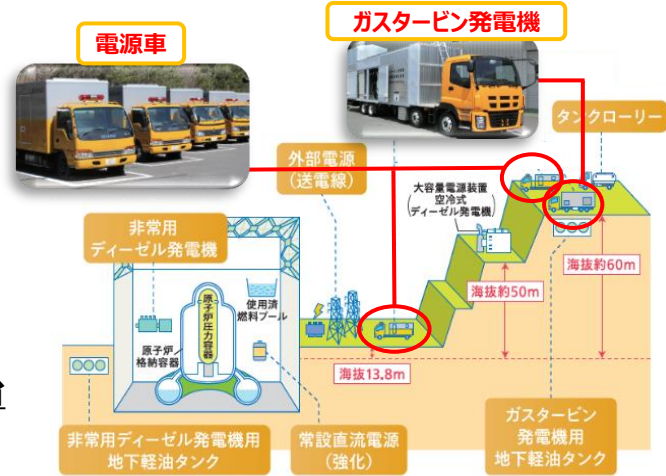
(女川原子力発電所における安全対策の実施例)

- 地震の想定を引き上げ
580ガル→1000ガル
※東日本大震災時は567.5ガル
(ガルは地震の揺れの強さを示す単位)

- 津波の想定を引き上げ
13.6m→23.1m
海拔29mの防潮堤設置
※東日本大震災での津波は13m

- 非常用電源を強化
電源車 0台→11台
ガスタービン発電機車 0台→2台
蓄電池 8時間分→24時間分

- 発生した水素を除去する装置を導入
- 放射性物質の大気中への放出を抑制する装置（フィルターバント）を導入



出典：東北電力より提供

【参考】新規制基準の策定

- 高い独立性を有する原子力規制委員会の下、世界で最も厳しい水準の新規制基準を策定。
- 新規制基準においては、地震・津波の想定を見直し、**安全対策を抜本強化**すると共に、重大事故の発生を防止するシビアアクシデント対策やテロ対策を新たに規定。

＜従来の規制基準＞

シビアアクシデントを防止するための基準
(いわゆる設計基準)
(単一の機器の故障を想定しても
炉心損傷に至らないことを確認)

自然現象に対する考慮
火災に対する考慮
電源の信頼性
その他の設備の性能
耐震・耐津波性能

＜新規制基準＞

意図的な航空機衝突への対応
放射性物質の拡散抑制対策
格納容器破損防止対策
炉心損傷防止対策 (複数の機器の故障を想定)
内部溢水に対する考慮 (新設)
自然現象に対する考慮 (火山・竜巻・森林火災を新設)
火災に対する考慮
電源の信頼性
その他の設備の性能
耐震・耐津波性能

新設
新設
強化又は新設
強化

(テロ対策)(シビアアクシデント対策)

2-0. 東京電力福島第一原子力発電所事故を教訓にした安全研究開発

- 2015年、資源エネルギー庁で「軽水炉安全技術・人材ロードマップ」を策定。規制基準以上の更なる安全性向上のため、**震災後11年**を経て**革新的安全性向上技術の実装・開発が進む**。

導入済みの事例

・ コリウムシールド

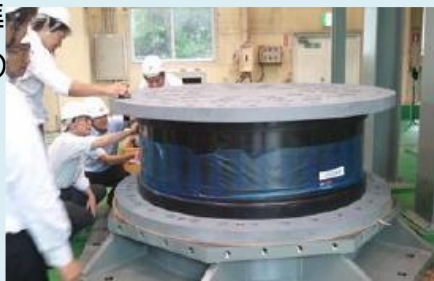
- 事故時に溶融燃料を受け止め
→ 柏崎刈羽発電所 6、7号機に導入



導入された
コリウムシールド

・ 免震システムの評価手法開発

- 免震技術の採用および設計標準化により、安全性確保と経済性の両立が期待される
→ 日本電気協会の免震設計技術指針に反映済



免震装置の例

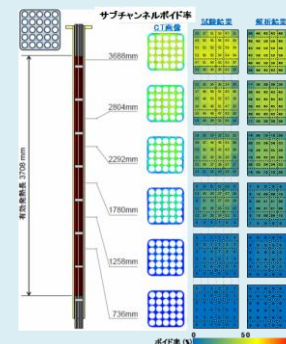
・ シビアアクシデント時用計装システム開発

- シビアアクシデント時もプラント重要パラメータ計測可能に
→ 女川2号機、柏崎刈羽6,7号機に導入

開発中の事例

・ 気液二相流の挙動解明

- 大型熱流動試験・データベース構築により、燃料集合体内部の水・蒸気の流れを精密に解析可能に
→ 燃料技術革新に貢献の可能性



・ 事故耐性燃料

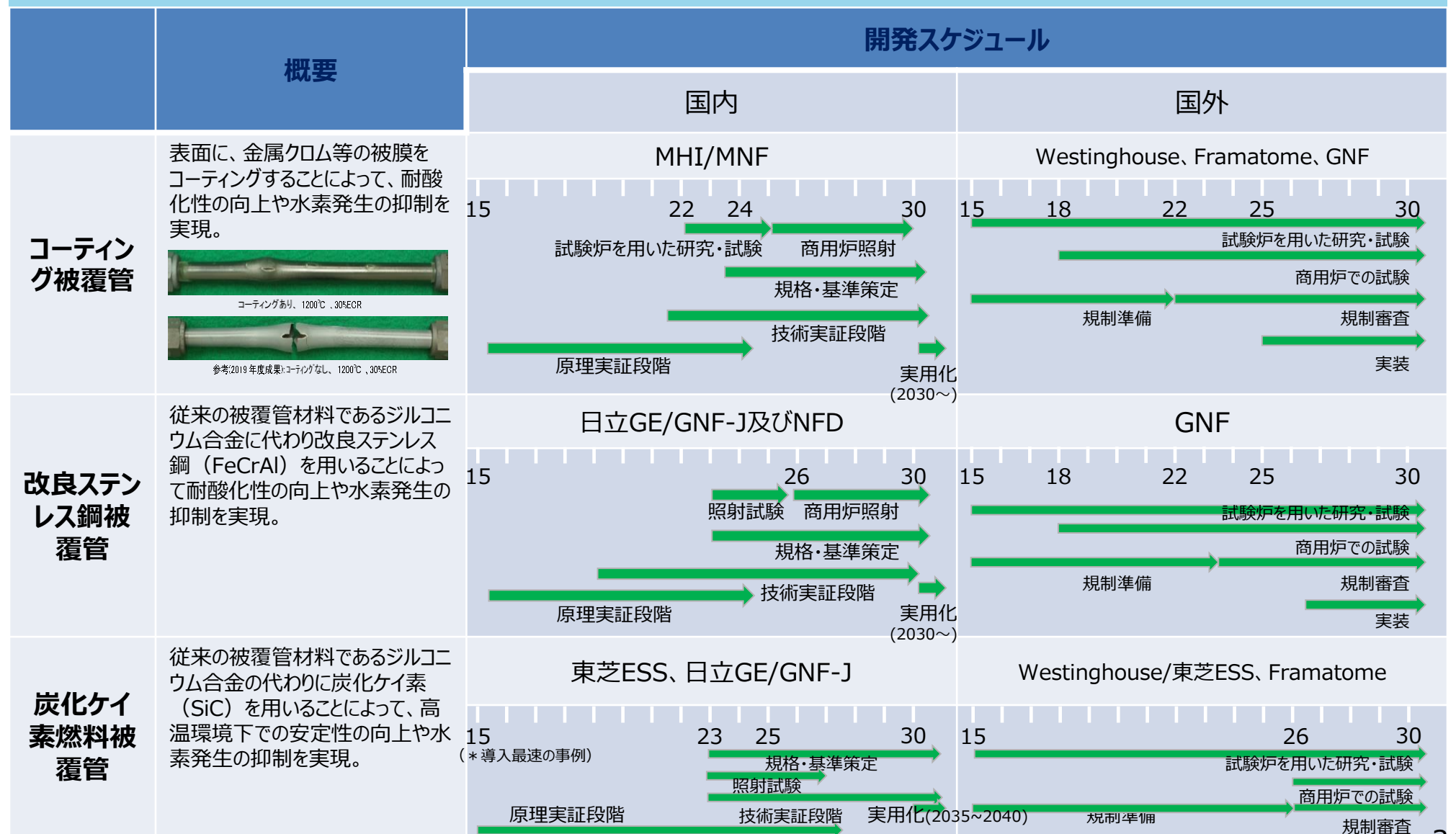
- 事故時に水素を抑制するクロムコーティング被覆管等の開発
→ 海外での照射試験の実施を計画



参考(2019年度成果)：コーティングなし、1200℃、30%EO

2-0. 安全性を大きく高める燃料の開発

- 燃料被覆管を金属でコーティングすること等により、酸化や水素発生を防ぎ安全性を高める事故耐性燃料の開発が国内外で進んでいる。革新炉への導入も想定される。



【参考】EUタクソノミーにおける原子力と天然ガスの位置づけ

- EUタクソノミーは、**EUのサステナビリティ方針に資する経済活動を明示**した、いわば「**グリーン・リスト**」。
※企業が基準に合致する旨を開示することで、「グリーン債券」の発行等を通じて資金調達しやすくなる効果がある。
- 欧州委員会は加盟国等からの意見聴取を経て、2022年2月2日付で**原子力および天然ガスの取扱いに関するドラフトを承認**。
- 今後、加盟国や議会等との議論を経て、**4～6カ月以内に理事会・議会で可決される見込み**。

補完的委任規則（complementary Delegated Act）における原子力と天然ガスの記載

以下の条件に適合する**原子力・天然ガスについてはEUのサステナビリティ方針（気候変動緩和・適合）に資する**。

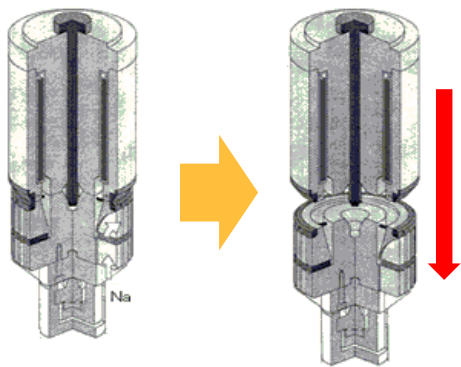
原子力	天然ガス
・2045年までに建設許可を受けた新規原発。 ・2040年までに延長認可を受けた既設原発。 ・<u>放射性廃棄物の管理について、資金面や処分場の計画についての条件あり</u>。 ＜具体的には以下のような条件を記載＞ ・放射性廃棄物の管理等の資金を確保すること ・低レベル/中レベルの放射性廃棄物の運用可能な処分施設を有すること ・2050年までに高レベル放射性廃棄物処分施設が運用開始できるよう 詳細な文書化された計画を有していること ・2025年からは事故耐性燃料(※)を実装すること 等 ※燃料被膜管に新素材を活用する等、シビアアクシデントに至る事象が発生した場合でも事故リスクを低下させる技術	CO2の排出量によってはグリーンと認定。 ※具体的には、 ・<u>100 g CO2/kWh未満のもの、又は、</u> ・2030年までに建設許可を得たものであれば、 ①<u>270gCO2/kWh未満であるもの、又は、</u>②<u>20年間にわたる年間平均排出量が550kgCO2/kW以下のものが対象</u>。 さらに、既存の高排出な火力発電所の建て替えに限定する等、複数の条件あり。 ⇒日本の一番発電効率が良いガス火力でも327gCO2/kWh程度のため、発電所のプラントから排出されるCO2を回収し地下に貯蔵するCCSを行う、または、水素を約50%程混焼する、もしくは稼働率を20%未満とする必要があり、極めて厳しい基準。

2-0. 受動的安全システムによる革新的な安全性向上

- 受動的安全性とは、システムの安全機能が、外部からのエネルギーあるいは信号、操作なしにそれ自体の有するメカニズムによって確保されること。
- 冷却液体の重力による注入や、自然循環による冷却といった自然法則を安全機能に採用した受動的安全炉の開発・導入が東京電力福島第一原子力発電所事故後も進む。

事故時に制御棒自動挿入

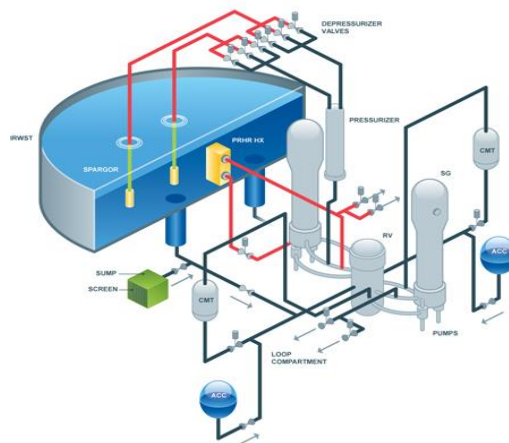
事故時の温度上昇で磁力を喪失し
制御棒が重力で落下して挿入されるため、
自然に反応が止まる



ナトリウム冷却高速炉
(日本原子力研究開発機構)

重力や蓄圧を使って注水

重力や蓄圧といった自然力を用いるため
事故時に電源や人的対応が不要

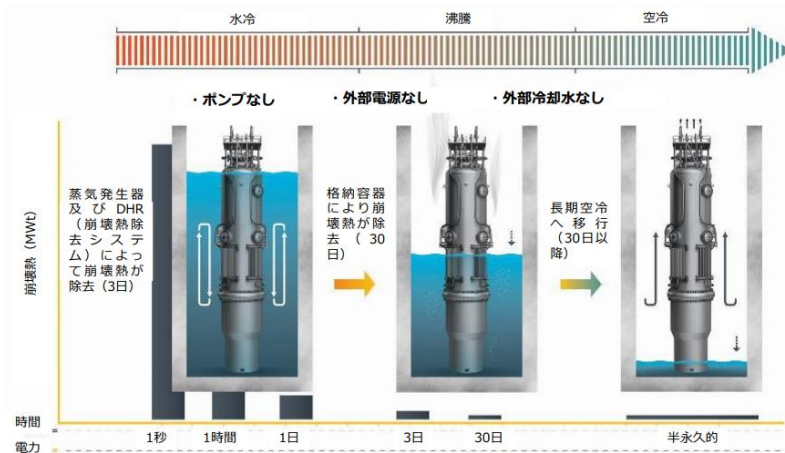


軽水炉 AP1000
(ウェスチングハウス)

その他の事例：EPR, 三菱次世代軽水炉,
ESBWR, 華龍1号 等

自然循環で冷却

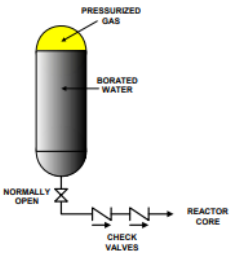
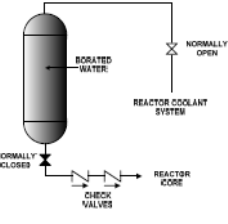
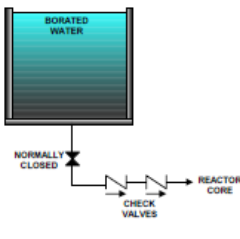
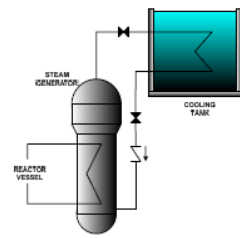
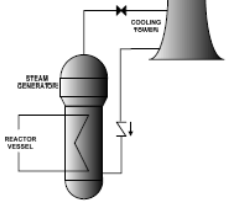
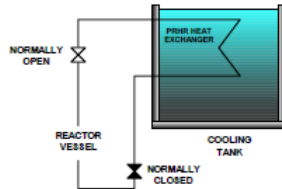
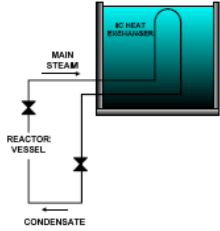
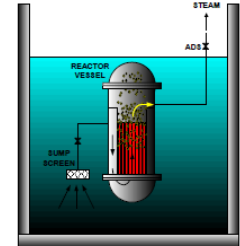
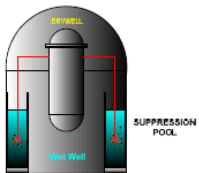
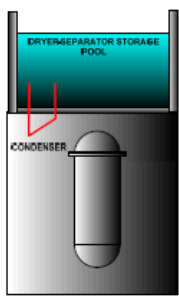
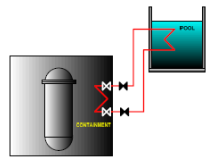
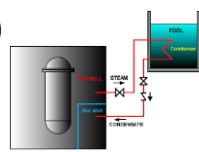
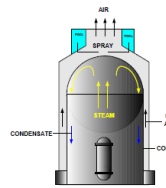
冷却に使われる液体や空気が
炉心の熱で密度差が生じて
自然循環し確実な冷却



小型軽水炉 VOYGR
(NuScale)

その他の事例：AP1000, 三菱小型軽水炉,
iB1350, BWRX-300 等

【参考】受動的安全システムの類型例

炉心崩壊熱除去のための受動的安全システム				
蓄圧注水 ○AP1000, VVER-1000, 三菱次世代軽水炉,EPR, ESBWR, 華龍1号 	自然循環力注水 ○AP1000, VVER-1000 	重力注水 ○AP1000, ESBWR, 華龍1号 	蒸気発生器を利用した自然循環冷却（水冷） ○VVER-640, IMR, 三菱小型軽水炉, 華龍1号 	
蒸気発生器を利用した自然循環冷却（空冷） ○VVER-1000, 三菱小型軽水炉 	受動的炉心冷却（単相） ○AP1000 	受動的炉心冷却（アイソレーションコンデンサー） ○ESBWR, ABWR-II, iB1350, BWRX-300 	自然循環冷却（サンプ水没） ○AP1000, NuScale 	
格納容器冷却・圧力抑制のための受動的安全システム				
静的格納容器圧力抑制（格納容器内蒸気凝縮型） ○AP1000, ABWR-II, ESBWR, iB1350 	静的格納容器冷却系（格納容器内蒸気凝縮型） 	静的格納容器冷却系（格納容器内蒸気凝縮/外部自然循環ループ型） ○VVER-640、華龍1号 	静的格納容器冷却系（外部蒸気凝縮型） ○ESBWR, ABWR-II, iB1350 BWRX-300（簡易型） 	静的格納容器冷却系（スプレイ水、空気冷却等） ○AP1000, NuScale, 三菱小型軽水炉 

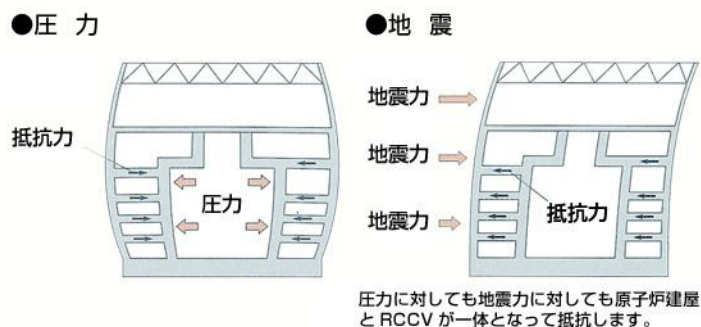
（出典）“Passive Safety Systems and Natural Circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants”, IAEA (2009)より資源エネルギー庁作成

2-0. 炉型革新による外部ハザードへの対応強化

- 炉型革新によって、より合理的に地震や津波等の自然災害、航空機衝突といった外部ハザードへの対応強化が可能。

一体構造・低重心で高耐震

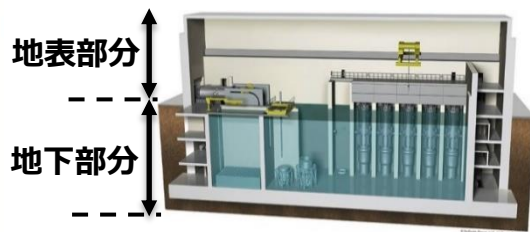
格納容器と建屋の一体構造により耐圧性、耐震性が向上。さらに重心が低くなり耐震性が向上



軽水炉 ABWR
(東芝ESS、日立GE、GE日立)

半地下立地

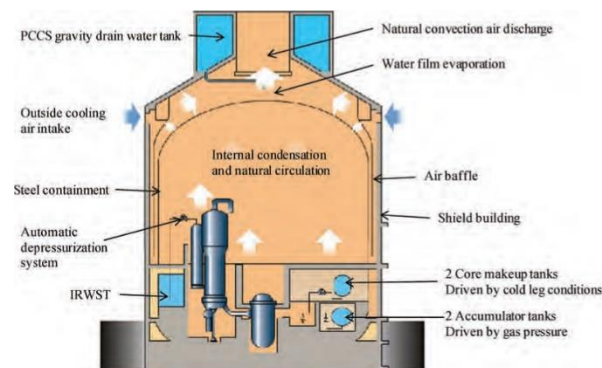
半地下立地で重要機器を地下配置により耐震・航空機衝突対策



小型軽水炉 VOYGR
(NuScale)

航空機衝突に耐える建屋

建屋外壁に鋼板・コンクリート複合モジュールと鉄筋コンクリート・モジュールを組み合わせた方式を採用し、航空機衝突に耐える設計 (※)



軽水炉 AP-1000
(ウェスチングハウス)

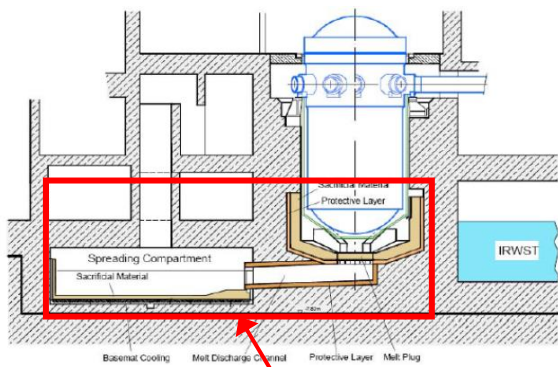
※2009年の規制変更で設計変更を実施。
2011年末に付則含め規則改訂了。

2-0. 炉型革新によるシビアアクシデント対策強化

- 炉心が重大な損傷を受けるシビアアクシデントが起きたとしても、環境中に甚大な影響が及ばないよう、受動的安全システムを含め、シビアアクシデント対策装置がビルトインされている。

コアキャッチャー

格納容器底部で溶融炉心を捕集し冷却

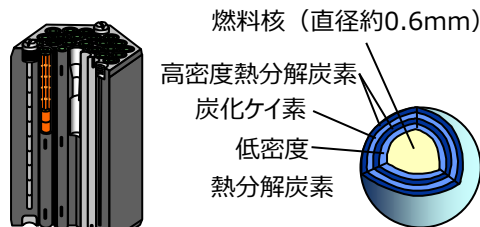


コアキャッチャー

軽水炉 EPR
(フラマトム)

事故耐性被覆燃料

燃料を嚴重（四重）に被覆するので、極めて燃料溶融しにくい上に、溶融炉心も被覆粒子内に閉じ込め



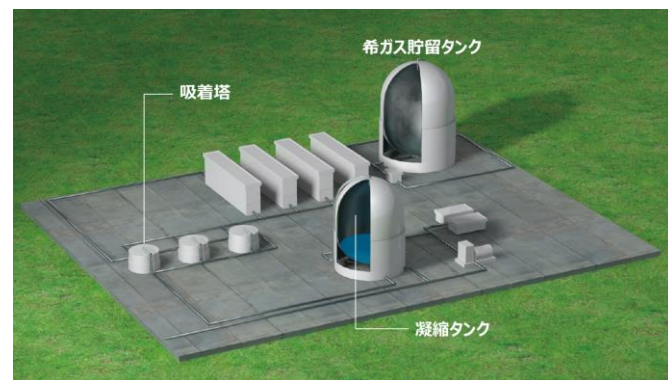
燃料体（黒鉛）

被覆燃料粒子

高温ガス炉 HTTR
(日本原子力研究開発機構)

放射性物質放出防止

放射性希ガスを分離・貯留し事故影響を発電所敷地内に限定



軽水炉
(三菱重工)

2-0. 革新軽水炉：炉型革新による安全性等の向上

- 地震・津波等の自然災害への対応、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てプラント機能を向上。

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
外部遮蔽壁の強靱化

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

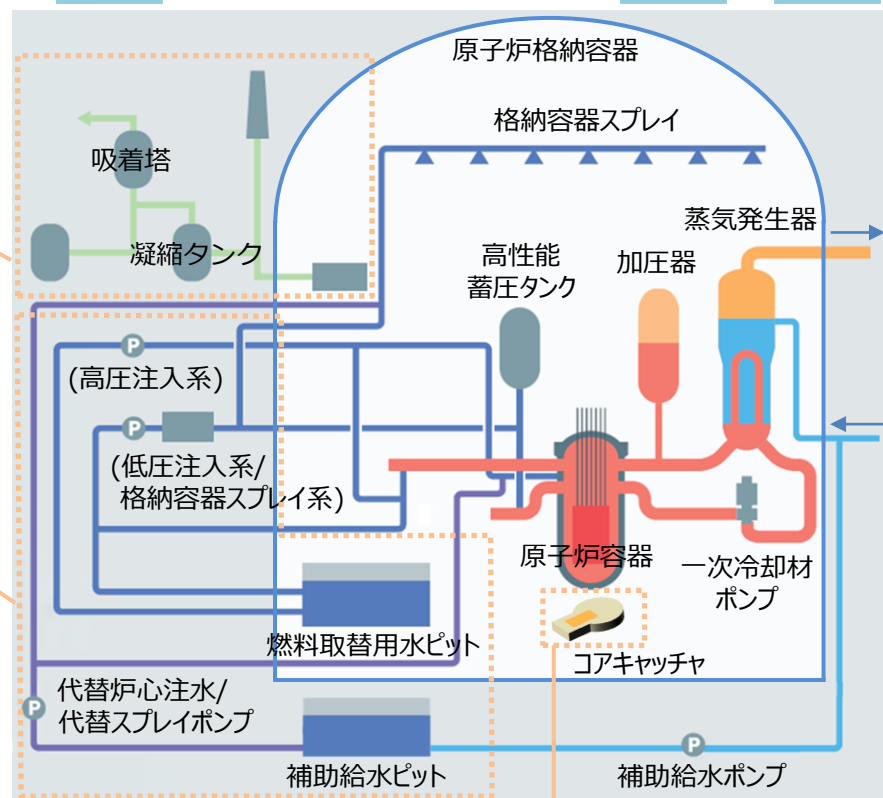
津波・竜巻・台風・火
山等の自然災害への
耐性を強化

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）



2-0. 高温ガス炉：冷却材喪失時も炉心溶融なく自然冷却

優れた安全性

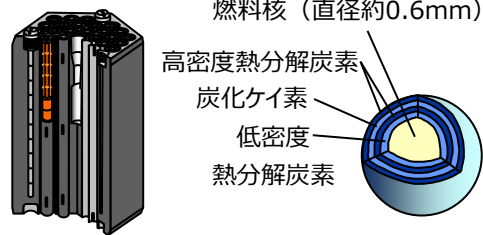
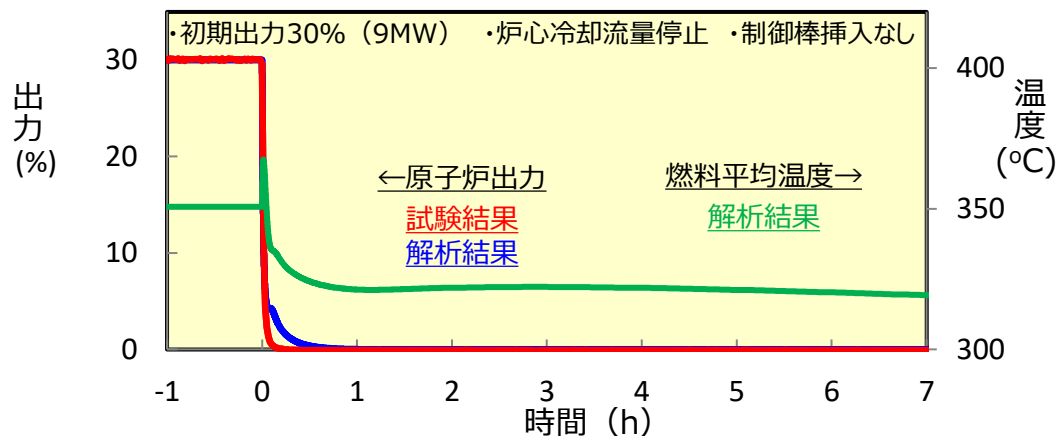
- ① 水を使わず化学的に安定なヘリウムで冷やすので、**水素爆発しない**
- ② 事故時に冷却材を失っても、黒鉛構造材が熱を吸収・放熱するので、**温度が上がりすぎない**
- ③ 燃料を嚴重（四重）に被覆するので、**極めて燃料溶融しにくい**

多様かつ効率的な熱利用

- 発電に加え、**950℃の高温熱**を利用した安定的かつ大量の水素製造等の産業利用や、**低温熱**を利用した地域暖房等の幅広い熱利用が可能。

放熱で自然冷却

試験炉HTTRで原子炉が自然に静定・冷却されることを確認



燃料体（黒鉛）

被覆燃料粒子

- 黒鉛構造材が熱を蓄熱・放熱し、被覆燃料粒子の健全性を維持
- 燃料を嚴重（四重）に被覆するので、極めて燃料溶融しにくい

2-0. 高温ガス炉：試験炉HTTRの固有の安全性は規制庁も認可

- 試験炉HTTRは、その固有の安全性により、規制庁審査にてあらゆる設計基準事故を超える事故に対応可能との結果。
- 大幅な追加措置無しで、2021年7月に運転再開。

○ 安全審査

項目	従来の内容	取得した許可における 新規制基準想定内容等
設計で想定する事故事象を超える事象 (BDBA)	・新規制基準による追加要求	(BDBAの想定) → <u>どの想定も炉心溶融は発生しない</u> ・設計で想定する事故事象 (DBA) + 原子炉停止機能の全喪失 ・設計で想定する事故事象 (DBA) + 炉心冷却機能の全喪失 ・設計で想定する事故事象 (DBA) + 閉じ込め機能の全喪失 ・使用済燃料プール等の冷却機能喪失
地震	・最大の地震動：350gal	新規制基準で地震動が厳しく (973 gal) になったが、高温ガス炉の安全性を考慮し、重要度分類を再分類 → <u>HTTRは大規模な追加工事は不要</u>

➡ 炉心溶融の可能性排除／大規模な追加工事無しに新規制基準合格

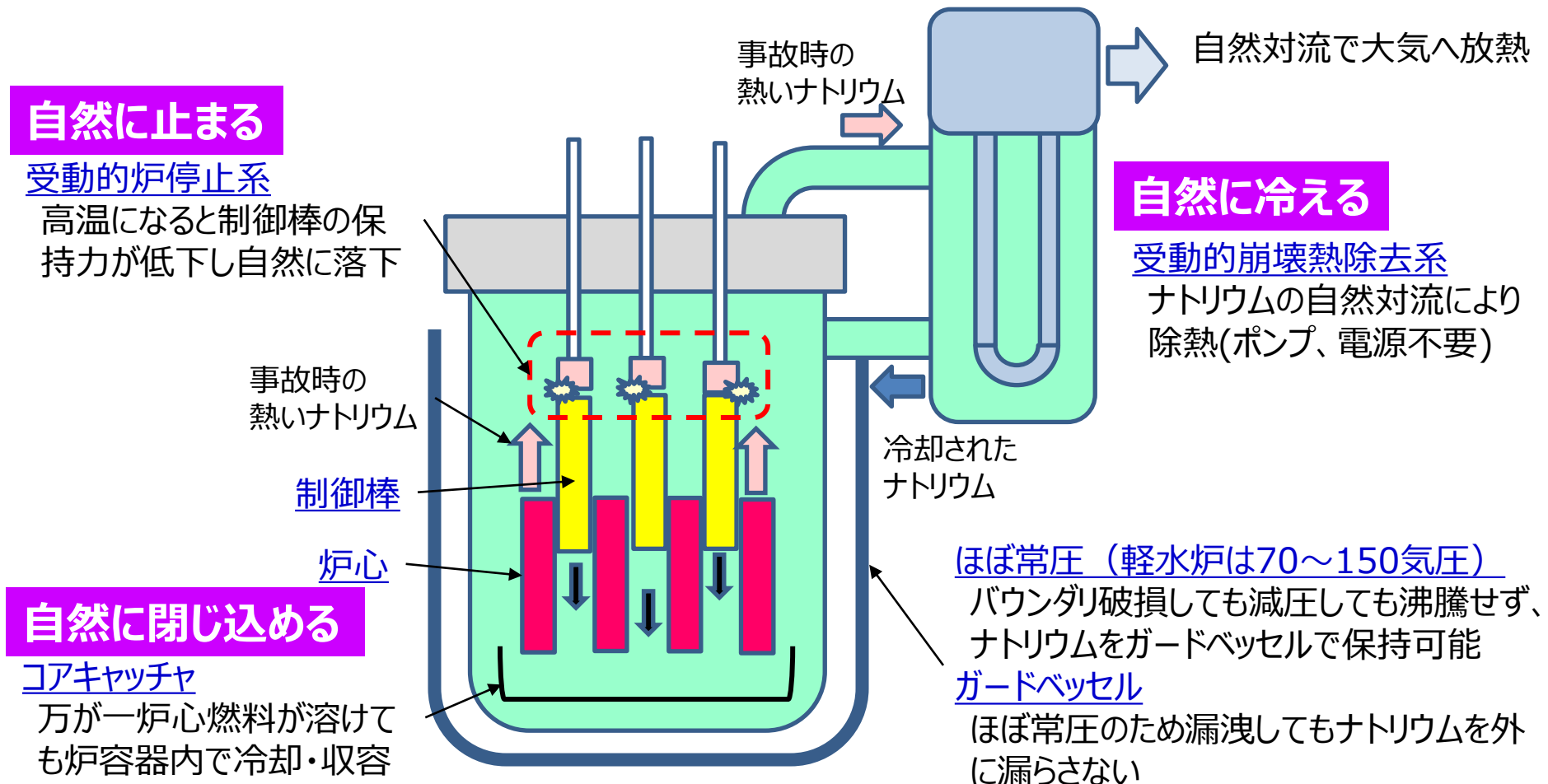
○ 緊急時活動レベルの見直し

事象	住民対応	
	変更前	変更後
原子炉運転中の非常停止が必要な場合に、原子炉の停止機能及び冷却機能を喪失する事象	屋内退避 (GE：全面緊急事態)	不要 (AL：警戒事象)
使用済燃料に対する冷却機能の喪失	屋内退避 (GE：全面緊急事態)	不要 (AL：警戒事象)
原子炉運転中に、燃料、1次系バウダリ、原子炉格納容器の閉じ込め機能が全喪失	屋内退避 (GE：全面緊急事態)	屋内退避の準備 (SE：施設敷地緊急事態)
HTTRにおけるGEは、 <u>防護設計の基準をはるかに超える自然事象やテロ行為</u> により、原子炉施設の閉じ込め機能を大きく破損させる事象が発生した場合のみと整理		

➡ 内部事象では敷地外での待避不要

2-0. 高速炉：サイクルの有効性を高めつつ低圧系で高い安全性

- 高速炉は高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減、資源の有効利用といった核燃料サイクルの有効性を高めるだけにとどまらず、革新的な安全性（自然に止まる、冷える、閉じ込める）を有する。



2-0. 高速炉：日本の安全設計基準が国際標準へ

- 第4世代炉国際フォーラム（GIF）において、我が国主導で1F事故の教訓を活かし、ナトリウム冷却高速炉の安全設計基準を整備。IAEA、OECD/NEAにおいても、国際基準として審議中。

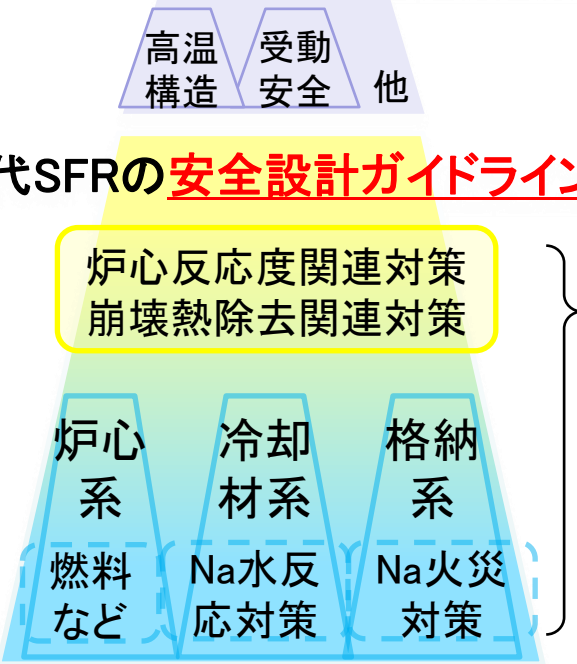
第4世代炉共通の安全原則

安全目標 ----- 例：緊急時退避の必要性を回避
基本的安全アプローチ ----- 例：深層防護第4レベル対応・受動的特性活用

第4世代SFRの安全設計クライテリア(SDC) ----- 安全原則を要件化

SFRの一般的特徴に基づく基本的要求
例：受動的な炉停止系及び崩壊熱除去系

第4世代SFRの安全設計ガイドライン(SDG)

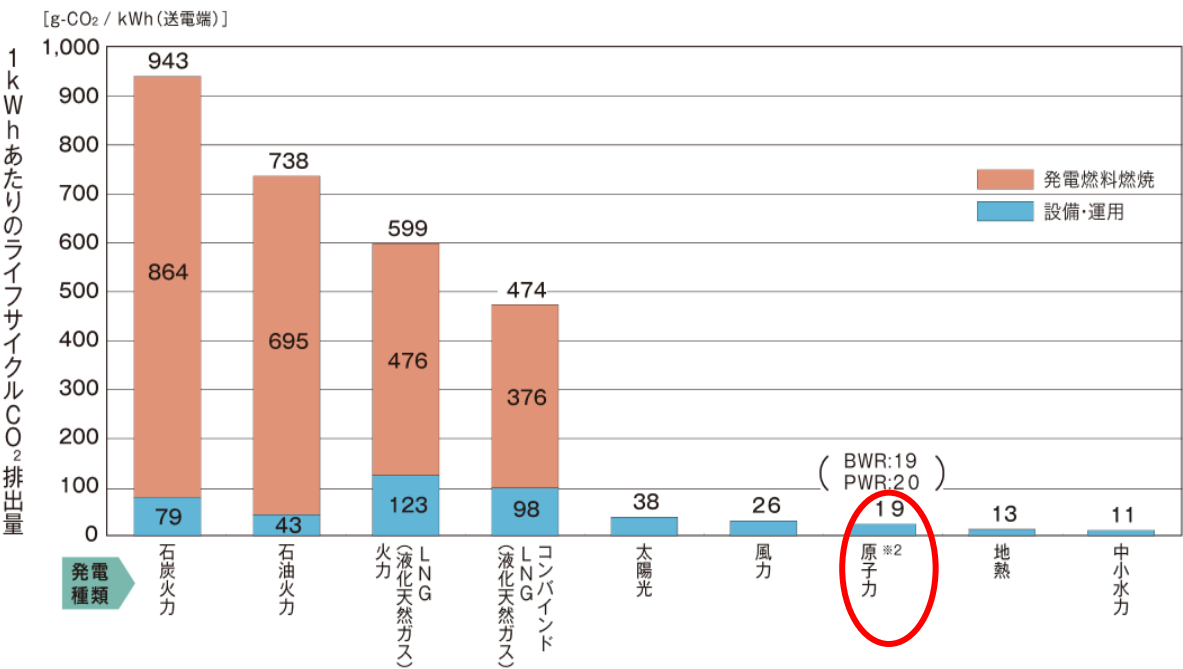


炉心系	炉心燃料の健全性	① 高温、高内圧、高照射環境に耐える燃料設計
	反応度制御	② 炉心冷却性を確保するための炉心設計
冷却材系	機器の構造健全性	③ 能動的炉停止
		④ 受動的炉停止または固有反応度特性の活用
		⑤ CDA時の過大なエネルギー発生防止と原子炉容器内保持冷却
	1次冷却材系	⑥ 高温・低圧条件に耐える機器設計
	Na化学反応対策	⑦ カバーガスとそのバウンダリ
		⑧ 液位確保対策
格納系	崩壊熱除去	⑨ ナトリウム漏えい燃焼対策
		⑩ ナトリウム-水反応対策
	格納バウンダリ	⑪ 自然循環の活用
	設計概念と負荷要因	⑫ 信頼性確保（多様性・多重性）
		⑬ 中間冷却材系の有する機能
		⑭ 格納バウンダリの形成と荷重

2 - 1. 電源の脱炭素化への貢献

- 原子力は、運転時にCO2を排出しないことに加え、電源毎のライフサイクルCO2排出量でも、水力・地熱に次いで低い水準。
- 原子力は、燃料投入量に対するエネルギー出力が圧倒的に大きく、電源の脱炭素化を進めるにあたっては、他電源と比べてエネルギー密度が大きい原子力が有力な選択肢に。

電源毎のライフサイクルCO2排出量



原子力発電所(100万kW)の年間発電量を代替する場合に必要な燃料

原子力 (濃縮ウラン)	21トン
天然ガス	950,000トン
石油	1,550,000トン
石炭	2,350,000トン

火力・原子力発電所(100万kW)と同量の発電量を得るための面積

原子力	約0.6km ²
火力	約0.5km ²
太陽光	約58km ²
風力	約214km ²

※ 山手線の内側の面積が約63km²

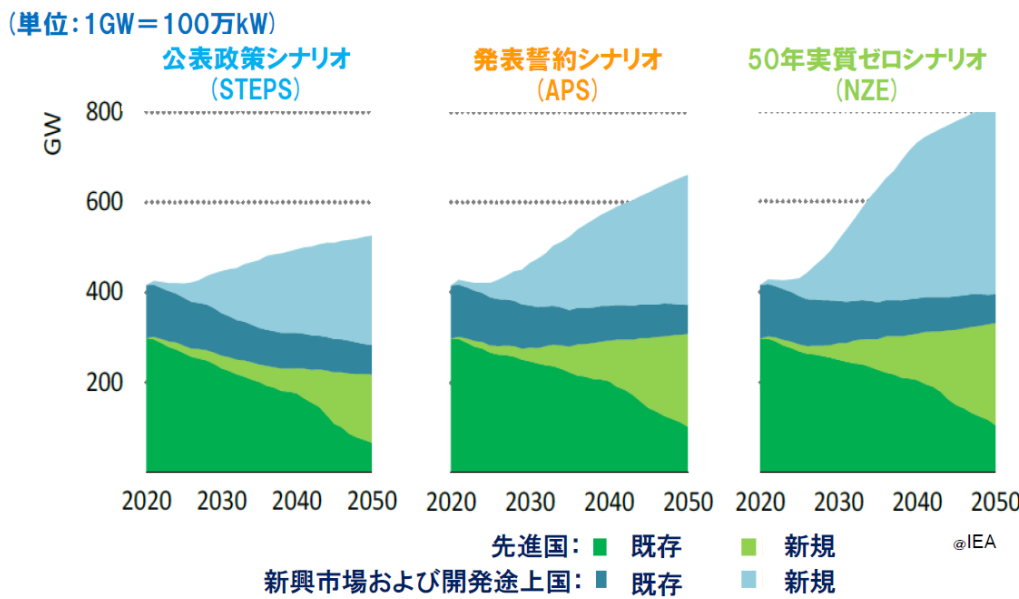
(出典) 電力中央研究所「日本の発電技術のライフサイクルCO2排出量総合評価」(2016年7月)

(出所) 資源エネルギー庁「電力調査統計」
2019年度火力発電燃料実績 (年度末貯蔵量) より算出

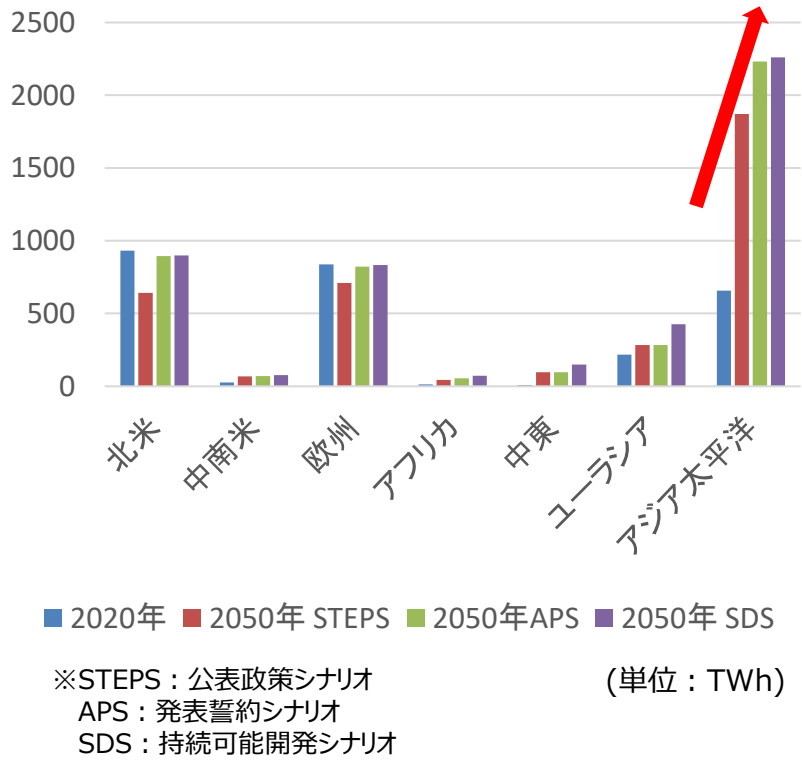
【参考】世界の原子力発電の将来見通し

- IEAの見通しによると、2020年には約400GWであった世界の原子力発電の設備容量は、2050年に最大800GWまで倍増する見通し。
- 特に、アジア・太平洋地域では、旺盛な電力需要増大やグローバルな脱炭素化の要請に伴い、石炭火力の代替として、原子力による発電量が約3倍に拡大するとしている。

世界の原子力発電設備容量の見通し



原子力の地域別の発電電力量見通し

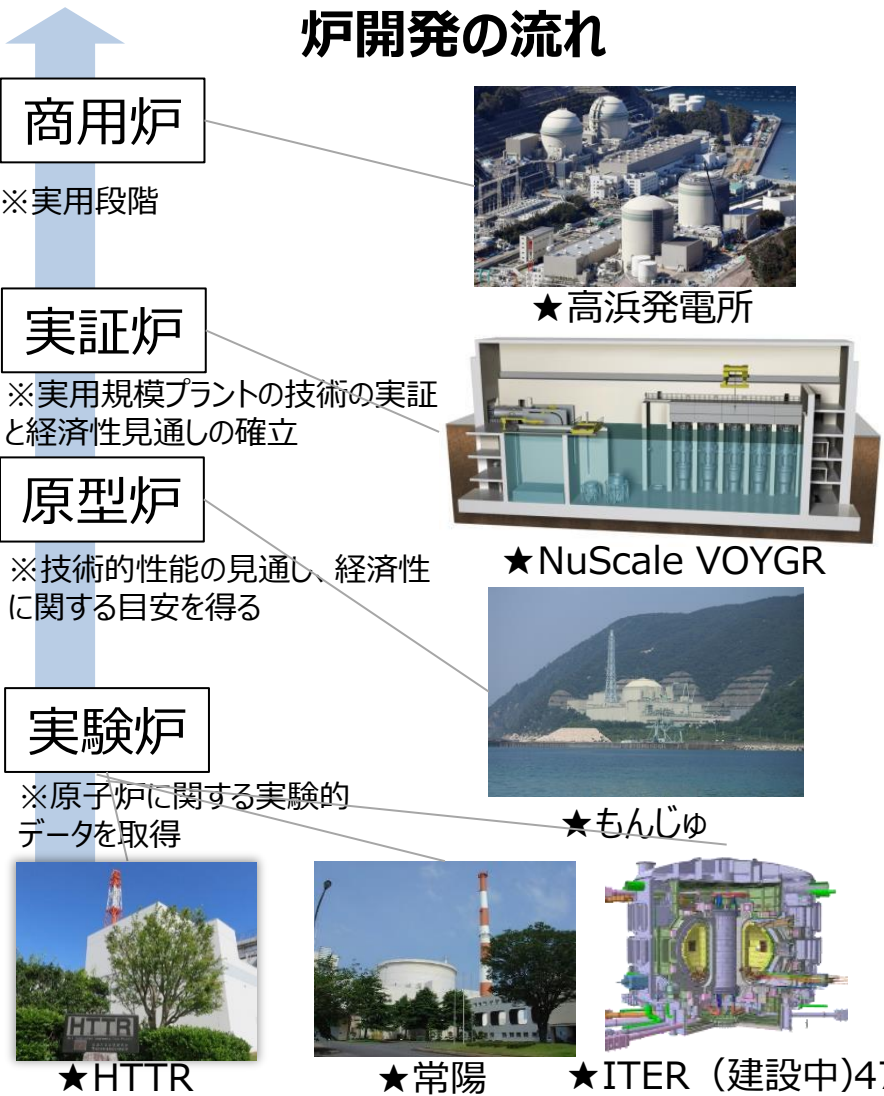


【参考】原子力技術の熟度

- 一般に、炉開発は、実験炉、原型炉・実証炉、商用炉の順で段階的に進める。
- 軽水炉は既に商用化されてから50年以上経過しており、最も熟度が高い。原型炉や実験炉の建設・運転・保守経験を有する高速炉、高温ガス炉も我が国の技術に優位性。

TRL (Technology Readiness Level) の定義

技術開発の相対的なレベル	TRL	TRLの定義
システムの運転段階	TRL 9	想定される全ての条件で運転された実システム
システムの試運転段階	TRL 8	試験と実証を通じて完成し性能確認された実システム
	TRL 7	フルスケールで、同様な（原型的な）システムを、現実的な環境において実証しているレベル
技術の実証段階	TRL 6	工学規模で、同様な（原型的な）システムを、現実的な環境において検証しているレベル
技術の開発段階	TRL 5	実験室規模で、同様なシステムを、現実的な環境において検証しているレベル
	TRL 4	実験室環境で、機器・サブシステムを検証しているレベル
実現可能性を示すための研究段階	TRL 3	解析や実験によって、概念の重要な機能・特性を証明しているレベル
	TRL 2	技術概念・その適用性を確認しているレベル
基礎技術の研究段階	TRL 1	基本原理を確認しているレベル



【参考】石炭火力発電の廃止を念頭に大型軽水炉を導入する動き

- 世界のカーボンニュートラルの潮流の中、石炭火力発電を段階的に廃止する流れ。
- 近年、オランダやポーランドでは、石炭火力廃止に加え、原子力発電所の新規建設の方針を発表。

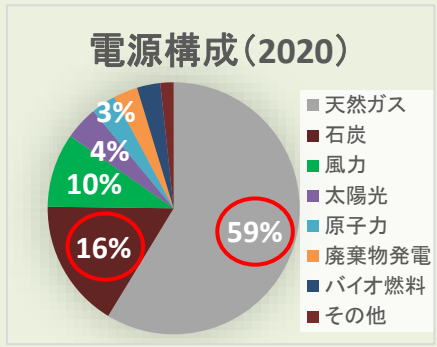
オランダ

- 2015年、石炭火力を2030年までに段階的に停止する法案を可決。
- 2021年、新政権における連立合意文書にて、稼働中のPWR1基（48万kW）の運転延長と、新たに2か所で原子力発電所の建設方針を明記。

原子力はエネルギーミックスにおいて太陽光、風力、地熱を補完することができ、水素製造も可能。
我々のガス輸入への依存も低減。

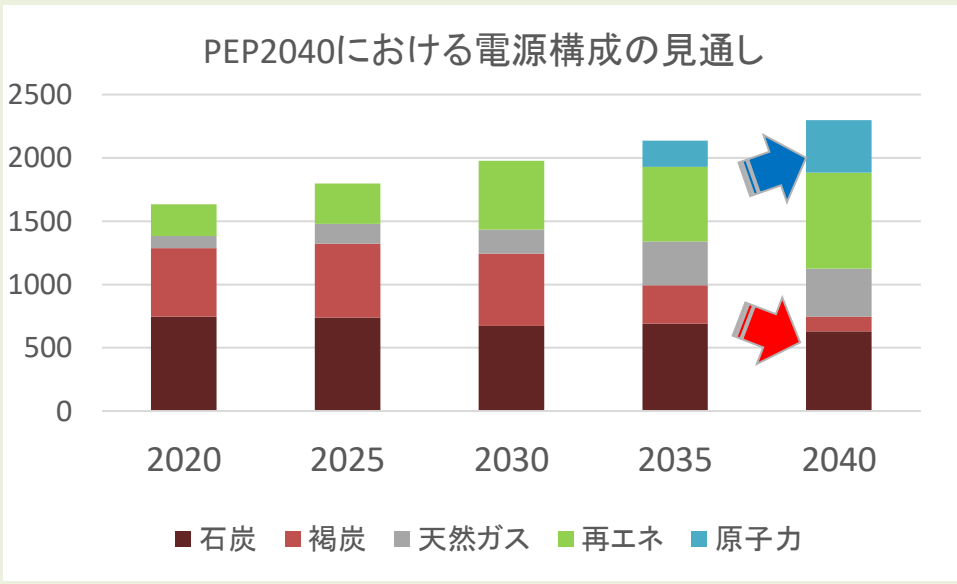


ルッテ首相率いる新連立政権



ポーランド

- 現状、火力発電が約7割を占めているが、今後石炭火力の依存度を低減し、2040年代には廃止予定。
- 2021年、大型軽水炉を2043年までに6基導入する方針を発表(2033年に初号機の運転開始)。



(出典)「2040年に向けた ポーランドエネルギー政策 (PEP2040)」

2-2. 製造部門における熱利用・水素製造への貢献

- 鉄鋼等の産業部門では、水素還元製鉄等の新たな取組が進められており、大規模かつ経済的な熱・水素の安定供給が必要。
- 高温ガス炉で、少ない敷地面積で、天候に左右されず、大規模かつ安定に熱・カーボンフリー水素の自給自足の可能性。鉄鋼・化学等の産業部門での脱炭素化を実現する可能性。

カーボンフリー社会での高温ガス炉活用のイメージ



製鉄用高炉 1 基に水素を供給するのに必要な敷地

高温ガス炉



約 $\frac{1}{1600}$ <<

東京ドーム1/2個以下
(~ 2 万m²)

太陽光



東京ドーム約700個
(約32.4km²)

高温ガス炉の活用により、カーボンフリーで大規模・安定の水素製造が可能

	コジェネシナリオ① (高温ガス炉1基当たり)	コジェネシナリオ② (高温ガス炉1基当たり)	必要量 (高炉1基 (鉄鋼400万t/年)当たり)
水素製造量	約9億 Nm ³ /年 (約12万Nm ³ /hr)	約7億 Nm ³ /年 (約9万Nm ³ /hr)	27.2億Nm ³ /年 (約31万Nm ³ /hr)
発電量	約160 MWe	約200 MWe	250 MWe

※2050年政府目標：2000億Nm³/年

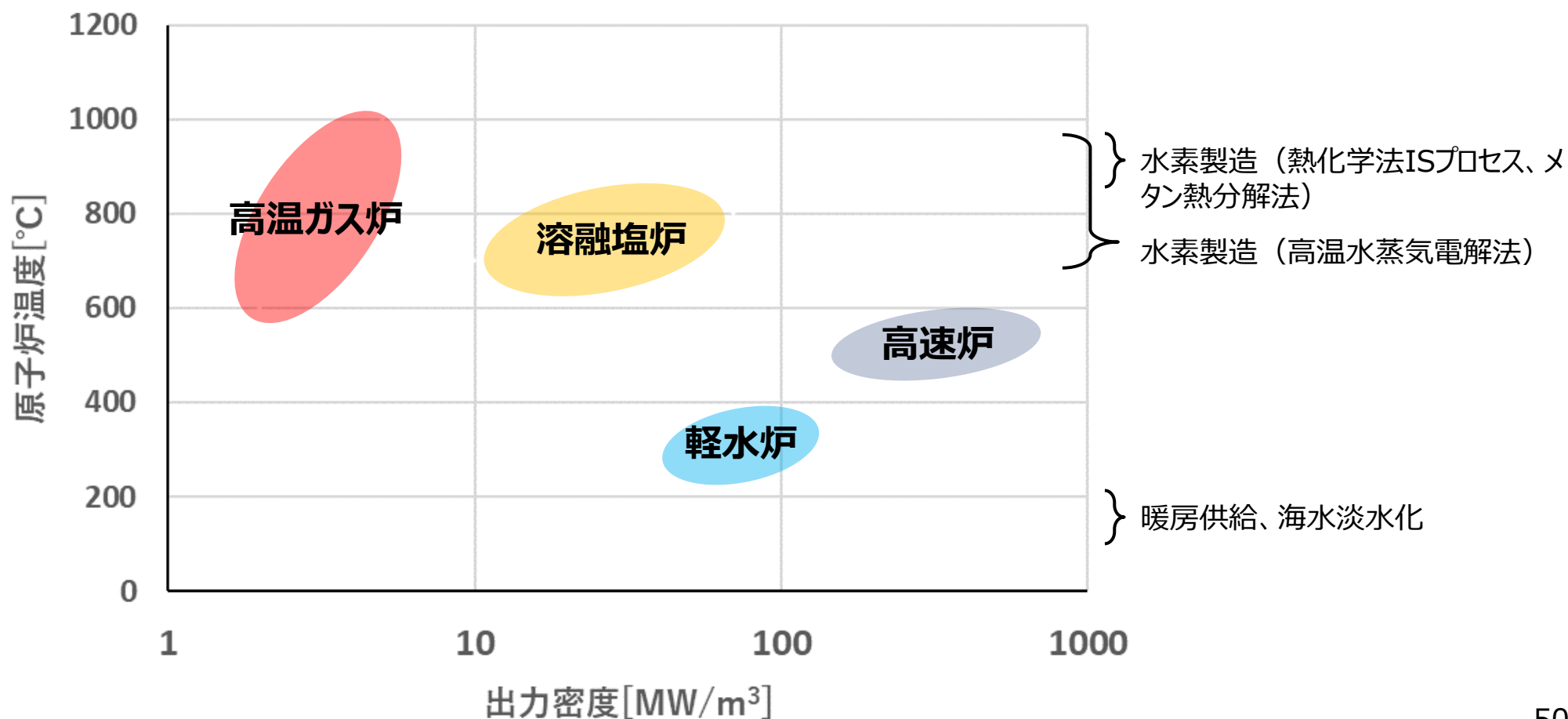
※高温ガス炉コジェネプラント（三菱重工業）に基づくデータ

【参考】各炉型の原子炉温度や出力密度

- 原子炉温度が高い炉型は、発電効率が高く、水素製造等の熱利用のポテンシャルを持つ。
- 出力密度が高い炉型は、炉心が小さく、発電の経済性向上のポテンシャルを持つ。

各炉型の原子炉温度や出力密度の領域（イメージ）

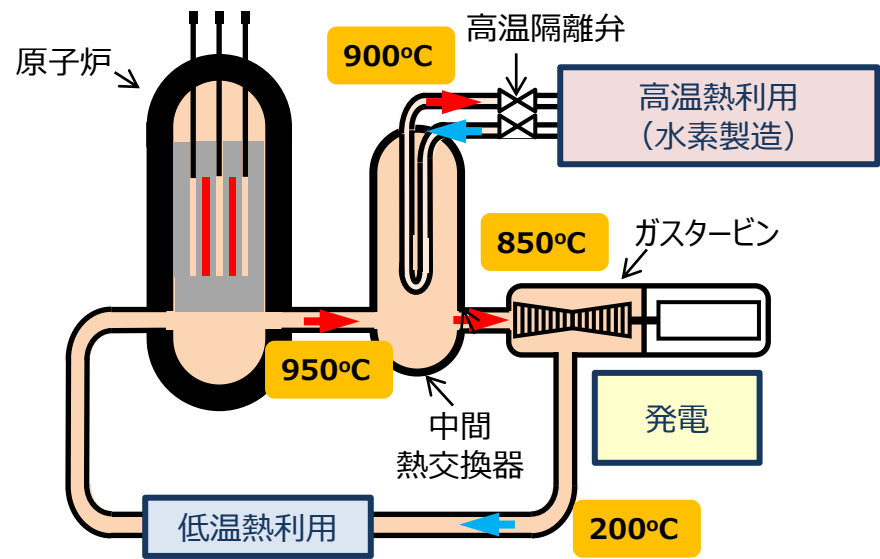
熱利用の形態



【参考】高温ガス炉水素製造システムの経済性

- 発電と水素製造のコジェネシステムの特長を生かし、発電の利益の一部を活用することで、水素製造コストを下げる事が可能。（例えば、発電コスト5.8円/kWh（発電のみの場合）のところ、8.0円/kWhで売電した場合、約13円/Nm³（25.4→**12.4円/Nm³**）のコスト低減効果）
- 廃熱（低温熱）を利用して地域暖房を行うと（0.65円/MJとした場合）約12円/Nm³コスト低減の可能性あり。（海水淡水化等についても低減可能性あり）
- 副産物である酸素は、製鉄所内で需要があり（高炉、転炉）、製鉄に用いる場合コスト低減につながる。

項目	コスト低減効果 (円/Nm ³)	水素製造コスト (円/Nm ³)
水素製造のみ	-	25.4
水素製造と発電のコジェネレーション	13.0	12.4
廃熱(低温熱)利用	12.3	0.1



※グリーン成長戦略
2050年コスト目標：20円/Nm³以下

熱電併給用高温ガス炉システム

(出典：日本原子力研究開発機構試算)

【参考】高温ガス炉等の超高温を利用した水素大量製造

- 令和4年度より、日本原子力研究開発機構（JAEA）所有の**高温ガス炉試験炉（HTTR）の超高温（950℃）を用いた水素製造技術の実証を開始。**

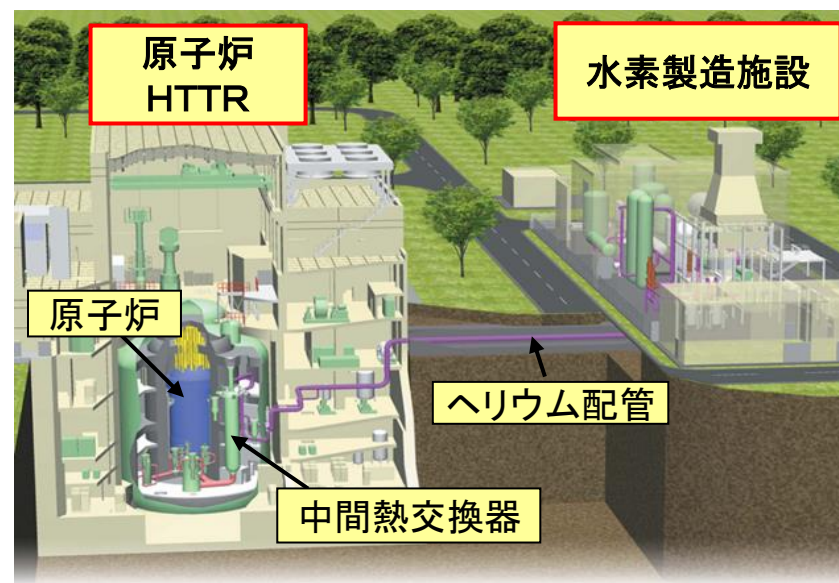
超高温を利用した水素大量製造技術実証

日本原子力研究開発機構、三菱重工業株式会社

- 800℃以上の脱炭素高温熱源（例えば、高温ガス炉、太陽熱、核融合等）を活用したカーボンフリー水素製造法によって、**2050年には約12円/Nm³で大量の水素を安定的に供給する可能性**を念頭に、製鉄や化学等での産業利用に繋げることを目指す。
- 高温でも利用可能な高温隔離弁の開発等、**HTTRと水素製造施設を安全に接続する技術開発**を実施。
- 国内外の様々な**カーボンフリー水素製造技術**（IS法、メタン熱分解法、高温水蒸気電解等）の**フィージビリティスタディを実施**。超高温熱源の活用に適した水素製造技術を検討。
- 並行して、上記で検討した技術の**実用化スケール向けの実現性及び成立性を確認**。



高温熱による産業界への水素活用のイメージ



HTTR-水素製造施設の構成（イメージ）

【参考】原子力を活用した水素製造・熱利用プロジェクト①

国	PJ名	対象炉型	支援額	水素製造規模	期間	概要
米国	低温電気分解の実証	PWR (Davis Besse発電所、Energy Harbor社)	918万ドル (約10億円)	33~42kg/h (800~1000kg/day)	2020~2021年	・軽水炉発電所に統合される水素製造パイロットプラントに必要な電気、熱、モニタリング、電解装置の応答速度、制御インターフェイスなどについて調査 ・トラック1(技術・経済性評価)、トラック2(プラントへの統合試験等)の2段階 ・プラントの150マイル圏内の石油精錬所などで使用
	高温電気分解の実証とフィジビリティ評価	PWR (Prairie Island発電所及びPalo Verde発電所、Xcel Energy社)	1,346万ドル (約15億円)	4kg/h	2020年~	・上記プロジェクトの続編 ・トラック3(Prairie Island発電所に高温電気分解水素製造パイロット施設設置等)、トラック4(Palo Verde発電所二次系への可逆電気分解システム統合のフィジビリティ評価等)の2段階 ・水素使用用途については情報なし
	PEMの実証	BWR (Nine Mile Point発電所、Exelon社)	361万ドル (約4億円)	電解槽容量 1MW	2020年 4月から 3年間	・Nel Hydrogen社のPEM電解槽の設置及び電解槽運転のシミュレーション ・タービン冷却系や化学物質制御用としてオンサイトで使用(販売はしない予定)
カナダ	実現可能性調査	CANDU	—	667m ³ /h	2021年 6月~	・Arcadis社が主導。Bruce Power社などが協力 ・オンタリオ州での水素製造のFS ・水素使用用途については情報なし

【参考】原子力を活用した水素製造・熱利用プロジェクト②

国	PJ名	対象炉型	支援額	水素製造規模	期間	概要
英国	Hydrogen to Heysham (H2H)	AGR (Heysham発電所、EDF Energy社)	—	最大 800kg/day	～2019年 9月でFSが完了	・政府による低炭素水素供給の資金提供コンペ応募案件。第一段階でFSを実施(採択された旨の情報はない) ・電解槽と原子力発電所の直接接続、副生成物である酸素にも価値を持たせるなどのアプローチを導入予定。 ・短期的には所内利用等、長期的にはガスグリッドへの注入等を想定
	Sizewell C Hydrogen Demonstrator Project	PWR (Sizewell B、EDF Energy社)	—	電解槽容量 2MW程度	2020年 11月～	・Sizewell C発電所(EPR)での熱を活用した商業規模の水素製造に向けた実証事業 ・Sizewell C建設の脱炭素化にSizewell Bを活用 ・製造した水素は発電所建設で使用する車両や機器の燃料などで利用
中国	高温ガス炉での水素製造	HTGR	—	50,000m ³ /h	—	・100 L/hourの水素製造実験に成功 ・鉄鋼業で使用
ロシア	VVERでの水素製造	VVER (Kola発電所、ROSATOM社)	—	電解槽容量 1MW、10MW	2021～ 2023年	・プラントに水素製造施設を統合 ・1MWの実証から開始して10MWまで拡張予定 ・水素使用用途については情報なし
	SMR水素製造で韓国との協同	SMR	—	—	2021年 12月～	・SMRでの生産技術の開発を目指す ・SMRに高温水蒸気電解施設を統合する予定 ・水素使用用途については情報なし
韓国	高温電解施設製造会社との覚書	HTGR	7,500万 ユーロ (約98億円)	電解槽容量 200MW	2022年 1月～	・発電所周辺の水素製造施設にElcogen社の固体酸化物電解技術を取り入れる ・水素使用用途については情報なし

【参考】原子力水素の産業利用（中国）

- 中国は2018年より、CNNCが高温ガス炉を活用した水素製造・熱利用を検討。

中国高温ガス炉での 水素製造・熱利用

- 中国核工業集団(CNNC)の子会社である中国核工業建設集団(CNEC)は、中国で最初の高温ガス炉(HTGR)の主要な開発者・投資者
- CNNCは2018年から原子力発電の余剰電力を使用して水素製造をするPower to Gas(P2G)を検討。HTGRは、原子力P2Gのオプションの一つ
- CNNCは清華大学・宝鋼集団と協力して**鉄鋼業での利用に向けたHTGRベースのグリーン水素プロジェクトに着手**(CNECが主導)

<現状>

- 100L/hの製造規模を目指したパイロットプロジェクトでの実験に成功

<今後>

- 600MW級HTGRで50,000m³/hの製造規模のP2Gを視野に入れている

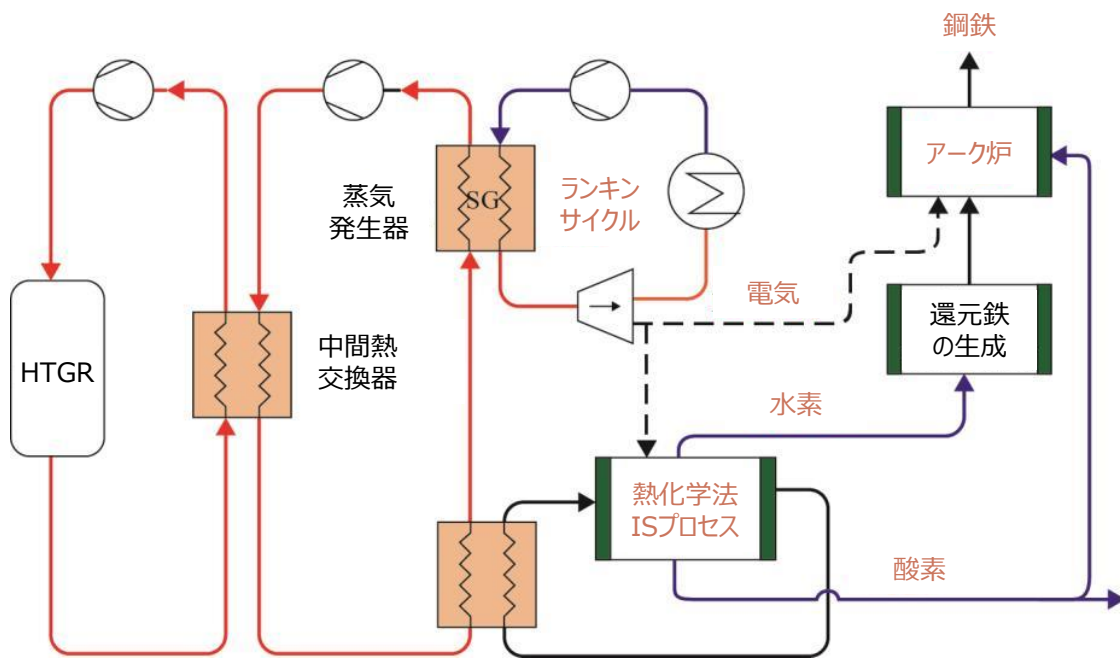


図 HTGRと製鉄プロセスの統合

出典：Tsinghua University, 2019, Nuclear Hydrogen Production Based on High Temperature Gas Cooled Reactor in China,
<https://www.engineering.org.cn/en/10.15302/J-SSCAE-2019.01.004>

出典：Energy Iceberg, 2020/11/4, Ten Chinese Green Hydrogen Companies Poised to Lead,
https://energyiceberg.com/ten-chinese-green-hydrogen-companies/#CNNC_Nuclear_Giants_Power-to-Gas

【参考】原子力水素の産業利用（米国）

- 米国は2020年より、DOEの原子力エネルギー局が技術開発支援を実施。

低温電気分解の実証 (Energy Harbor社・INL)

<概要>

- 軽水炉発電所に統合される水素製造パイロットプラントに必要な電気、熱、モニタリング、電解装置の応答速度、制御インターフェイスなどについて調査

<トラック1(技術・経済性評価)>

- 軽水炉と水素製造のハイブリッド制御についての技術・経済性評価(水素貯蔵も含む)

<トラック2(低温電解の実証)>

- Davis Besse発電所(PWR)に低温電解水素製造パイロット施設を統合し試験
- 試験では既存の機器やプラント、実験施設を利用
- 低温電解施設では2MWeの電力を使用し、コンテナ化されたPEM電解槽にて1日あたり9,085Lの水から800～1,000 kgの水素を製造
- 入力変数に基づいて水素製造出力を調整することができるソフトウェアのテストも実施

高温水蒸気電解の実証及びFS (Xcel Energy社・INL)

<概要>

- 左記のトラック1/2の実証に続いて実施されたプロジェクト<トラック3(高温電解の実証)>

- Prairie Island発電所(PWR)に高温電解水素製造パイロット施設(約4kg/h以上製造可)を設置
- 同施設はINLによる試運転後、事業者が運転し、データ収集や性能監視、発電所システム等との相互関係、気候条件による運転状況把握などを実施

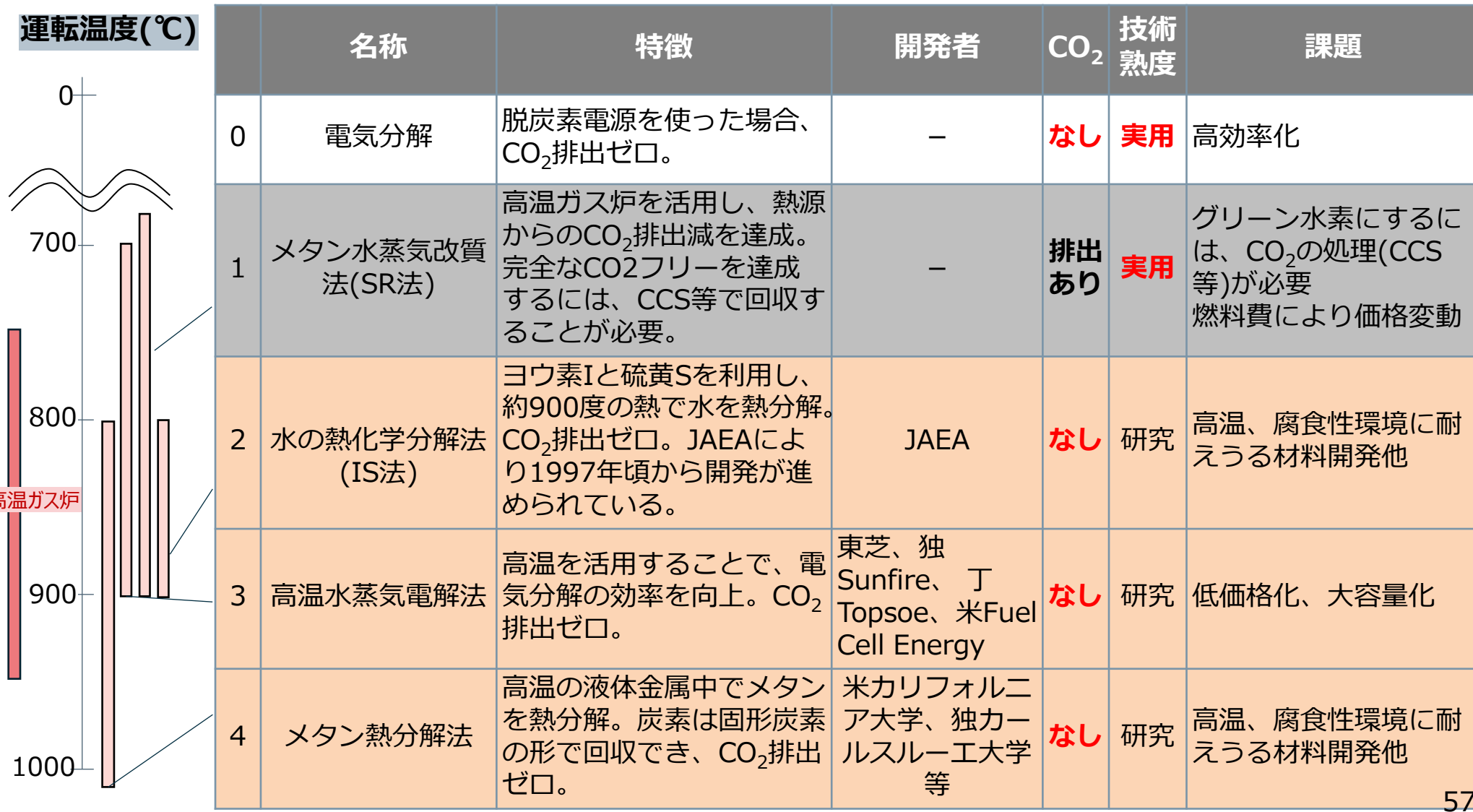
- ハイブリッド運転に必要なインターフェイスを開発

<トラック4(フィジビリティ評価)>

- Palo Verde発電所(PWR)の水素貯蔵インフラを対象
- 可逆電解システムをプラント二次系に統合するためのプラント初期設計及びフィジビリティ評価
- 上記評価及びトラック3までのプロジェクトに基づき、可逆電解ユニットの技術的・経済的なフィジビリティを実証するための設計パッケージを開発(水素貯蔵も組み込む)

【参考】国内外にて開発が進められている水素製造方法

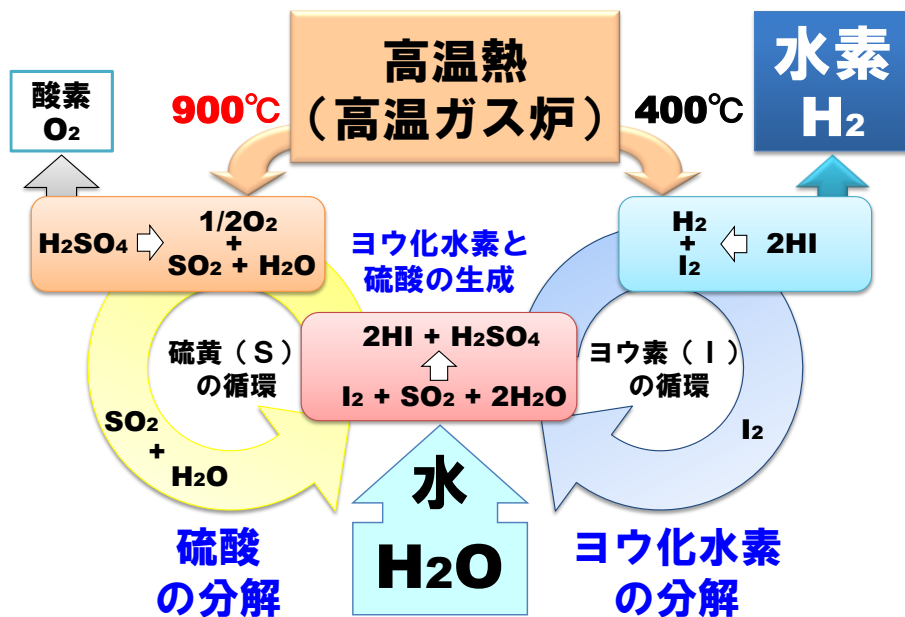
- 常温の電解法が世界で競争が加速するが、カーボンフリー水素製造には再エネコストの高さが壁。
- 高温を活用したカーボンフリー水素製造方法については、世界で**研究開発**が加速。



【参考】水素製造方法（熱化学水素製造法ISプロセス）

- ヨウ素(I)と硫黄(S)を利用して約900℃の熱で水を熱分解。

水素製造の原理と特徴



- 大規模オフサイト製造に適しているため大量の水素製造が可能
- 高温ガス炉との組み合わせにより炭酸ガスの排出なし
- ヨウ素及び硫黄はプロセス内で循環することから有害物質の排出なし

実用化に向けた技術課題

- ① 高温、強腐食性環境→ **耐食・耐熱機器の開発**
- ② 安定した水素製造→ **プロセス制御法の開発**



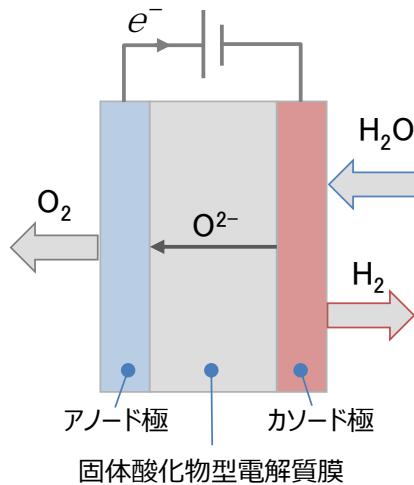
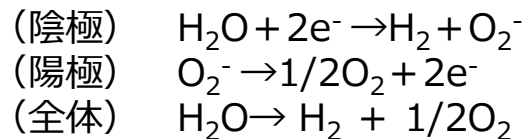
実験装置（日本原子力研究開発機構）

【参考】水素製造方法（高温水蒸気電解（SOEC））

- 水電解の効率が最も高く、省電力で大型適用も可能な将来の水電解技術。

水素製造の原理と特徴

【原理】固体酸化物膜（ジルコニア）を用い、700℃において
高温水蒸気を電気分解して水素製造。



【特長/理由】

- ・ 高電解効率
/高温（700℃）水分解反応
- ・ 省電力
/排熱を水素製造に利用可能

製品例

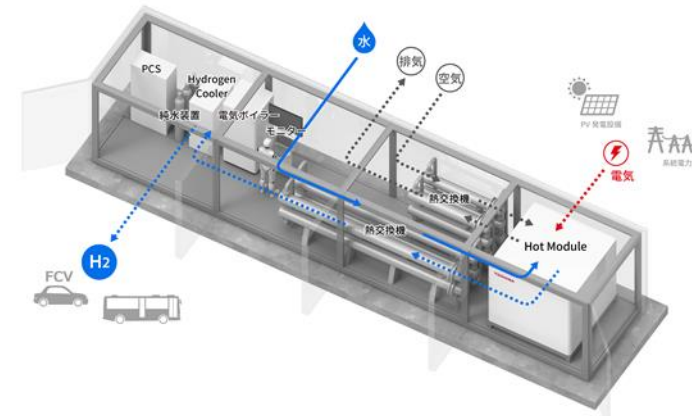
- Sunfire社、10kW試験機



社会実装例

- 東芝：SOEC500kWイメージ図

SOEC 水電解装置 システム構成



現状の設備単価と耐久性

- 装置システムコスト：80万円/kW（試作品）
- 耐久性：定常運転では2万時間オーダー

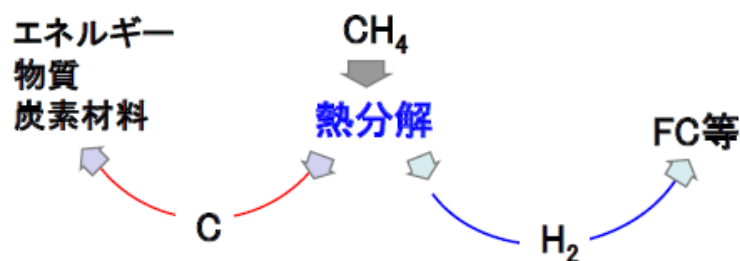
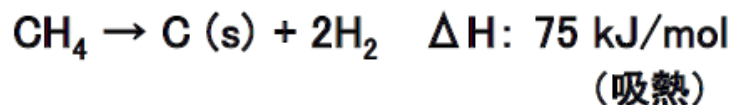
技術開発課題

- 耐久性向上、低コスト化
- セル・スタック製造技術、高温構造材技術

【参考】水素製造方法（メタン熱分解法）

- メタン分解の際、炭素を固体として分離することで、カーボンフリー水素を製造。

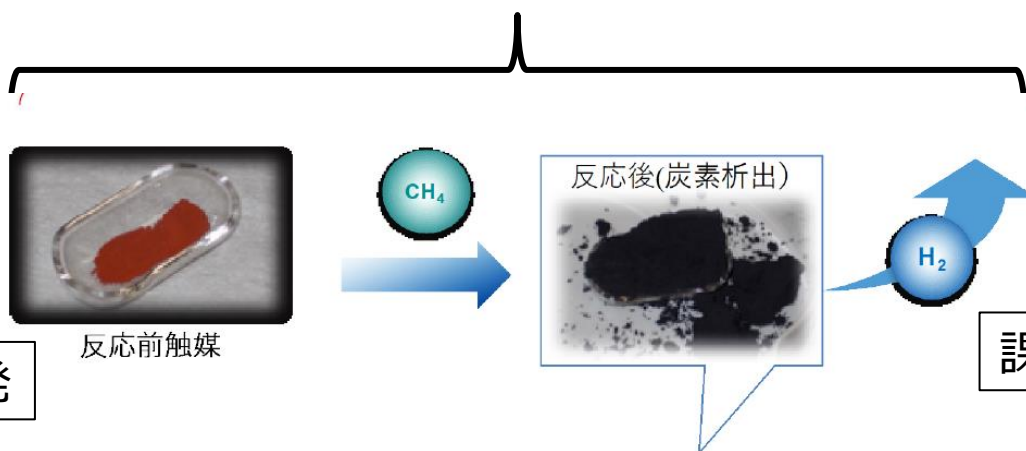
水素製造の原理と特徴



長所：炭素は固体として回収するため、CO₂を排出しない
短所：低効率

実用化に向けた技術課題

課題①：反応器設計



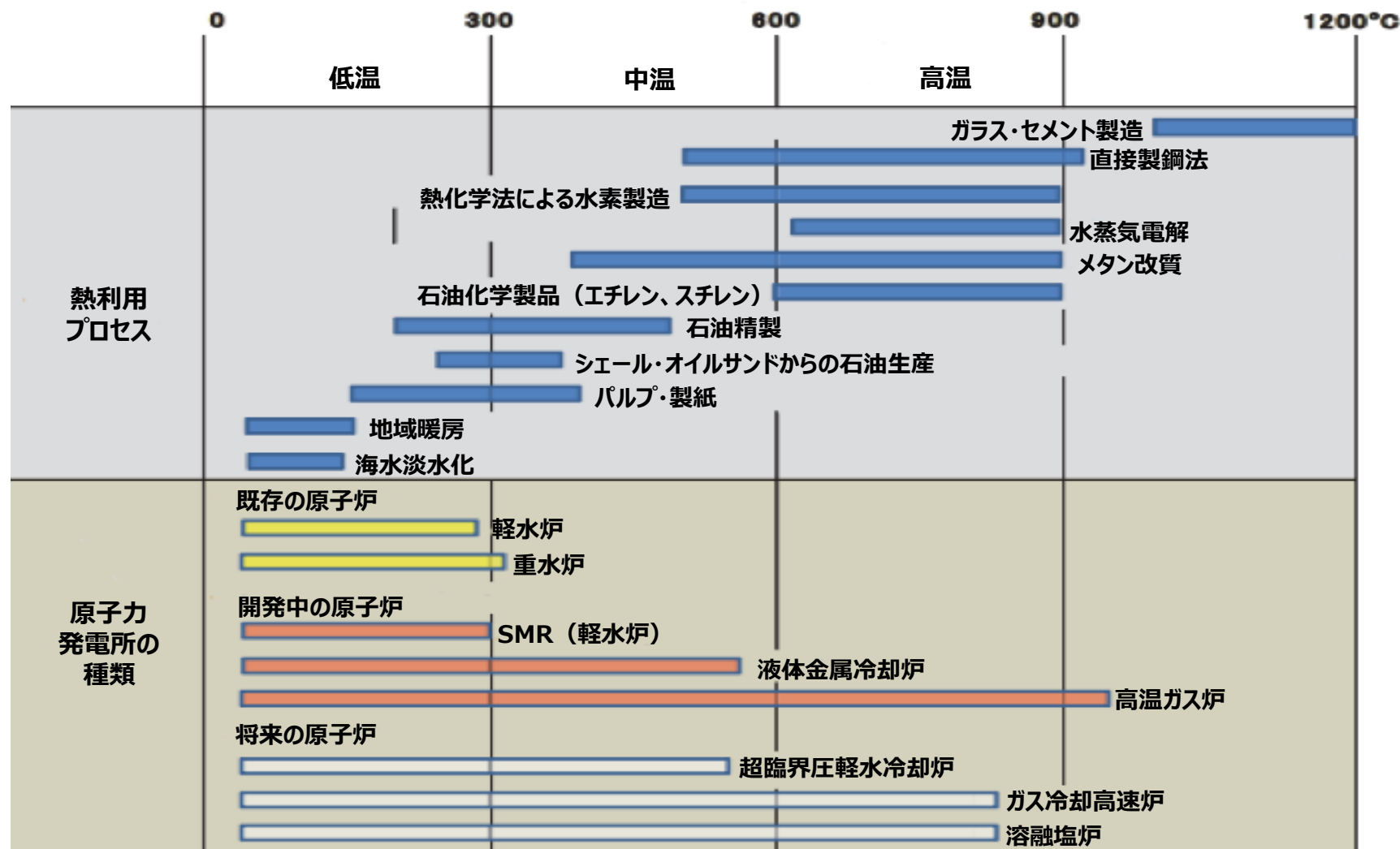
課題②：触媒開発

課題④：炭素の輸送・処理

課題③：固体炭素の活用・処理方法

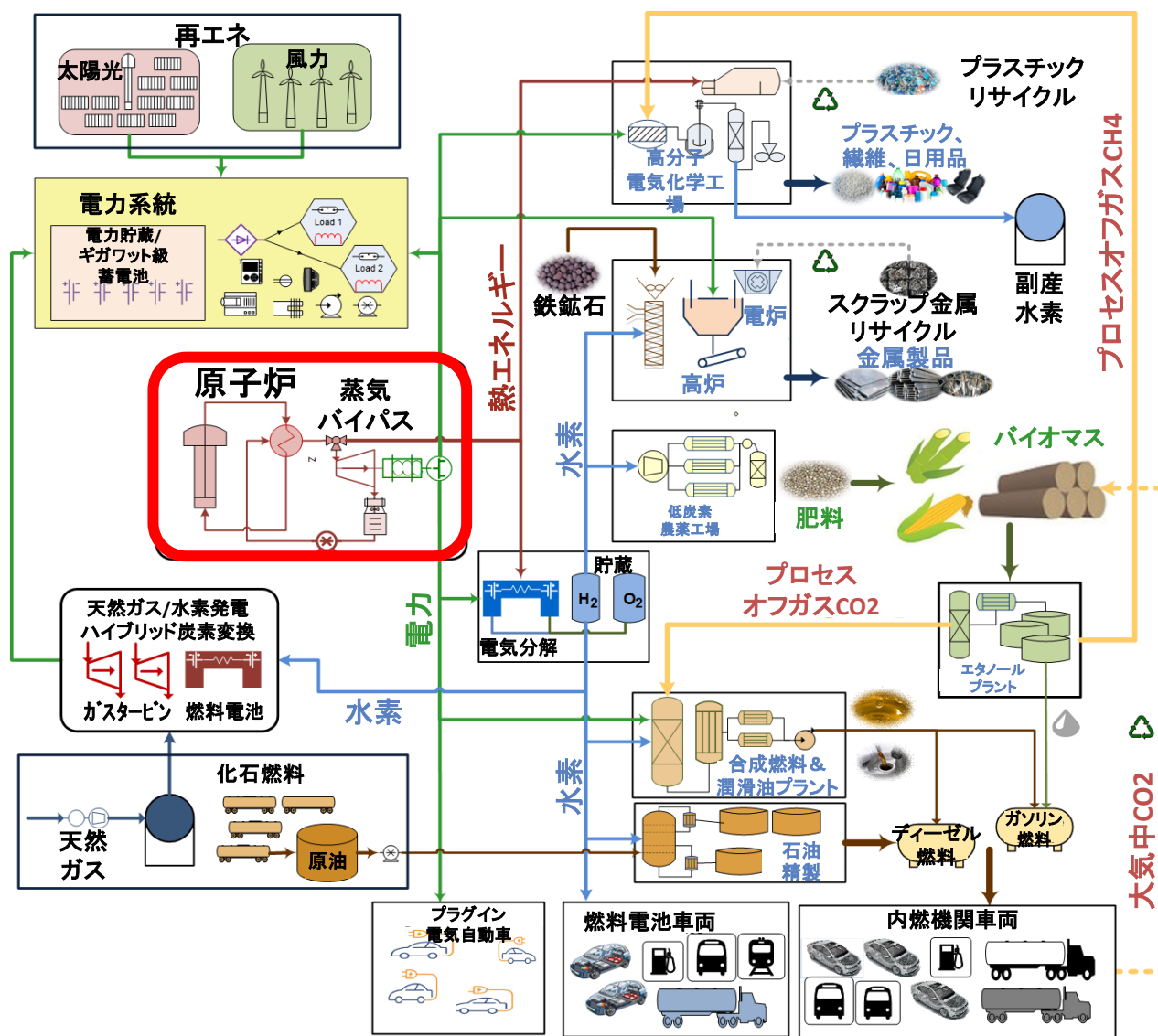
【参考】熱利用プロセスと各炉型の温度範囲

- 革新炉は低温（～300℃）から高温（～900℃）の熱供給の可能性があり、水素製造だけでなく、地域暖房や製鉄等の産業プロセス熱にも適用の可能性がある。



【参考】原子力の統合エネルギーシステム（IES）の概念図

- 米国エネルギー省（DOE）は、革新的かつ分野横断的な原子力エネルギー技術を開発するための統合エネルギーシステムを提唱（再エネ変動性補完や産業部門における熱・水素供給を含む）。



2-3. 負荷追従による系統安定化・再エネ導入への貢献

- 軽水炉やSMR・高速炉等の新たな炉型においては、再エネの大量導入等との親和性も勘案し、負荷追従可能なシステムを持ち、系統全体の安定化に貢献。

<フランスの軽水炉PWR>

- ・ 原子力発電比率が7割以上に上るフランスでは、一部の原子力発電所は柔軟に出力を調整し、電力需要の増減に対応。
- ・ 通常の制御棒に加え、中性子吸収量が小さい制御棒を併用することで、出力50%で運転可能。

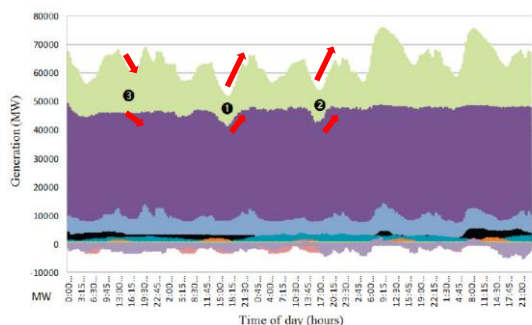


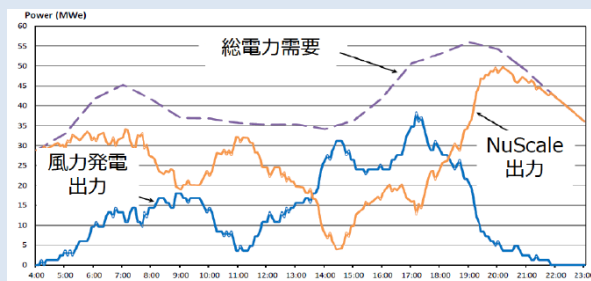
FIG. 20. Generation mix and demand in France during the Easter holiday, from 30 March to 3 April 2013 (reproduced from Ref. [23]).

(出典) Non-baseload operation in nuclear power plants: load following and frequency control modes of flexible operation, IAEA, 2018

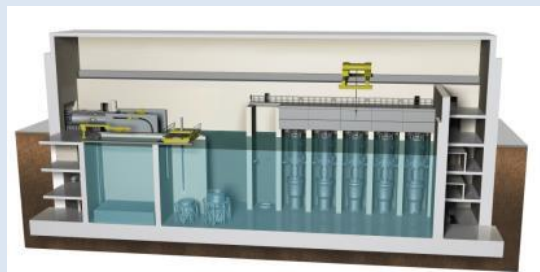
(出典) https://www.jaif.or.jp/cms_admin/wp-content/uploads/2015/12/sp_necg_1208-12.pdf

<NuScale VOYGR (SMR) >

- ・ 最大12基のモジュールを個別に起動・停止、制御棒調整、タービンバイパス制御により、様々な時間単位での負荷追従運転が可能。



NuScale VOYGRによる負荷追従イメージ



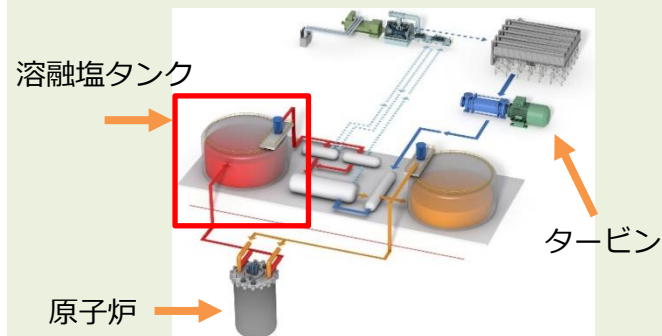
NuScale VOYGR 外観図

※NuScale社HP (<http://www.nuscalepower.com>) から引用

<TerraPower 高速炉 Natrium>

- ・ 高速炉の高温と蓄熱性能に優れた溶融塩タンクを組み合わせ、負荷追従が可能。
- ・ 蓄熱システムにより、5時間半以上にわたり、電気出力を34.5万kWから50万kWまで引き上げることが可能。
- ・ 溶融塩タンクによる蓄熱システムは、出力変動する再エネの補完として既に実用化。

システム概念図



2－3．分散型・可搬型エネルギーの供給

- 米国等でも、石炭火力に依存する僻地の脱炭素化や電力需要の分散・多様化へのニーズが存在。
- こうしたニーズを満たす手段として、小型分散型電源としてのマイクロ炉、系統分離された可搬型電源としての船舶搭載炉等に脚光。

マイクロ炉

- 極地や未開発地、さらには海洋上や宇宙領域など、過酷な環境において、長期間、燃料交換なしに、エネルギーの安定供給が可能。
- 米国国防総省を中心に遠隔地での軍事オペレーション等を支える技術として、2025年の実用化を目指し、約650億円の予算措置を実施。
- 宇宙領域においても、原子力の活用が米国等で検討されている。NASAは2030年までに小型原子炉を設置し、月面探査の電力源にすることを検討。
- 国内でも三菱重工が、災害時の非常用電源、遠隔地などで多目的に利用できるマイクロ炉を開発中。



原子力を利用した宇宙探査船

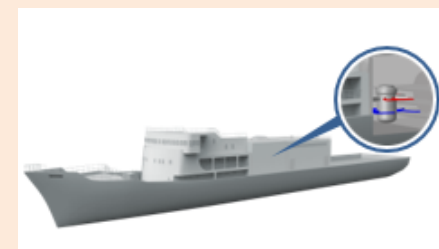
(出典)NASAのHPより引用

モバイル型SMR（船舶搭載炉）

- 長期間燃料交換不要な燃料を採用し、発電船により、離島・島嶼地域などの僻地や災害地等での電源供給が可能。ロシアで世界初の洋上原発の商業運転が2020年に開始。
- 国内でも三菱重工が、炉容器に蒸気発生器を内蔵することで、冷却材喪失事故の排除、炉心冷却にポンプ等の動的機器を使わない受動的安全性を有した船舶搭載炉を開発中。独自IPで、陸上発電用として出力30万kWの炉、船舶搭載用として革新的な窒化物燃料を使う出力3万kWの炉を開発。



発電用炉

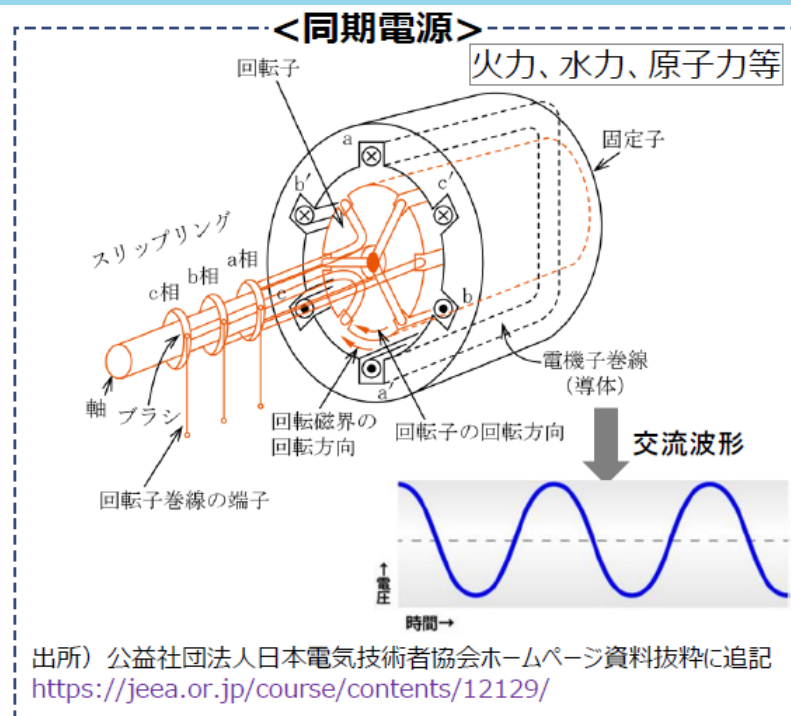


船舶搭載炉

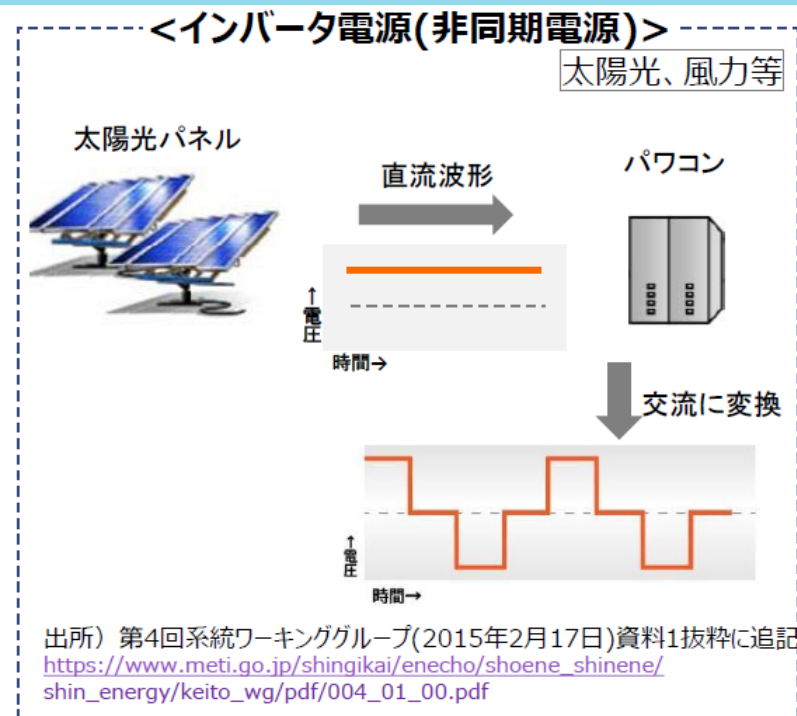
多目的利用小型PWR

2-4. 電源脱落時の電力系統内の慣性力の維持

- 火力、原子力、水力などの同期電源（50Hzや60Hzの回転速度で回る電源）は、タービンの回転で発電しており、周波数や電流の急激な変化に対して、同じ周期で回転を維持する力（慣性力）が働くため、発電を継続し、周波数を維持する機能を有する。
- 電力系統内の太陽光、風力、蓄電池などの非同期電源の割合が増大し、電源脱落時のリスクが高まる中で、一定程度の慣性力を維持していくことが必要。



【回転機】
回転エネルギーあり
慣性力・同期化力あり



【静止器】
回転エネルギーなし
慣性力・同期化力なし

※風力発電は接続方法によっては、慣性力を提供可能な機能も存在するものの、国内においてはPCSを挟むことが一般的であるため、慣性力・同期化力を見込めない。

【参考】石炭火力発電の廃止を念頭に大型軽水炉を導入する動き【再掲】

- 世界のカーボンニュートラルの潮流の中、石炭火力発電を段階的に廃止する流れ。
- 近年、オランダやポーランドでは、石炭火力廃止に加え、原子力発電所の新規建設の方針を発表。

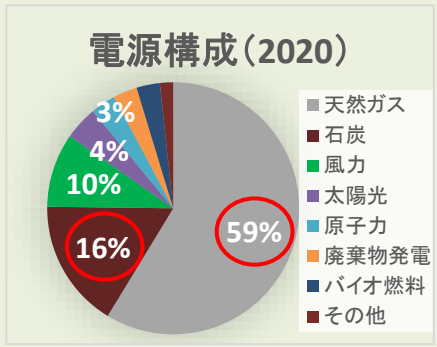
オランダ

- 2015年、石炭火力を2030年までに段階的に停止する法案を可決。
- 2021年、新政権における連立合意文書にて、稼働中のPWR1基（48万kW）の運転延長と、新たに2か所で原子力発電所の建設方針を明記。

原子力はエネルギーミックスにおいて太陽光、風力、地熱を補完することができ、水素製造も可能。
我々のガス輸入への依存も低減。

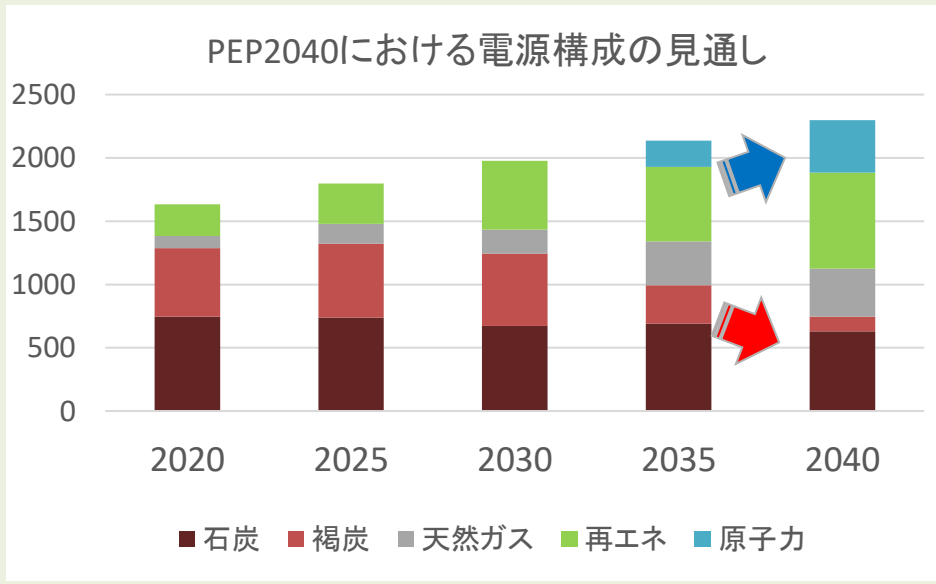


ルッテ首相率いる新連立政権



ポーランド

- 現状、火力発電が約7割を占めているが、今後石炭火力の依存度を低減し、2040年代には廃止予定。
- 2021年、大型軽水炉を2043年までに6基導入する方針を発表(2033年に初号機の運転開始)。

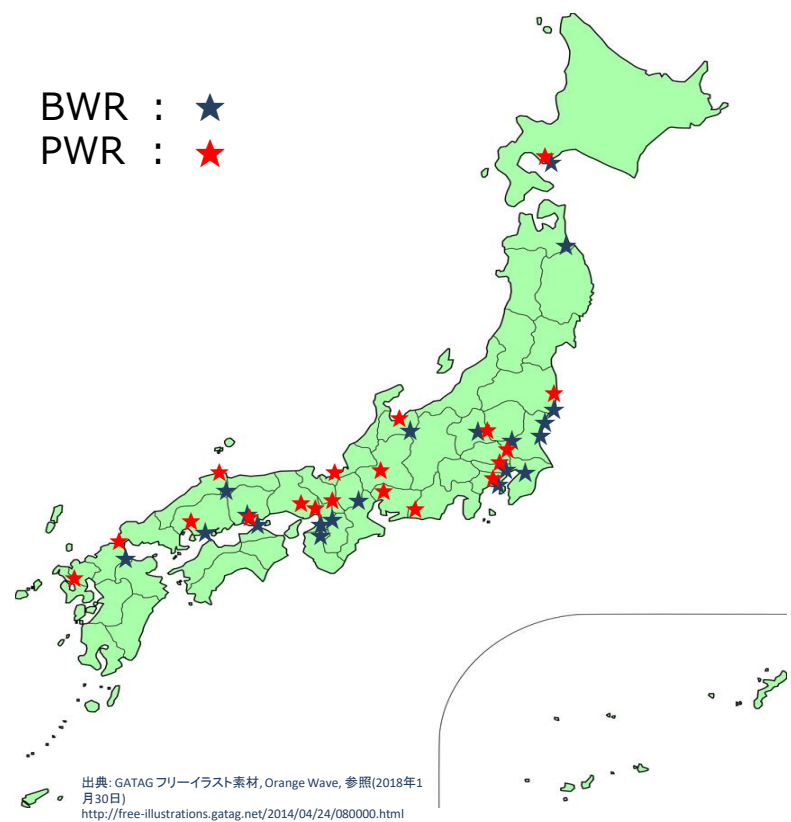


(出典)「2040年に向けた ポーランドエネルギー政策 (PEP2040)」

2－5．技術自給率の維持による地政学リスクの軽減

- 原子力の技術は、当初は海外からの機器輸入割合も高かったが、**1970年以降に営業運転を開始した原発の多くで国産化率90%を超えており、国内企業に技術が集積されている分野**である。
- 様々な産業分野でサプライチェーンの国内回帰の声もある中で、**原子力産業**は、安定的に電力を供給するための**サプライチェーン（約1,000万個の部品点数）を国内に持つ強み**がある。

BWRおよびPWRの主なサプライヤマップ



原子力発電所の国産化率の推移

発電所	東海 (黒鉛炉)	美浜1号 (PWR)	高浜2号 (PWR)	美浜 3 号 (PWR)	柏崎刈羽5 (BWR)	柏崎刈羽7 (ABWR)
運転開始年	1966	1970	1975	1976	1990	1997
国産化率 (%)	35%	58%	90%	93%	99%	89%

廃炉決定済

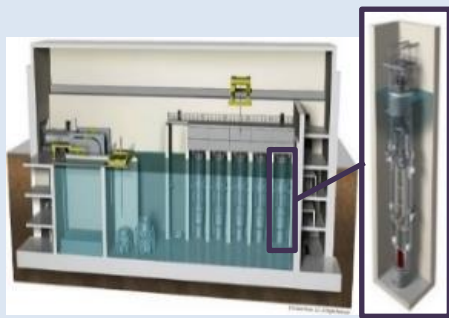
(出典) 原子力発電の効率化と産業政策 国産化と改良標準 (RIETI)、電力会社HP

2-5. 国際連携プロジェクトにおける貢献

- 国内の高い製造・研究開発基盤を生かして米英仏等の革新炉プロジェクトに参画し、欧米諸国の原子力産業基盤維持と世界の脱炭素に貢献。

小型軽水炉(SMR)

- 小型、受動安全 (約300℃)
 - モジュール生産、工期短縮
- ⇒固有の安全性、低資本費



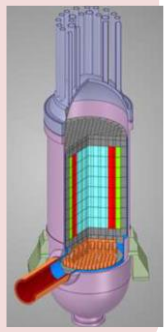
高速炉

- 高速中性子を利用した、ナトリウム冷却炉(約550℃)
- ⇒固有の安全性、資源の有効利用、放射性廃棄物の減容化・有害度低減、



高温ガス炉

- 化学的に安定なヘリウム冷却材・多重被覆燃料を使用した高温の原子炉(約950℃)
- ⇒熱利用・水素製造、固有の安全性



アメリカ
SMR協力



米・仏
高速炉R&D協力



イギリス
高温ガス炉



国際連携



実験炉：常陽



試験設備：AtheNa



試験炉：HTTR

JAEA施設



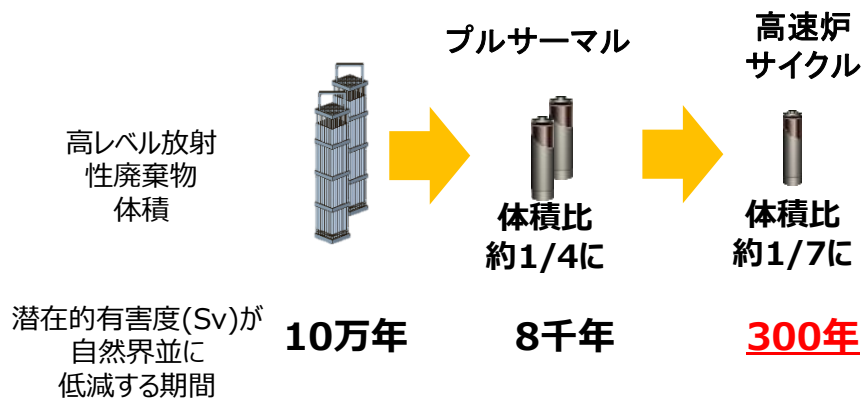
2-6. 廃棄物・資源問題への貢献

- 核燃料サイクルは、①高レベル放射性廃棄物の減容化、②有害度低減、③資源の有効利用等の観点から、引き続き推進することが重要。
- 高速炉では、高レベル放射性廃棄物の潜在的有害度が自然界並に低減する期間が10万年から300年に。長期的には資源の有効利用も可能であり、エネルギーセキュリティの確保にも貢献。核燃料サイクルの効果をより高める可能性。

高レベル放射性廃棄物の 減容化・有害度低減

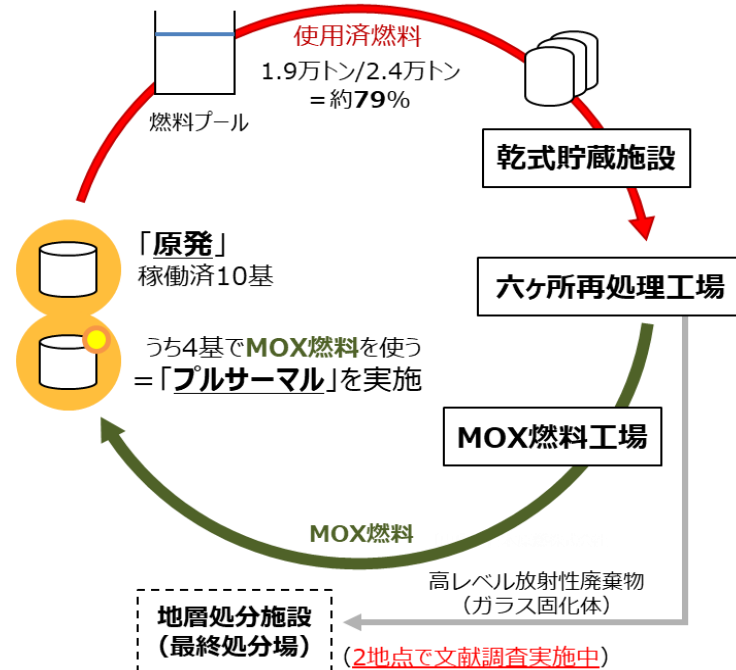
高速炉サイクル

- マイナーアクチノイド（MA）燃焼等でナトリウム冷却高速炉が米加で脚光を浴びる。
- 仏等では高速炉へのステップとして既存軽水炉でMA燃焼を図るマルチサイクル推進。



資源の有効利用

- 使用済燃料の再処理を経て製造したMOX燃料を軽水炉で利用（プルサーマル）することで、資源を有効利用。



2-7. 非エネルギー分野への貢献（医療分野）

- 原子炉はエネルギー利用のみならず、医療分野で利用される放射性同位体（RI）の製造に活用することが可能。
- 日本原子力研究開発機構（JAEA）の試験研究炉「JRR-3」や高速実験炉「常陽」において、RI製造が可能。

①大量生産：中性子の密度が高く、加速器に比べて大量のRI製造が安価に製造可能

原子炉と加速器でのモリブデン（**Mo-99**）の製造量・コスト面比較

	製造量(μg)	コスト(円/μg)
原子炉(JRR-3) ※年間当たり	3,900	1,000
加速器 ※1照射当たり	42	33,000

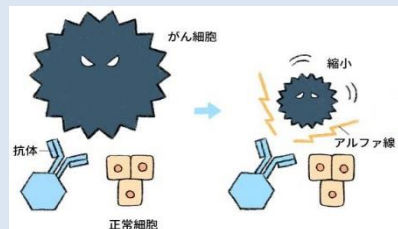


モリブデン（**Mo-99**）：
核医学検査でがん転移の発見等に利用

※JRR-3、常陽にて製造可能

②希少なRI：高速中性子を活用して、希少なRI製造が可能

例：がん治療に使えるアクチニウム（**Ac-225**）の製造が可能



アクチニウム(**Ac-225** 等)：
アルファ内用療法によるガン治療等に利用

※常陽にて製造可能

試験研究炉「JRR-3」

- 日本原子力研究開発機構（東海村）にある研究用原子炉。
- 2017年新規制基準適合性にかかる許可取得。2021年運転再開。



高速実験炉「常陽」

- 日本原子力研究開発機構（大洗研究所）にある高速実験炉。
- 1977年に臨界以降、40年間稼働。
- 新規制基準適合性に係る審査を2017年より継続。2024年度運転再開予定。



【参考】世界の医療用RI製造の状況（Mo-99）

原子炉名（国）	臨界年	運転 予定	経過年※1	稼動 日数	製造 可能週	製造可能量 （6-day-Ci/y）	備 考
BR-2 （ベルギー）	1961	2026	60	190	27	210,600	2016年改修・運転 延長
HFR （オランダ）	1961	2024	60	275	39	241,800	
LVR-15 （チェコ）	1957	2028	64	210	30	72,000	
MARIA （ポーランド）	1974	2030	47	200	36	95,000	
NRU※2 （カナダ）	1957	2018	運転停止	300	40	—	（187,200）
OSIRIS （フランス）	1966	2016	運転停止	180	26	—	（62,400）
SAFARI-1 （南アフリカ）	1965	2030	56	305	44	130,700	
RA-3 （アルゼンチン）	1967	2027	54	230	46	18,400	
OPAL （オーストラリア）	2006	2055	15	300	43	75,250	2017年より製造
※1：2021年現在の経過年。					合計	843,750	

※2009年には当時世界需要の38%を賄っていたNRU炉の緊急停止により、世界的に供給不足が発生。

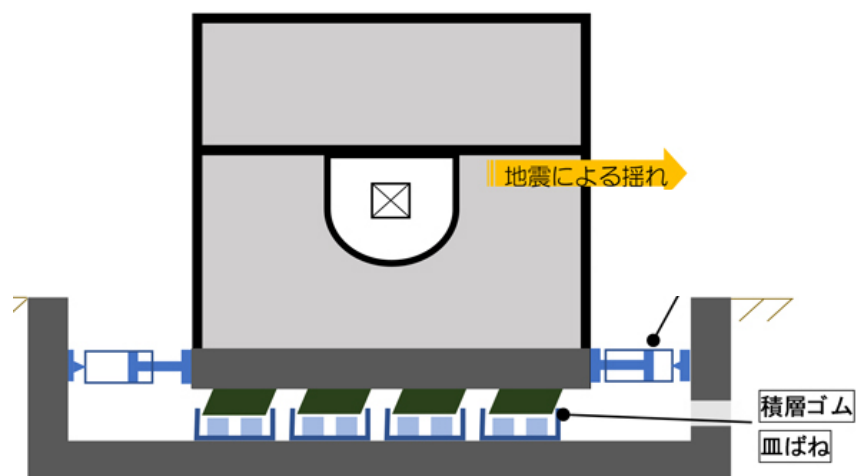
【参考文献】 NEA/SEN/HLGMR(2016)2, NEA/SEN/HLGMR(2015)5, “The Supply of Medical Radioisotopes”（2016年）をもとに日本原子力研究開発機構で和訳して作成

2-7. 非エネルギー分野への貢献（三次元免震）

- JAEAにおける高速炉開発の一環で、世界最高レベルの高性能免震装置を開発。
- 本技術は、精密機器工場やデータセンター等の一般建築物への応用も可能。

3次元免震システム

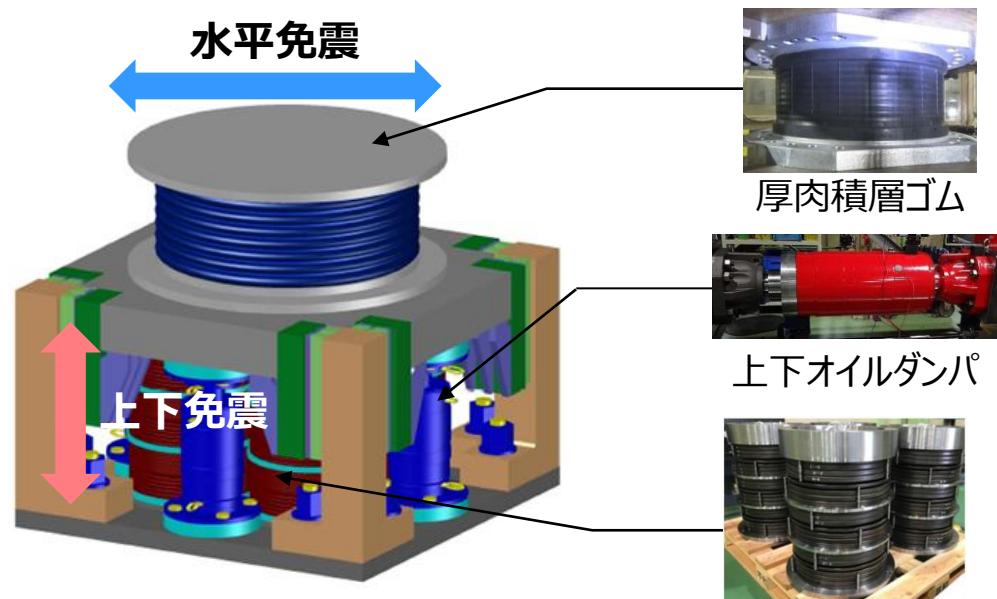
- 積層ゴムとばね要素の組み合わせによって、水平方向と上下方向の揺れを減衰させるシステム。



高速炉の3次元免震システム概略図

開発された高性能免震装置

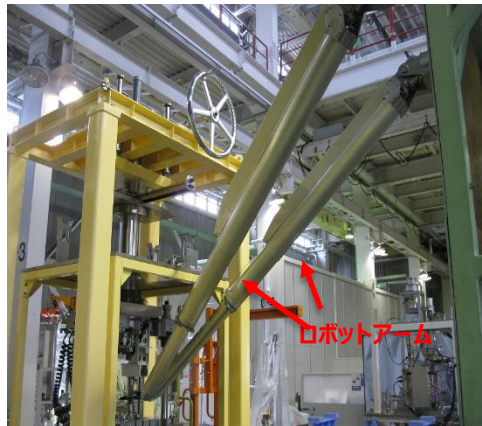
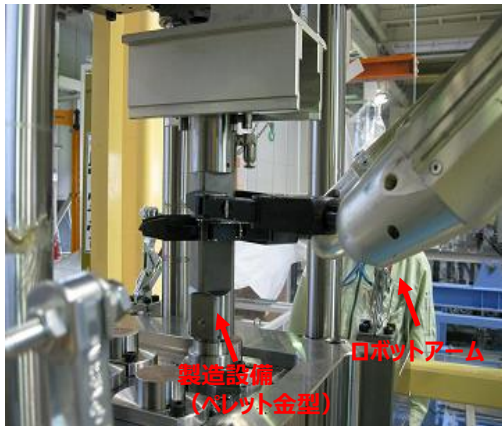
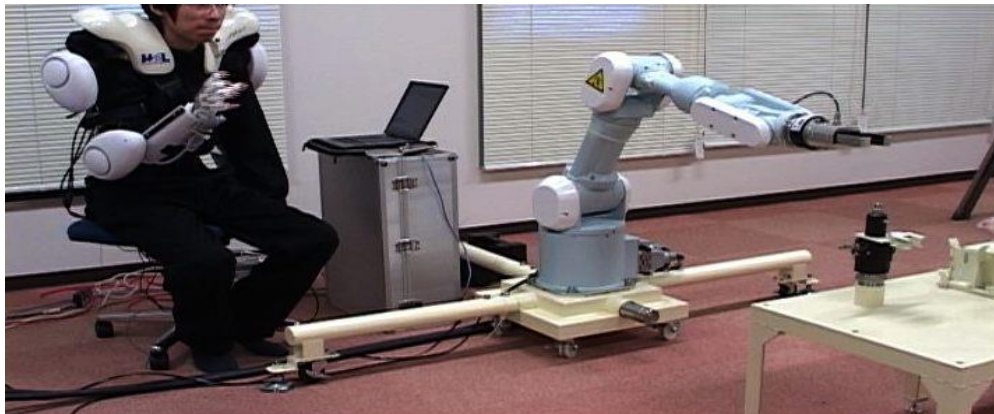
- JAEA、三菱FBRシステムズ、大林組、川金コアテックにて開発。
- 2021年、現存の免震装置技術の約2倍以上の性能を持つオイルダンパ（筒状の中にオイルとピストンを配置し、地震の揺れに合わせて地震エネルギーを吸収）を開発。



2-7. 非エネルギー分野への貢献（遠隔技術）

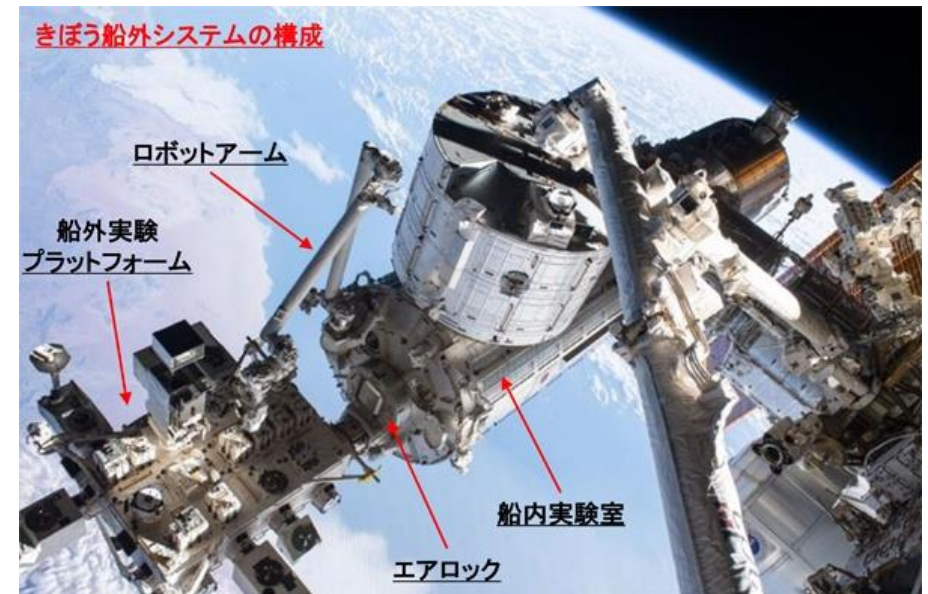
- 高速炉で燃焼可能な高放射線量のマイナーアクチノイドを含有する燃料の取扱い技術は、宇宙船外活動等の過酷環境における遠隔技術の他分野への応用可能性あり。

高放射線量下の精密設備の遠隔保守技術の開発



応用例

- 宇宙船外活動
- 爆発などの危険性がある不審物の調査や回収

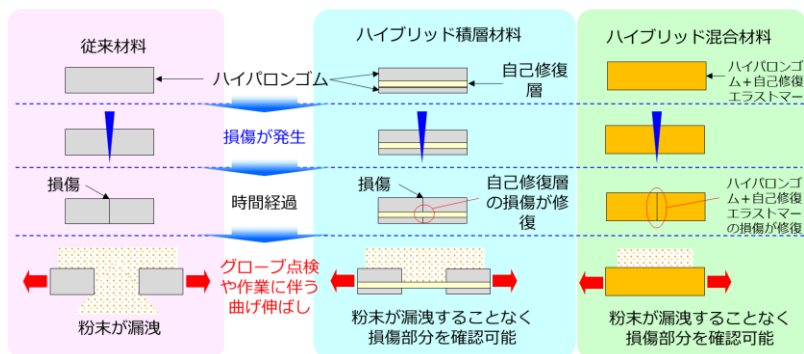


2-7. 非エネルギー分野への貢献（危険物質の閉じ込め）

- **MOX燃料製造**過程において核燃料物質を閉じ込めるため、材料が損傷した場合に自己修復機能を有するグローブを開発中。
- 本技術は、核燃料物質やRIの取扱いのみならず、医療、医薬品、生物、毒物等の**危険物質を取り扱う分野への適用可能性**あり。

自己修復機能を有するグローブの開発状況

- MOX燃料製造に係る革新技术として、自己修復性ハイブリッド複合材料で製作したグローブを開発中。
- シート状の自己修復性ハイブリッド積層材料の試作に成功。



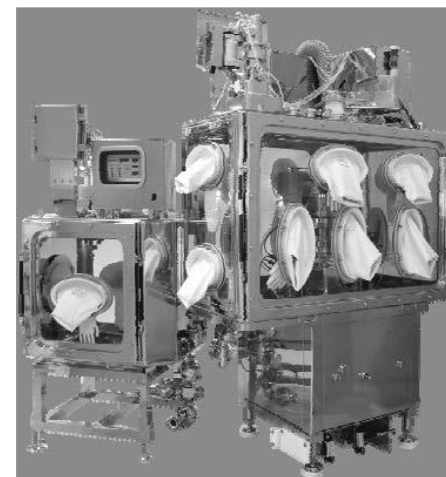
自己修復性ハイブリッド複合材料の概念



試作した自己修復性ハイブリッド積層材料

応用例*

- 医薬品製造時の危険物質閉じ込め



コンテインメント錠剤機*

*) https://www.seikiken.or.jp/nakai/document/nakai15_ronbun2.pdf

2-7. 非エネルギー分野への貢献（超断熱材料の製造）

- 核燃料として用いられる混合酸化物は、融点が高く(約3000K)、熱伝導率が低い材料であり、均質な製造技術や温度解析技術の開発が求められる。
- 本技術の特徴を活かし、超断熱セラミック製造や、寿命評価技術への適用可能性あり。

核燃料製造技術の開発

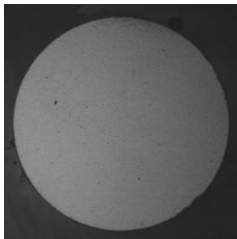
- マイクロ波を用いた原料粉末調製技術。
- 密度制御した焼結体製造技術。
- 高温特性評価、温度解析及び微細組織変化技術。



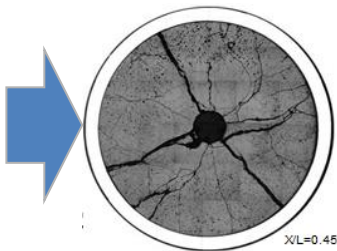
原料調製



焼結体（中空ペレット）



製造時



使用後

使用中の温度分布や組織変化のシミュレーション

応用例

- 高温炉の断熱材料など、製造・寿命評価技術。



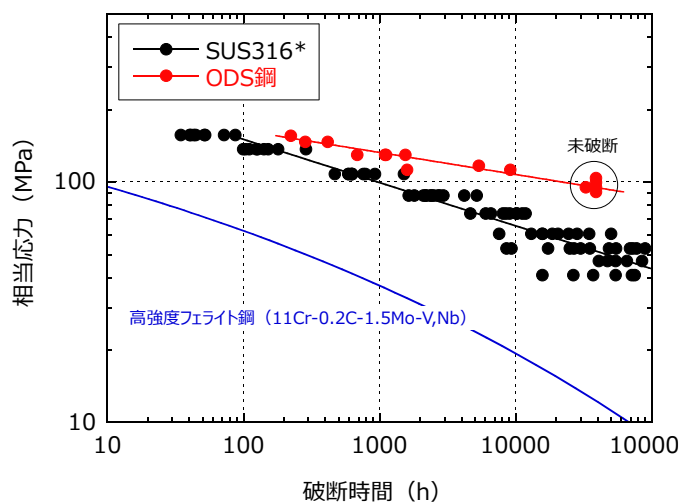
断熱タイル

2-7. 非エネルギー分野への貢献（構造部材）

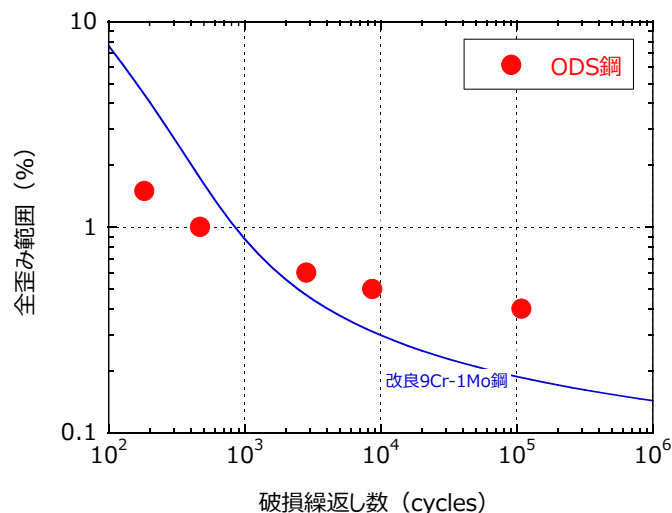
- 高い安全性・経済性を有する軽水炉や高速炉の燃料被覆管等の炉心材料として、高温・長時間強度に優れる構造部材を開発中。
※酸化物分散強化型（ODS）フェライト鋼
- 本技術は高温・長時間環境下で使用される構造部材への適用可能性あり。

ODSフェライト鋼の特徴

- 主要なオーステナイト鋼に比べて、優れた耐照射特性、低い熱膨張係数、高い熱伝導度を有する。
- フェライト鋼として世界最高レベルのクリープ強度、優れた疲労特性を有する。



700℃におけるクリープ強度



700℃における疲労特性

応用例

- 700℃程度の高温で長時間使用される構造部材等（ねじ、ボルト、ナット等）の接合の必要のない単体部材



ODSフェライト鋼の加工例
(高速炉燃料被覆管用の薄肉・細径管)

1. カーボンニュートラル実現に向けた社会全体の変革
2. 革新炉による貢献の可能性
- 3. 革新炉開発に求められる価値の評価軸**

3-0. 革新炉とはどのように定義されるか

※2022年3月28日第25回 原子力小委員会 海外電力調査会資料より資源エネルギー庁にて作成

- 革新炉とは、安全性、廃棄物、エネルギー効率、核不拡散性等の観点から優れた技術を取り入れた先進的な原子炉。

(参考：米原子力エネルギー革新法（2017年）)

- 小型モジュール炉（SMR）の定義は、国や機関により様々であり、定まっていない。

革新炉の区分		
革新炉 ＜定義＞	大型	小型
軽水炉	革新軽水炉	小型モジュール 炉（SMR）
第4世代炉等	大型第4世代炉	

※第4世代炉：黎明期の原子炉（第1世代）、現行の軽水炉等（第2世代）、改良型軽水炉等（第3世代）に続く原子力システム概念

SMRの定義

米国			英国		OECD/NEA		IAEA	
AR	SMR	・ 軽水炉 ・ 30万kWe 未満	SMR	・ 第3世代炉 ・ 小型 ・ モジュール	SMR	・ 1～30万kWe ・ モジュール (連続生産) ・ 第3世代炉 ・ 第4世代炉	SMR	・ 30万kWeまで ・ モジュール ・ 先進的 ・ 固有の安全性 ・ 全ての炉型 - 第3世代炉 - 第4世代炉
	・ 非軽水炉 (全ての炉型)		AMR	・ 第4世代炉 ・ モジュール ＜核融合炉＞				

3 – 1. 米英はカーボンニュートラル社会を見据え、革新炉を評価

- 米国は、開発の時間軸や負荷追従、体制整備等の観点から高速炉や高温ガス炉等を評価。
- 英国は革新炉評価を実施し、水素製造による製造業の脱炭素化や技術成熟度等の観点から高温ガス炉を高く評価。

米国 ARDP支援における評価 (2020年)

※ARDP : Advanced Reactor Demonstration Program
(先進的原子炉実証プログラム)

＜評価軸＞

- ・ 技術成熟度・時間軸
- ・ 安定供給、負荷追従、電気以外の利用等の価値 (既存炉と比較)
- ・ 原子炉の建設・製造能力、外注先やサプライチェーン等の体制整備
- ・ 規制当局との事前協議・調整の計画 ・ 価格競争力
- ・ 建設選定地の使用許可、環境、報告、規制、投資等の方策

実用化時期

7年以内に稼働する2つの革新炉原子炉の建設を支援
支援額：50%のコストシェアのもと\$3.2B(3200億円)
支援対象：①TerraPower社：
Natrium(金属燃料ナトリウム冷却高速炉)
②X-energy社：Xe-100(高温ガス炉)

~2028年

10~14年後に許認可・実用化される5炉型に対する支援
支援額(最大)：\$303M(303億円)
支援対象：溶融塩冷却高速炉、マイクロ炉、小型軽水炉、溶融塩炉

2030~2034年

2030年代半ばに実用化する可能性のある3炉型に対する支援
支援額(最大)：\$27.5M(27.5億円)
支援対象：ナトリウム冷却高速炉、ヘリウム冷却高速炉、高温ガス炉

2035年~

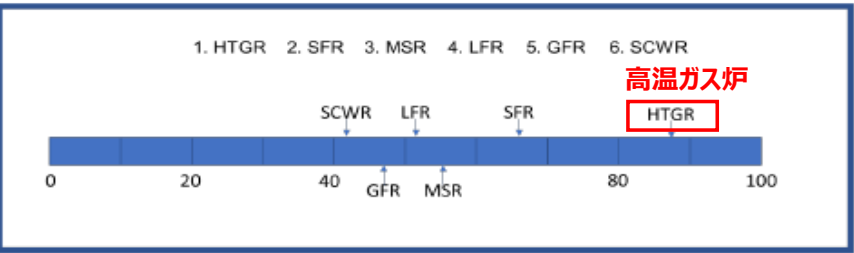
英国 NIROによる評価 (2021年)

※英国原子力研究所のシンクタンク

高温ガス炉が実証炉プロジェクトに最適との評価：

- ・ 技術成熟度・時間軸 (2030年代初頭)
- ・ 出力温度が高く、水素製造など熱利用可能
- ・ 既存サプライチェーンとの親和性 (ガス冷却炉の実績)

	高温ガス炉	ナトリウム冷却高速炉	超臨界圧軽水冷却炉
技術成熟度	◎	◎	△
熱利用	◎	○	○
安全性	◎	○	△
国内産業の蓄積	○	○	△
国際協力	◎	○	△



【参考】米英：原子力技術リーダーシップ再興を目指す

- 米英では、原子力技術リーダーシップ再興を戦略として掲げ、政府主導で原子力イノベーションの促進に向け、予算・法律面での環境整備が進展。

米国

2017年 原子力エネルギー革新法(NEICA)

- 米国エネルギー省(DOE)に「国立原子炉イノベーションセンター」を創設、民間の革新炉設計概念を試験/実証することを求める法案。

2019年 原子力エネルギー革新・近代化法案(NEIMA)

- 米国規制委員会(NRC)において、2年以内に新型炉の審査プロセスの策定を義務付ける法案。これによりライセンシングプロセスの公平性・透明性を向上。

2020年 原子力エネルギーにおける米国のリーダーシップ回復戦略

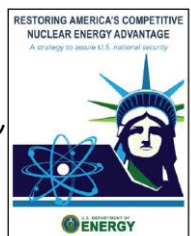
- 大統領覚書に基づき核燃料WGが作成。
- 国家安全保障の観点から、国内燃料サイクルの支援、革新炉開発の推進等を通じて、米国原子力産業の再興を勧告。

2021年11月 超党派「インフラ投資法」成立

- 革新炉の実証炉2基について、2028年の運転開始を目指し6年で総額約32億ドルの支出を承認。

2021年～「ビルド・バック・ベター法案(BBBA)」の審議

- 既設原子炉への税控除等の措置、核融合の研究開発の支援等が記載
※2021年11月に下院通過するも、上院での成立見通しは不透明。



原子力エネルギーにおける米国のリーダーシップ回復戦略

英国

2020年11月 10 Point Plan

- 「英国は原子力技術のリーダーであり続ける」と宣言。
- 2030年代初頭までに、小型モジュール炉(SMR)の開発と革新モジュール炉(AMR)実証炉の建設を目指して、約577億円の革新原子力ファンドを創設。

2020年12月 エネルギー白書

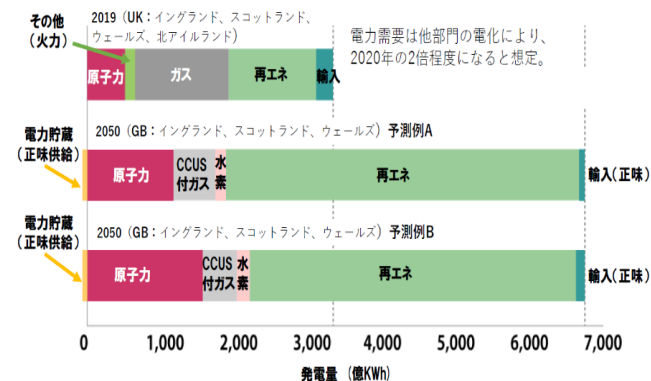
- 2050年までに電力倍増の見込みから、原子力を重視し、大型炉、SMR/AMR、核融合を支援。

2021年5月 規制の設計審査でSMR/AMR受入れ開始

- 包括的設計審査(GDA)を見直しし、開発段階からメーカーが規制当局と意見交換ができるよう、SMR/AMRの審査受入れを開始。

2021年12月 高温ガス炉選定

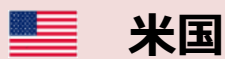
- パブコメの結果、2030年代初頭の実証炉に高温ガス炉選定。英政府公表の技術資料において、米加日を互惠協力可能な国として記載。



出典：英国エネルギー白書(2020年)を基に作成

【参考】米英：①大型軽水炉の支援、②SMR等のR&D支援の二本立て

● 産業の立て直しを図る米・英は、相次いで原子力への大規模な支援策を発表。①安全性を高めた大型軽水炉の支援等、②将来を見据えたSMR等の革新炉の研究開発支援の二本立て。



米国



英国

大型軽水炉
支援

◆既設支援

- 経済的困難な状況にある既設炉への財政支援(クレジット付与)
\$60億(約6,000億円)／5年間
- 既設炉の販売電力量に応じ税控除(法案未成立)

◆新設支援

- 国内新規建設を支援する資金調達モデル(RABモデル)関連法案を提出
- 大型原子力発電所の新規建設支援
最大 £17億(約2,500億円)

研究開発
支援

◆研究開発

- 革新炉実証プログラム(ARDP)
\$32億(約3,200億円)／6年
実証炉2基に対する資金支援
 - ・TerraPower社(高速炉)：約2000億円
 - ・X-energy社(高温ガス炉)：約1200億円
- SMRの技術開発支援・財政支援
 - ・NuScale：\$5.3億(約530億円) (R&D)
 - \$13.55億(約1355億円)／10年間(運営主体支援)

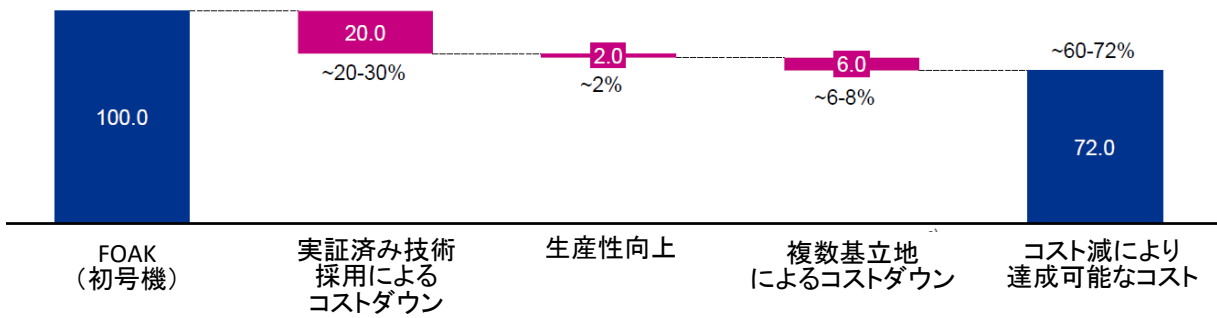
◆研究開発

- 「革新原子力ファンド」を設立(2020年12月)
£3.85億(約577億円)
 - ・SMR開発：£2.15億(約322億円)
 - ・AMR実証炉開発(高温ガス炉)
：£1.70億(約255億円)
- 「未来の原子力実現基金」を設立(2021年10月)
£1.2億(約180億円)

3-2. オランダは市場調査の結果、実証済みの大型軽水炉を選好

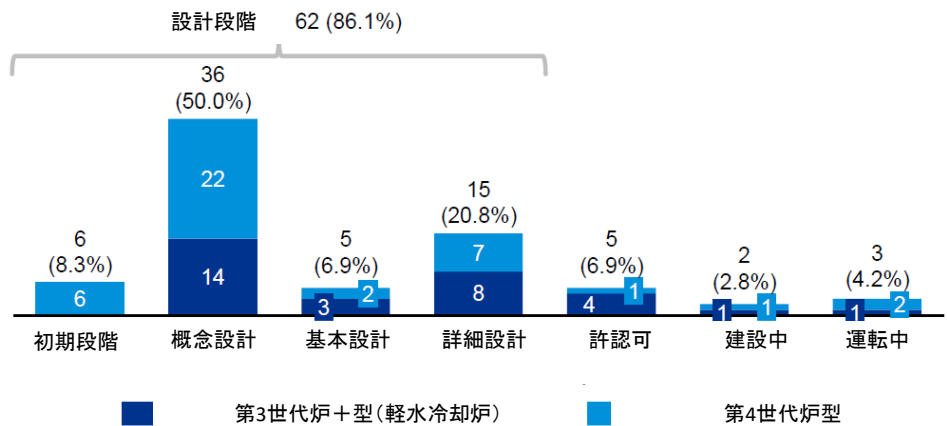
- オランダは原子力発電に市場が投資する条件を調査し、2021年に議会に報告。
- コスト超過・遅延の課題を最小化するため、実証済みで、安全かつ既に活用が進む大型軽水炉（第3世代炉+）を選択すべきとの市場関係者で幅広いコンセンサス。

実証済みの設計採用で28-40%/MWのコスト減の可能性



- オランダにおける第3世代炉+プロジェクトは実証済みの技術を採用することで他国において発生したコスト超過や遅延に必ずしも見舞われない。
- 既に実証済みの設計採用で28-40%/MWのコスト減の可能性。

SMRは86%が設計段階にあり、2027-2033年に運開予定



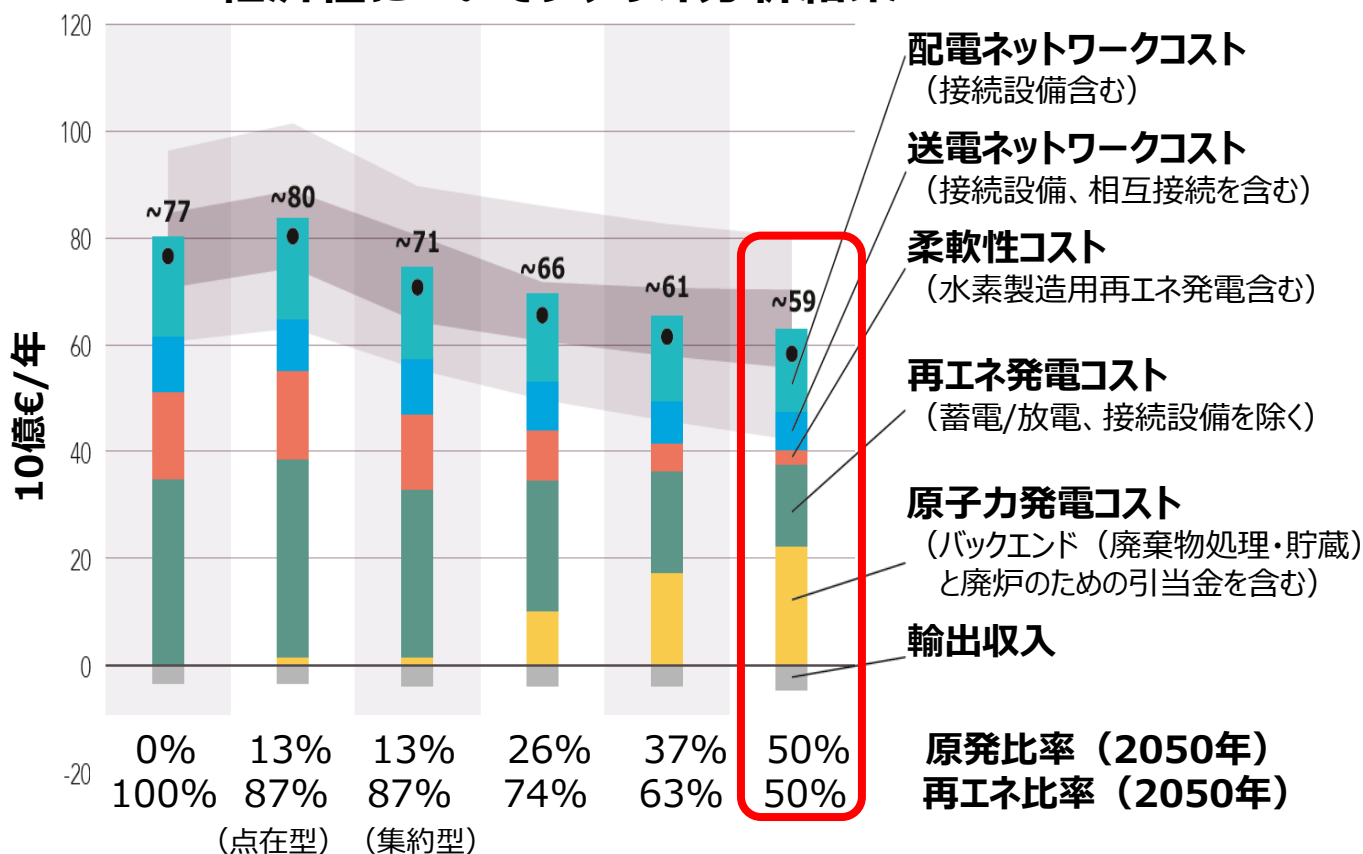
- SMRも関心高いオプションであるが、商用化されるのは2027-2033年であり、初号機（FOAK）建設について不確実性がある。
- SMRは大型軽水炉と同程度の出力当たりのコストを目指す、小型ゆえのスケールデメリットを補完するためには連続生産される必要がある。

Source: Advances in small modular reactor technology developments, IAEA (2020). KPMG analysis.

3-3. フランスはシナリオ分析の結果、14基の革新軽水炉を新設

- マクロン政権は仏送電系統運用会社（RTE）に対し、2050年カーボンニュートラルに向けた電源シナリオ分析を要請し、RTEは2021年10月に結果を公表。
- 既存炉の運転延長、EPR2を14基建設（23GW）、SMR導入（4GW）を組み合わせ2050年の原子力比率を50%とするシナリオが、経済面で最も優位と結論。

経済性についてシナリオ分析結果



2050年に40GW（37%）以上
原発維持で原発新設が経済的に：

- 約40GWの原発維持で、電気⇒ガス⇒電気に伴うコスト、大幅な送電線増強コストを避けることができる。
- 但し、原発新設は初期費用が高く、競争力はファイナンスコストに依存。

再エネ：原発 = 50：50で、
2050年CN未達リスクを軽減：

- 未発達のSMR産業は必ずしも必要ではないが、EPR2の建設速度を緩和させる機会。
- 30年間で14基のEPR2を建設するのは産業基盤に大きな挑戦であり、過小評価すべきではない。

【参考】フランス：米英同様、支援を具体化

- フランスでは国営企業が革新軽水炉EPR2の新規建設で産業基盤を維持しつつ、SMR・廃棄物管理が可能な炉型の開発も推進。

	 仏国
大型軽水炉支援	◆新設支援 2020年9月「France Relance」にて原子力産業の支援策を発表。 - 人材支援 €約1.1億(約143億円) - 中小企業支援（ファンド創設） 総額€2億(約260億円) ◆マクロン大統領は、2022年2月に「6基のEPR2の新設に着手し、更に8基の新設に向けた検討を開始」と宣言。
研究開発支援	◆研究開発 SMR・廃棄物管理が可能な炉型開発プロジェクトに €1B (約1,300億円) マクロン大統領は、「2030年までに、革新的な小型原子炉をフランスに導入する」と発言。

3－4．日本国内炉型技術開発における評価基準

- 日本国内でも、米国ARDPにおける評価軸を参考に、技術成熟度や市場性等を評価軸として民間の炉型開発を支援。

社会的要請に応える革新的な原子力技術開発支援事業（経産省補助事業）の審査項目

（１）技術の成熟度と必要な研究開発

- 技術成熟度の高さ
- 必要な研究開発項目

（２）実用化された際の市場性

- 海外または国内におけるニーズを踏まえた市場性に関する分析は十分か
- 経済性に関する分析・評価が十分か
（代替・競合技術と比較した競争力分析・評価、将来的な経済性向上に向けた見通し含む）
- 負荷追従、発電以外の多目的利用（水素製造含む）等の機動性を有するか
- 放射性廃棄物の減容・有害度低減、資源の有効利用性の点で優位性があるか

（３）具体的な開発体制の構築と国際的な連携体制

- 実用化までの開発計画・開発体制は現実的なものか
- 提案者の事業実施体制は十分か（若手の割合含む）
- 想定されるサプライヤーの体制（脆弱性・海外サプライヤーと比較した場合の優位性）は十分か
- 潜在的ユーザー・JAEAとの連携

（４）実用化する際の規制対応

- 安全確保に対する基本的な考え方、深層防護、事故シークエンス、外部ハザードに対する安全対策は十分か
- 実用化までに検討することが必要な安全設計方針・要件は十分か（安全性試験等を通じたデータ取得含む）

（５）その他

- 非エネルギー分野での貢献

3－5．今後、評価項目について具体的に議論していくべき論点（例）

欧米の革新炉開発における評価項目を踏まえて、前ページで提示した日本国内の炉型技術開発における評価項目について、

- 提示した評価項目に過不足はないか。

更に明確化が必要な項目はないか。（例えば、時間軸の観点等）

- 評価項目ごとの重み付けをどのようにしていくか。
- 評価項目ごとの基準をどのように設けるのか。

といった議論が必要なのではないか。

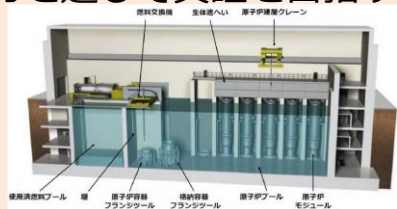
【参考】海外連携、国内開発等で推進するSMR開発

- **2020年代末の運転開始を目指す海外の実証プロジェクトと連携した取組**を支援し、日本企業がプロジェクトの主要プレーヤーとして参画し、脱炭素技術であるSMRの安全性の実証に貢献することを目指す。
- **日本企業独自の取組**による、多様なニーズを見据えた小型モジュール炉等の開発も支援。

NuScale SMR

日揮グローバル株式会社、
株式会社IHI

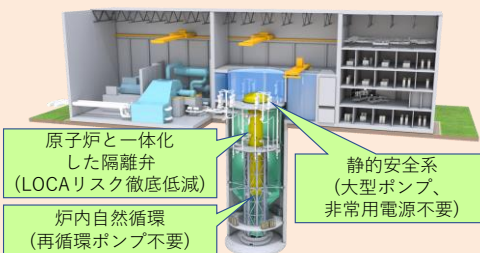
- PWRタイプのSMR。複数のモジュールをプール内に設置し、炉心冷却が可能。
- 1モジュールの出力は7.7万kWで、最大12個のモジュールを設置可能(最大92万kW)。
- 2029年に米国で実証炉運開を目指すNuScale社に、2021年、日揮・IHIが出資を発表。2022年、JBICも出資を発表。
- モジュール・メンテナンス機器等の課題についてについて日米協力を通じて実証を目指す。



BWRX-300

日立GEニュークリア・エナジー株式会社(日立GE)

- 出力30万kWのBWRタイプのSMR。圧力容器と一体化した隔離弁を採用した原子炉とすることで、配管破断による冷却材喪失事故を排除する設計。NRCが事前審査中。
- 米GE Hitachi社と日立GE社が共同開発し、北米での実証を目指す。
- 日立GEの実温・実圧で試験できる設備を活用し、要素技術を実証を予定。



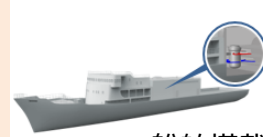
多目的利用小型PWR

三菱重工業株式会社

- PWRタイプのSMR。炉容器に蒸気発生器を内蔵することで冷却材喪失事故の排除、炉心冷却にポンプ等の動的機器を使わない受動安全性等が特徴。
- 独自IPで、出力30万kWの発電用炉と、革新的な窒化物燃料を使う出力3万kWの船舶搭載炉を開発。



発電用炉



船舶搭載炉

マイクロリアクター

- 災害時の非常用電源、遠隔地などで多目的に利用できる出力0.05万kWのマイクロリアクターも開発。



マイクロリアクター

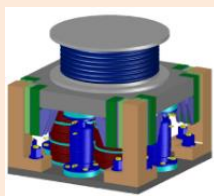
【参考】国際協力を活用した高速炉開発

- 日仏R&D協力（データ・設備共有、評価手法共同開発）の成果を活用しつつ、日本型タンク型炉を検討し、国内設置の見通しを明らかにした。日仏協力を活用しながら、多様なナトリウム冷却炉の概念について、研究開発を実施しながら比較評価。
- 日米R&D協力の下、核不拡散耐性の高い金属燃料についても検討を実施。また、テラパワー社・JAEA・MHI・MFBR間の覚書に基づき、ARDPプロジェクトにおける協力について、今後協議。

日本型タンク型炉の成立性検討



日本型タンク型炉

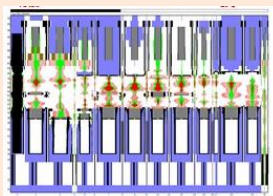


3次元免震装置／皿ばね試験体

- 日仏R&D協力で得られた知見を用いて、日本では経験のないタンク型ナトリウム冷却炉について、耐震性、安全性、経済性等の成立性を確認し、今後の開発見通しを得た。
- 耐震性を大幅向上する3次元免震装置の概念を構築し、成立性について各要素の試験を行い見通しを得た。

日仏R&D協力(継続中)

- 日仏R&D協力において燃料8分野、シビアアクシデント9分野、原子炉技術11分野（計28分野）で協力、日仏間で技術を融合（データシェア、設備共同利用、評価手法共同開発）することで、効率的な開発を行った。
- 2020年からは新たに32分野の協力を開始した。

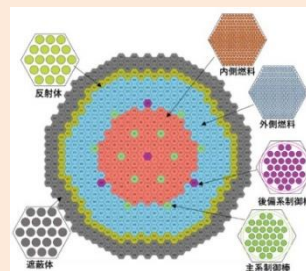


シビアアクシデント評価



PLANDTL試験装置
（共同試験実施）

金属燃料



金属燃料炉心

- 金属燃料についてはCNWG等において日米協力により安全性、炉心設計等の個別技術の検討を進めてきた。
- 2021年度からは金属燃料概念の性能評価、課題整理、日米協力による金属燃料の日本導入の可否について検討を進める。

【参考】多様な高速炉・サイクル概念

- 「戦略ロードマップ」に基づき、多様な技術間競争を促進中。
 - － 「まず当面 5 年間程度は、これまで培った技術・人材を最大限活用し、民間によるイノベーションの活用による多様な技術間競争を促進する。」
- NEXIP補助事業のもと、令和元年度から**多様な炉型の研究開発**を支援。

小型ナトリウム冷却金属燃料高速炉(MCR-200)

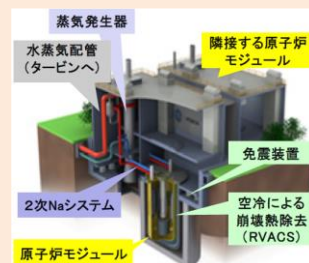
三菱重工業株式会社、三菱FBRシステムズ株式会社



- 二次系ループをモジュール型に増やして出力増が可能な小型ナトリウム冷却高速炉
- 金属燃料を粒子型とすることで、受動停止による安全性向上、ナノ粒子をナトリウム冷却材に混ぜることで、ナトリウムの化学的活性の抑制を目指す。
- 国産技術で高い技術成熟度。

小型ナトリウム冷却金属燃料高速炉(PRISM)

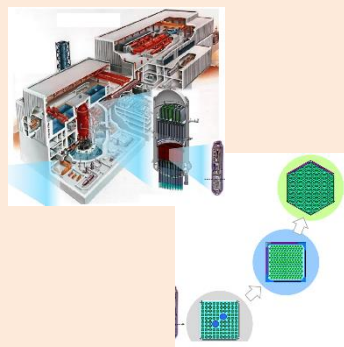
日立GEニュークリア・エナジー株式会社 (日立GE)



- 日立GEのパートナー・米GE Hitachi社開発のナトリウム冷却・金属燃料小型モジュール高速炉。
- 金属燃料による固有安全性、静的機器による受動安全、モジュール工法による工期削減等が特徴。
- 設計概念は米国のVTR、Natrium炉にも採用。

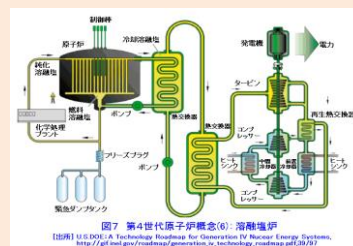
軽水冷却高速炉

日立GEニュークリア・エナジー株式会社



- MOX燃料棒を稠密に配した四角格子燃料を既設BWR・ABWRに装荷し、BWRでプルトニウムを集中的に経済効率よく燃焼することを可能とする提案。
- 現行再処理・MOX燃料技術を活用可能。

溶融塩炉



- 沸点が高く低圧で作動可能な溶融塩の液体燃料を循環させ、発電等に用いる炉型。米、加、仏等で次世代の技術として開発。

【参考】超高温の活用で脚光を浴びる高温ガス炉・核融合炉

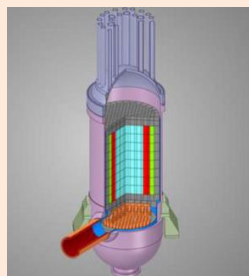
- NEXIPにおいて、水素製造、蓄熱のアイデアで柔軟性を有する高温ガス炉 2 炉型を支援。
- 日本発の核融合ベンチャー企業も登場。海外で進む実験炉プロジェクト市場へ参入中。

NEXIPで支援中の高温ガス炉提案

高温ガス炉コジェネプラント (水素製造・発電)

三菱重工業株式会社

- 高温ガス炉の900℃超の熱を活用し、発電と大量・安定の水素製造が可能なコジェネプラント。
- 水素の大量安定供給で製鉄等プラント等の脱炭素に貢献可能。
- HTTR設計・製作・建設、実用炉検討を通じた経験。



蓄熱型高温ガス炉

東芝エネルギーシステムズ株式会社、富士電機株式会社

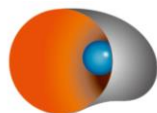
- 熱出力600MWt/ユニットで、4ユニット合わせて電気出力約100万kWを達成する高温ガス炉。
- 発電用を念頭とし、熔融塩蓄熱システム併設により負荷追従が可能。
- 高温水蒸気電解との接続による水素製造オプション
- HTTR建設主要企業としての経験。



核融合ベンチャーの動向

京都フュージョニアリング社

設立：2019年10月



Kyoto fusionengineering



小型核融合と
水素製造装置

- 2025年頃の核融合エネルギー発生を目指す米・英・加の核融合ベンチャーへの機器納入・開発受託を通じて、核融合市場に参入。
- 核融合向けの部材は高度な原子力技術が必要。製造する国内サプライヤの多くは軽水炉向けのサプライヤと共通しており、日本の優れた産業基盤を活かすイノベーション、人材育成、製品開発、海外市場開拓が可能。

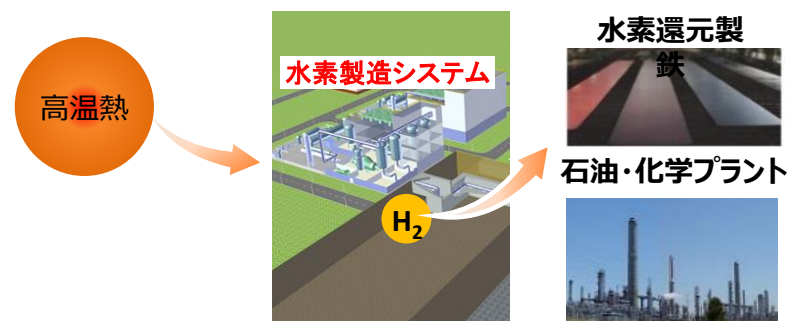
【参考】高温ガス炉等の超高温を利用した水素大量製造

- 令和4年度より、日本原子力研究開発機構（JAEA）所有の**高温ガス炉試験炉（HTTR）の超高温（950℃）を用いた水素製造技術の実証を開始。**

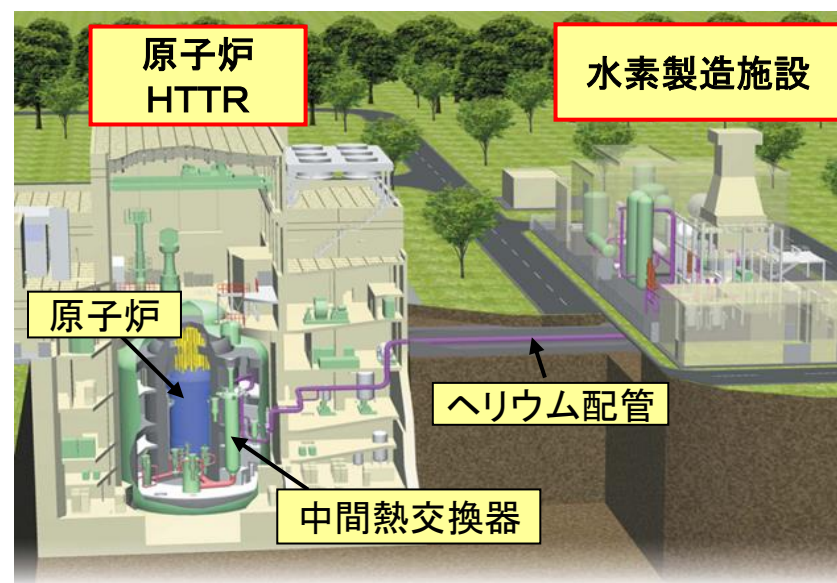
超高温を利用した水素大量製造技術実証

日本原子力研究開発機構、三菱重工業株式会社

- 800℃以上の脱炭素高温熱源（例えば、高温ガス炉、太陽熱、核融合等）を活用したカーボンフリー水素製造法によって、**2050年には約12円/Nm³で大量の水素を安定的に供給する可能性**を念頭に、製鉄や化学等での産業利用に繋げることを目指す。
- 高温でも利用可能な高温隔離弁の開発等、**HTTRと水素製造施設を安全に接続する技術開発**を実施。
- 国内外の様々な**カーボンフリー水素製造技術**（IS法、メタン熱分解法、高温水蒸気電解等）の**フィージビリティスタディを実施**。超高温熱源の活用に適した水素製造技術を検討。
- 並行して、上記で検討した技術の**実用化スケール向けの実現性及び成立性を確認**。



高温熱による産業界への水素活用のイメージ



HTTR-水素製造施設の構成（イメージ）