

エネルギーを巡る社会動向と原子力の技術開発

令和4年3月28日

資源エネルギー庁

1. 第24回小委員会の議論まとめ

2. カーボンニュートラル実現に向けた社会全体の変革

3. 革新炉による貢献の可能性

4. 革新炉の現状と国内の課題

5. 原子力産業サプライチェーンの現状と課題

第24回 原子力小委での主なご意見①（今後、具体的に議論していくべき論点）

0. 2050年カーボンニュートラル実現に向けた課題と対応

- 新增設・リプレースを含む将来に向けての原子力の活用の方針・道筋を明確化する必要。
- エネルギー安全保障に関し、国際情勢に左右されやすい自給率の低い国における、原子力の必要性の認識。
- 地政学リスクを前提とした柔軟に改変できるエネルギー体制が重要。
- 2050年カーボンニュートラルの達成には利用可能なエネルギー源や技術の総動員が重要。
- 国際情勢に左右されない電源を増やすことは、エネルギー自給率向上だけでなく、交渉力を確保するうえでも意義。
- 既設炉の活用と固定費回収のあり方、新增設に向けた投資予見性の向上施策等の事業環境整備について議論する必要。
- 大きな集約的なエネルギーである原子力の持続的な利用においてはしっかりとした仕掛けが必要。

1. 着実な再稼働の推進

- 老朽化・高経年化した原発がトラブル等により停止した場合における出力減等の問題も議論すべき。
- 早期再稼働と高い設備利用率の実現に向けて、人材確保を含め進捗管理をすべき。
- SMR等は規制の導入等にも時間がかかり、まずは既存の炉の再稼働を優先すべき。
- 長期サイクル運転や稼働年数の検討等の道筋を立てるべき。
- 運転統計データでは設備利用率は40年を超えたプラントの方が若干高い。

第24回 原子力小委での主なご意見②（今後、具体的に議論していくべき論点）

2. 革新的な安全性の向上等に向けた取組

- 長期的には高速炉、SMR、高温ガス炉等の革新炉技術開発による新增設が必要。
- 変動性の大きい再エネの調整電源として原子力を利用する可能性や水素を製造する可能性も検討する価値がある。
- 安価・安定的な電力供給は、将来の革新技術を含めた国内の新たな投資の重要な判断基準。
- 社会的ニーズの変化を踏まえた原子力の役割・重要性の再定義、技術がもたらす付加価値についての議論も必要。
- 将来に向け、従来の大型炉も含めどの技術・炉型にリソースをつぎ込むか優先順位の十分な検討が必要。
- 今後の炉の開発や既存の運転管理において、デジタルツインやAI技術等の活用が必要。
- 発電以外の原子力の持つポテンシャルも含めて議論を進めるべき。

3. 国民、自治体との信頼関係の構築

- 福井県における共創会議が、全国の立地地域のモデルケースとなるような取組にしていくべき。
- 世論の捉え方を考えるとともに、地域別・年代別に詳細な分析が必要。
- 安心を提供する面における広報も重要。
- ネガティブな情報の発信や原発のトラブルへの対応から目を背けていては国民からの信頼は得られない。
- 原子力の方向性について、時間をかけた国民的議論と意思決定のプロセスを検討することが必要。
- 原子力の意義を広く理解してもらうための官民の役割を再整理する必要。
- 原子力への不安は将来のイベントがどのような効果をもたらすかわからないものであり、原子力政策、核燃料サイクルや最終処分の効果や影響等を定量的に示すことが地元も含めた国民理解へつながる。
- 自治体・学校・大学等が協力し、オンライン協力や実習等を通じて原子力産業におけるキャリアパスを構築する等、日本に最適な仕組みを作ることが重要。

第24回 原子力小委での主なご意見③（今後、具体的に議論していくべき論点）

4. 原子力の安全を支える人材・技術／産業基盤の維持・強化

- 国内の研究基盤（技術開発への支援や大学での教育等）の充実化が必要。
- 日本が持つ高品質の技術について、足下でサプライヤが疲弊している状況への手当が必要。
- 原子力の将来の見通しが不透明では人材・技術の維持はできない。将来の若者も育たない。
- バランス感覚を持った技術者を育てるため、関係省庁が連携した人材育成が必要。
- 革新炉への投資や技術革新を進めていくことも人材・技術の維持にもつながる。

5. 原子力の平和利用に向けた国際協力の推進

- 核兵器に対する関心が高まる中、原子力の平和利用における核不拡散の面からも、日米欧がある程度技術を持っておく必要。
- 革新炉の開発について、国際的にどうかかわるのか、小委の中で議論する意義がある。

6. 核燃料サイクルの着実な推進と最終処分を含むバックエンド課題への取組

- バックエンドの問題は非常に重要。原子力自体の持続性という観点からも、議論すべき。
- 使用済燃料対策について、国が政策当事者として前面に立って取り組むべき。
- 核燃料サイクルについて、実現に向けた具体的な計画を示し、方向性を再度検討すべき。
- エネルギー基本計画の中で示された大型機器の輸出に関し、慎重な条件設定を検討すべき。
- 廃止措置をどのように安全かつ安価に進めていくのか、そこで発生した廃棄物をどのように処分していくのか、議論すべき。
中長期的には、高レベル放射性廃棄物の処分問題を着実に進めていく必要。

1. 第24回小委員会の議論まとめ
- 2. カーボンニュートラル実現に向けた社会全体の変革**
3. 革新炉による貢献の可能性
4. 革新炉の現状と国内の課題
5. 原子力産業サプライチェーンの現状と課題

2-0. 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)

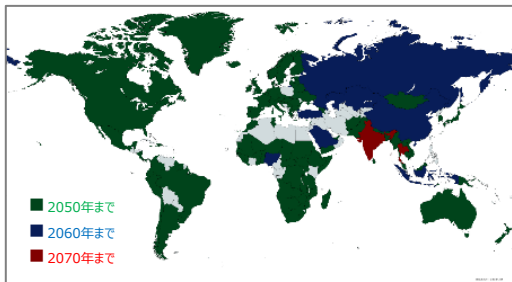
- 期限付きCNを表明する国地域は121、世界GDPの約26%を占める

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\$)

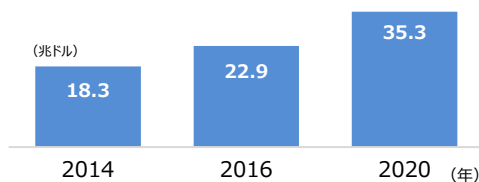
(参考) COP26終了時点のCN表明国地域



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</u> <u>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、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。

【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。

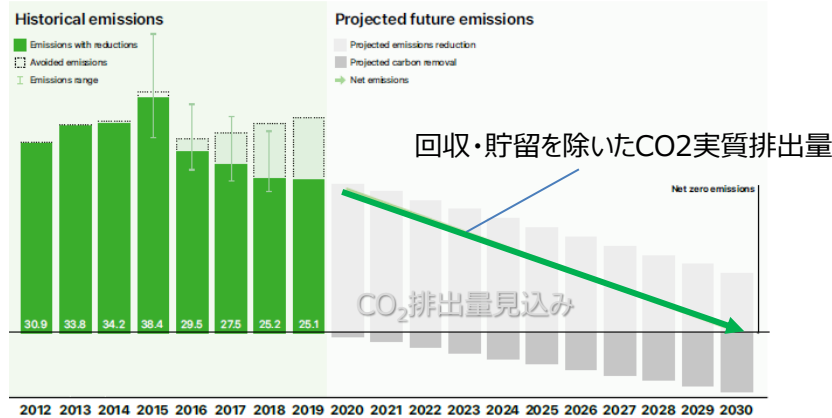
米・Apple：2030年までにサプライチェーン脱炭素化

- 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。

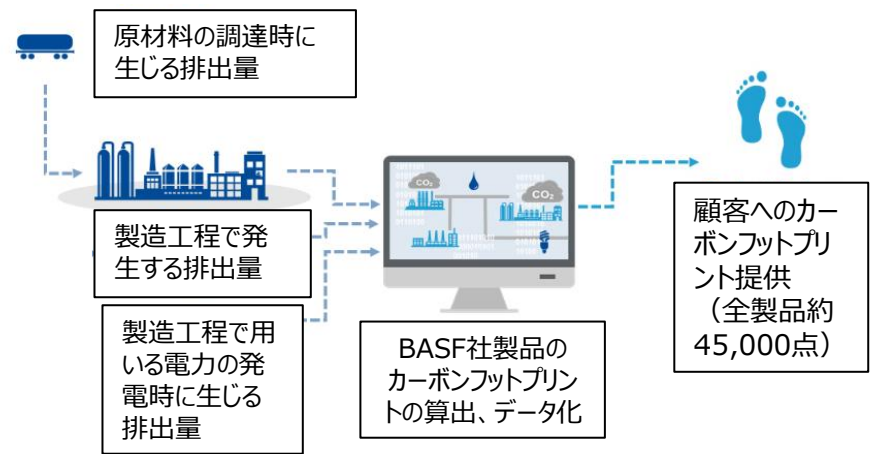
独・BASF：全製品のカーボンフットプリントを提供

- 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】



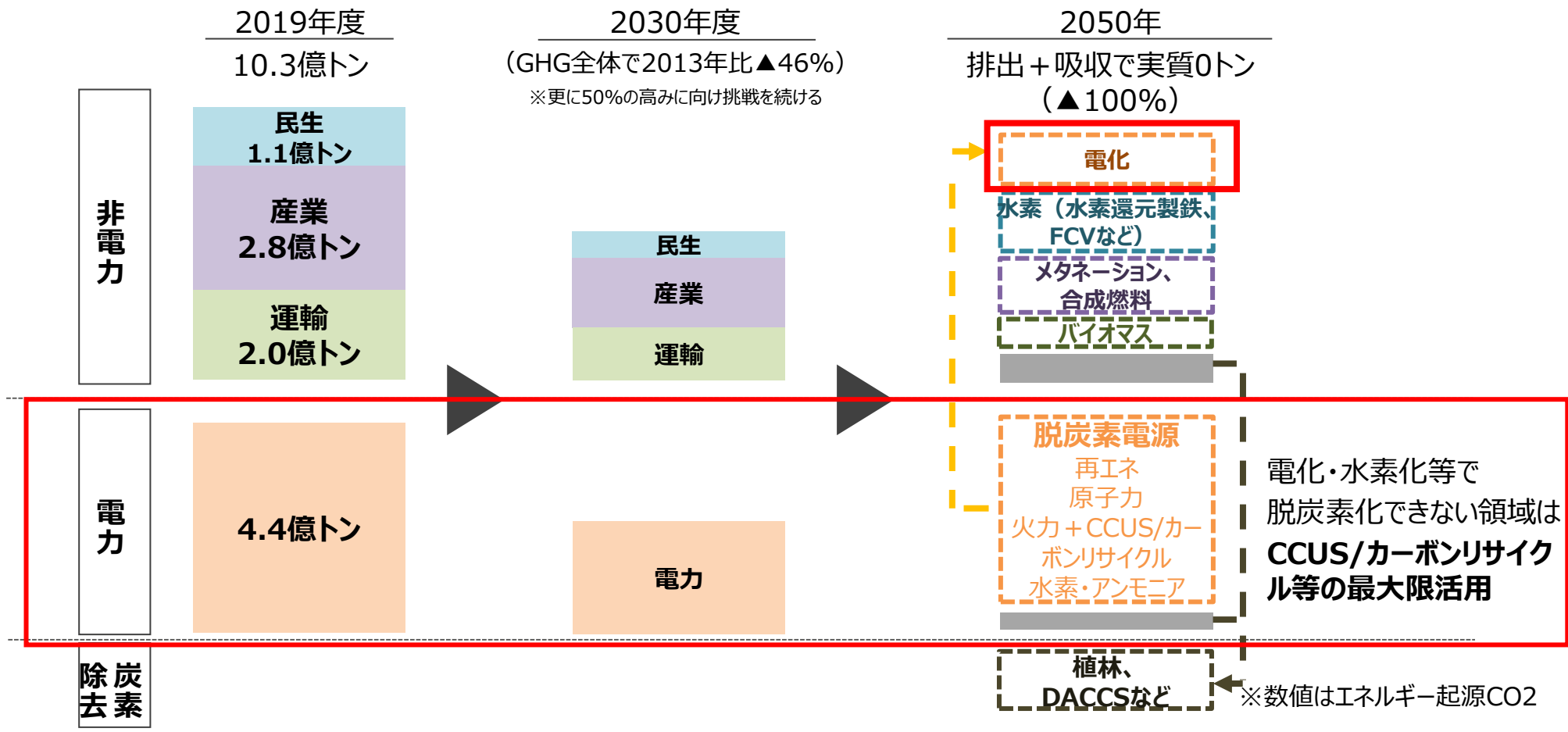
（出所） Apple 「Environmental Progress Report 2019」を基に経済産業省作成



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

2-0. 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。



2-1. 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。

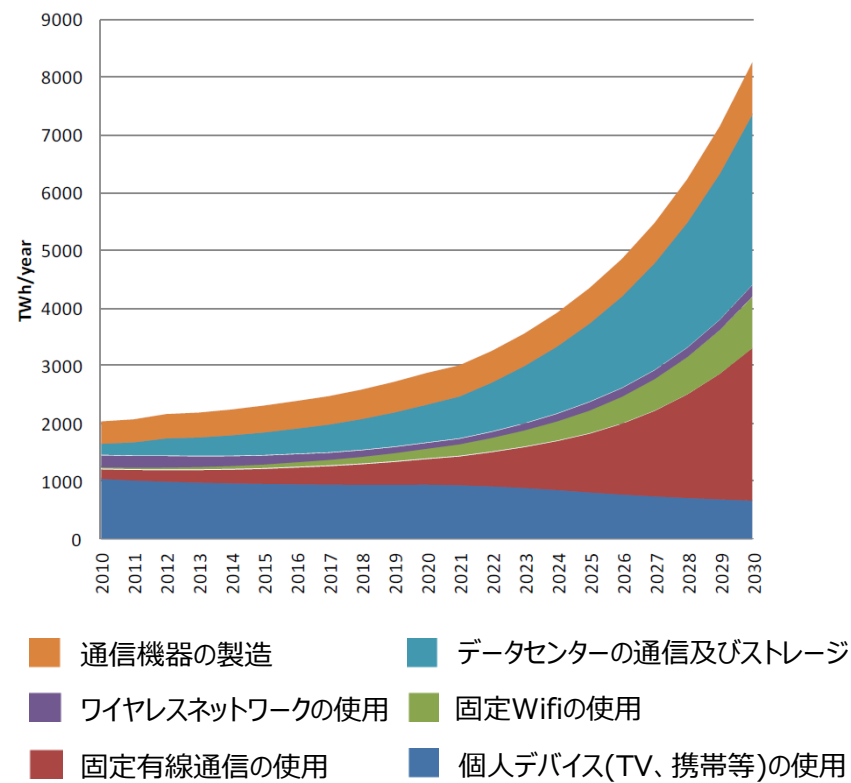
	目標年度	目標	FCV	EV	PHEV	HEV	ICE
日本 	2030	HV：30～40% EV・PHV：20～30% FCV：～3%	～3%	20-30%		30～40%	30～50%
	2035	電動車(EV/PHV/FCV/HV) 100%	100%				対象外
EU 	2035	EV・FCV：100% (注) 欧州委員会提案	100%		対象外		
米国 	2030	EV・PHV・FCV：50%	50%			50%	
中国 	2025	EV・PHV・FCV：20%	20%				
	2035	HEV50% EV・PHV・FCV：50% (注) 自動車エンジニア学会発表	50%			50%	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	ガラス熔融の20%を全電気熔融に転換
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突入。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
	麒麟 (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

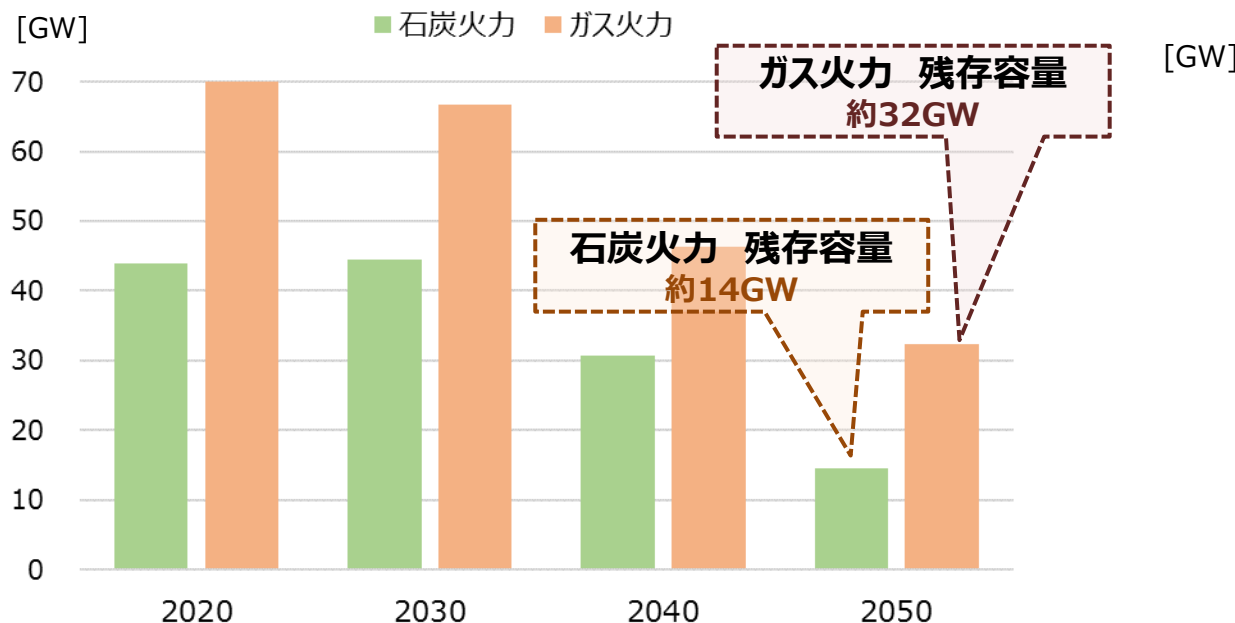
環境対応への遅れが
立地競争上不利に

※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）より抜粋 14

【参考】設備容量が減少していく火力発電の代替の必要性

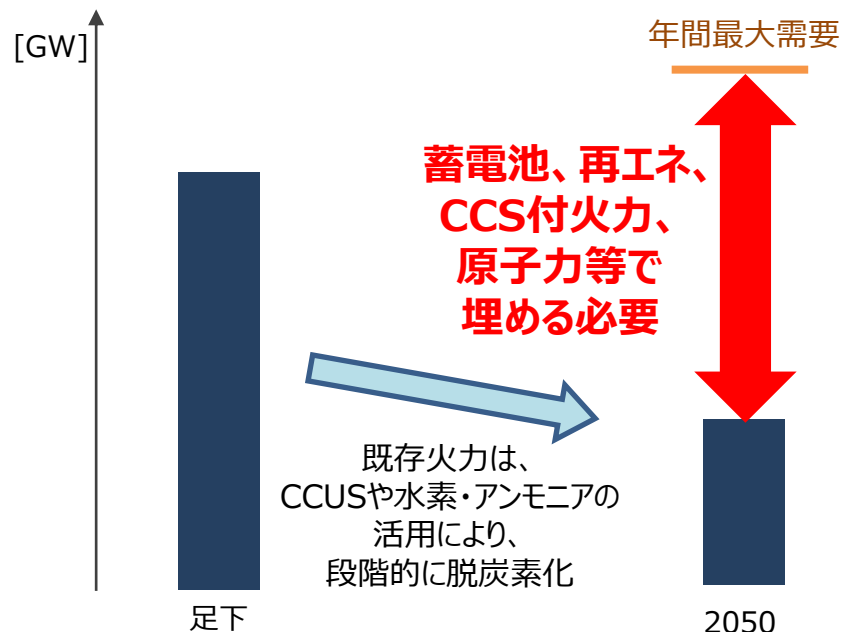
- 現在建設中の設備及び既運転の設備を対象とし、寿命を40年と想定すると、**今後の新規の新設案件がないという仮定**の下でも、**2050年時点でガス火力は約32GW、石炭火力発電は約14GWとなる。**
- また、**再エネの導入が拡大**する状況の中、火力発電は、
 - ー 太陽光や風力の出力変動を吸収し、**需給バランスを調整を行う調整力**や、
 - ー 急激な電源脱落などにおける周波数の急減を緩和し、**ブラックアウトの可能性を低減する慣性力**といった機能により、**電力の安定供給に貢献**してきた。
- 今後、こうした機能をもつ**火力を代替する技術・脱炭素化する技術（水素・蓄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

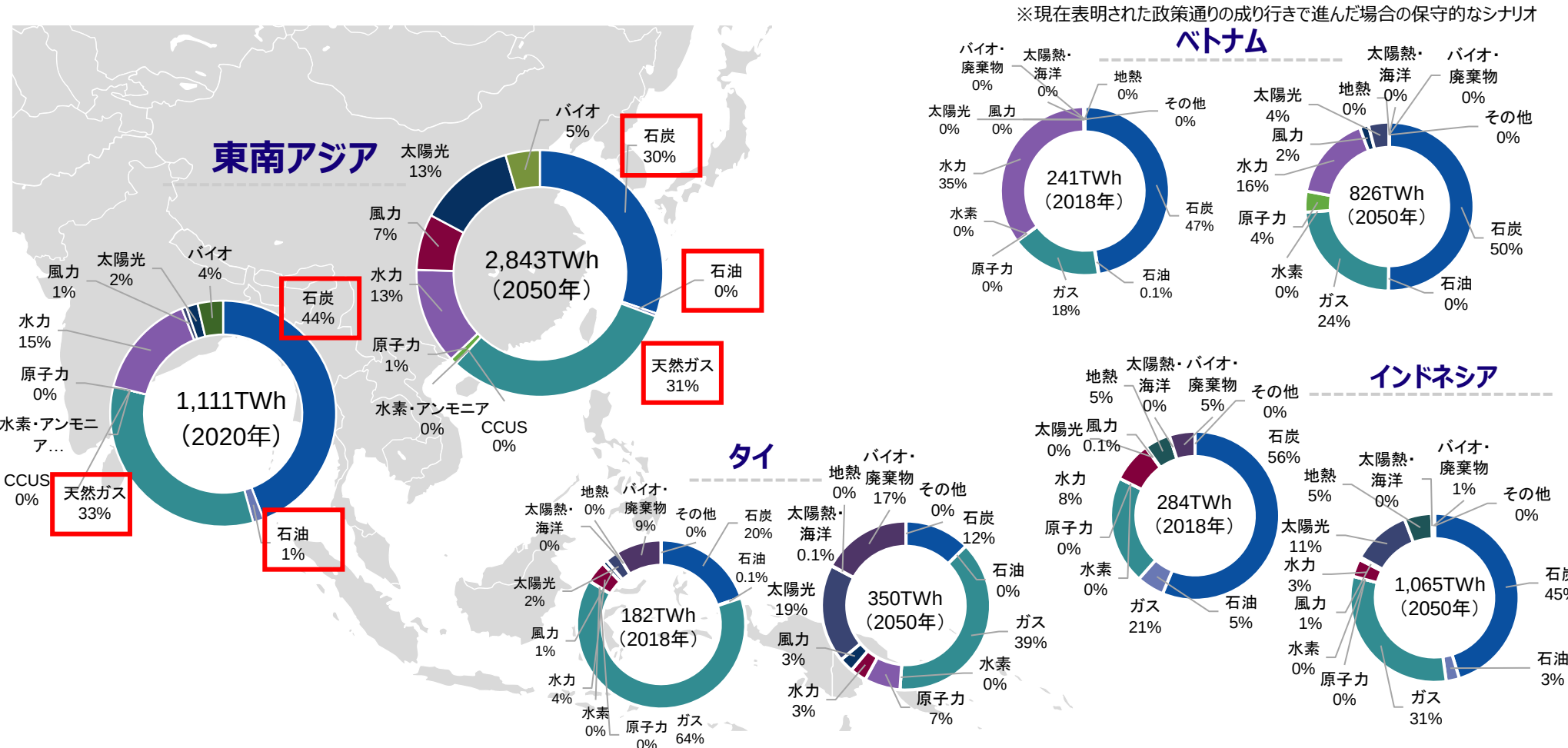
2050年における火力発電の設備容量と年間最大需要のイメージ



※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

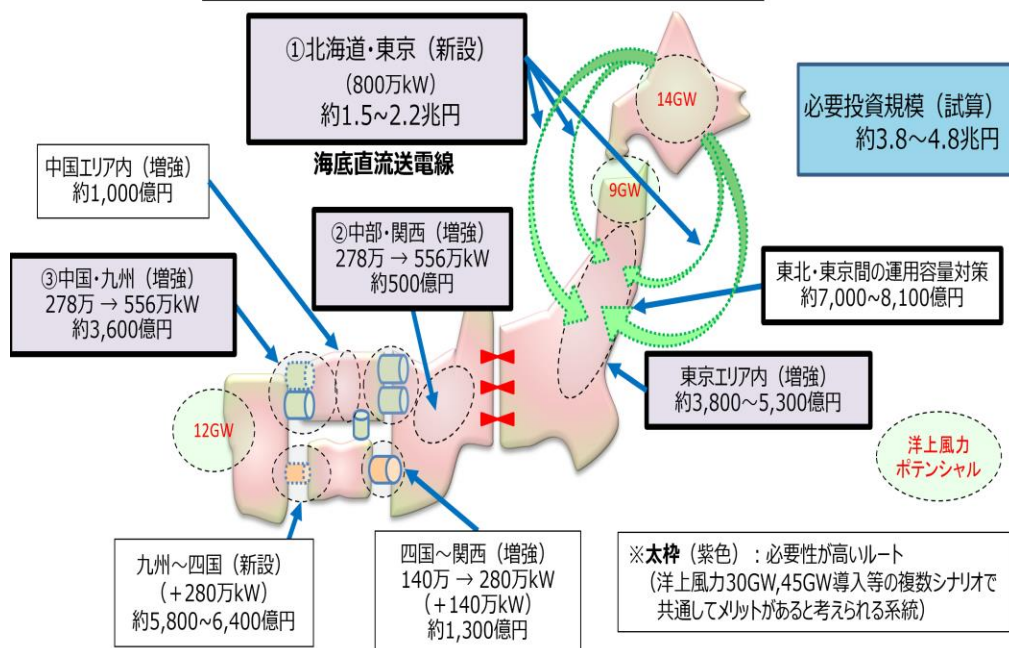
16

2-2. 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。

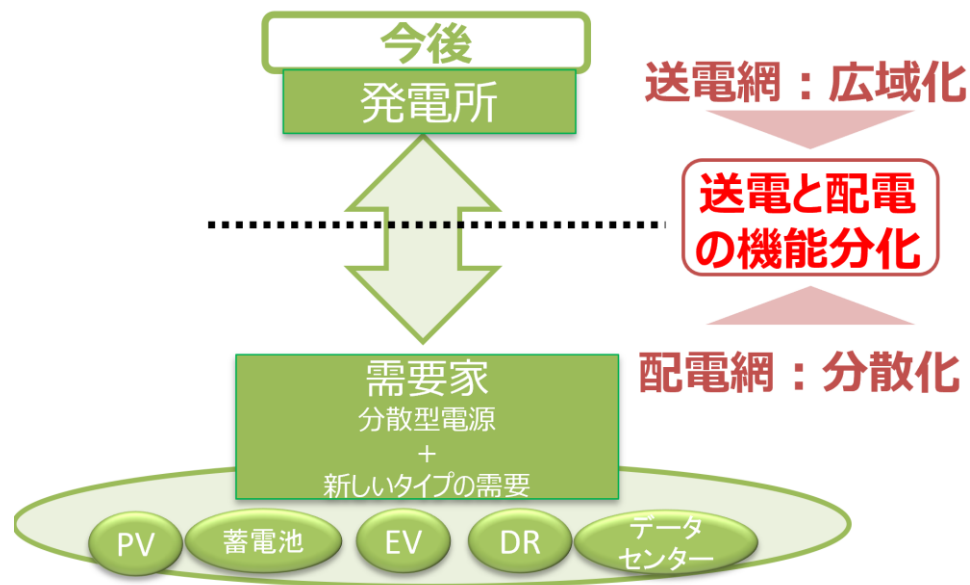
広域系統形成にかかるマスタープランの検討

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

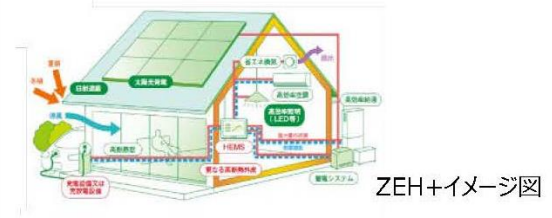
【参考】分散型電力システムの推進

- 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＞

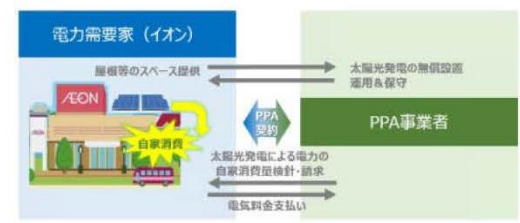
家庭

- 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。



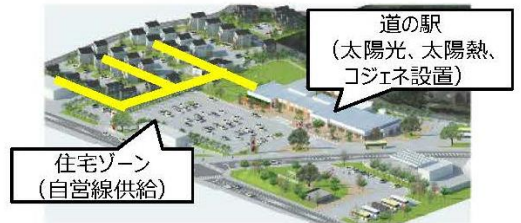
企業／公的機関

- 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

2-3. 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

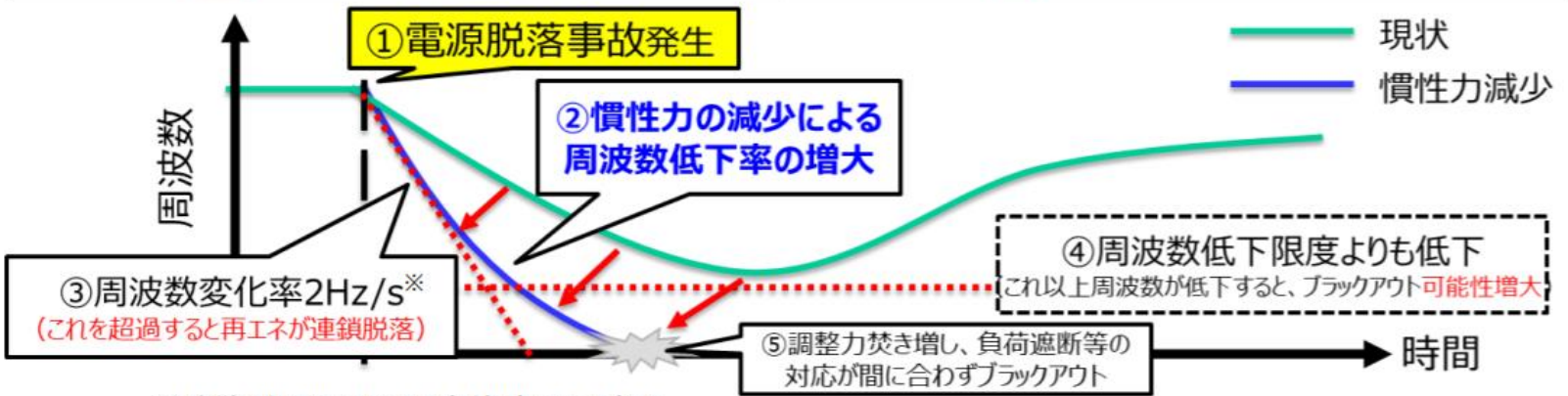
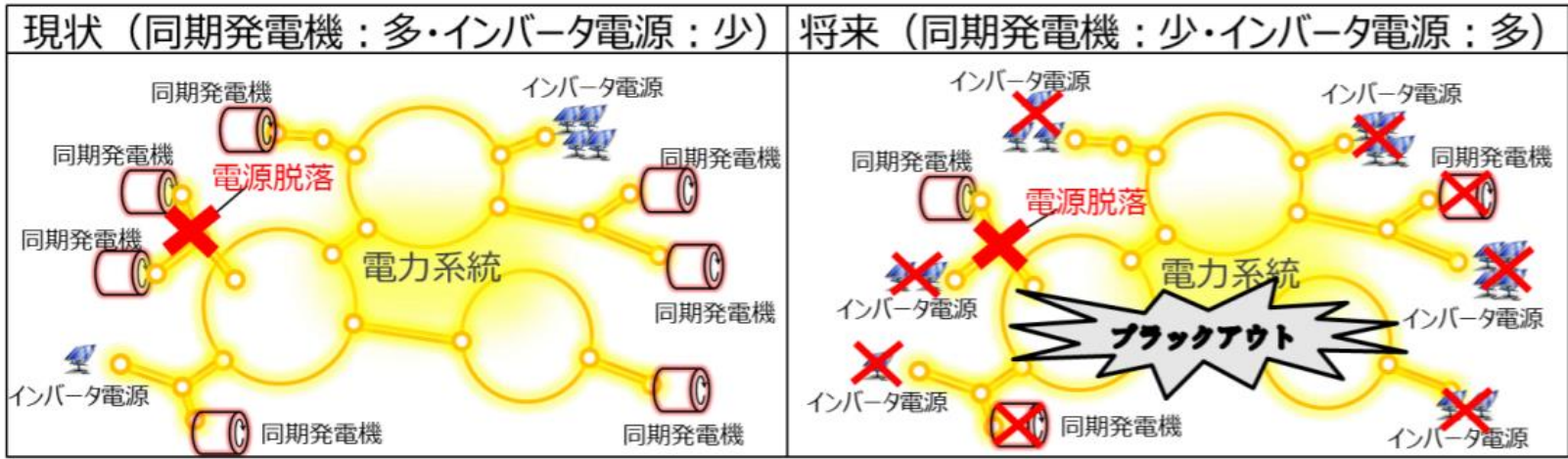
高圧発電機車238台

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。

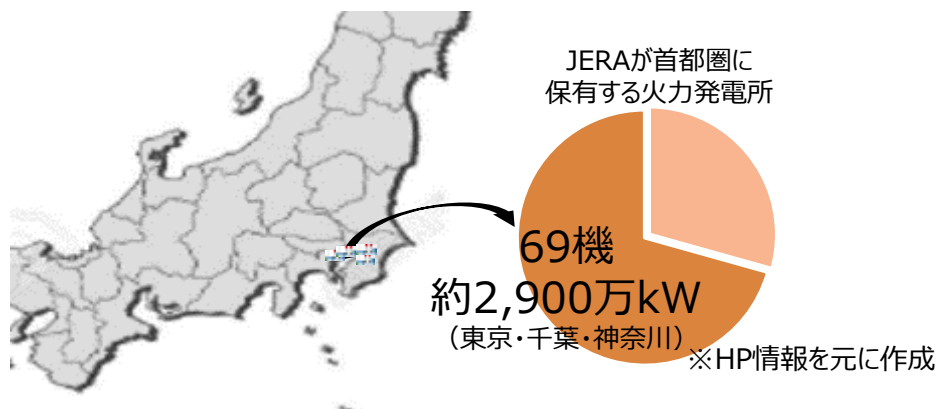


※分散型電源における事故時にも運転を継続するための要件（FRT要件）

【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

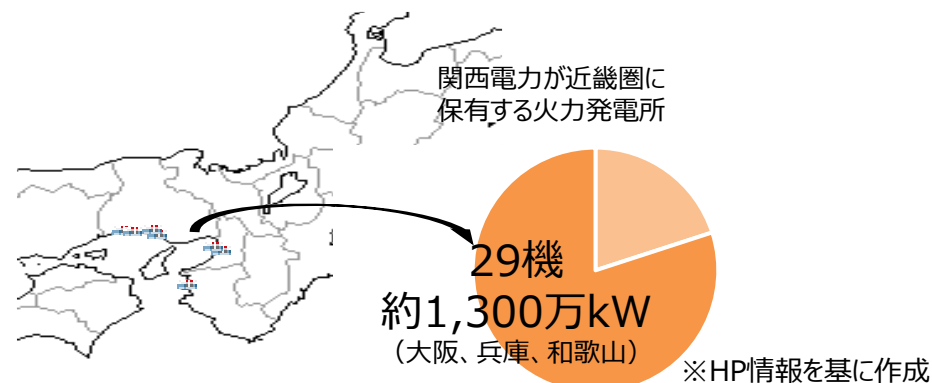


- ✓ JERAが首都圏に保有する全火力発電所の約7割（約2,900万kW）が東京湾岸に集中。

（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



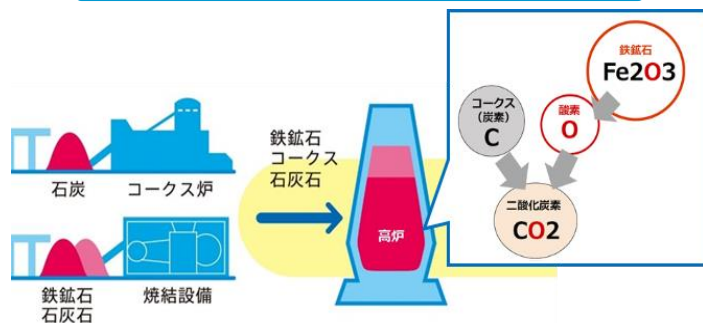
- ✓ 関西電力が近畿圏に保有する全火力発電所の約8割（約1,300万kW）が大阪湾岸や瀬戸内等に集中。

（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

2-4. 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）



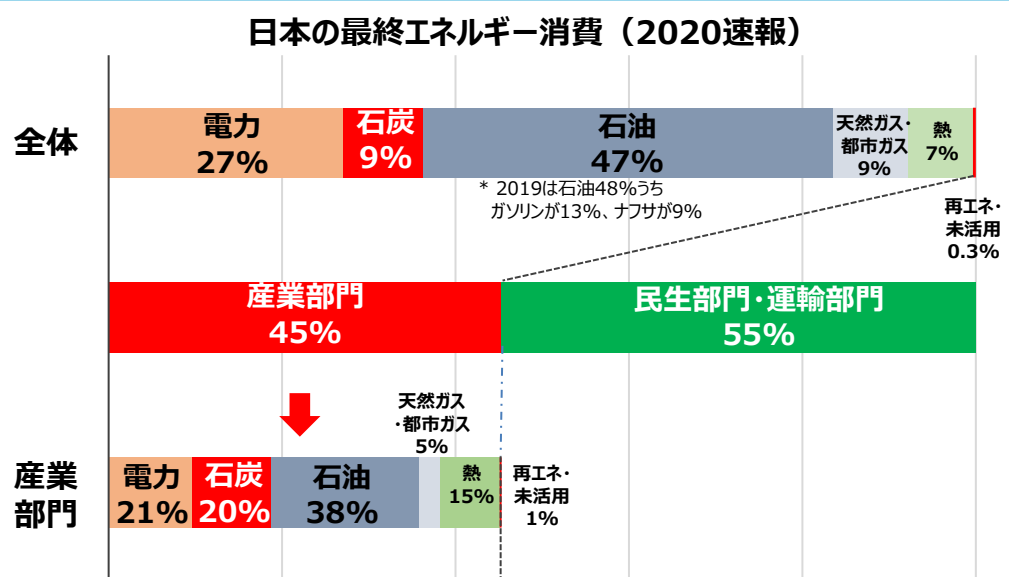
（出典）一般社団法人セメント協会資料を基に作成

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）

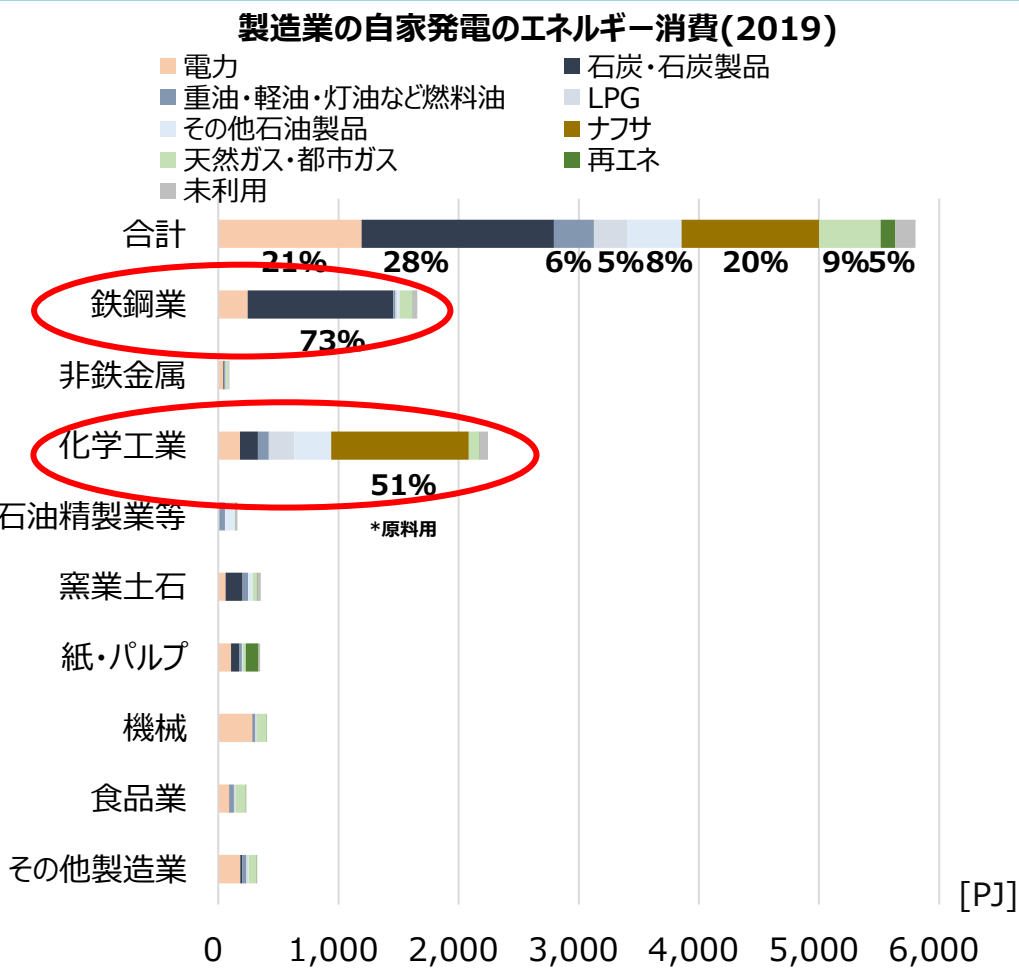
【参考】製造業における非電力（熱・燃料）需要の実態

- 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われ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、ドイツ、オランダ、豪州等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、2040年10GW）。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。
- 中・長期的な大規模水素輸入に向けたサプライチェーン実証プロジェクトを実施予定。
- 連立与党が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。
- 大型FCT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。
- ユタ州のIPPが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。（MHPS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FCTラックの開発を支援。



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。水素の製造、輸送・貯蔵、利用に向けて取り組む。
- 官民連携によるグリーン水素アライアンスを立ち上げ。
- 輸送分野では、商用車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、年間60万トンのグリーン水素生産を目標として設定。
- グリーン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。
- 産業の脱炭素化に加え、大型FCTラックの開発が優先項目に。



中国

- 2016年省エネ・新エネ車の技術ロードマップにおいてFCVの普及目標を策定。現在は商用車中心に普及が進む。
- 2020年4月にFCV産業のサプライチェーン構築への助成を発表。水素関連技術の競争力確立を目的とし、モデル都市を選定し、FCVや水素ステーションの技術開発・普及に奨励金を与える。

【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

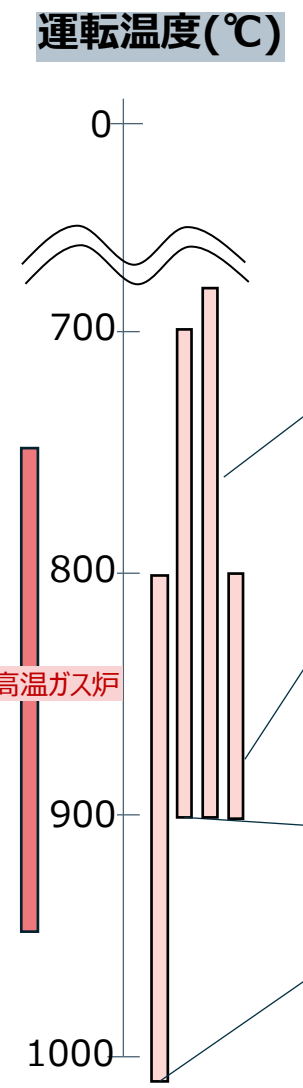
4. 自立商用フェーズ

●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。



	名称	特徴	開発者	CO ₂	技術熟度	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、Sunfire、Topsoe、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

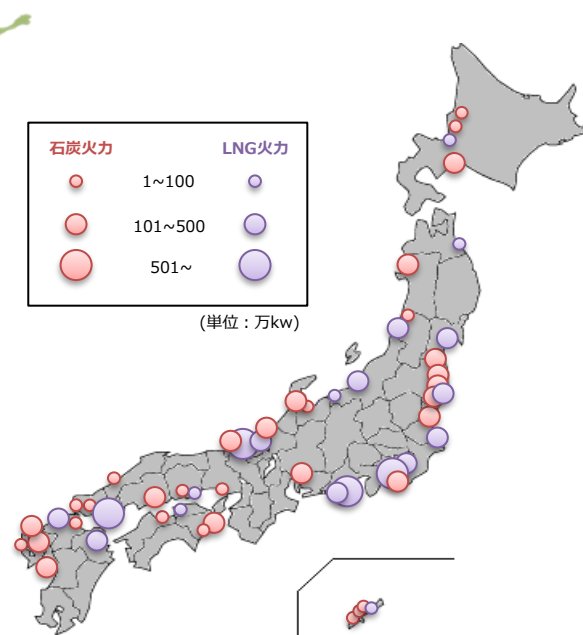
2-5. 地政学リスクへの対応

- 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

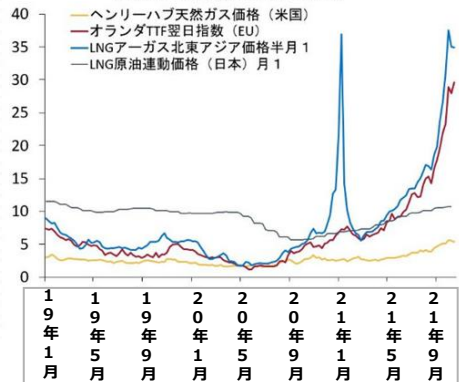


【出所】資源エネルギー庁公表の「石炭火力発電所一覧」や各社HPの情報を元に大手電力会社の石炭・LNGの火力発電設備を資源エネルギー庁にて集約

足下で資源価格は反発・上昇へ



天然ガス価格 (\$/mBtu、週平均)

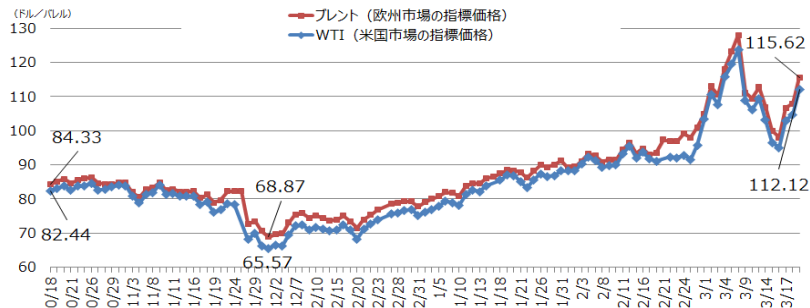


【参考】ウクライナ情勢の影響

- 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 天然ガス依存からの脱却

2/25、英国政府は、ウクライナ情勢が英国のエネルギー安全保障に与える影響についてファクトシートを公表。現状ロシアへの依存は4%未満だが、エネルギー価格高騰への対策が必要。長期的には天然ガスからの脱却が必要とし、そのためには、より安価な再生可能エネルギー、新たな原子力発電所の建設の推進が必要と分析。

ドイツ ロシアとのガスパイプライン計画を凍結、調達先多角化へ

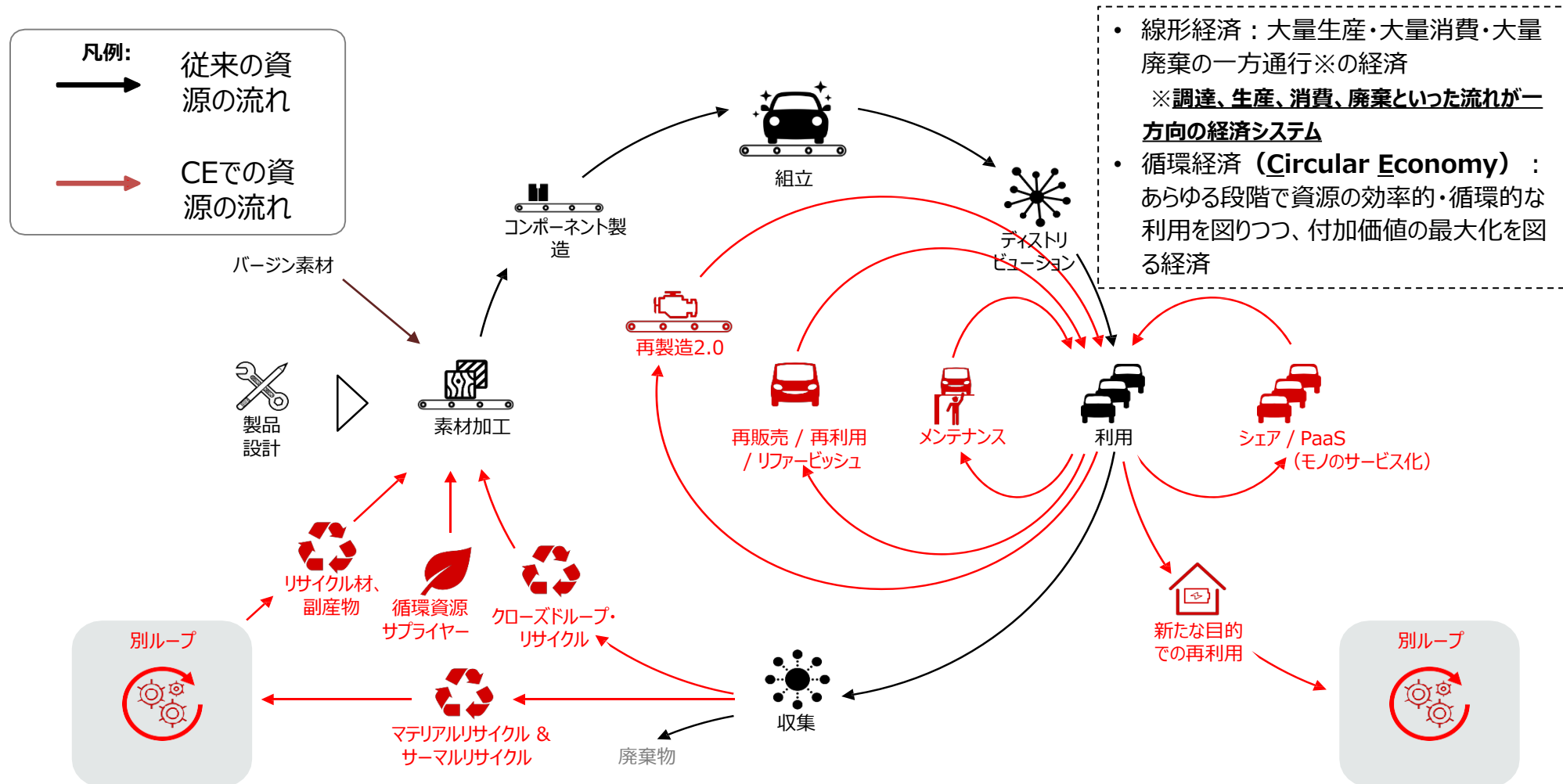
天然ガス輸入のうち、55%をロシア産に依存するドイツは、2/22にロシアからの天然ガスパイプラインである「ノルドストリーム2」のプロジェクト凍結を発表。3/5には、自国のエネルギー安全保障のため、国内初のLNG輸入ターミナルの建設していくことを発表。

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、チアンジュ3号機）の運転を10年延長する方針を決定。3月末までに2基の運転延長に必要な法案を閣議決定する予定。

2-6. 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。

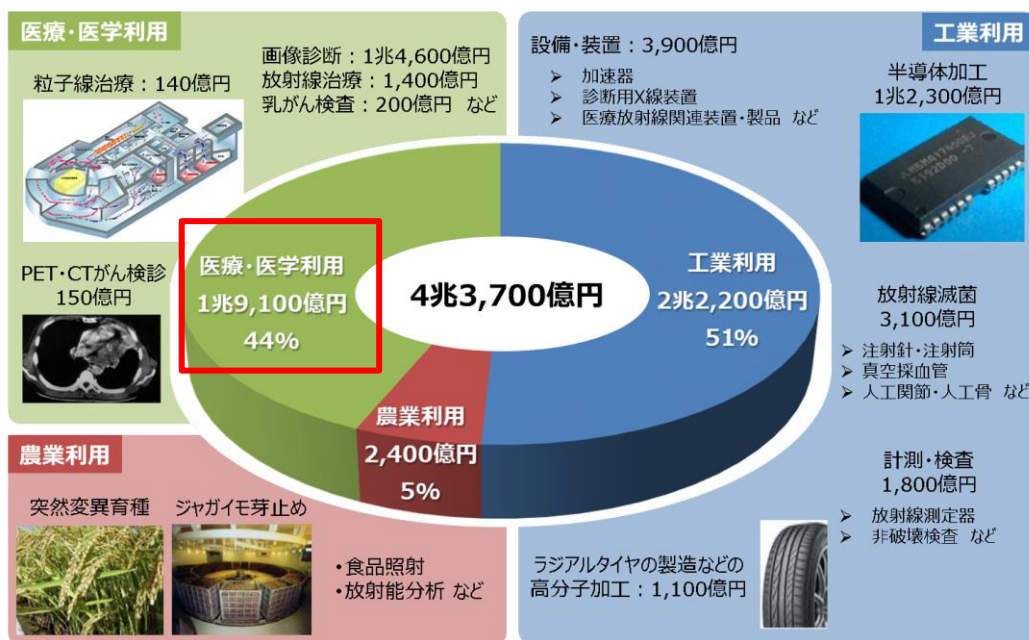


2-7. エネルギー分野以外へのイノベーションの波及

- 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）

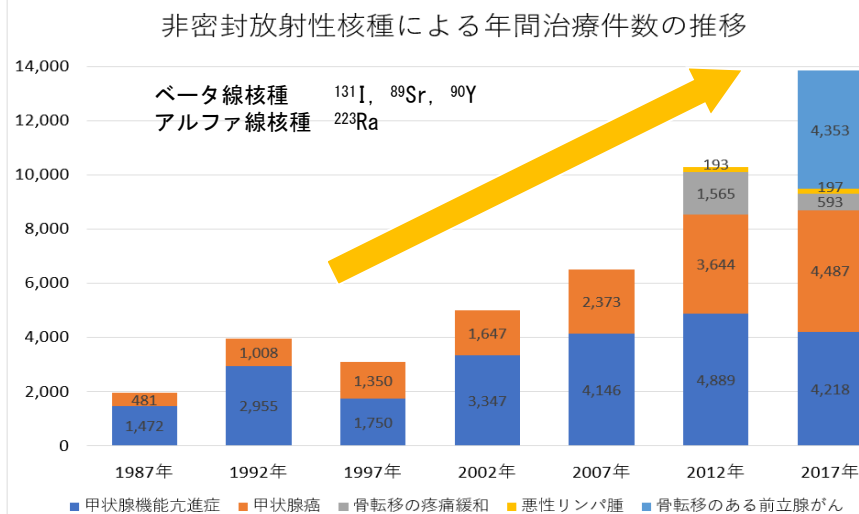
- ・分野全体で4兆3,700億円
（2005年度：4兆1,100億円）
- ・特に医療・医学利用については、10年間で30%増



（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. 第24回小委員会の議論まとめ
2. カーボンニュートラル実現に向けた社会全体の変革
- 3. 革新炉による貢献の可能性**
4. 革新炉の現状と国内の課題
5. 原子力産業サプライチェーンの現状と課題

3. 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。

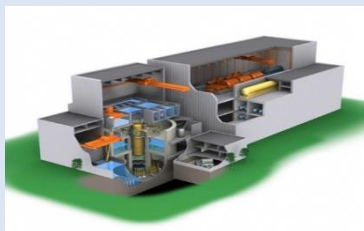
	カーボンニュートラル実現に向けた社会全体の変革	革新炉による貢献の可能性
安全性向上		● 炉型の革新安全性、事故耐性燃料【3－0】
電力部門の脱炭素化	● デジタル化等により需要増大する電力の脱炭素化【2－1】 ● 脱炭素電気ニーズの高まり【2－1】	● 電源の脱炭素化への貢献【3－1】
電力ネットワーク	● 再エネ導入拡大に伴う電力ネットワークの変革【2－2】	● 負荷追従による系統安定化・再エネ導入への貢献【3－2】 ● 小型分散型・可搬型電源としての活用【3－2】
レジリエンス	● 台風・地震等の災害発生時の電力レジリエンス【2－3】	● 電力系統内の慣性力の維持【3－3】
産業部門の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

3-0. 革新炉による安全性の革新

- 革新炉では、事故等により外部電源を喪失した場合でも、炉心を冷却するシステムを備えるなどの**固有の安全性**を有する。

<軽水炉（ESBWR）>

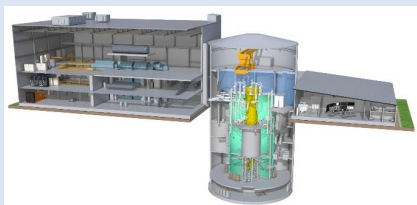
- ・ BWR型電気出力150万kW級。
- ・ 自然循環により、電源なしで受動的に原子炉の冷却が可能。



ESBWR

<SMR（BWRX-300）>

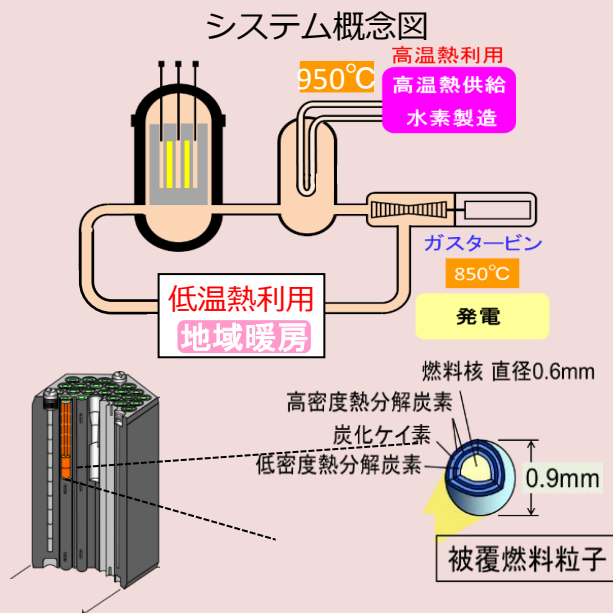
- ・ ESBWRベースに安全性と経済性を進化させたBWR型SMR。
- ・ 自然循環により電源・注水設備なしで受動的に原子炉の冷却が可能。



BWRX-300概略図

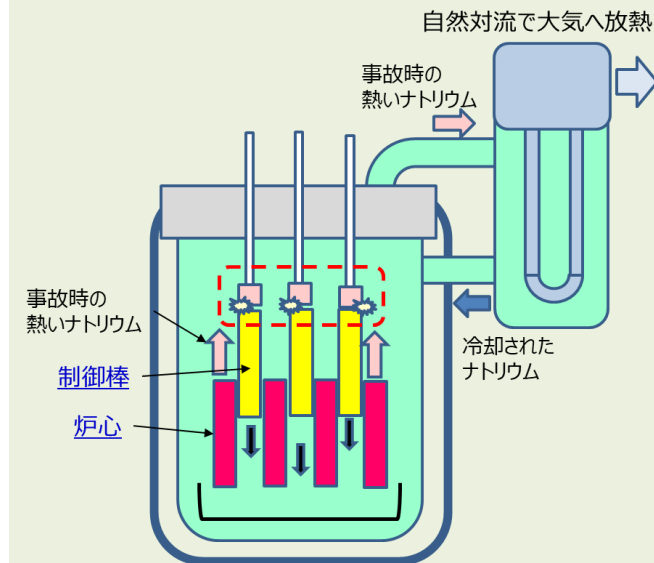
<高温ガス炉（HTTR）>

- ・ 高温で安定なヘリウム冷却材。
- ・ 水素爆発しない。
- ・ 高温に耐性のある燃料を使用するため、炉心溶融しにくい。
- ・ 万が一、冷却材を喪失しても、黒鉛構造材が熱を吸収・放熱するので、自然に冷却が可能。



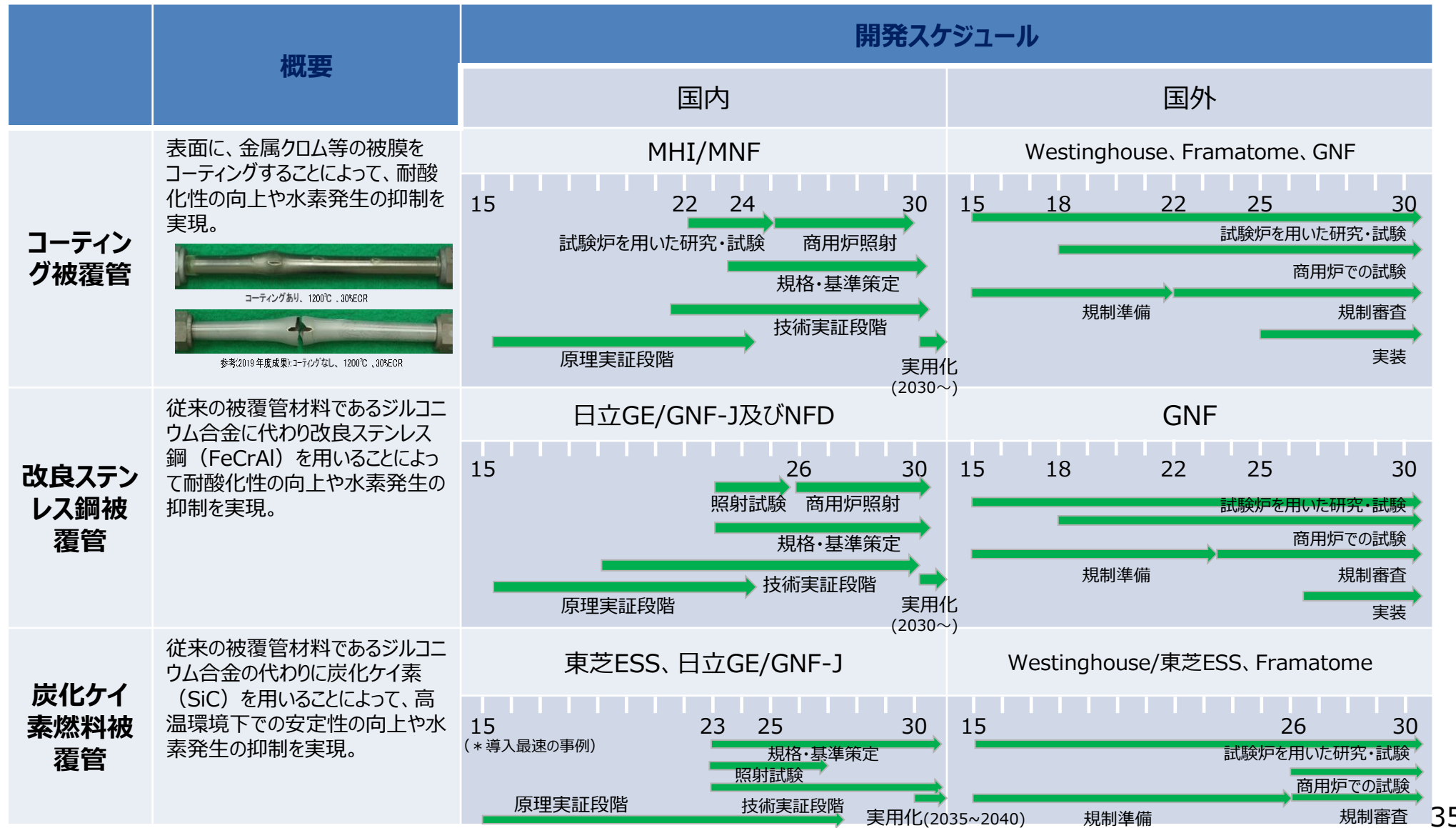
<ナトリウム冷却高速炉>

- ・ ナトリウムは熱を伝えやすく、自然循環により、電源なしでも受動的に原子炉の冷却可能。
- ・ 高温になると制御棒が自然に落下し、反応停止。
- ・ 万が一、炉心溶融しても炉容器内で冷却・収容。



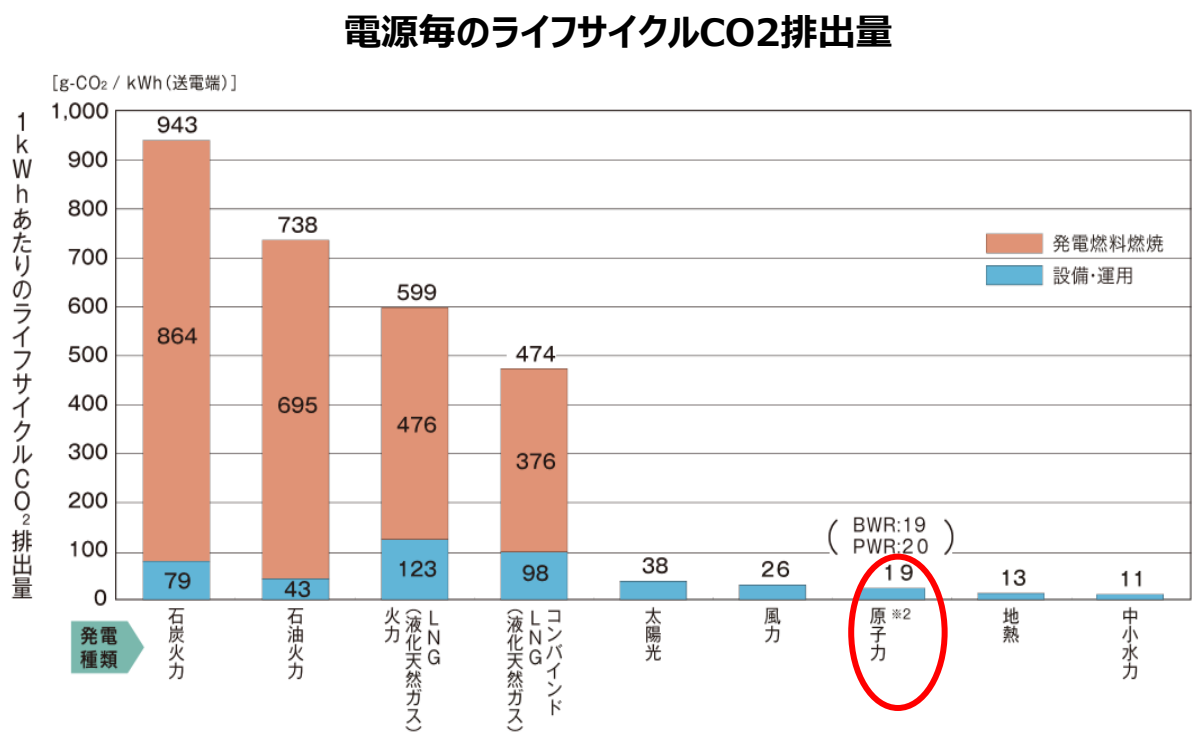
3-0. 安全性を大きく高める燃料の開発

- 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。



3-1. 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。



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

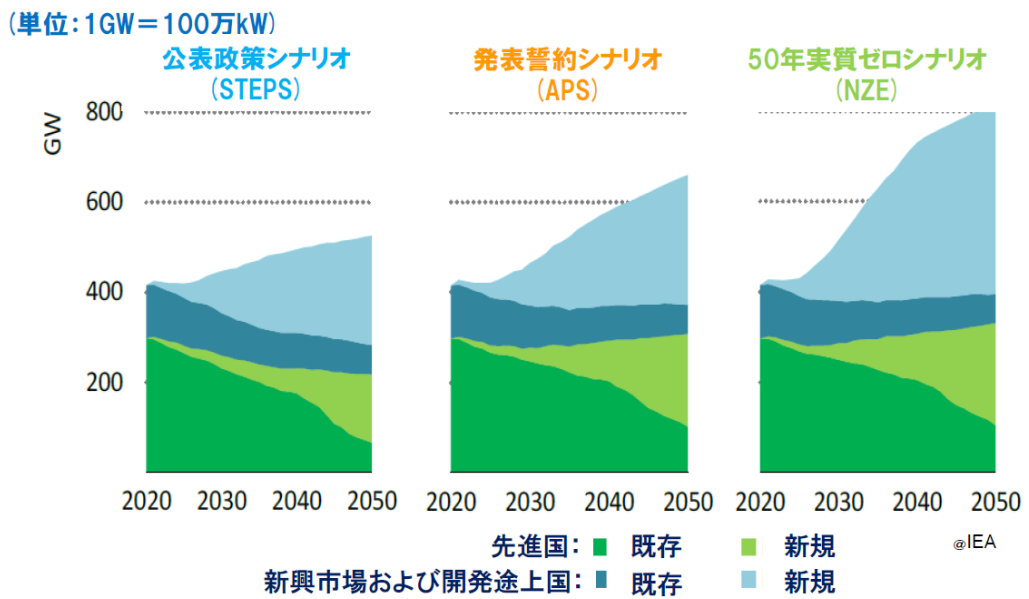
(出典) 電力中央研究所「日本の発電技術のライフサイクルCO2排出量総合評価」(2016年7月)

(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

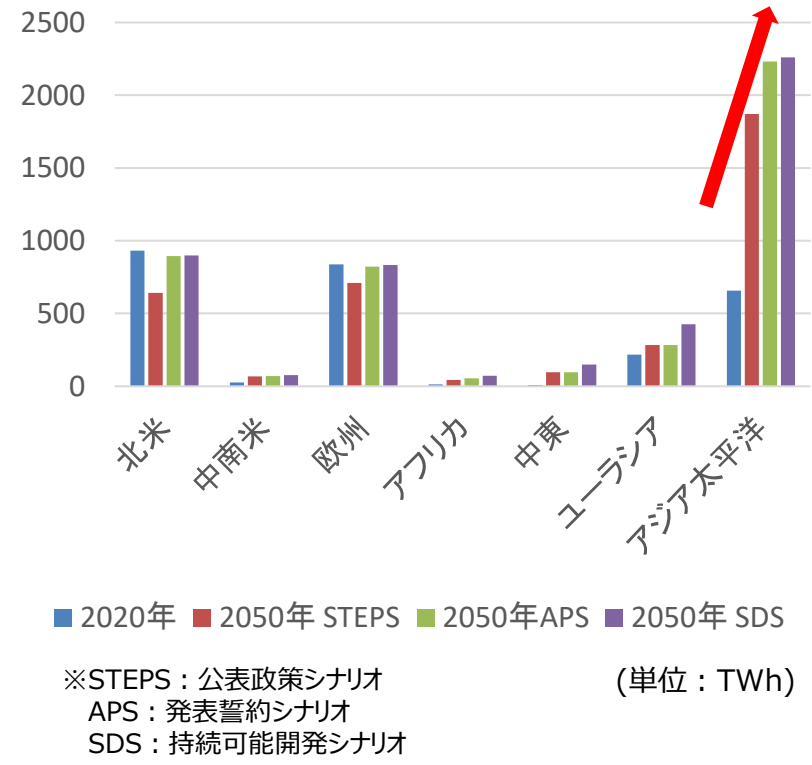
【参考】世界の原子力発電の将来見通し

- 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】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。

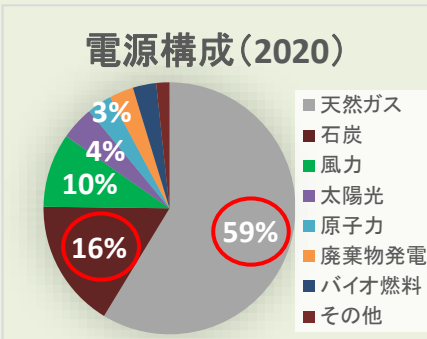
オランダ

- 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。



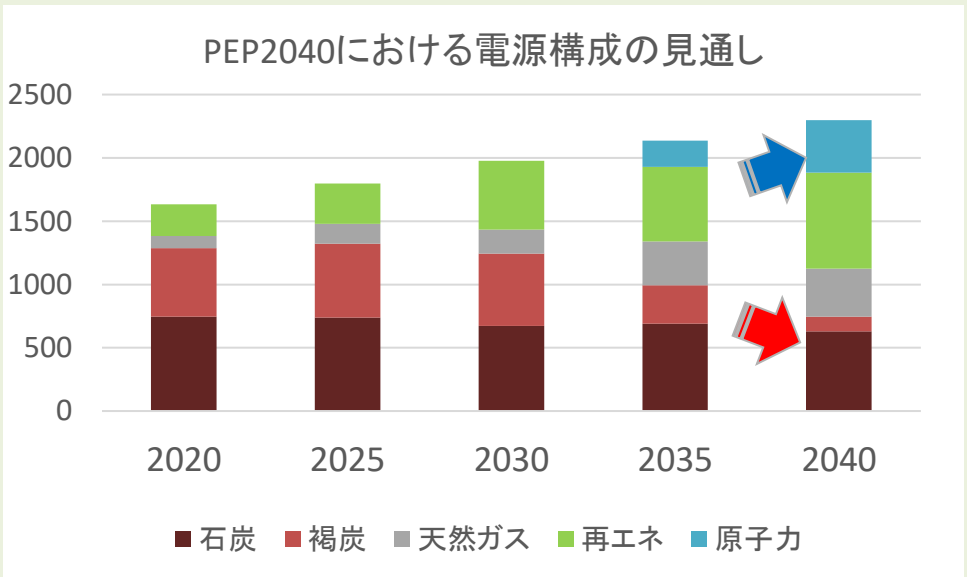
ルッテ首相率いる新連立政権



(出典)「海外諸国の電気事業第2編（2020年）」

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）」

3-2. 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。

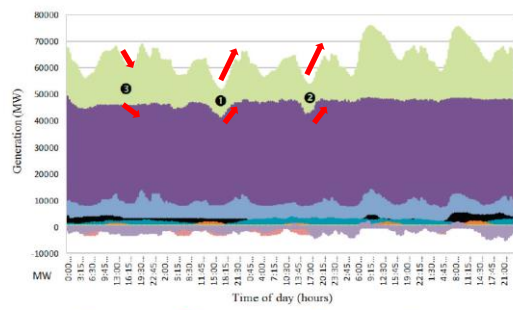


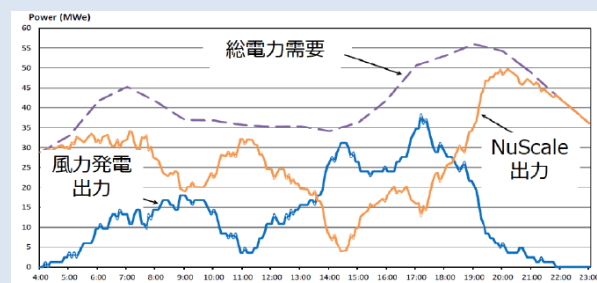
FIG. 20. Generation mix and demand in France during the Easter holidays, from 30 March to 3 April 2013 (reproduced from Ref. [23]).

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

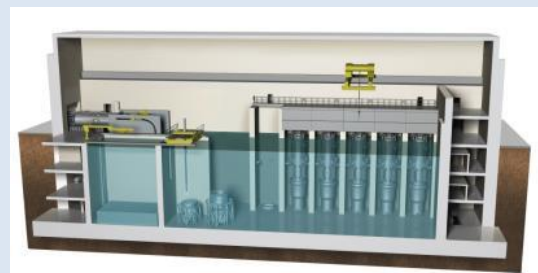
(出典) https://www.jaif.or.jp/cms_admin/wp-content/uploads/2015/12/sp_necg_1208-12.pdf

<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



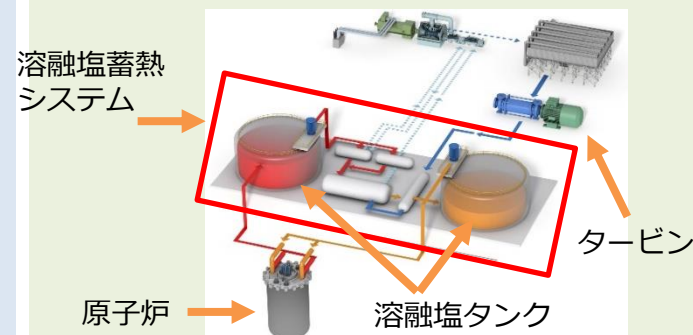
NuScale VOYGR 外観図

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

<TerraPower 高速炉 Sodium>

- ・ **高速炉の高温と蓄熱性能に優れる溶融塩**を組み合わせた蓄熱システムを組み合わせ、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



3-2. 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。
- 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。
- 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。



原子力を利用した宇宙探査船

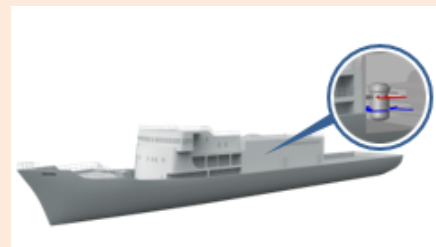
(出典)NASAのHPより引用

多目的利用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、原子炉容器に蒸気発生器等を内蔵することで、冷却材喪失等の事故を本質的に排除し安全性を高めた多目的利用SMRを開発。国内IPに基づき、陸上発電用として受動的安全性を全面的に採用した出力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

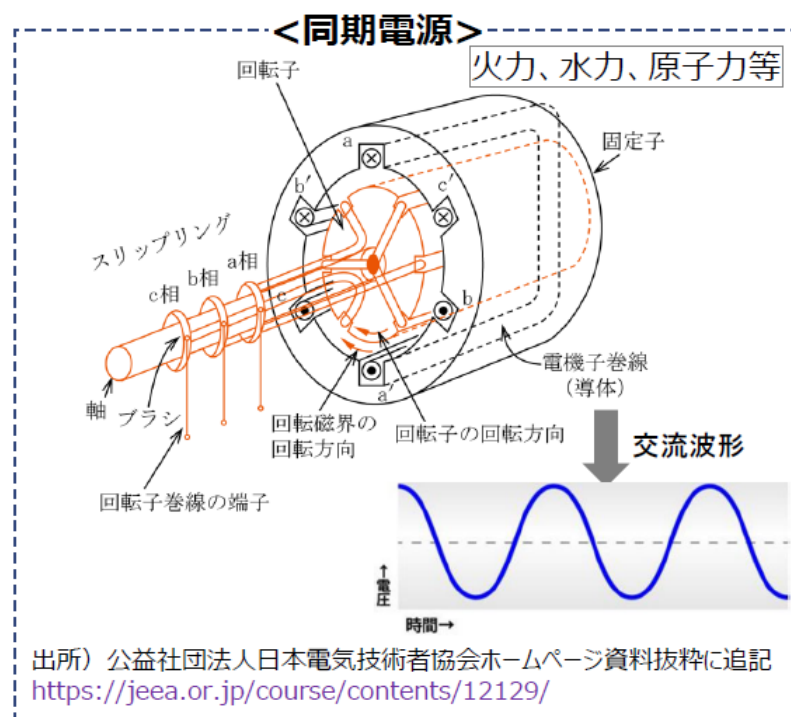


船舶搭載炉

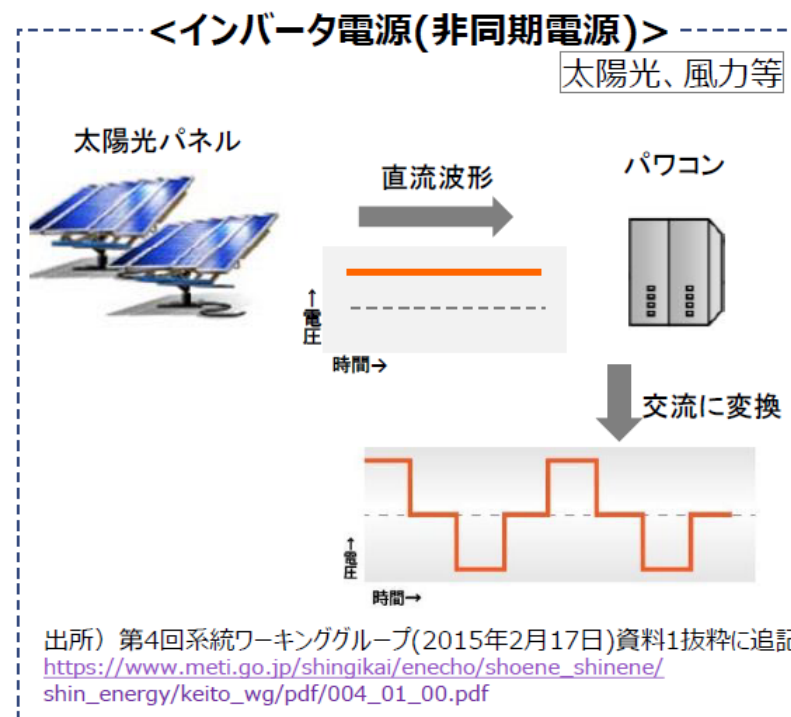
多目的利用小型PWR

3-3. 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

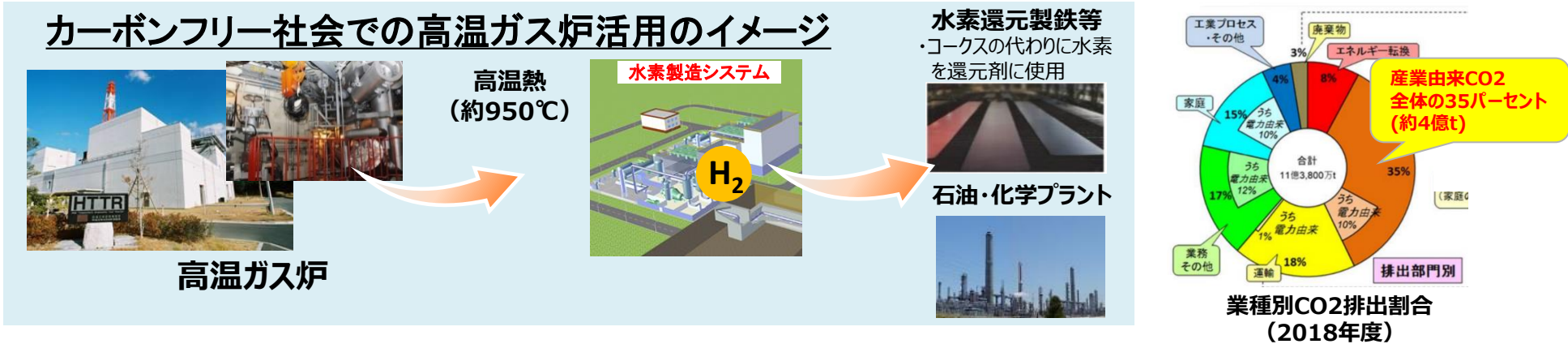


【静止器】
回転エネルギーなし
慣性力・同期化力なし

※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。

3－4．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。



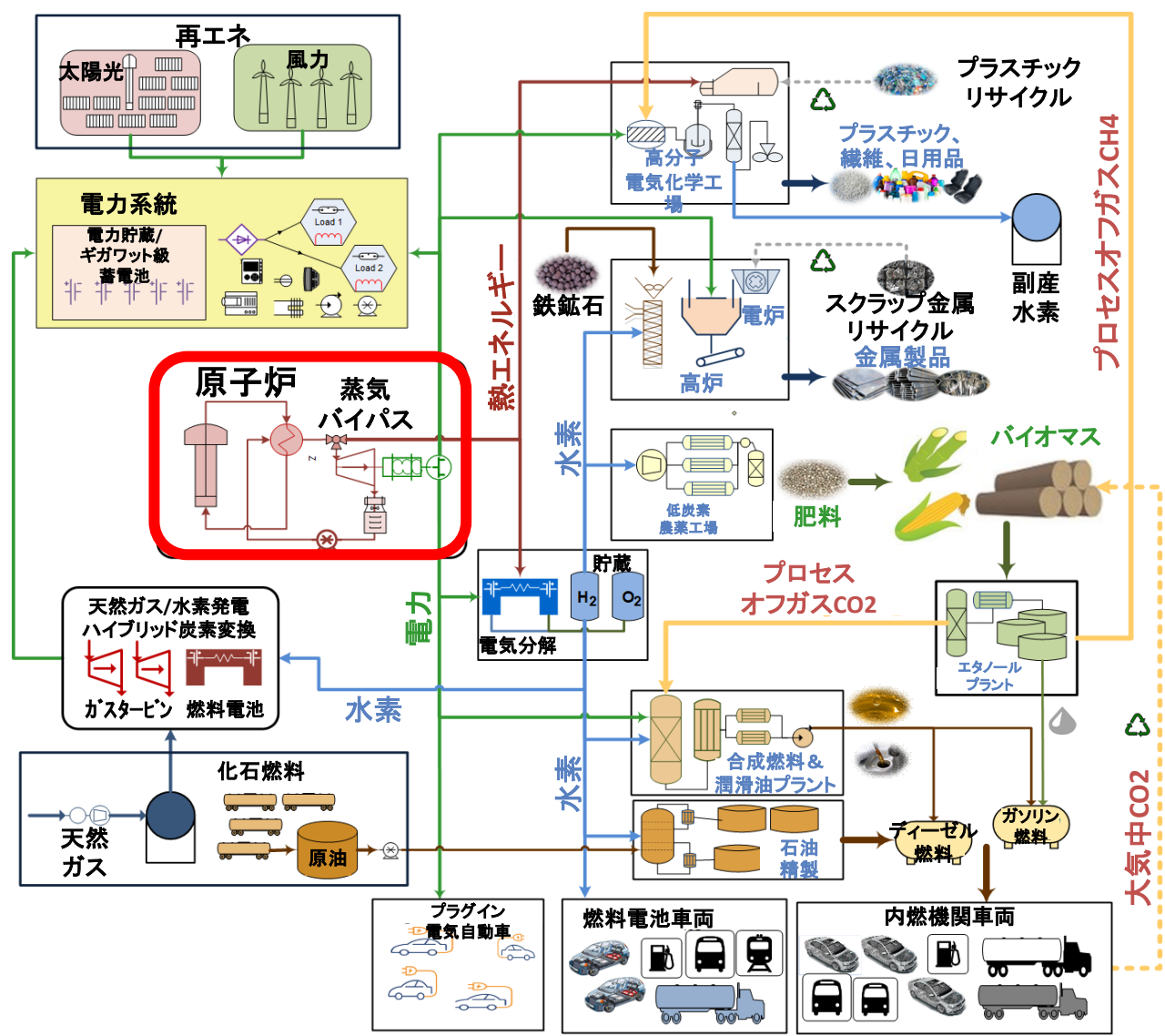
高温ガス炉の活用により、カーボンフリーで大規模・安定の水素製造が可能

	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】原子力の統合エネルギーシステム（IES）の概念図

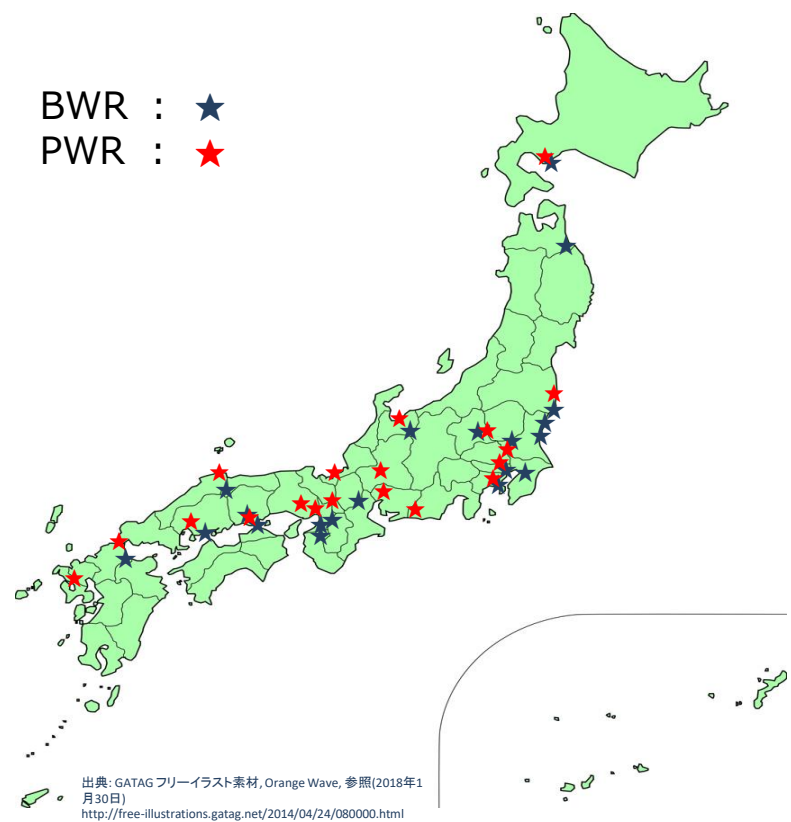
- 米国エネルギー省（DOE）は、革新的かつ分野横断的な原子力エネルギー技術を開発するための統合エネルギーシステムを提唱（再エネ導入や産業部門における水素供給を含む）。



3－5．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

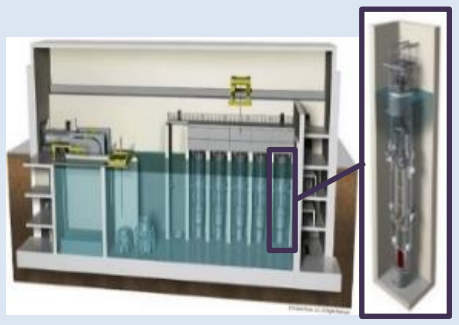
(出典) 原子力発電の効率化と産業政策 国産化と改良標準 (RIETI)、電力会社HP

3-5. 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



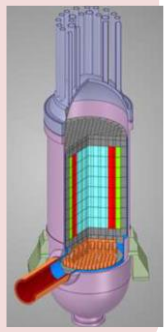
高速炉

- 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



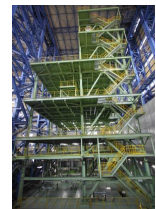
イギリス
高温ガス炉



国際連携



実験炉：常陽



試験設備：AtheNa



試験炉：HTTR

JAEA施設



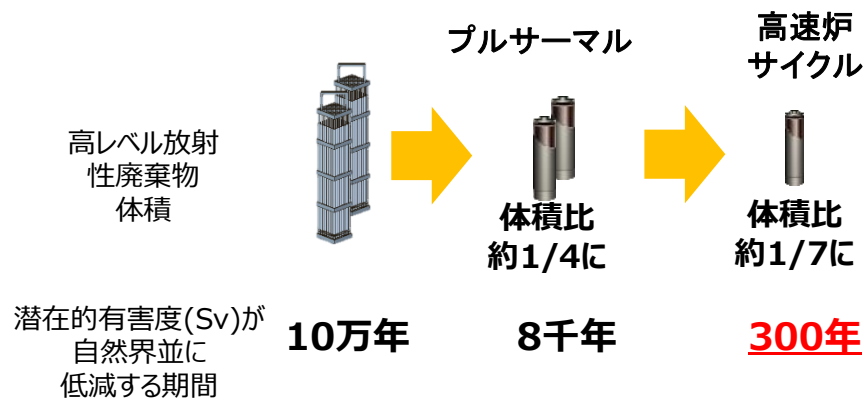
3－6．廃棄物・資源問題への貢献

- 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

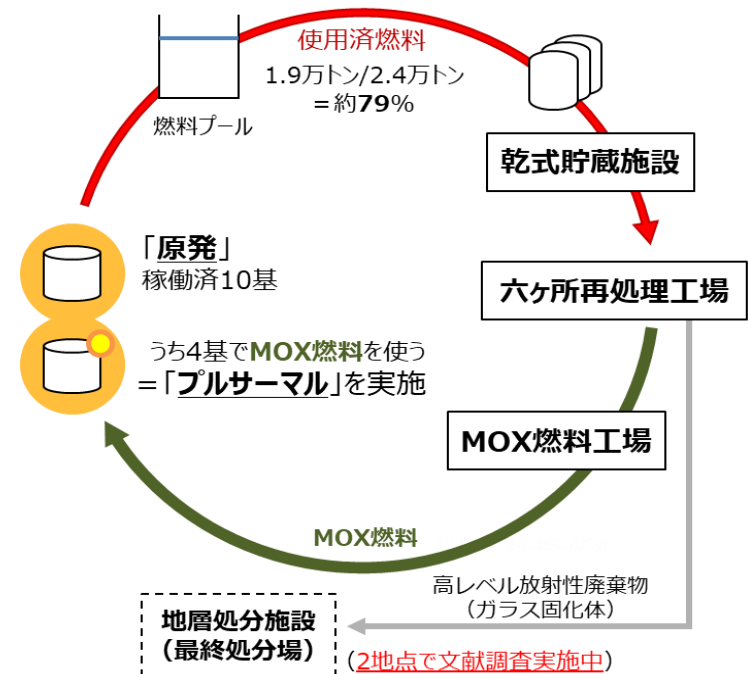
高速炉サイクル

- 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。



3－7．非エネルギー分野への貢献

- 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

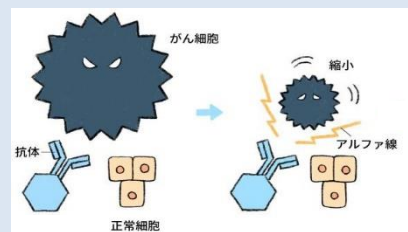


モリブデン（Mo-99）：
核医学検査でがん転移の発見等に利用

※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。

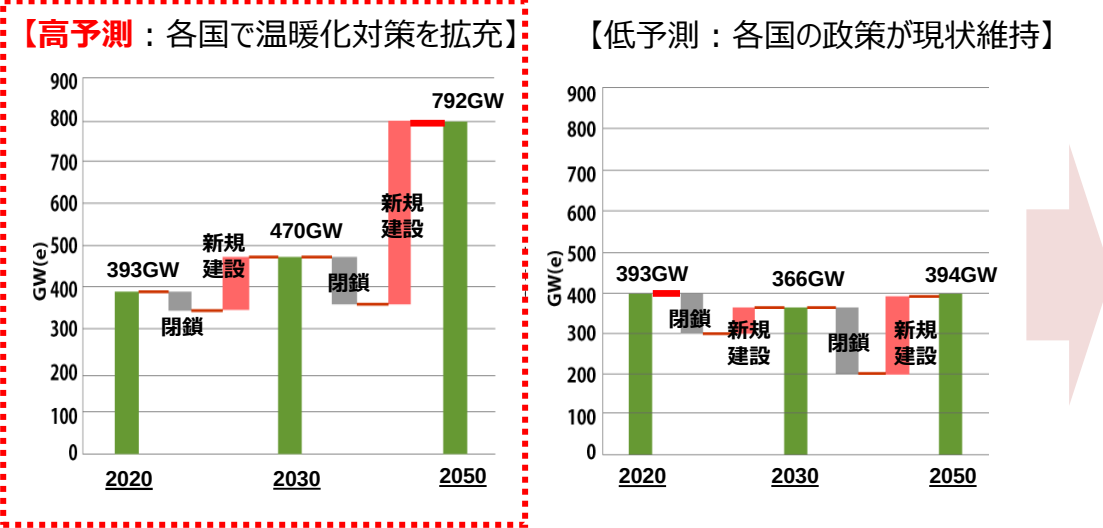


1. 第24回小委員会の議論まとめ
2. カーボンニュートラル実現に向けた社会全体の変革
3. 革新炉による貢献の可能性
- 4. 革新炉の現状と国内の課題**
5. 原子力産業サプライチェーンの現状と課題

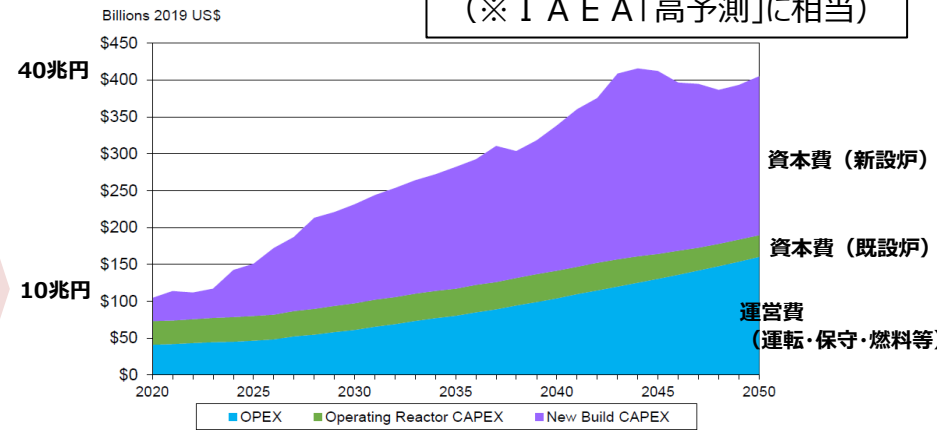
4-1. 世界の原子力市場の拡大見通し

- 国際機関の分析によると、原子力の市場規模は、**2050年には最大で年間約40兆円程度まで拡大**。そのうち、**アジアの旺盛な需要拡大**に込める伸び（石炭からのリプレイス等）が太宗を占める。
- **SMR等の新炉型は2050年で市場の1/4規模との予測**（当面は大型軽水炉が需要を満たす構図。）

IAEA (国際原子力機関) **世界の原子力設備容量予測** 単位: GW=100万kW

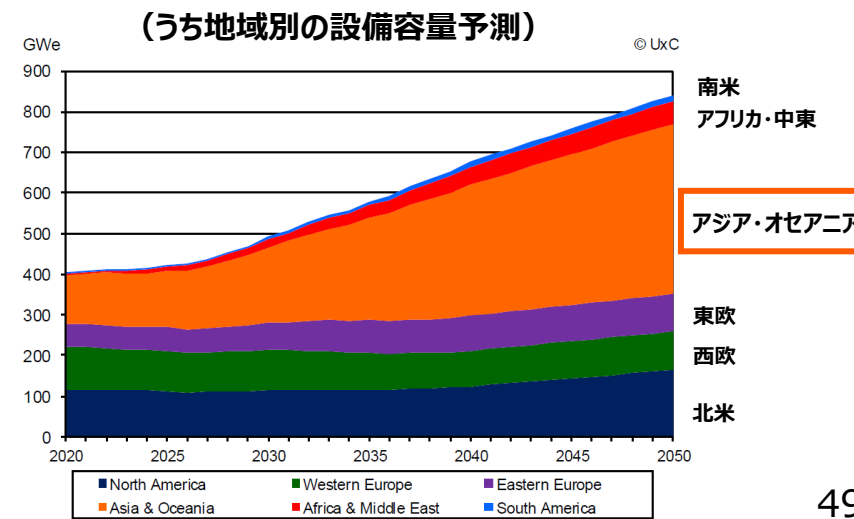


NEI (米国原子力エネルギー協会) **世界の原子力市場予測**
(※ IAEA「高予測」に相当)



NEI (米国原子力エネルギー協会) **による非従来型炉の市場規模予測**

「SMR、マイクロ炉、革新炉（高温ガス炉、溶融塩炉等）が、より市場に浸透していけば、これら非従来型の炉は、2050年の市場において、最大で25%を占める可能性がある」



(出所)IAEA「Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050」
NEI「Global Nuclear Market Assessment Based on IPCC Global Warming of 1.5°C Report」より資源エネルギー庁作成

4-2：世界各国のCN達成に向けた原子力推進の動き

- COP26における原子力関係イベントにおいて、関係機関の長や英国・仏国の担当閣僚から原子力の役割について力強い発言をするなど、原子力推進の流れ。

IEA（国際エネルギー機関）ファティ・ビロル事務局長



- 昨今のエネルギー市場におけるボラティリティによって、原子力の価値が再認識されている。
- 原子力は既に確立された、信頼できる、ローコストなゼロエミッション電源。
- 原子力の今後のタスクは①長期運転、②新設、③原子力イノベーション。
- 長期運転については、仏国、米国、日本において特に重要。然るべき安全対策と規制当局による援助が得られれば、運転延長した原子力発電は最も安価なクリーンエネルギー源のひとつ。

IAEA（国際原子力機関）グロッシ事務局長



- 化石燃料削減に貢献する観点で、原子力は重要な低炭素電源。
- SMR等の新技術も市場に参入しようとしており、ネットゼロに向けて重要な役割を担い続ける。
- 長期運転やSMRには新たな対応策が必要。監視・規制制度を有さない国との協働も進めたい。

英国 ハンズ閣外大臣



- 英国では運転中の13基のうち12基が今後10年程度で閉鎖予定。
- そのため、新しい原子力の戦略が必要。RABモデルという新たな資金調達モデルや革新炉支援のための1.2億ポンド(約180億円)の追加支援を決定。
- 原子力は再生可能エネルギーを補完する重要な役割。さらに、低炭素な水素生産にも資する熱供給源。

仏国 ル・ドリアン外務大臣



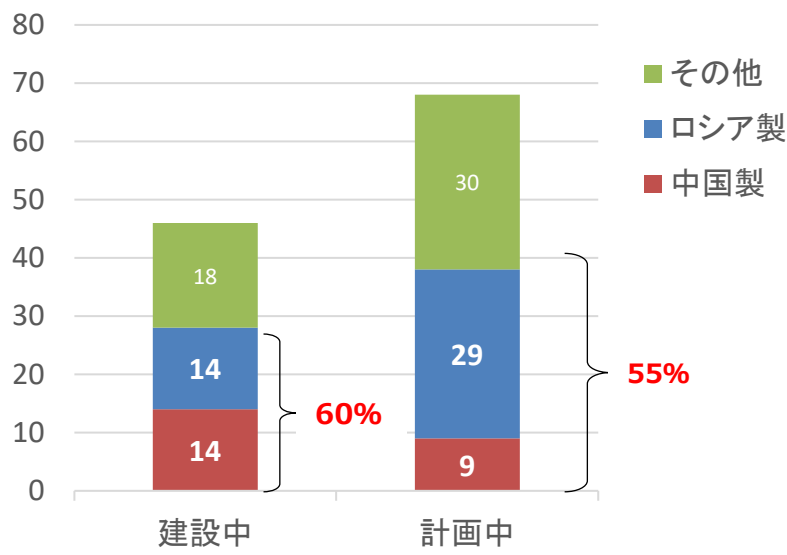
- 原子力は、低炭素で、信頼性が高く、柔軟性があり、持続的なエネルギー源。
- 仏国は、原子力をEUタクソミーに含めるよう提唱しつづけている。
- マクロン大統領は2030年までに原子力（SMR等）に対し10億ユーロを投資することを発表。
- 仏国は、低炭素エネルギーである原子力へのアクセスを希望するすべての国を支援する。

4-3. 中露：現行炉型（軽水炉）で世界市場を席巻

- 現行の炉型（軽水炉）による新設プロジェクトは、**中国・ロシアに集中**（いずれもPWR）。
- 中国は英国・南米等、ロシアは東欧や中東等に対し、**戦略的に輸出を働きかけ**。

<中国・ロシアの原子力発電所建設シェア>

- 現在、世界で建設中・計画中のPWRのうち、建設中については約**60%**、計画中のもので約**55%**が中露の炉型。



※「その他」には、米国AP1000やフランスEPR、韓国APR1400等が含まれる
（出所）世界の原子力発電開発の動向2021（2021年1月1日時点）
を基に資源エネルギー庁作成

<両国の具体的な輸出案件>

- 中国はパキスタン、英国、アルゼンチン、
ロシアは東欧・中東諸国、で具体的なプロジェクトを実施。
- 加えて、様々な国との協力覚書等も締結。

中国		ロシア	
パキスタン	建設中 (4基)	ベラルーシ	建設中 (1基)
英国	仏国と 建設中 (2基)	インド	建設中 (3基)
アルゼンチン	計画中	バングラデシュ ¹	建設中 (2基)
サウジアラビア	応札 可能性	トルコ	建設中 (3基)
		イラン	建設中 (1基)

4－3．中露：革新炉でも世界に先行

- 中国・ロシアは、革新炉においても、米英仏に先駆けて、開発・実証を推進中。

中国

<高速炉>

- ロシア技術の輸入により、実験炉を運転中。
- 現在は実証炉を建設中。2023年運転開始予定。
- 2030年代に商用炉導入予定。

<高温ガス炉>

- 2000年に研究炉が運転開始。
2021年9月、実証炉が初臨界。

<SMR>

- 2021年、国産PWR型SMR「玲龍1号」の実証炉を着工。
- 2026年運転開始予定。



HTR-PM外観

ロシア

<高速炉>

- 旧ソ連時代から豊富な運転経験を有する。
- 1980年、原型炉(BN-600)運転開始。
- 2015年、実証炉(BN-800)運転開始。
- 2035年頃に商用炉 (BN-1200)導入予定。

<SMR>

- 2020年、世界で初めて浮体式洋上SMRであるアカデミック・ロモノソフの商業運転を開始。
- 2021年、極東サハ自治共和国内に商用陸上SMRの建設許可を発給。2028年までの完工を目指す。



BN-800外観



アカデミック・ロモノソフ外観

4－4．米英：技術・人材が弱体化

- 米は、スリーマイル原子力発電所の事故以降新設が途絶え、**主要資機材の製造能力を喪失するなど技術・人材は弱体化**。その後、**35年ぶりに新規着工した発電所は、大幅な遅延・コスト増に直面**。
- 英は、90年代以降、天然ガス火力の依存度を高める一方、原子力発電所の新設を停止。国内の**原子力産業のサプライチェーンを喪失**。

米国

- 建設中：2基（AP1000）※**35年ぶり**
- 当初は建設計画4基 ⇒ **2基計画中止**
- 運転開始予定 **2016年** ⇒ **2022年以降**
 - 建設作業に係るノウハウ・人材を喪失していたこと等により運転開始は5年以上遅延・コスト増に直面。
 - 米国エネルギー省は、米国企業には大型軽水炉の**主要資機材（原子炉容器、蒸気発生器等）**を製造する能力はないと評価。

英国

- 建設中：2基（EPR）
 - 運転開始予定 **2026年以降**
 - 国内のサプライチェーンを喪失（**仏のサプライチェーンから調達**）。
 - 計画中の別案件では**中国炉型の導入を予定**。**資金調達も中国からの出資が太宗を占める**。
- ※別プロジェクトで、日立（ホライズン社）がABWR建設を計画するも、**2020年に撤退**を表明。

4-4. 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

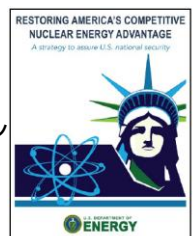
- 大統領覚書に基づき核燃料WGが作成。
- 国家安全保障の観点から、国内燃料サイクルの支援、革新炉開発の推進等を通じて、米国原子力産業の再興を勧告。

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547億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

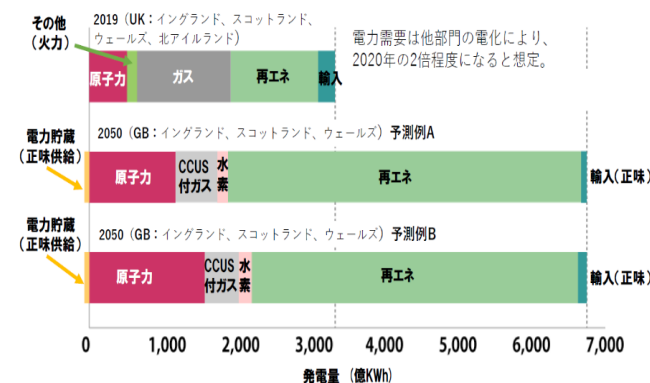
- 2050年までに電力倍増の見込みから、原子力を重視し、大型炉、SMR/AMR、核融合を支援。

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をできるよう、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

4 - 4. 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

◆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)

大型軽水炉支援

◆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

- 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等のサイト選定に係る財政・技術支援
- 核融合の研究開発(法案未成立)
～2026年 \$9億(約900億円)

研究開発支援

◆研究開発

- 「先進原子炉基金」を設立
(2020年12月)
£ 3.85億(約577億円)
- 「未来の原子力実現基金」を設立
(2021年10月)
£ 1.2億(約180億円)

4－5．仏韓：産業基盤を立て直し、海外にも展開

- 仏は、原子炉メーカー**フラマトム社の経営体制を一新させ、技術・人材の立て直し**に取り組み。直近では、2022年2月にマクロン大統領が「原子力の復活」を宣言。
- 韓国は、文政権下において国内脱原発方針を表明する一方、**国内4基の新設を継続**しつつ、海外プロジェクトにも積極的に取り組み、**国内の産業基盤を温存**。

仏国

- 建設中：1基（EPR）
- 運転開始予定 **2023年以降**
 - 英国やフィンランド等、海外で新規建設を展開し、国内産業基盤のつなぎとめ、国内建設も継続。
- マクロン大統領が**国内での新設を表明**（2022年2月）
 - 「**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する**」

韓国

- 建設中：4基（APR1400）※米国から技術導入
- 運転開始予定 **2022年から24年まで順次**
 - 脱原発方針の**文政権下でも、進行中の新規建設は続行**。22年3月の大統領選に勝利した**尹候補**は「原子力発電比率の維持」を公約
- 原発輸出に積極的
 - **UAEでバラカ原発PJを受注し、2021年にうち1基が営業運転を開始**
 - **エジプトで、ロシア主体PJのタービン系統に参画**

4 – 5. 仏韓：米英同様、支援を具体化

- 仏韓も具体的な原子力支援を表明。
- 仏韓では国営企業が、新規建設で産業基盤を維持しつつ、将来に向けた革新炉開発も推進。

	 仏国	 韓国
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。	◆海外新設支援 - 輸出推進のため「原子力輸出諮問委員会」を2021年に設置。 - 中小企業の資機材輸出のためのポータルサイト立ち上げ ◆国内建設（4基建設中） - 政府および政府系金融機関が電力公社に50パーセント超の株式を保有し、下支え。
研究開発支援	◆研究開発 SMRを含むプロジェクトに€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。	◆ 研究開発 SMRを含むプロジェクトに2兆7000億W（約2700億円）／5年間 ※詳細な内訳は不明。

※韓国では新大統領が5月に就任予定のため、今後変更可能性あり。

4-5. 仏韓：サプライチェーン支援策

- 仏は2020年9月に、総額4.7億ユーロを国内原子力サプライチェーンに投資する方針を発表。
- 韓国では2021年3月に、脱原発方針の中で、国内での需要の先細りを危惧し、韓国産業通商資源部（MOTIE）は、国内の原子力サプライヤの原子力機器輸出を支援する枠組みを設立。

仏国の原子力産業界の動向

➤ フランス復興計画（4.7億ユーロ目標）

フランス政府は、2020年9月に、原子力産業へ総額4.7億ユーロの支援を表明。

既に、原子力産業のデジタル化や原子力技能人材の強化等の事業に1.1億ユーロの支援を決定。

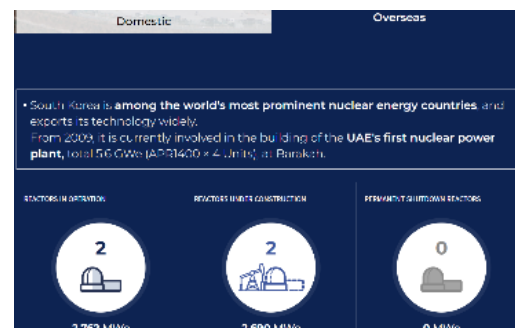
さらに2021年10月には、フランス政府とEDFが半額出資し、「フランス原子力基金」（総額2億ユーロ）を設立。2022年末までにエンジニアリングや機械加工等の重要なノウハウを保持する原子力サプライヤ（未定）に対し、当該基金から投資予定。

➤ EDFによるGE原子力タービン部門買収

EDFは、2022年2月にGEの原子力タービン事業（旧アルストム）買収を決定。仏国内で建設を予定しているEPR2での採用を想定。

韓国の原子力機器輸出支援策

- 海外17か国について、原子力プロジェクトの状況や入札情報等をタイムリーに紹介。
- 国内サプライヤの技術力・実績を発信するポータルサイトを開設し、案件マッチングを支援。
- 2021年7月には国内企業が、300万ドル規模のトルコ・アックユサイトのタービン用振動監視システム供給事業を受注。



輸出支援ポータルサイトの実物例

Key Figures

韓国原子力産業の国内外での実績を紹介

Supplier Directory

会員の韓国企業116社を「機械」「電気」「I&C」「化学」「エンジニアリング」「サービス・保守」の分野ごとに紹介し、製品・サービス別にサプライヤーを検索可能となっている。

4 - 6. 自前のサプライチェーンに乏しい米英は、将来を見越したSMR等について、日・韓との協力を志向

- 米英仏は、**SMRや高温ガス炉等の研究開発**に注力。中長期を見越した**技術の主導権獲得を志向**。
- ただし、足下の**国内の技術・人材が乏しい**ため、開発に向けては、**日本・韓国との協力**を志向。

 米国	 英国	 フランス
◆ 軽水炉SMR \$530M (約530億円) ※2013年以降 ⇒追加支援 ※2020年10月発表 <u>\$1.355B (約1,355億円) / 10年間</u> ◆ 非軽水炉SMR (高速炉・高温ガス炉) \$160M (約160億円) ※初期支援 <u>\$3.2B (約3,200億円) / 今後6年間</u>	◆ 軽水炉SMR ロールスロイスSMRに <u>£ 210M + £ 250Mを超える民間資金</u> ◆ 高温ガス炉 <u>£ 最大170M(約260億円)</u> 「未来の原子力実現基金」 <u>£ 120Mポンド (約180億円)</u>	◆ SMR (詳細不明) <u>€1B (約1,300億円)</u> ※2021年10月発表「フランス2030」にて言及。 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」と言及。
軽水炉SMR : NuScale (ニュースケール) 社 • 2029年の初号機運転開始を目指す • <u>2021年、日本の日揮・IHIが出資を表明。</u> 韓国勢も出資	軽水炉SMR : UK-SMR (ロールスロイス) • <u>Rolls-Royce、英国国研等が開発</u> • 2029年の運転開始を目指す	軽水炉SMR : Nuward (仏原子力庁等) • <u>CEA (仏原子力庁) 、EDF、Technic Atome等のコンソーシアムによって開発</u> • 参画する原子力メーカー・Framatome社は <u>三菱重工業と提携関係にある</u> (三菱重工業から同社に19.5%を出資)
高速炉 : Natrium (テラパワー) • 2028年の実証炉運転開始を目指す • <u>2022年、開発主体のTerra Power社と、JAEA・三菱重工・MFBRが、今後の協力に向けた覚書 (MOU)を締結</u>	高温ガス炉 (政府プロジェクト) • ビジネスエネルギー産業戦略省が、産業用の熱利用 (水素製造) に向けた実証を検討中。 ※JAEAが世界最先端技術を有しており (原型炉HTTR)、英国政府も関心を示している	

【参考】高速炉：ビル・ゲイツ氏のテラパワー社と協力覚書締結

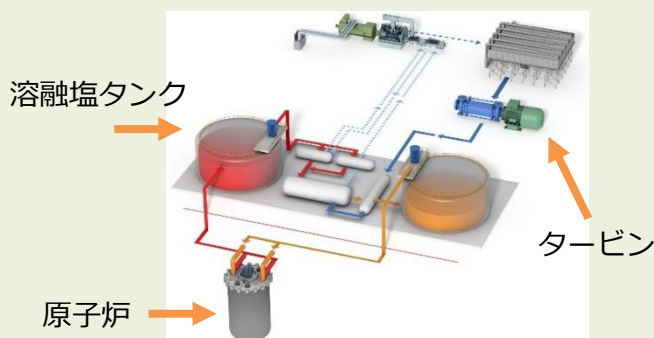
- テラパワー社は**2028年「Natrium炉」運開**目指し、米エネルギー省補助金（最大2,000億円）獲得。
- 日本に対しては、「**常陽」「もんじゅ」の経験**等に期待。**JAEA保有の試験設備**にも関心。
- **本年1月26日にテラパワー・日本原子力開発機構（JAEA）・三菱重工業・MFBR間で覚書を締結**。
- 本覚書に基づき、**2022年春頃の本契約**に向け、議論を継続していく。

※MFBR：三菱FBRシステムズ株式会社

<特徴>

- ・小型ナトリウム冷却高速炉(34.5万kW)
- ・米西部ワイオミング州に立地予定。
（**石炭火力の代替**を想定）
- ・ナトリウムは熱を伝えやすく、全電源喪失時にも**自然循環で除熱**可能。
- ・蓄熱システムを組み合わせ、**負荷追従**が可能（再エネとの親和性あり）。

システム概念図



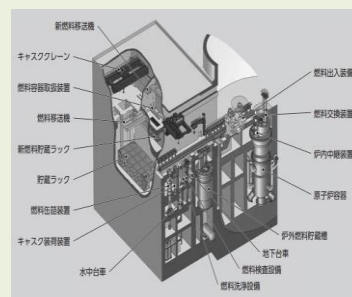
<協力の可能性のある分野>

- ・「常陽」「もんじゅ」等で、日本が保有する**高速炉のノウハウや試験設備**(※)
- (※)JAEA保有の大型ナトリウム試験設備（AtheNa）等
ア テ ナ
- ・日本企業が持つ**機器設計・製造技術**



「AtheNa」

世界でも希な大型設備。
ナトリウムの挙動を評価可能。



「燃料取扱設備」

コンパクトで経済的な燃料取扱設備等、日本企業の製造技術に期待。

<ビル・ゲイツ氏の発言>

- ・原子力は、**気候変動対策において理想的なエネルギー**。
- ・事故のリスクは、**イノベーションによって解決可能**。
- ・テラパワーは**第4世代原子炉を開発し、安全性は非常に高い。世間の認識を変える**には劇的に違うものを出す必要。
- ・「**Natrium**」は**エネルギー産業の「ゲームチェンジャー」**になる。

※原子力エネルギー会議での講演及びワイオミング州メディアへのビデオメッセージ（2021年6月）より引用



【参考】SMR：NuScale社 (NuScale Power Module) プロジェクトへの参画を目指す

- 2007年にSMR開発を目的に設立された米国企業。米国エネルギー省（DOE）の支援で開発を進め、**2029年に初号機**をアイダホ国立研究所内で運転開始予定。

<特徴>

- ・ PWRタイプ。1モジュールの出力は5～7.7万kWで、最大12モジュールを設置可能（最大60～92万kW）。
- ・ 蒸気発生器と圧力容器の一体化により、小型かつシンプルな設計で安全性を向上。自然循環により、冷却ポンプ、外部電源なしで炉心を冷却可能。
- ・ モジュール工法で、工期短縮、初期投資抑制の可能性。



アイダホ国立研究所内にて建設中

<国内企業の関わり>

- ・ 2021年、日揮・IHIが出資を発表。
日揮：4,000万ドル
IHI：非公表
- ・ 経産省予算にて、日揮・IHIが、モジュール・メンテナンス機器等の課題についての実証を目指す。

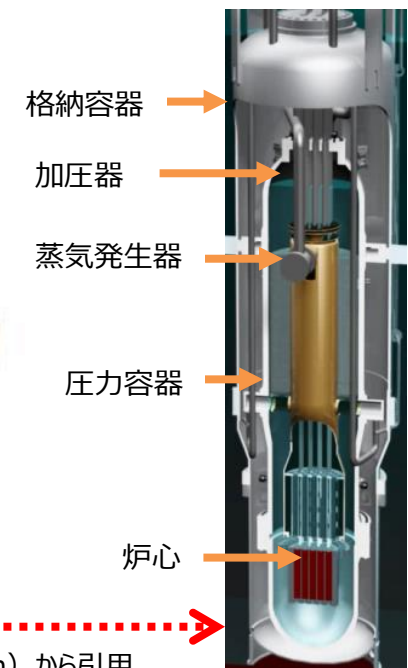


NuScale SMR 概念図

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

<米国政府の予算措置>

- ・ 2013年以降、NuScaleに対し、**530億円の開発支援**。
- ・ 2020年、今後10年間で運営主体に対し、13.55億ドルの追加支援を行うことを発表。

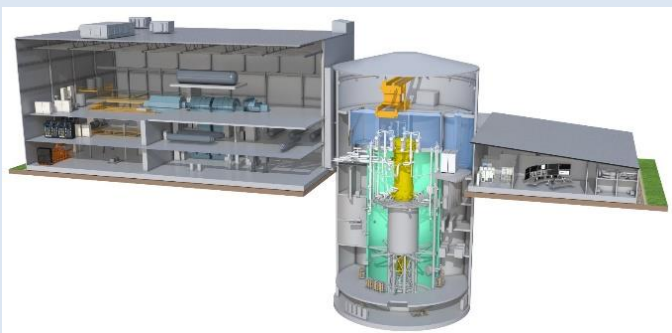


【参考】SMR：GE Hitachi社（BWRX-300）と日立GE社が共同開発

- 米GE Hitachi社と日立GE社が共同開発する電気出力30万kW級のBWR型小型モジュール炉。
- 2021年12月2日、カナダの電力会社OPG社が最速2028年運転開始を目指すプロジェクトに、米GE Hitachi社のBWRX-300を選定。
- 今後、日本国内でも、日立GE社の設備を活用した要素技術の実証を実施予定。

<特徴>

- ・ BWRタイプ。電気出力30万kW。
- ・ 自然循環の利用によりポンプを排除、受動的冷却システムにより電源・注水設備・運転員操作なしで7日間冷却可能。
- ・ 圧力容器に隔離弁を直付けすることで、冷却材喪失事故の発生確率を削減。



BWRX-300概略図

<カナダプロジェクトの概要>

- ・ オンタリオ州（人口最大州・首都オタワが位置）にて、州営オンタリオ電力がSMR建設に向け、炉型選定を実施。
- ・ 昨年12月に、米GE Hitachi社のBWR型軽水炉のSMRである「BWRX-300」が正式に採択。
- ・ 今後、2028年までの初号機建設を目指すためにサプライチェーン構築等が進められる見通し。



BWRX-300完成イメージ図

<国内企業の関わり>

- ・ 経産省予算にて、日立GEの実温・実圧で試験できる設備を活用し、要素技術の実証に向けて研究開発を実施中。

ハッスル
日立多目的蒸気源試験装置(HUSTLE)
実温・実圧にて安全性や性能を確認できる試験設備



【参考】高温ガス炉：英国、ポーランドとの国際協力を強化

● 英国は2030年代初頭の実証炉建設を目指し、日米加との国際連携を追求。

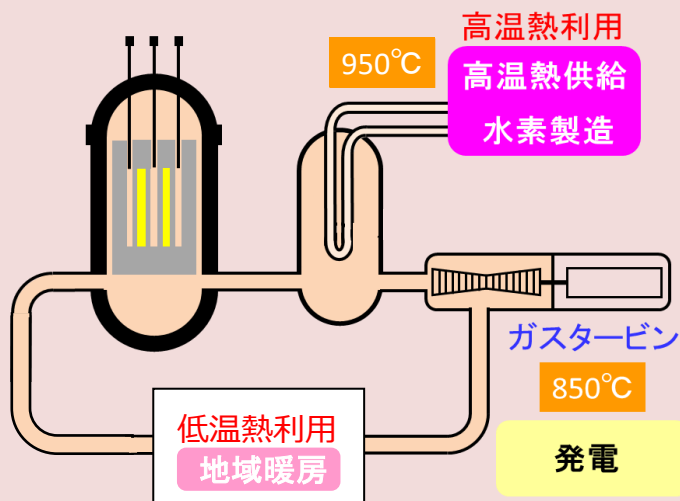
※2020年、日本原子力開発機構(JAEA)と英国国立原子力研究所(NNL)、原子力規制局(ONR)との間で、研究開発協力や情報交換のための覚書を締結。

● ポーランドでは、実験炉の建設を目指し、2021年から約18億円の予算措置。ポーランド国家原子力研究センター(NCBJ)からJAEAに協力依頼。

＜特徴＞

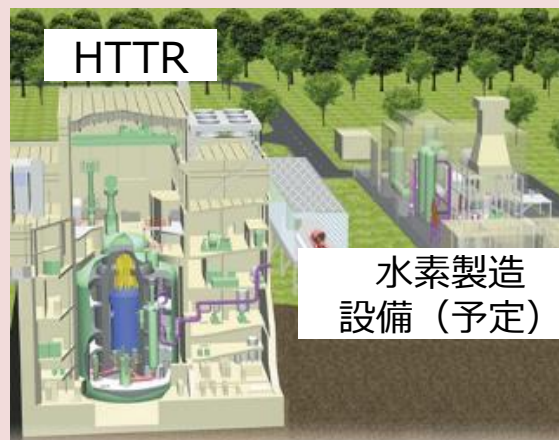
- ・ 高温で安定なヘリウム冷却材
- ・ 高温耐性で炉心溶融なし
- ・ 950℃の熱の利用が可能(水素製造等)

システム概念図



＜協力の可能性のある分野＞

- ・ 試験研究炉「HTTR」の技術
- ※世界最高温度950℃の出口温度達成
- ・ 950℃の高温を利用した大規模・安定のカーボンフリー水素製造技術



＜英国の動向＞

革新実証炉プログラムの対象として、高温ガス炉を選定したことを公表できることを嬉しく思う。※Nuclear2021（2021年12月）での発言



ハンズ ビジネス・エネルギー・産業戦略省(BEIS)
エネルギー担当大臣

高温ガス炉が高温熱、水素等を供給することで、脱炭素化に役立つ可能性は非常に大きい。
※WNN HPより引用



ハワース 国立原子力研究所(NNL)CEO

4-7. 米英は革新炉開発に伴う規制・法律も整備【再掲】

● 米英では、原子力技術リーダーシップ再興を掲げ、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)

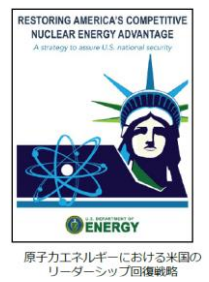
- 米国エネルギー省(DOE)に「国立原子炉イノベーションセンター」を創設し、民間の革新炉設計概念を試験、実証することを求める法案。

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スリ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。

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547億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

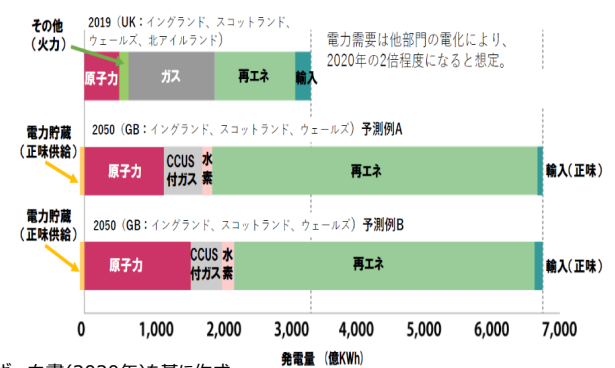
- 2050年までに電力倍増の見込みから、原子力を重視し、大型炉、SMR/AMR、核融合を支援。

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をできるよう、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

4 – 8. 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、技術成熟度や負荷追従、サプライチェーン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
- ・ レジリエンス、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の体制整備
- ・ 規制当局との事前協議・調整の計画
- ・ 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~

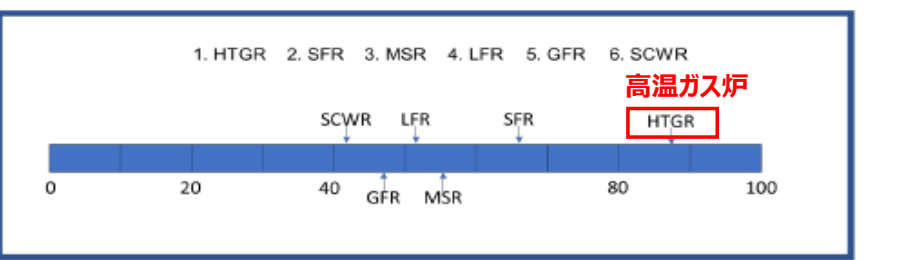
英国 NIROによる評価 (2021年)

※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：

- ・ 技術成熟度が高い
- ・ 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)

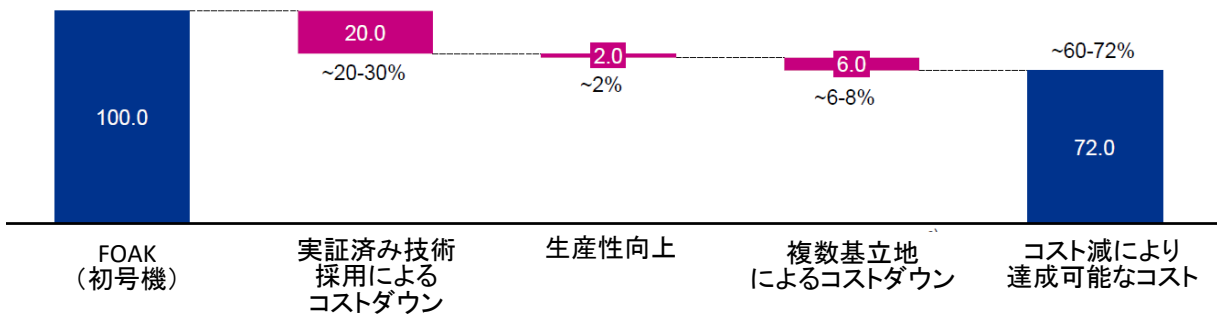
	高温ガス炉	ナトリウム冷却高速炉	超臨界圧軽水冷却炉
技術成熟度	◎	◎	△
熱利用	◎	○	○
安全性	◎	○	△
国内産業の蓄積	○	○	△
国際協力	◎	○	△



4 – 8. オランダは市場調査で実証済みの大型軽水炉を選好

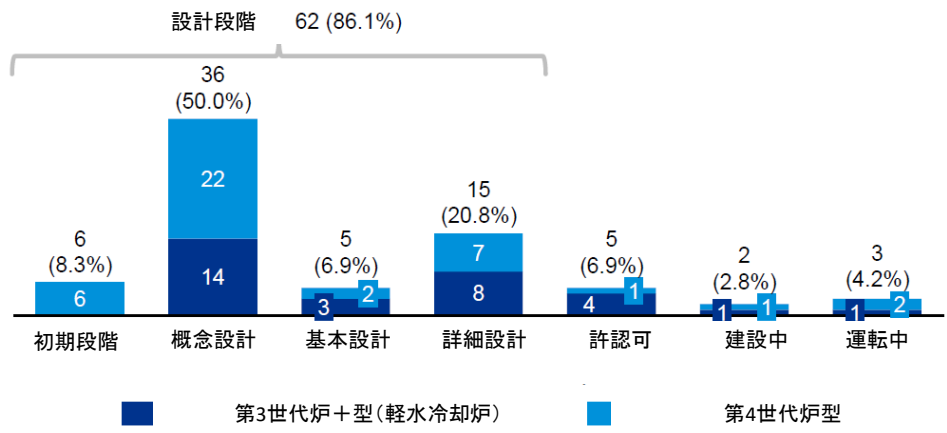
- オランダは原子力発電に市場が投資する条件を調査し、2021年に議会に報告。
- コスト超過・遅延の課題を最小化するため、実証済みで、安全かつ既に活用が進む大型軽水炉（第3世代炉+）を選択すべきとの市場関係者で幅広いコンセンサス。

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). KMPG analysis.

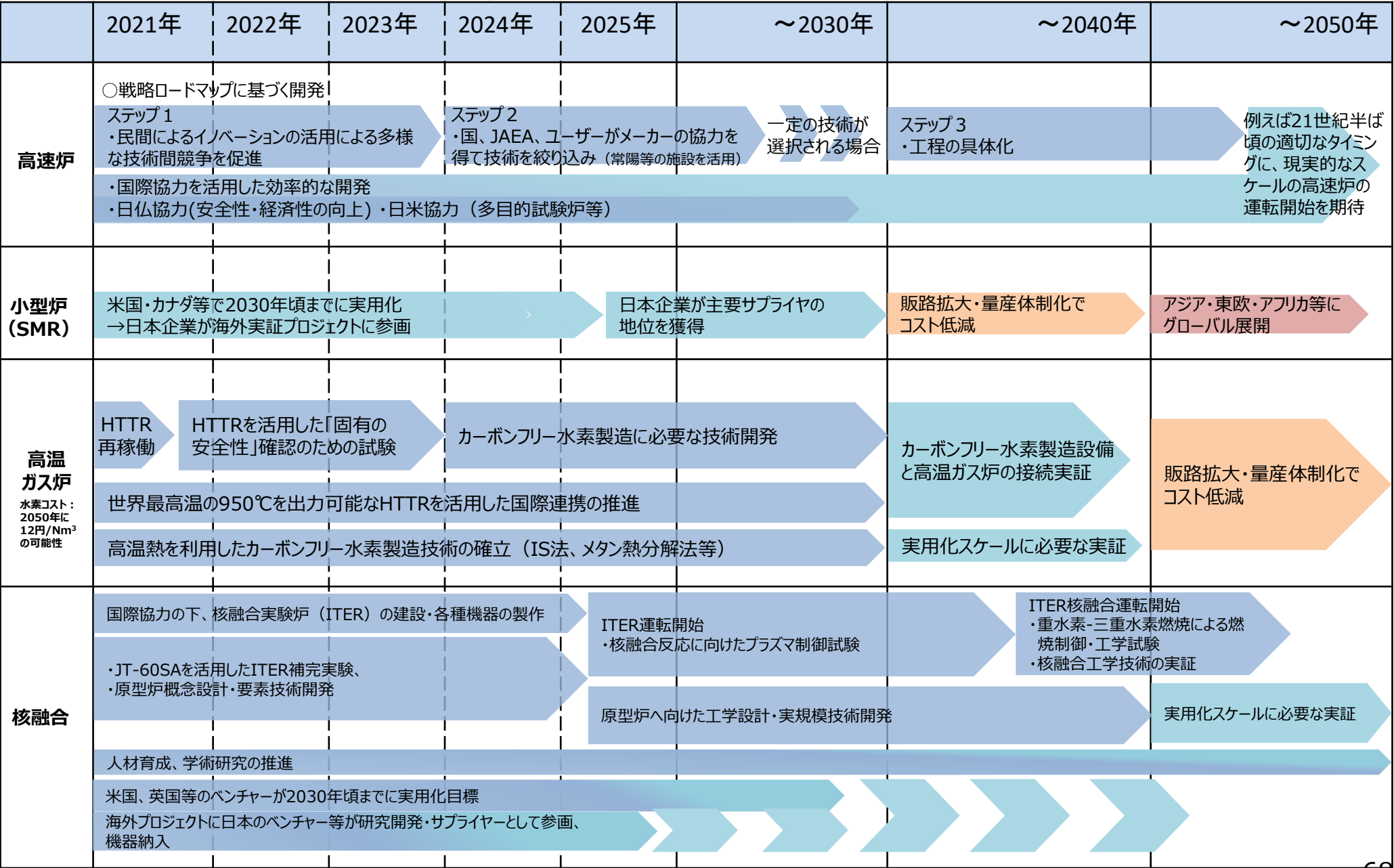
4－9．革新原子力の研究開発に向けて

● **原子力は、実用段階にある脱炭素の選択肢**。可能な限り依存度を低減しつつ、国内での着実な安全最優先の再稼働の進展とともに、海外（米・英・加等）で進む次世代革新炉開発に、**高い製造能力を持つ日本企業も連携して参画**し、多様な原子力技術のイノベーションを加速していく。（2021年6月「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」）

	現状と課題	今後の取組
高速炉	資源循環性の向上が必要 - 原子力の持続的な利用には、放射性廃棄物の減容化・有害度低減、中長期的には資源の有効利用に向けた技術開発を進めることが重要。 世界各国で高速炉の開発が進展 - ロシアは実証炉を運転開始済みで、中国も実証炉建設中。 - 北米でも政府支援を得て、ベンチャー企業等による高速炉開発が加速。	国際連携を活用し開発を着実に推進 「戦略ロードマップ」に基づき、例えば今世紀半ば頃の適切なタイミングに、現実的なスケールの高速炉の運転開始を期待。それに向けて、2023年度末頃までは多様な技術間競争を促進。<u>日仏、日米協力</u>で効率的な開発を推進。 原子力研究開発機構が保有するデータ・施設を最大限活用 - 建設・運転・保守経験で培われたデータ、施設を最大限活用。「常陽」の再稼働に向けた準備を速やかに進める。
小型炉 (SMR)	各種要素技術の開発が必要 - 海外での実証プロジェクトと連携した基本設計・開発。 - 日本企業独自で多様なニーズを見据えた小型炉を自主開発。 革新的技術の安全性や経済性を検証 - 安全性は、米・英・加で許認可取得に向けたプロセスが進行中。 - 経済性は、量産化で追求。	国際連携プロジェクトへの参画 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日本企業の取組に対し、安全性・経済性・サプライチェーン構築・規制対応を念頭に置きつつ支援を行う。海外で先行する規制策定を踏まえ、技術開発・実証に参画。 - 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。<u>主要サプライヤーの地位を獲得</u>。2020年代末の海外でのSMR初号機開発後、海外連携によりグローバル展開と量産体制を確立。
高温ガス炉	開発・運転ノウハウの蓄積と実用化スケールへの拡張が必要 - 高温工学試験研究炉（HTTR）で950℃（世界最高水準）・50日間の高温連続運転を達成（JAEA）。安全性を実証。 - 日本企業が水素製造・発電コジェネプラント、蓄熱可能な発電用高温ガス炉などを開発中。 - 高温ガス炉と水素製造施設との接続技術の確立が必要。	HTTRを活用した試験・実証等 - HTTRを活用し、安全性の国際実証に加え、2030年までに大量かつ安価なカーボンフリー水素製造に必要な技術開発を支援。 - 安全性・経済性・サプライチェーン構築・規制対応を念頭に置いた開発支援を行いながら、技術開発・実証に参画。<u>海外の先行プロジェクトの状況を踏まえ、海外共同プロジェクトを組成していく。</u> <u>日本の規格基準普及</u>に向けた他国関連機関との協力を推進。
核融合	国内施設を通じた研究開発や核融合実験炉（ITER）建設に向けた製造・試験、各種要素技術の開発が必要 - プラズマ制御技術の高度化に向けた試験実施。 - ITER本体の組立・据付開始、コイル等主要機器を日本から納入。 - 安全で安定稼働できる核融合原型炉の設計。	ITER計画等の着実な推進 - ITER計画等の国際共同技術開発や将来的な原型炉建設計画に向けた取組を通じて主要機器の実証と、出力の長時間維持技術を確立。日本の核融合原型炉の建設計画に反映。2030年頃の実用化を目指す米・英のベンチャーと日本のベンチャー・メーカー等が連携を加速。 - 核融合炉の高温熱を活用したカーボンフリーな水素製造技術の開発を推進。

研究開発に向けて

●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



4－10．日本国内の原子力技術開発支援

NEXIP : Nuclear Energy × Innovation Promotion

技術開発支援、研究開発基盤の供用、人材育成・産業基盤強化を通じて原子力イノベーションを創出



技術開発支援

- 安全性向上技術開発予算：**23.3億円** ⇒ 東電福島事故の教訓を踏まえ安全性向上を追求。
- 高速炉開発予算：**43.5億円** ⇒ 「戦略ロードマップ」に基づき開発を推進。
- 革新技术開発予算：**12.0億円** ⇒ 多様な革新的技術のF/S（フェジビリティ・ステイ）を実施。
- 水素製造技術実証：**7.0億円（新規）** ⇒ 原子力の超高温を活用した水素製造要素技術開発。
- イノベーション支援：**20.0億円（R3補正）** ⇒ 軽水炉の安全技術開発や革新炉の技術開発を実施。

研究開発基盤の供用

- 民間企業等が実施する開発に関する課題のうち、複数の民間企業等に共通する基盤的な課題について、JAEAが開発を実施。
- 産業界・大学・海外を繋ぐハブへ。

人材育成・産業基盤強化

- 産業基盤強化事業：**12.4億円** ⇒ 原子力利用を支えるサプライチェーンを強化。
原子力安全の最前線を担う人材の育成。

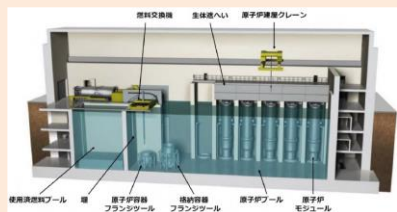
【参考】海外連携、国内開発等で推進するSMR開発

- **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

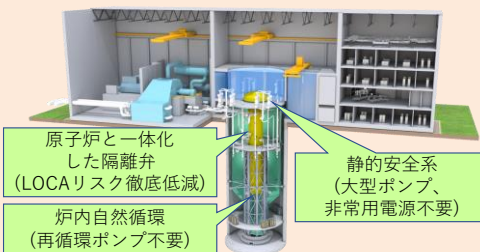
- PWRタイプのSMR。複数のモジュールをプール内に設置し、炉心冷却が可能。
- 1モジュールの出力は7.7万kWで、最大12個のモジュールを設置可能(最大92万kW)。
- 2029年に米国で実証炉運開を目指すNuScale社に、2021年、日揮・IHIが出資を発表。
- モジュール・メンテナンス機器等の課題についてについて日米協力を通じて実証を目指す。



BWRX-300

日立GEニュークリア・エナジー株式会社(日立GE)

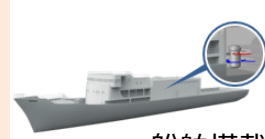
- 出力30万kWのBWRタイプのSMR。圧力容器と一体化した隔離弁を採用した原子炉とすることで、配管破断による冷却材喪失事故を排除する設計。NRCからも認可。
- 米GE Hitachi社と日立GE社が共同開発し、北米での実証を目指す。
- 日立GEの実温・実圧で試験できる設備を活用し、要素技術を実証を予定。



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。



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。



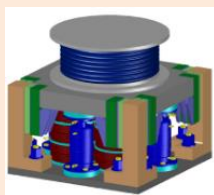
【参考】国際協力を活用した高速炉開発

- 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



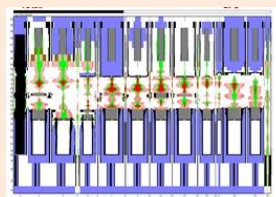
日本型タンク型炉



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)



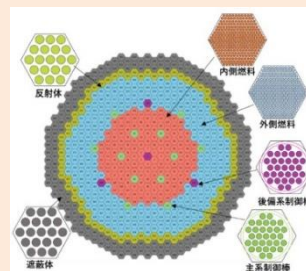
シビアアクシデント評価



PLANDTL試験装置
(共同試験実施)

- 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。

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)

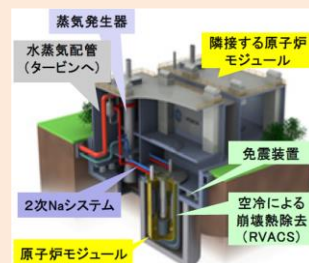
三菱重工業株式会社、三菱FBRシステムズ株式会社



- 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)

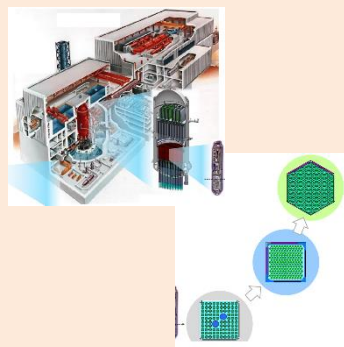
日立GEニュークリア・エナジー株式会社 (日立GE)



- 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。

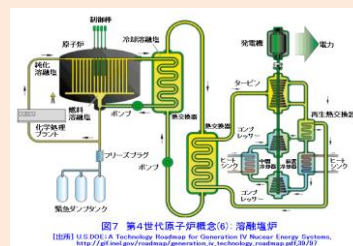
軽水冷却高速炉

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

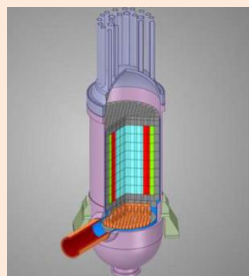
- NEXIPにおいて、水素製造、蓄熱のアイデアで柔軟性を有する高温ガス炉 2 炉型を支援。
- 日本発の核融合ベンチャー企業も登場。海外で進む実験炉プロジェクト市場へ参入中。

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

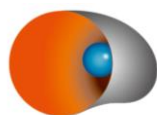
- 熱出力600MWt/ユニットで、4ユニット合わせて電気出力約100万kWを達成する高温ガス炉。
- 発電用を念頭とし、熔融塩蓄熱システム併設により負荷追従が可能。
- 高温水蒸気電解との接続による水素製造オプション
- HTTR建設主要企業としての経験。



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

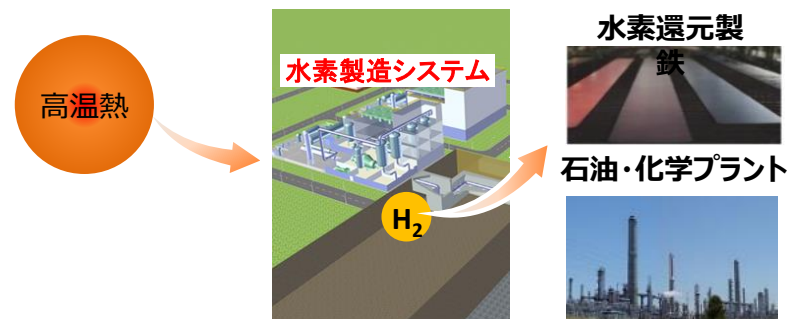
- 2025年頃の核融合エネルギー発生を目指す米・英・加の核融合ベンチャーへの機器納入・開発受託を通じて、核融合市場に参入。
- 核融合向けの部材は高度な原子力技術が必要。製造する国内サプライヤの多くは軽水炉向けのサプライヤと共通しており、日本の優れた産業基盤を活かすイノベーション、人材育成、製品開発、海外市場開拓が可能。

【参考】高温ガス炉等の超高温を利用した水素大量製造

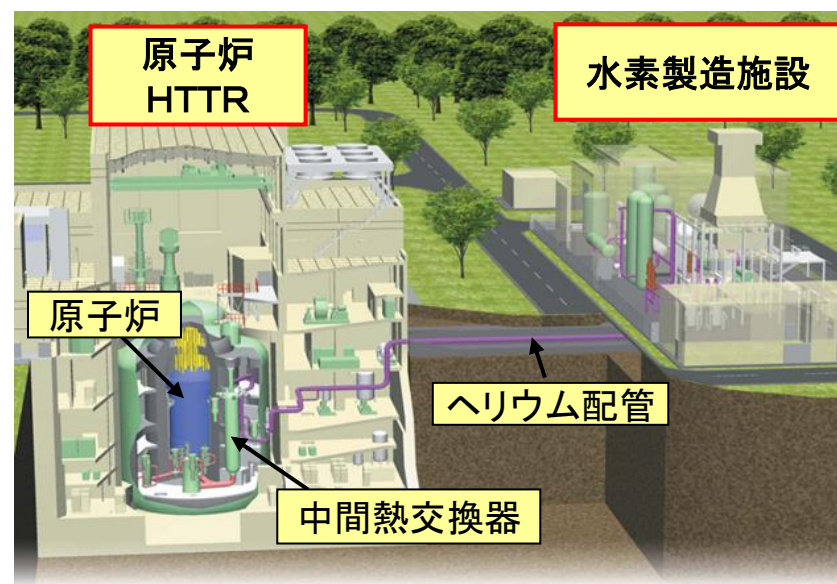
- 令和4年度より、日本原子力研究開発機構（JAEA）所有の高温ガス炉試験炉（HTTR）の超高温（950℃）を用いた水素製造技術の実証を開始。

超高温を利用した水素大量製造技術実証

- 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**し、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）

4－11．日本における課題

	日本の課題	(参考) 米英仏の例
予算措置	年間百億円程度の予算 にて技術開発を実施。今後更なる拡充が必要となる可能性。	数千億円規模の 大型予算措置 にて、軽水炉や革新炉の開発を支援。
非予算措置 (規制・法律)	革新炉開発の予見性を高める 規制や法律 が、今後課題となる可能性。	革新炉の審査プロセス策定を義務付ける法律や開発の予見性を高める規制審査 が存在。
開発・実装の 工程表	「グリーン成長戦略」が存在するが、実機を建設する機会については、 国際プロジェクトに依存 。今後、様々な機会が必要となる可能性。	市場の予見性を高める戦略があり、国内に2030年前後の運転開始 を目指したプロジェクトが多数存在。 ※例：米NuScale社SMR(2029年)、 米テラパワー社高速炉(2028年)、 英ロールスロイス社SMR(2029年)、 仏EPR2(2035年)等

1. 第24回小委員会の議論まとめ
2. カーボンニュートラル実現に向けた社会全体の変革
3. 革新炉による貢献の可能性
4. 革新炉の現状と国内の課題
- 5. 原子力産業サプライチェーンの現状と課題**

5－1．原子力産業における環境の変化①

- 国内では、進行・計画中の新設プロジェクトが震災で中断中。
 - 海外では、いくつかの輸出案件が計画されていたが、いずれも中止・終了。
- ⇒ 安全対策投資も土木投資等に偏る中、中核のサプライチェーンは売上途絶。

震災前に国内で計画が進んでいたプロジェクト

事業者名	発電所名	設置許可	着工
中国電力	島根 ③	H17.4 許可	H17.12（中断中）
電源開発	大間 ①	H20.4 許可	H20.5（中断中）
東京電力	東通 ①	H22.12 許可	H23.1（中断中）
	東通 ②	－	－
東北電力	東通 ②	－	－
	浪江・小高①	－	計画断念
日本原電	敦賀 ③	H16.3 申請	－
	敦賀 ④		
中国電力	上関 ①	H21.12 申請	－
	上関 ②	－	－
九州電力	川内 ③	H23.1 申請	－
中部電力	浜岡 ⑥	－	－
関西電力	美浜 ④	－	－

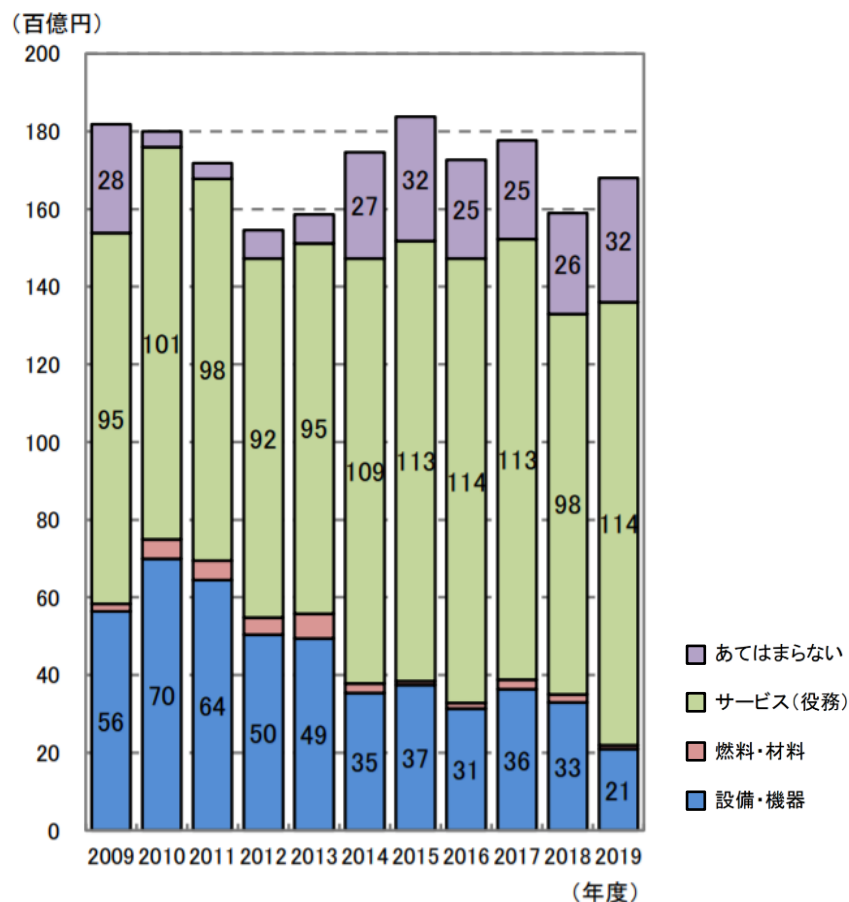
計画されていた原発輸出プロジェクト案件の例

英国	➢ <u>日立GE</u>は、英国内で建設計画を有するホライズン社を買収。2020年代の運転開始を目指していた。（2012年） ➢ しかし、新型コロナ感染拡大等により投資環境の厳しさが増したこと等から<u>プロジェクト撤退</u>を発表。（2020年9月）
トルコ	➢ 日・トルコ政府間協定で、建設が計画されているサイトにおける<u>日本の優先交渉権に合意</u>。（2013年） ➢ <u>政府間協定を終了</u>。（2021年6月）
ベトナム	➢ 建設予定の2サイトにおいて、<u>日・露をパートナーに選定</u>。 ➢ しかし、国内財政事情悪化により<u>計画中止を国会で決議</u>。 ➢ 他方で、計画再開時には<u>日・露を優先的パートナー</u>とすることを表明。（2016年）

5－1．原子力産業における環境の変化②

- サプライヤは、現在は安全対策工事で事業を維持しているが、将来の事業見通しが立たない状況。
- 要素技術を持つ中核サプライヤ等の撤退が相次いでおり、サプライチェーンの劣化が懸念される。
- 国内で建設や製造の現場の空白期間が続くことによる技術・人材の維持は喫緊の課題。

原子力産業界の売り上げの推移



【出典】原子力産業協会 原子力発電に係る産業動向調査2020報告書

原子力事業からの撤退

<大手企業>

- ・ 川崎重工業（廃止措置、発電所の保守管理等）
- ・ 住友金属工業、古河電気工業（燃料製造加工）
- ・ 明電舎（DCモータ）

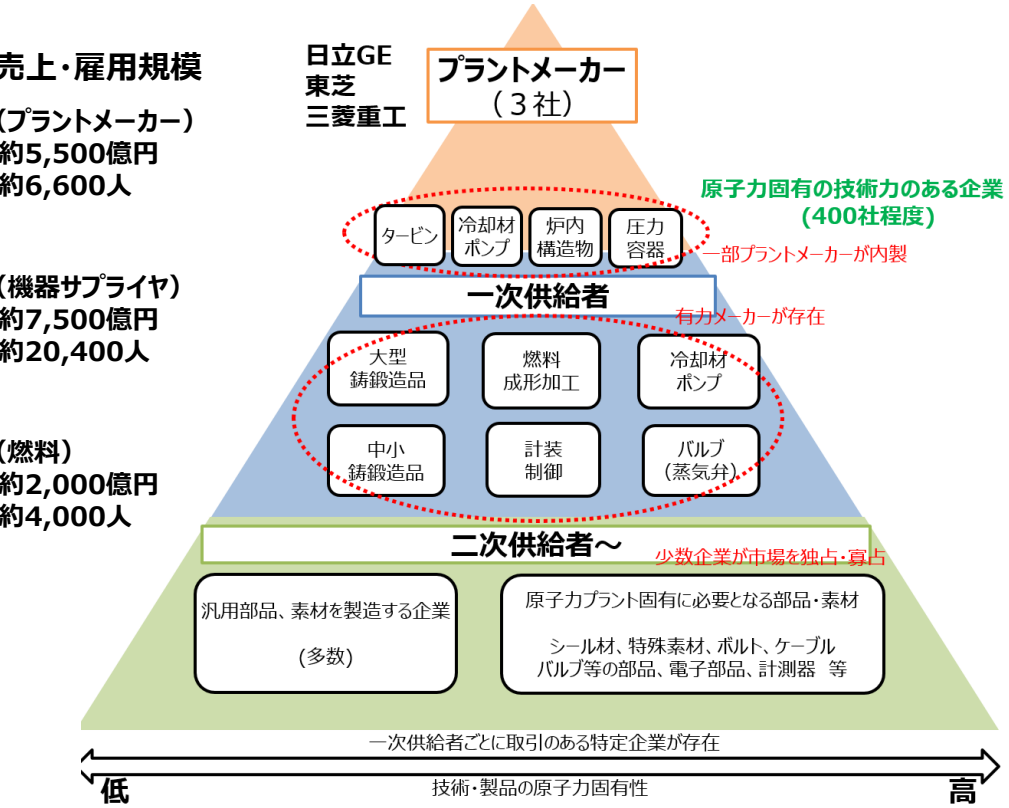
<要素技術を持つ中核サプライヤ>

- ・ ジルコプロダクツ（燃料部材）
2017年廃業
⇒ BWR用燃料被覆管部材は国内で調達できない状況に
- ・ 日本鑄鍛鋼（圧力容器、タービン等部材）
2020年廃業
⇒ 原子炉圧力容器部材の供給企業は国内残り1社に

【参考】原子力サプライチェーンの現状

- 原子力産業は多くのサプライヤや建設事業者等に支えられており、プラント・機器の製造・メンテナンスだけでも年間1兆円規模の巨大サプライチェーンを構築。素材及び製造技術に原子力固有の特殊性を持つ企業も数多く存在。
- また、耐放射性・遮蔽性・気密性や高い耐震性等に加え、保守・メンテナンスやトラブル対策を確実に実施するための高いトレーサビリティといった高度な品質管理が求められる。

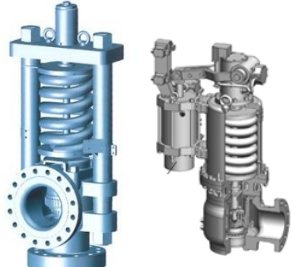
原子力のプラント・機器製造等のサプライチェーン



	製品例 (主要サプライヤ)
原子炉容器	原子炉容器 (三菱重工業、IHI) 大型部材 (日本製鋼所M&E)
タービン	蒸気タービン (三菱重工業、東芝ESS) 大型部材 (日本製鋼所M&E)
ポンプ	一次系 (三菱重工業、日立GE、荏原製作所) 二次系・安全系 (荏原製作所、関水社)
バルブ	大型バルブ (BWR : 岡野バルブ、PWR : TVE) 中小型バルブ (平田バルブ)
炉内構造物	制御棒駆動装置 (三菱重工業、日立GE) 部素材 (日立金属、大同特殊鋼、助川電気工業)



原子炉压力容器部材 (日本製鋼所M&E)



主蒸気安全弁 (TVE、岡野バルブ)



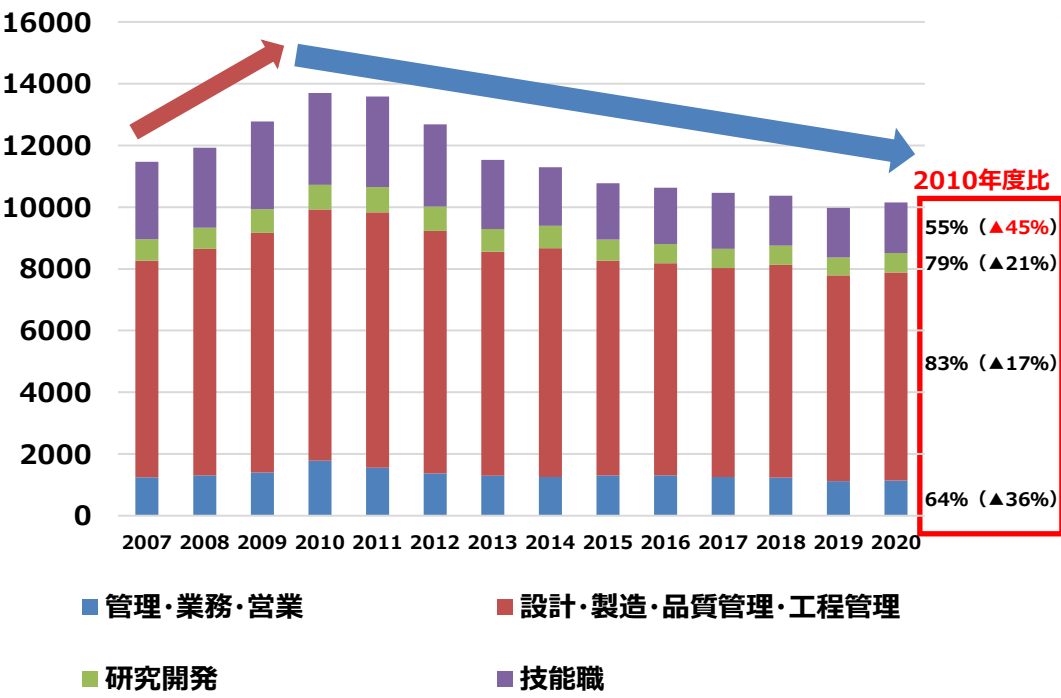
起動給水ポンプ (荏原製作所)

(出所) 原子力産業協会 原子力発電に係る産業動向調査2020報告書を基に資源エネルギー庁作成

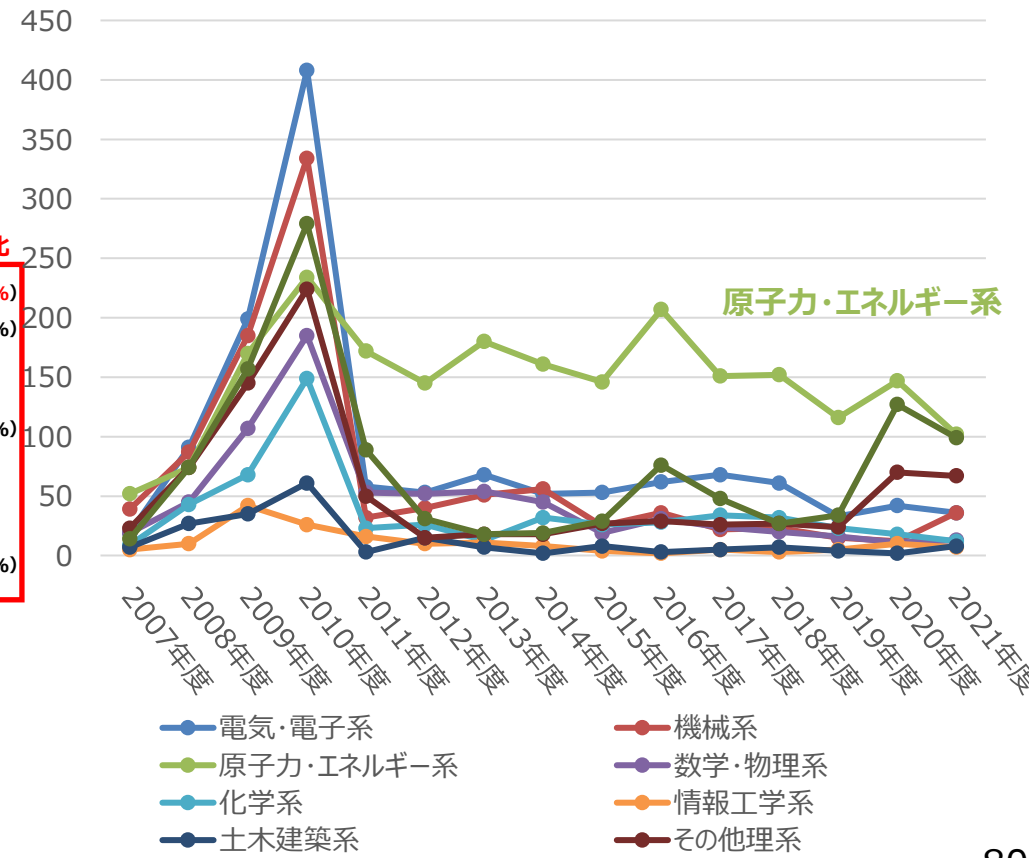
5-2. 原子力に関わる人材（産業）

- メーカーにおいては、原子力関連業務に従事する従業員数は震災以降減少傾向。特に、大型設備の製造時に必要な溶接工・組立工・機械工などの高い技術を持つ技能職が大きく減少。
 - 原子力関連企業の就職説明会に参加する原子力系の学生はほぼ横ばいであるが、将来の原子力産業の見通しが見えない中で、非原子力系の学生の参加は大きく減少。原子力関係の学科・専攻（※）の数も減少傾向にある。
- ※学科・専攻名に「原子力」が含まれる学科・専攻。

メーカー14社の各部門の原子力従事者



原子力関係企業合同就職説明会の学生参加者数の推移

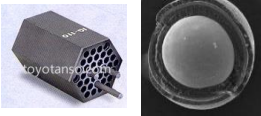
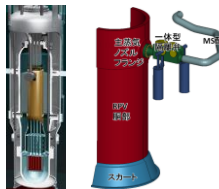
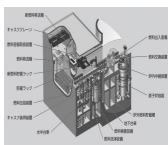


(出所) 日本電機工業会資料より作成

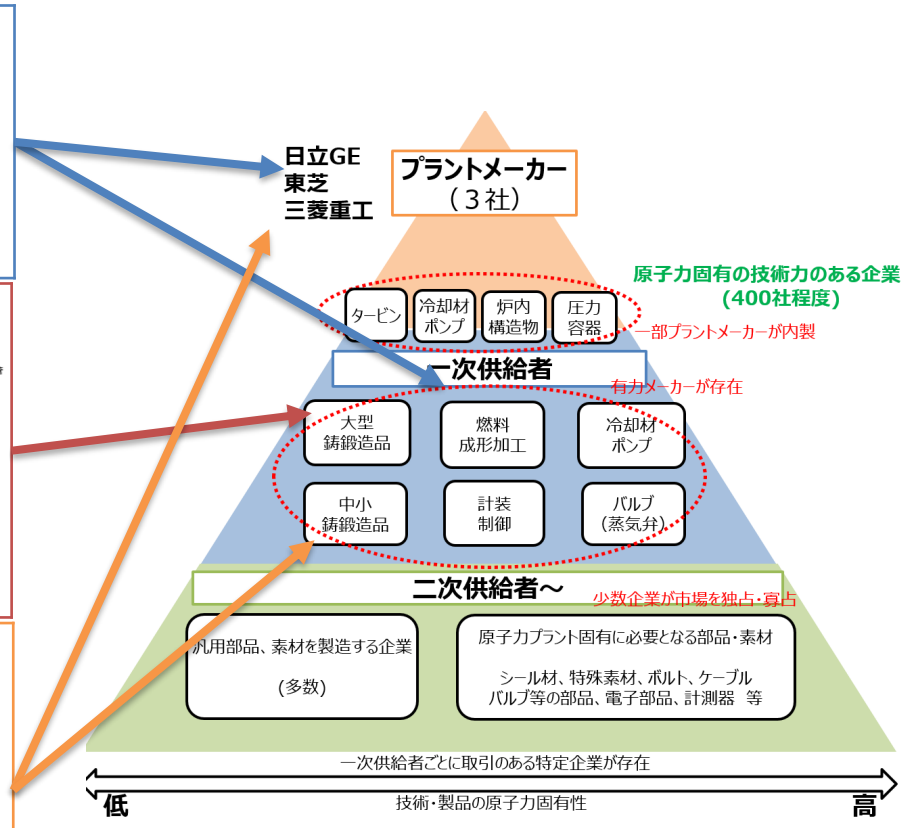
5-3. 原子力サプライヤの今後の戦略について

- サプライチェーンの維持・強化に向け、中枢部品・部材等のメーカーも、革新炉をはじめとする海外プロジェクトに効果的に参画できるよう、従来の「日の丸フルセット輸出プロジェクト」に替わる**新たなチーム組成**が必要に。
- 国内のサプライチェーンの現状をきめ細かく見極め、サプライヤによる**デジタル技術**の活用や供給途絶の危機にある高い**技術・サービスの継承をサポート**していくことが必要。

参画が期待されるサプライヤ例

高温 ガス炉	JAEA試験炉HTTRを基に、水素製造実証試験を始め実証プロジェクトを推進 ⇒実証炉目指す英との協力も視野に、 世界標準となる商業炉に向けたノウハウ確立	「燃料棒」「燃料」  ✓ 原子燃料工業 ✓ 東洋炭素
軽水炉 SMR	米国NuScaleやカナダBWRX-300のプロジェクトに、技術力の高い国内メーカー（IHI・日立GE等）も参画 ⇒米国での導入(2020年代末～)へ、 主要なサプライヤとなることを目指す	「格納容器」「弁」  ✓ IHI ✓ 岡野バルブ
高速炉	JAEAのもんじゅ・AtheNaを基に、米TerraPowerの実証炉プロジェクトに協力 ⇒三菱重工業等も参画、米国 実機プロジェクトに参画し、将来に向けたR&Dの検討を実施	「燃料取扱設備」  ✓ 三菱重工業 ✓ 富士電機

原子力のプラント・機器製造等のサプライチェーン



5－4．原子力サプライヤの海外展開実績

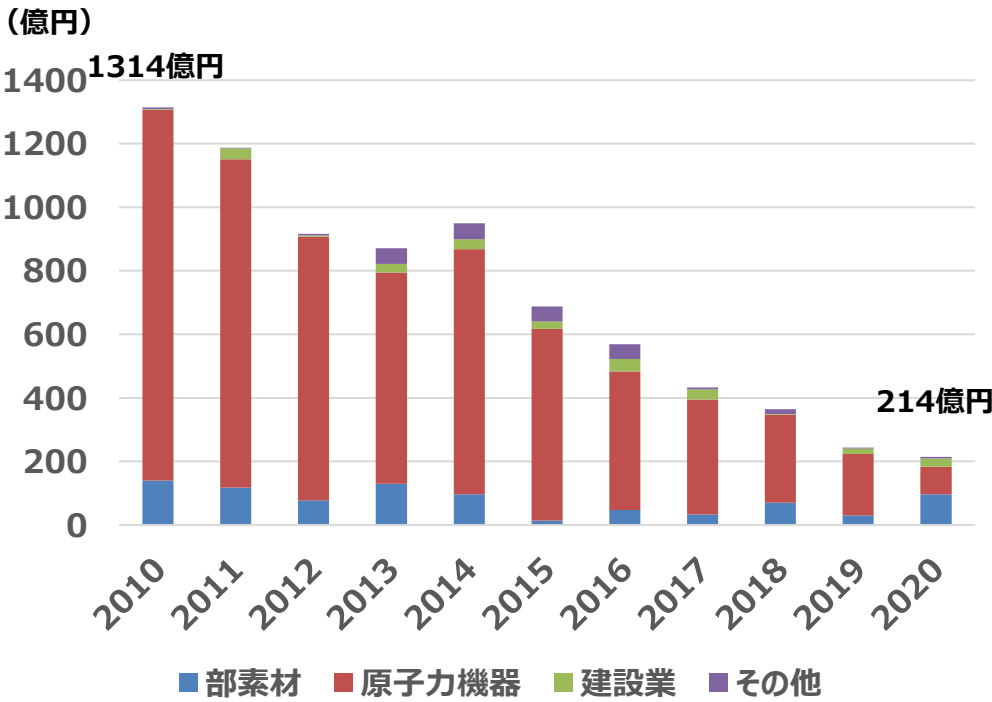
- 一部の中枢部品・部材のサプライヤは、海外プロジェクトにも多数参画してきた。他方、近年では西側諸国の市場低迷や中韓の国産化率向上に伴い、輸出高は震災前の1/5以下に。
- 国内市場が限定的な中で、国内サプライヤが、海外原子力プロジェクトに継続して参画することで、技術・人材の維持や海外技術のキャッチアップを図っていくべきではないか。

国内サプライヤ海外輸出実績

メーカー名	部品名	国名（サイト名）
日本製鋼所 M&E	大型鍛造品	英国（HPC）
IHI	格納容器	米国（ボーグル）
日本製鉄	SG管	米国（非公開）
荏原製作所	冷却ポンプ	米国（非公開）
TVE	湿分分離加熱器 逃し弁	中国（三門）
大同特殊鋼	炉内構造物	米国（ボーグル）
東洋炭素	黒鉛材	中国（HTR10）
助川電気工業	模擬燃料集合体	韓国 （韓国原子力研究所）

（出所） 各社ヒアリングに基づき資源エネルギー庁にて資料作成

原子力関係輸出高推移



（出所） 日本原子力産業協会資料に基づき資源エネルギー庁にて資料作成

【参考】原子力サプライヤの海外展開における課題

- サプライヤの海外進出にあたって、①海外規格の取得・維持、②海外案件のオンタイムな情報収集、③現地での継続的なメンテナンスサービスの提供等が課題。
- こうした課題を克服し、メーカー・サプライヤによる更なる新規事業開拓が可能となるよう、サポートしていくべきではないか。

サプライヤの海外進出における課題

- ✓ 仕様がみえないと開発を社内で通せないため、炉型の設計情報を持つプラントメーカーとの連携が重要。
- ✓ 維持費が高額かつ原子力は取替需要が低いので規格を保有し続けるメリットが薄い。
- ✓ アメリカはアメリカの規格、ヨーロッパはヨーロッパの規格となっており、規格の種類が多い。グローバル企業でもない限り全ての資格を保有し続けることは困難。
- ✓ 自社単独で海外案件に働きかけることには限界。規格取得しても維持費がかかるだけ。
- ✓ 海外進出した後のメンテナンスの提供が課題。技術移転するか子会社設立が必要となりコストがかかる。



国内サプライヤの海外進出には、

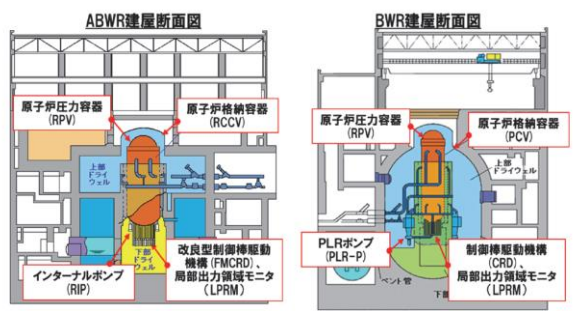
①規格取得支援、②海外プロジェクトに関する情報提供、③現地サポート 等の包括的なサポートが必要に

5-5. 原子力サプライヤのデジタル技術の活用

● 原子力部品の製造機会が減少する中、人材・技術の維持、効率化による省人化の観点からデジタル技術の活用についても支援を拡充していくべきではないか。

デジタルコンテンツによる技術継承

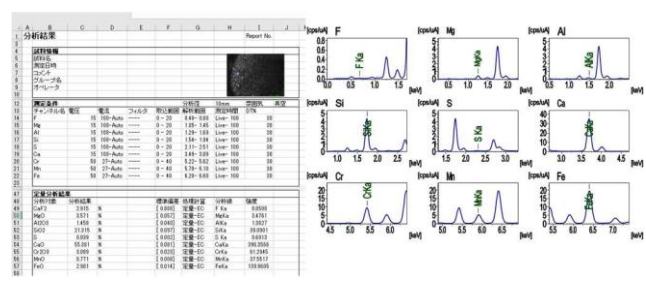
- ✓ ABWR、BWRの原子炉周辺の主要機器の保守点検作業をデジタルコンテンツとしてデータベース化。
- ✓ 技術者の高齢化やプラント長期停止等により喪失しつつある保守点検技術・ノウハウの若手技術者への継承を支援。



保守点検設備の例

デジタル化による省人化

- ✓ 大型鋳鍛造品のプロセス管理は作業者の経験・技能に基づいた職人のノウハウに依存。
- ✓ 計測機器等の導入により、管理状況をデータ化し、オンタイムで分析する品質管理システムを導入。



品質管理システム

3D造形技術により供給途絶対策

- ✓ 原子力部材（金属材料）の製造に3Dプリンティングの活用を検討。
- ✓ 実用化により供給途絶した部品の代替製造手段に。
- ✓ 途絶対策に限らず、部品製造にかかる期間・コストの短縮等の期待も。



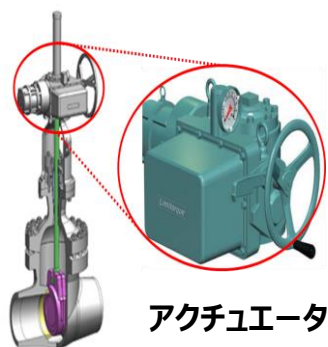
3D技術による造形プロセス

5－6．原子力技術・人材・新規事業開拓の支援

- 将来にわたって原子力を安全・安定的に活用していけるよう、現下の状況でも戦略的に産業・サプライチェーンを維持するため、技術・人材の状況を丁寧に分析した上で、供給途絶の危機にある高い技術・サービスの継承や中核サプライヤの新規事業開拓支援が必要に。

技術・サービスの継承

- ✓ 電動弁の駆動装置(アクチュエータ)内の直流モータの製造企業(甲府明電舎)が**2022年の撤退を表明**。
- ✓ 製造中止を踏まえ、日本ギアが**設計を引き継ぎ、代替サプライヤーによる製造・性能検査を推進**。



アクチュエータ

原子力人材の研修支援

- ✓ 発電所のメンテナンスを行う企業の**社員を対象に、研修を実施**。
- ✓ **原子力設備の保全技術、廃止措置の技術**等の実務的な知識を学ぶ講義や現場実習を通じて技術の維持を行う。



設備の保守点検作業

新規事業開拓支援

- ✓ TVEグループは**元々バルブの製造、メンテナンスを行っている企業**。
- ✓ 廃炉事業に参入し、鋳造品製造技術を活かし、廃炉工程で発生する**廃材を発電所内で溶融・成型し、再利用する取組(クリアランス)**を推進。



モバイル溶融炉設備

今後、具体的に議論していくべき論点（例）

1. 国としてのエネルギー政策上の原子力に関する目標設定

- 安定供給やカーボンニュートラルの実現、エネルギーコストの低減等の課題を踏まえた、原子力の持続的な活用の必要性、そのあり方の具体化・明確化が必要ではないか。
- 日本の原子力事業・技術・サプライチェーンが有する「強み」や、今後の改善・強化にむけた課題の具体化・明確化が必要ではないか。

2. 目標設定を踏まえた政策課題

（1）限られたリソースの中で、社会ニーズに応じた開発をどのように重点化していくか。

- 「原子力を通じてどういう価値の実現に貢献するか」「どのような研究開発課題があるのか」について検討が必要ではないか。

今後、具体的に議論していくべき論点（例）

2. 目標設定を踏まえた政策課題（続き）

（2）開発・実装の工程表や、それを踏まえたリソース投入のあり方をどう検討していくか。

- 実用化への具体的な工程表や、幅広い関係者が参画しつつ、戦略的に開発を実施していける枠組みが必要ではないか。
- 予算措置だけではなく、非予算措置（規制や法律）の検討が必要ではないか。

（3）サプライチェーンの劣化が懸念される中、技術・人材の維持をどのように進めていくか。

- サプライチェーンの現状や強み・弱みを踏まえ、日本としてのサプライチェーン戦略を検討すべきではないか。
- 国内サプライヤが、革新炉の潮流に対応し、事業継続の将来展望を描いていくための方策の検討が必要ではないか。

3. 社会に対し、上記の原子力の目標設定や価値、工程表をどう説明・共有していくか。