

2050年カーボンニュートラルの実現に向けた検討

令和2年12月21日
資源エネルギー庁

1. 電力部門の検討

再生可能エネルギー以外の課題と取り組み

a. 火力発電

- 化石+CCUS/カーボンリサイクル
- 水素・アンモニア

b. 原子力

電力部門の検討の進め方

- 電力部門の脱炭素化を目指す上で、それぞれの技術について足下の取組及び長期の課題と対応について検討。
- 前回・前々回の基本政策分科会において、長期的に再エネを大量導入する上での課題と対応等を議論。今回は他の脱炭素電源（原子力、化石＋CCUS/カーボンリサイクル、水素・アンモニア発電）について課題と対応等を議論。

検討事項

- 2050年を見据え、それぞれの電源が乗り越えるべき課題と対応
- 電源のCNを目指す上で、それぞれの電源の位置づけ

前回・前々回 検討

再エネ

- －長期的に大規模導入を実現する際の課題と対応
- －系統の安定運用を維持するために必要な要素

今回検討

原子力

- －安全性の追求等の原子力政策の課題と対応の方向性
- －2050年カーボンニュートラル実現に向けた原子力の在り方

化石＋CCUS/カーボンリサイクル

- －CCUS/カーボンリサイクルの足下の技術開発動向、貯蔵量の限界
- －脱炭素社会における化石燃料利用の意義

水素・アンモニア発電

- －水素の供給手段ごとの課題と対応
- －他需要部門における水素利用の必要性

1. 電力部門の検討

再生可能エネルギー以外の課題と取り組み

a. 火力発電

- 化石+CCUS/カーボンリサイクル
- 水素・アンモニア

b. 原子力

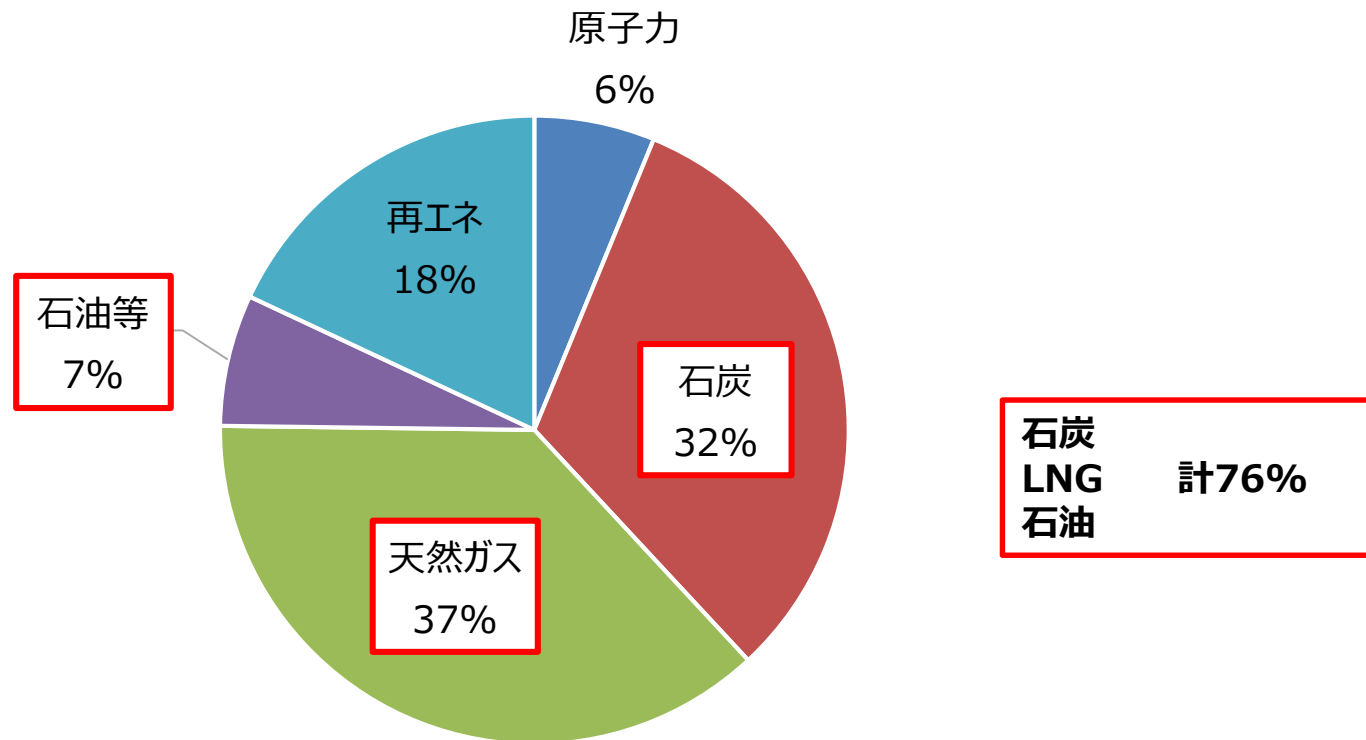
ご議論いただきたいこと①（火力発電）

- 化石燃料による火力発電は、戦後の高度経済成長を力強く牽引。1960年代の原油輸入自由化による石炭火力から石油火力へとシフトや、1970年代のオイルショックや環境問題等によるLNGの活用を拡大などを経ながら、長い間、貴重な電力供給源として活躍。
- 特に、東日本大震災以降、停止した原子力に代わり、火力発電の比率を拡大。足下でも、供給量の7割以上を占めている。こうして火力発電の容量を保持することは、災害等におけるエネルギー供給のレジリエンス対策に貢献。
- 加えて、再エネの導入が拡大する状況の中、火力発電は、
 - － 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、
 - － 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いる。
- 一方で、化石燃料による火力発電は、温室効果ガスを排出するという課題がある。これまでも、高効率化や次世代化に取り組んできたが、2050年のカーボンニュートラルの実現に向けては、電源全体の脱炭素化が不可欠であり、火力発電の在り方を抜本的に見直す必要があるのではないかと。
- こうした点を踏まえ、本日は、
 - ① 2050年カーボンニュートラルに向けた火力発電（化石燃料＋CCUS/カーボンリサイクル、水素・アンモニア発電）の在り方
 - ② 目指すべき姿に向けた課題や対応の方向性等について御議論いただきたい。

火力発電の役割①：供給力

- 火力発電は、発電電力量の7割以上を占める「供給力」として、ベースロード、ミドル、ピークといったそれぞれの特性を踏まえ、安定供給上重要な役割を担っている。
- 特に、これまでも災害時における供給力を提供してきており、容量を確保することはエネルギー供給のレジリエンス対策にも大きく貢献。

電源別発電電力量構成比（2019年度速報値）

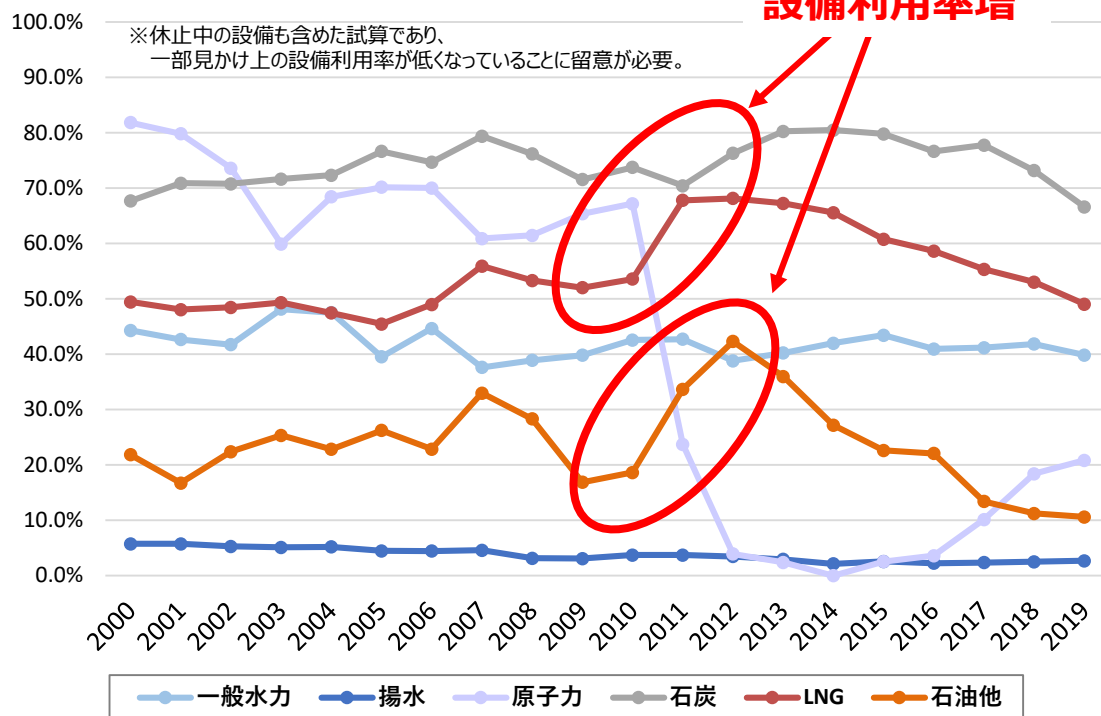


(参考) 東日本大震災後の供給力不足を補った火力発電

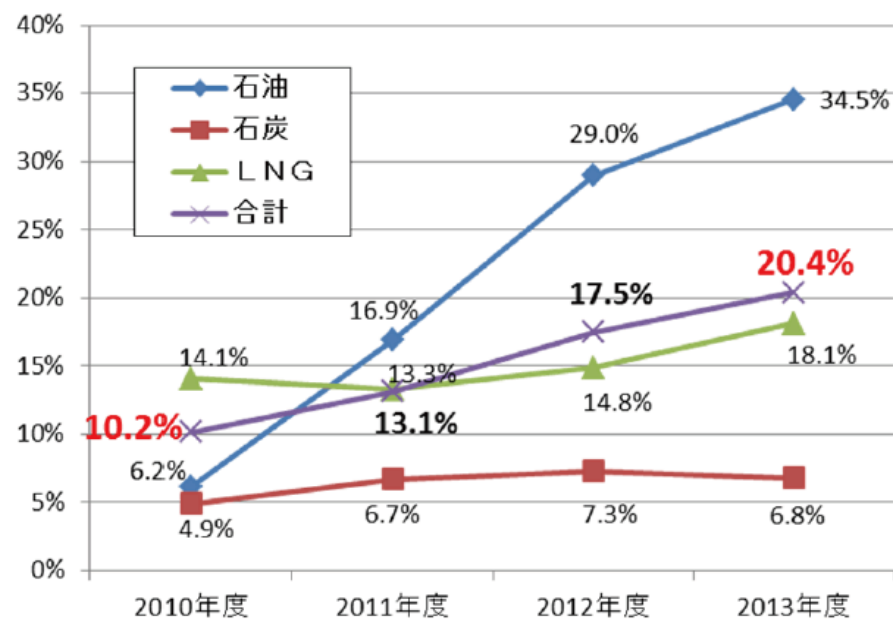
- 東日本大震災以降、原子力が稼働停止する中、長期停止させていた火力の再稼働を含め、火力の稼働増等によって電力供給力を確保。
- たとえば、2012年度、2013年度には節電要請などの電力需給対策が講じられた結果、電力の需給バランスは維持されたが、40年以上前から稼働を続ける老朽火力や緊急設置した火力を含め、火力をフル稼働させることで供給力を確保した。

<設備利用率の推移>

設備利用率増



<老朽火力の割合の推移 (kWベース)>



出典：資源エネルギー庁「エネルギー白書2014」

(参考) 大規模災害発生時の経年火力の活用

- 火力の休廃止が進むと、東日本大震災や北海道胆振東部地震のように、長期間にわたり供給力が減少するような大規模災害等が発生した場合、電力需給状況は極めて厳しくなる可能性がある。

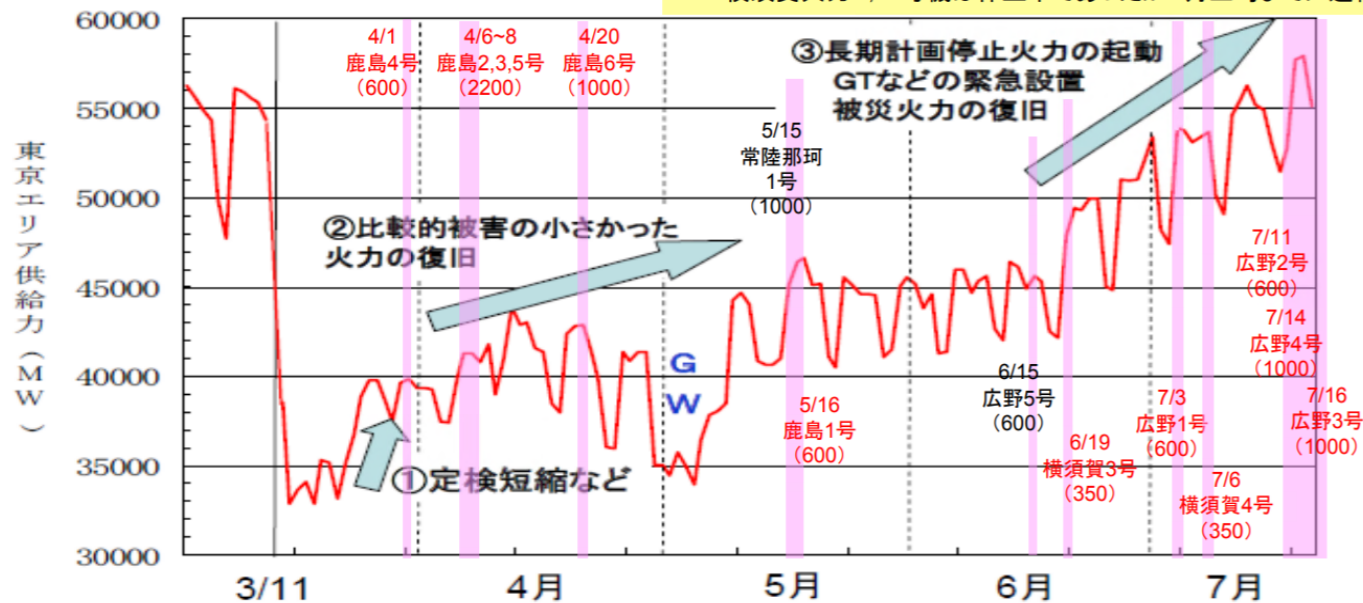
1-2. 東日本大震災の振り返り ③

第5回調整力及び需給バランス評価等に関する
委員会資料 (2016年8月)

□ 4月以降の状況(東京)【分析Ⅳ】

- ✓ FCなど連系設備の停止点検の繰り延べ
- ✓ 東清水FCにおいて 10万kW→13.5万kW(+3.5万kW)への緊急対策
- ✓ 津波被害のあった電源の復旧(鹿島、常陸那珂、広野)や長期計画停止中電源(横須賀3,4号)の再立ち上げおよび緊急設置電源の導入 (朱書きが石油火力)

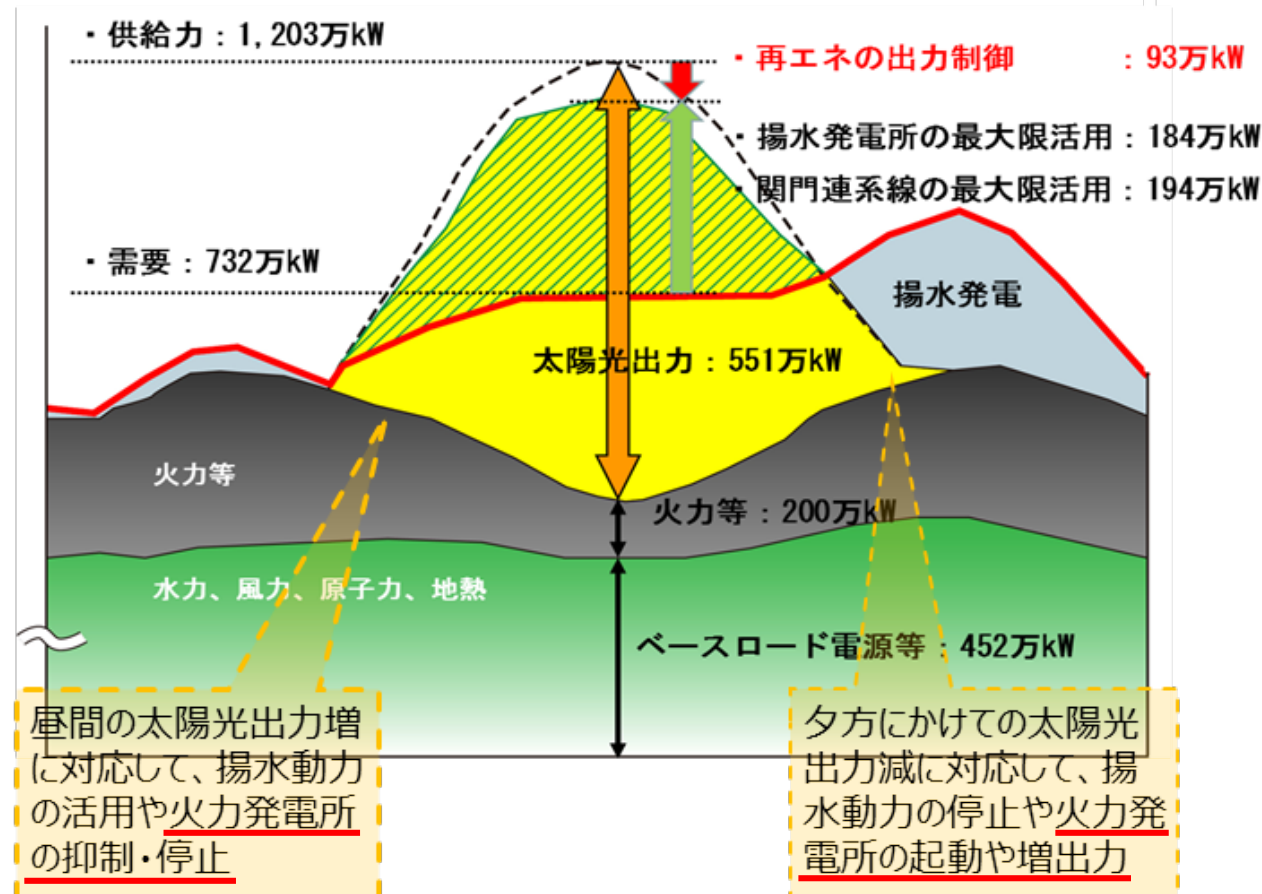
- 鹿島火力は4月～5月上旬にかけて全機復旧
- 広野火力は震災の影響が大きかったが、7月までに全機復旧
- 横須賀火力3、4号機は休止中であったが7月上旬までに運転再開



火力の機能②：調整力

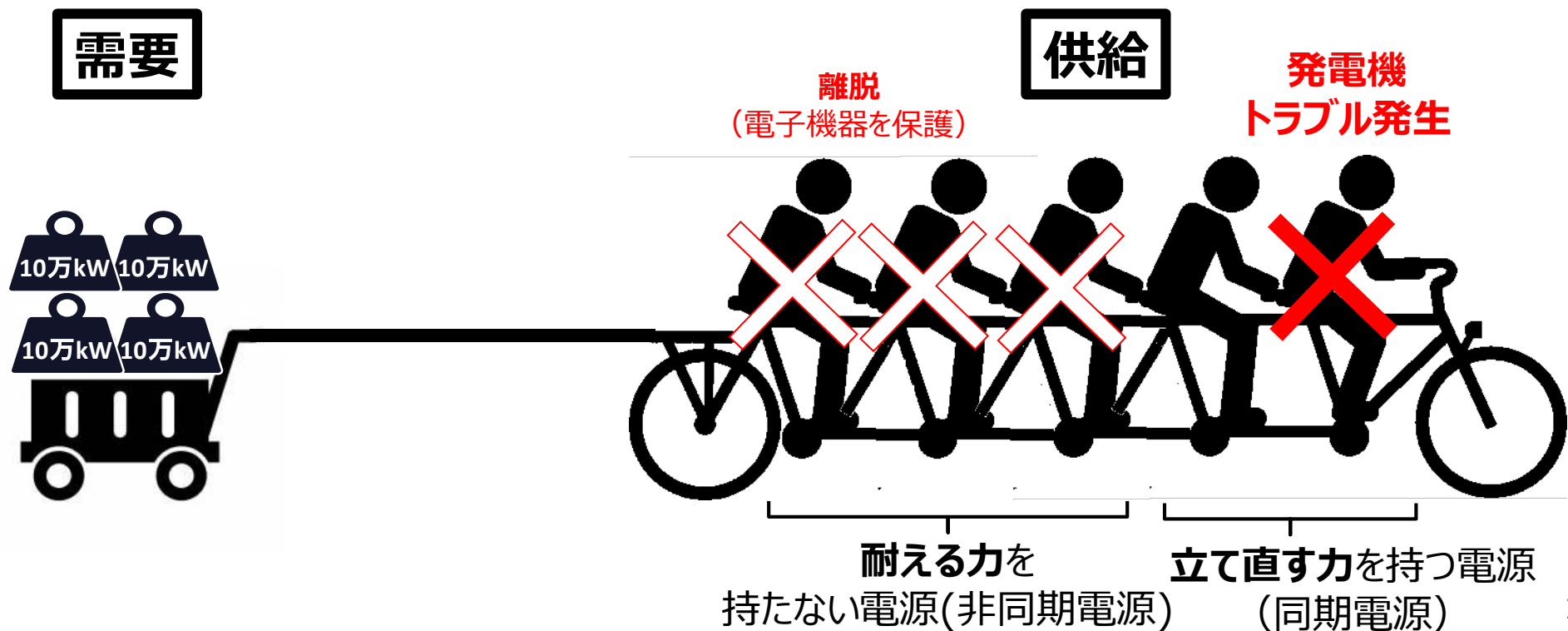
- 太陽光や風力といった変動再エネの導入の進展に伴い、その出力変動を吸収し、需給バランスを調整する機能を持つ他電源の存在が必要。
- 他のエリアよりも再エネの導入量が多い九州エリアでは、火力発電は、再エネの出力増減に応じて抑制・停止、起動・増出力といった出力調整を行いながら運用されており、電力の安定供給に大きく貢献している。

＜九州の電力需給イメージ（2018年10月21日の例）＞



火力の機能③：慣性力

- 系統で突発的なトラブル（電源の離脱、落雷等）が生じた場合、
 - ✓ 太陽光、風力、蓄電池などの非同期電源は、50Hzや60Hzの交流に変換するため電子機器を使用。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を持たず**、周波数の変化が一定の閾値を超えると、その電子機器を守るため**離脱（解列）**する。
 - ✓ 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（機械）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**、相対的に周波数や電流の急激な変化に対して、**発電を継続し、周波数を維持する機能を有する**。



2050年に向けた火力の活用に関する課題と対応の方向性

課題

方向性

① 環境負荷の低減

- 国内のCO₂排出量の4割以上が火力発電由来。また、うち約半数が石炭火力。
- 現在、高効率環境負荷低減に向け非効率火力のフェードアウトを検討しているところ。他方、2050年のカーボンニュートラルを目指す場合、電源由来のCO₂排出は限りなく0に近づけていく必要。

- **化石火力にCCUSを活用することで、オフセットにするか、水素やアンモニアを活用し、火力燃料自体の脱炭素化を図る必要。**
- こうした脱炭素技術の活用に向けて、技術確立、コスト低減など様々な課題への対応が必要。

② 安定供給のための 必要容量の確保

- 戦後、高度経済成長期に石炭・石油火力といった化石燃料により、大量のエネルギーを供給する体制を構築してきた。
- また、震災直後、原子力の停止によって火力比率が増大。
- 足下で、非化石が拡大する中、設備利用率が低下し事業性に影響。他方、再エネの導入拡大や、安定供給上必要な供給力・調整力としての機能はより一層求められる。

- 2050年に向けて非化石電源を最大限導入する中で安定供給を維持するためには、**供給力や調整力、慣性力といった機能を持つ火力発電を一定容量確保することが必要。**
- 活用に当たっては、（寿命を40年と仮定した時に、）2050年断面でも一定量残存する**火力発電設備の脱炭素化を段階的に進めていくことが必要。**

③ 適切な ポートフォリオの 組み方

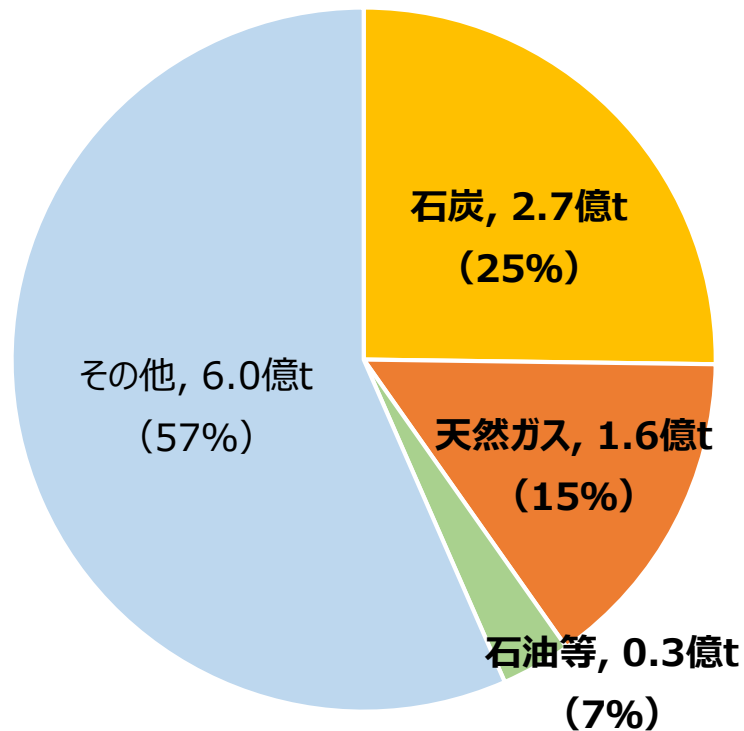
- 火力発電は今までも、石炭・LNG・石油間で、3Eにおいて一長一短が存在。
- 脱炭素化に向けても、技術ごとに3Eの観点から適切なポートフォリオを組むべきではないか。

- 化石+CCUSは、既存の火力発電がそのまま使える一方、適地や用途拡大の課題が存在。
- また、水素・アンモニアは国内外の供給体制構築や他部門での活用との兼ね合いなどの課題が存在。
- **脱炭素に向けては、脱炭素火力技術のそれぞれの熟度を勘案し、3Eを満たすポートフォリオの検討が必要。**

【課題①】環境負荷の低減（火力発電のCO2排出量）

- 国内におけるCO2排出量の4割以上が火力発電に由来。うち約半数が石炭火力。
- 燃料別にみれば、石炭＞石油＞LNGの順でCO2排出量が大い。

日本全体に占める火力発電のCO2排出量
(2018年度実績値)



kWh当たりのCO2排出量（電源別）

(g-CO₂/kWh)

1000

800

600

400

200

0

795

石炭火力
(USC最新鋭)

695

石油火力

376

LNG火力
(GTCC平均)

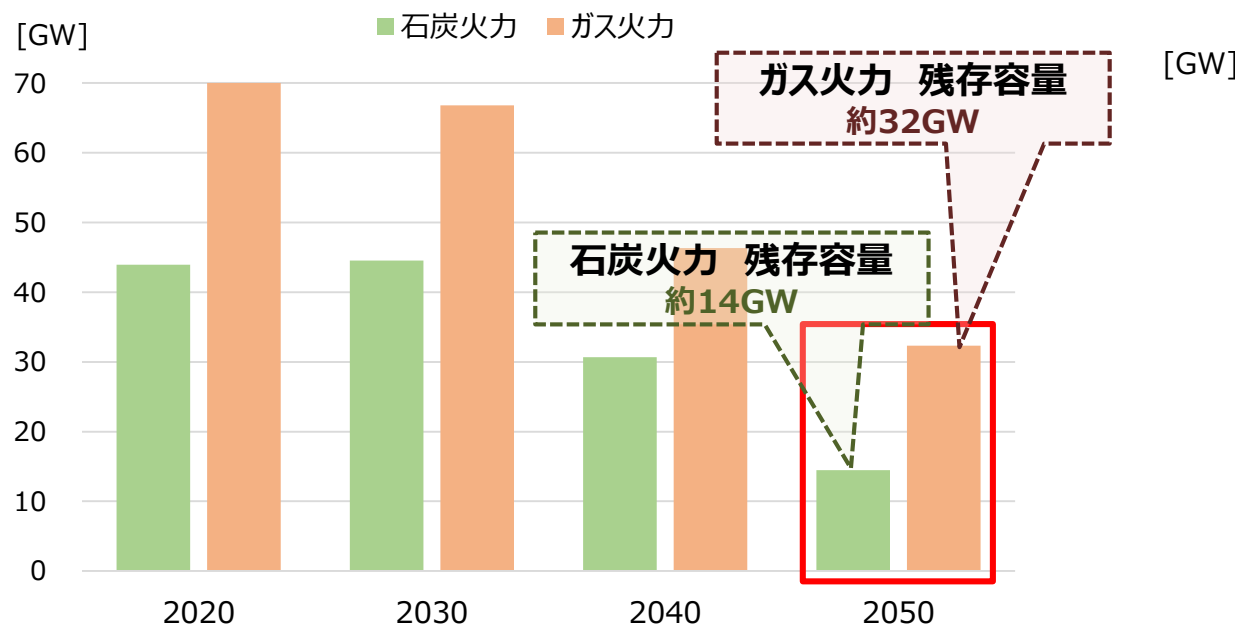
(出典) 環境省2018年度の温室効果ガス排出量（確報値）

出典：USC（最新鋭）については、最新鋭の発電技術の商用化及び開発状況（BATの参考表）を基に算出
石油・LNG火力については、電力中央研究所報告「日本における発電技術のライフサイクルCO2排出量総合評価」（2016年7月）

【課題②】安定供給のための必要容量の確保

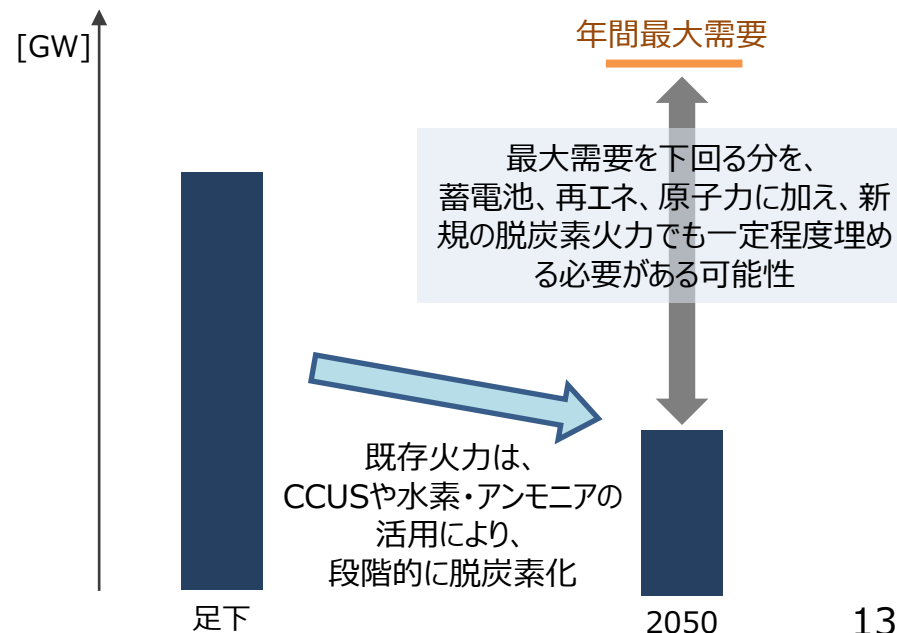
- 現在建設中の設備及び既運転の設備を対象とし、寿命を40年と想定すると、今後の新規の新設案件がないという仮定の下でも、2050年時点でガス火力は約32GW、石炭火力発電は約14GW残る。
- また、再エネの導入が拡大する状況の中、火力発電は、
 - ー 太陽光や風力の出力変動を吸収し、需給バランスを調整を行う調整力や、
 - ー 急激な電源脱落などにおける周波数の急減を緩和し、ブラックアウトの可能性を低減する慣性力といった機能により、電力の安定供給に貢献してきた。
- 2050年に向けて再エネの更なる導入拡大が見込まれる中では、供給力、調整力、慣性力といった機能を持つ火力発電を活用して安定供給を確保しつつ、脱炭素化を段階的に進めていくことが必要ではないか。

火力発電の容量推移（寿命を40年と想定）



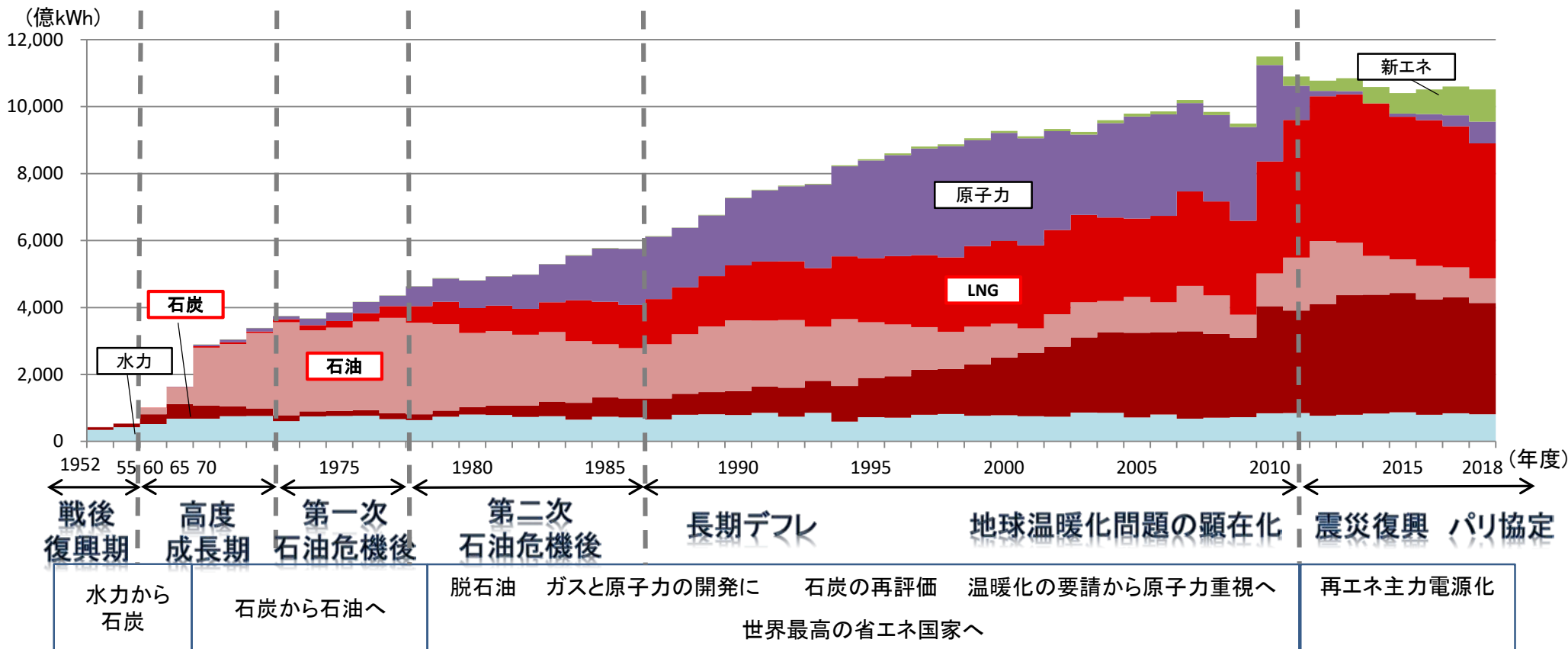
* 既設・建設中の火力発電設備を対象に、設備寿命を40年として算出

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



(参考) 化石燃料のエネルギー源としての歴史

- 戦後は水力発電を中心としていたが、高度経済成長期には電力需要の増大に伴い、石炭火力や石油火力といった火力発電が急増し、高度経済成長を牽引。
- その後、1970年代の石油危機や地球温暖化問題等により、原子力やLNG火力が増大。2011年東日本大震災以降は停止した原子力に代わり、火力発電が増大。
- 近年は、再エネの導入拡大や原子力の再稼働等により、火力発電の発電量は減少。



【課題③】適切なポートフォリオの確保

- 化石燃料の中にも、石炭、石油、LNGとそれぞれ一長一短の特徴を持つ燃料がある。
- 火力発電は、これら燃料の選択肢を保持しており、ポートフォリオを組むことで安定供給を維持することができる。
- 今後、脱炭素火力に向けた転換を進めるにあたって、化石＋CCUS、水素・アンモニア発電の技術的熟度等を踏まえながら、3Eを満たす適切なポートフォリオを組むことが重要。

		石炭	石油	LNG
エネルギー・セキュリティ	燃料調達の柔軟性	○	◎ 高い	△
	地政学的リスク	◎ 低い	△	○
経済性	発電コスト	◎ 安い	△	○
	燃料価格	◎ 安い	△	○
環境性	温室効果ガス	多 少		

(参考) 日本の島国特有のエネルギー事情

- ヨーロッパのように地続きの国々は、天然ガスのパイプラインや送電線を国際的に連結し、需給のバランスに応じて互いにエネルギーの売買を行っている。
- 一方、日本は島国であるため、地理的にガスパイプラインや国際送電線により、他の国と連結することが困難。現状では、必要な電力需要の全てを国内で発電する必要がある。

	日	仏	中	印	独	英	米
自給率(2019年) ※中・印は2018年 【主な国産資源】	12% [無し]	54% [原子力]	80% [石炭]	62% [石炭]	35% [石炭]	71% [石油 天然ガス]	104% [天然ガス 石油・石炭]
国際パイプライン	×	○	○	×	○	○	○
国際送電線	×	○	○	○	○	○	○

1. 電力部門の検討

再生可能エネルギー以外の課題と取り組み

a. 火力発電

- 化石+CCUS/カーボンリサイクル**
- 水素・アンモニア**

b. 原子力

ご議論いただきたいこと②（CCUS/カーボンリサイクル）

- 化石燃料の特徴として、エネルギー密度が高く、常時におけるエネルギー供給に加え、非常時を想定した備蓄等において有効といった点が挙げられる。
- カーボンニュートラル社会の実現に向けて、化石燃料による火力発電については、CCUS/カーボンリサイクル等を実施することが求められる。CCUS/カーボンリサイクルは、CO₂分離・回収設備を設置することで、既存の調達体制・設備を活用しつつ、CO₂の分離・回収・再利用/貯留によるCO₂排出削減に貢献可能。
- 他方、CCUS/カーボンリサイクルは我が国企業が技術的に先行する分野があるものの、現在、国際的にみても技術開発が加速し始めた段階であり、本格的な社会実装に向けて、更なるコスト低減やCO₂再利用/貯留ポテンシャルの拡大等に取り組む必要がある。

課題 1 : CCUS/カーボンリサイクルの技術的確立・コスト低減

課題 2 : CCUS/カーボンリサイクルのポテンシャル拡大

課題 3 : 【CCS】事業環境の整備

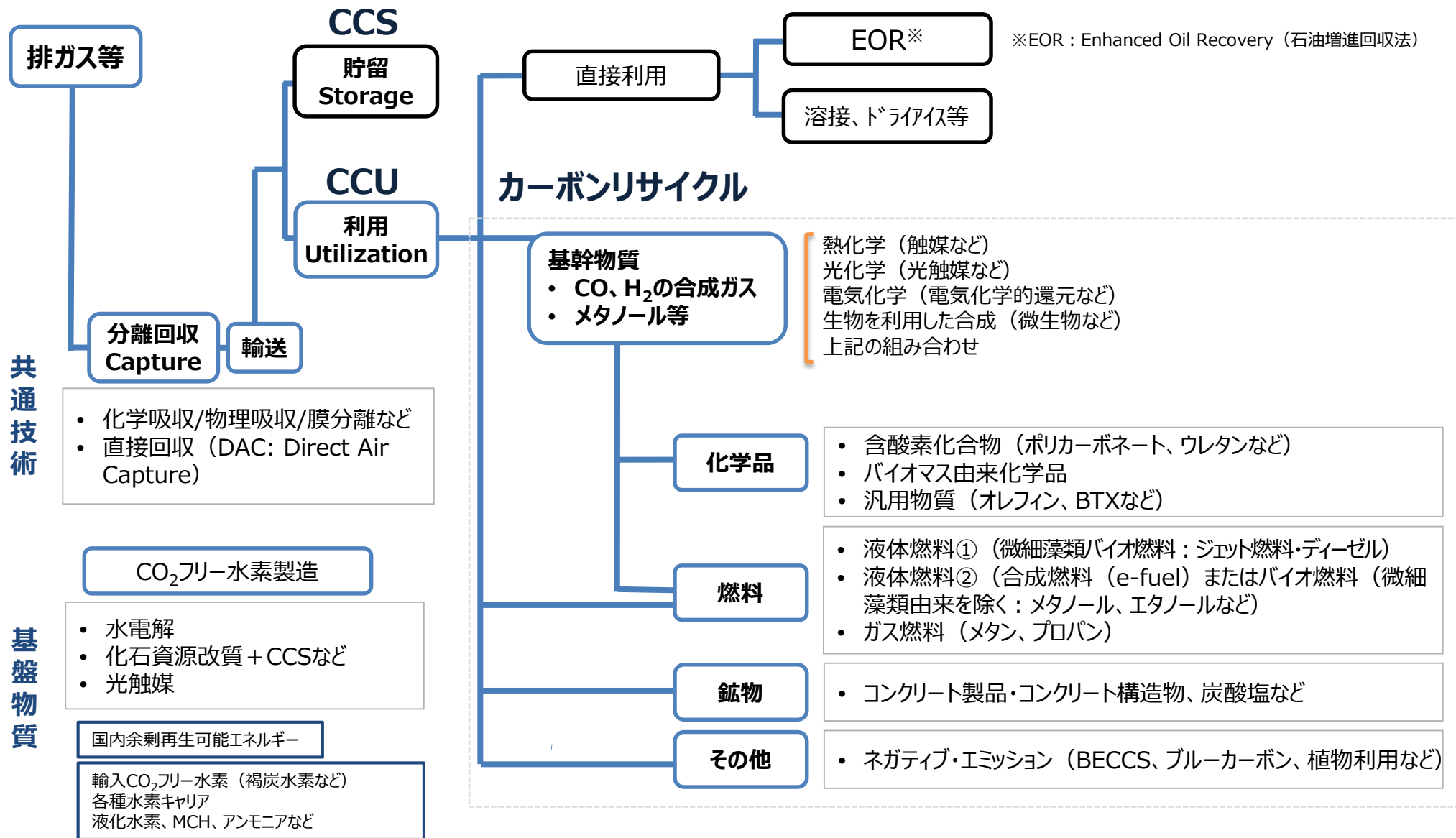
- こうした点を踏まえ、本日は、火力発電におけるCCUS/カーボンリサイクルについて、

① 電源構成においてどう位置づけるか

② 実現に向けた課題及びその対応の方向性はどうあるべきか

等について御議論いただきたい。

CCUS/カーボンリサイクルの概念



CCUS/カーボンリサイクルの概要

- 一貫した基礎技術は確立済みであり、現在は大規模化・商用化に向けた実証を実施しているところ。
- 我が国企業が国際的に競争力を有する領域も多く存在。

分離・回収

輸送

貯留

カーボンリサイクル

概要

排出源からCO2を分離し、回収

<分離回収技術>

物理吸収液/化学吸収法/膜分離/DAC

<排出源>

天然ガス処理、発電、製鉄、セメント製造、肥料製造、バイオエタノール製造、製油、バイオマス発電、廃棄物処理場、ブルー水素製造

分離回収したCO2を貯留地・再利用場所まで輸送

<輸送手段>

【陸域】パイプライン、タンクローリー、鉄道
【海域】海底パイプライン、船舶輸送

CO2を地下の貯留層に圧入・貯留し、モニタリング

<掘削・圧入・モニタリング>

【貯留地】陸域・陸域から海底下、海上
【圧入】帯水層層貯留・油槽貯留(EOR)
【モニタリング】圧入後のCO2監視

CO2を資源として活用し、化学製品や燃料などを製造

<カーボンリサイクル製品>

【化学品】汎用品（オレフィンやパラキシレンなど）
【燃料】ガソリン、都市ガスの主原料であるメタンなど
【鉱物】コンクリート製品など

現状の取組

既に商用化済の技術は存在 革新的な吸収方法は研究開発

・国内外でアミン吸収液での実績はある
・国内外で各排出源ごとに分離回収の研究開発を実施。

国内ではCO2の長距離輸送の実績なし

・国内では、オンサイトでのパイプライン輸送のみ。海外では、長距離パイプラインの実績あり（100km超）
※カーボンリサイクルでは排出源の近傍での再利用が可能なケースあり
※長距離輸送（200km以上）では船舶輸送の方がパイプラインより、費用対効果が高く、国内外の船舶輸送の実用化に向けた取組が進展。

圧入・モニタリング技術の技術実証を実施

・苫小牧市で実施した、大規模CCS実証試験で2019年11月に累計圧入量30万トンを達成（操業技術の確立）
・圧入後のCO2のモニタリングを継続実施

一部商用化の製品あり 多くは研究開発・実証段階 世界的にも研究開発が盛ん

・研究開発拠点の整備・拡充
・化学品・燃料・鉱物のいずれも一部研究開発・実証・事業化が本格化している段階
・世界的にも、研究開発・実証・事業化が活発化

(参考) カーボンリサイクルに関する産業界の取り組み

- 世界のカーボンリサイクルの研究開発・実証において、我が国企業が先行する分野もある。
- サプライチェーン全体でCO₂フリーな製品製造のニーズが高まっており、カーボンリサイクルに係る取組みを推し進める意義は大きい。

CO2分離・回収

国	企業・組織名	製品・生成物	開発段階
日	三菱重工エンジニアリング	化学吸収法（アミン液）	商用化
日	日鉄エンジニアリング	化学吸収法（アミン液）	商用化（NEDO）
独	BASF（化学メーカー）	化学吸収法（アミン液）	実証～商用化
蘭	シェル（石油化学）	化学吸収法（アミン液）	商用化
米	UOP（化学メーカー）	膜分離法（有機膜）	実証～商用化
日	住友化学、RITE	膜分離法（有機膜）	実証（NEDO）
英	Drax（電力）	バイオマス発電、CO ₂ 回収	実証
日	川崎重工業、RITE	化学吸収法（固体）	実証（NEDO）

燃料

国	企業・組織名	製品・生成物	開発段階
米	Lanzatech（スタートアップ）	エタノール	実証
米	Opus12（スタートアップ）	メタン、エタン、エタノール	実証
日	国際石油開発帝石 日立造船	メタン	実証（NEDO）
日	ユーグレナ	ジェット燃料（微細燃料）	実証
独	Audi（自動車メーカー）	メタン	実証
日	IHI	ジェット燃料（微細藻類）	基礎（NEDO）

化学品

国	企業・組織名	製品・生成物	開発段階
日	旭化成	ポリカーボネート	商用化
米	Newlight Technologies（スタートアップ）	ポリマー（生体触媒を活用）	商用化
日	日本製鉄 千代田化工	パラキシレン	基礎（NEDO）
日	東工大	アクリル酸	基礎（JST）
日	東ソー・産総研	ウレタン原料	基礎（NEDO）
独	BASF（化学メーカー）	アクリル酸	基礎
日	三菱ケミカル・東大等（人工光合成プロジェクト）	メタノール/オレフィン	基礎（NEDO）

鉱物

国	企業・組織名	製品・生成物	開発段階
日	中国電力、鹿島建設 等	CO ₂ 吸収コンクリート	商用化
英	O.C.O Technology（スタートアップ）	軽量骨材	商用化
米	Solidia Technology（スタートアップ）	CO ₂ 吸収コンクリート	商用化
米	Fortera（スタートアップ）	CO ₂ 吸収コンクリート	商用化
日	宇部興産、日揮、出光、東北大学	セメント原料	実証（NEDO）
日	太平洋セメント、東京大学、早稲田大学	セメント原料	基礎～実証（NEDO）
仏	LafargeHolcim 等（セメントメーカー）	セメント原料	基礎～実証（FastCarb PJ）

IPCC AR5 Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (2014)

多くのモデルでは、追加的な排出削減がかなり遅延したり、又は、バイオエネルギー、CCS、及びその組み合わせ(BECCS)などの鍵となる技術の使用が制限されたりすると、2100年までに約450ppmCO₂換算という大気濃度水準^{※1}(2度目標)を達成できなかった。

※1：人為起源のGHGの排出による気温上昇を産業革命前に比べて2℃未満に抑えられる可能性が高い緩和シナリオは、2100年に大気中の濃度が約450ppmCO₂換算となるものである(確信度：高い)。

Many models could not achieve atmospheric concentration levels of about 450 ppm CO₂eq by 2100 if additional mitigation is considerably delayed or under limited availability of key technologies, such as bioenergy, CCS, and their combination (BECCS).

CCS技術の利用が限定されているシナリオにおける総緩和費用の増加割合は、2100年までに約450ppmCO₂換算という大気濃度水準^{※1}(2度目標)において、138% (費用増加割合の幅：29～297) [シナリオ数：4] (Table SPM.2より引用)。

IEA, Energy Technology Perspectives 2020 (2020)

CCUSの役割は、予測期間中に変化。最初は、電力セクターと重工業の既存の資産の脱炭素化に焦点が当てられるが、時間の経過とともに、大気からの炭素の除去にシフトし、排出削減が困難な分野の排出量を除去する。CCUSは、2070年の累積排出量削減に4番目に大きな貢献をしており、全体の15%を占める。

The role of CCUS changes over the projection period: at first the focus is on decarbonising existing assets in the power sector and heavy industries, but over time it shifts towards the removal of carbon from the atmosphere, offsetting emissions in sectors where they are hard to abate. CCUS makes the fourth-largest contribution to cumulative emissions savings in 2070, accounting for 15% of the total.

化石+CCUS/カーボンリサイクルの実現に向けた課題と対応の方向性

課題

方向性

① CCUS/ カーボンリサイクル の技術的確立 ・コスト低減

一貫した基礎技術は確立、将来の大規模化や普及拡大に向けて技術的課題の克服・及びコスト低減を実現する必要

【分離回収】我が国企業が技術的に先行する分野があり、苫小牧・大崎上島での技術実証を通じて、基礎技術は確立も更なるCO2回収率の向上が課題。また、コストの太宗を占めており、商用化にはコスト低減が不可欠。

【輸送】排出地・貯留適地を結ぶための低コストな長距離輸送技術確立が課題。また、将来の大規模輸送に向けて、CCS輸送全体としてのコスト低減が必要。

【貯留】陸域からの貯留適地は限定的であり、海上から海底下貯留技術も必要。掘削・貯留・モニタリングそれぞれについて低コスト化が必要。BECCSやDACCS等、ネガティブエミッション実現のために貯留技術が必要。

【カーボンリサイクル】コンクリート、燃料、化学品等の分野で概ね基礎技術は確立、一部は既に実用化済。既存製品と比べて現状非常に高コスト、いずれの製品もコスト低減が不可欠。

- 我が国に技術優位性のある分離回収技術の社会実装に向けた技術開発の加速化
- 輸送については、低コストな船舶輸送技術の確立に加え、将来の大規模輸送を見据え、排出源の集積と幹線ネットワークを構築（ハブ＆クラスター）
- 貯留については、海底下貯留技術の技術開発やモニタリングの精緻化・自動化
- カーボンリサイクルについては、大規模実証の実施や公共調達による販路拡大

② CCUS/ カーボンリサイクル のポテンシャル拡大

CCSは貯留適地の選定と貯留関連設備の大規模調達が必要

【貯留適地の調査】日本に貯留可能な貯留ポテンシャルは約1500～2400億トンだが、探査・調査井の掘削等を通してより精緻な貯留適地の特定が必要。さらに、経済性・社会的受容性を考慮し、適地の選定が必要。

【CCS拡大に向けた設備拡大】掘削井1本あたりの年間の貯留可能量は限界があり、圧入井の本数の確保が重要。また、輸送ネットワークの整備も必要。

カーボンリサイクルは水素調達量の拡大や製品の用途拡大が必須

【水素調達量】化学品・燃料の製品製造には水素を必要とするため、大量に水素を調達出来るサプライチェーンの構築が必要。

【製品の用途拡大】CO2吸収型コンクリートは現状用途が限定的であり、性能向上による用途拡大が必要。

- CCSは、引き続き貯留適地調査を実施
- カーボンリサイクルは、現在我が国が技術優位性を持つ水素大量調達のためのサプライチェーン構築及び製品性能の向上に向けた研究開発を加速化

③ 【CCS】 事業環境の整備

CCSを実施する際の法整備・ビジネスモデルの検討が必要

【事業環境の整備】海外では法整備が進んでいる国・地域がある一方で、CCSに特化した法令がなく、様々な法律を適用法規としているため、手続きが煩雑かつ過剰なコスト負担。さらにCO2圧入後の長期的責任があり、民間企業が参入しにくい。

【政策支援】日本では低コストで実現可能なEORが困難な中、政策的な支援によるインセンティブが必要。また、CCSの事業リスクもあるため官民の役割・コスト分担を含めた議論が必要。

- CCS事業実施に適した法体系に関する調査、検討
- 事業実施を支援する制度措置の検討

（注）これらの課題以外にも、今後検討を深める中で生じる様々な課題について対応策を検討する必要がある。

【課題①】CCUS/カーボンリサイクルの技術的確立・コスト低減

【分離回収】 基礎技術は確立。CO2回収率の向上と低コスト化、エネルギー効率の向上が課題。

【輸送】 日本では船舶輸送が不可欠であり、世界でも実施例が少ない。

【貯留・モニタリング】 陸域貯留、陸域からの海底下貯留技術は実証済み。海上から海底下貯留技術の確立。

【カーボンリサイクル】 コンクリート、燃料、化学品等の分野で概ね基礎技術を確立、実証を開始。一部、実用化済。

分離・回収

輸送

貯留

カーボンリサイクル

分離・回収技術のコスト高・性能の不足

→コスト低・性能向上のための技術開発

→新たな分離・回収方法の開発
(固体吸収、膜分離等)

排出源ごとに排ガス組成が異なる バイオマスや大気中からの回収 によるネガティブエミッションの必要性

→様々なCO2回収源ごとに最適な分離・回収技術を確立

排出地・貯留適地を結ぶための 長距離輸送技術が未確立

→低温・低圧下での液化CO2船舶輸送技術の開発

貯留効率の向上・低コスト化、 モニタリングの精緻化・自動化・低コスト化

→安全・安心かつ経済的な掘削・貯留・モニタリング技術の開発

陸上圧入適地が限定的

→海上からの海底下の貯留技術の確立

◆化学品

触媒の転換率、収率、生産性の向上

◆バイオジェット燃料

CO2の吸収効率の向上、藻の増殖の安定化

◆メタン

触媒の耐久性の向上、適切な熱制御プロセスの構築

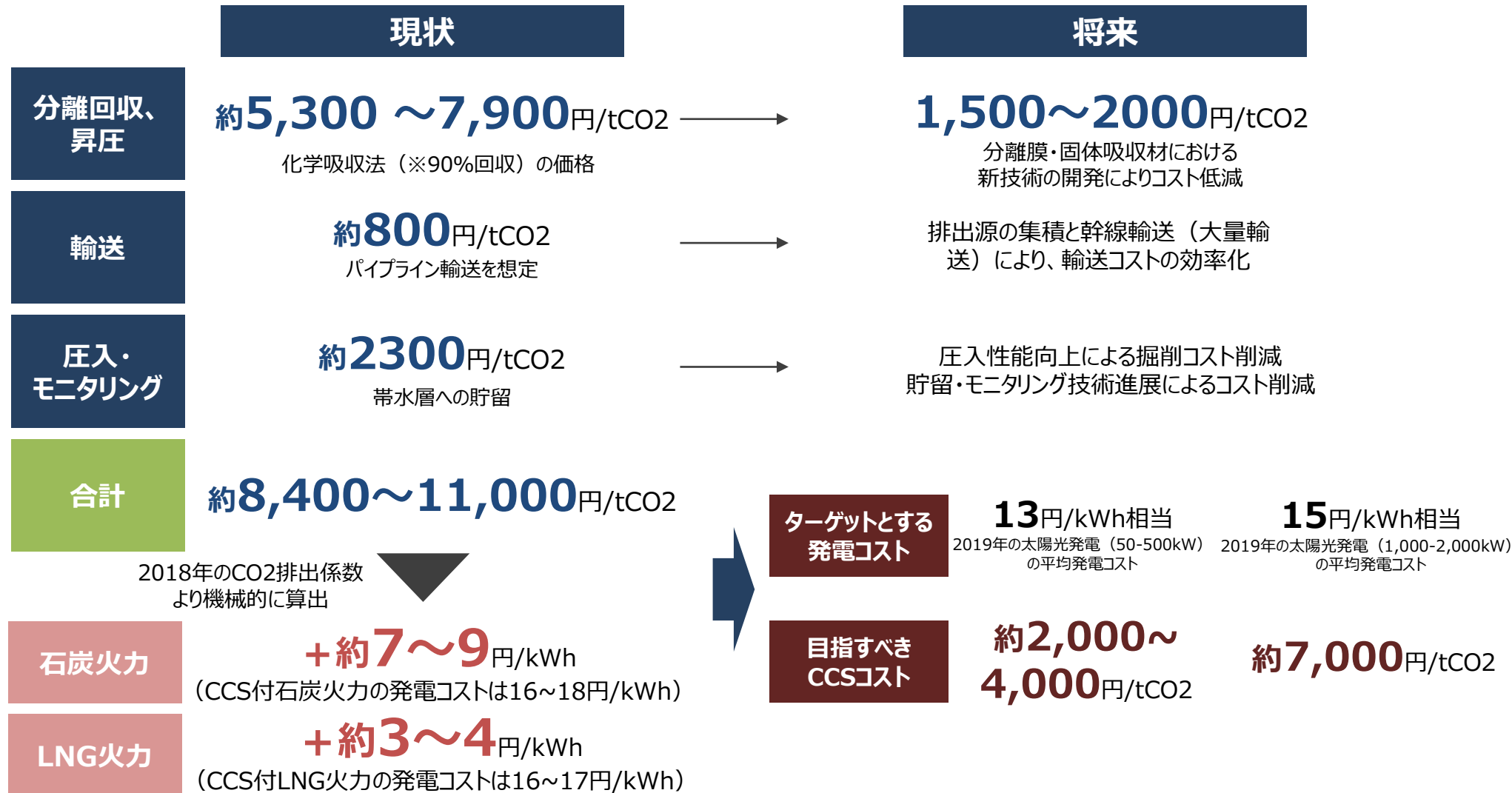
◆コンクリート

CO2吸収量の向上、防錆性能の開発

官民の役割・コスト分担を含めた事業環境の確立

【課題①】CCUS/カーボンリサイクルの技術的確立・コスト低減 —CCS—

- 火力発電に対して、足下のCCSコストによる価格上昇は石炭火力：約7~9円/kWh、ガス火力：約3~4円/kWh。例えば化石+CCSの発電コストを足下の太陽光以下の価格水準とするためには、CCSコストを半分以下に低減する必要がある。



※ 現状の各CCSコストはRITEのH25試算結果
 ※ 石炭・LNG火力のCO₂排出係数は総合エネルギー統計、環境省2018年度の温室効果ガス排出量（確報）より算出、発電コストはコスト検証WGの2020年値を採用

※ 左記の発電コストから機械的に試算、資本費・燃料費の将来的な変動や効率向上などは織り込んでいない点に留意

【課題①】 CCUS/カーボンリサイクルの技術的確立・コスト低減 ―カーボンリサイクル―

- 現時点で、カーボンリサイクル製品の多くは、国際的にみても研究開発・実証段階であり、既存製品と比べて高コスト。
- 社会実装に向けて、引き続き、研究開発・実証によるコスト低減、生産性向上や製品の性能向上が求められる。

		現状	既存の同等製品の価格
化学品	パラキシレン	数万円/kg (※想定値)	約100円/kg
燃料	合成燃料 (e-fuel)	— 研究開発初期段階よりコストは未計算	約100-150円/L
	ジェット燃料	約1,600円/L	100円台/L
	メタン	約350円/Nm3	約40-50円/Nm3
鉱物	コンクリート	約100-150円/kg	30円/kg

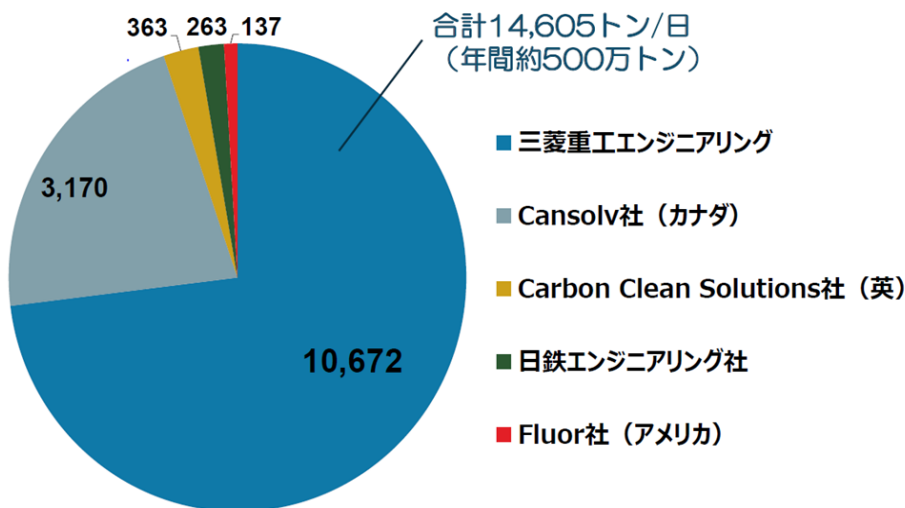
✓技術開発（触媒の開発等）
✓大規模実証
✓公共調達による販路拡大
（需要増による単位当たりコスト減）等

(参考) 分離回収技術の低コスト化に向けた課題

- CO₂分離・回収分野の国内技術力は優位性がある。
 - － 高濃度CO₂排出源を対象に、化学吸収法を商用化済。排出源に合わせた効率化・大規模化が課題。
 - － 三菱重工エンジニアリングは、世界最大の回収能力（～5000t/day）を誇る分離回収設備を商用化
- 世界的にも大規模なプロジェクトの進展とともに、コスト低減、製品競争力確保に向けたイノベーションが加速。

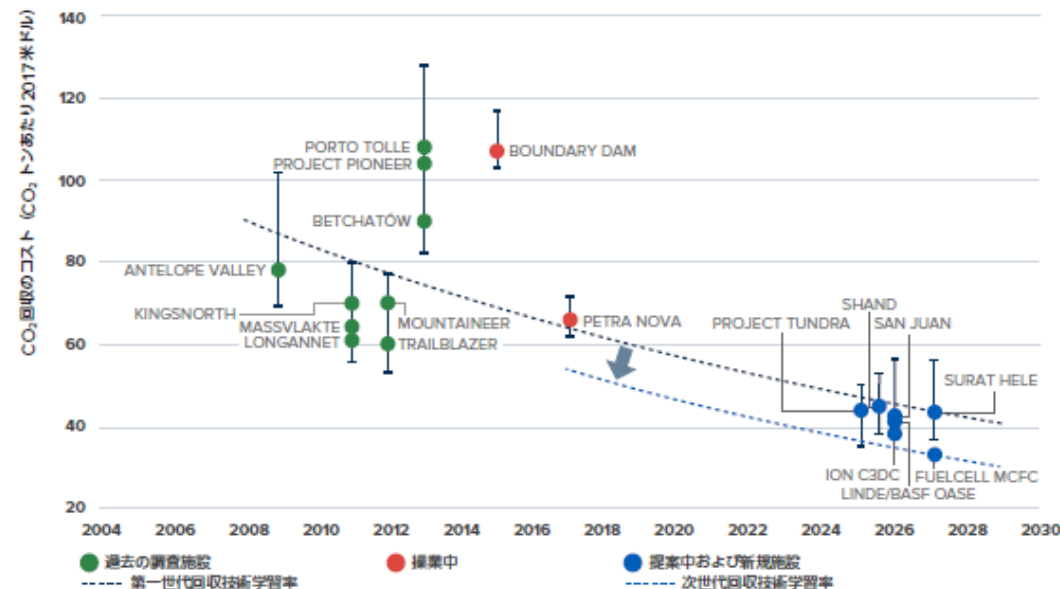
CO₂回収プラント実績

- 世界の排ガスからのCO₂回収プラント実績（回収量：トン/日）※1
（2000年以降計、建設中含む）



出典：グリーンイノベーション戦略推進会議資料より 三菱重工エンジニアリング発表資料

世界の大規模プロジェクトの進展とCO₂分離・回収コスト



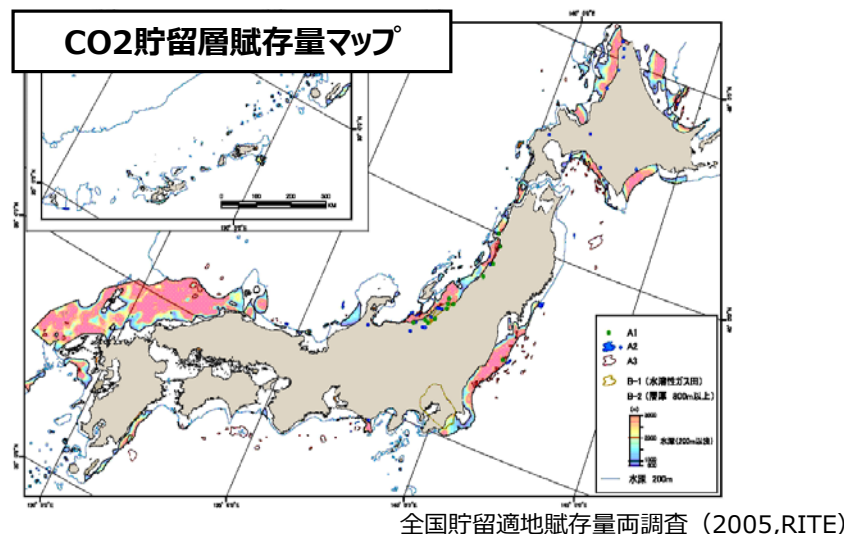
- 世界的にも大規模プロジェクトの進展とともにCO₂回収コストは着実に低下

出典：GCCSI

(参考) 輸送技術の課題

- 日本では、貯留可能性が大きい地域が日本海側に多いと評価。一方で、排出源は太平洋側に集中しており、排出源と貯留適地が近接しているとは限らず、排出源と貯留地の柔軟性確保の観点からも、長距離輸送手段（船舶輸送技術）の確立が必要。
- 大量輸送により低コスト化が実現。長距離輸送では船舶輸送が低コストになり、将来の大規模輸送のためには、「低温・低圧」条件下での輸送技術の確立が課題。

輸送の柔軟性の確保

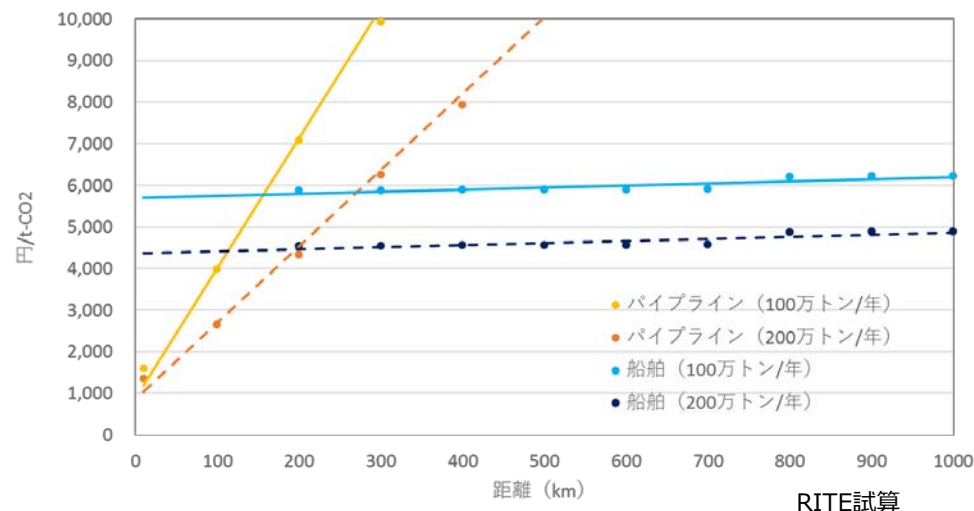


【排出源と貯留可能性の評価】

日本では、貯留可能性が大きい地域が日本海側に多いと評価。一方で、排出源は太平洋側に集中しており、排出源と貯留適地が近接しているとは限らない。

→排出源と貯留地の柔軟性確保の観点からも、船舶輸送による、長距離輸送技術の確立が必要。

輸送量・輸送距離とコストの関係



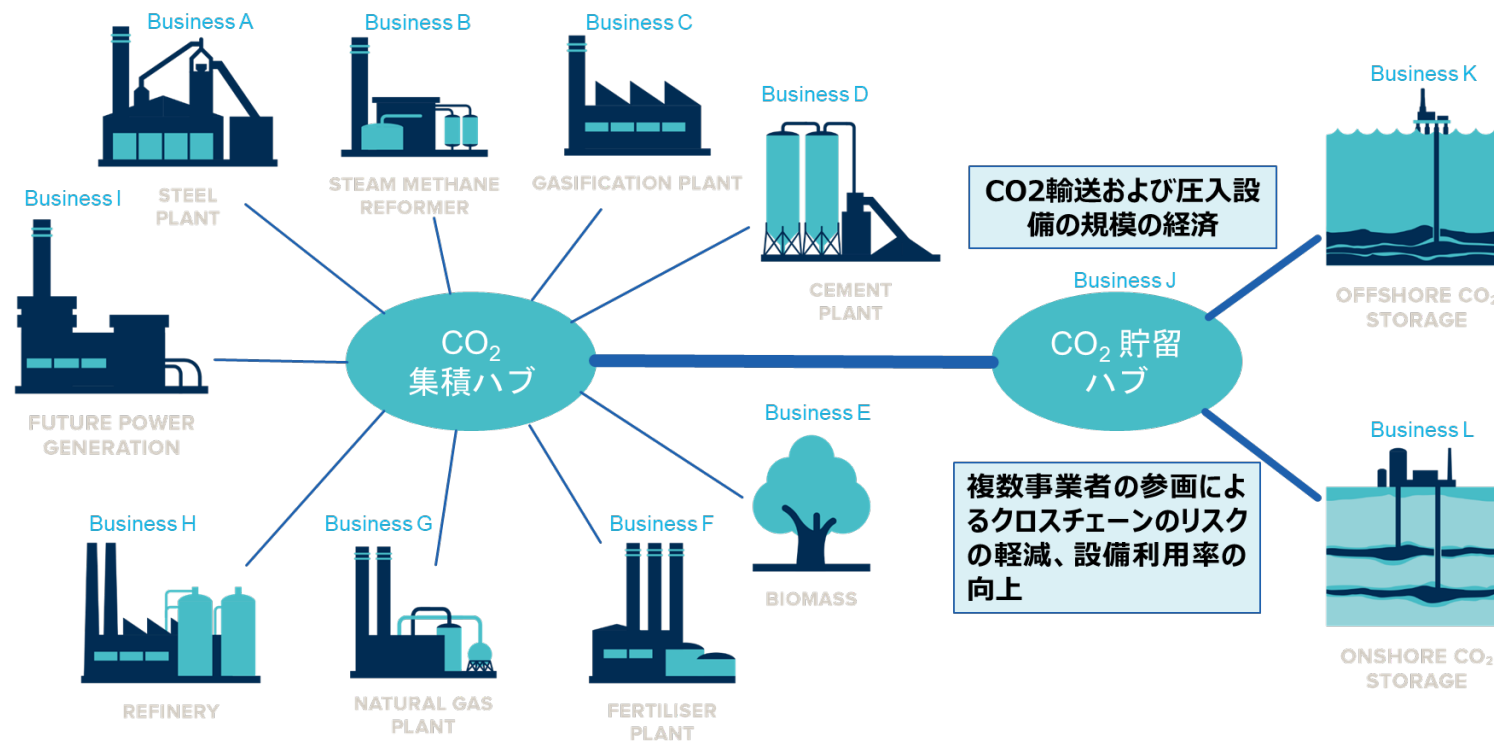
【輸送量】大量輸送になると、パイプライン・船舶輸送ともにコストが低減

【輸送距離】短距離輸送ではパイプラインが優位。200kmを超える、長距離輸送になると、船舶輸送の方が低コスト。

→将来の輸送船の最適設計のためには、「低温・低圧」条件下でのCO2の船舶輸送が課題。

(参考) 輸送の低コスト化 (ハブ&クラスター)

- 排出源と貯留地の1対1の輸送は非効率であるため、輸送の低コスト化のためにハブ & クラスターの構築が必要。
 - － 排出源の集積 (排出源のクラスター化)
 - － CO2集積ハブとCO2貯留のハブを形成
- これにより各地に輸送設備 (都市近郊にある大規模排出源を結ぶパイプライン網、輸送船舶基地) が整備され、様々な排出源からのCO2処理が可能となる。
- その結果、規模の経済による全体のコスト低減や、複数事業者の参画に伴うリスク低減が期待される。



(参考) 貯留・モニタリング技術の課題

- 苫小牧実証にて、貯留・モニタリングの一貫した技術を確立。
- 安全性・経済性向上に向け、貯留・モニタリング技術の研究開発が必要。
 - CO₂の状態・地層の安定性のモニタリング：高度な監視システム（光ファイバー技術）
 - 効率的なCO₂貯留：CO₂圧入量の増加、地下空間の高効率利用（マイクロバブル技術）

貯留

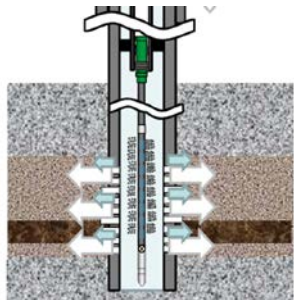
課題

貯留効率の向上、低コスト化

研究開発

マイクロバブルCO₂（微細気泡化）

CO₂をマイクロバブル化することで
貯留効率の向上、安全性の向上へ



①地層の狭い孔隙へのCO₂の浸透

- 地下地層空間の効率的な利用
- CO₂貯留効率の向上

②地層水へのCO₂の溶解が増加

- 貯留地下層内の圧力増加を抑制
- CO₂圧入時の安全性向上

モニタリング

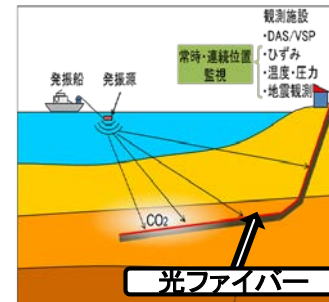
課題

モニタリングの緻密化、自動化、低コスト化

研究開発

光ファイバー観測

光ファイバーによる観測によって、堅牢な監視システム化や低コスト化へ



①測定ポイント（センサー）の飛躍的な増加

- 常時・連続監視 及びCO₂漏洩の早期検知
- 設置工事や観測設備費の抑制

②耐久性の向上

- 堅牢な監視システム
- 保守費のコストダウン実現

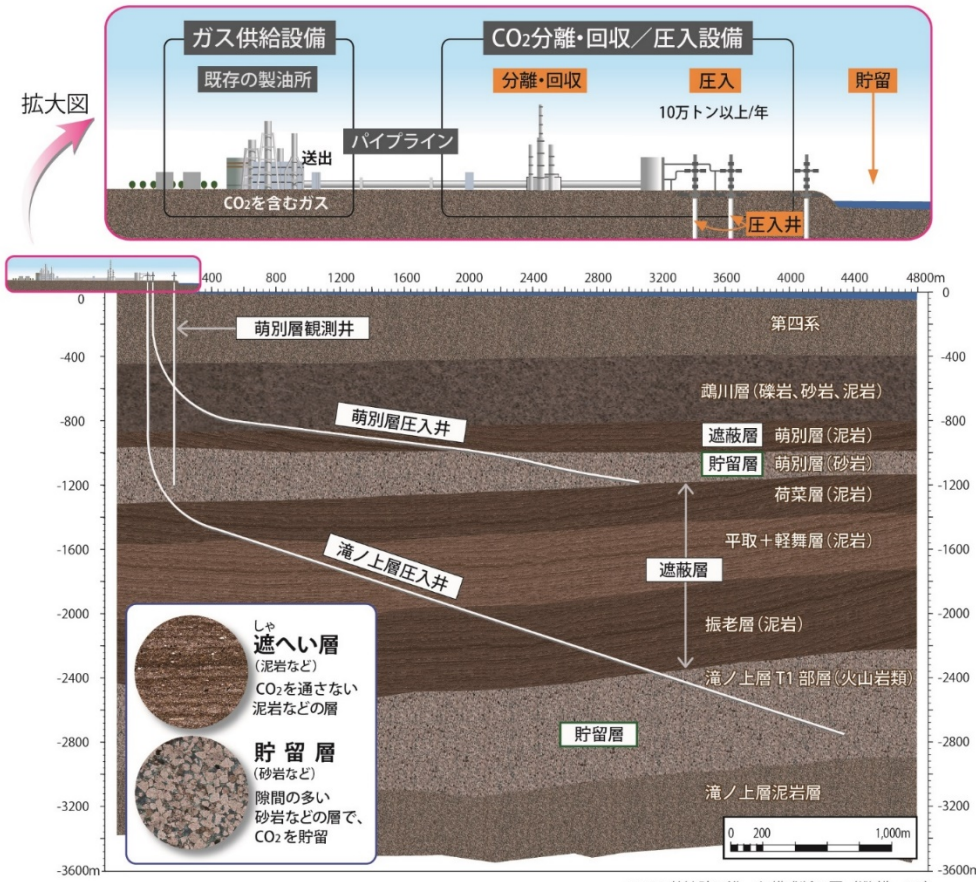
今後の課題

- 海上貯留技術の確立（陸域貯留・陸域からの海底下貯留技術（世界初）は確立。今後は海上貯留も必要）
- 貯留・モニタリング技術の向上（設置・回収作業の効率化、汎用性の向上、EORへの適用実証、データ蓄積）

(参考) CCSの取組 苫小牧実証

- 実用規模でのCCS実証を目的とした、我が国初の大規模CCS実証試験。
- 2012年度から2015年度に実証設備を建設し、2016年度からCO₂圧入を開始。地域社会と緊密に連携を取りつつ、2019年11月に累計圧入量30万トン进行達成。
- 都市圏近辺で地元の理解を得ながら、安全かつ安心に操業を完了できたのは世界でも有数の事例。

苫小牧CCS実証試験の全体像

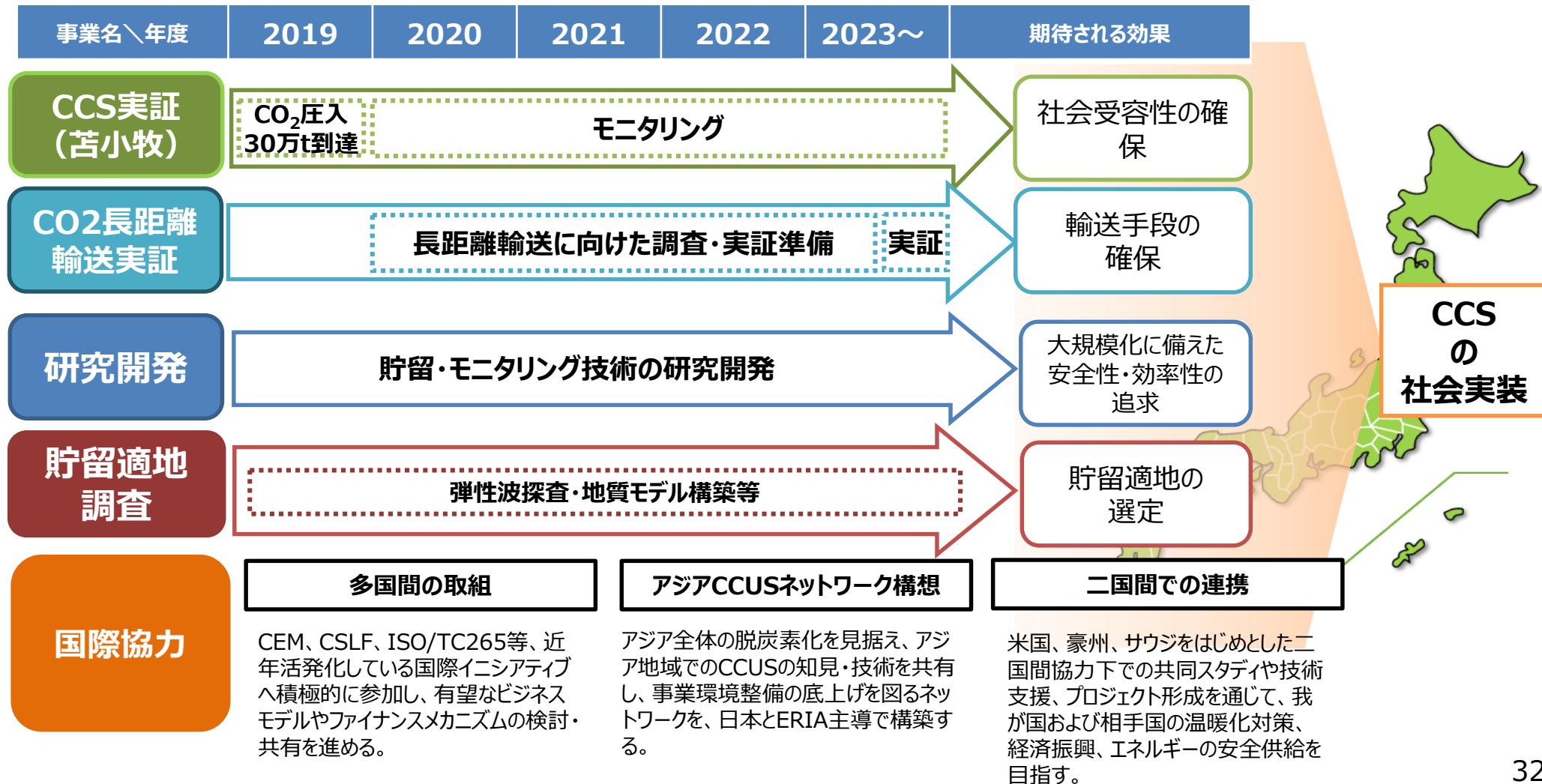


苫小牧CCS実証試験の施設の概要



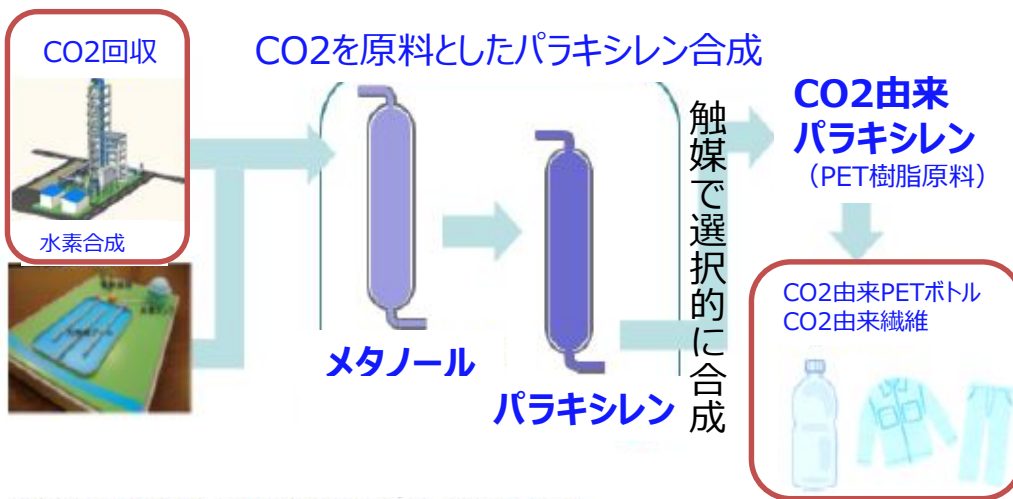
(参考) CCSに係る取組と今後の方向性

- パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略に沿って、CCS技術の2020年頃の実用化、2030年までの商用化、社会実装を見据え、
 - ① 苫小牧における大規模CCS実証、② CO₂長距離輸送実証、③ カーボンリサイクルとの連携、④ 貯留・モニタリング技術の研究開発、⑤ CO₂の貯留適地の調査を実施



(参考) カーボンリサイクル技術の課題事例

- （原油由来ではなく）CO₂を原料とした**パラキシレン製造技術の開発**
（※パラキシレンは、PETやポリエステル繊維の原料）
 - （CO₂から合成した）メタノールから、**パラキシレンを選択的に合成する（収率を上げる）触媒**及び合成プロセスを開発。
- 【課題】コスト低減、価値創出



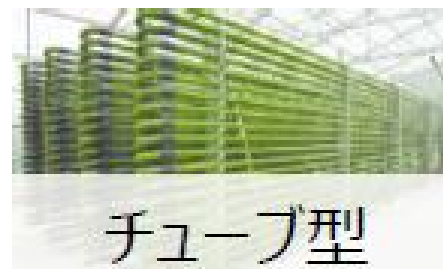
実施体制
川崎重工業、大阪大学

実施期間
2020年～2024年度

主な開発目標
・パラキシレン 1 t を製造する際に排出されるCO₂の量を 1 t 以下に低減可能なプロセスの構築
（従来法のCO₂排出量は約 2.7 t）

- 微細藻類**に集中的にCO₂を吹き込み、**効率的に光合成**させる基盤技術の確立及び標準化（藻類を原材料として、**バイオジェット燃料**等を製造）
- ①培養・分析条件を比較検証、標準化・体系化する**テストベッドを整備・実証**。
 - ②上記①により**標準条件を策定**。
- 【課題】コスト低減

① テストベッドの整備



② 標準条件の策定

環境・気候、培養試験、分析等における標準条件を策定。

実施体制
日本微細藻類技術協会
（ユーグレナ、IHI等）

実施期間
2020年～2024年度

開発目標
・**燃料の生産量**
数kL/年
→2030年：数百～千kL/年
（従来の**1,000倍**）
・**CO₂の吸収量**
10tCO₂/年・ha
→2030年：12～13tCO₂/年・ha
（従来の**1.2～1.3倍**）

(参考) カーボンリサイクルを拡大していく絵姿 (カーボンリサイクル技術ロードマップ)

CO₂利用量

フェーズ1

- カーボンリサイクルに資する研究・技術開発・実証に着手。
- 特に2030年頃から普及が期待できる、**水素が不要な技術や高付加価値製品を製造する技術**に重点。

フェーズ2

- 2030年に普及する技術を低コスト化。
- 安価な水素供給を前提とした2050年以降に普及する技術のうち、**需要の多い汎用品**の製造技術に重点。

フェーズ3

- 更なる低コスト化。

2030年頃からの消費が拡大

- 化学品；ポリカーボネート 等
- 燃料；バイオジェット燃料 等
- 鉱物・コンクリート；道路ブロック 等

2030年頃から普及

- 化学品
ポリカーボネート 等
- 燃料
バイオジェット燃料 等
- 鉱物・コンクリート
道路ブロック 等

※水素が不要な技術や高付加価値な製品から導入

2050年頃から普及

- 化学品
汎用品（オレフィン、BTX等）
- 燃料
ガス・液体（メタン、合成燃料）
- 鉱物・コンクリート
汎用品

※需要が多い汎用品に拡大

化学品（ポリカーボネート等）

ポリカーボネートはCO₂排出量の更なる削減

燃料（バイオジェット燃料等）

現状価格から1/8～1/16程度に低コスト化

鉱物・コンクリート（道路ブロック等）

現状の価格から1/3～1/5程度に低コスト化

水素

20円/Nm³（プラント引き渡しコスト）

CO₂分離回収技術

低コスト化

現状の1/4 以下

現状

2030年

2050年以降

貯留適地候補の調査

- CO₂の貯留に適した地層や構造が存在。
- これらの条件を満たす適地を段階的に調査し、貯留可能見込量を精査。
- また、CCSに対して地域の経済性・社会需要性が認められることが重要。
- これらを踏まえ適地候補の選定を進める。

適地条件

- ❑ 遮蔽層に覆われ、二酸化炭素が地下に留まる地質構造断層が必要。
- ❑ また、二酸化炭素が漏洩する経路がなく、過去に周辺で地震が集中して発生していないことが必要。

貯留適地調査

文献調査

弾性波探査調査

調査井掘削

総合評価

排出源からの距離等の経済性や社会的受容性を考慮して、貯留候補地を決定。

CCS拡大に向けた設備調達

- 大量のCO₂貯留には、輸送ネットワークの整備と、圧入井を整備する必要がある。
- 排出源と貯留地が離れている中、柔軟な輸送ネットワークの構築が必要。
- 圧入井は1本あたりの年間貯留量に限界があるため、圧入井の本数の整備が必要。

輸送ネットワークの構築

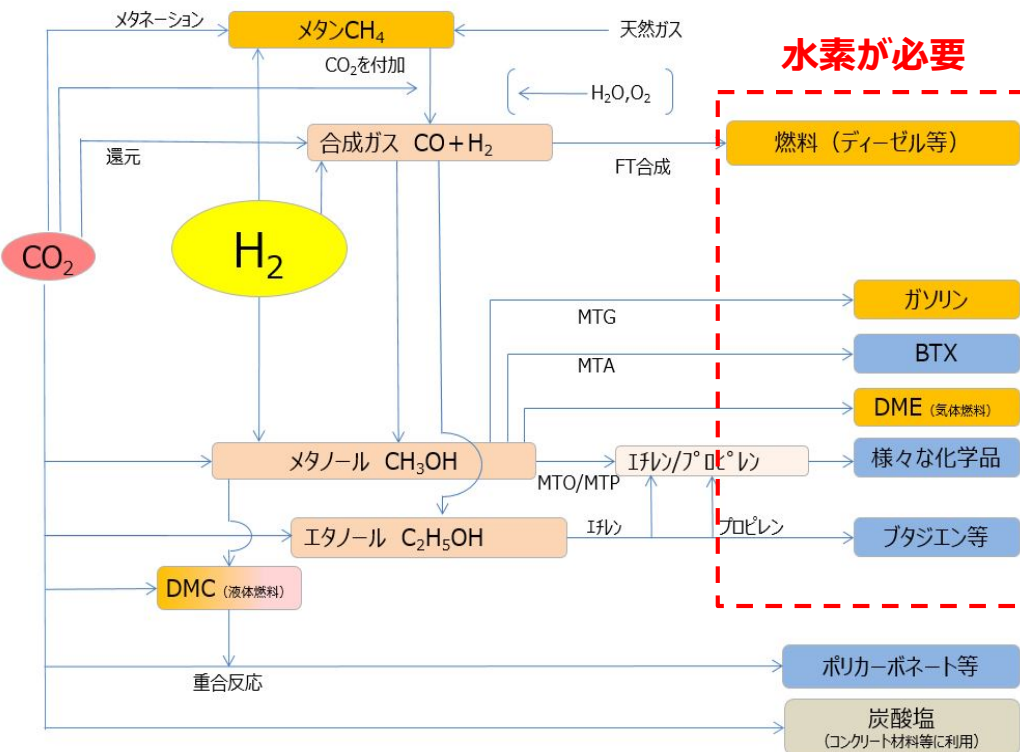
- 排出源と貯留地が離れており、柔軟性確保のために日本では船舶輸送が必要。
- 船舶による年間CO₂輸送量は、1隻当たりの年間輸送量と船舶数により決まる。
- 1隻の輸送量は低温・低圧の技術開発が進展した場合、10万トン・CO₂/年・隻程度と想定される。
- 例えば、0.5億トン/年の船舶輸送を実施するためには、2050年に500隻が必要。
※性状に近いLPG船の国内輸送は250万t/年を30隻で運用。

圧入井の整備

- 年間のCO₂貯留量は、圧入井1本あたりの年間の貯留量と圧入井の本数により決まる。
- 圧入井1本あたりの年間の貯留量は、地層の圧力限界などの関係で条件の良い貯留地でも100万t・CO₂/年程度。
- 例えば足下の井数と同水準の圧入井を2050年に200本実現した場合、圧入レートによるが約0.5～1億トン貯留可能。
※足下の油井数は77本、ガス井本数は104本

大量の水素調達

- CO₂と水素を結合させることで、化学品・燃料等の炭化水素を製造。
- コンクリート、燃料、化学品等の多様な分野においてカーボンリサイクル技術を確認・社会実装するためには、**大量かつ安価な水素調達が必要**。



製品の用途拡大

- 現時点では、CO₂吸収型コンクリートは鉄筋の錆につながるため鉄筋構造物には使用が困難であるため、現行製品の**用途は（鉄筋を使わない）道路・舗装ブロックに限定**。更なるポテンシャル拡大には用途拡大のための研究開発が必要。

◆ CO₂吸収型コンクリートの用途例

道路ブロック



型枠



舗装ブロック



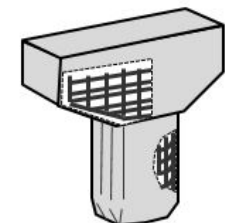
用途拡大の
技術開発



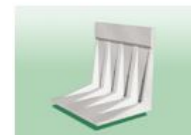
ダム



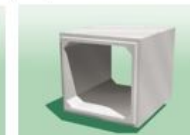
河川構造物



構造物の梁



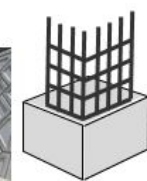
宅地造成用等のL字擁壁



共同溝・地下道等のボックスカルバート



護岸ブロック



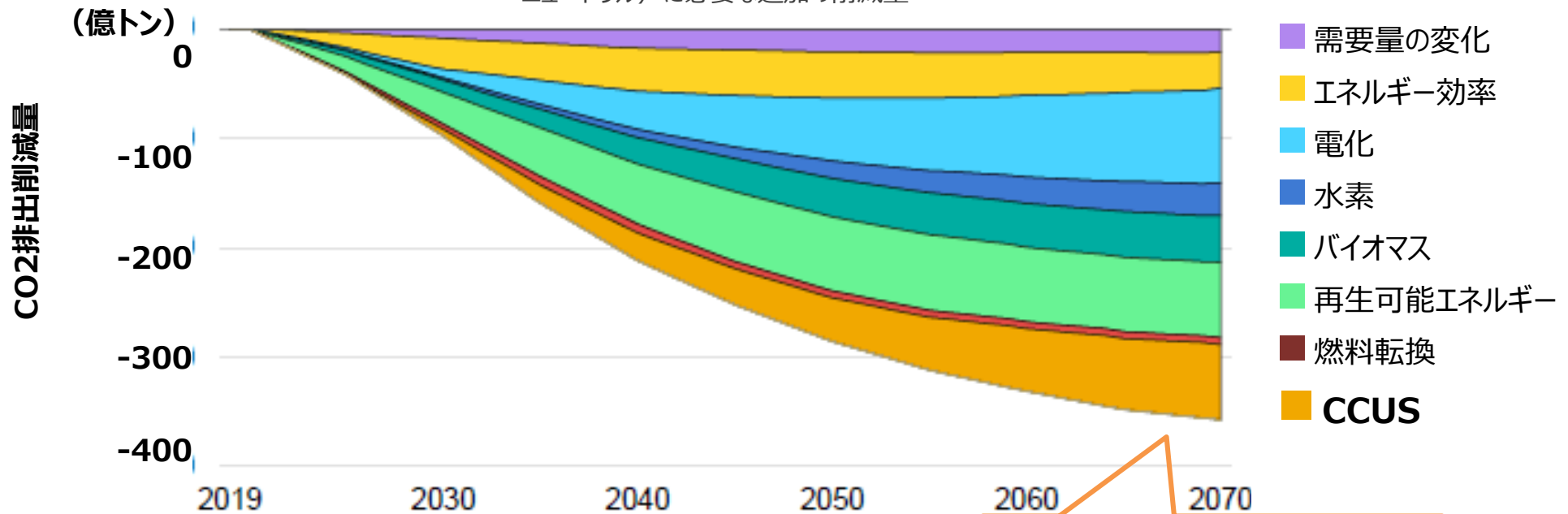
構造物の柱

(参考) CCUSの削減貢献度

- IEAによると、世界のカーボンニュートラル達成時におけるCCUSのCO₂削減貢献量は全体の約19%に当たる約69億トン/年。
- 日本の足下のCO₂排出量は世界全体の約3.5%、この比率でCCUS削減貢献量を按分すると約2.5億トン/年。

世界のエネルギー起源CO₂排出削減貢献量

※パリ協定に基づいて各国が現在表明している削減目標に基づく排出量から、2100年までに世界の気温上昇を**2度以内**とする場合（2070年にカーボンニュートラル）に必要な追加の削減量



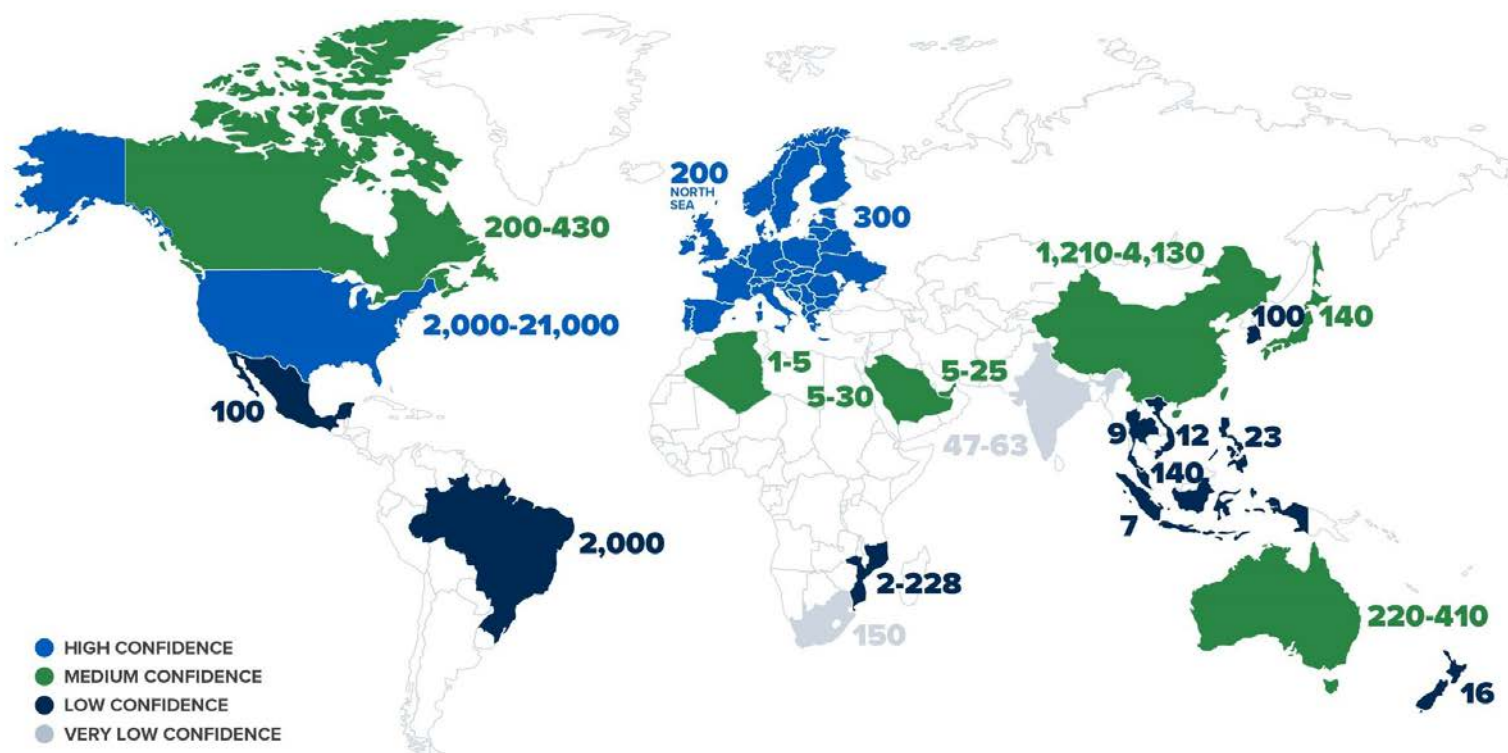
出典：IEA “Energy Technology Perspectives 2020” Figure2.2

(参考) 世界のCO₂排出量に占める日本の割合約**3.5%**
CCUS削減貢献量69億トン/年をこの比率で按分すると約**2.5億トン/年**

(参考) 海外の貯留ポテンシャル

- GCCSI (Global CCS Institute) の調査によると、世界では約 7 兆トン以上の貯留ポテンシャルが存在。※各国研究機関や国際機関の公表データを基に試算
- その中でも、東南アジア地域にはポテンシャルが多く存在し、安価に貯留することができるCCS + EOR (Enhanced Oil Recovery) やEGR (Enhanced Gas Recovery) が可能な地域が多い。他国では廃ガス田・廃油田などの再利用も見られる。

世界の貯留ポテンシャル



【課題④】CCS事業環境の整備

- CCSの社会実装に向けては、以下のような観点から事業環境整備が必要。

(1) **CCSの事業実施に即した法体系**

現在は高圧ガス保安法、労働安全衛生法、ガス事業法、鉱業法、鉱山保安法、海洋汚染防止法など複数の法規に対応する必要があり複雑。また、それぞれCCSを想定した内容ではないため、過剰な法規となっている可能性。

(2) **貯留地点及び貯留CO₂に係る長期的責任**

CO₂圧入後の長期的責任とその移管の主体が定められておらず、唯一海洋汚染防止法において、CO₂が地中貯留（廃棄）されている限り実施者が監視を続けることが示されている。（無期限の貯留サイト運用責任）

地上設備の適用法規（苫小牧CCSの事例）

事業者からの国への責任移管

責任移管までの経過期間

EU
CCS指令

最低**20**年
（加盟国によっては30年）

豪州
連邦法

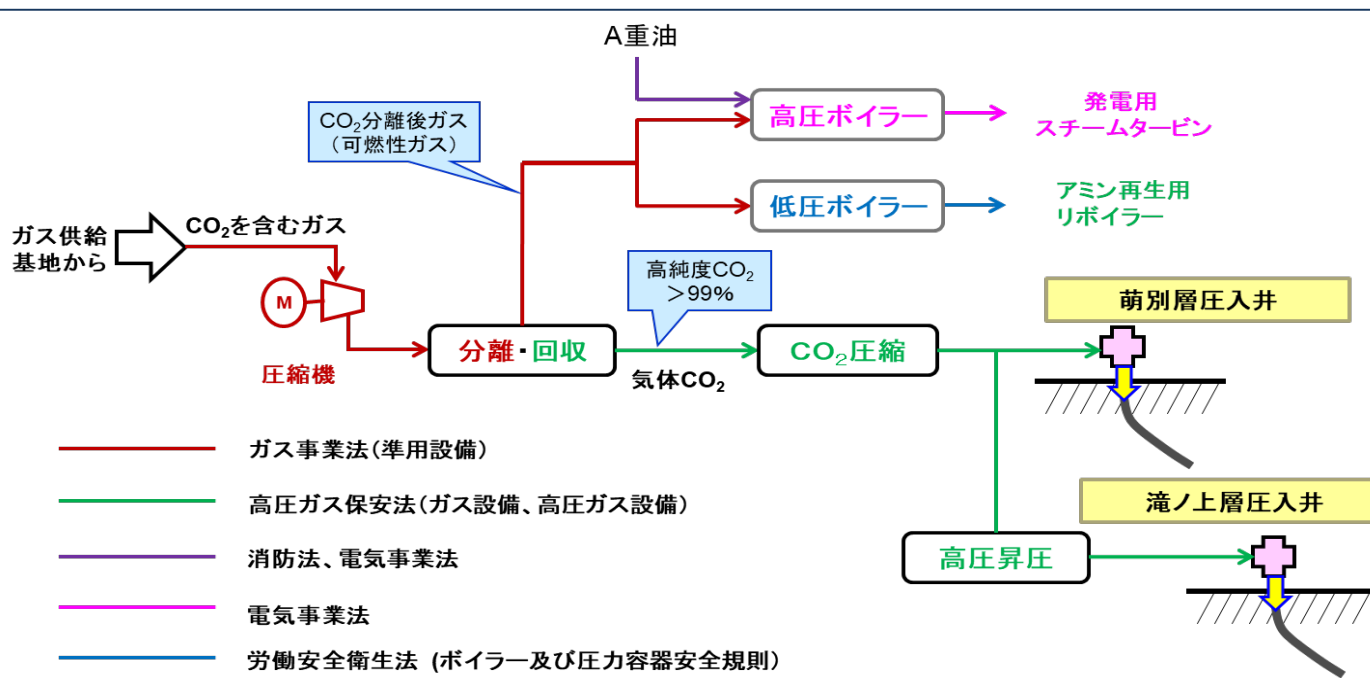
最低**15**年

米国
モンタナ州の例

最低**15**年

日本
海洋汚染防止法

無期限



(参考) 海外の事業環境整備の例

- 海外においては国や地方自治体政府の法令などによるCO2貯留に関する法的枠組みの整備が進んでいる。
- 法的枠組みの形式は多様であるものの、貯留層の探査・アクセス・利用に係る許認可、圧入期間中の圧入・貯留の管理、法的枠組みの移転に関する規定、モニタリング・報告・検証などの項目が含まれている。
- EUでは、CCSの法規制の基盤となるCCS指令を制定し、貯留サイトの寿命等事業環境を整備。各国、CCUSの事業環境整備を進めるべく、法整備を実施。

EU CCS指令 (2009)

- ・CCS技術に係る欧州委員会（EC）の法規制の基盤。
- ・EU排出量取引制度（EU ETS）や廃棄物枠組指令などを含む、より広範なEU環境法制
- ・EU域内におけるすべてのCO2貯留を対象とし、貯留サイトの寿命等、事業環境を整備。
- ・2011年6月25日までに各国の国内法にCCS指令の条項を組み込むよう義務付け
- ・各国はCCS指令の要件を、一定の裁量権を持って国内法規制に組み入れる

世界の主なCCS関連法規制

国名・襲名	規制・政策	施行	規制当局	対象範囲
英国	2008エネルギー法等	2008年	石油・ガス局	海域
オランダ	鉱業法、鉱業法令、鉱業規則	2011年	経済・気候政策省	陸海域
豪州	2008海域石油（温室効果ガス貯留）改正法	2008年	産業・科学・エネルギー資源省	海域
米国	地下圧入管理（UIC）プログラム	2010年	環境保護局	陸域

(参考) 世界の大規模CCSプロジェクト (操業中) のビジネスモデルの分類

- 世界では、現在、21件の大規模プロジェクトが稼働中。CO2回収追加コスト、EORによる収益の有無で分類すると、EORありで分離回収コストの低いプロジェクトが進行中。
- 日本では、EORが現実的でなく、発電分野においては、比較的分離回収コストも高く、検討されるビジネスモデルは追加でCO2を回収し、帯水層貯留を実施するパターンとなる。

分離回収コスト低い

分離回収コスト高い

EORあり

11 件

製造プロセスでCO2を回収 + CO2-EOR

- 天然ガス処理8件
- 肥料製造からの回収 3 件

5件

追加でCO2を回収 + CO2-EOR

- 水素製造 (エアプロダクト) ・石油製造
- **発電 (バウンダリーダム、ペトラノバ)**
- 製鉄 (アブダビ)

EORなし

4件

製造プロセスでCO2を回収 + 帯水層貯留

- 天然ガス処理 (スライプナー、スノービット、ゴルゴン)
- バイオエタノール (イリノイ)

1件

追加でCO2を回収 + 帯水層貯留

- **水素製造 (クエスト)**

CCSコスト小: 天然ガス処理、バイオエタノール製造、アンモニア・肥料製造⇒CO2の分離・回収コストがもともと製品価格に含まれているため追加費用とならない、または小さい

CCSコスト中: 石油精製の水素製造⇒燃烧排ガスに比べ、ガス中のCO2濃度が高く、中程度のコストで分離・回収できる

CCSコスト大: セメント製造、製鉄、**発電**⇒石油精製等プロセス中のガスに比べ、ガス中のCO2濃度が低く、CO2の分離・回収コストが大きい。

(参考) 世界の稼働中のCCSプロジェクト①

- 世界では21件のプロジェクトが稼働。21件のうち、天然ガス処理CCS：12件、アンモニア・肥料製造：2件、水素製造CCS：2件、バイオエタノールCCS：1件、発電CCS：2件、鉄鋼CCS：1件、石油精製：1件。

	プロジェクト名	国	CO ₂ 量/年	運転開始	排出源	回収対象ガス (回収タイプ)	輸送距離	輸送 タイプ	貯留 タイプ
1	Terrell Natural Gas Processing Plant (旧名Val Verde Natural Gas Plants) ¹⁾	米国	40 - 50万トン	1972	天然ガス処理	天然ガス	316 km	陸→陸 パイプライン	EOR
2	Enid Fertilizer CO ₂ -EOR ¹⁾	米国	70 万トン	1982	肥料製造	SMR合成ガス	225 km	陸→陸 パイプライン	EOR
3	Shute Creek Gas Processing Plant ¹⁾	米国	700 万トン	1986	天然ガス処理	天然ガス	最大460 km	陸→陸 パイプライン	EOR
4	Sleipner CO ₂ Storage	ノルウェー	100 万トン	1996	天然ガス処理	天然ガス	0 km	直接圧入	海底下 深部塩水層
5	Great Plains Synfuel Plant and Weyburn-Midale	カナダ	300 万トン	2000	合成天然ガス	石炭ガス化ガス	329 km	陸→陸 パイプライン	EOR
6	Snøhvit CO ₂ Storage	ノルウェー	70 万トン	2008	天然ガス処理	天然ガス	153 km	陸→海底 パイプライン	海底下 深部塩水層
7	Century Plant ¹⁾	米国	840 万トン	2010	天然ガス処理	天然ガス	64-240 km	陸→陸 パイプライン	EOR
8	Air Products Steam Methane Reformer EOR	米国	100 万トン	2013	水素製造	SMR合成ガス	158 km	陸→陸 パイプライン	EOR
9	Coffeyville Gasification Plant	米国	100 万トン	2013	肥料製造	石油コークス ガス化ガス	112 km	陸→陸 パイプライン	EOR
10	Lost Cabin Gas Plant	米国	90 万トン	2013	天然ガス処理	天然ガス	374 km	陸→陸 パイプライン	EOR
11	Petrobras Santos Basin Pre-Salt Oil Field CCS	ブラジル	約100 万トン	2013	天然ガス処理	天然ガス	0 km	直接圧入	EOR
12	Boundary Dam Carbon Capture and Storage	カナダ	100 万トン	2014	発電所	石炭燃焼排ガス (燃焼後回収)	66 km	陸→陸 パイプライン	EOR
13	Uthmaniyah CO ₂ -EOR Demonstration	サウジ	80 万トン	2015	天然ガス処理	天然ガス	85 km	陸→陸 パイプライン	EOR
14	Quest	カナダ	約100 万トン	2015	水素製造	SMR合成ガス	64 km	陸→陸 パイプライン	陸上 深部塩水層
15	Abu Dhabi CCS (phase 1 being ESI CCS Project)	UAE/Abu Dhabi	80 万トン	2016	製鉄 (DRI)	SMR合成ガス	43 km	陸→陸 パイプライン	EOR
16	Petra Nova Carbon Capture	米国	140 万トン	2017	発電所	石炭燃焼排ガス (燃焼後回収)	132 km	陸→陸 パイプライン	EOR

(参考) 世界の稼働中のCCSプロジェクト②

- 世界では21件のプロジェクトが稼働。21件のうち、天然ガス処理CCS：12件、アンモニア・肥料製造：2件、水素製造CCS：2件、バイオエタノールCCS：1件、発電CCS：2件、鉄鋼CCS：1件、石油精製：1件。

稼働中のプロジェクト（2）

	プロジェクト名	国	CO ₂ 量/年	運転開始	排出源	回収対象ガス (回収タイプ)	輸送距離	輸送 タイプ	貯留 タイプ
17	Illinois Industrial Carbon Capture and Storage	米国	100 万トン	2017	化学品生産 (エタノール)	穀物発酵ガス	1.6 km	陸→陸 パイプライン	陸上 深部塩水層
18	CNPC Jilin Oil Field CO ₂ -EOR (Phase III)	中国	60万トン	2018	天然ガス処理	天然ガス	53 km	陸→陸 パイプライン	EOR
19	Gorgon Carbon Dioxide Injection	豪州	340-400 万トン	2019	天然ガス処理	天然ガス	7 km	陸→陸 パイプライン	陸上 深部塩水層
20	Alberta Carbon Trunk Line ("ACTL") with Agrium CO ₂ Stream	カナダ	30-60 万トン	2020	肥料生産	SMR合成ガス	240 km	陸→陸 パイプライン	EOR
21	Alberta Carbon Trunk Line ("ACTL") with North West Sturgeon Refinery CO ₂ Stream	カナダ	120-140 万トン	2020	石油精製 (水素製造)	重質油ガス化ガス	240 km	陸→陸 パイプライン	EOR

建設中のプロジェクト

	プロジェクト名	国	CO ₂ 量/年	運転開始	排出源	回収対象ガス (回収タイプ)	輸送距離	輸送 タイプ	貯留 タイプ
22	Sinopec Qilu Petrochemical CCS	中国	40万トン	2020-2021	化学品生産	石炭ガス化ガス	75 km	陸→陸 パイプライン	EOR
23	Yanchang Integrated Carbon Capture and Storage Demonstration Project	中国	41万トン	2020-2021	化学品生産	石炭ガス化ガス	150 km	陸→陸 パイプライン	EOR
24	The ZEROS Project	米国	150万トン	2020年代後半	発電所	廃棄物ガス化ガス (酸素燃焼)	(検討中)	(検討中)	EOR

(注) SMR合成ガス：天然ガスの水蒸気改質によって製造される合成ガス（H₂, CO₂, CO, CH₄などから成る）

DRI：直接還元鉄（高炉によらず、鉄鉱石をH₂に富む合成ガスで還元する）

- 貯留目的のプロジェクトは、通常、深部塩水層と呼ばれる鹹水や飲料に適さない水で満たされた地層を対象とする。
- 深部塩水層のCO₂貯留容量は、油田と比べて格段に大きい。
- 大気中のCO₂排出量を削減するため、いずれは深部塩水層を対象としたプロジェクト数を増やしていく必要がある。

(出典) Global CCS Instituteの大規模CCUSプロジェクトデータに基づいて作成。

(参考) 海外におけるCCSのインセンティブ施策

- 各国で導入されているCCSインセンティブ施策は、大別すると「金銭的施策」、「事業リスク軽減施策」に分類される。
- 「金銭的施策」は、CCS導入に必要な資金の直接提供や、税制を優遇することにより間接的にコストを補填することで、高コストなCCSの導入の障壁を低くすることで導入を促すものである。
- 「事業リスク軽減施策」は、貯留したCO₂の漏洩リスクや貯留に伴う誘発地震への責任などCCS事業がもつリスクを軽減するために、複数の事業者・政府でシェアすることや、長期にわたる管理責任を政府が受け持つことで、CCS導入を促すものである。

	概要	具体的な施策	代表的な導入例
金銭的 施策	直接資金を提供したり、CCS導入に対して税制優遇をすることでコスト補填をし、CCS導入の障壁を下げ、導入を促す	建設・運用補助金	米国、カナダ、アルバータ州
		研究・開発資金支援	EU NER300、イノベーション基金（旧NER400）
		税制優遇	米国45Q
		債務保証	米国
		差額決済契約	英国電力市場
事業 リスク 軽減 施策	事業リスクを複数の事業者・政府でシェアしたり、長期にわたる責任を政府が受け持つことで、個別事業者が抱えるリスクを軽減しCCS導入を促す	リスクシェアリング	South West Hub CCS Project（豪）
		長期的責任移管	EU、米国、豪州

1. 電力部門の検討

再生可能エネルギー以外の課題と取り組み

a. 火力発電

- 化石+CCUS/カーボンリサイクル
- 水素・アンモニア

b. 原子力

ご議論いただきたいこと③（水素発電・アンモニア発電）

- 水素発電・アンモニア発電は既存の火力発電設備（専焼はガスタービン、水素混焼はLNG火力（ガスタービン）、アンモニア混焼は石炭火力（蒸気タービン））を改修することで実現できるため、既存アセットを有効に活用しつつ非化石電力を供給できる。これらいずれの技術についても、大型化・専焼化に向けて更なる技術開発が必要となるが、我が国が世界的に技術優位性を持つことから、産業振興の観点から取り組む意義も大きい。
- また、水素発電・アンモニア発電は大量に燃料を消費するため、他部門における利用が想定される水素・アンモニアのサプライチェーン構築及びコスト低減に資するという特徴も有する。
- 他方、水素発電・アンモニア発電のコストは燃料費用（水素価格・アンモニア価格）が支配的であり、安価かつ大量の水素製造・調達体制は未確立のため、その実現は技術的イノベーションに大きく依存する。

課題 1：水素発電・アンモニア発電技術の開発

課題 2：安価かつ大規模な水素・アンモニア調達

課題 3：非化石価値の埋没

- こうした背景を踏まえ、本日は、

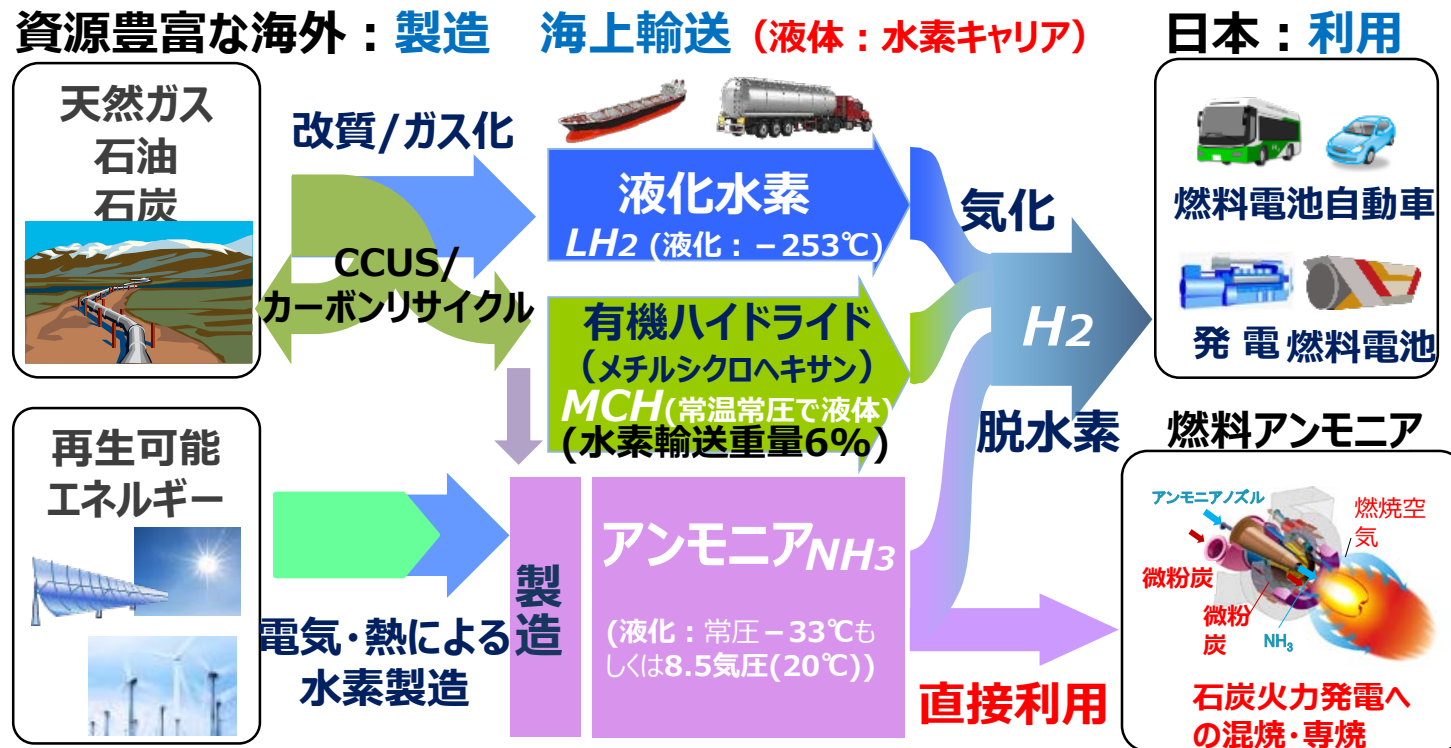
①水素発電・アンモニア発電をどう位置づけるべきか

②実現に向けた課題及び対応の方向性はどうあるべきか

等について御議論いただきたい。

水素及びアンモニア燃料の発電への活用

- 水素・アンモニアは燃焼してもCO₂を排出しないゼロエミッション燃料であり、火力発電への直接利用が可能。
- 発電においては大量の水素・アンモニアを調達する必要がある、基本的には資源が豊富な海外において製造し調達する事が合理的である。
- 水素は、現在FCV（燃料電池自動車）や石油精製プロセス等で利用され、今後は2030年の商用化を目指し、大規模な水素導入を可能とする国際水素サプライチェーン構築に関する技術開発等が行われている。船舶や航空機も含めた輸送分野、製鉄や化学といった産業分野と並び、発電は有望な利用先の一つ。
- アンモニアは、肥料を中心に原料アンモニア市場が存在しており、供給インフラには既存技術が活用可能。2020年代後半にも石炭火力発電所での混焼が可能となり、その後の普及、混焼率引き上げ、専焼化等を通じて、更なるカーボンニュートラルへの貢献が期待される。

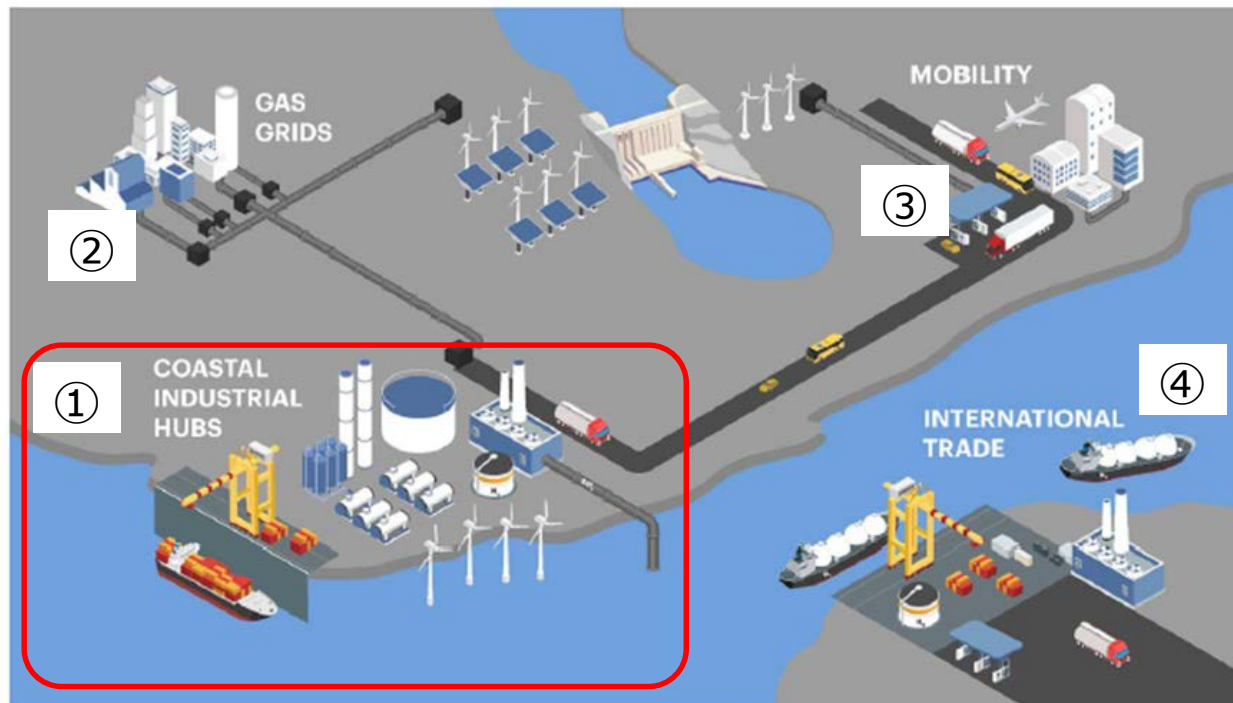


(参考) 地域における水素利活用の意義 (例：港湾地域周辺)

- 地域単位で集中的に水素を利活用することは、インフラ整備の必要性を最小限にし、効率良く大きな水素需要を創造することが可能。
- 例えば、IEAは水素レポートにおいて、石油精製や化学プラント等、大規模な水素需要家が集積する港湾地域周辺を水素利活用を促進することに適した場として挙げている。

【水素需要を創出する4つの足下の機会 (IEA水素レポートより)】

- ① 港湾地域周辺に立地する製油所、化学プラント、及び近隣の船舶、トラック等へのグリーン水素の供給
- ② 天然ガスパイプラインのような、既存のインフラを活用した水素輸送・化石燃料置換
- ③ 乗客や物品を載せて幹線道路を走る長距離乗用車やトラックやバス等の商用車
- ④ LNG市場の拡大の歴史に学び、国際海上輸送による水素取引の立ち上げ



水素発電・アンモニア発電 概要

	水素	アンモニア
概要	➤ 燃焼速度が比較的近いガス火力発電に水素を混入。水素の燃焼速度が速いため、その燃焼を制御する技術が必要。 ➤ 上記制御技術を使うことで、ガスタービンの水素専焼化も可能。	➤ 発電用バーナーの中心にある再循環領域（高温・低酸素）にアンモニアを一定速度で投入することで、アンモニアの分解及び還元反応を促進しつつ、アンモニアを燃焼。 ➤ アンモニアは燃焼速度が石炭に近いことから、石炭火力での利用に適している。
現状の取組	➤ 小型器（1MW）での専焼は現在実機で実証を開始し、大型器（数十万kW級）は30%の混焼率を達成するための燃焼器の技術開発が完了。 ➤ コストが下がれば、2050年時点での有望な電源となり得るため、JERAも2030年頃からの混焼開始を目指すことを表明。他電力会社も活用に関心。	➤ NOx発生抑制が課題であったが、混焼バーナーの開発に成功。現在大容量での混焼試験を実施中、2021年度から2023年度まで、実機を活用した20%混焼の実証を予定。 ➤ こうした取組も踏まえ、JERAが2020年代後半からの火力発電での燃料アンモニアの活用に向けた計画を表明。その他電力会社も活用に関心。
強み	➤ 既存のガスタービン発電設備のタービン部など多くの設備をそのまま利用可能、アセットを有効活用出来る。 ➤ 調整力、慣性力機能を具備しており、系統運用安定化に資する。 ➤ 一カ所で大規模な水素需要を創出し、水素の活用を更に高めるための国際サプライチェーン構築に大きく貢献出来る。 ➤ 水素専焼の技術開発に見通し有。	➤ 既に肥料用途を中心にアンモニア市場が存在。既存の製造・輸送・貯蔵技術を活用したインフラ整備が可能。 ➤ -33℃（常圧）で液化が可能であるため、輸送や貯蔵コストの抑制が可能。
弱み	➤ 液化水素の場合、脆化に加え、極低温という厳しい環境に耐える材質を使う必要。 ➤ MCHやアンモニアを水素キャリアとして使う場合、脱水素行程でもエネルギーを使う。	➤ 混焼率向上、専焼化にあたってはNOxの抑制技術、発電に必要な熱量を確保するための収熱技術が必要。 ➤ 毒性があるため、取り扱いには配慮が必要。

水素発電・アンモニア発電の実現に向けた課題と対応の方向性

課題

方向性

① 水素発電・アンモニア発電技術の開発

【水素】

- ガス火力への水素混焼、もしくは水素専焼達成のための基幹パーツは燃烧器。水素専焼でガス火力と同程度の発電効率を達成するための技術開発は現在実施中。
- 商用化の実現には混焼・専焼ともに安定燃焼性についても検証が必要。

【アンモニア】

- アンモニア発電については、燃料燃焼によるNOxの発生抑制が課題、実機による20%混焼の実証が必要。
- また、アンモニアは燃焼速度や火炎温度が低いため、発電に必要な熱量を確保するための収熱技術の開発が必要。

- 我が国が技術優位性を持ついずれの発電技術についても混焼・専焼の両機における実証を通じて技術を検証。
- アンモニアの20%混焼については、来年度より実機による実証を予定。

② 安価かつ大規模な水素・アンモニア調達

【水素】

- 発電分野では安価な水素を大量に利用するため、海外からのグリーン水素の輸入が前提となる。
- 海上輸送技術は実証段階であり、更なるサプライチェーンの大型化を通じたコスト削減を実施するには、超えるべきハードル（技術革新、大規模インフラ整備）が存在。

【アンモニア】

- 既に肥料用途を中心にアンモニア市場が存在し、技術的には既存の製造・輸送・貯蔵技術を活用したインフラ整備が可能。
- 他方、現在のアンモニアの世界での貿易量は限定的であり、燃料アンモニアの新たなサプライチェーンの構築が課題。

- 水素のサプライチェーン構築には技術実証を通じて設備の大型化・技術の検証を推進する必要。
- アンモニアのサプライチェーン構築にはファイナンス支援等で製造設備、輸送船舶、貯蔵設備の整備拡大を進める。

③ 非化石価値の埋没

- 仮に大型の商用サプライチェーンを確立したとしても、水素・アンモニアは化石燃料に当面は価格競争力を有さない。
- 現在はエネルギー供給構造高度化法等において、非化石エネルギー源として厳密に定義されていない。

- いずれについても非化石エネルギー源として定義することで、非化石価値を顕在化させ、既存燃料との価格差を埋める等により事業者の投資予見性を高める必要。

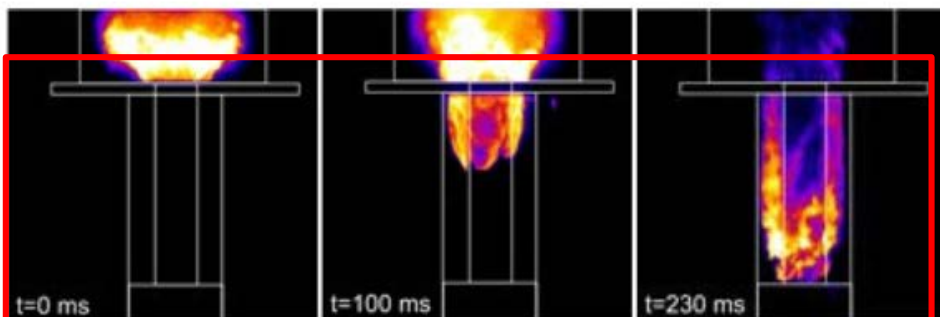
（注）これらの課題以外にも、今後検討を深める中で生じる様々な課題について対応策を検討する必要がある。

【課題①】水素発電の技術的な課題

- 水素火炎は、LNGに比較して**伝播速度が速く**、燃焼器内の火炎が、投入される燃料を伝って逆戻りしてしまう現象「**逆火**」が**起こりやすく**、**燃焼器の破損に繋がる**。
- そのため、空気と燃料を適切に混ぜる等の措置を講ずることで、「**逆火**」対策をしつつ、発電効率を既存の天然ガス並に高めることが求められ、**これらを両立させた専焼用の燃焼器の開発（マルチクラスタ方式）が必要**。



逆火の仕組み



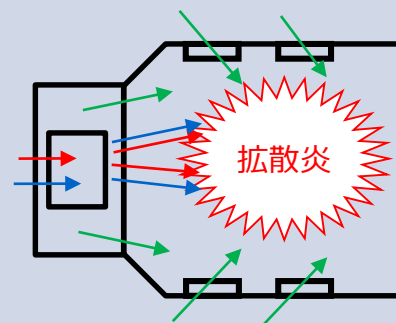
赤枠内：燃焼器内部

出典：University of Michigan at the 2014 University Turbine Systems Research Workshop

専焼用の燃焼器

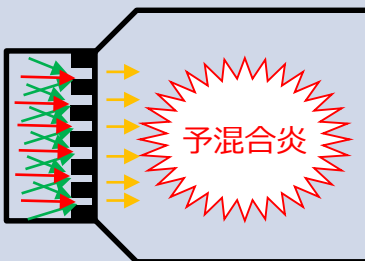
専焼用の燃焼器	
	マルチクラスタ方式
構造	
効率	効率低下なし

拡散方式(既存技術)



水噴射を行うため、温度低下(＝効率低下)

燃料 ■ 空気 ■ 水 ■ 混合ガス ■



NEDO支援で開発中

出典：三菱パワー

(参考) 水素発電の現状

- ①大規模火力発電級（500MW級）②地域における熱電供給のコジェネ発電（1MW級）のそれぞれの分野で技術開発・実証を実施。
- 技術力で先行している日本は、世界の水素発電実用化に向けた取組に貢献。

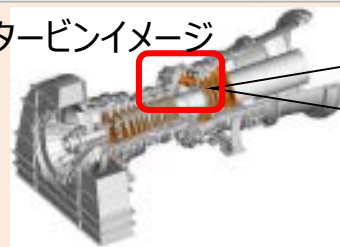
①大規模火力発電級（500MW級）のR&Dの流れ

既存大規模火力発電所における水素混焼のための技術開発を実施。2018年に水素混焼率30%を達成。

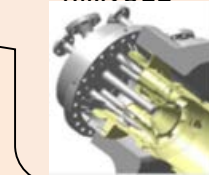


2020年より、水素専焼発電の技術開発を実施中。

ガスタービンイメージ



燃焼器



②地域における熱電供給のコジェネ発電(1MW級)のR&Dの流れ

水素を天然ガスに0～100%まで自在に混焼可能な技術を開発。2018年には水素専焼による市街地への熱電併給を世界で初めて達成。



2019年より、高効率な水素専焼発電の技術開発を実施中。



神戸市のポートアイランドに整備された水素発電施設（水素CGS）

③世界の水素発電の主な動き



三菱パワーは、オランダのマグナム発電所（天然ガス焚き）を水素焚きに転換するプロジェクトに参画。2025年頃に世界初となる大型水素専焼発電の商用運転を計画。

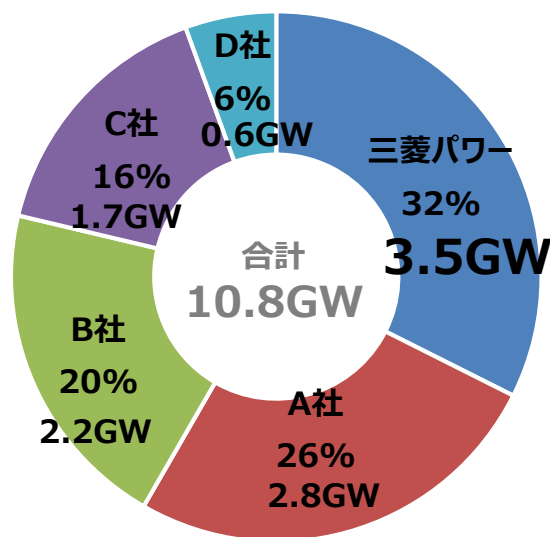


三菱パワーは、米国ユタ州において計画される大型水素発電プロジェクトで、GTを受注。同プロジェクトでは、2025年に水素混焼率30%で運転を開始し、2045年に100%専焼運転を目指す。

(参考) 水素発電の研究開発動向

- 高効率ガスタービンの主要メーカーは日米独の3社。
- 水素発電技術は、LNG焚のガスタービンの一部を改造することで水素の混焼/専焼を可能とする**既存のインフラを最大限活用可能な技術**。
- そのため、水素発電技術の展開においては、**その基礎となる高効率ガスタービンの展開が不可欠**。
- 日本メーカーは、**高効率ガスタービンの分野におけるシェアで首位を占めており、将来の水素発電技術の展開において優位な立場にある**。

世界のガスタービン市場の状況



2020年の上半期（1～6月）を通じて、ガスタービン世界市場（出力ベース）の10万kW以上のカテゴリーにおいて、トップシェアを獲得。

出典：米国マッコイ・パワー・レポート

日本メーカーの水素発電プロジェクトへの参画



オランダで計画される2025年頃の世界初となる大型水素専焼発電プロジェクト（440MW）日メーカーが参画。



シンガポールにおいて、日メーカーがデータセンター向けの水素発電を含むトリジェネレーションプラントの検討にかかるMOUを締結。



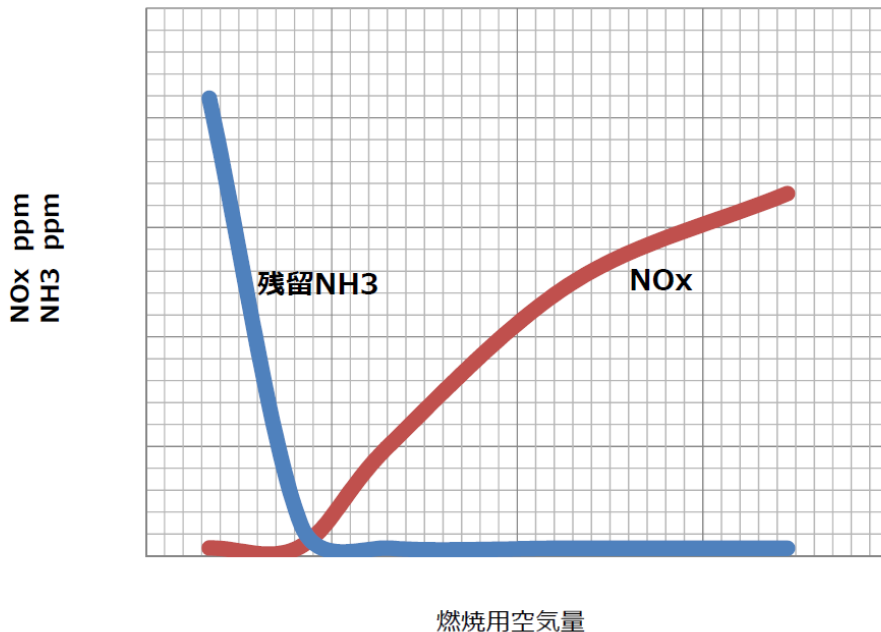
ユタ州において計画されるグリーン水素による大型水素発電プロジェクトで、日メーカーがGTを受注（840MW）。

その他、**ニューヨーク州、バージニア州、オハイオ州**にて計画される水素発電のプロジェクトに日メーカーが参画して受注に向けた協議を開始している。

【課題①】アンモニア発電（専焼）の技術的な課題

- アンモニアの燃焼時には、含有窒素が容易に酸化することで、窒素酸化物（ NO_x ）が発生。
→20%混焼時には技術的に抑制可能。他方、空気量が増えるにつれて NO_x は増加するため、混焼率向上（50%以上）や専焼化に向けた技術開発が必要。
- アンモニアの場合、メタンと比較して、燃焼速度、断熱火炎温度等が低く、燃焼の安定性確保が困難
→高い混焼率や専焼の場合には、燃焼の安定化に向けた収熱技術の開発が必要。

アンモニア燃焼に伴う NO_x の発生



出典：中外炉工業(株)

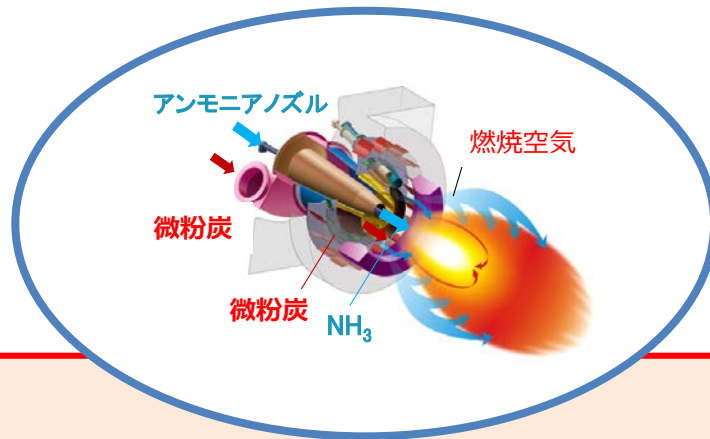
アンモニアと他の燃料の特性比較

燃料種	アンモニア NH_3	メタン CH_4	プロパン C_3H_8	水素 H_2
大気圧における沸点 (°C)	-33.3	-161.6	-42.1	-252.9
低発熱量 (MJ/kg)	18.6	50.2	46.6	120.4
可燃当量比範囲 (-)	0.63-1.40	0.50-1.69	0.51-2.51	0.10-7.17
最大燃焼速度 (m/sec)	0.09	0.37	0.43	2.91
最低自着火温度 (°C)	651	537	432	500
最高断熱火炎温度 (°C)	1750	1970	2020	2120

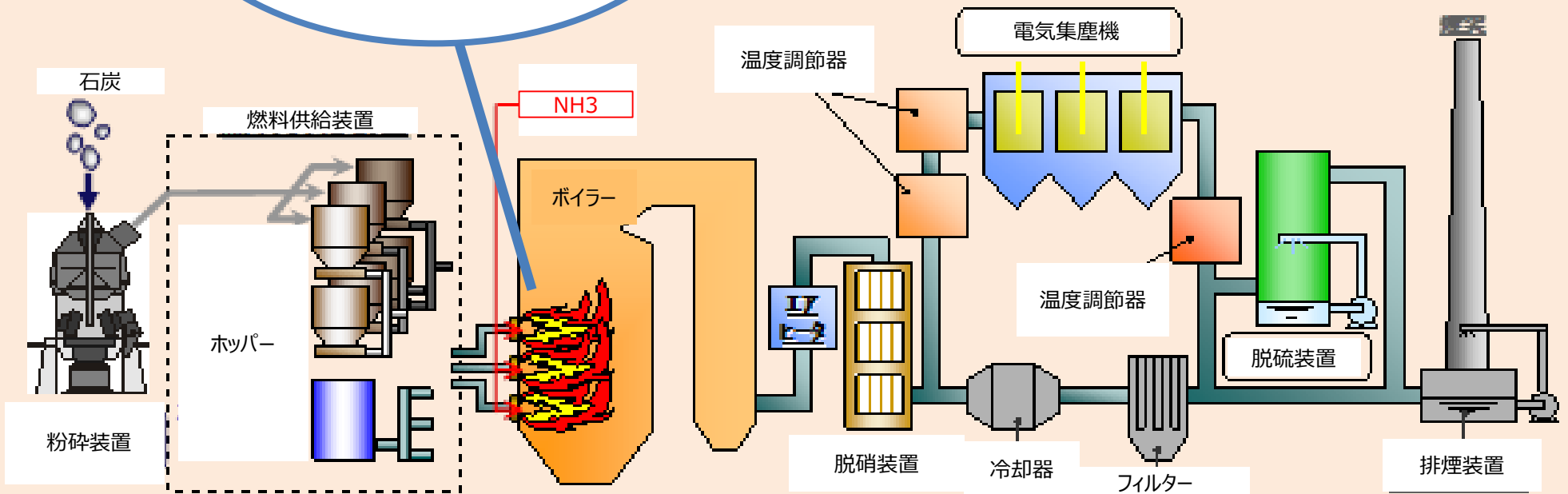
(参考) アンモニア発電 (混焼) の現状

- 微粉炭ボイラ用の単 (シングル) バーナーにアンモニアを20%混焼して、安定燃焼とNOx排出量の抑制に成功。微粉炭ボイラ (3段バーナー) での最適燃焼方法を検証中。
- 2021年度から、実機での実証試験を予定。
- アンモニア混焼発電は、世界的にも日本の官民がトップランナー。将来的には、アジアに加え、先進国にも展開可能。

混焼バーナー (イメージ)



大容量燃焼試験設備 (兵庫県相生市)



【課題②】安価かつ大規模な水素・アンモニア調達 -大規模調達-

- 水素のサプライチェーンは現状確立しておらず、技術開発を含めた取り組みが引き続き必要。
- アンモニアは既に海外サプライチェーンが構築されているものの、発電向けの需要規模を調達するためには、新たにサプライチェーンを構築する必要。

		水素製造	水素輸送・貯蔵	アンモニア製造	アンモニア輸送・貯蔵
現状の取組		➤ 褐炭 + C C S の実証を豪州で実施 ➤ 天然ガス由来の水素製造をブルネイで実証		➤ 技術的に確立済 ➤ サウジでのブルーアンモニア製造（天然ガス由来）の取り組み	➤ 豪州・ブルネイにおけるサプライチェーン構築の実証(液化水素、MCH)
		➤ 化石燃料（石炭、天然ガス）由来の水素製造方法は技術的に成熟 ➤ CCUSの更なるコスト低下、事業環境整備		➤ 十分な供給量を確保するサプライチェーン構築 ➤ 大規模化を通じた製造コストの低減	➤ 足下のアンモニア調達は大半が国内製造で、海上輸送サプライチェーンは限定的、拡大の必要

日ブルネイ水素SCPJ

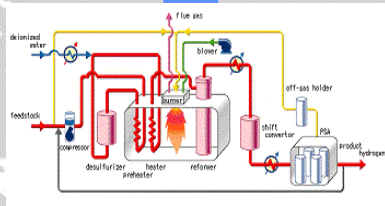
2020～



未利用ガス



水蒸気改質



水素化

(トルエン→メチルシクロヘキサン)



ケミカルタンカー



脱水素

(メチルシクロヘキサン→トルエン)



出典: AHEAD

日豪褐炭水素SCPJ

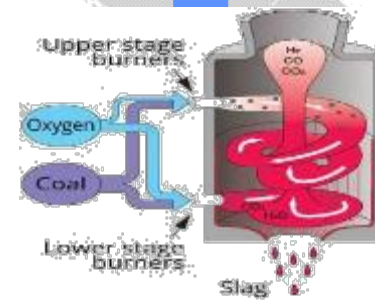
2020～



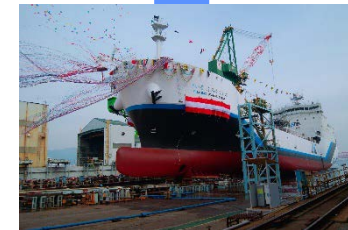
褐炭+CCS



ガス化
※IGCC技術利用



液化水素運搬船



液水荷役設備

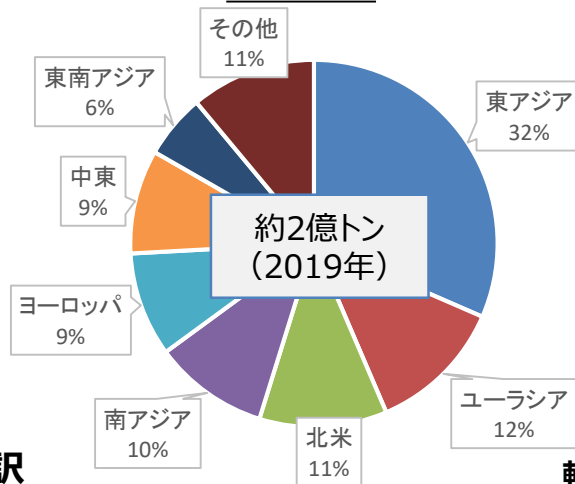


出典: 川崎重工業

(参考) アンモニア調達の現状・課題

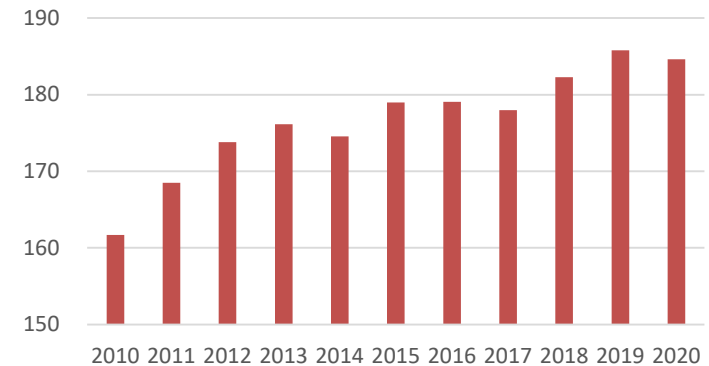
- 現在、世界の原料用アンモニア生産は年間約 2 億トン程度。そのうち貿易量は1割（約2000万トン）で、ほとんどが地産地消されている。
- 市場価格の高騰を防ぐ観点、安定量を確保する観点から、アンモニアの確保に向けた新たなサプライチェーンの構築が必要。

生産内訳

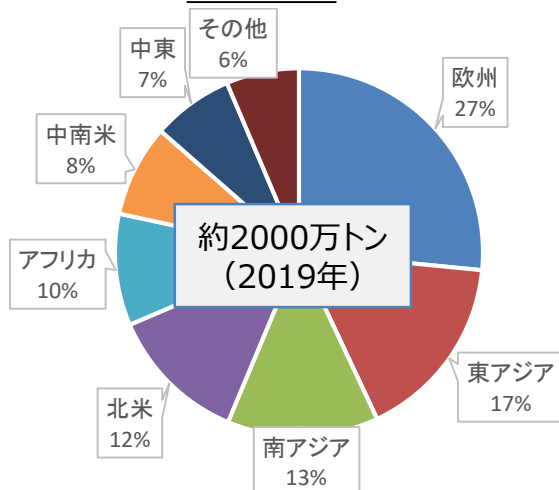


生産量推移

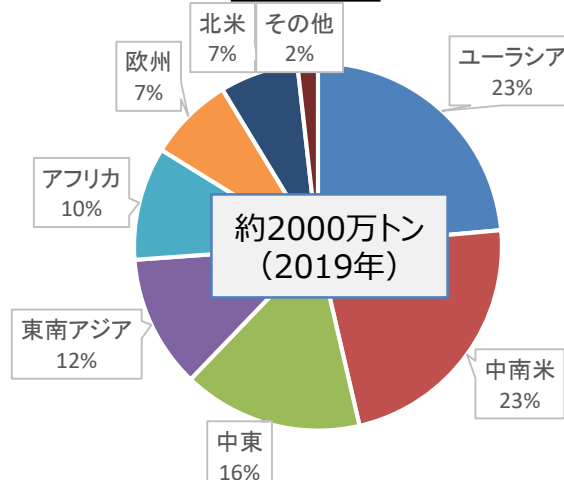
単位：100万トン



輸入内訳

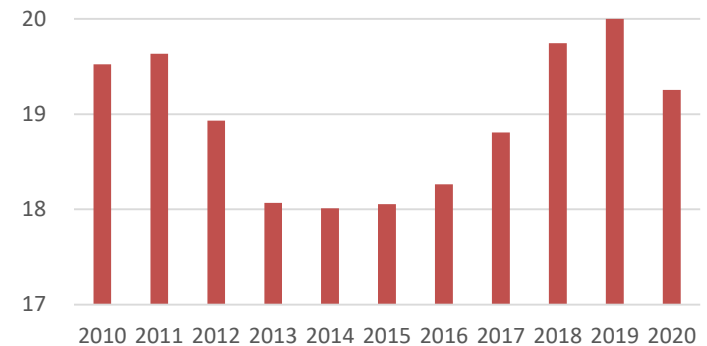


輸出内訳



貿易量推移

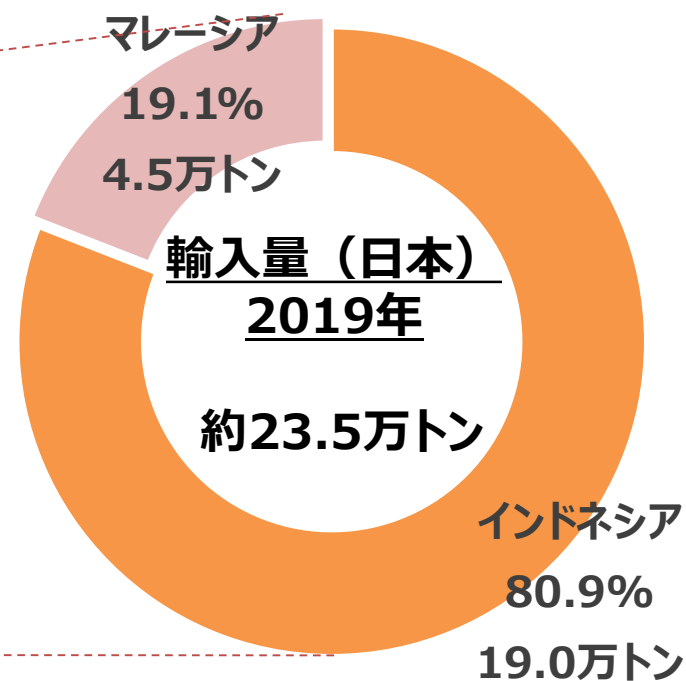
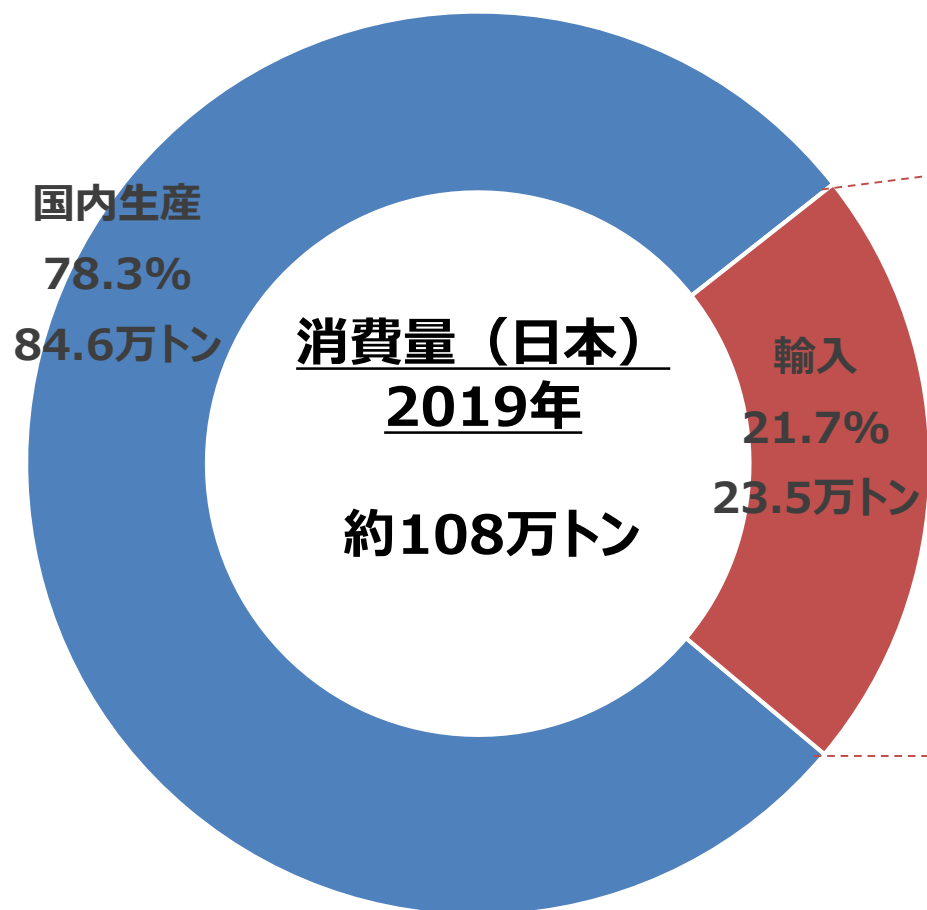
単位：100万トン



(出典) 三菱商事の資料をベースに一部加工

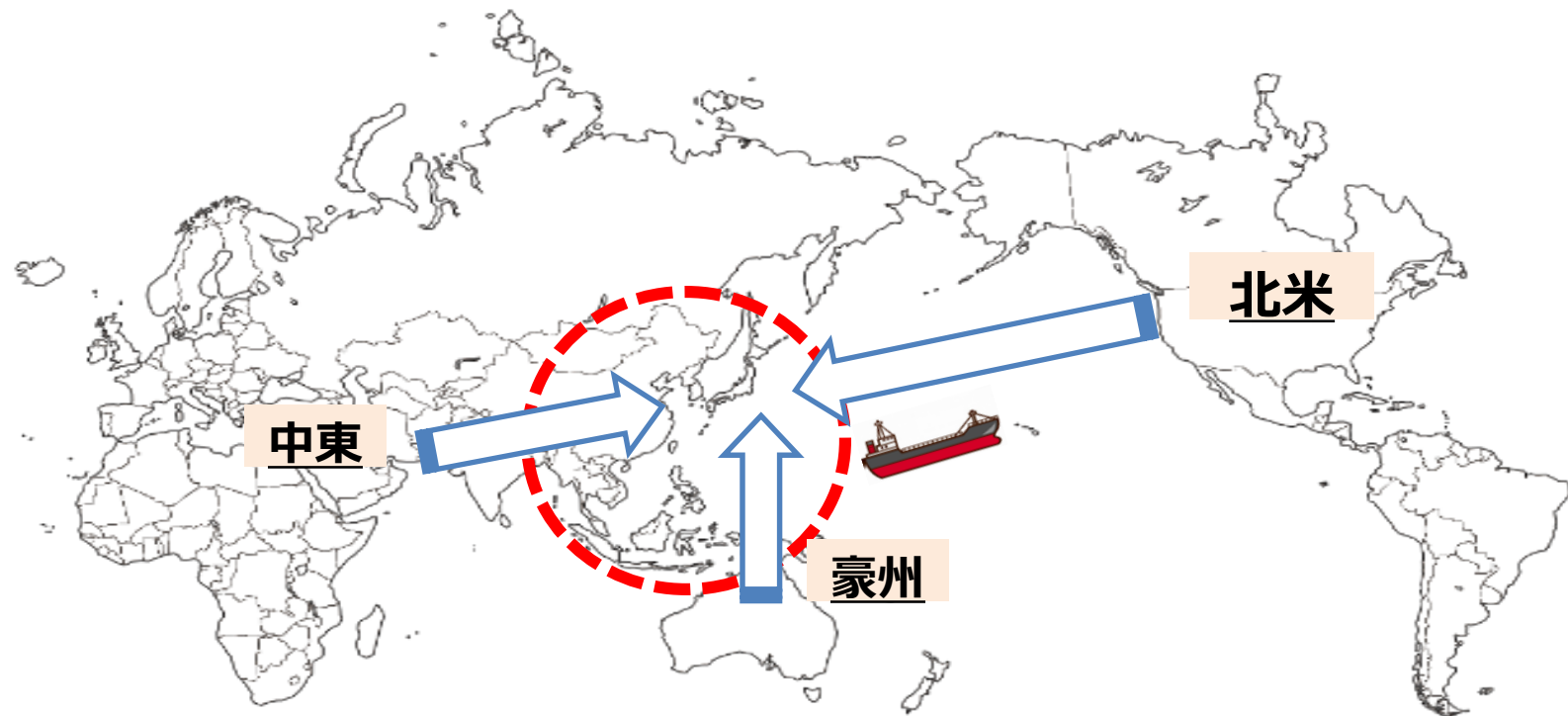
(参考) 国内のアンモニア市場の現状

- 日本の原料用アンモニア消費量は約108万トン（2019年）。うち、国内生産は約8割、輸入は約2割。インドネシア及びマレーシアから輸入。
- 世界的には、用途の約8割は肥料であり、残り約2割は工業用（ナイロン等の原料）となっているが、国内では工業用途が大半となっている。



(参考) アンモニア調達の現状・課題

- 石炭火力にアンモニアの20%混焼すると、1基（100万kW）につき年間約50万トン必要。仮に国内の大手電力会社の全石炭火力（約3900万kW）で20%の混焼を実施する場合、国内需要量は年間約2000万トン（現在の世界全体の貿易量に匹敵）。
- 混焼率の拡大、専焼化も見据え、産油・ガス国/再生可能エネルギー最適地（北米・豪州・中東など）と協力し、現在の原料アンモニアとは異なる新たな燃料アンモニア市場の形成とサプライチェーンの構築が必要。
- 将来的には、石炭火力が電源の4割を占める東南アジアへの混焼技術の展開も期待（IEAによれば東南アジアでの石炭火力は2040年には1億6900万kW）。



- 我が国における 2050 年のカーボンニュートラル実現に向けて、燃烧しても二酸化炭素を排出しないアンモニアの導入は、石炭火力への混焼を始め、船舶や工業炉等の二酸化炭素排出削減を図る上で重要な取組みである。
- 今後、関係者の取組が効果的にタイムリーに実施されることが、燃料アンモニア の 2020 年代後半の商用ベースでの導入、その後の拡大に必要であるが、その際、以下の視点を踏まえて取組を行う。

- ① 燃料アンモニア供給の安定化を図るため、調達先国の政治的安定性・地理的特性に留意した上で、単に外国事業者からアンモニア調達するのではなく、我が国企業が中長期的に安定してアンモニアをコントロールできる形での調達に努める、
- ② 競争力のある燃料アンモニアを導入するため、原料の調達、生産、輸送/貯蔵、利用、ファイナンス等においてコスト低減を図る、
- ③ 当面は普及に重点をおき広くアンモニアの導入を図るが、その後は、生産時に排出される二酸化炭素については合理的なコストでの抑制を図る。また、アンモニア由来の電気が評価される環境整備を図る。
- ④ アジア諸国をはじめ世界の脱炭素移行に貢献するため、燃料アンモニアに係る技術やノウハウのアジア等への展開を図るとともに、アンモニア事業に係る規格・標準化等の環境整備を図る。

(参考) 水素運搬方法の比較

- 最適な運搬方法は、運搬距離や量、用途等により左右されるが、主要な特性は以下のとおり。
- MCH・アンモニアはサプライチェーンの大部分で**既存インフラを活用できることが強み**であり、早期のサプライチェーン構築が見込めるが、**消費エネルギーは液化水素が潜在的には最も低くなる**見込みで、高純度化も容易。

	液化水素	有機ハイドライド (MCH)	アンモニア	メタネーション
体積(対常温 常圧水素)	約1/800	約1/500	約1/1300	約1/600
状態・毒性	液体(-253℃、常圧) 毒性無	液体(常温常圧) トルエンは毒性有	液体(-33℃、常圧等) 毒性、腐食性有	液体(-162℃、常圧) 毒性無
高純度化*	高純度化が容易 (追加設備不要)	高純度化には追加設備が必要		
特性変化時の 消費エネルギー (水素比率)	現在:25-35% 将来:18%	現在:35-40% 将来:25%	水素化:7-18% 脱水素:20%以下 ※将来はデータ無し	現在:-32% ※反応熱の有効利用で 引き下げ余地有
技術的成熟度	- 国際運搬用の、大規模液化機、運搬船等は要技術開発 - 液化水素ローリー等の国内運搬設備は現在も利用し成熟	- 水素化・脱水素プラントは今年度で実証完了 - 国内外運搬には既存インフラ利用可能	- 脱水素設備以外成熟 - 国内外の既存サプライチェーン利用可能	- 国内外で実証試験が実施 - 国内外の既存サプライチェーン利用可能

*FCは高純度な水素を必要とする一方、タービン等で利用する場合は不要

(出典) IEA, The Future of Hydrogen等より資源エネルギー庁作成

【課題②】安価かつ大規模な水素・アンモニア調達 -コスト構造-

水素発電（2020年時点試算）

製造

海外水素製造
(天然ガス+CO₂販売(EOR用途))
11.5円/Nm³

輸送

水素輸入
(ローリー輸送+液化+積荷+海上輸送)
162円/Nm³

発電

水素発電機
7万~9万円/kW

発電
コスト

専焼
97.3円/kWh

熱量ベース
(参考) 10%LNG火力混焼
20.9円/kWh

(出典)

- 水素輸送コスト：事業者ヒアリングに基づき試算
- 水素発電機コスト：富士経済「2020年版水素利用市場の将来展望」水素ガスタービン発電
- 水素発電コスト：発電コスト検証WGより試算

アンモニア発電（2018年時点試算）

海外水素製造
(天然ガス+CO₂販売(EOR用途))
11.5円/Nm³ (= 201ドル/トン)

海外アンモニア製造
4.3円/Nm³ (= 76ドル/トン)

アンモニア輸入
(積荷+海上輸送)
2.3円/Nm³ (= 40ドル/トン)

アンモニア専焼設備
46万円/kW

(参考) アンモニア混焼設備
29万円/kW

専焼
23.5円/kWh

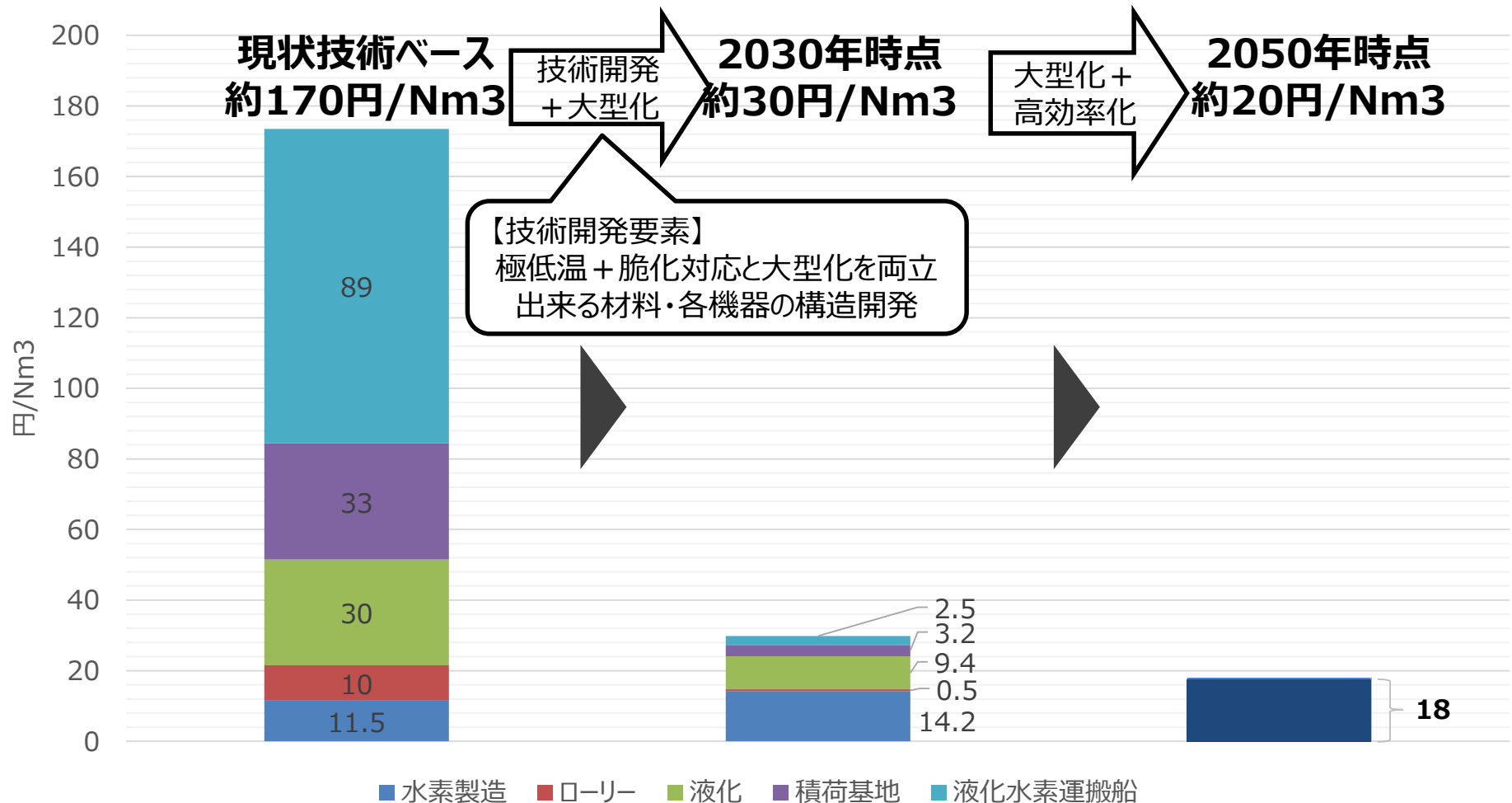
(参考) 20%石炭火力混焼
12.9円/kWh

(出典)

- アンモニア製造・輸入コスト：日本エネルギー経済研究所 SIP「CCS・EOR技術を軸としたCO₂フリーアンモニアの事業性評価」をもとに資源エネルギー庁試算
- アンモニア混焼、発電コスト価格：電源開発SIP「火力発電燃料としてのCO₂フリーアンモニアサプライチェーンの技術検討」
- アンモニア専焼、発電コスト：事業者へのヒアリング等をもとに資源エネルギー庁試算

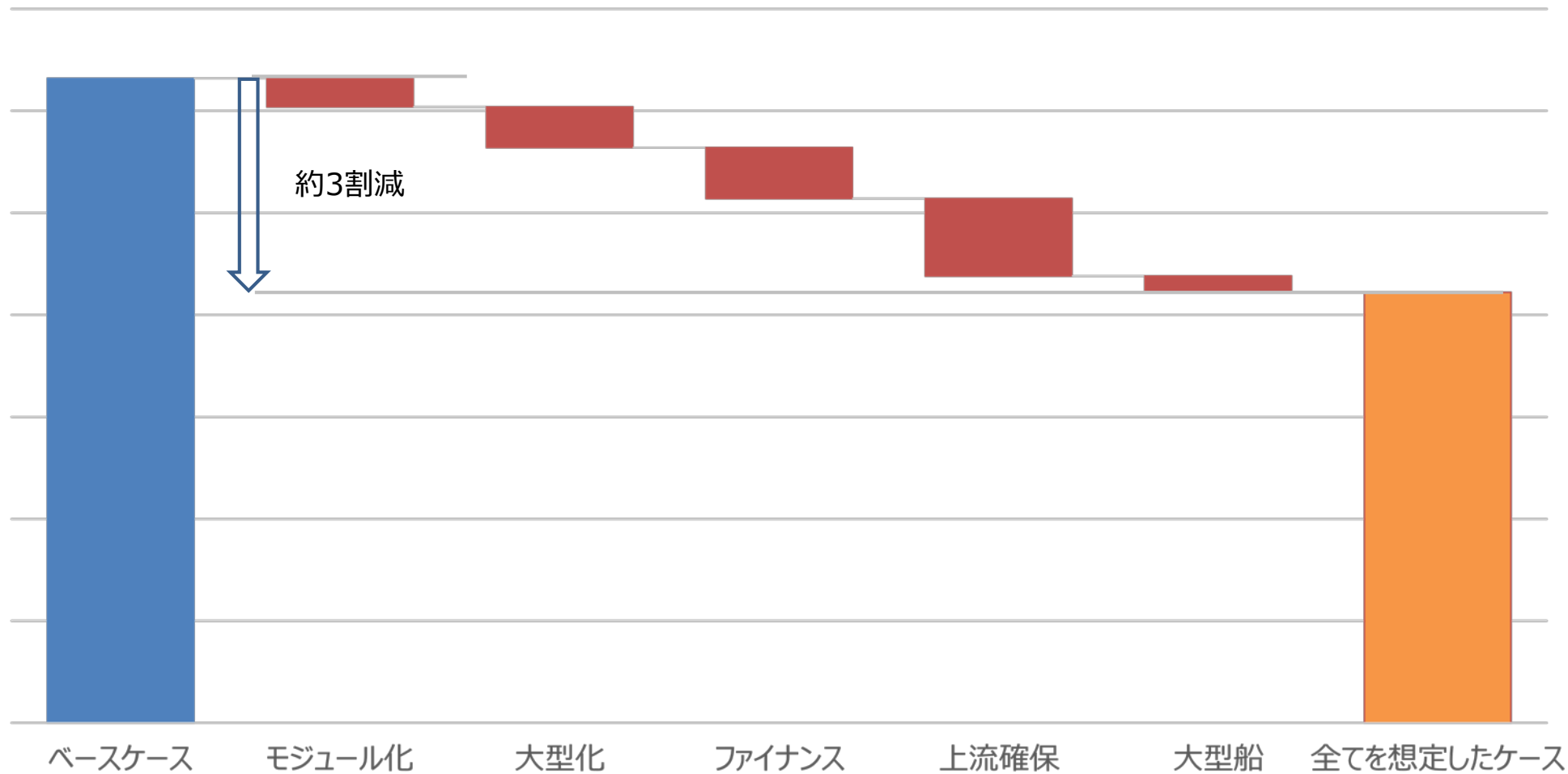
【課題②】安価かつ大規模な水素の調達 ー水素ー

- 発電で活用するためには、大量かつ安価な水素が必要。そのため、構成機器の大型化や高効率化により、コストを低減しつつ、供給力を高める必要がある。
- 過去、LNGにおいても、1970年から40年間で、液化機において、その容量が10倍となった結果、設備コストが半減したという歴史がある。
- こうした経験則も踏まえ、液化水素の供給コスト（CIF価格）を試算したところ、以下のとおり。



- 燃料アンモニア製造コストの低減に向け、設備のモジュール化・大型化や、上流権益の確保等が求められる。

アンモニアコストの低減見通し



(出典)

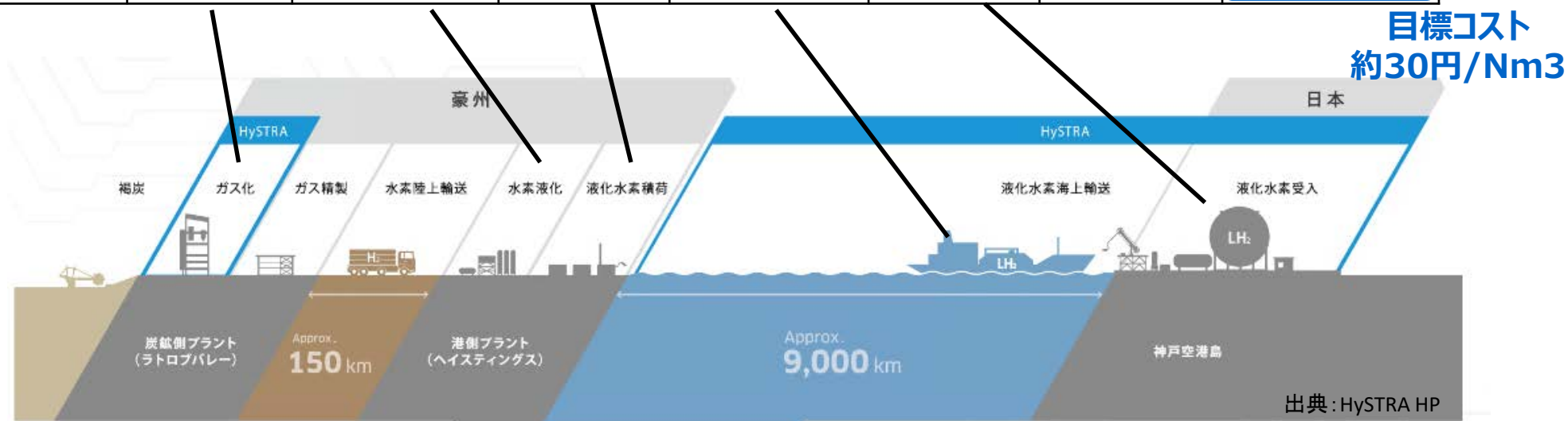
- ・ 民間企業からのヒアリングベース
- ・ アンモニア製造・輸入コスト：日本エネルギー経済研究所 SIP「CCS・EOR技術を軸としたCO2フリーアンモニアの事業性評価」 サウジアラビアケース

(参考) 2030年時点での商用液化水素サプライチェーンの規模感 (イメージ)

- 2030年時点では、液化器は25倍程度に大型化することを見込み、そのためには、新たな冷却技術の開発を行う必要がある。
- 技術的な課題を克服し、商用サプライチェーンが立ち上がったとすると、1GWのガス火力発電所を稼働率50%で1年間動かすことが可能（発電量：43億kWh）*

液化水素サプライチェーンの大型化の例

	水素製造	水素液化	積荷基地	水素輸送船	揚荷基地	水素発電	年間供給量
機器	製造器	液化器	タンク	水素船	タンク	発電所	—
現行実証	0.1t/d	2t/d	2500m ³	1250m ³	2500m ³	—	約36t/年**
商用化	770t/d	1000t/d (50×20基)	20万m ³ (5×4基)	32万m ³ (16×2隻)	20万m ³ (5×4基)	100万kW	約22.5 万t/年



*試算条件：（水素熱量120MJ/kg-H₂（LHV）、発電効率57%（出典：発電コスト検証WG） **褐炭ガス化プラントを年間フル稼働した際の液化水素量を試算

(参考) 大型化に伴う技術開発 (液化水素の例)

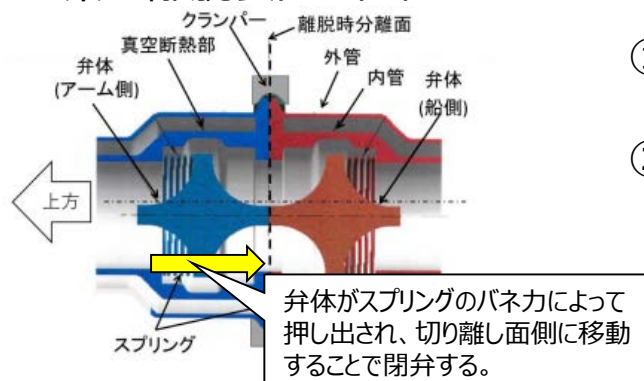
- 材質をステンレス等に制限する過酷な条件 (極低温や脆化) に対応しつつ、コスト低減に資する大型化を進めるための技術開発を支援中。

【例①：ローディングアーム (船舶から液化水素を荷揚げする設備)】

パイロットスケール



緊急離脱装置の仕組み



技術開発要素

- ① 極低温に耐えつつも、柔軟性を確保出来る新構造の開発 (構造自体を検討中)
- ② 大口径化と緊急離脱時の水素放出量の最小化 (迅速な閉弁) の両立を可能とする緊急離脱システム*の開発

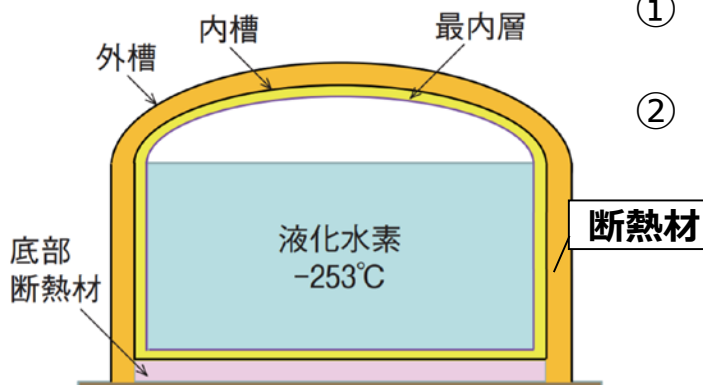
※突風等によりタンカーの急激な移動等の不測の事態が生じた際、流体をパージすること無く、短時間で安全にタンカーから切り離すシステム

【例②：陸上貯蔵用タンク】

パイロットスケール (2,500m³)



商用スケール (5万m³)



技術開発要素

- ① 真空断熱 + 断熱材の最適組合せの追求
- ② 自重に耐えられる新構造 (球型 → 平底円筒型)

(参考) 水素基本戦略における水素発電の規模感

- 2017年12月に再エネ・水素等関係閣僚会議で決定した水素基本戦略では、必要な調達量として、2030年には30万トン/年、将来的には500～1000万トン/年という規模の水素調達量が、コスト低減のためには必要とされた。

水素基本戦略における記載ぶり（発電分野）

水素発電については、国際的な水素サプライチェーンとともに 2030 年頃の商用化を実現し、その段階で 17 円/kWh のコストを目指す。そのために必要となる水素調達量として、**年間 30 万 t 程度を目安とする**（発電容量で 1 GW 程度に相当）。更に、将来的には環境価値も含め、既存の LNG 火力発電と同等のコスト競争力の実現を目指す。そのために必要となる水素調達量として、**年間 500 万～1,000 万 t 程度を目安とする**（発電容量で 15～30GW 程度に相当）。

水素発電の発電電力量試算(全量水素と仮定)

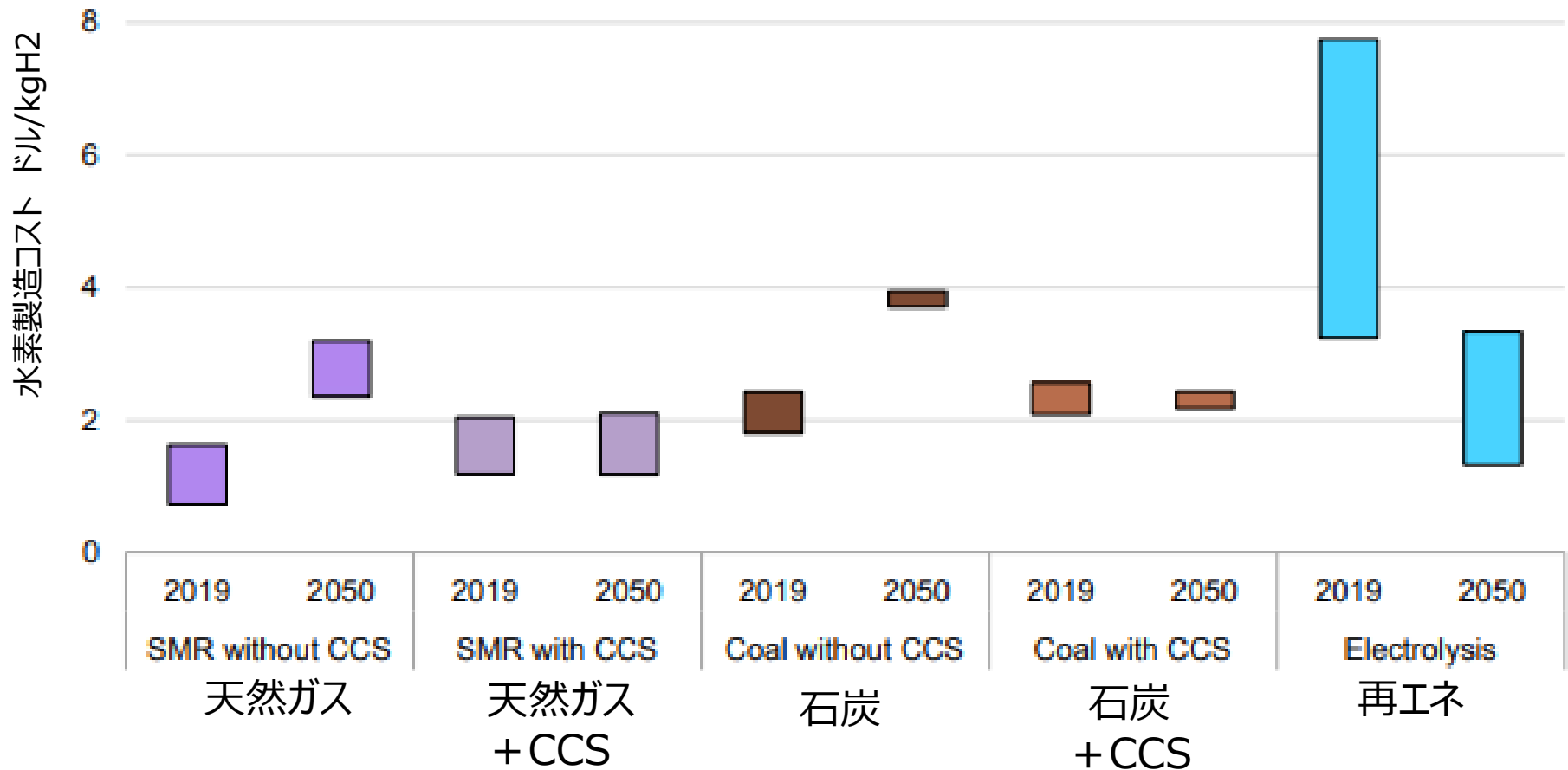
- A 水素調達量：30万トン（2030年）、500～1,000万トン（将来的）
- B 発熱量（LHV）：120MJ/kg
- C 発電効率：57%
（発電コスト検証WGのガス火力の値を使用）
- D 総発電量 = $A \times B \times C$ = **57億kWh(2030年)**
= **950～1900億kWh(将来的)**

備考：戦略中では、発電分野での需要創出を通じた供給力拡大に伴い、水素供給コストは2030年に**30円/Nm³**（発電コスト17円/kWh）、将来的には**20円/Nm³**（発電コスト12円/kWh）程度の実現を目指している。

(参考) 世界の水素製造コストに関するIEA予測

- 再エネ電源がコスト競争力を有するにつれ、2050年には天然ガス+CCUSで製造されるCO2フリー水素に対して、再エネ（電解）水素がコスト競争力を有する見込み。

エネルギー源別の水素製造コスト比較（2019年 vs 2050年）

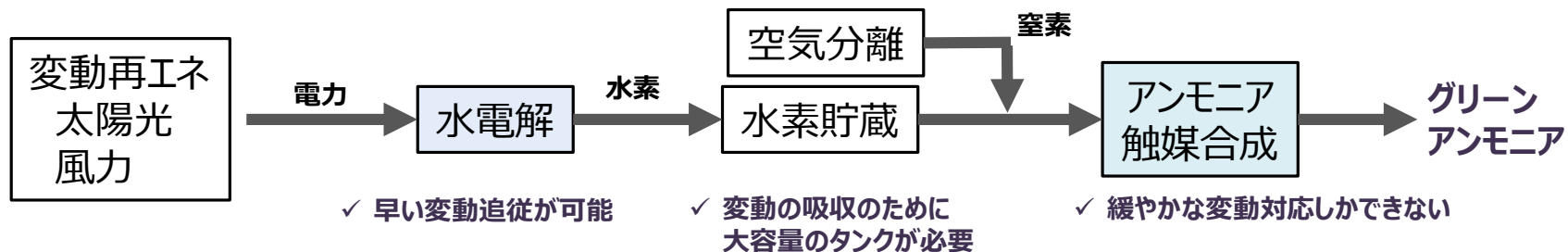


(参考) 燃料アンモニアの製造コストの低減方針

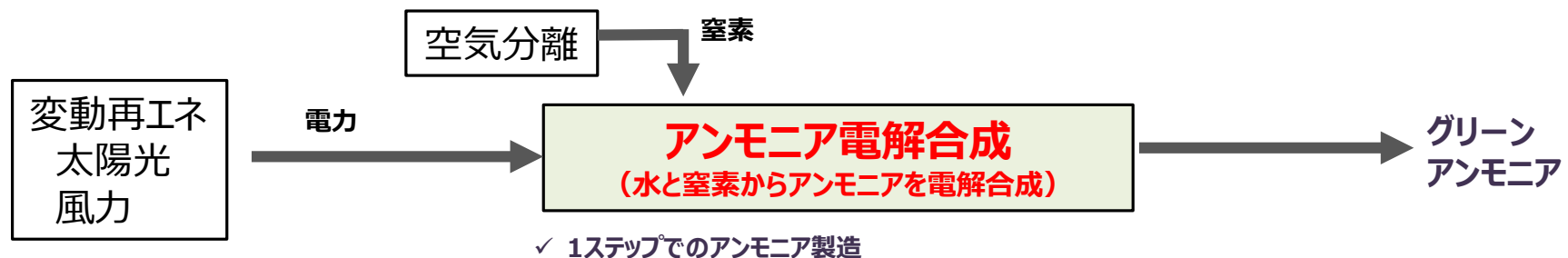
- アンモニアの既存の製造方法としては、化石燃料から製造する方法と、再エネから水分解によって製造する方法が存在。
- 他方、従来型の再エネからの製造方法では、水の電気分解、水素貯蔵、水素と窒素の反応という3段階の装置が必要になり、高コストとなる。そのため、コストの大幅削減に向け、新たに再エネから直接アンモニアの製造を可能とする**アンモニア電解合成技術**の開発を進める。

<再生可能エネルギー由来のアンモニア製造方法>

従来法：水電解 + HB法触媒合成



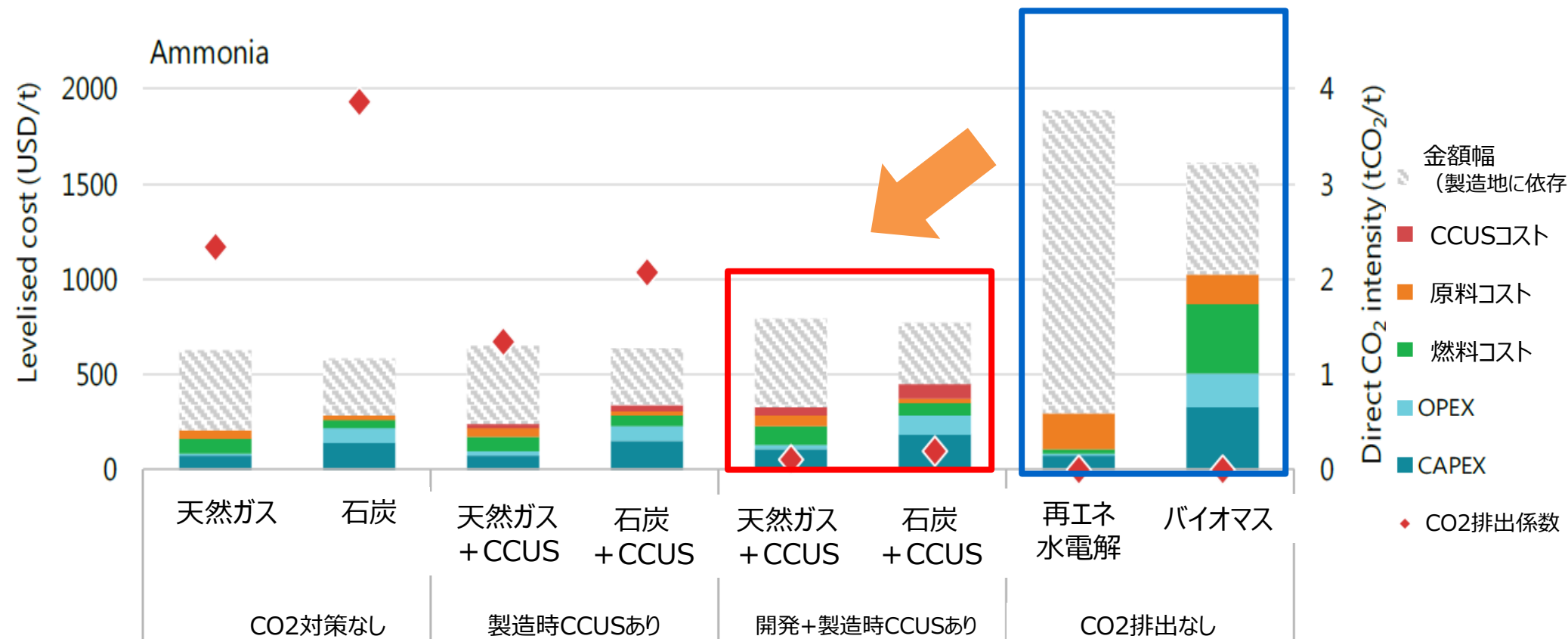
革新技术：アンモニア電解合成



(参考) 製造方法別のアンモニアコスト比較

- 地域による製造コストの差異はあるものの、現時点では、再生可能エネルギー由来の製造に比べ、天然ガスや石炭を原料とし、開発・製造段階で生じるCO2をCCUS／カーボンリサイクルによって回収する製造方法の方が、価格競争力が高い。

<製造方法毎の発電コスト（2018年）>



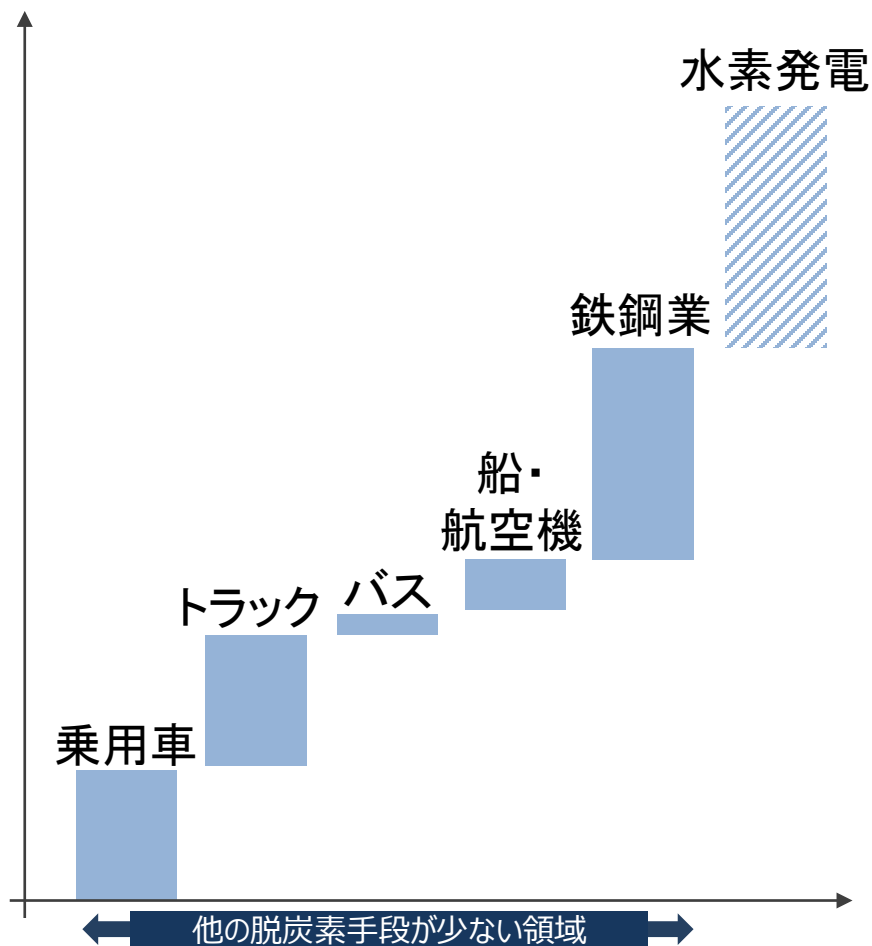
(出典) IEA, The Future of Hydrogen

(参考) 水素の供給・需要量 イメージ

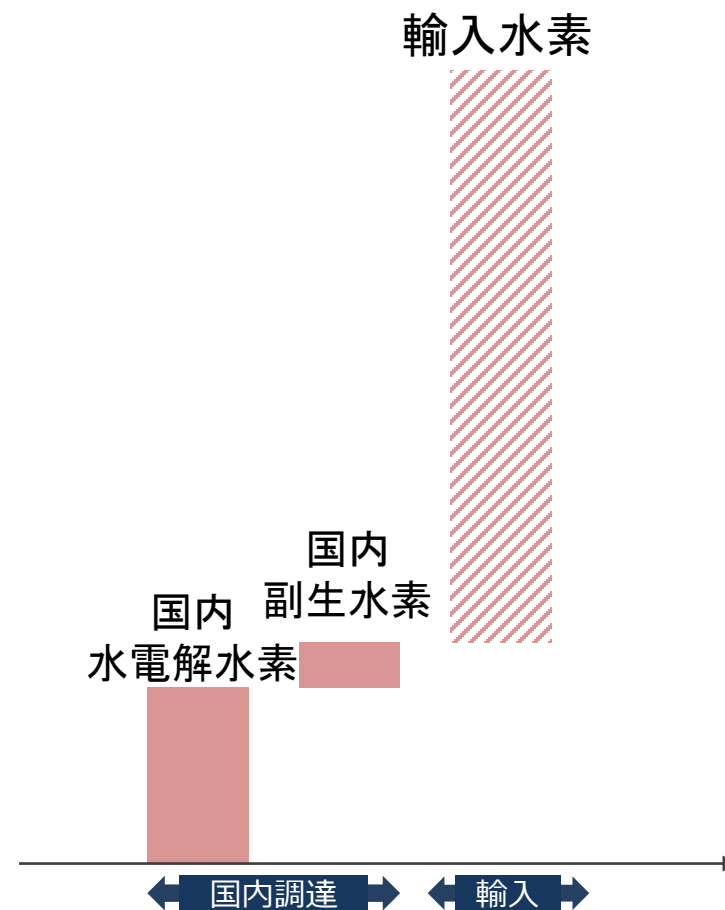
- 運輸部門、鉄鋼業は脱炭素手段が限られており、水素を優先的に利用する必要がある可能性

- 国内水電解水素の供給ポテンシャルは再エネの導入量に依存、再エネ導入における自然・社会的制約を踏まえると、国内水素は需要ポテンシャルの全てを満たすことはできない
- そのため、需要ポテンシャルを満たすために、多くは輸入に依存すると考えられる

水素需要ポテンシャル



水素供給ポテンシャル



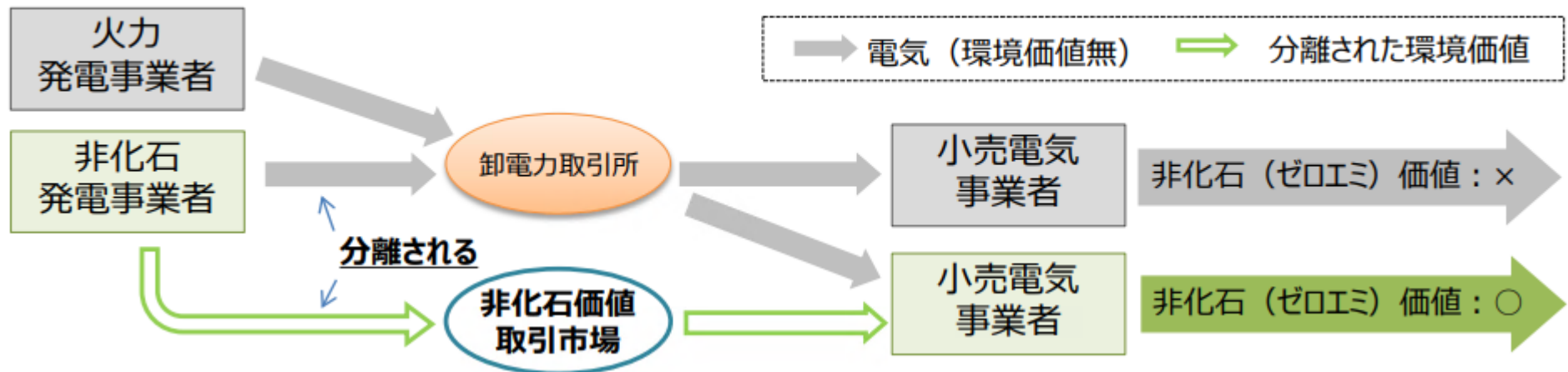
* 足下のエネルギー消費量を一定の想定のもと水素技術で代替した場合の水素需要ポテンシャルのイメージである点に留意

【課題③】社会実装に向けた制度整備の必要性

- 2030年に30円/Nm³の水素コスト目標を達成したとしても、水素発電のコストは17円/kWhとLNG火力と比して**高い見込み**。一方、アンモニア発電は2020年代後半の実用化が見込まれる。これらの社会実装を促すためには、**水素・アンモニアの環境価値を適切に評価する制度整備**が必要となる。

制度整備の例：非化石価値取引市場

- 概要：小売電気事業者による高度化法の目標達成を促すため、非化石電源（再エネ等）に由来する電気の非化石価値を証書化し取引するための市場。非化石価値は1.3円/kWhで市場取引(2020年第一四半期)。
- 水素・アンモニアは現在、**高度化法の中で非化石エネルギー源として定義されていない**。



水素基本戦略における記載ぶり（抜粋）

水素発電の導入に当たっては、電力システム改革が進展する中での経済性確立に向けた制度設計等の検討を進める。また、水素発電が有する環境価値を顕在化し、評価・認定、取引可能にしていくことが重要であり、他の制度設計に係る議論を注視しつつ、省エネ法における水素利用の位置づけを明確化する、あるいは高度化法における非化石電源として水素発電を位置づけるといったことを含め、実態も踏まえながら検討を進める。

1. 電力部門の検討

再生可能エネルギー以外の課題と取り組み

a. 火力発電

- 化石+CCUS/カーボンリサイクル
- 水素・アンモニア

b. 原子力

カーボンニュートラル社会における原子力政策の課題と対応

1. 原子力政策を巡る動向

- (1) 福島復興と福島第一原発の廃炉の取組**
- (2) 原子力エネルギーの特性**
- (3) カーボンニュートラルと原子力を巡る世界の動向**
- (4) 日本の原子力利用の歩みと現状**

2. 原子力政策の課題と対応の方向性

課題1：安全性の追求

課題2：立地地域との共生

課題3：持続的なバックエンドシステムの確立

課題4：事業性の向上

課題5：人材・技術・産業基盤の維持・強化、イノベーションの推進

ご議論いただきたいこと④（原子力発電）

- 福島復興・再生に向けた取組は、エネルギー政策の再構築の出発点であり、政府の最優先課題として、全力で取り組んでいかなければならない。
- カarbonニュートラル実現は、簡単なものではなく、日本の総力を挙げての取組が必要。そのため、再エネの最大限の導入に取り組むことはもちろん、実用化に向けてコスト低減など課題のある水素・カーボンリサイクルなど新たな選択肢も追求することが重要。
- このように、イノベーションの追求など最大限の取組を進めていくが、将来の技術動向を正確に予測することは困難であり、「実用段階にある脱炭素化の選択肢である原子力」を含め、使えるものを最大限活用することが重要ではないか。
- 他方、原子力が、Carbonニュートラル実現の手段として選択され得るには、原子力を巡る様々な課題に対応し、これらを乗り越えていくことで、国民からの信頼回復に取り組んでいくことが必要ではないか。
 - 課題1：福島教訓を活かし、安全性の追求をどのように取り組んでいくのか
 - 課題2：事故後の環境変化が生じる中で、長期的な視点から立地地域との共生にどのように取り組んでいくのか
 - 課題3：核燃料サイクルや最終処分、廃炉に至るまでの持続的なバックエンドシステムの確立に向け、どのように取り組んでいくのか
 - 課題4：自由化した市場の中で、原子力発電の事業性向上にどのように取り組んでいくのか
 - 課題5：安全を大前提とした原子力事業に不可欠な人材・技術・産業基盤の維持・強化にどのように取り組んでいくのか。更なる安全性等の追求に向けた原子力イノベーションにどのように取り組んでいくのか
- こうした点を踏まえつつ、本日は、
 - ①原子力利用の課題と対応の方向性
 - ②2050年Carbonニュートラル実現に向けた原子力の在り方等についてご議論いただきたい。

カーボンニュートラル社会における原子力政策の課題と対応

1. 原子力政策を巡る動向

- (1) 福島復興と福島第一原発の廃炉の取組
- (2) 原子力エネルギーの特性
- (3) カーボンニュートラルと原子力を巡る世界の動向
- (4) 日本の原子力利用の歩みと現状

2. 原子力政策の課題と対応の方向性

課題1：安全性の追求

課題2：立地地域との共生

課題3：持続的なバックエンドシステムの確立

課題4：事業性の向上

課題5：人材・技術・産業基盤の維持・強化、イノベーションの推進

原子力政策を巡る動向

(1) 福島復興と福島第一原発の廃炉

① 福島第一原発の廃炉（オンサイト）

- ・ 事故炉は冷温停止状態を維持。構内の放射線量大幅減
- ・ 廃炉に向けた作業は着実に進捗

汚染水対策：凍土壁等の対策により発生量の大幅削減

プール内燃料取り出し：4号機完了、3号機取り出し中

燃料デブリの取り出し：炉内調査による状況把握の進展

② 福島の復興（オフサイト）

- ・ 帰還困難区域を除く全ての地域の避難指示を解除済
- ・ 帰還環境整備の進展
- ・ なりわいの再建、企業立地が徐々に拡大
- ・ 新産業の集積の核となる拠点が順次開所

(2) 原子力エネルギーの特性

① 安定供給

- ・ 優れた安定供給性と効率性（燃料投入量に対するエネルギー出力が圧倒的に大きく、数年にわたって国内保有燃料だけで生産が維持できる準国産エネルギー源）
- + 高い技術自給率（国内にサプライチェーンを維持）
- + レジリエンス向上への貢献（回転電源、太平洋側・日本海側に分散立地）

② 経済効率性

- ・ 運転コストが低廉（安全対策費用等が増額してもなお低廉）
- ・ 燃料価格変動の影響を受けにくい（数年にわたって国内保有量で運転可能）

③ 環境適合

- ・ 運転時にCO₂を排出しない
- ・ ライフサイクルCO₂排出量が少ない

(3) 原子力を巡る世界の動向

① カーボンニュートラルと原子力利用

- ・ 消費電力量が大きく、かつカーボンニュートラルを表明している国の多くは、将来にわたって原子力を利用する方針

② 各国の動向

- ・ 米英仏：長期運転、新規建設、革新的技術開発
- ・ 露中：国内建設 + 積極的な海外展開
- ・ 独韓：将来的な原子力発電所の閉鎖
- ・ その他：アジア、中東、東欧などの一部の国では、電力需要の急増やエネルギー安全保障等を背景に、原子力利用を追求

(4) 日本の原子力利用の歩みと現状

① **これまでの歩み**：需要拡大、石油危機、温暖化等を背景に、原子力利用を推進

② **事故後の方針**：安全確保を大前提に再稼働を進める、可能な限り依存度低減・2030年20~22%の実現をめざす
実用段階にある脱炭素化の選択肢（安全性等に優れた炉の追求）

③ **今後の見通し**：自然体では2040年代以降、設備容量は大幅に減少の見通し

エネルギー政策を進める上での原点 ～原子力災害からの福島復興～

- 2021年3月は、東京電力福島第一原発の事故から10年の節目。福島の復興は一步一步進展するも、まだ多くの課題が残されている。改めて二度とあのような悲惨な事態を引き起こしてはならないことを再確認する必要。今後も、福島第一原発の廃炉と福島の復興に全力を挙げる。

福島第一原発の廃炉（オンサイト）

- 事故炉は冷温停止状態を維持。構内の放射線量大幅減。
 - ※ 1F構内の約96%のエリアが防護服の着用不要
 - ※ 周辺海域の水質は大きく改善しており、世界的な飲料水の水質基準と比べても十分に低いことが確認されている
- 廃炉に向けた作業は着実に進捗。
 - ①汚染水対策：凍土壁等の対策により発生量の大幅削減
540m³/日（2014.5）⇒ 180m³/日（2019年度）
 - ②プール内燃料取り出し：4号機完了、3号機取り出し中
 - ③燃料デブリの取り出し：炉内調査による状況把握の進展

福島の復興（オフサイト）

- 帰還困難区域を除く全ての地域の避難指示を解除済。
 - ※ 避難指示区域からの避難対象者数
8.1万人（2013.8）⇒ 2.2万人（2020.4）
- 帰還環境整備の進展
 - ※ 常磐線の全線開通（2020.3）、道の駅の整備 等
- なりわいの再建、企業立地が徐々に拡大。
 - ※ 15市町村の企業立地365件、雇用創出4,293人（2020.4）
- 新産業の集積の核となる拠点が順次開所。
 - ※ 福島ロボットテストフィールド（2020.3全面開所）
 - ※ 福島水素エネルギー研究フィールド（2020.3開所）

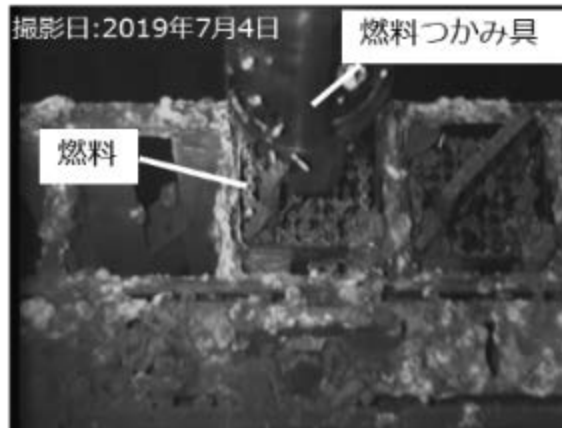
残された課題への対応

- ALPS処理水の取扱い
- 使用済燃料プール内の燃料の着実な取り出し
 - ※ 2020年度内に3号機完了。2031年内に全号機で完了。
- 燃料デブリの取り出し

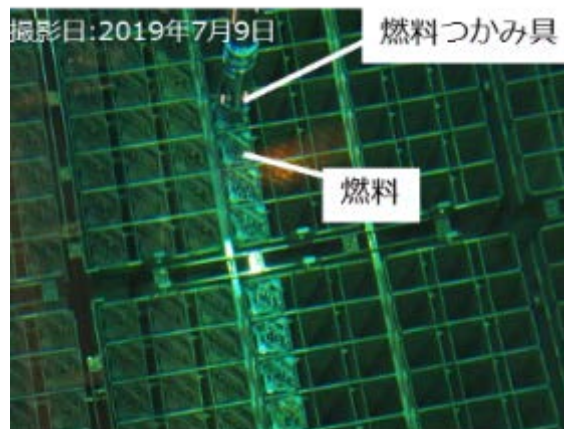
- 帰還困難区域の取扱い
 - ※ 特定復興再生拠点区域（6町村）の整備・避難指示解除
 - ※ 特定復興再生拠点区域外の解除に向けた方向性の検討
- 帰還促進に加え、移住・交流人口拡大による域外消費取込み
- 福島イノベーション・コースト構想の一層具体化

福島第一原発の廃炉の最近の主な進捗

- 3号機でプール燃料取り出しが進捗
- プール内の566体の燃料うち、434体の取り出しを完了（12/16時点）。
- 2020年度中の取り出し完了を目指す。



新燃料取り出し開始



共用プールラックへ新燃料を格納

- 1/2号排気筒の解体作業が完了
- 2019年8月から上部約60メートルの解体作業を実施。
- 5月1日に解体完了。



解体前



遠隔による解体作業



23ブロック切断後
(2020年4月28日)



蓋設置作業
(2020年5月1日)

避難指示の解除について

1. 本年3月、双葉町・大熊町・富岡町において、「帰還困難区域」の一部地域の避難指示を初めて解除。
2. 同時に、双葉町の避難指示解除準備区域を解除し、全ての居住制限区域と避難指示解除準備区域を解除。

●居住制限区域・避難指示解除準備区域の解除の状況

解除日	居住者数	時点
2014年 4月 1日: 田村市	215人(84.0%)	2020年11月30日
2014年10月 1日: 川内村 (一部)		
2015年 9月 5日: 楢葉町	4,030人(59.6%)	2020年11月30日
2016年 6月12日: 葛尾村	425人	2020年12月1日
2016年 6月14日: 川内村	2,055人(81.3%)	2020年12月1日
2016年 7月12日: 南相馬市	4,301人(55.6%)	2020年11月30日
2017年 3月31日: 飯館村	1,486人	2020年12月1日
川俣町	344人(47.3%)	2020年12月1日
浪江町	1,529人	2020年11月30日
2017年 4月 1日: 富岡町	1,567人	2020年12月1日
2019年 4月10日: 大熊町	281人	2020年12月1日
2020年 3月4日: 双葉町	—	

避難指示区域の現状と見通し(2020年3月10日現在)



●今後の避難指示解除の見込み

・特定復興再生拠点区域

各町村の計画では、2022年又は2023年に全域解除予定

(2013年8月区域設定時)

(2020年3月時点)

避難指示区域からの避難対象者数	約8.1万人	区域設定時から 約6年7か月	約2.2万人 (約5.9万人減)
避難指示区域の面積	約1,150km ²		約340km ² (約810km ² 減)

(注)避難指示区域からの避難者数は、市町村からの聞き取った情報(それぞれ、平成25年8月8日時点、令和2年3月10日時点の住民登録数)を基に、原子力被災者生活支援チームが集計。

出所:
※居住者の元データは各自治体調べ。田村市、葛尾村、南相馬市、飯館村、川俣町、浪江町、富岡町、大熊町の居住者数については、旧避難指示解除準備区域及び旧居住制限区域における居住者数。川内村、楢葉町の居住者数は半径20km圏外を含む自治体全域における居住者数。居住者数は震災後に転入してきた者等を含む。
※割合(%)は、居住者数を数えた区域における住民基本台帳人口に対する居住者数の割合を支援下で算出したもの。

帰還環境整備の進展、福島イノベーション・コースト構想の推進

- JR常磐線の全線開通により、浜通り地域の往来の再開が期待される。また、道の駅や産業施設の再開・整備など、地域経済の拠点の回復も着実に進展中。
- 2020年3月、新産業の集積の核となる拠点も順次開所。

常磐線の全線開通



双葉駅
(2020年3月14日 再開)

道の駅の整備



道の駅ならは
(2020年6月 全面再開)



出典：福島民報

道の駅なみえ
(2020年8月 一部供用開始)

福島ロボットテストフィールドの全面開所(2020.3.31)



福島ロボットテストフィールド（南相馬市）

福島水素エネルギー研究フィールドの開所(2020.3.7)



原子力エネルギーの特性

- **原子力の3E（安定供給、経済効率性、環境適合）の特性**は以下のとおり。近年頻発する自然災害や新型コロナ渦等を背景に、**技術自給やレジリエンスという側面に留意する必要**。

① 安定供給 (Energy Security)

- ・ 優れた安定供給性と効率性（燃料投入量に対するエネルギー出力が圧倒的に大きく、数年にわたって国内保有燃料だけで生産が維持できる準国産エネルギー源）
- + **高い技術自給率**（国内にサプライチェーンを維持）
- + **レジリエンス向上への貢献**（回転電源としての価値、太平洋側・日本海側に分散立地）

② 経済効率性 (Economic Efficiency)

- ・ 運転コストが低廉（安全対策費用や事故費用、サイクル費用が増額してもなお低廉）
- ・ 燃料価格変動の影響を受けにくい（数年にわたって国内保有量だけで運転可能）

③ 環境適合 (Environment)

- ・ 運転時にCO2を排出しない
- ・ ライフサイクルCO2排出量が少ない

①安定供給：優れた安定供給性と効率性

- 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（燃料交換後1年以上、発電の継続が可能）、数年にわたって国内保有燃料だけで生産が維持できる。

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	<u>約0.6km²</u>
火力	<u>約0.5km²</u>
太陽光	約58km ² ※山手線の内側の 面積が約63km²
風力	約214km ²

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)	<u>21トン</u>
天然ガス	950,000トン
石油	1,550,000トン
石炭	2,350,000トン

国内在庫日数

原子力 (ウラン)	<u>約2.9年分</u>
天然ガス	約20日分
石油	約200日分
石炭	約29日分

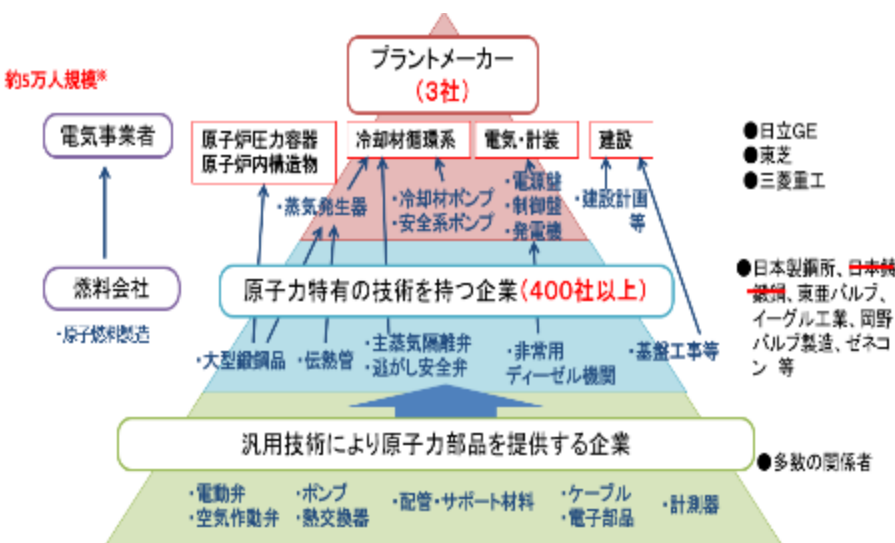
※ウラン在庫については電力中央研究所「原子燃料の潜在的備蓄効果」より
※電力調査統計等より作成
(洋上在庫含まず、電力会社の発電用在庫で計算)

①安定供給：高い技術自給率

- 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。
- 新型コロナウイルスの拡大によって、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。

原子力発電のサプライチェーン

原子力発電所の国産化率の推移



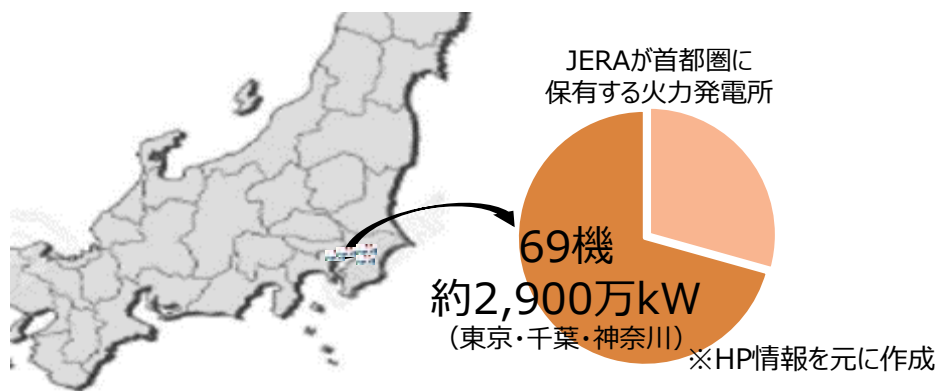
発電所	東海 (黒鉛炉)	美浜1号 (PWR)	美浜3号 (PWR)	島根1号 (BWR)	玄海2号 (PWR)	浜岡2号 (BWR)	柏崎刈羽7 (ABWR)
運転開始年	1966	1970	1976	1974	1981	1978	1997
国産化率 (%)	35%	58%	93%	94%	99%	94%	89%

(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)

①安定供給：災害時のレジリエンス向上への貢献

- 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。

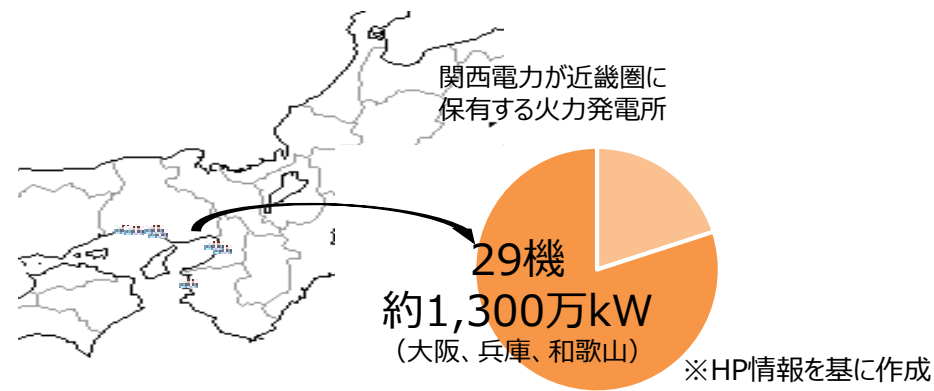


仮に、首都圏・近畿圏で直下型地震等が発生したとしても、日本海側に電源が十分に整備されていれば、供給力不足を回避できる可能性が高まる。

(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経済効率性：原子力発電の事業構造

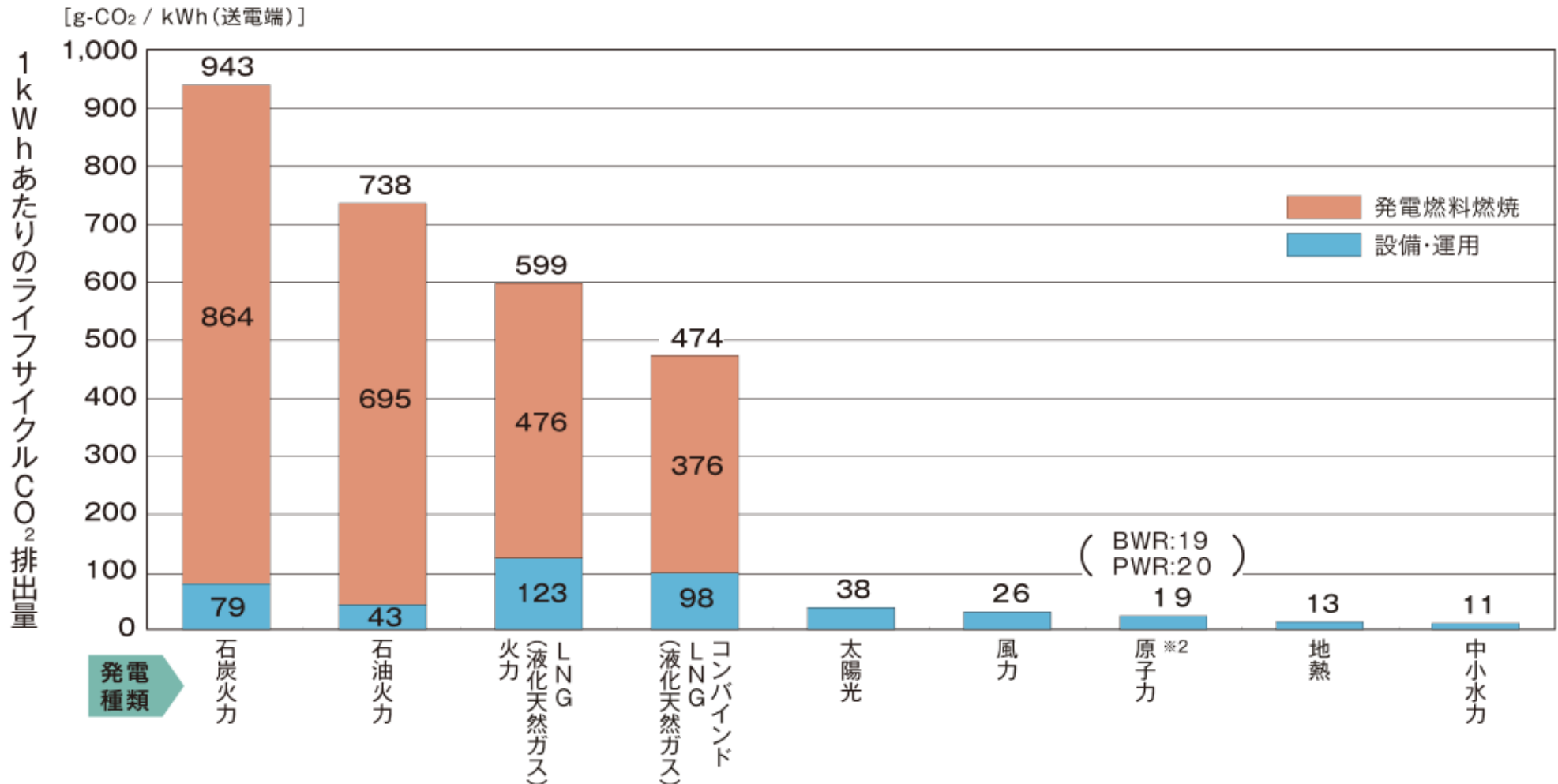
- 原子力発電は、初期投資額は他電源に比べて大きいが、稼働すれば40年又は60年という長期間、安価な燃料費で運転し、ライフタイムトータルで莫大な発電電力量を生み出すというビジネスモデル。

非化石電源の初期投資と発電電力量の関係

	初期投資 (億円)	出力 (万kW)	設備利用率 (%)	運転年数 (年)	発電電力量 (億kWh)
原子力 (建設費+安全対策費)	<u>5,000</u>	120	70	40～60	<u>2,943～4,415</u>
太陽光（メガ）	5.88	0.2	14	20	0.5
風力（陸上）	56.8	2	20	20	7
風力（洋上）	57～155	3	30	20	16～53
水力	76.8	1.2	45	40	19
地熱	237	3	83	40	87

③環境適合：電源毎のライフサイクルCO2排出量

- 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。



(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)

カーボンニュートラルと原子力利用の動向①

- 現在、原子力を利用している国の多くは、将来も原子力利用を継続する見通し。こうした国の多くはカーボンニュートラルを表明。
- また、現在、原子力を利用していない国の中でも、将来的な原子力利用の動きがみられる。

将来的に利用

※緑字はカーボンニュートラル表明国

25カ国

[]は運転基数

・ 米国 ※ ¹ [94]	・ チェコ [6]	・ ブルガリア [2]
・ フランス [56]	・ パキスタン [5]	・ メキシコ [2]
・ 中国 ※ ² [50]	・ スロバキア [4]	・ ルーマニア [2]
・ ロシア [38]	・ フィンランド [4]	・ オランダ [1]
・ インド [22]	・ ハンガリー [4]	・ アルメニア [1]
・ カナダ [19]	・ アルゼンチン [3]	・ イラン [1]
・ ウクライナ [15]	・ 南アフリカ [2]	・ UAE [1]
・ 英国 [15]	・ ブラジル ※ ³ [2]	・ ベラルーシ [1]
		・ 日本

※¹ バイデン政権の公約として表明

※² 2060年までのCNを表明 ※³ 条件付きで2060年のCNを検討

14カ国

・インドネシア	・トルコ
・ウズベキスタン	・ナイジェリア
・エジプト	・ バングラディシュ
・カザフスタン	・フィリピン
・ガーナ	・ポーランド※ ⁴
・サウジアラビア	・モロッコ
・シリア	・ヨルダン

※⁴ 2050年カーボンニュートラルに反対していたが、最近では「カーボンニュートラルへの貢献」を明言し、石炭火力の廃止に必要な約4兆円の投資をEUに協力要請。

現在、原発を利用

5カ国・地域

・ 韓国 [24]	(2017年閣議決定／2080年頃閉鎖見込)
・ ベルギー [7]	(2003年法制化／2025年閉鎖)
・ ドイツ [6]	(2002年法制化／2022年閉鎖)
・ スイス [4]	(2017年法制化／－)
・ 台湾 [4]	(2019年政府発表／－)
	(脱原発決定年／脱原発予定年)

現在、原発を利用せず

4カ国

・ イタリア	(1988年閣議決定／1990年閉鎖済)
・ オーストリア	(1978年法制化)
・ オーストラリア	(1998年法制化)
・ マレーシア	(2018年首相発言)

(注1) スペイン、スウェーデン、スロベニアは現在原発を利用しているが、IAEA Country Nuclear Power Profilesにおいての将来のスタンスを明らかにしていないため記載していない。

(注2) 韓国は今後新たな原発の建設計画を認めず設計寿命を終えた原子炉から閉鎖する方針のため、現在建設中の原発が設計寿命を迎える時期を記載。

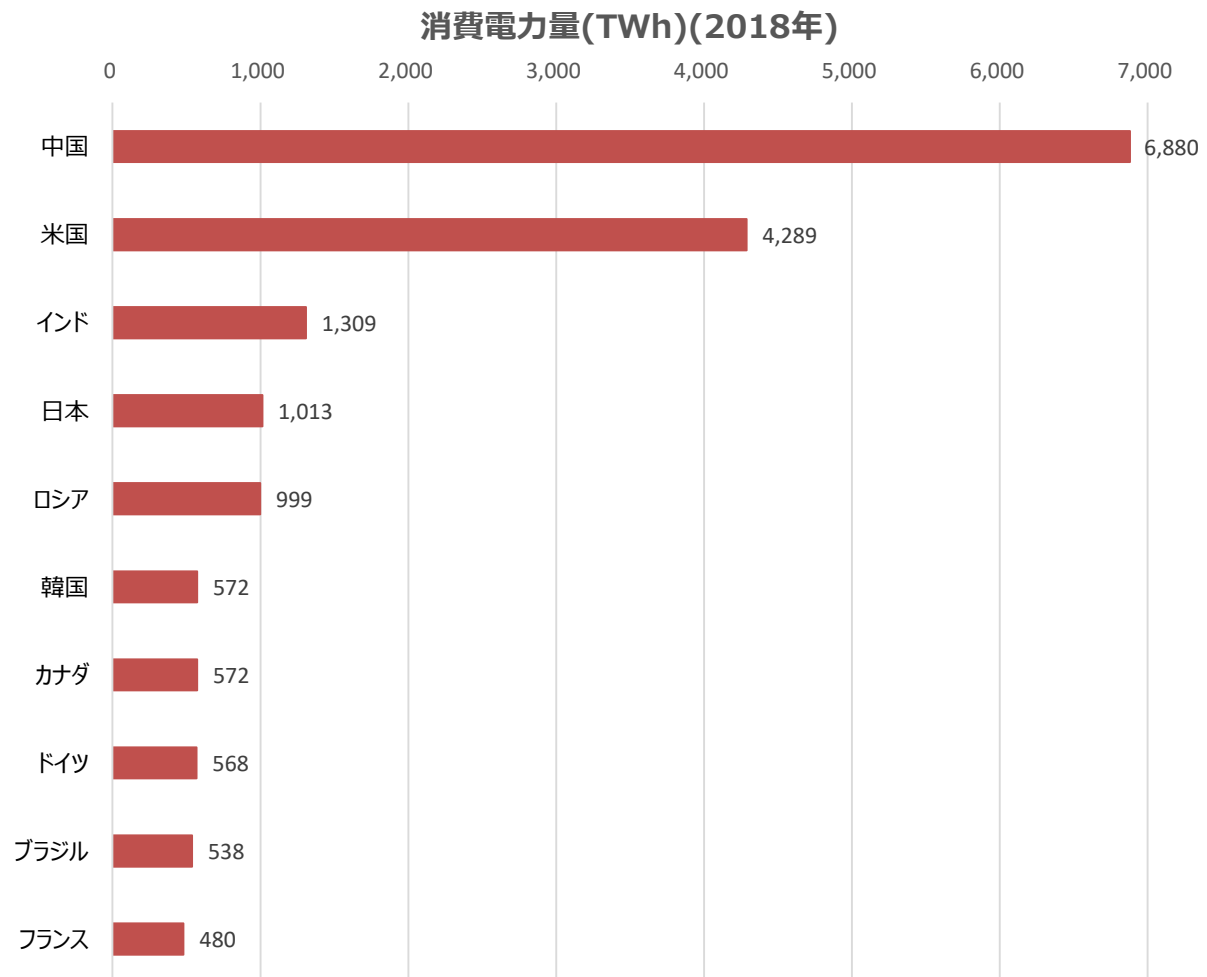
将来的に非利用

出所：IAEA Power Reactor Information System
ホームページ等 (2020/12/18)

カーボンニュートラルと原子力利用の動向②

- 消費電力量が大きく、かつカーボンニュートラルを表明している国の多くは、将来にわたって原子力発電を利用する方針。

2019年名目GDP (ドル)	カーボン ニュートラル	原子力 利用
14兆4000億	表明※ 1	利用
21兆4300億	未表明※ 2	利用
2兆8700億	未表明	利用
5兆800億	表明	利用
1兆7000億	未表明	利用
1兆6500億	表明	2080年頃廃止
1兆7400億	表明	利用
3兆8600億	表明	2022年廃止
1兆8400億	未表明※ 3	利用
2兆7200億	表明	利用



※ 1 : 2060年までにカーボンニュートラル

※ 2 : バイデン政権は、カーボンニュートラルを公約に掲げる。 ※ 3 : ブラジルは、条件付きで2060年までのCNを検討。

カーボンニュートラルと原子力利用の動向③

	名目GDP(ドル) (2019年)	人口(人) (2019年)	経済成長率 (2019年)	電力消費(TWh) (2018年)	国際連系線	電源構成 (2018年) ※一部2017年	自給率 (2018年) ※一部2017年	カーボン ニュートラル	原発利用	
									現在	将来
アメリカ	21兆4300億	3億2800万	2.2	4289	あり	化石：63% 再エネ：17% 原子力：19%	石油：86% ガス：101% 石炭：116%	未表明 (バイデン政権は 公約として掲げる)	○	○
中国	14兆4000億	13億9800万	6.1	6880	あり	化石：71% 再エネ：25% 原子力：4%	石油：34% ガス：63% 石炭：91%	表明 (2060年まで)	○	○
日本	5兆800億	1億2600万	0.7	1013	なし	化石：75% 再エネ：18% 原子力：6%	石油：0% ガス：2% 石炭：1%	表明	○	○
ドイツ	3兆8600億	8300万	0.6	568	あり	化石：53% 再エネ：35% 原子力：12%	石油：4% ガス：7% 石炭：56%	表明	○	2022年 廃止
インド	2兆8700億	13億6600万	4.2	1309	あり	化石：81% 再エネ：17% 原子力：3%	石油：18% ガス：52% 石炭：69%	未表明	○	○
イギリス	2兆8300億	6700万	1.5	326	あり	化石：47% 再エネ：34% 原子力：20%	石油：87% ガス：51% 石炭：19%	表明	○	○
フランス	2兆7200億	6700万	1.5	480	あり	化石：10% 再エネ：19% 原子力：72%	石油：1% ガス：0% 石炭：0%	表明	○	○
イタリア	2兆0000億	6000万	0.3	316	あり	化石：61% 再エネ：40% 原子力：0%	石油：10% ガス：7% 石炭：0%	表明	×	×
ブラジル	1兆8400億	2億1100万	1.1	538	あり	化石：18% 再エネ：79% 原子力：3%	石油：127% ガス：72% 石炭：12%	未表明	○	○
カナダ	1兆7400億	3800万	1.7	572	あり	化石：19% 再エネ：66% 原子力：15%	石油：264% ガス：140% 石炭：187%	表明	○	○
ロシア	1兆7000億	1億4400万	1.3	999	あり	化石：64% 再エネ：17% 原子力：19%	石油：357% ガス：150% 石炭：196%	未表明	○	○
韓国	1兆6500億	5200万	2.0	572	なし	化石：72% 再エネ：4% 原子力：23%	石油：1% ガス：1% 石炭：1%	表明	○	2080年頃 廃止
スペイン	1兆3900億	4700万	2.0	360	あり	化石：40% 再エネ：39% 原子力：20%	石油：0% ガス：0% 石炭：8%	表明	○	×
オーストラリア	1兆3900億	2500万	1.8	248	なし	化石：83% 再エネ：17% 原子力：0%	石油：33% ガス：309% 石炭：678%	未表明	×	×
メキシコ	1兆2600億	1億2800万	-0.3	290	あり	化石：80% 再エネ：18% 原子力：4%	石油：128% ガス：38% 石炭：57%	未表明	○	○
インドネシア	1兆1200億	2億7100万	5.0	263	あり	化石：88% 再エネ：12% 原子力：0%	石油：54% ガス：161% 石炭：543%	未表明	×	○

〔出典〕IMF World Economic Outlook 2020, The World Bank Group World Bank Open Data, IEA Data Services, World Energy Balances 2019 Indicator database, World Energy Balances 2019 extended edition database, IAEA Country Nuclear Power Profiles等

なお、電源構成において、各エネルギー源の比率は四捨五入しているため、合計しても100とならない場合がある。また、「化石」の数値には、廃棄物（非再エネ）が含まれている。

各国の原子力利用の動向①

米、仏、英

- 多くの既設炉が1960～1980年代に建設。新規建設の動きもあるが、多くが40年を超える運転を継続。そのような中で、**革新的技術開発**も積極的に推進。

アメリカ

- ✓ 現在、**2基の原発を建設中**。
- ✓ 運転中の既設炉94基のうち、**82基が60年運転、4基が80年運転**の認可を取得。
- ✓ **バイデン政権は、先進的な原子力等、重要なクリーンエネルギー技術のイノベーションの加速を公約**。

フランス

- ✓ 原子力発電比率を**現在の7割超から50%へ低減**する目標の期限を、**2025年から10年間先送り**。
- ✓ **1基の原発を建設中**だが、今後の**原発新設を2021年半ば以降に検討**予定。
- ✓ **マクロン大統領は、「今後数十年間も原子力がエネルギーミックスの重要な一部を占める」と述べている**。

イギリス

- ✓ 2030年までに**既設のほぼ全基が廃炉予定**。現在 **2基建設中**（仏中連合によるヒンクリーポイントC）。
- ✓ 本年12月のエネルギー白書では、「原子力は**引き続き重要なクリーンな電源**と位置づけ、ヒンクリーポイントC以降も**原発新設が必要**」と記載。
- ✓ **ジョンソン政権は、CNに向けた「グリーン産業革命に向けた10項目」において革新炉開発の基金を創設**。

露、中

- **国内での原子力発電所の新規建設を進めるとともに、積極的に海外展開も推進**。

ロシア

- ✓ 国内**3基建設中**、海外では**36基の原発プロジェクトが進行中**。
- ✓ 運転中の**高速実証炉**に加え、世界で唯一の**洋上原発（浮体式）**が運開するなど、**革新炉開発も推進**。

中国

- ✓ 積極的に外国技術を導入し、**国産化に成功**。2018年、第3世代炉（AP1000とEPR）を世界で初めて運転開始。現在、**10基の原発が建設中**。（計画中は28基）。
- ✓ 海外展開については、パキスタンで実績があるほか、イギリスやアルゼンチン等でも計画を推進。

各国の原子力利用の動向②

アジア、中東、東欧

- 電力需要の急増、エネルギー安全保障等を背景として、**原子力の利用を追求**。

アジア・中東

- ✓ **インド**：7基を印および露メーカーが建設中。米、露、仏メーカーの新設計画あり。
- ✓ **UAE**：4基を韓メーカーが建設中。

東欧

- ✓ **ポーランド**：6基の新設計画（米国と協力協定を締結）
- ✓ **ルーマニア**：2基の新設計画（米国と協力協定を締結）
- ✓ **ブルガリア**：3基の新設計画（米国と協力覚書を締結）

独、韓

- **将来的に原子力発電所を閉鎖する方針**。

ドイツ

- ✓ **メルケル政権は、2022年末までに稼働中の全6基の原発を終了予定**。
- ✓ 原子炉閉鎖に対する補償金を巡り事業者と政府が訴訟中。ドイツ与党内の保守グループ「価値同盟」が石炭火力廃止前倒しのため原発運転延長を要求。

韓国

- ✓ **文在寅政権は、今後新たな原発の建設計画を認めず設計寿命を終えた原子炉から閉鎖する方針**。
- ✓ 大統領直属の国家気候環境会議は、2050年のカーボンニュートラル達成のためには、石炭火力廃止の前倒しが望ましく、また再エネを重点的に取り組み、**天然ガスや原子力を補完的に活用すべき**と発表。

我が国のエネルギー選択の歴史と原子力利用の歩み

- 我が国は電力需要の拡大、石油危機、温暖化等を背景に、**エネルギーの選択肢を拡大**。その中で、**原子力利用を推進**。

原子力平和利用の開始（50年代～）

- ・世界初となる原子炉が米国で運転開始（51年）
- ・アイゼンハワー米大統領「Atoms for Peace」（53年）
- ・日本で原子力基本法が成立（55年）
- ・日本初の商業用原子炉（東海発電所）が運転開始（66年）

国内外での相次ぐトラブル（70年代後半～）

- ・スリーマイル島原発事故（79年）
- ・チェルノブイリ原発事故（86年）
- ・もんじゅナトリウム漏洩事故（95年）
- ・JCO臨界事故（99年）

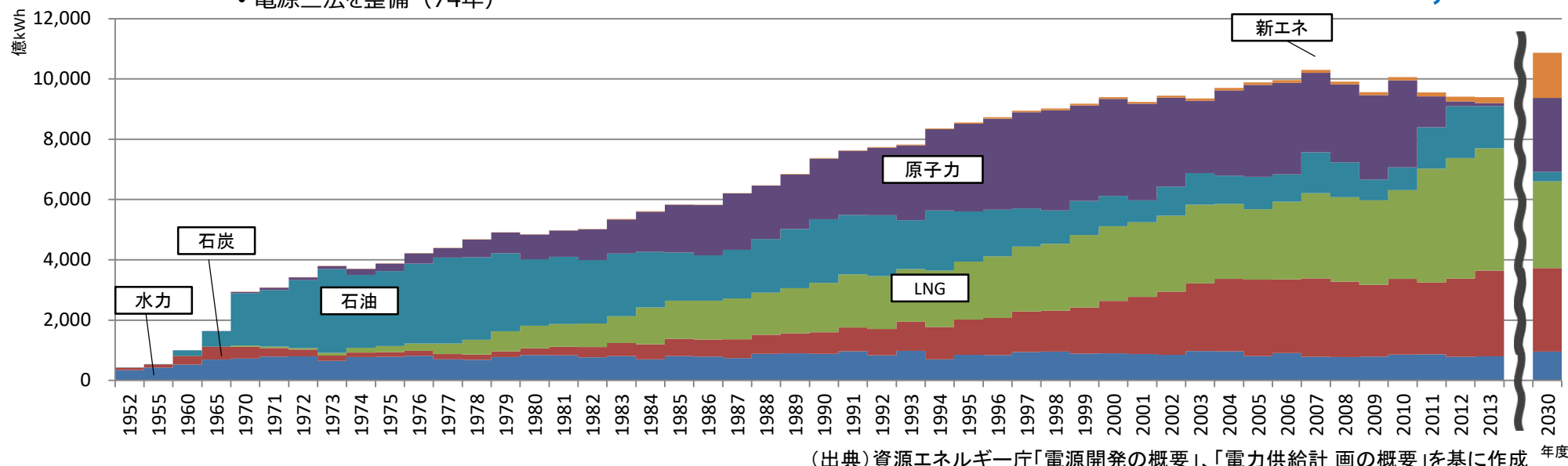
原子力利用の拡大（70年代～）

- ・日本初のBWR（敦賀1）、PWR（美浜1）が運転開始（70年）
- ・田中角栄首相「原子力を重大な決意をもって促進をいたい」答弁（73年：石油危機時）
- ・電源三法を整備（74年）

温暖化対策と原子力利用（90年代～）

- ・京都議定書（97年）の採択など、温暖化対策に注目が集まる中、世界各国での原発新設計画が増加

福島第一原発事故の発生



戦後復興期 高度成長期 第一次石油危機後 第二次石油危機後 長期デフレ 地球温暖化問題の顕在化

水力から
石炭

石炭から石油へ

脱石油。ガスと原子力の開発に。石炭の再評価。
世界最高の省エネ国家へ。

温暖化の要請から原子力重視へ

これからの
選択

福島第一原発事故後の原子力政策

- 福島第一原発事故後の原子力政策の動きは以下のとおり。

革新的・エネルギー環境戦略（2012年9月）

- ・ 2030年代に原発稼働ゼロを可能とするよう、あらゆる政策資源を投入する。

第四次エネルギー基本計画（2014年4月）

- ・ いかなる事情よりも安全性を全てに優先させ、国民の懸念の解消に全力を挙げる前提の下、原子力発電所の安全性については、原子力規制委員会の専門的な判断に委ね、原子力規制委員会により世界で最も厳しい水準の規制基準に適合すると認められた場合には、その判断を尊重し原子力発電所の再稼働を進める。その際、国も前面に立ち、立地自治体等関係者の理解と協力を得るよう、取り組む。
- ・ 原発依存度については、省エネルギー・再生可能エネルギーの導入や火力発電所の効率化などにより、可能な限り低減させる。

長期エネルギー需給見通し（2015年7月）

- ・ 原子力発電比率 = 20～22%程度

第五次エネルギー基本計画（2018年7月）

- ・ 2030年のエネルギーミックスにおける電源構成比率の実現を目指し、必要な対応を着実に進める。
- ・ 2050年シナリオに伴う不確実性、先行する主要国情勢から得られる教訓、我が国固有のエネルギー環境から判断し、再生可能エネルギーや水素・CCS、原子力など、あらゆる選択肢を追求する。（中略）現状、実用段階にある脱炭素化の選択肢である原子力に関しては、（中略）人材・技術・産業基盤の強化に直ちに着手し、安全性・経済性・機動性に優れた炉の追求、バックエンド問題の解決に向けた技術開発を進めていく。

原子力発電所の現状

2020年12月21日時点

- エネルギーミックスの実現に向け、設備利用率の向上や40年超運転も含め、安全確保を大前提として、再稼働を進める。

再稼働
9基

設置変更許可
7基

新規規制基準
審査中
11基

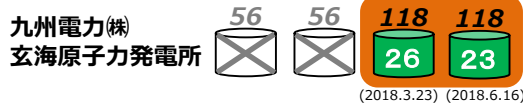
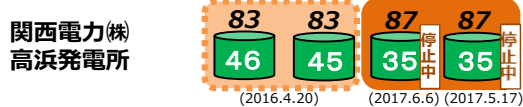
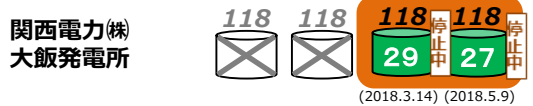
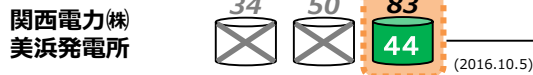
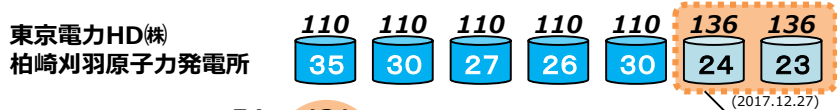
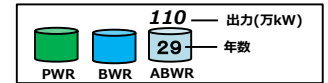
未申請
9基

廃炉
24基

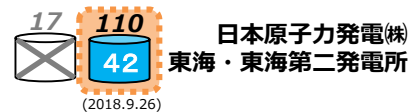
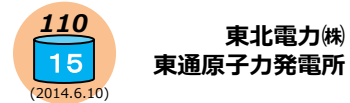
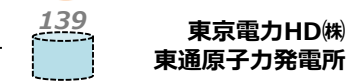
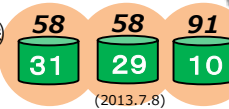
稼働中 3基、停止中 6基 (起動日)

(許可日)

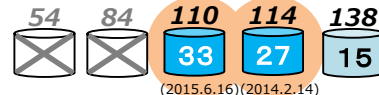
(申請日)



北海道電力(株) 泊発電所



四国電力(株) 伊方発電所



主な個別地点の状況①（設置変更許可済：7基）

東北電力 女川原子力発電所2号機（BWR）

- **安全対策:**原子炉設置変更許可済（2020年2月）、工事完了予定は2022年度中
- **防災対策:**緊急時対応を策定済（2020年6月、原子力防災会議に報告・了承）
- **地元理解:**宮城県、女川町、石巻市が、再稼働に対する理解表明（2020年11月）

関西電力・高浜発電所1・2号機、美浜発電所3号機（PWR） ※いずれも40年超運転

- **安全対策:**高浜1号機・美浜3号機の安全対策工事は完了、高浜2号機の工事完了は2021年4月
- **防災対策:**高浜地域の緊急時対応を策定（2015年12月）・改訂（2020年7月）、美浜地域の緊急時対応は地域協議会で検討中
- **地元理解:**高浜町議会（2020年11月）、美浜町議会（2020年12月）が、再稼働に対する理解表明

東京電力 柏崎刈羽原子力発電所6・7号機（ABWR）

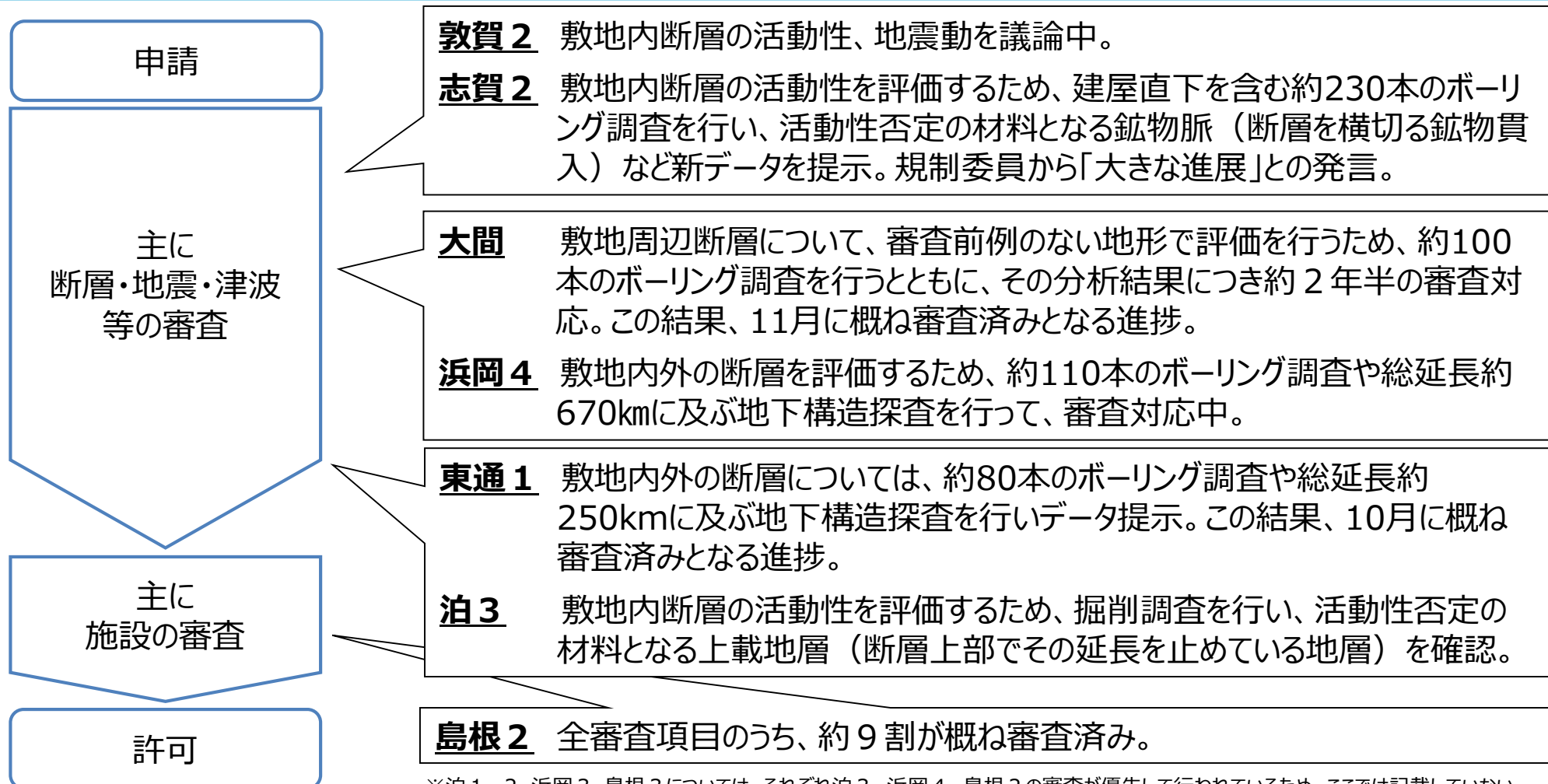
- **安全対策:**安全審査は終了、7号機の工事完了予定は2020年12月
- **防災対策:**緊急時対応を地域協議会で検討中、住民参加の実働訓練を実施（10月）に加え、個別訓練を複数回実施

日本原電・東海第二発電所（BWR） ※40年超運転

- **安全対策:**安全審査は終了、工事完了予定は2022年12月
- **防災対策:**緊急時対応は地域協議会で検討中

主な個別地点の状況②（許可審査中：11基）

- 再稼働に係る許可審査は、一般に、①断層等の地質、地震動、津波等の審査が概ね終了した後、②施設の審査を経て、基本設計の許可（設置変更許可）に至る。
- 円滑な審査対応のため、事業者間で連携し、①先行プラントの審査知見を横展開、②相互に人材派遣（派遣先の審査ピークに対応するとともに、派遣元へ審査経験を持ち帰って活用）等を実施。

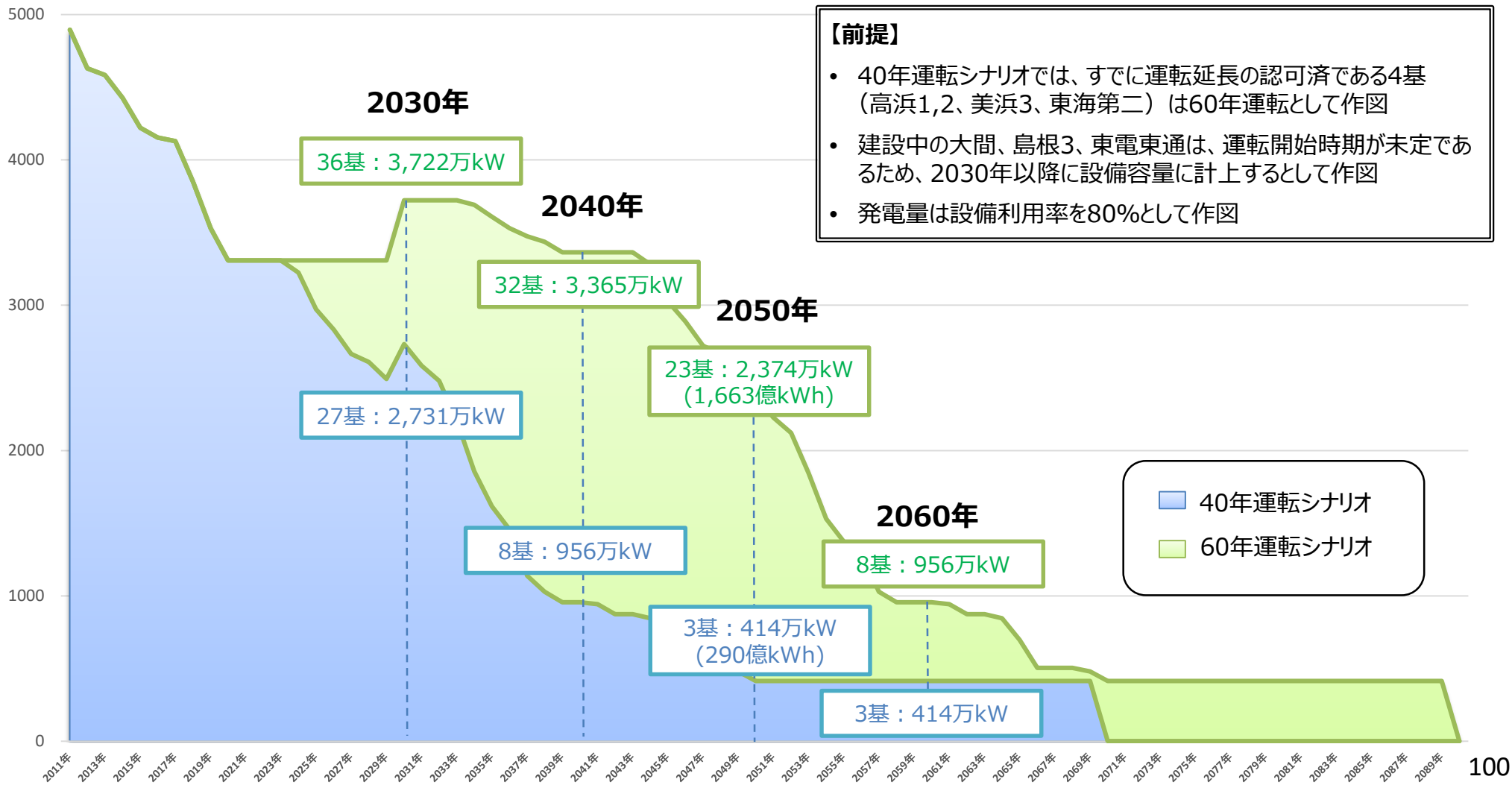


※泊1、2・浜岡3・島根3については、それぞれ泊3、浜岡4、島根2の審査が優先して行われているため、ここでは記載していない。

国内原子力発電所の将来の設備容量の見通し

- 廃炉が決定されたものを除き、**36基の原子力発電所（建設中を含む）が60年運転すると仮定**しても、自然体では、**2040年代以降、設備容量は大幅に減少する見通し**。

設備容量
(万kW)



カーボンニュートラル社会における原子力政策の課題と対応

1. 原子力政策を巡る動向

- (1) 福島復興と福島第一原発の廃炉の取組
- (2) 原子力エネルギーの特性
- (3) カーボンニュートラルと原子力を巡る世界の動向
- (4) 日本の原子力利用の歩みと現状

2. 原子力政策の課題と対応の方向性

課題1：安全性の追求

課題2：立地地域との共生

課題3：持続的なバックエンドシステムの確立

課題4：事業性の向上

課題5：人材・技術・産業基盤の維持・強化、イノベーションの推進

原子力政策の課題と対応の方向性

課題

対応の方向性

① 安全性の追求

- 福島第一原発の事故後、原子力発電に対する安全性への懸念が高まる中で、原子力の安全性追求にどのように取り組んでいくのか。

② 立地地域との共生

- エネルギー政策・原子力政策を進めていくためには、立地地域の理解と協力が欠かせない。他方で、福島第一原発の事故後、原子力に対する信頼の低下、原子力発電所の長期停止や廃炉などの環境変化が生じている中で、中長期的な視点も含め、立地地域との共生にどのように取り組んでいくのか。

③ 持続的な バックエンドシステムの 確立

- 六ヶ所再処理工場やMOX燃料加工工場の事業変更許可、北海道の2町村における文献調査の開始など、一定の進捗がみられる一方で、道半ば。
- 今後、サイクル、最終処分、廃炉に至るまでの持続的なバックエンドシステムの確立に向けてどのように取り組んでいくのか。

④ 事業性の向上

- 原子力事業は、初期投資が大きく、長期安定的に運営して回収することで事業性を確保するという事業構造。
- 電力自由化が進展する中で、原子力発電の事業性向上に向けてどのように取り組んでいくのか。

⑤ 人材・技術・産業基盤 の維持・強化と 原子力イノベーション

- 中国を含め海外で積極的な動きがある中で、日本は、高いレベルの人材・技術・産業基盤を有する一方、足下では原子力人材の減少や一部企業の原子力事業からの撤退などが生じている。こうした中で、人材・技術・産業基盤の維持・強化にどのように取り組んでいくのか。
- また、将来的に原子力利用を追求していくためには、更なる安全性・経済性等の追求に向けた取組を継続していくことが不可欠。世界の動向も踏まえ、原子力イノベーションにどのように取り組んでいくのか。

- ① 独立した原子力規制委員会・新規規制基準に基づく厳格な運用
- ② 産業界による不断の取組
- ③ 安全性向上に資する技術開発、導入

- ① 万が一に備えた避難計画の具体化・充実化、訓練を通じた不断の改善など原子力防災対策の強化
- ② 原子力の必要性に対する理解活動
- ③ 持続的な立地地域の発展に向けた取組

- ① 再処理施設をはじめとするサイクル施設の竣工、プルサーマルの推進、使用済燃料対策、ロードマップに基づく高速炉開発等の核燃料サイクルの推進
- ② 文献調査の着実な実施、更なる対話活動の取組等の最終処分の実現に向けた取組
- ③ 海外事業者の知見の活用、クリアランス物の建材等への再利用先拡大の円滑な廃炉に向けた取組

- ① 設備利用率の向上（トラブル低減、定期検査の効率的実施、運転サイクル期間の長期化等）
- ② 安全性が確認された原子力発電所の長期利用

（人材・技術・産業基盤）

- ① 原子力の安全利用のための人材育成を通じた技術・技能の伝承による人材・技術の維持・強化
- ② サプライチェーンの維持・強化による機器・部品の供給途絶リスクの回避

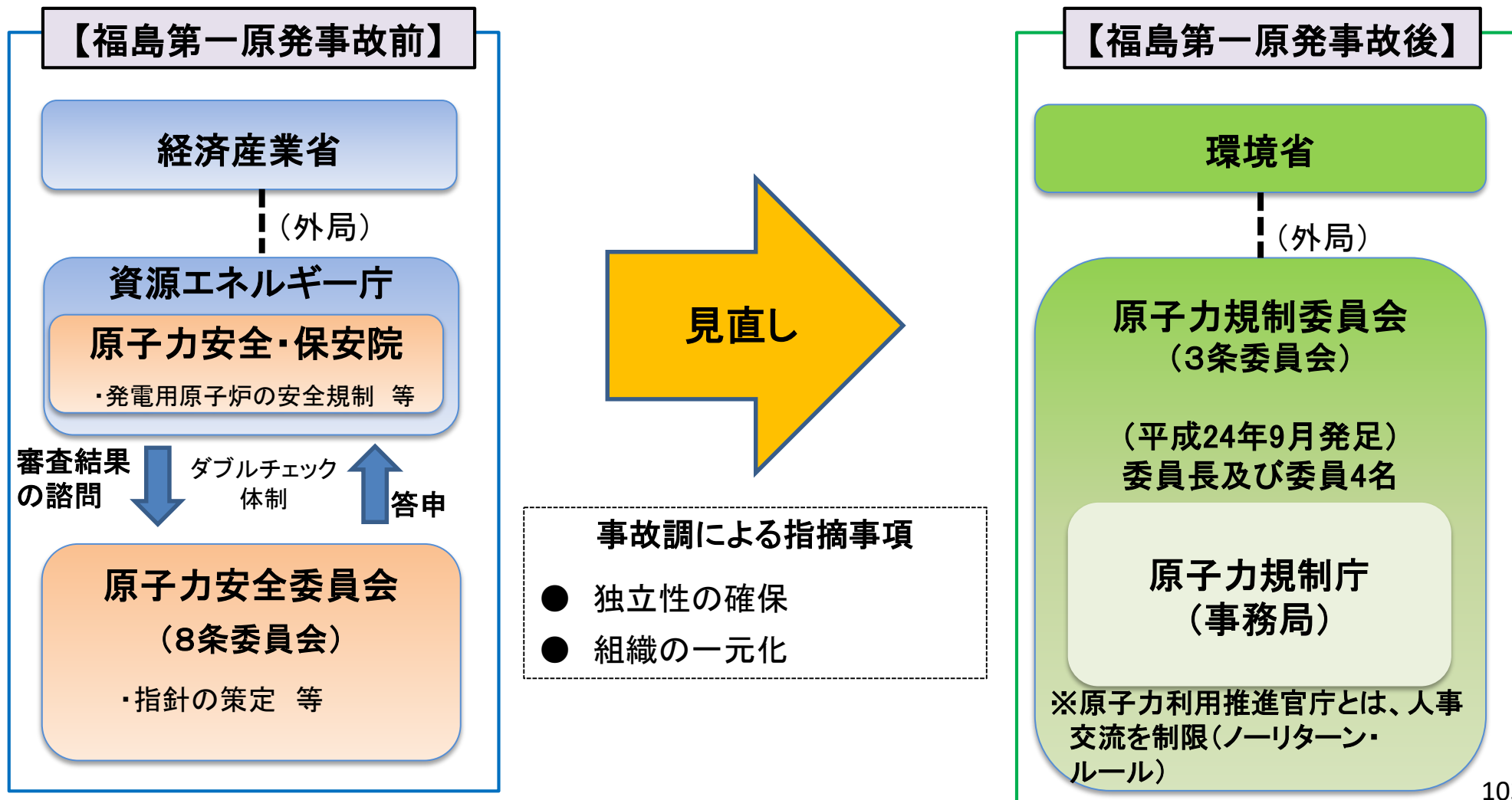
（原子力イノベーション）

- ① 軽水炉の安全性向上に資する研究開発の推進
- ② 小型モジュール炉（SMR）、高速炉、高温ガス炉等の革新的原子力技術開発の推進

（注）これらの課題以外にも、今後検討を深める中で生じる様々な課題について対応策を検討する必要がある。

【課題①】安全規制組織の見直し（原子力規制委員会の設置）

- 事故の反省・教訓を踏まえ、規制当局と推進当局を分離する観点から、高い独立性を有する原子力規制委員会を設置。
- 原子力発電所の安全性は、原子力規制委員会の判断に委ね、その判断を尊重し、再稼働を進める方針。



【課題①】新規制基準の策定

- 原子力規制委員会は、福島第一原発事故の教訓を取り入れ、政府・国会の事故調をはじめ**国内外の事故調等の指摘事項**、さらに**IAEA安全基準や諸外国の規制等**も参考としつつ、日本の自然条件も考慮した上で、新規制基準を策定。

事故調等の指摘事項（例）

- 外部事象も考慮したシビアアクシデント対策が十分な検討を経ないまま、事業者の自主性に任されてきた。
（国会事故調）
- 設置許可された原発に対してさかのぼって適用する（「バックフィット」といわれる）法的仕組みは何もなかった。（国会事故調）
- 地震や津波に対する安全評価を始めとして、事故の起因となる可能性がある火災、火山、斜面崩落等の外部事象を含めた総合的なリスク評価は行われていなかった。（政府事故調）

諸外国規制を参考とした検討（例）

- 従来の日本の安全指針類と、IAEA安全基準や米国、欧州主要国（フィンランド、フランス、ドイツ、英国）の規制を比較し、これを参考としつつ、新規制基準に取り入れるべき事項を検討。

<検討例>

- 設計基準の対象とする自然現象等として、何を追加的に考慮すべきか、海外の安全基準や報告書を参考として検討。
（例）火山、森林火災、竜巻 等
- 大規模な自然災害やテロリズム等、設計基準を超える事象への対応について、米国及び欧州の対応例を参考として検討。

【課題①】新規制基準の概要

- 新規制基準においては、地震・津波など自然現象の想定と対策要求を大幅に引き上げるとともに、万一シビアアクシデントやテロが発生した場合の対策を新たに要求。
- 対応すべき新知見が得られた場合、それを規制基準に反映し既許可施設にも適用（バックフィット）。

＜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	新設
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）	強化又は新設
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	強化
耐震・耐津波性能	

（テロ対策）（シビアアクシデント対策）

強化又は新設

強化

【課題①】各発電所における新規制基準への対応

- 新規制基準への対応を通じ、各発電所では、地震・津波等への対応能力を大幅に強化するとともに、シビアアクシデント対応設備を強化、対応手順を整備。
- また、バックフィットによる新知見への対応も累次実施。

自然災害対策の強化 (例：女川原子力発電所)

地震

- 東日本大震災など最新の地震動の特徴を考慮し、さらに、発電所に厳しい影響を与える場所で地震が発生するケースを想定して、設計の基準とする地震動を大幅引き上げ。

震災前 580ガル → 1000ガル
(※東日本大震災時は567.5ガル)

- こうした地震動にも損傷しないよう、建屋、機器、配管（約4300箇所）の補強工事を実施。

津波

- 津波の元となる地震について、東日本大震災クラスの地震規模（M9.1）で、さらに、発電所に厳しい影響を与える場所で発生するケースを想定して、設計の基準とする津波高さ（23.1m）を設定。

(※東日本大震災時は13m)

- こうした津波が来ても、敷地内に流入しないよう、海拔29mの防潮堤を新たに建設。
- さらに、想定を超える高さの津波に備え、重要機器がある建屋に、防潮壁・水密扉を設置。

シビアアクシデント対策 (例：美浜発電所)

電源の多重化・多様化

- 外部電源（耐震強化済み、3系統）や、非常用ディーゼル発電機（水冷式、2台）が、いずれも使用できなくなった場合にも備え、更なるバックアップとして、空冷式非常用発電装置2台、電源車6台を新たに配備。

冷却手段の多重化・多様化

- 非常時に原子炉を冷やすための注水ポンプを、従来の2系統に加え、更にバックアップの系統を新設。
- さらに、万一、原子炉を冷やすことができなくなった場合に備え、海水を取水して格納容器を冷やす、移動式の大容量ポンプ3台を新たに配備。

バックフィット対応

- 2013年の新規制基準施行後、新知見をもとに規制基準が累次改善。
- これを踏まえ、各発電所では、必要に応じ設備、対応手順等の追加整備を実施。

(2014年：1件 2017年：6件、
2018年：1件、2019年：1件)

(例) 噴火火砕物（火山灰）対策

ディーゼル発電機の吸気フィルターに対する噴火火砕物の影響について新知見が得られたため、規制委員会が本件に関する検討チームを設置。



2017年12月、万一の火山活動時に原子炉停止や冷却操作を行うことができるよう対策を求めることを決定。

【課題①】産業界による不断の取組

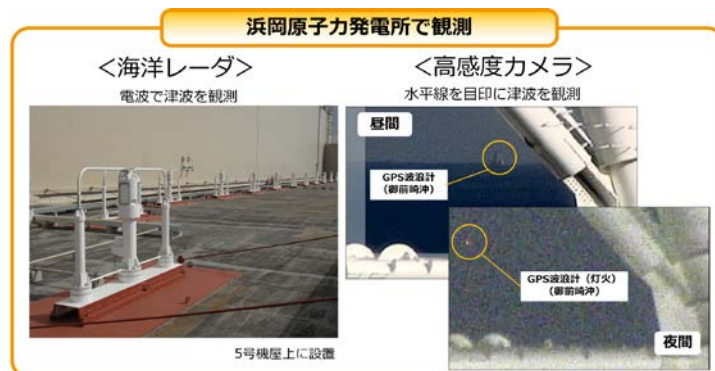
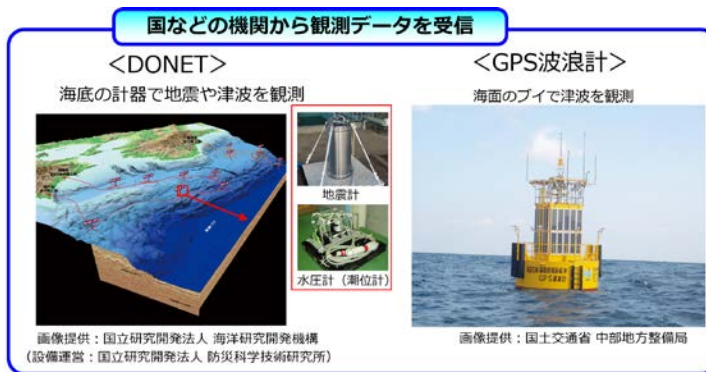
- 規制対応にとどまらず、その後の長期運転を安全に進めていくため、各事業者がサイトの特性を踏まえた自主的な安全対策を追加。さらに、産業界で連携して知見の共有・学びあい等を実施し、安全性向上に取り組む。

サイト特性に合わせた追加対策

- 独自の安全設備、システムの開発

(例) 津波監視システム (中部電力)

多様な津波観測データをリアルタイムで監視し、襲来を予測



(出典) 中部電力より提供

産業界大での共有・学び合い

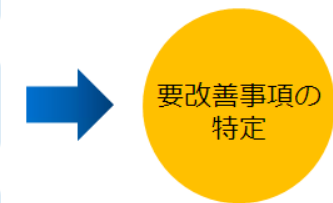
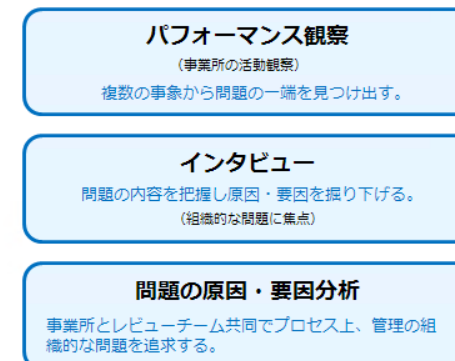
- 業界団体が保守管理等に関する知見を整理し、事業者の取組を牽引

(例) 原子力エネルギー協議会 (ATENA) が自主ガイドを策定・実施。各事業者は、ガイドラインに基づく安全性向上の取組にコミット

- 長期停止期間中における保全ガイド
- 長期運転に向けた設計経年化評価ガイド
- サイバーセキュリティに関する自主ガイド

- 第三者機関 (原子力安全推進協会 (JANSI)) が各発電所の安全向上への取り組みを評価、改善点を提示。教育・訓練等のソフト対策を含めた優良事例を横展開。12発電所で延べ19回実施。

※活動イメージ



(出典) 原子力安全推進協会
ホームページ

【課題①】安全性向上技術の開発

- 原子力の更なる安全性向上の追求のため、福島第一原子力発電所の事故の教訓も踏まえ、**民間で多様な安全性向上技術を開発し、導入に向けた取組を実施中。**

溶融した燃料を受け止める技術

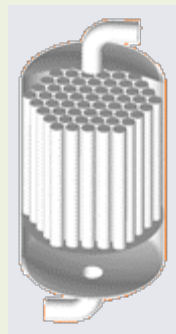
- コリウムシールド
 - 事故時に溶融燃料を受け止め
 - 柏崎刈羽発電所 7 号機に導入



導入された
コリウムシールド

水素処理技術

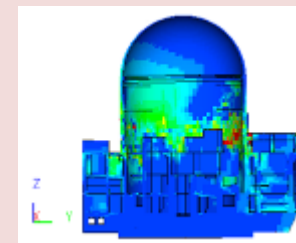
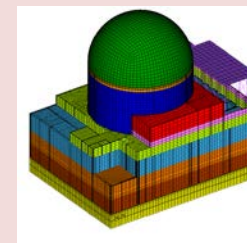
- 化学反応による水素処理装置
 - 事故時に発生する水素を処理し、水として格納容器に戻す
 - 来年度までに実証試験



水素処理装置の
概念図

リスク評価技術の開発

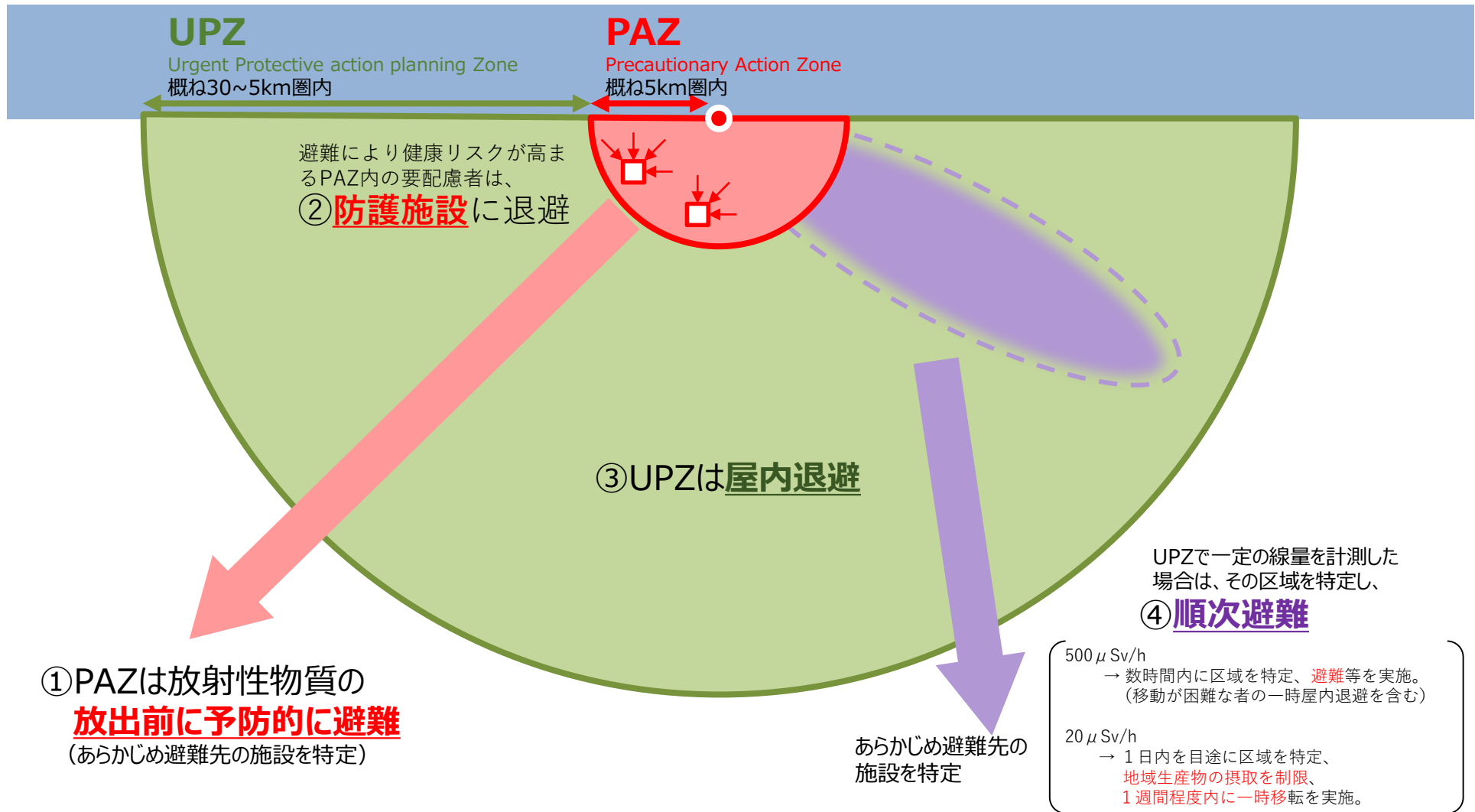
- 確率論的リスク評価（PRA）
 - 地震や津波等のリスクを評価するための計算手法等を整備し、よりの確な安全対策に反映
 - 来年度までに実証試験



シミュレーションモデル（左）
と地震時の解析例（右）

【課題②】原子力防災対策の強化（避難の考え方）

- 福島第一原発事故以前は、住民避難などの防災対策を検討する範囲は原子力発電所から10Km圏内だったが、その範囲を30Km圏内に拡大するとともに、原子力施設からの距離に応じて、即時避難や屋内退避等の避難の考え方を整理。（原子力規制委員会による原子力災害対策指針の策定）
- また、避難計画の策定にあたって、自治体任せにせず、政府が支援する枠組みを構築。



【課題②】原子力防災対策の強化（避難計画の具体化）

- 避難計画の策定にあたっては、国が策定当初からきめ細かく関与し、避難手段や資機材の確保等、地域が抱える課題をともに解決するなど、計画の具体化を支援。

＜策定時の共通課題の例＞

- | | |
|----------------|--------------------------|
| 1. 要配慮者の安全な避難 | 5. 避難受入れ自治体による「受入れ体制」の整備 |
| 2. 移動手段（バス）の確保 | 6. 避難退域時検査及び簡易除染実施体制の整備 |
| 3. 複合災害時の避難 | 7. 感染症の流行下での防護措置 |
| 4. 安定ヨウ素剤の事前配布 | |

国による自治体支援

- 原子力発電所がある13地域に「地域原子力防災協議会」を設置し、関係自治体と緊密に連携し、避難計画作成等を全面的に支援。
- 例えば、放射線防護対策施設の整備や、安定ヨウ素剤の調達など、緊急時に必要となる資機材等について、必要な財政的支援を実施。
- 国、自治体、電力事業者等が合同で実施する原子力総合防災訓練の主導や、道府県訓練の支援、自治体職員等の防災業務関係者への研修を実施。

事業者による防災対策の充実

- 原子力災害時には、自治体に対して、福祉車両・生活物資等の物的支援や、避難退域時検査等における要員などの人的支援を実施。
- 原子力災害が発生した場合に備えて、美浜原子力緊急事態支援センターを設置し、12社間での原子力事業者間協力協定を締結。
- さらには、協定の実効性をより一層高めるため、地理的に近接した各社間で追加協力協定を締結し、対策をさらに充実。

【課題②】原子力防災対策の不断の改善・強化

- 避難計画の策定後も、事故への備えに終わりはないとの考えの下、総合防災訓練、道府県訓練、事業者防災訓練の実施等を通じて、計画、設備・機器、対応能力等を検証するとともに、より合理的な人員・資機材の配置といった防災体制への改善・整備を行うなど、原子力防災対策の不断の改善・強化に取り組む。

原子力総合防災訓練の実施状況

実施年月	発電所・実施地域
平成25年10月	九州電力(株)川内原子力発電所 [鹿児島県]
平成26年11月	北陸電力(株)志賀発電所 [石川県]
平成27年11月	四国電力(株)伊方発電所 [愛媛県]
平成28年11月	北海道電力(株)泊発電所 [北海道]
平成29年9月	九州電力(株)玄海原子力発電所 [佐賀県・長崎県・福岡県]
平成30年8月	関西電力(株)大飯発電所及び高浜発電所 [福井県・京都府・滋賀県]
令和元年11月	中国電力(株)島根原子力発電所 [島根県・鳥取県]
令和3年2月(予定)	東北電力(株)女川原子力発電所 [宮城県]

※関係自治体、国、自衛隊、海上保安庁、警察、消防、各電力などが参加

具体的な訓練内容（例）

- ・ 事業者からの連絡・通報
- ・ オフサイトセンターや現地対策本部等の設置・運営
- ・ 現地への国の職員・専門家の緊急輸送
- ・ 環境放射線の緊急時モニタリング
- ・ P A Z 内要配慮者の放射線防護対策施設への移動
- ・ U P Z 内住民の屋内退避
- ・ 安定ヨウ素剤の緊急配布、避難退域時検査、避難先への住民避難、一時移転
- ・ 原子力災害医療
- ・ 交通規制・警戒警備
- ・ 広報対応 など

【課題②】立地地域のインフラ整備支援

○原子力発電施設等立地地域の振興に関する特別措置法

原子力発電所の周辺地域について、避難道路等の防災インフラ整備などに対する支援措置を規定。

○支援措置の概要

（１）防災インフラ整備への支援

【対象】

住民生活の安全の確保に資する道路、港湾、漁港、消防施設、義務教育施設

【支援内容】

- | | | |
|----------------------|-----------------|----------------|
| ①国の補助率のかさ上げ（５０％→５５％） | [約 １４億円（令和元年度）] | } 地方負担は実質１３．５％ |
| ②地方債への交付税措置（７０％） | [約１２２億円（令和元年度）] | |

（２）企業投資・誘致への支援（不均一課税（減税）による収収減の補填）

○電源立地交付金等

- 電源立地地域対策交付金等などにより、立地地域の自治体を実施する公共施設の整備や産業振興等を支援。
- 道路のインフラ整備としては、県道・市道等の整備や維持補修の事業が交付金を活用して実施されている。

（令和元年度の電源立地地域対策交付金
725.9億円。うち、道路関連事業45.1億円。）



完成後

【課題②】原子力の必要性に対する理解に向けた取組

- 地域の方々が原子力の必要性・安全確保に向けた取組に対する理解を深めるために、**事業者に対して**は、「情報の受け手」がその取組をイメージしやすいよう、**「顔の見える」コミュニケーションの強化を求めている**。
- **国として、立地地域はもちろん、安価で安定的な電気という利益を享受している消費地に対しても、原子力に対する理解が深まるよう、丁寧かつ正確な発信に取り組む。**

事業者の取組（中部電力の事例）

- 発電所で働く従業員が、一軒一軒訪問して行う「訪問対話」をはじめ、様々な機会を通じて、地域とのコミュニケーションを深めている。

○訪問対話

発電所で働く従業員が、一軒一軒訪問。
約84,000戸を約1年半で1巡
2019年3月に4巡目を開始



○発電所キャラバン

地域のイベント等でブースを設置し、原子力の必要性や安全対策について説明。
2019年度実績：16回開催



○意見交換会

安全対策や、エネルギー問題等について、少人数で話し合う意見交換会を開催。
2019年度実績：30回実施



○発電所見学会

安全性向上に向けた取組を説明。
2019年度実績：発電所見学者 15,303人
原子力館来館者 144,619人



国の取組

（立地地域に向けて）

- 住民説明会や地方議会において、原子力の安全性・必要性・防災対策について、関係省庁から説明。
- 国の職員が頻繁に現地を訪問し、首長等と密接にコミュニケーション。

（消費地含めた全国に向けて）

- エネルギー政策に関するシンポジウムや、説明会を2016年以降約500回開催。
- 資源エネルギー庁HPでは、エネルギーに関する話題をわかりやすく発信するスペシャルコンテンツを259本掲載。

※2020年12月現在

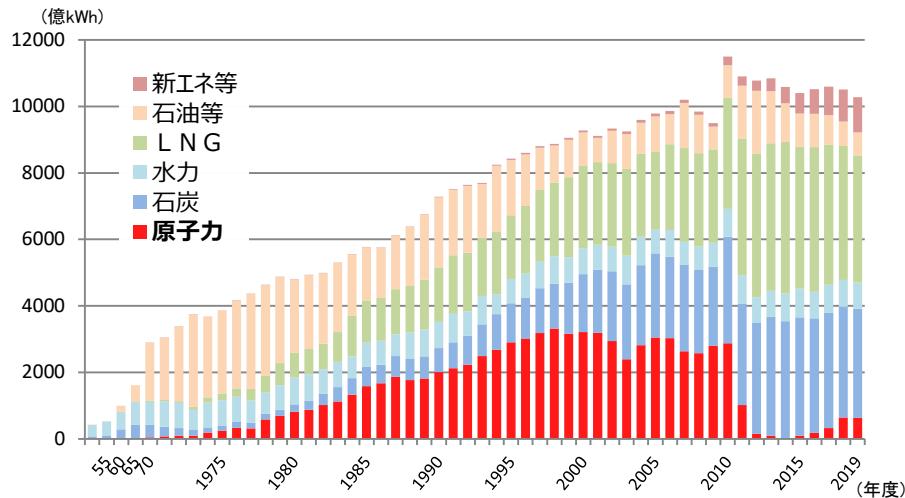
【課題②】我が国のエネルギー・原子力政策における立地地域の重要性

- 各地の原子力発電所が、都市部・工業地帯など全国の消費地への電力の安定供給に貢献。まさに、我が国のエネルギー・電力安定供給政策は、立地地域とともに歩んできた歴史。

日本の総発電電力量に占める 原子力発電の割合 (1965年-2019年)

約20%

総発電電力量	原子力発電電力量
約37.4兆kWh	約7.8兆kWh



県内電力需要に対する 当該県内の原子力発電量の割合 (2010年)

福井県：約8.2倍

県内需要	原子力発電電力量
約92.6億kWh	約767.2億kWh

佐賀県：約3.4倍

県内需要	原子力発電電力量
約68.6億kWh	約231.1億kWh

新潟県：約1.7倍

県内需要	原子力発電電力量
約168.6億kWh	約280.7億kWh

出典：「総合エネルギー統計」資源エネルギー庁（2010年度以降）
「電源開発の概要」、「電力供給計画の概要」資源エネルギー庁（2009年度以前）
※1966～69年のデータは除く

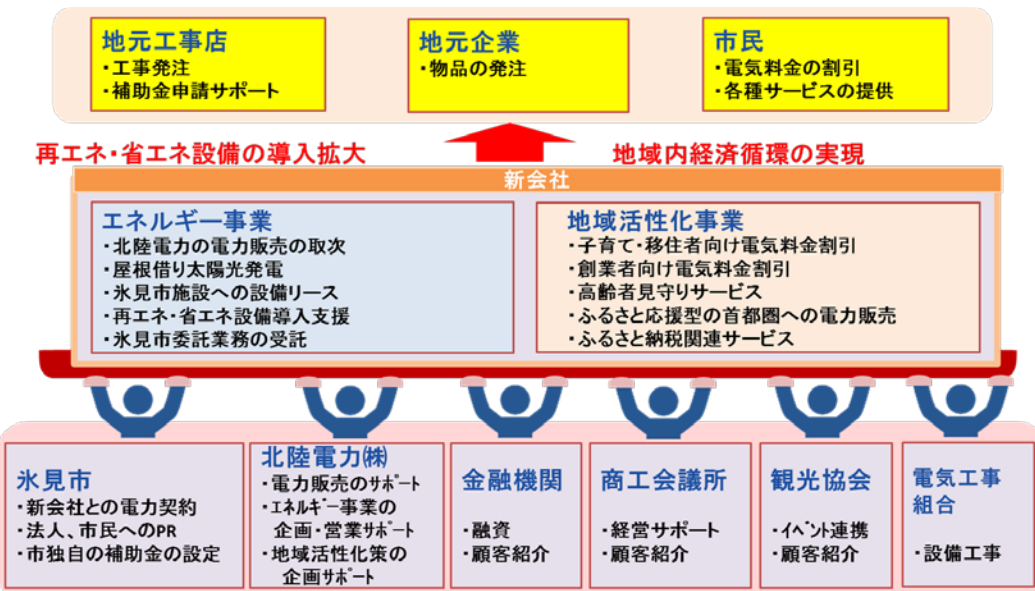
【課題②】持続的な地域経済の発展に向けて

- 電力供給を支えてきた立地地域の持続的な発展のために、**事業者自らが主体的に汗をかいて、地域に根差し、災害に強いまちづくり等に貢献していくよう、地域と協同したプロジェクトの積極的な推進や、NPO活動等への参画・貢献等を行うよう求めている。**
- **国もエネ高補助金、専門家派遣事業等により、自治体の実情に応じたきめ細かい支援を実施。**

地域活性化を目的としたエネルギー事業会社の設立

（富山県氷見市）

- ・ 氷見市、北陸電力(株)、金融機関、商工会議所ほか関係団体が出資し、エネルギー事業や地域活性化事業に取り組む新会社を設立。
- ・ 氷見市内の再エネ・省エネ設備の導入拡大や地域内経済循環の実現を、オール氷見で目指す。



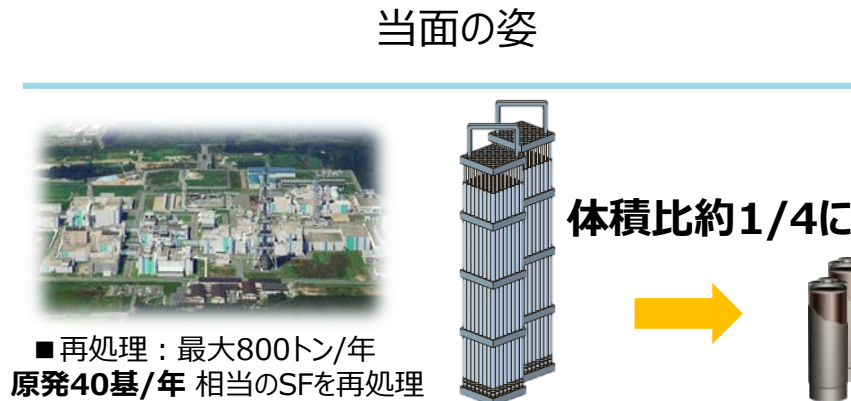
『嶺南Eコースト計画』の策定・実行（福井県）

- ・ 多数の原子力発電所等が集積する嶺南地域において、エネルギーをキーワードに、原子力と同様にCO2フリーの再生可能エネルギーの利活用等も取り込みながら、地域経済の活性化や環境に優しいまちづくりの実現を目指す「嶺南Eコースト計画」を2020年3月に策定。
- ・ 計画の策定にあたり、学識者、産業界、自治体のほか、国(文科省・経産省)、電力事業者(関西電力、北陸電力、日本原子力発電)も検討に参画。
- ・ 計画に基づく具体的なプロジェクトとして、関西電力が「シェアEV等を活用したVPP実証の実施」を提案。敦賀市と関西電力がVPP実証に係る協定を締結し、嶺南地域全体で事業を展開中。
- ・ 国も上記のVPP実証事業等をエネ高補助金（エネルギー構造高度化・転換理解促進事業）で支援するとともに、観光施設とエネルギー関連施設を組み合わせたPR事業に専門家派遣事業で協力

【課題③】核燃料サイクル推進の意義

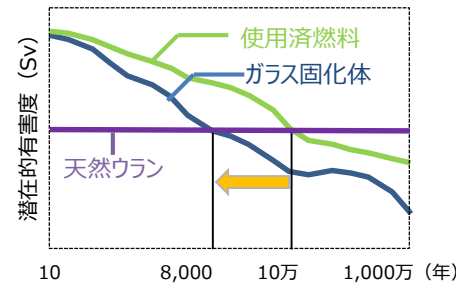
- 核燃料サイクルには①高レベル放射性廃棄物の減容化②有害度低減③資源の有効利用のメリット。
- 今後も安定的に原子力を利用するため、引き続き、核燃料サイクルを推進することが重要。

①高レベル放射性 廃棄物の減容化



将来的には
高速炉サイクルを目指す

②有害度低減



毒性が自然界並に
低減する期間
【Bq】100万年
→ 数万～10万年
【Sv】10万年
→ 8千年

【Sv】300年に短縮

③資源有効利用



- 新たに1～2割の燃料
- 800トンのSFから100トン程度のMOX燃料(原発12基/年 相当)

更なる有効利用

【課題③】核燃料サイクルの確立に向けて

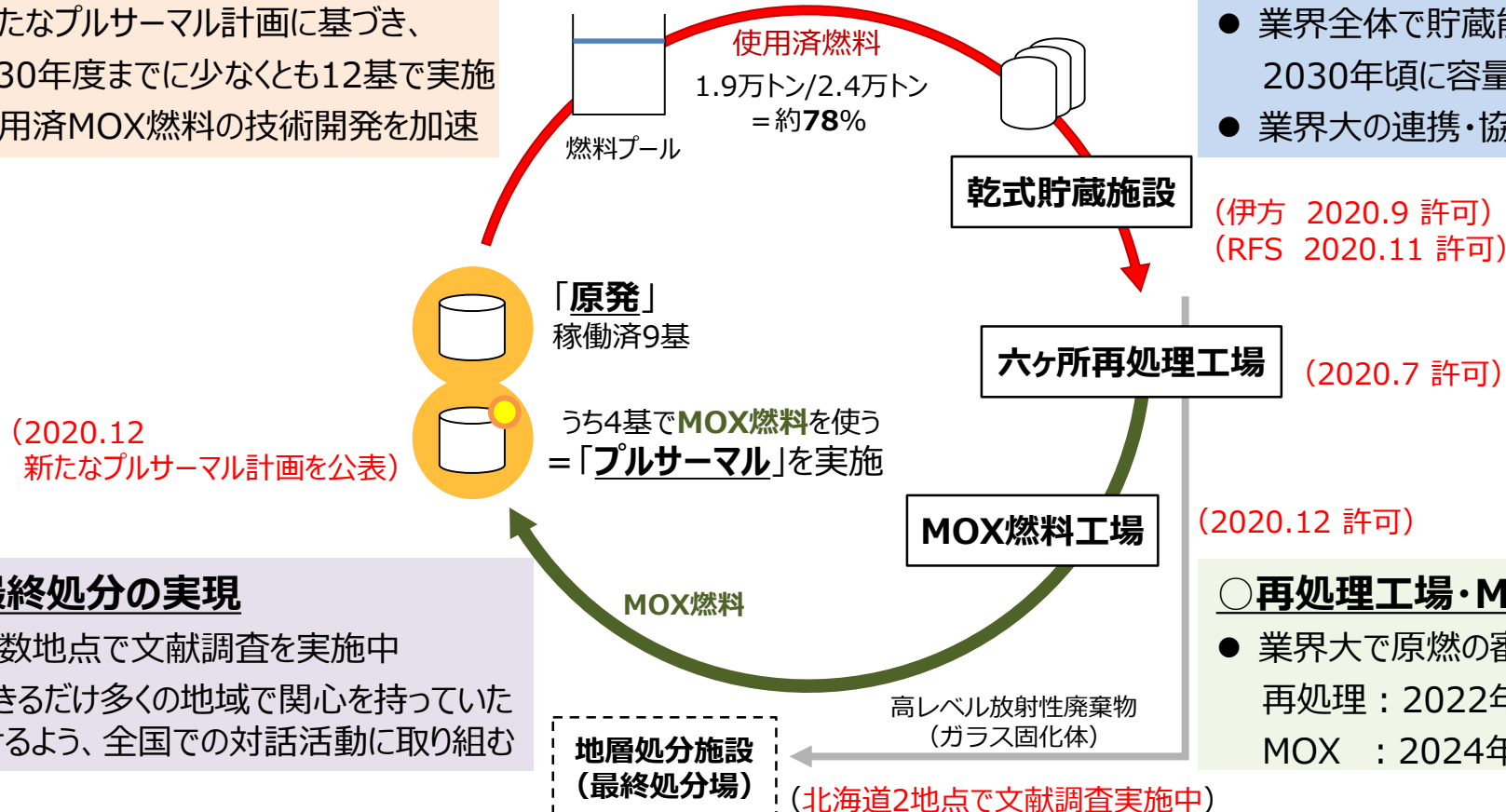
- 全国の使用済燃料が1.9万トンとなり、貯蔵容量の約8割に達する中、サイクル確立は重要な課題。
- 今般、サイクル施設の安全審査や最終処分取組など、核燃料サイクルの取組が大きく前進。
- 引き続き、核燃料サイクルの確立に向けて、①使用済燃料対策の推進、②六ヶ所再処理工場・MOX燃料工場の竣工、③最終処分の実現、④プルトニウムの利用拡大 等に取り組む。

○プルトニウムの利用拡大

- 新たなプルサーマル計画に基づき、2030年度までに少なくとも12基で実施
- 使用済MOX燃料の技術開発を加速

○使用済燃料対策の推進

- 業界全体で貯蔵能力の拡大を推進
2030年頃に容量を約3万トンへ
- 業界大の連携・協力を推進



○最終処分の実現

- 複数地点で文献調査を実施中
- できるだけ多くの地域で関心を持っていたけるよう、全国での対話活動に取り組む

○再処理工場・MOX工場の竣工

- 業界大で原燃の審査・竣工を支援
再処理：2022年度上期
MOX：2024年度上期

【課題③】「戦略ロードマップ」に基づく高速炉開発の推進

高速炉開発の意義

- ・長期的には、
 - ① 資源の有効利用
 - ・直近の課題として、
 - ② 廃棄物の減容
 - ③ 有害度低減 が重要
- +
- ・プルトニウムマネジメントの機能も追求する必要

スケジュール

ウラン資源の現状：既知資源は135年分

- ・本格的利用
→ 21世紀後半のいずれかのタイミング
- ・最初の高速炉の運転開始
→ 例えば21世紀半ば頃の適切なタイミング
- ・当面の10年の過ごし方
前半：多様な技術開発推進
→ 5年後以降に絞り込み
後半：絞り込んだ技術の開発

対象技術

- ・これまで培った技術・人材も最大限活用しながら、多様な高速炉技術の可能性を追求

Na冷却高速炉

・MOX燃料（仏・露 等）

・金属燃料（米国 等）

熔融塩高速炉

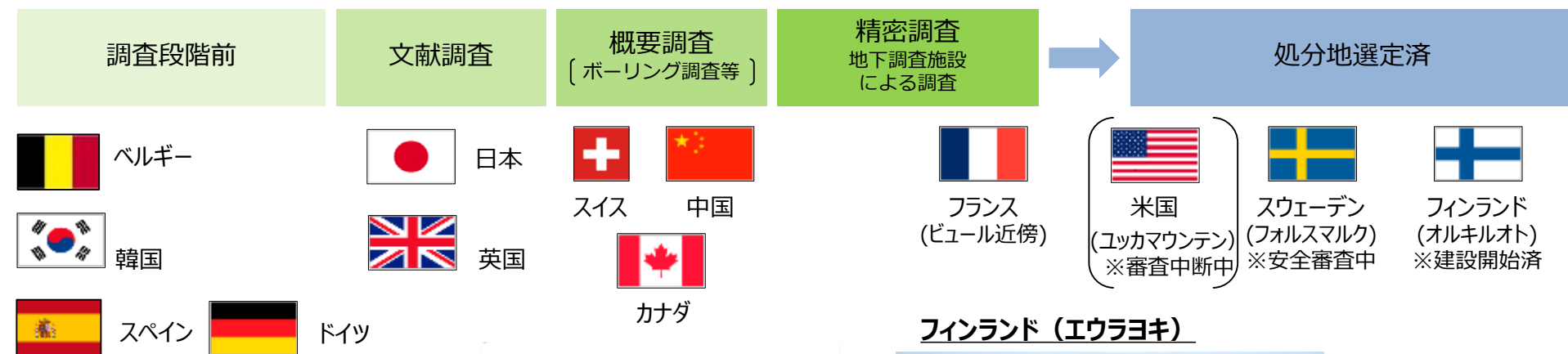
水冷却高速炉 等

役割分担／開発体制

- ・メーカーは知恵や創意工夫を活かして、主体的に技術開発を推進
- ・将来的なユーザーである電力が技術選択を実施
- ・国は開発の方向性を提示し、民間の主体的な取組を後押し
 - ① 熟度に応じた財政支援
 - ② 開発基盤の提供(JAEA)
 - ③ 規制への適応を念頭においた安全性追求

【課題③】最終処分の実現は全ての原子力利用国の共通課題

- 高レベル放射性廃棄物の最終処分の実現は、**原子力を利用する全ての国の共通の課題**。
- 世界で唯一処分場の建設を開始しているフィンランドにおいても、地層処分の実施を決めてから**30年以上の歳月をかけて、国民理解・地域理解に弛まぬ努力を重ねてきた**。



フランス (ビュール地下研究所近傍)



- ◆ ムーズ県とオート＝マルヌ県の県境に立地予定
- ◆ 処分場建設予定地の主な6自治体 (約90km²) の人口は600 人程度、農業が主要産業



フィンランド (エウラヨキ)



- ◆ 人口：約9400人
- ◆ オルキオト原子力発電所が立地
- ◆ 原子力発電がエウラヨキ市の主要産業

スウェーデン (エストハンマル)

(注) 写真はSKB社作成イメージ図



- ◆ 人口：約22000人
- ◆ フォルスマルク原子力発電所が立地
- ◆ 沖合には群島が数多く広がっており、避暑地や観光地としても有名

【課題③】最終処分に関する「文献調査」に向けた動き

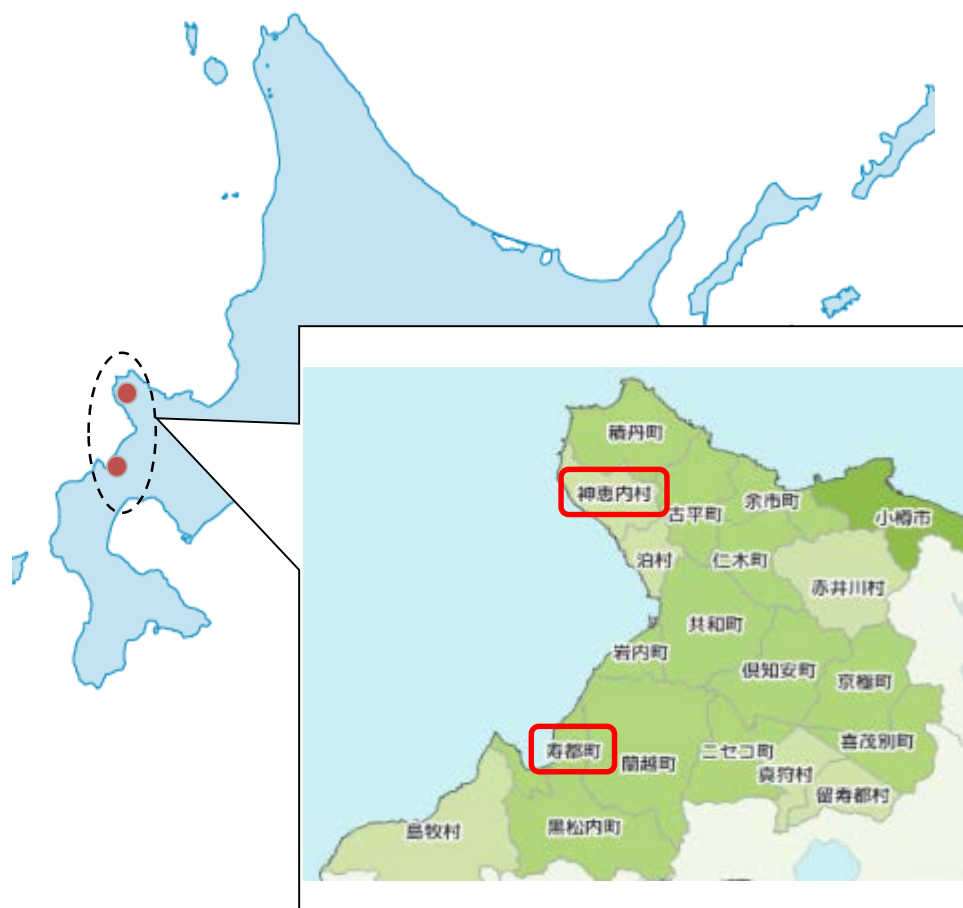
- 10月9日、北海道2自治体の首長が、文献調査の受入れを判断。
- これを踏まえ、11月2日、NUMOが事業計画変更を認可申請。11月17日、経産省が事業計画を認可（文献調査の開始）。
- 引き続き、地域の御理解と御協力を得ながら、全国のできるだけ多くの地域で、最終処分事業に関心を持っていただき、文献調査を受け入れていただけるよう、全国での対話活動に取り組んでいく。

(1) 北海道 寿都町 (すつつちょう)

- 8/13：文献調査検討の表面化
- 9/3：寿都町長と北海道知事との会談
- 9/4：梶山経産大臣と北海道知事との会談
- 9/7：寿都町主催で住民説明会（～9/29）
- 9/29：住民説明会（国説明）
- 9/30：町議会への説明会（国説明）
- 10/5：町長、地元産業界との意見交換（国説明）
- 10/8：町議会全員協議会（意見聴取）
- **10/9：町長が文献調査応募**

(2) 北海道 神恵内村 (かもえないむら)

- 9/11：商工会での検討状況が表面化
- 9/15：村議会開会（誘致請願を常任委員会に付託）
- 9/26：国・NUMO主催で住民説明会開始（～9/30）
- 10/2：常任委員会で誘致請願を採択
- 10/8：村議会臨時会で誘致請願を採択
- **10/9：国から申し入れ、村長が受諾**



【課題③】処分地選定プロセスにおける文献調査の位置付け

- 最終処分法では、概要調査（ボーリング調査）、精密調査（地下施設における調査）を経て、最終処分地を選定する方針。
- 概要調査を実施するかどうかの検討材料を集めるために、あらかじめ文献調査（資料による調査）を実施。

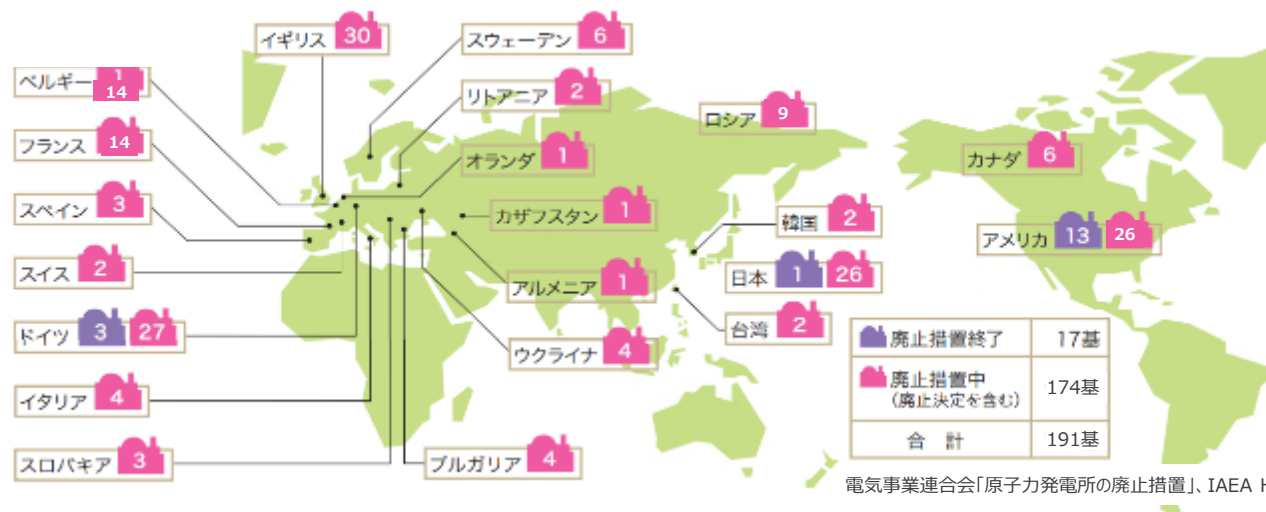


- 文献調査とは、全国各地での対話活動の中で、地域の地質を詳しく知りたい「市町村」があれば、どの市町村に対しても、地域に関する資料やデータを情報提供し、理解活動の促進を図るもの。
- 市町村が次の概要調査に進もうとする場合には、改めて都道府県知事と市町村長のご意見を聴き、これを十分に尊重することとしており、当該都道府県知事又は市町村長の意見に反して、先へ進まない。

【課題③】廃止措置の海外動向

- 世界各地で、**約190基の原発の廃止措置**が進められており、**内17基が廃止措置完了**。
- 海外では、廃止措置の技術・ノウハウを有し、**実績豊富な専門業者によるビジネスも確立**している。

世界の廃止措置の状況



海外での廃炉ビジネスの例

廃止措置の運営や、設備の解体、放射性廃棄物の処理・処分、廃炉に伴って発生する金属の除染・溶融によるリサイクルなどを実施する専門事業者が、国内外の廃止措置事業に参入。

米国Energy Solutions社

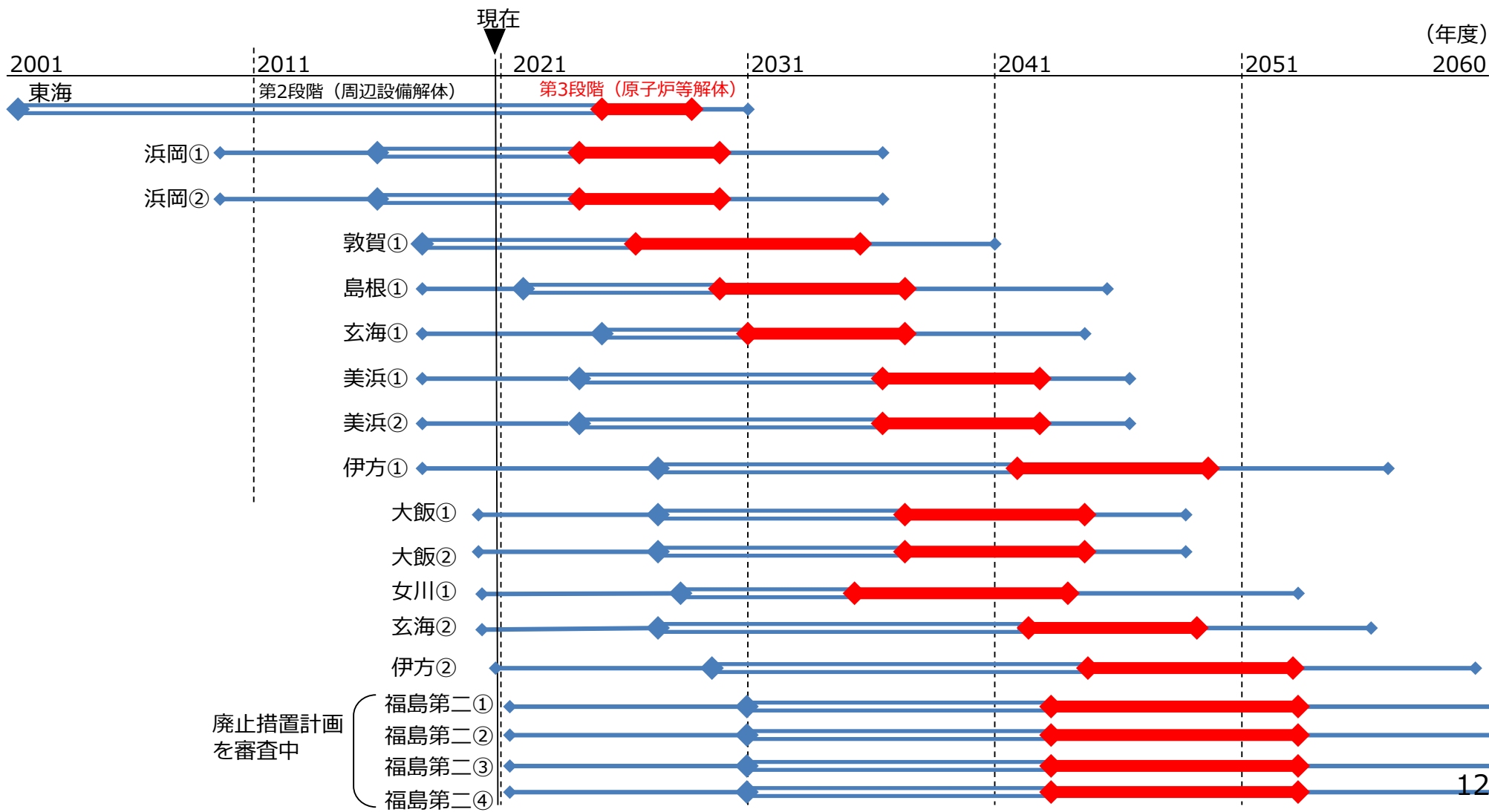


スウェーデンCyclife社（EDF子会社）



【課題③】各原子力発電所の廃炉スケジュール

- 現在、周辺設備を解体する第2段階にあるのは、4基。原子炉等を解体する第3段階は、**2020年代半ば以降に本格化**する見通しであり、長期間にわたる廃炉を安全に進めていくためには、**人材・技術の維持・強化が不可欠**。
- **海外事業者の知見の活用（大型金属処理委託の制度的課題の検討等）やクリアランス物の建材等への再利用先拡大に向けた取り組みの強化を通じて、円滑な廃炉を進めていく。**



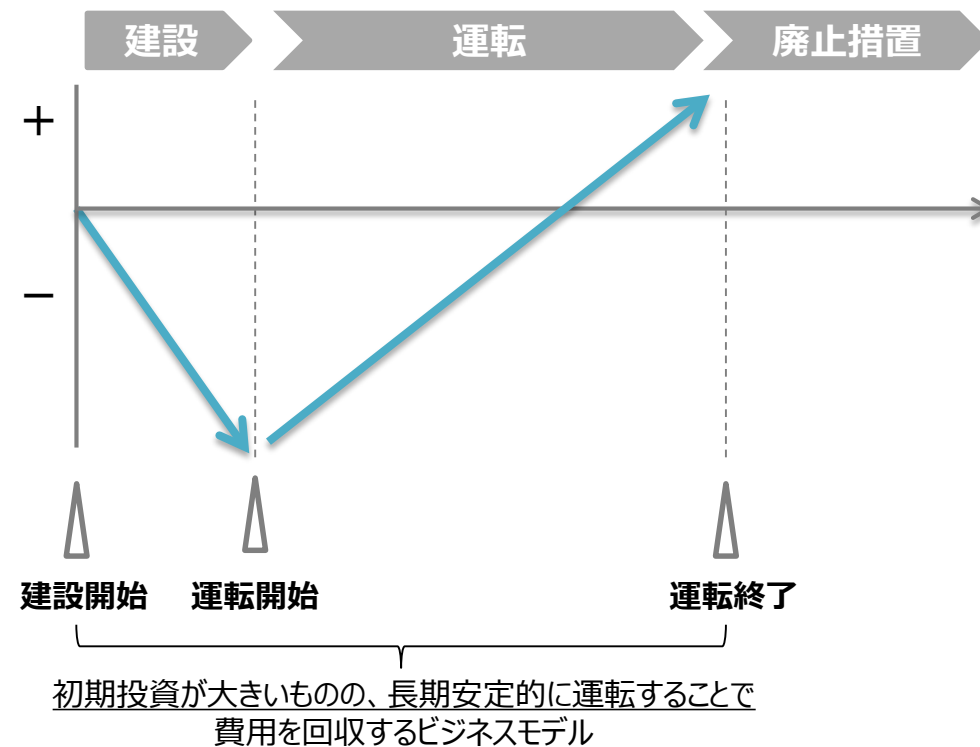
【課題④】原子力発電の事業構造

- 原子力発電は、初期投資額は他電源に比べて大きいが、稼働すれば40年又は60年という長期間、安価な燃料費で運転し、ライフタイムトータルで莫大な発電電力量を生み出すというビジネスモデル。
- そのため、電力自由化等の環境変化が生じている中で、事業性を確保していくためには、原子力事業を長期安定的に運営していくことが必要。

初期投資と発電電力量の関係

	初期投資 (億円)	出力 (万kW)	設備利用率 (%)	運転年数 (年)	発電電力量 (億kWh)
原子力	5,000	120	70	40～60	2,943～4,415
太陽光 (メガ)	5.88	0.2	14	20	0.5
風力 (陸上)	56.8	2	20	20	7
風力 (洋上)	57～155	3	30	20	16～53
水力	76.8	1.2	45	40	19
地熱	237	3	83	40	87

原子力事業の投資回収イメージ



出典：2015年コスト検証WGの各電源の諸元（2014年モデルプラント）を引用

【課題④】原子力事業の安定的な運営

- 原子力事業を安定的に運営していくためには、安全性を高め、トラブル等の防止を通じて、稼働停止期間を可能な限り短くし、高い設備利用率を実現することが必要。

日本の状況

- 直近3か年の再稼働済の原子力発電所は、高い設備利用率を実現。
- 他方、2020年度は、特重施設の工事や一部の原子力発電所のトラブル等による停止期間の長期化によって、直近3か年と比べて設備利用率は減少する見通し。
- こうした点を踏まえ、原子力事業を安定的に運営していくためには、トラブル等の防止を通じて、高い設備利用率を実現していくことが必要。

(直近3か年の設備利用率)

2019年度	約80% (9基)
2018年度	約80% (7基)
2017年度	約84% (5基)

※いずれも年度当初から稼働できる状態にあった原子力発電所の設備利用率の平均値で計算

(震災以前の設備利用率)

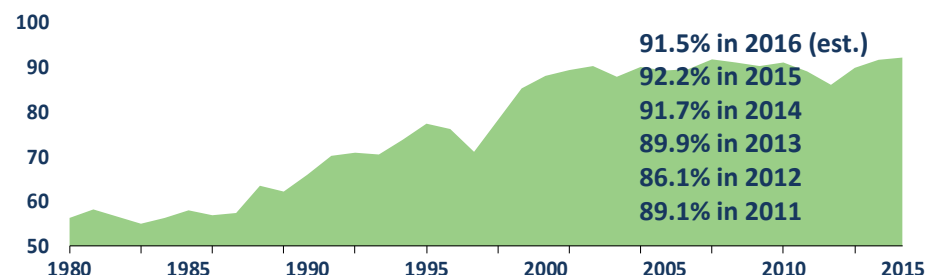
- 過去の平均設備利用率 (1981～2010年度) : 約73%
- 上記の期間のうち最高値 (1998年度) : 約84%

※定期検査やトラブル等で停止していた期間も含め算出

アメリカの状況

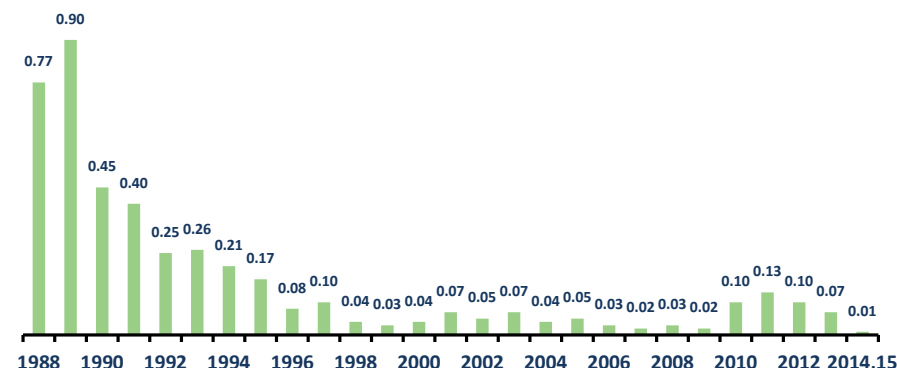
平均設備利用率

(1980年代 : 50%台 → 2000年代 : 90%前後)



安全性向上と重大事象の減少

(1990年 : 90事象 → 2015年 : 1事象未満) ※1年あたり



総合資源エネルギー調査会自主的安全性向上・技術・人材WG (第15回) 資料より抜粋

【課題④】更なる設備利用率の向上

- 更なる設備利用率向上の方策としては、主に①定期検査の効率的実施、②運転サイクル期間の長期化が挙げられる。いずれも海外では実施例があり、国内でも過去に具体的方策を検討した例がある。
- 実施に向けて、国内外の知見を集約し、新規制基準を踏まえた具体的な実施方法を検討、体系化することが必要。

定期検査の効率的実施

- 新規制基準施行後の定期検査期間は、平均約90日。
（※特重建設や訴訟による停止を伴う定期検査除く）
- 各事業者が蓄積してきた知見・経験の集約や、海外事例の分析等を行い、安全性を確保しつつより効率的に定期検査を実施する方策を検討。

<検討課題の例>

- ✓各事業者のベストプラクティスの集約、水平展開
- ✓日本より定期検査期間が短い海外事例の分析
- ✓運転中保全による作業平準化の必要性、有効性検討
- ✓新規制基準との関係整理 等

運転サイクル期間の長期化

- 定期検査の間隔については、法令上、3つの区分（13カ月以内、18カ月以内、24カ月以内）が規定されているが、現在、国内すべての炉は13カ月以内に区分。運転サイクル期間の長期化には、この区分変更が必要。
- こうした区分変更の実現に向け、まずは事業者において、過去の国内での検討例や、海外事例の分析等を行い、安全性を確保しつつ運転サイクルの長期化を実施する方策を検討。

<検討課題の例>

- ✓過去の国、事業者、研究機関等の検討成果の分析
- ✓各設備の検査・点検間隔や、燃料の効率性確保など、実運用上の課題整理
- ✓新規制基準との関係整理
- ✓技術的課題の洗い出し 等

【課題④】安全性が確保された既設炉の最大限の活用

- 原子力事業を長期安定的に運営していくために、**安全性確保を大前提に、活用できる既設炉を最大限活用**していくとの方針の下、**原子力規制委員会による運転期間延長の認可を受けた原子力発電所**について、**40年を超える運転**を進めていく。

運転延長制度の概要

- 原子力発電所の運転期間については、原子炉等規制法上、事業者から申請が行われた場合、原子力規制委員会の認可を受けて、1回に限り、最大20年間の延長が可能。
- 運転期間延長認可の申請にあたっては、事業者は、①取替困難機器に関する特別点検の実施 ②劣化状況の評価 ③施設管理方針の策定を実施。

長期運転に向けた事業者の取組

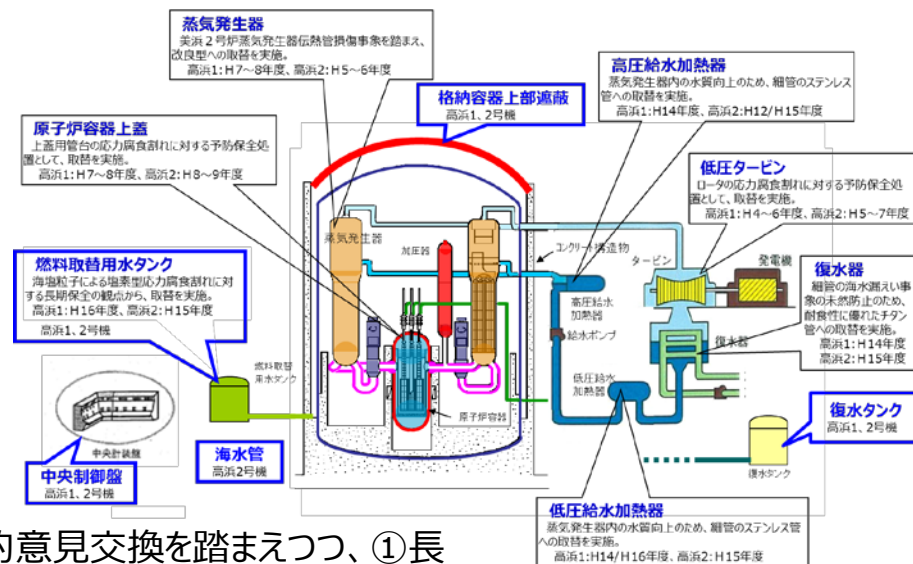
1. 設備のきめ細かなメンテナンスの実施

- 一定期間ごとに、各設備について、分解等による点検を行い、劣化状況を踏まえて適切な保全を実施。
- 更に、耐食性に優れた材料改良の成果等も取り入れ、必要に応じて機器を取替え。

2. 安全な長期運転のためのガイドラインの策定

- ATENA（原子力エネルギー協議会）が、規制委員会との技術的意見交換を踏まえつつ、①長期停止期間中の保全 ②設計の経年化評価 ③製造中止品の管理に係るガイドラインを策定。
- 各事業者は、ガイドラインに基づく安全性向上の取組にコミット。今後、策定されたガイドラインに基づく各事業者の取組の実施状況についてATENAが取りまとめ、公表予定。

（例）高浜発電所における機器の取替・追加



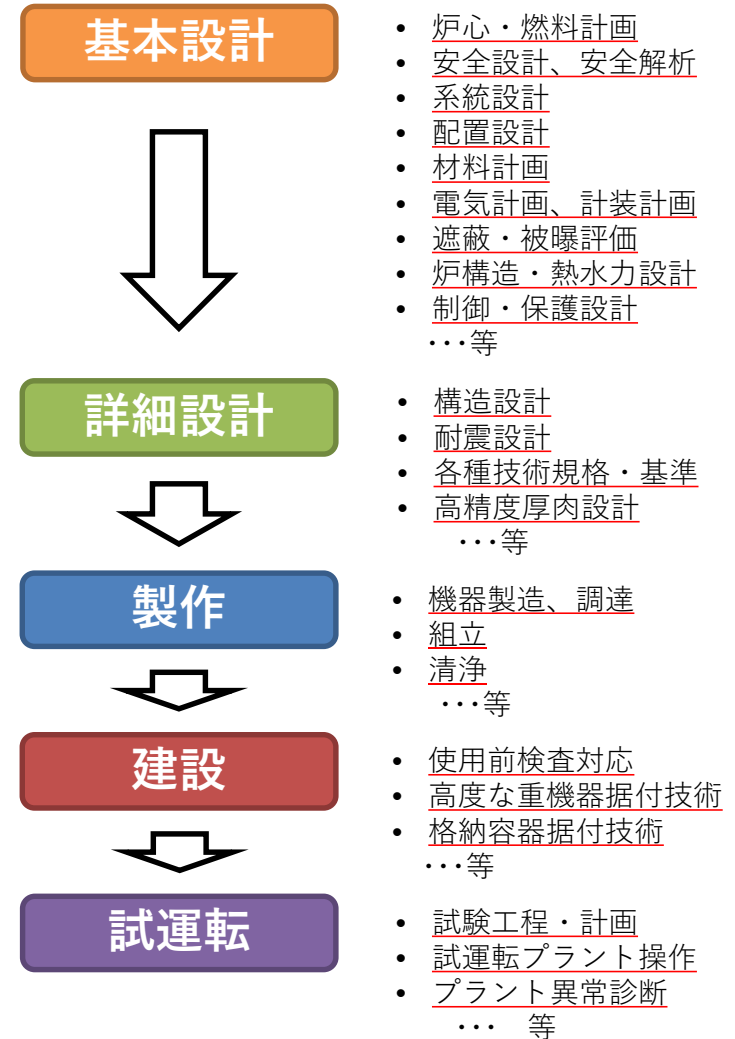
【課題⑤】原子力利用に必要な技術力

- 原子力利用は、幅広い学術領域の知識・経験が必要とされる。
- 原子力発電所の設計・建設には、広範な産業分野における高い技術力が求められる。

原子力工学に関連する学術領域



原子力発電所の設計・建設に必要な技術

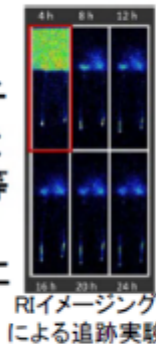


【課題⑤】原子力技術の広がり

主な放射線利用の例

【科学技術】

- X線・中性子・量子ビームによる構造解析や材料開発等
- 放射性同位元素(RI)イメージングによる追跡解析



大強度陽子加速器施設J-PARC
(出典)日本原子力研究開発機構

【工業】

- 精密計測
- 非破壊検査
- 材料の改良・機能性材料の創製
(自動車タイヤ、半導体素子加工プロセス等)
- 滅菌・殺菌等(医療器具等)

半導体

半導体の製造

ラジアルタイヤの製造



微細加工、不純物導入等、放射線による加工技術を利用して半導体を製造。



電子線照射によりゴムの粘着性の制御を容易にできることを利用。

【農業】

- 品種改良
耐病性イネの作出



放射線照射による突然変異を利用して新品種を開発
→188品種を開発
(2008年現在)

- 害虫防除
ウリミバエの根絶



放射線を照射し不妊化したオスを大量に放ち、孵化しない卵を産ませ、害虫を根絶

- 食品照射
ジャガイモ芽止め

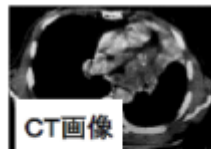


(未照射)(照射済み)
放射線照射によってジャガイモ発芽を防止

【医療】

＜放射線による診断＞

- レントゲン、X線CT
- PET
(陽電子放射断層撮象法)



＜放射線による治療＞

- リニアック
線形加速器で作成したX線により治療する方法
- ガンマナイフ
放射性同位元素から発生するガンマ線により治療する方法
- 重粒子線による治療
加速器により加速した重粒子線(陽子線・炭素線)により治療する方法

【環境保全】

- 窒素酸化物、硫黄酸化物等の分解、除去
- ダイオキシンの要因となる揮発性有機化合物の分解等

【核セキュリティ】

- 核鑑識技術(核物質等の出所、履歴、輸送経路、目的等)を分析・解析)
- 隠匿された核物質の検出

【課題⑤】原子力発電利用国

- 現在、33カ国が原子力発電を利用、そのうち自国で炉型を開発した国は10カ国。

自国炉型開発国（10カ国）

国名	主な原子炉メーカー	国名	主な原子炉メーカー
日本	三菱重工、日立、東芝	中国	中国核工業集団、中国広核集団
米国	ウェestingハウス、GE	ドイツ	シーメンス →現：仏フラマトムに統合
フランス	フラマトム	カナダ	CANDUEナジー（重水炉）
ロシア	ロスアトム	インド	インド原子力公社（重水炉）
韓国	斗山重工業	英国	BNFL（ガス炉） →現：米ウェestingハウスに統合

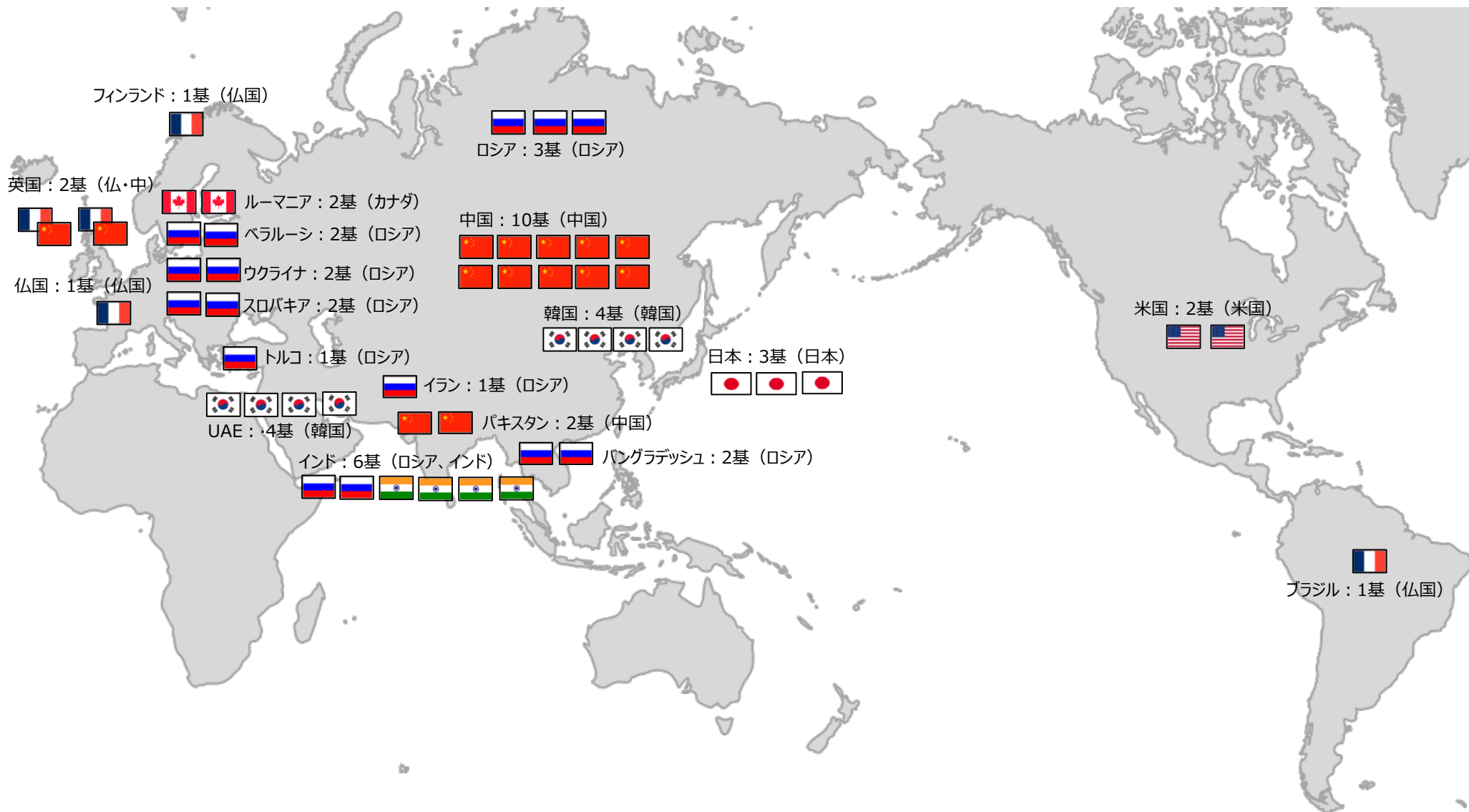
その他の原子力発電利用国（23カ国）

ウクライナ スウェーデン スペイン ベルギー 台湾 スイス スロバキア チェコ フィンランド
ブルガリア ハンガリー アルゼンチン パキスタン オランダ 南アフリカ ブラジル メキシコ
スロベニア アルメニア ルーマニア イラン UAE ベラルーシ

原子力発電所建設中・計画中の国（6カ国）

バングラデシュ、トルコ、エジプト、ウズベキスタン、リトアニア、カザフスタン

【課題⑤】世界の原子力発電所の建設状況

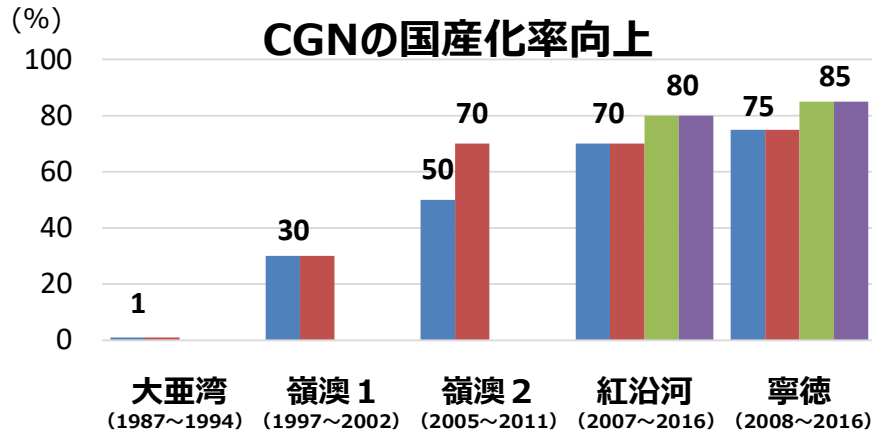


【課題⑤】中国の原子力技術の現状

- 中国は、国産化率85%を達成。自国炉型の「華龍一号」を開発し、国内外で建設中。
- 研究開発分野では、論文数などで、件数を増やしている。

国産化率・国産炉

- 中国広核集団（CGN）は、1987年に着工した大亜湾以降発電所の建設以降国産化を進め、2010年代には**国産化率85%を達成**した。



(出典) World Nuclear Association HPより作成

- 国産開発した「華龍一号」は、2020年12月に福清発電所5号機が送電網に接続。海外でも建設・計画中。

福清発電所



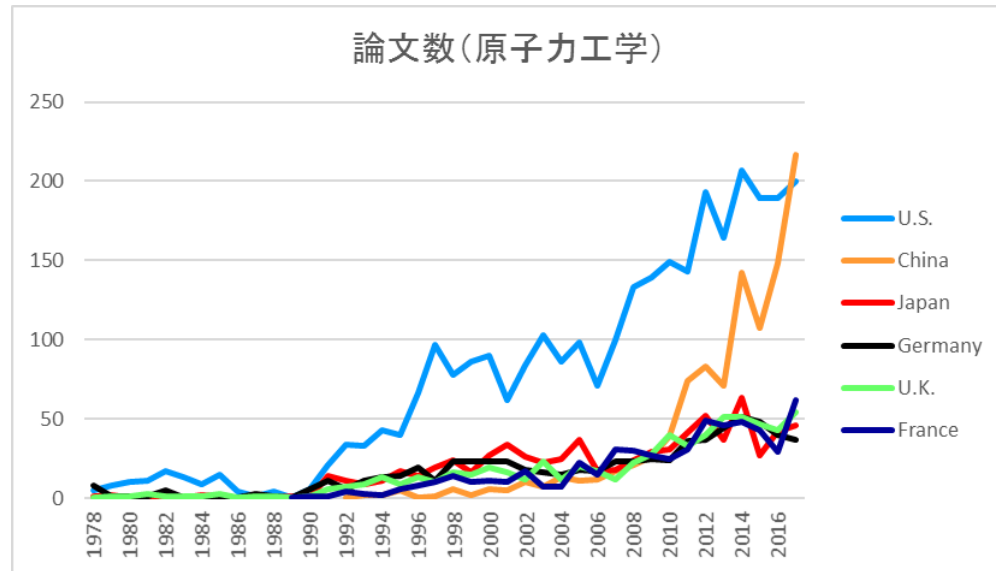
海外案件

- ✓ パキスタン・カラチ発電所で2基受注。
- ✓ アルゼンチン・アートチャ発電所で2基受注。うち1基が華龍一号。
- ✓ 英国・ブラッドウェルB発電所で2基建設予定。事前設計認証取得を目指す。

研究分野での実力

- 中国の原子力工学での論文数は、2017年に**米国を抜きトップ**になっている。

主要国別論文数 (1978年～2017年)



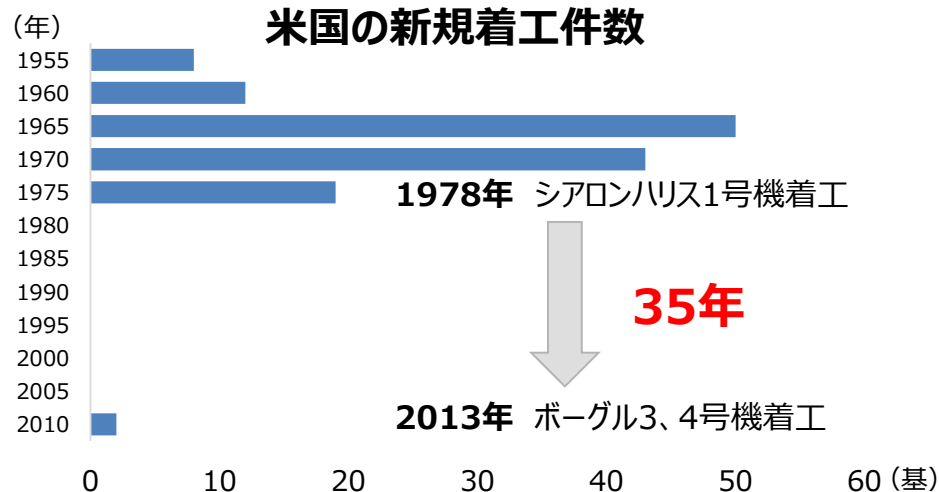
(出典) 第18回原子力小委員会 文部科学省提出資料より抜粋
Clarivate Analytics Web of Scienceを用いて、文科省にて集計

【課題⑤】米国の原子力産業の現状

- 米国は、35年間新規建設がない間、原子力産業における事業者の減少や一部資機材の輸入が進展。
- 現在は、原子力の再興に向けた取組を進め、革新原子炉開発等で原子力産業を支援。

35年ぶりの新規建設

- 2013年に着工したボーグル3、4号機は、**35年ぶりの新規着工**となった。



- 長期間建設がない間、米国では**原子力に関与する事業者が減少し、一部資機材は海外から輸入した**。
 - ✓ 米国機械学会が認証する原子力規格（N-Stamp）取得企業が**600社（1980年）から200社以下（2007年）に減少**。
 - ✓ 米国エネルギー省は、2005年、米国企業には**第三世代原子炉の主要資機材（原子炉圧力容器、蒸気発生器等）を製造する能力はない**、と評価。
 - ✓ 2002年以降、**原子炉圧力容器上蓋（取り替え用）は全て海外に依存**。

原子力の再興に向けた取組

- トランプ大統領は、2017年6月の演説で「**原子力の再興と拡大**」を表明し、**原子力産業の再生・復活**に注力、立法側でも原子力支援の法案が成立。

原子力技術開発に関する立法

法律	内容
原子力革新対応法（NEICA） 2018年9月成立	✓ 先進型原子炉の実証プロジェクトを実施時に、DOEがサイトを提供 ✓ 新型炉のライセンスを取得するまでの費用の一部をDOEが補助 等
原子力革新・近代化法（NEIMA） 2019年1月成立	✓ NRCの新型炉に対する規制ガイドラインの予見性向上 ✓ 国内研究施設の使用ライセンス付与 ✓ DOEによるライセンス申請にかかる費用の補助 等

- DOEは、2020年4月に「原子力部門における米国の主導権回復への戦略」の中で、**原子力産業全体で米国の主導権を回復するための18の政策提言**を提示。
- バイデン次期大統領は、**クリーンエネルギーへ4年間で2兆ドルの投資**を計画する中で、**革新原子炉への投資**に言及するなど、**ネットゼロに向けて原子力への支援を継続する意向**。

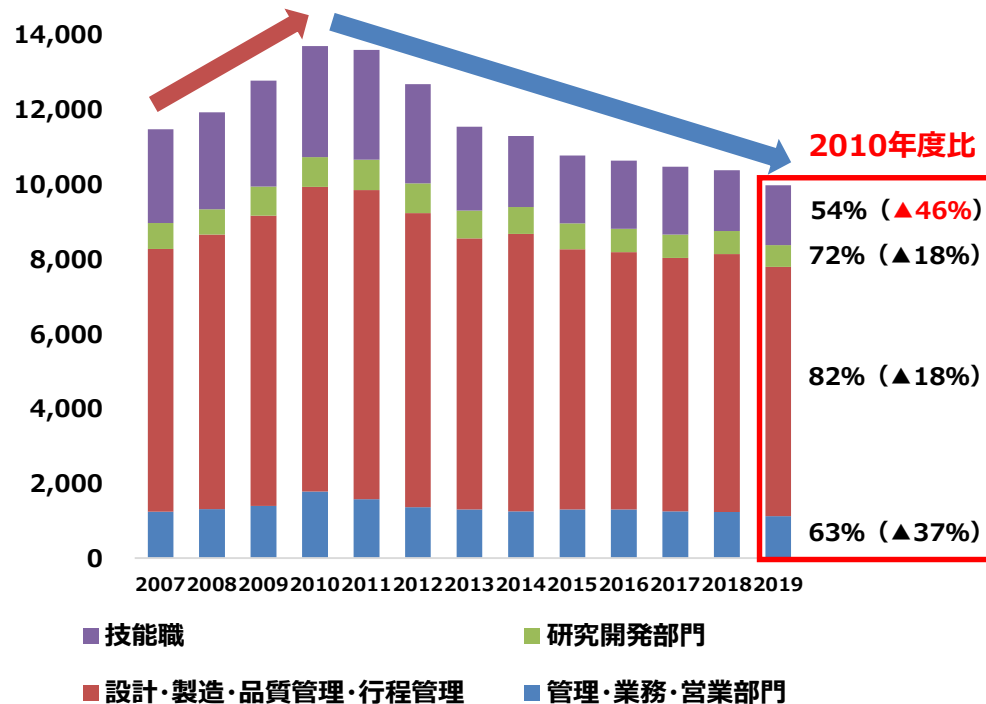
【課題⑤】国内メーカーの原子力技術維持における課題

- 国内メーカーは、震災以降、原子力関連業務に従事する従業員が減少傾向にある。
- 直近では、原子力特有の技術を持つサプライヤー企業の一部が原子力事業から撤退・廃業。

原子力従事者の減少

- 震災以降、原子力関係メーカー14社の原子力関連業務に従事する従業員は減少傾向。特に溶接工など高い技術力を持つ技能職が大きく減少

メーカー14社の各部門の原子力従事者



(出典) 日本電機工業会資料より作成

サプライチェーン企業の撤退・廃業

- 一部の機器製造メーカー、素材メーカーは、原子力事業から撤退。廃業を選択する企業も存在。

日本鋳鍛鋼

- ✓ 2020年3月末に自主廃業
- ✓ 原子炉圧力容器、蒸気発生器、タービン用部材（大型鍛造品）等を製造



川崎重工業

- ✓ 2020年11月に原子力事業の譲渡を発表
- ✓ 2023年3月までに、譲渡先のアトックスに技術支援を実施する予定
- ✓ 今後は水素エネルギー関連事業を推進



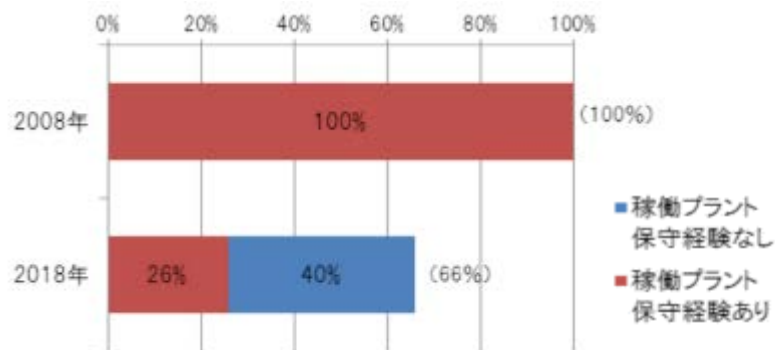
(出典) 各社ホームページ等より作成

【課題⑤】プラントの運転・保守に必要な技術力維持

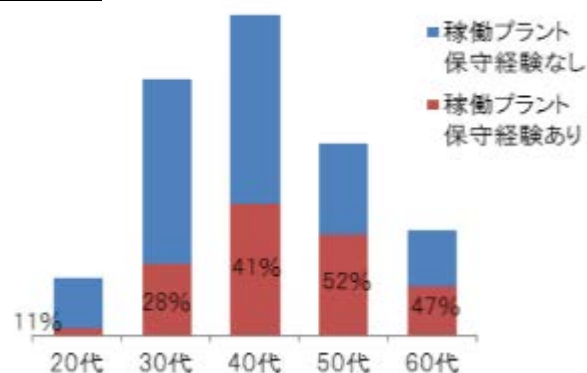
- プラントの長期停止により、稼働プラントの運転・保守作業を経験する機会が減少。
- 電力会社では、人員の融通や研修等により、再稼働に備えて技術力を維持している。

保守経験の低下の例

- 保守・定検を行うA社では、2018年の作業班長（各作業ごとの責任者）は2008年に比べて**33%減少**している。



- また、作業班長のうち、稼働プラントの保守経験を有する者の比率も低下している。



電力会社の技術力維持の取組例

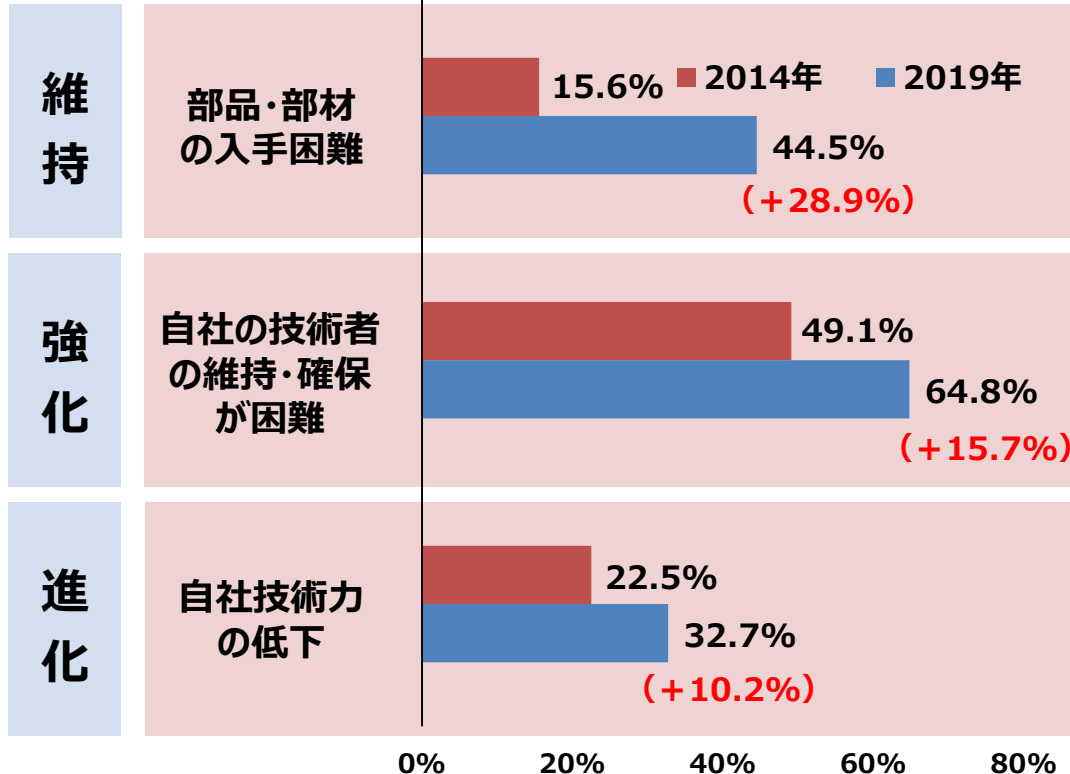
- **未稼働プラント（泊発電所）の運転員を稼働プラント（高浜発電所、伊方発電所）へ約2年間派遣し、当直勤務として経験を蓄積。**
- 活きた現場として火力発電所に運転員・保修員を派遣し経験を蓄積
- **海外プラントメーカーへの研修派遣等による技術レベル向上**
- 教育訓練の充実（シミュレーター訓練、ベテラン社員によるOJT等）
- 原子力安全推進協会（JANSI）による再稼働レビュー（先行プラントの知見を、後続プラントへ現場レベルで反映）

【課題⑤】人材・技術・産業基盤の維持・強化に向けた取組の方向性

- 安全な原子力利用を持続的に進めていくためには、原子力産業の競争力強化が不可欠。

- ① 実績のある確かな技術を国内に維持する
- ② 安全性と経済性の一層の向上を実現する能力を強化する
- ③ 脱炭素化の選択枝を担うことができる原子力産業に進化する

原子力関連事業者の課題認識



対応の方向性

供給途絶リスクの回避

- 代替可能性の低い主要機器・部品を特定し、個別のサプライヤーを支援することで国内に維持する。
- 一般産業向け工業品として製造された機器・部品等を原子力施設に使用する手法を整備し、サプライチェーンを強化する。

技術・技能の伝承

- 社内での円滑な技術伝承や、他社への技術移管を支援し、原子力特有の高度な製造技術、運転保守技術を維持する。
- 原子力産業界全体での人材確保・人材育成に向けた取組を支援し、更なる安全性向上を実現する。

革新的な原子力技術開発

- 軽水炉の安全性向上に加え、多様な社会的要請に応える革新的な原子力技術の開発、導入を推進する。
- 多様な主体による革新的な原子力技術開発を促進するため、ベンチャー企業や他業種等の参入を促していく。

- 原子力産業に関わる事業者にアンケートを実施、(2014年：N=271、2019年：N=156)
- 各項目について「あてはまる」「どちらかといえばあてはまる」と答えた事業者の割合を算出

(出典) 令和元年度原子力の利用状況等に関する調査（国内外の原子力産業に関する調査）より

【課題⑤】各国のイノベーションに向けた取組



英

革新炉の実証支援

グリーン産業革命の一環として、
革新炉実証等に向けた
£ 385M(約539億円)の基金を設置



SMRの開発

ロールスロイス社のSMRが2029年ま
での運開を目指す



仏

高速炉開発の推進

・多年度エネルギー計画で高速炉開発方針を堅持。

多様な炉型の開発

・軽水炉SMRであるNUWARDを開発中。
・大型の高速炉に加え、小型モジュールタイプの高
速炉も開発。



NUWARD



露

高速実証炉

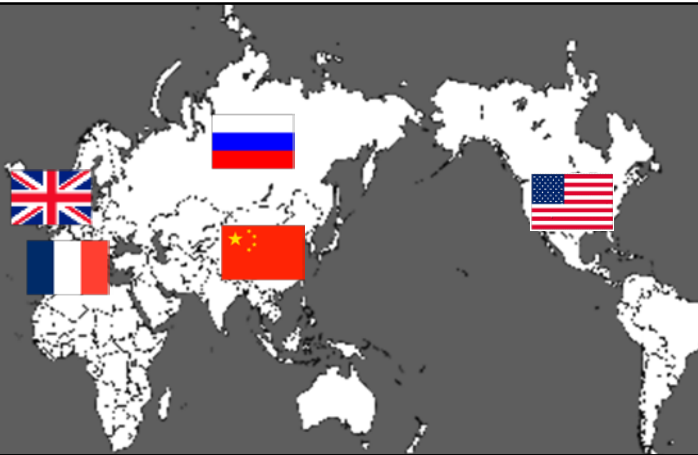


BN-800
～ 2015年12月に運開 ～

海上浮揚式原発



アカデミック・ロモノソフ号
～ 本年5月に運開 ～



中

高温ガス炉



高温ガス実証炉 (HTR-PM)
が来年に運開予定

中国国産炉 (華龍1号)

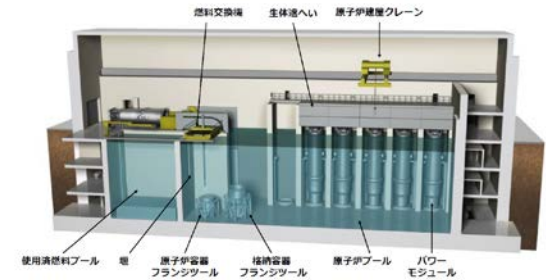


福清原子力発電所
～ 2020年12月に送電網接続～



米

軽水炉SMRの開発



NuScale社のSMR
～ アイダホ国立研究所内で2029年の運開を目指す ～

その先の実証炉建設

7年以内の実証炉建設に向け、2 炉型の支援を決定



ナトリウム冷却高速炉
(テラパワー社)



高温ガス炉
(X-Energy社)

【課題⑤】安全性、経済性等の更なる向上に向け、原子力イノベーションは重要な課題

- 軽水炉の安全性向上はもちろん、小型モジュール炉、その他革新炉の研究開発が進展。

軽水炉の安全性向上

福島事故を踏まえた安全対策

- ATF（事故耐性燃料）



事故時に水素を発生しない燃料被覆管

新技術の取り込み

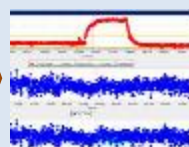
- 原子力×デジタルイノベーション
(例：ビッグデータ分析技術を活用した
プラント自動監視システム)



データ取得



自動解析



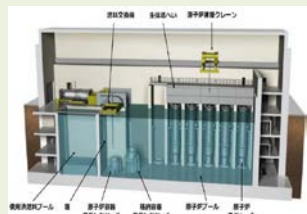
異常検知

小型モジュール炉

小型炉心で自然循環、シンプル化

- 先進国で複数の開発プロジェクト

NuScale SMR (NuScale)
BWRX-300 (GE日立, 日立GE)
UK SMR (Rolls Royce)
Nuward (CEA, EDF等) ...



NuScale SMR (NuScale)

高温ガス炉

水素製造等の高温熱利用

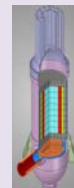
- JAEAのHTTRが世界最高温度950℃
を達成、高い安全性
- 民間でも多様な炉型開発



試験炉HTTR
(JAEA)



水素製造・発電用小型炉
(三菱重工、東芝/富士電機)



高速炉

「戦略ロードマップ」に基づき、着実に 開発を推進、放射性廃棄物対策

- 米仏とも協力
- 多様な高速炉の技術間競争の促進



常陽
(高速実験炉)



米国で開発中の多目的
高速炉試験炉 (VTR)

核融合

水素を燃料に発電・熱利用

- ITER計画、原型炉建設に向けた
取組を通じた技術開発を推進
- 京大発ベンチャー誕生



ITER

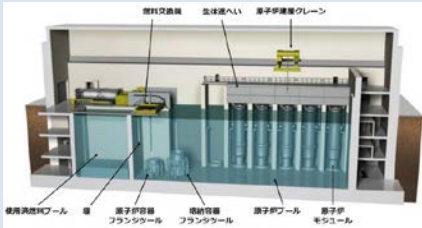


KYOTO-iCAP

小型軽水炉(SMR)

- 小さな炉心により、受動安全採用等のシステムシンプル化、信頼性向上
- モジュール生産による工期短縮
⇒ 避難範囲縮小、低資本費

◆ NuScale (NuScale社)



◆ BWRX-300 (GE日立)



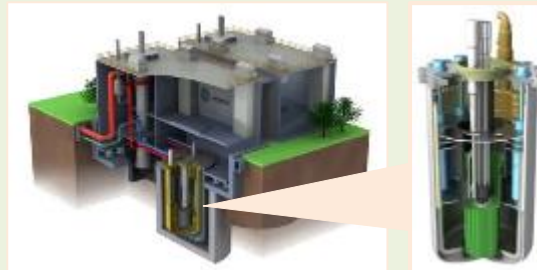
高速炉

- 高速中性子を利用した、ナトリウム冷却炉
⇒ 資源の有効利用、放射性廃棄物の減容化・有害度低減

◆ 実験炉：常陽（JAEA）



◆ PRISM (GE日立)



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、高い安全性



◆試験炉：HTTR (JAEA)



【課題⑤】各国で進展する原子力イノベーションへの支援

- 軽水炉の安全性向上はもちろん、軽水炉SMR、高温ガス炉、高速炉等の開発を、各国も様々な支援。
- 政府支援を受けたベンチャー企業等の多様な主体が様々な革新炉型を開発し、実証に向けた開発競争中。

米国

革新技術による軽水炉の安全性向上

- 事故耐性燃料の商用化に向け、2020年は計\$55.6M（約56億円）を支援予定。

多様な革新炉の開発・実証支援

- 2029年のNuScale社のSMR運転開始に向け、DOEがコストシェアのもと10年間で\$1.4B(1400億円)の支援。
- 革新炉開発支援プログラム（ARDP）で、**7年以内の高速炉と高温ガス炉の実証炉建設**を目指し、最大\$3.2B（3200億円）を支援。技術フェーズに応じた計3つの支援プランを用意。

ARDPの3つの支援プラン

Demos

- 7年以内に運転開始を目指す**高温ガス炉**（X-Energy社）と**ナトリウム冷却高速炉**（Terra Power社）を支援対象に選定。

Risk Reduction

- Demosの5年後頃の運開を目標
- 技術面・運用面・規制面での課題解決を支援。

ARC-20

- 2030年台中盤の商用化を目指す革新的な技術開発を支援。

技術熟度

- DOEが革新炉開発支援のため、**高速炉の多目的試験炉（VTR）を開発中。2026年～2030年の運開を目指す。**

英国

軽水炉SMRの開発

- 2029年の運転開始を目指すロールスロイス社に£18M（約25.2億円）の政府支援。

その先の革新炉実証に向けた支援

- 今年7月、非軽水炉SMR向け支援のPhanse2が開始。3炉型（WH社鉛冷却高速炉、U-Battery社高温ガス炉、Tokamak Energy社核融合炉）に支援を重点化し、**支援総額は2年間で£40M（約54億円）**。
- 11月に**革新炉実証等に向けた£385M（約539億円）のAdvanced Nuclear Fundの設置を発表。**

フランス

大型軽水炉の低コスト化に向けた開発

- フラマンビルでコストオーバーランが生じた**軽水炉EPRの低コスト化**に向けた開発を実施。（EPRはインドへの2基輸出計画等あり）

グリーンリカバリーの一環として、サイクル技術や革新炉を開発

- 核燃料サイクル推進のため、燃料のマルチリサイクル技術の開発等に€200M（約250億円）を支援。**高速炉開発も実施。**
- 総額€70M（88億円）の個別プロジェクト支援の中で、**軽水炉SMR（Nuward）の予備設計完了に向けた支援を実施。**

2. 電力部門におけるカーボンニュートラルの課題整理

これまでの2050年の議論における主なご意見①

【シナリオ関連】

1. シナリオ作成においては、コアシナリオは原子力、再エネにフォーカスして導入可能性を検討、イノベーションシナリオはあらゆる可能性を織り込んだものとすべき。シナリオ分析に際しては3E+Sの観点からコスト最小が重要。電力部門は蓄電池、火力+CCUS、水素発電を考慮すべき。
2. モデル分析ではインプットデータが重要。どう想定しているか開示すべき。
3. 複数シナリオは欧州を参考にしつつ、我が国固有の問題を踏まえたシナリオを設計すべき。
4. EU・英国のシナリオを見ても原子力、再エネをメインに位置づけ、いかにCCUS付き火力を利用するかとなっている。一つのアプローチに依存しないことが重要。
5. DACCSのような技術の可能性も踏まえて、コストの安い戦略を検討すべき。
6. 開発要素がたくさんある中で、技術を決め打ちせずに複数シナリオを用意することが重要。
7. コスト最小化の観点が重要。電源オプションは様々用意し、途上国に技術移転するという視点が大事。
8. 複数シナリオは必須。各団体で想定が異なっていることは、見通しの幅があるということ。幅を持たせたシナリオとすべき。
9. 原子力も確実に選択肢に入れて議論すべき。水素やCCUS火力の選択肢も幅広く考えるべき。
10. 再エネが主力電源であることに異論ないが、過度な依存をすべきでなく、幅をもって複数のシナリオを提示することが重要。
11. モデル分析はインプットが重要。こういったケースをベースに議論するか明確にすべき。需要サイドの行動変容の折り込みは、実現不可能ケースの言い訳となる場合があるため慎重に考慮すべき。

これまでの2050年の議論における主なご意見②

【再エネ導入関連】

1. 楽観的に考えれば達成可能、という考え方はエネルギー政策の検討において不適切。安定供給・安全保障の観点から厳しく評価すべき。
2. 自社の分析でも蓄電池を相当導入できたとしても、供給力・調整力を確保できる電源が一定程度必要。再エネ導入による便益を最大化するため、立地場所の適正化に加えてDRなどの活用も重要。
3. 海外では産業競争力を意識した再エネ導入施策が進められており、日本でもそういった取り組みが重要。
4. 洋上風力は、様々な技術が集積する可能性。純国産洋上風力の促進が重要。
5. 再エネの調整力については、EV・DR・P2Xも活用した次世代グリッドが重要。直流送電なども活用すべき。
6. CNに向けて生産プロセスの抜本改革が求められており、再エネに過度に依存する社会を前提にはできない。
7. 無風期間や統合コストの考え方は政策検討にあたり重要。
8. 特定の電源に依存するのは得策ではない。CN実現には再エネ、原子力が重要なプレーヤー。加えて、一定程度火力を使うことが効果的。
9. 大量に普及を進めるにあたっては自然環境・景観配慮や廃棄後のパネルの処理等の重要性が一層増し、立地地域への配慮が必要となる。
10. 気象条件の稀頻度リスクへの対応、社会受容性は重要な論点。現行規制の延長で考えるのではなく、社会受容性をどのように変えていくかが重要。
11. 再エネ100%導入シナリオが示されたことは重要。あらゆる実現可能性を閉ざすべきではない。無風期間が生じる時には調整力市場で価格が高騰するなどのシステム設計が重要。

これまでの2050年の議論における主なご意見③

【再エネ以外の電源】

1. 原子力は優れた特性を持つ、持続的に保有することが重要と位置づけを明確化するべき。既設炉の再稼働、新設炉の建設が必要となり、原子力を効率良く利用するための制度構築も併せて必要となる。
2. 技術自給率が高く、ゼロカーボンな原子力は新增設・リプレイスに加えて、新型炉開発も含めて日本の技術競争力に結びつけることが重要。
3. 安全性向上にかかるコストを踏まえた上でも再エネと比べて原子力のコストの方が安いことが国民と共有できていない。
4. 再稼働が進まないため悲観的な雰囲気があるが、審査申請済基数は30基ある。
5. 原子力を使い続けるのであれば、第一に信頼回復が必要。
6. 再エネは主力電源であり、残りが原子力、ゼロエミッション火力のどちらかという構図ではないか。原子力のリプレイスを想定していないのであれば、ゼロエミッション火力に全力を挙げるべきではないか。
7. 再エネの主力電源化は進めるべきだが、エネルギー需要を全て賄うことは難しく、CCUSも利用した化石燃料のカーボンニュートラル化が重要。
8. 2050年には化石燃料も相当残っていると考えるので、CCUSなども考えていく必要。
9. 水素やアンモニア等、日本がリードする技術、米国やサウジと協力して研究開発を進めて欲しい。

これまでの2050年の議論における主なご意見④

【エネルギー需要関連】

1. デジタル技術の波及効果を考えるべきでないか。
2. 需要側の電化はわかるが、熱に関して既存システムをどう移行させていくのかを考えるべき。
3. シェアリングは資産の利用率向上をもたらしている、エネルギーの用途や量や質などを踏まえるべき。
4. 需要の最適化が再エネ導入には不可欠であり、需要家の行動を把握し、供給状況に応じた需要の最適化が重要となる。
5. 災害の多い我が国においてはレジリエンスも考慮する必要がある。

【全体論】

1. カーボンニュートラルは非常に大きなチャレンジ。ビジョンを示し、様々なステークホルダーが取り組むことが大事。
2. 産業に安価なエネルギーを安定的に供給することがエネルギー政策の全て。楽観的に考えれば達成可能、という考え方はエネルギー政策の検討において不適切。安定供給・安全保障の観点から厳しく評価すべき。
3. 需要とコストについて統一した考え方が必要ではないか。
4. 方向性を示しながらも、柔軟性のある複数のシナリオを想定し、その優先順位をつけるべき。そうすることで民間投資も進む。
5. 技術のイノベーションの追求だけでなく、社会受容性も踏まえた制度のイノベーションも重要。
6. カーボンニュートラルに向けて、産油国との関係に断絶が生じないように、再エネ技術連携なども進めるべき。また、水素を資源ととらえ、水素の資源外交との考え方を明確に位置づけるべき。
7. 審議会のプロセスとスケジュールを公開し、国民や若者の意見を反映するプロセスを確立すべき。

再生可能エネルギー導入拡大に向けた政策の方向性とヒアリング等からの示唆

課題	主な政策の方向性	ヒアリング等からの示唆
① 出力変動への対応 (調整力の確保)	➤ 当面、火力・揚水を活用しつつ、連系線増強による地域間融通やデマンドレスポンス、再エネ事業者による電力需給を意識させる取組を進める。 ➤ 調整力の脱炭素化を進める。	➤ 火力・原子力がなければ、再エネの統合費用が高まり、総費用は大きくなる。日本を9地域に区分しVRE発電単価7-8円/kWhの場合、再エネ比率約54%が最適、3地域に区分しVRE発電単価9-10円/kWhの場合、再エネ比率約27%が最適。(日本エネルギー経済研究所)
② 送電容量 の確保	➤ 将来のポテンシャルを踏まえたマスタープラン ➤ その増強費用を全国で支える仕組みを整備。 ➤ 「ノンファーム型接続」全国展開やルール見直し。 ➤ 地域マイクログリッドの構築支援等を進めていく。	➤ 火力の発電量が小さくなると、送電線増強などのコストが追加的に必要となる。(日本エネルギー経済研究所) ➤ 系統制約が解消されても、VRE比率40%で、24%程度の出力制御率となる。(第33回 資料44ページ)
③ 系統の安定性維持 (慣性力の確保)	➤ 再エネでも慣性力を確保できる技術の開発。 ➤ 系統の安定性を維持するために必要な機能の要件化を検討。	➤ 変動再エネの比率が瞬間的に70%を超える(=年間ベースで約30~40%)と慣性力不足によりブラックアウトの可能性が増大。(第33回 資料62ページ)
④ 自然条件や 社会制約対応	➤ コスト低減や電力市場への統合の促進 ➤ 地域の理解促進、導入促進(ルール整備) ➤ 革新的技術の開発	➤ 規制緩和を見込んだ上で、立地制約の観点だけでも再エネ比率は40~50%程度。電力需要は地球環境産業技術研究機構(RITE)のエネルギー需給モデルの、約1.3~1.5兆kWhが前提。(電力中央研究所)
⑤ コストの受容性	➤ イノベーションを通じて実現し、コスト低減を図りつつ社会実装していく。 ➤ 更なるコスト低下に向けて取り組んでいく必要があるが、適地が減少し、コスト増となっていく懸念も。	➤ VREのみに頼った電力システムは割高となる。(日本エネルギー経済研究所) ➤ 再エネのコスト低下(太陽光・風力4-7円/kWh)で、総コストも15%程度下がる。(自然エネルギー財団)

✓ モデルの前提によっては、**再エネ80%程度**(国立環境研究所)、**100%**(自然エネルギー財団)も可能。

発電電力量

地球環境産業技術研究機構(RITE)のエネルギー需給モデルでは、**約1.3~1.5兆kWh**、国立環境研究所、自然エネルギー財団からは、**約1.5~2兆kWh**程度の発電量が求められるという試算も示されている。

各電源の課題

確立した脱炭素の電源	再エネ		1	<u>出力変動への対応（調整力の確保）</u>
			2	<u>送電容量の確保</u>
			3	<u>系統の安定性維持（慣性力の確保）</u>
			4	<u>自然条件や社会制約への対応</u>
			5	<u>コストの受容性</u>
	原子力		0	<u>国民の信頼回復</u>
			1	<u>安全性の確保</u>
			2	<u>立地地域との共生</u>
			3	<u>持続的なバックエンドシステムの確立</u>
			4	<u>事業性の向上</u>
			5	<u>人材・技術・産業基盤の維持・強化</u> <u>イノベーションの推進</u>
イノベーションが必要な電源	火力	化石＋CCUS	1	<u>CCUS/カーボンリサイクルの技術的確立、コスト低減</u>
			2	<u>CCUS/カーボンリサイクルのポテンシャル拡大</u>
			3	<u>CCSの事業環境の整備</u>
		水素・アンモニア	1	<u>水素・アンモニア発電の技術的確立</u>
			2	<u>安価で大量の水素・アンモニアの安定調達の実現</u>
			3	<u>非化石価値の埋没</u>

2050年における各電源の整理（案）

- 2050年カーボンニュートラルを目指す上で、脱炭素化された電力による安定的な電力供給は必要不可欠。3E+Sの観点も踏まえ、今後、以下に限定せず複数のシナリオ分析を行う。議論を深めて行くに当たり、それぞれの電源の位置づけをまずは以下のように整理してはどうか。

確立した脱炭素の電源

再エネ

- 2050年における主力電源として、引き続き最大限の導入を目指す。
- 最大限導入を進めるため、調整力、送電容量、慣性力の確保、自然条件や社会制約への対応、コストを最大限抑制する一方、コスト増への社会的受容性を高めるといった課題に今から取り組む。
- こうした課題への対応を進め、2050年には発電電力量（※1）の約5～6割を再エネで賄うことを今後議論を深めて行くにあたっての参考値（※2）としてはどうか。

原子力

- 確立した脱炭素電源として、安全性を大前提に一定規模の活用を目指す。
- 国民の信頼を回復するためにも、安全性向上への取り組み、立地地域の理解と協力を得ること、バックエンド問題の解決に向けた取り組み、事業性の確保、人材・技術力の維持といった課題に今から取り組んでいく。2050年には、再エネ、水素・アンモニア以外のカーボンフリー電源として、化石+CCUS /カーボンリサイクルと併せて約3～4割を賄うことを今後議論を深めて行くにあたっての参考値（※2）としてはどうか。

イノベーションが必要な電源

火力

化石 + CCUS

- 供給力、調整力、慣性力の利点を持つ一方で、化石火力の脱炭素化が課題。
- CCUS /カーボンリサイクルの実装に向け、技術や適地の開発、用途拡大、コスト低減などに今から取り組み、一定規模の活用を目指す。2050年には、再エネ、水素・アンモニア以外のカーボンフリー電源として、原子力と併せて約3～4割を賄うことを今後議論を深めて行くにあたっての参考値（※2）としてはどうか。

水素・アンモニア

- 燃焼時に炭素を出さず、調整力、慣性力の利点を持つ一方で、大規模発電に向けた技術確立、コスト低減、供給量の確保が課題。今からガス火力、石炭火力への混焼を進め、需要・供給量を高め安定したサプライチェーンを構築にも取り組む。
- 産業・運輸需要との競合も踏まえつつ、カーボンフリー電源として一定規模の活用を目指す。水素基本戦略で将来の発電向けに必要な調達量が500～1000万トンとされていることを踏まえ、水素・アンモニアで2050年の発電電力量の約1割前後を賄うことを今後議論を深めて行くにあたっての参考値（※2）としてはどうか。

※1：2050年の発電電力量は、第33回基本政策分科会で示したRITEによる発電電力推計を踏まえ、約1.3～1.5兆kWhを参考値（※2）とする。

※2：政府目標として定めたものではなく、今後議論を深めて行くための一つの目安・選択肢。今後、複数のシナリオを検討していく上で、まず検討を加えることになるもの。

次回以降

- ✓ 産業、民生、運輸部門における、2050年カーボンニュートラルへの課題と対応の方向性
 - ✓ 委員間でのフリーディスカッション
 - ✓ シナリオ分析の進め方
-
- ✓ 2050年カーボンニュートラルを見据えた、2030年目標の進捗と更なる取組の検証