

[3D\_PL] 「原子力アゴラ」調査専門委員会 地球環境問題対応検討・提言分科会  
地球環境問題に対する原子力発電の活用と役割に関する提言

(3月18日(金) 13:00 ~ 14:30 D会場) 座長(三菱総研)山内 澄

「地球環境問題対応検討・提言分科会」提言の背景と展開

・Nuclear for Climate憲章への署名  
(2015.5)、COP21 (2015.12)を踏ま  
えアゴラ専門委の下に分科会設立  
(2015.12)  
→学会60周年に中間報告(2019.4)  
→最終報告(2020.9)

ステップ1最終報告(2020.9)

COP目標達成への方策とシナリオ

価格動向踏まえたエネルギーミ  
ックス論とセキュリティ論(技術の自  
給性)

自由化市場での制度設計と技術  
開発の推進

原子力の課題(廃棄物処分)

・政府カーボンニュートラル宣言  
(2020.10)  
・エネ基改訂作業開始(2020.10)  
→これに呼応し、エネ基への反  
映を期待して提言

ステップ2中間報告(2021.8)

S+3E+R  
科学的レビューメカニズム

再エネと原子力の共存

原子力政策として既設活用とリプ  
レイス・新增設

原子力技術開発の推進

・COP26開催するも原子力の特出しなし  
(2021.11)  
・不本意なエネ基改訂議論と決定内容  
(2021.10)  
→科学に立脚した原子力としての、  
より突っ込んだ提言

ステップ2最終報告(2022.3)

S+3E+R  
科学的レビューメカニズム

・エネルギーのベストミックス  
・再エネの現実的限界を踏まえた  
原子力との共存

原子力の活用と技術開発

・既設活用とリプレイス・新增設  
・小型炉・高速炉・燃料サイクル

原子力の課題(国民の理解)

[3D\_PL] 「原子力アゴラ」調査専門委員会 地球環境問題対応検討・提言分科会  
地球環境問題に対する原子力発電の活用と役割に関する提言

(3月18日(金) 13:00 ~ 14:30 D会場) 座長(三菱総研)山内 澄

- (1) 地球環境に対する原子力の役割と提言総括  
—2050年カーボンニュートラル実現を目指して (東大)小宮山 涼一
- (2) 欧米のエネルギー情勢 (日本エネルギー経済研)下郡 けい
- (3) 再エネ大量導入時の電力部門の経済性 —LCOE 及び統合コストの概念—  
(立命館アジア太平洋大)松尾 雄司
- (4) カーボンニュートラル実現に向けた再エネ導入シナリオの検討 (電中研)永井 雄宇
- (5) 持続発展社会に寄与する原子力 —再エネとの共存と SDGsへの貢献  
(元 MHI NS エンジ)駒野 康男
- (6) 総合討論「2050年カーボンニュートラル実現に向けての原子力の役割と課題」

【見どころ】—昨年10月に2050年カーボンニュートラル実現の政府方針が出され、これを踏まえて学会として原子力の役割と活用につき発信するセッションを開催する。世界の原子力学会が Nuclear for Climate 憲章に共同署名した2015年に設置の「地球環境問題対応検討・提言分科会」では、2020年発出の提言に加え、今般、S(安全性)+3E(地球環境、エネルギーセキュリティ、経済性)+R(レジリエンス)のバランスを軸としたエネルギー需給構造のあるべき姿について提言する。セッションでは、科学的レビューとエビデンスベースの視点から、経済的・技術的な実現性と課題を提示し、原子力の更なる価値の実現につき議論する。

---

[3D\_PL]「地球環境問題に対する原子力発電の活用と役割に関する提言」  
2022年3月18日(金) 13:00～14:30 D会場

# 地球環境に対する原子力の役割と提言総括 2050年カーボンニュートラル実現を目指して

東京大学 小宮山 涼一



THE UNIVERSITY OF TOKYO

# 科学的アプローチによる政策決定

## 科学的レビューメカニズム\*：科学的視点を踏まえたエネルギー政策立案の重要性

- 「最新の技術動向と情勢を科学的に把握」
- 「透明な仕組み・手続の下、各選択肢の開発目標や相対的重点度合いを柔軟に修正・決定」

\*経済産業省：パリ協定長期成長戦略懇談会（第2回）(2018)

## 科学的意思決定によるエネルギー政策

最新の技術動向や情勢を定期的に把握し、透明な枠組み・手続の下、エビデンスや専門的知見により、各技術選択肢の開発目標や相対的重点度合いを柔軟に修正・決定することが重要  
(例) EBPM (Evidence-Based Policy Making、証拠に基づく政策立案)

## 第5次エネルギー基本計画「より高度な3E+S」：4項目の評価軸

- (1) 技術・ガバナンス改革による安全の革新により安全最優先を実現
- (2) 資源自給率に加え、技術自給率の向上と様々なリスク（再エネによる需給調整リスク、事故・災害リスク、化石資源の地政学リスク、希少資源リスク、先端技術の他国依存リスクなど）の最小化のためのエネルギー選択の多様化を確保
- (3) 環境適合においては脱炭素化への挑戦
- (4) 国民負担抑制に加え、自国産業競争力の強化

→科学的指標の設定などを踏まえ、定量的、定性的な客観的評価を踏まえた政策立案が重要

# 科学的アプローチによる政策決定

## 諸外国でも科学的アプローチを取り入れた政策立案を実施

- ARPA-E(米国)：科学的知見により有望技術を選択的に支援する枠組
- CCC(英国)：専門的知見に基づいた技術目標の提言、科学的指標による進捗評価

## 定量評価に基づくエネルギー政策の重要性

エネルギーミックスの性能を定量評価する指標の確立などを通じて、S+3Eを基本とし、様々なリスク、レジリエンス、技術成熟度や技術自給率、自国の産業競争力、国民負担の抑制など諸要素を考慮したエネルギー選択の評価軸の構築が重要

→本日のセッション：欧米の動向、再エネ、カーボンニュートラル、原子力・再エネ共存の観点から、科学的アプローチによる政策決定のあり方を考える

## Key metrics の例（電力供給部門）

部門ごとの進捗確認に用いることができる数値指標 (key metrics)を提示

**Table 3.5**  
Key metrics for electricity supply in the CCC Pathway to meet the Sixth Carbon Budget

Metric	Latest indicator			Milestones in the CCC pathway				
	Year	Annual change	Value	2025	2030	2035	2050	Trend
Grid Intensity (gCO <sub>2</sub> /kWh)	2020	-20	182	125	45	10	2	
Offshore wind capacity (GW)	2020	+0.4 GW	10.4	25	40	50	95	
Variable renewable generation (%) *	2020	+5% points	31%	45%	55%	70%	80%	
Dispatchable low-carbon generation (%)**	2020	0	0	0	10%	15%	10%	
Unabated gas generation (%)	2020	-5% points	36%	30%	10%	0	0	

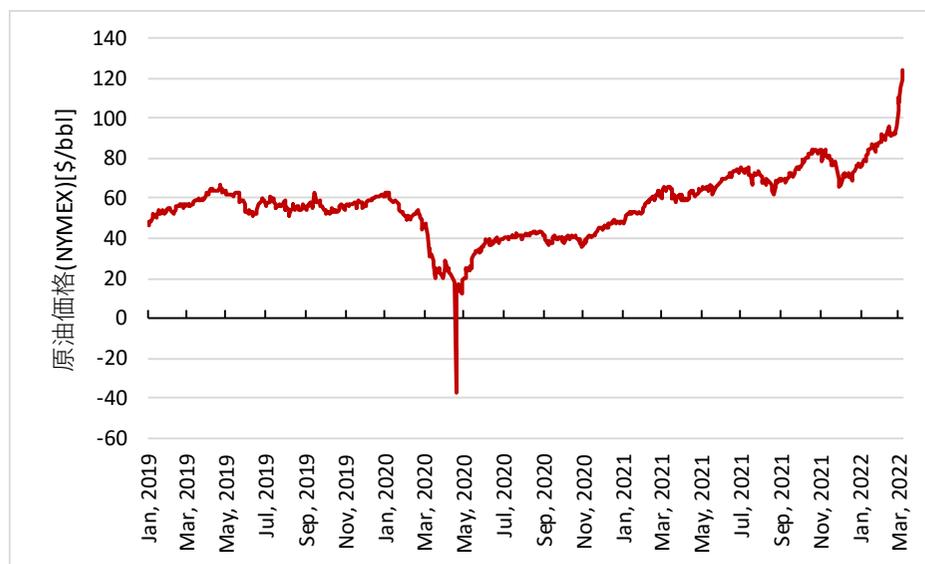
Source: CCC analysis based on BEB (2021) Energy Trends.  
Notes: \*Wind and solar generation. \*\*Includes gas with carbon capture and storage, hydrogen and bioenergy with carbon capture and storage.

(出典) CCC, UK (2021)

# 原油価格の動向

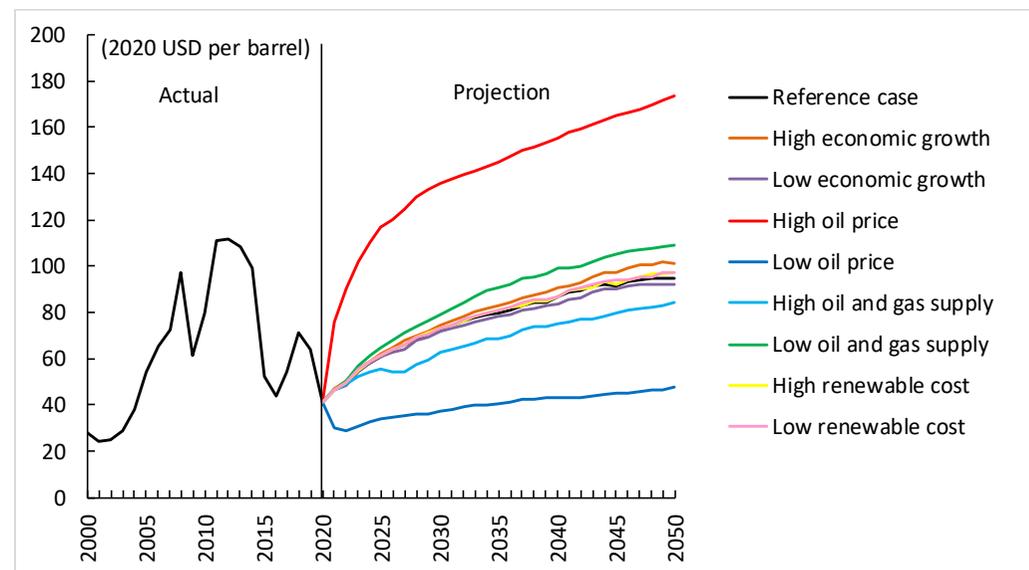
- 原油価格はこれまで大きく変動し、今後の推移も不確実性が大きい
- 現状、コロナ禍からの景気回復、地政学的リスクの高まり(ウクライナ危機)等により、エネルギー価格高騰
- 世界情勢の不確実性を踏まえ、エネルギー安全保障の強化は重要な課題
- 準国産エネルギーとしての原子力エネルギー活用がエネルギー安全保障強化、エネルギーコスト抑制に不可欠

## 原油価格(NYMEX)の推移



(出典) 米国エネルギー省(EIA/DOE)統計データより作成

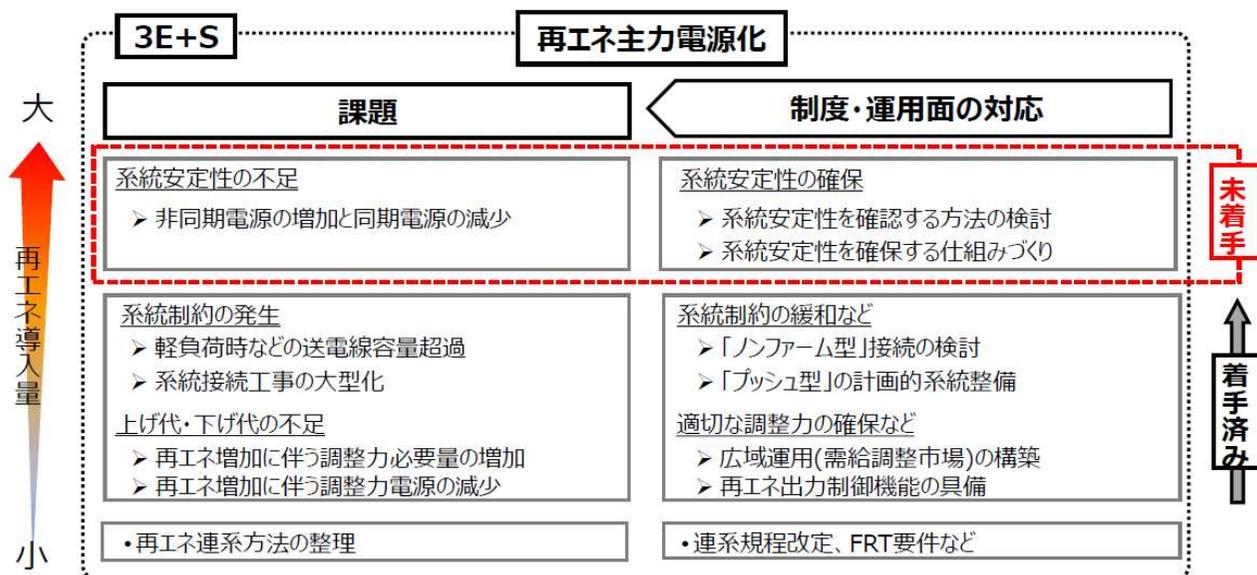
## 原油価格の展望



(出典) 米国エネルギー省(EIA/DOE): Annual Energy Outlook 2021より作成

# 再エネ主力電源化に向けた課題

- 電力安定供給のためには、供給力の確保(kWの確保)、電力量の確保(kWhの確保)、周波数調整力の確保( $\Delta kW$ の確保)、慣性力・同期化力の確保、送配電網の整備等が重要
- 電力コストは発電、送配電を含めたシステム全体として評価することが重要(系統統合コスト)→再エネ大量導入による電力コスト上昇リスクの抑制が大事
- 原子力発電は系統安定性(電力系統の慣性力・同期化力)や調整力確保に貢献→原子力は再エネ主力電源化にも貢献しうる技術選択肢(原子力、再エネの共存)

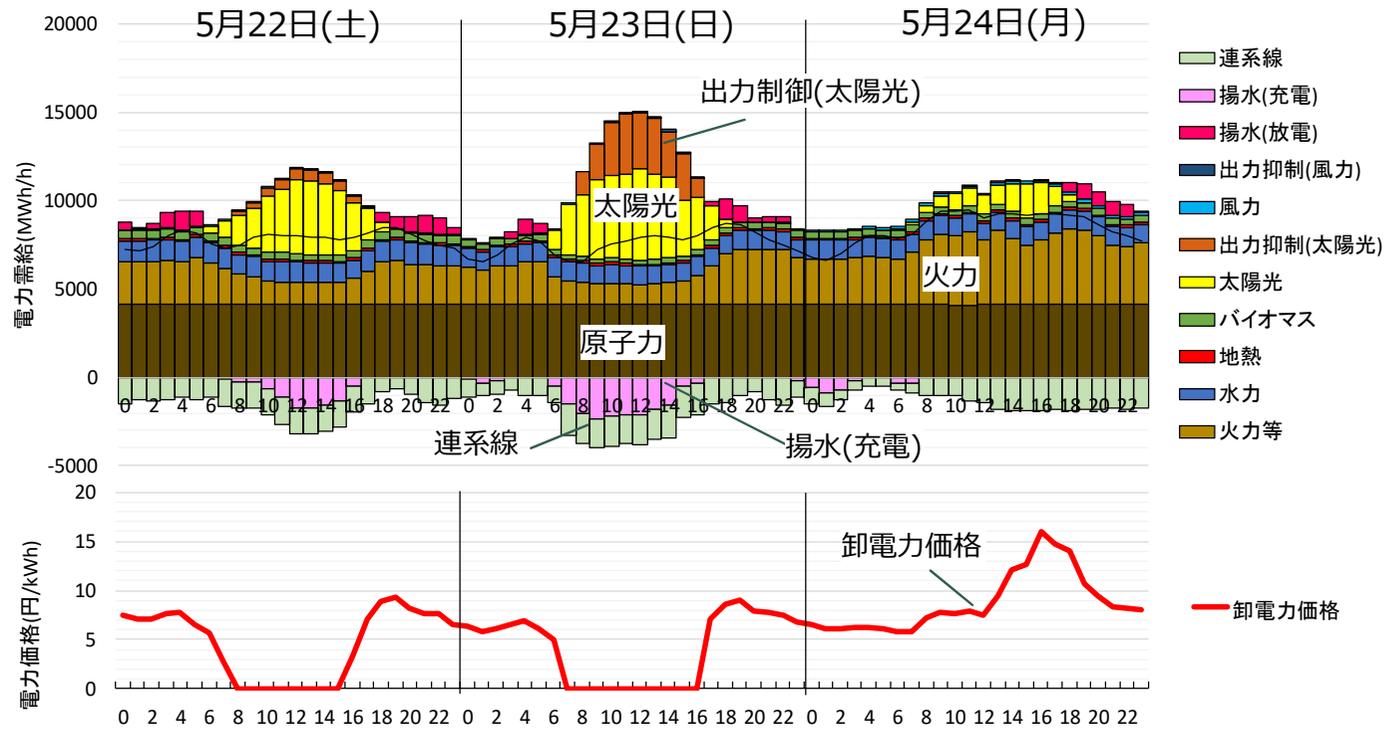


(出典)電力広域的運営推進機関：「再エネ主力電源化」に向けた技術的課題及びその対応策の検討について(2020年)  
 <[https://www.occto.or.jp/iinkai/chouseiryoku/2020/files/chousei\\_55\\_03.pdf](https://www.occto.or.jp/iinkai/chouseiryoku/2020/files/chousei_55_03.pdf)>

# 再エネ主力電源化に向けた課題

- 再エネ出力変動対策→火力出力抑制、揚水充電運転、連系線活用、再エネ出力抑制
- 卸電力価格低下→電源の事業インセンティブの低下→長期的な電力安定供給への影響の懸念

電力需給運用、卸電力価格(九州)：2021年5月22日～24日



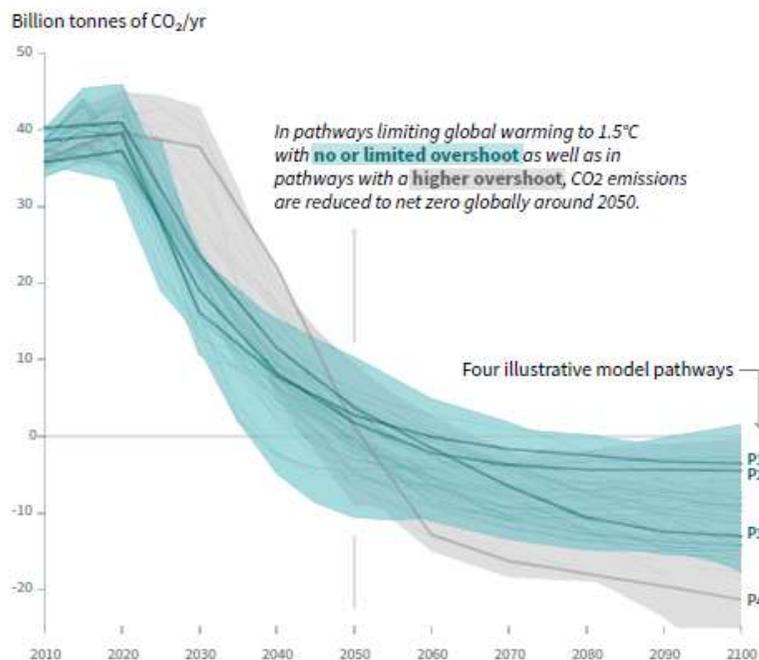
(出典) 九州電力需給情報、JEPXデータベースより作成

# カーボンニュートラルと原子力(世界)

- COP26(グラスゴー・英国、2021)では、世界的な目標として、1.5°C目標追求が定められた
- 1.5°C目標達成の実現に向けては原子力発電の増加が必要との分析
  - 原子力発電量：2030年(2010年比)1.6倍～2.1倍、2050年(2010年比)2.0倍～6.0倍

## 1.5°C目標を実現する世界のCO<sub>2</sub>排出パス

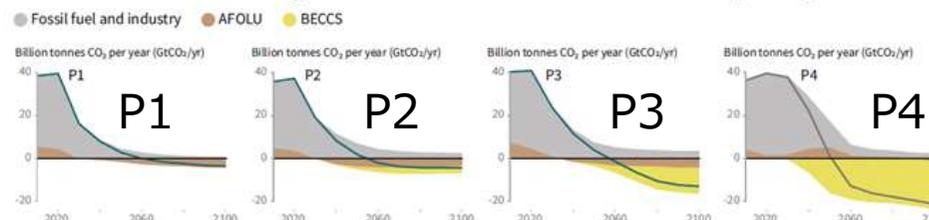
2100年に気温上昇1.5°C以下に抑制 → 今世紀半ばまでにネットゼロ排出



(出典) IPCC : Global Warming of 1.5°C (2018)

## 1.5°C目標と原子力

Breakdown of contributions to global net CO<sub>2</sub> emissions in four illustrative model pathways



原子力 発電量	2030年 (2010年比)	2050年 (2010年比)	シナリオ概要
P1	1.6倍	2.5倍	技術革新による省エネ実現
P2	1.8倍	2.0倍	持続可能性重視、再エネ普及拡大
P3	2.0倍	6.0倍	中間的見通し、全般的な技術進展
P4	2.1倍	5.7倍	エネ消費増大、CCS依存増大

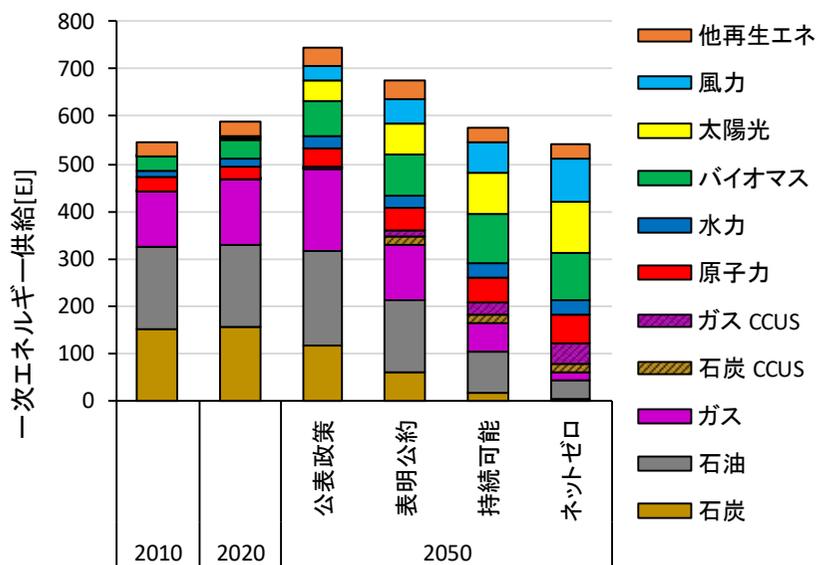
(出典) IPCC: Special Report: Global Warming of 1.5 °C, Summary for Policymakers(2018)より作成 7

# カーボンニュートラルと原子力(世界)

- 地球環境問題への対処には、技術の総動員が基本的戦略(省エネ、燃料転換、CCUS)
- 原子力は2050年にかけて世界で現状以上の水準まで増加

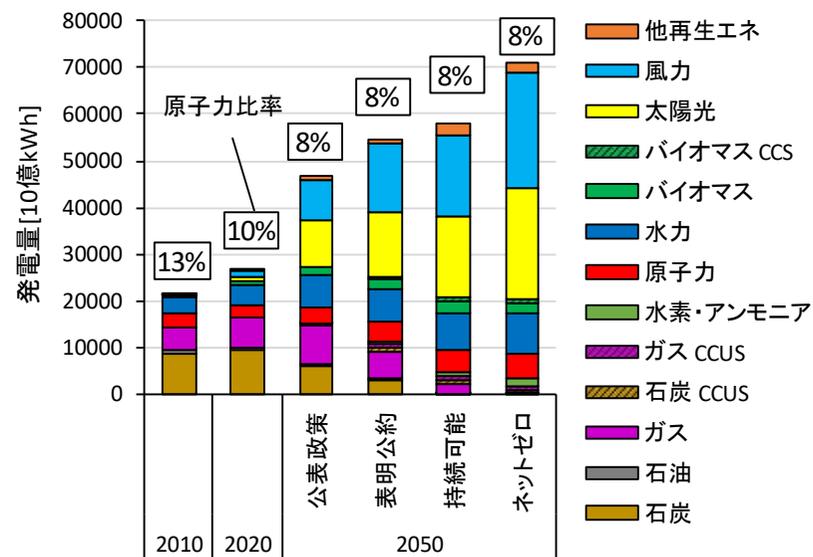
## 世界の電源構成の展望

### 世界の一次エネルギー供給の展望



(出典)OECD/IEA, WEO2021, OECD, Paris, 2021より作成

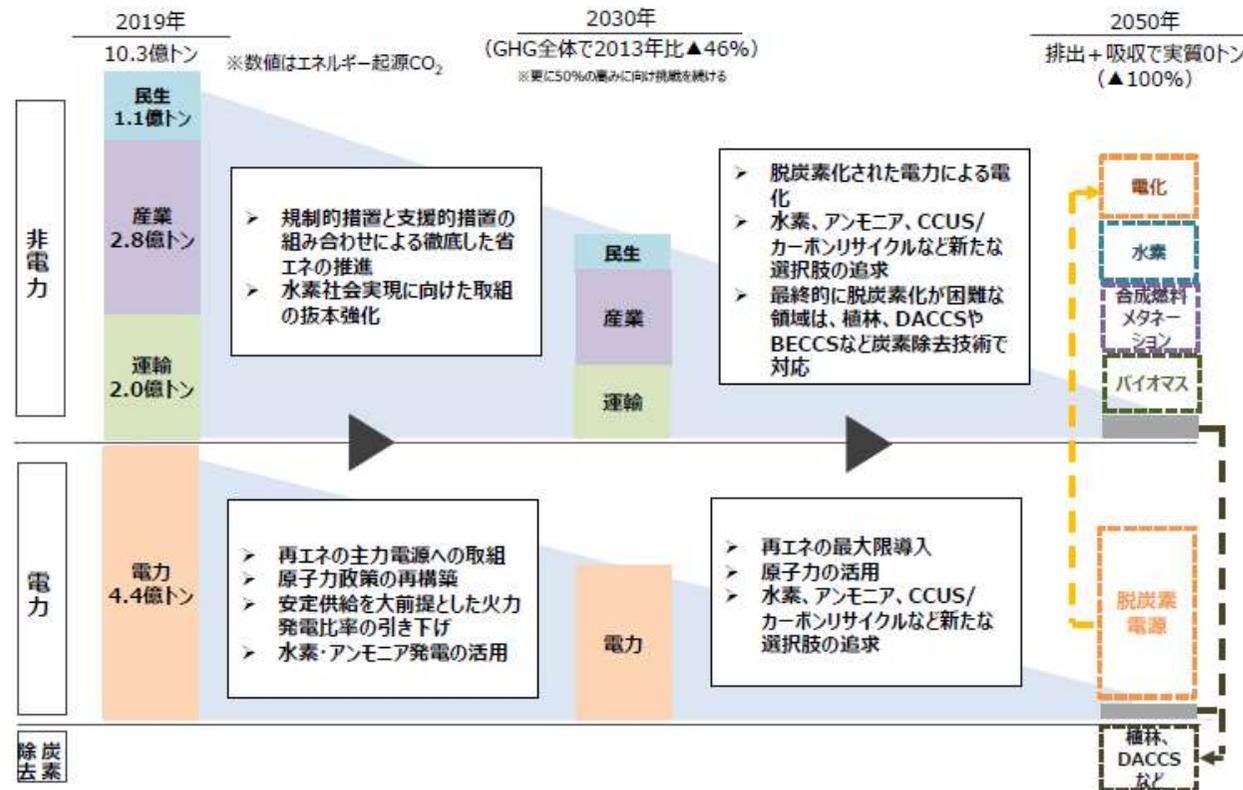
原子力発電量	公表政策	表明公約	持続可能	ネットゼロ
2050年 (2020年比)	1.4倍	1.7倍	1.8倍	2.0倍



(出典)OECD/IEA, WEO2021, OECD, Paris, 2021より作成

# 2050年までのカーボンニュートラル実現(日本)

- 脱炭素化の基本戦略→省エネ、燃料転換(クリーンエネルギー導入)、CCUS
- 電力脱炭素化、電化、水素・合成燃料、CCUS(ネガティブエミッション技術)、吸収源の拡大(植林等)ほか

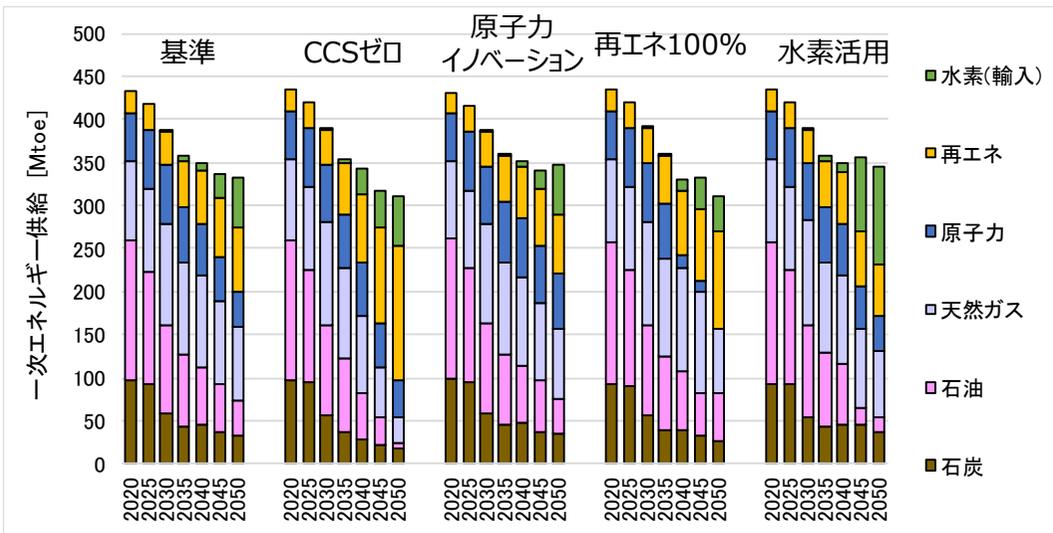


(出典) 経済産業省：2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略(令和3年6月18日)  
 <<https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005-4.pdf>>

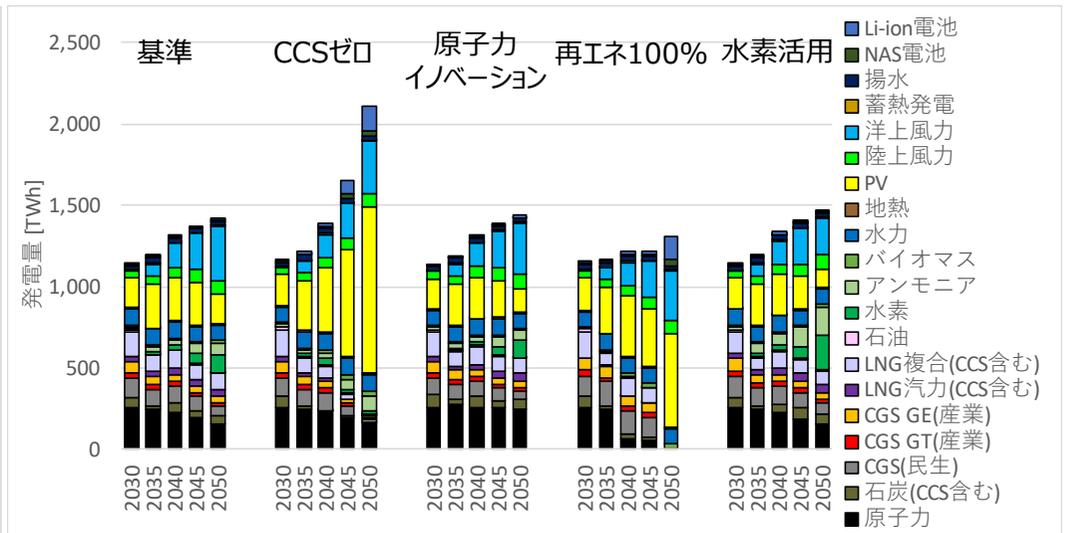
# 日本のカーボンニュートラル実現可能性(シナリオ分析)

- CCSゼロ：電化の一層の進展による脱炭素化(2050年総発電量：約2兆kWh)
- 原子力イノベーション：現在、建設計画中の設備相当規模(約8.8GW)の新增設可能性を考慮して原子力導入量を最適化(2050年時点での設備容量上限値32.5GW)、設備利用率向上(90%上限)  
→原子力は上限値まで導入→**原子力はカーボンニュートラル実現に貢献する経済合理的な選択肢\***
- \*ただし本分析はコスト最小化のアプローチでの分析であり、現実には原子力は経済性のみならず、社会受容性等の影響を受けるため、分析結果の解釈には留意が必要
- 再生可能エネルギー100%：太陽光を中心とした再エネ大量導入→電力コスト上昇→電化の抑制
- 水素活用：輸入量上限(2倍)→2050年4,000万トン/年、輸入価格(半減)→2050年10円/Nm<sup>3</sup>

## 一次エネルギー供給構成



## 電源構成(発電量)



(出典) 小宮山, 「原子力利用に関する基本的考え方」について, 内閣府 原子力委員会定例会, 2022年2月15日

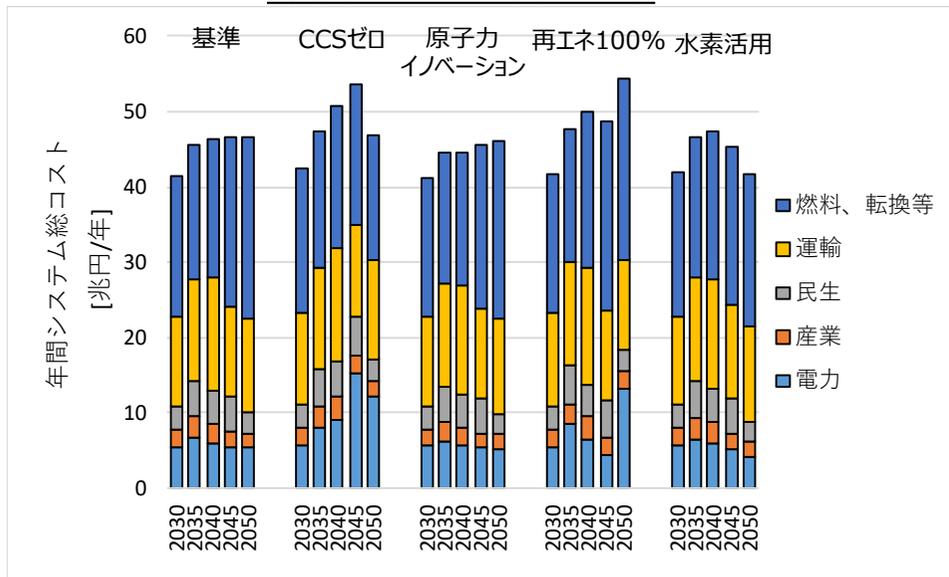
# 日本のカーボンニュートラル実現可能性(エネルギーシステム総コスト)

## ■ 原子力イノベーションシナリオ→原子力はエネルギーシステム総コスト抑制に貢献\*

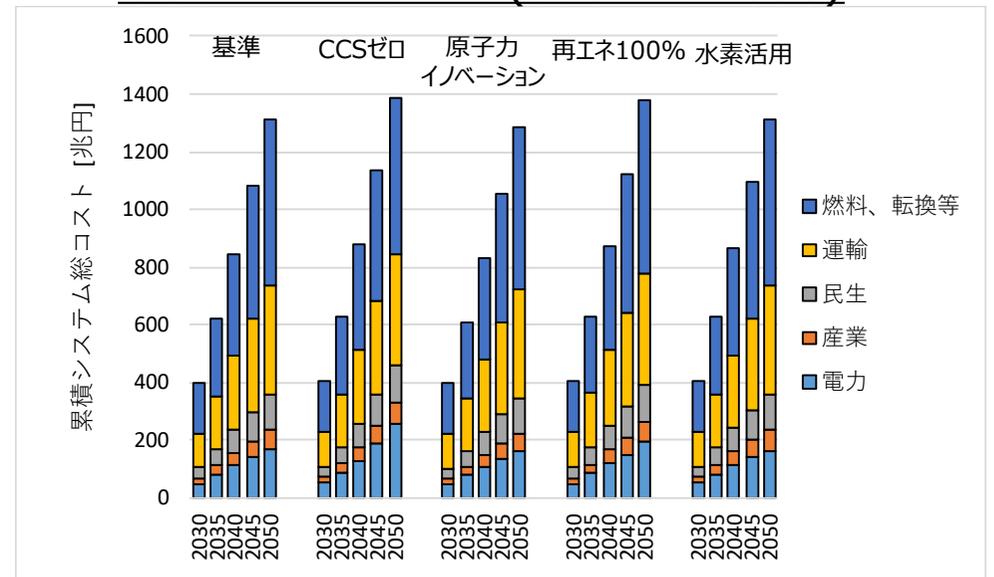
- 2050年までのシステム総コスト累計で最小、原子力イノベーションシナリオでの2050年のエネルギーシステム総コストは再エネ100%シナリオに比べて年間約8兆円抑制

\*ただし本分析はコスト最小化のアプローチでの分析であり、現実には原子力は経済性のみならず、社会受容性等の影響を受けるため、分析結果の解釈には留意が必要

### 年間システム総コスト



### 累積システム総コスト(各年までの累計)



(出典) 小宮山, 「原子力利用に関する基本的考え方」について, 内閣府 原子力委員会定例会, 2022年2月15日

# 結語

- **科学的アプローチによる政策形成の基盤整備と合理的なエネルギー選択の実現に向けた取組が重要な課題**
  - エネルギー選択の評価軸ならびに科学的指標の検討
    - ✓ S+3E、R(レジリエンス)、技術自給率、産業競争力、…
  - 透明性の高い枠組みによるエネルギー政策の議論
- **原子力エネルギーの課題に向けた取組**
  - 社会的信頼の回復
  - 高レベル放射性廃棄物処理・処分に向けた取組(国民対話など)

2022年3月18日 原子力学会 2022年春の年会

# 欧米のエネルギー事情

---

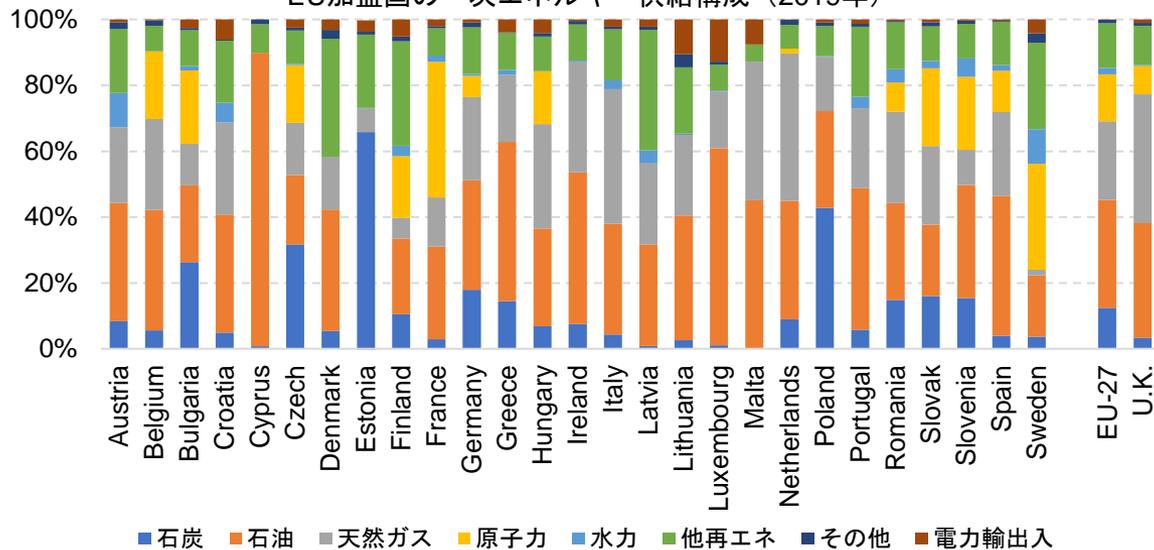
一般財団法人日本エネルギー経済研究所

戦略研究ユニット 国際情勢分析第1グループ

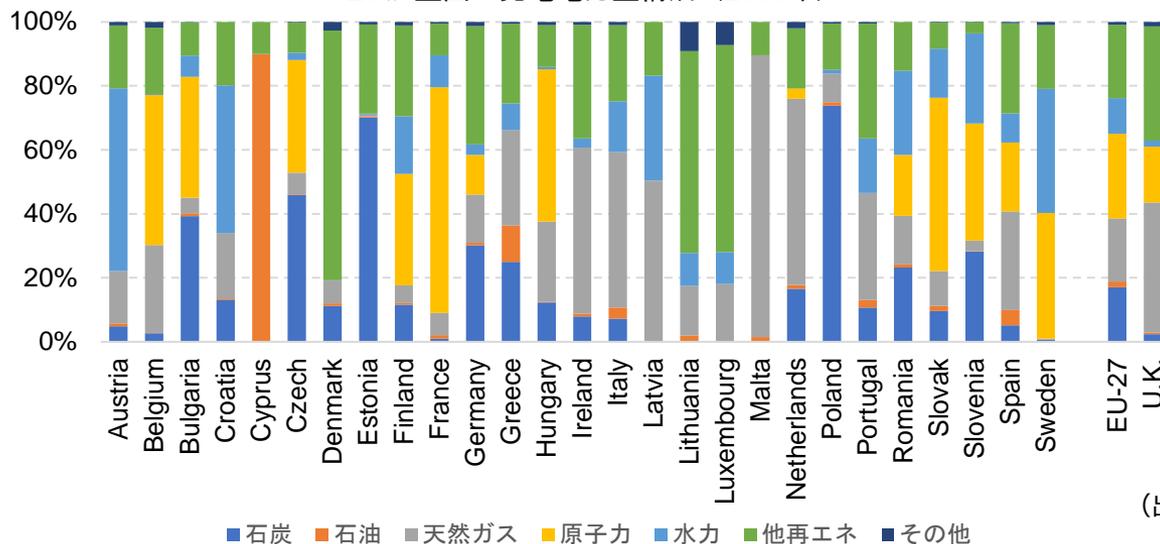
下郡 けい

# 欧州の動向

EU加盟国の一次エネルギー供給構成 (2019年)



EU加盟国の発電電力量構成 (2019年)

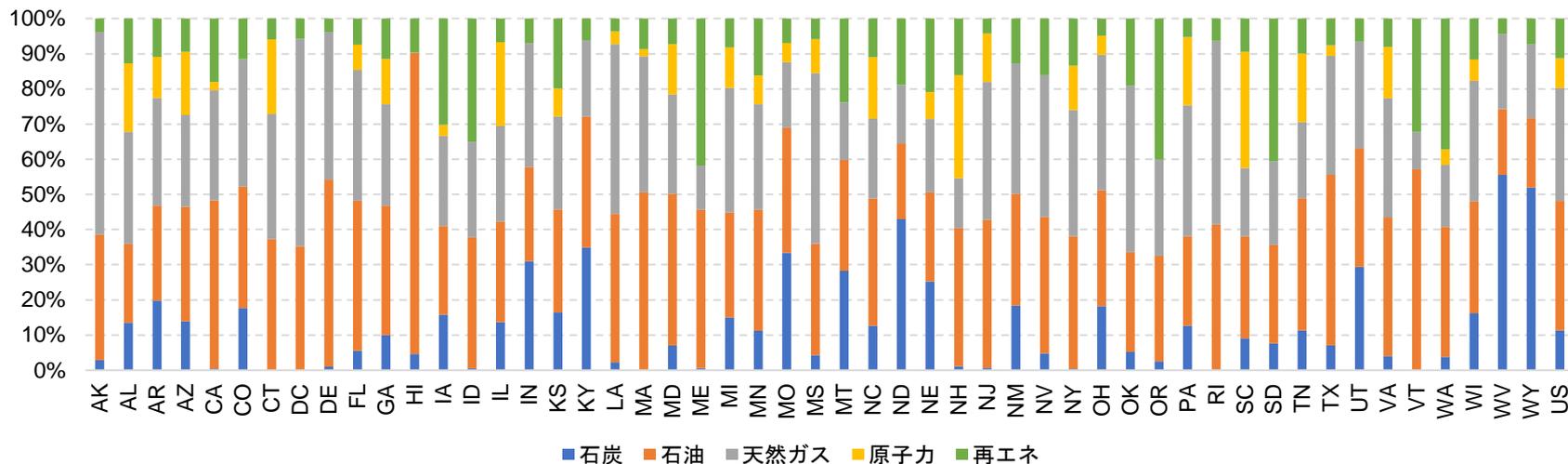


(出所) IEA, World Energy Balances 2021

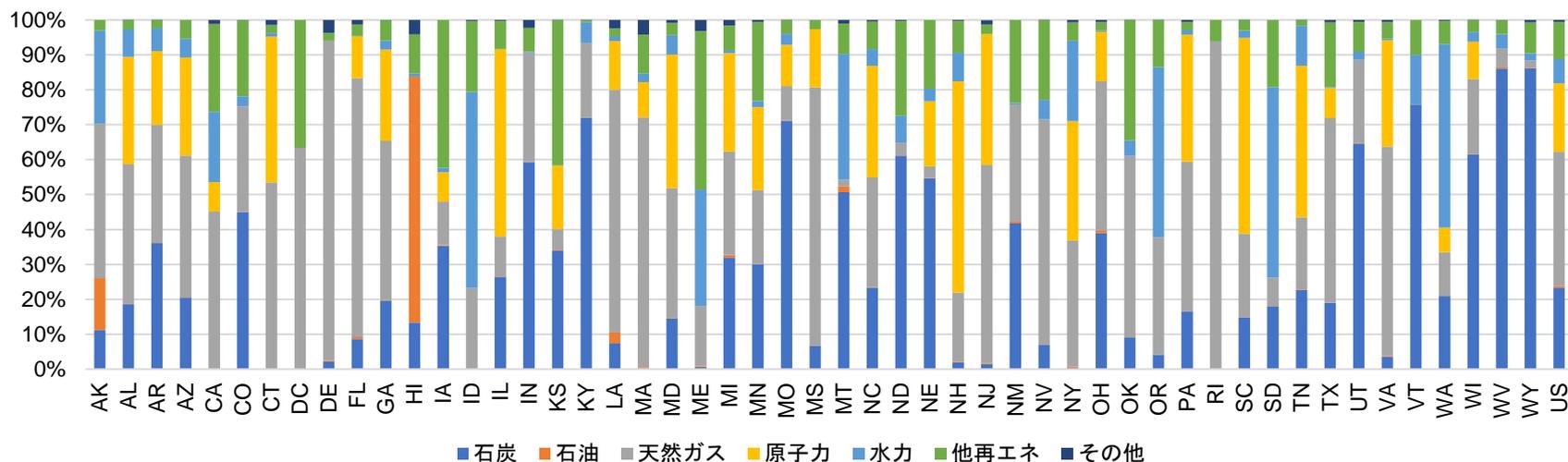
- 欧州グリーンディール（2019年12月公表）：
  - クリーンエネルギーへの転換を中心とした長期成長戦略として位置づけ。COVID-19を経て、経済復興とエネルギー転換を組み合わせるものとして、復興計画の中核に位置づけられる。
- 気候変動対策目標（EU）：GHG排出量を2030年までに1990年比55%削減、2050年までに気候中立
  - Fit for 55パッケージ（2021年7月）：EU-ETS指令や再生可能エネルギー指令、エネルギー効率化指令の改正などを提案。2021年12月には、ガス市場の脱炭素化、水素市場の整備、メタン排出規制、建物の脱炭素化に関する規制・指令案を提案。
- 持続可能な投資：例としてEUタクソノミー
  - 2022年2月、欧州委員会は、原子力とガスを移行期の活動と位置づけたスクリーニング基準を採択。
- エネルギー価格高騰、ロシア依存脱却：
  - エネルギー価格に関する政策文書（2021年10月）：不安定なエネルギー価格の解決策はトランジションの完了と指摘。
  - REPowerEU計画案（2022年3月）：2030年より前にロシア産化石燃料依存から脱却。2つの柱として、ガス供給の多様化、化石燃料依存の迅速な低減。
  - Versailles宣言（2022年3月）：欧州理事会、欧州委員会へ5月末までにREPowerEU計画の内容提案を求める。

国	動向
フランス	<ul style="list-style-type: none"><li>France 2030（2021年10月）：エネルギー移行に対応するための投資計画。2030年までに300億ユーロを10の分野に投じる（対象分野は、原子力（SMRや先進的原子炉）、グリーン水素、産業部門など）</li><li>国内原子力新設：マクロン大統領は、2050年までに6基のEPR2を建設（1号機は2028年までに着工、2035年の運転開始を予定）、さらに追加的な8基のEPR2建設に向けた検討を開始すると発表（2022年2月）。</li></ul>
ドイツ	<ul style="list-style-type: none"><li>三党（社会民主党、緑の党、自由民主党）の合意文書：気候中立（従来どおり2045年）を目指す、石炭火力からの撤退を理想的には2030年までに前倒し（従来は2038年）、2030年までに総電力需要の80%（従来は65%）を再エネで賄う、移行期には天然ガス火力を建設（ただし、水素のような気候中立的なガス利用に対応可能なもの）</li><li>ウクライナ侵攻を受け、首相はロシア依存度低減のためエネルギー政策の転換方針を表明（2022年2月）。石炭火力発電所と原子力発電所の運転期限を延長する可能性あり。新方針には、2カ所のLNGターミナル建設計画を盛り込む。</li></ul>
イギリス	<ul style="list-style-type: none"><li>2050年CN達成に向けて、グリーン産業革命に向けた10項目計画（2020年11月）を皮切りに、エネルギー白書（2020年12月）、水素戦略（2021年8月）、ネットゼロ戦略（2021年10月）などを公表。</li><li>規制資産ベース（RAB）モデルの導入を目指した「原子力資金調達法案」が議会に提出され、審議中。</li><li>ロシア産原油・石油製品の輸入を2022年中に段階的に停止と発表（2022年3月）。</li></ul>

米国各州の一次エネルギー消費構成（2019年）



米国各州の発電電力量構成（2019年）



- 米国はエネルギーの消費国であると同時に生産国であり、化石燃料（石油、天然ガス、石炭）の自給率はいずれも100%を超える（IEA, 2020年）
- 気候変動対策目標：GHGを2030年までに2005年比50～52%削減、2050年までにネットゼロ
  - ネットゼロに向けて、発電部門の脱炭素化（2035年まで）、エンドユースの電化と水素を含めた他クリーン燃料への転換、エネルギーロスの削減、メタンや他Non-CO<sub>2</sub>の排出削減、CO<sub>2</sub>除去の規模拡大という5つを重要な変化として指摘。
- 原子力：バイデン政権は、小型モジュラー炉を含めた新型炉開発を重視
  - 超党派インフラ投資法（2021年11月成立）：既設炉の維持と先進的な技術開発への予算配分が期待される
  - 民生用原子力発電クレジット（CNC）プログラム：既設炉の運転継続支援を目的、今後実施予定。超党派インフラ投資法では、CNCプログラム実施に予算充当を約束
- 対ロシア：
  - ロシア産原油・石油製品・LNG・石炭の禁輸をバイデン大統領発表（2022年3月）

# まとめ

- 日本のエネルギーシステムの脱炭素化を検討するうえでは、欧州や米国の動向も参照しつつ、エネルギー情勢を踏まえて様々な技術を組み合わせることが求められる。
- 変動性再生可能エネルギーの大量導入が見込まれる中、
  - 各電源の経済性評価（評価方法の更なる検討も含む）、
  - 社会的受容性を踏まえた上で各電源をどこまで受け入れることが可能か、
  - 既存技術の発電部門以外での利用なども 重要な視点。
- バランスのとれたエネルギー需給構造のあるべき姿を追求することが肝要。

## 原子力関連の活動（抜粋）

- 先進的技術の開発・導入、新設（**2045年**までに建設許可を取得）、既設の改修（**2040年**までに運転延長の承認を受け）を対象
- ライフサイクルGHG排出量が100gCO<sub>2</sub>e/kWh未満
- EU関連法令を遵守
- 放射性廃棄物管理基金、廃止措置基金を創設
- 放射性廃棄物管理と廃止措置に必要な資金を運転終了時に確保できる見込みを示す
- 極低・低・中レベル放射性廃棄物の操業可能な最終処分場を有する
- **2050年**までに高レベル放射性廃棄物の最終処分場を操業する詳細な計画を有する
- **2025年**から事故耐性燃料（ATF）を利用（新設・既設改修） など

## ガス関連の活動（発電から抜粋）

- 発電、コージェネレーション、熱製造を対象
- ライフサイクルGHG排出量が100gCO<sub>2</sub>e/kWh未満の場合
- **2030年末**までに建設認可を受けた施設で以下を全て満たす場合：
  - (i) 直接GHG排出量が270g/kWh未満、あるいは年間直接GHG排出量が20年以上にわたって平均550kg/kWh未満
  - (ii) 代替される電力を再生可能エネルギーでまかなうことができない
  - (iii) 固体・液体化石燃料を用いた既存の排出量の多い施設を代替する
  - (iv) 代替による出力増加は15%以内
  - (v) **2035年末**までに再生可能または/あるいは低炭素ガスの使用に完全に切り替えるよう施設を設計・建設する
  - (vi) 代替によりGHG排出量をkWhあたり55%以上削減する など

# 再エネ大量導入時の電力部門の経済性 －LCOE及び統合コストの概念－

令和4年3月18日

原子力学会春の年会企画セッション

立命館アジア太平洋大学

松尾雄司

# 報告内容

- 均等化発電原価（Levelized cost of electricity: LCOE）の概念
- 統合費用（Integration cost）の概念
- 統合費用を考慮した電源別限界費用（LCOE\*）の概念
- LCOE/統合費用/LCOE\*の評価例

# 均等化発電原価（Levelized cost of electricity: LCOE）とは

LCOEとは**1kWhの発電を行うために必要なコスト（発電単価）**のこと。

正確には、以下の式を満たす定数 $p$ をLCOEと呼ぶ。

（ライフサイクルにわたる累計総費用＝累計総収益となるような売電単価）

$$\sum_t \frac{C_t}{(1+r)^t} = \sum_t \frac{pE_t}{(1+r)^t} = p \sum_t \frac{E_t}{(1+r)^t}$$

$t$ : 時刻（年）を示す添字、 $C_t$ :  $t$ 年に発電に係る費用（建設費、運転維持費、燃料費等）

$E_t$ :  $t$ 年の年間発電量、 $r$ : 実質割引率

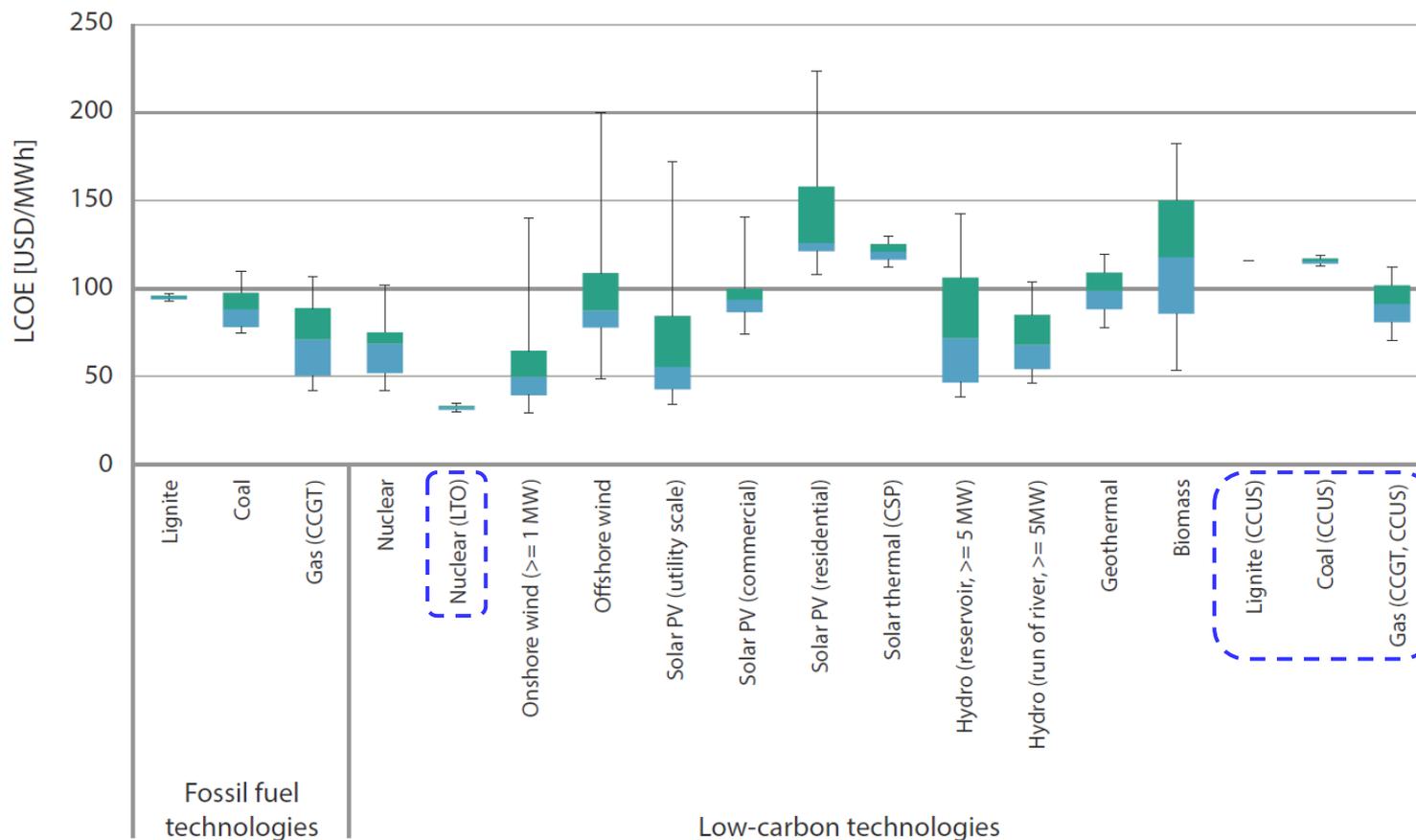
上式より、LCOEは以下のように計算できる。

$$p = \frac{\sum_t \frac{C_t}{(1+r)^t}}{\sum_t \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

※ 割引率 $r$ とは、将来の貨幣価値を現在の貨幣価値に換算する際に用いられる比率。

例えば実質3%の利息収入が確実に見込まれる場合には、10年後の実質100万円は現在の実質74万円に等しい。この場合、この3%が「実質割引率」と呼ばれる。

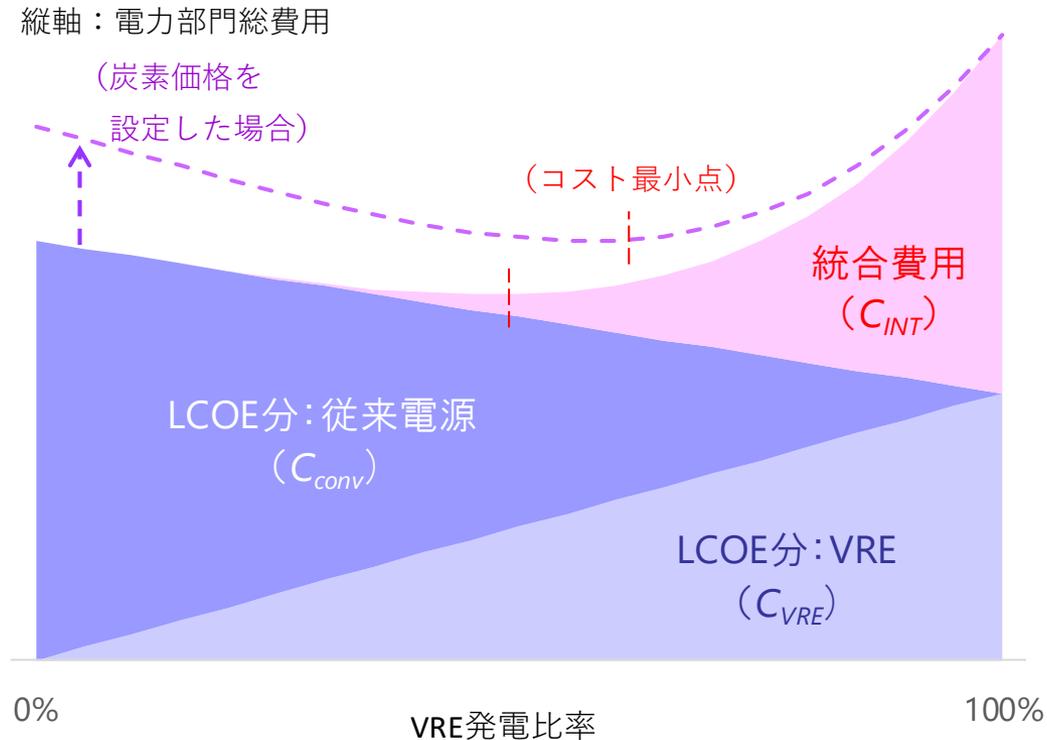
# IEA, OECD/NEA(2020)によるLCOEの評価



・ 実質割引率3%、7%及び10%で計算。上図は7%の評価例（国ごとに結果が異なるため、ここでは幅をもって示している）。

・ 原子力発電（新設）が最も安い国はロシア。  
 割引率3%、7%及び10%でそれぞれ2.7セント/kWh、4.2セント/kWh及び5.7セント/kWh。

# VRE大量導入時の統合費用の概念



- 従来電源のLCOEよりもVREのLCOEの方が安くなった場合、LCOEに比例する費用（従来の発電コスト：図中 $C_{conv}+C_{VRE}$ ）のみで比較すると、VRE導入比率が高くなるほど総費用は小さくなる。
- 但し実際には、VREの大量導入に伴い出力抑制や蓄電システムの設置、グリッドの増強などに係る追加的な費用が発生する。LCOE分以外の追加費用（何に起因するものであれ、全て含めたもの：図中 $C_{INT}$ に相当）を、VRE大量導入に係る**統合費用（Integration cost）**と呼ぶ。

# 統合費用の区分

※ 統合費用は以下のように区分することができる。

## 1. バランスコスト：Balancing costs

- ・主に短期の予測誤差に伴って追加的に生じる運用上のコスト。

## 2. グリッド増強コスト：Grid-related costs

- ・発電設備と電力需要の空間的な乖離に伴って生じるコスト。
- ・発電設備から系統までの接続線と、グリッド自体の増強の2種類が必要となる（前者はLCOEの中に含まれることもある）。

## 3. プロファイルコスト：Profile costs

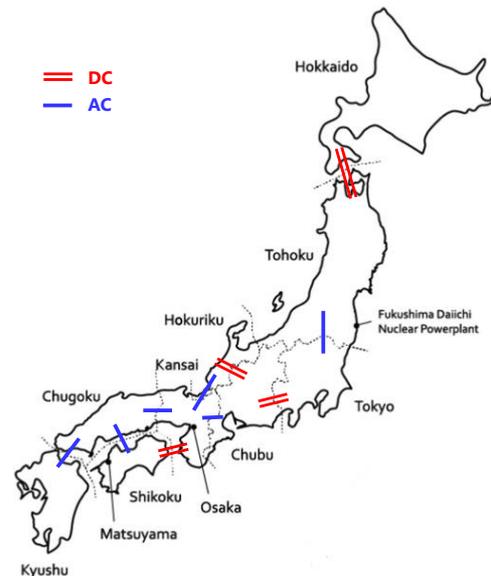
- ・発電設備と電力需要の時間的な乖離に伴って生じるコスト。以下の項目に細分される。
  - 3-1. 適合コスト（バックアップコスト）：Adequacy costs / Backup costs
  - 3-2. 出力抑制コスト：Overproduction costs
  - 3-3. 設備利用率低下に係るコスト増加分：Full-load hour reduction
  - 3-4. 計画内の起動・停止回数増加に係るコスト増加分：Flexibility effect

## 4. その他

- ・非同期発電機の増加（慣性の低下）に伴う費用増など

# 統合費用の評価例：日本の場合

- ・ 日本全体を3～9地域に区分、各地域内の風力・太陽光発電量をAMeDASデータ（2012年）から15分もしくは1時間間隔で推計。
- ・ 需要に見合う電力を供給できるような発電・蓄電・送電設備の導入量及びその運用に対し、全国の総システムコスト（資本費、運転維持費、燃料費等の合計値）を推計。
- ・ 総コストが最小になる（＝「最適な」）設備構成及びその運用を線形計画法（Linear programming: LP）により評価。
- ・ 2050年の「ゼロ・エミッション」化を想定し、以下の4種の電源をモデル化。VREの資源量については、暫定的に環境省のポテンシャルを利用。



## 変動性再生可能エネルギー（VRE）

風力（陸上・洋上）、太陽光

## 再生可能エネルギー（その他）

水力、地熱、バイオマス

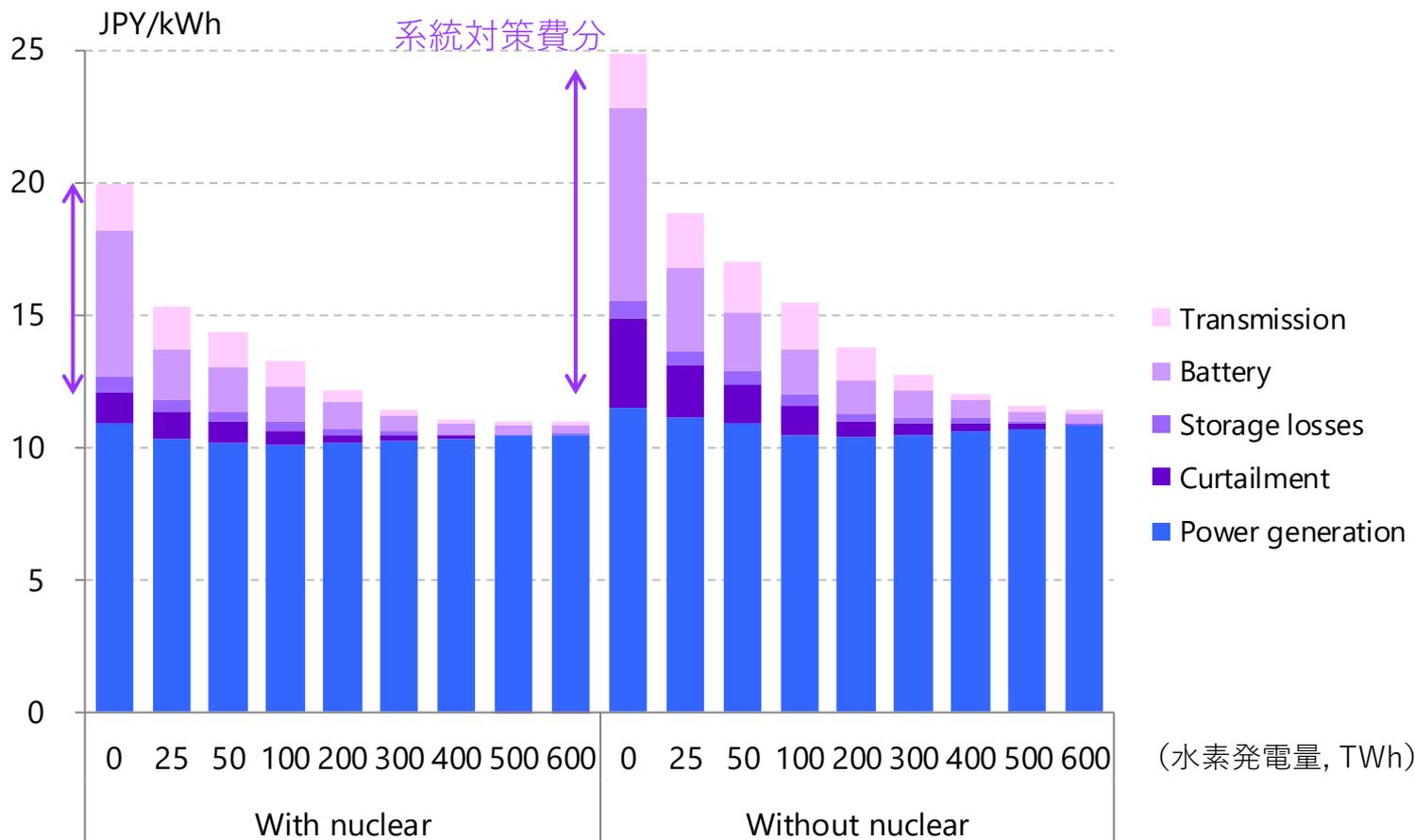
## 原子力

軽水炉。上限25GWと想定。

## ゼロ・エミッション火力

CCS付き火力発電または輸入水素/アンモニア火力発電

# 評価例：電力単価



- ・ 系統対策コストは蓄電池分、出力抑制分、地域間連系線分及び蓄電ロスに伴う余剰発電分からなる。
- ・ 水素0 TWhの「原子力なし」ケースでは再エネの発電設備容量が増大し、出力抑制分が非常に大きくなる

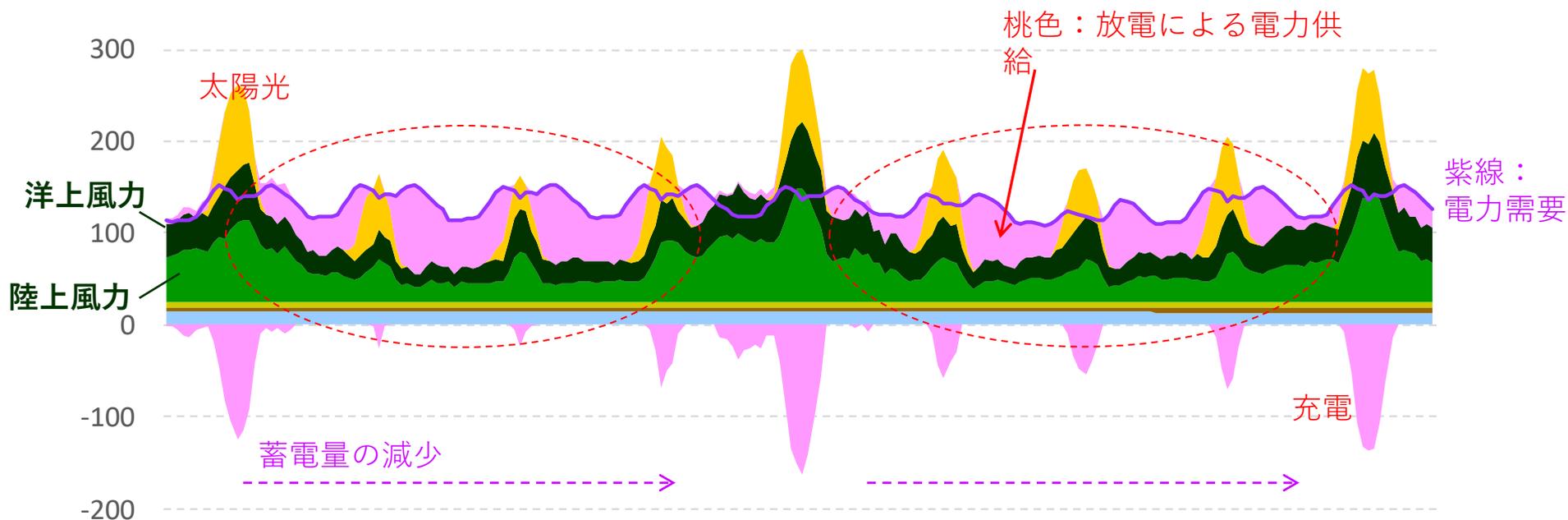
# 蓄電量を決定する要因：「無風期間」

横軸：時間

縦軸：需要量/出力

量

GW

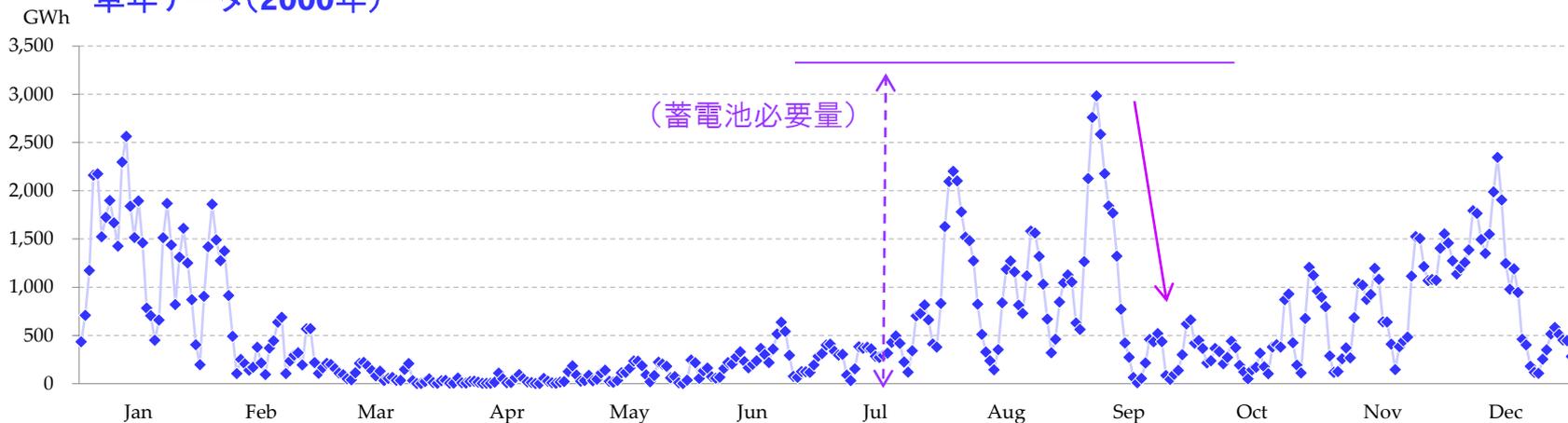


・ 1年のうち1度か2度、風力・太陽光の発電量が極めて小さくなる時期（**無風期間・”Dark doldrums”**と呼ばれる）が生じる。

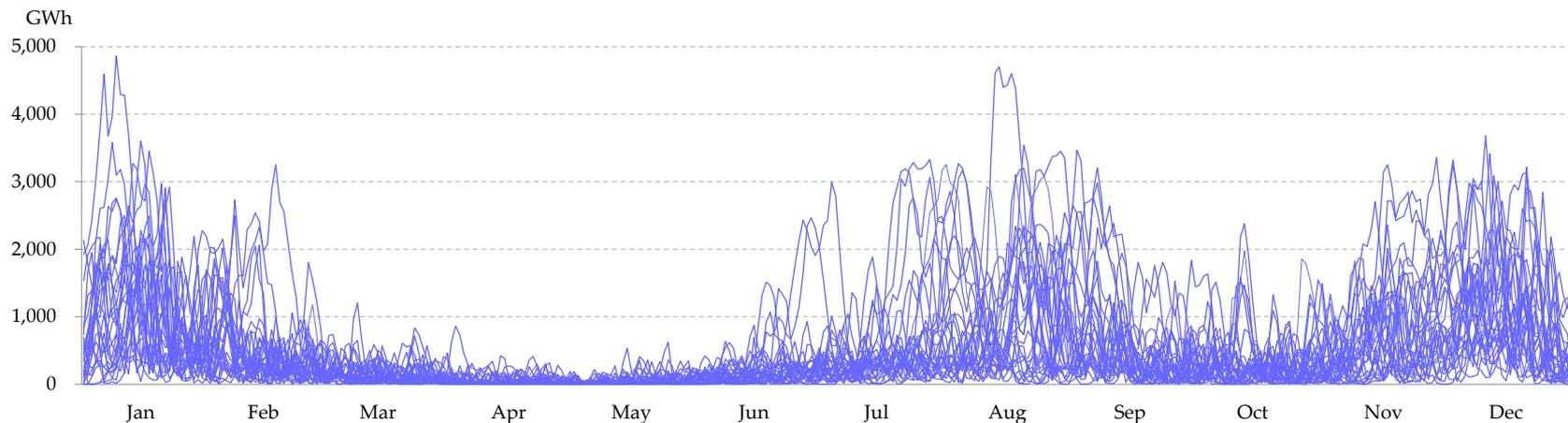
→ この「無風期間」の電力需要を賄うために必要な電力量が、蓄電池の必要量となる。

# 蓄電システムへの貯電量の年間推移

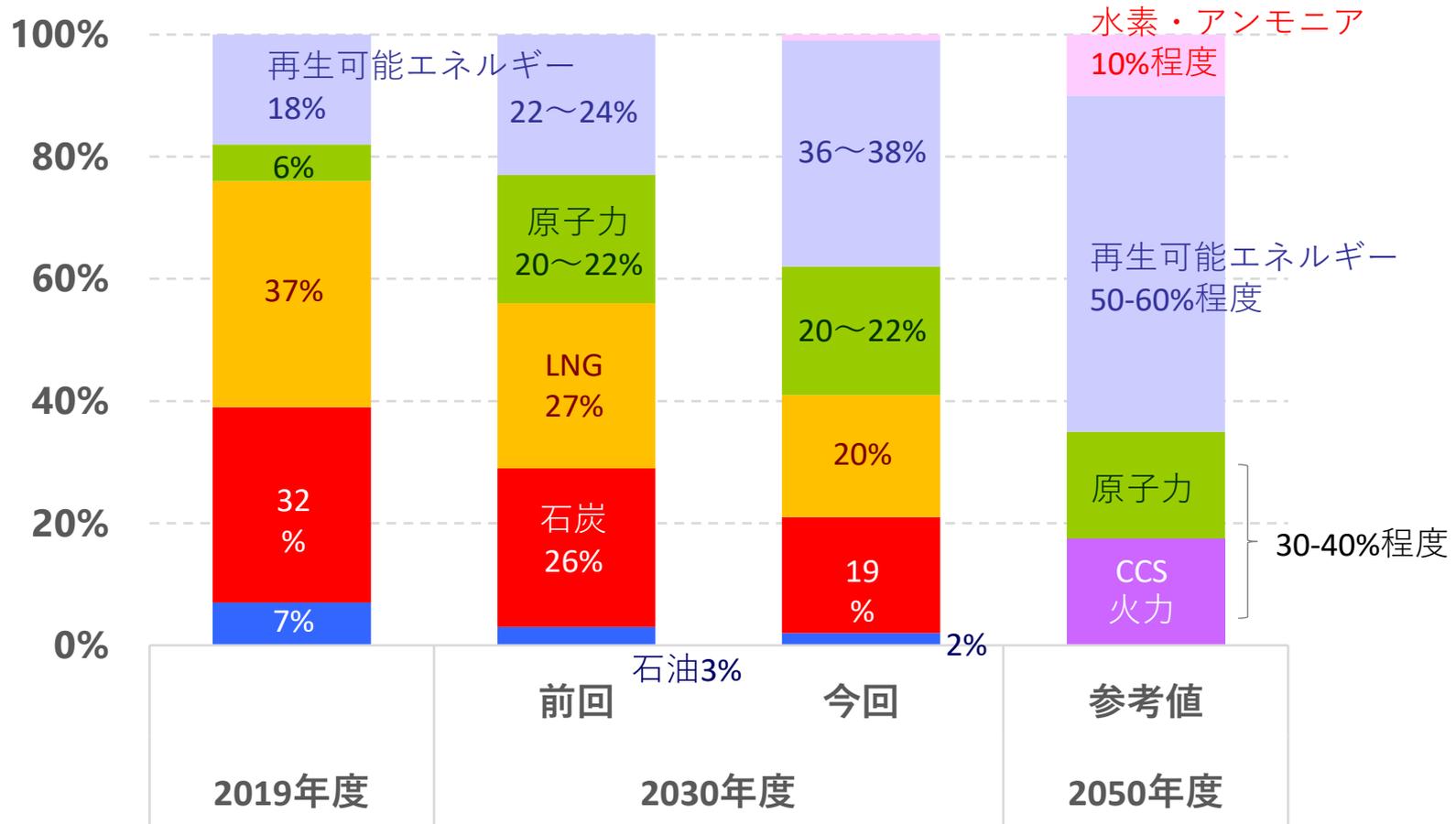
単年データ(2000年)



1990~2017年データ



# 2030年・2050年の電源構成比率（2021年政府試算）



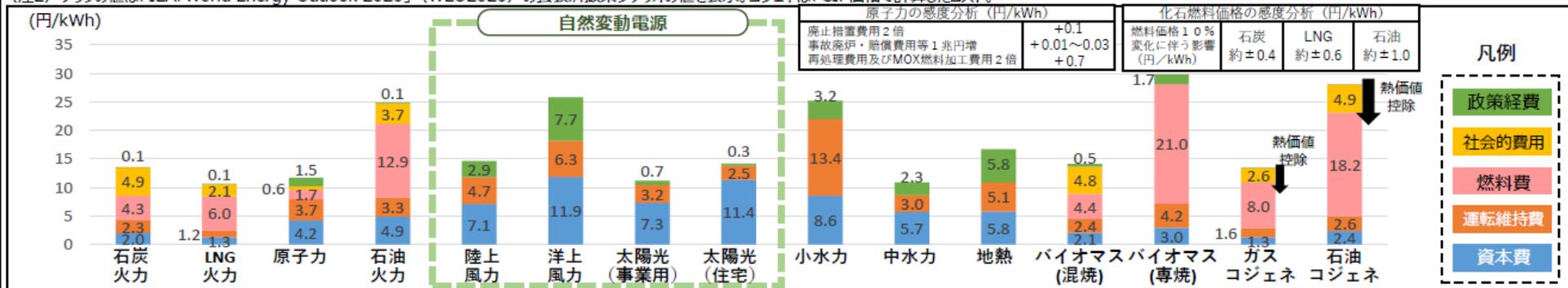
- 2021年に公表された長期エネルギー需給見通しでは、2030年のGHG排出削減目標（46%）に適合するため、**変動性再生可能エネルギー（VRE）**の導入量が大幅に上方修正された。
- この**電源構成を達成するためのコストの評価**は政策決定上極めて重要な情報を提供し得る。

# 均等化発電原価（LCOE）とLCOE\*

（出所）発電コスト検証ワーキンググループ資料（2021）

電源	石炭火力	LNG火力	原子力	石油火力	陸上風力	洋上風力	太陽光（事業用）	太陽光（住宅）	小水力	中水力	地熱	バイオマス（混焼、5%）	バイオマス（専焼）	ガスコジェネ	石油コジェネ
発電コスト(円/kWh) ※( )は政策経費なしの値	13.6～22.4 (13.5～22.3)	10.7～14.3 (10.6～14.2)	11.7～ (10.2～)	24.9～27.6 (24.8～27.5)	9.8～17.2 (8.3～13.6)	25.9 (18.2)	8.2～11.8 (7.8～11.1)	8.7～14.9 (8.5～14.6)	25.2 (22.0)	10.9 (8.7)	16.7 (10.9)	14.1～22.6 (13.7～22.2)	29.8 (28.1)	9.5～10.8 (9.4～10.8)	21.5～25.6 (21.5～25.6)
設備利用率	70%	70%	70%	30%	25.4%	33.2%	17.2%	13.8%	60%	60%	83%	70%	87%	72.3%	36%
稼働年数	40年	40年	40年	40年	25年	25年	25年	25年	40年	40年	40年	40年	40年	30年	30年

（注1）表の値は、今回検証で扱った複数の試算値のうち、上限と下限を表示。将来の燃料価格、CO2対策費、太陽光・風力の導入拡大に伴う機器価格低下などをどう見込むかにより、幅を持った試算としている。例えば、太陽光の場合「2030年に、太陽光パネルの世界の価格水準が著しく低下し、かつ、太陽光パネルの国内価格が世界水準に追いつくほど急激に低下するケース」や「太陽光パネルが劣化して発電量が下がるケース」といった野心的な前提を置いた試算値を含む。  
（注2）グラフの値は、IEA「World Energy Outlook 2020」（WEO2020）の公表政策シナリオの値を表示。コジェネは、CIF価格で計算したコスト。

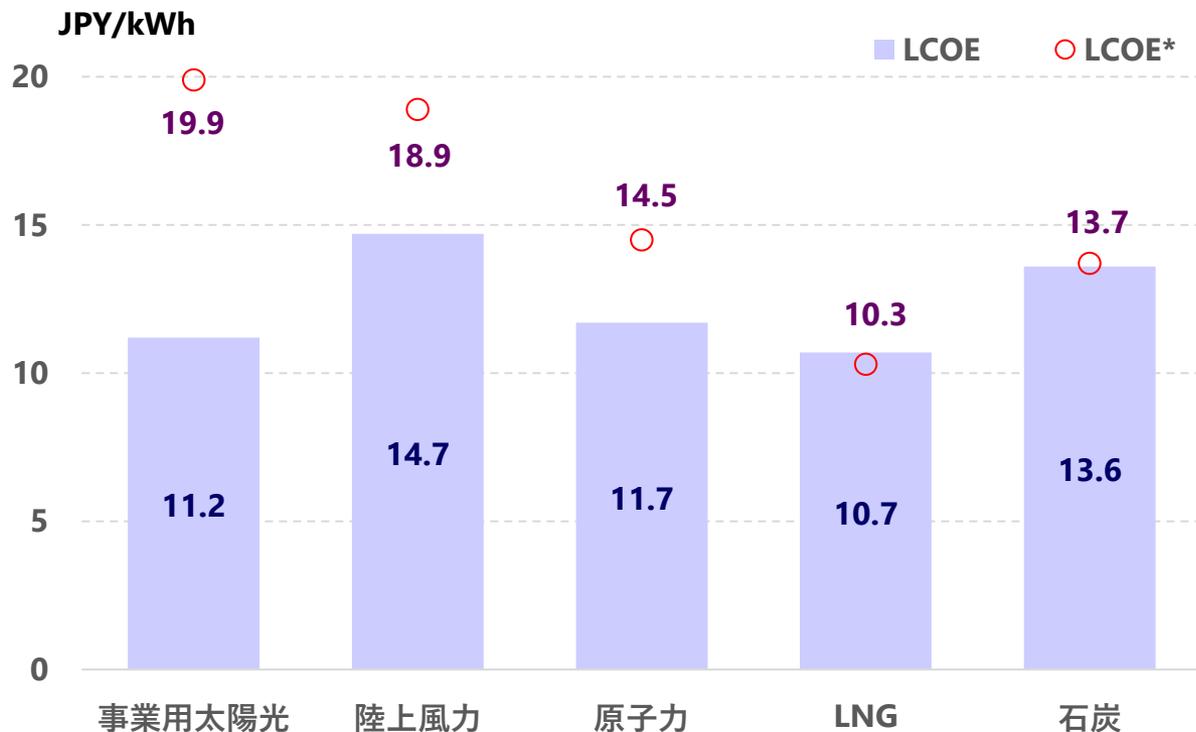


- 電力部門の経済性は従来、いわゆる発電単価 = **均等化発電原価（LCOE）** として評価されてきた（例えば発電コスト検証ワーキンググループ, 2021）。但し、この指標は電力需給の変化に伴うコスト（VRE大量導入時の需給構造の変化など）を評価できない。
- 2015年試算では「系統安定化費用」としてVRE導入時の電力システム全体での追加費用が簡易に計算されたが、電源別の詳細な経済性の評価は行われてこなかった。
- 本研究では電力需給解析の手法を用い、あるエネルギーミックスに対し各種の電源を一定量（限界的に）増加させることにより、**電源別限界コスト（LCOE\*）** として、電力需給構造の変化を反映した経済性評価指標の推計を試みた。

# 2030年の相対限界System LCOE (LCOE\*)

- LCOEの概念を拡張し、**統合費用を考慮した電源別発電単価**の評価を試みる。
- あるエネルギーミックス（例えば2030年政府目標値）を想定し、その中である電源（例えば太陽光発電）の発電量を **$x$  kWh**増加させる。その際、火力発電の発電量が **$x'$  kWh**増加し、電力部門のシステム総費用が **$C$ 円**上昇するとする。
- **$C/x'$  (円/kWh)** を計算することにより、当該電源（太陽光発電）と火力発電の経済性の差を評価することができる。
- 分母として、太陽光発電が増加した量 ( $x$  kWh) ではなく、火力が減少した量 ( $x'$  kWh) を用いることに注意。これにより、出力抑制や電力貯蔵ロス等の効果を正確に測定することができる。

# 解析結果：LCOE\*



- 太陽光・風力・原子力はLFC調整力を出せないと想定しているため、これらを導入した際には、エネルギーミックスの中で石炭火力からLNG火力への代替が生じ、コストが上昇する。
- 太陽光・風力では更に電力ロスの拡大によりLCOE\*が上昇する。
- LNG火力は高い調整力を持ちLCOE\*は低下するが、他方で高い設備利用率では稼働しないため、（設備利用率70%を想定した）LCOE 10.7円/kWhに比べると上昇寄与となり、差し引きでほぼLCOE=LCOE\*となる。

# 統合費用と原子力発電の経済性

- 多くの電源、特にVREについて、**電源別限界費用（LCOE\*）は導入初期には比較的安く、導入が進むにつれ高くなる**。このため、将来VREのLCOEが原子力よりも安くなったとしても、最適点（コスト最小となるエネルギーミックス）においてはVREのLCOE\*は原子力よりも高く、原子力は一定の役割を果たし得る可能性が高い。
- VRE大量導入下において、原子力の役割は**ゼロエミッション電力を安定的に供給し、VREの出力変動による供給途絶リスクに対処し得る**ことにある。このため、VRE比率が高くなるほど原子力発電の経済的価値は上昇する。
- 他方で、柔軟性に乏しい運用を想定した場合、原子力自体のLCOE\*も上昇する。原子力が**電力システムを安定的に運用するためにより大きく貢献**できればLCOE\*が低減し、原子力発電の利用の意義は更に大きくなると考えられる。

# まとめと今後の課題

- 従来用いられてきた均等化発電原価（LCOE）ではVRE大量導入時の電源別の経済性を評価することが不可能であり、新たな評価指標の確立が望まれる。
- 2030年のBrownfield（既設設備が残る電力システム）における評価では、電力需給解析モデルにおいて各電源の発電量を微小に変化させることにより、電源別限界費用（LCOE\*）を算出することができる。
- 電源別限界費用は、調整力の差などによるコスト変化のほか、出力抑制や揚水損失等の電力量の変化に影響される。特に、ある特定の電源（例えばVRE）を大量に導入すると、その電源のLCOE\*が急速に上昇する。このため、バランスのとれたエネルギーミックスを目指すことが政策的に重要となる。
- DR（電気自動車の利用など）やその他の対策を考慮することにより、LCOE\*は大幅に低下し得る。この観点から、今後**VREの大量導入を実現するため必要な対策を特定する**ことは現在の重要な政策課題であると言える。

本資料は、総合資源エネルギー調査会基本政策分科会第34回（2020年12月14日）発表資料「ネットゼロ実現に向けた風力発電・太陽光発電を対象とした大量導入シナリオの検討」を考慮して作成しております。

# カーボンニュートラル実現に向けた 再エネ導入シナリオの検討

電力中央研究所      社会経済研究所

主任研究員      永井 雄宇

上席研究員      朝野 賢司

原子力学会 2022年春の年会

2022年3月18日

 電力中央研究所

# 本資料の構成

---

1. 「再生可能エネルギーのポテンシャルは日本の電力供給量の約2倍」って本当？
2. 2050年までに、再エネ大量導入はどこまで可能なのか？
3. 再エネ導入シナリオの検討を踏まえた示唆

# 本資料の構成

---

1. 「再生可能エネルギーのポテンシャルは日本の電力供給量の約2倍」って本当？
2. 2050年までに、再エネ大量導入はどこまで可能なのか？
3. 再エネ導入シナリオの検討を踏まえた示唆

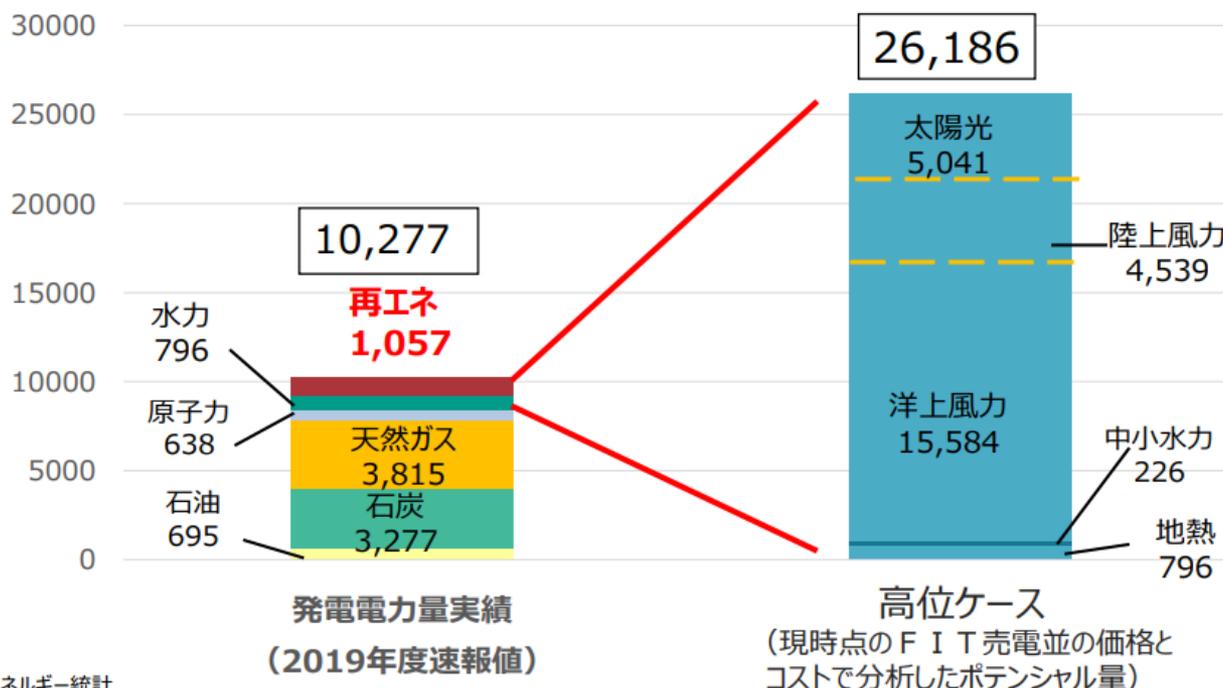
# 環境省：経済性を考慮した再エネポテンシャル評価

再エネポテンシャルは現在の電力供給量の最大2倍



- 環境省試算では、我が国には電力供給量の**最大2倍**の再エネポテンシャルが存在
- 再エネの最大限の導入に向け、課題をクリアしながら、着実に前進していく必要

発電電力量のポテンシャル (億kWh/年)



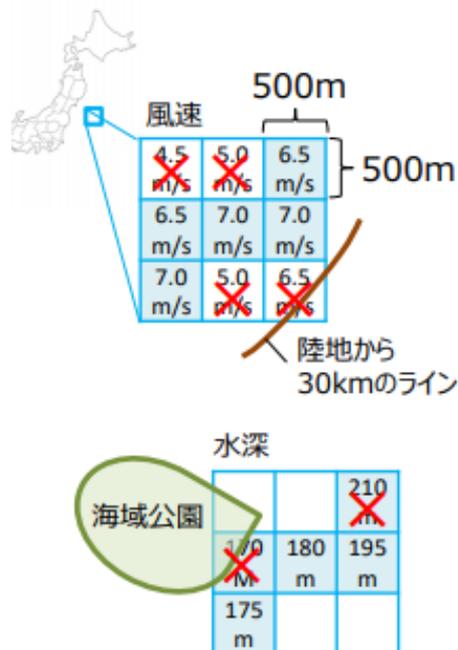
※出典：総合エネルギー統計

※ポテンシャルは、賦存量（面積等から理論的に算出できるエネルギー資源量）から、法令等による制約や事業採算性などを除き環境省算出。導入可能量ではないため、技術や採算性などの課題を克服しながら、ポテンシャルを最大限に活かしていく必要がある。

※この試算以外にも様々な試算あり。

# 洋上風力の「経済性を考慮した導入ポテンシャル」

年間1兆5,584億kWh≒日本の発電電力量の約1.5倍



## 洋上風力発電

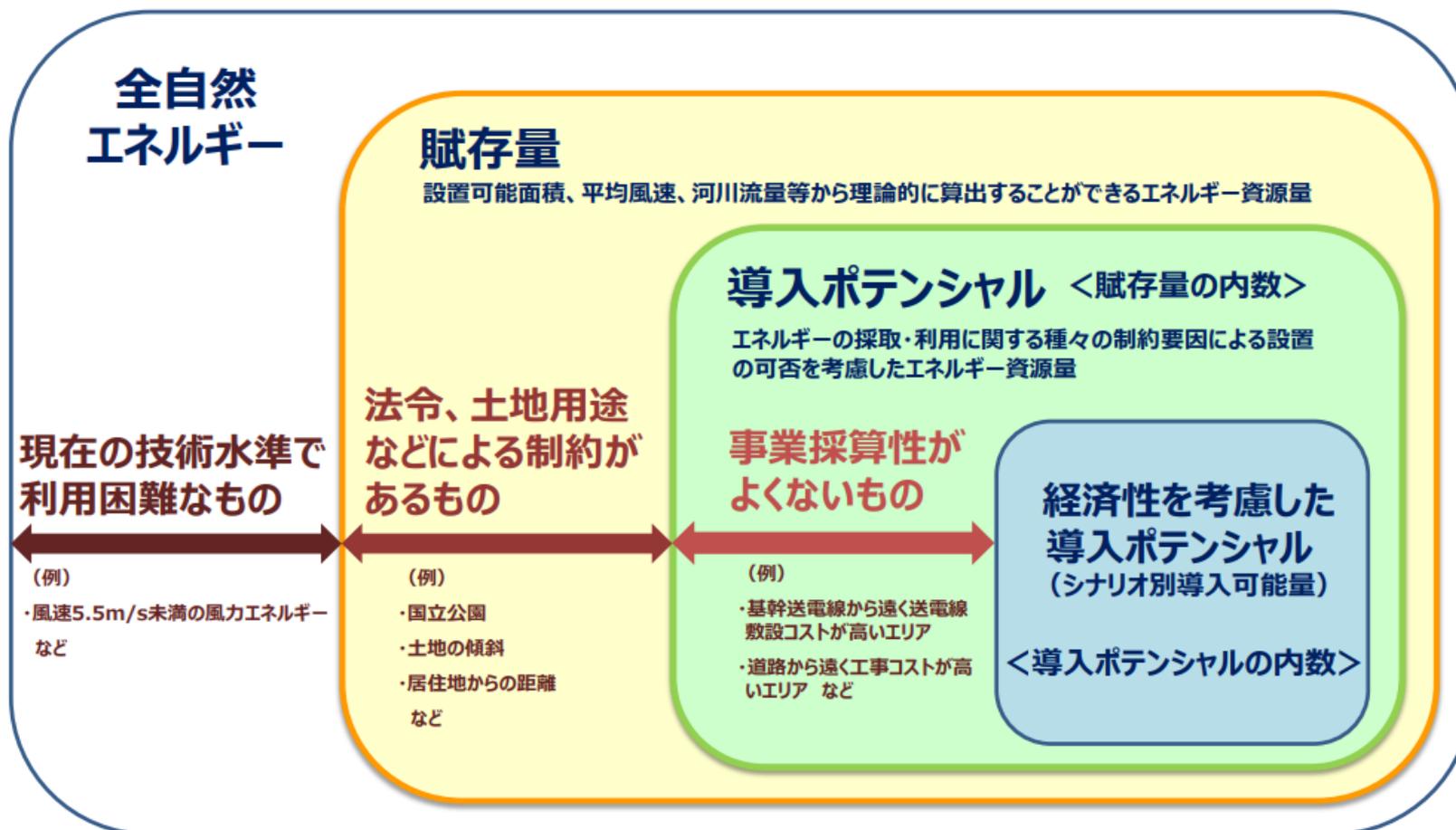
日本近海を500mメッシュ単位で区切り、海面上140mにおける風速が6.5m/s未満のメッシュおよび陸地からの距離が30km以上のメッシュを除く

水深200m以上のメッシュおよび国立・国定公園（海域公園）と重なるメッシュを除き、**設置可能面積**を算出

### 洋上風車が設置可能な海域

- 離岸距離30km以内、風速6.5m/秒、水深200m以上 & 国立公園以外  
⇒導入ポテンシャルは、1,120GW(11億2,022万kW)、3兆4,607億kWh
- 上記の海域の中で、買取価格36円/kWhで事業採算性が成立  
⇒経済性を考慮したポテンシャルは、460GW(4億6,025万kW)、1兆5,584億kWh

# 経済性を考慮した導入ポテンシャルとは？



(考慮されていない要素の例)

- ・系統の空き容量、賦課金による国民負担
- ・将来見通し (再エネコスト、技術革新)
- ・個別の地域事情 (地権者意思、公表不可な希少種生息エリア情報) 等

[出典] 環境省

# GIS（地理情報システム）による 再エネ導入シナリオの検討

地理情報システム（GIS：Geographic Information System）は、地理的位置を手がかりに、位置に関する情報を持ったデータ（空間データ）を総合的に管理・加工し、視覚的に表示し、高度な分析や迅速な判断を可能にする技術

## Q1 太陽光発電と風力発電は今後どのような場所へ設置されるべきか？

→ 土地利用に関わる法規制や条例、環境影響評価を踏まえ、設置に際しての法規制の制約や、受容性が高い地域への導入を定性的に評価・検討



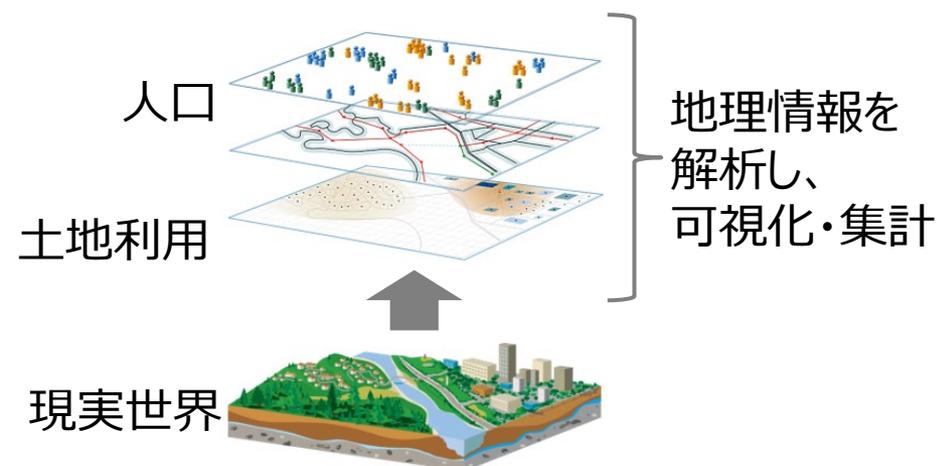
森林法

河川法

農振法・農地法  
etc・・・

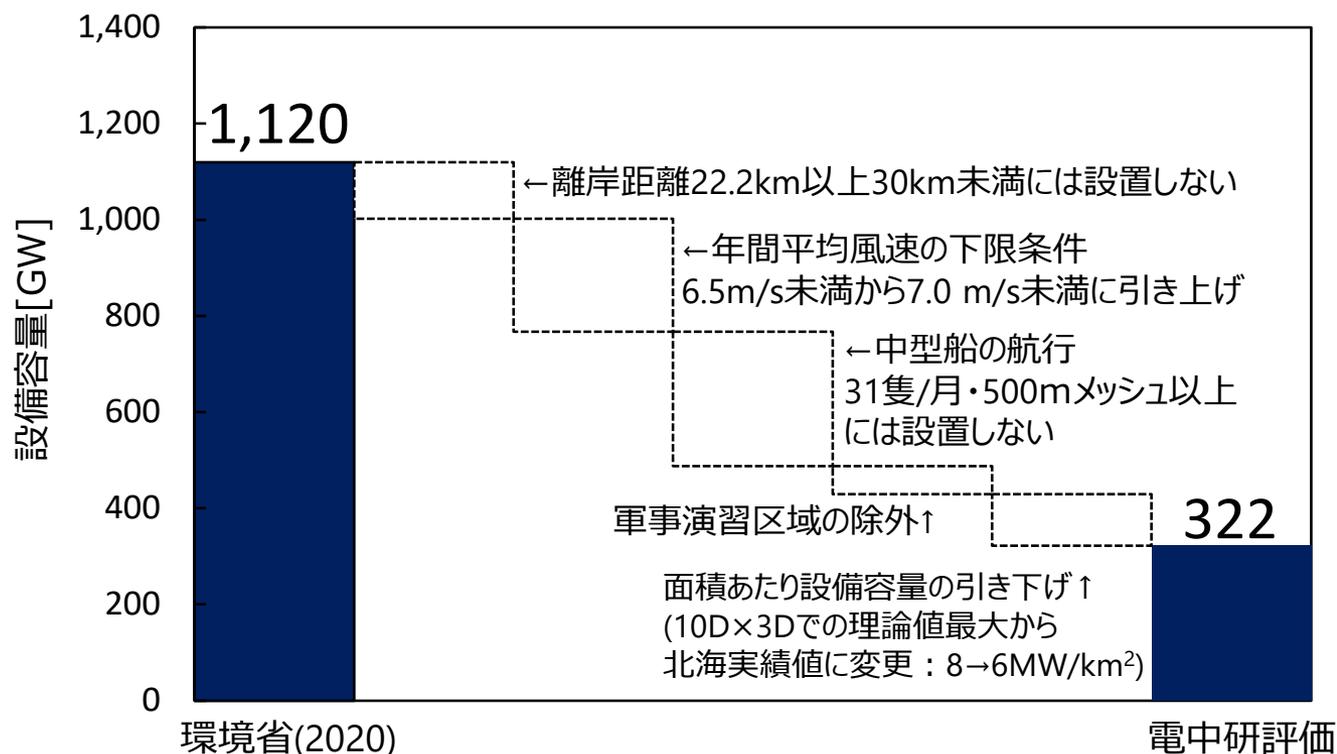
## Q2 導入が推奨される地域において各電源を、誰が、どの程度導入できるか？

→ GISを用いて、法規制、土地利用の状況、日射量や風速などの自然条件等を考慮した上での定量的評価。



# 洋上風力発電の導入ポテンシャル評価

- 環境省(2020)による洋上風力ポテンシャル評価(1,120GW)と比較
- 再エネ海域利用法の各要件（自然条件・航路への支障など）を踏まえ、「促進区域」の対象と想定される海域を抽出し、322GWと評価



[出典] 電中研 研究資料Y19502、朝野・永井・尾羽 (2020)

# 再エネ導入量GIS評価ツール公開による エビデンスベースの議論

- 洋上風力の設置対象となる海域、および同海域に設置可能な洋上風力の設備容量を評価するツールを公開

<https://www.denken-serc.jp/rpg/offshore/>

- 本評価ツールにより、ポテンシャル評価に影響を与える要因の把握が可能
  - ▶ 今後、陸上風力・地上設置型PVについても同様のツール公開を予定

シナリオと  
設置条件  
を選択

## Input

**設置条件選択**

(1) 受容性重視シナリオ

**離岸距離**

10.0 - 22.2 kmには設置しない

**年間平均風速**

9.0 m/s以上には設置しない

8.0 - 9.0 m/sには設置しない

7.0 - 8.0 m/sには設置しない

**水深**

0 - 30 mには設置しない

30 - 50 mには設置しない

50 - 60 mには設置しない

60 - 100 mには設置しない

100 - 200 mには設置しない

**漁業権**

漁業権内には設置しない

**船舶通行量**

0 - 3 隻/月には設置しない

## Output

条件を満たす対象海域/設備容量



面積	設備容量(6.0 MW/km <sup>2</sup> 換算)   <small>北海の実績値(平均)で換算</small>	設備容量(8.0 MW/km <sup>2</sup> 換算)   <small>10D x 3Dで配慮(0-タービン径)</small>
着床式: 890 km <sup>2</sup>	着床式: 5.3 GW	着床式: 7.1 GW
浮体式: 6323 km <sup>2</sup>	浮体式: 37.9 GW	浮体式: 50.6 GW
合計: 7213 km <sup>2</sup>	合計: 43.3 GW	合計: 57.7 GW

# 本資料の構成

---

1. 「再生可能エネルギーのポテンシャルは日本の電力供給量の約2倍」って本当？
2. 2050年までに、再エネ大量導入はどこまで可能なのか？
3. 再エネ導入シナリオの検討を踏まえた示唆

# 再エネ導入ポテンシャルの定義問題と 本発表における受容性重視シナリオ設定の考え方

- 導入ポテンシャルとは、設置可能面積や平均風速等から求められる理論的なエネルギー量から、**自然要因、法規制等の開発不可となる地域を除いて**算出されるエネルギー量。
- 開発不可条件の設定は難しく、各機関で前提が異なるため、試算結果の差異を生む一因。
- これまで電中研では、GIS（地理情報システム）を活用し、地上設置型PV・陸上風力発電と、洋上風力発電の導入ポテンシャル評価を行ってきた。
- 電中研評価の特徴は、近年、再エネ導入にともなう地域住民との紛争の増加を踏まえ、
  - ① **土地利用に関わる法規制**の影響の受けやすさの程度をランク付けした上で、影響を受けにくい地域に優先的に導入されるとしたこと（洋上風力は**再エネ海域利用法**に基づく評価）
  - ② 土地利用用途や住宅数等の2050年までの変化について可能な限り考慮したことにある。
- なお、将来の発電コスト等の経済性や、系統制約を考慮していないため、実際に導入に至るかは別途検討が必要。

## 受容性重視シナリオの考え方

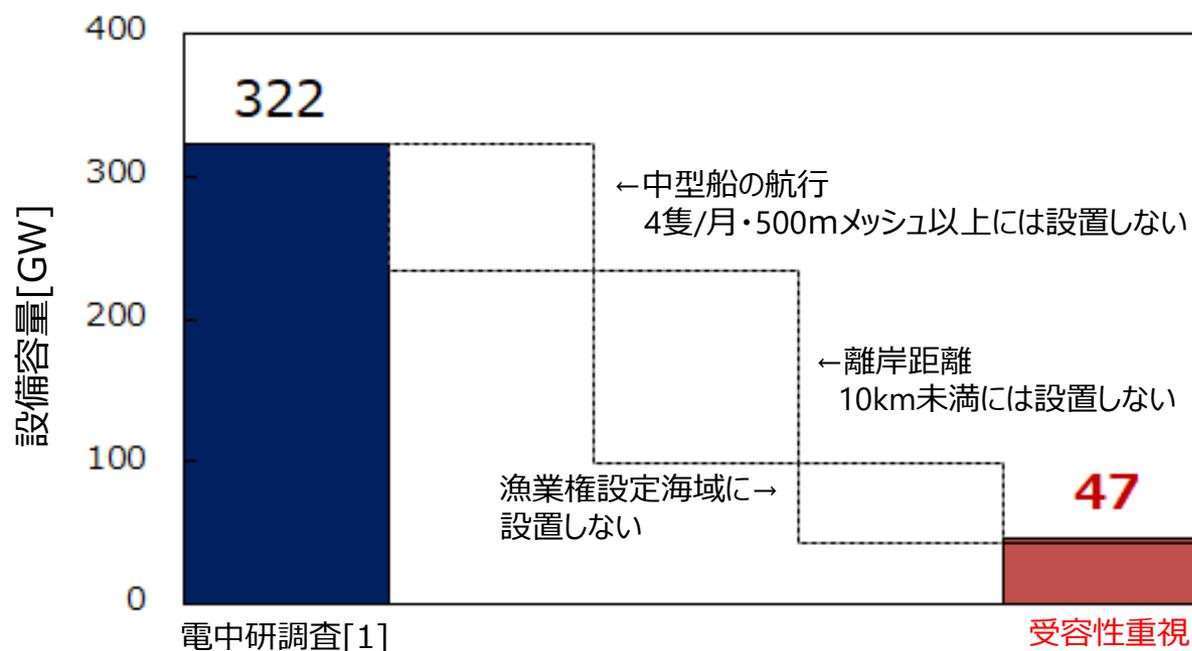
- 地域住民や、農業など他の土地利用と競合をできるだけ避けながら最大限の導入をはかる
- 土地利用・海域利用に関わる法規制の影響を受けにくい場所に、優先的に導入されるように考慮する。
- 実施の方向性が示されている規制緩和（再生困難な荒廃農地での再エネ転用等）は考慮する。
- 同じ土地を異なる再エネが利用し得る場合の土地利用競合を考慮する。
- 土地利用用途や住宅数等の2050年までの変化について可能な限り考慮する。

[出典] 朝野・永井・尾羽 (2020)

# 洋上風力発電の受容性重視シナリオの検討

## シナリオの考え方

- 海域利用法で既に「促進区域」に設定済み、「有望な区域」と「一定の準備段階の海域」の合計設備容量（約4GW）
- 以下条件の海域に設置を避ける想定（約43GW）
  - ✓ 中型船の航行4隻/月・500mメッシュ以上、景観や生態系影響等を踏まえた離岸距離10km未満、漁業権設定海域（H. Obane, et al.(2020)を参考）

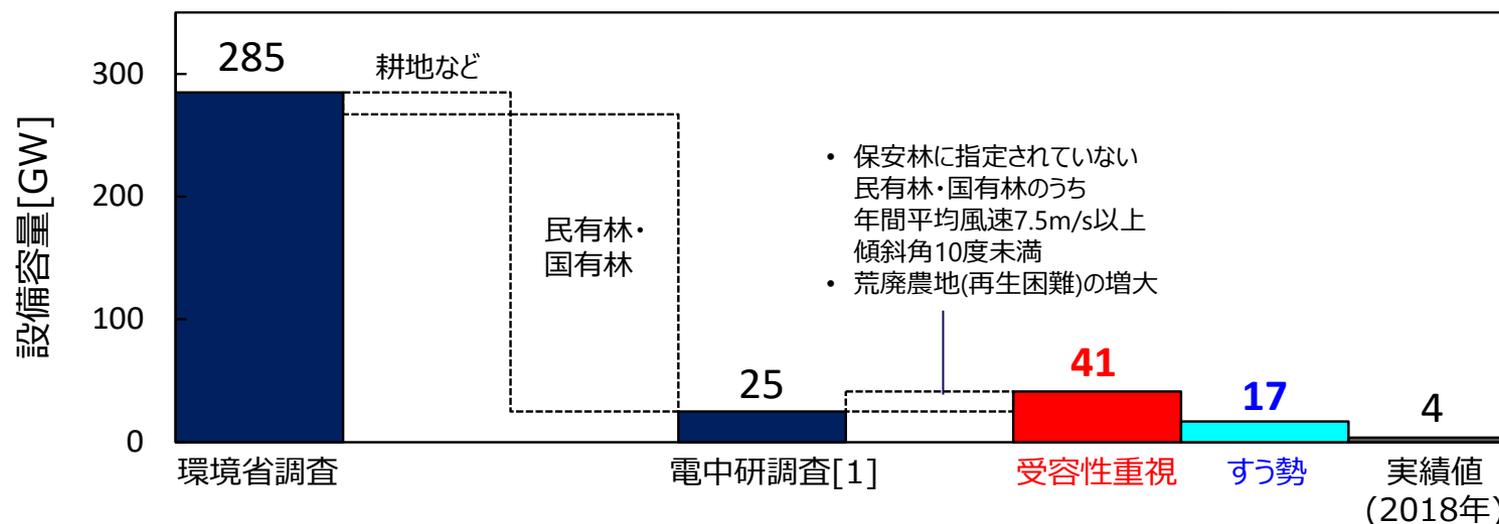


[出典] 朝野・永井・尾羽 (2020)

# 陸上風力の受容性重視シナリオの検討

## シナリオの考え方

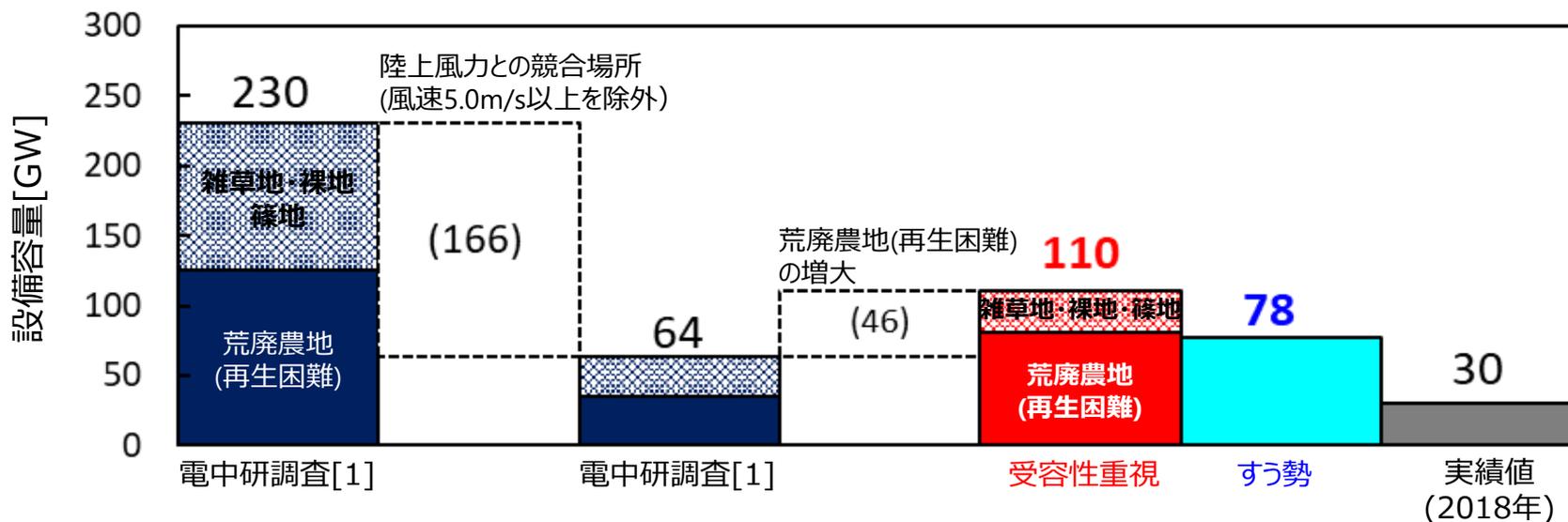
- 森林に設置しない前提のもと、風速5.0m/s以上の雑草地・裸地・篠地・荒廃農地（再生困難）に設置（25GW）
- 国有林における2件の導入実績を基に、保安林に指定されていない民有林・国有林のうち年間平均風速7.5m/s以上、および傾斜角10度未満の場所に設置（10GW）
- 2050年における荒廃農地の増加予測を踏まえ、再生困難な荒廃農地においても設置（6GW）



# 地上設置PVの受容性重視シナリオの検討

## シナリオの考え方

- 2050年にかけての耕地減少（荒廃農地増加）の傾向を織り込む
- 雑草地・裸地・篠地・荒廃農地(再生困難)において、陸上風力との競合を考慮し、風速5.0m/s未満の地域にPVを設置（64GW）
- 陸上風力との競合を考慮し、耕地減少に伴い増加する再生困難な荒廃農地の半分にPVを設置（46GW）



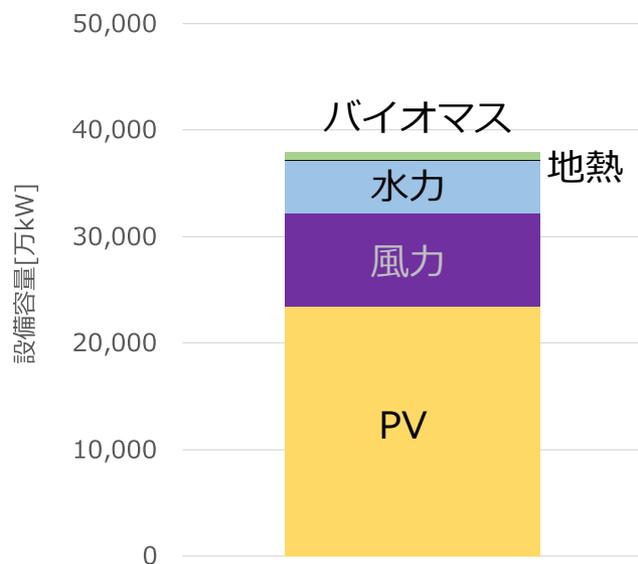
# その他PVの受容性重視シナリオの検討

	シナリオの考え方
戸建住宅 設置型PV (45GW)	<ul style="list-style-type: none"> <li>人口減少に伴い、戸建住宅の総ストック数は2,663万戸(2050年)に減少と推定[10]。</li> <li>2050年における総ストック数の37%にPVを設置する前提。具体的には以下のようにPV設置を想定。 →2030年以前に建設された住宅には後付けでその30%(約700万戸)にPVを設置(現状では、既築戸建へのPV設置が2割に過ぎないこと(8割は新築))。 2031年以降建設の新築の50%に設置し、段階的に導入率を引き上げ、2040年以降は全ての新築住宅にPV設置を想定(2050年時点で、2031年以降建設の新築約8割に設置)。</li> </ul>
集合住宅 設置型PV (17GW)	<ul style="list-style-type: none"> <li>人口減少に伴い、集合住宅は230万棟(2018年)から、200万棟(2050年)に減少すると推定。</li> <li>2050年時点における全集合住宅(200万棟)のうち、52%に相当する103万棟において、20m<sup>2</sup>以上の屋根と南壁面・20m<sup>2</sup>以上の窓にPVが設置される前提。 具体的には、2050年時点に存在する集合住宅のうち、2018年以前に建設された集合住宅の33%、2019～2030年に建設される集合住宅の67%、2030年以降は同住宅の7割から段階的に向上し、2040年以降は全ての新築集合住宅にPVが設置される前提。</li> </ul>
公共系等PV (45GW)	<ul style="list-style-type: none"> <li>一定の空間設備費用を許容する前提のもとで、屋根20m<sup>2</sup>以上・南壁面・窓20m<sup>2</sup>以上にPVを設置する前提。</li> </ul>
営農型PV (16GW)	<ul style="list-style-type: none"> <li>全ての農業経営体(約20万)が、50kWの営農型PVを設置(10GW)</li> <li>全ての再生可能な荒廃農地で営農型PVが導入(営農再開を前提に透過率を確保)(6GW)</li> </ul>

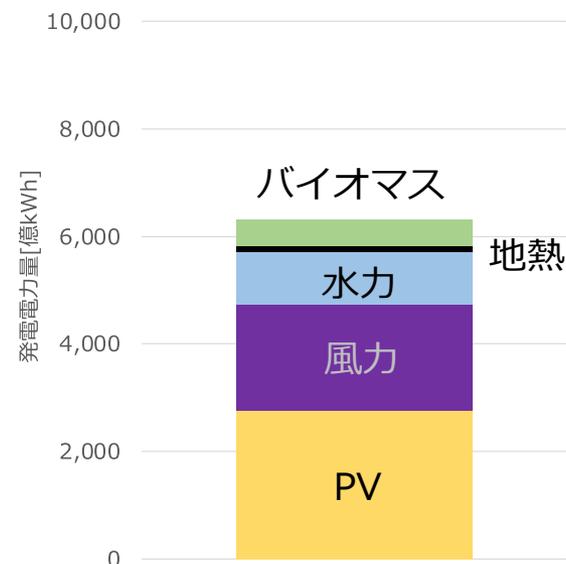
# 再エネの受容性重視シナリオ

- PV・陸上風力・洋上風力についての、2050年における受容性重視シナリオにおける設備容量と、標準的な設備利用率を用いて発電電力量を概算した。
- 水力・地熱・バイオマスについては、現行の長期エネルギー需給見通しの再エネ24%ケースから据え置きとすると、以下となる。

設備容量：約3.8億kW



発電電力量概算：約6,300億kWh



\*この結果は朝野・永井・尾羽 (2020)の一部を見直した数値である

# 本資料の構成

---

1. 「再生可能エネルギーのポテンシャルは日本の電力供給量の約2倍」って本当？
2. 2050年までに、再エネ大量導入はどこまで可能なのか？
3. 再エネ導入シナリオの検討を踏まえた示唆

# 再エネ導入ポテンシャル評価

## 受容性重視シナリオの設定

- ① 土地利用に関わる法規制の影響の受けやすさの程度をランク付けした上で、影響を受けにくい地域に優先的に導入される
- ② 土地利用用途や住宅数等の2050年までの変化について可能な限り考慮

受容性重視シナリオの2050年の再生可能エネルギー導入量は:

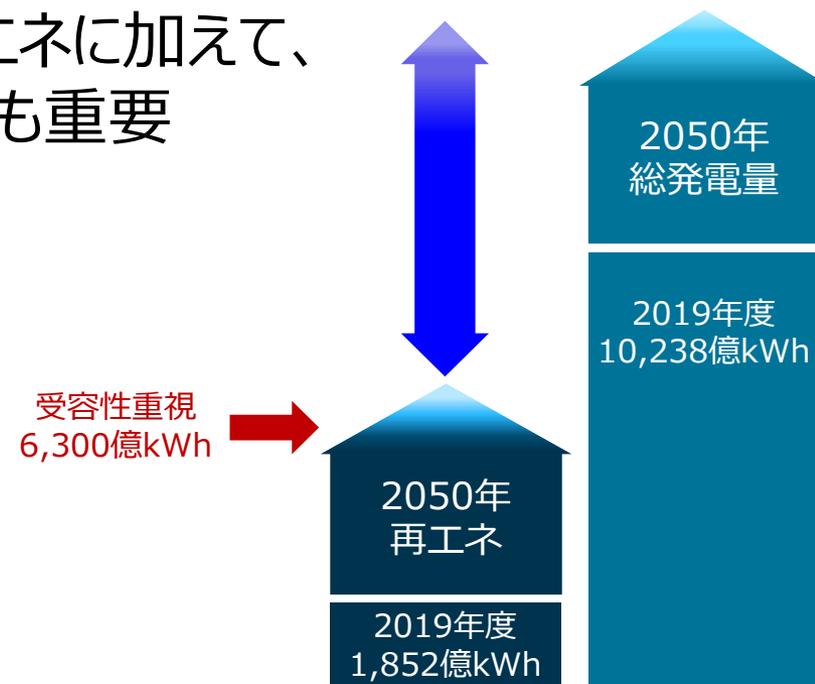
- 設備容量：約3.8億kW
- 発電電力量：約6,300億kWh

カーボンニュートラル = 再エネ100%ではない

⇒再エネ・原子力の既存技術のみならず、蓄電池・水素・CCS・ネガティブ排出技術の技術進歩を踏まえ、各技術の組み合わせの中で、費用最小化を目指す

# 導入シナリオ検討からの示唆

- 再エネの主力電源化に向けては、漁業への配慮や景観等**立地地域における理解も重要**
  - 北海道・東北・九州等を中心に、PV・風力のポテンシャルは偏在。また、シナリオの検討では**系統制約**を考慮しておらず、数値の実現には、この課題克服が必要
  - 電力部門の脱炭素化のためには、再エネに加えて、**その他のエネルギー供給源・技術開発も重要**
- 当所では、GISに基づく研究成果の蓄積を踏まえて、Web上でユーザーが任意の条件を設定することで、再エネ導入量が変化するツールの公開を進めているところ。専門家・政策決定者等において、導入量に影響を与える要因の共通理解が進むことで、再エネ導入や設備形成に関する議論が深まることを期待



# 持続発展社会に寄与する原子力

\* 再エネとの共存とSDGsへの貢献 \*

2022年3月18日

地球環境問題対応検討・提言分科会

駒野 康男

# 持続発展社会に寄与する原子力

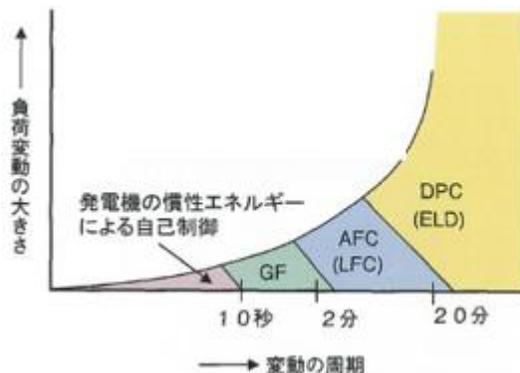
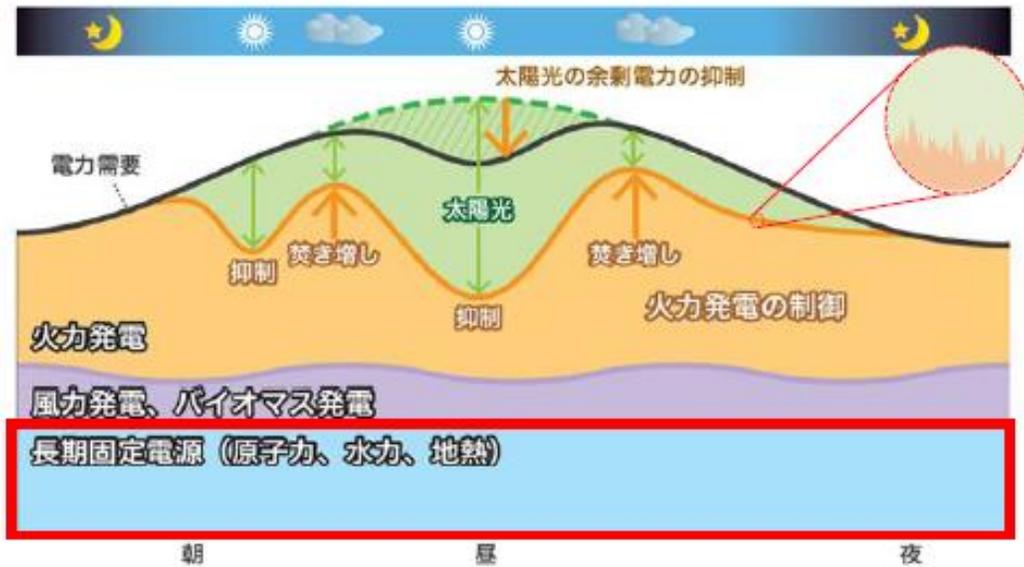
原子力は、**安定性・レジリエンスに強く、経済性・エネルギーセキュリティに優れ、カーボンフリー社会へも大きく貢献**

- ◆ **資源枯渇の心配なく、22世紀以降も持続可能となるカーボンフリー基幹電源  
(高速炉＋燃料リサイクル)**
- ◆ **出力調整機能(負荷追従運転、周波数制御)により、再エネと共存性が高い⇒本報告**
- ◆ **電力分野以外でのカーボンフリーへの寄与⇒本報告**
  - ・熱利用
  - ・水素製造(電気分解、高温ガス利用)
  - ・水素還元製鉄
- ◆ **原子力(放射線)技術は、医療分野、半導体製造等産業分野、農業分野、宇宙開発利用等 社会への貢献する重要な技術**

原子力はSDGs(今以上に豊かな暮らしを持続できる世界の実現)に貢献⇒本報告

# 出力調整機能の活用により可変再エネと共存

電力需要バランス調整の例



◆原子力は燃料費が安いいため、現状は、経済性の観点より、国内ではベースロード運転を実施。

◆再エネの変動対応には、現状、火力発電や揚力発電利用により対応。再エネ増大で、CNを目指すには、蓄電等の対応が必要で、コストが増大。



◆原子力は、燃料量は固定で、中性子束を変化させるだけで、出力調整が可能であり、ガス火力並の早い出力調整機能(GF、AFC、負荷追従運転)を持たせることは可能。

# 既設国内原子力の出力調整実績

◆PWRの原子炉制御系は、次の負荷変化に対して原子炉トリップすることなく、新しい負荷状態に安定に追従できるよう設計。試運転時、その能力を確認。

- ① ±10%ステップ状負荷変化（定格出力の15%から100%の範囲）
- ② ±5%/分ランプ状負荷変化（定格出力の15%から100%の範囲）
- ③ 大幅なステップ状負荷急減（50～95%負荷急減）

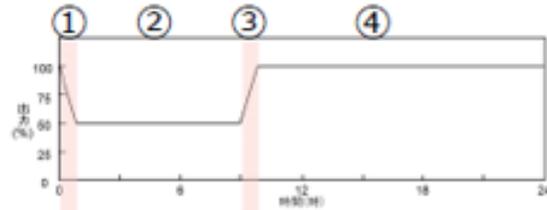
◆国内での出力調整運転実績

- ①日間負荷追従運転@1987年及び1988年：伊方2号機のBOC及びEOC  
12h(100%)-3h-6h(50%)-3hの実証試験実施
- ②AFC/GF運転@1984年及び1985年：美浜3号機  
出力変動幅約3%、AFC単独、GF単独、AFCとGFの重合せの実証試験実施

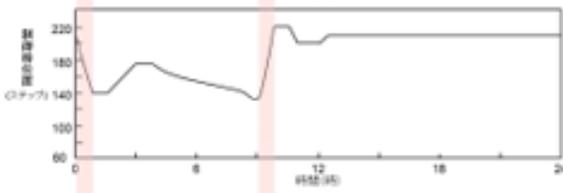
# 原子力の出力調整運転例とその高度化策

14h(100%)-1h-8h(50%)-1h運転

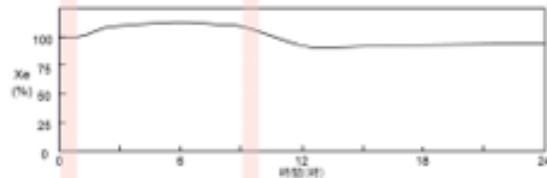
出力



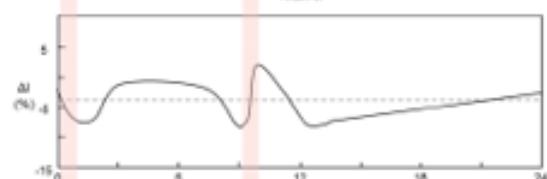
バンクD  
制御棒位置



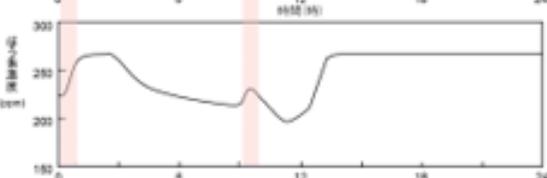
Xe濃度



軸方向出力  
分布偏差



ほう素濃度



- ◆既設国内プラントでも、約1%/分の負荷変動の対応は可能
- ◆ただし、出力変化やそれに伴うXe濃度の変化対応は、制御棒とほう素濃度の調整によるため、EOCでは早い負荷変化が難しい。



以下の対応により、さらに、高い出力調整能力(ガス火力並)をもたせた対応は可能

- ・グレイ制御棒等 弱吸収制御棒の設置
- ・制御棒を反応度制御と軸方向分制御に機能分したグループ構成
- ・軸方向出力制御方式(CAOC幅の拡大等)の変更
- ・ほう素濃度の自動制御
- ・負荷追従にマッチした温度制御 等

◆上記は、既設プラントの改造でできないことはないが、今後の既設の寿命を考えると、早期に、出力調整能力の高い新設プラントの建設の開始が、再エネとの共存を図ったCN社会構築には必要

# 仏・原子力の出力調整運転例



(出典) IAEA 2021 Nuclear Energy for a Net Zero World より抜粋

◆フランスでは、原子力が電源構成比の70%程度であり、多数のプラントが出力調整運転を実施

◆設備対応:

- 負荷追従用にグレイロッド\*を設置
- ほう素濃度の濃縮／希釈は自動制御 等

\* ) 中性子吸収能力の低い制御棒を一部に配置し、制御棒の挿入／引抜に伴う炉内軸方向出力分布の歪を緩和

◆EU全体で太陽光発電が比率が増加し、従来の夜中だけでなく、日中に出力を下げるような負荷追従運転も実施。



**CN電源である再エネと原子力の共存を実証**

# CNに向けた原子力の各種利用

CNに向け、原子力の各種利用の検討⇒社会への実装に期待

- ◆炉出力を一定として、需要に合わせて電気出力と熱(熱供給/利用や蓄熱)に振り分ける案
- ◆水素製造(次ページ)や水素還元製鉄に利用する案
- ◆SMR(固有の安全性向上、建設費/期間削減等)を活用した例
  - 複数のモジュール炉を活用した出力調整例
  - SMRと再エネの組合せの「ハイブリッド・カーボンフリー発電」  
など

**CN実現には、電力の他、燃料の脱炭素化も必要⇒クリーンな水素製造・供給が有力**  
**再エネによる水素と、原子炉電力/熱を利用した水素は相互に補完しあいながら、安定した水素サプライチェーン実現に貢献**

原子力によるカーボンニュートラル水素の製造方法

- ◆ クリーンな**水素製造**に**再エネの活用**が検討されているが、**日本の場合、下記の点で不利**。
  - 日本は日射量・設置土地面積などの自然条件の制約により、**国内でのグリーン水素製造はコスト的・量的に厳しい**。
  - 海外からの**水素の輸入にパイプラインが使えない**ため、**液体水素・有機媒体利用・アンモニア**などの方法による船舶輸送になり、これも**エネルギー効率やコストが悪化**。
- ◆ **CN実現に向け、原子力は発電だけでなく、熱利用や水素製造(右表)に活用することが望ましい**。

水素製造方法	原料	供給原子力エネルギー		製造プロセス(代表的)
		エネルギー形態	原子炉(代表的)	
電気分解法	水	電気	軽水炉	アルカリ水電解 固体高分子膜
高温水蒸気 電気分解法	水	電気+熱	高温ガス炉 Na炉・熔融塩炉	固体酸化物電解 (高温・中温)
熱化学法	水	熱	高温ガス炉	高温プロセス ISプロセス
原子力加熱 化石燃料 水蒸気改質法	天然ガス + 水 - CO2分離回収	熱	高温ガス炉 Na炉・熔融塩炉	高温プロセス 中温プロセス 透過膜改質
原子力加熱 バイオマス 水蒸気ガス化法	バイオマス + 水	熱	高温ガス炉	高温プロセス CNの合成ガス [H <sub>2</sub> +CO]利用

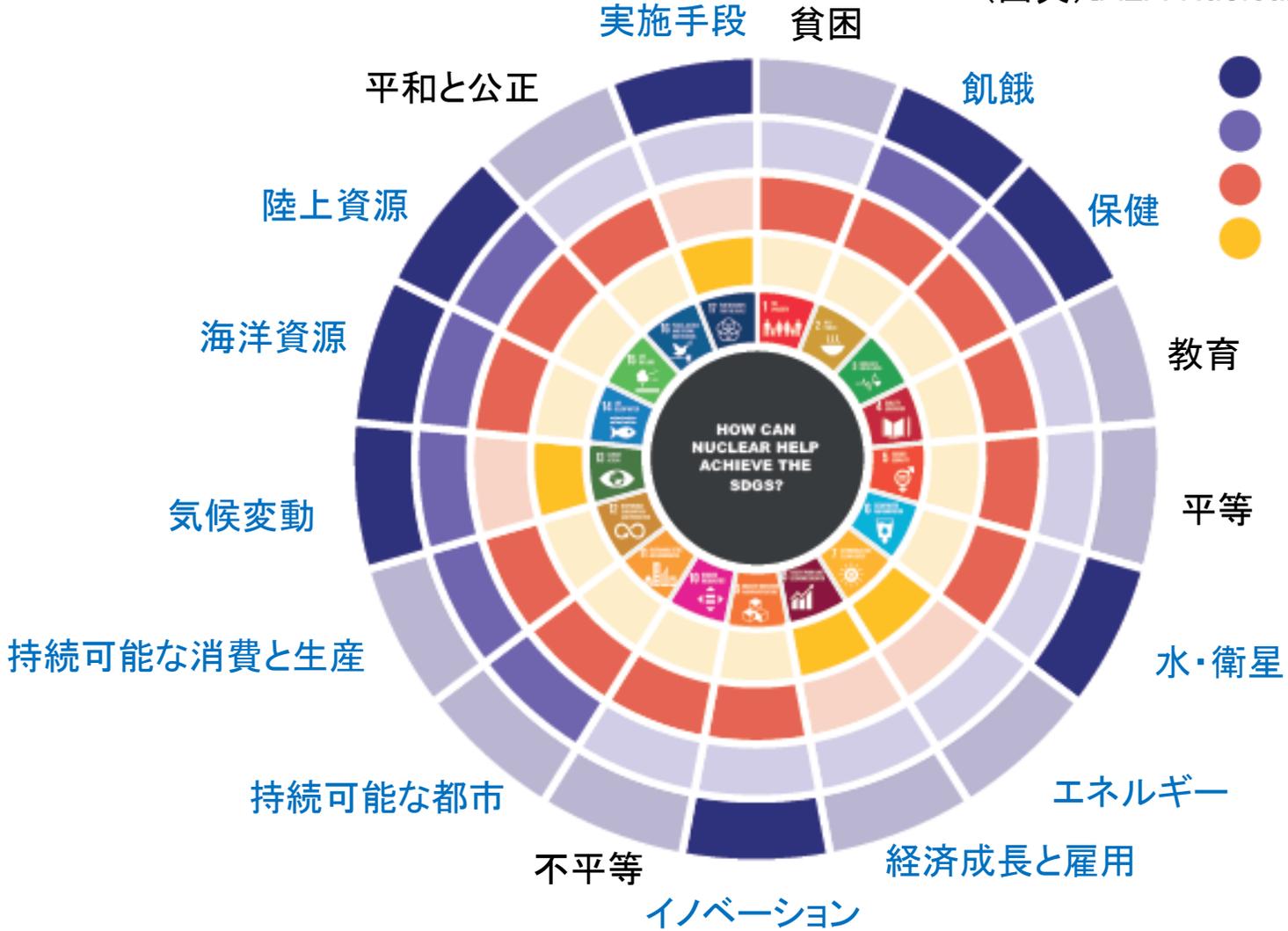
原子力はエネルギー利用だけでなく、医療・工業・農業等に貢献し、  
**SDGsに大きく貢献⇒原子力の理解促進に向け、発信が必要**

-  目標1(貧困)
-  目標2(飢餓) 土壌の肥沃度改善と作物の品種改良、害虫の不妊化
-  目標3(保健) 診断、がん治療、放射性医薬品(PET、骨シンチ等)供給
-  目標4(教育)
-  目標5(平等)
-  目標6(水・衛生) 淡水化、効率的な水管理
-  目標7(エネルギー) 安価かつ信頼できる持続可能なエネルギーの提供
-  目標8(経済成長と雇用) 経済成長(半導体加工、ラジアルタイヤ製造等産業利用)に寄与、魅力ある雇用
-  目標9(イノベーション) レジリエントなインフラ構築、技術革新
-  目標10(不平等)
-  目標11(持続可能な都市) 持続可能な都市計画に活用(橋梁検査、多目的利用:エネルギー/医療最先端都市構想)
-  目標12(持続可能な消費と生産) 天然資源節約、新資源の創出
-  目標13(気候変動) CO<sub>2</sub>削減による温暖化防止、大気汚染防止
-  目標14(海洋資源) 海洋の環境影響調査、海洋資源のサーチに寄与
-  目標15(陸上資源) 森林の持続可能/砂漠化への対処
-  目標16(平和と公正)
-  目標17(実施手段): グローバル・パートナーシップの活性化、IAEA加盟国: 171か国

多くの団体や企業がSDGsに取り組。  
学校教育でも取り入れられSDGs認知度上昇  
⇒原子力の貢献を発信すべき

# IAEA: 原子力のSDGsに対する貢献

(出典) IAEA Nuclear Energy Net Zero World 2021に加筆して作成



- 原子力技術が貢献
- 原子力エネルギーが優位性を発揮
- 原子力エネルギーが間接的貢献
- 原子力エネルギーが直接的貢献

◆ IAEAのレポートでは、  
原子力は間接的貢献を含めると  
全ての目標に対して貢献

# 結言

- ◆ CN社会実現には、再エネと出力調整能力を活用した原子力の共存が、技術見通しや経済性やエネルギーセキュリティを考慮すると、最も優れた手段である。
- ◆ 現状の既設原子力プラントでもある程度の出力調整運転は可能であるが、再エネが大量に導入された場合の変動対応を考慮すると、早期に出力調整能力の高い新設プラントの建設を開始することが必要である。また、柔軟な運転が可能な電源に報酬を与えられるよう、電力市場設計に盛り込むことが必要である。
- ◆ 原子力は、発電以外の分野のCNにも寄与(熱利用や、水素や水素化合物製造等)も期待され、各種開発を実施していくべきである。
- ◆ 原子力はエネルギー利用だけでなく、医療・工業・農業等に貢献し、SDGsに大きく貢献⇒原子力の理解促進に向け発信が必要

# (補足)出力調整運転実施に向けての課題

## 1)運用

- ◆適切なタイミングでの手動でのほう素濃度調整⇒自動化(開発済み)
- ◆EOCでのほう素の希釈には時間を要し、出力変動幅や速さに制限有⇒複数プラントでの運用、または高度化の改良要
- ◆摩耗・疲労等の機器耐力への配慮が必要。←設計上は考慮しており実質問題なし

## 2)規制

- ◆機器耐力上問題ないこと、安全解析の初期条件がカバーされていること等の説明要
- ◆高度化改造をすれば、その認可要

## 3)コスト

- ◆柔軟な運転に対する報酬が与えられる制度の充実(需給調整市場)

## 4)社会的受容

- ◆同炉型での海外での実績、NRA認可、出力調整のCNでの重要性等からの理解推進