
日本学術会議 公開シンポジウム「2050年カーボンニュートラル実現に向けたエネルギーシナリオ」、オンライン開催、2022年4月1日(金)

カーボンニュートラル実現に向けた エネルギー・電力システム

東京大学大学院工学系研究科
准教授 小宮山 涼一



THE UNIVERSITY OF TOKYO

日本のエネルギー問題

● 化石燃料中心のエネルギー供給、世界有数のエネルギー消費国

- ・ 比率(2020年) 石油:38%、石炭:27%、ガス:22%、原子力:2%、再エネ:11% (化石燃料:87%)
- ・ 一次エネルギー消費:世界5位、石油消費:世界5位、石油輸入:世界4位、LNG輸入:世界1位、石炭輸入:世界2位

● 極めて低いエネルギー自給率、高止まりするエネルギー輸入依存度・中東依存度

- ・ エネルギー自給率は12%、化石資源はほぼ全量を輸入、原油輸入の約9割(89.6%)を中東に依存(2019年度)

● 国際エネルギー情勢の構造的変化

- ・ 中国やインド等のエネルギー需要の増大、地政学的リスクの顕在化、エネルギー価格の高騰、エネルギー資源の獲得競争

● 環境制約と持続可能性への対応

- ・ 2030年度の温室効果ガス排出量46%削減(2013年度比)、2050年ネットゼロ

● 再生可能エネルギー大量導入への対応

- ・ 調整力・送配電容量・系統安定性の確保、FIT賦課金の上昇、再エネとの共生

● 自然災害等によるエネルギー安定供給への影響

- ・ 地震、大雨、洪水、台風等の自然災害や不測の事態によるエネルギー供給支障(停電等)の顕在化

● 産業競争力の強化、経済成長の実現

カーボンニュートラル実現に向けた重要な視点

S+3E+R (Safety + Energy security, Economic efficiency, Environment + Resilience)

安全

Safety

安全性に配慮したエネルギー供給

安定供給

Energy security

安定的に必要な十分なエネルギー量の確保

経済性

Economic efficiency

経済合理的な価格でのエネルギー調達

環境適合性

Environmental compatibility

地球環境や大気汚染に配慮したエネルギーの確保

レジリエンス

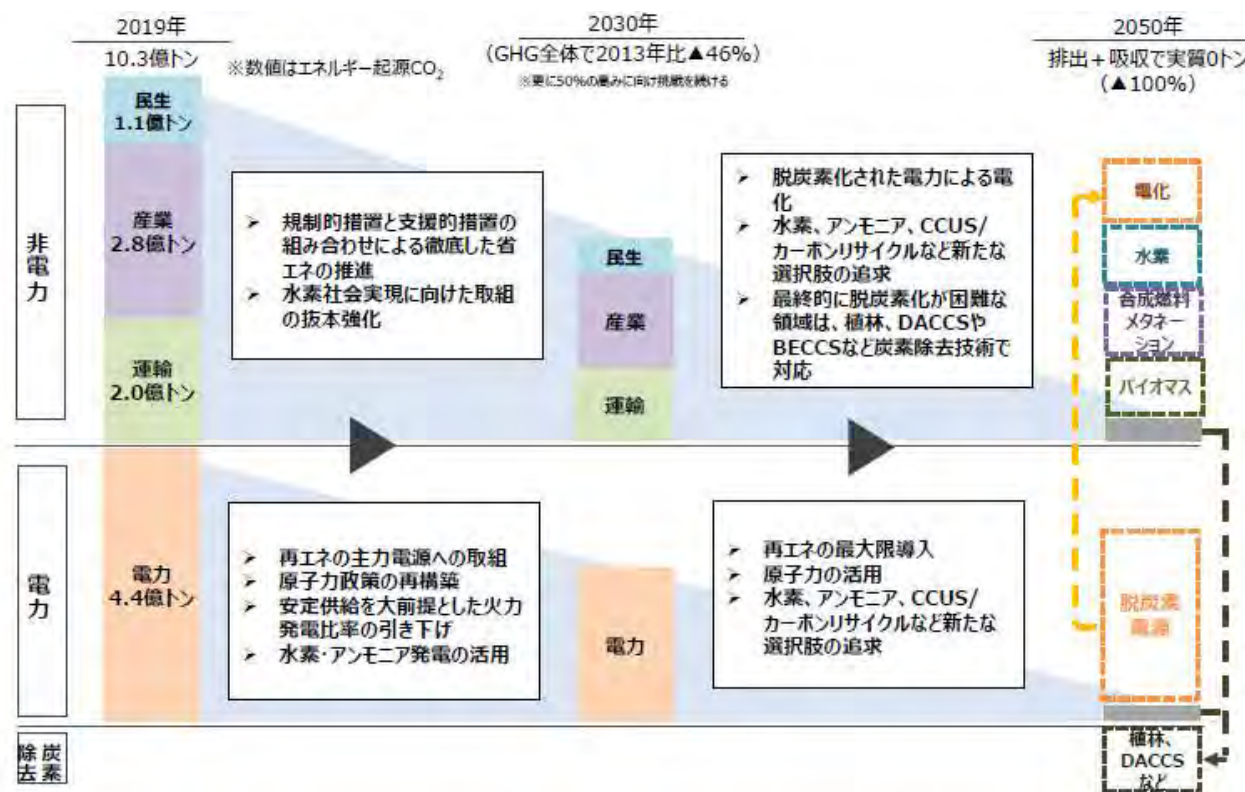
Resilience

災害等によるエネルギー供給支障時からの迅速な復旧

S+3E+Rを同時達成する決定打となるエネルギー源は今だ存在しない
→各資源、技術の長所・短所を踏まえたエネルギー・ベストミックスが重要な視点

2050年までのカーボンニュートラル(CN: Carbon Neutrality)

- 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>>

カーボンニュートラル実現の選択肢

省エネルギー

徹底した省エネの追求(機器効率向上、デジタル技術によるエネルギー管理)

運輸部門の脱炭素化

車の電動化等(EV、FCV)、船舶・貨物車・航空等(水素・アンモニア、バイオ燃料、合成燃料)

電力部門の脱炭素化

再エネ主力電源化、原子力、火力(水素・アンモニア、CCUS)、分散型リソース活用(DER、NWA)

多様な技術の
総動員が不可欠

民生部門(業務、家庭)の脱炭素化

住宅・建築物ゼロエミ化(断熱、ZEH・ZEB)、デジタル化(BEMS、HEMS)、燃料脱炭素化(合成燃料)

産業部門の脱炭素化

燃料や製造工程(鉄鋼、化学工業など)の脱炭素化(水素、合成燃料、CCUS、電化)

炭素除去技術(CDR*)

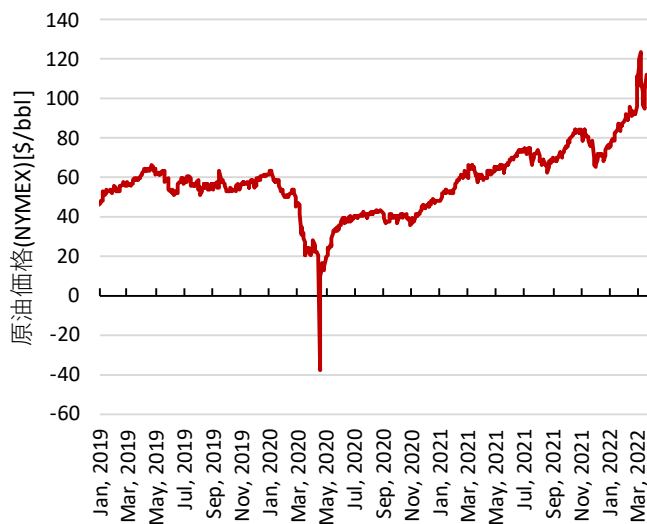
吸収源の拡大(植林等)、ネガティブエミッション技術(BECCS、DACCS)

*CDR(Carbon Dioxide Removal)

エネルギー安全保障

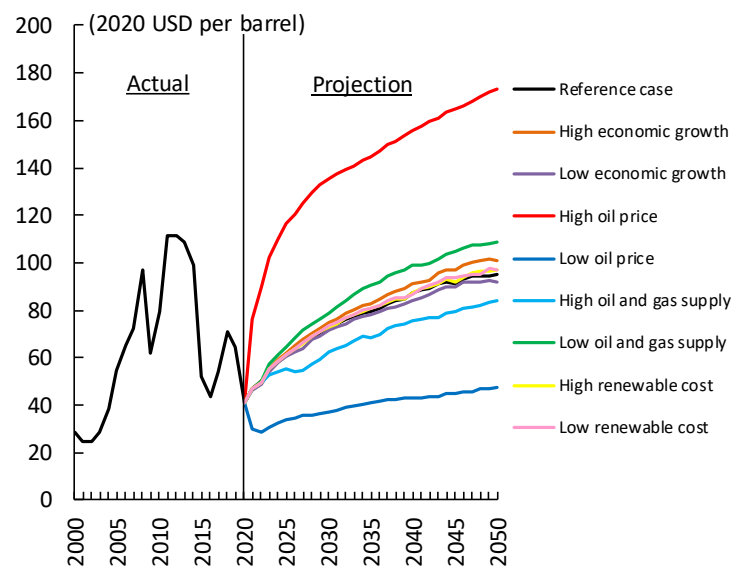
- 原油価格はこれまで大きく変動、今後の推移も不確実性が高い(地政学的リスク等)
- 欧州：ウクライナ情勢をめぐる地政学的リスクの顕在化、エネルギー危機の深刻化
 - ・「REPowerEU」計画(2022年3月)：省エネ推進、再エネ普及拡大、ガス調達源の分散化によるロシア依存低減
- CNへの移行過程(トランジション)では依然、化石燃料に依存→化石燃料の資源開発、インフラへの投資の確保、エネルギー調達リスクへの対応など、エネルギー安全保障問題への対策強化は重要な課題

原油価格(NYMEX)の推移



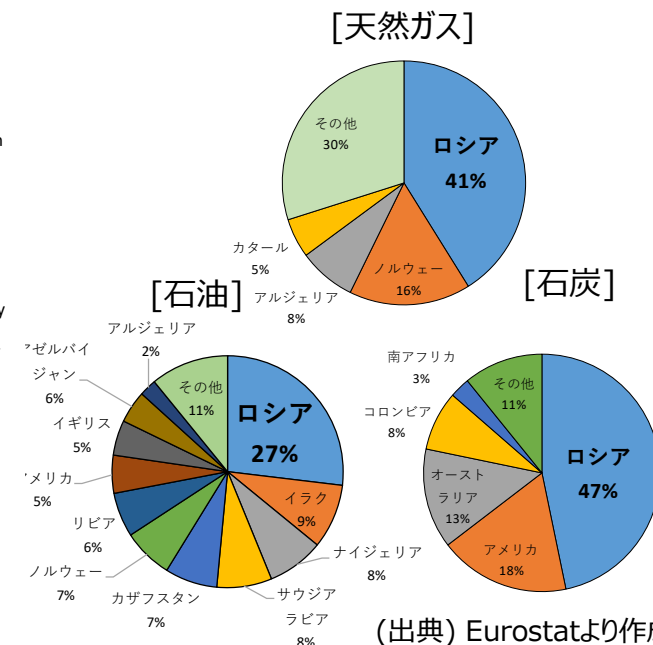
(出典) 米国エネルギー省(EIA/DOE)統計データより作成

原油価格(ブレント原油)の展望



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

欧州の国別輸入比率(2019年)



(出典) Eurostatより作成

エネルギー安全保障

カーボンニュートラル時代のエネルギー安全保障のあり方に関する検討が重要

- **エネルギー自給率の向上**

- ・ 国内エネルギー生産の強化、再生可能エネルギーや原子力エネルギーの導入・維持

- **エネルギー資源調達時のリスクの低減**

- ・ 資源権益の獲得の強化（例：自主開発比率の向上による安定供給確保）
- ・ 輸入相手国の分散化（例：特定の国・地域への高依存度の是正）
- ・ 輸入相手国との協力関係の強化（例：産油国・消費国の相互理解の深化[産消対話]）
- ・ エネルギー利用の分散化（例：特定のエネルギー源への高依存度の是正）
- ・ エネルギー輸送の安全確保（例：シーレーンの安全確保）
- ・ 緊急時対応力の強化（例：石油備蓄）

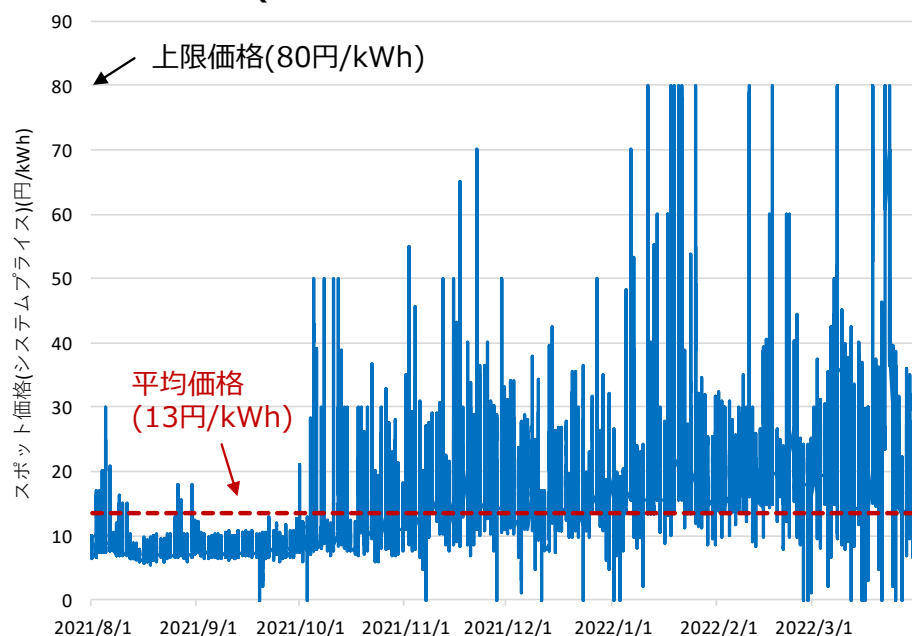
- **エネルギー消費の抑制**（例：省エネルギー技術、エネルギー管理・制御技術の普及）

- **エネルギー供給インフラの整備**（例：電力系統、ガス導管、石油設備の強靱化）

電力安定供給に向けた課題

- 脱炭素化、電力自由化、再エネ普及の中、火力発電所の休廃止が増加し、電力需給は注視が必要な状況
- 自然災害(地震等)他、不測の事態に起因する電力需給ひっ迫への対応強化が必要(電力価格高騰など)
- 2022年度冬季の電力需給は厳しい見通し(東京電力管内の予備率[厳冬H1需要での需給]は3%以下*)
- カーボンニュートラル実現に際して、電力・エネルギー安定供給のための投資インセンティブ確保が重要な課題

電力スポット価格(2022年8月1日～2022年3月31日)



(出典) JEPX取引情報より作成

2022年12月～2023年3月の電力需給 (厳気象H1需要に対する予備率)

	12月	1月	2月	3月
北海道	12.6%	6.1%	6.1%	11.6%
東北	8.8%	6.1%	5.9%	11.6%
東京	8.8%	0.1%	1.0%	11.6%
中部	8.8%	3.7%	3.1%	9.3%
北陸	8.8%	3.7%	3.1%	9.3%
関西	8.8%	3.7%	3.1%	9.3%
中国	8.8%	3.7%	3.1%	9.3%
四国	8.8%	3.7%	3.1%	9.3%
九州	8.8%	3.7%	3.1%	8.6%
沖縄	56.4%	42.0%	43.6%	69.3%

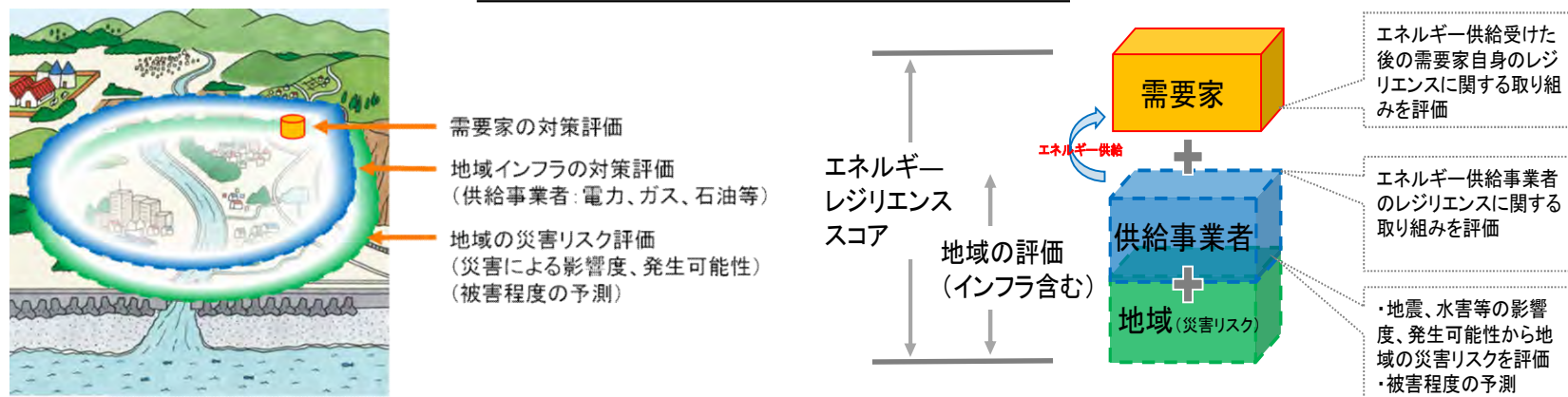
(出典)経済産業省 :需給を取り巻く課題と供給力確保策について(2022)
<https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/046_03_03.pdf>

レジリエンス

- エネルギー供給は、様々なリスクに直面(地震、大雨、洪水、台風等の自然災害)
- CN実現に向けて、また、その移行過程において、エネルギー供給障害の発生時、被害影響の最小化、迅速な復旧を遂行しうる能力(**レジリエンス**)をどのように確保するかも重要な課題
- レジリエンスは、SDGs(持続可能な開発目標)の9番目の目標(レジリエントなインフラ整備)や、11番目の目標(レジリエントな住環境の整備)などとも関連する、**持続可能な成長に貢献する重要な価値**
- APECで2020年に合意された「エネルギーレジリエンス原則」

「エネルギーレジリエンスとは、平時には需要家を含む社会に対して所要のエネルギーを安定的に供給するとともに、有事には自然的・人為的災害を始めとした様々なショックがエネルギーの供給支障を生じた場合に、それが人命・資産や経済活動及び社会にもたらす影響を低減するための、**災害等の発生前後における、ハード・ソフト面での安全性・堅牢性及び迅速な停止復旧能力**である。」

エネルギー・レジリエンススコアの考え方

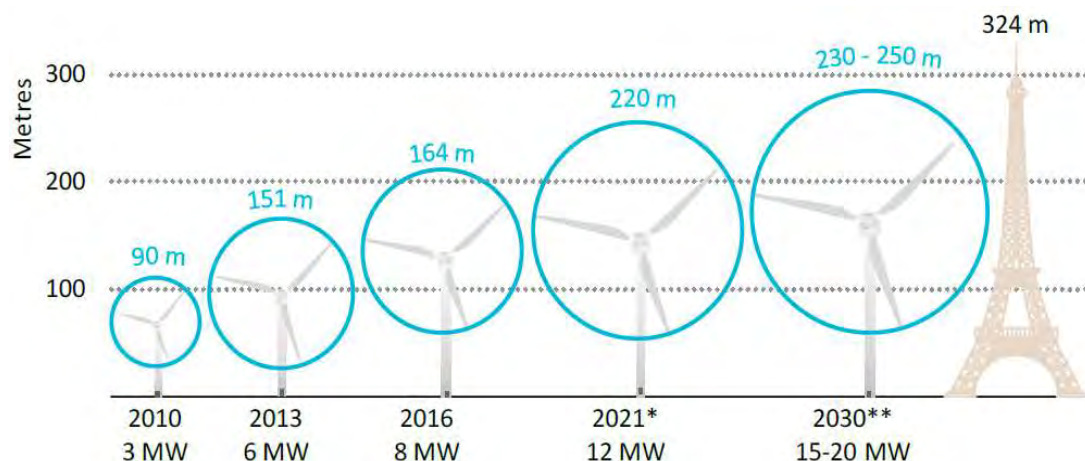


(出所) 経済産業省：第2回 エネルギーレジリエンス協議会資料、経済産業省：令和2年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書2021)、2021
<<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/index.html>>

洋上風力発電

- 日本の洋上風力ポテンシャル：約16億kW(環境省, 2011)、日本の電力需要の最大約8倍[2040年](IEA, 2019)
- 洋上風力発電の特徴：自然変動電源の中でも高稼働率(約40%)、世界の発電コスト(LCOE)は平均で10円/kWh以下
- コスト低減の課題：風車の大型化(規模の経済、高風速利用)、量産化、維持費抑制、長寿命化、建設期間短縮等

風車開発の変遷



(出典) IEA, Offshore Wind Outlook 2019 (2019)

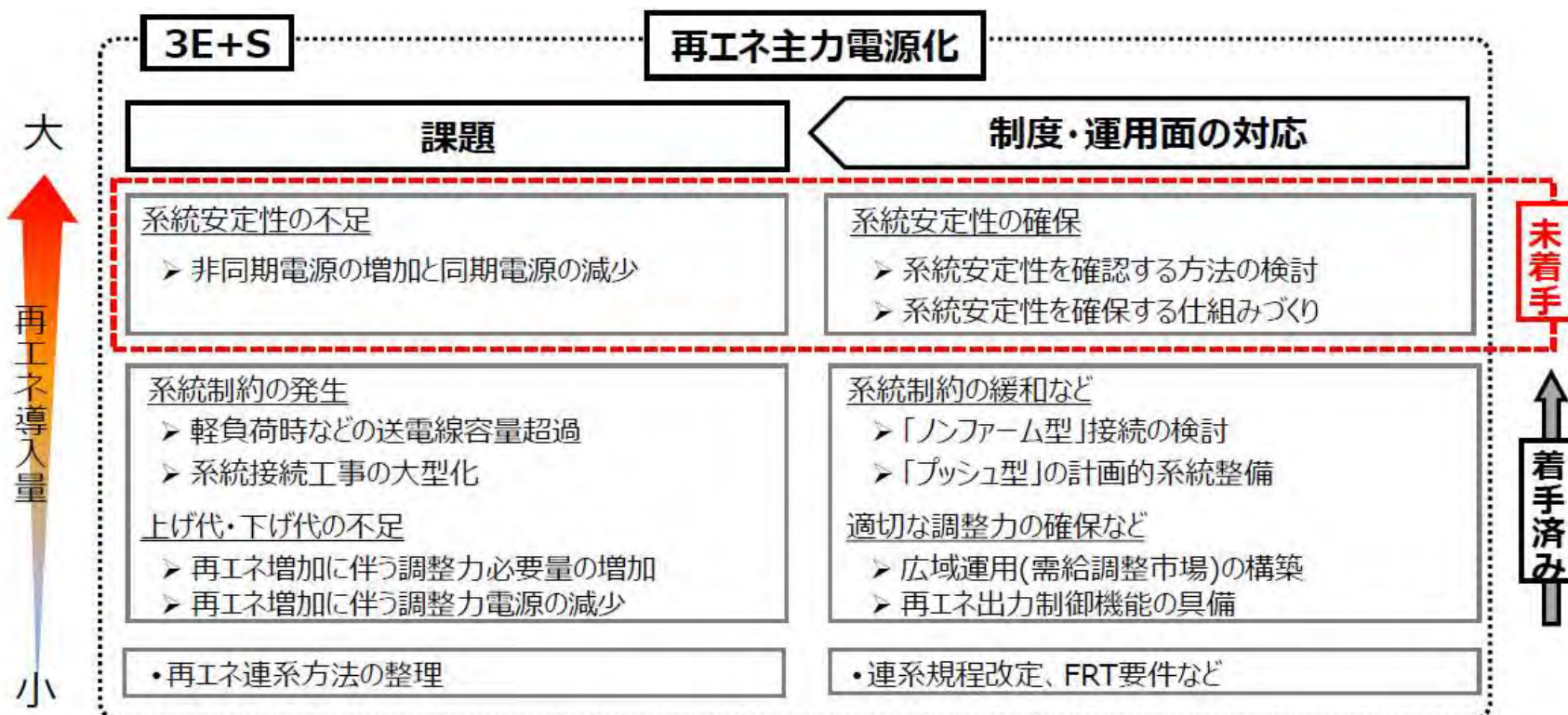
日本の洋上風力開発の状況



(出典) 経済産業省, 「洋上風力発電の低コスト化」プロジェクトの研究開発・社会実装計画(案)の概要(2021)

再生可能エネルギー主力電源化に向けた対策

調整力の確保(上げ代、下げ代)、送電容量の確保(系統整備、ノンファーム型接続等)、
系統安定性の確保(慣性力、同期化力)

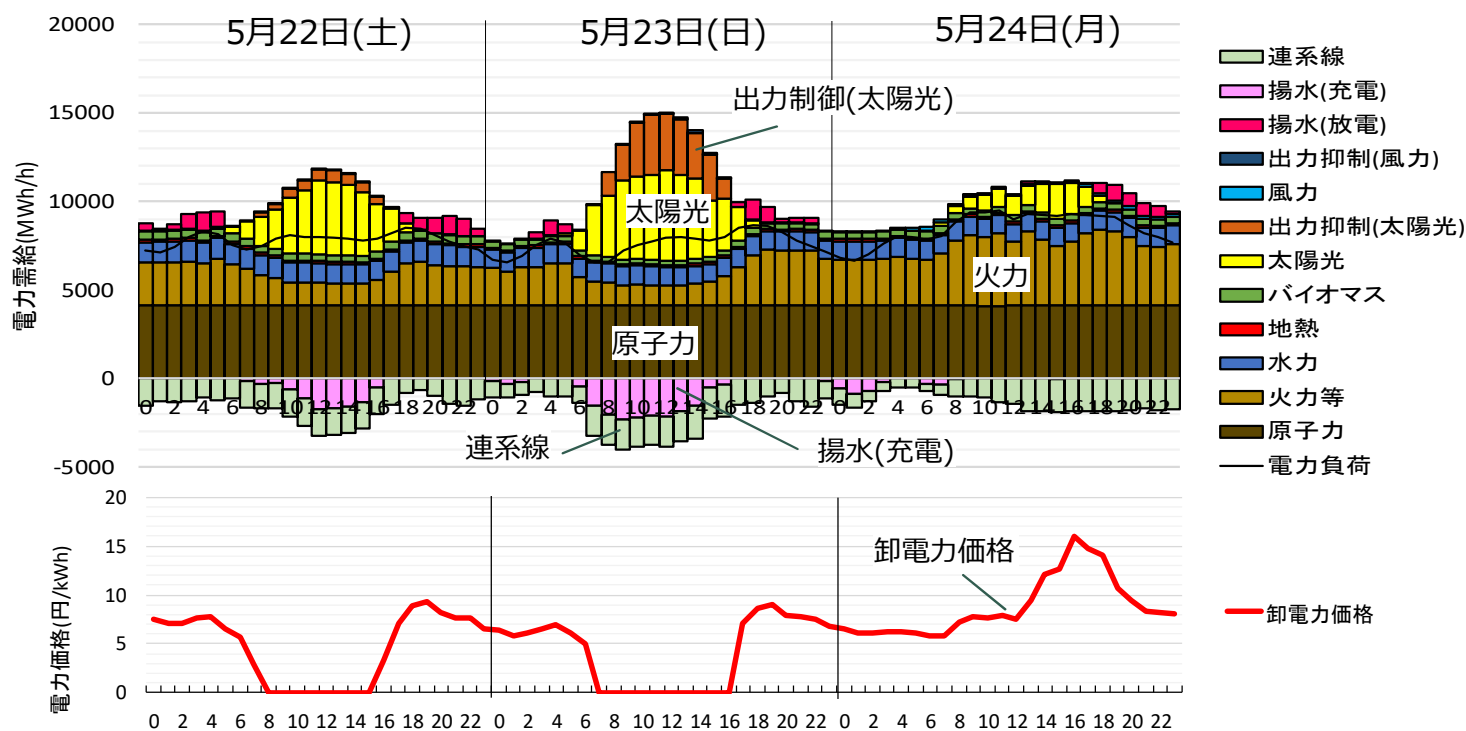


(出典)電力広域的運営推進機関：「再エネ主力電源化」に向けた技術的課題及びその対応策の検討について(2020年)
https://www.occto.or.jp/iinkai/chouseiryoku/2020/files/chousei_55_03.pdf

電力需給運用(九州地域：2021年5月22日～24日)

- 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(関門連系線)、再エネ出力抑制
- 卸電力価格低下→電源新設投資インセンティブの低下、電力安定供給確保への影響

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

再生可能エネルギー開発を巡る問題

- 太陽光は、近年増加する災害に起因した被害の発生に対する安全面の不安や、景観や環境への影響等をめぐる地元との調整における課題等、地域の懸念が顕在化
- 自治体において、開発届出等を義務付ける等の条例を定める動きがある
- 将来的に予見される大量の廃棄パネルに関する問題解決も重要になる

災害に起因した太陽光発電設備に係る被害例



景観に影響を及ぼしている事例



観光地へのアクセス道路からの景観

<自治体における再エネ発電事業に関する条例の例>

静岡県富士宮市（富士山景観等と再生可能エネルギー発電設備設置事業との調和に関する条例）（2015年7月1日施行）

世界遺産の富士山等の景観や自然環境等と再生可能エネルギーの調和を図る必要性。

→ 一定規模以上の太陽光・風力発電事業を実施しようとする場合は、**市長への届出と市長の同意が必要**。

※ 景観保護上重要な区域については、市長は原則同意しない。

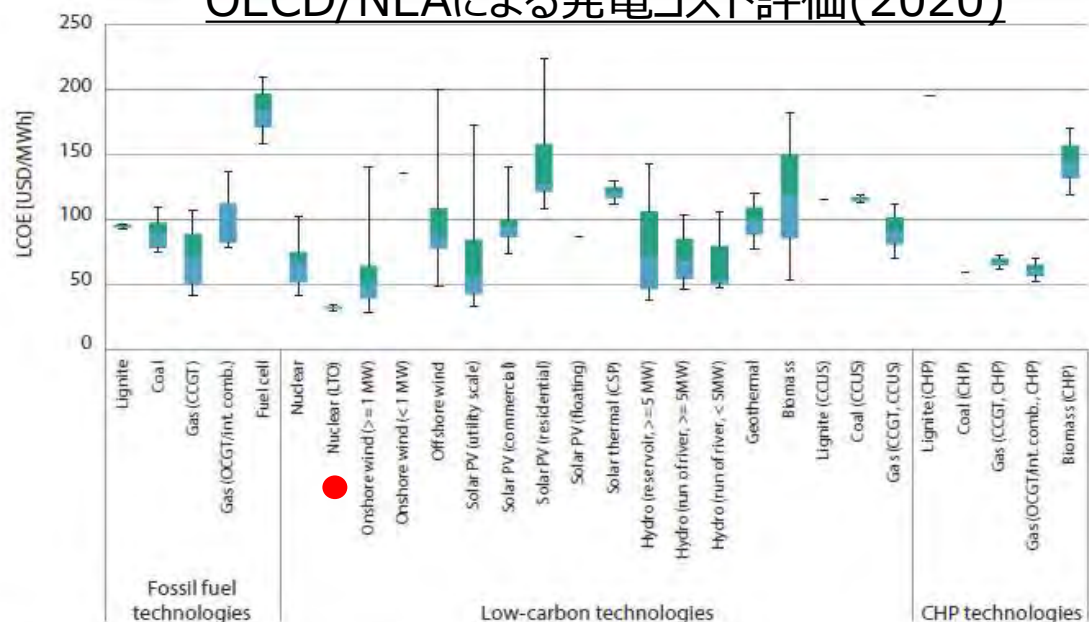
(出所)経済産業省：2050年カーボンニュートラルの実現に向けた検討、令和2年11月17日

<https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/033/033_004.pdf>

経済性の確保(発電コスト)

- 世界的に陸上風力、事業用太陽光発電等の発電コストが、火力や原子力と同水準まで低下。再エネへの投資も世界的に旺盛。
- 一方、運転延長を行った原子力(Nuclear(LTO))は、他電源の新設と比較して最も経済優位性のあるオプション
- 電力系統への統合コスト(系統接続に必要な調整力等のコスト)を考慮の場合、事業用太陽光や陸上風力の発電コストは原子力を上回る
→電力のコストは主に、発電コストに加え、送配電等のコストで構成されるため、電力システム全体(発電、送配電等)を考慮した評価が重要
- 統合コストを考慮の場合、原子力発電コストも上昇→原子力発電の柔軟性確保も重要との示唆

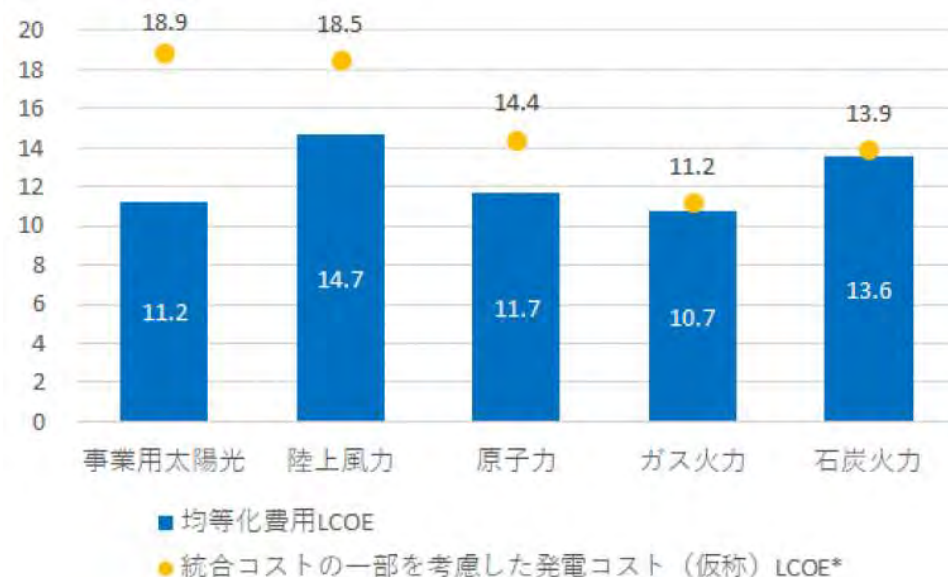
OECD/NEAによる発電コスト評価(2020)



(出典)OECD/NEA: Projected Costs of Generating Electricity, 2020 Edition (2020)

*LTO(Long-term Operation: 原子力発電の寿命延長)

発電コスト評価 (電力系統への統合コストの考慮)



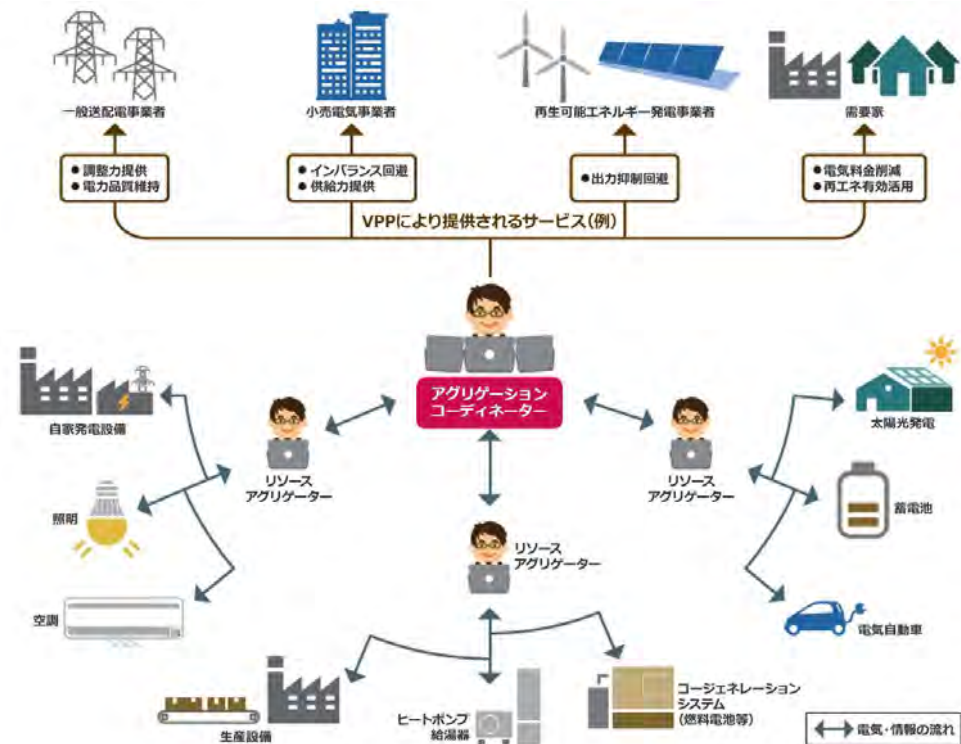
(出典)経済産業省：発電コスト検証について(令和3年8月4日)

<https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/2021/048/048_004.pdf>

分散型エネルギーリソース(DER)の活用

- 分散型エネルギーリソース(DER)活用への期待
 - ・ 災害時の電力安定供給強化
 - ・ 電気の流れの双方向化と電力需給構造の柔軟性向上→電力システム高度化
 - ・ 再エネ導入によるエネルギー自給率向上
 - ・ 省エネルギー(コジェネなど熱の有効利用や送電ロス低減)、地域経済の活性化など
- 多様なDERの普及
 - ・ デマンドレスポンス(DR)： 分散型リソース制御(上げ下げDR)、需要家の行動変容
 - ・ 卒FIT太陽光： 経済性のある電源としての自家消費利用、アグリゲーション活用への期待
 - ・ 電気自動車(EV)： 車載用蓄電池の災害時における非常用電源としての活用
 - ・ P2P電力取引： 電気事業者を仲介せず分散型電源と電力負荷を仮想的にバランシング
 - ・ Virtual Power Plant(VPP)： 多様な分散資源をデジタル技術で一つの電源として運用
- NWA(Non-Wire Alternatives)
 - ・ 送配電網の投資は高額、電気料金上昇リスク
 - ・ DERを活用した送配電網の投資抑制策

バーチャルパワープラント(VPP:Virtual Power Plant)



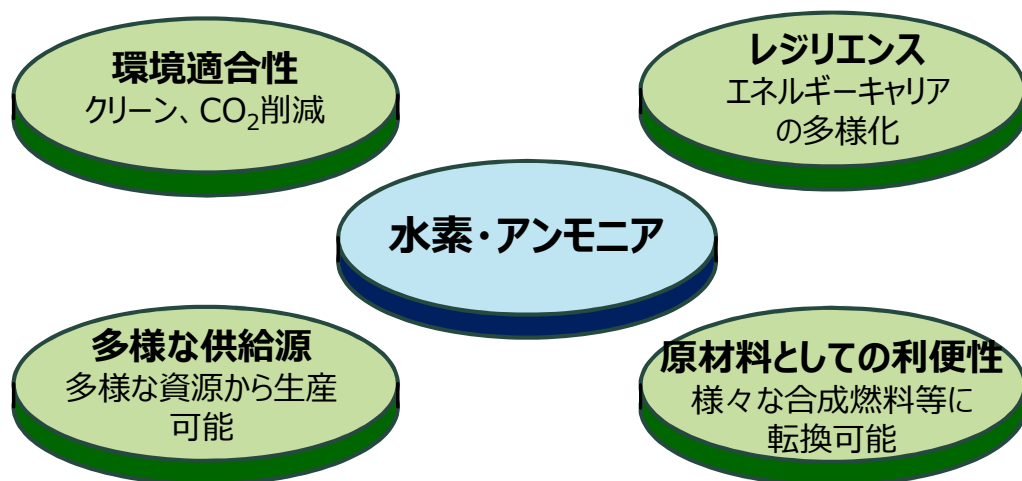
(出典)経済産業省

<https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/advanced_systems/vpp_dr/about.html>

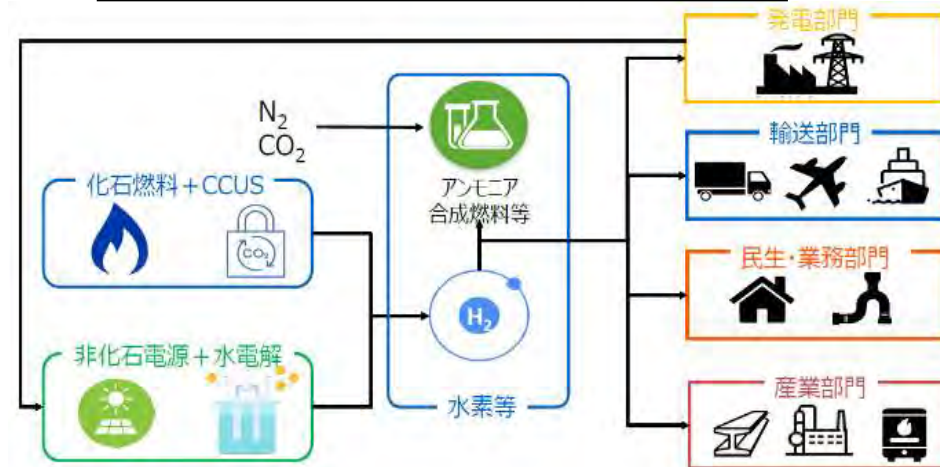
水素・アンモニア

- 水素・アンモニアの価値→環境適合性、レジリエンス、多様な供給源、原材料としての利便性
- H_2 、 NH_3 のCNへの貢献→脱炭素化が困難な分野(Hard-to-Abate Sectors)(鉄鋼、化学工業、船舶、航空等)、発電部門(混焼、専焼)での脱炭素化を目的として、利用の検討が進められている。
- 水素の類型：グレー水素(化石燃料由来、安価)、ブルー水素(化石燃料+CCUS)、グリーン水素(再エネ由来、現在のコストはブルー水素の2～4倍、将来低下の見込みも)、イエロー水素(原子力)
- 水素液化温度は $-253^{\circ}C$ の一方、アンモニアは $-33^{\circ}C$ で液化可能、既存インフラも存在
- 課題は、技術開発、インフラ整備(サプライチェーン整備)、コスト低減

水素・アンモニアの価値



クリーン水素・アンモニア供給と利用用途



(出所)経済産業省：今後の水素政策の課題と対応の方向性中間整理（案）、2021年 16

カーボンニュートラルと原子力エネルギー

- **原子力エネルギー利用のメリット** → **原子力エネルギーは、エネルギー安定供給と地球環境保全に貢献するエネルギー源**
 - **電力・非電力分野の脱炭素化**（ゼロエミッション電力供給、グリーン水素製造、グリーン熱供給等）
 - **エネルギーセキュリティ強化、電力安定供給への貢献**（準国産エネルギー[国内燃料在庫で数年間電力供給可能]→エネルギー自給率向上、国産技術→技術自給率の維持、燃料価格高騰の影響が小さく経済優位性のあるベースロード電源、化石燃料調達の際の価格交渉力の強化[Bargaining power]、慣性力・同期化力や調整力の提供[再エネ主力電源化への貢献]、電力市場の競争の活性化[新電力等への安定した価格での電力供給]、高速炉サイクル開発→国産資源に乏しい国家環境が原点[超長期の原子力利用]、高レベル放射性廃棄物の量・有害度の低減等）
 - **技術イノベーション**(小型モジュール炉[SMR]→高い安全性、工期短縮、投資リスク低減、防災エリア縮小等)
 - **原子力発電の再稼働**(未稼働炉約23百万kW、2022年3月時点)→LNG換算約18百万トンに相当*→国際エネルギー市場の需給緩和、他国のエネルギー調達確保への貢献→原子力再稼働は世界のエネルギー安定供給に貢献*原子力設備利用率80%、LNG発電効率60%時
- **電力自由化と原子力エネルギー**
 - **原子力は電力自由化の下で維持されうるか？**（競争環境での投資リスクの問題）
 - **市場メカニズムと公益、国益の両立**：電力自由化と公益や国益(地球環境問題、エネルギー安全保障)をどのように両立すべきか？
- **原子力エネルギー利用を巡る課題への取組が重要**
 - **社会的信頼の回復**
 - **安全性を大前提とした既設原子力発電の再稼働、安定的運転の継続**
 - **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)

高温ガス炉「HTTR」



高速実験炉「常陽」

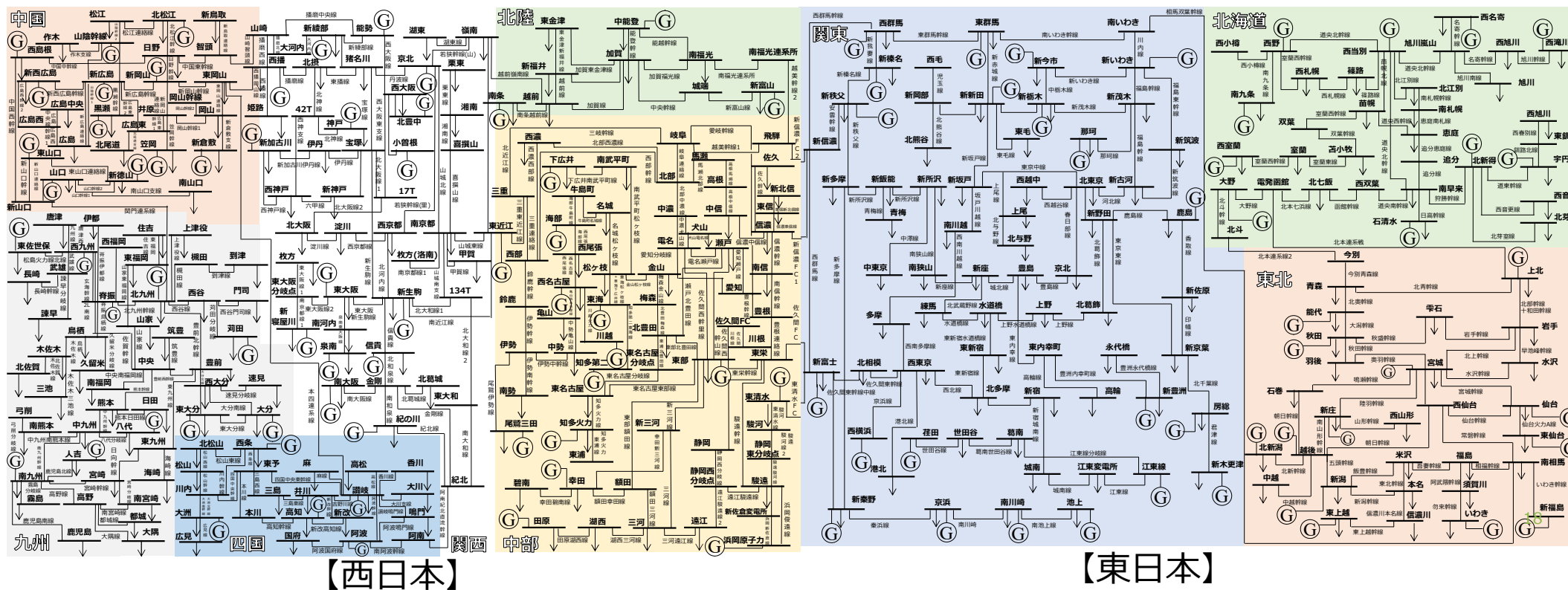


(出所) 日本原子力研究開発機構 (JAEA)
<<https://www.jaea.go.jp/04/o-arai/joyo/index.html>>
<<https://www.jaea.go.jp/02/press2020/p20060301/>>

日本の電力系統の数値シミュレーション

全国の基幹系統を考慮(383母線、475本の基幹送電線)、年間8,760時間(1時間値)でのシミュレーション

電力基幹系統モデル



(参考) Komiyama R, Fujii Y: *Energy Policy*, **101**, 594-611 (2017), Komiyama R, Fujii Y: *Renewable Energy*, **139**, 1012-1028 (2019)

[謝辞] モデル構築に際して、JSPS科研費JP20H02679, (独)環境再生保全機構環境研究総合推進費(2-2104), 文部科学省原子力システム研究開発事業JPMXD0220354480等の助成を受けた。

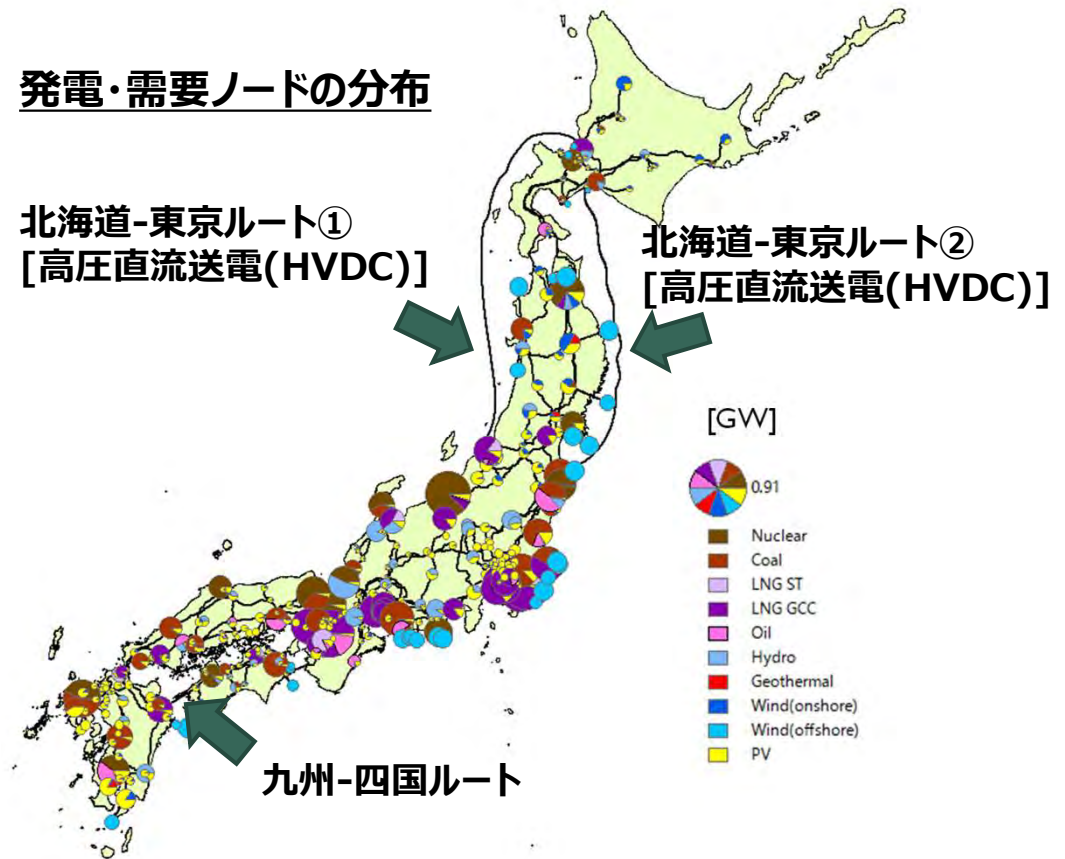
日本の電力系統の数値シミュレーション

- 分析手法：電力需給モデル(線形計画法)
- 目的関数：固定費(発電・電力流通設備) + 燃料費(火力・原子力) + 電力貯蔵設備運用費 + 送電線増強費用(直流送電)
- 制約条件：同時同量制約、発電出力制約(定検パターンを考慮→作業停止計画も最適化)、供給予備力制約、負荷追従制約、最低出力制約(火力・原子力、DSS運転)、送電容量制約、電力貯蔵設備制約、設置可能容量制約、SNSP制約(慣性力に関する制約)、電力貯蔵Cレート制約など
- 時間解像度：
 - 年間8760時間、1時間値で分析
- 発電技術：石炭、石炭-アンモニア混焼、石炭-CCS、ガス複合、ガス汽力、ガス-水素混焼、ガス-CCS、石油、水素、原子力(大型炉、小型炉)、一般水力、地熱、バイオマス、海洋、太陽光、陸上風力、洋上風力
- 電力貯蔵設備：揚水、NAS電池(長周期変動用)、Li-ion電池(短周期変動用)
- 主な前提条件：太陽光(設備容量上限を設定せず新增設可能)、風力(環境省による導入ポテンシャル評価等を踏まえ上限値を設定)、水素発電(輸入量年間上限2,000万トン、輸入価格20円/Nm³)、原子力発電(60年運転シナリオ[23.7GW]、新增設無し)など

発電・需要ノードの分布

北海道-東京ルート①
[高圧直流送電(HVDC)]

北海道-東京ルート②
[高圧直流送電(HVDC)]



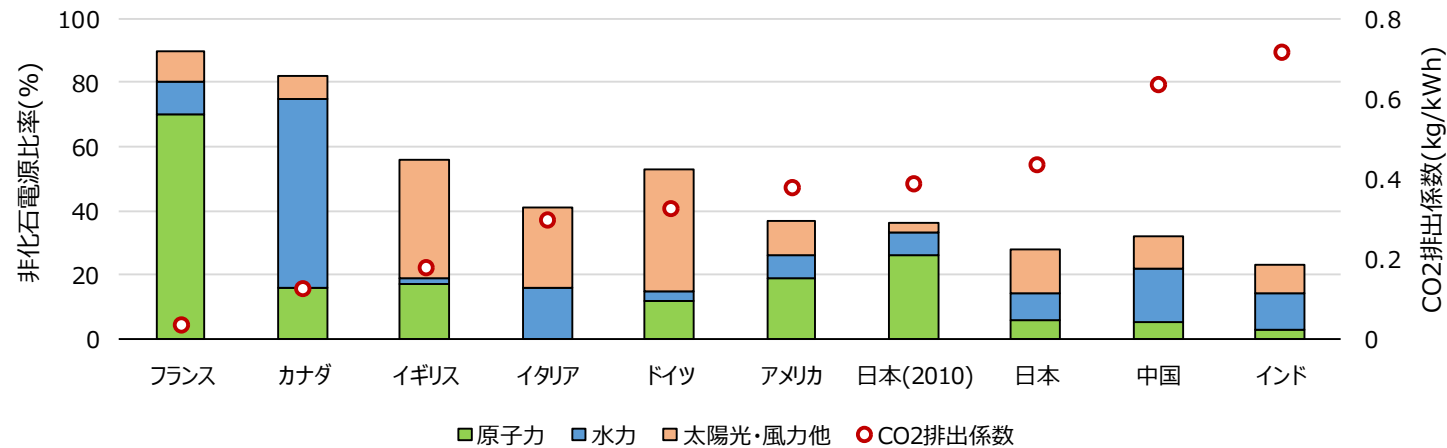
* 全量メルिटオーダー・間接オークション取引を想定

カーボンニュートラル実現に向けた電源ベストミックス

ケース設定(CO₂制約に関するケース設定)

- 基準(CO₂制約無し)
- 200g-CO₂/kWh [英国:180g-CO₂/kWh]
- 100g-CO₂/kWh [カナダ:130g-CO₂/kWh]
- 50g-CO₂/kWh [フランス:40g-CO₂/kWh]
- CN (CO₂ネットゼロ)
- CN+ (CO₂ネットゼロ+再エネ出力抑制無し) [再エネ電力の最大限の活用]

電力CO₂排出係数、非化石電源比率(2019年)

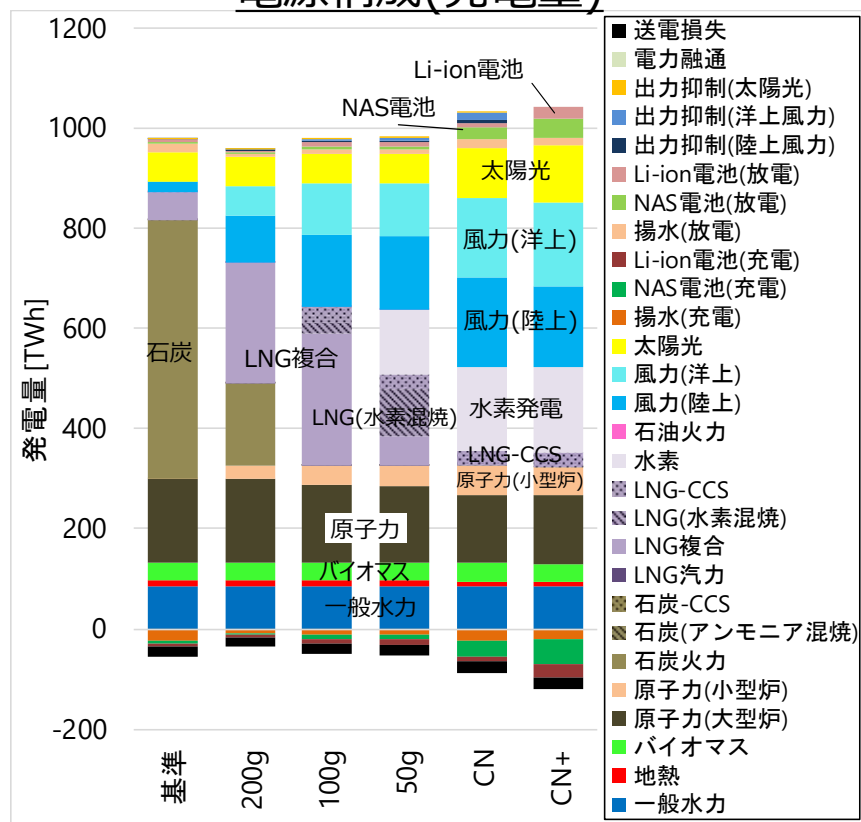


(出典) IEA, World Energy Balances 2021等より作成

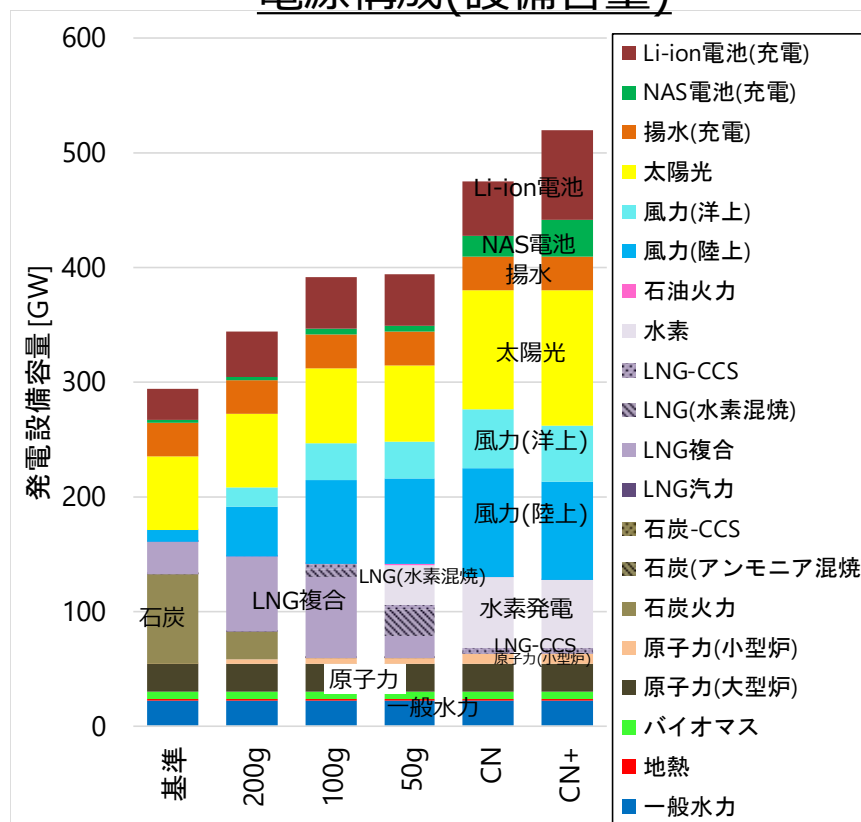
カーボンニュートラル実現に向けた電源ベストミックス

カーボンニュートラル制約→太陽光、風力(陸上・洋上)、水素発電、バッテリー等の導入拡大

電源構成(発電量)

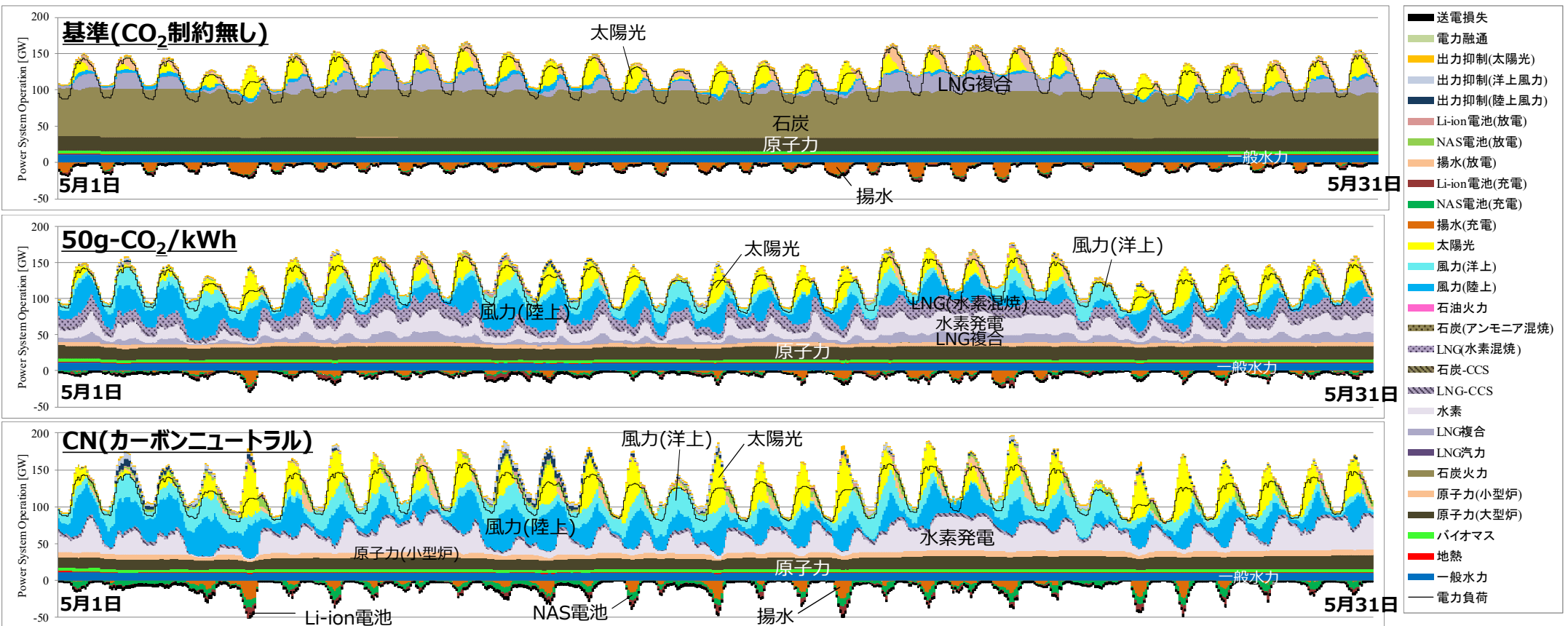


電源構成(設備容量)



電力需給運用(日本全体：5月、1カ月間1時間値)

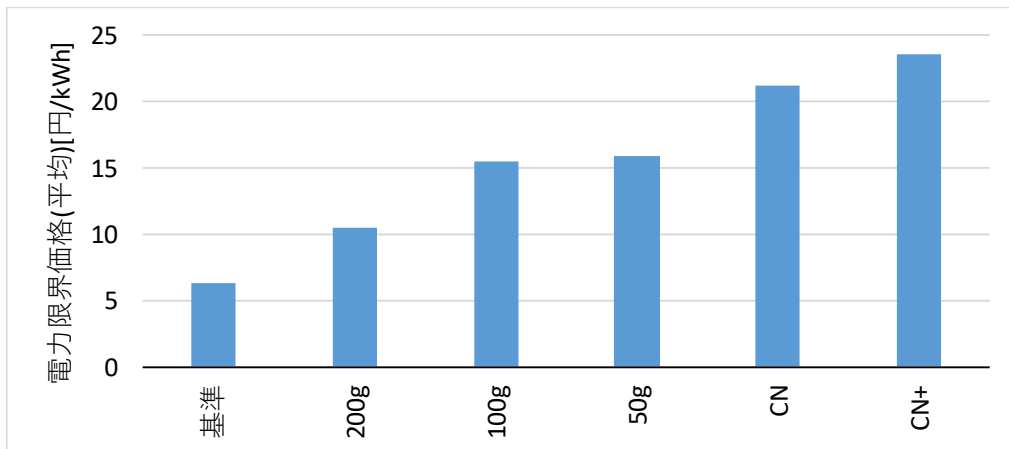
カーボンニュートラル・再エネ大量導入→自然変動電源(太陽光、洋上風力、陸上風力)、水素、原子力、バッテリー、CCUS等の最大限の活用による脱炭素化と調整力の確保



カーボンニュートラル実現に向けた電源ベストミックス

電力価格はCO₂制約により上昇傾向(CNケースの電力価格は基準ケース比で3倍以上の上昇)、変動幅(ボラティリティ)も拡大→電力価格を踏まえた電源計画の検討、脱炭素化と経済性の両立が重要な課題

電力価格(電力限界価格)



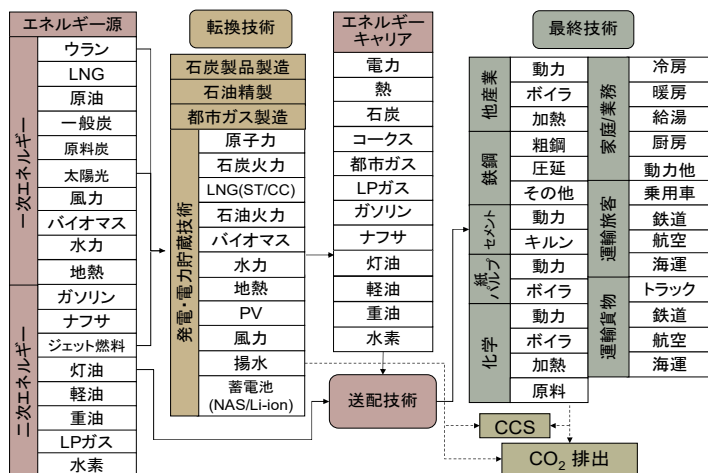
電力価格(最高/最低価格ほか)

[¥/kWh]	電力限界 価格	電力平均 価格	標準偏差	最高価格	最低価格
基準(CO2制約無)	6.4	8.4	8.2	99.4	2.2
200g-CO ₂ /kWh	10.5	9.5	8.7	122.7	4.2
100g-CO ₂ /kWh	15.5	10.7	9.2	141.0	2.9
50g-CO ₂ /kWh	15.9	11.9	9.0	138.3	2.6
CN	21.2	13.4	10.9	163.6	0.0
CN+	23.6	14.3	14.2	134.8	▲270.1

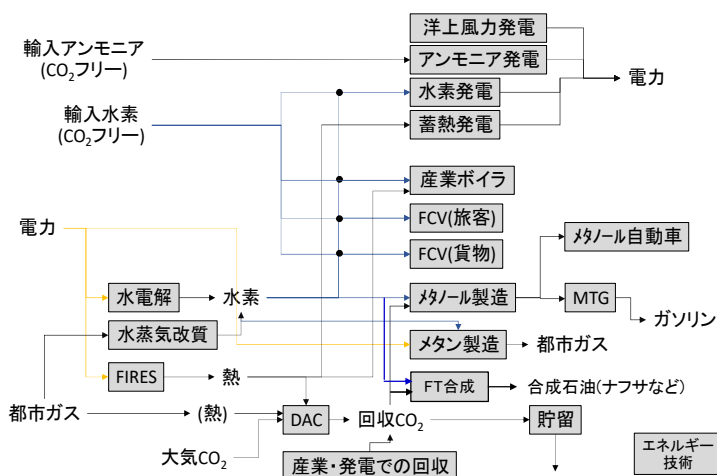
エネルギーシステムの数値シミュレーションモデル

- 日本のエネルギー全体を分析対象に、最適化計算によりCO₂排出制約の下での最適エネルギー需給構造を分析
 - ・ エネルギーシステム全体を評価(一次エネルギー、転換部門、最終消費部門[産業、家庭、業務、旅客、貨物])
 - ・ 電力部門の詳細分析(時間解像度→1時間値、年間8,760時間で分析→再エネ出力変動を詳細に考慮)
- エネルギー供給側(一次/二次エネルギー)と需要側(鉄鋼、セメント、化学、民生、運輸など)を対象に個別技術の積み上げによる分析を行い(技術ボトムアップでの分析)、カーボンニュートラル実現時とそのトランジション(移行過程)でのエネルギー需給構造を統合的に分析
- 革新的技術など300種類以上の技術要素・プロセス等を考慮：次世代自動車(EV、FCV)、エネルギー貯蔵(Li-ion電池、NAS電池、蓄熱装置)、CCUS(大気中CO₂直接回収、メタネーション、FT合成)、エネルギーキャリア(水素、アンモニア、メタノール、合成ガス、合成石油)、発電技術(水素発電、アンモニア発電、洋上風力発電、燃料電池、蓄熱発電)、省エネ技術(ヒートポンプ)など
 - ・ (参考：モデルの実績) GAUC(Global Alliance of Universities on Climate：気候変動に関する国際大学アライアンス)イベント(2021年)、ICEE(The International Conference on Electrical Engineering：電気工学国際会議)パネルセッション(2021年)、日本機械学会企画セッション(2021年)など

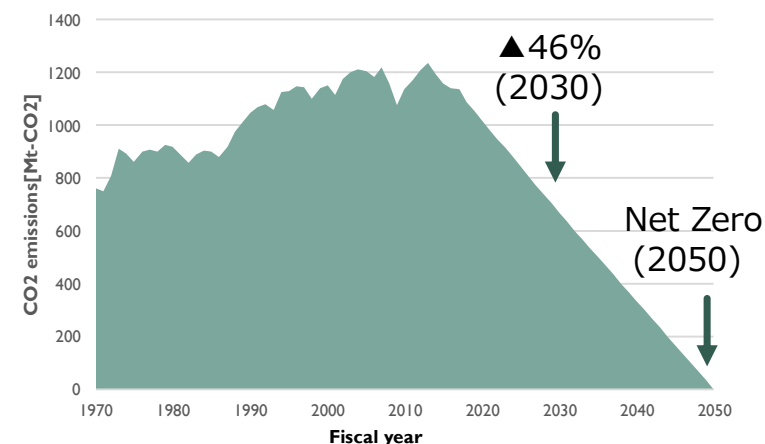
エネルギー技術選択モデル



新技術のモデル化(水素、燃料電池自動車、蓄熱発電、大気中CO₂直接回収、メタネーション、アンモニア、FT合成等)



CO₂排出量制約(2030年：46%削減、2050年：ネットゼロ)



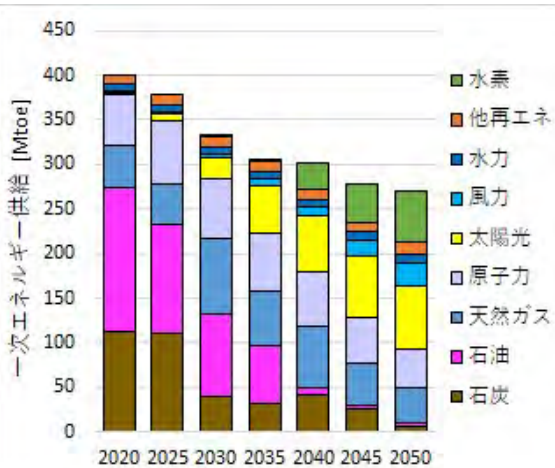
(参考)Kawakami Y, Komiyama R, Fujii Y, IFAC-Papers OnLine 51(28)598-603 (2018), 川上,小宮山,藤井,電気学会論文誌B,138(5), 382-391 (2018)ほか

日本のカーボンニュートラル実現可能性

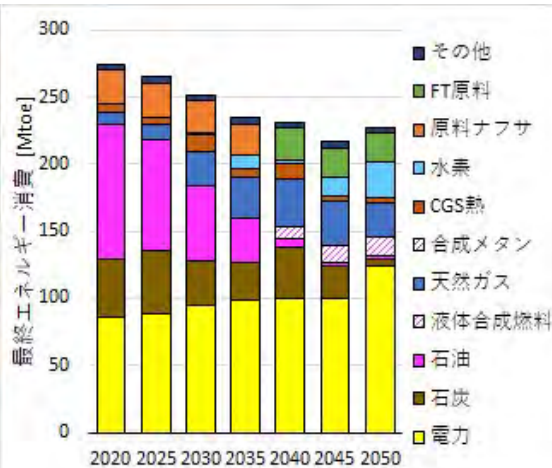
● 主な前提条件

- 風力発電：陸上40GW・洋上90GW上限に新增設可能、水素発電：輸入量年間上限2,000万トン、輸入価格20円/Nm³、太陽光：設備容量上限を設定せず新增設可能、原子力発電：60年運転シナリオ(2050年23.7GW)など
- **省エネルギー推進、電化の進展(需要の電力化)、CCUS技術の展開、CO₂限界削減費用の上昇**
 - 省エネ進展：一次エネルギー供給(2050年→2020年比約3割省エネ)、最終エネルギー消費(2050年→2020年比約2割省エネ)
 - 電化の進展(需要の電力化)：電化率(2020年：約30%→2050年：約50%)
 - 電力脱炭素化：太陽光発電、風力発電の主力電源化
 - CO₂削減：エネルギー起源CO₂排出量(2019年：10.6億トン→2050年：ネットゼロ)
 - CO₂限界削減費用：2030年約2万円/t-CO₂、2050年約8万円/t-CO₂

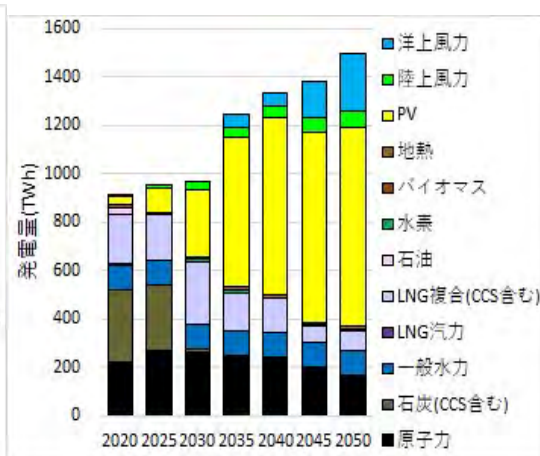
一次エネルギー供給の見通し



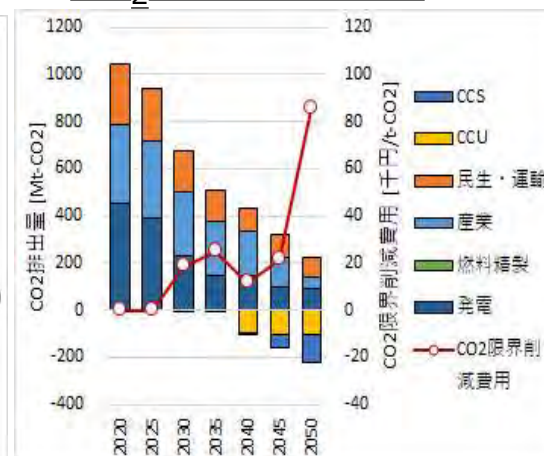
最終エネルギー消費の見通し



電源構成の見通し



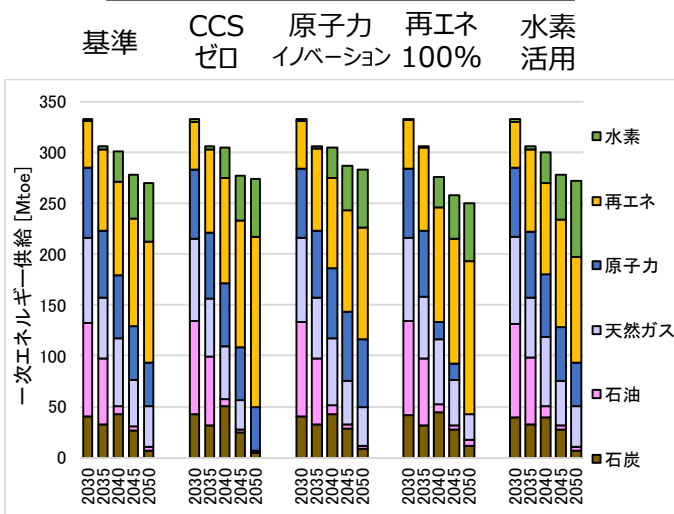
CO₂排出量の見通し



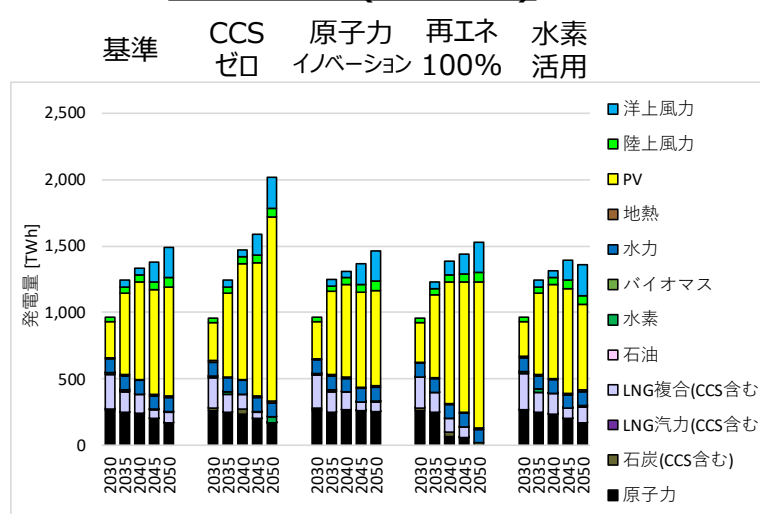
日本のカーボンニュートラル実現可能性(シナリオ分析)

- CCSゼロ：電化による脱炭素化(2050年総発電量：約2兆kWh)、CO₂限界削減費用上昇(14万円/t-CO₂、60%増)
- 原子力イノベーション：建設計画中原子炉(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、CN実現に貢献する経済合理的な選択肢、2050年までの累積システム総コストはシナリオ間で最小 *ただし原子力は社会受容性等の影響を受け、分析結果の解釈には留意が必要
- 再生可能エネルギー100%：2050年エネルギーシステム総コストは原子力イノベシナリオ比で年間約4兆円上昇
- 水素活用：輸入量上限(基準シナリオ比3割増)→燃料脱炭素化の進展により、需要の電化進展の抑制

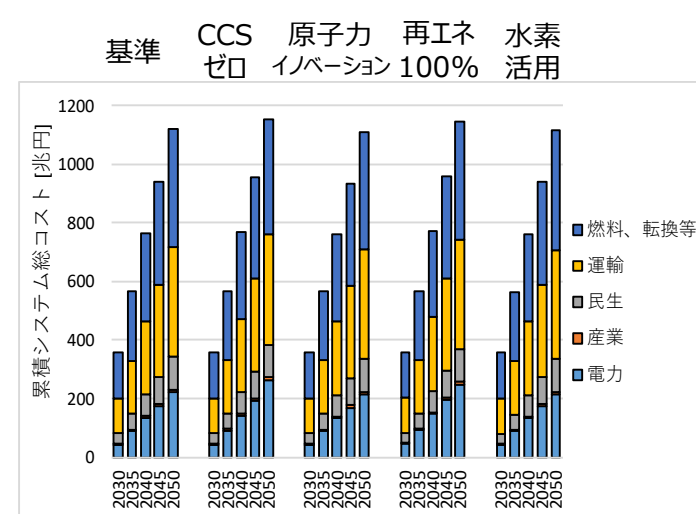
一次エネルギー供給構成



電源構成(発電量)



累積システム総コスト(各年までの累計)



結 語

- **カーボンニュートラル実現には多様な技術の総動員が不可欠**

- 省エネ、再エネ、原子力、化石燃料の環境調和型利用、CCUSなど
- それぞれの利点、欠点を補完するベストミックスの構築が重要

- **科学的なエネルギー政策の検討**

- 科学的レビューメカニズム：「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」
 - ✓ （例）EBPM（Evidence-Based Policy Making、証拠に基づく政策立案）
- エネルギー選択の評価軸や科学的指標の確立
 - ✓ S+3E、R(レジリエンス)、技術成熟度、技術自給率、産業競争力、国民負担、…
- 透明性の高い枠組みによるエネルギー政策の議論が重要