



H-UTokyo Lab.

日立東大ラボ産学協創フォーラム

『Society 5.0 を支えるエネルギーシステムの実現に向けて（第4回）』

カーボンニュートラル社会に向けたエネルギー基幹システムのS+3E

横山 明彦

東京大学大学院
工学系研究科教授

2021年12月1日

Contents

- 0. 報告の全体像の説明：「カーボンニュートラル社会のエネルギーシステム」**
- 1. 日本政府のエネルギー政策の基本的な方向性**
- 2. カーボンニュートラル社会の将来像からのバックキャストिंग**
- 3. 健全なカーボンニュートラルを実現するエネルギーシステム**
- 4. まとめ**

報告の全体像の説明：

「カーボンニュートラル社会のエネルギーシステム」(14:05-14:50)



- 提言書（第3版）までに、将来の基幹エネルギーシステム・産業の姿および制度政策について検討・提言した。
- 今回は、2050年CN実現に向けた「将来の姿の分析」「技術解析」「制度・政策の提言」を発表する。

東京大学
横山 明彦
(14:05-14:25)

【カーボンニュートラル社会に向けたエネルギー基幹システムの S+3E 】
2050年CNに向けたイノベーションの姿とその移行過程、設備投資等を比較分析
2050年CNに向けた電源・系統システム整備の技術的な課題を提起

日立製作所
小野田 学
(14:25-14:35)

【カーボンニュートラル社会におけるエネルギー基幹システムの技術イノベーション】
2050年CNにおけるエネルギーシステムの多様な姿を比較検討
電化推進・再エネ大量導入による系統システムの課題・対応策を検討

東京大学
大橋 弘
(14:35-14:50)

【持続可能な社会・産業とカーボンニュートラルを協調させる制度・政策】
2050年CN実現と、電力システムの S+3E 再構築に向けた制度・政策を提言
地球全体での効率的なGHG削減に向けて、産業・製造業との協調について検討

Contents

- 0. 報告の全体像の説明：「カーボンニュートラル社会のエネルギーシステム」
- 1. 日本政府のエネルギー政策の基本的な方向性**
- 2. カーボンニュートラル社会の将来像からのバックキャストिंग
- 3. 健全なカーボンニュートラルを実現するエネルギーシステム
- 4. まとめ

1. 日本政府のエネルギー政策の基本的な方向性 第6次エネルギー基本計画（10月22日閣議決定）

- 昨年10月からの議論を経て、「第6次エネルギー基本計画」が本年10月22日に閣議決定。
- 「2050年カーボンニュートラル(CN)」や「2030年CO₂等▲46%」の実現に向けた政策の道筋が示された。

第5次エネルギー基本計画（2018年）の要点

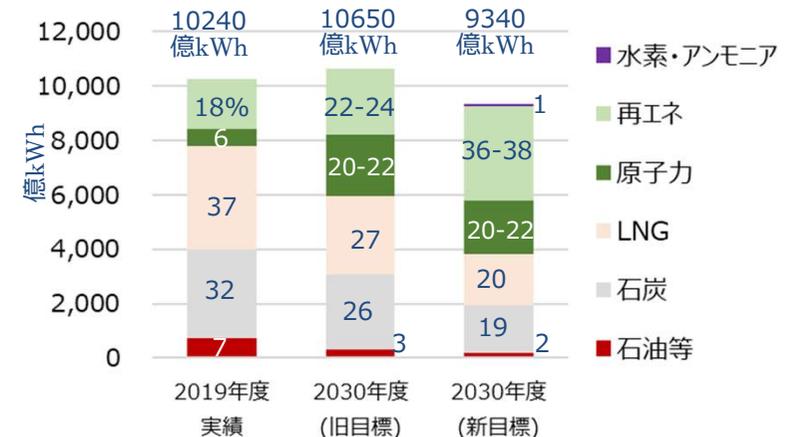
1. 2030年CO₂等▲26%に向けたエネルギーミックス実現
2. 2050年CO₂等▲80%に向けたエネルギー転換・脱炭素への挑戦

2018年以降の情勢の変化

1. 世界的なCN潮流、エネルギー安全保障への危機感
2. 2050年カーボンニュートラル宣言、グリーン成長戦略
3. 自然災害の多発・激甚化など安定供給リスクの高まり

第6次エネルギー基本計画（2021年10月）

- 2050年CN、2030年度▲46%、更に▲50%の高みを目指して挑戦を続ける新たな削減目標の実現に向けたエネルギー政策の道筋を示す。
 - 国際的なルール形成の主導、これまで培ってきた脱炭素技術、新たな脱炭素イノベーションにより国際的な競争力を高めることが重要。
- **「S+3E」：安全性(Safety)の確保を大前提に、気候変動対策(Environment)を進める中でも、安定供給の確保(Energy Security)やエネルギーコストの低減(Economic Efficiency)に向けた取組を進める。**
- エネルギー基本計画は主に以下パートにて構成
 - ① 東電福島第一の事故後10年の歩み
 - ② 2050年カーボンニュートラル実現に向けた課題と対応
 - ③ 2050年を見据えた2030年に向けた政策対応

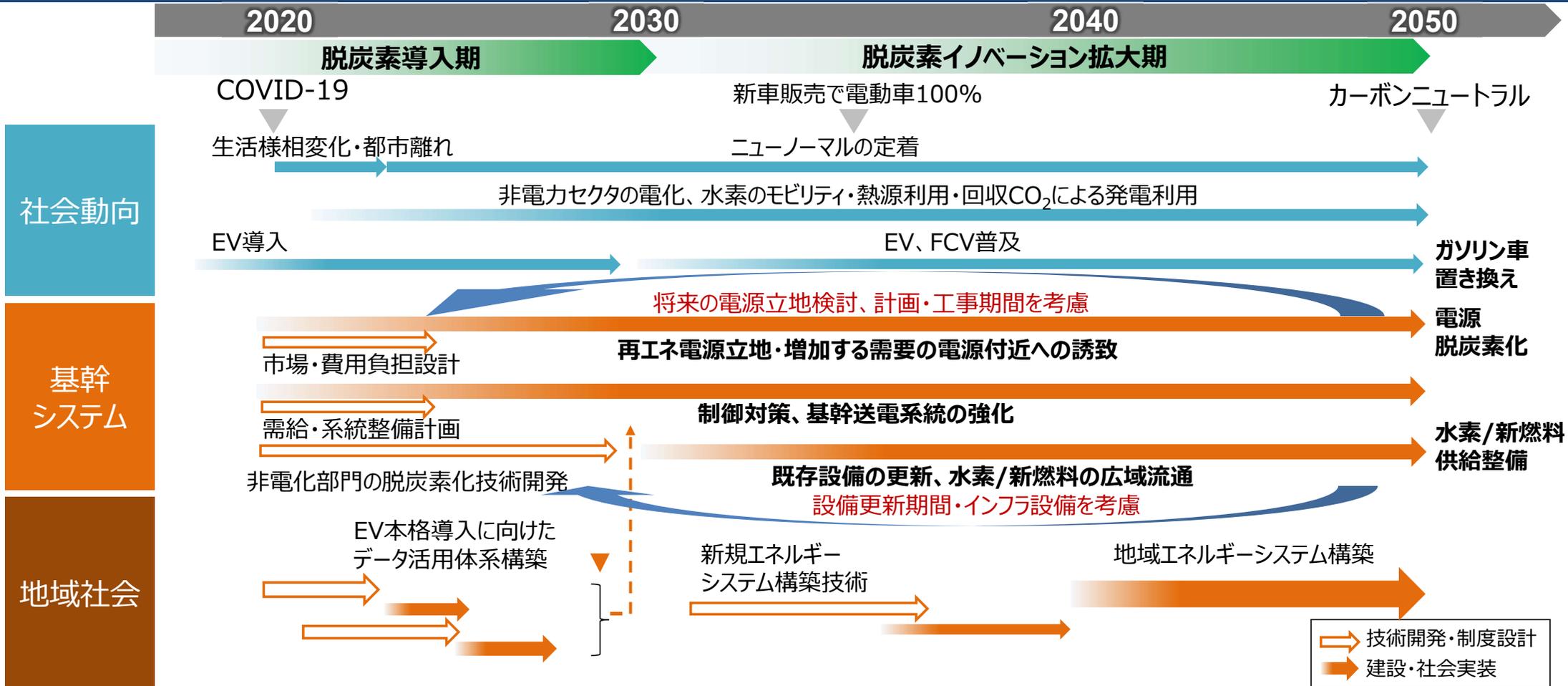


Contents

- 0. 報告の全体像の説明：「カーボンニュートラル社会のエネルギーシステム」
- 1. 日本政府のエネルギー政策の基本的な方向性
- 2. カーボンニュートラル社会の将来像からのバックキャストिंग**
- 3. 健全なカーボンニュートラルを実現するエネルギーシステム
- 4. まとめ

2. カーボンニュートラル社会の将来像からのバックキャストिंग リードタイムを考慮した計画・早期着手の検討

- 2030年/2050年の目標達成に向け、電源開発のほか、需給・系統整備を計画し実行することが重要。
- 日立東大ラボでは、2050年CNのエネルギーシステムの姿を描き、手順を逆算するバックキャストिंगを提言。



※EV: Electric Vehicle, FCV: Fuel Cell Vehicle

2. カーボンニュートラル社会の将来像からのバックキャストिंग 東京大学 藤井・小宮山研究室の需給シミュレーションモデルを活用



- 2050年CN実現時のエネルギーシステムの姿を描くツールとして、実績のあるモデルを採用。
- 2030年▲46%、2050年CN等の制約条件のもと、エネルギー需給構造についてコスト最適化計算を実施。

藤井・小宮山研究室モデルの概要：エネルギー技術選択モデル(動学的コスト最小化型モデル)

- 日本のエネルギー全体を分析対象に、**CO₂排出制約のもとでエネルギー需給構造について、コスト最適化計算が可能。**
 - **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**)
- **エネルギー供給サイド** (一次/二次エネルギー) と **需要サイド** (鉄鋼、セメント、化学、民生、運輸など) について **個別技術の積み上げによる分析を行い、CN実現ならびにそのトランジション (移行過程) のエネルギー需給構造を統合的に分析可能。**
- **革新的技術をはじめ多様な技術要素を考慮**：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) <藤井・小宮山研究室モデルの実績>
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)、日本原子力学会報告書(2020年)など内外の学術的議論の場で結果が紹介されている。

(参考文献) 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)

2. カーボンニュートラル社会の将来像からのバックキャストイング シミュレーション条件：技術イノベーションを考慮

- 主要な脱炭素技術の導入（再エネ・原子力・水素・CO₂回収）が全て実現すると仮定
- 2050年CNおよびトランジション（移行過程）について、コストを最適化してシミュレーション

CO₂排出量 (削減目標値)

2030年：2013年比 ▲46 %
2050年：ネットゼロ (▲100 %)

発電設備・技術の導入条件(2050年)

太陽光発電(PV)：発電容量の上限を設定せず、新增設
太陽光発電協会(JPEA)の目標値は、2050年に300GW(*1)

風力発電：陸上40 GW・洋上90 GWを目標に新增設
日本風力発電協会(JWEA)が政府に提言した目標値(*2)

原子力発電：50 GWを上限に新增設
・既設発電所の再稼働 / 運転期間の延長(40年→60年)
(廃炉が決定されたものを除く)
・建設が中断している新設3基が完工・運転開始
・小型モジュール炉(SMR)などを新增設

水素発電：輸入量 2000万t / 輸入価格 20円/Nm³
「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」(*3)における目標値

CO₂回収技術の導入条件 排出削減目標を達成するためCO₂回収技術を導入
CO₂の貯留・活用(CCS: Carbon Capture, Utilization & Storage)
CO₂の直接空気回収(DAC: Direct Air Capture)

(*1) (一社)太陽光発電協会 (2021年3月8日資料)

https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/026_05_00.pdf

(*2) (一社)日本風力発電協会 (2021年3月24日資料)

https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/039/039_008.pdf

(*3) 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略

https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/pdf/green_honbun.pdf

次頁以降にて、再エネ・原子力(SMR)・水素・CO₂回収を活用したケースのシミュレーション結果を紹介

2. カーボンニュートラル社会の将来像からのバックキャストिंगシミュレーション結果概要

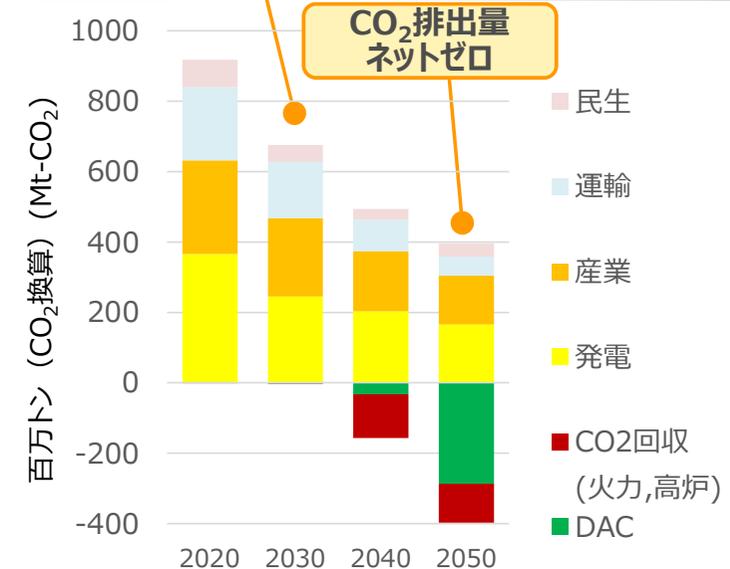
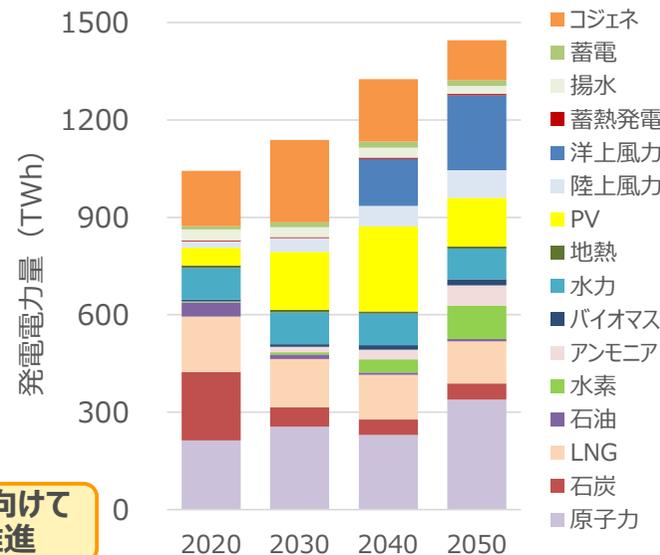
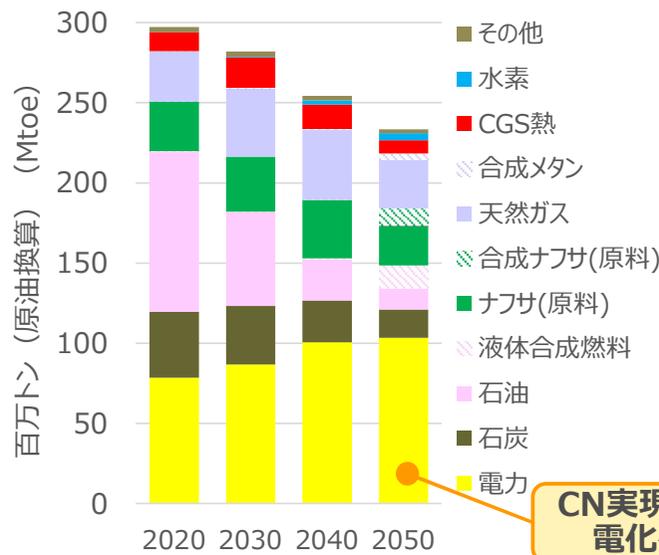
● 2030年▲46%/2050年CN実現に向けて、「総エネルギー消費量の削減」「再エネ普及」が重要

総エネルギー消費量		
	2013	2050
総需要	311 Mtoe	233 Mtoe
電力需要	1.0兆kWh	1.45兆kWh
電化率	14%	44%

電力供給量		
	2013	2050
再エネ	101TWh 11%	835TWh 58%
火力/原子力等	839TWh 89%	611TWh 42%

CO ₂ 排出量		
	2013	2050
CO ₂ 排出量	1,230 百万トン-CO ₂	実質ゼロ

▲46%(2013年比)



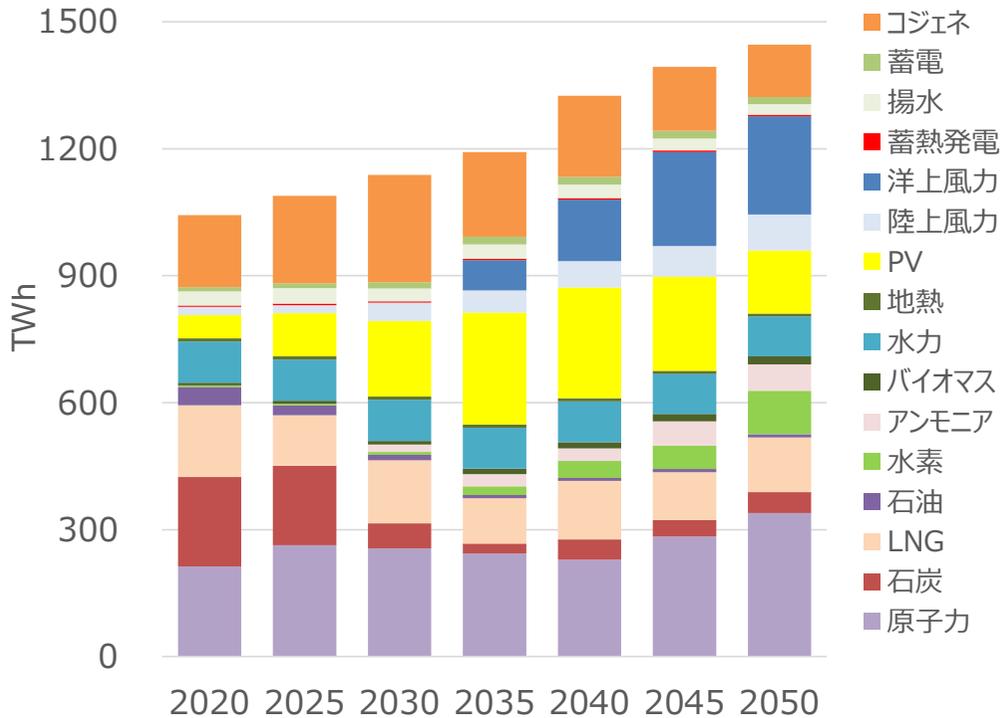
問題提起：CN実現および移行過程にて、原子力・化石燃料の電力供給力も重要ではないか

原子力・化石燃料は引き続き重要なエネルギー源、安定供給を如何に維持・確保すべきか

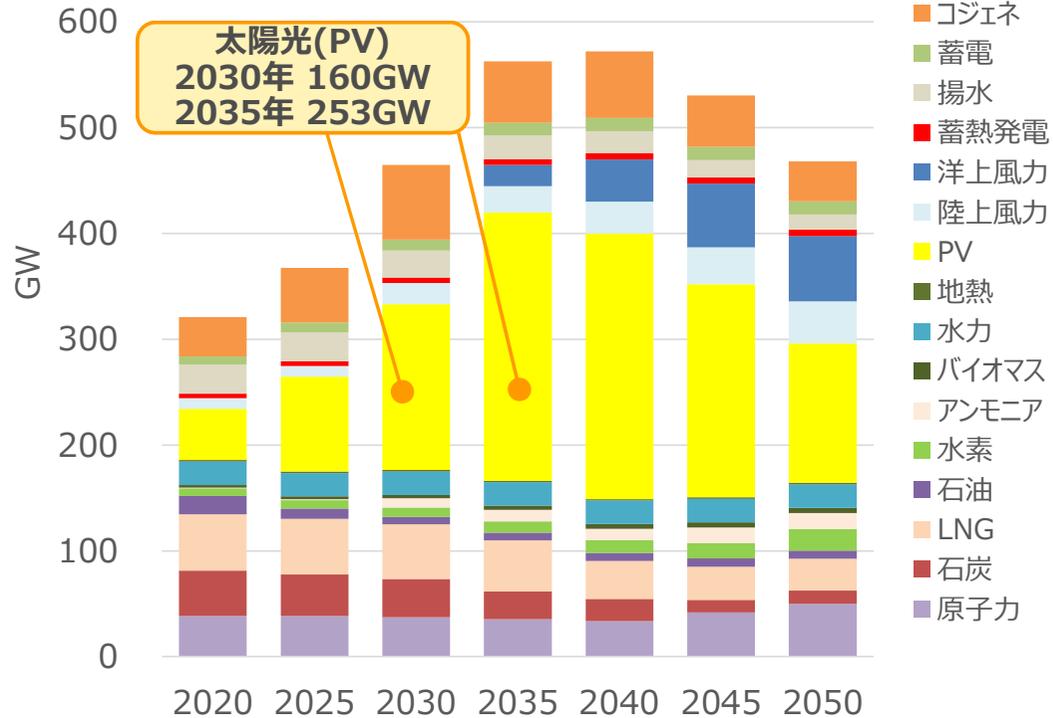
2. カーボンニュートラル社会の将来像からのバックキャストिंग 2050年CNの電力供給

- 再エネ、原子力/SMR、水素/アンモニア、CCUSの導入量について、コスト最適化を考慮して試算
- 2030年/2050年の目標達成に向けて、非連続なイノベーションと効率的な電源開発が必須

電力供給量 (TWh)



電源容量 (GW)



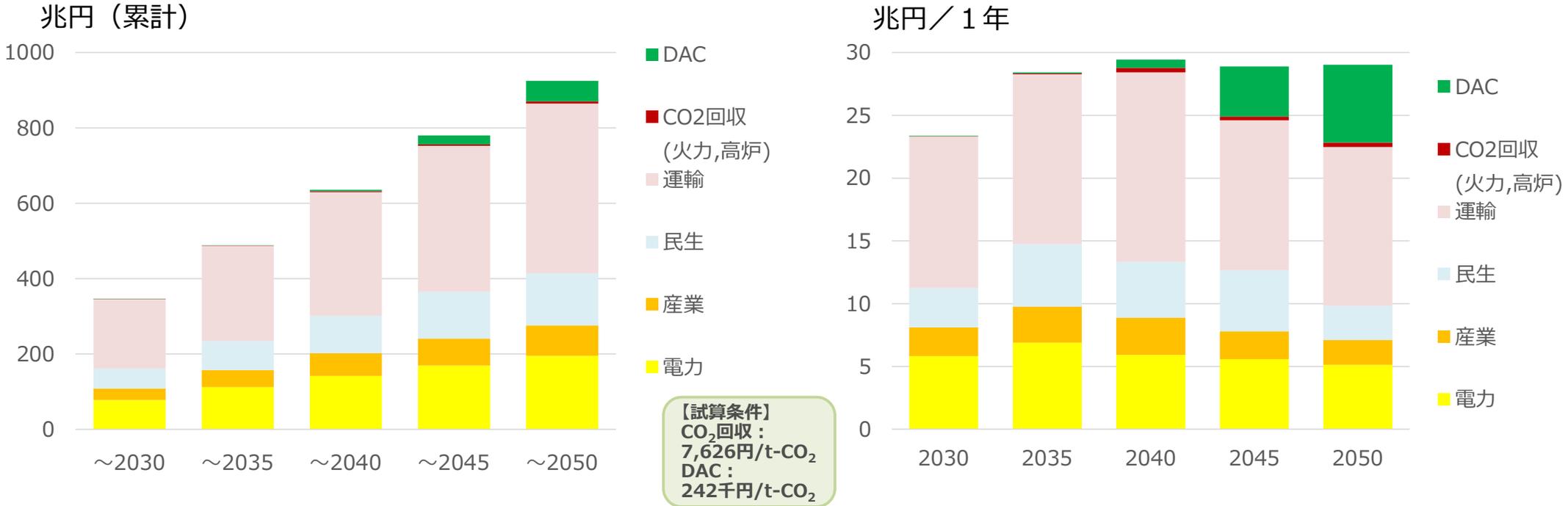
検討課題：2030年▲46% / 2050年CNの目標両方を効率的・経済的に達成するためのトランジション

2025～2035年の太陽光(PV)新設は可能か？ 代替手段によるCO₂排出削減はできないか？

2. カーボンニュートラル社会の将来像からのバックキャストイング 2050年CNの設備投資 / CO₂排出量の推移

- 投資額を分野別に積み上げ。「産業」の投資額が限定的な理由は、償却期間が長いため。
- CO₂排出 / 吸収を分野別に試算。2030年頃からCO₂吸収への投資が必要となる見込み。

脱炭素の設備投資 + 運転保守(O&M)費用



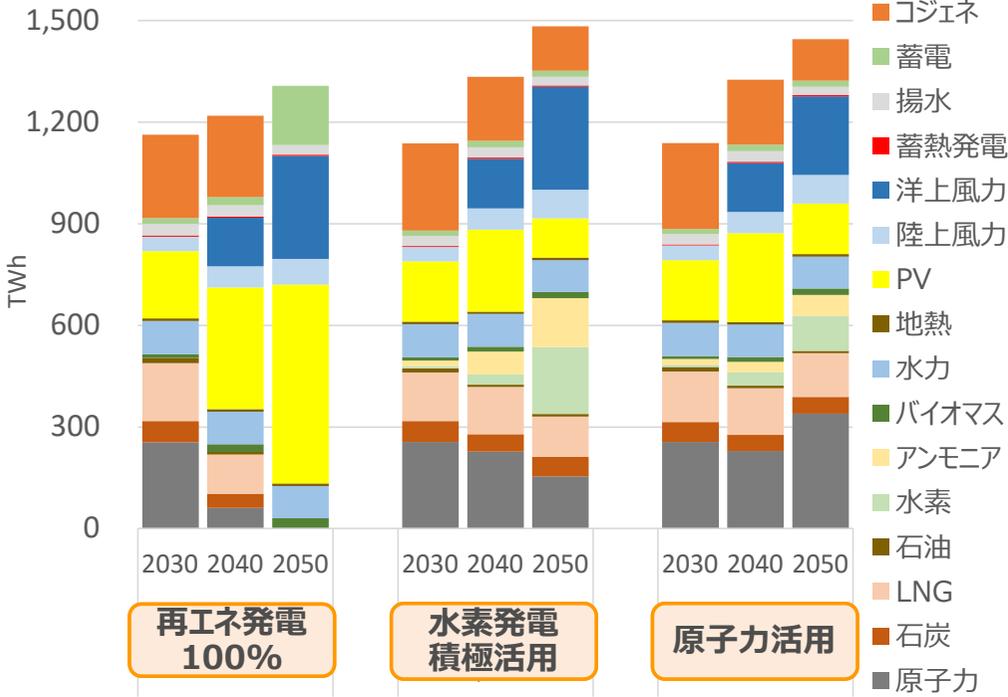
2050年CN実現に向けた複数のケースを検証

次ページにて、3ケースのシミュレーション結果を比較

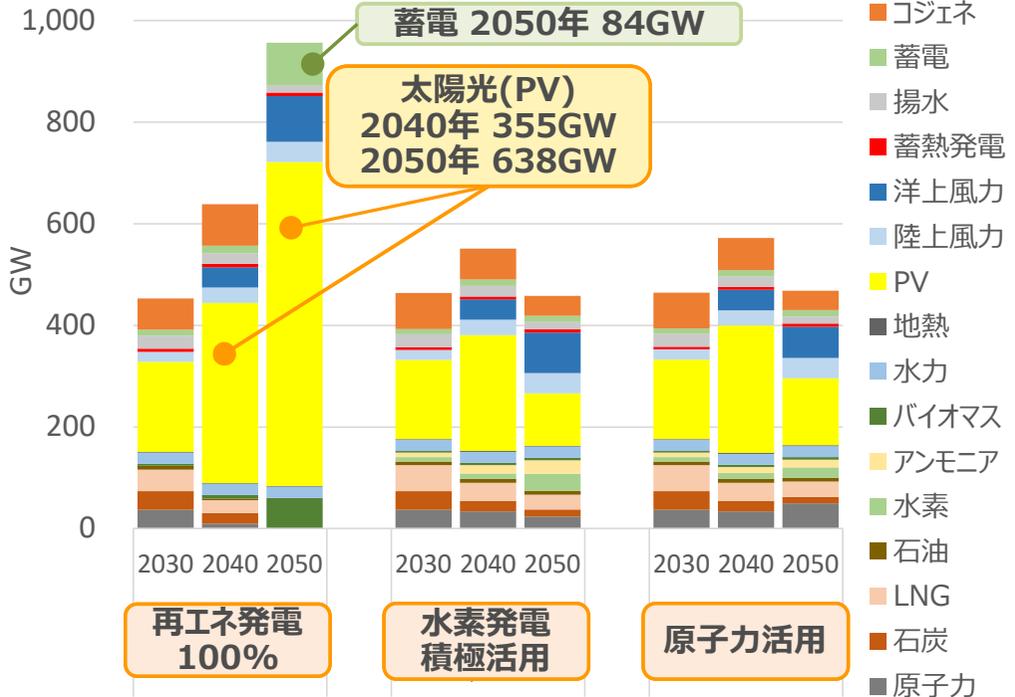
2. カーボンニュートラル社会の将来像からのバックキャストイング 複数のシナリオを比較：2050年CNの電力供給

- 2050年CNに向けて3ケースを検討
- シミュレーション条件を個別に設定 / コスト最適化し、3ケースの試算結果を比較

電力供給量 (TWh)



電源容量 (GW)



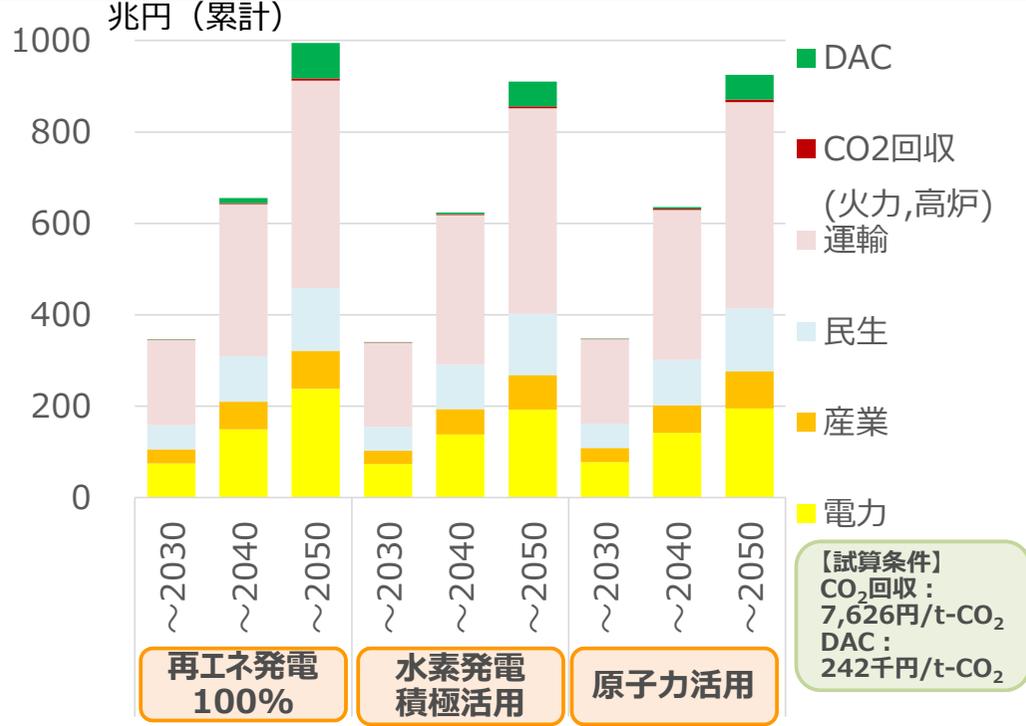
問題提起：再エネ発電100%シナリオでは、太陽光発電や蓄電池が大量に必要

設置場所の確保 / 投資コストの検証が必要

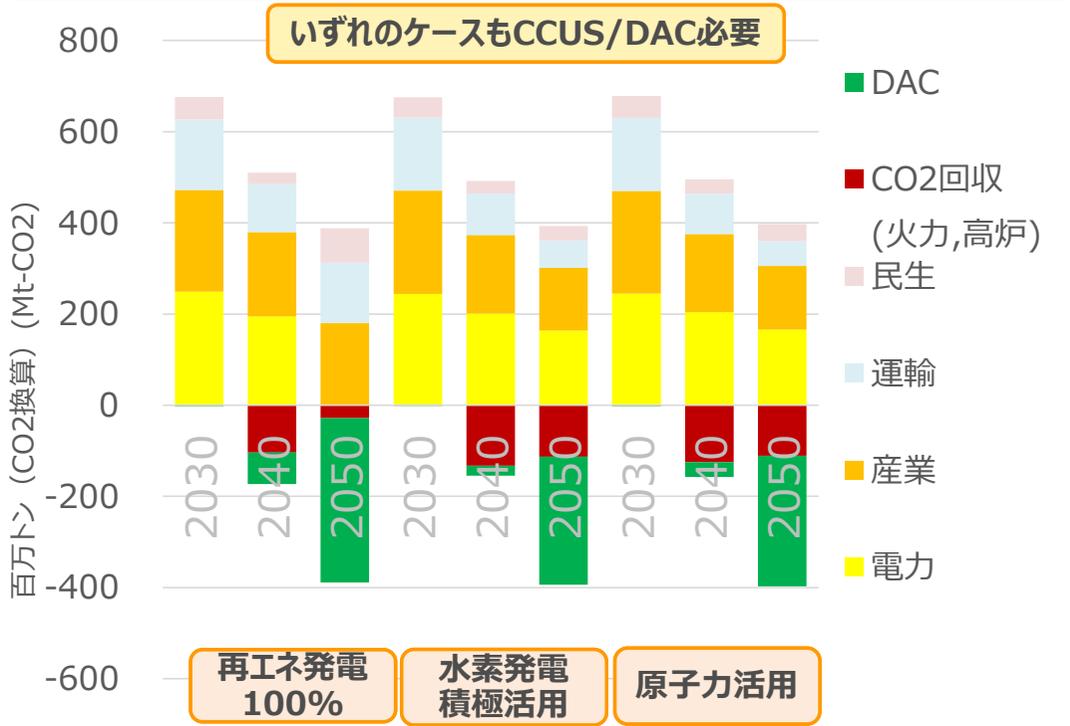
2. カーボンニュートラル社会の将来像からのバックキャストイング 複数のシナリオを比較：電力システムの設備投資 / CO₂排出量

- 投資額を比較すると、「再エネ中心」ケースでは電力分野が増え、その他分野はほぼ変わらない。
- 排出量ネットゼロの実現には、いずれも「CCUS」「DAC」が必要となる見通し。

脱炭素への設備投資 + 運転保守(O&M)費用



分野別のCO₂排出量 / 吸収量の推移



いずれのケースでも、CO₂回収 / DACが必要

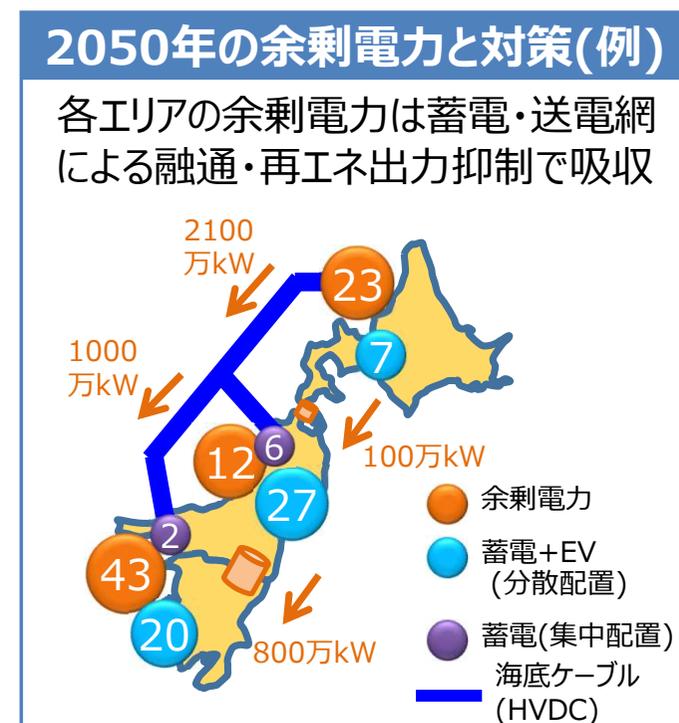
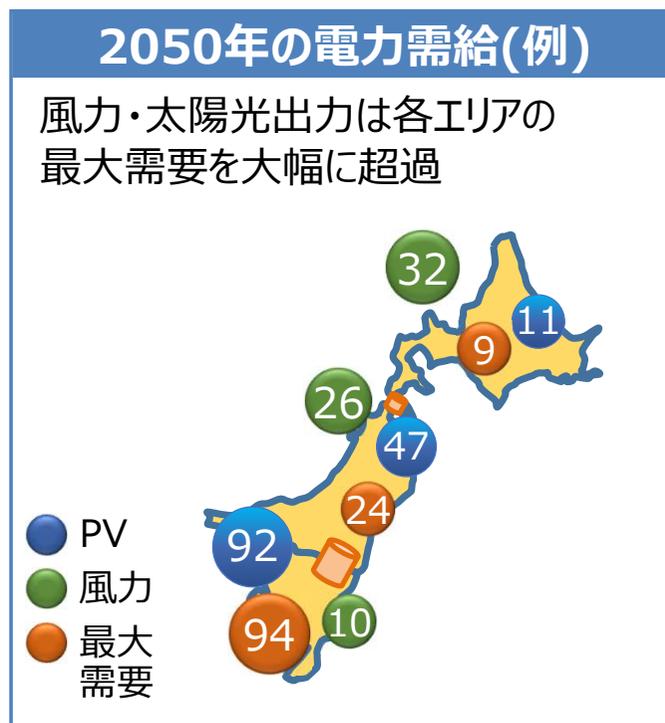
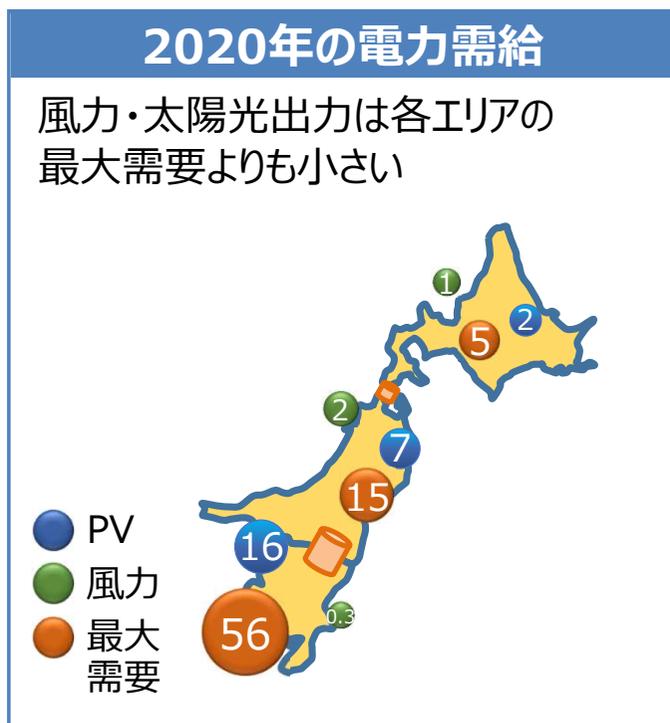
再エネ発電100%では、電気よりも他燃料がコスト優位（電化率が下がる）。

Contents

- 0. 報告の全体像の説明：「カーボンニュートラル社会のエネルギーシステム」
- 1. カーボンニュートラル社会の将来像からのバックキャスト
- 2. カーボンニュートラル実現に必要なイノベーション
- 3. 健全なカーボンニュートラルを実現するエネルギーシステム**
- 4. まとめ

3. 健全なカーボンニュートラルを実現するエネルギーシステム 再エネ電源近傍での需要創出、送電線の整備

- 2050年の姿から、洋上風力が有望な「北海道・東北」、需要が大きい「関東」の電力システムを技術的に解析
- 将来は「北海道・東北」で余剰電力が発生、2050年CN実現に向けて「需要側対策」「送電網整備」が必要

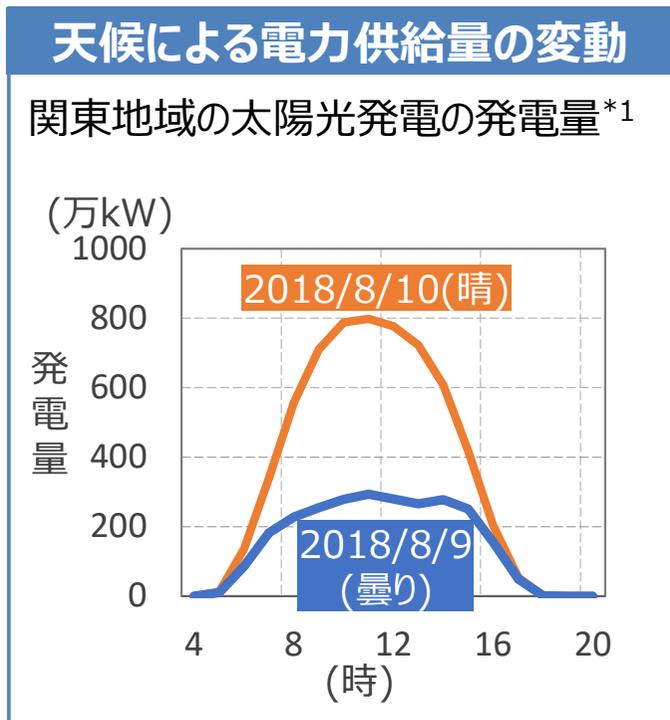


2050年CNに向けて必要な準備 : 「再エネ電源の増設」×「再エネ近傍での産業」×「再エネをつなぐ送電線」

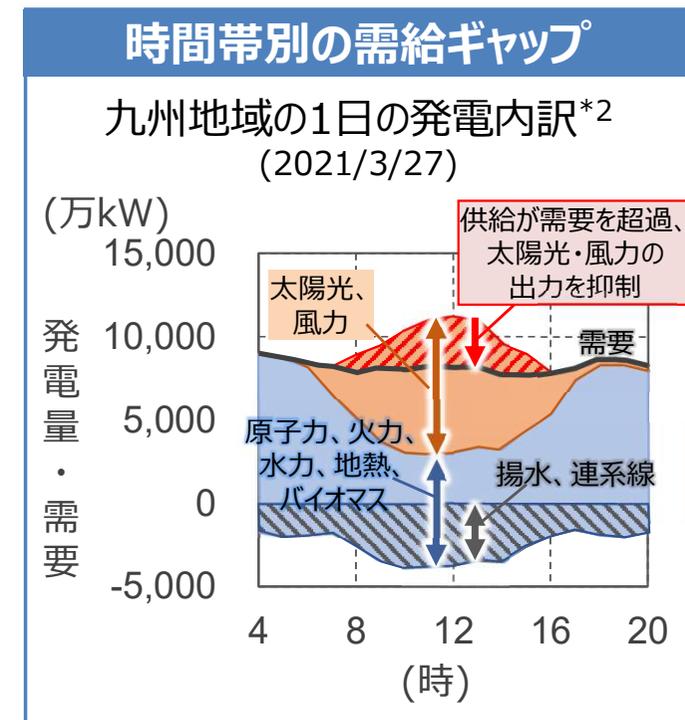
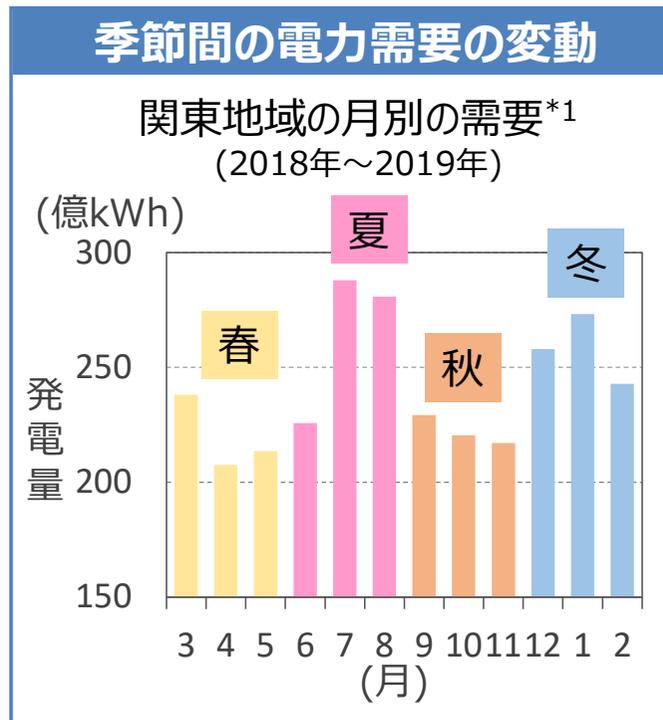
計画的な再エネの増設、再エネ近傍での水素等の製造、電源と需要地をつなぐ送電システムの整備が必要

3. 健全なカーボンニュートラルを実現するエネルギーシステム 天候・季節・時間帯での電力需給の変動対策

- 再エネは自然条件により出力変動するため、同じ季節の中でも、天候により1日の電力供給量が大きく変動
- 需要側は季節（春秋・夏・冬）にて電力需要が変動、昼・夜の時間帯別でも電力需給が大きく変動



*1: 東京電力パワーグリッド株式会社のHP公開データを元に日立製作所で作成



*2: 九州電力送配電株式会社のHP公開データを元に日立製作所で作成

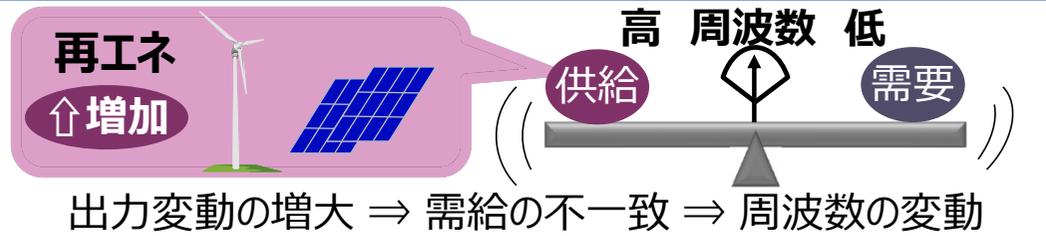
2050年CNに向けて必要な準備：季節・時間帯別の需給ギャップを埋めるための対策

需給ギャップ発生時に稼働させる発電所、余剰電力を蓄電する設備、電力の使い方の見直しなどが必要

3. 健全なカーボンニュートラルを実現するエネルギーシステム 再エネの出力変動への対応：同時同量・周波数の安定化

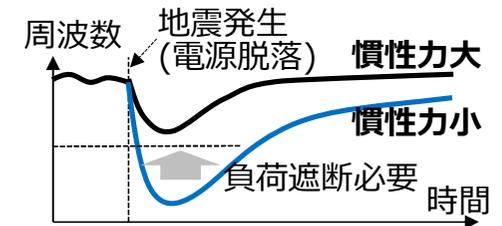
- 刻々と変化する需要と供給が一致することが必要（同時同量）。需給を一致させる「調整力」の確保が必要。
- 電力系統で働く「周波数を一定に保つ力（慣性力）」が再エネ主力電源化により低下、「慣性力」の確保が必要。

再エネの出力変動の影響



再エネ主力電源化による周波数への影響

落雷・地震時に電源が脱落し周波数が低下、緊急制御(負荷遮断)で大停電が発生・拡大する可能性あり。



「同時同量」の問題を解消する「調整力」

蓄電池の充放電などで需給の不一致を解消



蓄電池の充放電



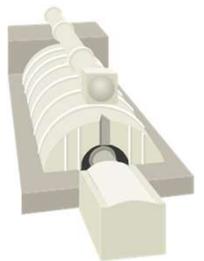
EVの充放電



電力消費時刻の調整

周波数を一定に保つ「慣性力」

- ・火力発電機の「低出力」「多数台」運転 (+新燃料、CCS)
- ・再エネインバータの「擬似慣性制御」
- ・「同期調相機」の導入 など



2050年CNに向けて必要な準備：「調整力」「慣性力」の確保が必要

調整力・慣性力を効率的に供給する技術イノベーションの段階的導入が不可欠

Contents

0. 報告の全体像の説明：「カーボンニュートラル社会のエネルギーシステム」
1. カーボンニュートラル社会の将来像からのバックキャスト
2. カーボンニュートラル実現に必要なイノベーション
3. 健全なカーボンニュートラルを実現するエネルギーシステム
- 4. まとめ**

4. まとめ

カーボンニュートラル実現の課題と必要なイノベーション

1. **リードタイムを考慮した電力システム計画の策定/早期着手が必要。**
 - a. 再エネ電源の計画的な開発
 - b. 再エネ電源の近傍での産業の創出（水素の製造等）
 - c. 再エネ電源と電力需要地をつなぐ送電システムの整備
 - d. 季節・時間別の需給ギャップ対策（発電所、蓄電池、電力の使い方の見直し等）
 - e. 調整力・慣性力を効率的に供給する技術イノベーションの段階的導入

2. **2050年CNに向けたトランジション（移行過程）では「原子力」「化石燃料」の活用が必須。安定供給の維持・確保に向けた対策が必要ではないか。**

3. **2030年/2050年目標を経済的に達成するため、現実的かつ効率的な計画を立てるべき。**

2030年目標達成に必要な太陽光(PV)導入量を確保できるか？
国内で排出削減の取り組みをする以外に、CO₂排出削減の貢献はできないか？

4. **産業では脱炭素が困難な分野が残る。電源の脱炭素以外に、CO₂吸収事業が必要。**