



**H-UTokyo Lab.**

日立東大ラボ 産学協創フォーラム

「第5回 Society5.0を支えるエネルギーシステムの実現に向けて」

## 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**

東京大学名誉教授

2023年1月25日

## エネルギー安定供給に関する課題整理と施策について検討評価

### 第4回フォーラム(2021年12月)

■ 再エネ拡大と増大する電力需要への対策を目的に複数のシナリオと対策効果を検証

1. 安定電源の重要性：  
再エネ拡大、火力縮小をバランスする  
原子力等安定電源の確保
2. 安定供給のための蓄エネ配置：  
洋上風力向けの大規模蓄電と  
分散PV向けのEV活用
3. 消費者が脱炭素を選択する社会：  
CO<sub>2</sub>見える化、複雑化するサプライチェーン  
の社会モデル構築とデジタル解析による  
脱炭素スマート化

### 今回

■ 国際情勢を踏まえたエネルギーシナリオの見直しおよび新たな課題抽出と対策を検証

1. 燃油価格の高騰に伴う  
エネルギーシナリオの変化
2. 再エネ導入量の急拡大に備えた  
基幹システムの課題と対策

- (1) 燃油価格が高騰しているがカーボンニュートラルが可能となるシナリオはあるか？これまでとどう違ってきた？**
- (2) カーボンニュートラルへの過程でおこる基幹システムの課題はなに？解決策はある？**



**将来を想定したシミュレーションで評価してみました。**

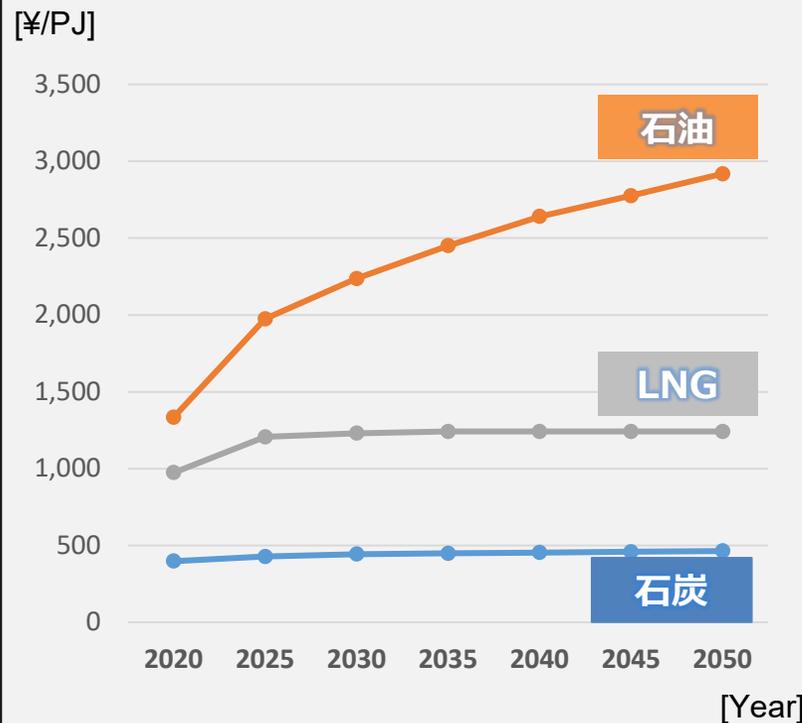
## 燃油価格高騰を考慮したCNの移行プロセスの姿を検討

Case0: 米国EIA<sup>\*1</sup>試算 (Annual Energy Outlook 2022, Long Term Outlook<sup>\*2</sup>)を基に設定

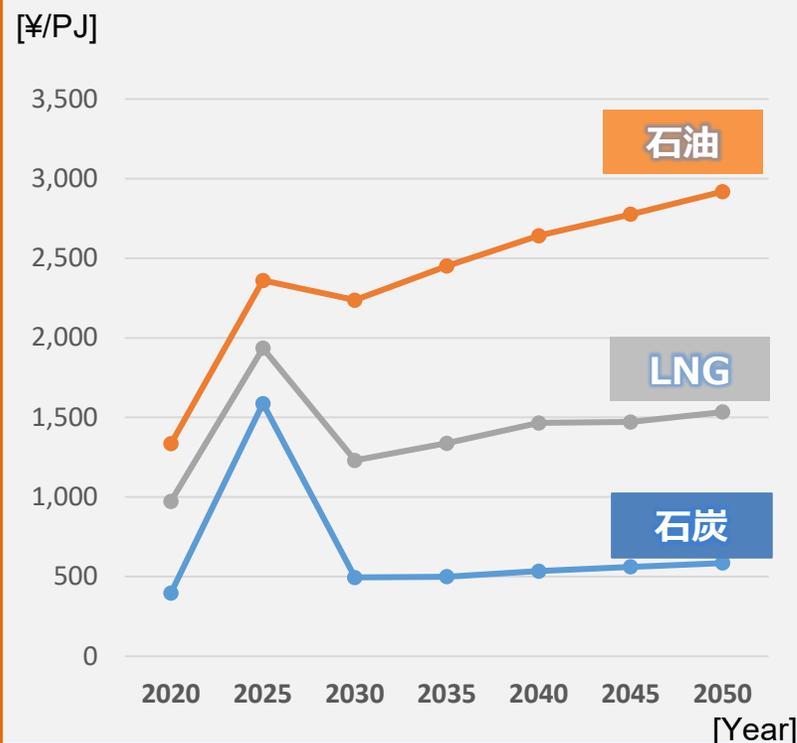
Case1: 現在の燃油市況価格は2030年までに沈静化し、長期トレンドに戻る<sup>\*3</sup>

### Case 0 : ウクライナ侵攻前長期見通し

(日立東大ラボ第4回フォーラム報告)



### Case 1 : 燃油価格高騰一過性



### ◆ 検討条件

・シミュレーションツール：  
東京大学・藤井・小宮山研  
エネルギー需給をたもちつつ、  
システム総コストを最小にするような、  
2050年までの移行計画を各年  
8760時間を考慮し最適計算  
(技術選択モデル)

・CO<sub>2</sub>削減量：  
46%削減@2030年、  
CN@2050年

・燃油価格トレンド  
Case 1を採用

\*1 EIA: Energy Information Administration (米国エネルギー省) エネルギー情報局

\*2 EIA Outlook 2022: <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/>

\*3 2025年は現在の燃油市況価格を、2030年以降は米国EIA予測を元に作成

## 2-2. 2050年CN達成時の検討条件（前回フォーラムでの検討）

### CCS、水素輸入等の設定を変えて異なる電源・需要構成を最適化結果として算出

	①再エネ100%	②火力CCS制限	③原子力活用	④水素調達
原子力稼働年	停止	60	←	←
原子力設備容量上限(GW)	0	24	50(SMR)	←
火力CCS上限(ton)	2億	1億	2億	←
水素輸入上限(ton)	2,000万	←	←	上限なし
水素単価(¥/Nm <sup>3</sup> )*1	20	←	←	←
FCV価格(現状比)	0.68	←	←	0.20
EV価格(現状比)	0.68	←	←	←
太陽光上限(GW)	なし	←	←	←
陸上風力上限(GW)	40	←	←	←
洋上風力上限(GW)	90	←	←	←
太陽光建設コスト(万円/kW)	15	←	←	←
陸上風力建設コスト(万円/kW)	21	←	←	←
洋上風力建設コスト(万円/kW)	51	←	←	←
CCSコスト(¥/tonCO <sub>2</sub> )	7450	←	←	←
DACコスト(¥/tonCO <sub>2</sub> )	10,340	←	←	←
LiB蓄電コスト(¥/Wh)	10	←	←	←

PV、風力など再エネのみ

火力発電のCCS貯留量  
に制限あり

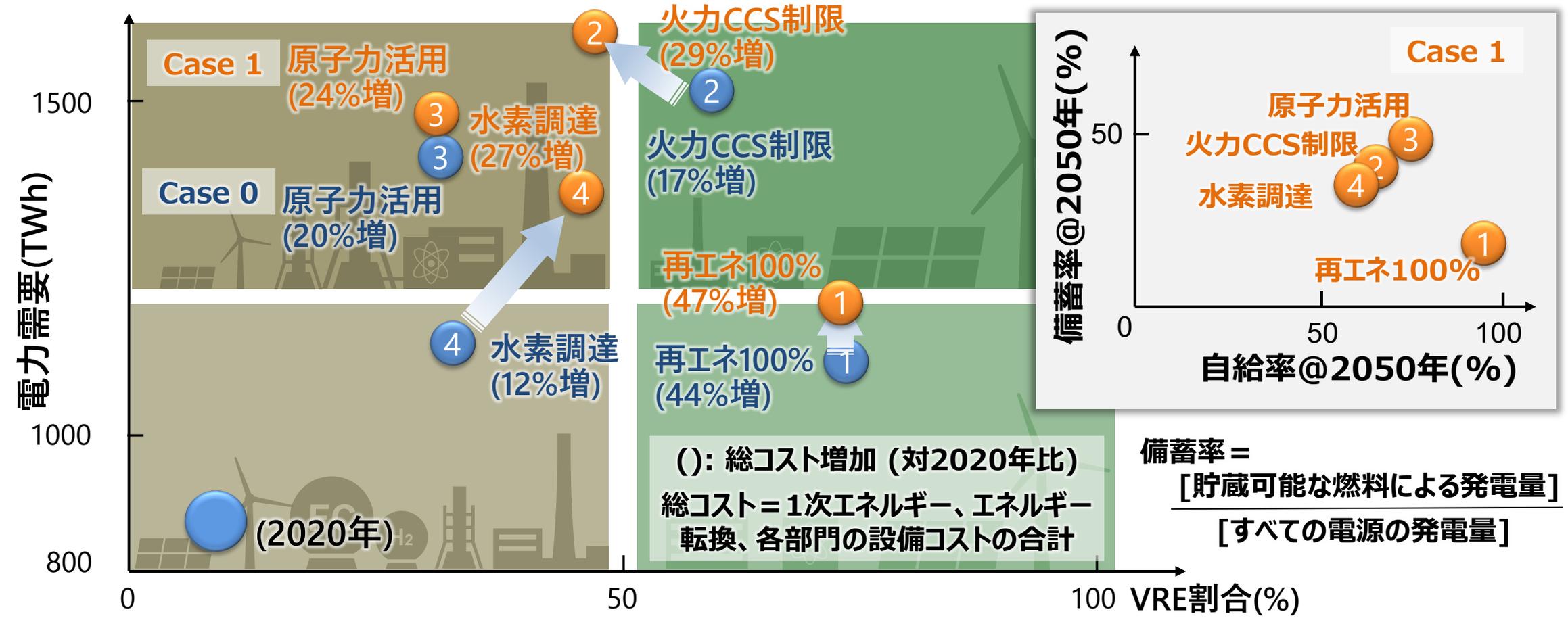
2040年以降にSMRを  
増設する

水素を海外から輸入

# 2-3. 燃油価格の高騰を考慮したエネルギーシナリオ:

## Case0 → Case1: 燃油価格高騰一過性ケース

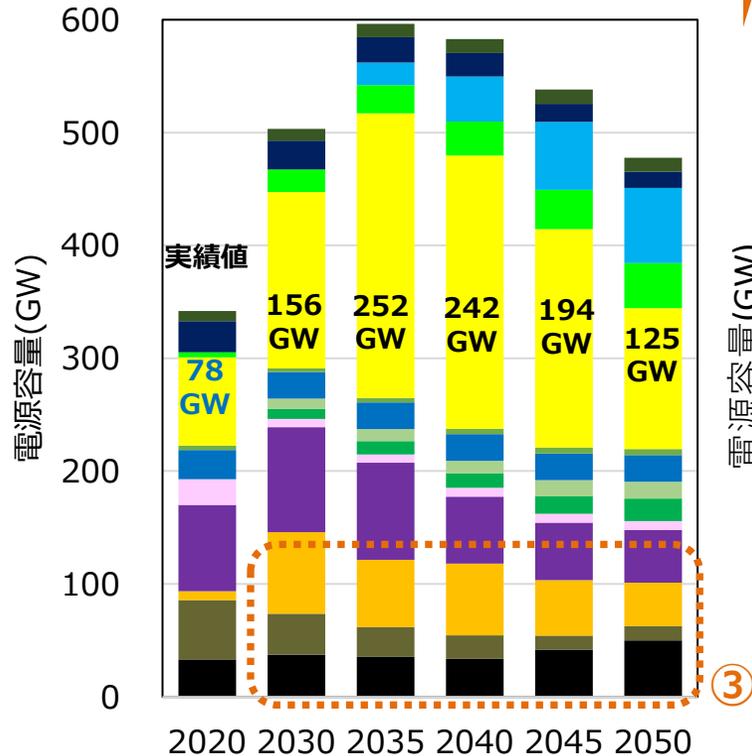
燃油価格が高騰してもカーボンニュートラルを達成できる解はある  
 電力需要は増加、水素の原料利用が進展、エネルギー総コストは2020年比20~50%増



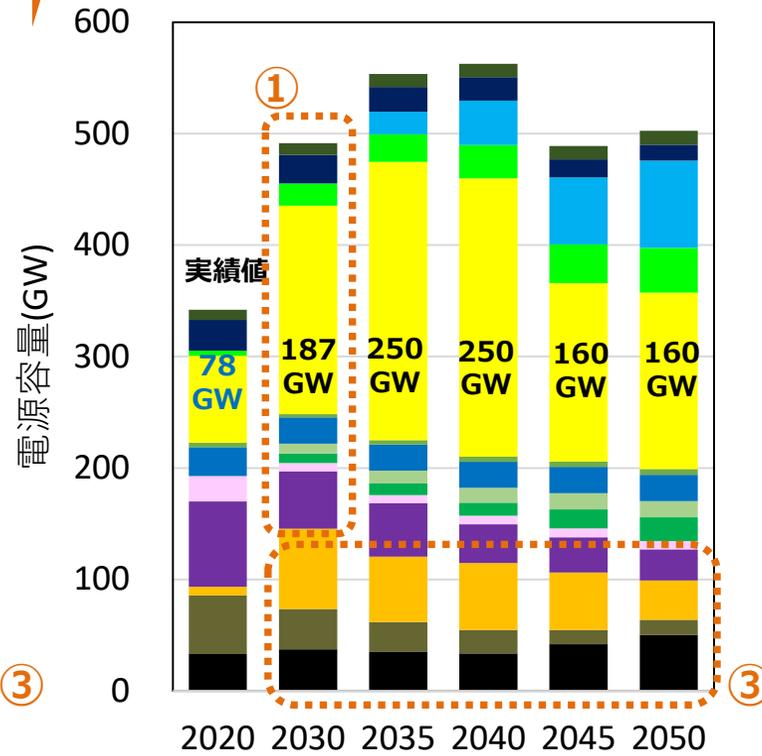
総コスト増、自給率、備蓄率のバランスから、次ページ以降「③原子力活用」をベースケースとして検証

## 2030年にPVは倍増、コジェネなど高効率熱利用、原子力再稼働でカーボンニュートラル達成

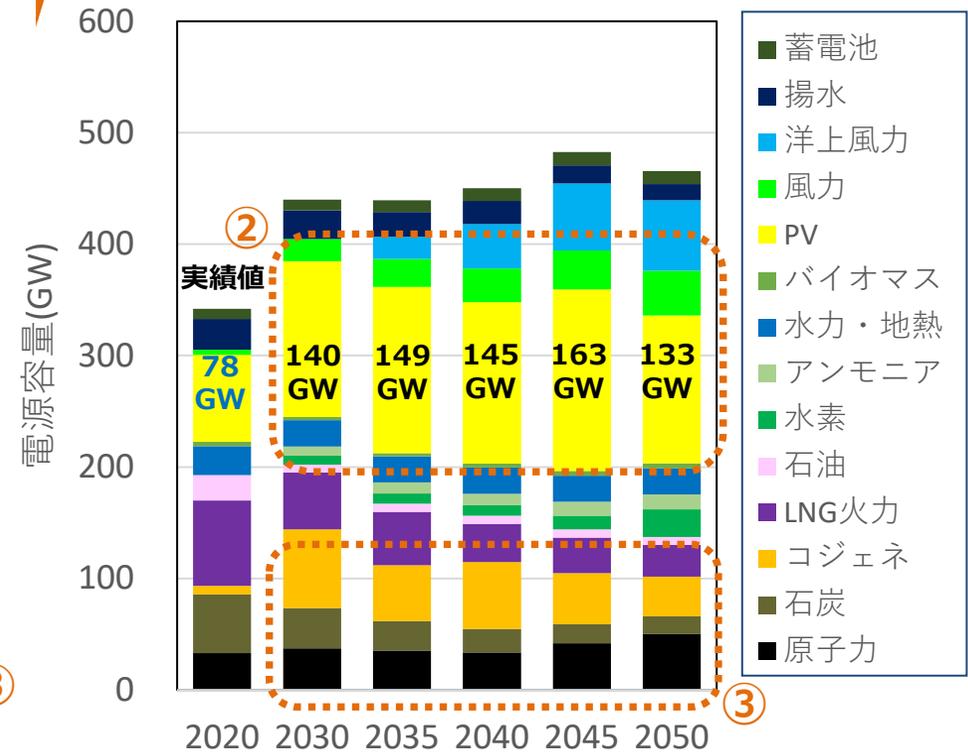
**Case 0 : ウクライナ侵攻前長期見通し (第4回フォーラム報告)**



**Case 1 : 燃油価格高騰一過性 (燃油価格高騰を反映)**



**Case 1' : 燃油高騰+フォアキャストによる補正 (Case1'からPV廃棄量を低減)**



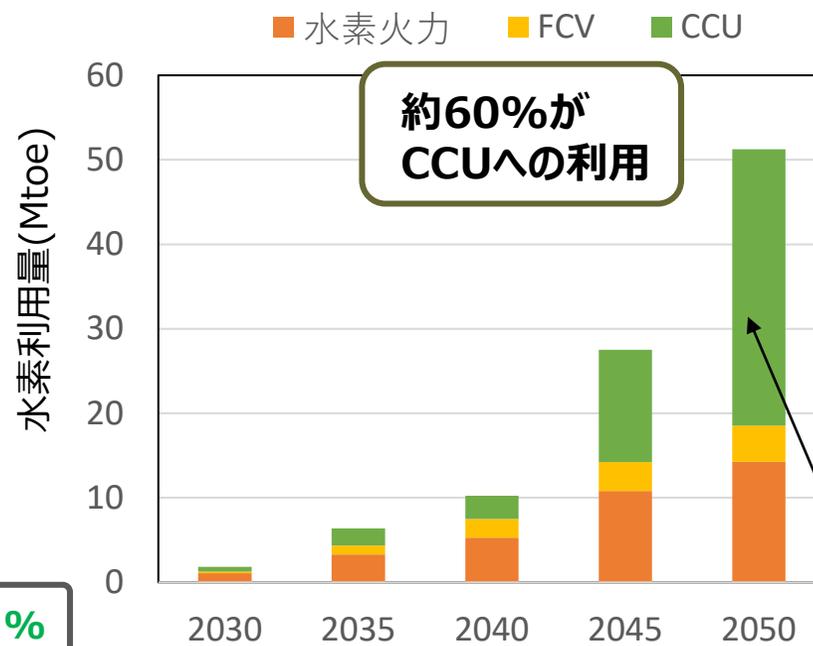
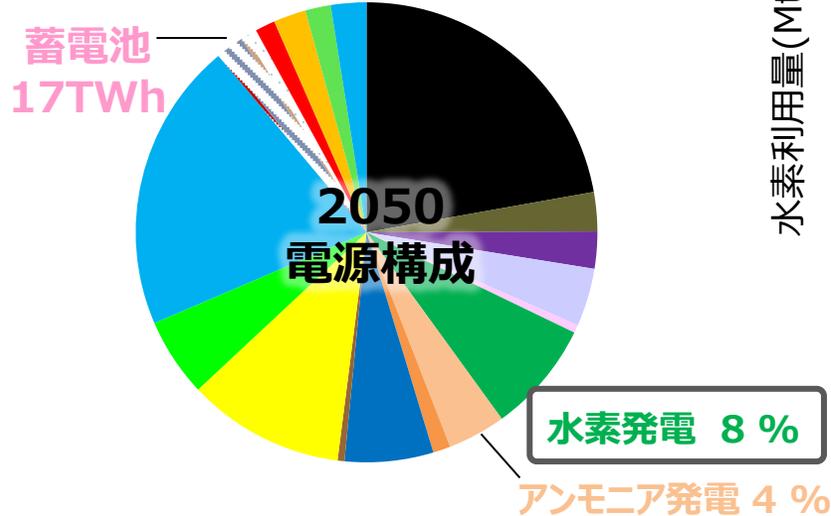
- ① 燃油価格の高騰により2030年では再エネ増, 化石燃料発電削減が必要
- ② 「PV新設→短期間で廃棄」を回避するための補正シナリオも可能(Case1')
- ③ コジェネ等による熱利用, 原子力活用が重要

# 2-5. 不確実性を考慮したCNの移行プロセスの姿 原子力活用シナリオ：水素の利用

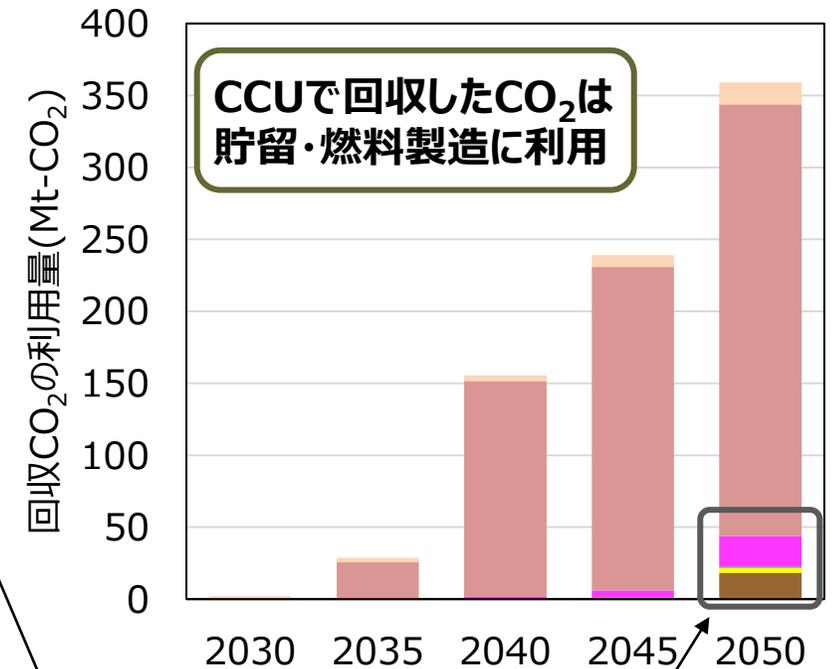
水素は発電に加えてCO<sub>2</sub>からの新燃料製造に活用,  
蓄電池17 TWh導入や原子力等の安定電源確保でレジリエンス・セキュリティ面に貢献

## Case1: 燃油価格高騰一過性ケース

- 原子力
- 石油
- 水力
- 洋上風力
- Li-ion
- 家庭CGS
- 石炭
- 水素
- 地熱
- 蓄熱発電
- GT CGS
- LNG汽力
- アンモニア
- PV
- 揚水
- GE CGS
- LNG複合
- バイオマス
- 風力
- NAS
- 業務CGS



- メタン製造
- ガソリン製造
- ジェット燃料製造
- 灯油製造
- CO2貯留
- エタノール等石化原料製造
- 軽油製造



### 1. 燃油価格の高騰に伴うエネルギーシナリオの変化

- (a) 脱炭素電源の早期確保が必要（再エネ導入前倒しと原子力活用など）
- (b) 水素利用の多様化：発電以外にも合成燃料などへの活用が必要
- (c) 熱の効率的利用が必要

### 2. エネルギーのレジリエンス, セキュリティ

- (d) レジリエンス：蓄電池17TWhなど、中長期のエネルギー貯蔵・備蓄が必要
- (e) セキュリティ：エネルギー自給率増，国際調達・協力体制が重要

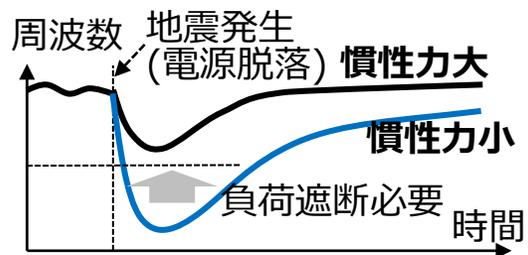


**次にこれらの電力面の流通を支える基幹システムシステムの課題と対策を示す**

## (2) カーボンニュートラルへの過程でおこる基幹システムの課題はなに？ 解決策はある？

### ① 周波数低下

地震時の電源脱落で周波数が急低下  
→ 電源脱落や停電範囲拡大が懸念



火力発電等の回転機減少で慣性低下が要因

### ② 周波数変動

再エネ出力急変により需給不均衡となり周波数変動発生が懸念



### ③ 系統安定性の低下

偏在する再エネ電力を需要地へ送電する能力に限界

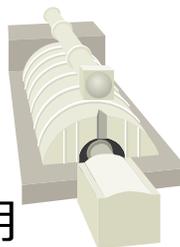


落雷時等の系統安定性や熱容量から送電に限界

### 解決策 (提言)

#### 慣性増

- 火力機「低出力・多数台」運転 (新燃料、CCS), 原子力機活用
- 再エネインバータの「擬似慣性制御」や「同期調相機」の導入

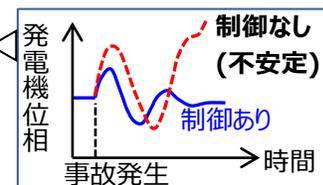


#### 調整力確保

- 蓄電やEVの充放電
- 電力消費の制御 (デマンドレスポンス)



#### HVDC等による増強, 分散リソースの電力制御で系統安定性改善



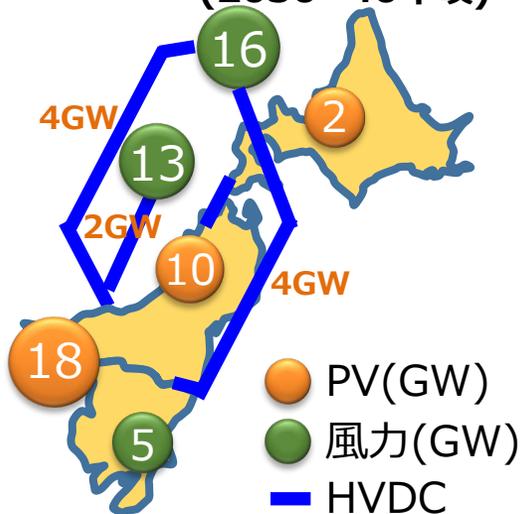
## 3-2. 再エネ急拡大に備えた系統対策：①周波数低下

課題：再エネ発電が大きい時間帯に慣性が低下し、電源脱落時の周波数低下大  
 提言：慣性増加のため、回転型発電機（火力・原子力等）の運転台数の確保が必要

### 検討条件

- ・系統：電力会社公開情報等から系統解析モデル作成
- ・OCCTOマスタープラン電源偏在シナリオ(45GW)から発電・需要条件を設定
- ・故障条件：福島近隣火力機7.1GWを一斉解列

(2030~40年頃)



SNSP\*1

25% (夜間など)

75% (PV発電大)

75% (PV発電大)

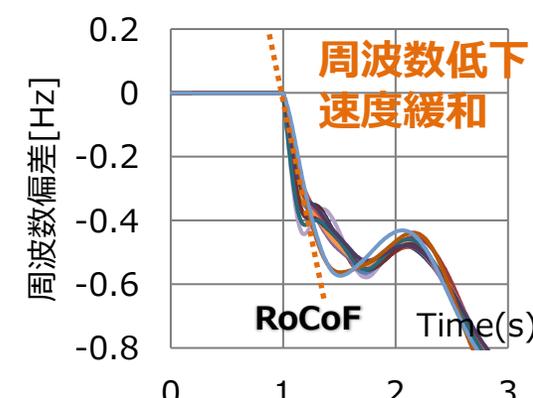
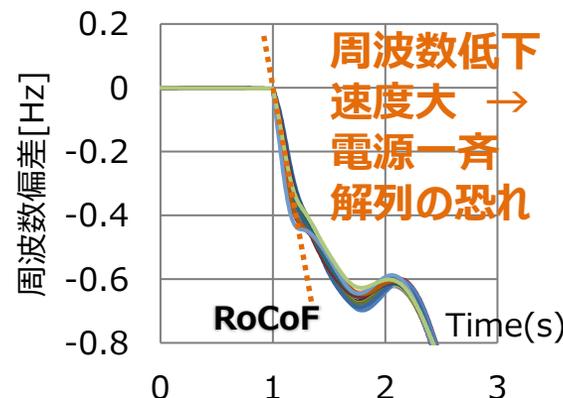
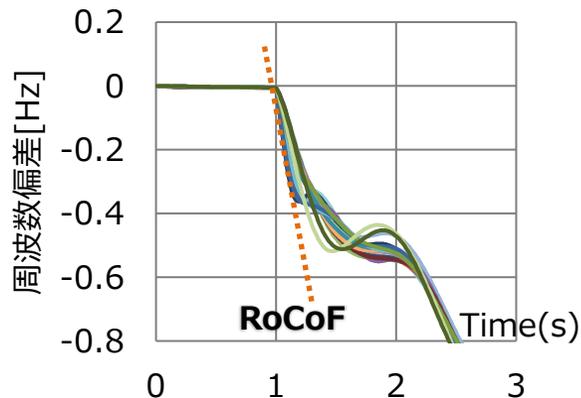
系統の慣性

132 % (299 GWs)

100 % (227GWs)

115 % (261 GWs)  
 (回転機台数増)

発電機周波数(東北)

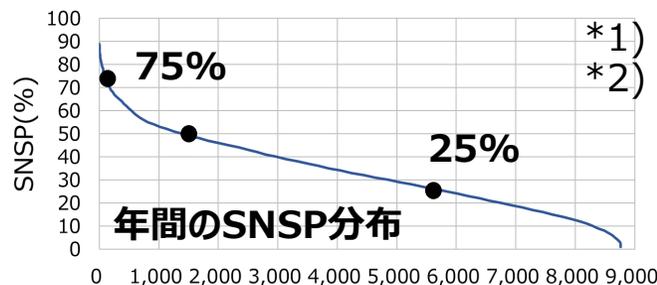


RoCoF\*2 (<2Hz)

-1.5 Hz/s ○

-2.3 Hz/s ×

-1.96 Hz/s ○



\*1) SNSP(瞬間的な非同期電源比率): System Non-Synchronous Penetration  
 \*2) RoCoF(周波数変化率):Rate of Change of Frequency

・前述のシナリオの過酷条件を想定し電源脱落時の周波数維持が難しい(SNSP大の)時間帯を年間8760時間から選びシミュレーション実施。

### 3-3. 再エネ急拡大に備えた系統対策：①周波数低下

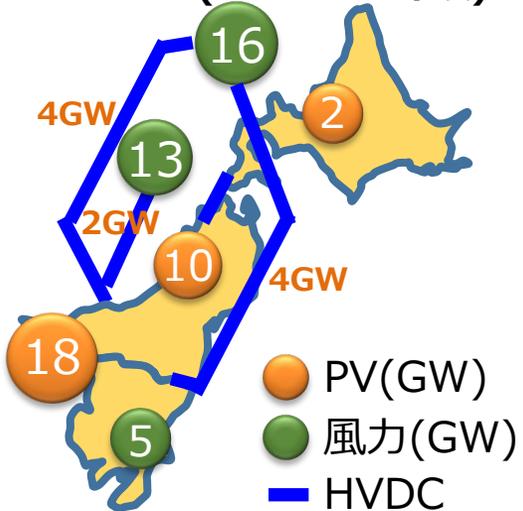
課題：再エネ発電が大きい時間帯に慣性が低下し、電源脱落時の周波数低下大

提言：電源脱落直後の周波数低下を改善する再エネ・分散リソースのインバータ慣性制御が必要

#### 検討条件

- ・系統：電力会社公開情報等から系統解析モデル作成
- ・OCCTOマスタープラン電源偏在シナリオ(45GW)から発電・需要条件を設定
- ・故障条件：福島近隣火力機7.1GWを一斉解列

(2030~40年頃)



SNSP\*1

75% (PV発電大)

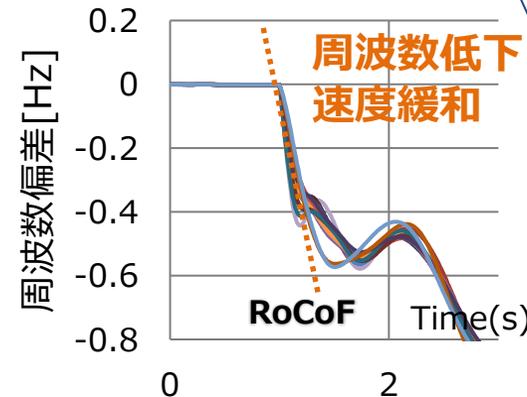
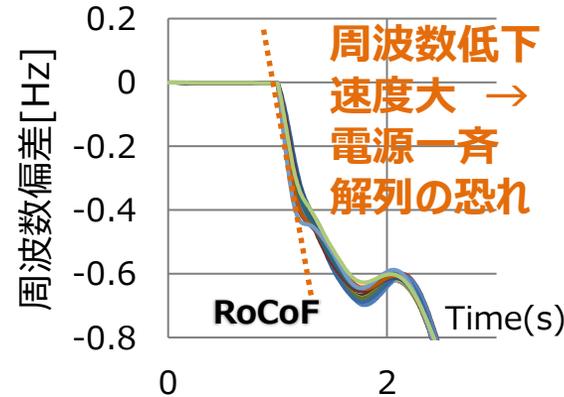
75% (PV発電大)

制御

—

インバータ慣性制御

発電機周波数 (東北)

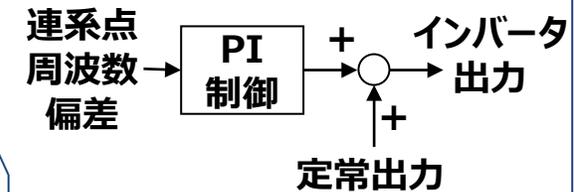


RoCoF\*2 (<2Hz)

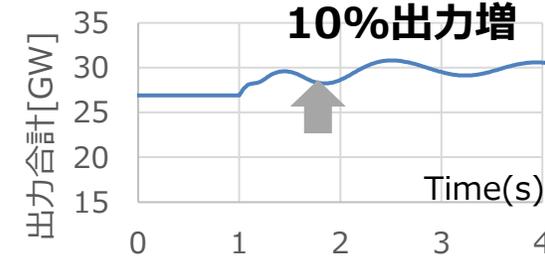
-2.3 Hz/s ×

-1.95 Hz/s ○

#### インバータ制御構成



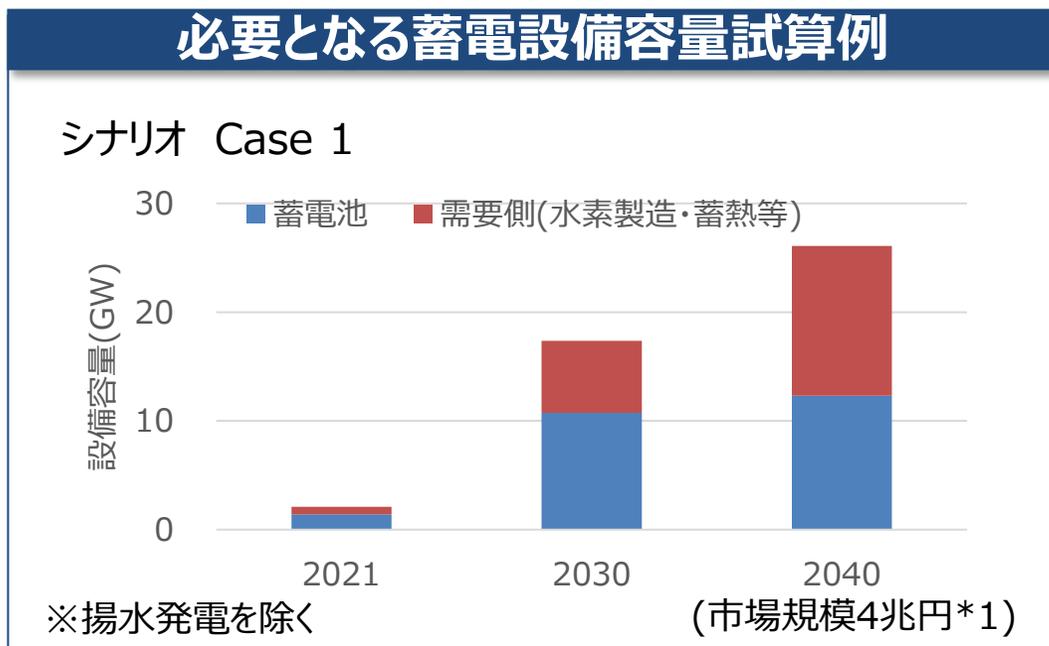
#### 分散リソース出力 (合計)



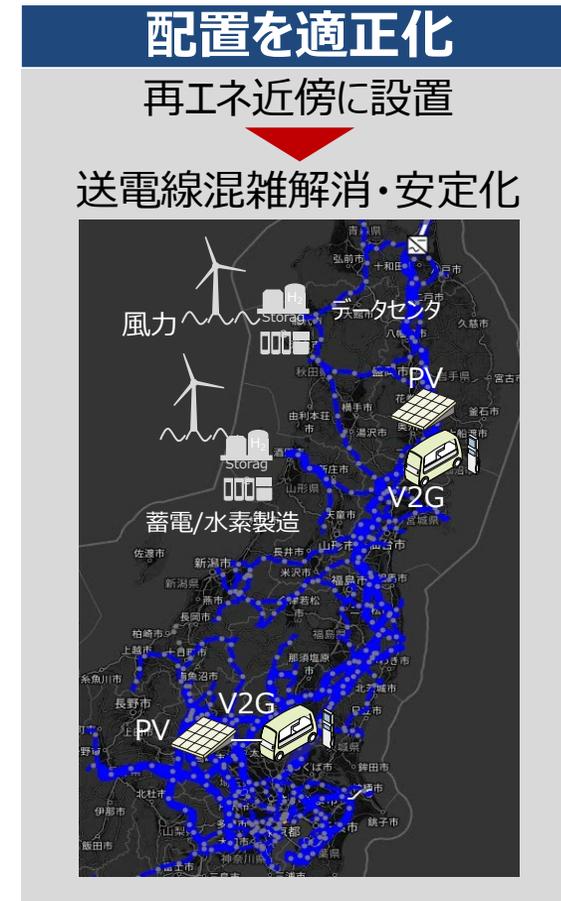
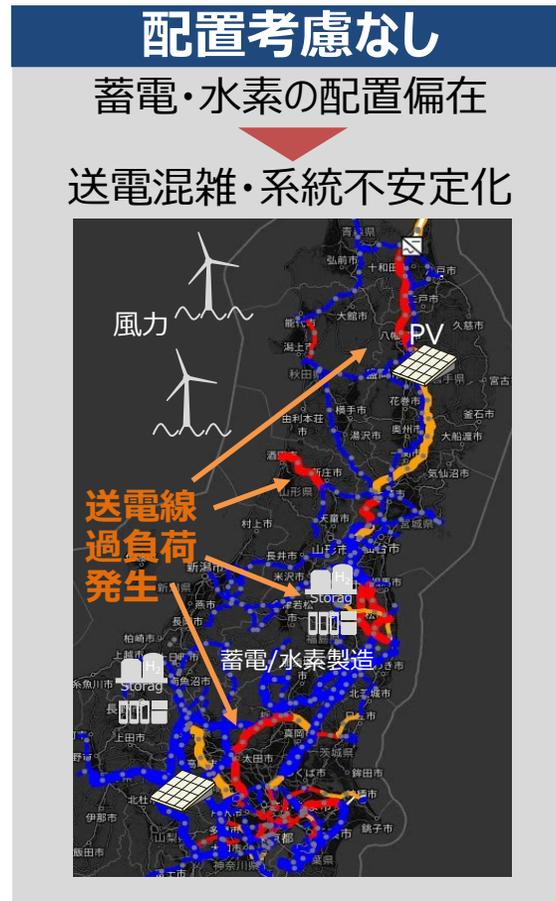
◆開発課題：インバータ制御方式・パラメータ決定，出力抑制時の再エネ出力増加制御

# 3-4. 再エネ急拡大に備えた系統対策：②周波数変動

課題：再エネ出力変動により需給不均衡となり周波数が変動，再エネ発電ピーク時には出力抑制や系統混雑発生  
 提言：分散リソース活用と需要の配置誘導によって系統混雑解消を解消しつつ調整力の確保が必要



- ### 配置適正化による対策のポイント
- EV充放電は分散されたPVの変動対策に有効
  - 発電近傍にデータセンタ・水素製造など需要を誘導



地域社会での調整力捻出については，次の発表で詳細報告

\*1) 設備の充放電時間4h, 40円/Whとして試算

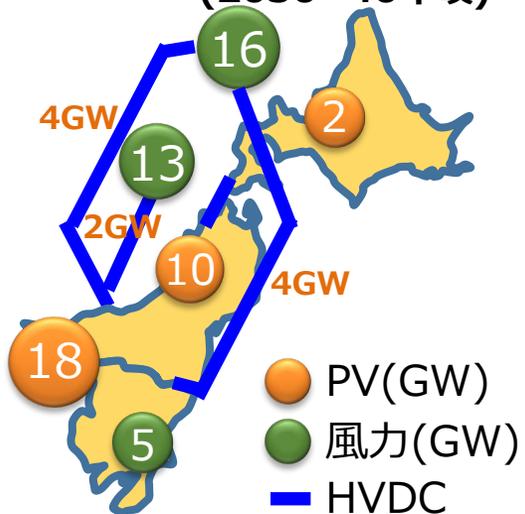
WF: Wind Farm, PV: Photovoltaic, V2G: Vehicle to Grid, HVDC: High Voltage Direct Current (直流送電)

# 3-5. 再エネ急拡大に備えた系統対策：③系統安定性の低下

課題：偏在する再エネ電力を需要地へ送電する能力に限界  
 提言：送電増強・系統安定化による広域送電電力の拡大が必要

## 検討条件

- ・系統：電力会社公開情報等から系統解析モデル作成
- ・OCCTOマスタープラン電源偏在シナリオ(45GW)から発電・需要条件を設定
- ・故障条件：岩手北部で落雷による2回線地絡故障(6LGO)(2030~40年頃)

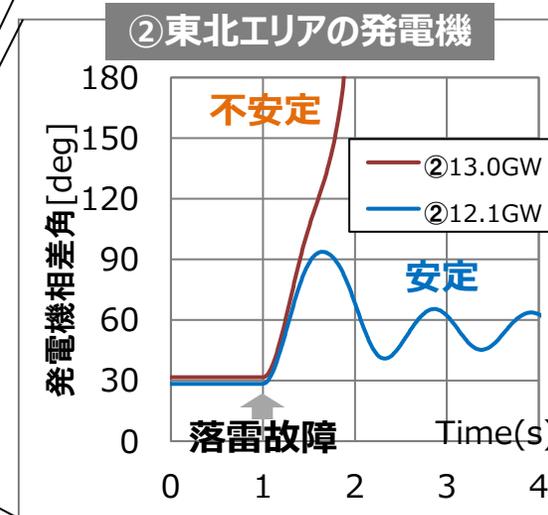
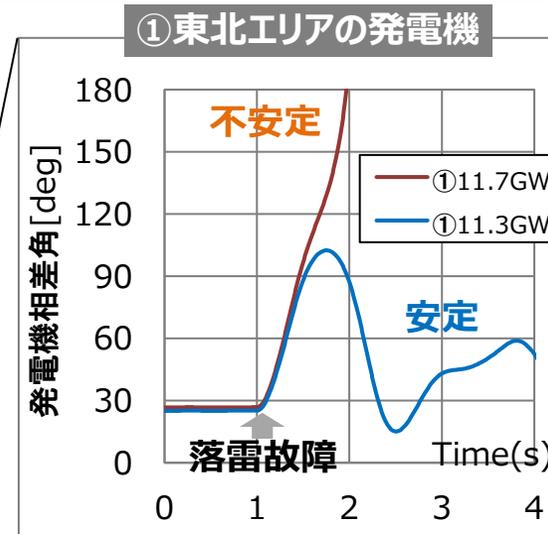


## 東北再エネ大, 関東需要大の重潮流断面



\*1: 洋上風力からの10GW(4+4+2GW)のHVDC送電量は除く

#	対策	東北東京間送電電力
(a)	ベース条件 (交流系統増強)	9.3 GW
(b)	HVDC 2GW 設置	11.3 GW
(c)	再エネ/蓄電の安定化制御	12.1 GW



HVDC: High Voltage Direct Current (直流送電), 6LGO: 2回線×3相地絡故障

参考：電力広域的運営推進機関「マスタープラン 中間整理」[https://www.occto.or.jp/iinkai/masutapuran/2021/210524\\_masutapuran\\_chukanseiri.html](https://www.occto.or.jp/iinkai/masutapuran/2021/210524_masutapuran_chukanseiri.html)

### 1. 燃油価格の高騰に伴うエネルギーシナリオの変化

- (a) 脱炭素電源の早期確保が必要（再エネ導入前倒しと原子力活用など）
- (b) 水素利用の多様化：発電以外にも合成燃料などへの活用が必要
- (c) 熱の効率的利用が必要
- (d) レジリエンス：蓄電池17TWhなど、中長期のエネルギー貯蔵・備蓄が必要
- (e) セキュリティ：エネルギー自給率増，国際調達・協力体制が重要

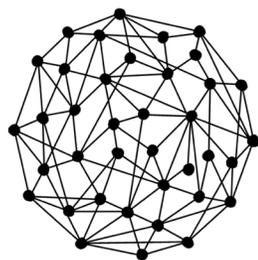
### 2. 再エネ導入量の急拡大に備えた基幹システムの課題と対策

#### ①慣性低下への対応：

回転機運転台数の確保，分散リソースインバータの慣性制御が必要

#### ②調整力の確保：地域リソースの活用，系統の混雑回避制御が必要

#### ③系統安定性確保：送電増強に加え，地域の蓄電・EV制御など系統安定化が必要



**H-UTokyo Lab.**

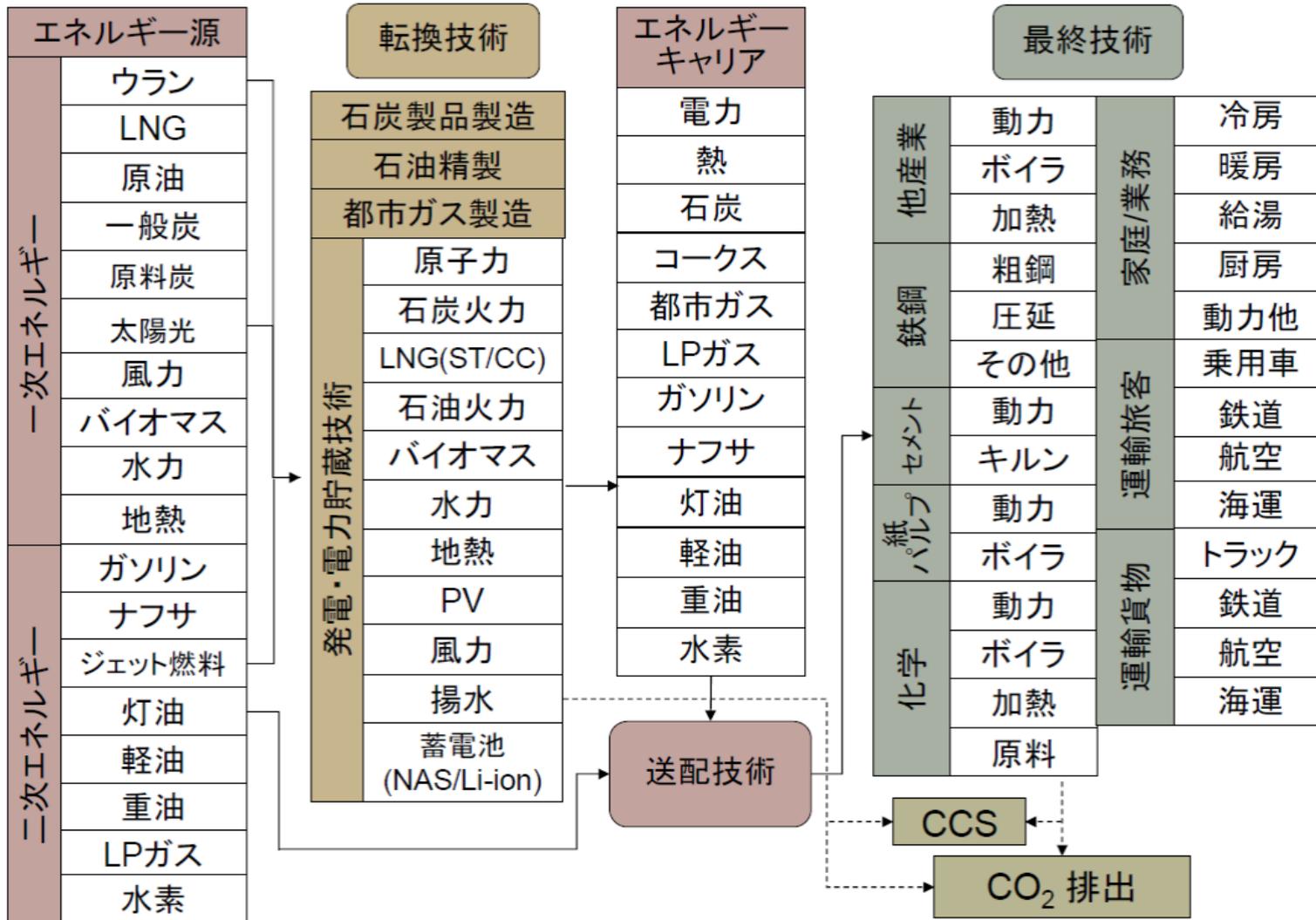
- 2050年CN実現時のエネルギーシステムの姿を描くツールとして、実績のあるモデルを採用。
- 2030年▲46%、2050年CN等の制約条件のもと、エネルギー需給構造についてコスト最適化計算を実施。

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、CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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)

## 藤井・小宮山研究室モデルが対象とするエネルギーシステムの概要



- ・エネルギーの生産（輸入）から転換・送配・最終需要部門での消費に至るエネルギーシステム全体を対象とする。
- ・対象期間のシステム総コストを最小にする最適化モデルとして構成される。

CCUS: Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage

# A3. 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・CO<sub>2</sub>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

## CO<sub>2</sub>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/Nm<sup>3</sup>  
「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

## CO<sub>2</sub>回収技術の導入条件 排出削減目標を達成するためCO<sub>2</sub>回収技術を導入

CO<sub>2</sub>の貯留・活用(CCS: Carbon Capture, Utilization & Storage)

CO<sub>2</sub>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)

(\*2) (一社)日本風力発電協会 (2021年3月24日資料)

(\*3) 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略

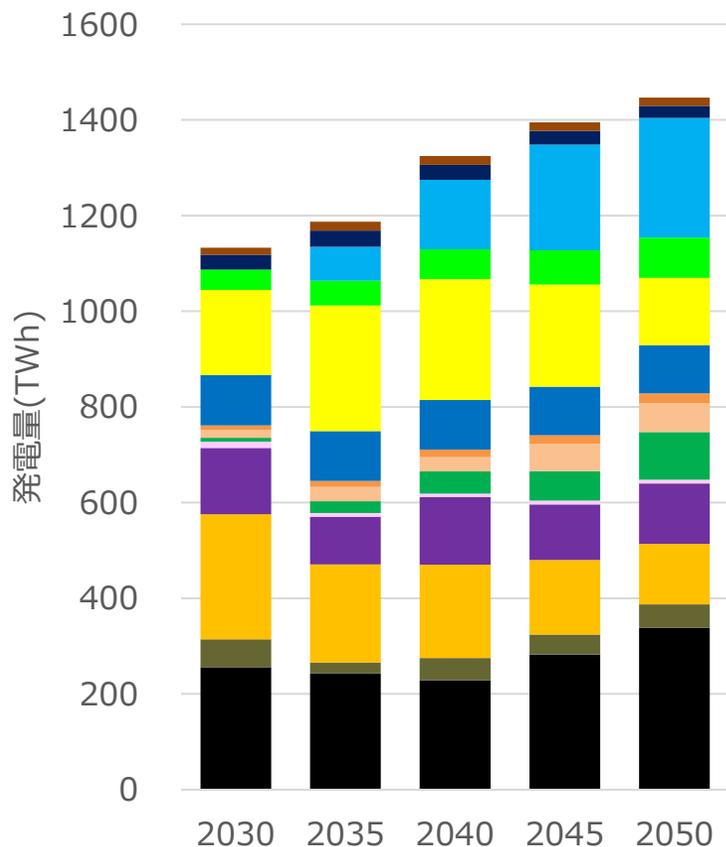
[https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku\\_gas/saisei\\_kano/pdf/026\\_05\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/026_05_00.pdf)

[https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic\\_policy\\_subcommittee/039/039\\_008.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/039/039_008.pdf)

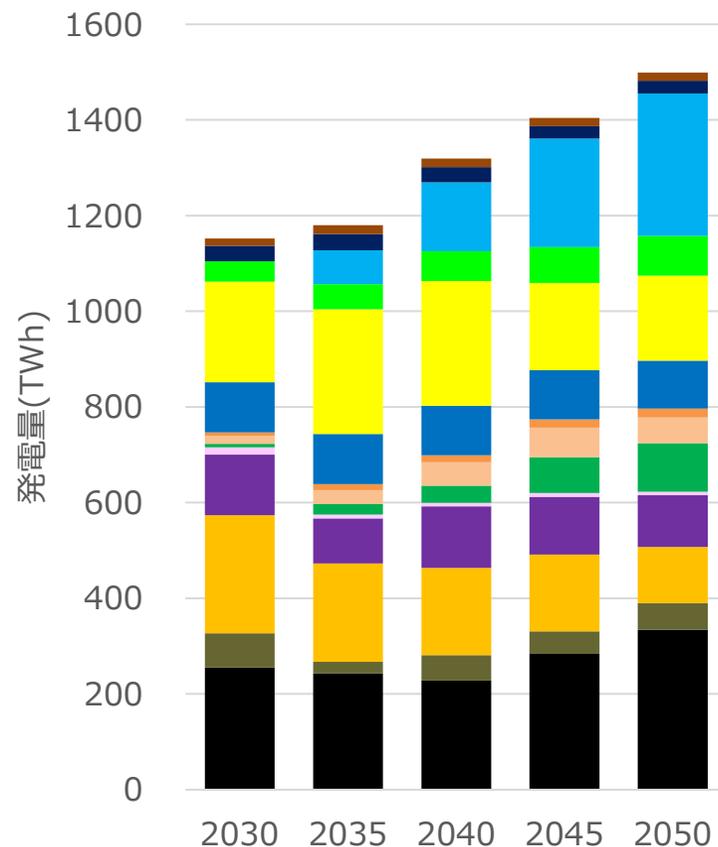
[https://www.meti.go.jp/policy/energy\\_environment/global\\_warming/ggs/pdf/green\\_honbun.pdf](https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/pdf/green_honbun.pdf)

## ③原子力活用ケース：発電電力量

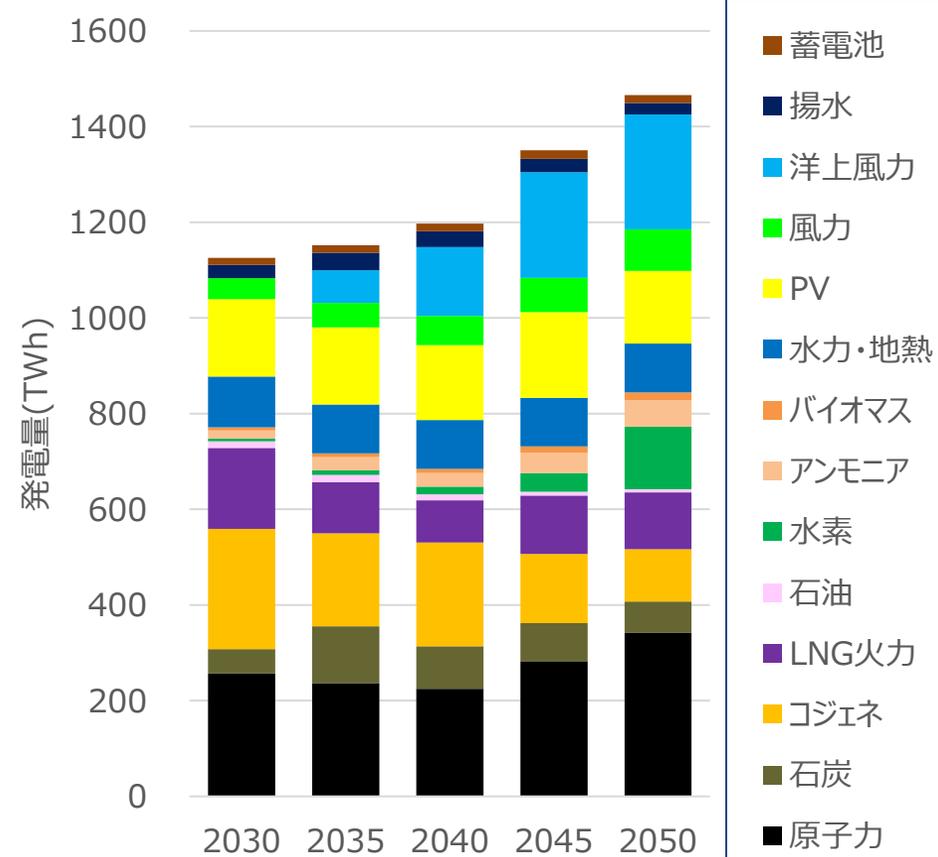
Case 0 : ウクライナ侵攻前長期見通し (第4回フォーラム報告)



Case 1 : 燃油価格高騰一過性 (燃油価格高騰を反映)



Case 1' : 燃油高騰+フォアキャストによる補正 (Case1'からPV廃棄量を低減)

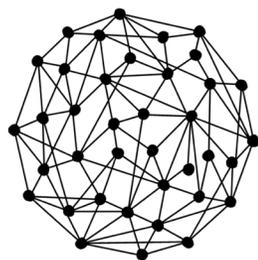


## CNに向けてIEAのPhase4~6の課題を解決するイノベーションが必要

課題	Phase	再エネ電力量比	Phaseの概要	対策候補
系統運用微修正	Phase1	~5%	再エネによる 系統への顕著な影響なし	<ul style="list-style-type: none"> <li>リアルタイム監視制御</li> <li>送電容量の拡大</li> </ul>
	Phase2	~10%	再エネによる わずかな系統運用影響	
潮流変化 大	Phase3	~20%	再エネ出力が 系統運用を決定	<ul style="list-style-type: none"> <li>需給運用の広域連携</li> <li>柔軟な発電出力制御</li> <li>系統安定化システム</li> </ul>
柔軟な供給調整	Phase4	~45%	再エネ100% タイミング発生	
長期エネルギー過不足	Phase5	~70%	日単位での再エネ余剰 (蓄電)	<ul style="list-style-type: none"> <li>非同期電源の連系制限</li> <li>揚水発電の運用高度化</li> <li>高速周波数応答</li> <li>蓄電システム</li> </ul>
季節単位の電力貯蔵	Phase6	~100%	季節単位の再エネ余剰 (水素貯蔵)	
				<ul style="list-style-type: none"> <li>水素・大規模蓄電(数日)</li> <li>水素・新燃料長期貯蔵</li> </ul>

開発・普及必要

※ [1] IEA, "Integrating variable renewables: Implications for energy resilience", Asian Clean Energy Forum 2017, [2] IEA, "Status of Power System Transformation 2019" を元に日立東大ラボで追記作成



**H-UTokyo Lab.**