

1時間値の電力需給を考慮した 大規模世界エネルギーシステムモデルの開発

2022年1月25日

エネルギー・資源学会 第38回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス

大槻貴司* 小宮山涼一** 藤井康正**

* 日本エネルギー経済研究所 電力・新エネルギーユニット 兼 計量分析ユニット

** 東京大学大学院 工学系研究科 原子力国際専攻

研究背景・目的

背景

政策動向

- ・ ネットゼロ排出目標をはじめとする気候変動政策の世界的な強化.
- ・ 自然変動電源(VRE)¹への期待の高まり: 発電脱炭素化やセクター統合など.

モデル

- ・ 従来の世界エネルギーシステムモデルは時間解像度が粗く, VREの評価に課題: 柔軟性投資を過小評価²や最適解が変化³するとの報告. また, 時間帯数は1000のオーダーが必要⁴との報告も.

目的

- ・ エネルギーシステム全体を包含しつつ, 発電部門等を1時間値で表現した世界モデルの開発.
- ・ 開発モデルによる分析: ネットゼロ排出に向けたVRE・CCS・原子力等の最適導入量や, 再エネ100%のエネルギーシステムなど.

1 本研究では太陽光・風力発電のことを指す.

2 Nicolosi et al., *Lawrence Berkeley Natl. Lab. Pap.*, no. 4197 (2010); Kannan & Turton, *Environ. Model. Assess.*, vol. 18, no. 3 (2013); Poncelet et al., *Appl. Energy*, vol. 162, pp. 631–643 (2016).

3 Shirizadeh & Quirion, *Appl. Energy*, vol. 305 (2022).

4 Merrick, *Energy Econ.*, vol. 59, pp. 261–274 (2016).

世界ネットゼロシナリオに関する先行研究

- 1.5°C目標やネットゼロの世界エネルギーシステムを解析した事例は存在するが、時間解像度は粗いものが多い。
- Bogdanovらは再エネ100%のみを分析しており、CCSや原子力等も含んだ包括的な分析はなされていない。

	概要	時間解像度
IPCC SR15 (2018)	90の1.5°Cシナリオ(9モデル)を整理	9モデルのうち5つは年間156時間帯分割、もしくはそれ以下 ¹
Bogdanov et al. (2019)	LUT Energy System Transitionモデルを用いて再エネ100%のエネルギーシステムを分析	年間8760時間帯
IEA Net Zero by 2050 (2021)	WEMとETPモデルを組合わせて2050年ネットゼロのエネルギーシステムを分析	WEMは年間4時間帯。ETPモデルは年間4季節代表日×8時間帯/代表日 ² 。
NGFS (2021)	3つの統合評価モデル(GCAM, MESSAGE, REMIND)を用いて2050年ネットゼロを分析	N/A
Akimoto et al. (2021)	DNE21+モデルを用いてネットゼロのシステムにおけるDACやCCUの役割を分析	年間4時間帯 ³

¹ Pietzcker et al. Energy Economics 64 (2017) 583–599 (2017)を基に記述。5モデルはAIM/CGE, IMAGE, MESSAGE, REMIND, WITCH。

² IEA “World Energy Model Documentation” (2021)および“Energy Technology Perspectives 2020” (2020)を参照。

³ IAMC https://www.iamcdocumentation.eu/index.php/Electricity_-_DNE21%2B (2022年1月20日アクセス)

開発モデル概要

- 電力需給等を1時間刻みで表現した世界モデル「NE5.0-R2」を構築.
- 筆者らが過去開発したモデルNE5.0-R(3時間刻み)¹の定式化を工夫し, メモリ消費を抑えつつ時間解像度を向上.

モデル概要

定式化	逐次動学最適化型モデル (線形計画)
分析期間	2015~2050年 (代表時点:2015, 20, 30, 40, 50)
地域解像度	世界100ノード
時間解像度	年間8760時間帯(24時間×365日)
変数	5.1億個 (1時点モデル)
制約式	5.4億本 (1時点モデル)
CPU	Intel Xeon E5-2687W v4 (3.00GHz), コア数48
所要メモリ	520GB
計算時間	24時間 (1時点の計算に要する実時間)

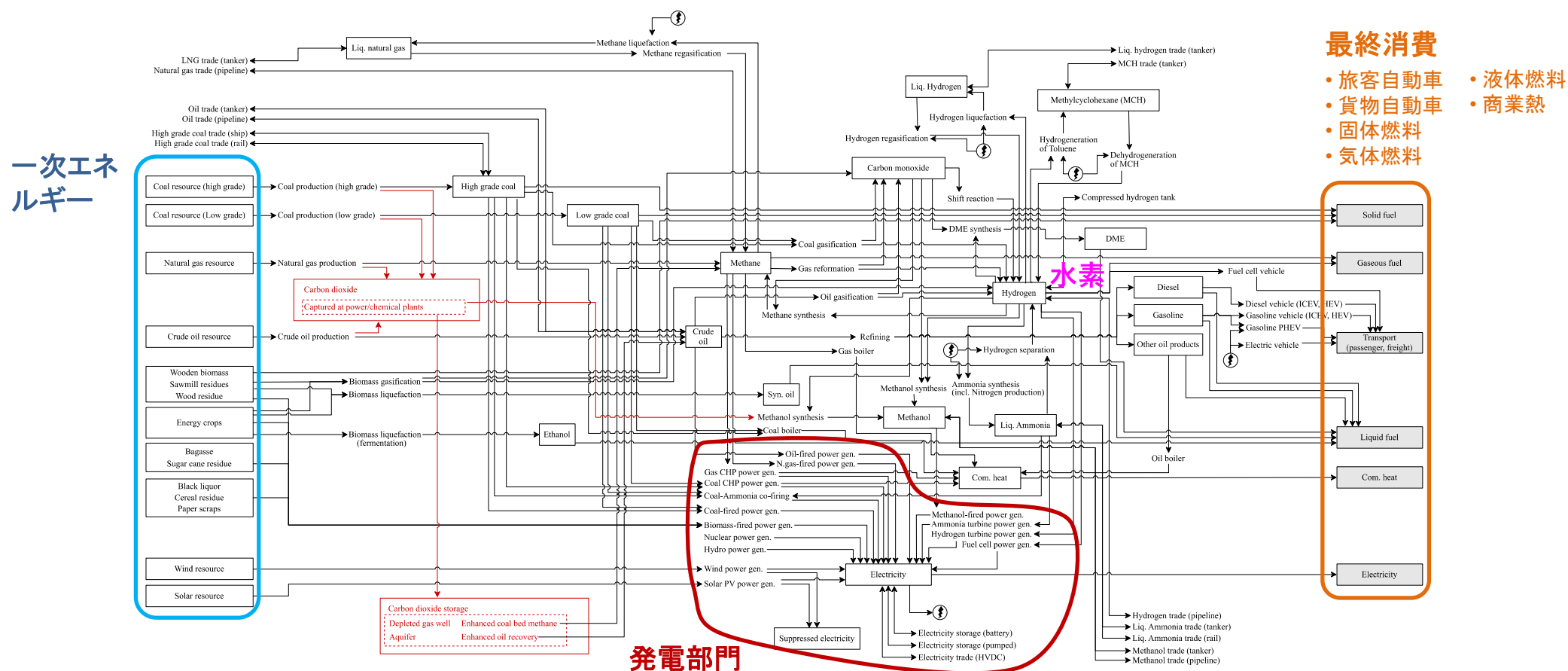
既存の世界モデルの中では
最大規模と思われる

※なお, 3時間刻みモデルでは
変数3億個, 制約式4億本であった

¹ 大槻・小宮山・藤井:“再生可能エネルギー100%の電源構成の可能性:高時間解像度版世界エネルギーシステムモデルによる分析”, 第28回日本エネルギー学会大会(大阪, 2019年8月)

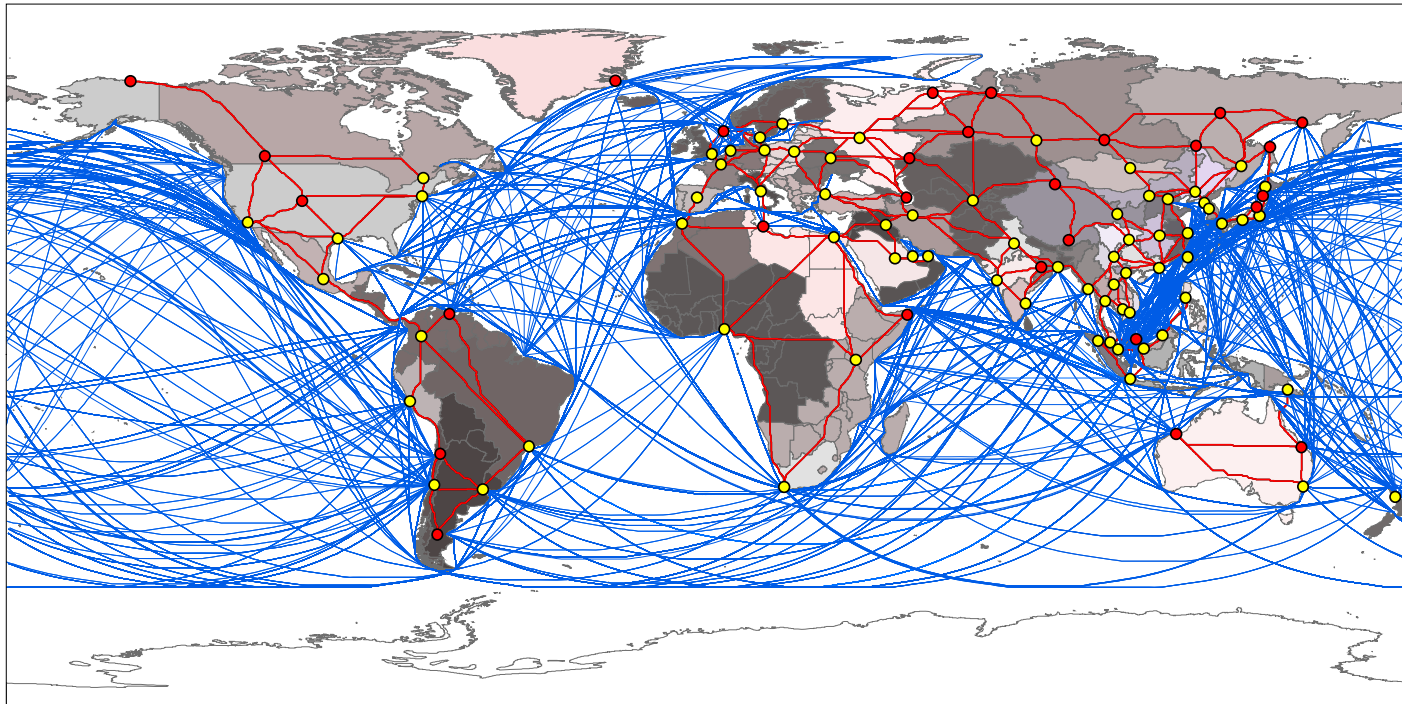
分析システム

- エネルギーシステム全体が最適化対象であり，電力・非電力の両者を考慮．
- 最終需要は自動車輸送のみサービス需要として取扱い，その他は燃料需要として集約化．



地域分割

- 世界を100のノードで表現し, エネルギー資源や需要, 技術経済的パラメータの地域性を反映.
- 各種エネルギーキャリアの地域間輸送も考慮. 但し, 計算量の観点から電力の国際送電は本分析では除いた.



ノード間の輸送可能品目

- 高品位炭
- メタン
- 原油
- 水素
- メタノール
- アンモニア
- メチルシクロヘキサン(MCH)
- 電力
- CO₂

※国際送電は除いた一方で, 再エネ由来の水素や, その水素から合成したメタン, メタノール, アンモニア, MCHの国際輸送は考慮

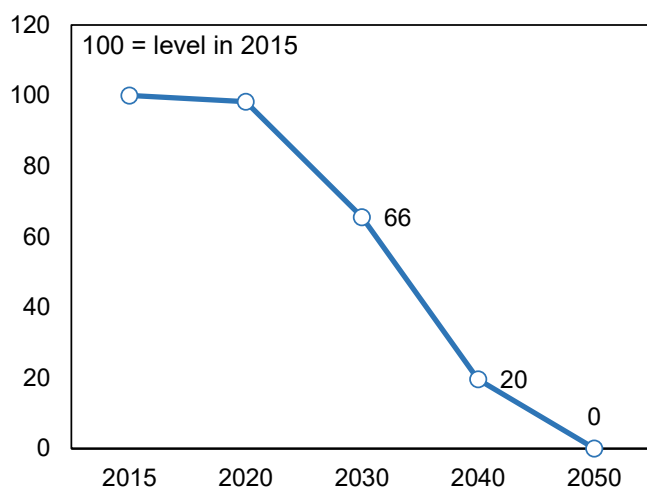
ケース設定

- 3つのケースを分析. NoRegは環境政策を考慮しないケース. 他方, 後者2つはCO₂ネットゼロ制約を考慮.
- RE100は再生可能エネルギー100%でネットゼロのエネルギーシステムを構築することを想定.
- VREは太陽光・陸上風力を考慮.

	CO ₂ 制約	原子力発電	CO ₂ 貯留
① NoReg	なし	最適化 ※設備上限あり	最適化 ※累積貯留上限あり
② FullTech	2050年に世界のエネルギー起源CO ₂ ゼロ	最適化 ※設備上限あり	最適化 ※累積貯留上限あり
③ RE100	2050年に世界のエネルギー起源CO ₂ ゼロ	2050年までに廃止	2020年以降ゼロ

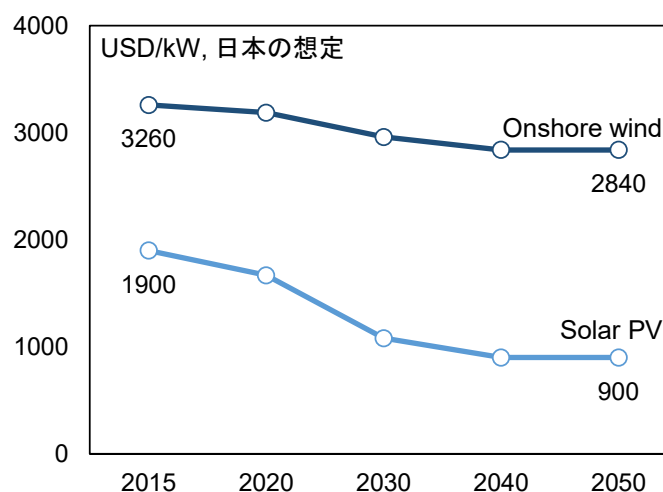
主要想定

エネルギー起源CO₂制約



- IEAのNet Zero Emission by 2050 (NZE) Scenarioを基に設定.
- 2030年に34%削減, 2040年に80%削減, そして2050年にネットゼロ化.

太陽光・風力発電等



- 発電費用はIEA WEO2018 SDSの想定等を基に設定.
- 陸上風力の資源量はBoschを基に世界全体で448PWh/yr, 太陽光発電は今回は上限無しで計算.
- 蓄電池は2050年に300USD/kWhと想定.

原子力発電・CO₂貯留資源

※世界計の想定

原子力	50年に最大800GW
帯水層	累積3108GtCO ₂
枯渇ガス田	天然ガス採掘と共に増加
石油増進回収	累積31GtCO ₂
炭層メタン増進回収	累積136GtCO ₂

- 原子力発電は各国の原子力開発計画や政策, 稼働年数規制等を踏まえ, 上下限制約を想定.
- CO₂貯留資源はNEDO¹等を基に設定.

¹ NEDO Research Report 51401008-0-1 (2002), 51402009-0 (2003).

最終エネルギー消費

- ネットゼロに向けては需要側の電力化が進展.
- FullTechでは負の排出技術の活用によって化石燃料が残存. 他方, RE100ではゼロ・エミッション燃料¹のみとなる.

最終エネルギー消費

世界全体

Mtoe

20,000

15,000

10,000

5,000

0

電力化率

18%

31%

41%

58%

2015

NoReg

FullTech

RE100

2050

電力

石油

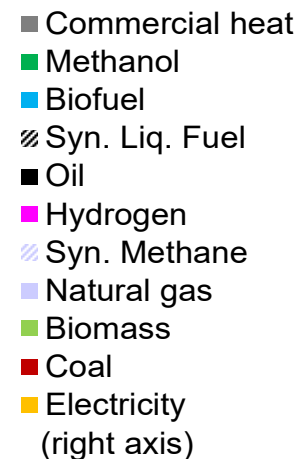
水素

天然ガス

合成メタン

バイオ燃料

合成石油



¹ バイオ燃料や水素, 合成石油, 合成メタンなど

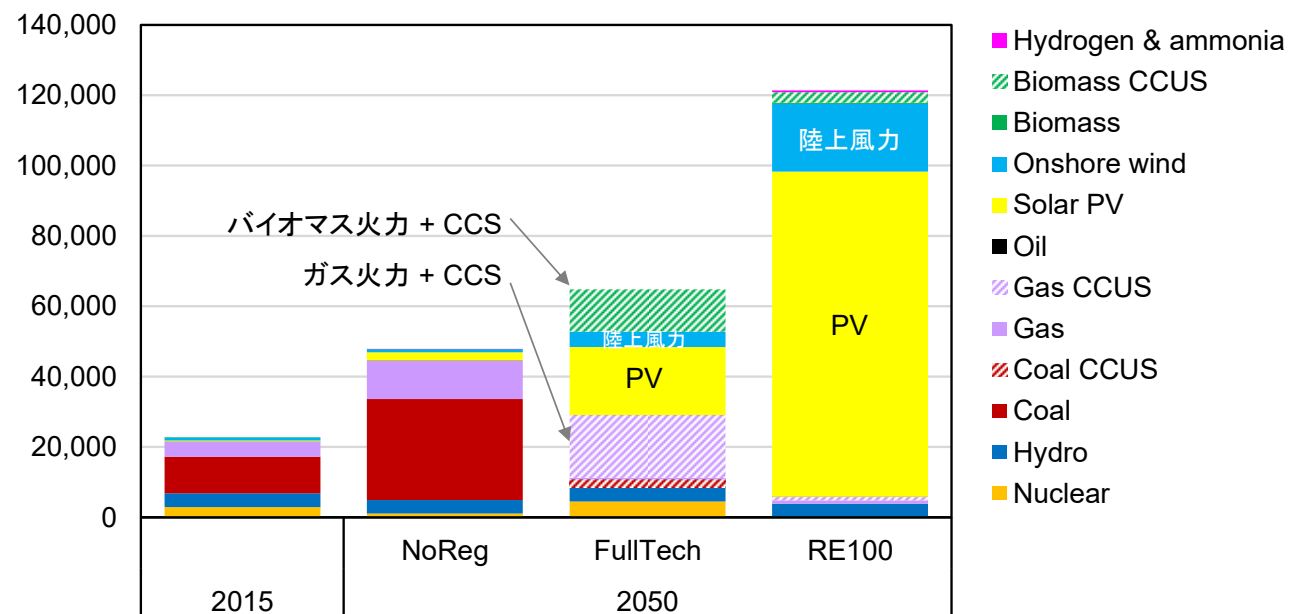
発電電力量

- FullTechのVRE発電比率(2050年)は37%と推計。CCSが利用可能であればVRE最適比率はそれ程高くない可能性。
- RE100の発電量はFullTechの倍程度に達した。これは、最終消費用の電力に加え、水電解の電力が必要となるため。

発電電力量

世界全体

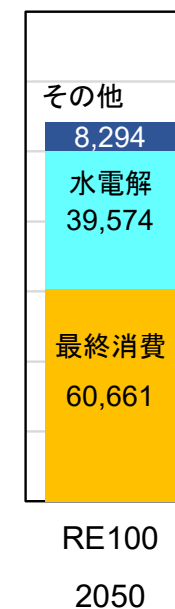
TWh



RE100の電力消費

世界全体

TWh



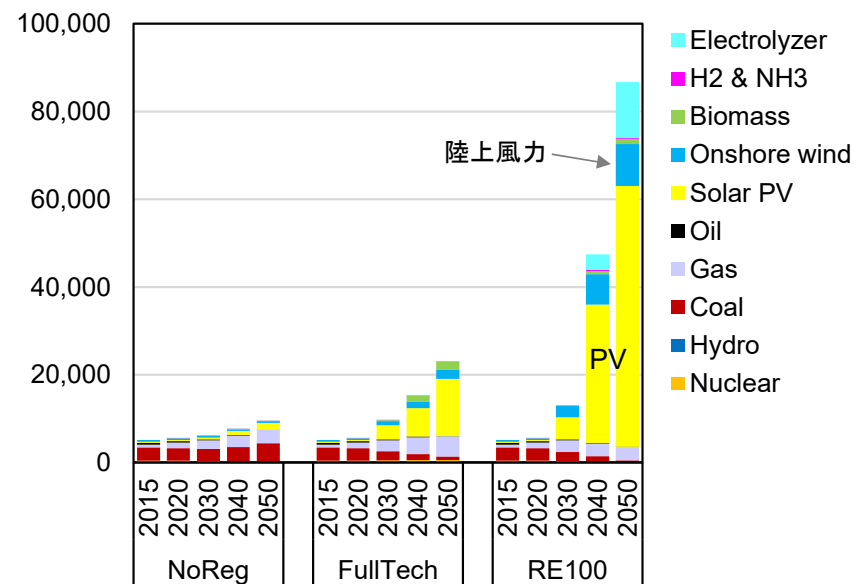
発電設備容量とエネルギー貯蔵容量

- RE100ケースの実現には相当程度の発電設備容量やエネルギー貯蔵容量が必要となる。
- なお、再エネ設備・蓄電池等の生産設備や原料鉱物資源の供給制約は本推計では考慮していない^注

発電設備容量

世界

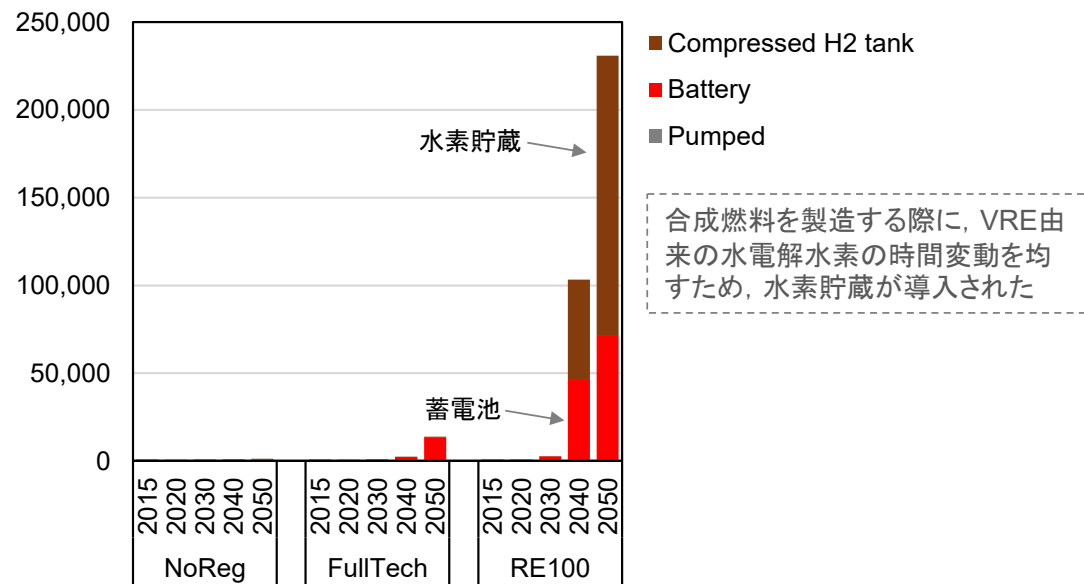
GW



エネルギー貯蔵容量

世界

GWh



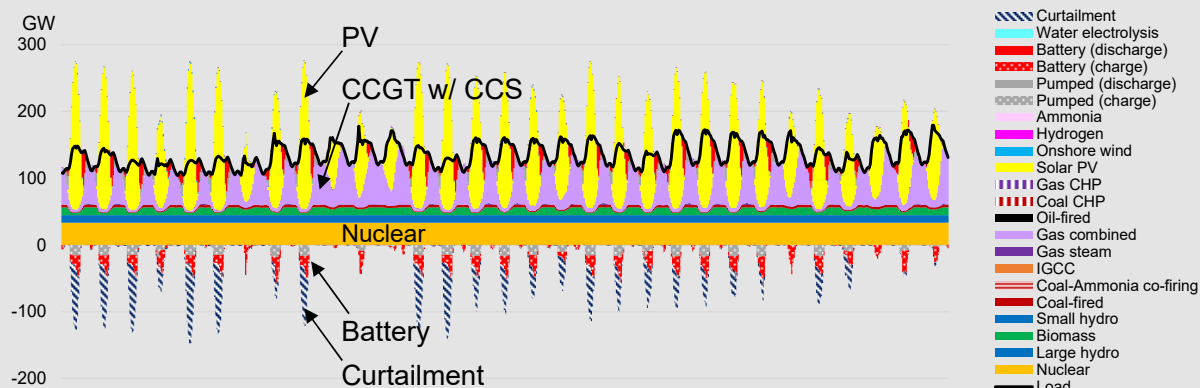
注 この点については、再エネや蓄電池以外にも、CO₂貯留サイトの開発(掘削リグの台数制約等)も考慮されていない。

1時間値の電力需給

電力需給の例

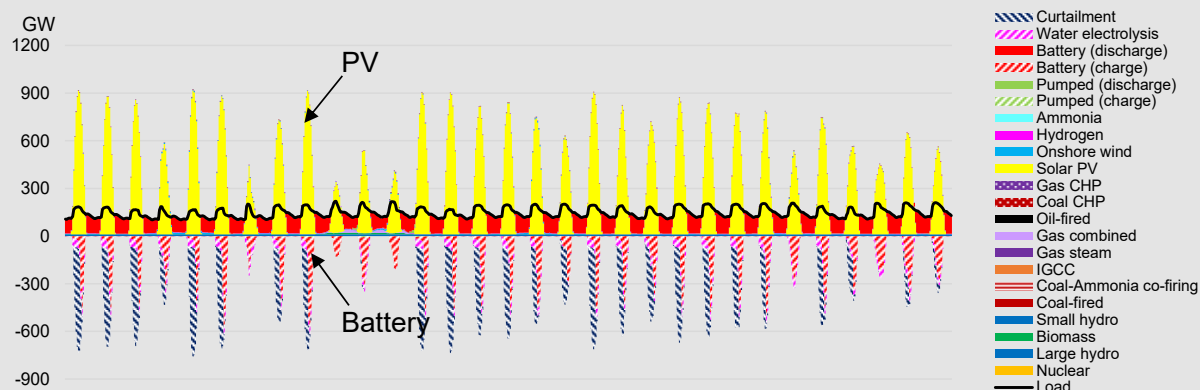
日本合計 2050年 5月

FullTech



- 太陽光発電やガス複合火力 (CCS付き), バイオマス火力, 原子力等の技術が貢献.
- 太陽光発電の出力変動にはガス複合・バイオマス火力の出力調整や, 揚水・蓄電池による貯蔵, 出力制御で対応.

RE100



- 太陽光発電が中心の電力供給であり, 夜間は蓄電池による電力供給で需給バランスを確保.
- 昼間には最大500GWh/hの蓄電池への充電も見られる. また, 昼間の太陽光電力の一部は水素製造にも利用.

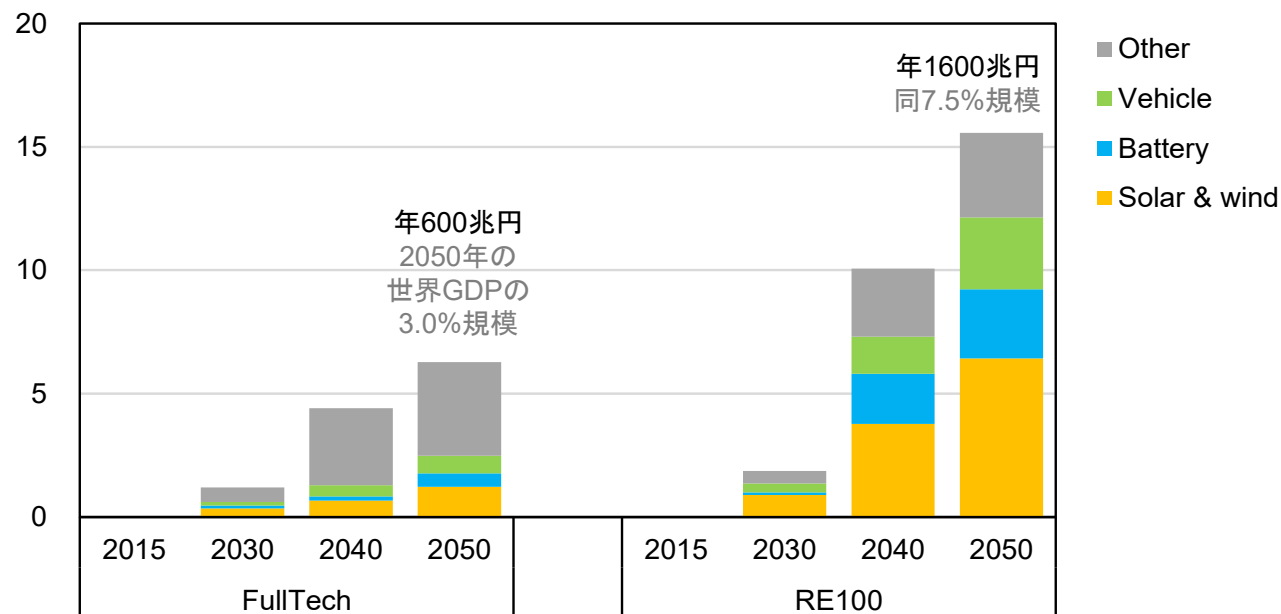
エネルギーシステム費用

- ネットゼロ排出実現に向けてエネルギーシステム費用は上昇.
- 2050年断面ではFullTechにて年6兆ドル, RE100では16兆ドル増. 費用負担抑制のため, 対策技術のコスト低減は重要

ネットゼロ排出実現への費用

世界全体 エネルギーシステム費用のNoRegケースからの増分

Trillion USD per year



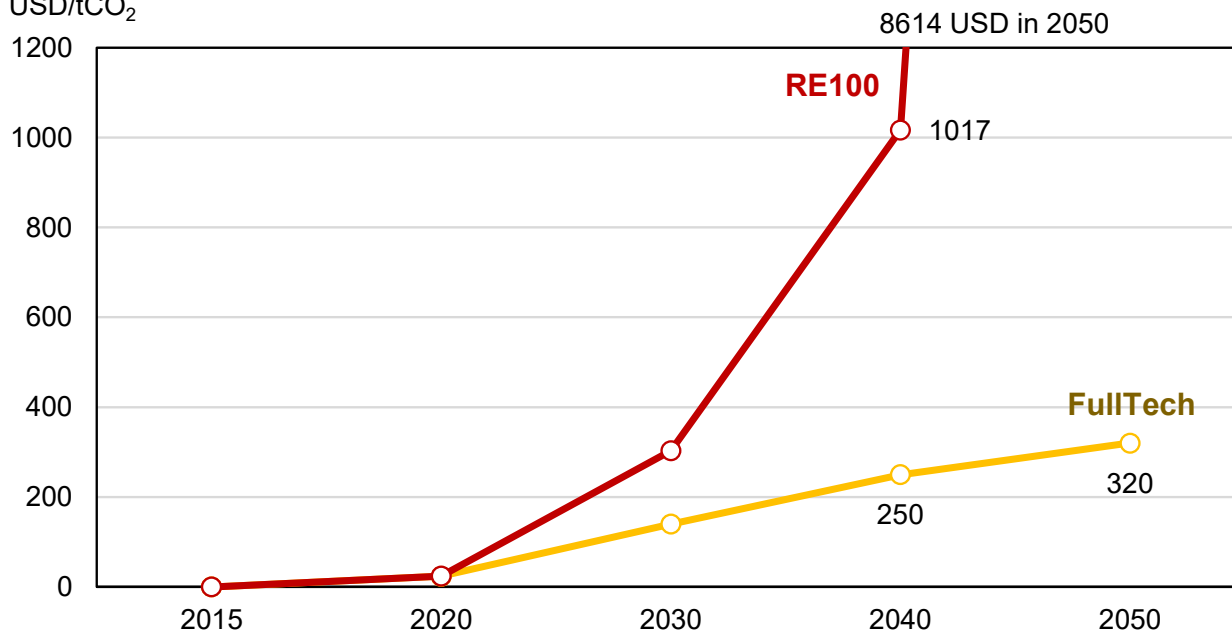
CO₂限界削減費用 (Marginal CO₂ Abatement Cost = MAC)

- MACはRE100ケースにて上昇. 熱や貨物車向けの合成燃料や乗用BEV¹の世界的導入が高コストであった可能性. また, “最後の1トン”の削減はロシア等の高緯度地域. 気象条件(日射の季節性)等が影響したと考えられる.
- 2040~50年のCO₂削減を見据えると, 世界全体としてはCCSや原子力等の幅広い選択肢を持つことが重要.

CO₂限界削減費用

世界全体

USD/tCO₂



結論

主なポイント

- 本分析では1時間値の電力需給を考慮した大規模な世界モデルを開発した。VRE出力の時間変動性を明示的に考慮しつつ、世界の電力・非電力のエネルギー需給(貿易含む)を分析可能となった。
- 2050年のエネルギー起源CO₂ネットゼロ排出に向けたエネルギー需給を分析した結果、発電部門の対策としてはVREのみならずCCSや原子力等も活用することが経済合理的と評価された(VREの発電比率は37%)。
- 他方、再生可能エネルギー100%によるネットゼロ排出化は経済的に非効率となる可能性も示唆された。電力のみならず、エネルギー全体を賄うために、VRE導入量は相当規模となりうる。
- ネットゼロに向けては様々な道筋がある中、現時点においては、多様な技術選択肢を適切に組み合わせていく戦略が重要と考えられる。

今後の課題

- 国際送電線を考慮した分析: 計算量抑制のための工夫(定式化変更や、地域を絞った国際送電線の許容等)
- モデルの拡張
 - ・ 技術の拡充: 洋上風力や、自動車以外の需要側のボトムアップ的モデル化
 - ・ マテリアルフローのモデル化: 鉱物資源制約の考慮等