

日本における 2050 年カーボンニュートラル達成のモデル分析： 再エネ 100%の電力供給の経済性に関する感度分析¹

大槻 貴司^{*}，尾羽 秀晃^{**}，松尾 雄司^{***}，森本 壮一^{****}

要旨

著者らは日本の 2050 年 CO₂ 正味ゼロ排出化に向けたエネルギーシナリオを試算し、第 44 回基本政策分科会などでその結果を提供してきた。そこでの主な結果の一つとして、再生可能エネルギー（再エネ）100%シナリオにおける電力限界費用が、費用最適シナリオ比で 2 倍以上に上昇したことが挙げられる。しかしながら、同試算の想定（特に自然変動電源やエネルギー貯蔵技術の費用、バイオマス火力等の dispatchable な再エネ電源の利用可能性）は足元の状況を踏まえるとやや保守的であり、それらが試算結果に影響を及ぼしていた可能性があった。そこで本研究では上記想定に関する感度分析を行い、既報の再エネ 100%シナリオから得られた傾向の頑健性を考察した。数値シミュレーションの結果、自然変動電源の出力の季節性が電力限界費用上昇に寄与すること、エネルギー貯蔵システムの低コスト化や dispatchable な再エネ電源の活用が電力限界費用を抑制すること、他方で自然変動電源の費用自体はそれほど影響しないことが確認された。再エネ 100%の電力供給に向けては安価なエネルギー貯蔵技術や再エネベースの dispatchable な電源の確保が重要といえる。ただし、これらの条件が揃った場合においても、費用最適シナリオと比較すると電力限界費用の水準は依然として高く、再エネ 100%の経済的課題が示唆されている。今後も様々な角度から検討が必要ではあるが、既報の知見の頑健性は低くはないと推察される。

1. はじめに

2050 年カーボンニュートラルの達成に向けて、わが国のエネルギーシステムのあり方が活発に検討されている。2021 年 5 月には地球環境産業技術研究機構（RITE）が温暖化対策評価モデル DNE21+を用いて複数シナリオにおける 2050 年のエネルギー構成や電力限界費用等进行分析し、総合資源エネルギー調査会基本政策分科会（第 43 回）に試算を提供した¹⁾。その後、第 44 回基本政策分科会においても 4 つの研究機関や団体（国立環境研究所＝NIES、自然エネルギー財団＝REI、デロイトトーマツコンサルティング、日本エネルギー経済研究所＝IEEJ）がエネルギーシステムモデル等による分析結果を報告し^{2)～5)}、エネルギー需給構造の抜本的な転換にあたっての課題や制約が議論された。なお、著者らは IEEJ⁵⁾の分析に関与した（詳報⁶⁾も今後掲載予定）。

これらの分析において注目された点の一つが再生可能エネルギー（再エネ）大量導入時の電力限界費用である。3 つの分析¹⁾⁴⁾⁵⁾が電力限界費用を試算したが、いずれにおいても再エネ大量導入シナリオでは電力限界費用が大きく上昇し得ることが報告された（表 1-1）。例えば、IEEJ の場合⁵⁾、2050 年の電力供給を 100%再エネで賄う

¹ 本稿は第 41 回エネルギー・資源学会研究発表会（令和 4 年 8 月 8～9 日）における講演論文（8-3）を学会の許可を得て掲載するものです。

^{*} （一財）日本エネルギー経済研究所客員研究員，横浜国立大学准教授

^{**} （一財）日本エネルギー経済研究所 計量分析ユニット 主任研究員

^{***} （一財）日本エネルギー経済研究所客員研究員，立命館アジア太平洋大学准教授

^{****} （一財）日本エネルギー経済研究所 環境ユニット 主任研究員

シナリオの電力限界費用（年平均値）は、標準的なカーボンニュートラルシナリオ比で倍程度に上昇する結果が得られている（なお、IEEJ⁵⁾や本研究での貨幣価値は2014年実質値）。また、1時間値の電力限界費用は季節によって二極化する傾向も得られた。つまり、日射や風況に優れた季節では恒常的に電力余剰状態となり、0円/kWh近傍の限界費用が頻発するが、天候条件に劣る時期には限界費用が上昇し、それが平均値を押上げることも示唆された（詳細は文献⁶⁾）。再エネ電力100%への経済的な課題が示唆されたといえる。

一方で、足元では太陽光・風力発電（自然変動電源＝VRE）の費用低減が大幅に進展している。2050年には既報⁵⁾⁶⁾で想定した以上に自然変動電源は安価となり、限界費用の抑制に寄与する可能性があるが、同分析ではVRE費用に関する感度分析は検討していなかった。また、同分析では水素貯蔵や dispatchable な再エネであるバイオマス火力発電がVREの季節変動への対応に重要な役割を果たすことが示唆されたが、これらについても不確実性（例えば、エネルギー貯蔵技術の経済性が大幅に改善する可能性や、国内バイオマス資源量の不確実性）に関する検討はされていない。このような背景から、本研究ではVRE費用やエネルギー貯蔵費用、国内バイオマス資源量について感度分析を行い、既報⁵⁾⁶⁾の結果の頑健性について考察する。

表 1-1 既往分析における電力限界費用の試算値

	電力限界費用	
	標準的なシナリオ	再エネ100%シナリオ
RITE ¹⁾	25 円/kWh	53 円/kWh
NIES ²⁾	--	再エネ100%は検討対象外
REI ³⁾	--	--
Deloitte ⁴⁾	23 円/kWh	52 円/kWh
IEEJ ⁵⁾	16 円/kWh	28~33 円/kWh

注：シナリオ自体は検討されているものの、電力限界費用が試算されていない場合は「--」とした。

2. 研究手法

2-1 高時間解像度日本エネルギーシステムモデルの概要

本研究ではエネルギーシステム全体を対象としつつ、電力需給を1時間値で表現した高時間解像度・最適化型のモデル⁶⁾を用いる。このモデルは線形計画問題として定式化され、エネルギー需給バランス制約やCO₂制約等の各種制約条件の下、分析期間の総費用の最小化を通じて効率的なエネルギー需給像を描く。分析期間は2015~2080年であり、代表時点として2015年、20年、30年、40年、50年、65年、80年の需給を計算する（なお、本稿では2050年までの結果を基に議論する）。地域解像度としては日本を5地域分割（北海道、東北、東京、西日本、九州沖縄）で表現し、各地域のVRE資源の偏在性や地域間送電費用を考慮した。

モデルの構成要素としては一次エネルギーと二次エネルギー、最終需要、エネルギー起源CO₂、およびそれらを連結する300程度の技術・プロセスが含まれる。本モデルのような技術積み上げ型の最大の特長は、各エネルギー技術を明示的に扱い、その経済・技術性能（資本費、設備利用率、エネルギー原単位等）を詳細に表現できる点にある。エネルギー技術群や核技術の経済・技術性能、最終需要は与件となる。最終需要は産業・民生・運輸部門のエネルギーサービス需要（計37区分）としてモデル化を行った。

VREとしては地上設置型太陽光、屋根設置型太陽光、壁面設置型太陽光、陸上風力、着床式洋上風力、浮体式洋上風力の6種類を対象とした。変動性対策としては火力発電の出力調整、VREの出力制御、エネルギー貯蔵（揚水式水力、ナトリウム硫黄電池、リチウムイオン電池、レドックスフロー電池、水電解と圧縮水素貯蔵）、

ダイヤモンドレスポンス（電気自動車：EV やプラグインハイブリッド車への充電，EV からの放電，民生用ヒートポンプ給湯機の運転制御）が考慮されている。なお，VRE 以外の再生可能エネルギー電源は大規模水力，中小水力，地熱，バイオマス火力がモデル化されている。また，再生可能エネルギー電力由来の水素による専焼火力発電も考慮されている。

モデルの規模は変数 5400 万個，制約式 5800 万本に達する。1 ケースの計算時間（実時間）は，CPU が Intel Xeon E7-8867 v4 (2.40GHz) の計算機環境で約 10 時間要する。最適化ソルバは Xpress（求解アルゴリズム：内点法）を使用した。計算時には約 55GB のメモリが必要となる。主な変数や制約式は文献⁶⁾を参照されたい。

2-2 分析ケース

既報⁶⁾の RE100 ケースを基に，VRE 建設費，国内バイオマス資源量，エネルギー貯蔵技術費用について感度分析を実施した（表 2-1 の通り計 4 ケースを試算）。

RE100 ケースは 2050 年の発電電力量を全て再エネで賄いつつ，エネルギー起源 CO₂ の正味ゼロを達成するケースである。原子力発電は 2050 年までに廃止し，火力発電はバイオマスもしくは国内再エネ電力由来の水素を燃焼するもののみ利用可能としている。VRE+ケースでは 2050 年の VRE 建設費を RE100 ケース比で 9 割減とした（例えば，地上設置型太陽光は 1.1~1.8 万円/kW）。Biomass+ケースでは国内の木質バイオマス資源量を森林蓄積量⁷⁾から設定した（RE100 ケースでは国内バイオマス生産量実績等から想定していた）。2020 年の森林蓄積量は約 54.1 億 m³と推計されるが，この資源を 40 年周期で利用する（つまり 52.4÷40=1.3 億 m³/年の木材生産が可能）と仮定した場合，約 18Mtoe/年のエネルギー供給に相当する。なお，森林蓄積の大部分は人工林であるため，代表的な樹種であるスギやヒノキを想定して発熱量を推計した。Storage+ケースでは比較的長期のエネルギー貯蔵に適すると考えられる水素貯蔵（水電解と圧縮水素貯蔵）およびレドックスフロー電池の建設費を RE100 ケース比で 9 割減させた。

表 2-1 分析ケース

	RE100	VRE+	Biomass+	Storage+
CO ₂ 制約および電源構成	2050 年までにエネルギー起源 CO ₂ は正味ゼロ。 電力需要は全て再生可能エネルギーで賄う			
VRE 建設費 (2050 年)	表 2-2 の水準	RE100 ケース比で 90%減	RE100 ケースと同等 (表 2-2 の水準)	
木質バイオマス 国内資源量	2020 年度の固体バイオマス生産量実績等を 基に想定 (7.4Mtoe/year)		森林蓄積量からの 推計値 (18Mtoe/year)	RE100 と同量 (7.4Mtoe/year)
水素貯蔵・レド ックスフロー電 池の建設費 (2050 年)	水素貯蔵システム（水電解装置：4.5 万円/kW，圧縮機等：7 万円/kW，貯蔵タンク：1.5 千円/kWh）。レドックスフロー電池（入出力部分：2.8 万円/kW，電解液タンク：9.9 千円/kWh）			RE100 ケース比 で 90%減

表 2-2 VRE の想定 (RE100・Biomass+・Storage+ケース)

	建設費 (万円/kW)	設備利用率
地上設置型太陽光	10.5~17.7	16~18%
屋根設置型太陽光	12.3~22.8	11%
壁面設置型太陽光	17.5	8%
陸上風力	22.1	20~39%
着床式洋上風力	45.0	33~40%
浮体式洋上風力	58.5	33~40%

注：モデルの中では各技術区分の中で更にグレードを設けており，建設費や設備利用率で差を設けている。設備利用率は地域毎の気象条件を基に推計した。

2-3 前提条件

表 2-1~表 2-2 以外の想定は文献⁶⁾を踏襲した。ここでは VRE 導入量上限値の考え方のみ説明する。本稿の分析では自然環境や社会活動に大きな影響を及ぼし得る場所に VRE を設置しない前提とした。具体的には森林への太陽光発電と陸上風力発電の設置は許容せず，また，洋上風力発電は利害関係者との対立が生じにくいと考えられる海域（漁業権外，離岸距離 5km 以上，船舶通行量 0~20 隻/月と定義⁸⁾）に設置可能としている。具体的な上限値としては日本計で地上設置型太陽光は 66GW，屋根設置型太陽光は 203GW，壁面設置型太陽光は 96GW，陸上風力は 23GW，着床式洋上風力は 31GW，浮体式洋上風力は 142GW である。

3. シミュレーション結果と考察

3-1 電力限界費用

本モデルからは地域別・1 時間刻みの電力限界費用を得ることができる。図 3-1 に各ケースにおける日本の電力限界費用の加重平均値（以下，「平均値」）を示す。平均値の算出にあたっては式(1)を用いた。

$$wsp_{c,y} = \frac{\sum_r \sum_t (sp_{c,t,r,y} \cdot elc_{c,t,r,y})}{\sum_r \sum_t elc_{c,t,r,y}} \quad (1)$$

ここで， c はケースを表す添え字， $wsp_{c,y}$ はケース c における年 y の日本の電力限界費用の平均値（単位：円/kWh）， $sp_{c,t,r,y}$ はケース c ，年 y ，地域 r ，時間 t の電力限界費用（円/kWh）， $elc_{c,t,r,y}$ はケース c ，年 y ，時間 t における地域 r の正味の発電電量（kWh/hour）を表す。

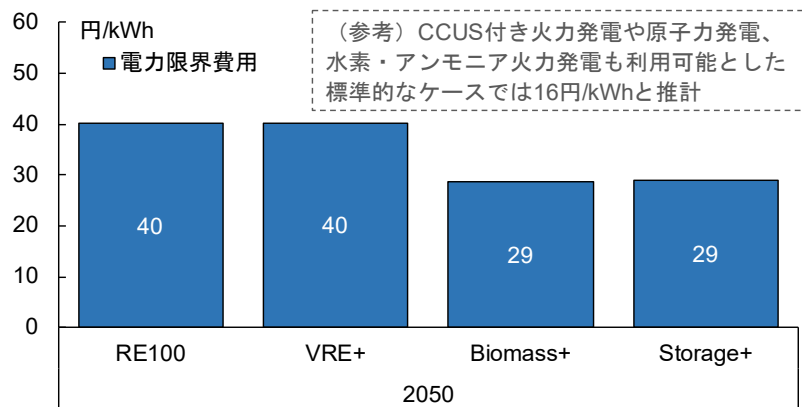
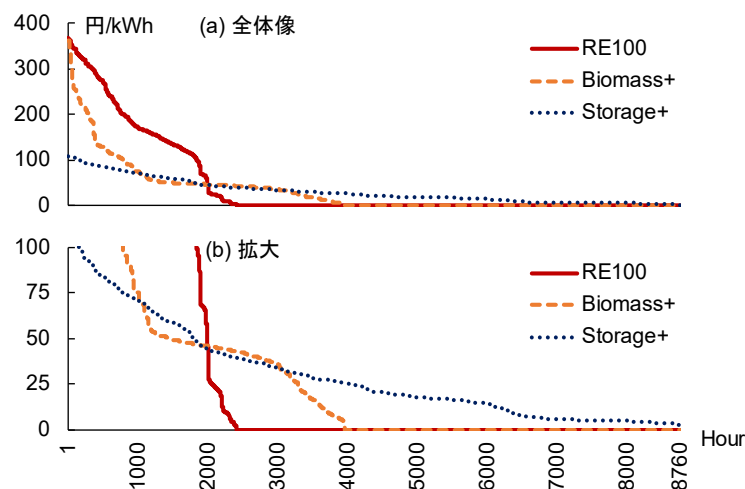


図 3-1 日本の電力限界費用の平均値

図 3-2 RE100・Biomass+・Storage+ケースの1時間値電力限界費用
(2050年、5地域の加重平均)の持続曲線

電力限界費用の平均値はRE100ケースの40円/kWhに対して、VRE+ケースでは大きな改善は見られなかった(図3-1)。他方、Biomass+ケースやStorage+ケースでは平均値が低減し、両ケースとも29円/kWh程度と推計された。次節にて述べる通り、Biomass+ケースではバイオマス火力の季節的な運用を増加させ、また、Storage+ケースでは月や季節を跨ぐエネルギー貯蔵を拡大させてVREの長周期的な変動に対応する姿となった。RE100ケースの電力限界費用はVRE自体の費用ではなく、その他の要因に起因していたこと、そして、VREの統合費用(特に季節性への対応費用)がその要因の一つであった可能性がある。なお、RE100ケースの電力限界費用の平均値は既報⁶⁾では34円/kWhと推計されたが、本稿では40円/kWhへ上昇した。これはモデルの計算期間を2080年へ延長し、各代表時点の期間の定義も調整する等の改良を行ったことによる。

季節性が緩和される様子は1時間値の電力限界費用(図3-2)でも確認できる。RE100ケースでは1年間の中で電力限界費用が二極化している。つまり、0.01円/kWh以下が年間の大半で(6300時間ほど)発生すると共に、100円/kWh以上に達する時間帯も1800時間ほど生じている。この0.01円/kWh以下の時間数は出力制御が生じた時間数に概ね一致し、RE100ケースでは季節的に(複数月の長時間にわたって)電力が余剰となることが示唆されている。対してBiomass+ケースでは、電力限界費用の年最高値はRE100ケースと同程度に達するものの、二極化が相対的に緩和された。Storage+ケースではその傾向が更に進展し、0.01円/kWh以下の時間帯はゼロ、100円/kWh以上の時間帯は140時間ほどへ減少した。Biomass+やStorage+ケースの電力限界費用低減の背景

には、このような二極化の緩和があることが分かる。極めて高い再エネ比率の達成に向けては、季節性対応のため、dispatchable な再エネ電源の確保や長期間のエネルギー貯蔵に適した技術の導入が重要と考えられる。

ここで、Biomass+や Storage+ケースのような技術進展を想定しても電力限界費用は 29 円/kWh 程度まで上昇した点には注意されたい。CCUS 付きの化石燃料火力発電や原子力発電、水素・アンモニア発電等の技術選択肢を広く考慮した標準的なケース(バイオマスやエネルギー貯蔵の技術進展は含まず)の電力限界費用は 16 円/kWh である。幅広い選択肢を活用する戦略と比較すると、Biomass+ケースや Storage+ケースでも電力限界費用の点では課題が窺える。

3-2 電力需給

図 3-3~図 3-5 に RE100・Biomass+・Storage+ケースの 1 時間値の電力需給を示す(電力限界費用が低下する 5 月、および限界費用が上昇する 8 月末~9 月初めの 1 週間のみ示している)。VRE+ケースの結果は RE100 ケースに類似したため、ここでは割愛する。RE100 ケースの 5 月には良好な日射や低電力需要が相まって出力制御が頻発している(図 3-3a)。他方で 8 月末~9 月初めには VRE 出力に対して電力需要が季節的に増加することで需給がタイト化し、出力制御は実施されず、バイオマス火力発電の稼働が見られた(図 3-3b)。このようにバイオマス火力の稼働が必要となる時期には電力限界費用が上昇している(図 3-6a)。

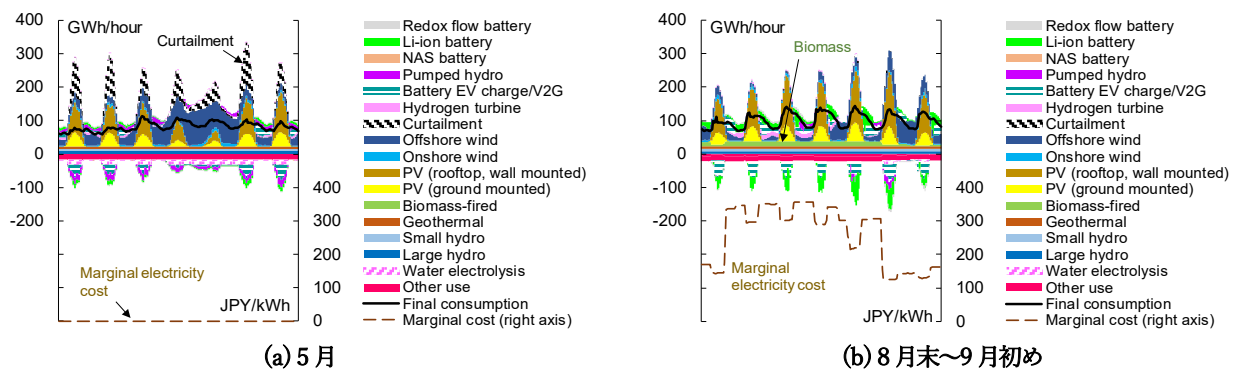


図 3-3 RE100 ケースにおける 1 週間の 1 時間値電力需給 (2050 年, 日本合計)

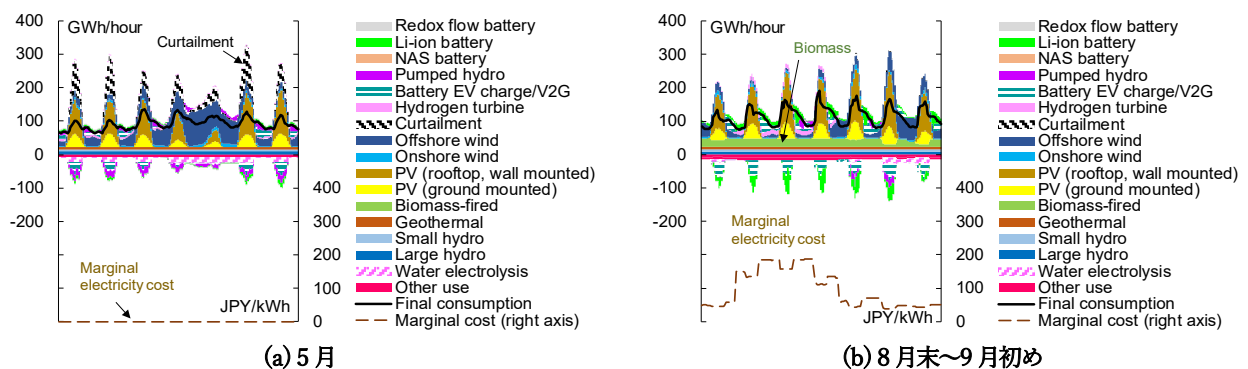


図 3-4 Biomass+ ケースにおける 1 週間の 1 時間値電力需給 (2050 年, 日本合計)

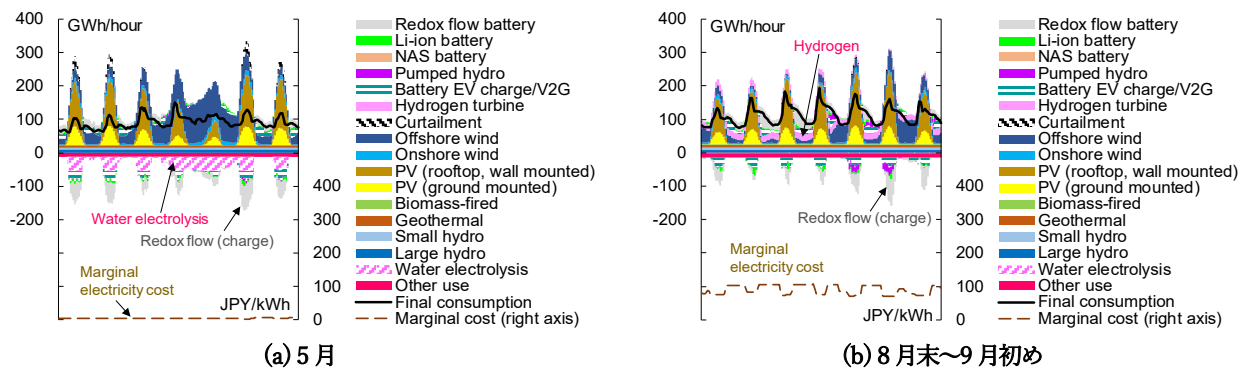


図 3-5 Storage+ケースにおける 1 週間の 1 時間値電力需給 (2050 年, 日本合計)

Biomass+ケースの 5 月の電力需給は RE100 ケースと類似しているが, 8 月末~9 月初めはより多くのバイオマス火力発電が見られる結果となった (図 3-4a-b) . 需給ひっ迫の緩和に貢献しており, 電力限界費用の抑制に寄与している. 1 年を通して見ても, 需給がタイト化するタイミングにてバイオマス発電量が増加しており, 7 月末~9 月半ば頃の限界費用を大きく抑制している (図 3-6a-b) .

ところで, RE100 ケースから Biomass+ケースにかけてのバイオマス火力発電増分は全て CO₂回収・貯留装置付きであり, ネガティブエミッションを創出している. バイオマス火力は, 単に Dispatchable な再エネ電源としての貢献のみならず, この点でも電力限界費用の抑制に寄与した可能性もある. 本分析では発電部門のみならずエネルギーシステム全体の CO₂を正味ゼロにするため, RE100 ケースでは直接空気回収技術+CO₂貯留(DACCS)を用いて最終消費部門等の残余の CO₂を相殺する姿となっている (付図 2) . これに対して Biomass+ケースでは CCS 付きバイオマス火力によるネガティブエミッションが DACCS を一部代替する結果となった. 直接空気回収用の電力消費が削減され, 電力需給のタイト化を和らげる効果があった可能性がある.

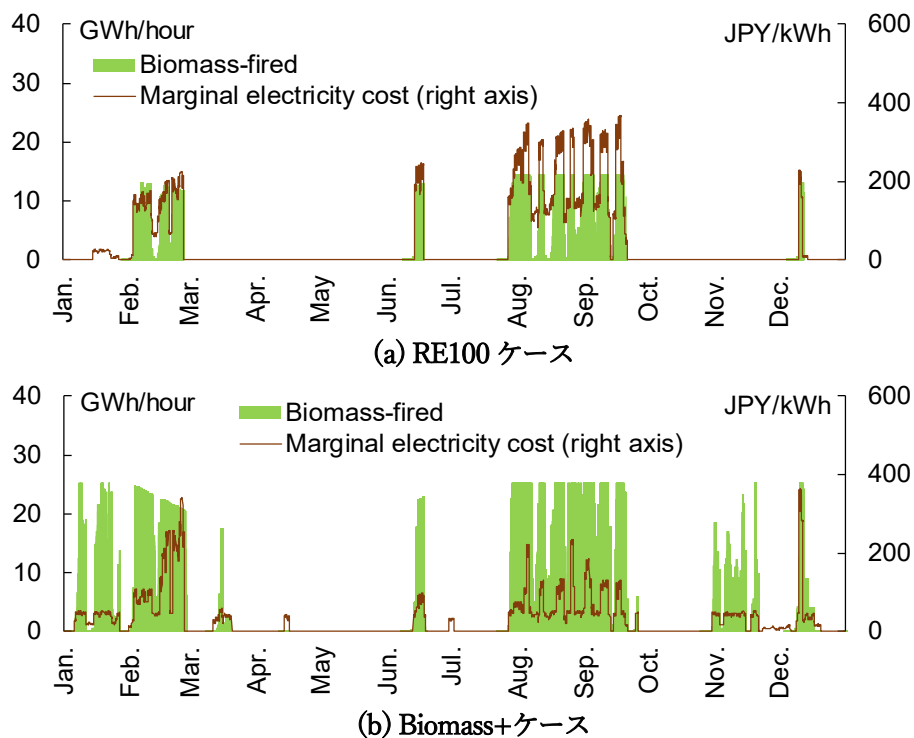


図 3-6 2050 年のバイオマス火力の 1 時間値発電量 (日本計)

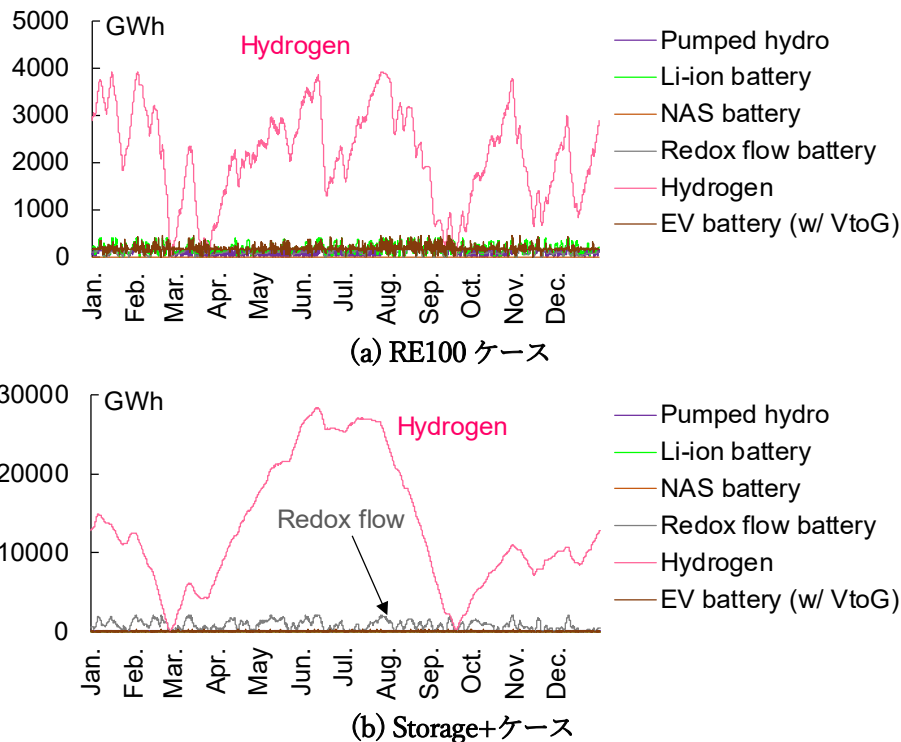


図 3-7 2050 年の 1 時間値のエネルギー貯蔵量 (State of Charge, 日本計)

Storage+ケースでは水素貯蔵システムやレドックスフロー電池の大幅な導入拡大が窺える。5 月には出力制御の代わりに水素製造やレドックスフロー電池への充電が選択された(図 3-5a)。これらの技術の建設費が安価となったことにより、出力制御よりも設備投資を行う方が経済合理的な選択となっている。そして、電力需給がタイト化する時期(図 3-5b)には水素発電の稼働が見られた。この燃料水素は 4~6 月頃にかけて製造されたものであり、数か月間の貯蔵を経て利用されている(図 3-7b)。水素貯蔵のエネルギー貯蔵量は最大で 28TWh に達するが、これは Storage+ケースの 2050 年の 12 日分の最終電力消費量に相当する。RE100 ケースにおいても水素貯蔵は週や月を跨ぐエネルギー貯蔵に用いられているが(図 3-7a)、Storage+ではより大規模かつ長期的に実施して季節間の電力需給調整を図っており、それが季節間の電力限界費用の平準化に寄与したと考えられる。

4. 結論

本研究では高時間解像度エネルギーシステムモデルを用いて、再エネ電力 100%かつカーボンニュートラルなエネルギーシステムの電力限界費用について感度分析を行った。感度分析にあたっては VRE 建設費と国内バイオマス資源量、エネルギー貯蔵技術費用の想定に着目した。

特徴的な結果として、RE100 ケースの電力限界費用は VRE 建設費に対してそれほど敏感ではないこと、他方で国内バイオマス資源量やエネルギー貯蔵技術の費用は影響したことが挙げられる。Dispatchable な再エネ電源であるバイオマス火力発電や大規模・長期のエネルギー貯蔵が VRE の季節性対応に貢献し、それらが電力限界費用を抑制する傾向が見られた。季節変動に関する統合費用が RE100 ケースの電力限界費用上昇の一因となっていたことが示唆されており、高い再エネ比率の達成に重要な要素と思われる。

ただし、バイオマス資源量を拡充した Biomass+ケースやエネルギー貯蔵技術の費用低減を想定した Storage+ケースにおいても電力限界費用は 29 円/kWh ほどの水準に達する。CCUS 付きの化石燃料火力発電や原子力発電、水素・アンモニア発電等の技術選択肢を広く考慮した標準的なケースの電力限界費用(16 円/kWh)と比較

すると依然として高価であり、経済的な課題が窺える。既報⁶⁾では RE100 ケースの経済的課題を指摘したが、本分析を通してその結論は大きく変わらなかった。勿論、今後も様々な観点からの検証が必要だが、既報の頑健性は低くはないと推察される。

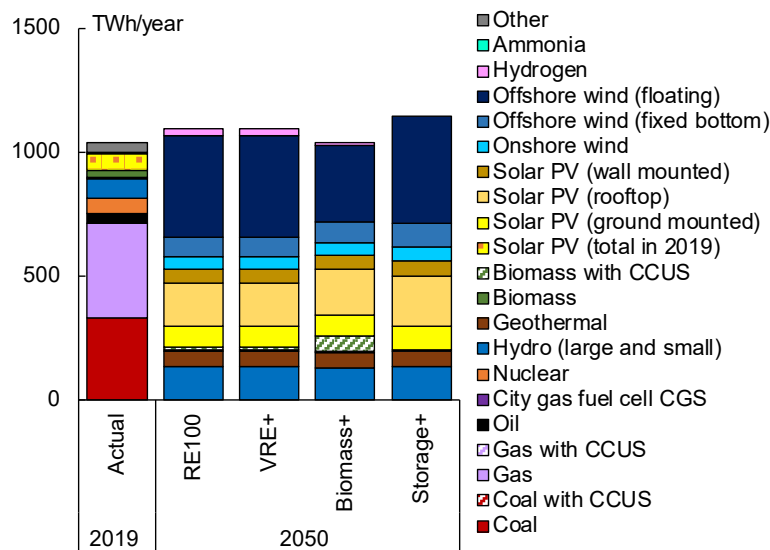
今後の検討課題としてモデルおよび試算の精緻化が挙げられる。本モデルの地域解像度は 5 地域であり、電力系統のトポロジーや接続制約、増強費用は簡略化されている。また、VRE 出力の波形も 5 地域に集約したものをを用いており、多様な地点の気象データが十分に反映されていない恐れがある。地域解像度を高め、より現実に即した分析を行うことが重要と思われる。また、本モデルは完全予見を仮定しており、電力需要や VRE 出力の予測誤差等を考慮していない。不確実性に係る費用を反映した分析も VRE 大量導入可能性の検討のために必要である。

謝辞

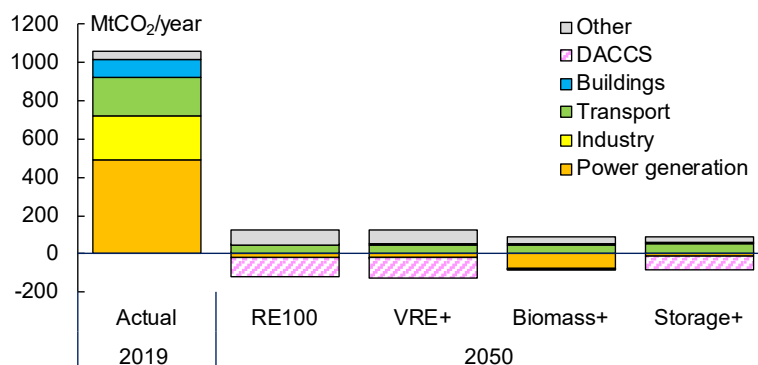
本研究の一部は（独）環境再生保全機構の環境研究総合推進費（2-2104）および文部科学省原子力システム研究開発事業 JPMXD0220354480 の助成を受けた。

付録

付図 1 に各ケースの日本計の発電電力量を、付図 2 に部門別 CO₂ 排出量を示す。



付図 1 各ケースの発電電力量



付図 2 各ケースの部門別 CO₂ 排出量（日本計）

参考文献

- 1) 秋元圭吾, 佐野史典; 2050 年カーボンニュートラルのシナリオ分析 (中間報告), 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 (第 43 回会合) 資料 2, (2021)
- 2) 国立環境研究所; 2050 年脱炭素社会実現に向けたシナリオに関する一分析, 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 (第 44 回会合) 資料 2, (2021)
- 3) 自然エネルギー財団; 2050 年の脱炭素日本を支えるエネルギーミックス—次期エネルギー基本計画の策定にむけて, 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 (第 44 回会合) 資料 3, (2021)
- 4) デロイトトーマツコンサルティング; カーボンニュートラル社会に向けたシナリオ分析, 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 (第 44 回会合) 資料 5, (2021)
- 5) 松尾雄司, 大槻貴司, 尾羽秀晃, 川上恭章, 下郡けい, 水野有智, 森本壮一; 2050 年カーボンニュートラルのモデル試算, 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 (第 44 回会合) 資料 6, (2021)
- 6) 大槻貴司, 尾羽秀晃, 川上恭章, 下郡けい, 松尾雄司, 水野有智, 森本壮一; 2050 年 CO₂ 正味ゼロ排出に向けた日本のエネルギー構成-自然変動電源の立地制約を考慮した分析-, 電気学会論文誌 B, Vol.142, No.7, pp.334-346, (2022, 掲載決定)
- 7) 林野庁; 森林・林業統計要覧 2021, p.5, (2022)
- 8) H. Obane, Y. Nagai, K. Asano; Assessing the potential areas for developing offshore wind energy in Japanese territorial waters considering national zoning and possible social conflicts, Marine Policy, Vol.129, 104514 (2021)

お問合せ: report@tky.iej.or.jp