

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

ゼロカーボン電源システムの安定化と 技術・経済性評価 (Vol.1)

— 安定的かつ経済的なゼロカーボン電力供給のための技術開発課題 —

令和 2 年 3 月

**Economic and Technological Evaluation for Zero Carbon Electric Power
System Considering System Stability (Vol.1):**
Technological Development Issues for Reliable and Affordable Zero Carbon Power Supply

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies

国立研究開発法人科学技術振興機構
低炭素社会戦略センター

LCS-FY2019-PP-21

概要

脱炭素社会の実現に向けて、電源起源のCO₂排出量をゼロとする電源システム（ゼロカーボン電源システム）を構築するための技術的・経済的評価が求められている。本提案書では、低炭素社会戦略センター（LCS）の構築してきた低炭素技術の定量的技術シナリオに基づく系統安定性を考慮した電源構成モデルを用いて、2050年のゼロカーボン電源システムを多角的に評価した。ゼロカーボン電源システムの構築に必要な技術指標とその経済性を示し、技術開発の方向性を示すことを目的としている。特に電力需要、慣性力供給技術、再生可能エネルギーポテンシャルに着目し、その経済性を評価した。省エネルギー、電力化率の上昇、IT関連の電力需要の増大などにより、将来の電力需要は不確実性が高い。電力需要800～3,000 TWh/年を分析対象とし、技術向上による太陽光発電ポテンシャルの拡大、浮体式を含む洋上風力発電の導入、送電網の大規模強化を考慮した。系統安定度の指標として地域内の同期発電機により供給される慣性力比率を50%、25%、10%と定め、その経済影響を評価した。系統安定化に寄与する技術として、多目的ダムを活用した新揚水発電、高温岩体地熱発電（HDR）の導入による影響を評価した。その結果、再生可能エネルギーおよび蓄電システムのコスト低減、送電網の強化に加え、再生可能エネルギーポテンシャルの拡大によって、ゼロカーボン電源システムの構築は経済性を加味しても実現可能であることを示した。特に、慣性力供給技術による経済影響が大きく、系統安定化のための技術開発の重要性を明らかにした。技術開発による効果は、再生可能エネルギー電源システムのコスト低減およびポテンシャル拡大の技術開発により、1～10兆円/年の電源コスト低減効果があり、系統安定度技術の向上により、1～20兆円/年の電源コスト低減効果があることが示された。以上をふまえて、本提案書では、再生可能エネルギーのコスト低減技術とポテンシャル拡大のための技術開発と産業育成、慣性力供給技術を含む系統安定化対策技術の推進を提案する。また、ゼロカーボン電源システムを前提とした大規模送電計画、広域の系統安定化のための技術・経済評価手法の構築を提案する。

Summary

To realize a decarbonized society, there is a need for technical and economical evaluation to construct a power supply system without CO₂ emission (zero-carbon electric power system) that takes into account the wide range of power demand expected due to energy conservation, an increased rate of electrification, and IT-related power demand. In this proposal, we evaluate a zero-carbon power system in 2050 with various aspects using a power-supply configuration model that takes into account system stability based on quantitative technology scenarios for low-carbon technologies established by the Low Carbon Society Strategy Center (LCS). The purpose of this study is to show the necessary technical indicators to construct a zero-carbon electric power system and its economics, and to show the direction of technological development. We evaluate the economic efficiency, focusing particularly on power demand, inertial power supply technologies, and renewable energy potential. The analysis covers a range from 800 to 3,000 TWh/year of power demand, taking into account the expansion of photovoltaic power generation potential through technological improvements, the introduction of offshore wind power generation including floating types, and the large-scale enhancement of the transmission grid. The inertia ratio of regions supplied by synchronized generators was set to 50%, 25%, and 10% as an index of system stability, and the economic impact was evaluated. We evaluated the effects of introducing new pumped storage power generation using a multipurpose dam and hot dry rock geothermal power generation (HDR) as technologies to improve system stability.

As a result, it was shown that the construction of a zero-carbon power supply system is feasible from an

economical aspect by developing technologies to reduce the costs of renewable energy power systems and storage systems, enhance the transmission grid system, and to expand the potential of renewable energy. In particular, the economic impact of the inertial power supply technology was significant, and the importance of technology development for system stabilization was clarified. The effects of technological development range from 1 to 10 trillion JPY per year of power cost reduction by reducing the cost of the renewable energy power systems and expanding their potential, and from 1 to 20 trillion JPY per year by improving the technologies that enhance system stability. Based on these outcomes, we propose to promote the development of technologies that reduce the cost of renewable energy, the development of technology for expanding the potential of renewable energy, the promotion of related industries, and the development of system stabilization technologies including technologies to produce inertial force. We also propose a large-scale power transmission plan based on a zero-carbon electric power system, and the establishment of a technical and economic evaluation method for stabilizing a cross-regional transmission grid system.

目次

概要

1. 緒言.....	1
1.1 ゼロカーボン電源システムの構築に向けた分析手法の提案.....	1
1.2 これまでの LCS の電源構成モデルを用いた研究概要.....	1
1.3 ゼロカーボン電源システムの技術・経済性評価.....	1
2. 手法の概要及びシナリオ条件.....	2
2.1 電源構成モデルを用いた経済性評価の概略.....	2
2.2 シナリオ条件.....	3
3. ゼロカーボン電源システムの技術・経済性評価.....	4
3.1 ゼロカーボン電源システムの構築と系統安定化対策技術の評価.....	4
3.2 技術改良・開発による経済性評価.....	8
4. ゼロカーボン電源システム構築の課題と指標の提案.....	9
4.1 同期発電機の効用と慣性力制約の意味付け.....	9
4.2 慣性力制約を緩和する技術の検討.....	9
4.3 ゼロカーボン電源システムの構築のための研究課題.....	10
5. 政策立案のための提案.....	10
参考文献.....	11

1. 緒言

1.1 ゼロカーボン電源システムの構築に向けた分析手法の提案

脱炭素社会の早期実現に向けて、日本においても温室効果ガス排出量を実質ゼロとする検討が始まっている。低炭素社会戦略センター（LCS）では、定量的技術・社会シナリオを構築するシステム研究を通じ、明るく豊かな脱炭素社会実現に向けた将来像を定量的に評価してきている。本研究では、LCS が構築してきた低炭素技術の定量的技術シナリオに基づく系統安定性を考慮した技術経済分析の手法を用い、2050年のゼロカーボン電源システムを多角的に評価した。

将来のゼロカーボン電源システムの構築には、火力発電システムに頼らない系統システムを構築しなければならないが、このような系統システムでは送電線容量、発電設備の配置、年間を通じた需給バランスが大きく異なり、全く新しい系統システム構築のための議論が必要となる。LCS では、以下の大胆な仮定を置くことにより、系統安定化を考慮した2050年断面の電源構成モデルを用いて、新たな技術の導入可能性を評価した。

- 1) 2050年断面における将来の低コスト再生可能エネルギーの導入
- 2) 送電設備のコスト低減を考慮した大規模な送電容量の追加
- 3) 対象地域内の慣性力比率を指標とした系統安定化対策技術
- 4) 技術開発による再生可能エネルギー導入ポテンシャルの拡大
- 5) 再生可能エネルギー電源の新技术の導入

新たな系統システムの構築には数十年の時間を要するため、ゼロカーボン電源システムを前提とした具体的かつ広範囲の系統システム設計が急務であり、本提案書ではその方向性を示す分析手法を提案する。

1.2 これまでのLCSの電源構成モデルを用いた研究概要

LCS では、低炭素電源システムを評価するため、定量的技術シナリオを用い、系統安定性を考慮した多地域電源構成モデルを構築してきた。そこでは、再生可能エネルギーのコスト低減を評価した定量的技術シナリオの結果から、電源システム起源CO₂排出量85%以上の削減が現状と同等のコスト水準で達成できることを明らかにし、各技術開発項目を示した。特に、太陽光・風力・蓄電池システムのコスト低減、安定化電源である高温岩体地熱発電（HDR）、新揚水発電の技術導入効果を評価してきた。また、電力需要の増大、地域間送電網の強化、慣性力を供給する同期発電機の重要性についても示してきた。これらの研究成果に基づき、LCS ではゼロカーボン電源システムを評価するためのLCS電源構成モデルを構築した。

1.3 ゼロカーボン電源システムの技術・経済性評価

本研究は、ゼロカーボン電源システムを評価するLCS電源構成モデルを用いて、系統システムの構築に必要な指標を示し、技術開発の方向性を示すことを目的としている。本手法は、低炭素技術の経済性評価とデータ構築、技術・社会シナリオを相互に評価したシステム研究などによる研究成果を集約し、新たな技術、社会像の定量的な評価によって構築されている。これにより、将来の漠然とした新しいシステム設計に対して、多角的な技術評価に基づき、各技術の経済影響を定量的に評価することを可能にしている。本提案書では、特に電力需要、慣性力供給技術、再生可能エネルギーポテンシャルに着目し、その経済性を評価した。本章では、LCS電源構成モデルを用いたゼロカーボン電源システムの技術・経済性評価の目的を示した。2章では、本手法の概要および、検討したシナリオ条件について解説する。3章では、シナリオ条件ごとの計算結果をまとめ、4章では、分析結果に基づき、ゼロカーボン電源システムの構築に必要な評価指標について考察する。5章では、本提案書の研究結果から、政策立案のための提案を示す。

2. 手法の概要及びシナリオ条件

2.1 電源構成モデルを用いた経済性評価の概略

LCS 技術シナリオと LCS 電源構成モデルを用いた技術・経済性評価の概略を図1に示す。電源構成モデルは、電力需要、CO₂ 排出量削減目標を設定し、技術シナリオに基づき、電源システムの電力コストを算出する。さらに、コストまたは CO₂ 排出量を最小化とする線形計画法を用いた最適化計算により、定められた制約条件下において、発電システム、蓄電システム、送電システムの設備容量と燃料消費量を計算し、電力システムの総コストと CO₂ 排出量を算出する。本提案書では、まず CO₂ 排出量最小化により、CO₂ 排出量削減ポテンシャルを計算し、ゼロカーボン電源システムの構築が可能となる条件を評価する。次に、それぞれの系統安定化対策技術に対して、コスト最小化となる電源構成および発電コストを計算する。ゼロカーボン電源システムの経済性評価のために、2050 年の時間断面において、CO₂ 排出削減目標と電力需要を定め、LCS 技術シナリオの条件を選択し、技術性能指標（建設費、設備利用率、および運用係数）を設定する。最適化計算においては、全国を 9 つの地域^{a)}に分割し、季節ごとの代表日における各地域の 1 時間毎の電力需要を設定する。制約条件には、各発電設備の設備制約、変動に関する制約、地域間の送電制約、蓄電システムの制約、各地域の気象条件や地理的条件による制約を定めた。全ての設備容量を内生化し、各地域における慣性力比率の制約を加えているところが特徴である。

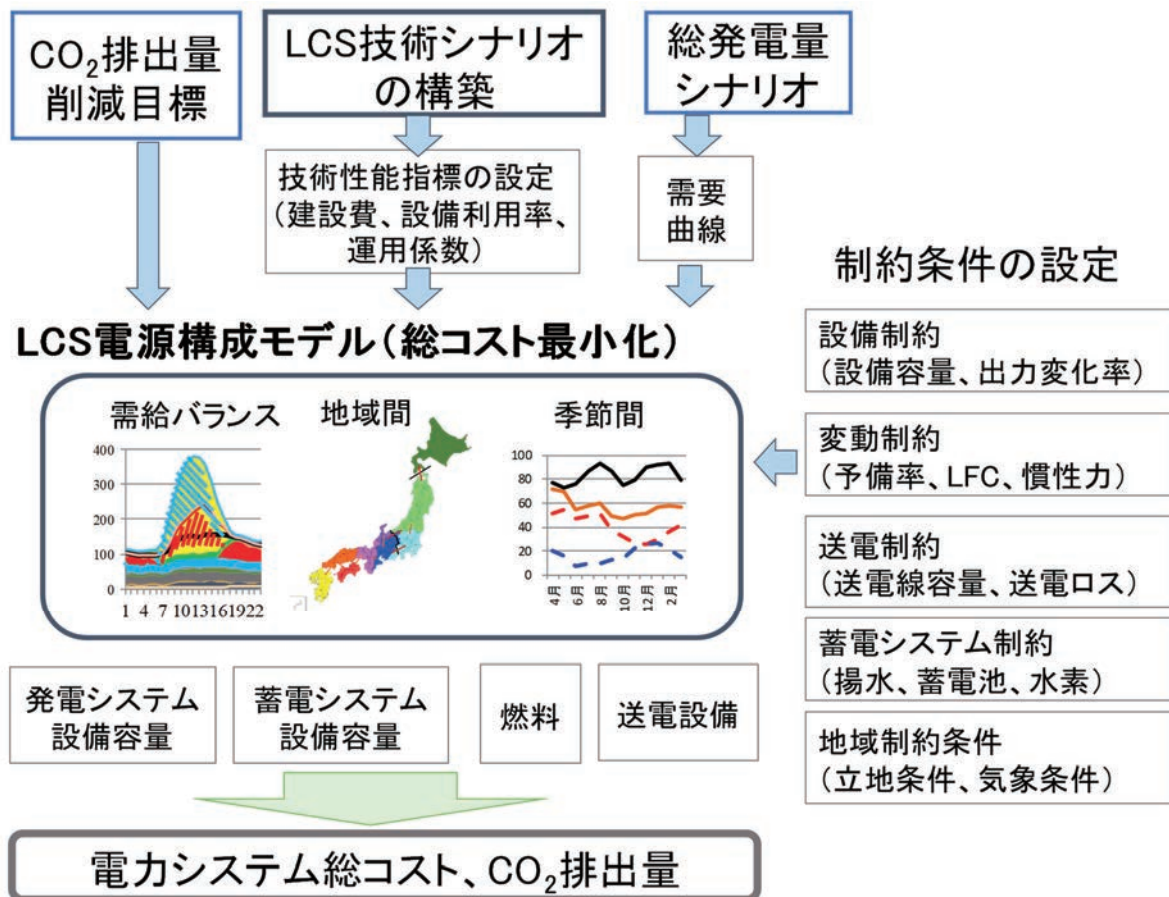


図1 LCS 技術シナリオ及び LCS 電源構成モデルを用いた技術・経済性評価の概要

^{a)} 各電力会社の地域区分（北海道、東北、関東、北陸、中部、関西、中国、四国、九州）で分割。沖縄を除く。

2.2 シナリオ条件

再生可能エネルギーは、水力、太陽光、風力、木質バイオマス、地熱を対象としている。前報[1]と比較して、太陽光発電システム、風力発電システムのコストおよび導入ポテンシャルを見直している。太陽光発電システムは技術開発による導入ポテンシャルの拡大[3]を考慮し、モジュール変換効率の向上、耕作放棄地の利用、用地の利用効率化から、前報の約2倍となる。風力発電において、既報の分析では陸上のみを対象としていたが、本提案書では洋上風力発電の技術シナリオ[2]として着床式、浮体式を含めている。

表1に主なシナリオ条件を示す。電力需要を800TWh/年から3,000TWh/年の範囲とし、200TWh/年刻みの12ケースを設定した。

系統安定対策技術として、地熱発電におけるHDR[4]と、新揚水発電の利用を想定した。新揚水発電[5]は、多目的ダムを下池として、周囲の山に新たに上池を新設した発電・蓄電を行うシステムである。

慣性力比率を制約条件として、計算対象としている1時間における電力需要に対する同期発電機の発電量の比率（慣性力制約）を設定している。制約値は、10、25、50%の3ケースとした。同期発電機としては、火力、原子力、水力、地熱、揚水、水素タービンが対象となる。直流送電により接続される地域は周波数と位相が異なるため、同一周波数となる3地域（北海道、東日本（東北、関東）、西日本（北陸、中部、関西、中国、四国、九州））に対して、それぞれの地域で慣性力比率を計算した。地域間送電網は、現状、および送電容量を増加させて系統を強化したケースを設定した。

表1 電力需要と系統安定化対策技術のシナリオ条件

項目	条件
電力需要（12 ケース）	800～3,000 TWh/年（200TWh/年 刻み）
新揚水発電（2 ケース）	導入なし／あり（導入可能設備容量 100 GW、500 GWh）
高温岩体地熱発電（2 ケース）	導入なし／あり（導入可能設備容量 66 GW）
慣性力制約（2 ケース）	50%以上／25%以上／10%以上
地域間送電網強化（2 ケース）	現状／地域間送電網強化

3. ゼロカーボン電源システムの技術・経済性評価

3.1 ゼロカーボン電源システムの構築と系統安定化対策技術の評価

(1) 電力需要と CO₂ 排出量の最大削減ポテンシャル

図2に CO₂ 排出量削減ポテンシャルと電力需要の関係を示す。電力需要 800~3,000 TWh/年の範囲において、系統安定化対策技術の導入によって削減可能な CO₂ 排出量の削減率を示している。現状の地域間送電網を用いた慣性力制約 50%のケースを細点線・記号 0 で、地域間送電網を強化し、慣性力制約が 50%、25%、10%のケースをそれぞれ細実線・記号 1、太実線・記号 2、太破線・記号 3 で示す。さらに、それぞれの慣性力制約、地域間送電網の条件における、HDR、新揚水発電の有無を各色およびシンボルで示す。また HDR 無・新揚水発電無を記号 A、HDR 無・新揚水発電有を記号 B、HDR 有・新揚水発電無を記号 C、HDR 有・新揚水発電有を記号 D で表す。

前報[1]では、地域間送電網の強化によって、慣性力制約 50%では電力需要 800 TWh/年、慣性力制約 25%では電力需要 1,000 TWh/年まではゼロカーボン電源システムが構築可能であることを示した。本提案書では、太陽光発電システムの導入ポテンシャルの拡大および洋上風力発電システムを考慮しており、図2の結果より、電力需要が増加したケースでもゼロカーボン電源システムの構築可能であることが示された。系統安定化対策技術について現状技術を示した 0-A (現状の地域間送電網、慣性力制約 50%、HDR 無、新揚水無) では、電力需要 1,200 TWh/年まで CO₂ 排出量削減率が 100%であり、ゼロカーボン電源システムが構築可能である。また、このゼロカーボン電源システムが構築可能な電力需要は、HDR および新揚水発電の導入により 1,400 TWh まで増加した (0-D)。

地域間送電網の強化により、ゼロカーボン電源システムが構築可能な電力需要は、慣性力制約 50%のもとでは 1,400 TWh/年となり (1-A)、さらに新揚水発電の導入、HDR の導入により、電力需要 2,000 TWh/年まで上限が高くなる (1-D)。慣性力制約 25%のケースでは、新揚水発電、HDR の導入により、電力需要の上限は 2,000~2,600 TWh/年であった (2-A~D)。さらに慣性力制約 10%のケースでは、新揚水発電あるいは HDR を導入しなくとも 2,600 TWh まで (図示せず)、新揚水発電および HDR の導入により電力需要 2,800 TWh/年まで、ゼロカーボン電源システムが構築可能であった (3-D)。一方、送電網強化を行わない場合には、慣性力制約 10%のもとで、新揚水発電および HDR を導入しても、上限は 1,400 TWh であった。

以上の結果をふまえて次項 (2) では、地域間送電網を強化し、慣性力制約 25%としたケースにおいてゼロカーボン電源システムの構築が可能となる電力需要 800 TWh/年~2,000 TWh/年の範囲の発電コストと電源構成について示す。

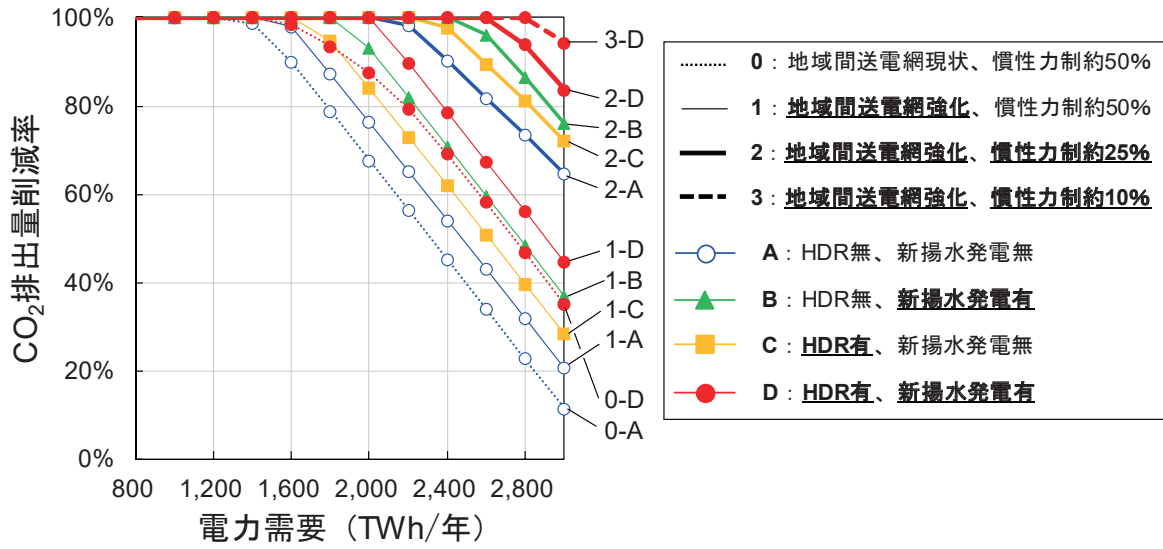


図2 CO₂ 排出量削減ポテンシャルと電力需要

(2) ゼロカーボン電源システムの発電コストと系統安定化技術

系統安定化技術の条件別のゼロカーボン電源システムの電力需要 800~2,000 TWh/年に対する発電コストを図3に示す。地域間送電網の強化以外の系統安定化対策技術を含まない現状技術(1-A)では、ゼロカーボン電源システム構築の上限は電力需要 1,400 TWh/年であり、発電コストは 21~33 円/kWh となる。新揚水発電の導入(1-B)により電力需要 800~1,800 TWh/年にて、発電コストは 15~29 円/kWh となる。HDRを導入(1-C)すると、上限が 1,600 TWh となり、発電コストは 16~28 円/kWh となる。新揚水発電と HDR 両方を導入(1-D)すると、800~2,000 TWh の範囲で発電コストは 13~26 円/kWh となる。慣性力制約を 25%とした場合は新揚水・HDR の導入がないとき(2-A)に 14~24 円/kWh、新揚水を導入(2-B)すると 13~18 円/kWh となった。さらに慣性力制約を 25%から 10%とする(2-B→3-B、あるいは 2-D→3-D)ことにより、1~4 円/kWh 発電コストは低下した。

慣性力制約を 50%から 25%とすることにより、発電コストは大幅に削減することから、慣性力制約を緩和させる技術がゼロカーボン電源システムの構築に最も大きな影響を与える。また、電力需要の増加により発電コストは増大するため、将来の電力需要を評価し、それぞれの電力需要において必要となる様々な技術を評価しておくことが重要となる。

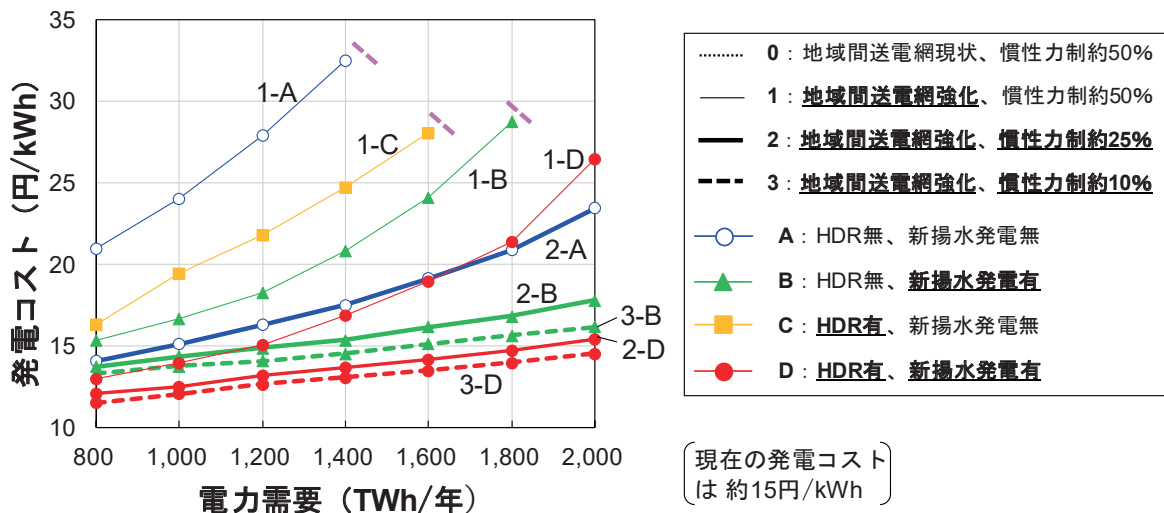


図3 ゼロカーボン電源システムの発電コストと電力需要

次に、現状およびいくつかのケースの電源構成と発電コストを表2に示す。ケース1は地域間送電網の強化以外の系統安定化対策技術を含まない現状技術のケースである。ゼロカーボン電源システムにける発電コストは 24.0 円/kWh と高い。電力需要 1,000 TWh/年に対して、総発電量は 2,097 TWh/年と半分以上がエネルギーロスとなっている。エネルギーロスは送電ロス、蓄電ロス、余剰電力があり、特に蓄電のための水素タービンにおいては、電気分解による水素製造、および水素タービン運転時のエネルギーロスが大きく、エネルギー効率は 33%と小さい。新揚水発電を導入したケース2では発電コストは 16.7 円/kWh であり、水素タービン、蓄電池の利用量が減少し、総発電量は 1,486 TWh/年と低下している。さらに HDR を導入したケース3では発電コストは 14.0 円/kWh となり、慣性力を供給できる同期発電機を有する新揚水発電、HDR の導入により、電力需要 1,000 TWh/年にて現状と同等の発電コストでゼロカーボン電源システムの構築が可能となる。さらに、電力需要が 1,400 TWh/年のケース4では 16.9 円/kWh となり、電力需要の増加に伴い、水素、蓄電池、揚水の利用量も増加し、エネルギーロスが大きくなる。慣性力制約を 25%に緩和したケースでは、電力需要 1,400 TWh/年のケース5で 13.7 円/kWh、電力需要 1,800

TWh/年のケース6では14.7円/kWhとなり、電力需要が増加しても現状と同等のコストでゼロカーボン電源システムの構築が実現可能となる。このとき、エネルギーロスは電力需要1,400TWh/年、1,800TWh/年に対してそれぞれ332TWh/年、472TWh/年となる。

表2では様々な電力需要、系統安定度技術による条件による代表的な傾向を示したが、次に分析対象とした全ケースの計算結果から、各技術の導入量の範囲を示す。ゼロカーボン電源システムの構築には、太陽光発電は600~1,400TWh/年(600~1,400GW)、風力発電は300~1,000TWh/年(100~320GW)必要である。特に風力発電が500TWh/年以上を必要とするケースでは、洋上風力発電の役割が大きい。蓄電池システムは900~2,200GWhの蓄電容量が必要であり、水素タービン発電は0~400TWh/年が必要となる。蓄電池は特に太陽光発電と電力需要の1日の中での変動を調整し、水素タービン、揚水が季節変動を調整する。さらに、バイオマス、地熱も季節により出力を変化させることにより、季節変動を調整する役割も担っている。

表2 日本のゼロカーボン電源システムの電源構成と発電コスト

年		2013	2018	2050					
ケース				1	2	3	4	5	6
慣性力制約		—	—	50%	50%	50%	50%	25%	25%
高温岩体地熱発電		—	—	無	無	有	有	有	有
新揚水発電		—	—	無	有	有	有	有	有
電力需要 [TWh/年]		990	1,107	1,000	1,000	1,000	1,400	1,400	1,800
発電量 [TWh/年]	原子力	9	62	0	0	0	0	0	0
	石炭・LNG・石油等	977	924	0	0	0	0	0	0
	水力	85	78	130	130	130	130	130	130
	太陽光	9	65	1,371	761	673	1,143	897	1,302
	風力	5	11	554	558	301	626	569	700
	地熱	2	2	12	12	112	112	112	112
	木質バイオマス	3	20	31	25	30	31	29	29
	合計	1,090	1,162	2,097	1,486	1,246	2,041	1,732	2,272
蓄電容量 [TWh/年]	水素タービン発電	—	—	347	53	7	147	16	32
	蓄電池	—	—	644	338	296	493	374	545
	揚水	10	10	80	384	333	424	183	282
蓄電池設備容量 [GWh]		—	—	2,176	1,062	971	1,695	1,184	1,775
発電コスト [円/kWh]		15.1	14.9	24.0	16.7	14.0	16.9	13.7	14.7
(うち、送電線費用)		(1.0)	(1.0)	(2.6)	(2.1)	(1.5)	(1.9)	(1.7)	(1.7)

3.2 技術改良・開発による経済性評価

表3に、ゼロカーボン電源システムの構築に重要な技術の改良・開発による経済影響を示す。発電コストは電源システムの年間総経費を電力需要で除して計算している。電源システムの年間総経費は、各電源、蓄電、送電システムの年間総経費を積算している。ここで、太陽光発電、風力発電、蓄電池の各システムについては、各電力需要シナリオにおけるそれぞれのシステムの年間総経費と、現状技術の設備費または発電コストとした場合の年間総経費との差額を電源コスト低下額として示した。HDR と新揚水発電の導入、慣性力制約については、表1に示したそれぞれのシナリオ条件における計算結果から年間総経費の差額を電源コスト低下額とした。また、これらの導入技術およびそのコスト低減・制約緩和を実現するために重要となる技術改良・開発項目も示した。

太陽光発電は導入量が多く、その影響は4~8兆円/年と大きい。風力発電は電力需要が大きい場合に導入量が大きく、電力需要1,800TWh/年のケースでは10兆円/年と、洋上風力発電の技術開発の効果が高まる。系統安定化に資する新揚水、HDR は電力需要により導入効果が大きく異なり、1~7兆円/年となる。慣性力制約は9~20兆円/年と電力需要の低いケースでも経済影響は大きく、慣性力供給技術および系統システムの開発が重要である。このように、それぞれの技術毎の経済影響を示し、技術改良・開発への投資効果を評価していくことが必要となる。また、その際には、将来の電力需要予測に幅を持たせた、複数の選択肢を相互評価することも重要となる。

表3 技術改良・開発による電力コスト低下 (現在→2050年)

項目	技術改良・開発の内容	現状技術から将来技術へのコスト/制約指標の変化	電源コスト低下額 [兆円/年]		
			電力需要 1,000 TWh/年	電力需要 1,400 TWh	電力需要 1,800 TWh
太陽光発電	高効率化、切削接合、生産性向上	設備費軽減 (90→40 円/W、原価)	4	8	8
風力発電(洋上)	大型化、設備利用率の向上	発電コスト軽減 (36→14 円/kWh)	0.1	1	10
蓄電池	材料開発、生産性向上	設備費軽減 (10→6 円/Wh)	0.5	1	1
高温岩体地熱発電	地下構造	→9 円/kWh	2	4	7
新揚水発電	多目的ダム上部地調査・設計	→20 円/kWh	1	4	7
慣性力制約緩和	装置、システム開発	50%以上→25%以上	9	20	20

4. ゼロカーボン電源システム構築の課題と指標の提案

本提案書では、ゼロカーボン電源システム構築のうえでの系統安定化対策技術に着目し、慣性力を供給できる同期発電機を有する低炭素発電技術（新揚水発電、HDR）の導入と、慣性力比率を指標とした制約の緩和という側面から検討し、それぞれの重要性を定量的に明らかにした。本章では、系統安定化技術としての役割、指標の一つとして提案している慣性力制約について説明する。

4.1 同期発電機の効用と慣性力制約の意味付け

同期発電機は、需給調整、周波数調整、位相角調整の機能があり、系統安定性に寄与する。電源システムは、それらを総合的に評価した多数のシミュレーションと実験結果の基に構築されているが、将来の未知の系統システムを評価することはできない。本研究では、系統安定度を評価する指標として簡易に慣性力比率として示すことにより、再生可能エネルギーの時間変動性、地域偏在性に対するエネルギーポテンシャルと電源および蓄電技術の経済性を評価するとともに、系統安定度の想定による系統システムの経済性評価の違いを示した。

ゼロカーボン電源システムの構築には、現状の系統の10倍以上の送電量が必要とされるが、無数にある将来シナリオにおける詳細な分析は困難である。再生可能エネルギー普及の進む欧州では、水力、原子力などの比率が高く、慣性力低下による位相角調整の問題は顕在化していない。日本では水力発電のためのダム開発・拡張は難しく、原子力発電は系統安定化のために用いていないため、ゼロカーボン電源システムの構築に向けて、この問題が他国より早く顕在化するが、明快な解決策は存在していない。一部、アイルランド、イギリスなどでは、風力発電の割合が高く、非同期発電機の割合を指標とした評価がなされ、同期発電機が極端に少なくなるケースも検討され始めている[6,7]。これらの分析例では、現状の系統システムに対し、火力等の同期発電機が一定割合存在しているか、仮想同期発電機が十分に系統安定度に寄与すると仮定して検討されている。エネルギーモデルを用いた多くの分析では、蓄電池、仮想同期発電機の技術開発を根拠に、エネルギーモデルでは系統運用を可能とし、将来の系統システムに慣性力制約は評価されていないのが現状である。

本研究では、直流送電により周波数と位相が異なる地域を区分して地域を定めた。対象地域における具体的な同期発電機の配置、送電線の強化等の系統システムの設計、仮想同期発電機などを用いた運用などは電力システムのモデルにおいて大規模な研究が必要とされる。本研究は、様々な将来の電力システムにおける技術導入の方向性を示すため、経済的な影響を評価した試みとしての位置づけである。

4.2 慣性力制約を緩和する技術の検討

将来において慣性力比率を下げるためには、地絡事故などによる急激な周波数変動に対応できる技術の確立が必要である。広域における慣性力維持においては、直流大容量送電との組み合わせや、仮想同期発電機、蓄電池を用いた同期発電機システムなどが想定される。本研究では、慣性力を提供する電源システムとして、同期発電機を持つ火力、原子力、地熱、バイオマス、水力に加え、水素タービンを想定した。既存技術に加え、同期発電機を持つ新たな電源システムとして、HDR、新揚水発電を評価したが、慣性力比率を下げるための具体的な技術は示していないため、今後の研究課題である。

現状の技術水準を元に、将来の系統運用においては慣性力制約50%を基準とした。システム、潮流問題などの異なる状況では厳密には比較できないが、系統の専門家からの助言、他国での運用状況に基づき独自に定めた基準である。ゼロカーボン電源システムの構築に向けては、慣

性力制約 25%以下とすることによる経済影響が大きい。このため、広い地域における系統システムの技術開発が必要となる。システム監視技術、廃棄後の火力・原子力の同期発電機の活用、長距離高圧直流送電、マイクログリッドなど、新たな系統システム構築における検討課題を評価分析する必要がある。

一方で、省電力化も有効である。慣性力制約 50%を維持しつつ、現在と同水準の電力コストを達成するためには、太陽光発電の技術開発、新揚水発電、HDR、洋上風力の導入促進を図りつつ、電力需要を低減する政策が必要となる。なお、LCS では太陽光発電[3]、洋上風力発電[2]、新揚水発電[5]および HDR[4]などの技術開発のための研究開発課題なども、個別の提案書において評価している。

4.3 ゼロカーボン電源システムの構築のための研究課題

本提案書では、対象地域における同期発電機の発電量割合（慣性力比率）の制約を指標として分析し、技術開発、導入促進の課題を示した。将来の系統システム構築については、具体的かつ詳細な系統を評価することは困難である。このため、全体評価に必要な指標を示して、電力需要、慣性力供給、再生可能エネルギーポテンシャルなどの技術とその導入・技術開発のもたらす経済影響を評価することが必要である。本提案書では、系統安定度の指標の一つとして慣性力比率を示したが、今後はゼロカーボン電源システムの構築に向けた様々な指標を検討し、技術・経済性評価の研究を進めていく予定である。

5. 政策立案のための提案

本提案書では、ゼロカーボン電源システムを評価する LCS 電源構成モデルを用いた技術・経済性評価手法を示し、将来の系統システム構築に必要な指標として、電力需要、慣性力供給技術、再生可能エネルギーポテンシャルに対する各技術とその影響を示した。その結果から、科学技術を促進するための政策立案に向けて、以下を提案する。具体的な技術開発項目は各項目に記した別途提案書より提案されている。

- ・再生可能エネルギーのコスト低減のための技術開発の促進[2,3,8,9]
- ・将来の広域の慣性力比率を指標とし、これを低減するための系統安定化対策技術開発の促進
慣性力供給に資する低炭素電源システムとして、HDR、新揚水発電の技術開発、導入支援[4,9]
- ・電力需要の拡大に伴い、再生可能エネルギーの導入ポテンシャルを拡大するため、太陽光発電の高効率化・産業育成、洋上風力のコスト低減技術の促進[2,3]
- ・ゼロカーボン電源システムを前提とした大規模送電計画、系統安定化対策などの系統システムに対する長期技術・経済評価

参考文献

- [1] 低炭素社会の実現に向けた政策立案のための提案書, 技術開発編, “低炭素電源システムの安定化と技術・経済性評価 (Vol.3) – 2050年の低炭素電源システムの技術開発課題 –”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2019年3月.
- [2] 低炭素社会の実現に向けた政策立案のための提案書, “風力発電システム (Vol.2) – 大規模導入を想定した将来の日本型風力発電システムの経済性評価及び技術開発課題 –”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2020年3月.
- [3] 低炭素社会の実現に向けた政策立案のための提案書, “太陽光発電システム (Vol.6) – 2050年に向けた主力電源としての太陽光発電システム産業の将来像 –”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2020年3月.
- [4] 低炭素社会の実現に向けた政策立案のための提案書, 技術開発編, “地熱発電 (Vol.2) – 高温岩体発電の発電コスト試算 –”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2016年3月.
- [5] 低炭素社会の実現に向けた政策立案のための提案書, “日本における蓄電池システムとしての揚水発電のポテンシャルとコスト (Vol.2)”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2020年2月.
- [6] O’Sullivan J, Rogers A, Flynn D, Smith P, Mullane A, O’Malley M, “Studying the Maximum Instantaneous Non-Synchronous Generation in an Island System –Frequency Stability Challenges in Ireland”, IEEE transaction on power systems, vol. 29, no. 6, p2943-2951, 2014.
- [7] Ierna R, Zhu J, Roscoe AJ, Yu M, Dysko A, Booth CD, Urdal H, “Effects of VSM Convertor Control on Penetration Limits of Non-Synchronous Generation in the GB Power System”, In: 15th Wind Integration Workshop, 2016.
- [8] 低炭素社会の実現に向けた政策立案のための提案書, 技術開発編, “木質バイオマス燃料のコスト低減 (Vol.2) – 木質バイオマスの生産総コストとその低減策 –”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2017年3月.
- [9] 低炭素社会の実現に向けた政策立案のための提案書, 技術開発編, “蓄電池システム (Vol.6) – リチウムイオン電池のエネルギー密度向上の可能性と研究課題 –”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2019年2月.

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

**ゼロカーボン電源システムの安定化と
技術・経済性評価 (Vol.1)**

— 安定的かつ経済的なゼロカーボン電力供給のための技術開発課題 —

令和2年3月

**Economic and Technological Evaluation for Zero Carbon Electric Power
System Considering System Stability (Vol.1):**

Technological Development Issues for Reliable and Affordable Zero Carbon Power Supply

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies,
Center for Low Carbon Society Strategy,
Japan Science and Technology Agency,
2020.3

国立研究開発法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター

本提案書に関するお問い合わせ先

- 提案内容について・・・低炭素社会戦略センター 主任研究員 井上 智弘 (INOUE Toshihiro)
フェロー 下ヶ橋 雅樹 (SAGEHASHI Masaki)
- 低炭素社会戦略センターの取り組みについて・・・低炭素社会戦略センター 企画運営室

〒102-8666 東京都千代田区四番町5-3 サイエンスプラザ4階
TEL : 03-6272-9270 FAX : 03-6272-9273 E-mail : lcs@jst.go.jp
<https://www.jst.go.jp/lcs/>

© 2020 JST/LCS

許可無く複写・複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。
