



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

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－

平成31年3月

**Economic Evaluation for Low Carbon Electric Power System Considering  
System Stability (Vol.3):**

Technological Development Issues of Low Carbon Electric Power Systems in 2050

Strategy for Technology Development

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-FY2018-PP-19

## 概要

低炭素社会戦略センター（LCS）では、多様な再生可能エネルギーの技術開発評価に基づく定量的技術シナリオを構築し、電源構成にもたらす影響を評価している。独自の再生可能エネルギーの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開発してきた。既報では、2050年の電源起源CO<sub>2</sub>排出量85%削減は2013年比で同等となる発電コストで実現可能であることを示し、低炭素電源システムの技術開発がもたらす経済的影響を評価してきた。本稿では、送電網強化を含む低炭素電源システムの系統安定性に寄与する技術とその経済性を評価し、電源起源のCO<sub>2</sub>排出量80～100%削減を実現可能とする道筋を示した。

再生可能エネルギーが大規模に導入されると系統安定化対策が必要であり、火力発電が持つ同期発電機の割合が低下することにより、特に慣性力の低下による影響が懸念されている。このため、系統安定度の対策として、蓄電池の普及、送電網の強化、慣性力の供給技術について評価し、低炭素電源システムの経済性を示した。また、CO<sub>2</sub>排出量を90%削減するケースでは、慣性力を持つ同期発電機の割合を半分とすることにより、年間総経費約5兆円の差が生じることを示した。同期発電機の割合を減らしてかつ系統を安定化させるための技術開発が重要である。特にCO<sub>2</sub>排出量を90%以上削減するには、慣性力の供給制約による発電コストへの影響が大きく、系統安定化のための新しい技術開発が必要となる。このように、技術開発の経済影響を評価し、重要技術開発項目を評価している。さらに、電力需要が増大すると技術制約が大きくなるため、今後検討を進めていく。

## Summary

At the Center for Low Carbon Society Strategy (LCS), quantitative technology scenarios have been developed based on various technological development evaluation of renewable energy sources and the evaluation of their impact on power supply configuration. We have developed a multi-regional power generation model considering system stability using original renewable energy technology scenarios. In the previous report, we have shown that CO<sub>2</sub> emissions from electric power systems can be reduced by 85%, at almost the same power cost as that incurred in the present (2013) by 2050 and evaluated the economic impact of technology development of low carbon electric power system. In this paper, we evaluated the technologies that contribute to the system stability of low carbon electric power systems including enhancement of the electricity grid and its economics. As a result, we showed pathways to reduce 80 to 100% of CO<sub>2</sub> emissions from electric power systems.

When renewable energy is introduced on a large scale, system stabilization measures are necessary. There is a concern about the influence of decreasing inertial force when reducing the proportion of synchronous generators which are mainly based on thermal power. For this reason, as measures to contribute to system stability, we evaluated the installed capacity of storage battery systems, the enhancement of the electricity grid, and the technology of electrical inertia. Also, it is shown that the total annual expense difference is about 5 trillion yen in the case of reduction of CO<sub>2</sub> emissions by 90%, which is half of the ratio of synchronous generators with electric inertial force. It is important to develop technologies to reduce the proportion of synchronous generators and to stabilize the system. Particularly, in order to reduce CO<sub>2</sub> emissions by 90% or more, the supply constraint of electrical inertial force has a large influence on the power generation cost. It is necessary to develop new technologies for system stabilization. In this way, we evaluate the economic impact of technological development and evaluate important technical development issues. Furthermore, there are remaining research issues such as the future increase in electricity demand that creates further technical restrictions.

## 目次

### 概要

1. 緒言.....	1
2. 電源構成モデルを用いた低炭素電源システムの評価手法.....	2
2.1 評価手法の特徴.....	2
2.2 多地域電源構成モデルを用いた評価手法.....	2
3. 系統安定化技術の経済性評価.....	3
3.1 系統安定化技術の評価.....	3
3.2 電力需要とCO <sub>2</sub> 排出量削減率の評価.....	6
4. 政策立案のための提案.....	7
参考文献.....	7

## 1. 緒言

日本は、2050年までに温室効果ガス排出量を80%削減する目標を掲げており、第5次エネルギー基本計画には、再生可能エネルギーを主電源化することが明示されている。IPCCでは2050年1.5度目標に向けた指針を示しており、電源システム起源のCO<sub>2</sub>排出量をゼロに向けた試みが必要となっている。ゼロエミッションを目指す電源システムを構築するためには、2050年の長期的な視点から、重要な技術を定量的に評価する必要がある。同時に、系統安定性を考慮して、再生可能エネルギーが大規模に導入されるときが発電システムの経済性を評価することも必要である。

本研究の主目的は、電源システムからのCO<sub>2</sub>排出量削減と発電コストの関係を明らかにするために、将来の技術レベルを評価することである。LCSでは、多様な技術開発の評価に基づく独自の定量的技術シナリオ[1-5]を構築し、CO<sub>2</sub>排出量削減の電源構成にもたらす影響を評価してきた[6-9]。系統安定性を考慮した多地域電源構成モデルを開発し、再生可能エネルギーのコスト低減技術、省エネルギーによる電力需要の削減が重要であることを示し、以下の点を明らかにしてきた。

1. 電源起源のCO<sub>2</sub>排出量85%の削減も現状と同等の発電コストで実現可能
2. 低炭素電源の技術開発と省電力による経済性影響が大きい
3. 系統安定化のための新技術が必要

既報[6]では、電力需要、再生可能エネルギーの技術水準、系統安定化に寄与する低炭素電源の導入量条件を検討し、2050年80%削減に対する発電コストの影響を示した。その結果、2050年に電源システム起源のCO<sub>2</sub>排出量を2013年比80%削減することは、経済合理的にも可能であることを示した。さらに、特に、太陽光発電、蓄電池システム、高温岩体地熱発電の技術開発が重要であることを示した。また、既報[7]では、発電コストを2013年とほぼ同等にする条件で、電源システム起源のCO<sub>2</sub>排出量を、2013年比85%以上削減するためには新たな技術開発の促進が必要であるが、80%削減であれば、2020年の技術レベルで達成可能であることが判明した。

本稿では、さらに電源システムからのCO<sub>2</sub>排出量をゼロに向けて、系統安定度を強化するための技術課題とその経済性を評価する。

## 2. 電源構成モデルを用いた低炭素電源システムの評価手法

### 2.1 評価手法の特徴

再生可能エネルギーの主力電源化が現実的となり、大規模導入に向けた経済性と系統安定化の確保を同時に実現する電源システムの構築が求められている。再生可能エネルギーが大規模に導入されたシナリオを評価する研究が進んできているが、シナリオ研究と技術評価が別々に実施されるため、技術開発の進展を考慮した低炭素電源システムの経済性評価は少なく、将来のコスト低減の効果が十分に検討されていない。このため、個々の発電技術の現状、および将来の定量的な評価と、電源システム全体におけるボトルネックが何かを定量的に評価することが求められる。

LCS では、再生可能エネルギーおよび蓄電池の技術開発を考慮した将来の技術シナリオを構築しており、その分析結果を用いて、低炭素電源システムを評価する手法を確立している。LCS の方法論は、技術開発の経済効果と CO<sub>2</sub> 排出削減目標を達成するための課題を定量的に推定することに寄与する。個々の技術評価から、エネルギーシステムにおける低炭素化と経済性への影響を分析するとともに、技術の進展を随時再評価して政策提案に結び付けられることが大きな特徴である。低炭素電源システムの経済性評価には、系統安定化を考慮した多地域電源構成モデルを開発し[6]、これを用いている。このモデルでは、多数の技術シナリオ、電力需要、CO<sub>2</sub> 排出量制約、に基づいて電源システム全体のコスト最小化により発電コストおよび CO<sub>2</sub> 排出量を算出する。モデルの計算時間と技術評価の煩雑さから、再生可能エネルギーや蓄電池の設備容量は外生的に与えて低炭素電源システムを評価する研究事例が多いが、研究対象を限定して評価しやすくする一方で、システム全体が大きく変化する場合は対象外となる。本研究では、再生可能エネルギー等の設備や系統システムの条件も内生化して、経済合理的に実現可能な範囲を幅広く評価していることも特徴である[6]。

再生可能エネルギーの大規模導入に伴い、これまで火力発電システムが担っていた、電圧や周波数の短期変動の負荷周波数制御、長期的な季節変動の緩和を新たに講じる必要がある。また、太陽光発電システム (PV) や風力発電システムなどインバータを介するシステムには同期発電機の持つ慣性力がなく系統システムが不安定になるため、地絡事故（電路が大地と電氣的に接触して生じる事故）等による大規模な停電を防止する、システムの安定性も確保する必要がある。これらを解決するために、本研究では、システムの安定性を考慮した多地域電源構成モデルを用いて、システムの安定性を確保しつつ、再生可能エネルギーの大規模導入による電力システムの経済性を評価している[6,7]。このモデルについて、次項に解説する。

### 2.2 多地域電源構成モデルを用いた評価手法

LCS の開発している評価手法[6]では、(1)再生可能エネルギー技術の将来のコストを定量的技術シナリオから推定し、(2)系統安定化を考慮した多地域電源構成モデルを用いてコスト最適となる電源構成から、CO<sub>2</sub> 排出量および発電コストを算出している。

定量的技術シナリオを用いた将来コストの推計は、LCS の各電源システムに対する技術評価を用いている。定量的技術シナリオは、LCS の「低炭素技術・評価プラットフォーム」[10]に基づき、将来技術水準を推定し、各種の再生可能エネルギーシステムの製造設備、労働、原材料、用役の費用を積算してコストを推計している。本モデルでは技術シナリオとして、LCS の独自の技術評価の結果を用いている。このモデルは線形最適化プログラミングを用い、所与の総 CO<sub>2</sub> 排出量制約および総電力需要の等の制約下で、総発電コストの最小化を解く。日本を主要電力会社に基づいて 10 地域に区分し、各地域の電力消費の時間別データを用いて電力需給データを推計する。モデルの主なパラメータは、系統・電源・蓄電システムの設備、運用、燃料に関するパラメータ

と再生可能エネルギーの導入可能量である<sup>1)</sup>。PV と風力発電の時間当たりの出力は、数十の気候条件データを使って 1 年間分推定する。日負荷曲線は、季節特性に応じて 7 つの代表日に分類している。送電網は、既存設備の利用を仮定し、送電網強化には地域間送電網の追加費用を算出している。モデルで用いた主な制約条件を以下に記す。系統安定化に関する制約として、負荷追従運転制約と過渡安定度制約を含むことが特徴である。

- ・ 需給バランス制約
- ・ 設備容量制約
- ・ 供給予備率制約
- ・ 出力変化率制約
- ・ 蓄電システム制約
- ・ 負荷追従運転制約
- ・ 過渡安定度制約

### 3. 系統安定化技術の経済性評価

#### 3.1 系統安定化技術の評価

電源システム起源の CO<sub>2</sub> 排出量 80~100%削減を実現可能とする道筋を示すため、系統安定化対策を考慮した低炭素電源システムの経済性を評価した。特に系統安定性について評価した。再生可能エネルギーが大規模に導入されると系統安定化対策が必要であり、火力を主体としていた同期発電機の割合が低下することにより、特に慣性力の低下による影響が懸念されている。本モデルでは、系統安定化も考慮し、CO<sub>2</sub> 排出量の制限下において総電力コストを最小とする電源構成と経済性を評価することができる。本稿では、年間電力需要を現状より 15%削減を達成した 800TWh とした分析結果を示す (表 1、図 1)。沖縄、島嶼はエネルギー輸送の評価が異なるため本分析対象から除いている。

再生可能エネルギーの技術開発により、2050 年の CO<sub>2</sub> 排出量削減 80%は現状と同等のコストで構築可能である (ケース A)。技術開発・電力需要などの条件により計算結果として示される設備導入量は異なるが、特に寄与の大きい技術 (異なるシナリオにより計算された導入される設備容量の範囲) は太陽光発電 (300~600GW)、風力発電 (50~200GW) と、蓄電池システム (400~700GWh) であった。CO<sub>2</sub> 排出量 90%以上の削減には系統安定化に寄与する技術開発が重要であり、慣性力を持つ高温岩体地熱発電システムを導入したケース B では、現状と同程度のコストで実現可能である。また、ゼロエミッション (CO<sub>2</sub> 排出量 100%削減) は実現可能ではあるが発電コストは 2 倍程度高くなる (ケース C)。現状の送電網 (図 1: 青実線) では、90%削減までしか実現できないため、地域間送電網の強化 (図 1: 青点線) が必要となる。

さらに、系統安定化対策を実施して慣性力を持つ同期発電機の割合を低減すると、CO<sub>2</sub> 排出量削減率 80%以上を達成するためには、発電コストが大きく低下する。ケース C と D とを比較すると、年間総経費約 5 兆円の差に相当する。同期発電機の割合を減らしてかつ系統を安定化させるための技術開発が重要である。

次に、電力需要が 2013 年と同等となる、電力需要 1,000TWh/年とした分析結果を図 2 に示す。CO<sub>2</sub> 排出量削減率は送電網の強化なしでは 90%削減が最大値となる。さらに、送電網の強化、慣性力供給技術の向上により、ゼロエミッションにむけた低炭素電源システムの実現が可能となる。

<sup>1)</sup> 電源システムには、火力 (石炭、LNG、石油)、水力 (流れ込み式、貯留式)、原子力、地熱 (熱水系、高温岩体)、バイオマス、風力、太陽光が含まれ、蓄電システムとして、揚水発電、蓄電池、水電気分解システム、水素タービンが含まれる[6]。

CO<sub>2</sub>排出量 90%削減において、慣性力を持つ同期発電機の割合を低減すると、主に水素発電量の減少により、発電コストは低下する。これは、年間総経費は約 12 兆円の差に相当する。電力需要の増大の可能性も考慮すると、系統安定化技術の開発はより重要となる。

表 1 ゼロエミッションに向けた電源システムの技術シナリオと経済性評価  
(2050年の電力需要 800TWh/y のケース)

ケース		2013年	A	B	C	D	
計算条件	CO <sub>2</sub> 排出量削減率 (2013年比)	—	80%	90%	100%	100%	
	高温岩体地熱 (HDR)	—	なし	あり	あり	あり	
	地域間送電網の強化	—	現状	現状	強化	強化	
	同期発電機 (慣性力) の比率	—	50%	50%	50%	25%	
	年間電力需要 [TWh/y]	990	800	800	800	800	
計算結果	発電量 [TWh/y]	石炭	357	16	0	0	0
		LNG	443	277	159	0	0
		石油、他	179	0	0	0	0
		太陽光	9	327	412	692	467
		風力	5	77	141	460	306
		地熱	0	12	112	112	112
		バイオマス	3	31	31	31	31
		水力	85	130	130	130	130
		原子力	9	0	0	0	0
		総発電量	1,090	870	985	1,425	1,046
	発電コスト [円/kWh]	12.9	11.5	12.5	20.7	14.0	
	水素 利用量 [TWh/y]	—	0	43	186	62	
	蓄電池 利用量 [TWh/y]	—	135	173	322	199	
蓄電池 設備容量 [GWh]	—	451	591	1,061	656		

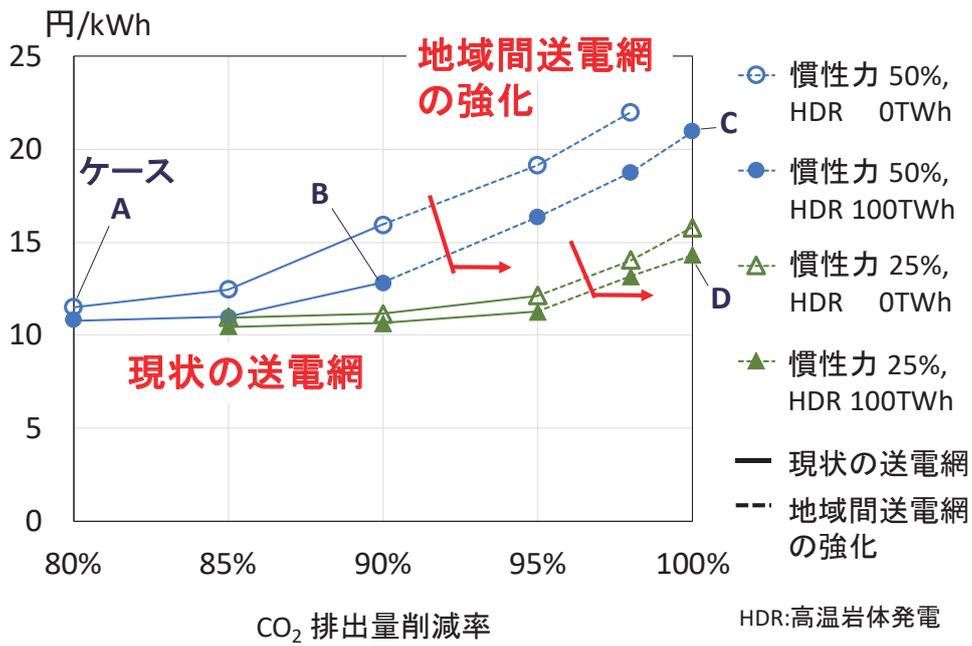


図1 低炭素電源システムの発電コスト（電力需要 800TWh）

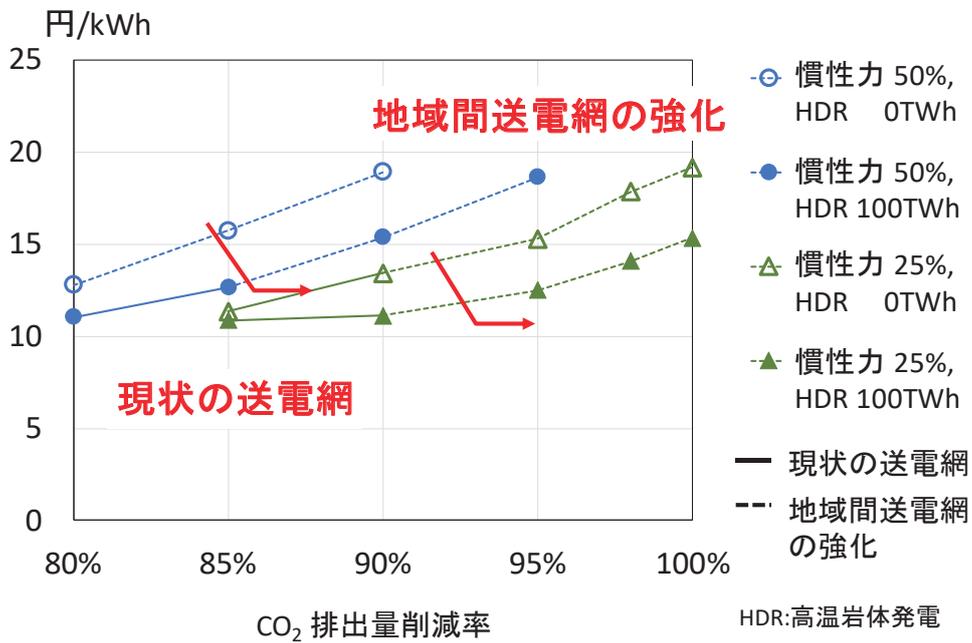


図2 低炭素電源システムの発電コスト（電力需要 1,000TWh）

### 3.2 電力需要とCO<sub>2</sub>排出量削減率の評価

低炭素電源システムの実現には、将来の電力需要が大きく影響するが、電力需要の推計は省エネルギー技術に加え、産業構造の変化を含む様々な要因を考慮する必要がある。このため、電力需要に対するCO<sub>2</sub>排出量削減率の影響を評価する必要がある。

図3に、電力需要700~1,400TWh/年に対して、技術的に可能なCO<sub>2</sub>排出量の削減ポテンシャルを示す。再生可能エネルギーの技術開発を前提とし、送電網の強化、慣性力を持つ同期発電機の割合の低減、高温岩体地熱（HDR）の導入可能量について比較した。実線が既存の送電網を用いたケースであり、点線が地域間送電網を強化したケースである。例えば、送電網の強化に加えて慣性力割合を現状50%の半分の25%へと低下したケース（オレンジ点線）では、電力需要1,000TWhまではCO<sub>2</sub>排出量のゼロエミッション化が可能であるが、電力需要1,300TWhを超えるとCO<sub>2</sub>排出量90%以上の削減は、高温岩体地熱発電を開発しなければ実現不可能となる。このように、電力需要と系統技術の相互影響を考慮して将来技術の評価する必要がある。本稿では、CCS、水素の地域外輸送と輸入、洋上風車、仮想同期発電機等の慣性力供給技術などは含まれていない。

将来の低炭素電源システム実現に向けて、電力需要を評価するとともに、系統安定化の技術や、再生可能エネルギー技術とポテンシャル評価、その他の低炭素技術についても、今後、更なる検討を進めていく。

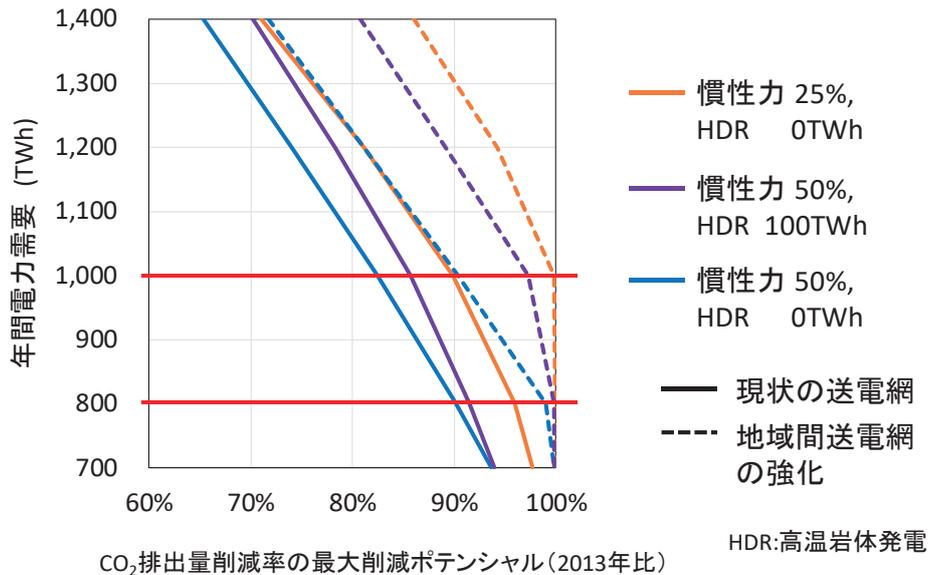


図3 CO<sub>2</sub>排出削減ポテンシャルと電力需要

## 4. 政策立案のための提案

本稿では、系統安定化対策を考慮した低炭素電源システムの経済性を評価し、電源起源のCO<sub>2</sub>排出量80~100%削減を実現可能とする道筋を示した。

- 1) 経済的かつ系統安定化を考慮した低炭素電源システムの実現は可能であり、個別の再生可能エネルギー発電技術のコスト低減が不可欠である。重要技術（異なるシナリオにより計算された導入設備容量の範囲）は太陽光発電（300~600GW）、風力発電（50~200GW）と蓄電池システム（400~700GWh）であり、大規模な普及に向けた政策支援も必要となる。
- 2) 高温岩体地熱発電等の資源制約が少なく、かつ、系統安定性に寄与する低炭素電源の技術開発が重要となる。
- 3) 特にCO<sub>2</sub>排出量90%以上削減するには、送電網の強化に加え、慣性力の供給制約による発電コストへの影響が大きく、系統安定化のための新しい技術開発が必要となる。
- 4) 電力需要の低炭素電源システム実現に対する影響が大きく、将来の産業構造の変革も含めた電力需要の総合的評価が必要であり、様々な将来像に対する技術評価を進めていく必要がある。

## 参考文献

- [1] 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、技術開発編，“太陽光発電システム（Vol.4）—定量的技術シナリオに基づく太陽電池モジュールの製造コスト低下要因分析—”，科学技術振興機構低炭素社会戦略センター，2017年3月。
- [2] 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、技術開発編，“蓄電池システム（Vol.2）—高容量化活物質を用いた蓄電池のコスト試算と将来展望—”，科学技術振興機構低炭素社会戦略センター，2015年3月。
- [3] 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、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。
- [4] 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、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。
- [5] 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、技術開発編，“カーボンフリー水素の経済性とCO<sub>2</sub>排出量”，科学技術振興機構低炭素社会戦略センター，2017年3月。
- [6] 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、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—2050年CO<sub>2</sub>排出量80%削減に向けた日本の電源システムの課題—”，科学技術振興機構低炭素社会戦略センター，2017年3月。
- [7] 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、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.2）—2050年CO<sub>2</sub>排出量80%削減に向けた日本の電源システムの課題—”，科学技術振興機構低炭素社会戦略センター，2018年3月。

- [8] T. Inoue, K. Yamada, “Economic Evaluation toward Zero CO<sub>2</sub> Emission Power Generation System after 2050 in Japan”, Energy Procedia, Vol.142, p2761–2766, 2017
- [9] T. Inoue, S. Matsuda, H. Iwasaki, R. Matsunashi, K. Yamada, “Economic Evaluation for Stable Electric Power System with High Ratio of Photovoltaic Power System –toward more than 90% CO<sub>2</sub> Reduction of Electric Power System in Japan”, Proc. 32<sup>nd</sup> EU PVSEC, Munich, p.3008-3010, 2016.
- [10] 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, 技術開発編, “低炭素技術設計・評価プラットフォームの構築”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2014年3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

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－

平成31年3月

**Economic Evaluation for Low Carbon Electric Power System Considering  
System Stability (Vol.3):**

Technological Development Issues of Low Carbon Electric Power Systems in 2050  
Strategy for Technology Development,  
Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action  
toward Low Carbon Societies,  
Center for Low Carbon Society Strategy,  
Japan Science and Technology Agency,  
2019.3

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 研究員 井上 智弘 (Toshihiro INOUE)
- 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/>

© 2019 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。

---