

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「分散協調型エネルギー管理システム構築
のための理論及び基盤技術の創出と融合展開」
研究課題「太陽光発電の大量導入における電力需
給システムに関する理論的・定量的な経済分析」

研究終了報告書

研究期間 平成25年10月～平成27年3月

研究代表者：大橋 弘
(東京大学大学院経済学研究科、教授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

東日本大震災以降、わが国では電力需給のひっ迫が続くなかで再生可能エネルギーを育てようとする方向性があります。本研究では、まず、再生可能エネルギーの中でも中心的な役割を果たしている太陽光発電に注目し、その大量導入が及ぼす経済的な影響について定量的な考察を行いました。

日射量データ上に、電気学会で用いられている電力系統モデルを重ね合わせ、太陽光発電の日射量の変化が、既存の発電所である火力発電や水力発電の運転の仕方にどのような影響を与えるのかを数値解析（シミュレーション）を用いて計測をしました。太陽光発電はひとつひとつのパネルは雲がかかると発電が止まってしまうなど発電量に大きな分散が存在し、電気の使い勝手が悪いですが、まとまって太陽光発電が大量に導入されると、そうした分散をならすことができるために、既存の発電設備と準ずる供給力として日中に一定程度の評価が可能であることが分かりました。わが国では電力需要のピークは夏季の昼過ぎになりますが、太陽光発電はそうした時間帯に発電量が多いために、電力需要のピークカットに貢献し、火力発電の炊き減らしに貢献することが定量分析から明らかになりました。そこで火力発電の燃料費が高い今日において、太陽光発電の導入は意義があると言えます。

しかし、太陽光発電の導入量の増加に伴い、その効果が逡減してくることが同時に明らかにされました。太陽光発電が導入されるにつれて、夏季日中の電力需要ピークは次第に夕方に移行し、約 4,000 万 kW が導入された段階では、年間の需要ピークは冬季日没時に移ってしまう可能性があることが分かりました。この段階を超えると、太陽光発電が追加的に導入されても、太陽光発電が最大需要に対する供給力に貢献することはなく、需給ひっ迫の解消にはもはや役立たないこととなります。2013 年時点の太陽光発電の設備固定費を基準としてシミュレーションを行うと、太陽光発電が約 2,000 万 kW を超えて導入されると、太陽光発電の追加的な導入による火力発電の燃料費の減少額よりも、設備固定費の増加額が大きく、社会的には導入量が過多となることが分かりました。

さらに電力系統モデルを精緻化した上で、10 年後（すなわち 2023 年）において全国大のメリットオーダーを達成された場合の最適な電源別発電比率（エネルギーミックス）を試算しました。電力需要の見通し、再生可能エネルギーの設備導入量、原子力発電の稼働状況の 3 つをパラメータとして、いくつかのシナリオを作成し、それぞれのシナリオにおける二酸化炭素排出量、発電に係る費用（燃料費のほか、年間固定費や再エネ賦課金を含む）を計算しました。加えて、太陽光発電の影響が最も大きいと考えられる九州エリアの軽負荷期における状況をシミュレーションしたところ、連系線を最大限活用したとしても、事業用太陽光発電の出力抑制は避けがたい事態である点を明らかにしました。

本研究では、太陽光発電に関する考察に加えて、電力を利用する需要側の分析を行いました。太陽光発電や風力発電など出力が不安定な再生可能エネルギーが大量に導入された場合、周波数調整力の不足や電圧変動など様々な問題が発生する可能性が指摘されています。したがって、電圧系統の安定維持のために、需給バランスを柔軟に調整する仕組みを整備することが必要だと言えます。この点に関して、電力料金価格やインセンティブの支払を通じて、需要家側から需給調整に寄与してもらうデマンドリスポンス（DR）という枠組みが注目を集めています。本研究では、電力需要家が電力料金価格やインセンティブにどのように反応するかを定量的に推定することで、DR の有効性について分析を行いました。

電力需要側の経済主体としては、企業と家庭が考えられます。企業側の分析として、選択約款としてわが国で長年用いられてきた需給調整契約の効果検証を行いました。産業用等の需要家に対して調査票を送付し、当該契約が負荷抑制にどれだけ役に立っているかを統計的・計量経済学的に解析を行ったものです。研究の結果からは、需給調整契約（調整

電力や日時が事前に定められる計画調整契約など) が個別の需要家のピーク電力を平均的には抑制したものの、同時に使用電力量を大きく減少させたことから、負荷平準化への貢献は限定的であったことが明らかになりました。

(2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. 「太陽光発電の大規模導入に関するシミュレーション分析」(齋藤経史・花田真一・大橋弘)
CIRJE-J-258: 1-39, 2014

概要:

電気学会による基幹系統モデルに基づいて、日射量の実測値から太陽光発電が大量導入したときの電力負荷パターンや電源構成の変化を1時間単位でシミュレーションした。約4000万kW 導入された段階でピークは夏季日中から冬季日没時に移り、この時点で追加的な太陽光発電の導入は供給力の増加につながらないことが分かった。

2. Effects of Consumer Subsidies for Renewable Energy on Industry Growth and Welfare: Japanese Solar Energy (with Satoshi Myojo), CIRJE-F-925, 2014

概要:

太陽光発電の普及を需給の関係から構造的に推定をしたうえで、住宅用太陽光発電に対する政策効果、具体的には太陽光発電の設置にかかる補助金制度と余剰電力買い取り制度について政策効果分析を費用対効果の観点から行った。これらの政策は普及の観点からは一定程度の貢献が見られるものの、社会的厚生観点からの貢献はきわめて限定的であることが明らかにされた。

3. 「電源別発電構成と経済評価:2023 年におけるシナリオ別シミュレーション」(齋藤経史・大橋弘) CIRJE-J-269: 1-32, 2015

概要:

9エリア間を連系線で繋ぐ電力系統モデルを構築し、いくつかのシナリオのもとで全国大のメットオーダーを達成したときの最適な電源別発電構成をシミュレーションし、その経済評価を行った。需要見通し、再生可能エネルギーの導入状況、原子力稼働状況という3つのパラメータにおいて作られたシナリオのもとで、CO2 排出量や発電に関する費用を試算した。さらに軽負荷期における再生可能エネルギーの影響を評価するために、特定の供給エリア(九州)に注目した考察も行った。

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

- ・特になし

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 大橋グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
大橋 弘	東京大学大学院 経済学研究科	教授	H25.10～
齋藤 経史	同上	特任研究員	H25.10～
五十川 大也	同上	特任研究員	H25.10～

研究項目

- ・ 太陽光発電の大量導入に伴う経済的な評価
- ・ 需給調整契約の定量的評価・検証

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

・ 各電力各社よりPV300 データを初めとしてデータ・情報提供を受けると共に、関西電力研究所等の研究機関と研究成果に基づいた意見交換を行う場を設けることを通じて、産業界等との研究上の連携を深めた。また政府官庁に対しても研究成果について直接・間接的な意見交換を行い、政策の形成過程における研究成果の反映にも努めた。

§ 3 研究実施内容及び成果

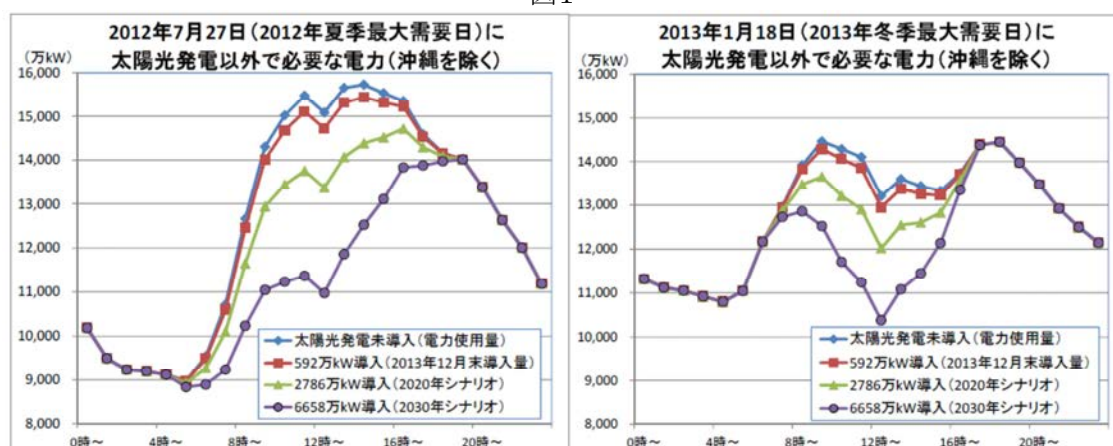
3.1 太陽光発電の大量導入に伴う経済的な評価(東京大学 大橋グループ)

(1)研究実施内容及び成果

本研究では、太陽光発電の大量導入による電力系統への経済評価を行った。まず太陽光発電の導入における地理的な広がりを考慮するために、一般電気事業者によって全国 321 箇所にて行われた分散型エネルギー大量導入促進系統安定対策事業(PV300 実証事業)を通じて収集された日射量データを用いた。この実日射量データに、空間クリギングと呼ばれる統計手法を適用することで非観測地点における日射量を予測し、日本全国における 2km 単位の日射量メッシュデータを作成した。

各メッシュに付与された日射量を太陽光発電量に変換し、電気学会の模擬系統である West30 機・East30 機モデルの負荷ノードに太陽光発電量を割り当てた。また、1 時間単位で公開されている 9 電力会社の電力重要データから太陽光発電出力を勘案して負荷データとして用いた。運転予備力を考慮に入れたシミュレーションによって太陽光発電による影響を経済的に評価した。こうした作業を踏まえて、太陽光発電の大量導入シナリオに応じた全国大でのピーク需要の変化を推定した。結果は、図1のとおりである。

図1



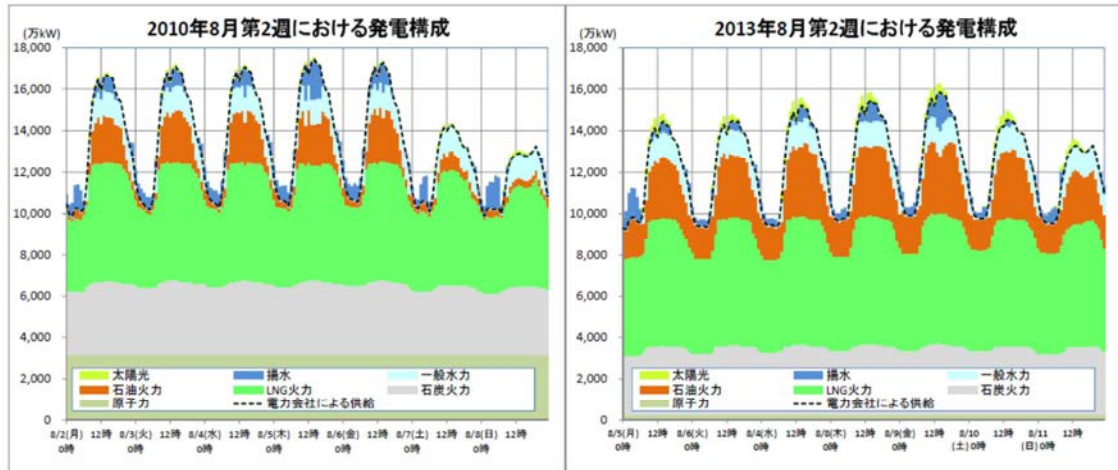
この図からも明らかなように、太陽光発電の導入量が増えるにしたがって、わが国の電力需要のピークは低下し、約 4,000 万 kW 導入された段階でピークは夏季日中から冬季の日没時に移ることが明らかになった。この段階以降では、追加的な太陽光発電の導入は供給力の増加にはつながらないことが分かった。

また 2013 年の需要ピークを 2010 年と比較する形で電源構成をシミュレーションしたところ、図2 のようになった。図 2 から東日本大震災後の原子力発電所の停止により、石油火力での発電割合が伸びていることが分かった。原子力発電所が稼働しているケースでは太陽光発電 1 万 kW の導入に伴い、約 2 億円の燃料費削減が見込まれる。その一方で、原子力発電所が平常稼働 (2003 年度から 2011 年度までの平均稼働率である 58.7%) であったケースでは、太陽光発電 1 万 kW の導入による燃料費削減額は 1.6 億円まで減少する。太陽光発電導入による燃料費削減額は原子力発電所の稼働状況にも大きく依存することが示された。

なお太陽光発電の導入は火力発電の燃料費低減につながるが、その削減効果は太陽光発電の導入が進むにつれて逡減する。その一方で、太陽光発電の導入によって需要ピークとなる時間帯が変化することで、太陽光発電による需要ピーク抑制効果が低下し、太陽光発電の導入によって削減できる火力発電の設備量は減少する。このため太陽光発電設備の追加導入に伴う設備固定費は増大する。2013 年時点の太陽光発電の設備固定費を基準としてシミュレーションを行うと、

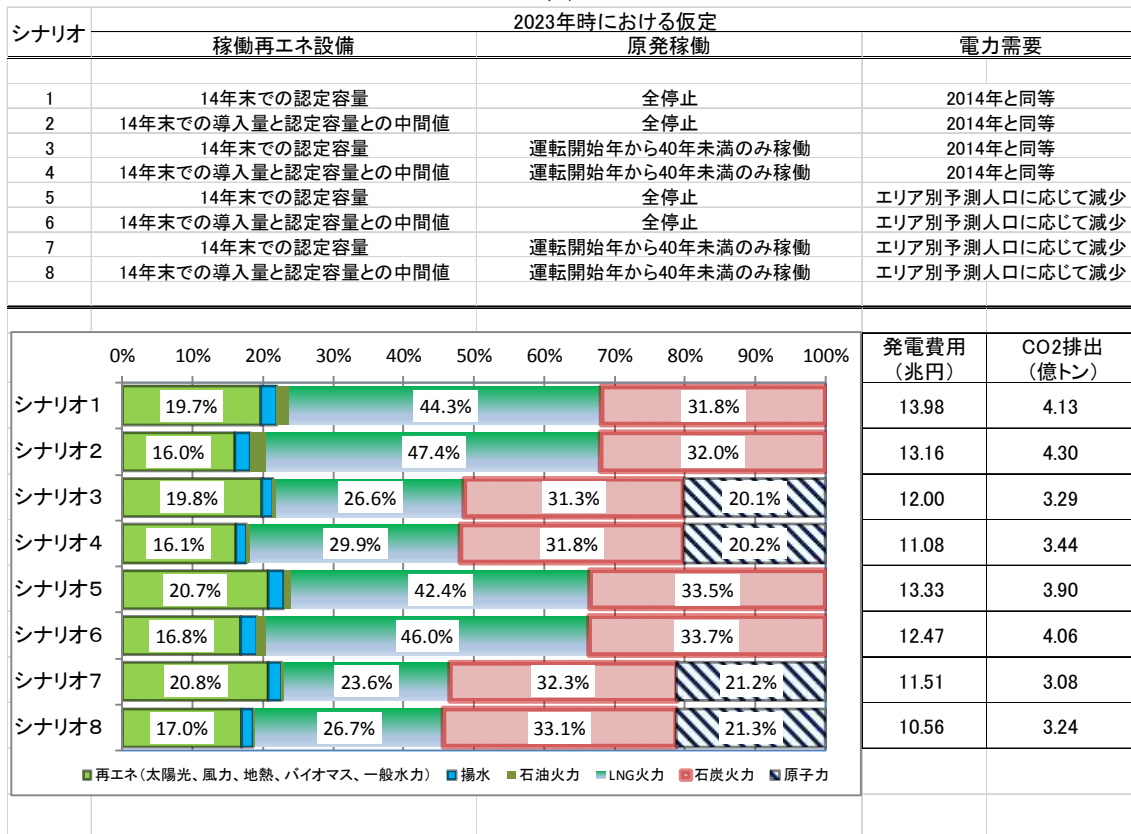
太陽光発電約 2,000 万 kW 導入後は、太陽光発電の追加的な導入による火力発電の燃料費の減少額よりも、設備固定費の増加額が大きく、社会的には導入量が過多となる可能性が示された。

図2



さらに先の模擬系統モデルを拡張し、9 エリアを繋ぐ連系線を明示的に取り入れた電力系統モデルを構築し、10 年後の全国大のメリットオーダーを達成した場合における電源別発電量の構成を試算した。需要見通し、再生可能エネルギーの設備導入量、原子力の稼働状況の 3 つをパラメータとしてシナリオをいくつか作成し、それぞれのシナリオにおける二酸化炭素排出量、発電にかかる費用を計算した。その計算結果は、図 3 である。

図 3

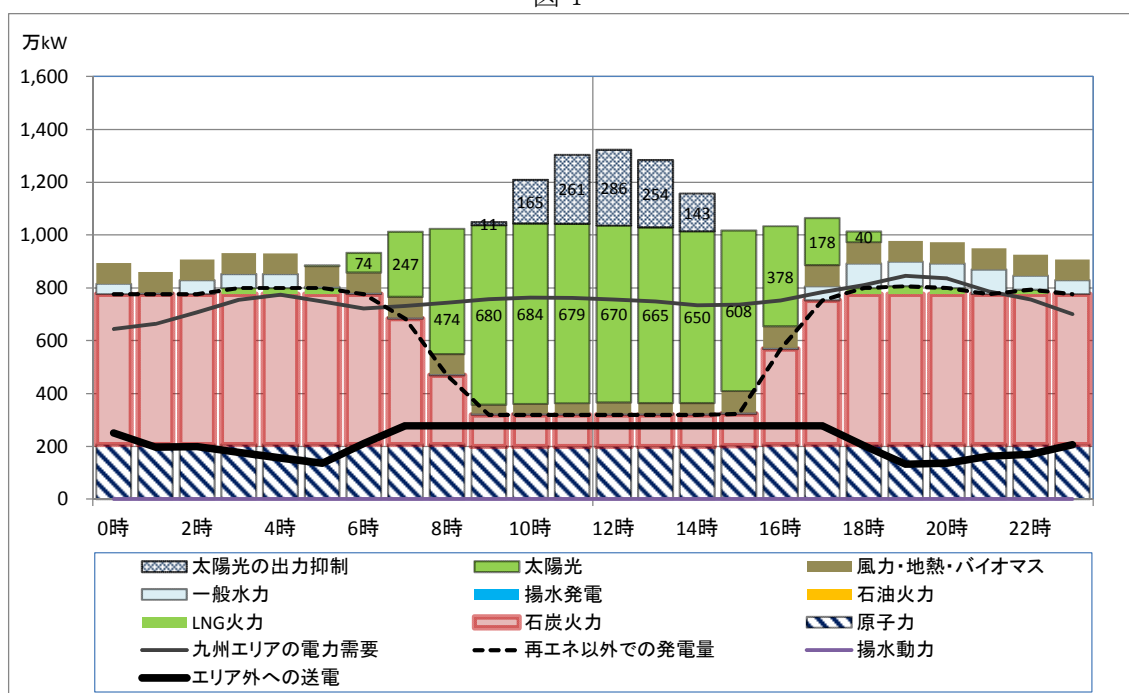


なおここでの費用には原子力における政策経費や追加的安全対策費用などは含まれておらず、

また2015年以降に認定される再生可能エネルギーの影響は織り込まれていないことに注意が必要である。また二酸化炭素は発電に係る発生量であり、建設・施工・廃棄等に係る発生量は勘案していない。

さらに太陽光発電の影響が大きく出ると考えられる九州エリアの軽負荷期における電力需給の状況をシミュレーションした。軽負荷日として2023年5月5日(祝日)を取り上げて、その電源構成を見たものが図4である。注目すべき点は3つある。(1)日中は関門連系線を使って中国地方側へ最大限送電している。(2)石油・LNG火力は日中停止しており、石炭火力も必要最小限の基数が最低出力で運転している。(3)上の(1)(2)にもかかわらず、再エネの余剰をエリアで吸収することができず、太陽光発電の出力抑制が行われる。出力抑制の対象設備は、事業用太陽光発電に限った場合、最大で全設備の30%を超える程になる。

図4



3.2 需給調整契約の定量的評価・検証(東京大学 大橋グループ)

(1)研究実施内容及び成果

本研究では、東京電力管内及び関西電力管内の工場を対象としたアンケート調査の結果を用いて、2012年夏季に提供された需給調整契約が工場の電力利用に与えた影響を定量的に評価した。具体的に分析では2012年夏季に発動がなかった随時調整契約を除き、計画調整契約と「デマンドダイエットプラン」・「デマンドカットプラン」に焦点を合わせたものである。これらの契約が工場レベルでピーク電力の抑制や電力使用量、料金に与えた影響を定量的に分析した。

需給調整契約の効果に関する先行研究として、契約された調整電力から負荷の「削減効果」を推定したものは存在している(例えば、需給検証委員会(電力需給に関する検討会合/エネルギー・環境会議)「需給検証委員会 報告書」、2012)。しかし、この「削減効果」は契約上の数字を集計したものにすぎず、需給調整契約がもっとも効果的に機能した場合の最大値を表しているに過ぎない。本分析は、需給調整契約が契約上期待された通りに機能したのかどうかについて、データのパネル構造を利用した計量経済学的手法によって検証したものである。本研究は需給調整契約の影響を定量的に評価した最初の取り組みと

して位置づけられる。

表1は調査対象となった工場について需給調整契約が与えた平均的な影響をまとめた結果、表2は同様の分析を工場規模別・産業別に行った結果である。本研究から以下の3点が明らかになった。第一に、需給調整契約に加入することによって個々の需要家が支払う電力料金は平均で11%程度下落した。このことは需給調整契約を提供することによって電力会社は相応の費用負担をしていることを意味する。第二に、需給調整契約は個別需要家のピーク電力を平均的には抑制したが、同時に使用電力量を大きく減少させたことから、工場レベルでは負荷平準化への貢献は限定的だった。最後に、需給調整契約から得られる料金低下は需要家の規模が大きくなるほど拡大するが、個別需要家のピーク電力の削減率には大きな変化は見られなかった。

表1

	電力料金	使用電力量	ピーク電力	負荷率
固定効果モデル (一階差推定)	-10.96% ***	-5.15% ***	-2.64% **	-2.64%

表2

	電力料金	使用電力量	ピーク電力	負荷率
工場規模別				
小規模	-5.21% *	-4.11%	0.42%	-1.70%
中規模	-9.26% ***	-3.34% *	-2.66%	-0.37%
大規模	-16.30% ***	-7.92% ***	-3.85% **	-2.99% *
産業別				
軽工業	-8.88% ***	-2.95%	-0.53%	-1.65%
金属・化学工業	-15.18% ***	-8.86% ***	-6.77% ***	-1.38%
機械等製造業	-9.47% ***	-4.26% *	-2.04%	-1.43%

Notes: ***, **, *はそれぞれ推計値が1%、5%、10%水準で統計的有意性を持つことを表す。

§4 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 6件、国際(欧文)誌 2件)

1. 齋藤経史・花田真一・大橋弘『太陽光発電の大規模導入に関するシミュレーション分析』CIRJE-J-258 2014年3月
2. 大橋弘『ネットワークにおける産業組織論:概論』運輸と経済 第74巻第11号:18-24 2014年11月
3. 大橋弘『通信における市場構造とイノベーション競争政策の果たすべき役割』Nextcom Vol. 19: 14-23 2014 Autumn
4. Myojo Satoshi and Hiroshi Ohashi, "Effects of Consumer Subsidies for Renewable Energy on Industry Growth and Welfare: Japanese Solar Energy," CIRJE-F-925: 1-27, 2014
5. 齋藤経史・大橋弘『電源別発電構成と経済評価:2023年におけるシナリオ別シミュレーション』CIRJE-J-269 2015年3月
6. Daiya Isogawa, Kohei Nishikawa, Hiroshi Ohashi, "Innovation Height and Firm Performance: An Empirical Analysis from the Community Innovation Survey," *KDI Journal of Economic Policy*, 2015, 37(1): 44-72"
7. 五十川大也・中村豪・西川浩平・花田真一『需給ひっ迫時における需要抑制策の評価:2012年夏季の需給調整契約が産業用需要に与えた影響』日本経済研究 近刊
8. 五十川大也・大橋弘・中村豪・西川浩平・花田真一『「工場の電力需要に関するアンケート調査」調査結果の概要 速報版』CIRJE-J-246 2013年4月

(2)その他の著作物(総説、書籍など)
特になし

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議 3件、国際会議 5件)

1. 大橋弘、電力システム改革について、エネルギー資源学会、東京、2013年10月28日
2. Hiroshi Ohashi, Japan's Electricity Market: Economics Perspective, Philippines-Japan Workshop on Economic Policies "Regulatory Framework: Balance between private investment opportunities and public welfare" 8 May 2014
3. 大橋弘、再生可能エネルギーの経済学、日本経済学会、2014年6月14日
4. Hiroshi Ohashi, Effects of Horizontal Merger on Firm Performance, UNSW, 30 May 2014
5. Hiroshi Ohashi, New to Market Product Innovation and Firm Performance, 2014 KDI Journal of Economic Policy Conference, 8 August 2014
6. Hiroshi Ohashi, The Effects of Government Subsidies on Private Innovation Activities in a Dynamic Environment, AIEA-NBER Conference, 19 August 2014

7. Hiroshi Ohashi, Effects of Horizontal Merger on Firm Performance, EARIE Conference, Italy, 31 August 2014

8. 大橋弘、電力システム改革と EMS: 経済学からの考察、科学技術振興機構・CREST 中間成果報告会「2020 年に向けた多様性を考慮した次世代型 EMS の研究・開発」、2014 年 9 月 11 日

② 口頭発表 (国内会議 3 件、国際会議 1 件)

1. 大橋弘、再生可能エネルギーの経済学、政策研究大学院大学、2014 年 5 月 21 日
2. 大橋弘、コージェネの経済価値、コージェネ財団特別講演会・パネルディスカッション、2014 年 7 月 23 日
3. Hiroshi Ohashi, The Effects of Government Subsidies on Private Innovation Activities in a Dynamic Environment、一橋大学、2014 年 7 月 28 日
4. 大橋弘、RIETI セミナー「新たな産業の方向性を問う」 2015 年 1 月 30 日

③ ポスター発表 (国内会議 0 件、国際会議 0 件)

(4) 知財出願

① 国内出願 (0 件)
該当無し

② 海外出願 (0 件)
該当無し

③ その他の知的財産権
該当無し

(5) 受賞・報道等

① 受賞

1. 第9回 石川賞 日本経済学会 2014年6月

② マスコミ(新聞・TV等)報道

1. 『電力システム改革の課題(上) 料金上昇や供給減を避け、ピーク時対応に不安』 日本経済新聞社「経済教室」 2014 年 6 月 26 日
2. TBS テレビ NEWS23「再生可能エネルギーの将来についてインタビュー」2014 年 11 月
3. 『再生可能エネルギーの今後』 日刊建設工業新聞 2015 年 2 月 5 日

③ その他

1. 『広域的な電力活用の経済メリット: 東西連系線を例に』RIETI コラム 2014 年 5 月 28 日
2. 『政府が企業を救済する基準は?』 エコノミスト 第 91 巻第 48 号:30-32 2013 年 10 月 29 日

3. 『エネルギーミックスと今後のシステム改革』RIETIコラム 2015年3月18日

(6)成果展開事例

①実用化に向けての展開

・特になし

②社会還元的な展開活動

・特になし

§5 研究期間中の活動

主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要	備考
2013年10月12日	一橋大学・経済産業研究所シンポジウム	一橋大学講堂	約200名		大橋が講演
2014年5月21日	GRIPS セミナー「再生可能エネルギーの経済学」	GRIPS	約30名		大橋が講演
2014年6月14日	日本経済学会 石川賞講演「再生可能エネルギーの経済学」	同志社大学	約50名		大橋が講演
2014年7月28日	一橋大学にて講演	一橋大学	約50名		大橋が講演
2014年5月30日	University of New South Walesにて講演	UNSW	50名		大橋が基調講演
2014年7月23日	コージェネ財団特別講演会・パネルディスカッション「コージェネの経済価値」	東京	約150名		大橋が講演
2014年8月8日	KDI Conference	韓国 Daejeon	約40名		大橋が講演
2014年8月19日	KAIST-NBER Conference	韓国 Daejeon	約50名		大橋が講演
2014年8月31日	EARIE Conference	Italy	約50名		大橋講演
2014年9月11日	電気学会	同志社大学	約50名		大橋講演
2015年1月30日	RIETI セミナー	東京	30名		大橋講演

§6 最後に

・特になし