

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23510058

研究課題名(和文) 太陽光発電に対するフィード・イン・タリフ制の経済評価と統合的促進策の研究

研究課題名(英文) The research on economic effects of feed-in tariffs and support schemes for photovoltaic grid integration

研究代表者

竹濱 朝美 (TAKEHAMA, Asami)

立命館大学・産業社会学部・教授

研究者番号：60202157

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円、(間接経費) 750,000円

研究成果の概要(和文)：固定価格買取制の経済効果と太陽光発電系統連系の制度設計を日独比較した。1)ドイツ買取制は、発電・送電分離に基づき、系統運用者に優先給電義務と系統拡張義務を課し、出力抑制に95～100%の経済補償がある。2)15年間で原子力発電量2800億kWhを再生可能エネルギーに代替する投資費用と天然ガス輸入費用節約を推定した。投資費用と天然ガス輸入費用節約の収支は14年目に均衡する。3)風力・太陽光大量連系の系統運用をドイツ50Hertz区域について分析した。風力・太陽光は110kV以下配電網に優先給電されるため、風力・太陽光出力変動に対応して、在来電源出力の柔軟な調整と広域系統運用が重要である。

研究成果の概要(英文)：This research examined the support schemes for feed-in tariffs and large-scale grid integration of wind and photovoltaic energy (PV) in Germany and Japan. 1) Under the German Renewable Energy Act, German grid operators are obliged to give a priority feed-in of renewable electricity, and are obliged to expand the grid in order to feed-in maximum amount of renewable electricity. 2) We examined a scenario for shifting 280TWh of electricity from nuclear power to renewable energy in the next fifteen years in Japan. The investments for renewable energy and the saving effects due to a decreased import of natural gas can make a balance in the 14th year. 3) The research examined feed-in data of wind and PV energy in 50Hertz zone in Germany. Around 90% of wind power capacity and 99% of PV capacity is integrated into and fed into the distribution grid at 110kV level or the lower-voltage levels. 50Hertz transfers the maximum amount of electricity to the TenneT zone through its tie-lines.

研究分野：環境学

科研費の分科・細目：環境学・環境影響評価・環境政策

キーワード：太陽光発電 風力発電 固定価格買取制 EEG 系統拡張 系統連系 優先給電 ドイツ

1. 研究開始当初の背景

本研究は、太陽光発電を日本に加速的に普及させるため固定価格買取制の具体的制度設計およびその経済効果を考察することを意図した。本研究開始直前に福島第一原子力発電所事故が発生し、固定価格買取制が2012年より開始することが決定された。これを受けて、固定価格買取取り制の普及効果を高めるための優先給電義務、系統拡張義務、出力抑制順序など、日本の買取制が有効にきくするための詳細条件を整理する必要があった。かつ、変動性電源の太陽光・風力発電の系統連系が需給調整に与える影響を買取制の制度設計においてどう調整すべきか、研究する必要があった。

2. 研究の目的

太陽光発電は気象条件によって出力が変動するため、大量に系統に連系すると需給調整が課題となる。このため、太陽光発電の普及政策は固定価格買取制(FIT、以下、買取制と略す)の経済性及び経済効果の問題に加えて、変動性電源の系統連系を促進するために必要な条件整備という観点から、制度設計を考察する必要がある。ドイツは風力・太陽光発電の普及と大量連系において先行することから、ドイツの太陽光・風力発電の普及と系統連系にかかる制度設計を日本と比較分析した。

3. 研究の方法

具体的には、(1)買取制設計における優先給電義務、系統拡張義務、出力抑制順序の考察、(2)買取価格と普及効果の関係の考察、(3)脱原発・再生可能エネルギー電源(以下、再エネ電源)転換の投資費用と経済効果の推計、(4)風力・太陽光発電の大量連系におけるドイツの系統運用の現状分析、(5)系統運用の中立公平性確保に向けたドイツの給電データ開示制度を整理した。

4. 研究成果

(1) 買取制の制度設計における優先給電義務、系統拡張義務に関する日独比較

欧州ではEU指令(Directive 2009/72/EC)により、送電網運用者は発電事業から分離されている。かつ、ドイツ買取制では、系統運用者は再エネ電力を他の電源に優先して最大量を優先給電する義務、再エネ電源の接続・給電のために、「遅滞なく」電力網を増強・拡張する義務を負う。日本の買取制には優先給電義務、系統拡張義務がない。

ドイツ再生可能エネルギー法(EEG)は系統拡張費用が「経済的に合理的でない」場合のみ、系統運用者は系統拡張義務を免れることができる(§9(3), EEG)。系統拡張費用の「経済的に合理的」な水準とは、「系統拡張費用が再エネ電源の新規建設費用の25%を超えない」ことが目安である(Deutscher Bundestag Drucksache 15/2864, 15.

Wahlperiode 01. 04. 2004: 連邦議会環境委員会文書第15期(2004年)。ドイツでは、特定の再エネ電源の新規建設費用の25%までの拡張費用は「経済合理的」であり系統拡張義務を負う。この合理性基準はEEG法運用に参照されている。

出力抑制と経済的補償: 電力系統の過負荷および隘路リスクが原因で再エネ電源を出力調整する場合、ドイツ買取制では、送電・配電業者は再エネ電源の売電収入の損失分の95~100%を補償する。日本では、年30日までの出力抑制は、損失売電収入の経済的補償が無い。(竹濱「再生可能エネルギー電力買取制の制度設計上の考慮点: ドイツEEGの費用と効果の分析から」、人間と環境 Vol.38, No.1, 2012。竹濱「ドイツにおける風力発電の給電データ開示制度と系統運用の現状」JWPA, 日本風力発電協会誌9号(2013)。

(2) ドイツのFIT 買取制の買取価格と収益性の分析

2011年までのドイツ買取制の収益性と普及効果を分析した。ドイツの太陽光発電の買取価格は、設置工事費用、銀行借入金利、維持費、損害保険料、インバーター取替、バイオマス原料費、接続費用(電源線、昇圧設備、接続工事費)、借地料など、全ての経費を考慮しても、銀行預金より高い収益性(概ねIRRが6%~8%程度)の水準である。太陽光発電のIRRは平均的な発電量で年7~10%、ドイツ南部のIRRは年11%を超える。ドイツ太陽光発電事業では、IRRが9%を超えると、市場が加熱し、逆に、IRRが6%以下では、大規模太陽光事業は普及が進まない(図1)。これらを参考に日本での金利水準を考慮してIRR設定を行なう必要がある。(竹濱・梶山, 2011, 「再生可能エネルギー買取制(FIT)の費用と効果」(植田和弘・梶山恵司編著「国民のためのエネルギー原論」日本経済新聞社、第7章)。

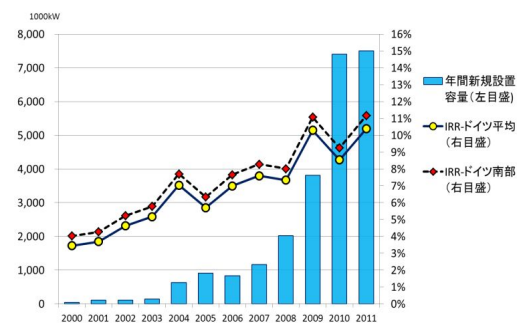


図1 ドイツ太陽光発電のIRRと新規設置容量

(3) 脱原発・再生可能エネルギー転換の投資費用と経済効果の推計

日本の原子力発電の発電量を再生可能エネルギーで代替するための投資費用と天然ガス輸入費用の節約効果を推定した。今後15

年かけて2800億kWh（2010年度の原子力発電量にほぼ相当）を再生可能エネルギーによって代替する。15年目には、2800億kWhの30%を風力発電で、30%を太陽光で、14%をバイオマスで、10%を地熱で、16%を中小水力で代替するシナリオである（図2）。投資費用と再生可能エネルギー発電によるLNG天然ガス輸入費用の節約効果との収支は、最大で3兆7800億円の赤字になるが、10年後には、赤字額は約1.8兆円に減少する。14年目にほぼ収支均衡し、15年目には、天然ガス輸入費用による国富流出をゼロにすることができる（図3）。

再生可能エネルギー投資額の約7割を日本企業の製品から調達する場合、日本企業の売り上げとなる。再生可能エネルギーの投資需要の一部が日本企業の受注になる限り、再生可能エネルギーへの投資は、日本企業にとって公共投資と同様の効果をもつ。（「固定価格買取制への期待」、安斎・館野・竹濱編「原発ゼロプログラム」かもがわ出版）

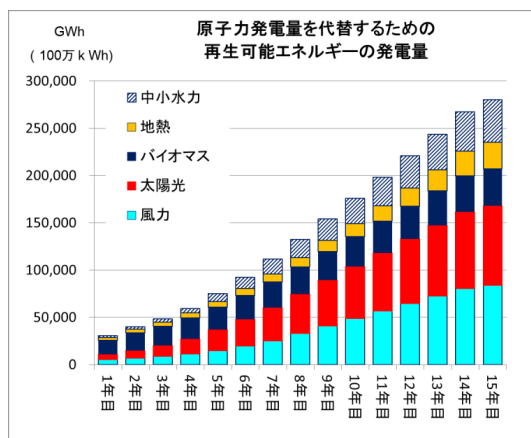


図2 原子力発電量の再生可能エネルギー電源による代替シナリオ

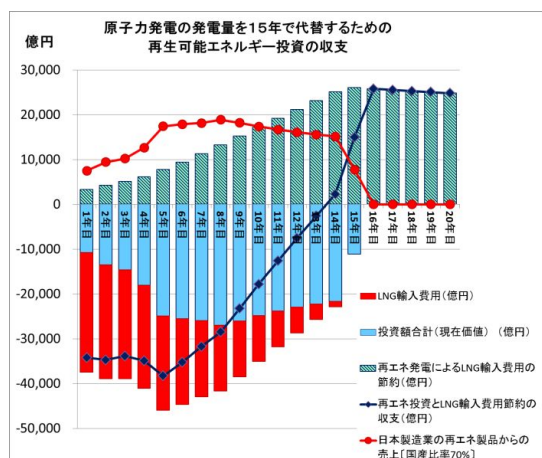


図3 15年間で原子力発電量を代替する再生可能エネルギー投資の収支バランス

(4) ドイツの優先給電と系統安定性維持のための出力制限の順序

ドイツの出力抑制順序について法規定を

要約した。各送電区域において、電力系統の安全性と信頼性に危険がある場合、送電業者は、送電網に直接・間接に連系する発電設備、蓄電設備等に対して介入を行う権限を認められている（§13, EnWG ドイツエネルギー事業法）。介入は次の順序に従い実施する。

系統運用措置。これは Redispatch（給電発電所の変更）が主な内容である。§13(1)-1, EnWG）。

市場的措置。需給調整用調整力（Regelleistung）の投入、契約に基づく切り離し可能な負荷の活用、契約に基づく在来電源に対する出力抑制（§13(1)-2, EnWG）。在来電源に対する出力抑制には、契約に基づく補償を行う。上記方法で系統の混雑や過負荷リスクを除去できない場合、全電源に対する出力抑制（後述と）を実施する。

在来電源に対する出力抑制。系統安定性を維持するための必要最低限の出力（must run capacity）を維持したうえで、それ以外の在来電源を最低限まで抑制する（§13(2), EnWG）。在来電源に対する出力抑制には経済的補償は無い。

再エネ電源（名目出力100kW以上）に対する出力抑制。系統の過負荷（grid overload）の場合、隘路リスク（grid bottleneck）を回避するため、再エネ電源に対しても出力抑制を行う（§13(2), EnWG と §11(1), EEG 連結運用）。送電・配電業者は、再エネ電源から最大限の給電をしなければならないが、系統安定性に必要な最低限の在来電源の出力は維持する（§11(1), EEG 再生可能エネルギー法）。

隘路（Netzengpass）リスクを回避するための再エネ電源への出力抑制（前記）の場合、系統運用者は再エネ電源事業者の損失収入の95%~100%を補償する。隘路リスクを理由としない出力抑制には経済補償は無い（§12(1), EEG）。（竹濱「ドイツにおける風力発電の給電データ開示制度と系統運用の現状」（JWPA, 日本風力発電協会誌, 9号, 2013）。

(5) 風力・太陽光発電の優先給電にかかるドイツの系統運用分析

変動性電源である風力・太陽光発電を大量連系し優先給電する系統運用の特徴を理解するため、ドイツ50Hertz送電区域の実績15分値[MW]について、太陽光・風力発電出力、残余需要変動、垂直負荷、国際送電線輸出入、地域間連系線負荷を分析した（図4,5）。

風力発電量[MWh]の約70%は50Hertz管内需要とTennet管内向け送電で吸収され、風力発電量の30%が輸出で調整された（2012年、図6）。管内の国際送電線混雑管理割り当て容量は国外行き約2000MWと限られているため、風力発電出力のうち国際送電が調整するのは一部である。

設備容量で風力発電の90%、太陽光発電の99%は110kV以下配電網に連系して優先給

電される(図7)。風力・太陽光発電の出力増加に伴い、垂直負荷(380kV送電網から110kV配電網への降圧・配電電力)が減少し、風力発電出力が非常に多い時に、逆垂直負荷となる(110kVから380kVに昇圧・受電電力)。逆垂直負荷で風力・太陽光発電出力が需要を上回る時、110kV配電網の需要は再エネ電源により充足され、分散型発電・地産地消を実現している。ドイツの系統運用では、再エネ電源を優先給電するため、風力・太陽光の出力変動に応じて、380kV送電網からの垂直負荷(主に大型火力電源からの供給)が柔軟に抑制される(図8)。日本の系統運用は長期固定電源(原子力、大型火力)を優先する運用である点で、大きな違いがある。

50Hertz送電区域は風力発電電力を最大限に給電するため、地域間連系線を活用して、TenneT管内に最大限の送電を行っている。再生可能エネルギー電源の出力抑制の時刻に地域連系線の送電負荷は、送電容量の50%~70%に達する(図9,10)。

ドイツの380kV送電網と110kV配電網をつなぐ主要な変電所には、垂直負荷と逆垂直負荷の双方向潮流に対応可能なように、自動タップチェンジャー(tap changer)と電圧調整装置、双方向対応の保護器が装備されている。50Hertz管内の風力発電設備の90%、太陽光発電設備のほとんどが110kV以下の配電網に連系している。このため、配電網の電圧上昇に対応するため、必要に応じて配電網の分割、変電設備の設置が進められている。ドイツ配電システムが大量の再生可能エネルギー電源を受け入れることができるのは、配電網における再生可能エネルギー電源の連系にかかわる設備投資が実施されているためである。

中立的系統運用のための給電データ開示：ドイツ送電業者は、風力・太陽光発電の給電状況について、15分単位出力値[MW]の開示を義務付けられている。給電データの開示は、中立的系統運用の透明性を確保するうえで意義がある(表1)。

(竹濱・齋藤「太陽光発電と風力発電にかかるドイツの給電データ開示制度：50ヘルツ区域の需給運用」太陽/風力エネルギー講演論文集, pp.28-29, 2013)。竹濱「ドイツにおける風力発電の給電データ開示制度と系統運用の現状」(JWPA, 日本風力発電協会誌, 9号, 2013)

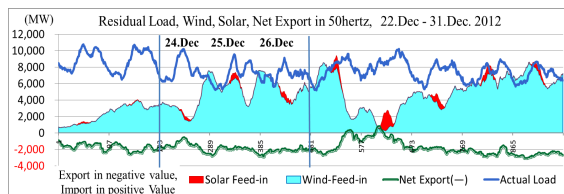


図4 風力・太陽光発電出力, 需要, 輸出, 2012年12月22日~31日, 50Hertz管内)

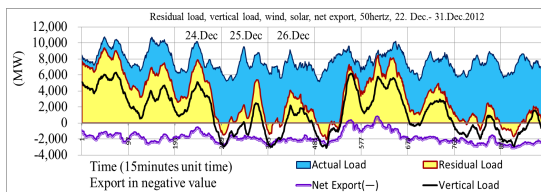


図5 垂直負荷, 残余需要, 需要負荷, 純輸出, 2012年12月22日~31日, 50Hertz管内

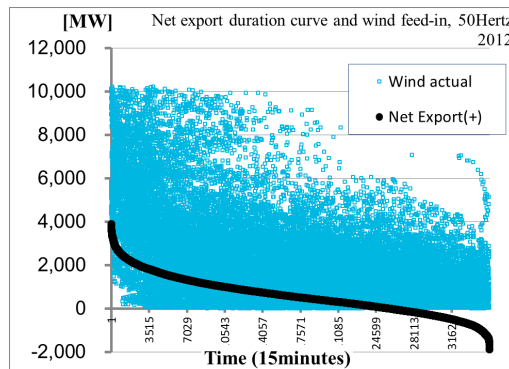


図6 風力発電出力と輸出(輸出の多い順に並び替え)50Hertz管内2012年

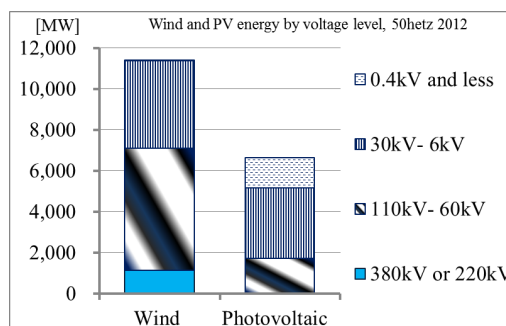


図7 50Hertz管内の風力・太陽光発電設備の連系電圧階級(2012年)

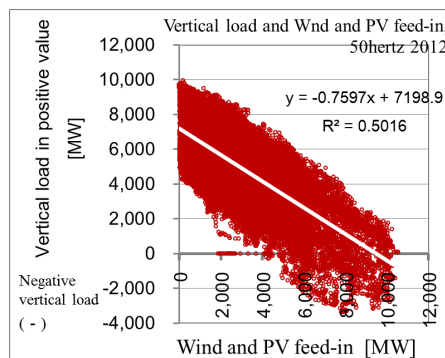


図8 風力・太陽光発電出力と垂直負荷, 50Hertz管内, 2012年

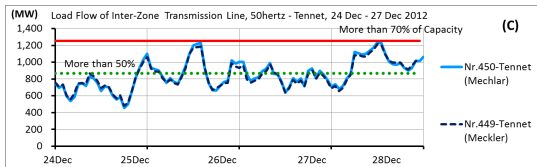
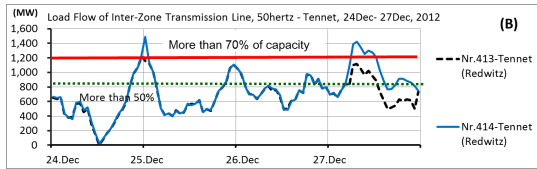
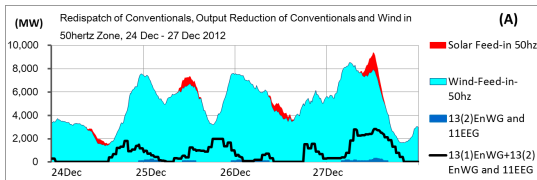


図9 風力・太陽光発電出力，出力抑制，地域間送電負荷(50Hertz管区,2012年12月24日~27日) A: Redispatch と出力制限, B: 50Hertz と Tennet の連系線 No.413, No.414 の負荷1時間値 C: Tennet との連系線 No.450, No.449 の負荷.送電容量に対する負荷の割合.赤実線=70%, 緑点線=50%.

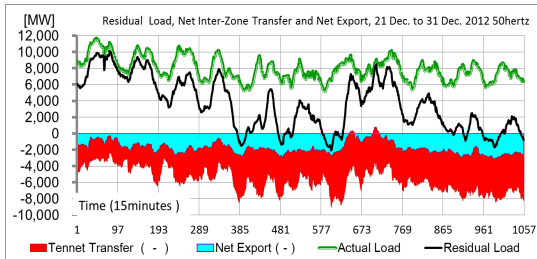


図10 需要負荷，残余需要，純輸出(-)，Tennet 送電電力(-)，50Hertz，2012年12月21日~31日)

表1 ドイツ再生可能エネルギー電源の給電データ開示制度

ドイツにおける風力と太陽光にかかる主な給電情報の開示制度

情報開示項目	開示の根拠法規
風力給電予測24時間前, 風力給電リアルタイム, 太陽光給電予測24時間前, 太陽光給電リアルタイム, 15分単位, [MW]	AusglMechAV, EEG
送電網から配電網への垂直ロード (Vertical load) [MW / hour], 年間最大需要 [MW/15分], ロードカーブ[MW/15分], 域内発電所と配電網からの給電電力[MW/15分], 風力給電 [MW/hour], 停電回数と停電継続時間	Stromnetzzugangsverordnung
系統安定性のための市場介入データ, 非再生エネルギーの redispatch と出力抑制, 全電源に対する出力抑制, 入場所 (送電設備), 介入種類, 影響を受けた配電業者, 調整を受けた出力[MW], 介入時刻, 継続時間 (15分単位), リスクタイプ (隘路回避等), 介入された配電網設備	EnWG
Redispatch(送電先変更)のデータ, 実施日, 実施時刻, 継続時間, 送電区域, 実施理由, 方法 (有効電力削減, 有効電力増加), 電圧種別 (中圧, 高圧) 出力[MW], 制御した総電力量[MWh], Redispatch を実施した送電業者と要請した送電業者, Redispatch を受けた発電所.	連邦ネットワーク規制庁ガイドライン
Balancing Energy (2次, 3次調整力) の投入量, 入札結果	StromNZV

出所)筆者まとめ.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

(雑誌論文)(計10件)

斎藤哲夫, 竹瀆朝美, 小西雅子, 欧州に於ける風力発電出力予測の利用, 電気学会全国大会講演論文集 (H26 年版, 分冊6, 系統運用・解析, 系統機器・制御, 開閉機器・避雷器, 系統保護・制御装置) H26 年分冊6巻, 査読無, 2014, pp.S18(17)- S18(20).

竹瀆朝美, ドイツにおける大規模風力系統連系による柔軟な系統運用, 給電データに基づく分析, 第35回・風力エネルギー利用シンポジウム, 査読無, 2013, pp.319-322.

竹瀆朝美, 齋藤哲夫, 太陽光発電と風力発電にかかるドイツの給電データ開示制度: 50ヘルツ区域の需給運用の現状, 太陽/風力エネルギー講演論文集 2013年版, 査読無, 2013, pp.28-29.

竹瀆朝美, ドイツにおける風力発電の給電データ開示制度と系統運用の現状, JWPA(日本風力発電協会誌), 査読無, No.9, 2013, http://jwpa.jp/2013_pdf/88-26tokushu.pdf, pp.58-68

竹瀆朝美, 東京電力の料金原価に基づく原子力発電の費用, 立命館産業社会論集, 査読無 Vol.48, No.3, 2012, pp.41-58. http://www.ritsumeit.ac.jp/acd/cg/ss/sansharonshu/483pdf/48-3_02-03.pdf

竹瀆朝美, ドイツ再生可能エネルギー電力の系統連系をめぐる給電データ開示: 優先接続に関する透明性 (transparency) の確保について, 第34回・風力エネルギー利用シンポジウム予稿集, 査読無, 2012, pp.263-266.

竹瀆朝美, 再生可能エネルギー固定価格買取制の経済効果: ドイツの経験から, 中小商工業研究, 査読無, No.112, 2012, pp.11-28.

竹瀆朝美, 再生可能エネルギー買取制の効果と費用: ドイツとの比較から見る今後の課題, 都市問題, 査読無, 103巻6号, 2012, pp.20-32.

竹瀆朝美, 再生可能エネルギー電力買取制の制度設計上の考慮点: ドイツ EEG の費用と効果の分析から, 人間と環境 (日本環境学会誌), 査読無, Vol.38, No.1, 2012, pp.13-25.

竹瀆朝美, 再生可能エネルギー普及のカギは買い取り価格: 参考になるドイツの先進性, エコノミ

スト, 査読無, 2011年9月6日号, 2011, pp.84-86.

〔学会発表〕(計8件)

Takehama, Asami, Grid Integration of Wind and Photovoltaic Energy in 50Hertz Zone in Germany. Experts' Meeting, Revision 2014 (Japan Renewable Energy Foundation 自然エネルギー財団), 2014年2月24日, イイノホール, 東京.

竹瀆朝美, 齋藤哲夫, 太陽光発電と風力発電にかかるドイツの給電データ開示制度: 50ヘルツ区域の需給運用の現状, 日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会・合同研究発表会, 2013年11月28~29日, 沖縄県市町村自治会館, 那覇市.

竹瀆朝美, ドイツにおける大規模風力系統連系による柔軟な系統運用: 給電データに基づく分析, 第35回・風力エネルギー利用シンポジウム(2013), 2013年11月12日~13日, 科学技術館サイエンスホール, 東京

竹瀆朝美, 風力発電および太陽光発電の系統連系に向けた給電データ開示の役割, 日本消費経済学会, 第38回全国大会, 2013年10月26日~27日, 中央学院大学

Takehama, Asami, Grid Integration Issues of Renewable Energy in Japan and Its Transparency of Grid Data, 18th REFORM Group Meeting, 26th-29th August 2013, Schloss Leopoldskron, Salzburg, Austria, http://www.polsoz.fu-berlin.de/polwiss/forschung/systeme/ffu/veranstaltungen/termine/downloads/13_salzburg/Takehama-Salzburg-2013.pdf,

竹瀆朝美, ドイツ再生可能エネルギー電力の系統連系をめぐる給電データ開示: 優先接続に関する透明性(transparency)の確保について, 第34回・風力エネルギー利用シンポジウム, 2012年11月27~28日, 科学技術館サイエンスホール, 東京.

Takehama, Asami, Japan's feed-in tariff scheme and its grid connection issues in comparison with Germany, 17th REFORM Group Meeting, 27th-31st. August 2012, Schloss Leopoldskron, Salzburg/Austria, http://www.polsoz.fu-berlin.de/polwiss/forschung/systeme/ffu/veranstaltungen/termine/archiv/pdfs_salzburg/Takehama.pdf?1367712378

竹瀆朝美, 再生可能エネルギー買取制における風力・太陽光の給電予測と給電データの役割, 日本環境学会・別府大会, 第38回・研究発表会, 2012年6月9日, 別府大

学.

〔図書〕(計4件)

吉村純一, 竹瀆朝美編, 流通動態と消費者の時代, 白桃出版, 2013, 231項 pp.161-191.

安齋育郎, 舘野淳, 竹瀆朝美編, 「原発ゼロ」プログラム, かもがわ出版, 2013, 240項 pp.140-148.

上園昌武編, 竹瀆朝美, 先進事例から学ぶ再生可能エネルギーの普及戦略, 本の泉社, 2013, 248項 pp.69-92.

植田和弘・梶山恵司編著, 竹瀆朝美, 国民のためのエネルギー原論, 日本経済新聞社, 2011, 318項 pp.195-223.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹瀆朝美 (TAKEHAMA, Asami)
立命館大学・産業社会学部・教授
研究者番号: 60202157