

令和 5 年 5 月 17 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02679

研究課題名（和文）電力・非電力部門を考慮した数理計画モデルによる再エネ大量導入可能性の分析

研究課題名（英文）Study on Renewable Energy Integration with Mathematical Programming Model considering Electricity and Non-Electricity Sectors

研究代表者

小宮山 涼一（Komiya, Ryoichi）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・教授

研究者番号：60537819

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 8,800,000円

研究成果の概要（和文）：自然変動電源の導入拡大のためには、余剰電力の発生や、再エネ残余需要の急激な変動に対応するための対策が必要になる。本研究では、詳細な時間解像度や地理的解像度を有する電力システムモデル、ならびに、一国のエネルギー全体をカバーしたエネルギーモデルを構築することにより、電力部門の対策に限定せず、再エネ余剰電力による水素や合成燃料製造・利用を考慮した、総合的な再エネ大量導入策を定量的に分析した。数値シミュレーション分析を通じて、カーボンニュートラルや再エネ大量導入時に、再エネ出力変動の電力システムへの影響が水素製造や合成燃料製造により緩和される可能性があること等を定量的に具体的に示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、再生可能エネルギー大量導入実現のため、電力部門のみならず、非電力部門（電力以外のエネルギー転換・最終消費部門）も考慮して、技術的対策を具体的に定量的に示し、従来にはない再エネ大量導入シナリオを提示した点に学術的意義があると考えられる。特に、全国の全ての電力基幹システムを383ノード、475本の送電線で考慮し、年間8,760時間で電力システム全体の挙動を分析可能とした点は、学術的意義、社会的意義が大きいと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In order to expand the integration of variable renewable energy (VRE), it is necessary to take measures to deal with surplus VRE electricity output. By developing a power system model and an energy system model with detailed time resolution and geographical resolution, quantitative analysis is conducted for planning comprehensive measures to introduce large amounts of VRE, taking into consideration the possible production and use of hydrogen and synthetic fuels. Through numerical simulation analysis, it is quantitatively and concretely shown that the impact of VRE output variability on a power system can be mitigated by hydrogen production and synthetic fuel production under carbon neutrality constraint and massive VRE introduction.

研究分野：エネルギー・電力システム分析

キーワード：再生可能エネルギー エネルギーシステム 電力システム カーボンニュートラル

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 再エネ普及拡大が国際的に進む中、日本でも再エネの主力電源化を目指す方針が政府より示され、自然変動電源(太陽光、風力)の導入が進んでいる。しかし、自然変動電源は、気象条件の影響を受けて出力が不規則に大きく変動する可能性を有し、火力発電とは異なり、出力を自在に制御することが難しく、電力系統への連系量の拡大は容易ではない。

(2) 自然変動電源の連系拡大のためには、余剰電力の発生や、再エネ残余需要の急激な変動に対応するための対策が必要になる。代表的な対策として、バッテリー、揚水、送電線増強などが挙げられるが、各対策の経済的な潜在量には限界がある。電力部門の対策に限定せず、再エネ余剰電力による水素や合成燃料製造・利用を通じて、総合的な再エネ大量導入策を検討することは、学術的にも、技術的、政策的にも意義のある研究対象であると考えられる。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究は、再生可能エネルギー大量導入実現のため、電力部門のみならず、非電力部門(電力以外のエネルギー転換・最終消費部門)も考慮して、技術的対策を定量的に示し、従来にはない再エネ導入シナリオ提示を目的とする。

(2) 取扱う変数や制約条件の数で世界最大規模の最適電源構成モデル(日本の電力基幹系統を全て考慮)と、日本のエネルギーシステム全体を網羅した最適化型エネルギー需給モデルを改良し、水素製造、合成燃料製造、熱貯蔵・利用など、電力部門以外での対策技術の導入可能性を、複数のケース設定の下で、定量的に検討する。

### 3. 研究の方法

(1) 太陽光や風力発電等の出力変動を詳細に考慮した最適電源構成モデルなどエネルギーシステムモデルによる再生可能エネルギー大量導入に関する数値シミュレーション分析を実施した。特に最適電源構成モデルに関しては、再エネ出力変動を1年間8,760時間で考慮し、さらに電力系統を383母線、472本の基幹送電線でモデル化することにより、既往研究には見られない詳細な地理的・時間的解像度での電力システムの数値シミュレーションを実施した。本研究では、現在普及が進む着床式洋上風力発電に加え、今後の普及が期待される浮体式洋上風力発電のほか、次世代技術を明示的に考慮している点に独自性がある。

(2) エネルギー政策動向を踏まえ、CCUS付石炭火力、CCUS付LNG火力、水素専焼発電、水素混焼LNG火力、アンモニア混焼石炭火力を考慮した最適電源構成モデルを構築し、再生可能エネルギー大量導入に関する数値シミュレーション分析を主に実施した。また電力系統ネットワークに関しても、再エネ大量導入を見据えて広域的な系統開発計画が検討されていることから、北海道-東京間の高圧直流送電(HVDC)等を新たにモデル化し、電力基幹系統の規模を拡張した。また特に、再生可能エネルギーの余剰電力により水電解で製造した水素や、その水素の利用用途としてメタネーション(合成メタン製造)を考慮した最適電源構成モデルやエネルギーシステム全体をカバーしたエネルギー需給モデルを開発し、再生可能エネルギーの部門横断的利用の可能性に関して、分析を実施した。

### 4. 研究成果

(1) 風力発電の出力は風速の3乗に比例して増減するため、その導入可能性の正確な評価のためには詳細な出力変動を考慮する必要がある。本研究では世界約2,400地点の仮想洋上風力発電所を世界エネルギーモデルで設定し、その出力変動を電力部門において3時間値で考慮することで、従来の世界エネルギーモデルに比べて詳細な洋上風力発電の導入可能性評価を行った(図1)。洋上風力発電のコスト低減が導入量に大きく影響し、コストが低減した場合は欧州や南米地域など中緯度帯の浅い海域を中心に大規模な洋上風力導入が進められることや、出力変動の系統への影響は、合成燃料製造のための水素製造(水電気分解)により緩和されることが計算結果より示された。

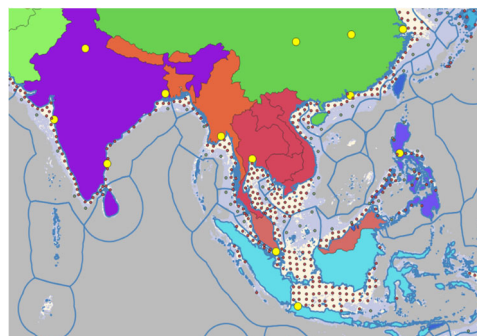


図1 アジアの洋上風力仮想導入地点

(2) 全国の全ての基幹系統を 383 ノード、475 本の送電線、および導入が予見される新技術(洋上風力発電や CCUS 技術など)をモデル化して拡張を行った最適電源構成モデルを開発した(図 2)。年間 8,760 時間にて CO<sub>2</sub> 排出制約(カーボンニュートラル制約など)を想定の上にて太陽光・風力発電の大量導入下での電力需給解析が可能である。電源は、原子力(大型炉, 小型炉)、火力(LNG 複合、LNG 汽力、石油、石炭、LNG-CCUS、石炭-CCUS、LNG-水素混焼、石炭-アンモニア混焼)、一般水力、地熱、バイオマス、海洋エネルギー、陸上風力、洋上風力、太陽光、揚水式水力、NAS 電池、Li-ion 電池を考慮する。電力系統では連系線(北本連系線、相馬双葉幹線、周波数変換所、北海道-東京間高压直流送電[HVDC]等)の拡張計画を考慮した。

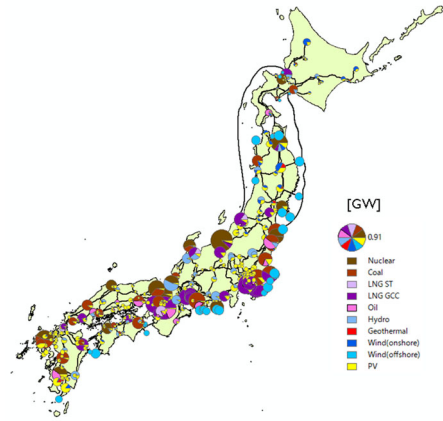


図 2 送電線、電源設備容量の分布

(3) CO<sub>2</sub> 制約が厳しくなるにつれ、石炭火力低減と LNG 複合や LNG-水素混焼、風力発電の導入拡大が進み、さらにカーボンニュートラルに近づくにつれ、水素発電、LNG-CCUS、太陽光や風力、小型原子炉、バッテリーの導入拡大が進む結果となった。

(4) 地理的に詳細な最適電源構成モデルを拡張して、国内水素製造、輸入水素、メタン合成(メタネーション)の導入可能性について分析を行った(図 3)。モデル内でのメタン供給技術は 2 種類(輸入 LNG、サバティエ反応)、水素製造技術として水電気分解装置、水素貯蔵技術として 2 種類(圧縮水素貯蔵タンク、液化水素貯蔵タンク)、そして CO<sub>2</sub> 回収技術として 2 種類(各種火力での化学吸収法、直接空気回収[DAC: Direct Air Capture])を想定している。各火力発電所における CO<sub>2</sub> 回収設備の導入については経済性に従い選択可能であるとしている。水素供給源として国内水電解の他に輸入水素も想定している。

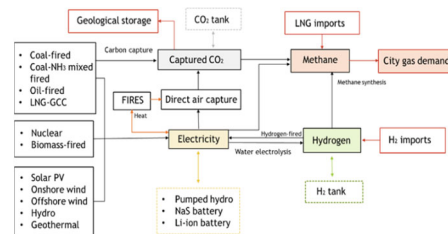


図 3 エネルギーフロー

(5) 炭素税の課税に関して感度分析を行い、高額な炭素税率下では発電部門において水素専焼発電が石炭、LNG 火力に代わって導入され、その水素の大部分が輸入水素によって供給される様子が見られた。発電部門における CO<sub>2</sub> 排出量は水素発電と VRE の大規模導入により大幅に低減がなされた一方で、炭素税の課税水準が極めて高くなると、主として輸入水素を利用して、都市ガス部門における合成メタン(メタネーション)が一定程度、導入される結果となった(図 4)。

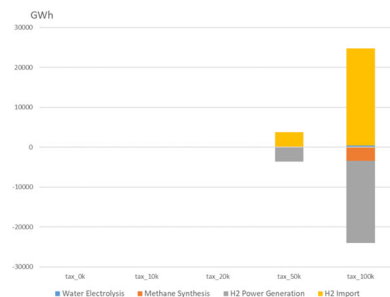


図 4 国内水素需給バランス

(6) ボトムアップ型技術選択モデルを基に、脱炭素の重要技術である CCUS 技術に関して詳細にモデル化し、CO<sub>2</sub> の固定やネガティブエミッション技術を考慮可能とし、炭素固定方法の一つとして化学製品中への炭素固定を考慮した上で、エネルギーシステムの CO<sub>2</sub> 排出ネットゼロ実現可能性について分析を行った。電力需給バランスを 1 時間値で評価可能など電力部門の詳細なモデル化に加え、エネルギー需要の時間解像度を詳細化することにより、変動性再生可能エネルギー(VRE)の大量導入時において、VRE の出力変動に対して、電力・エネルギーの余剰や需給逼迫のより現実的な評価を可能とした。

(7) 分析期間は 2020 年から 2050 年、1 期 5 年で 7 期の計算を行う。CO<sub>2</sub> 排出量の上限制約を、2050 年にネットゼロとし、各技術に関して感度分析を行った。その結果、最終エネルギー消費構成では、全ケースで電化の進展と合成液体燃料利用が見られた(図 5)。CO<sub>2</sub> 貯留可能量の小さいケース(CCS-)では合成液体燃料の拡大に加え合成メタンが導入され、化石燃料利用は粗鋼製造の原料炭利用に限定される。CO<sub>2</sub> 貯留可能量の大きいケース(CCS+)では、CO<sub>2</sub> 原単位の小さい天然ガスを中心に利用が継続することがわかった。

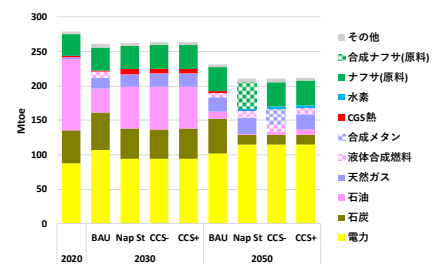


図 5 最終エネルギー消費

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Gyanwali Khem, Komiyama Ryoichi, Fujii Yasumasa   | 4. 巻<br>112                   |
| 2. 論文標題<br>Deep decarbonization of integrated power grid of eastern South Asia considering hydrogen and CCS technology  | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>International Journal of Greenhouse Gas Control   | 6. 最初と最後の頁<br>103515 ~ 103515 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.ijggc.2021.103515   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-                     |
| 1. 著者名<br>Yi Y., Gyanwali K., Komiyama R., Fujii Y., Yamaguchi A.   | 4. 巻<br>42(6)                 |
| 2. 論文標題<br>How Will the Capital Cost Influence the Integration of CCS Coal Plants into the Chinese Low-carbon Optimal Power Expansion Plan by 2050 ?  | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Japan Society of Energy and Resources  | 6. 最初と最後の頁<br>368-384         |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.24778/jjser.42.6_368   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-                     |
| 1. 著者名<br>Sied, J., Komiyama, R., Fujii, Y.   | 4. 巻<br>42(5)                 |
| 2. 論文標題<br>Dynamic Multi-Sector Energy Economic Analysis to Identify Potential of Nuclear and Renewable Energy Options in Expanding Electricity Sector of Developing Countries: Bangladesh Case Study | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Japan Society of Energy and Resources  | 6. 最初と最後の頁<br>295-304         |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.24778/jjser.42.5_295   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-                     |
| 1. 著者名<br>吉武宗浩, 小宮山涼一, 藤井康正   | 4. 巻<br>43(2)                 |
| 2. 論文標題<br>洋上風力発電の出力変動を考慮した世界エネルギーモデルによるカーボンニュートラル実現可能性に関する分析   | 5. 発行年<br>2022年               |
| 3. 雑誌名<br>エネルギー・資源学会論文誌   | 6. 最初と最後の頁<br>108-118         |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.24778/jjser.43.2_45  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-                     |

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Komiyama Ryoichi, Fujii Yasumasa                                       | 4. 巻<br>16              |
| 2. 論文標題<br>Large-scale integration of offshore wind into the Japanese power grid | 5. 発行年<br>2021年         |
| 3. 雑誌名<br>Sustainability Science   | 6. 最初と最後の頁<br>429 ~ 448 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1007/s11625-021-00907-0                           | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)   | 国際共著<br>-               |

|   |                           |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Gyanwali Khem, Komiyama Ryoichi, Fujii Yasumasa   | 4. 巻<br>15                |
| 2. 論文標題<br>Power sector analysis of the BBIN sub region with a spatially disaggregated dynamic power generation mix model | 5. 発行年<br>2020年           |
| 3. 雑誌名<br>IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering  | 6. 最初と最後の頁<br>1641 ~ 1654 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1002/tee.23234   | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-                 |

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Gyanwali Khem, Komiyama Ryoichi, Fujii Yasumasa   | 4. 巻<br>202                   |
| 2. 論文標題<br>Representing hydropower in the dynamic power sector model and assessing clean energy deployment in the power generation mix of Nepal | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>Energy  | 6. 最初と最後の頁<br>117795 ~ 117795 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.energy.2020.117795  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-                     |

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Yi Ye, Komiyama Ryoichi, Fujii Yasumasa  | 4. 巻<br>18              |
| 2. 論文標題<br>Development of Chinese Dynamic Optimal Power Expansion Planning Model Integrated with Hydrogen and Fuel Cell System | 5. 発行年<br>2023年         |
| 3. 雑誌名<br>IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering   | 6. 最初と最後の頁<br>834 ~ 848 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1002/tee.23793  | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)   | 国際共著<br>-               |

|   |                    |
|---|--------------------|
| 1. 著者名<br>今川 智稀、小宮山 涼一、藤井 康正                                  | 4. 巻<br>44         |
| 2. 論文標題<br>CCU技術を詳細化した技術選択モデルによる日本の2050年カーボンニュートラル実現可能性に関する分析 | 5. 発行年<br>2023年    |
| 3. 雑誌名<br>エネルギー・資源学会論文誌                                       | 6. 最初と最後の頁<br>1~13 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.24778/jjser.44.1_1             | 査読の有無<br>有         |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難                        | 国際共著<br>-          |

|  |                     |
|--|---------------------|
| 1. 著者名<br>西倉 寛太、小宮山 涼一、藤井 康正                                       | 4. 巻<br>44          |
| 2. 論文標題<br>災害の予測可能性を考慮した近似確率動的計画モデルによる分散型エネルギーシステムのレジリエンスに関する定量的分析 | 5. 発行年<br>2023年     |
| 3. 雑誌名<br>エネルギー・資源学会論文誌  | 6. 最初と最後の頁<br>74~86 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.24778/jjser.44.2_74                 | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難                             | 国際共著<br>-           |

|  |                     |
|--|---------------------|
| 1. 著者名<br>田原 聡史、藤井 康正、小宮山 涼一                       | 4. 巻<br>43          |
| 2. 論文標題<br>日本国内における最適電源構成と組み合わせた水素製造・メタン合成技術の経済性評価 | 5. 発行年<br>2022年     |
| 3. 雑誌名<br>エネルギー・資源学会論文誌                            | 6. 最初と最後の頁<br>75~83 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.24778/jjser.43.3_75 | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難             | 国際共著<br>-           |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>古川 慶人、小宮山 涼一、藤井 康正   | 4. 巻<br>43            |
| 2. 論文標題<br>世界エネルギーモデルによる感度分析を用いた相変化型大気中CO <sub>2</sub> 直接回収技術の導入可能性の評価 | 5. 発行年<br>2022年       |
| 3. 雑誌名<br>エネルギー・資源学会論文誌  | 6. 最初と最後の頁<br>225~234 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.24778/jjser.43.6_225                    | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難                                 | 国際共著<br>-             |

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>OTSUKI Takashi, KOMIYAMA Ryoichi, FUJII Yasumasa, NAKAMURA Hiroko  | 4. 巻<br>4                     |
| 2. 論文標題<br>Temporally detailed modeling and analysis of global net zero energy systems focusing on variable renewable energy | 5. 発行年<br>2023年               |
| 3. 雑誌名<br>Energy and Climate Change  | 6. 最初と最後の頁<br>100108 ~ 100108 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.egycc.2023.100108  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-                     |

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>神戸 健太郎、小宮山 涼一、藤井 康正                                    | 4. 巻<br>42              |
| 2. 論文標題<br>家庭部門と電力部門のエネルギー需給構造を詳細化した技術選択モデルによる送配電網の維持・運用費用に関する分析 | 5. 発行年<br>2021年         |
| 3. 雑誌名<br>エネルギー・資源学会論文誌  | 6. 最初と最後の頁<br>108 ~ 118 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.24778/jjser.42.3_108              | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難                           | 国際共著<br>-               |

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 5件)

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Komiya, R.  |
| 2. 発表標題<br>Energy Modelling Study for Achieving Carbon Neutrality in Japan             |
| 3. 学会等名<br>The International Conference on Electrical Engineering (ICEE) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Komiya, R.  |
| 2. 発表標題<br>Installable Potential of Small Modular Reactors and Renewable Energy for Achieving Carbon Neutrality in Electric Power System |
| 3. 学会等名<br>6th AIEE Energy Symposium (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Komiya, R., Fujii, Y., Kawakami, Y., Otsuki, T.  |
| 2. 発表標題<br>Long-term Energy Strategy for Carbon Neutrality in Japan and the World   |
| 3. 学会等名<br>Global Alliance of Universities on Climate(GAUC) 'Pathways to net zero emissions and carbon/climate neutrality' (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Komiya, R.  |
| 2. 発表標題<br>Optimal Deployment of Small Modular Reactors Under Large scale Integration of Variable Renewable Energy |
| 3. 学会等名<br>39th USAEE/IAEE North American Conference (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Komiya, R.   |
| 2. 発表標題<br>A Comprehensive Analysis of the Role of Innovative Technologies for Achieving Green Transformation with Optimal Power Generation Mix Model |
| 3. 学会等名<br>IEEJ PES & IEEE PES Thailand Joint Symposium 2023 (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2023年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>小宮山涼一   |
| 2. 発表標題<br>カーボンニュートラル実現に向けたエネルギー・電力システム                          |
| 3. 学会等名<br>日本学術会議 公開シンポジウム「2050年カーボンニュートラル実現に向けたエネルギーシナリオ」(招待講演) |
| 4. 発表年<br>2022年  |



|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>小宮山涼一                                |
| 2. 発表標題<br>最適化型電力需給モデルによる電力需要の柔軟性に関する基礎的分析      |
| 3. 学会等名<br>電気学会全国大会、S6 再エネ発電大量導入のための各種需給調整力のあり方 |
| 4. 発表年<br>2023年                                 |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>小宮山涼一                                |
| 2. 発表標題<br>カーボンニュートラル実現に向けたエネルギー・電力システムシミュレーション |
| 3. 学会等名<br>スーパーコンピューティング技術産業応用協議会セミナー（招待講演）     |
| 4. 発表年<br>2022年                                 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|                           |                       |    |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関              |  |  |
|---------|----------------------|--|--|
| ネパール    | Tribhuvan University |  |  |