

令和 4 年 6 月 27 日現在

機関番号：12701

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K18230

研究課題名（和文）次世代エネルギーシステムを対象としたエクセルギー産業連関分析手法の構築と応用

研究課題名（英文）Development and application of exergy input-output analysis for next-generation energy system

研究代表者

稗貫 峻一（Hienuki, Shunichi）

横浜国立大学・先端科学高等研究院・非常勤講師

研究者番号：20791544

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、次世代エネルギーシステムの導入が社会全体のエネルギー効率改善へもたらす影響を、エネルギーの「質」を考慮したエクセルギー指標を用いて分析することを目的とした。具体的には、産業連関表におけるエクセルギーの定義を定め、産業連関表に対応したエクセルギー消費量データベースを構築し、再生可能エネルギー発電を対象としたケーススタディを実施した。その結果、各産業で直接間接的に生じるエクセルギー消費量を推計可能となり、再生可能エネルギー発電のエクセルギー収支を定量的に示した。これにより、「質」の低いエネルギー需要や大量に電力を消費する次世代技術における再生可能エネルギー利用の有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、産業のエネルギー需要別（冷暖房、給湯、動力など）、エネルギー供給別（電力、ガス、化石燃料など）にエネルギーの需給量を推計し、エネルギーの「質」を考慮することが可能なエクセルギー消費量に変換することで、産業間のエクセルギーフローを体系的に整理した。また、このエクセルギー指標を産業連関表と組み合わせることで、サプライチェーン全体で直接間接的に消費されるエクセルギー消費量の分析評価が可能となった。この成果は、エクセルギー消費量が大きい産業部門の特定につながり、産業の電化や再生可能エネルギー技術の導入など技術選択に資する情報となりうる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to analyze the effects of introducing next-generation energy systems on the energy efficiency of the society, using exergy indices that take energy "quality" into account. Specifically, in this study, exergy was defined in an input-output table; an exergy consumption database, which corresponded to the input-output table, was constructed; and a case study, which targeted renewable energy power generation, was conducted. Hence, the exergy consumptions that were directly and indirectly generated in each industry were estimated, and the exergy balance of the renewable energy power generation throughout the lifecycle was shown. This quantitatively demonstrated the effectiveness of using renewable energy in low "quality" energy demand and next-generation technologies with high power consumption.

研究分野：環境学

キーワード：エネルギーシステム エネルギーの質 エクセルギー 産業連関表 再生可能エネルギー 技術選択
ライフサイクル分析 環境エネルギー分析

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

エネルギー需給システムや関連する技術を対象とした環境エネルギー分析の多くは、エネルギー消費量や化石燃料消費量を中心に議論されることが多い。しかし、エネルギー需要形態までを含めた研究は少ない。わが国における家庭部門のエネルギー需要に着目すると、その多くが冷暖房や給湯として使われており、これら熱需要を満たすために多くの電力や化石燃料が供給されている。しかし、電力や化石燃料は様々なエネルギー需要に使える「質」の高いエネルギーであり、冷暖房や給湯などのエネルギーの「質」が低い需要での利用を低減していくことが社会全体のエネルギーシステムの効率化につながる。こうした背景から、再生可能エネルギー技術は、そのままでは社会で活用しにくい「質」の低い風力、太陽光などのエネルギーから「質」の高い電力や熱を生産することが可能であり、「質」の低いエネルギー需要に対して効果的に利活用することが期待されている。

これまでに再生可能エネルギー技術の分析評価に用いてきた産業連関表 (Input-Output Table: 以下 IO 表) は、公の統計データに基づいた分析手法であり、一国一地域内で生じる産業間の財・サービスの取引を網羅的に分析することができる。また、各部門に対応したデータベース (各種係数) の構築が成されていれば、一つの金額データから社会や経済指標と連動した多面的な分析評価が可能である。しかし、従来の IO 表を用いたエネルギー分析は、エネルギーの「消費量」を基本としており、各産業の需要形態やエネルギーの「質」までは考慮していない。

その一方で、エネルギーの「質」を考慮した概念としてエクセルギー指標がある。エクセルギーとは、そのエネルギーがもつ仕事の最大量を示しており、値が大きいほど様々な生産活動に利用することが出来る「質」の高いエネルギーを示す。この指標を用いた分析は、比較的小さい範囲の技術やシステムの分析には採用されてきたが、社会全体のエネルギーシステムを対象とした研究は少ない。

従って、IO 表とエクセルギー指標を組み合わせた分析手法を構築することで、社会全体のエネルギー需給システムで直接間接的に消費されるエネルギーを「質」を考慮しながら分析評価することが可能となる。

2. 研究の目的

そこで本研究は、次世代エネルギーシステムの導入が社会全体のエネルギー効率改善へもたらす影響をエネルギーの「質」を考慮したエクセルギー指標を用いて分析することを目的とした。具体的には、IO 表におけるエクセルギーの定義を定め、IO 表に対応したエクセルギー消費量データベースを構築し、再生可能エネルギー発電を対象としたケーススタディを実施した。

3. 研究の方法

3.1 エクセルギーIO 表の作成

図1は既存の IO 表および関連する情報と本研究が作成するエクセルギー消費量データベースの位置づけを示している。既存の IO 表は、総務省が作成している 2015 年 IO 表¹⁾ を基本とした。分析指標の拡張では、IO 表の付帯表である雇用表、Embodied energy and emission intensity data for Japan using input-output tables (以下: 3EID)²⁾ による温室効果ガス排出量、エネルギー消費量に加えて、各指標に対応したエクセルギー消費量を推計した。次に、再生可能エネルギー技術に関連する情報は、Renewable Energy-Focused Input-Output Table (以下: REFIO)³⁾ を中心に不足している情報を収集して対象技術を拡張した。

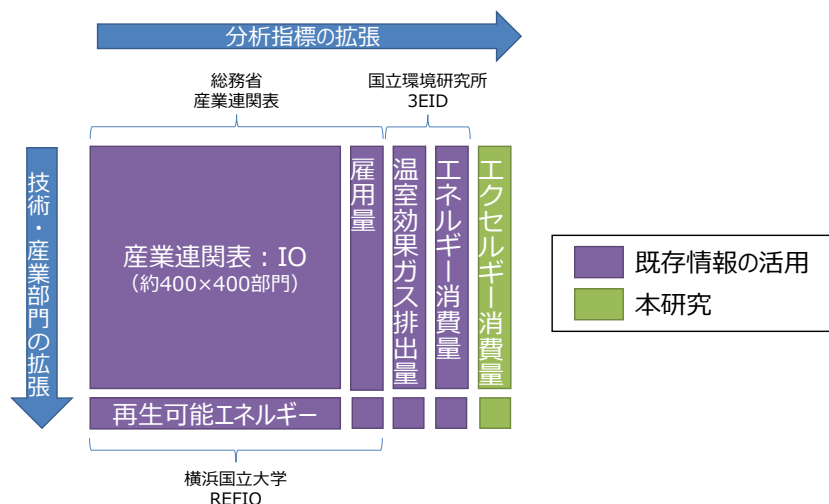


図1 エクセルギー産業連関表の概要

3.2 産業連関表におけるエクセルギーの定義

エクセルギーは、エネルギーの価値や質を数値化して表そうとしたものである。一般的にはエクセルギーの定義を「その地域の環境温度で取り出せる最大の有効エネルギー」としている⁴⁾。本研究では、I0表を基本としていることから、各産業の生産活動を基準に各部門に投入/産出するエクセルギーを考慮し、「人間社会が仕事として効果的に利用することができるエネルギー」と定義した。

3.3 エクセルギー投入量と産出量の推計

前述の3EIDではエネルギー投入量から原材料として投入された分を控除したエネルギー消費量が体系的に整理されている。しかし、投入されたエネルギーがどのように使用されているのかまでは記載されていない。そこで、収集した情報を整理することで電力、化石燃料、蒸気の投入量と産出量を需要別に推計し整理することで、各部門のエクセルギー消費量を推計した。

① エネルギー転換部門

I0表の構造上、事業用電力、自家発電、蒸気供給部門によるエネルギー消費量はエネルギー転換部門に計上される。例えば、既存のI0表において自動車産業部門の消費量は、その部門で燃焼される化石燃料による直接分が計上されており、電力を生産する際の天然ガスの投入量は事業用電力部門に計上される。しかし、エクセルギーI0分析を実施する場合、各部門に投入されるエクセルギー投入量と産出量を推計する必要があるため、前述のエネルギー転換部門から産出される電力、蒸気量をI0表の付帯表である物量表から詳細に推計し、エネルギー転換部門から産出されるエネルギーを利用する各部門に投入されるように改良した。これによりエネルギー転換部門でのエクセルギー消費量は、エネルギー転換による損失分のみが計上される構造となる。

また、蒸気供給部門については、高温需要と低温需要でエクセルギーの価値が大きく異なるが、蒸気供給部門からの産出される蒸気は全て高温需要と仮定した。

② 製造業・サービス業

製造業のエクセルギー投入量は3EIDを基本として、石炭、石炭製品、原油、石油製品、天然ガス、都市ガス、再エネ・未活用エネルギー消費量とエクセルギー変換係数により推計した。また、エクセルギー産出量は、電力需要7種（照明、生産用冷凍機、ポンプ・ファン、コンプレッサ、電気炉・加熱設備、動力・搬送設備、他生産設備）、化石燃料需要5種（ボイラー、空調、プロセス用直接加熱、非プロセス用直接加熱、他生産設備）、蒸気需要6種（洗浄、乾燥、殺菌、反応・溶解、空調、他生産工程）⁵⁾を考慮した（図2）。ただし、投入エクセルギーはI0の部門別に推計しているのに対し、需要に関する情報は20種の製造業に分類されているため、I0の各部門にこれら20種の産業別情報をあてはめた。

同様に、サービス業のエクセルギー投入量は、製造業と同様に3EIDのエネルギー投入量を基準とした。エクセルギー産出量のうち電力需要は、空調、照明、コンセント、OA機器、動力、エレベーター、厨房機器、冷蔵庫、ショーケース、給湯のエネルギー需要別にオフィスビル、卸売・小売、食品スーパー、医療機関、ホテル・旅館、飲食店、学校の7種を推計し、I0表の該当する各部門にあてはめた。また、化石燃料の需要のうち、ガソリン、ジェット燃料、軽油、輸用部門に投入されるLPGは全て動力に変換されると仮定し、残りは全て低温需要として推計した。

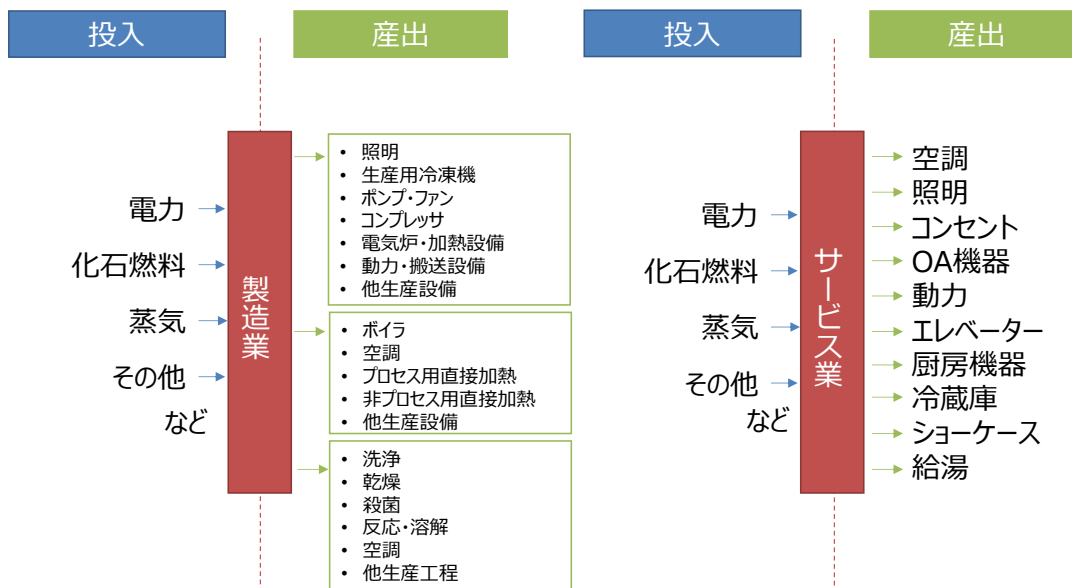


図2 製造業・サービス業部門のエクセルギー量推計の概要

③ その他の産業・最終需要部門

その他の産業は、主に農林水産業、建設業、運輸業が該当する。まずこれらの部門のエネルギー需要として、電力は全て低温需要と仮定した。また、化石燃料は、ガソリン、ジェット燃料油、軽油、輸送部門のLPGは全て動力に変換されると仮定し、残りは全てを低温需要とした。

最終需要部門（家計消費、家計外消費）のエクセルギー消費量は、3EIDのエネルギー投入量から、エネルギー白書2016⁶⁾の値により家計消費部門の給湯や冷暖房などの需要構造を推計した。なお、家計外消費については詳細な情報が得られなかったため家計消費と同じ構造とした。

3.4 エクセルギー消費量の推計

対象とする技術のライフサイクル全体のエクセルギー消費量($LCEx_{loss}$)は式(1)に従い推計される。またライフサイクル*i*段階におけるエクセルギー消費量($Ex_{loss i}$)は、式(2)から最終需要(f_i)を与えることで推計する。ここでの、 $(I - A)^{-1}$ はレオンチェフ逆行列、 \widehat{Ex}_{loss} は生産額あたりのエクセルギー消費係数ベクトルの対角行列を示す。

$$LCEx_{loss} = \sum Ex_{loss i} \quad (1)$$

$$Ex_{loss i} = \widehat{Ex}_{loss}(I - A)^{-1}f_i \quad (2)$$

上記の式により推計されるエクセルギー消費量は、2015年の産業構造、社会構造を前提としており、輸入材により国外で生じる影響は国内と同じ条件で推計される点に留意する必要がある。

4. 研究成果

4.1 家計消費部門の直接間接エクセルギー消費量

図3は、家計消費部門を最終需要 f_i とし、式(2)に従い推計した、家計消費由来の直接間接の部門別エクセルギー消費量を示している。家計消費由来の直接間接エクセルギー投入量、消費量、利用量は、それぞれ約13,750[exPJ]、8,480[exPJ]、5,260[exPJ]であり、全体の約60%が消費され、約40%が冷暖房、給湯、動力、照明などで利用されている。ここでのエクセルギー消費は、投入された電力や化石燃料などのエクセルギーから、仕事として変換されなかった無効エクセルギーを示し、利用料は動力、熱などの仕事に変換されたエクセルギーを示す。部門別エクセルギー消費量は、事業用電力(石炭や天然ガスから電力に変換した際のロスなど)が全体の18%、家庭での直接消費量(電力、都市ガス、ガソリンなどの利用など)が14%であり、この二つで全体の約30%を占めている。また、小売、飲食店などのサービス部門、自家輸送(貨物)、道路貨物輸送、自家輸送(旅客)、航空輸送などの輸送部門、石油製品、石炭・原油・天然ガスなどの原料採掘部門、石油化学基礎製品などの石油関連部門が比較的上位に来る傾向がある。サービス部門は、家庭の直接消費と同様に、給湯や冷暖房のエネルギー需要に、質の高い電力や化石燃料を供給していることが主たる要因である。また、輸送部門はガソリンや軽油をエンジンにより動力に変換する際の消費量であり、石油関連部門は製品製造に必要な電力や化石燃料消費に伴う影響である。

これらエクセルギー消費量が大きい部門は、「質」の低いエネルギー需要に、「質」の高いエネルギーを供給している部門であり、電化や再生可能エネルギー利用によるエネルギー効率化が比較的大きく期待される部門といえる。このように、ライフサイクル分析にエクセルギー消費量の指標を採用することで、従来のエネルギー消費量の指標では見え難いエネルギー需給の関係性を考慮した分析が可能となった。

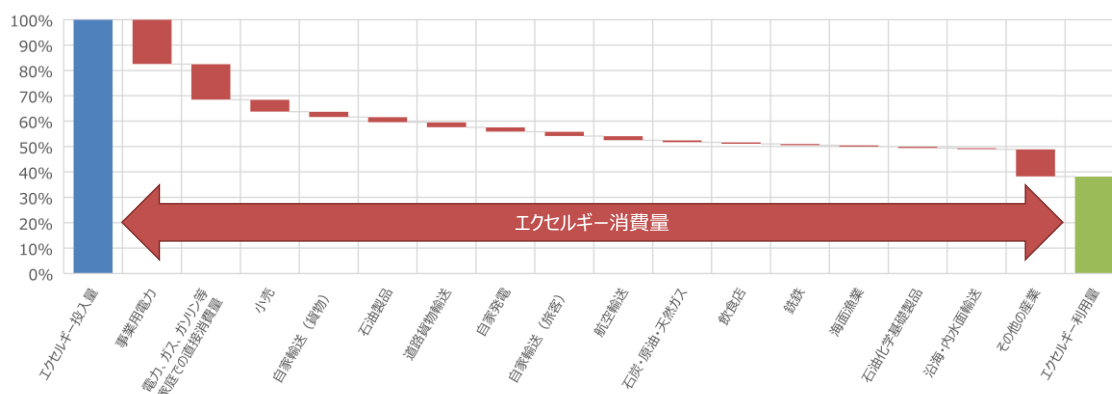


図3 家計消費由来の部門別エクセルギー消費量（上位15部門）

4.2 地熱・風力・太陽光発電のエクセルギー消費量⁷⁾

再生可能エネルギー技術の前提条件を、REFIO³⁾の前提条件に従い大規模地熱 50,000、風力 20,000、大規模太陽光 1,100[kW]とし、式(1)、(2)に従いライフサイクルエクセルギー消費量を推計した。

その結果、1GWh(3,600GJ)発電あたりの直接間接エクセルギー消費量は、地熱、風力、太陽光発電でそれぞれ100、325、335[exGJ]と推計された。部門別エクセルギー消費量の共通した特徴として、事業用電力・送配電部門、鉄鉄、熱間圧延鋼材部門、各資材を輸送に関連する道路貨物輸送、自家輸送(貨物、旅客)部門が比較的上位にある(図4)。各発電技術の特徴は、主要設備の製造部門に表れている。地熱発電の鋼管は蒸気井戸の掘削時に必要な資材であり、風力のタワーは風車を支える主要な資材、ガラス繊維・同製品は風車の資材である。さらに太陽光では太陽電池モジュールとそこに投入される鉱物や半導体素子部門でのエクセルギー消費量である。

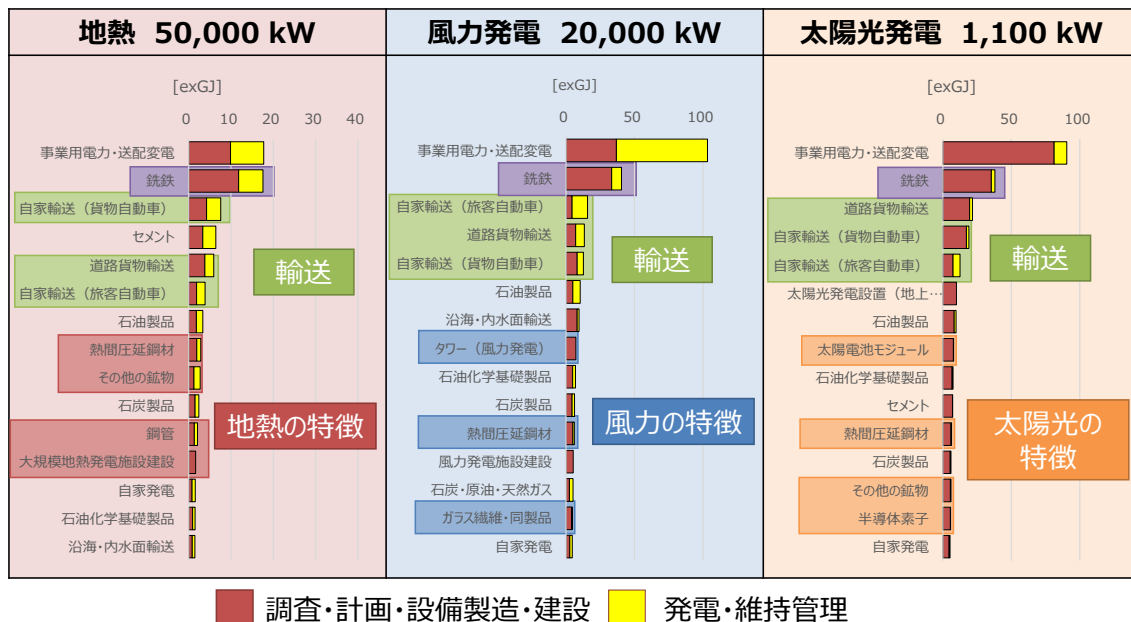


図4 地熱・風力・太陽光発電の1GWh(3,600GJ)あたりの部門別エクセルギー消費量⁷⁾

4.3 他の研究への応用

本研究で構築したエクセルギーI0表は、トヨタ・モビリティ基金「水素社会構築に向けた革新研究助成」水素エネルギーの効果的な利用に向けたライフサイクルエクセルギー分析(2018-10)に応用し、水素エネルギーシステムのライフサイクルエクセルギー分析を実施した。また、本研究の実施により取得した情報を整理し、地熱発電を対象とした地域分析と自動車の技術改善目標と環境政策の効率性分析に展開した。これらの結果は、各報告書や論文を参照されたい。

4.4 まとめと今後の展開

本研究では、I0表とエクセルギーの概念を組み合わせることで直接間接的に消費されるエクセルギー消費量を推計することが可能となった。これによりサプライチェーンの中で電化や再生可能エネルギー技術による効率化が期待される部門を特定し、構築した手法の有用性を示した。ただし、I0表の構造上の課題から、投入される再生可能エネルギーの扱いについて多くの課題が残った。今後は、手法の改善と共に、輸送部門や産業部門の電化などエネルギー・エクセルギー効率の分析を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 総務省. (2019). 平成27年(2015年)産業連関表.
- 2) 南斉規介. (2019). 産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID), 国立研究開発法人国立環境研究所. <http://www.cger.nies.go.jp/publications/report/d031/index.html>.
- 3) 森泉由恵, 本藤祐樹, 中野諭. (2015). 再生可能エネルギー部門拡張産業連関表の開発と応用. 日本エネルギー学会誌, 94(12), 1397-1413.
- 4) 久角喜徳. (2010). エネルギーの新しいものさしエクセルギーエネルギーの新しいものさしエクセルギー.
- 5) 富士経済. (2017). 産業施設におけるエネルギー消費の実態総調査 2017.
- 6) 経済産業省. (2016). エネルギー白書 2016.
- 7) 稗貫峻一. (2021). 7-2-4 再生可能エネルギー技術評価のためのエクセルギー産業連関表の利用. 日本エネルギー学会大会講演要旨集 第30回日本エネルギー学会大会 (pp. 168-169).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3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 Hienuki Shunichi, Mitoma Haruka, Ogata Mari, Uchida Izumi, Kagawa Shigemi	4. 巻 46
2. 論文標題 Environmental and energy life cycle analyses of passenger vehicle systems using fossil fuel-derived hydrogen	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy	6. 最初と最後の頁 36569 ~ 36580
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijhydene.2021.08.135	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -
1. 著者名 Eguchi Shogo, Takayabu Hirota, Kaneko Mitsuki, Kagawa Shigemi, Hienuki Shunichi	4. 巻 -
2. 論文標題 Proposing effective strategies for meeting an environmental regulation with attainable technology improvement targets	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Business Strategy and the Environment	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/bse.2778	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -
1. 著者名 Shunichi Hienuki, Hiromi Kubota	4. 巻 -
2. 論文標題 Socioeconomic Life Cycle Analysis of Geothermal Power Generation Considering Regional Industrial Structures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings World Geothermal Congress 2020	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -
1. 著者名 稗貫 峻一	4. 巻 30
2. 論文標題 再生可能エネルギー技術評価のためのエクセルギー産業連関表の利用	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本エネルギー学会大会講演要旨集	6. 最初と最後の頁 168 ~ 169
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20550/jietaikaiyoushi.30.0_168	査読の有無 無
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 稗貫 峻一	4. 巻 28
2. 論文標題 ライフサイクルエクセルギー分析に向けた産業連関表利用の提案	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本エネルギー学会大会講演要旨集	6. 最初と最後の頁 198 ~ 199
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20550/jietaikaiyoushi.28.0_198	査読の有無 無
オープンアクセス 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 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 稗貫峻一
2. 発表標題 再生可能エネルギー技術評価のためのエクセルギー産業連関表の利用
3. 学会等名 第30回日本エネルギー学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shunichi Hienuki、Hiromi Kubota
2. 発表標題 Socioeconomic Life Cycle Analysis of Geothermal Power Generation Considering Regional Industrial Structures
3. 学会等名 World Geothermal Congress 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年 ~ 2021年

1. 発表者名 稗貫峻一
2. 発表標題 ライフサイクルエクセルギー分析に向けた産業連関表利用の提案
3. 学会等名 第28回日本エネルギー学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 稗貫峻一
2. 発表標題 産業連関分析の次世代エネルギーシステム評価への適用
3. 学会等名 環太平洋産業連関分析学会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 稗貫峻一、野口和彦、澁谷忠弘、三宅淳巳
2. 発表標題 産業連関表を用いた水素エネルギーシステムの効率性分析
3. 学会等名 第14回日本LCA学会研究発表会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Researchmap https://researchmap.jp/hienuki
--

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (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
---------	---------