

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（特設分野研究）

研究期間：2017～2022

課題番号：17KT0035

研究課題名（和文）シミュレーション実験による限界費用ゼロエネルギー普及政策評価

研究課題名（英文）Evaluation of Policies for Promoting Energy with Zero Marginal Cost by Using Simulation Experiments

研究代表者

手塚 哲央（Tezuka, Tetsuo）

京都大学・エネルギー科学研究科・名誉教授

研究者番号：60163896

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、限界費用ゼロである再生可能エネルギーが普及したASEAN諸国とそれを取り巻く日中韓3国との間の経済協力（ASEAN+3）がもたらす影響を分析する枠組みを構築した。具体的には、以下の3点を実施した。(1)限界費用ゼロエネルギーが基幹エネルギーとなったエネルギー市場における市場制度の検討、(2)ASEAN+3の諸国の経済協力の影響分析の枠組み検討、(3)再生可能エネルギーがエネルギー需給の中心となった状況での国際電力市場制度の考察。

研究成果の学術的意義や社会的意義

限界費用ゼロエネルギーに対しては、それが基幹エネルギーとなったときには新たな市場制度を用意する必要のあることは、本研究における重要な指摘である、そして、再生可能エネルギーの国際市場取引においては、さらに再生可能エネルギーの出力の不確実性を取り除く意味でも、化学エネルギーに変換しておくことは有効なオプションとなり得ることも指摘された。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to develop a framework for analyzing the effects of economic cooperation between ASEAN member states, China, Korea and Japan with renewable energy of zero marginal cost as a main energy supply source. The three points of this research are: (1) Analysis of energy market rules in the energy supply-demand system mainly depending upon zero marginal cost energy. (2) Development of the framework for analyzing the economic cooperation effects between ASEAN member states, China, Korea and Japan. (3) Investigation of international framework for electricity market with renewable energy as a main energy supply source.

研究分野：Energy systems study

キーワード：Renewable energy Zero marginal cost ASEAN Collaboration Simulation experiment

1. 研究開始当初の背景

中長期視点に立てば再生可能エネルギーとリサイクル技術に徐々にシフトすることが望ましいと考えられるが、短期的には現状の各国の経済の状態や国際間の相互影響を考慮しなければならず、再生可能エネルギー普及という目的に絞ったとしても、各国の政策策定は合意形成過程も含めて非常に複雑なものとなる。その中でエネルギー需給状況を分析する数理モデルは複雑な状況における客観的な因果関係を合理的に検討するための有効な支援ツールとなる。また実際にも ASEAN 各国の政策担当者から、政策策定の有効な手法が求められている。しかし、エネルギー政策の導入効果を、数理モデルを援用して比較評価する効果的な手法や枠組みは、発展途上国はいまでもなく、日本を含む工業化国においても確立しているとはいえない。特に、再生可能エネルギーは燃料費ゼロ、すなわち限界費用ゼロという特殊な特徴を有しており、市場を含む制度設計には従来の化石燃料を中心とした制度設計とは大きく異なる新規な考え方を必要とする。

2. 研究の目的

本研究では、限界費用ゼロである再生可能エネルギーが普及した ASEAN 諸国とそれを取り巻く日中韓 3 国 (ASEAN+3) の間の経済協力がもたらす影響評価の枠組みを構築する。具体的には、以下の 3 点を実施する。

- (1) 限界費用ゼロエネルギーが基幹エネルギーとなったエネルギー市場における市場制度の検討、
- (2) ASEAN(+3) 諸国の経済協力の影響分析の枠組み検討 (図 1 参照)、
- (3) 再生可能エネルギーがエネルギー需給の中心となった状況での国際電力市場制度の考察。

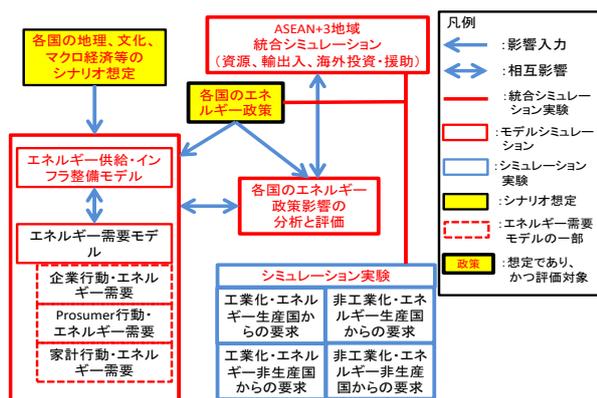


図 1 本研究で提案するエネルギー政策評価の枠組

3. 研究の方法

3.1 限界費用ゼロエネルギーが基幹エネルギーとなったエネルギー市場における (国内) 市場制度の検討

限界費用ゼロエネルギーが基幹エネルギーとなったエネルギー市場において必要となる市場制度について、理論的分析とシミュレーションモデルによる検討を行う。

3.2 ASEAN+3 の諸国の経済協力の影響分析の枠組み検討

ASEAN+3 の諸国の経済協力の影響分析には、産業連関表を用いた複数国のエネルギー経済モデルによる各国の政策分析環境を構築し、協力の条件を変えることによる協力の効果の変化の様子を定量的に分析する。

また、ASEAN 諸国における再生可能エネルギー導入評価に当たっては、再生可能エネルギー導入の費用分析も重要である。本研究では、生涯平均化コスト (LCOE) の分析を行う。

3.3 再生可能エネルギーがエネルギー需給の中心となった状況での国際電力市場制度の考察

再生可能エネルギーがエネルギー需給の中心となった状況を考察し、電力に加えて再生可能エネルギーの取引の媒体となる水素やメタンなどの長期貯蔵可能なエネルギー媒体を含むエネルギー取引市場の挙動を、簡略化された数理モデルを構築することにより検討する。

4. 研究成果

4.1 限界費用ゼロエネルギーが基幹エネルギーとなったエネルギー市場における (国内) 市場制度の検討

限界費用ゼロエネルギーが基幹エネルギーとなったエネルギー市場において必要となる市場制度について検討を行った。理論的分析とシミュレーションモデルによる検討の結果、再生可能エネルギーの供給量が潜在需要量に満たない場合 (通常はこの場合に該当) には、従来の化石燃料に依存した市場取引制度は機能しないことが定量的に示された。そして、その場合に望ましい需給バランスを実現するためには、消費者がエネルギー消費から獲得する効用を関係者間で共有することが必要となるがそれが難しいとすれば、電力市場においては以下の方策が候補となる。

- ① 供給量の強制 (計画) 分配、
- ② 消費者が、希望する量を消費できるように発電設備に投資、

- ③ 水素などの長期のエネルギー貯蔵（化学貯蔵）の導入  
（エネルギー貯蔵物質が豊富にあればそれは化石燃料の役割を担うが、豊富にないとなれば、分配の問題は依然として残る。）
- ④ 電力料金を適応的に変えることにより需給調整
- ⑤ エネルギー販売の際に価格以外の情報を提供、  
例えば、供給量不足情報の提供により地域内にある電気機器運転を総合管理する。
- ⑥ 派生需要であるエネルギー需要の特徴を活かし、本来の需要価値を市場取引する。これはエネルギー供給のサービス化を意味し、電力の Product Service System としての議論が必要となる。

#### 4.2 ASEAN+3 の諸国の経済協力の影響分析の枠組み検討

ASEAN+3 の諸国の経済協力の影響分析には、産業連関表を用いた複数国のエネルギー経済モデルによる各国の政策分析環境を構築し、協力の条件を変えることによる協力の効果の変化の様子を定量的に分析した。

エネルギー協力政策が多国間レベル(ASEAN+3)の経済状況に及ぼす影響評価の枠組みを図2に示す。ここで、政策策定担当者も含めて対話的にシミュレーションを進めること(図1)が、本来であれば望ましい。本報告の最後にも記載しているが、その試みは新型コロナウイルスの世界的なパンデミックによって実現できなかった。ただ、ここで述べている内容はそのままその政策担当者を含めたシミュレーション実験に適用できるものである。

モデルシミュレーションの主な結果は：

- (1) 石炭利用に代替するクリーンエネルギーは国によって異なり、例えば、日本はより多くのバイオマスを利用し、中国はより多くのPVと風力を利用し、韓国はより多くの原子力を利用するなどの多種多様なシナリオが想定できる。

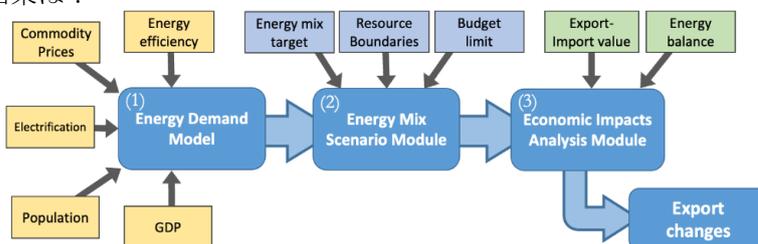


図2 ASEAN+3 間の経済協力影響分析の枠組

- (2) その選択の結果、中国、インドネシア、フィリピン、ベトナムは、ASEAN+3 のクリーンエネルギーシフトにより、大きな経済的な損失を受けることとなる(図3参照)。
- (3) ただし、BAU(現状推移型シナリオ)からの各シナリオの輸出削減額は、各国の総貿易額と比較した場合には大きな額とは言えず、別の経済対策により補償できる可能性も示唆される。

year	TOTAL EXPORT CHANGES (USD)									
	jpa	kor	chn	brn	idn	mys	phl	sgp	tha	vnm
2016	0	0	-3,092,919	0	-18,130,906	0	0	0	0	-170,644
2017	0	0	-2,990,092	0	-17,528,126	0	0	0	0	-164,971
2018	0	0	-1,038,913	0	-6,090,180	0	0	0	0	-57,319
2019	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2020	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2021	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022	0	0	0	0	-21,894,423	0	0	-59,712	0	-398,080
2023	0	0	-55,871	0	-27,649,089	0	0	-74,062	0	-505,250
2024	2,374	0	-1,302,255	0	-48,429,057	995	0	-67,626	1,582	-933,793
2025	0	-25,374	-2,807,818	0	-82,596,329	-164,182	-2,537,357	-100,706	0	-1,361,397
2026	0	-34,323	-4,687,943	0	-107,413,368	-222,090	-3,432,305	-103,045	0	-1,803,556
2027	0	-65,154	-6,150,617	0	-128,965,607	-421,586	-6,515,423	-57,379	0	-1,936,276
2028	0	-54,434	-7,639,146	0	-115,696,539	-352,220	-5,443,405	-9,448	0	-1,875,902
2029	0	-18,761	-9,152,247	0	-96,205,039	-121,392	-1,876,061	0	0	-1,967,054
2030	0	-4,455	-10,700,413	0	-98,084,291	-28,827	-445,508	0	0	-2,222,681

図3 ASEAN+3 諸国への経済影響評価結果例

また、現在検討が進められている ASEAN 電力網 (ASEAN Power Grid) による電力貿易の経済影響評価に関する分析については、図4に示すように、ASEAN 諸国間の再生可能エネルギーのポテンシャルや経済発展の段階に大きな差異があることから、その間のエネルギー貿易については、大きな効果が期待できるとともに、経済成長途上にある国の発展を阻害しないように制度設計には慎重な配慮も求められる。

一方、図5に ASEAN 諸国間の電力貿易の経済影響評価の枠組みを示す。ここで、電力取引に関しては、電力供給総費用最小化の結果に基づいて分析されていることが重要である。また、分析結果の一例として、タイとマレーシア間の電力取引結果の分析結果例を図6に示す。

シミュレーション分析によって以下の事項が定量的に示された。

- (1) ASEAN 諸国間の電力取引は、ASEAN 諸国内の再生可能エネルギーの導入・利用を促進する効果がある。
- (2) 水力発電設備の有効利用の効果は、国際間の電力取引によって大きく増大する。

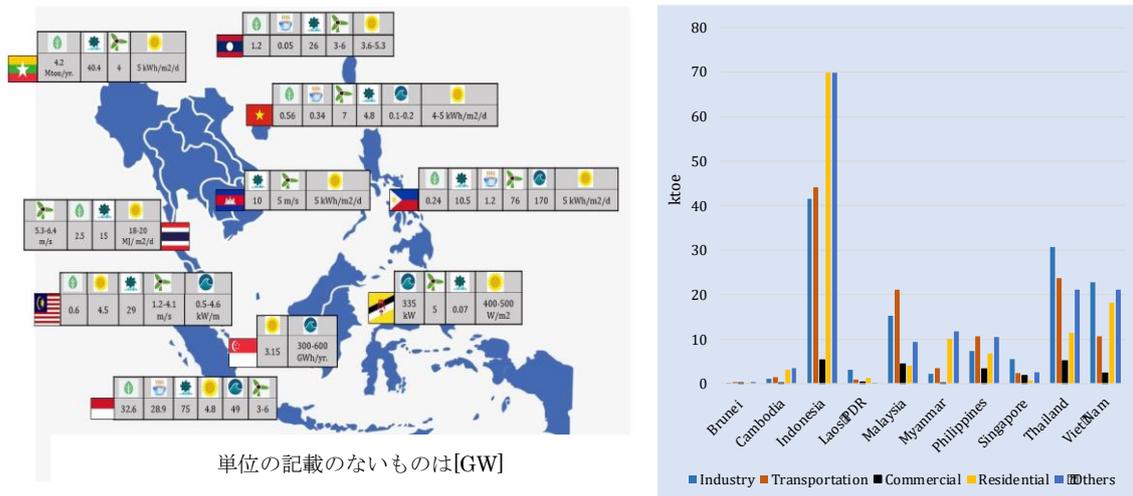


図4 ASEAN 諸国の再生可能エネルギーポテンシャルと電力需要

(3) 現在、市場慣行として、ASEAN 諸国間の電力取引は主に長期電力購入契約(PPA)に基づいているが、再生可能エネルギーの変動特性を考慮した電力貿易を効果的に進めるためには、短期的な状況に応じた取引を促進することが必要となる。

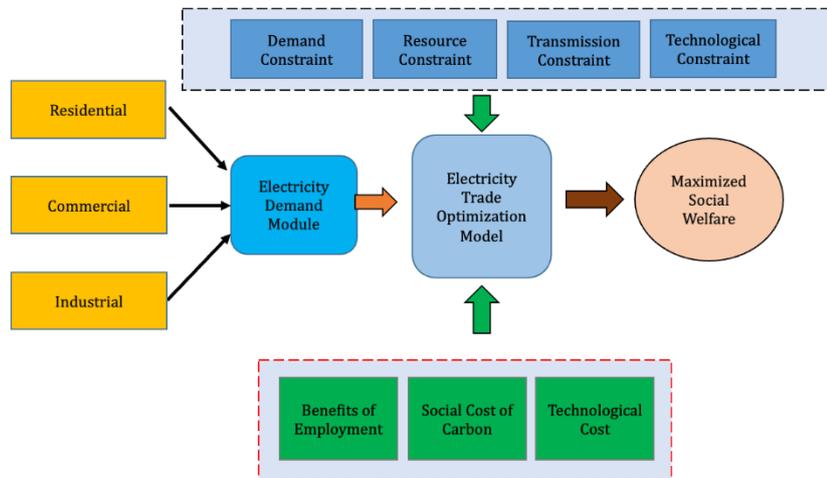


図5 ASEAN 諸国間の電力取引の影響分析評価の枠組み

なお、ASEAN 諸国における再生可能エネルギー導入評価に当たっては、再生可能エネルギー導入の費用分析も重要である。本研究では、生涯平均化コスト(LCOE)の分析も試みている。マレーシアにおける分析結果の例を図7に示す。

#### 4.3 再生可能エネルギーがエネルギー需給の中心となった状況での国際電力市場制度の考察

最後に、再生可能エネルギーがエネルギー需給の中心となった状況の検討を行い、再生可能エネルギーの取引の媒体となる水素やメタンなどの長期貯蔵可能なエネルギー媒体の取引市場の制度設計が特に発展途上にある再生可能エネルギー供給国にとって重要であることが、半定量的に示された。

一方、国際電力市場取引を考える際には、再生可能エネルギー特有の供給量の不確実性の影響を打ち消すために、再生可能エネルギーから得られた電力の一部を水素、メタン、アンモニアなどの化学エネルギーに変換・貯蔵することが求められる。その際には、化学エネルギーに変換する際の経済性の問題を考慮しないこととなり、再生可能エネルギーが基幹エネルギーとなった場合には従来とは異なる特別な市場が出現すると考えられる。

なお、当初の予定では図1の枠組みにより、ASEAN 諸国の若手政策担当者を招いてモデル分析による政策決定シミュレーション実験を実施する予定であったが、新型コロナウイルスの世界的なパンデミックにより、その試みは今後の課題として残されることとなった。ただ、本研究で作成された枠組みは、そのままそのシミュレーション実験に利用でき、図1の政策担当者を含めたシミュレーション実験の枠組み提案そのものも、この研究課題の重要な成果である。

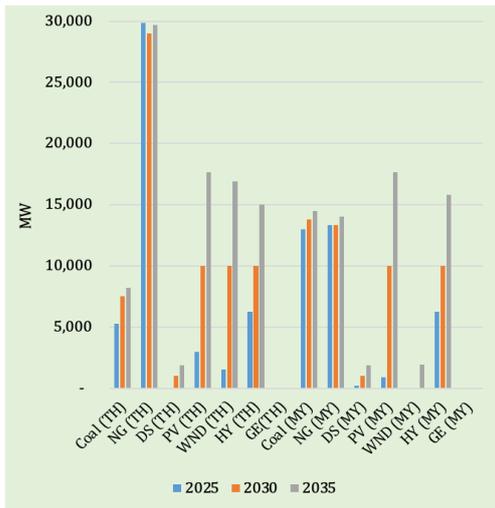


Fig. 21. Installed Capacity

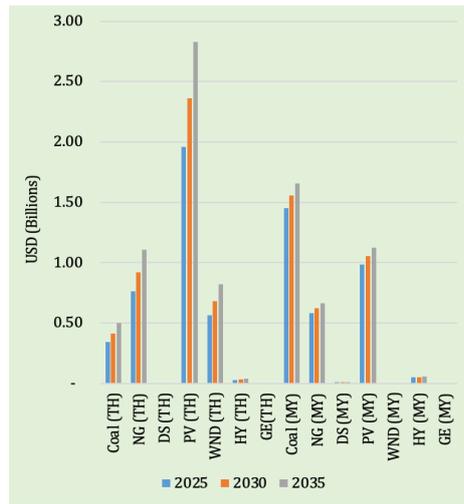


Fig. 22. Employment Benefits

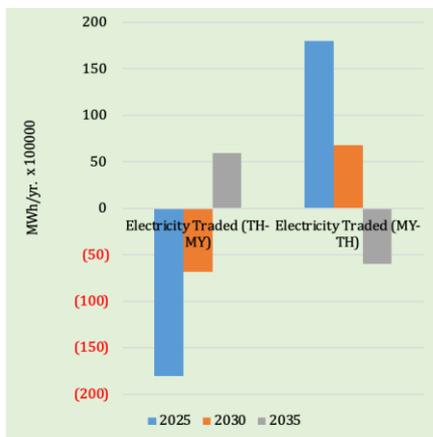


Fig. 19: Electricity Trade (TH-MY)

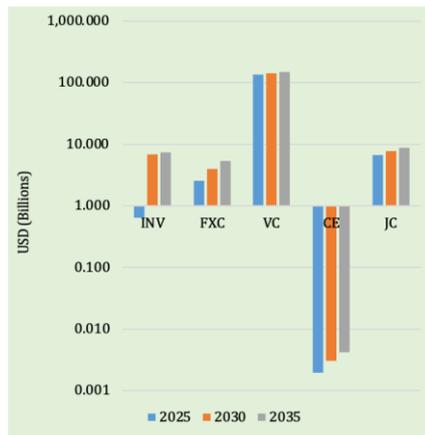


Fig. 20: Cost Implications (TH-MY)

図6 分析結果例 (タイ、マレーシア間の電力貿易の経済影響分析)

Year	Component	RM/W	\$/W in 2018
2016 (Malaysia)	Solar PV	2.56	0.60
	Inverter	0.62	0.14
	M. Structure	1.18	0.28
	BoS	2.29	0.54
2014 (Malaysia)	Solar PV	3.00	0.79
	Inverter	0.80	0.21
	M. Structure	1.50	0.4
	BoS	2.60	0.70
2011 (Malaysia)	Solar PV	4.84	1.87
	Inverter	1.03	0.40
	M. Structure	2.12	0.82
	BoS	2.61	1.02

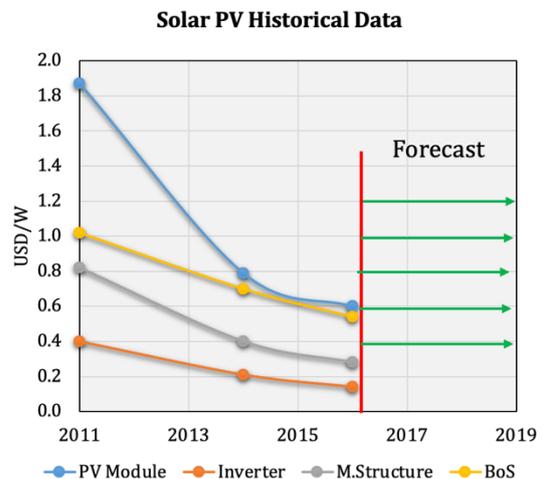


図7 マレーシアの太陽電池製造費用の分析結果例

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 4件／うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Yugo Tanaka, Andrew Chapman, Tetsuo Tezuka, Shigeki Sakurai	4. 巻 70
2. 論文標題 Putting the process into the policy mix: Simulating policy design for energy and electricity transitions in Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Energy Research & Social Science	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) 10.1016/j.erss.2020.101702	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 該当する
1. 著者名 後藤良介, 手塚哲央	4. 巻 -
2. 論文標題 既設発電設備更新制約を考慮した再生可能エネルギー大量導入時の電源構成に関する研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 エネルギー資源学会論文誌	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 Yugo Tanaka, Shigeki Sakurai, Benjamin C. McLellan, Tetsuo Tezuka	4. 巻 -
2. 論文標題 Multiple Streams and Power Sector Policy Change: Evidence from the Feed-in Tariff Policy Process in Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Politics & Policy	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) 10.1111/polp.12357	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 該当する
1. 著者名 Briandhika Utama, Tetsuo Tezuka	4. 巻 -
2. 論文標題 Japan-Indonesia cooperation policies to enhance the renewable energy penetration into energy market	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of 7th International Conference on Sustainable Energy and Environment (SEE 2018)	6. 最初と最後の頁 267, 271
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 該当する

1. 著者名 Widha Kusumaningdyah, Tetsuo Tezuka and Benjamin C. McLellan	4. 巻 14
2. 論文標題 Investigating Preconditions for Sustainable Renewable Energy Product; Service Systems in Retail Electricity Markets	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Energies	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) 10.3390/en14071877	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 該当する

[学会発表] 計3件(うち招待講演 1件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Yilun Luo
2. 発表標題 A HYBRID SYSTEM DYNAMICS MODEL OF POWER ADEQUACY AND DECARBONIZATION IN AN ELECTRICITY MARKET
3. 学会等名 International Association of Energy Economics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 手塚哲央
2. 発表標題 Systems Analysis of Renewable Energy Use in ASEAN Region
3. 学会等名 Renewable Development Strategy for ASEAN 2040 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tetsuo Tezuka, LOI Liang Yu
2. 発表標題 SIMULATION-BASED FRAMEWORK DESIGN FOR SUPPLY AND DEMAND OF RENEWABLE ENERGY WITH ZERO-MARGINAL COST
3. 学会等名 Grand Renewable Energy 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究 分担者	尾形 清一  (OGATA SEIICHI)  (60622991)	京都大学・エネルギー科学研究科・准教授   (14301)	
研究 分担者	マクレラン ベンジャミン  (McLellan Benjamin)  (10723455)	京都大学・エネルギー科学研究科・教授   (14301)	

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1件

国際研究集会 Future Zero Carbon Energy Systems and their Implications	開催年 2023年～2023年
--	--------------------

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
---------	---------