

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月1日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18355

研究課題名(和文)革新的エクセルギー回収およびプロセス統合による藻類を利用する高効率エネルギー生産

研究課題名(英文) Highly-efficient energy production from algae based on exergy recovery and process integration

研究代表者

アズィズ ムハンマッド (Aziz, Muhammad)

東京工業大学・科学技術創成研究院・特任准教授

研究者番号：40611190

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、エクセルギー回収およびプロセス統合の二つの技術を同時に検討し、独創的な藻類によるエネルギー変換プロセスを提案する。対象となるシステムは発電および水素製造の両方となり、主に乾燥・ガス化・ケミカルルーピング・コンバインドサイクルで構成される。エクセルギー回収およびプロセス統合を同時に応用することで、システム全体のエクセルギー損失を最小化することができた。そのため、高いエネルギー効率(約64%)を持つ藻類によるエネルギー収集システムを構築することができた。上記の行った研究から、研究成果として学术论文6件、国際学会8件、本章1件が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

藻類は光合成変換効率が非常に高く、バイオマス資源として活用することは重要である。国土の小さい日本は、バイオマスを生産するためには、海洋域等を有効に活用することが必要である。しかし、藻類を燃料として利用するに際し、エネルギー変換の過程には様々な課題があり、藻類を利用したエネルギー生産の実現の見通しは立っていない。大きな課題の一つとして、藻類の含水率が高いことが挙げられる。本研究では、上記の課題を強く意識し、藻類由来のエネルギー生産に特化した革新的なエネルギー変換システムを提案した。非常に高い全エネルギー効率のシステムを構築することで、藻類によるエネルギー生産の実現性を高くできた。

研究成果の概要(英文)：In this study, an innovative energy production from algae is proposed by adopting simultaneously both exergy recovery and process integration technologies. The proposed system includes both power and hydrogen generation, and consists of continuous processes of drying, gasification, chemical looping, and combined cycle. The adoption of both exergy recovery and process integration to the integrated system was able to reduce significantly the exergy loss. As the results, energy production system using algae with very high energy efficiency (about 64%) can be realized. From the conducted study, 6 academic journals, 8 international conferences, and 1 book chapter have been produced.

研究分野：エネルギープロセス統合工学

キーワード：エネルギー高効率化 藻類 エクセルギー回収 プロセス統合 エネルギー生産

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、光合成によって二酸化炭素を固定しながら成長する植物を用いて、カーボンニュートラルなバイオマス資源としてエネルギーを生産することが推し進められている。特に光合成変換効率の高い藻類を、バイオマス資源として活用することは重要であり、日本のような国土の小さい国でバイオマスを生産するためには、海洋域(日本の排他的経済水域面積は世界第6位)等を有効に活用することが必要となる。

しかし、藻類をバイオ燃料として利用するに際し、藻類の生産から生産プロセスにおけるエネルギー変換の過程には様々な課題があり、藻類を利用したエネルギー生産の実現の見通しは立っていない。大きな課題の一つとして、藻類の含水率が高いことが挙げられる。藻類は他のバイオマス(木質系や農作物系など)とは異なり、生産(収穫)時には湿量基準で80%程度の水分が含まれている。そのため、乾燥・保管・輸送・変換等に困難が生じている。また、現在のエネルギー生産プロセスではほとんど従来型の熱回収技術によって設計されたため、高効率なエネルギー変換プロセスが存在していない。

### 2. 研究の目的

光合成変換効率の高い藻類を用いたエネルギー生産は、含水率が高いことから、生産プロセスにおけるエネルギー変換効率の低下・安定性の維持・保存の困難・輸送費の増大を引き起こす。その結果、エネルギー生産におけるプロセス全体のエネルギー収支比が小さくなり、生産コストが上昇する。これらの解決には、藻類由来のエネルギー生産に特化したエネルギー収支比を高めるための革新的なエネルギー変換技術が必要となる。本研究では、エクセルギー回収技術およびプロセス統合技術を藻類に適用し、独創的なエネルギー生産プロセスを提案する。これにより全プロセスにおけるエネルギー損失を最小化し、高効率な藻類由来のエネルギー生産を実現する。

### 3. 研究の方法

本研究では、エクセルギー回収およびプロセス統合の2つの技術を同時に検討し、藻類に特化した独創的なエネルギー変換プロセスを提案する。図1はエクセルギー回収、およびプロセス統合の概念図を示す。エクセルギーはエネルギーと違い、熱力学第2法則を基に系の状態だけでなく周囲の状態も考慮する有効エネルギーである。エクセルギー回収では、ある特定のプロセス内のエネルギーや熱を効率的に循環させ、エクセルギー損失を最小化する。例えばプロセス流体をコンプレッサ等で加圧して流体の状態(沸点等)を変化させ、エクセルギー率を上昇させる。これを熱交換器に適用することで、流体間の加熱や冷却が可能となる(図1(a))。

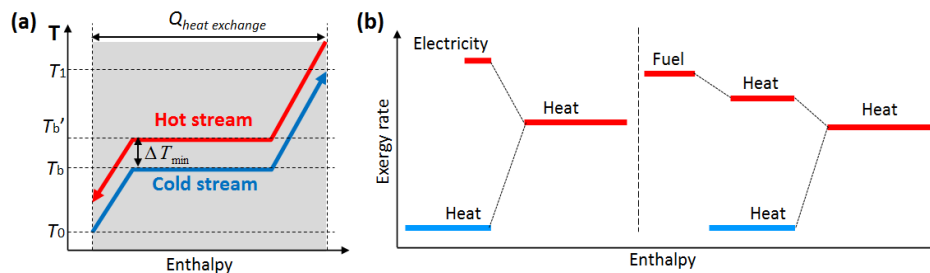


図1 エクセルギー回収・プロセス統合の概念図

提案するプロセスは、主に乾燥・ガス化・コンバインドサイクルで構成される。1つのプロセスですべての熱を完全に循環できないため、回収しきれない熱は他のプロセスに利用し、プロセス全体のエネルギー損失を最小化する(プロセス統合)。従来の熱回収技術では、熱交換には温度差が必要なため、主に顕熱のみが回収されており、潜熱等の回収・利用はほとんど行われていない。結果として、熱回収が充分されているとは言えず、エクセルギー回収およびプロセス統合により全体のエネルギー効率はまだ向上の余地がある(図1(b))。

藻類の変換工程には複数のプロセスが含まれる。単独のプロセス内の熱循環だけではなく、プロセス間のエネルギー回収も重要となる。エクセルギー回収およびプロセス統合技術を同時に適用し、藻類に特化したエネルギー生産プロセスの設計と評価を行う点に、本研究の特徴がある。

本研究における藻類を用いたエネルギー生産の生産プロセス概念図を図2に示す。乾燥プロセスでは、藻類の含水率が高いため、申請者のこれまでの研究成果で構築した過熱水蒸気乾燥方法を適用する。また、プロセス流体のエネルギーと熱を循環させるため、断熱圧縮を行って流体の状態を変化させる。この圧縮操作に伴い流体の温度が上がり、熱の質が再生される。圧縮前後の流体の温度を比較すると、熱交換を行うために必要な温度差が生じる。このため、熱交換器内で熱交換が可能となる。

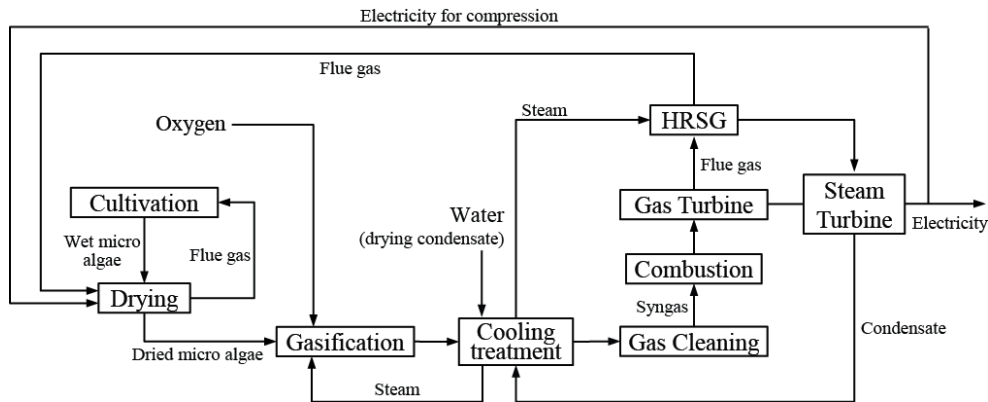


図2 全体の藻類によるエネルギー生産プロセスの概念図（熱化学的ガス化）

藻類のガス化では、超臨界水ガス化技術と従来型の熱化学的ガス化技術がある。本研究では、それらのガス化技術を比較しながら、全体のプロセス設計を行う。熱化学的ガス化では藻類の乾燥が義務になるが、超臨界水ガス化では藻類を高含水率のまま投入できるため、乾燥プロセスを省略できる。但し、藻類および水を超臨界状態にするためには圧縮および加熱が必要となり、エネルギー消費の増大が予測される。エクセルギー回収を実現するために、各ガス化技術の新たなプロセス設計や熱交換に関連した特性の解明が必要となる。そのため、シミュレーションだけでなく、熱交換関連（特に超臨界水ガス化炉内での熱交換）の基礎実験の実施も予定している。

発電側であるコンバインドサイクルでは生成された合成ガスを燃焼させ、ガスタービンおよびスチームタービンを利用して発電を行う。従来のコンバインドサイクルと違い、サイクル内の熱交換のみではなく、乾燥およびガス化プロセスと熱交換を行うことで、乾燥を含めた全体の正味エネルギー効率（送電端効率）を45%以上とすることを目標とする。

#### 4. 研究成果

平成28年度では、主に藻類による発電システムの基礎プロセスの設計・評価を行った。藻類による発電システムの基本的なプロセスを構築し、最適な計算を行った。また、各運転パラメータによるエネルギー効率も評価し、最適な運転条件を取り出した。平成29年度では、平成28年度のモデルおよび結果を踏まえ、全体のシステムの最適化・要素技術の抽出を行った。また、全体の効率を上げるために、発電利用だけでなく、水素製造とのコプロダクションシステムを構築した。含まれるプロセスは主に藻類乾燥、ガス化、ケミカルルーピング、アンモニア合成（水素貯蔵）である。製造した水素をアンモニアとして貯蔵する。提案したプロセスによる最高エネルギー効率は約64%である。平成30年度では平成28～29年度から得られた結果を踏まえ、全体のプロセスの統合化および最適化を行った。各モジュールでの再設計・最適化を行った。水素貯蔵方法として、主にアンモニアを選定した。また、将来的に本提案プロセスを実証する時に解決が必要となる課題を整理した。そのうえ、統合化した全プロセスに対して再度エネルギーとエクセルギーの解析と評価を行い、全プロセスにおける最終エネルギー・エクセルギー効率も求めた。

上記の行った研究から、全研究期間では、研究成果として学術論文6件、国際学会8件、本章1件が得られた。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

1. Agung Tri Wijayanta, Takuya Oda, Chandra Wahyu Purnomo, Takao Kashiwagi, Muhammad Aziz. Liquid hydrogen, methylcyclohexane, and ammonia as potential hydrogen storage: Comparison review. International Journal of Hydrogen Energy, in press. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.04.112 (査読有)
2. Agung Tri Wijayanta, Muhammad Aziz. Ammonia production from algae via integrated hydrothermal gasification, chemical looping, N<sub>2</sub> production, and NH<sub>3</sub> synthesis. Energy, 174, 331-338, 2019 (May). DOI: 10.1016/j.energy.2019.02.190 (査読有)
3. Anissa Nurdiawati, Ilman Nuran Zaini, Mohamad Amin, Muhammad Aziz. Microalgae-based coproduction of ammonia and power employing chemical looping process. Chemical Engineering Research and Design, 146, 311-323, 2019 (Jun). DOI:

- 10.1016/j.cherd.2019.04.013 ( 査読有 )
4. Muhammad Aziz, Aditya Putranto, Muhammad Kunta Biddinika, Agung Tri Wijayanta. Energy-saving combination of N<sub>2</sub> production, NH<sub>3</sub> synthesis and power generation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 27174-27183, 2017 (Nov). DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.09.079 ( 査読有 )
  5. Ilman Nuran Zaini, Annisa Nurdiawati, Muhammad Aziz. Cogeneration of power and H<sub>2</sub> by steam gasification and syngas chemical looping. *Applied Energy*, 207, 134-145, 2017 (Dec). DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.06.071 ( 査読有 )
  6. Muhammad Aziz. Power generation from algae employing enhanced process integration technology. *Chemical Engineering Research and Design*, 109, 297-306, 2016 (May). DOI: 10.1016/j.cherd.2016.02.002 ( 査読有 )

[学会発表](計 8 件)

1. Muhammad Aziz. Modelling of efficiently-integrated algal gasification, nitrogen production, ammonia synthesis, and power generation. 2nd International Conference on Energy and Power (ICEP2018), Dec 13-15, 2018, Sydney, Australia. Published in: *Energy Procedia*, 160, 627-632, 2019 (Feb). DOI: 10.1016/j.egypro.2019.02.222
2. Firman B. Juangsa, Lukman A. Prananto, Takuya Oda, Muhammad Aziz. Highly energy-efficient combination of dehydrogenation of methylcyclohexane and hydrogen-based power generation. 21st Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction (PRES '18), August 25-29, 2018, Prague, Czech. DOI: 10.3303/CET1870349
3. Muhammad Aziz, Firman B. Juangsa, Farid Triawan, Asep B.D. Nandiyanto, Ade G. Abdullah. Integrated nitrogen production and conversion of hydrogen to ammonia. 21st Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction (PRES '18), August 25-29, 2018, Prague, Czech. DOI: 10.3303/CET1870096
4. Muhammad Aziz. Combined supercritical water gasification of algae and hydrogenation for hydrogen production and storage. International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability Spring Meeting 2017 (TMREES17), April 21-24, 2017, Beirut, Lebanon. Published in: *Energy Procedia*, 119, 530-535, 2017 (Jul). DOI: 10.1016/j.egypro.2017.07.069.
5. Muhammad Aziz. Combined nitrogen production, ammonia synthesis, and power generation for efficient hydrogen storage (ammonia). World Engineers Summit - Applied Energy Symposium and Forum 2017: Low carbon cities and urban energy systems (WES-CUE 2017), July 18-21, 2017, Singapore. Published in: *Energy Procedia*, 143, 674-679, 2017 (Dec). DOI: 10.1016/j.egypro.2017.12.745.
6. Muhammad Aziz, Ilman Nuran Zaini. Production of hydrogen from algae: Integrated gasification and chemical looping. 9th International Conference on Applied Energy, ICAE 2017. ID#212, August 21-24, 2017, Cardiff, UK. Published in: *Energy Procedia*, 142, 210-215, 2017 (Dec). DOI: 10.1016/j.egypro.2017.12.034
7. Lukman Adi Prananto, Muhammad Kunta Biddinika, Muhammad Aziz. Combined dehydrogenation and hydrogen-based power generation. 9th International Conference on Applied Energy, ICAE 2017. ID#647, August 21-24, 2017, Cardiff, UK. Published in: *Energy Procedia*, 142, 1603-1608, 2017. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.12.537
8. Muhammad Aziz, Ilman Nuran Zaini. Energy-efficient conversion of microalgae to hydrogen and power. The 8th International Conference on Applied Energy - ICAE 2016. 392, October 8-11, 2016, Beijing, China. Published in: *Energy Procedia*, 105, 453-458, 2017 (May). DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.340.

[図書](計 1 件)

1. Muhammad Aziz, Ilman Nuran Zaini. Algae to hydrogen: Novel energy-efficient co-production of hydrogen and power. In: *Advances in Hydrogen Production and Storage*, Vol. 1: Hydrogen Production Technologies (Editors: Mehmet Sankir, Nurdan Demirci Sankir), Wiley-Scrivener Publishing LLC, pp. 459-486, 2017, DOI: 10.1002/9781119283676.ch12, ISBN: 9781119283645.

〔産業財産権〕  
出願状況（計 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況（計 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：  
ローマ字氏名：  
所属研究機関名：  
部局名：  
職名：  
研究者番号（8桁）：

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：小田拓也  
ローマ字氏名：ODA Takuya

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、研究者個人に帰属されます。