

令和 2 年 6 月 30 日現在

機関番号：11401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00658

研究課題名（和文）低炭素とレジリエンスを両立する持続可能なCO₂フリー水素供給システムの設計研究課題名（英文）Design of CO₂ free hydrogen supply system achieving both low carbon and resilience

研究代表者

古林 敬顕（Furubayashi, Takaaki）

秋田大学・理工学研究科・講師

研究者番号：40551528

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：日本の脱炭素社会に向けて、再生可能エネルギー由来のCO₂フリー水素のポテンシャル及びCO₂削減効果を評価するとともに、水素エネルギーを利用した地域エネルギーシステムを設計した。東北地方の対象地域をケーススタディとして、太陽光や風力の利用可能量からCO₂フリー水素の賦存量分布を推計して、地域の水素供給システムを設計した。得られた結果を基に、CO₂フリー水素を電力、熱、輸送用燃料として利用した場合のCO₂削減効果、エネルギー効率及びコストをそれぞれ定量評価した。地域のエネルギー需要を地域の再生可能エネルギー及びCO₂フリー水素で供給する、脱炭素化とレジリエンスを両立したシステムを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

国内の水素に関する研究の多くは、燃料電池や貯蔵に関する技術的課題の解決を至上命題としており、水素の製造、輸送、貯蔵、利用まで考慮したシステム研究の事例はほとんどない。そのため、本研究の学術的意義や社会的意義として、CO₂フリー水素の賦存量分布を示し、各地域の地域特性を考慮した利用可能量を示したこと、製造だけでなく輸送を考慮した水素供給システムの設計手法を構築したこと、電力、熱、輸送用燃料を対象として、CO₂フリー水素を利用する価値を定量評価したこと、低炭素化とレジリエンスを両立する持続可能な地域エネルギーシステムを設計したことが挙げられる。

研究成果の概要（英文）：This study aims to design a regional energy system considering CO₂ free hydrogen. The target area is regional municipals in Tohoku region. First of all, the renewable energy potential such as solar PV and wind power was analyzed using geographical information system. The CO₂ free potential was estimated from renewable energy potentials and electricity demand in target area. The energy efficiency, CO₂ reduction, and cost to utilize hydrogen into electricity generation, heat production, or transportation fuel are analyzed. Finally, the regional energy system, which renewable energy in target area and CO₂ free hydrogen meet energy demand, was designed.

研究分野：エネルギーシステム

キーワード：水素 エネルギーシステム 再生可能エネルギー 脱炭素社会 サプライチェーン

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2012年の固定価格買取制度の導入以降、太陽光発電をはじめとする再生可能エネルギーが急速に普及したが、太陽光発電や風力発電等の出力変動電源の系統連系可能量は、その賦存量と比較して少なく、現在の電力系統のみでは再生可能エネルギーのポテンシャルを十分に利用することができない。ドイツのEnergiepark Mainzにて2MWの電解装置を用いた大規模な実証研究が行われる等、海外では再生可能エネルギーの導入促進に向けて、系統連系だけでなく、Power to GasやPower to Heatの研究が盛んに行われている。一方、国内の再生可能エネルギーの導入促進に向けて、蓄電池やデマンドレスポンスによる負荷平準化等、系統連系可能量の増加に向けた研究が行われているが、余剰電力を用いた水素製造の研究事例は少なく、実証試験の規模も小さい。そのため、エネルギー需要の3形態である電力、熱、輸送用燃料の中で、電力の低炭素化のみが先行して、熱や輸送用燃料の低炭素化は需要家の電化や省エネに依存しているのが現状である。電化以外の低炭素に資する技術として、燃料電池自動車や家庭用燃料電池が一般向けに販売されているにもかかわらず、水素を製造、輸送、エネルギー利用するシステム全体のCO₂削減効果やエネルギー効率、コストを定量評価した国内の研究事例が少ない。申請者の古林は、学生らとともに国内の現状の水素フローを作成して、国内で利用されている水素は製油所や鉄鋼業等の産業部門で製造された副生水素であり、化石燃料を原料としていることを明らかにした。そのため、CO₂フリー水素の導入効果を明らかにするためには、水素製造、輸送、利用を考慮した水素供給システムの設計、他の資源や技術を用いたシステムとの比較、地域を対象としたエネルギーシステムの最適設計が必要となるので、機器効率に着目する従来の研究とはまったく異なる研究アプローチが必須である。

2. 研究の目的

本研究は、日本の脱炭素社会に向けて、再生可能エネルギー由来のCO₂フリー水素のポテンシャル及びCO₂削減効果を評価するとともに、水素エネルギーを利用した地域エネルギーシステムの設計を目的とする。具体的には、太陽光や風力の利用可能量からCO₂フリー水素の賦存量分布を推計して、需要地に供給する水素供給システムの設計手法を構築する。得られた結果を基に、東北地方の対象地域をケーススタディとして、CO₂フリー水素を電力、熱、輸送用燃料として利用した場合のCO₂削減効果、エネルギー効率及びコストをそれぞれ定量評価する。さらに、水素供給システムを地域エネルギーシステムの最適設計に組み合わせることで、脱炭素化とレジリエンスを両立した社会システムの構築に資する。

3. 研究の方法

第一に、CO₂フリー水素のポテンシャルマップを作成し、水素供給システムの設計手法を構築する。次に、構築した手法を対象地域に適用して、水素供給コスト及びCO₂排出量を示す。得られた結果を基に、インベントリ分析によってCO₂フリー水素の利用に伴うCO₂削減効果やレジリエンスの向上等の価値を示す。さらに、水素供給システムと従来のエネルギーシステムの設計手法を組み合わせ、低炭素化とレジリエンスを両立する持続可能な地域エネルギーシステムの設計手法を構築する。

(1) CO₂フリー水素のポテンシャルマップに基づく水素供給システムの設計

はじめに全国のCO₂フリー水素のポテンシャルマップを作成する。公開されている日照量及び風況のデータを基に、土地利用条件、系統連系可能量、水電解装置の規模と効率等を考慮して、地理情報システムと組み合わせることで、ポテンシャルマップとして図示する。

水素の製造、貯蔵、輸送を考慮した、CO₂フリー水素供給システムの設計手法を構築する。研究実績があるバイオマス活用システムの設計手法(古林, 日本機械学会論文集, 2015)を応用した混合整数計画法を用いて、施設配置問題を考慮した数理モデルを開発する。空間情報分析とインベントリ分析を組み合わせ、CO₂フリー水素のCO₂排出量及び供給コストを示す。

(2) CO₂フリー水素の利用が低炭素化及びレジリエンスに及ぼす影響の定量評価

CO₂フリー水素を電力、熱、輸送用燃料の燃料として利用することを想定して、既存のシステムに対するCO₂削減量及びコストを示す。また、対象地域のエネルギー需要の時間分布と、再生可能エネルギーの時間変化を考慮して、水素製造によるエネルギー貯蔵が地域のエネルギー自給率に与える影響を評価する。

(3) 持続可能な地域エネルギーシステムの設計

構築した水素供給システムの設計と、従来のエネルギーシステムの設計手法を組み合わせ、CO₂フリー水素を考慮した地域エネルギーシステムの設計手法を構築する。電力、熱、輸送用燃料のすべての需要を対象として、低炭素とレジリエンスを両立する地域エネルギーシステムを設計する。CO₂フリー水素の需要量及び利用形態を明らかにして、CO₂フリー水素の導入が地域に与える影響を定量的に示す。

4. 研究成果

(1) CO₂フリー水素のポテンシャルマップに基づく水素供給システムの設計

再生可能エネルギーのポテンシャルマップから、北海道及び東北地方では風力発電、九州地方では太陽光発電の利用可能量が大きいことがわかった。再生可能エネルギーによる発電量と、対象地域の電力需要の差を余剰電力と定義して、東北地方を対象とした場合、再生可能エネルギー

の利用可能量は電力需要を大きく上回り、余剰電力は 154.1 TWh/year となった。しかし、再生可能エネルギーの出力変動の影響で、年間 2000 時間程度は再生可能エネルギーが需要に対して不足することがわかった。この不足分を蓄電池で賄う場合、余剰電力は 148.4 TWh/year となり、CO₂ フリー水素のポテンシャルは 432 PJ/year (40.1 billion Nm³/year) となった。

(2) CO₂ フリー水素の利用が低炭素化及びレジリエンスに及ぼす影響の定量評価

化石燃料を含む多様なエネルギー源から水素を製造することを想定して、CO₂ 排出量及びコストを解析した。その結果、再生可能エネルギー由来の電力を用いた水電解による水素の CO₂ 排出量は、ガソリンや都市ガスなどの化石燃料に比べて極めて少ないが、火力発電由来の電力を用いた水電解の場合、化石燃料に比べて CO₂ 排出量が多いことが明らかとなった。また、現在は再生可能エネルギーのコストが割高であるため、再生可能エネルギー由来の水素のコストも割高であるが、欧州で風力発電が化石燃料と価格競争力を持ったことなどから、将来の水素製造コストは、現状の水素価格に比べて安価になると予想される。

(3) 持続可能な地域エネルギーシステムの設計

東北地方の中でも、特に風力発電の利用可能量が大きい秋田県を対象として、地域エネルギーシステムを設計した。エネルギーフロー分析によって、産業、業務、家庭、運輸の各需要部門における電力、熱、輸送用燃料の需要量を推計した。また、(1)と同様に、対象地域における風力発電の発電量と、電力需要とを比較して、余剰電力量を得た。再生可能エネルギーが不足する場合は、余剰電力を蓄電池に貯蔵して賄い、蓄電池の容量は、不足分を供給可能な下限値とした。水電解装置の設備容量を変化させて、水素製造量及び県外への電力供給量、水素製造コストを解析した。また、蓄電池に貯蔵された電力を、需要家のみ供給するケースと、水素製造にも利用するケースを設定した。

図 1 に示す対象地域の電力負荷曲線から、1 時間あたりの余剰電力は最大 12 GW となり、既存の送電網の供給能力を上回る可能性があることが示された。また、年間 1800 時間程度は再生可能エネルギーが不足するため、48.4 GWh の蓄電池が必要となった。蓄電池を水電解にも利用することで、水電解装置の規模が小さいほど、設備利用率は向上することが示された(図 2)。一方、水素供給コストは、蓄電池の電力を利用することで、割高となることがわかった(図 3)。そのため、持続可能な脱炭素社会に向けた水素の利用促進には、水電解装置や燃料電池の高効率化及び低コスト化だけでなく、蓄電池の低コスト化も重要であることが明らかとなった。

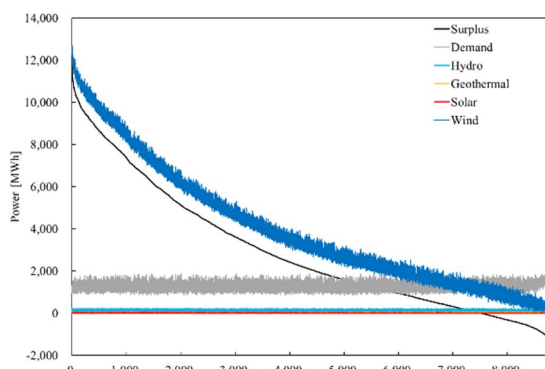


図 1 電力深曲線

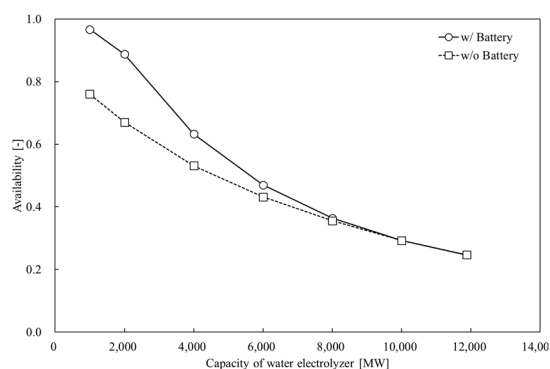


図 2 水電解装置の設備利用率

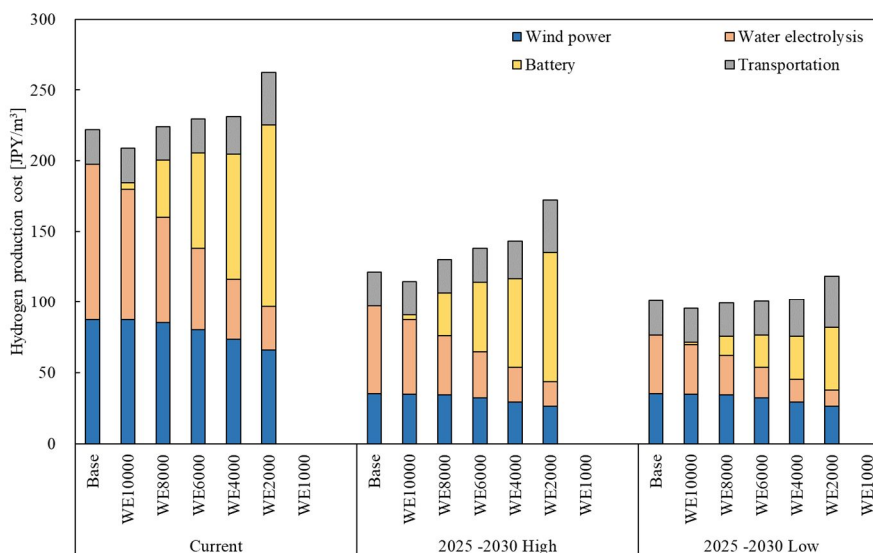


図 3 水素供給コスト

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 UCHIDA Teruhisa、FURUBAYASHI Takaaki、NAKATA Toshihiko	4. 巻 85
2. 論文標題 Well-to-wheel analysis and a feasibility study of fuel cell vehicles in the passenger transportation sector	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.18-00122	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 Sato, Fernando Enzo Kenta Furubayashi, Takaaki Nakata, Toshihiko	4. 巻 9
2. 論文標題 Energy and CO2 Benefit Assessment of Reused Vehicle Parts through a Material Flow Approach	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Automotive Engineering	6. 最初と最後の頁 91-98
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20485/jsaeijae.9.2_91	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 Fujii Shin、Furubayashi Takaaki、Nakata Toshihiko	4. 巻 12
2. 論文標題 Design and Analysis of District Heating Systems Utilizing Excess Heat in Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 1202 ~ 1202
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/en12071202	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 Furubayashi Takaaki、Nakata Toshihiko	4. 巻 174
2. 論文標題 Cost and CO ₂ reduction of biomass co-firing using waste wood biomass in Tohoku region, Japan	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Cleaner Production	6. 最初と最後の頁 1044 ~ 1053
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jclepro.2017.11.041	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 古林敬顕, 佐藤雄治, 中田俊彦, 河西英一	4. 巻 84
2. 論文標題 施設配置問題を考慮した持続可能な木質バイオマスサプライチェーンの設計	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-17
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 Takafumi Usui, Takaaki Furubayashi, and Toshihiko Nakata	4. 巻 19
2. 論文標題 Induced technological change and the timing of public R&D investment in the Japanese electricity sector considering a two-factor learning curve	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Clean Technologies and Environmental Policy	6. 最初と最後の頁 1347-1360
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10098-017-1333-1	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 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 古林敬顕、中田俊彦
2. 発表標題 熱導管ネットワークの拡張を考慮した地域熱供給システムの性能解析
3. 学会等名 第35回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 角田友明、古林敬顕、中田俊彦
2. 発表標題 地域資源・エネルギー需給の分析に基づく脱炭素社会に向けたエネルギーシステムの最適設計
3. 学会等名 第35回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村形夏生、古林敬顕、中田俊彦
2. 発表標題 交通手段選択の分析に基づく、持続可能な社会に向けた地域内旅客運輸システムのエネルギー消費の構造分析
3. 学会等名 第35回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋遼、古林敬顕、中田俊彦
2. 発表標題 部分均衡エネルギー・経済モデルによる2050年脱炭素社会に向けた持続可能エネルギーシステムの統合デザイン
3. 学会等名 第35回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長野尚也、古林敬顕、中田俊彦
2. 発表標題 セクターカップリングを考慮した脱炭素型地域エネルギーシステムの設計
3. 学会等名 第35回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takaaki Furubayashi, Toshihiko Nakata
2. 発表標題 11.Design of the regional energy system in Japan for zero carbon and high resilience
3. 学会等名 Sustainable Development of Energy, Water and Environmental System conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 古林敬顕, 中田俊彦
2. 発表標題 導管熱密度を考慮した地域熱供給システムの設計
3. 学会等名 第34回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 清野若菜, 古林敬顕, 中田俊彦
2. 発表標題 地域エネルギー需給の空間情報分析と福島県のエネルギーシステム設計への応用
3. 学会等名 日本機械学会東北支部大会第53期総会・講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takaaki Furubayashi, Toshihiko Nakata
2. 発表標題 Design of district heating system based on linear heat density in Japan
3. 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability (国際学会)
4. 発表年 2017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	中田 俊彦	東北大学・工学研究科・教授	
	(Nakata Toshihiko)		
	(20260416)	(11301)	