

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

2-1804 2050年の社会像を見据えた再生可能エネルギー利用拡大への道筋
(JPMEER20182004)

平成30年度～令和2年度

Scenarios for Expanding Renewable Energy Use Considering Visions of Society in 2050

〈研究代表機関〉
横浜国立大学

〈研究分担機関〉
国立研究開発法人産業技術総合研究所

○図表番号の付番方法について

「Ⅰ. 成果の概要」の図表番号は「0. 通し番号」としております。なお、「Ⅱ. 成果の詳細」にて使用した図表を転用する場合には、転用元と同じ番号を付番しております。

「Ⅱ. 成果の詳細」の図表番号は「サブテーマ番号. 通し番号」としております。なお、異なるサブテーマから図表を転用する場合は、転用元と同じ図表番号としております。

令和3年7月

目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究目標	
4. 研究開発内容	
5. 研究成果	
5-1. 成果の概要	
5-2. 環境政策等への貢献	
5-3. 研究目標の達成状況	
6. 研究成果の発表状況	
6-1. 査読付き論文	
6-2. 知的財産権	
6-3. その他発表件数	
7. 国際共同研究等の状況	
8. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	18
II-1 費用対効果の高い再エネ技術導入の分析と道筋の検討 （横浜国立大学）	
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
II-2 合理的な将来エネルギーインフラ構築の分析 （国立研究開発法人産業技術総合研究所）	
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
III. 研究成果の発表状況の詳細	49
IV. 英文Abstract	52

I. 成果の概要

課題名 2-1804 2050年の社会像を見据えた再生可能エネルギー利用拡大への道筋

課題代表者名 本藤 祐樹 (横浜国立大学大学院環境情報研究院 教授)

重点課題 主：【重点課題⑤】低炭素で気候変動に柔軟に対応する持続可能なシナリオづくり

副：【重点課題⑥】気候変動の緩和策に係わる研究・技術開発

行政要請研究テーマ（行政ニーズ） 非該当

研究実施期間 平成30年度～令和2年度

但し、新型コロナウイルスの影響のため、令和3年5月まで延長

研究経費

(千円)

	契約額	実績額 (前事業年度繰越分支出額含む)
平成30年度	21,933	21,933
令和元年度	24,242	23,548
令和2年度	24,242	22,792
令和3年度	0	1,869
合計額	70,417	70,142

本研究のキーワード 脱炭素社会、地域経済、シナリオ、産業連関表、エネルギーモデル、再生可能エネルギー、熱利用、雇用

研究体制

(サブテーマ1) 費用対効果の高い再エネ技術導入の分析と道筋の検討 (横浜国立大学)

(サブテーマ2) 合理的な将来エネルギーインフラ構築の分析 (国立研究開発法人産業技術総合研究所)

研究協力機関はない。

1. はじめに (研究背景等)

我が国では、温室効果ガスの排出量に関して2030年度には2013年度比で26%削減、2050年度には80%削減という中長期目標を掲げている(研究開始当時)。これらの目標を達成し、低炭素社会を現実のものとするためには、再生可能エネルギー(以下、再エネ)の大幅な利用拡大が必要不可欠である。再エネ技術の導入初期においては「導入量の拡大」に重きをおいた全国一律の政策が講じられてきたが、今後は、再エネ利用によってもたらされる「効果」を根拠としたきめ細やかな普及政策へと転換することが求められる。

中長期的な再エネの大幅な利用拡大を検討する際には、第一に、幅広い再エネ利用の可能性を考慮することが肝要である。太陽光発電や風力発電など電力に関心が集まっているが、木質バイオ熱や太陽熱など直接熱利用の可能性についても考慮することが求められる。また、将来的なオプションとして波力発電や海洋温度差発電など海洋再エネ技術の導入可能性も検討する必要がある。第二に、各再エネ技術がもたらす効果(例えばCO₂削減効果や雇用創出効果)の違いを考慮することが肝要である。それらの違いを考慮して、費用対効果の高い再エネ技術を推進していくことが重要である。

しかしながら、これまでも長期的な温室効果ガス削減に向けたシナリオ分析は行われてきたが、地域という文脈で再エネの普及に焦点をあてた詳細な分析は十分とは言えない。それに故に、今後の低炭素政策の立案には、上述した点を考慮して、中長期の再エネ普及に関する詳細な分析が不可欠である。

2. 研究開発目的

本研究では、フォアキャストとバックキャストの両アプローチを採用し、2050年の再エネ大量普及社会の構築に向けた潜在的な道筋を明らかにする。

中期的な道筋は、既存エネルギーインフラを前提に、再エネ技術の費用対効果の高い導入方策についてフォアキャストで検討する。再生可能エネルギー部門拡張産業連関表（REFIO）を用いて、再エネを利用した発電技術と熱生産技術の導入によるCO₂削減効果や雇用創出などの推計結果に基づき、費用対効果の高い再エネ導入シナリオについて検討する。

長期的な道筋は、個別技術の導入を支えるインフラに着眼し、CO₂大幅削減を可能とするエネルギーシステムの姿をエネルギーモデルにより描出し、再エネ導入とインフラ整備の方向性をバックキャストで検討する。海洋再エネや水素などの将来技術もオプションに入れ、再エネの適地偏在性を考慮して、将来のエネルギーシステムの姿について検討する。

3. 研究目標

全体目標	再生可能エネルギー（以下、再エネ）技術の導入がもたらすコベネフィットも考慮して、中長期にわたる各技術の最適な導入のあり方を明らかにし（下記のサブテーマ1と2における具体的な推計結果に基づき）、我が国における将来の再生可能エネルギー大量普及社会の構築に向けた潜在的な道筋を示す。
サブテーマ1	費用対効果の高い再エネ技術導入の分析と道筋の検討
サブテーマリーダー /所属機関	本藤 祐樹／横浜国立大学
目標	CO ₂ 削減量や雇用創出などの観点から効果的な再エネ技術の導入のあり方を、各技術の特性および導入される地域の特性を考慮して、フォアキャストにより定量的に明らかにする。具体的には、第一に、熱技術等を新たなオプションとして加え、再エネ導入効果の定量分析を可能とする再生可能エネルギー部門拡張産業連関表を拡充する。その上で、第二に、再エネを用いた発電技術（太陽光、風力等）だけではなく、熱生産技術（バイオ熱、地中熱等）も取り上げ、各技術のライフサイクルCO ₂ 削減コストを明らかにする。第三に、再エネ技術が導入されることで生じ得るコベネフィットとして、地域における雇用の創出やシフト、関連産業の創出などの可能性を明らかにする。第四に、地域の自然・社会特性に応じた、費用対効果の高い再エネ技術の導入プランを明らかにする。
サブテーマ2	合理的な将来エネルギーインフラ構築の分析
サブテーマリーダー /所属機関	田原 聖隆／国立研究開発法人産業技術総合研究所
目標	2050年までを対象に複数のシナリオに基づいて、再エネの大量導入によってCO ₂

	<p>排出量大幅削減を実現可能なエネルギーシステム像に関する定量的情報を、バックキャストにより示す。具体的には、第一に、海洋再エネ技術とエネルギー輸送・貯蔵技術を対象として、実用段階におけるライフサイクルCO₂排出量ならびにコストを算出する。第二に、将来の技術開発や社会状況の変化、ならびに、コベネフィットを考慮して、2050年までにCO₂排出量大幅（80%）削減可能な地域別の再エネ供給パターン・エネルギー需要パターンを複数提示する。第三に、エネルギー需要パターンと再エネを含めたエネルギー供給パターンを満たし、かつCO₂排出量大幅削減可能なエネルギー輸送・貯蔵技術の最適な組み合わせを明らかにし、将来のエネルギーインフラの姿を提示する。</p>
--	---

4. 研究開発内容

図0. 1に本研究課題の全体像を示す。サブテーマ1「費用対効果の高い再エネ技術導入の分析と道筋の検討」の研究開発内容は大きく5つ（4-1. ～5. ）に分けられる。サブテーマ2「合理的な将来エネルギーインフラ構築の分析」の研究開発内容は大きく4つ（4-6. ～9. ）に分けられる。また、サブテーマ1の雇用分析の結果（4-4. ）はサブテーマ2の海洋再エネ発電技術の結果（4-6. ）は、再エネ技術の導入プラン（4-5. ）の検討で利用されている。

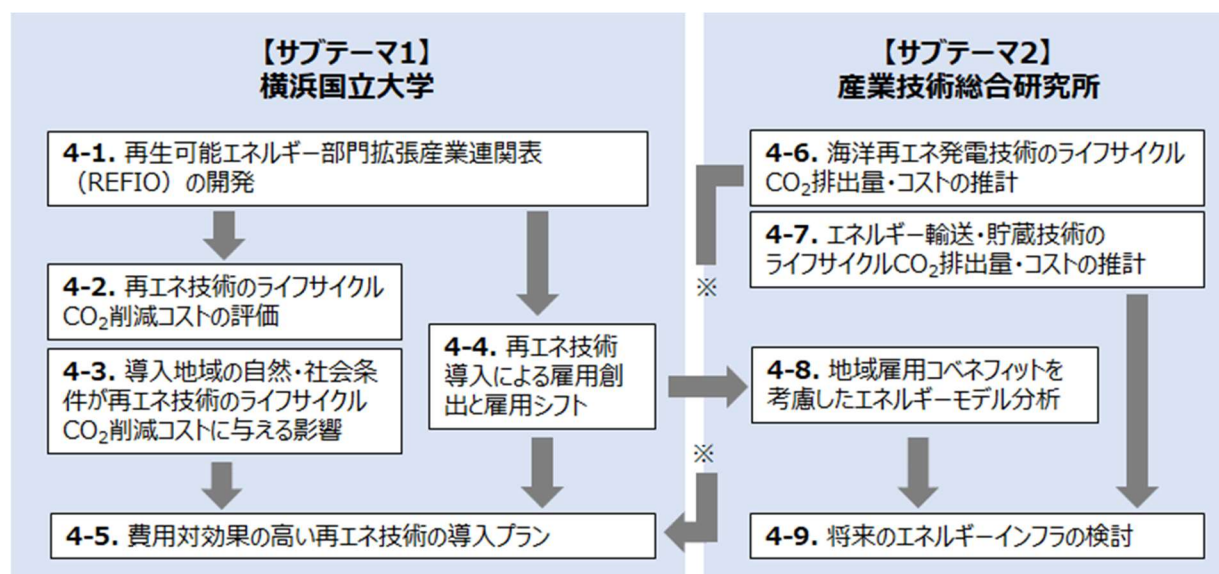


図0. 1 研究開発内容の全体

4-1. 再生可能エネルギー部門拡張産業連関表（REFIO）の開発

再エネ技術導入がもたらす影響を環境・社会経済面から分析するために、横浜国立大学では再生可能エネルギー部門拡張産業連関表（Renewable Energy-Focused Input-Output Table: REFIO）を開発してきた。本研究では、これまで再エネ発電技術だけを対象としたREFIOを、再エネ直接熱利用技術（地中熱、太陽熱、木質バイオマス熱）の導入効果についても分析できるように改良した。

また、再エネの普及により大量の施設解体・廃棄が見込まれるため、普及が進む太陽光発電と風力発電を対象とし、REFIOに施設廃棄部門を追加した。

4-2. 再エネ技術のライフサイクルCO₂削減コストの評価

今後の温室効果ガス削減に向けた再エネ技術選択のために、再エネを用いた発電技術12種と直接熱利用技術（給湯、空調）8種の計20種を対象とし、上述したREFIOを用いて、各再エネ技術の導入によるラ

ライフサイクルCO₂削減量とライフサイクルコストを推計した上で、各再エネ技術のライフサイクルCO₂削減コストを評価した。

4-3. 導入地域の自然・社会条件が再エネ技術のライフサイクルCO₂削減コストに与える影響

再エネ直接熱利用技術のCO₂削減効果は、地域の自然条件（日射量、気温など）や社会条件（代替される既存設備、エネルギー価格など）に大きく左右されるため、地域特性を考慮した再エネ技術評価の方法を開発した。その上で、地域別にライフサイクルCO₂削減量とライフサイクルCO₂削減コストを求め、削減量や削減コストは導入条件によって大きく異なることを定量的に示するとともに、費用対効果の高い（CO₂削減コストが安価な）導入条件を明らかにした。

4-4. 再エネ技術導入による雇用創出と雇用シフト

再エネの普及により見込まれるコベネフィットとして、再エネ技術のライフサイクルにわたる雇用創出・シフトに着眼し、REFIOを用いて分析した。再エネ直接熱利用技術については、各技術の雇用創出ポテンシャルとそれらの導入がもたらす産業間の雇用シフトを明らかにした。発電技術については、経済産業省の長期エネルギー需給見通し（2015年）で示されている2030年の電源構成を想定し、2016年度から2030年度までの電源構成の変化により生じる雇用創出機会の増減について明らかにした。

4-5. 費用対効果の高い再エネ技術の導入プラン

再エネ直接熱利用と海洋再エネを取り上げ、地域の自然・社会特性を考慮し、技術単体ではなく地域レベルでの費用対効果の高い導入のあり方について検討した。再エネ熱利用に関しては、木質バイオマスを取り上げて、熱供給形態の違いに着目して効果的な導入形態を明らかにした。海洋再エネに関しては、中期的な導入可能性が見込まれる海洋温度差発電（OTEC）を対象とし、電力と冷熱の複合生産に着目して費用対効果の高い導入のあり方を探索した。

4-6. 海洋再エネ発電技術のライフサイクルCO₂排出量・コストの推計

本研究では、長期的な視点から将来技術として海洋再生可能エネルギー発電を取り上げ、洋上風力、波力、潮力、潮流、海洋温度差の5種を対象として、ライフサイクルCO₂排出原単位とライフサイクルコストを推計した。各技術の基礎情報（技術仕様、投入資材など）今後の導入見込み等の情報については、文献調査、現地調査、専門家へのヒアリング調査によって収集した。また、ライフサイクルCO₂排出原単位の推計では、産業技術総合研究所が開発してきたLCA用インベントリデータベース「IDEA」を利用した。

4-7. エネルギー輸送・貯蔵技術のライフサイクルCO₂排出量・コストの推計

海洋エネルギー技術とともに将来、エネルギー輸送・貯蔵技術としての活用が期待されている水素エネルギーに着目して、ライフサイクルCO₂排出原単位とライフサイクルコストを算出した。水素基本戦略等に基づく、水素エネルギーの位置づけは世界的なGHG排出削減・一次エネルギー有効利用を実現する「グローバル水素」と、国内の変動性再生可能エネルギーを地産地消的に有効利用するための「ローカル（蓄エネ）水素」に類型化できる。国内の再エネ大量普及の中長期道筋を明らかにするという本研究の目的に照らし、グローバル水素を比較対象とし、ローカル（蓄エネ）水素について分析した。

4-8. 地域雇用コベネフィットを考慮したエネルギーモデル分析

産業技術総合研究所が開発してきた最適化型エネルギーモデル「多地域MARKALモデル」を用いて、2050年までのCO₂排出量大幅削減可能なエネルギーシステム像の検討を実施した。多地域MARKALモデルの分析対象期間は2010～2050年、日本国内を対象として詳細な空間分解能を有しており、エネルギーシステムの長期的推移を地域別に分析することに適している。この多地域MARKALモデルを改良して、地域雇用コベネフィットが再エネ発電導入パターンに与える影響、地域コベネフィットがエネルギーインフラ整備に与える影響、エネルギー需要パターン変化が供給構造に与える影響を分析した。

4-9. 将来のエネルギーインフラの検討

上述した一連の分析結果から、長期的な視点からエネルギーインフラの将来像について検討した。

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

5-1.1 再生可能エネルギー部門拡張産業連関表（REFIO）の開発

横浜国立大学では過去に、再エネ発電技術12種を対象とし、再生可能エネルギー部門拡張産業連関表（REFIO）を開発してきた。本研究では、第一に、再エネ直接熱利用技術が、今後の脱炭素社会における重要なオプションになると考え、新たに直接熱利用技術8種をREFIOへ組み込んだ。第二、普及量が多いと見込まれる太陽光・風力発電について、機器製造・施設建設・運用の各段階に加えて、施設廃棄も考慮できるようにREFIOに組み込んだ。国内外で再エネ分析用の産業連関表の作成が取り組まれてきたが、熱技術や施設廃棄を組み込んだ表は他に無く、これらの更新により、再エネの普及に伴う環境・社会経済影響をより包括的に分析できるようになった。

（1）再エネ直接熱利用技術の組み込み

表0.1に示すように、これまで発電技術だけを対象としていたREFIOに、新たに8種の直接熱利用技術（給湯、空調）を加えた。また、これら8種の再エネ熱生産技術の導入に伴う効果分析を実施するためには、代替される従来技術についても考慮する必要がある。それ故に、表0.1に示すように、再エネ直接熱利用システムとの代替あるいは組合せが可能な、5種の従来方式の給湯・空調システムについても対象とした。

表0.1 REFIOに組み込まれた再エネ熱生産技術8種と従来技術5種

技術（計13種）		用途	新設部門（計37部門）
再エネ熱生産技術	太陽熱	太陽熱温水器（自然循環型） ソーラーシステム（強制循環型）	家庭用給湯 家庭用給湯
	地中熱	地中熱ヒートポンプ（チラータイプ） 地中熱ヒートポンプ（ビルマルチタイプ）	業務用空調 業務用空調
	木質バイオマス熱	木質チップボイラー 木質ペレットボイラー 木質チップボイラー 木質ペレットボイラー	業務用給湯 業務用給湯 業務用空調 業務用空調
従来技術	ガス燃	ガス給湯器	家庭用給湯
	空気熱	ウォータチリングユニット パッケージエアコン	業務用空調 業務用空調
	石油燃焼	温水発生機 吸収式冷温水機	業務用給湯 業務用空調

これら13種の技術について、ライフサイクルの観点から機器製造、建設（機器設置）、運用、燃料製造の各段階に相当する37部門をREFIOに新設した（表0.1）。例えば、太陽熱温水器は、既存の産業連関表の「ガス・石油機器・暖厨房機器」部門に含まれている。しかし、その生産額は全体の0.6%にすぎず、同部門の投入構造を用いて太陽熱温水器の生産による波及効果を測ることは無理がある。そのため、本研究では、太陽熱温水器を製造する独立部門を新たに作成した。他の技術に関しても同様であり、各技術の特徴が表されるように、関連する独立部門を新たに作成した。なお、木質バイオマス熱に関しては燃料製造が必要であり、木質ペレット製造について新たに部門を作成した（木質チップ製造は既存の産業連関表に該当する適切な部門が存在する）。

これら新設37部門の投入額ベクトルと産出額ベクトルを推計するために、基本となる推計方針は発電技術と同じとした上で、直接熱利用技術の特性を考慮した推計方法を開発した。推計に必要なコストデータや情報は、関連企業・協会・自治体などへのヒアリング調査や文献調査から得た。

再エネ直接熱利用技術を組み込んだREFIO 更新版は以下の三点の特長を持つ。第一に、再エネ発電技術を対象とした産業連関表の作成は国内外でいくつか試みられているが、再エネ直接熱利用技術（給湯、

射量が多いが、従来機器の燃料費が安価なため、静岡市ほどはマイナスの値が大きくない。逆に、秋田市は日射量が少ないことが主因で、那覇市は年間給湯負荷が少ないことが主因で、削減コストが大きい。

以上のように、中期的な再エネ直接熱利用技術の導入においては、地域の自然・社会条件を考慮して効果的に導入を進めることが肝要であり、その導入施策・制度の構築に本研究成果を活用することが可能である。

5-1.4 再エネ技術導入による雇用創出と雇用シフト

再エネ技術の第一義的な価値は、エネルギー供給において化石燃料消費やCO₂排出を大きく削減できることにあるが、他方で社会経済的な価値の創出についても期待されている。

本研究では、第一に、再エネ熱利用技術に関して、再エネ発電技術と同様に雇用創出ポテンシャルを推計し、各技術の特性を明らかにした。第二に、再エネ発電技術については、2030年の電源構成が達成される場合を想定し、日本全体として雇用がどのように変化するかを明らかにした。

(1) 再エネ直接熱利用技術の雇用創出ポテンシャル

図0.2に8種の再エネ直接熱利用技術の供給熱量あたりのライフサイクル雇用創出ポテンシャル（以下、LC-雇用ポテンシャル）を示す。参考までに過去に推計された再エネ発電技術のLC-雇用創出ポテンシャルを図の右に示す。第一に、地中熱ヒートポンプと木質チップ・ペレットを用いた空調4種のGWhあたりの雇用量は、給湯4種のそれらと比較して大きい。空調は稼働する季節が限定され、年間を通して需要がある給湯に比べると、空調の総供給熱量が少ないことに起因する。第二に、木質チップ・ペレットを用いた給湯・空調は、太陽熱や地中熱に比べて、建設時に比して運用時における雇用創出が大きいことが認められる。木質チップ・ペレットはその燃料生産に伴い生み出される雇用が大きい一方で、太陽熱や地中熱は燃料を必要とせず、設備稼働に必要な電力の生産に伴う雇用創出も小さい。

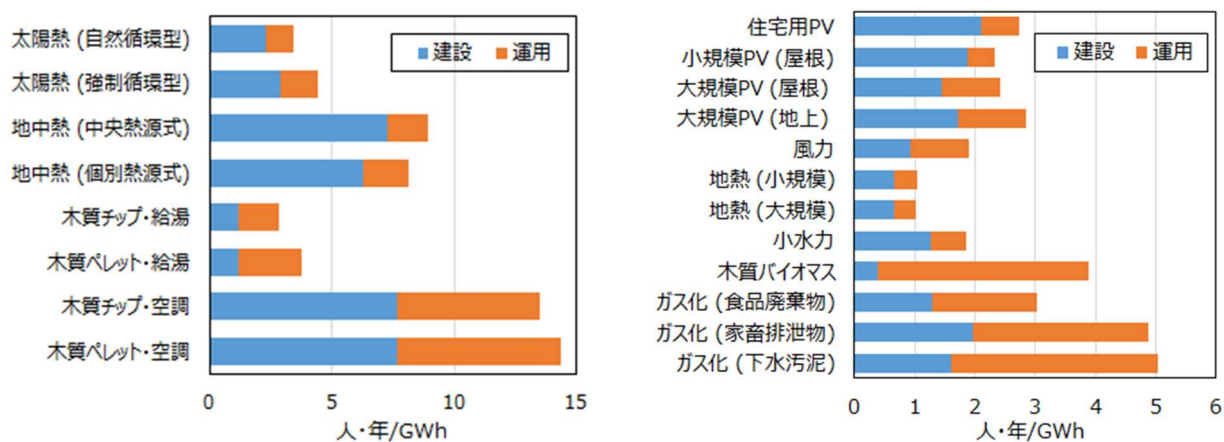


図0.2 再エネ直接熱利用技術（左）と再エネ発電技術（右：参考）のLC-雇用創出ポテンシャル

(2) 電源構成の変化が与える雇用の増減・シフト

上述したように、再エネ熱技術のLC-雇用創出ポテンシャルが推計されたことで、再エネ技術20種（発電・熱）の特性が明らかにされた。しかし、再エネ技術の導入は従来技術の撤退を意味する。例えば、再エネ発電技術の普及は火力発電など既存技術の新規導入や発電量の減少をもたらし、それらの減少は雇用機会の喪失につながる。ここでは、2015年の長期エネルギー需給見通しにおける2030年度の電源構成が達成される場合を想定し、雇用の増減・シフトについて分析した（熱利用技術の雇用の増減・シフトに関する分析は「成果の詳細Ⅱ-2、p.28~29」を参照されたい）。

2016年度の電源構成（実績）に基づき、発電に伴い国内で直接間接に誘発される雇用量は年間で約58万人・年と推計された。2030年度では再エネ発電の比率が高まり電源構成は変化するが、2030年の雇用量も2016年度と同じく約58万人と推計され、年間の雇用総量では変化はほとんど認められなかった。し

かし、図1.11に示されるように、2030年度に生じる雇用の内訳は2016年度のそれと異なる。図は各産業部門における雇用の増減について、400部門以上の詳細結果を15部門に集約した結果を示している。2016年度に比して2030年度では、火力発電所における直接的な雇用は減少し、太陽光発電など再エネ発電に伴う直接的な雇用は増加する。また、電源構成の変化により間接的に生じる増減に関しては、「対事業所サービス」「運輸」「建設（＝建設補修）」などは増加分に対して減少分の方が大きい。逆に、「林業」「木材・木製品（＝チップ）」

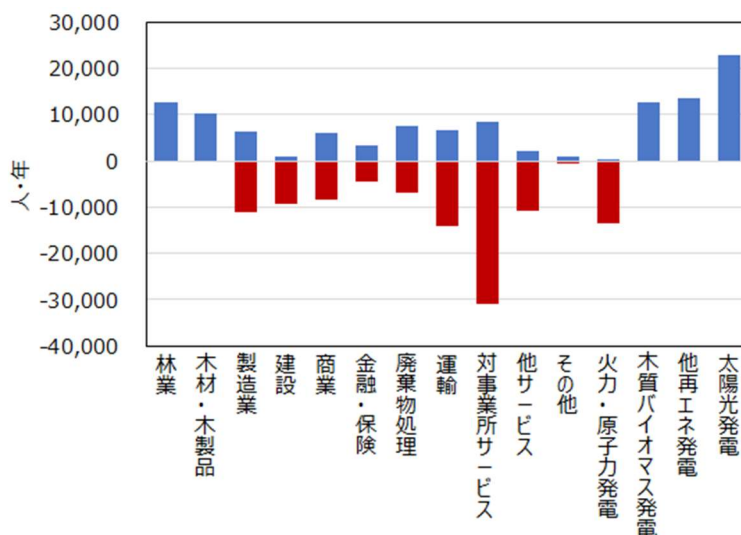


図1.11 発電に係る直接間接雇用量の各産業部門における増減 (2016年度→2030年度、運用分)

における間接的な雇用は増加する。直接間接に増加する雇用の多くは再エネ発電の運転や点検、木質チップ調達に係るものであり、再エネ導入地域で対応可能性が高い仕事であり、雇用の増加とあわせて関連産業の創出も期待される。再エネに導入による雇用増だけに着目せず、各産業部門の増減量や雇用の創出地域を把握することが重要である。

なお、本分析では、2015年度の長期需給見通しに基づいて推計したが、2030年度の再エネ比率目標は2021年度に引き上げられる見込みであり、図1.11の各産業部門の増減もさらに大きくなることが予想され、再エネの大幅導入に向け雇用の円滑なシフトや地元産業の育成に対する支援が重要になる。

5-1.5 費用対効果の高い再エネ技術の導入プラン

これまでの分析で明らかになった各種再エネ技術の特性を土台にして、地域レベルでの費用対効果の高い導入のあり方について検討した結果を示す。再エネ直接熱利用技術としては木質バイオマスを、海洋再エネ技術としては海洋温度差発電を取り上げ、地域のエネルギーシステムの中心として効果的に機能する可能性について分析した。

(1) 木質バイオマス熱の地域熱供給の可能性

地域における木質バイオマスを用いた熱供給システムとして、複数の需要家の熱需要を満たすためにエネルギーセンターを設けてそこから各需要家へ熱を供給する地域熱供給が挙げられる。本研究では、地域熱供給の可能性を探るための評価モデルを開発し、一定の木質バイオマスのポテンシャルを持つ日本の地方部（中山間地域）を想定し、実際の基礎自治体の状況を参考に需要家群を設定し、個別熱供給との比較を通して地域熱供給について評価した。

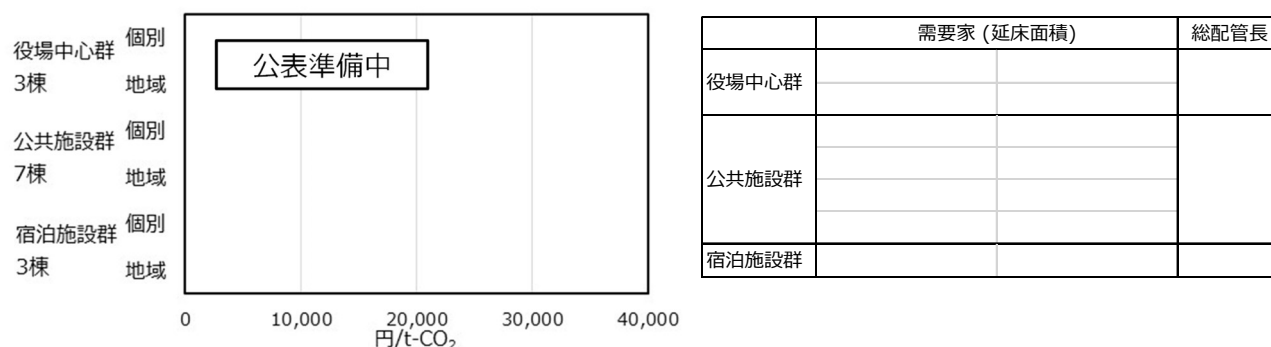


図1.13 木質チップボイラを用いた個別/地域熱供給のライフサイクルCO₂削減コスト (北海道、重油ボイラ代替)

利用によりLC-CO₂削減コストが削減されており、特に17 地域では、複合利用によるLC-CO₂削減コストの減少は50%以上となっており、複合利用がOTECのLC-CO₂ 削減コストの減少に大きく寄与している。

以上のように、海洋深層水を発電だけでなく冷熱源にも利用することで、OTECが離島などにおける地域エネルギーシステムの核となる可能性がある。また、冷熱源を建物空調や土壌冷却に加えて養殖などに幅広く活用することで、OTECは費用対効果のより高い脱炭素オプションになることが示唆される。

5-1.6 海洋再エネ発電技術のライフサイクルCO₂排出量・コストの推計

(1) 推計方法

本研究では、表0.2に示すように、将来的に期待される海洋再生可能エネルギー発電技術として、洋上風力発電、波力発電、潮力発電、潮流発電、海洋温度差発電の5種を取り上げて、ライフサイクルCO₂排出原単位(LC-CO₂)とライフサイクルコスト(LC-コスト)を評価した。評価においては、可能な限り前提条件を統一した。所内率に関しては、洋上風力、波力、潮力、海流は10%、OTECは30%とし、設備利用率に関しては、洋上風力、波力、潮力・海流は30%、潮流は60%を海洋温度差は80%とし、設備補修に関わるCO₂排出量は設備建設に伴う排出量の2%とした。また運用年数は、洋上風力は20年、波力、潮力、海流・潮流、海洋温度差は30年と設定した。

LC-CO₂ (g-CO₂/kWh)に関しては、海洋エネルギー構造物や発電装置の製造や設置、設備補修に関わるCO₂排出量を、想定する運用期間中の総発電量で除することで求めた。CO₂排出量の算定に用いた、構造物や機器の製造や設置に伴う素材やエネルギーなどの必要量は、文献調査ならびにヒアリング調査より入手した。直接、これらの必要量が得られない場合は、総重量や見取り図などから素材やその重量を推定するなどした。バックグラウンドインベントリデータ(例えば、製鉄に伴うCO₂排出量など)には、LCA用インベントリデータベース「IDEA」を用いた。また、LC-コスト(円/kWh)は均等化発電原価で算出しており、割引率は6%と想定した。

以下では、洋上風力発電と海洋温度差発電の結果の概要を示す。他3種の技術については「成果の詳細II-2、p.41~44」を参照されたい。

表0.2 対象とした海洋再生可能エネルギー発電技術

発電技術	地域	評価対象
洋上風力発電	国内	浮体式(4ケース), ジャケット式(1ケース), 着床式(1ケース)
	海外	浮体式(4ケース)
波力発電	国内	振動水柱型(4ケース), 可動物体型(1ケース), 超波型(1ケース)
	海外	振動水柱型(1ケース)
潮力発電	海外	潮力発電(5ケース)
潮流・海流発電	国内	橋脚利用式(1ケース), 油圧式(1ケース), 垂直軸直線翼式(1ケース), 橋脚・港湾構造物利用式(1ケース)
海洋温度差発電	国内	陸上設置型(1ケース), 洋上設置型(1ケース)
	海外	陸上設置型(6ケース)

(2) 洋上風力発電

洋上風力発電は、洋上向けに防塩措置を施した風力発電装置を、浅瀬ではモノパイル式の支柱等に取り付け、水深の深い場所では浮体に取り付けて発電を行う。

図2.3(a)に国内および海外の洋上風力発電装置のLC-CO₂とLC-コストを示す。浮体に鉄ではなくコンクリートを用いた方がCO₂排出量は小さく、特に銚子沖はコンクリート構造体に銅水破スラグ(廃棄物)を中詰めしているためCO₂排出量がさらに小さい。海外の事例と比べ、国内の事例のLC-CO₂が大きいのは、日本に特有の台風等を想定した構造物の強化が必要なためである。全体的な傾向として出力が大きくなるほどLC-CO₂が削減される傾向が認められ、多少のスケール効果が見込まれる。また、浮体式のLC-コストに関しては、5MW以下では浮体の大部分は鉄製であり、鉄に起因するコストが大半を占めている。海外の実用化されている洋上風力に比べると、国内の実証実験のコスト試算は見劣りする。しかし、今後、6~8MWへの大型化と浮体のコンクリート化によってLC-コストが削減される可能性がある。

(3) 海洋温度差発電

低温の海洋深層水と海洋表層水の温度差を利用してタービンを回して発電する海洋温度差発電（OTEC）は、設備利用率が80%以上を見込めるためベース電源として期待できる。

図2. 3 (e)に、OTECのLC-CO₂とLCコストの試算結果を示す。LC-CO₂に関しては、海洋深層水を大量に汲み上げる必要があるため、取水管設置に係わるCO₂が全体に占める割合が大きい。ジャパンマリンユナイテッド（JMU）と佐賀大学が共同開発している洋上設置型（10MW）は、陸上設置型の装置を浮体にのせているため、浮体の鉄鋼によるCO₂排出量が多い。国内の100kWと10MWの想定システムのLC-コストは、それぞれ、53、51円/kWhであり、現状の離島の発電価格である60～100円/kWhを下回る。また同システムのLC-CO₂は、それぞれ、41、69g-CO₂/kWhであり、離島のベース電源であるディーゼル発電のLC-CO₂である約800g-CO₂/kWhを大きく下回る。離島への設置を想定するならば、LC-コストとLC-CO₂ともに優位である。また、OTECには取水した海洋深層水を発電以外（建物冷房、養殖など）に利用できるためコベネフィットが期待されており、上述したLC-コストよりも低下する可能性がある。コベネフィットを考慮した分析はサブテーマ1の結果「5-1. 5」を参照されたい。

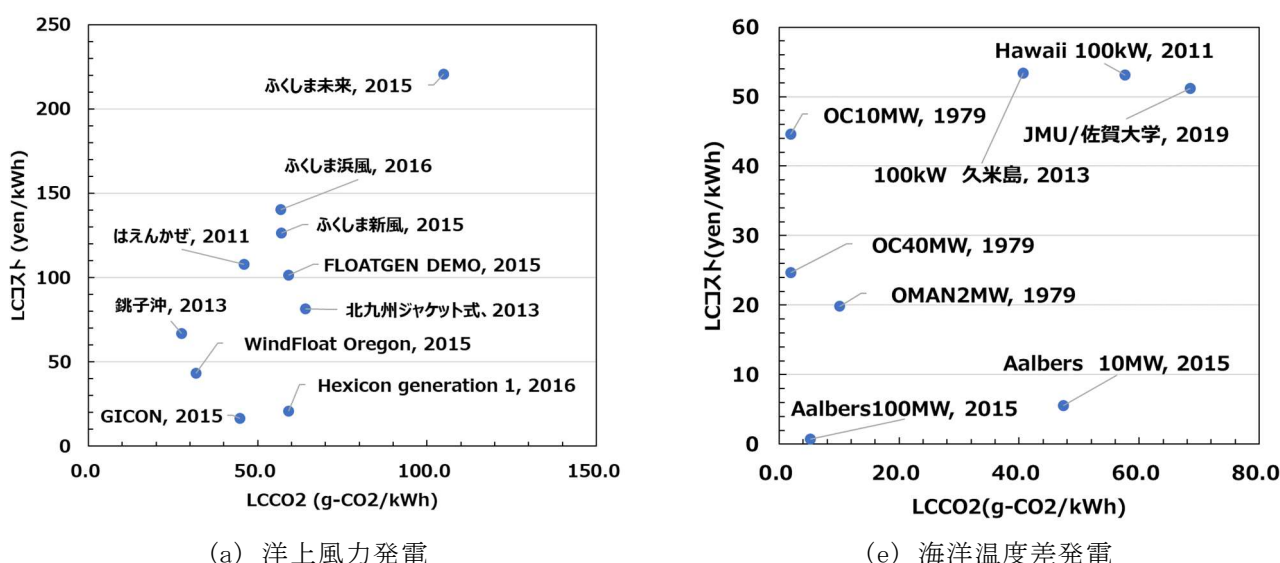


図2. 3 海洋エネルギー発電技術のLCCO₂(g-CO₂/kWh)とLCコスト(円/kWh)

5-1. 7 エネルギー輸送・貯蔵技術のライフサイクルCO₂排出量・コストの推計

(1) 推計の前提・方法

本研究では、将来のエネルギー輸送・貯蔵技術として期待される水素を取り上げ、国内の再エネ普及に直接的に関わるローカル（蓄エネ）水素に注目して、グローバル水素を比較対象とし、水素1MJあたりのLCコスト・LCCO₂を評価した。

ローカル（蓄エネ）水素のサプライチェーンは、再エネ電力証書で購入したPV電力を用いた水電解によって水素製造してエネルギーキャリアに変換した後、需要地まで輸送（距離50km）し、既存産業で利用することを想定した。エネルギーキャリアは、高圧水素、液化水素、メチルシクロヘキサン（MCH）、アンモニア、メタンの5種類を想定した。他方、グローバル水素は、中東（UAE）の太陽光発電を用いた水電解によって水素製造してエネルギーキャリアに変換した後、日本まで国際輸送（距離10,000km）して燃焼用燃料として利用することを想定した。エネルギーキャリアは前述5種類のうち長距離輸送に不向きな高圧水素を除く4種類を想定した。

水素サプライチェーンに投入される電力について2通りのケース（ベースケース・低炭素ケース）を想定した。ベースケースでは、PV電力は水素製造（再エネ水電解）プロセスのみで利用し、それ以外のプロセスでは系統電力を利用することを想定した。低炭素ケースでは、CO₂調達以外のサプライチェーン全

体で投入されるすべての電力にPV電力を利用することを想定した。また、LCCO₂の算出において資本財に起因する排出量は対象外としたが、例外的にPV発電は構成資材製造、建設、輸送に伴う排出を考慮した。

(2) 推計結果

図2. 4 (a)に、ローカル（蓄エネ）水素のLCコスト・LCCO₂を示す。グラフの左下に向かうほど、LCコスト・LCCO₂ともに小さくなり、エネルギーキャリアとしての優位性があることを意味する。

水素製造プロセス以外に投入される電力に系統電力を利用することを想定した場合（ベースケース）、メタンや高圧水素のLCコスト・LCCO₂が小さく、液化水素・MCH・アンモニアはLCコスト・LCCO₂ともに大きい。液化水素・MCH・アンモニアのLCCO₂が大きいのは、エネルギーキャリア製造やMCH脱水素・アンモニア分解プロセスにおける電力消費に起因する。そこで、これらのプロセスでもPV電力を利用することを想定した場合（低炭素ケース）、LCCO₂は大きく変化し、特に高圧水素・液化水素・アンモニアのLCCO₂はメタンよりも小さくなる。以上の結果から、ローカル（蓄エネ）水素の低炭素化には、水素製造プロセスだけでなくサプライチェーン全体で投入される電力の低炭素化が重要と言える。

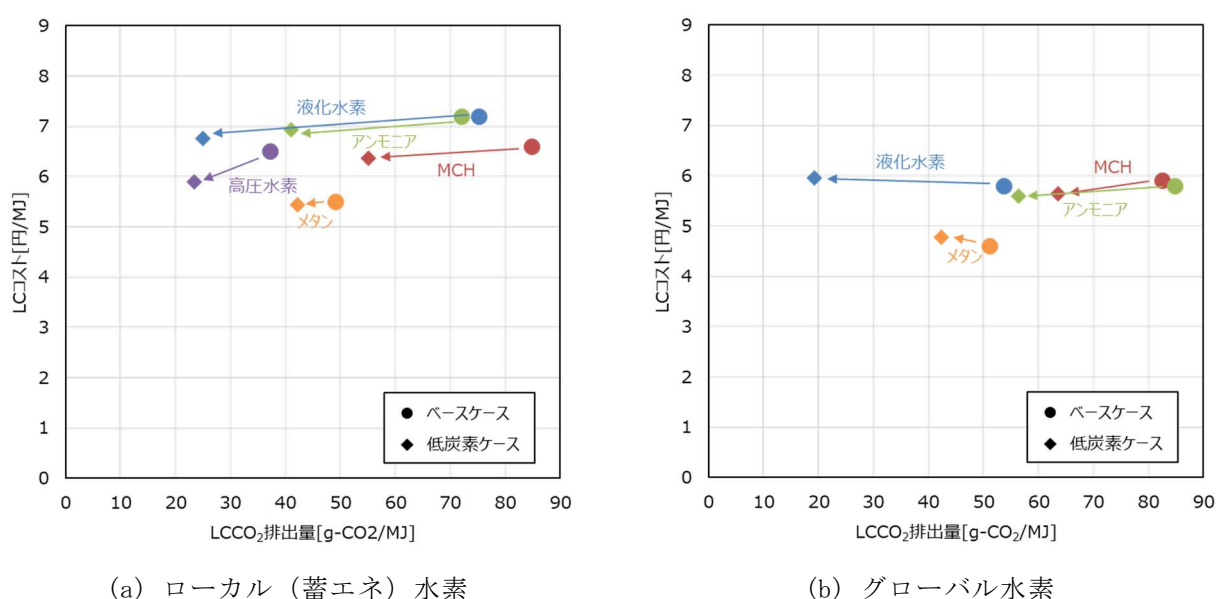


図2. 4 水素のLCコスト・LCCO₂

5-1. 8 地域雇用コベネフィットを考慮したエネルギーモデル分析

(1) モデル分析の前提

エネルギー技術の導入に伴うエネルギー・環境的便益 (CO₂排出量の削減やエネルギー自給率の向上など) だけでなく社会経済的便益も分析対象とするために、本研究では多地域MARKALモデルの改良を実施した。MARKALモデルは最適化型のエネルギーモデルであり、分析対象期間にエネルギーシステム全体にかかる総システムコストの最小化を目的関数とする。多地域MARKALモデルの分析対象期間は2010～2050年、日本国内を対象として詳細な空間分解能を有しており、エネルギーシステムの長期的推移を地域別に分析することに適している。

第一に、社会経済的便益として地方に立地する発電施設の建設・運用に関連する雇用創出効果に着目し、雇用によって地方にもたらされるコベネフィット (副次的便益) を金額価値換算し、目的関数である総システムコストから差し引くという形で最適化計算の中に組み込んだ。発電容量・発電量あたりの建設段階及び運用段階における雇用創出量にはサブテーマ1の分析結果を利用した。また、雇用量を金額価値に換算する係数について0～150万円/人・年の間で感度分析を行うことで、エネルギー技術導入に伴う地域雇用コベネフィットの取り扱いが再エネ発電導入パターンに与える影響を評価した。

第二に、エネルギーインフラとして蓄電池・水電解装置に着目して、コベネフィットの取り扱いがエネルギーインフラ整備に与える影響を評価した。蓄電池は低コスト化により普及が進むリチウムイオン

電池、水電解装置は発電用水素を供給する「大規模水素製造（アルカリ水電解）」とFCV用水素を供給する「オンサイト水素製造（PEM水電解）」を考慮して、各プロセスの性能・コストデータを設定した。

（２）分析結果

図2. 6に各ケースにおける2030・2040・2050年の再エネ発電量と2010～50年の総雇用用量を示す。ここでは、蓄電池や国内水素製造の導入は考慮しないエネルギーモデルを利用し、コベネフィットの効果を分析した。コベネフィットを考慮するケース（EMP50・EMP100・EMP150）では、考慮しないケース（BASE）に比べて、2030～2040年の再エネ発電量が増加しており、コベネフィットを考慮することで再エネ発電の早期導入が進むことがわかる。これにより、地方における総雇用用量が最大9%増加する一方、都市における総雇用用量が最大8%減少し、トータルとして国内で発電施設の建設・運用に関連する雇用用量は増加する。コベネフィットを考慮することで、燃料を海外からの輸入に依存する火力発電よりも国内の地方に多く賦存する再エネ発電の導入が重視される結果、国外から国内、都市から地方へと雇用機会が還流されることを意味する。

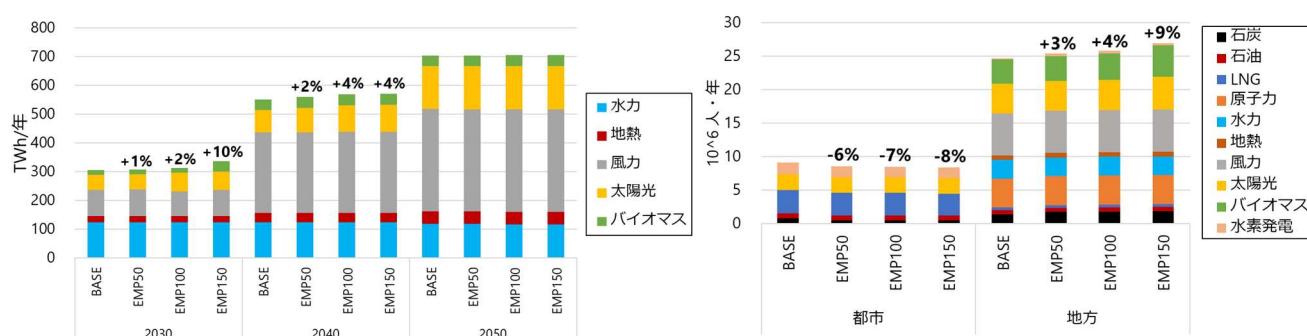


図2. 6 2030・2040・2050年の再エネ発電量（左）と2010～50年の総雇用用量（右）

図2. 7に2030・2040・2050年の蓄電池容量と国内水電解水素製造量を示す。ここでは、蓄電池利用もしくは国内水素製造のプロセスを追加したエネルギーモデルを利用した。2050年の蓄電池容量は、BASEケースで29.4GW、EMP150ケースで32.2GWであり、コベネフィットを考慮することで2050年の蓄電池容量は10%増加する。特に変動性再エネ発電のポテンシャルが大きい北海道や九州地方において蓄電池導入量が増加し、全国の再エネ発電量は10TWh増加する。他方、2050年の国内水電解水素製造量は、BASEケースで19.7万t、EMP150ケースで86.5万tであり、コベネフィットを考慮することで2050年の国内水素製造量は4倍以上に増加する。地域別に見ると、コベネフィットの考慮によって、風力発電のポテンシャルが大きい北海道や東北で水素製造量が増加し、全国の再エネ発電量は49TWh増加する。

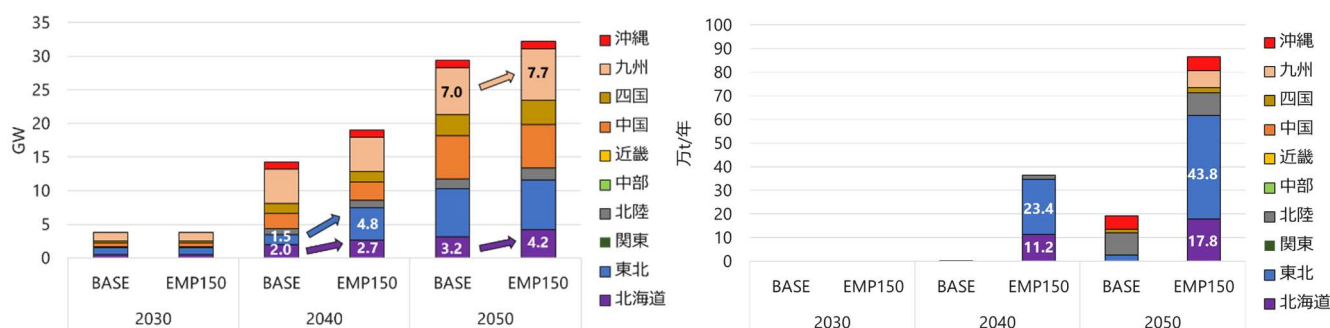


図2. 7 2030・2040・2050年の蓄電池容量（左）と国内水電解水素製造量（右）

以上の結果から、発電技術導入のコベネフィットは国内のエネルギーインフラ整備、とりわけ国内水素製造の普及に大きく影響することがわかる。また再エネポテンシャルの大きい地方部において、蓄電池や水電解装置の導入が進むことが明らかになった。

5-1.9 将来のエネルギーインフラの検討

(1) エネルギーモデルを用いた検討

サブテーマ(2)で得られた分析結果から、将来のエネルギーインフラについて検討する。

多地域MARKALモデルによる分析結果から、2050年の電源構成はCCS付き火力・原子力・再エネ・水素発電のみで構成されており、電力の脱炭素化はCO₂排出量大幅削減を実現する上での必要条件であることが示された。発電施設の建設・運用に関連する雇用によって地方にもたらされる副次的な便益を考慮すると、2030～2040年にかけて再エネ発電の早期導入が進み、雇用が国外から国内、都市から地方へと還流されることが確認できた。雇用創出効果を最も重視するEMP150ケースでは、考慮しないBASEケースに比べて、2010～2050年の40年間に日本全体で154万人・年の雇用が追加的に創出されている。

再エネ発電の導入を進めるにあたって、蓄電池や水電解装置といった電力・水素インフラを拡充していく事が重要である。コベネフィットを考慮すると2050年の蓄電池容量は32.2GWとなり、現在の揚水発電所の容量の1.2倍に相当する蓄電池が必要になることが示された。地域別に見ると、系統規模が大きい三大都市圏（関東、中部、近畿）を除く7地域において蓄電池が導入される。一方、水電解装置による2050年の国内水素製造量はコベネフィットを考慮する場合で86.5万tとなる。2050年における海外からの水素輸入量の3.1%程度であり、輸入水素（グローバル水素）と比較して国内水素製造（ローカル（蓄エネ）水素）の規模は小さく、導入有利な地域にコンパクトな水素ネットワークを導入することが効果的であると考えられる。地域別にみると、コベネフィットの考慮によって、風力発電のポテンシャルが大きい北海道・東北の2地域で水電解装置の導入が進み、再エネ発電量の増加分は蓄電池よりも大きい。ただし、そのためには水電解装置を調整力として活用する必要があり、再エネ発電の出力変動に対応できる水電解装置の開発や地域内で水素需要を喚起する制度構築が求められる。

(2) ライフサイクル評価による検討

エネルギーモデルでは簡略化されているローカル（蓄エネ）水素の輸送・貯蔵段階について詳細に検討するために、本研究では、5種類のエネルギーキャリア（高圧水素・液化水素・MCH・アンモニア・メタン）を想定し、ローカル（蓄エネ）水素のLCコスト・LCCO₂を算定した。ローカル（蓄エネ）水素の導入初期段階（2030年頃）では、再エネ電力は水素製造プロセスでのみ使用され、その他のプロセスに投入される電力は系統から供給されることが想定される。その場合、高圧水素やメタンのLCCO₂が小さく、特にメタンに関してはLCコストも小さい。メタンは、既存の都市ガスインフラを利用して輸送・貯蔵することが可能であり、国内における水素利活用を推進する初期段階において有望なエネルギーキャリアになり得る。

ローカル（蓄エネ）水素の導入後期段階（2050年頃）になると、再エネ発電量が多くなるためサプライチェーン全体の電力消費を再エネによって賄える可能性がある。その場合、高圧水素・液化水素・アンモニアのLCCO₂も減少し、特に高圧水素はLCCO₂とLCコストの両面から有望と考えられ、長期的なCO₂排出量大幅削減に向けてこれらのエネルギーキャリアを輸送・貯蔵するインフラ整備が重要となる。

5-2. 環境政策等への貢献

<行政等が既に活用した成果>

本研究で作成した再生可能エネルギー部門拡張産業連関表（REFIO）は、国内再エネ由来の水素の利用拡大に向けて環境省が進めている事業において、水素導入による地域経済効果の分析に利用されている。（令和3年度第1回「地域資源を活用した水素の価値の定量化分科会」資料4のp.15）

<行政等が活用することが見込まれる成果>

・脱炭素と地方創生を両立しうる再エネ導入シナリオの策定に資するツール

本研究で開発した、環境・経済両面から分析可能な再生可能エネルギー部門拡張産業連関表（REFIO）、ならびに、地方雇用効果を組み込んだ多地域MARKALモデルは、地域循環共生圏（第五次環境基本計画、

2018年4月)の実現に向けた政策検討に資するツールである。これらのツールを活用することで、地域の再エネ資源を有効活用して脱炭素と地方創生を両立しうる再生可能エネルギー導入シナリオ・戦略の策定に必要な定量的情報を提供することが可能となる。

・再エネ導入に伴うコベネフィットー雇用機会の創出と雇用シフトー

本研究で得られた再エネ導入に伴う雇用機会の創出や雇用シフトに関する分析方法・結果は地域再エネ政策立案に大いに寄与すると考えられる。パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略 (2019年6月)においても脱炭素社会に向けて「労働力の公正な移行」の重要性が指摘されており、地域再エネの導入加速にむけ、労働力、地域経済、地場産業の移行を一体的に検討するための有効な情報を提供している。

・再エネ熱直接利用、海洋エネルギー、国内再エネ由来水素の可能性

本研究が明らかにした再エネ直接熱利用技術や海洋エネルギーの費用対効果の高い導入のあり方については、地域脱炭素ロードマップ (2021年6月)が強調する今後5年間に集中して行う取組・施策の立案に資する。また、2050年の再エネ大量導入社会を見据えた場合、地方部の雇用の潜在的な価値を考えることによって、国内再エネ由来水素の導入拡大が進む可能性を指摘しており、水素を利用した脱炭素先行地域の検討に貢献する。

5-3. 研究目標の達成状況

サブテーマ1とサブテーマ2のいずれもが「目標通りの成果をあげ」、研究課題全体としても将来の再エネ大量普及社会の構築に向けた潜在的な道筋を示すという「目標通りの成果を上げた」。

第一に、サブテーマ1と2の密接な連携のもとで、中長期的に、再エネ導入がもたらす雇用機会の創出というコベネフィットの考慮が、地域再エネの導入拡大を後押しする可能性を定量的に明らかにした。それと共に、中期的には、地域再エネの導入加速に向け、雇用の円滑な産業間シフトや地元産業の育成などの支援に役立つ定量情報を示した。これまで指摘されてきた再エネ技術のコスト低減だけではなく、地域の公共的価値に着目して、将来の再エネ大量普及社会の構築に向けた道筋を描くという新たな可能性を提示した。

第二に、サブテーマ1と2では、再エネを利用した直接熱利用技術と海洋再エネ技術に着目して、CO₂削減オプションとしての可能性を定量的に明らかにした。具体的には、直接熱利用技術（給湯）は費用対効果に優れ、CO₂削減オプションとして有望であること、そして、地域の自然・社会条件を考慮して効果的に導入を進めるべきということを示した。また、両技術に共通して、地域資源（中山間地域等の木質バイオマス、島嶼地域等の海洋深層水）を用いた、効果的な地域エネルギーシステムのあり方を具体かつ定量的に提示した。これまで着目されてきた発電だけではなく、直接熱利用や海洋エネの可能性を明らかにし、さらに、それらを単体の技術として導入するだけではなく、地域の核となるインフラとして整備するという潜在的な道筋を提示した。

6. 研究成果の発表状況

6-1. 査読付き論文

<件数>

4件

<主な査読付き論文>

- 1) 森泉由恵, 本藤祐樹, 中野諭 (2019) 再生可能エネルギー熱技術を対象とした金額・物量ハイブリッド産業連関モデルの開発と雇用分析への適用, 日本エネルギー学会誌, 98(12), 318-332
- 2) 早乙女裕紀, 本藤祐樹, 森泉由恵 (2020) 地中熱ヒートポンプによるCO₂削減に効果的な導入条件の探索, 日本エネルギー学会誌, 99(6), 57-66 **【論文賞 受賞】**

- 3) Y. NAGATOMO, A. OZAWA, Y KUDOH, H. HONDO: Energy, 226, 12350 (2021) (IF:6.1) ,
Impacts of employment in power generation on energy systems in Japan- Analysis using
an energy system model
- 4) 庭野諒, 本藤祐樹, 森泉由恵, 田原聖隆 (2021) 海洋深層水の複合利用を考慮した海洋温度差
発電の導入可能性, 日本エネルギー学会誌, 100(7), 73-82

6-2. 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

6-3. その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	0件
その他誌上発表 (査読なし)	1件
口頭発表 (学会等)	19件
「国民との科学・技術対話」の実施	1件
マスコミ等への公表・報道等	1件
本研究に関連する受賞	6件

7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

8. 研究者略歴

研究代表者

本藤 祐樹

京都大学大学院エネルギー科学研究科修了、博士 (エネルギー科学)、
現在、横浜国立大学大学院環境情報研究院 教授

研究分担者

1) 田原 聖隆

成蹊大学大学院工学研究科、博士 (工学)、
現在、国立研究開発法人産業技術総合研究所安全科学研究部門 社会とLCA研究グループ
付

2) 工藤 祐揮 (研究期間：平成30～令和元年度)

東京大学大学院工学系研究科修了、工学博士、
現在、国立研究開発法人産業技術総合研究所安全科学研究部門 研究グループ長

3) 小澤 暁人 (研究期間：令和元～令和2年度)

東京大学大学院工学系研究科修了、博士 (環境学)、
現在、国立研究開発法人産業技術総合研究所ゼロエミッション国際共同研究センター
研究員

4) 森本 慎一郎 (研究期間：令和2年度)

京都大学大学院エネルギー科学研究科修了、博士 (エネルギー科学)
現在、国立研究開発法人産業技術総合研究所ゼロエミッション国際共同研究センター
研究チーム長

II. 成果の詳細

II-1 費用対効果の高い再エネ技術導入の分析と道筋の検討

国立大学法人横浜国立大学

大学院環境情報研究院

大学院環境情報研究院

本藤 祐樹

森泉 由恵 <研究協力者>

[要旨]

本研究では、再生可能エネルギー大量普及社会に向けて、中期的な視点から、費用対効果の高い再エネ導入のあり方についてフォアキャスティングにより明らかにすることを目的とする。まず、横浜国立大学が開発してきた再生可能エネルギー部門拡張産業連関表 (REFIO) に、直接熱利用技術を新たなオプションとして加え、再エネ導入効果を包括的に分析できるように改良している。その上で、発電技術 (太陽光、風力等) だけではなく、直接熱利用技術 (バイオ熱、地中熱等) も取り上げ、各技術のライフサイクルCO₂削減コストを明らかにしている。なかでも、直接熱利用技術のライフサイクルCO₂削減コストについては、導入地域の自然・社会条件に大きく影響を受けることを示している。また、再エネ技術のコベネフィットとして地域における雇用機会の創出を取り上げ、再エネ技術導入が地域の雇用機会を生み出すとともに、産業間の雇用シフトをもたらすことを定量的に明らかにしている。このことは、再エネの大幅導入にあたり、雇用の円滑なシフトや地元産業の育成に対する支援が必要なことを示唆している。最後に、地域レベルでの費用対効果の高い再エネ導入に向けて、木質チップを用いた地域熱供給システム、ならびに、海洋深層水を用いた温度差発電と冷熱利用の複合システムに関して、効果的な導入のあり方を明らかにしている。

1. 研究開発目的

再生可能エネルギー大量普及社会に向けて、CO₂削減効果や雇用創出などの各種再エネ技術の特性と導入される地域の特性に基づき、既存エネルギーインフラを前提に中期的な視点から、費用対効果の高い再エネ導入のあり方についてフォアキャスティングで検討する。

2. 研究目標

CO₂削減量や雇用創出などの観点から効果的な再エネ技術の導入のあり方を、各技術の特性および導入される地域の特性を考慮して、フォアキャストにより定量的に明らかにする。具体的には、第一に、熱技術等を新たなオプションとして加え、再エネ導入効果の定量分析を可能とする再生可能エネルギー部門拡張産業連関表を拡充する。その上で、第二に、再エネを用いた発電技術 (太陽光、風力等) だけではなく、熱生産技術 (バイオ熱、地中熱等) も取り上げ、各技術のライフサイクルCO₂削減コストを明らかにする。第三に、再エネ技術が導入されることで生じ得るコベネフィットとして、地域における雇用の創出やシフト、関連産業の創出などの可能性を明らかにする。第四に、地域の自然・社会特性に応じた、費用対効果の高い再エネ技術の導入プランを明らかにする。

3. 研究開発内容

3-1. 再生可能エネルギー部門拡張産業連関表 (REFIO) の開発

再エネ技術導入がもたらす影響を環境・社会経済面から分析するために、横浜国立大学では再生可能エネルギー部門拡張産業連関表 (Renewable Energy-Focused Input-Output Table: REFIO) を開発してきた¹⁾。本研究では、これまで再エネ発電技術だけを対象としたREFIOを、再エネ直接熱利用技術の導入効果についても分析できるように更新した。地中熱、太陽熱、木質バイオマス熱を対象とし、直接熱利

用技術ならではの特性を考慮して、これら3種の技術に関連する部門を新設するための方法を開発した。その上で、関連企業・協会・自治体などへのヒアリング調査や文献調査から得た情報やコストデータを用いて、直接熱利用技術に関連する部門をREFIOに新設した。

また、再エネの普及により大量の施設解体・廃棄が見込まれるため、普及が進む太陽光発電と風力発電を対象とし、REFIOに施設廃棄部門を追加した。関連企業へのヒアリング調査や解体工事の現地調査から得た情報やコストデータを参考に、発電所の建設工事の詳細コストから解体・廃棄工事のコストを推計する方法を開発し、施設廃棄部門の投入係数ベクトルを作成した。

3-2. 再生可能エネルギー技術のライフサイクルCO₂削減コストの評価

今後の温室効果ガス削減に向けた再エネ技術選択のために、各技術の有効性をライフサイクルの観点から再エネを用いた発電技術12種と直接熱利用技術（給湯、空調）8種を対象とし、上述したREFIOを用いて、各再エネ技術の導入によるライフサイクルCO₂削減量を推計した上で、各再エネ技術のライフサイクルCO₂削減コストを評価した。

3-3. 再エネ導入地域の自然・社会条件がライフサイクルCO₂削減コストに与える影響

再エネ直接熱利用技術のCO₂削減効果は、地域の自然条件（気温など）や社会条件（代替される既存設備など）に大きく左右されるため、地域特性を考慮した再エネ技術評価の方法を開発した。その上で、地域別にライフサイクルCO₂削減量とライフサイクルCO₂削減コストを求め、削減量や削減コストに大きな影響を与える要因を明らかにするとともに、費用対効果の高い（CO₂削減コストが安価な）導入条件を明らかにした。

3-4. 再エネ技術導入が雇用に与える影響

再エネの普及により見込まれる社会経済効果として、再エネ技術のライフサイクルにわたる雇用創出・シフトに着眼し、REFIOを用いて分析した。経済産業省の長期エネルギー需給見通し（2015年）で示されている2030年の電源構成を想定し、2016年度から2030年度までの電源構成の変化により生じる雇用量的変化を試算した。その上で、雇用量的変化だけではなく、如何なる産業において如何なる職種の雇用が増減するのか、雇用の質についても検討した。

3-5. 費用対効果の高い再エネ技術の導入プラン

再エネ直接熱利用や海洋再エネ（洋上風力を除く）を取り上げ、地域の自然・社会特性を考慮し、技術単体ではなく地域レベルでの費用対効果の高い導入のあり方について検討した。再エネ熱利用に関しては、木質バイオマスを用いた地域熱供給の可能性について、熱供給形態の違いに着目して効果的な導入形態を明らかにした。海洋再エネに関しては、中期的な導入可能性が見込まれる海洋温度差発電（OTEC）を対象とし、電力と冷熱の複合生産に着目して効果の高い導入地域を探索した。

4. 結果及び考察

4-1. 再生可能エネルギー部門拡張産業連関表（REFIO）の開発

（1）REFIO更新版の作成方法

① 対象とした技術

表1. 1に示すように、これまで発電技術だけを対象としていたREFIOに、新たに8種の直接熱利用技術（給湯、空調）を加えた。

太陽熱に関しては、住宅用の給湯技術2種、太陽熱温水器（自然循環型）とソーラーシステム（強制循環型）を対象とした。導入対象を戸建住宅とし、自然循環型は集熱機面積4m²、貯湯槽容量200Lのサイズを、強制循環型は、集熱機面積4～6m²（水式・平板型）、貯湯槽容量200～300Lのサイズを想定した。

地中熱に関しては、業務用建物向けの空調技術として地中熱ヒートポンプ（クローズドシステム方式）を取り上げ、チラータイプ（中央熱源方式）とビルマルタイプ（個別熱源方式）の2種を想定した。

木質バイオマス熱では、業務用建物における給湯と空調における利用を想定し、バイオマス原料をボイラで燃焼させ温水を取り出すシステムを対象とした（温水ボイラ）。給湯に関しては中央式給湯方式とした。空調に関しても中央熱源方式とし、温水発生器（温熱源）と吸収式冷凍機（冷熱源）の組合せを想定した。なお、バイオマス原料は木質チップと木質ペレットの2種を取り上げた。

これら8種の再エネ熱生産技術の導入に伴う効果分析を実施するために、代替される従来技術についても考慮する必要がある。それ故に、表1. 1に示すように、再エネ熱利用システムとの代替あるいは組合せが可能な、従来方式の5種の給湯・空調システムについても対象とした。

表1. 1 REFIOに組み込んだ再エネ熱生産技術と従来技術

技 術		用 途	
再エネ熱生産技術	太陽熱	太陽熱温水器（自然循環型） ソーラーシステム（強制循環型）	家庭用給湯 家庭用給湯
	地中熱	地中熱ヒートポンプ（チラータイプ）	業務用空調
		地中熱ヒートポンプ（ビルマルタイプ）	業務用空調
	木質バイオマス熱	木質チップボイラー	業務用給湯
		木質ペレットボイラー	業務用給湯
		木質チップボイラー	業務用空調
		木質ペレットボイラー	業務用空調
	従来技術	ガス燃	ガス給湯器
空気熱		ウォータチリングユニット	業務用空調
		パッケージエアコン	業務用空調
石油燃焼		温水発生機	業務用給湯
		吸収式冷温水機	業務用空調

② 部門の新設

表1. 1の13種の技術について、ライフサイクルの観点から機器製造段階、建設（機器設置）段階、運用段階、燃料製造段階について新たに37部門を作成した（表1. 2）。例えば、太陽熱温水器は、既存の産業連関表の「ガス・石油機器・暖厨房機器」部門に含まれている。しかし、その生産額は全体の0.6%にすぎず、同部門の投入構造を用いて太陽熱温水器の生産による波及効果を測ることは無理がある。そのため、本研究では、太陽熱温水器を製造する独立部門を新たに作成した。他の技術に関しても同様であり、各技術の特徴が表されるように、関連する独立部門を新たに作成した。なお、木質バイオマス熱に関しては燃料製造が必要であり、木質ペレット製造について新たに部門を作成した（木質チップ製造は既存の産業連関表に該当する適切な部門が存在する）。

③ 新設部門の投入額ベクトルと産出額ベクトルの推計

新たな部門を作成するためには、投入額ベクトルと産出額ベクトルを推計する必要がある。投入額ベクトルは、原料費や人件費、機器費、燃料費、電力費、メンテナンス費、一般管理費などから構成されるコスト構造を推計することで作成される。産出額ベクトルは、生産物の販路構成を推計することで作成される。例えば、運用部門では、どの部門がどのくらいの熱を需要しているかを推計する。

新設部門の作成では、以下の二点に特徴を持つ推計手法を開発した。第一に、建設部門の投入額ベクトルの作成において、複数のデータを用いて大まかな費用構成を推計した上で、ヒアリング調査から得た工事設計図書等を用いて詳細なコスト項目への分割を行う。この手法により、一般性の高い投入係数を作成することが可能となる。第二に、運用部門のベクトル作成において、給湯負荷や空調負荷、およびエネルギー消費量の推計に建築研究所の「エネルギー消費性能計算プログラム」を用いる。産業連関分析と熱負荷計算ソフトウェアを組み合わせることにより、熱供給の特性を全国レベルでの影響評価に反映することができる。

④ 新設部門の組み込み

最後に、新たに作成した部門を既存の産業連関表に組み込む。新設部門（表1. 2）の生産活動は既存の部門に含まれている。例えば、太陽熱温水器の生産活動は、既存の産業連関表のガス・石油機器・暖厨房機器部門に含まれている。そのため、新設した太陽熱温水器部門の投入額・産出額を、ガス・石油機器・暖厨房機器部門の投入額・産出額から差し引いて、調整を行った。他の新設部門についても同様に、該当する既存部門の投入額・産出額から、新設部門のそれらを引き剥がすことで、表全体としての財・サービスのバランスが保たれるようにした。

表1. 2 REFIOに新設された再エネ熱生産技術に関連する部門

プロセス	技術	新設部門
設備製造	太陽熱給湯システム	太陽熱温水器（自然循環型） ソーラーシステム（強制循環型）
建設	太陽熱給湯システム	太陽熱温水器設置（自然循環型） 太陽熱温水器設置（強制循環型）
	ガス給湯システム	ガス給湯器設置
	地中熱利用システム	地中熱交換器設置 地中熱（チラー）熱源機設置・二次側工事 地中熱（ビルマル）熱源機設置・二次側工事
	空気熱利用システム	ウォータチリングユニット設置 パッケージエアコン設置
	木質バイオマス熱利用システム（給湯） 木質バイオマス熱利用システム（空調） 石油燃焼システム（給湯） 石油燃焼システム（空調） 木質バイオマス熱利用・石油燃焼システム（共通）	木質ボイラ設置（建屋建築を含む） 木質ボイラ設置（建屋建築を含む） 温水発生機設置 吸収式冷水機設置 二次側配管工事 室内機設置
運用	太陽熱給湯システム	太陽熱温水器（自然循環型）による熱供給 ソーラーシステム（強制循環型）による熱供給
	ガス給湯システム	ガス給湯器による熱供給
	地中熱利用システム	地中熱HP（チラー）による温熱供給 地中熱HP（チラー）による冷熱供給 地中熱HP（ビルマル）による温熱供給 地中熱HP（ビルマル）による冷熱供給
	空気熱利用システム	ウォータチリングユニットによる温熱供給 ウォータチリングユニットによる冷熱供給 パッケージエアコンによる温熱供給 パッケージエアコンによる冷熱供給
	木質バイオマス熱利用システム（給湯） 木質バイオマス熱利用システム（空調） 木質バイオマス熱利用システム（給湯） 木質バイオマス熱利用システム（空調） 石油燃焼システム（給湯） 石油燃焼システム（空調）	木質チップボイラによる温熱供給（給湯） 木質チップボイラによる温熱供給 木質チップボイラによる冷熱供給 木質ペレットボイラによる温熱供給（給湯） 木質ペレットボイラによる温熱供給 木質ペレットボイラによる冷熱供給 温水発生機による温熱供給（給湯） 吸収式冷水機による温熱供給 吸収式冷水機による冷熱供給
燃料製造	木質ペレット製造	木質ペレット製造

(2) 再生可能エネルギー部門拡張産業連関表（REFIO）更新版の特徴

本研究で作成したREFIO 更新版は以下の三点の特長を持つ。第一に、再エネ発電技術を対象とした産業連関表の作成は国内外でいくつか試みられているが、再エネ直接熱利用技術（給湯、空調）を分析できるものはそもそも見当たらない。第二に、熱生産に関しては物量単位（熱量）を用い、その他の財・サービスに関しては金額単位を用いるというハイブリッド表にしたことが挙げられる。既存の産業連関

表には熱の販売を行う熱供給業部門があるが、熱供給システムを所有して熱を自家消費する場合は、各部門の生産活動の中に含まれてしまう。それ故に、熱供給システムを稼働するための財・サービス、例えば、冷暖房による電力消費量や石油消費量は自家消費を行った各部門に計上されているが、熱の生産および消費は表章されていない。REFIO 更新版では、自家消費のための独立した熱供給部門を新たに作成して、仮設部門として表章している。ただし、自家消費のための熱には価格が存在しないため、熱を表す単位として、金額ではなく熱量を用いる。よって、REFIO更新版における財・サービスの需給バランス式は式 1-1 のように表現される。

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{A}_1^* \\ \mathbf{A}_2^* & \mathbf{A}_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \mathbf{X}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{F}_1 \\ \mathbf{F}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \mathbf{X}_2 \end{pmatrix} \quad \text{式 1-1}$$

ただし、 \mathbf{A}_1 ：既存部門の投入係数（百万円/百万円）、 \mathbf{A}_1^* ：熱供給・需要部門の投入係数（百万円/MJ）、 \mathbf{A}_2^* ：既存部門の投入係数（MJ/百万円）、 \mathbf{A}_2 ：熱供給・需要部門の投入係数（MJ/MJ）、 \mathbf{F}_1 ：既存部門の最終需要（百万円）、 \mathbf{F}_2 ：熱供給・需要部門の最終需要（MJ）、 \mathbf{X}_1 ：既存部門の生産額（百万円）、 \mathbf{X}_2 ：熱供給・需要部門の生産量（MJ）を示す。

第三に、再エネ熱生産技術だけでなく、それらによって代替される従来技術に関しても新たに部門を作成し、表に組み込んだことが挙げられる。再エネ発電技術の導入に伴うCO₂削減効果の評価では系統電力が妥当なベースラインとなるが、再エネ熱技術（給湯、空調）の場合は代替する従来技術を特定することが求められる。それ故に、表 1. 2 に示されるように、従来技術についても部門を新設した。

（3）REFIOにおける施設廃棄部門の組み込み

再エネの普及により大量の施設解体・廃棄が見込まれるため、普及が進む太陽光発電と風力発電を対象とし、REFIOに施設廃棄部門を追加した。以下では、新たに開発した施設廃棄部門の投入係数ベクトルの推計方法を述べた上で、推計された投入係数ベクトルを示す。

① 再エネ施設廃棄部門の投入係数ベクトルの推計方法

図 1. 1 に、新たに開発した再エネ施設廃棄部門の投入係数ベクトルに関する推計方法の概略を示す。解体・廃棄工事費は、直接工事費、間接工事費、消費税等で構成される。解体工事費の「明細」の入手は、事例も極めて少なく困難なため、関連企業へのヒアリング調査や現地調査から得た工事手順等に関する情報を参考とし、基本的には建設工事費詳細（実績値）から廃棄部門の投入係数ベクトルを推計する手法とした。

直接工事費に関しては、国土交通省の資料に基づき想定した11工事プロセス別（表 1. 3）に、図 1. 1 に従って、費用の詳細を建設工事費明細から推計する。例えば、②電気設備解体工事の場合、電気設

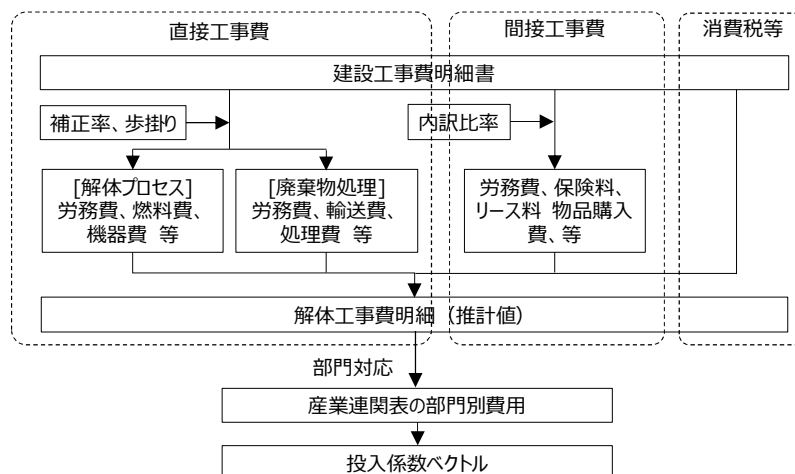


図 1. 1 再エネ施設廃棄部門の投入係数ベクトル推計手順の概略

表1. 3 再エネ施設の解体工事を構成する11種の工事プロセス

工事プロセス	工事の作業内容	太陽光発電
①直接仮設工事	足場養生など	
②電気設備解体工事	発電関連設備・制御設備の撤去（機器、電線・ケーブル、配管類）	○
③機械設備解体工事	空調設備、タンク、ボイラ、導水管、風力ナセル・ブレード等の撤去	
④内外装解体工事	床材・壁材・天井材・建具等の撤去（建屋がある場合に考慮）	
⑤屋根材解体工事	屋根材（鋼板等）の撤去（建屋がある場合に考慮）	
⑥躯体解体工事	コンクリートとりこわし、鉄筋・鉄骨の解体（建屋がある場合に計上）	
⑦基礎解体工事	基礎撤去、取水口の撤去、杭引抜き工事など	○
⑧附帯施設解体工事	構内舗装解体、外構とりこわし、フェンス撤去など	○
⑨埋設配管解体工事	地中配管の撤去（風力など、地中に配管が埋められている場合に考慮）	
⑩整地	埋戻し・砕石敷きなど	○
⑪建設副産物処理	解体に伴い発生する建設副産物（廃棄物、有価物）の処理	○

備の建設時の労務費に補正率を乗じることで、解体時の労務費を推計する。補正率は、国土交通省の資料において、作業別に細かく設定されている。また、建設工事費明細から電気設備に用いられている部品等の必要量（＝廃棄物量）がわかるので、それらから廃棄物処理における労務費（＝積込費）、輸送費、処理費などを推計する。

間接工事費は、共通仮設費、現場管理費、一般管理費で構成されている。例えば、一般管理費の場合、建設工事費明細における直接工事費に占める一般管理費の割合と同じとして推計する。その上で、解体を請け負う企業の一般管理費の内訳比率を利用して、労務費、保険料、リース料、物品購入費など詳細な費用について推計する。

上述のように推計された解体工事費の明細をもとに、各費用項目を産業連関表の部門に対応させることで、部門別費用（＝各部門から当該廃棄部門への投入額）を求め、最終的に、当該廃棄部門の投入係数ベクトルを作成する。

② 太陽光発電の施設廃棄部門の投入係数ベクトル

表1. 4に一例として、大規模地上設置型の太陽光発電施設（スクリュータイプ基礎）の建設工事費明細から推計した、施設廃棄部門の投入係数ベクトルの一部を示す。表の値は、表示されている各部門から施設廃棄部門への投入係数を示しており、投入係数が大きい順に並べている。「廃棄物処理」部門からの投入が最も大きく、解体時に利用する重機の利用に係わる「物品賃貸業」（重機のリース）や「石油製品」（燃料）などがそれに続く。また、「法務・財務・会計」や「損害保険」などのサービス部門からの投入、さらには、表中では「その他」に含まれているが「茶・コーヒー」部門などからの投入も認められる。これらは間接工事費（一般管理費）において発生する費用である。

表1. 4 大規模太陽光発電施設（スクリュータイプ基礎）部門の投入係数ベクトルの一部

部門名	投入係数	部門名	投入係数	部門名	投入係数
廃棄物処理（産業）	1.E-01	事務用品	3.E-03	建物サービス	1.E-03
物品賃貸業（貸自動車を除く）	7.E-02	広告	3.E-03	洗濯業	1.E-03
再生資源回収・加工処理	2.E-02	小売	2.E-03	損害保険	1.E-03
石油製品	1.E-02	不動産賃貸業	2.E-03	卸売	1.E-03
企業内研究開発	7.E-03	その他の対事業所サービス	2.E-03	機械修理	7.E-04
鉄道旅客輸送	5.E-03	固定電気通信	2.E-03	土木建築サービス	6.E-04
法務・財務・会計サービス	5.E-03	金融	1.E-03	その他	1.E-03

4-2. 再生可能エネルギー技術のライフサイクルCO₂削減コストの評価

(1) 再エネ技術のライフサイクルCO₂削減コストの推計方法

上述のREFIO更新版を用いて、20種の再エネ技術のLC-CO₂削減コストを推計した。CO₂削減コストは、基本的には式1-2～4に従って、従来技術を再エネ技術で代替する時に増加する費用を、技術代替によ

って削減されるCO₂排出量で除して求めた。再エネ発電技術に関しては、系統電力をベースラインとして削減コストを評価した。再エネ熱生産技術に関しては、既設の従来型給湯・空調設備を代替することを想定して、削減コストを評価した。例えば、太陽熱温水器の場合は、その導入によって代替されるガス給湯器による給湯をベースラインとした。

$$CRC_i = (LCC_i - LCC_j) / (LCCO_{2,j} - LCCO_{2,i}) \quad \text{式 1 - 2}$$

ただし、 CRC_i ：再エネ技術*i*のCO₂削減コスト（円/t-CO₂）、 LCC_i ：再エネ技術*i*のライフサイクルコスト（円/kWh）、 LCC_j ：従来技術*j*のライフサイクルコスト（円/kWh）、 $LCCO_{2,i}$ ：再エネ技術*i*のライフサイクルCO₂排出量（g-CO₂/kWh）、 $LCCO_{2,j}$ ：従来技術*j*のライフサイクルCO₂排出量（g-CO₂/kWh）である。

$$LCC = (C_{INV} + C_{OM} \times t) / (Q \times t) \quad \text{式 1 - 3}$$

ただし、 C_{INV} ：初期投資額（円）、 C_{OM} ：運用コスト（円/年）、 Q ：年間発電量または年間熱供給量（kWh/年）、 t ：評価期間（実勢または法定耐用年数）（年）である。

$$LCCO_2 = (\mathbf{e}^T (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{F}_C + \mathbf{e}^T (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{F}_{OM} \times t) / (Q \times t) \quad \text{式 1 - 4}$$

ただし、 \mathbf{e} ：直接CO₂排出原単位ベクトル（t-CO₂/百万円）、 \mathbf{T} ：転置、 \mathbf{I} ：単位行列、 \mathbf{A} ：投入係数行列（REFIO 更新版）、 \mathbf{F} ：最終需要ベクトルである。ここで、部門別の直接CO₂排出原単位を用意する必要があるが、既存部門については国立環境研究所の3EID の値を用い、新設37部門については各部門への化石燃料の投入額に基づき新たに推計した。式 1 - 4 に従い、建設の総費用（ C_{INV} ）を最終需要ベクトル \mathbf{F}_C として、運用の総費用（ C_{OM} ）を最終需要ベクトル \mathbf{F}_{OM} として与えることで、ライフサイクルにわたり直接間接に誘発されるCO₂、すなわちライフサイクルCO₂排出量を求めることが出来る。

（2）再エネ技術のライフサイクルCO₂削減コスト

図 1. 2 に、20種の再エネ技術（発電、直接熱利用）のライフサイクルCO₂削減コスト（以下、LC-CO₂削減コスト）の推計値を示す。なお、ここで示す結果は、日本の平均的な状況を想定して、各技術の特徴を定量的に明らかにするものである。



図 1. 2 再エネ技術のライフサイクルCO₂削減コスト

以上のように、REIFOの利用により20種の再エネ技術のLC-CO₂削減コストの横並びでの評価が可能となり、再エネ直接熱利用（給湯）が中期的に有望な脱炭素オプションとなることが認められた。

4-3. 導入地域の自然・社会条件がライフサイクルCO₂削減コストに与える影響

上記（4-2.）では、日本の平均的な条件のもとに各種再エネ技術のLC-CO₂削減コストの結果を示した。ただし、再エネ熱生産技術に関しては、導入する地域によってLC-CO₂削減コストが大きく変わり得る。以下では、太陽熱、地中熱、木質バイオマス熱を対象とし、導入地域の自然・社会条件が、LC-CO₂削減コストに与える影響について分析した結果を示す。

（1）地域特性を考慮した評価方法

給湯や空調において従来技術から再エネ技術に切り替えることによるライフサイクルCO₂削減コストは、導入地域の日射量や気温などの自然条件、既存の給湯・空調機器の種類やエネルギー価格などの社会条件に大きく依存する。

図1. 3に地域特性を考慮した評価方法の概略を示す。各システム（従来技術、再エネ技術）の基礎データを出発点にして、前述の式1-2~4に従い、各々のLC-コストとLC-CO₂排出量を求め、LC-CO₂削減コストを地域別に推計した。図中の赤字は地域によって異なる条件を意味しており、特に給湯や空調のエネルギー消費量は、これらの条件に依存して大きく異なる。例えば、太陽熱給湯におけるエネルギー

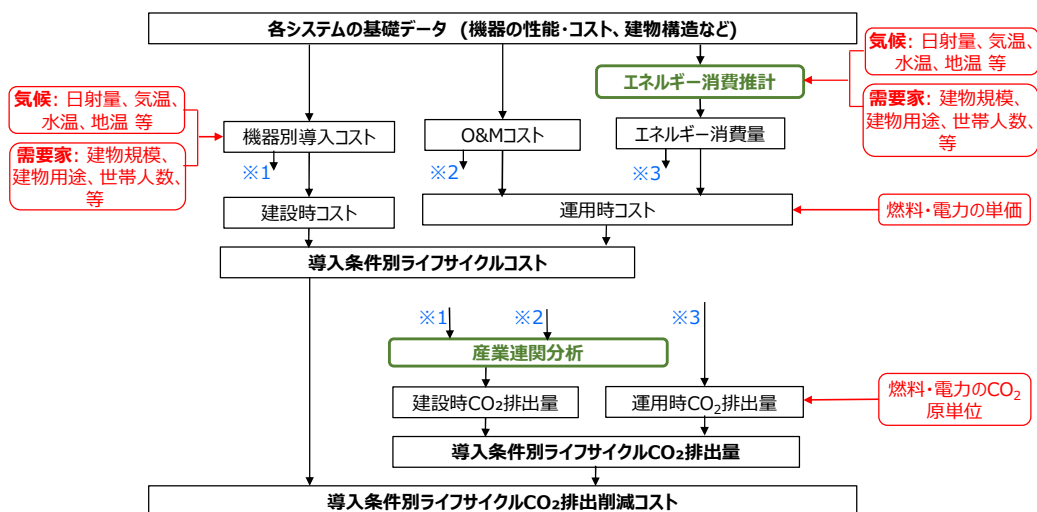


図1. 3 導入条件別ライフサイクルCO₂排出削減コスト推計の概略

一消費量の推計では、本研究室で開発したエネルギー消費推計プログラムを利用し、日射量や気温などの気候条件、建物規模や世帯人数などの需要家条件を考慮し、地域別にエネルギー消費量を推計した。空調に伴うエネルギー消費量の推計には建築研究所の「エネルギー消費性能計算プログラム」を用いた。また、運用時コストや運用時CO₂排出量の推計においても地域条件が結果を大きく左右する。例えば、従来給湯器においてCO₂排出係数が大きい燃料や単価の高い燃料を用いている場合は有利（削減コストが小）となる。このように、各地域の自然・社会条件を反映して、導入条件別にLC-CO₂削減コストを推計した。

（2）太陽熱の導入地域別ライフサイクルCO₂削減コスト

図1. 4に一例として、住宅用太陽熱温水器（自然循環型）の導入によるLC-CO₂削減コストを示す。各都道府県の県庁所在地に導入した場合のLC-CO₂削減コストを示しており、マイナスの値は、太陽熱温水器の導入により、CO₂排出量のみならずコストも削減できることを示している。

多くの市（区）において、LC-CO₂削減コストがマイナスとなっており、特に静岡市と水戸市では費用対効果が高いと言える。静岡市は日射量の多いことが主因だが、従来機器の燃料費や年間給湯負荷が全国中位であるなど他の条件も整っているため、削減コストが大きくマイナスとなる。甲府市は、静岡市以上に日射量が多いが、従来機器の燃料費がもともと安価なため、静岡市ほどはマイナスの値が大きい。逆に、秋田市は日射量が少ないことが主因で、那覇市はそもそも年間給湯負荷が少ないことが主因で、削減コストが大きい。

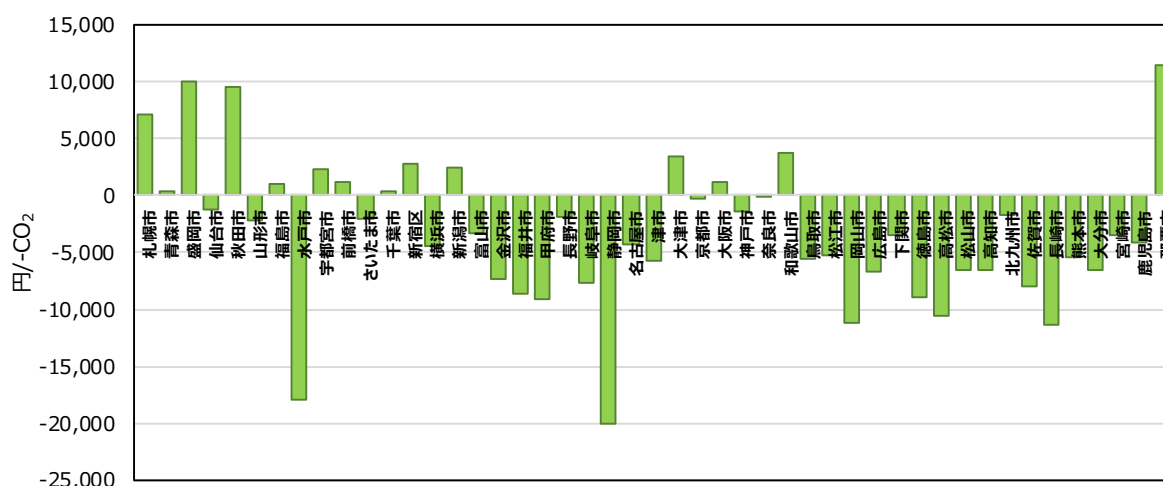


図1. 4 住宅用太陽熱温水器（自然循環型）の導入地域別ライフサイクルCO₂削減コスト

（3）地中熱の導入地域別ライフサイクルCO₂削減コスト

図1. 5に、事務所における地中熱ヒートポンプ空調（クローズドループ）の導入によるLC-CO₂削減コストを示す。図1. 5は、如何なる条件のもとにおいて地中熱ヒートポンプ空調（以下、GSHP）が効果的かを示している。既存技術（機器種類と燃料種）、気候、使用電力、建物規模の違いを組み合わせた640パターンを設定して削減コストを推計し、削減効果が認められた250パターンの条件を4種（A～D）に類型化して、各グループのLC-CO₂削減コストの平均値と最小値を示している。

中小規模（延床面積4,500m²）の建物に設置されている吸収式冷温水器をGSHPで代替することが費用対効果に最も優れていることがわかる（C、D型）。出力が比較的小さい吸収式冷温水器のLC-コストが大きいことが主因であり、代替される既存設備の種類や出力がLC-CO₂削減コストを大きく左右していると言える。さらにCO₂排出係数が小さい電力が利用できると（D型）、GSHP稼働時の電力消費に伴うCO₂排出が少ないので、より効果的となる。また、空気熱HPをGSHPで代替する場合、LC-CO₂削減コストは全般的には大きい。寒冷地域（北海道や北日本など）への導入（A型）は、中小規模と大規模（延床面積45,000m²）のいずれにおいても一定の効果を持つ。これは、寒冷地域では、GSHPは空気熱HPに比べてCOPの低下が小さく、稼働時のCO₂排出量が減少するためである。

前述したように（図1. 2）、地中熱ヒートポンプ（空調）導入のLC-CO₂削減コストは全体としては他の再エネ技術と比べて高い傾向があるが、導入条件によっては費用対効果の高い導入が可能となる。

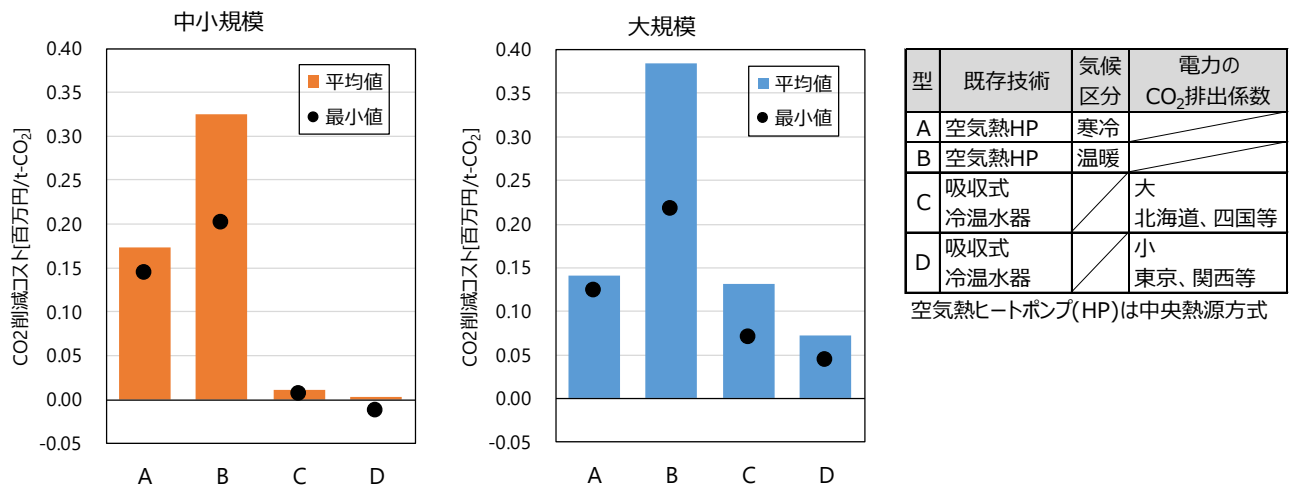


図1. 5 事務所における地中熱ヒートポンプ空調の導入条件別ライフサイクルCO₂削減コスト

(4) 木質バイオマス熱の導入地域別ライフサイクルCO₂削減コスト



図1. 6 木質チップボイラ導入に伴う地域別の年間ライフサイクルCO₂削減量とライフサイクルCO₂削減コスト（宿泊施設、重油ボイラ代替）

図1. 7 木質チップボイラ導入に伴う建物用途別のライフサイクルCO₂削減コスト（北海道、重油ボイラ代替）

以上のように、木質バイオマスのLC-CO₂削減コストは、太陽熱や地中熱のそれらと異なり、日射量や気温などの自然条件の影響はあまり受けず、建物用途や代替される従来熱源機器などの社会条件に留意して費用対効果の高い条件に従い優先的に導入を進めることが重要である。

(5) まとめ

以上、本研究では、地域の自然・社会条件を考慮した再エネ熱直接利用技術の評価手法を開発し、その手法を用いて各技術の特性（ライフサイクルCO₂削減量、ライフサイクルコスト、ライフサイクルCO₂削減コスト）を推計した。これらの各技術の特性は導入条件に大きく左右されることを定量的に示し、地域の自然・社会条件を考慮して効果的に導入を進めるべきということを定量的に明らかにした。本研究の成果は、費用対効果の高い再エネ利用拡大に向けた政策の立案に向けて、再エネ熱直接利用技術の具体的な導入促進策の検討に資すると考えられる。

4-4. 再エネ技術導入が雇用に与える影響

再エネ技術の第一義的な価値は、エネルギー供給において化石燃料消費やCO₂排出を大きく削減できることにあるが、他方で社会経済的な価値の創出についても期待されている。ここでは、再エネ技術導入が雇用に与える影響について、REFIOを用いて検討した結果を示す。

再エネ発電技術のライフサイクル雇用創出ポテンシャルは過去に推計され、各技術の特性について明らかにされている²⁾。本研究では、第一に、再エネ熱利用技術に関して、再エネ発電技術と同様に雇用創出ポテンシャルを明らかにした。第二に、再エネ発電技術について、2030年の電源構成が達成される場合を想定し、日本全体として雇用がどのように変化するかを明らかにした。

(1) 再エネ直接熱利用技術の雇用創出ポテンシャル

再エネ直接熱利用技術として、太陽熱給湯（自然循環型、強制循環型）、地中熱ヒートポンプ空調（個別熱源方式、中央熱源方式）、木質バイオマス熱空調・給湯（チップ、ペレット）の計8種を取り上げ、それら技術の雇用創出ポテンシャルを、REFIOを用いて明らかにした。

各部門で誘発される雇用量（ L ）は、式1-5により推計される。

$$\mathbf{L} = \hat{\mathbf{I}}[\mathbf{I} - \mathbf{A}]^{-1}\mathbf{F} \quad \text{式1-5}$$

ここで、 \mathbf{L} は雇用誘発量ベクトル、 $\hat{\mathbf{I}}$ は雇用係数の対角行列、 \mathbf{I} は単位行列、 \mathbf{A} はREFIOから求められた投入係数行列、 \mathbf{F} は最終需要ベクトルである。なお、最終需要ベクトル \mathbf{F} は、建設部門の場合は初期投資額、運用部門の場合は熱供給量である。

図1. 8に8種の再エネ直接熱利用技術の供給熱量あたりのライフサイクル雇用創出ポテンシャルを示す。第一に、地中熱ヒートポンプと木質チップ・ペレットを用いた空調4種のGWhあたりの雇用量は、給湯4種のそれらと比較して大きい。空調は稼働する季節が限定され、年間を通して需要がある給湯に比べると、空調の総供給熱量が少ないことに起因する。第二に、木質チップ・ペレットを用いた給湯・空調は、太陽熱や地中熱に比べて、建設時に比して運用時における雇用創出が大きいことが認められる。木質チップ・ペレットはその燃料生産に伴い生み出される雇用が大きい一方で、太陽熱や地中熱は燃料を必要とせず、設備稼働に必要な電力の生産に伴う雇用創出も小さい。

上述したように再エネ直接熱利用技術の導入は雇用を生み出すが（図1. 8）、それらが既存技術の代わりに導入される場合、既存技術の雇用創出機会が失われる。図1. 9は一例として、給湯のために重油ボイラの代わりに木質チップボイラを導入する場合を取り上げ、運用段階における産業部門間の雇用シフトを示している。木質チップボイラを選択によって、重油ボイラ運用（運転、点検、補修）に係る直接的な雇用「重油給湯（運用）」がマイナスになるとともに、重油利用に伴う間接的な雇用である

「商業」が大きくマイナスとなる。他方で、木質チップボイラ運用に係る直接的な雇用「木質チップ給湯（運用）」、ならびに、「育林」「木材チップ」「素材」などの燃料生産に係る間接的な雇用が大きくプラスとなる。特に、マイナスとなる「商業」は重油取引活動が多くを占めており、導入地域における石油製品販売事業における雇用減少を、逆に、林業関連産業に雇用増加をもたらす。再エネ導入による地域における雇用増だけに着目するのではなく、雇用の産業間シフトを定量的に把握することが重要である。

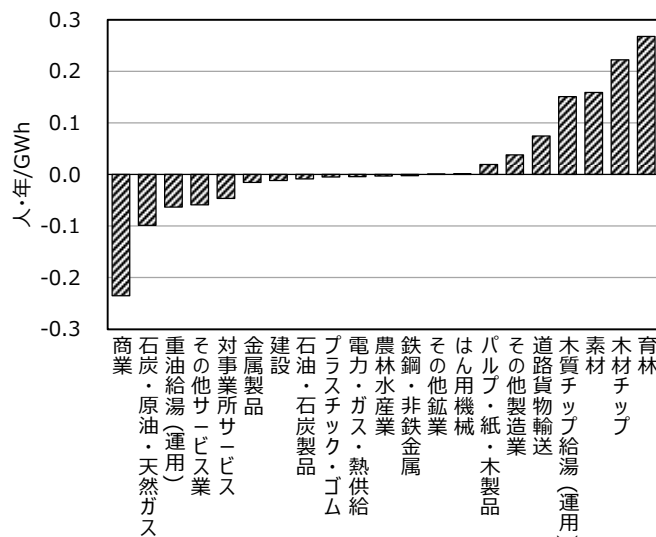
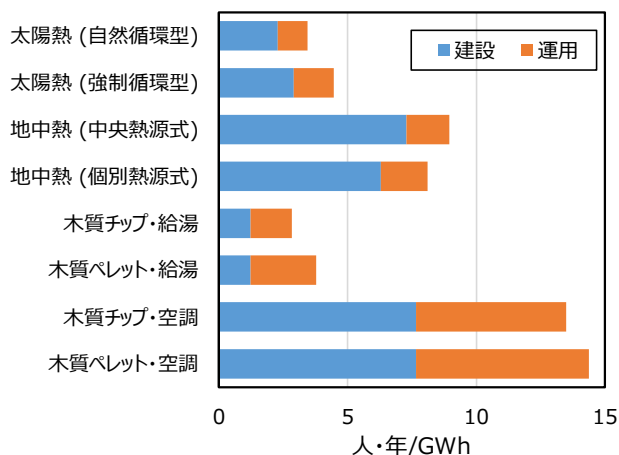


図1. 8 再エネ直接熱利用技術のライフサイクル雇用創出ポテンシャル

図1. 9 木質チップボイラ（給湯）導入に伴う運用段階における間接雇用シフト

(2) 電源構成の変化が与える雇用シフト

再エネ発電技術の普及は火力発電など既存技術の新規導入や発電量の減少をもたらし、それらの減少は雇用機会の喪失につながる。このような雇用の増減・シフトについて、2015年の長期エネルギー需給見通し（文献3）における2030年度の電源構成が達成される場合を想定し、REFIOを用いて分析した。

2016年度の電源構成（実績）に基づき、発電に伴い国内で直接間接に誘発される雇用量は約58万人・年と推計された。2030年度では再エネ発電の比率が高まり電源構成は変化するが、2030年の雇用量も2016年度と同じく約58万人と推計され、雇用総量では変化はほとんど認められなかった。

しかし、図1. 10に示されるように、雇用の内訳は2016年度と2030年度では異なる。火力発電と再生可能エネルギー発電に係る雇用は、2016年度にはそれぞれ全体の58%と21%を占めるが、2030年度にはそれぞれ全体の40%と41%と大きく変化する。特にバイオマスと太陽光の割合が増加しており、地方部において分散的に雇用が生まれることが推察される。なお、原子力発電所に関しては、その多くが2016年度は停止中であったが雇用はそのまま維持されていると想定しているため、2016年度と2030年度で大きな変化はない。また、図1. 10は発電所の運用に伴う雇用であり、再エネ発電設備の建設に伴う雇用は含まれていない。2016年度から2030年度まで同じペースで再エネ発電設備が新設されると仮定すると、毎年、約8.4万人・年の雇用が継続して生まれることになる。

図1. 11は、2016年度と比較して2030年度に生じる雇用の各産業部門における増減を示している（400部門以上の詳細結果を15部門に集約した結果）。前述したように雇用の総量はほとんど変化しないが、火力発電と再エネ発電では直接間接に雇用が生じる産業部門が異なるため、各産業部門における増減が異なる。2016年度に比して2030年度では、火力発電所における直接的な雇用は減少し、太陽光発電など再エネ発電に伴う直接的な雇用は増加する。また、電源構成の変化により間接的に生じる増減に関しては、「対事業所サービス」「運輸」「建設（＝建設補修）」などは増加分に対して減少分の方が大きい。逆に、「林業」「木材・木製品（＝チップ）」における間接的な雇用は増加する。直接間接に増加する雇用は再エネ発電の運転や点検、燃料調達に係るものであり、再エネ導入地域で対応可能性が高い仕事であり、雇用の増加とあわせて関連産業の創出も期待される。各産業部門で増減量が異なるため、再エ

ネ導入に伴い産業間の雇用シフトが生まれる。なお、本分析では、2015年度の長期需給見通しに基づいて推計したが、2030年度における再エネ比率目標は引き上げられる見込みであり、図1. 11の各産業部門の増減もより大きくなることが予想され、再エネの大幅導入にあたっては雇用の円滑なシフトや地元産業の育成に対する支援が重要になる。

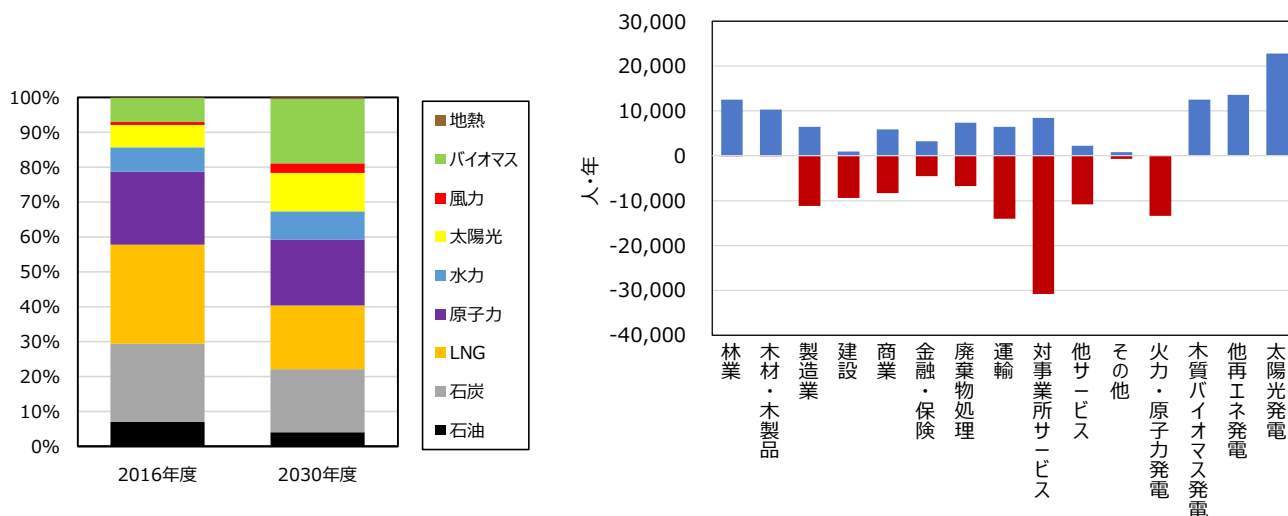


図1. 10 発電に係る直接間接雇用量の発電技術別の内訳

図1. 11 発電に係る直接間接雇用量の各産業部門における増減（2016年度→2030年度、運用分）

4-4. 費用対効果の高い再エネ技術の導入プラン

本節では、これまでの分析で明らかになった各再エネ技術の特性を土台にして、地域レベルでの費用対効果の高い導入のあり方について検討した結果を示す。再エネ直接熱利用技術としては木質バイオマスを、海洋再エネ技術としては海洋温度差発電を取り上げ、地域のエネルギーシステムの中心として効果的に機能する可能性について分析した。

(1) 木質バイオマス熱の地域熱供給の可能性

地域における木質バイオマスを用いた熱供給システムとして、複数の需要家の熱需要を満たすためにエネルギーセンターを設けてそこから各需要家へ熱を供給する地域熱供給が挙げられる。一定の木質バイオマスのポテンシャルを持つ日本の地方部を想定し、木質チップボイラを用いた個別熱供給と地域熱供給を比較することで、地域における導入のあり方を検討した。図1. 12に示されるように、個別熱供給では、建物ごとに設置された木質チップボイラで給湯し、地域熱供給では、共通の木質チップボイラ（エネルギーセンター）から地域配管を通して各需要家に給湯する。

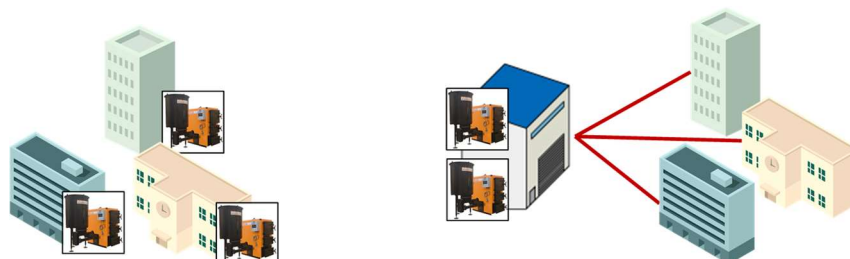


図1. 12 木質バイオマスを用いた熱供給システム（左：個別熱供給、右：地域熱供給）

図1. 13に、3種類の需要家群における個別熱供給と地域熱供給のLC-CO₂削減コストを示す。建物に個別設置された重油ボイラの代わりに、木質チップボイラ（個別／地域熱供給）を導入する際のLC-CO₂削減コストである。「役場中心群」は役場を中心に小学校と図書館が隣接している場合、「公共施設群」は役場、学校、病院などが中心地にコンパクトに集まっている場合、「宿泊施設群」は観光地において

ホテルが隣接している場合を、実際の基礎自治体の状況を参考に、それぞれ想定している。

本研究では、地域熱供給の可能性を探るための評価モデルを開発し、中山間地等におけるコンパクト（総配管長が短い）、かつ、小さな需要家（一か所当たりの熱需要が小さい）の集合体においては、地域熱供給のメリットがデメリットを上回る可能性を示した。なお、雇用効果に関しても推計が可能なモデルとなっており、また、太陽熱などにも適用可能であり、今後の地域における再エネ熱利用技術のあり方を具体的に検討するためのツールとしての活用が期待される。

図1. 1 3 木質チップボイラを用いた個別／地域熱供給のライフサイクルCO₂削減コスト（北海道、重油ボイラ代替）

（2）海洋温度差発電の複合利用の可能性

海洋温度差発電（OTEC）は、他の海洋再エネ技術とは異なり、発電後の海洋深層水を農業や冷房などに再利用（海洋深層水の複合利用）が出来るという大きな特徴を持つ。ここでは、日本の各地域に導入することを想定して、図1. 1 4 に示す2種のシステムを比較することで、地域における費用対効果の高いOTECの導入可能性について、LC-CO₂削減コストを指標として評価した。OTEC複合システムでは、発電後の海洋深層水を冷熱源として、業務施設の冷房と農業施設の土壌冷却に複合利用することを想定している。OTEC単独システムでは、海洋深層水は発電のみに利用され、冷房はエアコンで、土壌冷却はヒートポンプ冷却機を用いると想定している。

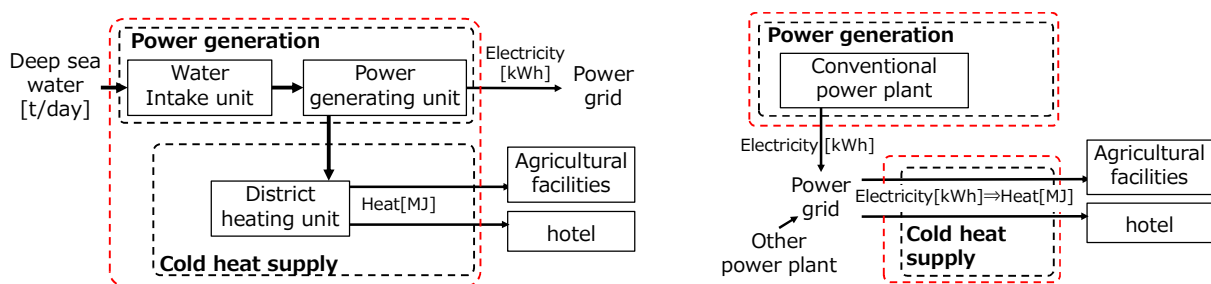


図1. 1 4 電力と冷熱を供給するOTEC複合システム(左)と電力のみを供給するOTEC単独システム(右)

図1. 15 は、LCCO₂ 削減コストが40,000[円/t-CO₂]以下となる地域を取り出し、それらの値を示している。横軸は複合利用なしの場合、縦軸は複合利用ありの場合のLCCO₂削減コストを示す。また、バブルの大きさは地域の人口、バブルの色は気候区分を示す。傾向として、低緯度の温暖地域のLCCO₂ 削減コストが小さいことが分かる。文献⁴⁾を参考として30,000[円/t-CO₂]以下を許容可能な基準と仮定すると、人口約1,200人以上の沖縄離島部、沖縄本島、人口約1.3万人以上の九州離島部、四国の大規模離島の一部（小豆島、島後島）の20地域がOTEC導入において有望な地域であると考えられる。

これら20地域のLCCO₂削減コストが小さい理由は、第一に、低緯度に位置し表層水温が高く、発電量が大きいためである。従来システムにおけるLCCO₂排出量が大きい電源を代替する割合が高くなり、LCCO₂削減コストは小さくなる。第二に、低緯度に位置するか、もしくは、地域の規模が大きいが故に、多くの冷熱需要を確保でき、複合利用の効果が大きいためである。図1. 15 に示されるように、これら20地域すべてで、複合利用なしのLCCO₂削減コストは30,000[円/t-CO₂]を上回っている。特に、17 地域では、複合利用によるLCCO₂削減コストの減少は50%以上となっており、複合利用がOTECのLCCO₂ 削減コストの減少に大きく寄与している。特に、上記の2条件のいずれも満たす宮古島（沖縄県）や石垣島（沖縄県）の場合、複合利用のLCCO₂ 削減コストは1,000[円/t-CO₂]に満たないと評価された。

以上のように、海洋深層水を発電ではなく冷熱源としても利用することで、OTECが離島などにおける地域エネルギーシステムを中心として機能する可能性がある。また、冷熱源を建物空調や土壌冷却に加えて養殖などに幅広く活用することで、OTECは費用対効果のより高い脱炭素オプションになることが示唆される。

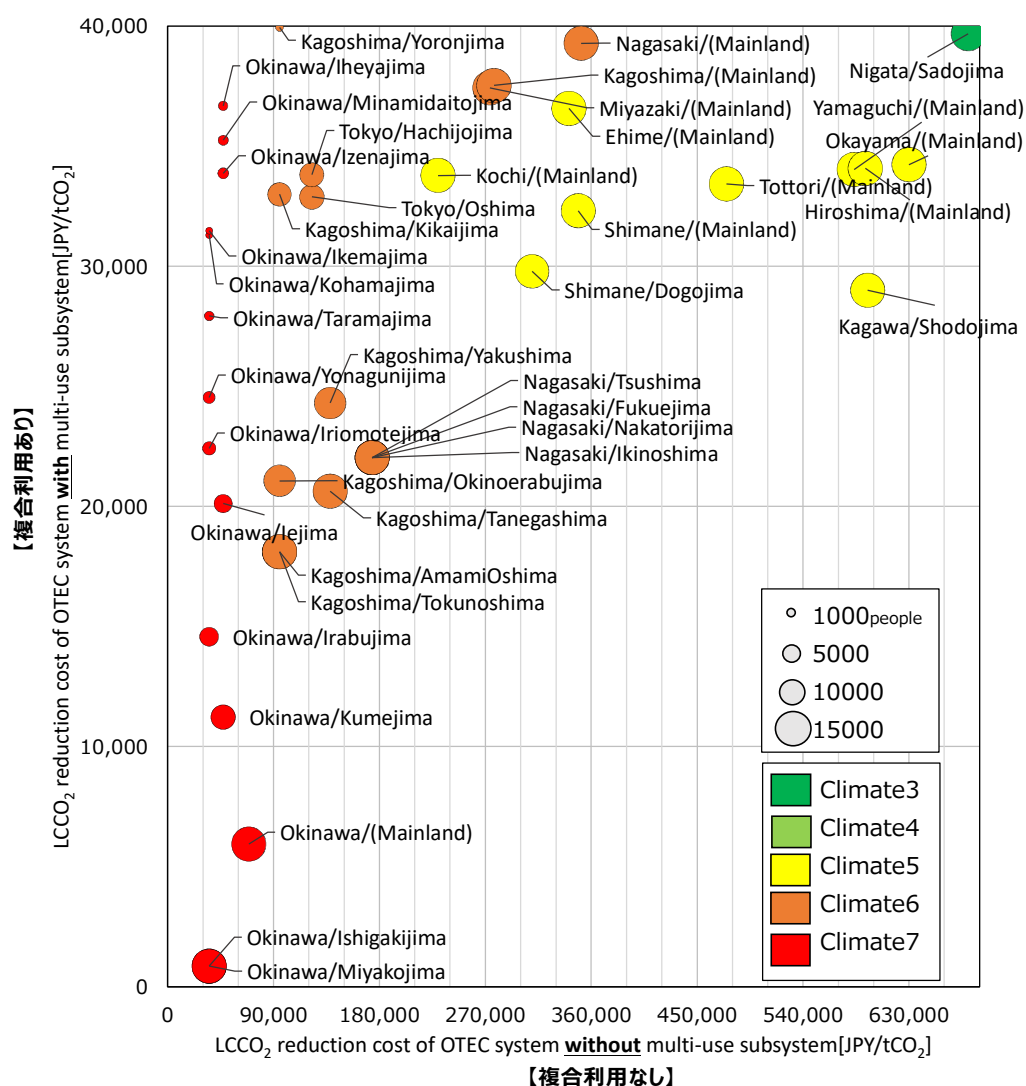


図1. 15 OTECシステムの地域別のライフサイクルCO₂削減コスト

5. 研究目標の達成状況

サブテーマ1について「目標通りの成果を上げた」。第一に、熱技術等を新たなオプションとして加え、再エネ導入効果の定量分析を可能とする再生可能エネルギー部門拡張産業連関表を改良した。その上で、再エネを用いた発電技術（太陽光、風力等）だけではなく、熱生産技術（バイオ熱、地中熱等）も取り上げ、各技術のライフサイクルCO₂削減コストを明らかにした。第三に、再エネ技術が導入されることで生じ得るコベネフィットとして、地域における雇用の創出やシフト、関連産業の創出などの可能性を明らかにした。第四に、地域の自然・社会特性に応じた、費用対効果の高い再エネ技術の導入プランを明らかにした。

6. 引用文献

- 1) 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
- 2) Hiroki Hondo, Yue Moriizumi (2017) Employment creation potential of renewable power generation technologies: a life cycle approach, Renewable and Sustainable Energy Reviews 2017, 79, 128-136
- 3) 経済産業省, 長期エネルギー需給見通し, 2015年7月
https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/pdf/report_01.pdf
- 4) 佐野史典, 秋元圭吾, 本間隆嗣, 徳重功子 (2016) 日本の2030年温室効果ガス排出削減目標の評価, エネルギー・資源学会論文誌, 37(1), 51-60

II. 成果の詳細

II-2 合理的な将来エネルギーインフラ構築の分析

国立研究開発法人 産業技術研究所

安全科学研究部門

田原 聖隆

安全科学研究部門

工藤 祐揮（平成30～令和元年度）

ゼロエミッション国際共同研究センター

小澤 暁人（令和元～令和2年度）

ゼロエミッション国際共同研究センター

森本 慎一郎（令和2年度）

〔要旨〕

再エネ大量普及の長期的な道筋を明らかにするために、2050年までを対象に複数のシナリオに基づいて、再エネの大量導入によってCO₂排出量大幅削減を実現可能なエネルギーシステム像に関する定量的情報を、バックキャストにより示す。まず、海洋再エネ技術（洋上風力・波力・潮力・海流・潮流・海洋温度差発電）とエネルギー輸送・貯蔵技術（ローカル（蓄エネ）水素・グローバル水素）を対象として、実用段階におけるライフサイクルCO₂排出量ならびにコストを算出する。また、エネルギーモデルを用いて、将来の技術開発や社会状況の変化、ならびに、コベネフィットを考慮して、2050年までにCO₂排出量大幅（80%）削減可能な地域別の再エネ供給パターン・エネルギー需要パターンを複数提示する。第三に、ライフサイクル評価およびエネルギーモデルを用いた分析結果に基づいて、エネルギー需要パターンと再エネを含めたエネルギー供給パターンを満たし、かつCO₂排出量大幅削減可能なエネルギー輸送・貯蔵技術の最適な組み合わせを明らかにし、将来のエネルギーインフラの姿を提示する。

1. 研究開発目的

再エネ大量普及の長期的な道筋を明らかにするために、個別技術ではなく個別技術の導入を支えるインフラに着眼し、将来の効果的な再エネ導入に必要なインフラの姿をエネルギーシステムモデルにより描出し、インフラ整備のあり方をバックキャストで検討する。

2. 研究目標

2050年までを対象に複数のシナリオに基づいて、再エネの大量導入によってCO₂排出量大幅削減を実現可能なエネルギーシステム像に関する定量的情報を、バックキャストにより示す。具体的には、第一に、海洋再エネ技術とエネルギー輸送・貯蔵技術を対象として、実用段階におけるライフサイクルCO₂排出量ならびにコストを算出する。第二に、将来の技術開発や社会状況の変化、ならびに、コベネフィットを考慮して、2050年までにCO₂排出量大幅（80%）削減可能な地域別の再エネ供給パターン・エネルギー需要パターンを複数提示する。第三に、エネルギー需要パターンと再エネを含めたエネルギー供給パターンを満たし、かつCO₂排出量大幅削減可能なエネルギー輸送・貯蔵技術の最適な組み合わせを明らかにし、将来のエネルギーインフラの姿を提示する。

3. 研究開発内容

3.1. 将来技術の実用段階におけるライフサイクル評価

3.1.1. 海洋再エネ技術

本研究では、表2. 1に示す5種の海洋再エネ技術を対象として、ライフサイクルCO₂原単位（LCCO₂）とライフサイクルコスト（LCコスト）を推計した。

海洋エネルギー発電のLCCO₂（g-CO₂/kWh）は、海洋エネルギー構造物や発電装置の製造や設置、設備補修に関わるCO₂排出量を、想定する運用期間中の総発電量で除することによって試算した。総発電量を求

表2. 1 対象とした海洋再エネ技術の各ケースの詳細

発電方式	プロジェクト名	定格出力	単位	引用文献
洋上風力	北九州(ジャケット式)	2	MW	(NEDO, 2009)
洋上風力	ふくしま未来(浮体)	2	MW	(福島洋上風力コンソーシアム, 2018)
洋上風力	ふくしま新風(浮体)	7	MW	(福島洋上風力コンソーシアム, 2018)
洋上風力	ふくしま浜風(浮体)	5	MW	(福島洋上風力コンソーシアム, 2018)
洋上風力	FLOATGEN DEMO(浮体)	2	MW	(The Scottish Government, 2015)
洋上風力	GICON(浮体)	6	MW	(GICON, 2016)
洋上風力	Hexicon generation 1(浮体)	10	MW	(Hanne Lerche Raadal et al., 2014)
洋上風力	WindFloat Oregon(浮体)	8	MW	(Principle Power, Inc., 2017)
洋上風力	はえんかぜ(浮体)	2	MW	(戸田建設株式会社, 2016)
洋上風力	銚子沖(着床)	2	MW	(経済産業省, 2014)
波力	酒田ケーソン(振動水柱型)	40	kW	(合田ら, 1991)
波力	LIMPET(振動水柱型)	500	kW	(The Queen's University of Belfast, 2002)
波力	空気タービン式(振動水柱型)	40	kW	(エム・エムブリッジ株式会社, 東亜建設工業株式会社, 2018)
波力	海明(振動水柱型)	1,375	kW	(益田善雄, 1981)
波力	消波工型安定化タンク方式(振動水柱型)	30	kW	(固定式波力発電システム調査研究分科会, エンジニアリング振興協会, 1984)
波力	越波式(越波式)	137	kW	(市川土木株式会社, いであ株式会社, 協立電機株式会社, 2016)
波力	フローター式(可動物体式)	50	kW	(三井造船鉄構エンジニアリング株式会社, 2018)
潮力	Annapolis tidal-electric plant	20	MW	(Rice, R. 1984)
潮力	Cook inlet Rainbow (40 PH/24 SL)	930	MW	(State of Alaska office of the government, 1981)
潮力	Cook inlet Eagle bay (60PH/36SL)	1,440	MW	(State of Alaska office of the government, 1981)
潮力	Cook inlet Point mackenzie (60PH/46SL)	1,260	MW	(State of Alaska office of the government, 1981)
潮力	Swansea bay	240	MW	(Peter Simon, 2015)
潮流	橋脚利用式	175	kW	(広島工業大学, ナカシマプロペラ株式会社, 五洋建設株式会社, 2016)
潮流	油圧式	100	kW	(東京大学生産技術研究所, 九州大学, 佐世保重工業株式会社, 2018)
潮流	垂直軸直線翼型	50	kW	(株式会社大島造船所, サイエンスリサーチ株式会社, 2018)
潮流	橋脚・港湾構造物利用式	45	kW	(中国電力株式会社, 広島工業大学, 2019)
海洋温度差	JMU/佐賀大学(洋上)	10	MW	(佐賀大学, ジャパンマリンユナイテッド株式会社, 2018)
海洋温度差	Aalbers 100MW(陸上)	100	MW	(Albers, 2015)
海洋温度差	Aalbers 10MW(陸上)	10	MW	(Albers, 2015)
海洋温度差	100kW 久米島(陸上)	100	kW	(佐賀大学, ジャパンマリンユナイテッド株式会社, 2018)
海洋温度差	OC 10MW(陸上)	10	MW	(Dugger, G. L., 1979)
海洋温度差	OC 40MW (陸上)	40	MW	(Dugger, G. L., 1979)
海洋温度差	Hawaii 100 k W(陸上)	100	kW	(Lim Seungtaek et al., 2020)
海洋温度差	5MW OMAN(陸上)	5	MW	(Amir-Sina Hamedi et al., 2017)

めるために必要なパラメータについては、立地や設備規模によって様々な数値があり得るが、本試算では所内率に関しては、洋上風力、波力、潮力、海流は10%、OTECは30%、設備利用率に関しては、洋上風力、波力、潮力・海流は30%、潮流は60%、海洋温度差は80%とした。また運用年数は、洋上風力は20年、波力、潮力、海流・潮流、海洋温度差は30年と設定し、設備補修に関わるCO₂排出量は設備建設に伴う排出量2%とした。直接文献より投入資材の情報が得られない場合は、総重量、見取り図などから、

素材を推定し、その重量を試算した。また、発電機などの素材情報が直接得られない場合は、文献値を用いて、出力に比例すると仮定して算出している。

LCコスト（円/kWh）は均等化発電原価で算出しており、割引率は6%で計算している。

洋上風力発電は、洋上に設置するため防塩措置を施した風力発電装置を、浅瀬ではモノパイル式の支柱等に取り付け、水深の深い場所では浮体に取り付けて発電を行う（Freeman et al., 2016）。支柱や浮体に起因する排出量により陸上風力と比べCO₂排出量も高いため、発電機の大型化によるCO₂排出量削減（Needs, 2008）とコスト低下（Hjuler et al., 2017）が期待されている。日本では、現状では福島県の7 MW（石原、2014）が最も発電出力が高いが、海外では10MW（Vestas, 2018）が製品化されており、さらに2050年に向けては32MW（Needs, 2008）の可能性も示唆されている。

波力発電は波の力を電力に変換するもので、空気タービンを回転させる振動水柱型と、機械的な運動に変換する可動物体型、さらにコンクリートまたは鋼製の水中構造物であるケーソンを超える波を集めてタービンを回す越波型の3つの方法がある（NEDO技術白書、2010）。

潮力発電のtidal lagoonは潮の満ち引きを利用して入り江に低落差のダムを造る発電方式である（Gray, 1972）。現在稼働しているtidal lagoonは3基でフランスのLa Ranceと韓国のShiwa tidal power、カナダのannapolic tidal-electric plant（実証機）、である（Shaun, 2016）。干満差が1m以上必要であり日本で適用できる場所は限られている。

潮流・海流発電には、潮流の流れを利用する潮流発電と、海流の流れを利用する海流発電がある。水の流れが潮流か海流かの違いがあるが、両者とも水の流れの運動エネルギーを、海水中に設置した水車や羽の回転を介して電気エネルギーに変換する構造は同じであるため、本試算ではすべて潮流発電として整理した。潮流・海流は年間通して安定しているため、ベース電源として利用することが期待される。その一方で海水中に装置があるため、メンテナンスにコストがかかることが懸念される（NEDO報告書、2015）。

低温の海洋深層水と海洋表層水の温度差を利用してタービンを回して発電する海洋温度差発電は、設備利用率が80%以上を見込めるためベース電源として期待できる（Albers, 2015）。また海洋深層水を汲み上げることから、これが発電以外のコベネフィットが期待されるため離島のベース電力として期待される（NEDO報告書、2018）。現在、沖縄県久米島町では100kWの試験機が稼働しており（沖縄県海洋温度差発電実証施設ウェブサイト）、取水管から汲み上げた海洋深層水を海ぶどう、車エビなどの水産業、ハウスへの冷水供給による温帯の葉物野菜を栽培する農業利用、冷水の空調に利用している。海外では、海底から取得した深層水を低温の循環水として用いる際、開放系で蒸発した表層水を凝縮器で蒸留水として得ることの出来るオープンサイクルと、タービン用のアンモニアの循環を閉鎖系で行うクローズドサイクルを合わせ持つハイブリッド型の海洋温度差発電（Jaafar, 2018）の開発も行われている。

3.1.2. エネルギー輸送・貯蔵技術

本研究では、エネルギー輸送・貯蔵技術としての活用が期待されている水素エネルギーに着目した。平成29年12月に決定された水素基本戦略の中で、水素の製造・供給に直接的に関係するのは「低コストな水素利用の実現」「国際的な水素サプライチェーンの開発」「国内再生可能エネルギーの導入拡大と地方再生」である。これらの中で水素を、温室効果ガス排出削減のために様々な一次エネルギーを世界規模で有効活用するためのオプションとしての「グローバル水素」と、国内での変動型再生可能エネルギー資源や未利用の地域資源を有効利用するための地産地消的な蓄エネルギー・エネルギーキャリアのオプションとしての「ローカル（蓄エネ）水素」という視点で類型化した場合に、エネルギー輸送・貯蔵技術として水素の位置付けを、表2. 2の通り整理した。本研究では国内における再エネ大量普及の中長期道筋を明らかにすることを目的とするため、ローカル（蓄エネ）水素に着目しつつ、グローバル水素を比較対象として分析を実施した。

表 2. 2 エネルギー輸送・貯蔵技術としての水素の類型化

	グローバル水素	ローカル（蓄エネ）水素
位置付け	温室効果ガス排出削減に一次エネルギーを有効活用するためのオプション。低コスト・大量輸送。海外との貿易取引	変動型再エネの負荷平準化、または未利用地域資源有効活用のための蓄エネ・エネキャリアオプション。地産地消、地域経済活性化
代替・競合関係	輸入化石燃料（主にエネルギー用LNGや化学品原料用原油）との代替関係	蓄電池や火力発電の調整力、他の再エネ資源変換技術との競合関係
キャリア候補	液化水素、有機ハイドライド、アンモニア、メタノールなど	高圧水素、有機ハイドライド、メタン、アンモニア、メタノールなど
用途例	発電：ガスタービン、運輸：水素ステーション（燃料電池自動車）、産業：熱／原料利用、家庭・業務：燃料電池	産業、民生／業務部門：燃料電池・内燃機関コジェネ、運輸：フリート内利用（公共交通・産業機械）

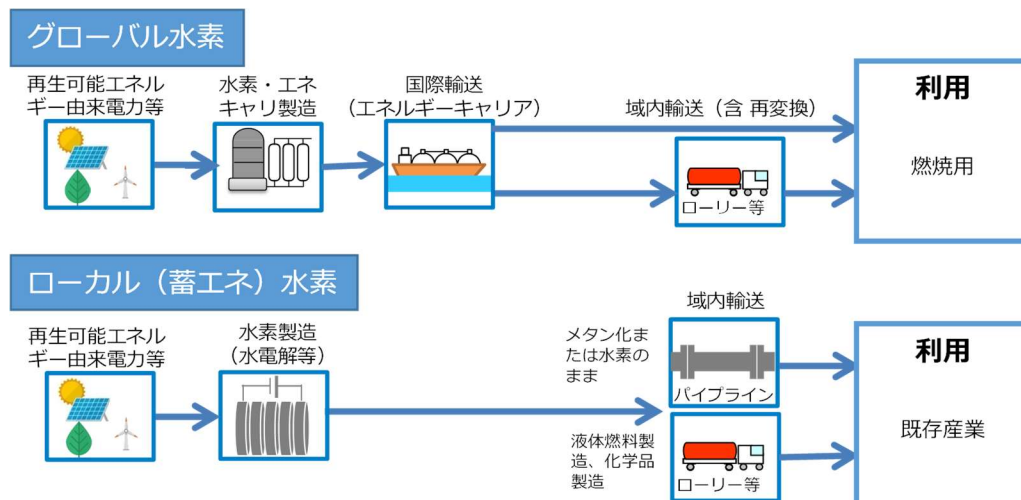


図 2. 1 グローバル水素・ローカル（蓄エネ）水素の評価範囲

図 2. 1 に本分析の評価範囲を示す。グローバル水素は、中東（UAE）の太陽光発電を用いた水電解によって水素製造してエネルギーキャリアに変換した後、日本まで国際輸送して燃焼用燃料として供する。エネルギーキャリアは液化水素・メチルシクロヘキサン（MCH）・アンモニア・メタンの4種類を想定し、輸送距離は10,000kmとした。ローカル（蓄エネ）水素は、再エネ電力証書で購入したPV電力を用いた水電解によって水素製造してエネルギーキャリアに変換した後、需要地まで輸送し、既存産業で利用する。エネルギーキャリアは前述の4種類とメタンを加えた合計5種類を想定し、輸送距離は50kmとした。なお、本分析で検討するメタンチェーンのメタネーション原料となるCO₂は、排出源となる他のプロセスですでに排出量として勘定されているものと考え、その調達にはCO₂の回収（アミン法による化学吸収を想定）、圧縮、輸送に必要なユーティリティの投入に伴う間接的なCO₂排出量を計上することとした。また、メタネーションによって得られたメタンの燃焼に伴うCO₂排出量も、排出源となる他のプロセスですでに排出量として勘定されているものと考え、カーボンニュートラルであるとした。

LCコスト・LCCO₂を算出するにあたって、サプライチェーンで投入される電力について2通りのケース（ベースケース・低炭素ケース）を想定した。ベースケースでは、PV電力は水素製造（再エネ水電解）プロセスのみで利用し、それ以外のプロセスでは系統電力を利用することを想定する。低炭素ケースでは、CO₂調達以外のサプライチェーン全体で投入されるすべての電力にPV電力を利用することを想定する。表 2. 3 に、日本とUAEにおける系統電力とPV発電の電力価格・CO₂原単位を示す。本分析ではエネルギーキャリアシステムへの投入原材料量・ユーティリティ量に伴うCO₂排出量を対象とし、CO₂原単位には、IDEA Version 2.2の値を用いた。資本財に起因する排出量は対象外としているが、PV発電については資本財に由来するCO₂排出量はゼロとはせず、電中研の発電技術LCA報告書²⁾で想定されている10MWメガソーラーの構成資材製造、建設、輸送に伴う排出を考慮し、想定する耐用年間中の総発電量で割った発電

量あたりのCO₂原単位を用いた。

想定したサプライチェーンに関する詳細については参考文献¹⁾を参照されたい。

表2. 3 系統電力とPV発電の電力価格・CO₂原単位

	電力価格 [円/kWh]		CO ₂ 原単位[g-CO ₂ /kWh]	
	系統電力	PV電力	系統電力	PV電力
日本	12.5	7.0	573	51.8
UAE	5.6	7.0	568	39.2

3.2. CO₂排出量大幅削減可能なエネルギーシステム像の検討

3.2.1. エネルギーモデルの選定

本研究では、産総研が開発するエネルギーモデル「多地域MARKALモデル」を用いて、2050年までのCO₂排出量大幅削減可能なエネルギーシステム像の検討を実施した。多地域MARKALモデルは日本国内を対象として47の「都道府県」、10の「電力地域」、1つの「国」の3種類58区分で構成されており、エネルギーキャリア・技術ごとに分割区分の種類を使い分けることで、地域別の詳細なエネルギー需給分析を実現する。このように日本国内を対象として詳細な空間分解能を考慮しているのが産総研の多地域MARKALモデルの特徴であり、他のモデルの多くは日本を1つの地域とみなす「一国モデル」となっている。以上の点から、産総研の多地域MARKALモデルは他のモデルにはない詳細な空間分解能を有しており、本研究の目的である地域別の再エネ供給を分析するのに適していると言える。

多地域MARKALモデルの概要は以下の通りである。詳細については、参考文献³⁾を参照されたい。

- ◆ 目的関数：分析対象期間の総システムコストの最小化

$$\text{総システムコスト} = \text{一次エネルギー資源の調達コスト} + \text{技術の建設・運用コスト} - \text{技術の減価償却（最終期の残存価値）}$$
- ◆ 制約条件：①エネルギーシステムの構造による制約、②その他の制約
- ◆ 分析対象期間：2010年～2050年
- ◆ 期間解像度：5年単位
- ◆ 1期における時間帯数：6（夏・冬・中間期×昼・夜）

3.2.2. 多地域MARKALモデルの改良

3.2.2.1. 雇用創出効果の組み込み

再生可能エネルギー技術の導入は、CO₂排出量の削減やエネルギー自給率の向上といったエネルギー・環境的側面だけでなく、再エネ技術導入に伴う産業・雇用の創出など社会経済的側面においても便益を生むことが予想される。再生可能エネルギー技術は、第5次環境基本計画⁴⁾において提唱された「地域循環共生圏」の形成にも重要な役割を果たすと考えられており、地域ごとに適切な再エネ技術を導入することで「各地域が地域資源を最大限活用しながら自立・分散型の社会を形成しつつ、地域の特性に応じて資源を補完し支えあうことにより、地域の活力が最大限に発揮」⁵⁾することが期待される。

このような背景を踏まえ、本研究では「地方に立地する発電施設の建設・運用に関連する雇用創出効果」を副次的な便益（コベネフィット）と捉え、副次的な便益がエネルギーシステムの長期推移に与える影響を検討した。ここでいう副次的な便益とは端的に述べると地方創生効果であり、地域住民が受ける恩恵に着目すれば、具体的には、地方の発電施設に関連する労働者の経済活動の増加や、地方税の税收増加であるといえる。以下では、「地方」と「都市」の分類方法および雇用創出による副次的便益のモデルへの組み込み方法について説明する。

(1) 発電施設の立地の分類

再生可能エネルギーの賦存地域や現存する発電所の立地等を踏まえて、日本国内を以下の3地域に分類して地方ごとの発電設備の立地を設定した。

- ◆ 最も都市の割合が高い地域（関東、中部、近畿）：
全ての火力発電（水素発電含む）および住宅用PVを「都市」、その他を「地方」に分類
- ◆ 都市の割合が中程度の地域（東北、九州）：
LNG火力発電（水素発電含む）を「都市」、その他を「地方」に分類
- ◆ 最も都市の割合が低い地域（北海道、北陸、中国、四国、沖縄）：
全ての発電技術を「地方」に分類

(2) 目的関数の拡張

MARKALモデルの目的関数は前述のとおり総システムコストの最小化である。本研究では、発電施設の建設・運用段階で発生する雇用によって地方にもたらされる副次的な便益を金額価値換算し(式2-1)、上記の総システムコストから差し引くという形で最適化計算の中に組み込んでいる。

$$\text{雇用の金額価値} = \text{empvalue} \times \sum_{t, \text{ela}} \left[\left\{ R_{INV}(\text{reg}, t, \text{ela}) \times \text{empinv}(\text{reg}, \text{ela}) \times (1 - \text{rftch}(t, \text{ela})) + \right. \right. \\ \left. \left. (R_{GEN}(\text{reg}, t, \text{ela}) \times \text{empom}(\text{reg}, \text{ela})) \times (1 - (1 + D)^{-N}) \times \frac{1+D}{D} \right\} \times (1 + D)^{S-N \times (t-1)} \right] \quad \text{式 2 - 1}$$

ここで、 $R_{INV}(\text{reg}, t, \text{ela})$ と $R_{GEN}(\text{reg}, t, \text{ela})$ はそれぞれ地域reg、分析期間tにおける各発電技術elaの新設容量及び年間発電量を表しており、これらはモデル計算により内生的に決定される。なお、発電技術は利用率可変の電源、利用率の制御できない電源、ベースロード用電源に分類し、それぞれ異なる方法で年間発電量を推計している。 $\text{empinv}(\text{reg}, \text{ela})$ と $\text{empom}(\text{reg}, \text{ela})$ はそれぞれサブテーマ(1)の分析結果⁶⁾を基に決定した地方における各発電技術の建設段階及び運用段階における雇用創出量である(表2.4)。 $\text{rftch}(t, \text{ela})$ は分析期間tに建設された発電技術elaの減価償却に関するパラメータで、分析最終期(2050年)終了時点における未償却残高の割合を表す。これを差し引くことによって分析期間後半の建設段階における雇用効果の過大評価を防いでいる。 empvalue は地方で発生した雇用量を金額価値に換算する係数である。また、Nは1期当たりの年数、Sは各期の基準年、Dは割引率を表しており、本研究ではそれぞれN=5、S=2、D=0.05と設定している。

表2.4 建設段階及び運用段階における雇用創出量

	建設段階 [人・年/GW]	運用段階 [人・年/GWh]
石炭	3.40×10^4	2.78×10^{-1}
石油	2.81×10^4	1.98×10^{-1}
LNG	1.77×10^4	1.24×10^{-1}
原子力	5.17×10^4	4.26×10^{-1}
水力	1.26×10^5	1.06×10^{-1}
地熱	6.89×10^4	2.60×10^{-1}
風力	1.86×10^4	5.71×10^{-1}
住宅用PV	3.02×10^4	5.30×10^{-1}
メガソーラー	2.74×10^4	8.72×10^{-1}
バイオマス	4.60×10^4	2.83

3.2.2.2. エネルギーインフラに関する制約

本研究では、CO₂排出量大幅削減可能なエネルギー輸送・貯蔵技術の最適な組み合わせをバックキャストにより明らかにし、将来のエネルギーインフラの姿について検討する。そこで、本研究で使用する産総研の多地域MARKALモデルにおけるエネルギーインフラに関する設定や制約について、以下で説明する。

(1) 電力・水素のエネルギーフロー

図2.2に、産総研の多地域MARKALモデルにおける電力・水素のエネルギーフローの概略を示す。

発電技術の価格・性能は、調達価格等算定委員会資料やIEA『World Energy Outlook 2016』に基づいて設定した。再エネ発電の最大導入量は環境省『再エネ導入ポテンシャル調査』『再エネに関するゾー

ニング基礎情報』の導入可能量（中位シナリオ）に基づいて設定し、原子力発電は2030年ミックスを達成しつつ段階的に廃炉することを想定して発電容量を設定した。国内CCSの最大貯留量は、2050年2億t-CO₂/年とした。蓄電池は低コスト化により普及が進むリチウムイオン電池を想定して、性能・コストデータを設定した。電力地域間で電力融通を行う連系線の容量については、現存する容量と現在拡張が予定されている容量の合計値として設定した。

輸入水素のCIF価格は、2030年40円/Nm³、2050年30円/Nm³とした。国内水素製造プロセスについては、天然ガス改質による水素製造と水電解による水素製造の2種類を考慮している。このうち水電解による水素製造は、再エネ大量導入時の系統余剰電力を有効利用しつつ、将来増加が見込まれる低炭素水素需要を満たす技術として注目されている。水電解による水素製造は、主に発電用水素を供給する「大規模水素製造」とFCV用水素を供給する「オンサイト水素製造」の2通りを考慮した。大規模水素製造には大規模化が可能なアルカリ水電解、オンサイト水素製造には小規模運用に適したPEM型水電解を適用することを想定して、各プロセスの性能・コストデータを設定した。

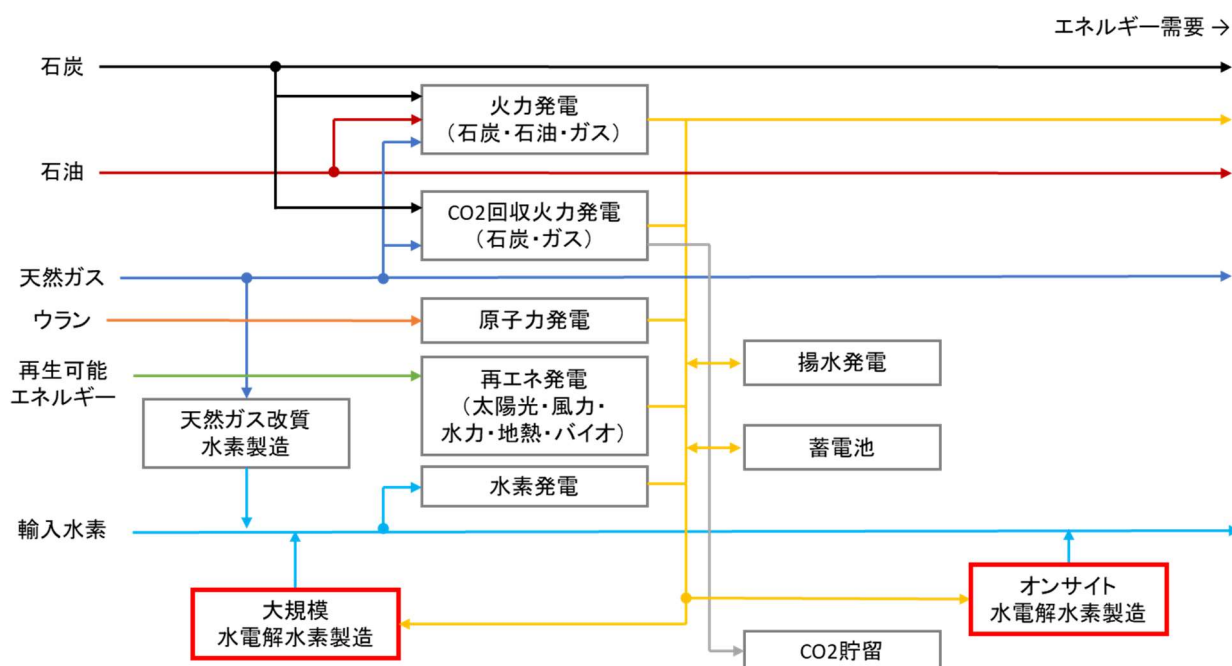


図2. 2 多地域MARKALモデルにおける電力・水素のエネルギーフロー（概略）

(2) 調整力電源シェアの制約

変動再エネ電源（太陽光・風力）の大量導入時においても電力需給を一致させて系統安定性を担保するためには、電力需要に応じて出力を調整できる電源（以降、「調整力電源」と呼ぶ）ある程度の割合で運用する必要がある。一方MARKALモデルの時間解像度は昼・夜のみであり、短時間の電力需給変動を考慮することができないため、調整力電源の必要量を過小評価することが懸念される。

そこで、産総研の多地域MARKALモデルに調整力電源シェアの制約を実装し、2050年を目処とした変動再エネ電源の大量導入時においても調整力電源の割合が一定以上になるように改良を加えた。具体的には、火力・バイオマス・水素発電・揚水発電・蓄電池を調整力電源として取り扱い、加えて複数の水電解装置を束ねることでバーチャルパワープラント（VPP）として調整力電源と同じ役割を果たすと仮定して、これらの電源の発電量が総発電量の50%以上となるように制約する。50%という下限値は、電源計画モデルを用いた詳細な電力システム運用分析⁷⁾の結果に基づいて設定した。

(3) 変動再エネ・蓄電池の容量制約

系統規模が小さい電力地域においては、先述の調整力電源の導入に加えて、変動再エネ電源（太陽光・風力）に蓄電池を併設して蓄電池の出力を制御することで変動再エネ電源の急峻な出力変動を発電所内で緩和することが求められている。国内においては、北海道・東北などにおいて蓄電池併設の変動再エ

ネ発電所が運用を開始している。そのような状況を鑑み、都市の割合が高い関東、中部、近畿を除く地域においては、メガソーラー・風力発電の導入に比例して蓄電池が導入されることを想定して、制約式を追加した。具体的には、蓄電池併設の変動再エネ発電所の設計に基づいて、メガソーラー・風力発電1MWに対して蓄電池が最低0.5MW導入されるように制約した。

3.2.3. シミュレーションケース設定

以上の改良を加えた多地域MARKALモデルを用いて、副次的便益やエネルギー需要パターンがエネルギーシステムに与える影響を評価した。なお、いずれのケースでもエネルギー由来CO₂排出削減目標は2030年25%削減、2050年80%削減（いずれも2013年比）として設定した。

(1) 副次的便益がエネルギーシステムに与える影響の評価

本研究では、式2-1のempvalueの値を以下のようにケースごとに変化させることで、雇用効果の大きさと再生可能エネルギー発電技術の普及との関係について分析する。本研究では地方の発電施設関連の労働者分の経済活動による地域内の収益増加や、地方税の税收増加を雇用の価値であると考え、家計調査や企業活動基本調査に基づく推計を根拠として、下記の4ケースを設定した。

- ◆ BASE：雇用効果を考慮しない（empvalue=0万円/人・年）ケース
- ◆ EMP50：地方における雇用の金額価値をempvalue=50万円/人・年としたケース
- ◆ EMP100：地方における雇用の金額価値をempvalue=100万円/人・年としたケース
- ◆ EMP150：地方における雇用の金額価値をempvalue=150万円/人・年としたケース

(2) エネルギー需要パターンがエネルギーシステムに与える影響の評価

現行の多地域MARKALモデルでは、日本エネルギー経済研究所が想定する社会経済状況に準拠して、以下の手順で将来のエネルギーサービス需要（産業部門の生産量や運輸部門の総輸送距離など）を外生的に設定している。昨今の社会情勢変化を鑑みると、経済情勢およびワークスタイル・ライフスタイルの変化によってエネルギーサービス需要が変化することが想定されるが、現時点でエネルギーサービス需要の変化量を正確に予測することは困難である。そこで本研究では、将来のエネルギーサービス需要に関する感度分析を実施することで、将来の社会情勢変化の不確実性がエネルギーシステムに与える影響を評価した。具体的には、産業・民生・運輸部門における2050年のエネルギーサービス需要を±10%の幅で変化させた場合に一次エネルギー供給・電源別発電量に与える影響を評価した。

4. 結果及び考察

4.1. 将来技術の実用段階におけるライフサイクルCO₂排出量・コストの算出

4.1.1. 海洋再エネ技術

(1) 洋上風力発電

図2-3(a)に国内および海外の洋上風力発電装置のLCCO₂(g-CO₂/kWh)とLCコスト(円/kWh)を示す。LCCO₂(X軸)排出量は2MW級発電装置では、五島の“はえんかぜ”が“ふくしま未来”よりも排出量が少なかった。これは、浮体に鉄ではなくコンクリートを使っているためである。また着床式の銚子沖の風力発電装置は、コンクリート構造体に銅水破スラグを中詰めしており、それを廃棄物相当と考えるとCO₂排出量がゼロと見なせるため、排出量が低くなる。海外の文献と比較すると日本の2MW級の浮体式はCO₂排出量が多いが、これは日本における洋上風力発電は開発が初期段階であり、日本に特有の台風等を想定した構造物の強化が必要(環境省委託事業報告書、2014)なためである。また風力発電装置の浮体は、円筒型の浮体構造を持つスパー式が最もLCCO₂が小さいとされているが(Raadal, 2014)、これは設置に100m以上の深い水深が必要で設置場所が限られるので、洋上固定式(おおよそ水深50mまで)との中間の水深に設置できる浮体構造を持つセミサブ式やバージ式等も検討されている。収集した文献の前提条件による排出量の違いはあるものの、全体的な傾向として出力が大きくなるほどLCCO₂が削減される傾向が認められる。

次にLCコストの試算の大半のコストは、5MW以下では浮体の大部分は鉄製であるためである。海外の実

用化されている洋上風力に比べると、日本で実証実験のコスト試算は見劣りしてしまう。福島洋上風力コンソーシアム等は日本の風土における系統連結の試験や各種浮体の特性の把握を行っており(浮体式洋上ウインドファーム実証事業、2016)、将来に向けたコスト削減に向け検討している。クラスター1は2020年以降にプロジェクトが予定されており、主に6-8MWへの大型化と浮体のコンクリート化によって効率化され、LCコストの低下が実現を目指している。少し楽観的な試算と思われるが、20円/kWhに達成すると試算されており、さらなる発電機の大型化によってLCコストおよびLCCO₂の値が低下していくと思われる。クラスター2は想定段階ではあるが、ジャケット式の浮体に風車を2基設置しており、LCコストが5円/kWhを下回っている試算を行っている。SCD-nezyfloaterの小型基は現在NEDO(NEDO報告書、2017)で試験中である。

(2) 波力発電

収集したデータを用いて試算した波力発電のLCCO₂(g-CO₂/kWh)とLCコスト(円/kWh)を図2. 3(b)に示す。波力発電は波の力を電力に変換するもので、空気タービンを回転させる振動水柱型と、機械的な運動に変換する可動物体型、さらにコンクリートまたは鋼製の水中構造物であるケーソンを超える波を集めてタービンを回す越波型の3つの方法がある(NEDO技術白書、2010)。振動水柱型の中で、天然の岩をケーソンに用いるブローホール式および、既存のケーソンを利用する空気タービン式のCO₂排出量が他よりも小さい。越波式(NEDO報告書、2016)ではコンクリート構造物の建設に伴うCO₂排出量も計上しているため、LCCO₂が多くなっている。可動物体型の機械式波力発電は海外で実績があるが、海外と比べると日本の波が荒く補強等が必要となるため(NEDO報告書、2015)、LCCO₂は多くなる。

波力発電のLCコストの試算結果は、製造された年代が新しくなるにつれてその値が低下していることが分かる。越波式等のケーソン型は構造物のコンクリートケーソンを用いており、これをケーソンとして防波堤に付け替えると、大幅にLCコストと共にLCCO₂の値を低下可能となる。日本のリニア式のLIMPET等の商用機30円/kWhより低い値を示しており、更なる開発による発電コストの低下が期待される。日本では酒田の波力発電装置のように古くから試験研究がなされて来たが、現状では試験機がエントリーした状態であり、風力発電のように大型化等による商用化が期待されるが、やや他の発電方式に比べCO₂、コスト両者見劣りしている。

(3) 潮力発電

潮力発電のLCCO₂(g-CO₂/kWh)とLCコスト(円/kWh)の試算結果を図2. 3(c)に示す。潮力発電は、その建設費が膨大なためSwansea bayの計画のように中止されることが多く(BBC news、2020)、計画から抽出出来るLCコストは多いが、具体的にLCCO₂として試算できるものは少ない。上述したように我が国においては、対象地域が限られているので、海外の事例のみの限定的な試算結果となった。

(4) 潮流・海流発電

潮流・海流発電のLCCO₂(g-CO₂/kWh)とLCコスト(円/kWh)の試算結果を図2. 3(d)に示す。橋の橋脚部分に設置する橋脚利用式は、橋脚のコンクリートに起因する排出量を計上していないためLCCO₂が小さい。プロペラの回転によって油を循環させて、メンテナンスが容易な海上で発電モーターを回す油圧式のLCCO₂が多いのは、支持構造物に起因する排出量によるものである。長いシャフトを海中に入れて水車を回転させる鉛直軸直線翼型と橋脚・港湾構造物利用式は、双方とも海上に発電機が設置されるが、橋脚・港湾構造物利用式は支持構造物の構造が簡易なためLCCO₂が小さい。橋脚利用式、橋脚・港湾構造物利用式はLCCO₂とは異なりLCコストでは高い値を示した。これは設置できる場所が橋脚といった高所であることから設置およびメンテナンス費用が高くなっているためである。日本では波力発電同様に試験機がエントリーした状態であり、更なる開発の進展によって商用化に繋げて行くと思われる。

(4) 海洋温度差発電

海洋温度差発電のLCCO₂(g-CO₂/kWh)とLCコスト(円/kWh)の試算結果を図2. 3(e)に示す。ジャパンマリンユナイテッド(JMU)と佐賀大学が共同開発している洋上設置型は、陸上設置型の装置を浮体にのせる構成になっており、浮体に必要なる鉄鋼に起因するCO₂排出量が多いため、陸上設置型の装置より排出量が多くなっている。詳細は掲載できないが、海洋温度差発電は海洋深層水を大量に汲み上げる必要があるため、取水管設置に係わるLCCO₂が多い。日本の0.1-10MWの想定基では51-53円/kWhを計上しており、

現状の離島の発電価格である60～100円/kWh (Inoue et al., 2015)よりも下回っている。LCCO₂では41-69g-CO₂/kWhであり、離島のベース電源であるディーゼル発電の800g-CO₂/kWhから大きく下回っており優位である。上述したように海洋温度差発電には取水した海洋深層水の利用によるコベネフィットがあるので、上述したLCコストよりも現状できる可能性がある。今後、どのようなコベネフィットを含めるか考慮したコスト分析が必要である。

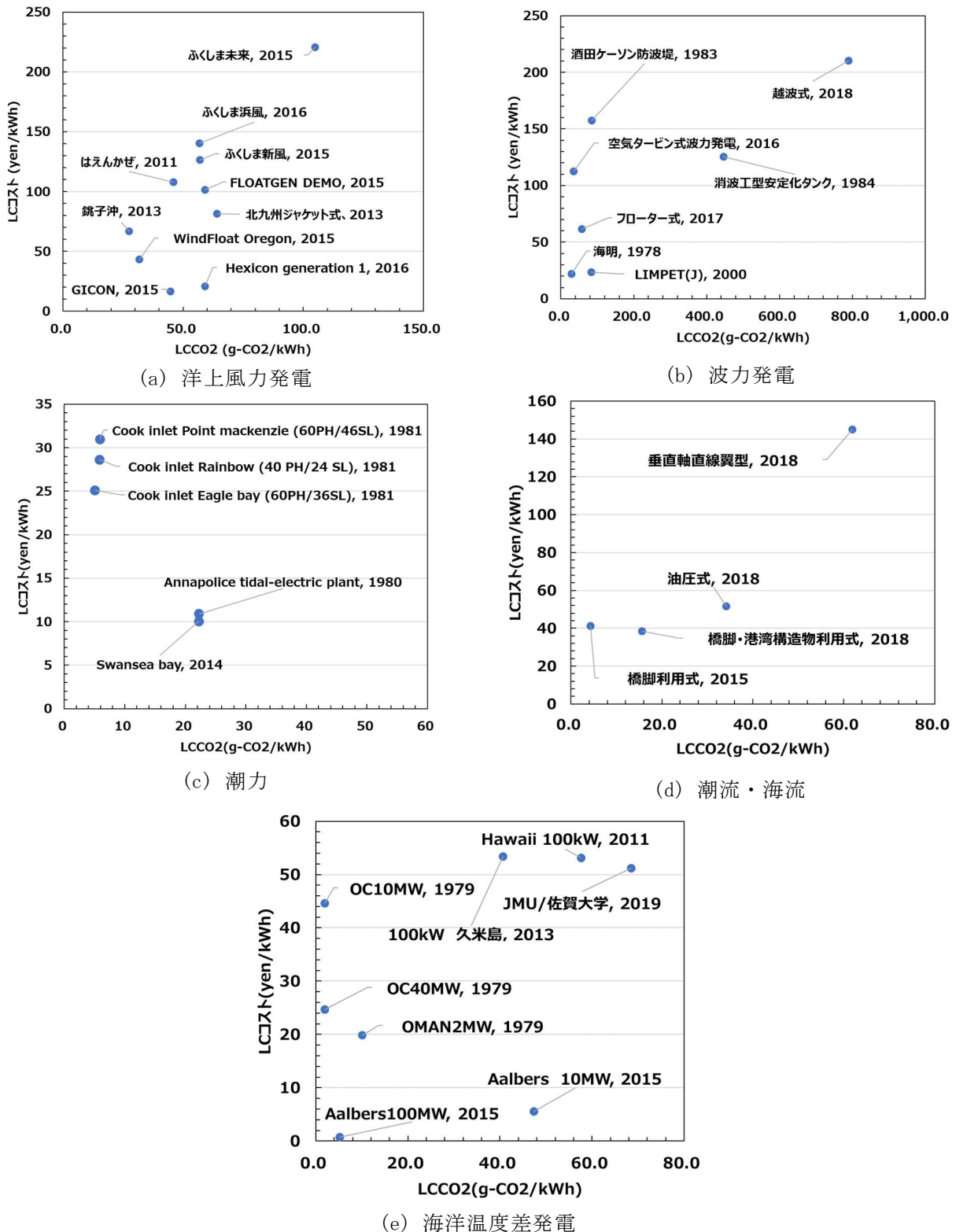


図 2. 3 海洋エネルギーのLCCO₂(g-CO₂/kWh)・LCコスト(円/kWh)

以上のように試算したLCCO₂の数値は現時点のものであり、本研究課題で想定している2050年には違った結果になってくる。例えば、RITEの想定する電源構成(RITE、2016)によれば、電力のCO₂排出原単位は2013年に比べておよそ93%減少すると試算されている。また、経団連の低炭素社会実行計画等では、各産業のCO₂排出量削減目標が設定されている。2030年、2050年には今回試算したよりもLCCO₂は小さくなる。とりわけ、電力起因のCO₂排出量の割合が多い、鉄鋼以外の金属などはCO₂の削減ポテンシャルが大きい。再エネルギー発電のなかでも太陽光発電はシリコン関係の電力の割合が多いので、削減ポテンシャルが大きい。今後、将来のインベントリデータを見据えて、再エネ導入の道筋を立てる必要性が示唆された。

4.1.2. エネルギー輸送・貯蔵技術

図2. 4 (a)にローカル(蓄エネ)水素のLCコスト・LCCO₂を示す。グラフの左下に向かうほど、LCコスト・LCCO₂ともに小さくなり、エネルギーキャリアとしての優位性があることを意味する。

ベースケース(水素製造(再エネ水電解)プロセス以外に投入される電力として系統電力を利用することを想定)の場合、メタンのLCコストが最も小さく、LCCO₂も高圧水素に次いで小さい。一方、ベースケースの液化水素・MCH・アンモニアはLCコスト・LCCO₂ともに大きい傾向にあり、エネキャリア製造やMCH脱水素・アンモニア分解プロセスにおけるユーティリティ投入の影響が大きい。

低炭素ケース(CO₂調達以外のサプライチェーン全体で投入されるすべての電力にPV電力を利用することを想定)の場合、メタン以外のエネルギーキャリアのLCCO₂がベースケースと比べて大きく低下している。特に高圧水素・液化水素・アンモニアのLCCO₂はメタンよりも小さい。これはエネキャリア製造やMCH脱水素・アンモニア分解プロセスに投入される電力にPV電力を使用することで電力消費に伴うCO₂排出量が削減されるためである。以上の結果から、ローカル(蓄エネ)水素の低炭素化には、水素製造(再エネ水電解)プロセスだけでなくサプライチェーン全体で投入される電力のCO₂原単位の低減が有効であることがわかる。

図2. 4 (b)に示すグローバル水素の結果をローカル(蓄エネ)水素と比較すると、LCコストはすべてのエネルギーキャリアに共通してグローバル水素のほうが0.5~1.0円/MJ程度小さいのに対して、LCCO₂はキャリアのよって大小関係が異なることがわかる。

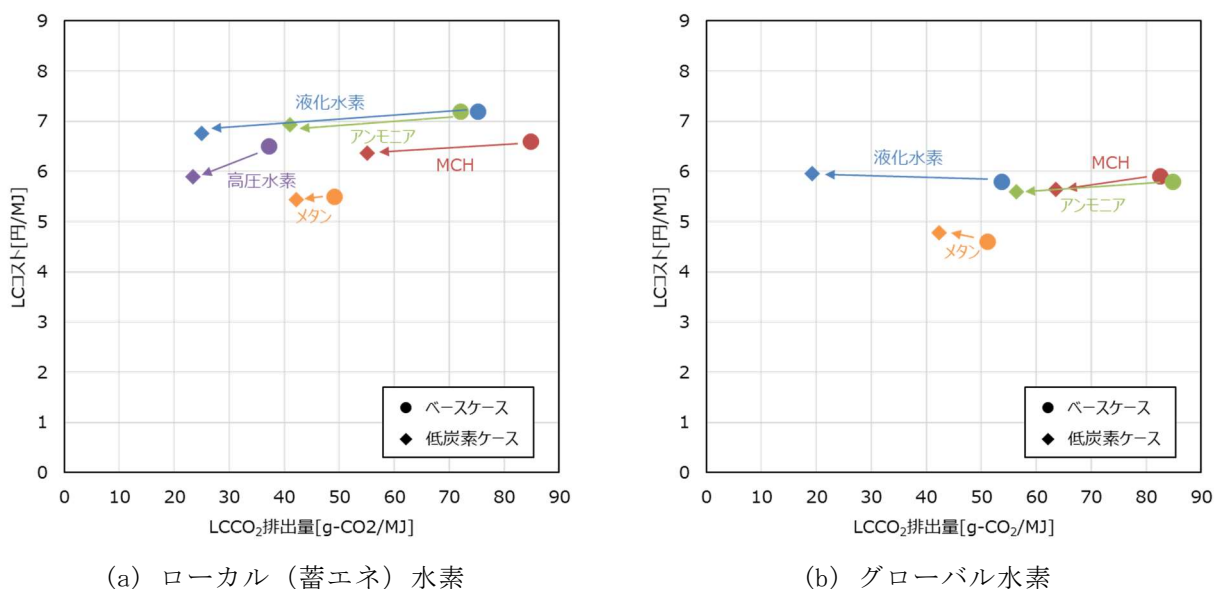


図2. 4 水素のLCコスト・LCCO₂

4.2. 2050年CO₂排出大幅削減可能なエネルギーシステム評価

4.2.1. 副次的便益が再エネ発電導入パターンに与える影響

図2. 5にBASEケースにおける電源別発電量の推移、図2. 6に各ケースにおける2030・2040・2050年の再エネ発電量と2010~50年の総雇用量を示す。なお、これらの結果では蓄電池や国内水素製造の導入は考慮していない。

電源別発電量の推移に着目すると、2030年以降に再エネ発電（特に風力発電）の導入が拡大し、CO₂排出削減制約が厳しくなるにつれて発電部門の低炭素化が進む。その後2050年になると再エネ発電は最大導入量や連系線制約が律速となって導入拡大が停滞し、代わりに水素発電の導入が拡大して電化が進む。2050年の電源構成はCCS付き火力・原子力・再エネ・水素発電のみで構成されており、ここから2050年CO₂排出80%削減を達成するためには発電部門の脱炭素化が必要条件になることがわかる。2050年の総発電量は1313TWhであり、2010年（1098TWh）と比較して19%増加する。2050年の再エネ発電量は704TWhであり、総発電量の54%を占める。

つづいて各ケースの再エネ発電量を比較すると、副次的便益を考慮するケース（EMP50・EMP100・EMP150）では、考慮しないケース（BASE）に比べて再エネ発電量が2030年に最大10%、2040年に最大4%程度増加する。再エネ発電の中でも特に太陽光・バイオマス発電の増加が大きく、この2つはいずれも雇用創出効果が高い発電技術である。以上の結果から、副次的便益を考慮することで再エネ発電の早期導入が進むことがわかる。さらに副次的便益を考慮することで、地方における総雇用量が最大9%増加する一方、都市における総雇用量が最大8%減少し、トータルとして国内で発電施設の建設・運用に関連して創出される雇用量は増加する。副次的便益を考慮することで、燃料を海外からの輸入に依存する火力発電よりも国内の地方に多く賦存する再エネ発電の導入が重視される結果、国外から国内、都市から地方へと雇用が還流されることを意味する。

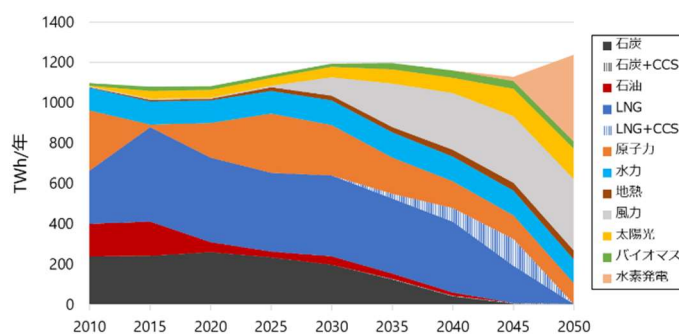


図2. 5 電源別発電量の推移（BASEケース）

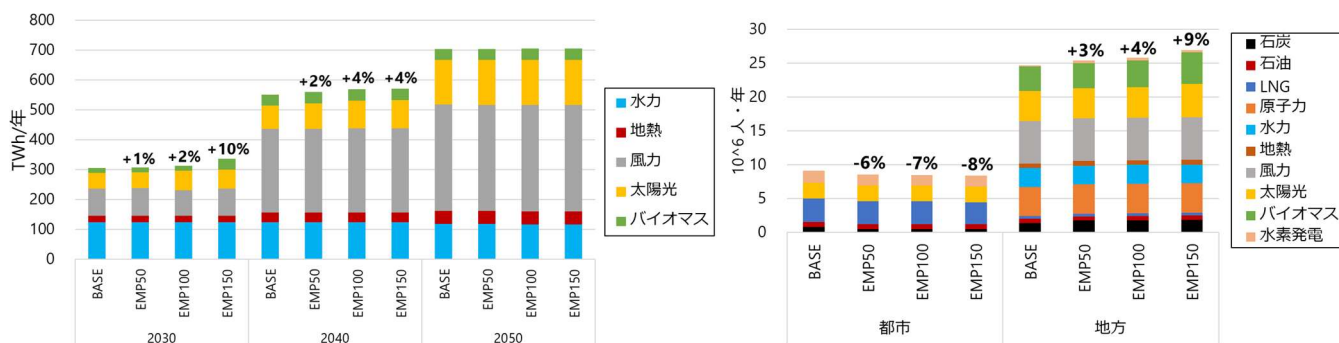


図2. 6 2030・2040・2050年の再エネ発電量（左）と2010～50年の総雇用量（右）

4.2.2. 副次的便益がエネルギーインフラ整備に与える影響

図2. 7に2030・2040・2050年の蓄電池容量と国内水電解水素製造量を示す。

エネルギーインフラとして蓄電池に着目すると、副次的便益を考慮しないケース（BASE）において2050年の蓄電池容量は29.4GWであり、地域別では東北・中国・九州地方において蓄電池容量が大きい。副次的便益を考慮するケース（EMP150）では2050年の蓄電池容量は32.2GWとなり、特に北海道や九州地方において蓄電池導入が進んでいることがわかる。これは、副次的便益を考慮することで北海道の風力発電や九州のメガソーラーの容量が増加するのに呼応して、蓄電池の導入が進むためである。副次的便益を考慮するとき、2050年の再エネ発電量は便益を考慮しない場合と比べて、日本全体で約10TWh増加する。

エネルギーインフラとして水電解装置に着目すると、副次的便益を考慮しないケース（BASE）において2050年の国内水電解水素製造量は19.7万tである。一方、副次的便益を考慮するケース（EMP150）では

2050年の製造量は86.5万tとなり、副次的便益を考慮しないケースの4倍以上に増加する。以上の結果から、発電技術導入の副次的便益は国内水素製造の普及に大きく影響することがわかる。地域別に見ると、副次的便益を考慮する場合は風力発電のポテンシャルが大きい北海道や東北において水電解による水素製造が進み、2050年の再エネ発電量は便益を考慮しない場合と比べて日本全体で約49TWh増加する。

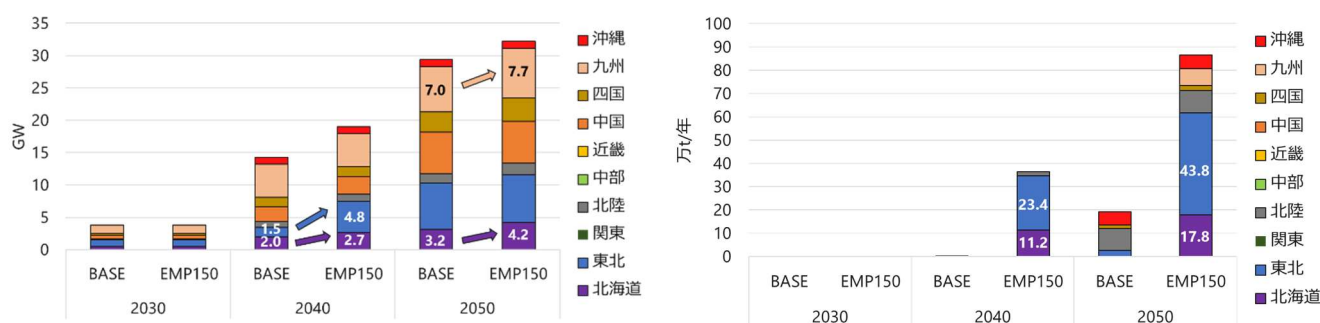


図2. 7 2030・2040・2050年の蓄電池容量（左）と国内水電解水素製造量（右）

4.2.3. エネルギー需要パターン変化が供給構造に与える影響

図2. 8に産業・民生・運輸部門における2050年のエネルギーサービス需要を±10%の幅で変化させた場合の一次エネルギー供給・電源別発電量を示す。

3つのエンドユース部門のうち影響が最も大きいのは産業部門であり、一次エネルギーの総供給量は14.2~15.6EJ (BASE: 14.9EJ)、総発電量は997~1133TWh (BASE: 1052TWh)の幅で変化する。これに対して運輸部門のエネルギーサービス需要が変化したときの影響は小さく、一次エネルギー総供給量は14.7~15.1EJ、総発電量は1039~1061TWhとなる。

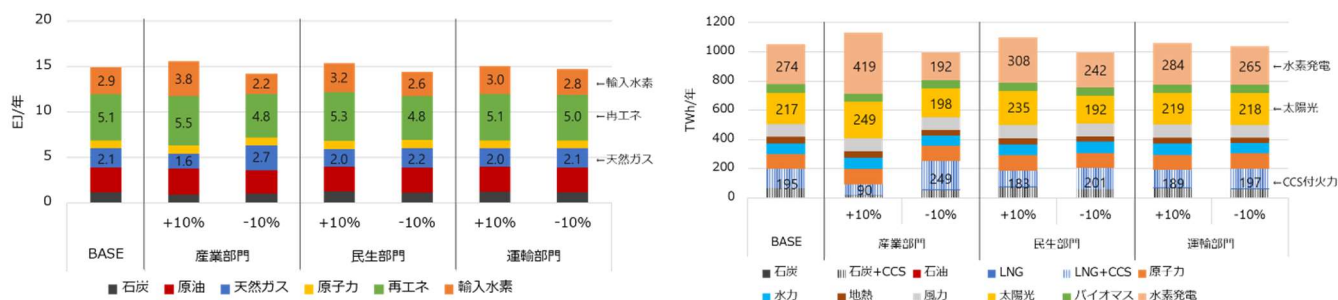


図2. 8 感度分析結果：2050年の一次エネルギー供給量（左）と電源別発電量（右）

4.3. 将来のエネルギーインフラの検討

本研究で得られた分析結果から、CO₂排出量大幅削減可能なエネルギー輸送・貯蔵技術の最適な組み合わせを検討する。

4.3.1. 再エネ発電の重要性と電力・水素インフラの役割

エネルギーモデルによる分析結果から、電力の脱炭素化はCO₂排出量大幅削減を実現する上での必要条件であるといえる。図2. 5の電源別発電量の推移が示すとおり、2050年CO₂排出量の80%削減（2013年比）を達成するとき、2050年の総発電量は2010年と比較して約2割増加し、総発電量の半分以上が再エネ発電によって供給される。再エネ発電の導入拡大は、増加する電力需要を満たしつつ、電力の脱炭素化を進める上で重要な役割を果たす事がわかる。

また、再エネ発電の導入はCO₂排出量の削減やエネルギー自給率の向上といったエネルギー・環境的側面だけでなく、再エネ技術導入に伴う産業・雇用の創出など社会経済的側面に対する副次的便益においても重要である。図2. 6に示す分析結果において、副次的便益を考慮することで、2030~2040年にかけて再エネ発電の導入が進み、雇用が国外から国内、都市から地方へと還流されることが確認できた。雇用創出効果を最も重視するEMP150ケースでは、雇用創出効果を考慮しないEMP0ケースに比べて、2010~2050年の40年間に於いて日本全体で154万人・年の雇用が追加的に創出されている。

4.3.2. 再エネ発電導入のための電力・水素インフラの役割

図2. 7に示すとおり、再エネ発電の導入を進めるにあたって、蓄電池や水電解装置といった電力・水素インフラを拡充していく必要がある。

副次的便益を考慮しない場合、2050年の蓄電池容量は29.4GWであり、これは現在の揚水発電所の容量(26GW)よりも大きい。副次的便益を考慮すると蓄電池はさらに増加し、2050年には32.2GWとなる。導入地域に着目すると、北海道・九州など変動性再エネ発電のポテンシャルが大きい地域を中心に三大都市圏(関東、中部、近畿)を除く7地域において蓄電池が導入されており、再エネ発電の導入拡大にはこれらの地域における蓄電池の整備が求められる。

国内の水電解装置に関しては、2050年の水素製造量が副次的便益を考慮しない場合で19.7万t、考慮する場合で86.5万tとなる。2050年の水素輸入量に対する国内水素製造量の比率は副次的便益を考慮しない場合で0.7%(輸入量:2986万t)、考慮する場合で3.1%(2805万t)であり、輸入水素(グローバル水素)と比較して国内水素製造(ローカル(蓄エネ)水素)の規模は小さい。副次的便益を考慮すると、風力発電のポテンシャルが大きい北海道・東北の2地域において特に水電解装置の導入が進み、再エネ発電の増加分は蓄電池の場合よりも大きい。

以上の結果をまとめると、蓄電池は変動性再エネ発電のポテンシャルが大きい地域を中心に導入されていき、2050年の導入規模は現在の揚水発電所の発電容量以上になると予想される。一方、水電解装置は導入規模こそ蓄電池や輸入水素と比較して小さいものの、風力発電のポテンシャルが大きい地域を中心に再エネ普及拡大に貢献しうる。再エネ普及時の課題である調整力の確保に対して、水素は利用時(水素発電)だけでなく製造時(水電解装置)においても調整力として役割を果たすことが期待されている。しかし、蓄電池と水電解装置を調整力という観点で比較した場合、現状の技術水準では蓄電池のほうが優位である。水電解装置も調整力として活用するためには、再エネ発電の急峻な出力変動に対応できる水電解装置の開発や、水電解装置を束ねてVPPとして活用するための仕組みづくりが必要である。また、製造した水素を地域で利活用するための需要を喚起する制度構築(水素発電の導入推進、FCV用水素ステーションの誘致、産業用水素ボイラーの導入支援など)も重要である。

4.3.3. ローカル(蓄エネ)水素活用のためのエネルギーキャリアの役割

エネルギーモデルの分析では、ローカル(蓄エネ)水素の製造・利用段階に着目して水素インフラの役割について検討した。エネルギーモデルでは簡略化されているローカル(蓄エネ)水素の輸送・貯蔵段階について詳細に検討するために、水素エネルギーキャリアのライフサイクル分析結果を考察する。本研究では、5種類のエネルギーキャリア(高圧水素・液化水素・MCH・アンモニア・メタン)を想定して、ローカル(蓄エネ)水素のLCコスト・LCCO₂を算定した。

ローカル(蓄エネ)水素の導入初期段階(2030年頃)では、再エネ電力は水素製造プロセスでのみ使用され、その他のプロセスに投入される電力は系統から供給されることが想定される。このような場合には、図2. 4(a)が示すように高圧水素やメタンをエネルギーキャリアとした場合のLCCO₂が小さく、特にメタンに関してはLCコストも小さい。メタンは既存の都市ガスインフラを利用して輸送・貯蔵することが可能であり、国内における水素利活用を推進する初期段階において有望なエネルギーキャリアになりうる。

ローカル(蓄エネ)水素の導入後期段階(2050年頃)になると、再エネ発電量が多くなるためサプライチェーン全体の電力消費を再エネによって賄える可能性がある。また、再エネ以外の低炭素電源(CCS付き火力・原子力・水素発電)も普及することで、系統電力のCO₂原単位も低くなっていることが予想される。このような場合には、図2. 4(b)が示すように高圧水素・液化水素・アンモニアをエネルギーキャリアとした場合のLCCO₂も小さくなる。長期的なCO₂排出量大幅削減に向けた取り組みとして、これらのエネルギーキャリアを輸送・貯蔵するインフラ整備が重要となる。

今回の分析ではMCHのLCCO₂は他のキャリアと比べて大きかったが、この結果はエネルギーキャリアとしてのMCHの可能性を否定するものではない。水素のライフサイクル評価は、想定する水素サプライチェーンの対象地域・輸送距離・用途などによって結果が大きく変わりうる。MCHに関しては既存のガソリン

インフラを利用して輸送・貯蔵することが可能であるため、エネルギーアクセスの低い地域（離島等）における活用が期待されているが、本研究では分析の対象としてない。低炭素エネルギーシステムの実現に向けて、このような特殊環境も考慮したエネルギー技術の評価が重要である。

5. 研究目標の達成状況

サブテーマⅡについて、目標通りの成果を上げた。第一に、海洋再エネ技術として洋上風力・波力・潮力・海流・潮流・海洋温度差発電、エネルギー輸送・貯蔵技術としてローカル（蓄エネ）水素・グローバル水素に着目して、実用段階におけるLCCO₂ならびにLCコストを算出した。第二に、産総研の多地域MARKALモデルを用いて、2050年までにCO₂排出量大幅（80%）削減可能な地域別の再エネ供給パターン・エネルギー需要パターンを複数提示した。第三に、ライフサイクル評価・エネルギーモデルによる分析結果に基づいて、エネルギー需要パターンと再エネを含めたエネルギー供給パターンを満たし、かつCO₂排出量大幅削減可能なエネルギー輸送・貯蔵技術の最適な組み合わせを明らかにし、将来のエネルギーインフラの姿を検討した。

6. 引用文献

- 1) 一般財団法人エネルギー総合工学研究所：平成30年度 地球温暖化対策における国際機関等連携事業（ミッション・イノベーションを通じた国際連携に関する取組等調査）報告書（2019）
- 2) 一般財団法人電力中央研究所：日本における発電技術のライフサイクルCO₂排出量総合評価．総合報告：Y06（2016）
- 3) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：水素利用等先導研究開発事業 トータルシステム導入シナリオ調査研究 平成28年度～平成29年度成果報告書（2018）
- 4) 環境省：第5次環境基本計画（2018）
- 5) 環境省：地域循環共生圏 <https://www.env.go.jp/seisaku/list/kyoseiken/index.html>
- 6) 森泉由恵，本藤祐樹，中野諭：再生可能エネルギーと雇用創出ポテンシャル：産業連関モデルによる比較分析．日本エネルギー学会誌 95(1) pp.16-27（2017）
- 7) 永富悠，松尾雄司，小笠原潤一：LFC調整力を考慮した電源構成モデルによる2040年の電源構成の分析と政策課題に関する検討．エネルギー・資源学会論文誌 40(2) pp.8-20号（2019）

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

(1) 誌上発表

<査読付き論文>

【サブテーマ1】

- 1) 森泉由恵, 本藤祐樹, 中野諭 (2019) 再生可能エネルギー熱技術を対象とした金額・物量ハイブリッド産業連関モデルの開発と雇用分析への適用, 日本エネルギー学会誌, 98(12), 318-332
- 2) 早乙女裕紀, 本藤祐樹, 森泉由恵 (2020) 地中熱ヒートポンプによるCO₂削減に効果的な導入条件の探索, 日本エネルギー学会誌, 99(6), 57-66 **【論文賞 受賞】**
- 3) 庭野諒, 本藤祐樹, 森泉由恵, 田原聖隆 (2021) 海洋深層水の複合利用を考慮した海洋温度差発電の導入可能性, 日本エネルギー学会誌, 100(7), 73-82

【サブテーマ2】

- 4) Y. Nagatomo, A. Ozawa, Y. Kudoh, H. Hondo (2021) Impacts of employment in power generation on energy systems in Japan- Analysis using an energy system model, Energy, 226, 12350 [IF:6.1]

<その他誌上発表 (査読なし) >

【サブテーマ1】

- 1) Yue Moriizumi, Hiroki Hondo (2018) Assessing Employment Impacts of Japan's Renewable Energy Target for 2030, Proceedings of the 18th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, SDEWES2018.0595, pp.1-7

(2) 口頭発表 (学会等)

【サブテーマ1】

- 1) 本藤祐樹, 森泉由恵, 田原聖隆, 工藤祐揮, 小澤暁人 (2018) 多様な価値観に基づく再生可能エネルギー普及に向けた道筋の探索, 第27回日本エネルギー学会年次大会, 東京 (日本大学理工学部, 駿河台キャンパス), 2018年8月
- 2) Yue Moriizumi, Hiroki Hondo (2018) Assessing Employment Impacts of Japan's Renewable Energy Target for 2030. 13th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, Palermo, Italy, Oct. 2018 (口頭発表)
- 3) 本藤祐樹 (2019) 2050年の社会像を見据えた再生可能エネルギーの利用拡大への道筋, 第14回日本LCA学会研究発表会, 福岡 (九州大学), 2019年3月
- 4) 森泉由恵 (2019) 再生可能エネルギーがもたらす地域コベネフィット, 第14回日本LCA学会研究発表会, 福岡 (九州大学), 2019年3月
- 5) 早乙女裕紀, 本藤祐樹, 森泉由恵 (2019) 地中熱ヒートポンプのCO₂削減効果を最大化する導入条件の探索, 第14回日本LCA学会研究発表会, 福岡 (九州大学), 2019年3月
- 6) 竹村彩花, 本藤祐樹 (2019) 業務用太陽熱給湯システムの建物用途・地域別CO₂削減効果, 第14回日本LCA学会研究発表会, 福岡 (九州大学), 2019年3月
- 7) 本藤祐樹 (2019) 2050年の社会像を見据えた再生可能エネルギー利用拡大への道筋, 気候変動の緩和策と適応策の統合的展開, 令和元年度 環境研究総合推進費 研究成果発表会, 名古屋 (名古屋大学), 2019年9月
- 8) 金均虎, 本藤祐樹, 森泉由恵 (2020) 太陽光・風力発電設備の廃棄がもたらす雇用や地域産業への影響, 第15回日本LCA学会研究発表会, 東京 (武蔵野大学, 有明キャンパス), 2020年3月 (コロナ禍により誌上発表に変更)

- 9) 庭野諒, 本藤祐樹, 森泉由恵, 田原聖隆 (2020) 離島地域での海洋温度差発電の副次的便益を考慮した導入可能性, 第15回日本LCA学会研究発表会, 東京 (武蔵野大学, 有明キャンパス), 2020年3月(コロナ禍により誌上発表に変更)
- 10) 小幡遼央, 本藤祐樹, 森泉由恵 (2020) 需要家特性を考慮した木質バイオマス地域熱供給システムのライフサイクルCO₂削減コスト, 第29回日本エネルギー学会大会(コロナ禍により誌上発表に変更)
- 11) 鈴木莉央奈, 本藤祐樹, 森泉由恵 (2020) 産業連関表を用いた廃棄物発電システムの経済波及効果分析, 第29回日本エネルギー学会年次大会(コロナ禍により誌上発表に変更)
- 12) 松崎裕太, 本藤祐樹, 森泉由恵 (2020) 拡張産業連関表による各種電池の製造に伴うCO₂排出量の分析, 第29回日本エネルギー学会年次大会(コロナ禍により誌上発表に変更)
- 13) 本藤祐樹 (2021) 持続可能な未来と再生可能エネルギーの利用, 令和3年度日本高圧力技術協会春季講演会 **【特別講演 (招待)】**

(参考: ポスター発表)

- 1) Kyosuke Shimizu, Hiroki Hondo, Yue Moriizumi (2018) CO₂ Reduction potential of residential solar water heating systems in Japan, Grand Renewable Energy 2018, Yokohama, Japan, 17-22 June 2018 **【Best Poster Presentation Award 受賞】**
- 2) 庭野諒, 本藤祐樹 (2018) 海洋エネルギー発電技術のCO₂削減ポテンシャル評価, 第27回日本エネルギー学会年次大会, 東京 (日本大学理工学部, 駿河台キャンパス), 2018年8月
- 3) 早乙女裕紀, 本藤祐樹, 森泉由恵 (2018) オフィス用地中熱ヒートポンプの地域別CO₂削減効果, 第27回日本エネルギー学会年次大会, 東京 (日本大学理工学部, 駿河台キャンパス), 2018年8月 **【ポスター発表賞 受賞】**
- 4) 小幡遼央, 本藤祐樹, 森泉由恵 (2018) 木質ペレット熱利用システムのライフサイクルCO₂排出分析, 第27回日本エネルギー学会年次大会, 東京 (日本大学理工学部, 駿河台キャンパス), 2018年8月
- 5) 小幡遼央, 本藤祐樹, 森泉由恵 (2018) 業務用木質ペレット空調システムのライフサイクルCO₂削減効果, 第14回日本LCA学会研究発表会, 福岡 (九州大学), 2019年3月 **【ポスター発表賞 受賞】**
- 6) 庭野諒, 本藤祐樹, 田原聖隆, 森泉由恵 (2019) 横浜国立大学海洋深層水の複合利用を考慮した海洋温度差発電の収益性分析, 第28回日本エネルギー学会年次大会, 大阪 (関西大学, 千里山キャンパス), 2019年8月 **【ポスター発表賞 受賞】**
- 7) 金均虎, 本藤祐樹, 森泉由恵 (2019) 太陽光・風力発電設備の廃棄に伴う二酸化炭素排出量の推計, 第28回日本エネルギー学会年次大会, 大阪 (関西大学, 千里山キャンパス), 2019年8月
- 8) 松崎裕太, 本藤祐樹, 森泉由恵 (2021) 産業連関表を用いたリチウムイオン電池の社会経済評価, 第16回日本LCA学会研究発表会

【サブテーマ2】

- 1) 田原聖隆 (2019) 海洋エネルギー技術のコベネフィットと将来可能性, 第14回日本LCA学会研究発表会, 福岡 (九州大学), 2019年3月
- 2) 小澤暁人 (2019) 長期的なエネルギー供給に関するモデル分析, 第14回日本LCA学会研究発表会, 福岡 (九州大学), 2019年3月
- 3) 田原聖隆, 中宮邦近, 小澤暁人, 工藤祐揮, 庭野諒 (2019) 再生可能エネルギー発電の将来CO₂排出原単位の予測, 第28回日本エネルギー学会大会, 2019年8月
- 4) 永友佑, 本藤祐樹, 工藤祐揮, 小澤暁人 (2019) 「コベネフィットを考慮した2050年までの再生可能エネルギー発電の普及可能性, 第28回日本エネルギー学会大会, 2019年8月

- 5) 永友佑、本藤祐樹、工藤祐揮、小澤暁人（2020）地方における雇用創出効果を考慮した2050年までの再生可能エネルギー発電の普及可能性，第29回日本エネルギー学会年次大会，2020年8月
- 6) 永友佑、本藤祐樹、工藤祐揮、森本慎一郎、小澤暁人（2021）地方における発電技術の雇用創出効果が日本のエネルギーシステムに与える影響，第16回日本LCA学会研究発表会，2021年3月

（参考：ポスター発表）

- 1) 永友佑、産業技術総合研究所第16回E&Eフォーラム(2020) 発電技術の雇用創出効果が日本のエネルギーシステムに与える影響【**優秀賞 受賞**】

（3）「国民との科学・技術対話」の実施

【サブテーマ1】

- 1) 本藤祐樹「将来における再生可能エネルギーの賢い使い方を考える」エコプロ2019，東京（東京ビックサイト），2019年12月

（4）マスコミ等への公表・報道等>

【サブテーマ1】

- 1) 横浜国立大学のSDGsに関するホームページから、本研究プロジェクトの取り組みを「How to use renewable energy smartly in the future?」として日英両言語で発信
<https://www.apcot.co.jp/ynu/sdgs/projects/how-to-use-renewable-energy-smartly-in-the-future/>

（5）本研究費の研究成果による受賞

- 1) Grand Renewable Energy 2018 International Conference, Best Poster Presentation Award（平成30年6月22日）
発表者：Kyosuke Shimizu, Hiroki Hondo, Yue Moriizumi
発表題目：CO₂ reduction potential of residential solar water heating systems in Japan
- 2) 第27回日本エネルギー学会大会、ポスター発表賞（平成30年8月9日）
発表者：早乙女裕紀、本藤祐樹、森泉由恵
発表題目：オフィス用地中熱ヒートポンプの地域別CO₂削減効果
- 3) 第14回日本LCA学会研究発表会、学生優秀ポスター発表賞（平成31年3月7日）
発表者：小幡遼央、本藤祐樹、森泉由恵
発表題目：業務用木質ペレット空調システムのライフサイクルCO₂削減効果
- 4) 第28回日本エネルギー学会大会、ポスター発表賞（2019年8月8日）
発表者：庭野諒、本藤祐樹、森泉由恵、田原聖隆
発表題目：海洋深層水の複合利用を考慮した海洋温度差発電の収益性分析
- 5) 産業技術総合研究所第16回E&Eフォーラム、優秀賞（2020年12月21日）
発表者：永友佑
発表題目：発電技術の雇用創出効果が日本のエネルギーシステムに与える影響
- 6) 平成30年度日本エネルギー学会論文賞（令和3年8月4日）
発表者：早乙女裕紀、本藤祐樹、森泉由恵
発表題目：地中熱ヒートポンプによるCO₂削減に効果的な導入条件の探索

IV. 英文Abstract

Scenarios for Expanding Renewable Energy Use Considering Visions of Society in 2050

Principal Investigator: Hiroki Hondo

Institution: Yokohama National University

E-mail: hondo@ynu.ac.jp

Cooperated by: The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

[Abstract]

Key Words: Decarbonized society, Local economy, Scenario, Input-output table, Energy model, Renewable energy, Renewable heat technologies, Employment

The objective of this study is to explore potential paths towards the establishment of a renewable energy-based society in 2050 using both forecasting and backcasting approaches. In this study, the Renewable Energy-Focused Input-Output (REFIO) model and multi-regional MARKet Allocation (MARKAL) model are used to analyze and assess the environmental and socio-economic impacts of renewable energy technologies.

First, the results of the analysis quantitatively reveal that, in the medium- and long-term, the co-benefit of creating employment opportunities associated with the deployment of renewable energy technologies may boost the expansion of local renewable energy. In the medium term, quantitative information useful for supporting the smooth inter-industry shifts of employment and the development of local industries is provided to accelerate the introduction of local renewable energy. This study presents a new possibility of drawing paths towards building a future renewable energy-based society by focusing on the public benefits of the region, rather than just on the cost reduction of renewable energy technologies, which has been so far pointed out.

Secondly, this study quantitatively reveals the potential as a CO₂ reduction option, focusing on renewable heat technologies and ocean renewable energy technologies. Specifically, it quantitatively shows that renewable heat technologies (hot water supply) are cost-effective and promising as a CO₂ reduction option, and in addition that the introduction of these technologies needs to be promoted more effectively, considering the natural and social conditions of the region. In addition, in common with both technologies, an effective regional energy system using local resources (woody biomass in mountainous regions, deep sea water in island regions, etc.) is presented in a specific and quantitative manner. This study clarifies the potential of not only renewable power generation technologies, which have been the primary focus, but also renewable heat and ocean energy technologies, and furthermore, presents potential paths to not only introduce them as stand-alone technologies, but to develop them as the core of the region's energy infrastructure.