

課題名 RFe-11T1 実装可能な技術による我が国の未来エネルギーシステムの構築

課題代表者名 加藤 之貴 (東京工業大学 原子炉工学研究所)

研究実施期間 平成23年度

累計予算額 累計予算額 11,582千円
予算額は、間接経費を含む。

研究体制

- (1) エネルギー技術のリスク評価と解析 (早稲田大学)
- (2) リスク評価に基づく技術ロードマップ検討 (東京大学)
- (3) エネルギーシステム評価研究 (九州大学)
- (4) 低炭素化効果の評価 (名古屋大学)
- (5) 未来エネルギーシステム提案 (東京工業大学)

研究協力機関

記載すべき事項はない

研究概要

1. はじめに(研究背景等)

代表者と研究分担者は2010年に「実装可能なエネルギー技術で築く未来一骨太のエネルギーロードマップ」(実装骨太)を編纂した。本研究はこれを発展させるものである。実装骨太ではエネルギー技術の積上げによる2040年における二酸化炭素排出量削減見通しを検討した。しかしながら、その評価は2040年単年のみの基礎的な評価に過ぎず検討として不十分であった。とくにエネルギー需要の日間、季節間、年間変化を配慮した動的な評価が無く、より実用に即したエネルギーの需要側、これに応じたエネルギー供給側の構成を検討する必要があった。そこで、本研究ではサブグループ(1)～(5)が連携し、実装骨太著者グループらと各エネルギー技術の可能性、リスクを精査しさらにその成果を統合し、より実装性の高いエネルギーシステムの構築を検討した。同時に提案システムの精度の高い評価を目指すこととした。

さらに、平成23年3月11日の東日本大震災以降では日本のエネルギー需給構造の大きく、かつ早急な変革が必要になり、ここ数年のエネルギー技術選択が中長期のエネルギー需給のあり方に大きく影響するに至った。そこで、震災後を考慮し、2050年までを視野にいたした、中長期エネルギーシステムの検討を進める必要が生じた。これらを背景に実装可能性を基準とした未来エネルギーシステムの構築を目指した。

2. 研究開発目的

実装骨太において種々のエネルギー技術分野について技術可能性と技術のリスクをあわせて評価する手法を既に確立している。本研究では各技術の効果、さらに時系列的な技術進歩、技術リスク予測を進めることを目指す。サブグループ(1)～(5)が連携し、各技術に関する将来予測をより詳細に精度高く進める。検討結果をもとに我が国のエネルギービジョンに寄与する、より実装性を基準とした未来エネルギーシステム構築を目指す。具体的には2050年までを視野にいたした日本の中長期エネルギーシステムを検討するためのエネルギー需給構造の評価ツールの提供を目指す。東日本大震災以後のエネルギーシステムの変化を配慮する。実装可能な技術による我が国の未来エネルギーシステム構築のためエネルギー需給構築の定量的な評価ツールを検討する。評価ツールを基にシナリオ評価を進め、エネルギー分野に関する低炭素化効果を定量評価し、政策提言を示す。各エネルギー技術のリスク評価を進め将来の普及性を工学的な視点で検討する。選択されたエネルギー技術を利用しての将来のエネルギー需要を日間、季節間、年間変動を考慮しての導入シナリオを作成し、そのエネルギー需要評価ツールを作成する。さらに、この需要に応じた系統側電力のエネルギー源、発電技術毎の供給構成を検討する。低炭素、低コストを指標とした電源構成の検討を行う。上記の検討より得られた、電源構成評価手法、エネルギー需要側評価手法の双方を用いた統合評価を行う。様々なエネルギー導入シナリオのもとで、日本全体の地球温暖化ガス発生量を評価し、望ましい未来エネルギーシステムの構成を示す。統合評価の結果をもとに政策提言の提示を目指す。

3. 研究開発の方法

(1) エネルギー技術のリスクの評価と解析

エネルギー技術のリスクの評価と解析は、サブテーマ(2)～(4)で実施される研究のベースとなるものであり、

研究方法は実装骨太の技術ロードマップ著者へのアンケートとヒアリングを中心に実施した。

アンケートおよびヒアリングの内容については研究会での議論およびアドバイザー会合における意見を反映して準備した。特に、3.11の東日本大震災を経て、執筆時点の震災前と震災後のロードマップにおける変化の可能性に加え、これまで議論されてなかった災害発生時のリスクについても回答を依頼した。

その結果を踏まえ、解析フォームを用いて統一的にまとめた上で評価・解析を実施した。なお、調査の一部はサブテーマ(4)に連携して実施した。

(2) リスク評価に基づく技術ロードマップ検討

本テーマにおいてはサブテーマ(1)で特定された技術のリスクに基づきながら、将来エネルギーシステムに組み込まれる技術を特定し、そのロードマップを検討しながら、将来エネルギーの需要状況をシミュレートできるモデルを構築する。将来のエネルギーシステムを設計するためには、エネルギー技術を体系的に分析し、一つのシステムとして組み合わせたときのエネルギーコスト、安定供給性、環境負荷、安全性などのような多面性を評価できるようにしなくてはならない。構築するモデルは技術の将来における性能や普及率といった変数を決定し、エネルギーシステムに組み込まれたときに得られる機能を推定し、最終的な燃料や電力の必要量を分析できるものとする。

モデルの構築にあたっては、技術のリスク評価に基づくロードマップの検討が必要となる。ロードマップを検討する上で考慮すべきリスクとしては、同一のエネルギー需要に対して複数の技術が導入される技術の競合、一つの技術の効率が他の技術の効率などに影響する重複、他方の技術が他方の技術に含まれ効率に影響を与える技術の包含、技術の導入が他の技術の導入を前提にした依存などの、技術同士の相互関係がありえる。これらの技術間の関係におけるリスクを考慮し、技術ロードマップを検討していく。

また、構築にあたっては、技術の実装可能性にも留意する。“実装可能性”には大きく技術的なものと社会的なものがあると考え。技術が技術的に実装可能とは、実証段階にあり、量産可能で、導入場所があり、既存の技術に比べ著しく高コストでないことを指す。技術が社会的に実装可能とは、環境、社会、経済への影響を考慮した上で、社会に導入可能または導入に対し合意形成可能であることを指す。既に実証から大規模導入に掛かっている技術については過去の統計データから将来を予測するための機構を構築し、現在実証段階にある技術については国内外の専門家や文献、特許などを参考にしながら将来を予測可能とするモデルを構築する。

(3) エネルギーシステム評価研究

各種発電技術は、設備費、燃料費、負荷追従性、資源確保の安定性、環境負荷など異なる特性を有する。それらの特性を踏まえ、夏季昼間や冬季夕方の需要ピーク時にも安定に電力を供給する中期・長期の電源構成を計画するため、本研究では、様々な制約条件を線形計画法で解く電源構成モデルを使用した。電力需要は東京電力から公表された2008年、2010年の需要データをもとに、夏、春・秋、冬の各平日・休日および夏季最大ピーク3日平均の7代表日の全国の仮想電力需要データを構築した。それらのデータをもとに、人口減と省エネ化シナリオに基づき、今後の需要データを評価した結果および太陽光発電や風力発電などの今後の設置量・稼働率シナリオを入力として電力網に関わる発電技術をどのように組み合わせる時に安定供給を実現しつつ電力網の発電コストを最小化できるかを評価した。各発電技術の設置年から既設の設備容量の今後の推移を設定し、評価の対象年は2010、2020、2030、2040、2050年とした。化石燃料価格についてはコスト等検証委員会の新政策シナリオを標準シナリオとして想定した。

(4) 低炭素化効果の評価

本テーマでは、各提案技術を導入したエネルギーシステムの低炭素化効果の評価を実施した。ここでは、低炭素化効果の指標としてGHG(Greenhouse Gas)排出量を用いた。一般に、エネルギー技術の導入に伴うGHG排出量の変化は燃料消費に伴う排出と電力使用に伴う排出双方の増減により生じる。そこで、サブテーマ(2)で構築されたエネルギー需要の将来予測モデルを用いて、あるエネルギー技術を導入した際の2010、2020、2030、2040、2050年における産業、業務、家庭、運輸セクターの各需要家についての各種燃料の消費量および電力の日負荷曲線を決定した。つづいて各年毎の電力の日負荷曲線をサブテーマ(3)で構築された電源構成モデルへの入力として与え、2050年までの発電コストが最小化になるように最適計算を行い、電力使用時のCO₂排出原単位、CO₂排出量、総発電コストなどを決定した。以上得られたデータに基づいて、GHG排出量 = $\sum(\text{各燃料消費量}_i \times \text{燃料種ごとのGHG排出係数} + \text{電力消費量}_i \times \text{電力使用時のCO}_2\text{排出原単位})$ (i: 各需要家)によりGHG排出量を算出し、ベースケースとの比較からGHG排出量の削減効果を定量的に示した。さらに、実装可能性の観点から評価されたエネルギー技術の性能および導入量予測を基準として、性能および導入量の変動がGHG削減効果に与える影響についての感度解析も実施した。

なお、本計算にあたっては2050年までのエネルギー技術の性能および導入量予測が必要であるが、この点に

関してはサブテーマ(1)(2)と連携しながら独自調査の結果も組み入れた上で決定した。また、考慮したエネルギー技術については表-1に掲げた技術とした。

(5) 未来エネルギーシステム提案

成果を総括し未来型エネルギーシステムの提案と提言をまとめた。検討の流れを図-1に示す。サブテーマ(1)エネルギー技術のリスク評価と解析で各技術の評価を進め、サブテーマ(2)リスク評価に基づく技術ロードマップ検討により各技術の将来展開を検討する。サブテーマ(3)エネルギーシステム評価研究にてエネルギーのベストミックス化を検討する。ベストミックス化されたエネルギーシステムに関して(4)低炭素化効果の評価を行い、各エネルギー技術の利用によるエネルギーシステムの低炭素化効果を評価する。これらの成果を統合し、エネルギー技術導入による日本全体の低炭素化を評価するツールの作成を検討する。エネルギー技術を導入したベストミックス化されたモデルに対して温室効果ガス(GHG)削減効果評価を行い、未来に向けた新たなエネルギーシステム技術展開の方向性を提案する。技術の導入シナリオを複数立て、ケースごとに各エネルギー技術のエネルギー需要の2050年までの経時変化を算出する。

各要素技術の将来進展をモデル化しエネルギー需要シナリオを作成する。電気自動車、照明、空調などを取り込むにあたり日間、年間のエネルギー需要変動を考慮し、これを2050年まで検討する。この需要に応じた供給側の検討を系統電力コスト、CO₂原単位を指標に最適化(ベストミックス化)する。結果を需要側にフィードバックし需要シナリオを再構築し、この連携によって最適化されたエネルギーシステムの構築を目指す。ベストミックス化された供給側からのエネルギー供給をもとに需要側基準でのGHG削減効果をCO₂換算値で、2050年までの経時変化で算出する。計算結果をもとにエネルギー技術導入の効果、構成を検討する。国民との対話を進め、進捗状況を開示し、参加者の意見を聴取し研究手法に反映する。これらの成果をもとに政策提言を行う。

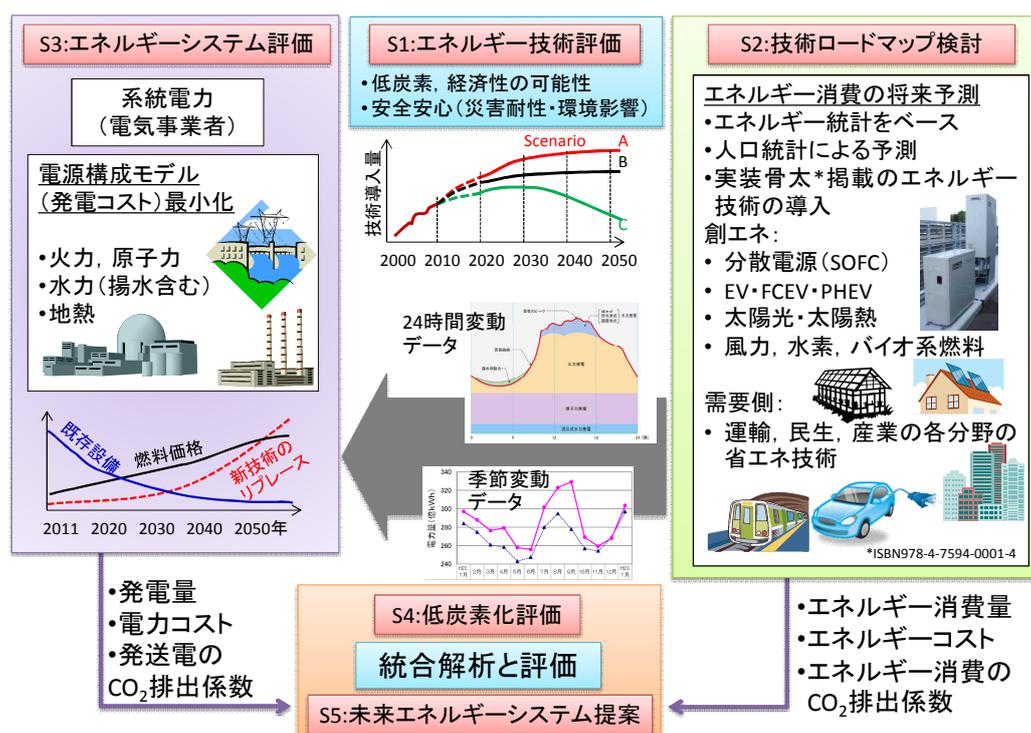


図-1 未来エネルギーシステム提案の検討評価の流れ(Sはサブテーマを示す)

4. 結果及び考察 ※4.のうち、結果についてはサブテーマごとに記載すること。

(1) エネルギー技術のリスクの評価と解析

これまで、エネルギー基本計画における低炭素化の骨子は、9基/14基の原発増設に基づく電化が中心に据えられていた。しかしながら、福島第一原発の事故後に再稼働が不透明な情勢となる中、不安定ながらも再生可能エネルギーへの代替が模索され始めたことを踏まえ、これらの実装骨太で考慮していない技術も研究を進める上で不可欠と判断し、日本経済新聞のゼミナール連載への執筆者をベースに本委託研究の実施者で分担して調査した。

調査を踏まえた評価および解析の結果、再生可能エネルギー(この例では太陽光発電)が導入された場合、不安定電源の調整力を確保するためには、蓄電池(V2G, Vehicle to Grid)や揚水発電のみでは不足、稼働率の不透明な火力発電を大量に準備しておかざるを得ないなど、既存の技術および枠組みでの対応に限界がある。

個人消費による太陽光発電の導入促進にフォーカスした政策制度面では○であるが、一方で、電力系統の運用に際して発電した電力を一方的に送電する現在の発電一体運営の維持は極めて困難であると予測される。したがって、発・送・配電分離を含めた電気事業法の改正などに踏み込まない限り、制度面で導入を律速する可能性がリスクとして存在することが明らかになった。他の技術でも同様にまとめ、政策提言のためのツールとして、考慮すべきリスクを技術ごとのデータベースの形に整備した。

(2) リスク評価に基づく技術ロードマップ検討

エネルギー需要を家庭、業務、産業、運輸に大別し、それぞれの分野で2010年～2050年までに導入される実装可能な技術を特定し、その導入効果を評価するためのモデルを構築した。モデルは国内の総合エネルギー統計に基づくことで、実際にどの程度燃料の消費量が変化するかを評価できるものとなっている。表-1にモデルにおいて考慮したエネルギー需要における技術と変動要因を示す。

各技術の導入率については現状の実装可能性を分析して得られた技術導入の推移を基にし、実際にどの程度導入されるかという技術毎のシナリオを入力することで将来のエネルギー需要を出力できるようにしている。このとき、エネルギーにより享受される機能(効用)の必要量は、人口やGDPといった指数に影響を受けることが予想されるため、構築したモデルにおいてもエネルギー必要量を人口とGDPの変化によって増減する仕組みを搭載した。例えば、人口に関しては既に公開されている人口問題研究所の人口将来予測に基づき、人口に合わせて、家庭部門、業務部門の人口と強い相関のあると考えられる教育、医療などの分、運輸部門の家計寄与分などのエネルギー需要が削減されることとした。GDPに関しても、同様に産業等の分野のエネルギー需要が増減することとした。ここでは将来のGDPの予測に関していくつかのシナリオがありうることを考慮し、1人あたりGDPの変化などから総GDPを計算し、関連するエネルギー需要が増減される仕組みを構築した。

モデルの出力としては、各分野の年間の燃料使用量と電力使用量に加え、電力需要の日負荷曲線を出力できるようにしている。電力需要は今後抑制されると推定された。これは人口の変化に基づく需要そのものの減少に加え、ピーク時間帯に使用されている空調等の効率改善や燃料電池によるコジェネレーションなどによる給湯需要と同時に発生する電力などによるものである。このような電力需要の日負荷曲線に基づき原子力、火力、水力、風力、太陽光、地熱などの発電設備の最適化構成を求めて、最終的な燃料消費や環境負荷を解析できるようなモデルを構築した。

モデルの出力結果は、サブテーマ(3)、(4)、(5)において利用できる形になっており、本サブテーマで構築したモデルによりエネルギーシステムの評価と低炭素化評価を行い、将来のエネルギーシステムを提案可能とした。また、サブテーマ(3)、(4)の結果に合わせたモデルの再構築や出力情報の調整を行った。

(3) エネルギーシステム評価研究

本研究の開発により、以下のようなシナリオオプションを設定した解析を可能とした。

- 原子力発電: 例 1 再稼働容認、新設なし、40年で廃炉。例 2 再稼働なし。
- 火力発電(石炭・石油・天然ガス): 例 1 40年で廃棄、新設可。例 2 石炭は一定量使用。
- 水力発電: 例 1 現状と同じ発電容量を維持。
- 発電所効率: 例 1 公表された発電効率、設置年度をもとに廃棄予定年度、発電効率推移を予測。
- 燃料価格: 例 1 コスト等検証委員会によるシナリオに準拠。例 2 現在のトレンドの外挿。
- 再生可能エネルギー導入量: 例 1 太陽光発電・風力発電は導入実績の外挿予測、寿命は20年。地熱発電は2050年に5.18GW[5]となるよう線形増加。例 2 太陽光発電・風力発電は一定量で頭打ち。
- 蓄電: 例 1 蓄電技術として揚水発電に加えて、次世代自動車(電気・プラグインハイブリッド・燃料電池)の蓄電池が利用できるとし、3車種の合計の導入量を仮定。例 2 化学物質としての蓄電を想定。
- CO₂: 例 1 CO₂は漸減させる。例 2 CO₂排出を炭素税などにより経済最適化の内部化をする。

電源構成モデルにより評価された発電種別ごとの発電電力量内訳が将来どのように推移していくか評価した。電力需要側にどのような省エネ技術を導入した時に電力網の構成がどのように推移していくのか、どのような前提を置いた時に、電力網の最適構成はどのように推移するのかなど、技術の選択や前提による今後のエネルギーシステムのあり方について比較・議論する基盤を構築することに成功した。

(4) 低炭素化効果の評価

3. 研究開発方法で示したように、サブテーマ(1)～(3)と連携しながら表-1に掲げられた各エネルギー技術についての低炭素化効果の定量的評価および性能および導入量の変動が低炭素化効果に及ぼす影響についての感度解析を実施した。一例として家庭分野における各エネルギー技術の導入によるGHG排出量の削減効果を検討した結果、たとえばGHG排出量の削減効果としては厨房の電化に比べ暖房の電化(灯油⇒電力)の方が

かなり大きいことが明らかになった。また、暖房の電化において機器効率の向上が排出量削減効果に大きく影響することが明らかになった。このように、本サブテーマにより、各エネルギー技術の導入に伴うGHG排出量の削減効果を時間軸ごとに定量的に示すことが可能になった。また、機器性能の向上や導入量がGHG排出量の削減効果に及ぼす影響についても示すことが可能となった。

(5) 未来エネルギーシステム提案

(1)～(4)の作業を統合し、実装可能技術を用いた未来型のエネルギーシステムのシナリオ評価検討を進めた。需要側の各エネルギー技術の導入シナリオのケースを作成し、ケース毎のエネルギー需要側を試算し、これをもとにしたエネルギー供給側のベストミックス化を行った。さらに日本全体のGHG発生量をCO₂換算でケース毎に試算した。

表-1 エネルギー需要側における考慮した技術

		技術および変動要因	
家庭・業務	考慮した技術	➤	エネルギー機器の効率 家電製品(エアコン、冷蔵庫)、給湯機器、照明機器
		➤	家庭用燃料電池(SOFC)の効率および導入率
		➤	太陽光・太陽熱の導入量
		➤	空調需要におけるエネルギー効率 建屋の断熱性能の向上
		➤	エネルギーの使用形態の変化 厨房の電化、給湯の電化、暖房の電化
	未考慮の観点	➤	デマンドコントローラ等の制御技術導入による省エネ効果
		➤	カーテンや簾などの導入やライフスタイルの変更による省エネ効果(電力量・電力)
		➤	各家電製品の使用時間の分散やライフスタイルの変更などの節電効果(電力)
		➤	産業構造の変化に伴う業務分野のエネルギー需要の変化
産業	考慮した技術	➤	省エネルギー技術の導入 膜-蒸留ハイブリッドシステム、低温排熱利用、クレーン・モーター等におけるエネルギー回生、農林分野における未利用バイオマスの利用、鉄鋼プロセスにおける水素利用や CCS 等による省CO ₂ 技術、中小事業所における省エネ対策の徹底
		➤	自家発電における技術導入および効率改善 化学再生発電、ガスエンジン
	未考慮の観点	➤	産業構造の変化に伴うエネルギー需要の変化
		➤	資源リサイクルなど静脈産業によるエネルギー需要の変化
運輸	考慮した技術	➤	次世代自動車の普及 ハイブリッド車、燃料電池車、電気自動車
		➤	燃費の向上
	未考慮の観点	➤	モーダルシフトによる需要の変化
全分野共通	考慮した観点	➤	人口変化に伴うエネルギー需要の変化
		➤	GDP 変化に伴うエネルギー需要の変化
	未考慮の観点	➤	人口あたりのエネルギー消費量の変化
		➤	GDP あたりのエネルギー消費量の変化

表-2 電源構成モデルにおける発電技術項目

考慮した技術	➤	原子力、石炭火力、LNG 火力、石油火力、LNG 複合火力、水力*、揚水、地熱、太陽光、風力(* 中小水力は一般水力と区別しないこととした。)
考慮していない技術	➤	波力、海洋温度差、熱電素子など

表-3 統合解析のシナリオオプション(2050年目標)

項目	指標	基本	積極進展	積極進展+再生可能進展	低炭素化高度進展
人口変化		人口統計に準拠			
GDP変化		一人あたり年1%成長			同年0%成長
再生可能エネルギー	太陽光、風力発電導入	太陽光85GW、風力32GW (稼働率21.6%)		太陽光150GW、風力64GW (稼働率34.9%)	太陽光150GW、風力64GW (稼働率34.9%)
自動車	燃費向上	無	有		
自動車	域内燃料電池自動車+電気自動車割合	0%(2050)	80%(2050)	積極進展ケースに太陽光150GW、風力64GWを導入	積極進展+再生可能ケース、GDP成長率0.0%/(人・年)、さらに種々のエネルギー技術の高度化を考慮
自動車	遠距離燃料電池自動車割合	0%(2050)	80%(2050)		
家庭	厨房電化	0	80%(2050)		
業務	厨房電化	0	80%(2050)		
家庭	灯油の電化	0	東北以北50%(2050)、関東以南80%(2050)		
業務	灯油の電化	0	50%(2050)		
軽水炉		再稼働ありかつ40年で運転終了、または再稼働無し			
高温ガス炉	基数(2050)	0	11	11	11

エネルギー需要側、電源構成側では表-1、2の各事項を考慮した。さらに導入効果を評価するため、統合解析のシナリオオプションを表-3の通りに設定した。GDP成長率を2000~2008年の実績にあわせ+1%/(人・年)と設定し、軽水炉発電は再稼働ありで、かつ40年での運転終了、または再稼働無しを想定した。電気・燃料電池自動車、厨房電化、灯油の電化、高温ガス炉型原子炉を主たるパラメータとした。以下では再稼働ありで、かつ40年で運転終了のケースでの結果を示す。

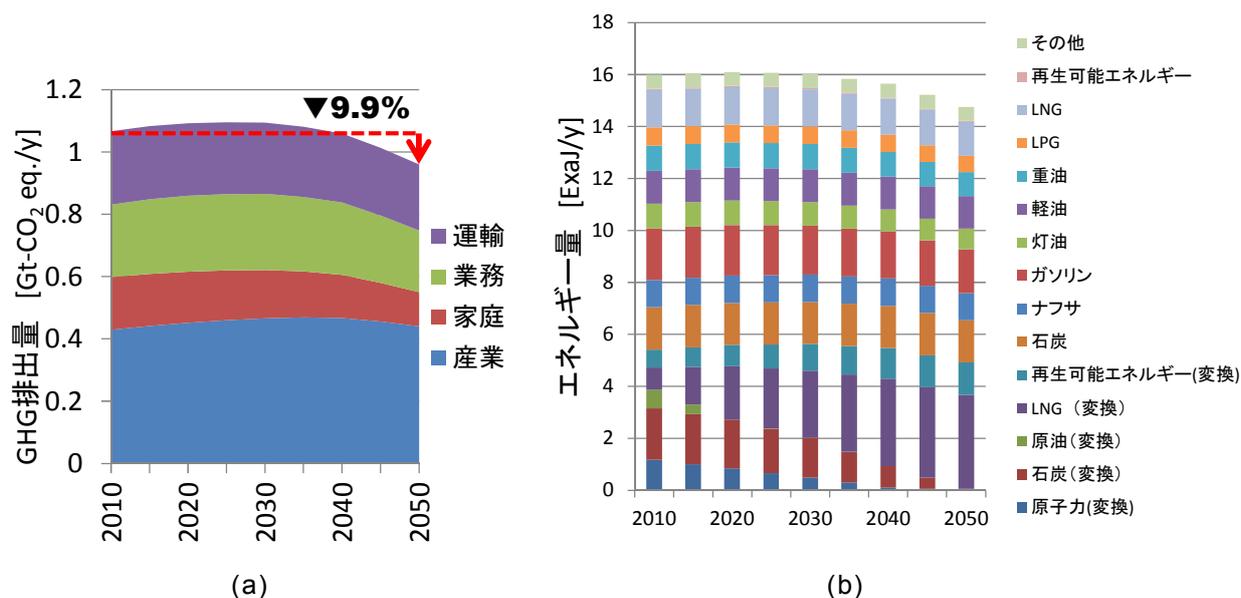


図-2 基本ケースの日本全体の年間(a)GHG排出量、(b)一次エネルギー消費量の経年変化

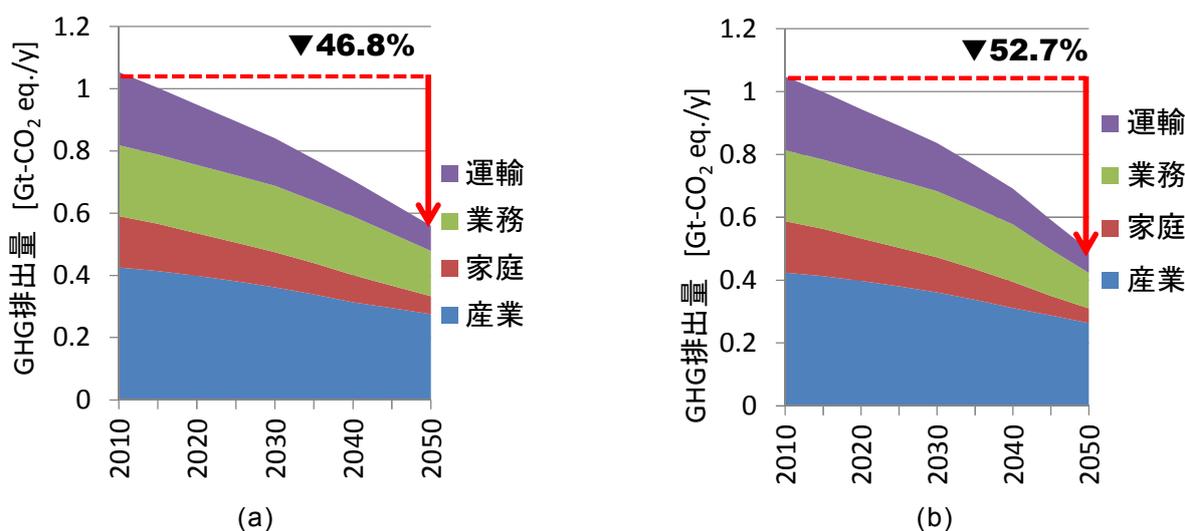


図-3 ケース毎の年間GHG排出量(a)積極進展ケース、(b) 積極進展ケース+再生可能進展ケース

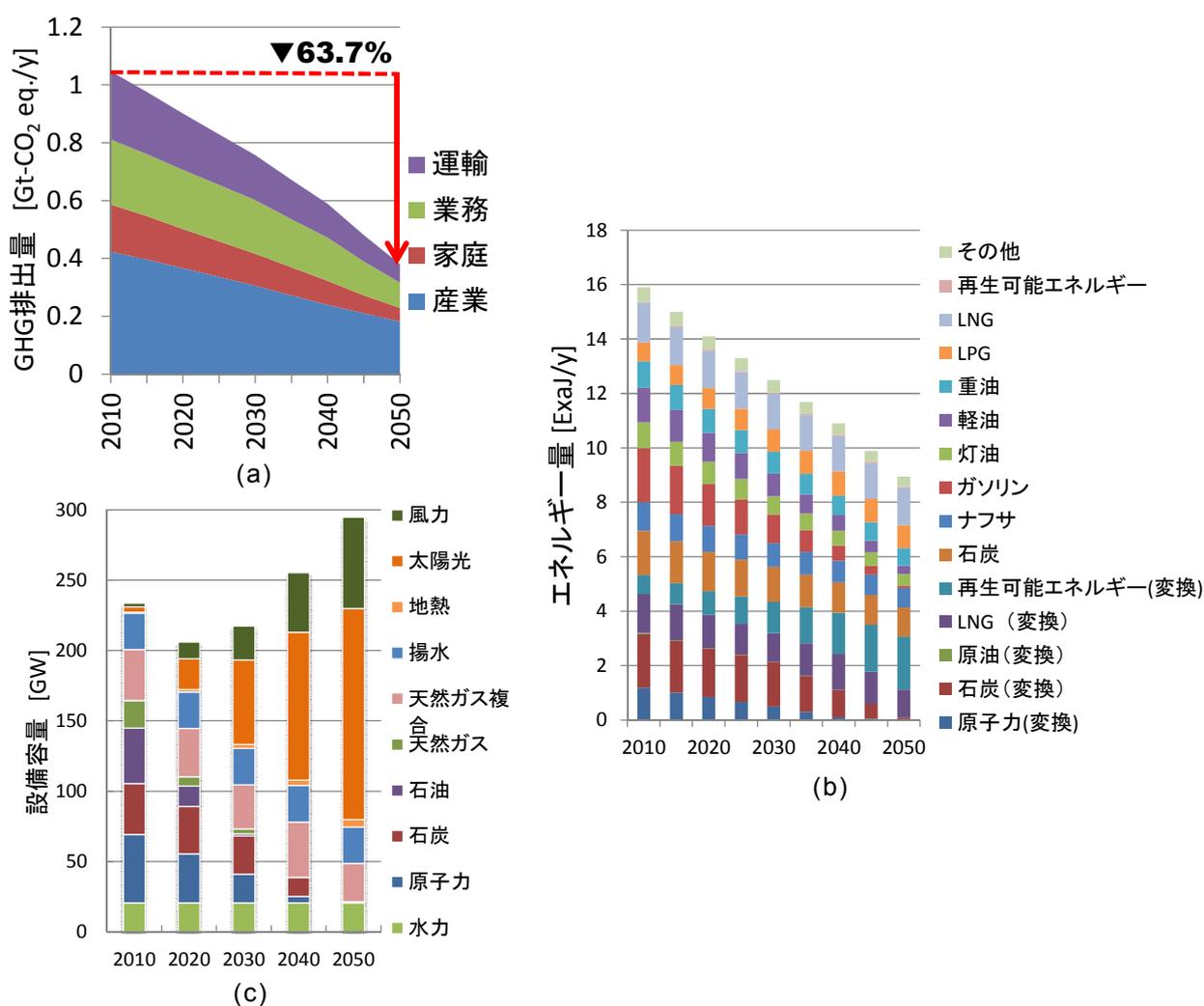


図-4 低炭素化高度進展ケースにおける各経年変化、(a)日本全体の年間GHG排出量、(b)一次エネルギー消費量、(c)電設備容量

基本ケースの結果を図-2に年間の(a)GHG排出量、(b)一次エネルギー消費の経年変化を示す。GHG削減量は2010年に対して2050年では9.9%削減となった。軽水炉の停止にともない、他技術での発電が必要になる。同図(b)より、天然ガス複合発電(GCC)はGHG排出係数が小さく、石油・石炭発電から次第に移行することで

GHG排出量削減に貢献している。しかし天然ガスGCCの導入量が多い方針をとり、発電所の建設を進めた後で天然ガスの価格が高騰した場合、エネルギー価格も高くなる。燃料価格が想定と異なる形で変動するリスクを考慮する必要がある。これに対し実装可能技術を積極的に導入した積極進展ケースでは-46.8%(図-3(a))、さらに積極進展ケースに再生可能エネルギーを積極的に導入した場合-52.78%(図-3(b))であり、大きなGHG排出削減が可能であった。図-4に低炭素化高度進展ケースにおける各経年変化の結果を示す。このケースは積極進展ケースに対し実装可能技術、再生可能エネルギーを高度に導入(PV 150 GW, 風力 64 GW)に加え+GDP 伸び率0.0%(人・年)を仮定した。同図(a)より年間GHG排出量の同63.7%削減が達成できると試算された。同図(b)より一次エネルギー消費量のうち再生可能エネルギーの分が進むことで化石エネルギー消費が削減される。これを実現するため、同図(c)に示す設備容量においては再生可能エネルギーの容量が大きくなることが明らかになった。電源構成の最適化により低炭素化が可能であることを定量的に明らかにした。以上より低炭素化実現に向けての技術導入効果を定量的に評価できる統合解析手法を確立し、解析ツールを作成した。

研究と並行し国民との対話集会を開催し、将来のエネルギーシステムの定量的な評価と、具体的な課題を示して欲しいとの要請を受けた。とくに、原子力減少に対するエネルギーシステムの変化の検討などが求められた。今回の検討結果はこれらの意見を反映したものである。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

サブグループ(1)~(4)および本サブテーマ(5)では実装可能技術を用いた未来型のエネルギーシステムのシナリオ評価検討を行い、その実現課題を明らかにした。

サブテーマをもとに行った、統合評価より政策決定に資する、以下の成果を導いた。

エネルギー需要・供給・省エネ技術に係る様々なオプションを設定したシナリオ解析を実現した。実装可能なエネルギー技術が進展し積極的に導入されることで、4割以上のCO₂排出の低減が可能。産業排熱回収、次世代自動車導入、灯油の電化などが有効。さらに太陽光、風力発電の導入で5割以上低減が可能。また、一方GDPが基本とした一人当たり年1%成長に対し同0%成長では6割以上の低減が評価できた。原発再稼働、40年で運転終了の場合、電源構成の最適化により低炭素化が可能であることが定量的に示された。

様々なシナリオ解析に基づく課題抽出・制度提言が可能になった。例えば、再生可能エネルギー大規模導入時には、負荷変動が大きく電力貯蔵技術が必須であることを明らかにした。併せて負荷変動が大きいゆえに垂直統合型の電力会社経営は困難であり、電事法・固定価格買取制度の見直しが必須であった。電力貯蔵技術としては蓄電池のみならず水素などのケミカルストレージが候補であった。

火力発電については高効率な発電装置への置換が重要。需要側には電気、熱利用技術が有効。家庭・業務部門ではエアコンなど電気機器の効率向上、暖房の電化、産業部門では低温排熱利用ヒートポンプ、蒸留膜ハイブリッドシステム、包括的な省エネルギープロセスシステムの導入、運輸部門では、自動車の燃費向上・次世自動車の普及が有用であった。カーボンニュートラルなバイオマスや太陽熱や未利用熱など、電力以外へ買取制度や補助金の範囲を拡充することは検討の価値がある。太陽熱やバイオマスなどの低エクセルギー源は温水、暖房などの低エクセルギー需要に直接利用することが効率的で有用である。また再生可能エネルギーの非定常電気出力の活用方法としてヒートポンプを用いた増熱、さらには化学物質に変換してエネルギー貯蔵が将来のエネルギー有効利用手法の候補となりえる。これらを明らかにした点に本研究の科学的意義があると判断する。

なお、将来のエネルギーシステム検討の上で、精度の高い検討には設備の全国の蓄積量や広範な需要内訳データを公的な機関が整備することが望ましい。

(2) 環境政策への貢献

本研究により得られた研究成果による環境政策への貢献は下記の3点である。

第一に、設備費や燃料費、負荷追従性等のデータをもとに将来の動向を推計し、電力網の発電コスト最小化の条件のもとでの電源構成を求める手法を開発し、そのツール化を行った。本ツールを用いることで、様々なシナリオのもとでの二酸化炭素排出削減効果を容易に推計可能となり、今後の削減達成目標の設定の際のエビデンスを提供することが可能となる。これにより少ないコストで再生可能エネルギー技術等の導入施策等の環境政策の実施前に、それが実現された場合の効果を推算することが可能となった。

第二に、分散電源の導入拡大により重要性がますます蓄電技術が、導入量の規模により変化し得ることを指摘した。(規模は小さいうちは~だがとの記載)具体的には、太陽光発電の導入量を150GWとしたケースでは、本研究が想定しているような電気自動車の二次電池の活用に加え、水電解水素やCO₂還元による燃料合成などの、ケミカルストレージの活用を考慮する必要がある。このことは環境政策としての二酸化炭素排出削減施策の実

施において、その目標値の設定次第で、研究開発や導入を支援すべき技術が変化することを意味する。

そして第三に、解析結果をもとに、環境政策、特に二酸化炭素排出抑制政策における熱技術の重要性を指摘した。エアコンなど電気機器の効率向上や屋の断熱性能の向上など熱需要抑制技術の進展に加え、低温排熱利用などの熱利用技術による二酸化炭素排出削減ポテンシャルは大きく、継続的な研究開発や導入促進策が必要であることを定量的に示すことが出来た。このことは、熱利用技術に関する研究開発などを通じた、今後の実効性のある環境政策立案時にエビデンスとして活用することが可能である。

また、得られた成果の一部を活用し、コスト等検証委員会のCall for Evidence(根拠に基づく情報提供の照会)(平成23年12月22日～平成24年2月20日)に情報提供を行った。提供した情報は、平成24年3月14日の第9回コスト等検証委員会の「配布資料2-1. Call for Evidenceで得られた情報を踏まえた対応について(案)(発電原価)」において議論された。提出された意見には「現在の報告書の内容を変更する必要があるものではない。」と判断されたものが多く見られるなか、当グループからの意見はすべて「試算結果を参考値として示す。」と反映された。

6. 研究成果の主な発表状況(別添作成要領参照)

(1)主な誌上発表

<査読付き論文>

特に記載すべき事項はない

<査読付論文に準ずる成果発表> (「持続可能な社会・政策研究分野」の課題のみ記載可)

特に記載すべき事項はない

(2)主な口頭発表(学会等)

- 1) 梶川裕矢: 化学工学会 札幌大会 2011, シンポジウム <東日本大震災後のエネルギーシナリオを考える>, 札幌, E201 (2011), 「エネルギーロードマップとイノベーション政策」
- 2) 中垣隆雄: 化学工学会 札幌大会 2011, 同シンポジウム, E204 (2011)
「今夏の電力供給の概要と今後の見込み」
- 3) 松方正彦: 同シンポジウム, E207, 「エネルギーと仲良くする新しいライフスタイルにむけて」
- 4) 加藤之貴: 同シンポジウム, E213, 「原発の事故の内容、収束に向けての技術的 内容、新型原子炉の研究開発況」
- 5) 古山通久: 同シンポジウム, E216, 「脱原発ははたして可能か?~実装可能な技術 で考える~」
- 6) 松方 正彦: 化学工学会 第43回秋季大会, シンポジウム <2011年夏以降の電力需給とエネルギービジョン>, 名古屋, V202(2011),
「電力需給に関する緊急提言の基本的な考え方」
- 7) 梶川裕矢: 同シンポジウム, V203, 「電力需給に関する緊急提言の背景と内容」
- 8) 松方正彦: 同シンポジウム, V204, 「緊急提言グループの活動報告」
- 9) 中垣 隆雄: 同シンポジウム, V205, 「今夏の電力供給の概要」
- 10) 菊池康紀、窪田 光宏: 同シンポジウム, V206, 「2011年夏季における電力需要の分析」
- 11) 古山通久: 同シンポジウム, V2015, 「ポスト大震災の電力需給アンバランス解消に向けて」
- 12) Yukitaka Kato, A. L. Dipu, M. Ujisawa: Proc. of 1st International Conference on Energy Efficiency and CO₂ Reduction in the Steel Industry (EECRsteel 2011), Düsseldorf, Germany, (2011)
“Feasibility Study on Carbon Recycling Iron-Making System“
- 13) T. Nakagaki: ASME 2011 Energy Sustainability Conference & Fuel Cell Conference, Washington DC, USA, (2011)
“Exergy recuperation of mid and low quality heat by chemical reactions”
- 14) 古山通久: 第2回新エネルギーフォーラム(2011)
「ポスト3.11 の電力需給とエネルギービジョン」
- 15) 古山通久: 東風公民館校区主催講演会(2011)
「みんなで実行! 無理なく協力節電」
- 16) 古山通久: 日本伝熱学会関西支部伝熱技術フォーラム平成23年度第1回例会兼化学工学会エネルギー一部会熱利用分科会 第22回研究会(2011)
「原発減少社会における電力需給を考える」

- 17) M. Koyama: 11th International Conference on Clean Energy (ICCE-2011), Taichung, Taiwan, 2011
 “Future Japanese Energy System with Decreasing Nuclear –Exploration for A Golden Mean Way with A Minimum Regret” (keynote lecture)
- 18) 古山通久: 第3回国家経営勉強会(2011)
 「原発減少社会におけるエネルギーの将来～電力に関する中庸の議論を中心に～」
- 19) 古山通久: プロセスシステム工学第143委員会・平成23年度第5回研究会(2012)「原発減少社会における電力需給～中庸の立場から」
- 20) 加藤 之貴: 化学工学会 第77年会, シンポジウム –化学産業技術フォーラム セッション3「実装可能技術で築くエネルギーシステム」, 東京, XB213(2012),
 「未来エネルギーシステムの構築に向けて」
- 21) 中垣 隆雄: 同シンポジウム, XB214, 「系統電源の構成分析と将来予測」
- 22) 菊池 康紀: 同シンポジウム, XB215, 「将来のエネルギー需要の分析とモデル化」
- 23) 古山通久: 同シンポジウム, XB216, 「発電部門の低炭素化」
- 24) 梶川裕矢: 同シンポジウム, XB217, 「社会シナリオの工学的評価に基づくエネルギー戦略立案に向けて」
- 25) 菊池康紀他: 実装可能な技術による将来エネルギーシステムの設計、日本LCA学会第7回研究発表会、東京理科大学、pp. 10-11(2012)

7. 研究者略歴

課題代表者: 加藤 之貴

1962年生まれ、東京農工大学工学部卒業、工学博士、現在、東京工業大学原子炉工学研究所准教授

研究参画者

- (1) 1) 松方 正彦
 1960年生まれ、早稲田大学工学部卒業、現在、早稲田大学理工学術院先進理工学研究科教授
- 2) 中垣 隆雄
 1966年生まれ、早稲田大学工学部卒業、現在、早稲田大学創造理工学部准教授
- (2) 1): 菊池 康紀
 1982年生まれ、東京大学工学部卒業、現在、東京大学大学院工学系研究科助教
- 2): 梶川 裕矢
 1976年生まれ、東京大学工学部卒業、現在、東京大学大学院工学系研究科特任講師
- (3) 古山 通久
 1974年生まれ、東京大学工学部卒業、現在、九州大学稲盛フロンティア研究センター教授
- (4) 窪田 光宏
 1973年生まれ、名古屋大学工学部卒業、現在、名古屋大学大学院工学研究科助教
- (5) 加藤 之貴 (課題代表者)

RFe-11T1 実装可能な技術による我が国の未来エネルギーシステムの構築

(1) エネルギー技術のリスクの評価と解析

早稲田大学 先進理工学部応用化学科
創造理工学部総合機械工学科

松方 正彦
中垣 隆雄

平成23年度累計予算額：1,289千円

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 一つのエネルギー技術がロードマップ通りに開発、あるいは性能向上して市場に投入されても、技術面、経済面、資源面、立地面、耐災害面、環境影響面、政策制度面などの側面で、導入量に影響する要因がある。それらを広義のリスクと捉え、導入を律速する事項の洗い出しと評価・解析を実施した。影響の大きい原子力、大規模再生可能エネルギー（水力、太陽光、風力など）、モビリティの駆動源の電化・水素化、SOFCコジェネレーションシステムの導入など、ロードマップに対する工学的および社会的な側面での影響要因を精査し、それらをリスクと捉えた場合の今後のエネルギー技術導入における実装可能性と低炭素化効果について検討できるデータベースを構築した。

[キーワード] ボトルネック、制約条件、導入量

1. はじめに

エネルギーシステムは、日本国を検討対象とした場合、境界内外からのインプット（化石燃料、バイオ系燃料、ウラン、未来にはエネルギーキャリアとしての水素などの物質、太陽光、風力等による国内の再生可能エネルギー電力なども含む）を用い、産業活動による製品や輸送の動力、民生の電力および熱の創出などをアウトプットとしてエネルギーを消費し、廃熱・廃物を生成する一連の動的な流れである。ベストミックスを考える際には、このシステムのエネルギー・物質収支において、需給の24時間変動や季節変動に加え、災害時の一時的な大変動も含むあらゆる変動を許容し、都市部のみならず全国津々浦々まで行き渡る送電・物流網によって時空間的に破綻せずに成立することが基本条件となる。これに加え、人口減や二次エネルギーの中心となる電力、特に大規模集中電源の寿命ライフサイクルとして原子力発電の廃炉、老朽火力のリプレースなどを考慮した長期的な視点でのシナリオを仮定し、対象となる新たなエネルギー技術の導入ロードマップを考えていく必要がある。

これまで、エネルギー基本計画における低炭素化の骨子は、9基/14基の原発増設に基づく電化が中心に据えられていた。しかしながら、福島第一原発の事故後に再稼働が不透明な情勢となる中、不安定ながらも再生可能エネルギーへの代替が模索され始めたことを踏まえ、図書「実装可能なエネルギー技術で築く未来 骨太のエネルギーロードマップ2」¹⁾および日本経済新聞のゼミナール連載への執筆者に対してアンケートおよびヒアリングを実施し、同書で考慮していない技術についても併せて本委託研究の実施者で分担して調査した。

2. 研究開発目的

地震津波等の災害に対するリスクのみならず、マクロなエネルギーシステムに新たなエネルギー技術が入り込み、市場規模や生産高などの経験曲線を踏まえた導入のロードマップを改めて考えていくにあたり、ロードマップ実現に向けて律速するものには何があるかという項目を広義のリスクとして洗い出しておく必要がある。本サブテーマでは、導入する各エネルギー技術のリスクの洗い出しをアンケートベースで実施する。最終的にはサブテーマ（5）の統合解析において、ここで評価したリスクが一次エネルギー構成やGHG排出量に与える影響を定量的に考察するためのデータベースとして整理することを目的とする。

3. 研究開発方法

エネルギー技術のリスクの評価と解析は、サブテーマ（2）～（4）で実施される研究のベースとなるものであり、研究方法は図書¹⁾の著者へのアンケートとヒアリングを中心に実施した。まず、震災後から間もない2011年7月の時点で、以下の緊急アンケートから開始した。

次に、このアンケートから著者の感度の高いキーワードを抽出し、追加のヒアリングの内容に

1. 我が国のエネルギー需給のあるべき将来・姿について

我が国のエネルギー需給システムのあるべき将来・姿について、a) 超短期（～2015）、b) 短期（2020）、c) 中期（2030）の時間区切りごとにご意見をお願いいたします。

なお、短期・中期については、原発のあり方の前提条件をお示しください（例：寿命40年で廃炉、現状維持など）。

a) 超短期（～2015年）

b) 短期（2020年）

c) 中期（2030年）

2. 震災前後における骨太技術の開発・導入動向の変化

骨太第2版では各骨太技術について性能基準、市場規模などの5年、10年、30年後（理想）の目標・導入予測を示していただきましたが、東日本大震災を機にその開発・導入の速度・量に大きな変化が見込まれる技術があります（例：太陽光発電など）。このような技術については、できるだけ具体的に開発・導入動向の変化について記述をお願いします。

3. 骨太技術の災害時リスク

骨太技術が導入された際、災害時にどのようなリスクが生じる可能性があるかご記述下さい。

については研究会での議論およびアドバイザー会合における意見を反映して準備した。特に、3.11の東日本大震災を経て、当該図書の執筆時点の震災前と震災後のロードマップにおける変化の可能性に加え、これまで議論されてなかった災害発生時のリスクについて詳細なヒアリングを実施した。その結果を踏まえ、表(1)-1のフォームでまとめた上で評価・解析を実施した³⁾。なお、調査の一部はサブテーマ（4）に連携して実施した。評価マークは障壁のないロードマップ通りの導入に対する影響をシンボルとして表し、ボトルネックとなる可能性の高いものを×印で、やや懸念のあるものを△印で、可能性の低いものを○印としてそれぞれ表した。

表(1)-1 エネルギー技術のリスク評価のまとめ

導入量	(ロードマップに基づくエネルギー技術の導入量の再検討含む)	
検討項目	影響	特記事項
技術面	例：○	主に執筆時点からの見直し
経済面		主に執筆時点からの見直し
資源面		導入量を律速する資源的制約とそのリスク
立地面		NIMBY*や物理的制約に関する立地のリスク (*NIMBY: Not In My Back Yard)
耐災害面		大震災を考慮した耐災害面のリスク
環境影響面		ライフサイクルを考慮した環境影響とそのリスク
政策制度面		導入量を律速する現行の政策制度面の制約
その他		上記に分類されないリスク等

4. 結果及び考察

4.1 緊急アンケートの結果

1. 我が国のエネルギー需給のあるべき将来・姿について

a) 超短期（～2015年）

発電システム 火力発電の増強、IPP*の積極的活用、発電システムの高効率化、分散型発電、コージェネレーションシステムの普及

エネルギー利用 太陽熱利用

(*IPP: Independent Power Producer, 卸電力事業者)

b) 短期（2020年）

発電システム 再生可能エネルギー（風力、太陽光発電、地熱、小水力）の積極導入、分散型発電、コージェネレーションシステムの普及、クリーンコール技術の確立

電力供給 系統連系技術の高度化 ⇒ 逆潮流の推進、スマートグリッド送電網の試験的構築、電力貯蔵技術の試験的運用・確立

エネルギー利用 熱のマイクログリッド化技術の実用化

c) 中期（2030年）

発電システム 再生可能エネルギーの活用、ウラン原子炉からトリウム原子炉への転換、核燃料サイクル関連の技術開発

電力供給 系統連系の高度化、地域内スマートグリッド網の構築、昼夜間電力の負荷平準化、高圧直流グリッド幹線の創設

エネルギー利用 太陽熱空調技術の開発、車依存社会からの脱却

9名の著者の回答から抽出したキーワードを以下にまとめて示す。

キーワードをまとめると、再生可能エネルギーの活用、分散型発電・コージェネシステムの活用、系統連系の高度化、スマートグリッド網の構築、電力貯蔵技術の確立、熱利用技術の進展などが挙げられ、大規模集中型から小型分散への変革と、地震津波による災害リスクとその社会的影響の再検討が必要である、との認識はほとんどの著者で一致した。

4.2 技術ごとの整理

前項で抽出したキーワードを元に、震災前後で特に影響の与え方が変わった技術について表

(1)-1に従って整理した(表(1)-2~12)。

表(1)-2 電気自動車(EV)と蓄電池

導入量	域内交通の40~80%のEV化とV2H*、V2G*としての利用 (*V2H: Vehicle to Home, V2G: Vehicle to Grid)	
検討項目	影響	特記事項
技術面	○	域内走行がほとんどのセカンドカーでは、現時点での航続距離160kmは十分。ユーザーの航続距離による搭載電池の選択で軽量化に向かう可能性が高い。SOC幅の拡大や放電量の増大により、航続距離の延長、同じ距離なら搭載バッテリーを格段に縮小できる可能性は十分にある。
経済面	×	経済的なメリットをカタログ上で記載できるまでには時間が掛かる。経済的メリットを、実運用例などを引き合いに明確化しないと幅広い購買層に対する動機付けにはならない。
資源面	△	LiよりもMn、Ni、特にCoの資源制約が懸念。リサイクルと関係するが、成立するのはコストの高いCo、Ni程度。また、二次利用(リユース)やリサイクル市場に登場するのは10年後。EVの場合、モーターの出力密度の競争力の点でNd、Dyなども資源的制約あり。
耐災害面	△	パワーソースの多様化がリスク分散になる。国や地域ごとに最適にローカライズされたEV、PHEV*、FCEV*、ICEV*の比率があると考えられる。 (*PHEV: Plug-in Hybrid EV, FCEV: Fuel Cell EV, ICEV: Internal Combustion Engine Vehicle)
環境影響面	△	リユース市場の形成においては標準化・共通化が望ましい。始まるのも10年後で、事業化が軌道に乗るか不透明である。コストとバッテリーの製造時のCO ₂ エミッション(LC-CO ₂ *の視点)は、国内の会社などでは下げることが可能であると考えられる。しかしスモール100と言われる小規模集団は安い非純正品の電池を調達することから、価格が下がり販売台数を伸ばしても1台あたりのCO ₂ 排出量がむしろ増えることすら予想される。また、モラルのない会社の電池はあつという間に性能が低下し、CO ₂ をペイバックすることなく交換寿命を迎えることにもなりかねない。 これから先10年後以降、徐々に処分量が増えてくる電池の資源分離回収には、電解・溶解など大きなエクセルギー投入を伴うので、コスト的に見合うものでなければ基本的には、失活させて埋め立て廃棄となるので、その時の環境影響評価もしておかねばならない。 (*LC-CO ₂ : Life Cycle CO ₂)
政策制度面	△	EV化で本当にCO ₂ 削減になっているかは利用状況によって異なるため、闇雲にEVのみに補助金を初期的に出すのではなく、たとえば、一定程度時間をおいて、利用履歴と含めて真に達成している案件にのみキャッシュバックなどの制度も考えられる。バッテリーの二次利用に対しては、半ば公的な体制作りが欠かせない。V2Gとなると縦割り行政も弊害となる可能性が高い(国交省:車の視点、経産省:系統の視点、環境省:CO ₂ の視点など)
その他	—	現段階では、原材料の合成過程を含めておらず、必ずしも正確な見積もりはできておらず、今後も精度向上は困難である。おそらく製品出荷までの歩留まりも、現状では相当程度悪いと予想され、少なめに評価されている可能性が高い。世界的に急速なEV導入がなされても、ランニングが電力由来で明確化できるのに対し、製造時のCO ₂ エミッションは基準も集計法も国ごとに違いがありそれをどのように標準化するかは大きな課題である。

表(1)-3 高温ガス炉、原子力発電⁴⁾

導入量		2040年で安全炉として高温ガス炉6.6 GW熱出力	
検討項目	影響	特記事項	
技術面	△	<p>現在、日本原子力開発機構にある高温ガス炉（HTGR）、高温工学試験研究炉（HTTR）、熱出力30MW、があり世界最高出力温度950℃を達成している。国産技術を総合した世界最高技術を有している。高温ガス炉は軽水炉に対して受動安全性が高い。一方で原子炉としての不安があり、普及への課題は多い。</p> <p>日本では熱出力600 MWのHTGR研究開発が既に進められてきた。現在具体的な計画はないが、技術的には最初の10年で1基、その後2年に1基、2040年までに計11基、熱出力6.6 GW、電気出力3GWが想定できる。</p>	
経済面	△	<p>軽水炉が冷却材に水を用いるのに対してHTGRは気体のヘリウムを用いる。このため相対的にエネルギー出力密度が低くなり、装置あたりの出力も小さくなる結果、コスト高を招く。一方、軽水炉は緊急炉心冷却システムを必要とする。一方、HTGRは輻射・自然対流により受動安全的に崩壊熱除去が可能であり、冷却システムが不要とでき、その分コスト低減が可能である。</p>	
資源面	△	<p>当面、軽水炉と同じウランのワンスルー（一回通過方式）利用になるため、ウラン資源の制約を受ける。</p>	
立地面	×	<p>HTTRは茨城県大洗町に立地している。これまで町との間断の無い交流で立地が許容されてきた。しかしながら、新規設置は原子炉としての地域不安を除くことが課題であり、当面の立地は困難。</p>	
耐災害面	△	<p>軽水炉の崩壊熱除去の困難性に着目し、新たな安全炉として高温ガス炉は開発された。HTTRではH18に冷却材供給停止試験を行い、原子炉の自己制御性により初期温度を上回ることなく低下し安定。かつ原子炉圧力容器からの放熱で十分崩壊熱を除去できることを実証している。H23/3東日本大震災による影響は報告されていない。</p> <p>一方で、想定外事象についての対応は常に必要であり、引き続き安全性の検討を続ける必要がある。</p>	
環境影響面	△	<p>LCCO₂は極めて低いことから、温室効果ガスの削減には有効である。崩壊熱の受動的な除去が可能であり、軽水炉のような事故は起こりにくいが、想定外事象での放射性物質の拡散リスクを意識する必要がある。</p>	
政策制度面	×	<p>従来、軽水炉、高速増殖炉の開発が主であったため、HTGRに対する関心が小さかった。今後、必要に応じた評価の見直しが可能。</p>	
その他	—	<p>技術継承が望まれる。原子炉の理解が得られない現在、普及保留は止むを得ない。現在、HTGRは日本の世界一の国産技術であるが、既に、中国が着工を進めており、国際的変化を看過できない。少なくとも着実な技術継承を進め、常に世界最高の技術を維持することが望まれる。</p>	

表(1)-4 水力発電⁵⁾

導入量		ベース電源としての最大容量は890万kW＋未利用小水力64万kW	
検討項目	影響	特記事項	
技術面	○	<p>ダム、水路の土木：優れた工法があり、これまでは耐震技術も問題ないとされてきた。</p> <p>水車タービン、発電機：高度な技術を国産として保有しており、納入、稼働実績も申し分ない。</p>	
経済面	×	<p>1万kW 以上の大規模な立地が望まれるが、良好な立地条件の所は既に開発し尽くした。中小規模では発電単価を高く設定せざるを得ない⁶⁾。また、老朽化したダムは、排砂や浚渫工事によって機能を維持できるように追加投資が必要である。</p>	

資源面	△	大型のタービン発電機の一部や小水力発電機には、永久磁石にNdが使われており、希土類に若干の不安がある。
立地面	×	大容量の良好な立地条件の所は既に関済し尽くされており、難工事が予測される箇所や、数百～数千kW程度の中小規模の発電しかできない所がほとんどである。
耐災害面	△	津波の被害こそ無いものの、東日本大震災では、東北電力管内では落石による電気設備の損害や、土木工事による損壊などで、余震を含めると、のべ21箇所の被害箇所が報告された。また、福島県須賀川市では農業用の藤沼湖が決壊し、死者7名を出す惨事となったことから、下流部の防災対策が必要になると考えられる。
環境影響面	△	発電時にCO ₂ をほぼ出さないことから、温室効果ガスの削減には有効な純国産の再生可能エネルギーの一つである。その反面、恒久的な地形変化を伴うことから、自然環境、特に生態系への影響が大きい。環境影響評価を事前に実施し、発電用、治水用、水源確保用、農業用のいずれにおいても上流下流の住民、全ての河川利用者・水利権者の理解を得ねばならないことから、長い年月と労力が掛かる。
政策制度面	△	環境影響評価とともに、国と自治体の一致した協力が必要である。実際に、長野県の脱ダム宣言や、群馬県川原湯温泉の八ツ場ダムをはじめとして、これまでも国土交通省と自治体・周辺住民との間で問題になっている。

表(1)-5 太陽光発電

導入量	2050年段階で85～150GW	
検討項目	影響	特記事項
技術面	○	2010年度の国内導入実績106万kW。2011年度同見込み130～150万kW。
経済面	○	世界販売量トップ10社のうち6社が中国・台湾で日本は2社。2011年現在の国内販売価格は、既築住宅で45～55万円/kW程度。新築で30万/kWのものもあり。45万円/kWのシステムは、設備稼働率11%・20年寿命・維持費ゼロとするとき約23円/kWh。10年目でパワーコンディショナを交換すると約25円/kWh。今後の価格低下も期待できる。
資源面	△	特に今後の高効率化に向け、化合物半導体系を考慮すれば、資源制約に注意が必要。
立地面	△	現在は良好な立地条件の既設・新設戸建て住宅を中心に設置が進む。10000万kWを超える導入の場合、都市部の高層ビル、集合住宅、工場等敷地・屋根、耕作放棄地など適地を慎重に検討する必要あり。
耐災害面	○	現状では停電時の自立運転モードを有するものがほとんどである。台風等強風への対策も考慮されて設置されている。
環境影響面	○	発電時にCO ₂ をほぼ出さないことから、温室効果ガスの削減には有効な純国産の再生可能エネルギーの一つである。
政策制度面	○	導入補助金、余剰電力買い取り制度、全量買い取り制度など普及促進制度が充実している。今後は、電力網の不安定化をどのように担保しつつ大規模普及をさせるのか、議論が必要となり、複数の技術オプションを想定した議論が開始されている。
その他	△	太陽光発電を設置後、隣接地への建物設置による日照状況の変化など従来と異なるエネルギー資源としての日照権に配慮が必要。

表(1)-6 風力発電

導入量	2050年段階で32～64GW	
検討項目	影響	特記事項

技術面	○	2010年度の国内導入実績25.6万kW。国内の稼働率実績は21.6%と集計。世界での生産能力は十分にあり、導入の制約とはならない。
資源面	△	本体自体に大きな資源制約はないが、発電に用いられる磁石にNdやDyなどの確保に注意が必要。
立地面	×	風力発電からは特定の周波数の低周波・騒音が出ていることが観測されており、住宅の近くへの設置はすべきではない。洋上への設置には生態系への影響の把握も必要。
耐災害面	○	台風等強風への対策や雷等への対策を考慮した設置が必要。東日本大震災では津波を受けた洋上風力発電所も発電を継続した。
環境影響面	△	発電時にCO ₂ をほぼ出さないことから、温室効果ガスの削減には有効な純国産の再生可能エネルギーの一つである。低周波・超低周波・騒音の環境影響は現在調査が進行中である。
政策制度面	△	FITの対象となり、普及促進が期待される。電力網の不安定化の度合いは太陽光発電よりも大きく、電力網の安定性をどのように担保しつつ大規模普及をさせるのか、議論が必要である。 (FIT: Feed In Tariff)

表(1)-7 高効率な分散コジェネレーションシステム（燃料電池）

導入量	2050年段階で14GWe	
検討項目	影響	特記事項
技術面	○	2009年固体高分子形燃料電池（PEFC）の市販化当初、総合効率は高かったものの発電効率は37%LHVと低かった。その後、2011年4月に40%LHVと効率を高めたモデルが発売、10月には45%LHVの発電効率の固体酸化物形燃料電池（SOFC）が市販化された。SOFCは2012年4月にはさらに効率を高めたモデルも市販化される。
経済面	×	2009年市販化当初は346万円/台であった。2011年、PEFCモデルは276万円/台、SOFCモデルは270万円/台で購入可能である。1/5程度に価格を下げることに加えて、寿命を長くし、経済性を大幅に改善することが必要である。
資源面	△	PEFCはPtやRu、SOFCはLa、Co等の資源の確保に注意が必要である。
立地面	○	大きな問題はない。SOFCはコンパクトであるため、今後マンション等への設置も可能となる。戸建てへの設置の際には、隣接する家屋寝室への深夜の低周波・騒音等の注意は必要である。
耐災害面	△	自立運転に対応した機種は今後発売予定である。そのことにより停電時には有用であるものの、東日本大震災のような災害時には一般にガスより電気の方が復旧は早い。一方、LPGで稼働するシステムは復旧に関してガスよりも優れていると言える。
環境影響面	○	LNGを用いるシステムとして、LNG複合発電がある。今後、53%HHVが達成されようとしているが、送電ロスを考慮すると家庭等では50%HHVの発電とみなせる。46.5%LHV（42%HHV）で発電し、43.5%LHVの熱も利用可能なSOFCは今後の大きな技術的向上余地もあることから、LNGを最も効率的に利用可能な技術選択肢である。
政策制度面	△	現在は、導入補助金があり、またガス会社等の優遇料金はあるものの、電力網への逆潮流が認められていない。今後、燃料電池の発電性能向上とともに余剰電力の買い取りがより重要となってくるため、逆潮流の認可に向けた施策が望まれる。

表(1)-8 農村工学分野の省エネルギー（特に農村地域でのバイオマス利用）

導入量	産出/投入化石エネルギー=1.3のバイオマスタウンが300市町村
-----	----------------------------------

検討項目	影響	特記事項
技術面	○	地味な周辺技術の整備が実用化のネック。先行取得された特許の使用の是非は要検討事項である。
経済面	×	国際社会における相対的な経済的地位の低下の影響が不透明。自国産へのこだわりの是非は論点にすべき。
資源面	△	再生可能エネルギーの生産に必要な化石資源がネック。放射線等に汚染された土地の回復に要する期間の考慮も必要。
立地面	×	都市と農村の経済的、教育機会の格差による森林・中山間地域の人為的資源管理の喪失が国土保全機能の低下を招き、このことが地域資源活用の持続性の保証期間を短縮してしまう危険性がある。
耐災害面	△	災害発生確率の設定が高まることによるエネルギー消費量の増大。
環境影響面	△	GHG排出量抑制、低周波発生、健康阻害物質・病原菌の蔓延等の対策がエネルギー消費量の増大になる可能性あり。
政策制度面	△	性悪説に基づき、善良な取り組みに対しても規制がある。

表(1)-9 需要端の省エネ機器（空調、冷蔵庫など）

導入量		2050年には家庭用エアコンのCOP*が6.3 (*COP: Coefficient Of Performance, 成績係数)
検討項目	影響	特記事項
技術面	○	1999年の省エネ法改正に伴うトップランナー方式の導入により大幅な性能向上が図られ、2007年にはフローベースの暖房COP=5.35、冷房COP=4.85を達成した。その後、目標年度が2010年度以降のエアコンについては通年エネルギー消費効率（APF）が基準として導入され、目標値は5.8（家庭用冷房能力3.2 kW以下の場合）。
経済面	○	堅調に普及が進んでおり、2008年現在の保有数は2.6台/世帯に至っている。冷暖房兼用エアコンの全国平均の小売価格は185000円（2007年）程度と推計されているが市場は成熟しており、価格変動は小さいと考えられる。
資源面	△	圧縮機のモーターにNdやDyなどの希土類磁石が使用されており、安定した確保には注意が必要である。
耐災害面	△	駆動エネルギー源である電力の復旧状況により左右される。
環境影響面	△	機器効率の向上によりCO ₂ 排出量は低減されつつあるが、コンプレッサーおよび配管からの冷媒（フロン類）の漏えいによるオゾン層破壊、地球温暖化への影響が懸念されている。2020年にはHCFCの生産が禁止されオゾン層破壊に対する懸念が小さくなるものの、現在の主用冷媒であるHFCも温暖化係数が高く、引き続き地球温暖化への対応が必要である。
政策制度面	○	トップランナー方式の導入により機器単体のエネルギー効率は大幅に向上しており、本方式の有効性は高い。一方、エネルギー消費効率の低い旧型エアコンの更新促進を図る適切な施策の導入が必要。

表(1)-10 住宅の省エネ

導入量		住宅の高断熱化（2050年に2010年比べて断熱効率が20%向上）
検討項目	影響	特記事項
技術面	○	技術的には次世代省エネ基準を十分クリア可能な状態にある。昭和55年に「省エネ基準」が、平成4年に「新省エネ基準」が、平成11年には「次世代省エネ基準」が決定された。次世代省エネ基準では年間冷暖房負荷の基準値が460 MJ/(m ² ・年)、熱損失係数が2.7 W/(m ² K)以下（IV地域）と定められている。

経済面	△	新築着工住宅について、次世代省エネ基準適合のためには50～60万円／戸のイニシャルコストの増大（新省エネ基準適合に比べて）が必要との試算がある。イニシャルコストの増大は導入促進上の大きな阻害要因となる。（出所：120108-環推費-住宅の省エネ.ppt）（090224-住宅生産団体連合会.pdf、100518-住宅生産団体連合会、国交省-住宅省エネ-H1908.pdf）
環境影響面	○	国土交通省の試算によれば、次世代省エネ基準（H11年）適合住宅は省エネ基準（S55年）住宅に比べ年間暖冷房エネルギー消費量を約55%に低減可能とされている。家庭のエネルギー消費の約30%は暖冷房であることから、高断熱化は電力、燃料消費量の削減をもたらし、CO ₂ 排出などの環境負荷低減に有効である。
政策制度面	○	正確な統計データは存在しないが、次世代省エネ基準適合住宅は新築住宅の1～2割に留まっていると推計されている。この現状を踏まえ、2020年までに新築住宅・建築物の省エネ基準適合の義務化が検討されている段階にある。

表(1)-11 水素（FCEV）

導入量	積極進展ケースで域外走行車両の80%がFCEV化	
検討項目	影響	特記事項
技術面	○	燃料電池自動車は技術的な目途が立ちつつあるが、水素ステーションが高コストであり、高圧水素に対応可能な安価な素材開発等が必要。
経済面	×	燃料電池自動車は、2015年から市販が開始される予定であるが、水素ステーション網が整備されなければ普及は見込まれない。しかし、燃料電池自動車の普及初期段階（普及台数の少ない段階）では、水素ステーションは赤字での運営が不可避である。
資源面	△	Pt量の低減、リサイクルシステム・技術の確立が必要。 自動車用Pt使用量：0.5～1g-Pt/kW(2010)→0.1g-Pt/kW(2020)
立地面	×	水素に関する知識が国民に十分浸透していないことから、NIMBY問題が生じるおそれあり。危険性において、ガソリンスタンドとほとんど差のないことが浸透するには、相当の期間を要する可能性がある。
環境影響面	△	CO ₂ 排出規制の動向によっては、化石燃料から水素エネルギーを製造する場合に、CCS*技術との組み合わせが必要となる可能性がある。 (*CCS: Carbon Capture and Sequestration)
政策制度面	△	高圧ガス保安法など規制の更なる見直しを進めることが必要。普及状況等によっては、法体系の抜本的な見直しが必要となる可能性がある。
その他	—	自然エネルギー大量導入では、大容量の電力貯蔵が必要。蓄電池と平行して、水素エネルギーの技術開発が不可欠と考える。

表(1)-12 潜熱蓄熱技術（未利用熱エネルギーおよび太陽熱などの熱利用）

導入量	潜熱蓄熱の熱密度1000kJ/L、5000円/MJ(熱)	
検討項目	影響	特記事項
技術面	△	熱容量UP：普及のためには、500-1000 kJ/Lクラスの大きな潜熱の蓄熱材の開発が必要。650 kJ/L（充填率60%）で蓄熱槽が半分のサイズとなり得る。 熱交換速度UP：家庭用での熱の取り出し10-40kWが期待値だが、蓄熱材～熱媒体～負荷の間での熱移動が律速となり、課題である。
経済面	×	顕熱蓄熱（貯湯）よりコストが増えることに対するメリット（小型化、適用分野）次第。

資源面	△	500-1000 kJ/Lのように大きな潜熱の蓄熱材自体の資源的な視点でのボトルネックの有無に注意が必要である。
立地面	○	既存の顕熱蓄熱（貯湯）と比較して大幅に小型化することができれば、分散型熱源や自動車等の蓄熱槽としての普及を後押しできる。
耐災害面	△	衛生面の課題はあるが、災害時には、顕熱蓄熱（貯湯）の方が貯水槽として活用可能なメリットがある。
環境影響面	○	直接の影響は特にない。
政策制度面	△	再生可能熱の補助金など、普及には政策・制度面での後押しが必要

4.3 個別技術のリスク評価のまとめ

技術面：高温ガス炉、潜熱蓄熱のみ△で、他は○である。したがって、技術的側面におけるリスクは小さいと考えられる。

経済面：電気自動車、水力発電、燃料電池、農村地域のバイオマス利用、水素（FCEV）、潜熱蓄熱等、低炭素化に寄与が大きい技術で×である。政策制度面での適正なバックアップがない限り、経済面で導入がボトルネックとなる可能性が極めて高いことを意味する。

資源面：出力密度の高い電動機、発電機を用いる技術には、Nd、Dyなどの希土類の資源制約に懸念がある。国家の元素戦略とともに、これらを使わない技術開発も必要である。蓄電池では、LiよりもCoに懸念があり、環境負荷とコストを考慮しながらリサイクルが必要。

立地面：水力、原子力、水素ステーション、風力などは立地面の制約が大きく×である。農村地域においても、人口流出による林地資源管理機能の喪失がリスクである。

耐災害面：△が多いが、太陽光や分散コジェネレーションシステムなどは耐災害面で○となっている。この結果は、緊急アンケートの結果とも一致することから、災害時の自立機能の確保は震災以後、重要度を増した側面である。

環境影響面：再生可能エネルギーのバッファとなりうる蓄電池を搭載した電気自動車は、現状では必ずしもCO₂の排出削減になっていない。水素については、当面の普及期は化石燃料からの安価な製造方法が主流であることから、場合によってはCCSとの併用が必要との意見もある。

政策制度面：現在の全量の固定価格買取制度は電気だけを対象としている。カーボンニュートラルなバイオマスや太陽熱や未利用熱など、電力以外へ買取制度や補助金の範囲を拡充することは検討の価値がある。例えば、太陽熱温水器、薪ストーブを例に取れば、ガスや灯油の代替としての手当となるが、それには、これらのライフサイクルでのCO₂削減効果の明確化に加え、太陽熱の温水量や薪の使用量などを集計するしくみと妥当な評価指標の整備が必要である。水素では高圧ガス保安法、太陽光では電力自由化を含む電気事業法の改正が必須となり、これらの制度設計と施行がボトルネックとなる可能性がある。

その他：東日本大震災では、50Hz圏内の30GW級の電源喪失によって電力が著しく不足したが、60Hz圏内からの応援融通は周波数変換所（FC）がボトルネックとなったことから、FCに耐災害面でのリスクがある。再生可能エネルギーの大量導入を想定した場合、エネルギーストレージの重要性が高まる。分散化されたクラスターごとの電力のデマンドレスポンスサービスと蓄電池を利用した相互融通で、基幹網に大逆潮流させない方法だけでは解決できない可能性が高い。大規模な蓄電設備である揚水発電所の有効利用やフライホイールなどの機械エネルギーのほか、昼間の余剰電力でヒートポンプを稼働させてエンタルピーを増加させた熱としてストレージすること、さら

には水電解水素やCO₂の還元と燃料合成などケミカルストレージも有効である。これらの電気、熱、化学の蓄エネルギーの役割分担は、ストレージの期間、量、輸送距離、コストなどの制約条件で棲み分けがされると考えられる。

4.4 エネルギーシステムのリスク評価

サブテーマ（２）、（３）、（４）の結果を踏まえて、エネルギーシステム全体としてのリスクを評価した結果を表(1)-13にまとめる。

表(1)-13 エネルギーシステム全体としてのリスク評価のまとめ

リスクの種類	リスク発現のメカニズム	シナリオにおけるリスク発現（と考えられる対応策）
燃料価格の変動	燃料価格が想定と異なる形で変動した場合、エネルギー価格が許容範囲以上に高くなりうる。例えば、天然ガス複合の導入量が多い方針をとり、発電所の建設を進めた後で天然ガスの価格が高騰した場合、エネルギー価格も高くなる。もしくは、石炭による発電を将来的に撤廃する方針で廃棄を進めている状態で石炭価格が他の燃料に比べて低い状態を維持した場合、石炭を一次エネルギーとして多く利用している国に比べてエネルギー価格が相対的に高くなる。	例えば、LNGに依存する電源構成として原子力の再稼働、太陽光および風力の導入量と燃料価格推移において、再稼働あり＋導入量最小＋現状外挿の電源④（表(5)-4）と、新政策シナリオの同①と比較すると、2050年でLNG発電量が74%を占め、同④で発電単価/GHG削減は+82%/8.1%、同①では+38%/9.9%である。火力でCO ₂ 排出量の少ないLNGに依存した場合、価格の変動によってかなり大きな影響を受けることになる。石炭は発電用途の依存度が低下する結果になっており、直近では影響が無視できないが、2050年以降はエネルギー価格のリスクが発現する可能性は低い。
燃料供給の安定性	特定の燃料への依存度が高い場合、当該燃料の供給に支障が発生した場合に燃料を安定して供給できなくなる。エネルギー自給率が低いほど影響を受けやすい。	最も地理的リスクの高い石油については、燃料よりも石油化学品の供給に支障を来すが、石油8000万kL、LPG250万トンの備蓄が官民で確保され、約半年は持ちこたえられる。一方、天然ガスの備蓄は義務づけされておらず、LNGでは長期間備蓄に向かないが、調達先が中東以外にも分散している側面もあり、コスト増加はあり得るが、電源構成への影響は限定的である。
技術開発と普及の不確実性	特定の技術の開発が想定通りに進まないことにより、普及が進まず、エネルギー供給が安定的に行われなくなる。	発電技術として、不確実で影響の大きい太陽光発電の導入のみ異なるケースの比較では、2050年のGHG排出量が10GWのPV設備減で+0.3%の影響がある。需要端での創エネとして最も大きいSOFCコジェネ導入の影響は、2050年のGHG排出量が1GWの設備減で+0.15%である。いずれも不足分は火力発電で補うことになる。
資源消費による制限	特定の技術を導入するために利用する希少な資源*について、資源の供給が不安定に	Coの資源制約がEV(蓄電池)導入に影響した場合、特に冬季の夕方の供給力に問題が生じる可能性がある。一方、NdやDyの

	なることにより技術を導入できなくなり、エネルギーシステムが設計通りに構築できなくなりうる。	資源制約がEVや風力の積極的導入ケースに影響した場合は蓄電容量にも影響することから、太陽光発電も併せ、分散型再生可能エネルギーの導入量にもブレーキが掛かると考えられる。資源確保と同時にリサイクルが重要であり、希土類の代替技術開発の促進も必要である。蓄電池では、二次利用市場の形成とリサイクルの定着が重要である。
気象条件の変動	長雨や台風による太陽光の稼働率の低下、渇水による水力の低下などによりエネルギー供給が安定的に行われなくなりうる。	流込式の水力は渇水による出力低下、台風・豪雨による土砂流入・導水管等の破損があった場合、ベース電源が喪失し、代替火力がない場合は供給力に影響が出る。一方、夏季の需要ピーク時に長雨となった場合、太陽光による発電量が期待できない上に、気温と湿度によっては空調負荷が下がらない場合、代替火力がないと供給力不足への影響が大きい。
自然災害による影響	地震、津波等の大規模自然災害によって数千万kWの電力が喪失した場合にエネルギー供給が安定的に行われなくなりうる。	仮に沿岸部立地の大規模集中発電が停止した場合、地震津波の直接被害のない太陽光発電、SOFC、EVがあれば自給できる。この場合、蓄電容量の制限で50GWが上限となる。一例として、東北地域の人口が全国の7%、利用できる蓄電量を30%と仮定すると、このエリアで局所的に確保できるのは105万kWとなる。自立モードでSOFCを運転する場合、都市ガスは復旧に時間が掛かるため、LPGの方が影響は小さい。
発電技術の供給メーカーの国産割合	例えば、太陽光発電技術・製造の国産割合が低い場合、産業競争力が低下することや、調達コストの高騰などがありうる。	導入量できなかった太陽光の約1/10、風力の場合は約1/5の火力の設備容量が増加する。大量の普及期に、蓄財が国外に流出し、貿易収支を悪化させることも議論が必要である。
環境影響の顕在化	技術的には可能でも、実装段階で顕在化する新たな環境影響によって技術が進展しないリスク。例えば、シェールガス採掘による水源汚染や、メタンリーケージによるGHG増加など。	天然ガスの価格に大きく影響し、再生可能エネルギーが積極的に進展する駆動力になる一方で、エネルギー価格は相対的に上昇し、蓄電や変動調整力がボトルネックとなる。

*希少な資源とは、クラーク数などの埋蔵量に関する観点だけでなく、現在の判断で許容可能なコストで採掘可能な量なども検討して特定されるものである。今後は鉄や銅、アルミニウムといった汎用金属も随伴元素の存在によるリサイクルの限界とインド・中国等の需要量の増加により希少とされる可能性も考慮すべき。

表(1)-13を基に、確率とハザードを3段階で分類したリスクマトリックス解析結果を表(1)-14に示す。

表(1)-14 リスクマトリックス解析結果

ハザード	小	中	大
確率	- システムの設計変更を検討する必要がある	- システムの大規模な設計変更を検討する必要がある	- システムの設計を大きく変更する必要がある
低 - 数十年以内に起こる可能性あり			・自然災害による影響
中 - 十年以内に起こる可能性あり	・燃料供給の安定性 ・発電技術の供給メーカーの国産割合	・技術開発と普及の不確実性 ・環境影響の顕在化	
高 - 数年以内に起こる可能性あり	・気象条件の変動	・燃料価格の変動	

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

緊急アンケートを通じ、震災後のエネルギー技術として、省エネルギーの重要性とリスク分散も含めた意味で大規模集中から小型分散への移行にシフトするとの共通の方向性が見いだせた。その方向性に影響の大きい原子力、大規模再生可能エネルギー（水力、太陽光、風力など）、モビリティの駆動源の電化・水素化、SOFCコジェネレーションシステムの導入など、ロードマップに対する工学的および社会的な側面での影響要因を精査しており、それらをリスクと捉えた場合の今後のエネルギー技術導入における実装可能性と低炭素化効果について検討できるデータベースを構築した。

(2) 環境政策への貢献

これまで述べた通り、政策提言のためのツールとして、考慮すべきリスクを技術ごとのデータベースの形で整備した。本研究をもとに、サブテーマ（2）および（3）で検討された結果について、導入のリスクを想定したシナリオ変数を設定し直して比較することで、エネルギーシステムの構造ならびに低炭素化効果に対するリスクの影響と実装可能性を検討することができる。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

特に記載すべき事項はない

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない

（２）口頭発表（学会等）

- 1) 中垣隆雄：化学工学会 札幌大会 2011、シンポジウム <東日本大震災後のエネルギーシナリオを考える>、札幌（2011/8/6）、E204（2011）、（2011）
「今夏の電力供給の概要と今後の見込み」
- 2) 松方正彦：化学工学会 札幌大会 2011、同シンポジウム、E207（2011）、
「エネルギーと仲良くする新しいライフスタイルにむけて」
- 3) 松方正彦：化学工学会 第43回秋季大会、シンポジウム <2011年夏以降の電力需給とエネルギービジョン>、名古屋（2011/9/16）、V202（2011）、
「電力需給に関する緊急提言の基本的な考え方」
- 4) 松方正彦：化学工学会 第43回秋季大会、同シンポジウム、V204（2011）、
「緊急提言グループの活動報告」
- 5) 中垣隆雄：化学工学会 第43回秋季大会、同シンポジウム、V205（2011）、
「今夏の電力供給の概要」
- 6) 松方正彦：INCHEM TOKYO 2011、基調講演II エネルギー関連技術の将来像、（2011）
- 7) 中垣隆雄：INCHEM TOKYO 2011、化学再生発電システムによる燃費削減効果、（2011）
- 8) 中垣隆雄：化学工学会 第77年会、シンポジウム -化学産業技術フォーラム セッション3「実装可能技術で築くエネルギーシステム」、東京（2012/3/16）、XB214（2012）、
「系統電源の構成分析と将来予測」
- 9) T. Nakagaki：ASME 2011 Energy Sustainability Conference & Fuel Cell Conference、Washington DC、USA、（2011/8/9）
“Exergy recuperation of mid and low quality heat by chemical reactions”

（３）出願特許

特に記載すべき事項はない

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない

（５）マスコミ等への公表・報道等

- 1) 日本経済新聞 ゼミナール「エネルギーと技術」、全国版、全36回、2011年8月24日～10月14日
- 2) 松方正彦、古山通久：ゼロから見直すエネルギー 節電、創エネからスマートグリッドまで、丸善、2012年2月28日
- 3) 日本経済新聞、日曜に考える イノベーション ここを攻めろ⑨（エクセルギー再生の特集記事） 2011年3月11日

8. 引用文献

- 1) 加藤之貴、安永裕幸、柏木孝夫監修：「実装可能なエネルギー技術で築く未来 骨太のロードマップ2」、2010年 化学工業社
- 2) 松方正彦、古山通久監修：「ゼロから見直すエネルギー 節電、創エネからスマートグリッドまで」、2012年、丸善
- 3) 東日本大震災復興構想会議、復興への提言資料、2011年年6月25日
- 4) 電力中央研究所研究報告 Y09022、Y96010、Y98019、Y09027
- 5) 電気事業連合会、INFOBASE2010
- 6) 新エネルギー財団、平成20年度 中小水力開発促進指導事業基礎調査（未利用落差発電包蔵水力調査）報告書

(2) リスク評価に基づく技術ロードマップ検討

東京大学 大学院工学系研究科 菊池 康紀
大学院工学系研究科 梶川 裕矢

平成23年度累計予算額：2,528千円

予算額は、間接経費を含む。

【要旨】 得られたエネルギー技術情報をもとに技術ロードマップを作成し、GHG削減効果の評価、統合を行った。サブテーマ（1）と連携し、各エネルギー技術のリスク情報を整理し、技術ロードマップを構築し技術進展を示した。各エネルギー技術の時系列的な進歩を、技術の競合・重複といったリスクを考慮しながら予測した。これを基にサブテーマ（3）（4）と協力し、技術の導入によるエネルギー需要の変化を予測するモデルを構築した。

【キーワード】 エネルギー需要予測、モデリング

1. はじめに

未来エネルギーシステムを設計していくためには、エネルギー需給構造の中で技術がどのように利用可能な状態になっているかを把握しなければならない。エネルギーの需要と供給は互いにバランスしなければならないものであるが、これまでは需要を既知のものとし、それを満たすための供給側システムの議論が多くなされてきた。一方、東日本大震災を経て、供給に合わせた需要の形を議論することも重要ということが明らかになっている。

技術が持つリスクを考慮しながら実際に導入されたときの性能を評価するためには、将来のエネルギーシステムに技術を組み込んだときの環境性や化石資源消費形態などをシミュレートすることが有用といえる。サブテーマ（1）で評価・解析されたリスクに基づいたエネルギー需要における技術のロードマップと、将来のエネルギー需要状況を分析するためのモデルが必要となる。

2. 研究開発目的

本テーマでは技術のリスクと実装可能性を考慮したロードマップを作成し、将来のエネルギー需要をシミュレートするための数理モデルを構築する。

3. 研究開発方法

本テーマにおいてはサブテーマ（1）で特定された技術のリスクに基づきながら、将来エネルギーシステムに組み込まれる技術を特定し、そのロードマップを検討しながら、将来エネルギーの需要状況をシミュレートできるモデルを構築する。将来のエネルギーシステムを設計するためには、エネルギー技術を体系的に分析し、一つのシステムとして組み合わせたときのエネルギーコスト、安定供給性、環境負荷、安全性などのような多面性を評価できるようにしなくてはならない。構築するモデルは技術の将来における性能や普及率といった変数を決定し、エネルギーシステムに組み込まれたときに得られる機能を推定し、最終的な燃料や電力の必要量を分析できる

ものとする。

モデルの構築にあたっては、技術のリスク評価に基づくロードマップの検討が必要となる。ロードマップを検討する上で考慮すべきリスクとしては、同一のエネルギー需要に対して複数の技術が導入される技術の競合、一つの技術の効率が他の技術の効率などに影響する重複、他方の技術が他方の技術に含まれ効率に影響を与える技術の包含、技術の導入が他の技術の導入を前提にした依存などの、技術同士の相互関係がありえる。これらの技術間におけるリスクを考慮し、技術ロードマップを検討していく。

また、構築にあたっては、技術の実装可能性にも留意する。“実装可能性”には大きく技術的なものと社会的なものがあると考え。技術が技術的に実装可能とは、実証段階にあり、量産可能で、導入場所があり、既存の技術に比べ著しく高コストでないことを指す。技術が社会的に実装可能とは、環境、社会、経済への影響を考慮した上で、社会に導入可能または導入に対し合意形成可能であることを指す。既に実証から大規模導入に掛かっている技術については過去の統計データから将来を予測するための機構を構築し、現在実証段階にある技術については国内外の専門家や文献、特許などを参考にしながら将来を予測可能とするモデルを構築する。

モデルの構築においては実際のエネルギー需要にまつわる文献¹⁻⁵⁾や統計データ⁶⁻¹⁰⁾を参照しながら進める。現状の家庭、業務、産業、運輸における燃料の需要は総合エネルギー統計⁶⁾を用いる。ここで、実際に使用した燃料の量を燃料の需要と定義し、その結果得られたエネルギーにより享受できる機能の量をエネルギーの需要と定義すると、総合エネルギー統計には燃料の需要がまとめられていると考えることができる。実際に享受していた機能はエネルギー機器の効率を乗ずることで求める。これにより、現在の機器による機能の需要が明らかとなり、将来の機器の効率上昇によりどの程度燃料の需要を削減できるかが分かるようになる。なお、本テーマにおいて用いたエネルギー需要の統計データは2008年の実績値を2010年と等しいと仮定して進める。これは2010年の統計データが平成23年度段階で明らかになっておらず、2009年の統計データが統計上外れ値と判断できるためである。モデルの基本構造を式(2)-1にまとめる。ただし、ここでDemand: 燃料需要[J/y]、a: 人口・GDPなどの社会条件による需要変動係数[-]、Eff: 部門iにおける燃料jの用途kでのエネルギー効率[-]、ΔDemand: 技術導入による需要の変動量[J/y]、b: 技術導入による需要の変動率[-]、t: 年、t0: 代表年(2010年など)、i: 部門、j: 燃料、k: 用途を示す。

$$\text{Demand}_{i,j}(t) = \frac{(a_i(t) \cdot \text{Demand}_{i,j}(t_0) \cdot \text{Eff}_{i,j,k}(t_0) - \Delta \text{Demand}_{i,j}(t)) \cdot b_{i,j}(t)}{\text{Eff}_{i,j,k}(t)}$$

t年におけるエネルギー需要

式(2)-1

4. 結果及び考察

エネルギー需要を家庭、業務、産業、運輸に大別し、それぞれの分野で2050年までに導入される実装可能な技術を特定し、その導入効果を評価するためのモデルを構築した。モデルは2008年における国内の総合エネルギー統計に基づくことで、実際にどの程度燃料の消費量が変化するかを評価できるものとなっている。表(2)-1にモデルにおいて考慮するエネルギー需要における技術と変動要因をまとめる。

表(2)-1 エネルギー需要における技術と変動要因

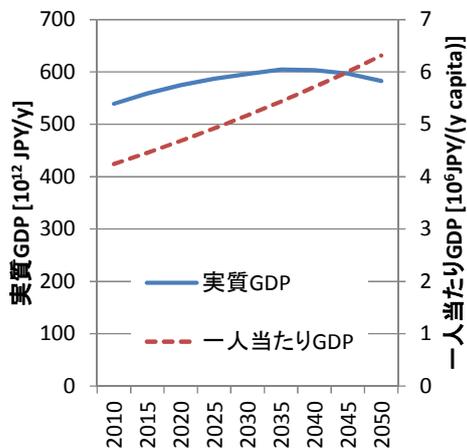
部門	技術および変動要因
家庭・業務	<ul style="list-style-type: none"> ➤ エネルギー機器の効率 家電製品（エアコン、冷蔵庫）、給湯機器、照明機器 ➤ 家庭用燃料電池（SOFC）の効率および導入率 ➤ 太陽光・太陽熱の導入量 ➤ 空調需要におけるエネルギー効率 建屋の断熱性能の向上 ➤ エネルギーの使用形態の変化 厨房の電化、給湯の電化、暖房の電化
産業	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 省エネルギー技術の導入 膜-蒸留ハイブリッドシステム、低温排熱利用、クレーン・モータ等におけるエネルギー回生、農林分野における未利用バイオマスの利用、鉄鋼プロセスにおける水素利用やCCS*等による省CO₂技術、中小事業所における省エネ対策の徹底(*CCS: Carbon Capture and Sequestration) ➤ 自家発電における技術導入および効率改善 化学再生発電、ガスエンジン
運輸	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 次世代自動車の普及 ハイブリッド車、燃料電池車、電気自動車 ➤ 燃費の向上
全分野共通	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 人口変化に伴うエネルギー需要の変化 ➤ GDP変化に伴うエネルギー需要の変化

各技術の導入率については現状の実装可能性を分析して得られた技術導入の推移を基にし、実際にどの程度導入されるかという技術毎のシナリオを入力することで将来のエネルギー需要を出力できるようにしている。このとき、エネルギーにより享受される機能（効用）の必要量は、人口やGDPといった指数に影響を受けることが予想されるため、構築したモデルにおいてもエネルギー必要量を人口とGDPの変化によって増減する仕組みを搭載した。例えば、人口に関しては既に公開されている人口問題研究所の人口将来予測¹¹⁾に基づき、人口に合わせて、家庭部門、業務部門の人口と強い相関のあると考えられる教育、医療などの分、運輸部門の家計寄与分などのエネルギー需要が削減されることとした。GDPに関しても、同様に産業等の分野のエネルギー需要が増減することとした。ここでは将来のGDPの予測に関していくつかのシナリオがありうることを考慮し、1人あたりGDPの変化などから総GDPを計算し、関連するエネルギー需要が増減される仕組みを構築した。例えば、1人あたりGDPが年率1%で成長すると仮定した場合、人口変化と合わせるとGDPの変化は図(2)-1のようになる。このようなGDP変化の予測を与えればエネルギー需要の変化を予測できるようなモデルを構築した。

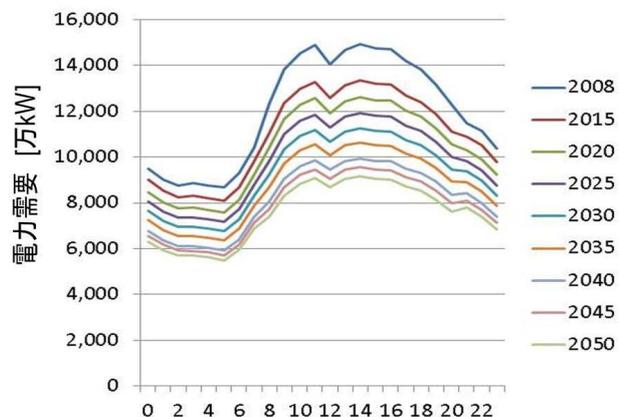
モデルの出力としては、各分野の年間の燃料使用量と電力使用量に加え、電力需要の日負荷曲線を出力できるようにしている。図(2)-2に電力日負荷曲線の出力例を示す。2008年から比較して電力需要が抑えられているのは、人口の変化に基づく需要そのものの減少に加え、ピーク時間帯に使用されている空調等の効率改善や燃料電池によるコジェネレーションなどによる給湯需要と同時に発生する電力などによるものである。このような電力需要の日負荷曲線に基づき原子力、火力、水力、風力、太陽光、地熱などの発電設備によるベストミックスを求めて、最終的な燃料消費や環境負荷を解析できるようなモデルを構築した。

モデルの出力結果は、サブテーマ(3)、(4)、(5)において利用できる形になっており、

本サブテーマで構築したモデルによりエネルギーシステムの評価と低炭素化評価を行い、将来のエネルギーシステムを提案可能とした。また、サブテーマ（3）、（4）の結果に合わせたモデルの再構築や出力情報の調整を行った。



図(2)-1 一人当たりGDP変化と総実質GDPの変化の例



図(2)-2 需要モデルからの出力
例：電力日負荷曲線

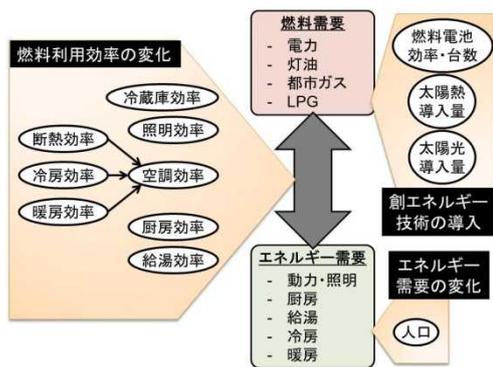
以下でそれぞれの技術のロードマップとモデルについて説明する。

- 家庭・業務におけるエネルギー技術モデル

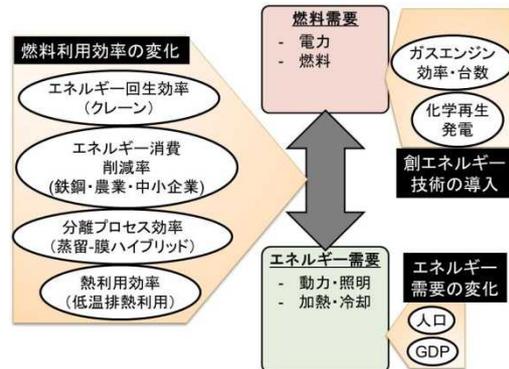
家庭・業務においてはエネルギー需要として大きく、動力・照明、厨房、給湯、冷房、暖房がある。これらの需要に対して、家庭では主に電力、灯油、LPG、都市ガスなどが燃料として利用されている。業務においては上記の燃料以外にも石炭や重油といったものも利用されている。例として、家庭における需要予測モデルの構造を図(2)-3に示す。まず、モデルはエネルギー需要と燃料需要を変化させる3つの要素で構成されている。すなわち、燃料利用効率の変化、創エネルギー技術の導入、エネルギー需要の変化の3つである。燃料利用効率の変化はそれぞれのエネルギー需要を満たすために導入されている機器の効率の変化によるものである。創エネルギー技術としては、燃料電池のようなコージェネレーション技術や太陽熱・太陽光のような再生可能エネルギー技術の導入によるものであり、熱や電力を分散型エネルギー供給技術により賄うことを考慮することである。エネルギー需要の変化とは、人口の変化によりそもそも家庭のエネルギー需要が提言することである。モデルの構造として家庭と業務には将来のエネルギー需要の変化の要素としてGDPを考慮する点以外大きな違いはない。

- 産業におけるエネルギー技術モデル

産業においては電力と熱の需要形態が複雑であり、エネルギー需要を動力・照明と加熱・冷却に大別する形でモデルを構築している。需要予測モデルの構造例を図(2)-4に示す。エネルギー回生や分離プロセスの効率により燃料利用効率に変化がでる。燃料利用に関しては、鉄鋼や農業などにおいては高炉ガスや農業残渣バイオマスなどのように分野固有のリソースが存在するため、個別の分野での燃料利用効率の改善も考えられる。また、産業においては多くの場合既にコージェネレーション技術が導入されているため、ガスエンジンや化学再生発電の導入によりその効率を高めることができる。



図(2)-3 家庭における需要予測モデルの構造



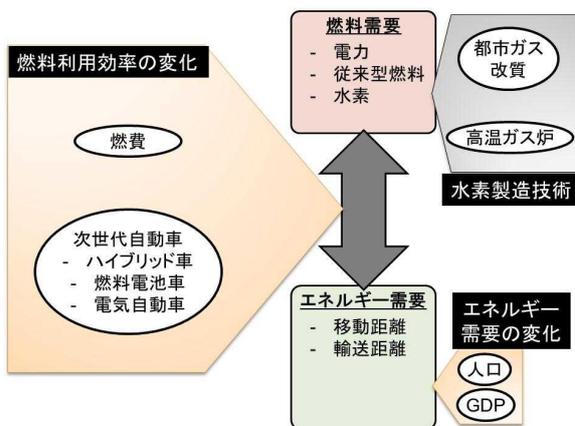
図(2)-4 産業における需要予測モデルの構造

● 運輸におけるエネルギー技術モデル

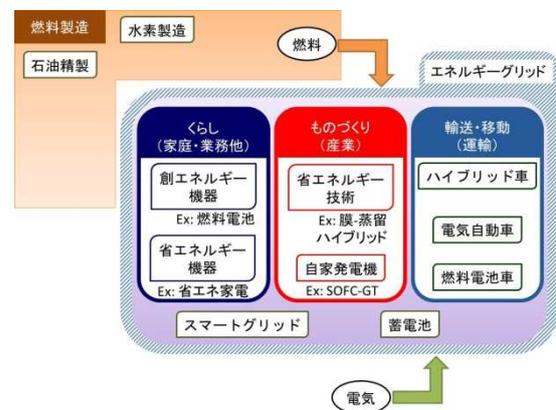
運輸においてはエネルギー需要として移動距離、輸送距離をとり、人口とGDPによる変化を考慮できるようにした。このとき、燃料の利用効率は燃費の向上と次世代自動車の導入により変化することとしている。なお、運輸においては新しい燃料として水素を考慮している。水素については現在のエネルギーシステムの中に運輸分野で使うことを前提とした大規模な製造プロセスが存在しないため、新規に導入することを考えた。構築したモデル（図(2)-5）では都市ガスの改質により現在でも水素を製造することが可能であるため、都市ガス改質による水素製造を前提としている。ただし、高温ガス炉の導入により水素を製造することが可能となることも考慮できるようなモデルとしている。

● エネルギー需要分野の統合

家庭・業務、産業、運輸を統合し、図(2)-6に示すようなエネルギー需要モデルを構築した。燃料の使用量と電力需要量を推算することができる。なお、余剰太陽光エネルギーを蓄電することも可能としている。これは導入したバッテリー搭載型の自動車や定置型の蓄電池を前提としている。



図(2)-5 運輸における需要予測モデルの構造



図(2)-6 エネルギー需要モデルの構造

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

各エネルギー技術の時系列的な進歩を、技術の競合・重複といったリスクを考慮しながら予測した。これを基にサブテーマ(3)(4)と協力し、技術の導入によるエネルギー需要の変化を予測するモデルを構築した。

(2) 環境政策への貢献

エネルギー需要を予測していくことは将来のエネルギーシステムを設計する上で重要な作業といえる。特に環境政策に対しては需要の変動によって必要となるエネルギーそのものが変化することから、将来の温室効果ガス排出量を予測していくためにも有効である。このような予測するための仕組みとして本テーマではモデルを構築した。これにより、今後新たに開発された技術を導入したときの結果を分析することを可能とするばかりか、需要における変数の中でどの変数を変化させることが需要全体に与える影響が大きいかなどを解析することができるようになった。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

特に記載すべき事項はない

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 菊池康紀、梶川裕矢、加藤之貴、窪田光宏、中垣隆雄、福島康裕、松方正彦、古山通久：化学工学，第76巻 第3号，154-157 (2012)

「“東日本エネルギー危機に関する緊急提言”のフォローアップレポート」

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 梶川裕矢：化学工学会 札幌大会 2011，シンポジウム <東日本大震災後のエネルギーシナリオを考える>，札幌，E201 (2011)，「エネルギーロードマップとイノベーション政策」
- 2) 梶川裕矢：化学工学会 第43回秋季大会，同シンポジウム，V203 (2011)，「電力需給に関する緊急提言の背景と内容」
- 3) 菊池康紀、窪田 光宏：化学工学会 第43回秋季大会，同シンポジウム，V206 (2011)，「2011年夏季における電力需要の分析」
- 4) 菊池 康紀：化学工学会 第77年会，同シンポジウム，XB215 (2012)，「将来のエネルギー需要の分析とモデル化」

- 5) 梶川裕矢：化学工学会 第77年会，同シンポジウム，XB217（2012），
「社会シナリオの工学的評価に基づくエネルギー戦略立案に向けて」
- 6) 菊池康紀他：実装可能な技術による将来エネルギーシステムの設計、日本LCA学会第7回研究
発表会、東京理科大学、pp. 10-11（2012）

（3）出願特許

特に記載すべき事項はない

（4）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない

（5）マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない

8. 引用文献

- 1) 加藤之貴、安永裕幸、柏木孝夫監修：「実装可能なエネルギー技術で築く未来 骨太のロードマップ2」、2010年 化学工業社
- 2) 省エネルギー総覧編集委員会：「省エネルギー総覧2010・2011」、2010年 通算資料出版会
- 3) 前 真之：住宅における給湯の省エネルギー — その使用実態と対策・省エネ基準改正について —、建設工業調査会 寄稿文、(2008) http://www.kenkocho.co.jp/pdf/141_08mm.pdf
- 4) 電力中央研究所研究報告 Y08054、Y08055、Y09022、Y96010、Y98019、Y09027
- 5) 電気事業連合会、INFOVBASE2010
- 6) 経済産業省 資源エネルギー庁：総合エネルギー統計、
<http://www.enecho.meti.go.jp/info/statistics/jukyu/index.htm>
- 7) 経済産業省 資源エネルギー庁：エネルギー白書、
<http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/index.htm>
- 8) 国土交通省：自動車燃費一覧、http://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_fr10_000009.html
- 9) 日本自動車研究所：「水素ステーション」、
http://www.jari.or.jp/jhfc/data/seminor/fy2008/pdf/h20_04.pdf
- 10) 東京電力：過去の電力使用実績データ、
<http://www.tepco.co.jp/forecast/html/download-j.html>
- 11) 社会保障・人口問題研究所：「将来推計人口・世帯数」、
<http://www.ipss.go.jp/syoushika/tohkei/Mainmenu.asp>

(3) エネルギーシステム評価研究

九州大学 稲盛フロンティア研究センター 古山通久

平成23年度累計予算額：1,604千円

予算額は、間接経費を含む。

【要旨】 本サブテーマでは、将来の電源構成を考えるに当たり、需要や供給技術特性など様々なデータを入力として電力網の最適運用を評価するための電源構成モデルにデータ・機能追加を行った。発電技術オプションとして、原子力、石炭火力、LNG火力、石油火力、LNG複合火力、水力、揚水、地熱、太陽光（PV）、風力を考えた。簡単のため、全てが電力網に接続しており、全体最適運用が可能であるとした。電源種別ごとの建設コスト、燃料費、償却資産残存価値率、固定資産税率、運転比率、利子率、負荷追従率、既設設備廃棄年は既往のデータ等から整備し、電力網に係る様々なシナリオの評価を実現した。

【キーワード】 電力網、長期計画、シナリオ評価

1. はじめに

未来エネルギーシステムを設計していくためには、ある電力需要を、どのような技術を用いて供給するのかを把握しなければならない。電力需要は、一日の中でも時間により変動し、企業活動が活発な平日とそうでない休日でも大きく異なり、季節変動も大きい。また、今後、どのように需要が推移し、それに対して供給技術をどのように導入するべきかを決定する必要がある。サブテーマ（2）で推算される電力需要の将来の推移が与えられた時に、どのような発電技術を用いて供給するのが現実的であり最適であるのかを評価するためのモデルが必要となる。

2. 研究開発目的

技術ロードマップをもとにした電力の供給技術の最適化を評価するための手法を開発する。各サブテーマと連携し、将来の電力エネルギーシステムの最適運用の評価を行う。

3. 研究開発方法

各種発電技術は、設備費、燃料費、負荷追従性、資源確保の安定性、環境負荷など異なる特性を有する。それらの特性を踏まえ、夏季昼間や冬季夕方の需要ピーク時にも安定に電力を供給する中期・長期の電力エネルギーベストミックスの計画のため、本研究では、様々な制約条件を線形計画法で解く電源構成モデルを使用した。電源構成モデルの入力データを図(3)-1に模式的に示す。電力需要は東京電力から公表された2008年、2010年の需要データをもとに、夏、春・秋、冬の各平日・休日および夏季最大ピーク3日平均の7代表日の全国の仮想電力需要データを構築した。それらのデータをもとに、人口減と省エネ化シナリオに基づき、今後の需要データを評価した結果および太陽光発電や風力発電などの今後の設置量・稼働率シナリオを入力として電力網に関わる発電技術をどのように組み合わせた時に安定供給を実現しつつ電力網の発電コストを最小化で

きるかを評価した。各発電技術の設置年から既設の設備容量の今後の推移を設定し、評価の対象年は2010、2020、2030、2040、2050年とした。化石燃料価格についてはコスト等検証委員会の新政策シナリオを標準シナリオとして想定した。

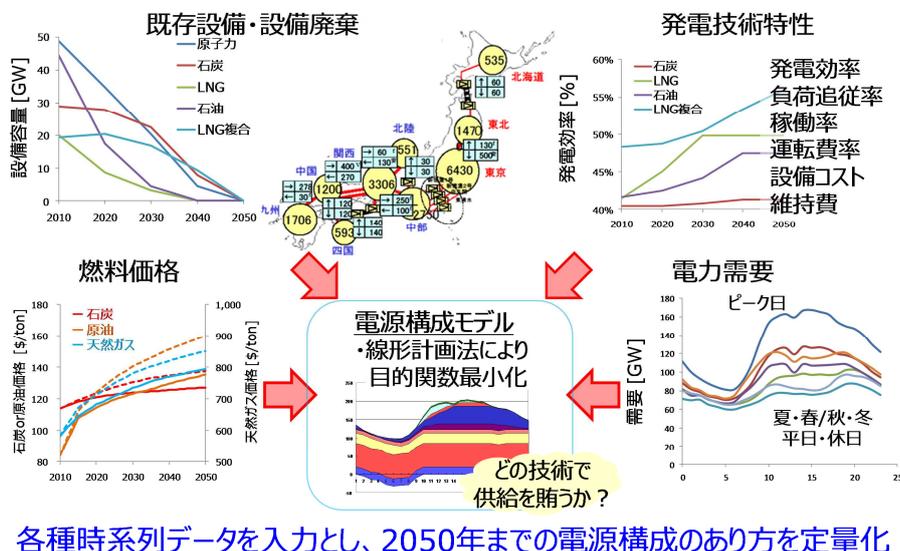


図 (3)-1 電源構成モデルの入力データ模式図

4. 結果及び考察

本研究では、将来の電源構成を考えるに当たり、開発済みの電源構成モデル¹⁾にデータおよび機能を追加することで活用した。発電技術のオプションとしては、原子力、石炭火力、LNG火力、石油火力、LNG複合火力、水力、揚水、地熱、太陽光、風力を考えた。中小水力は一般水力と区別しないこととした。簡単のため、全てが電力網に接続しており、全体最適運用が可能であるとした。原子力、石炭火力、LNG火力、石油火力、LNG複合火力、水力、揚水について、建設コスト、燃料費、償却資産残存価値率、固定資産税率、運転比率、年間利率、負荷追従率等は既報¹⁾のままとした。原子力、石炭火力、LNG火力、石油火力、LNG複合火力については、火力・原子力発電所設備要覧をもとに、設備容量、完成年月データを収集した。収集したデータに基づき、40年を寿命とした際の2010、2020、2030、2040、2050年の各時点において利用可能な設備容量を算出し、増設しない場合の発電容量の値として電源構成モデルに入力した。その他、評価に用いた個別技術の特性等データや仮定について以下に記す。

【石炭・LNG・石油・LNG複合火力発電】火力・原子力発電所設備要覧から、2010、2020、2030、2040、2050年の各時点において利用可能な設備の発電効率の出力加重平均を高位発熱量基準で算出した(表(3)-1)。古い設備の廃棄に伴い、徐々に効率が向上していく。予備的な解析結果から、今後LNG複合火力発電の大きな新設導入が見込まれるため、新設したLNG複合火力発電による効率向上も含めた推移を仮定し、電源構成モデルへの入力とした。CO₂の回収・貯蔵については考慮しなかった。

各火力発電の燃料価格は、コスト等検証委員会による発電コスト試算シート中の、新政策シナリオの値(表(3)-2)を標準として想定した。新政策シナリオの値は、2010年から2050年における石炭、天然ガス、原油の価格上昇がそれぞれ12、36、61%である。2001年段階での価格はそれぞれ

約4円/kg、26円/kg、24円/lであることを考えると、価格上昇が相当に低位で推移したケースに相当する。近年のトレンドから外挿した価格推移予測を行った例についても表(3)-2に示す。この時、2010年から2050年における石炭、天然ガス、原油の価格上昇はおよそ320%、130%、240%であり、このような価格推移となった時には今後の電源構成のあり方に大きく影響し得る。

表(3)-1 石炭・LNG・石油・LNG複合火力発電の発電効率推移(%、HHV)

	2010	2020	2030	2040	2050
石炭(新設考慮せず)	40.2	40.3	40.8	41.8	-
LNG(新設考慮せず)	38.8	39.4	39.5	-	-
石油(新設考慮せず)	39.0	38.7	38.6	-	-
LNG複合火力発電(新設考慮せず)	48.8	49.3	50.3	51.3	-
LNG複合火力発電(新設考慮)	49.2	50.9	52.6	54.3	56.0

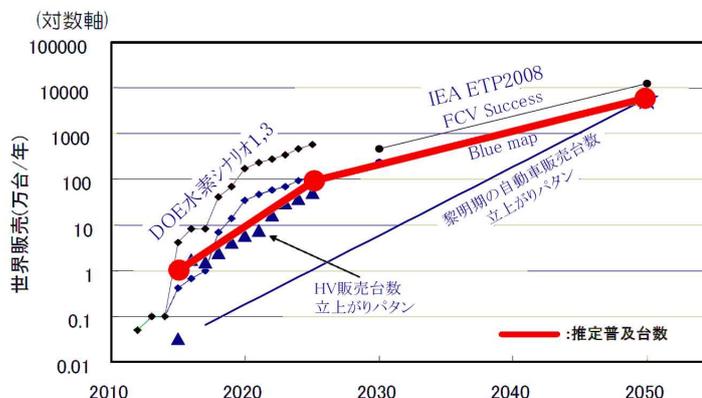
表(3)-2 石炭・LNG・石油の価格推移予測(石炭:円/kg, LNG:円/kg, 石油:円/kg)

	2010	2020	2030	2040	2050	
石炭	新政策シナリオ	9.8	10.4	10.6	10.8	10.9
	トレンド外挿	9.8	16.8	24.4	33.0	39.5
LNG	新政策シナリオ	50.1	58.5	63.0	66.0	68.0
	トレンド外挿	50.1	66.6	84.4	104.7	120.0
石油	新政策シナリオ	45.4	61.8	66.5	69.9	73.0
	トレンド外挿	45.4	117.9	162.3	212.7	251.0

【水力発電】水力発電は、主として設備寿命の見積もりが困難なことが理由となり、今後の新設・廃棄の見通しを得ることが困難であるため、現在と同じ発電、蓄電容量を今後とも維持すると仮定した。中小水力は簡単のため一般水力に含めることとした。

【蓄電技術】揚水発電については、水力同様の理由で現在の容量を今後とも維持すると仮定した。今後の新設揚水発電以外の蓄電技術としては、蓄電池または水素など化学燃料として蓄えることが考えられる。それらの低価格化見通し予測の困難さおよび、それらを再生可能エネルギーの導入と並行して導入していくことによる追加コストが大きいことから、本研究では、次世代自動車に搭載される蓄電池を活用することで追加コストを抑えた蓄電方式を評価に採用した。この蓄電方式では、一週間や一カ月単位での蓄電を意図したものではなく、今後、様々な蓄電オプションを考慮して、より詳細な検討・解析を行う必要がある点に注意が必要である。

次世代自動車の普及見込みは、産業競争力懇談会による報告書中にあるこれまでのハイブリッド車販売台数の立

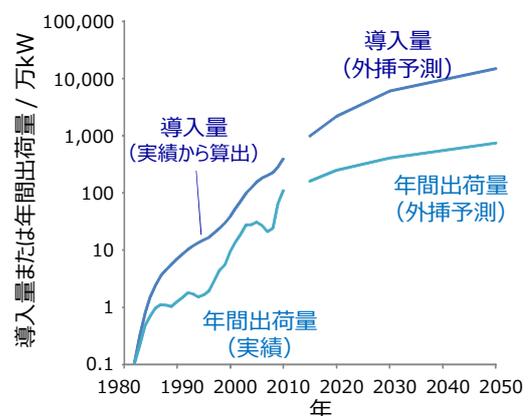


図(3)-2 ハイブリッド車販売台数の立ち上がりパターン (文献2より抜粋)

ち上がりパターンを参考とした²⁾。産業競争力懇談会による報告書では、図(3)-2に示すように2015年販売開始予定の燃料電池自動車の普及がハイブリッド車販売台数の立ち上がりパターンに従うと想定しているが、本研究では、電気自動車、プラグインハイブリッド車、燃料電池自動車の3種の次世代自動車の普及がハイブリッド車販売台数の立ち上がりパターンに従うと想定した。2010年に電気自動車が一般販売開始された時を基準とし、自動車寿命を10年、世界販売台数の1/3が国内販売台数であると仮定した。この時、2020年、2030年時点で100万台、800万台の国内ストックと計算される。2030年以降は、国内需要は飽和期に入り、2050年に国内ストックが5000万台になるよう普及すると仮定した。次世代自動車に搭載される蓄電池の平均容量を10kWhとする時、2020年、2030年時点で1000万kWh、8000万kWhとなる。このうち20%が蓄電に利用可能で、2時間の充電または放電を考えると、100万kWおよび800万kWの蓄電に対応可能となる。この例のような様々な仮定による値を電源構成モデルへの入力として用意した。

【太陽光発電】太陽光発電が今後どのような速度で社会に普及していくのかについては、太陽光発電協会により公表されている国内向けの住宅用・非住宅用等すべて合わせた出荷量実績を集計し、外挿することで今後の年間出荷量の予測を行った(図(3)-3)。寿命を20年とし年間出荷量を積算することでその時点における国内の導入量を算出した。この試算では、2050年にはおよそ15,000万kWの導入量と外挿された。

太陽光発電の導入ポテンシャルは側壁を考慮しない時、住宅用で6,500万kWと経済産業省により試算されている。この試算では、屋根・屋上への設置可能比率、屋根形状、耐震基準適否、空室率等を考慮し、導入量としては4kW/戸を想定している。経済産業省の評価では今後の技術開発による効率向上は考慮されていない。効率が向上すれば、単位面積当たりの発電量が増え、1戸当たりの導入量は増加し、より大きな導入ポテンシャルが見込める。新エネルギー・産業技術総合開発機構による「太陽光発電ロードマップ(PV2030+)」では、現在の16%程度の発電効率は、2020、2030、2050年には20%、25%、40%になると想定している。単純計算では、現在4kWの設置に必要なスペースで、5、6.25、10kWの発電も可能となる。実現性の不確かさはあるものの、住宅用では6,500万kW以上の導入が可能と考えてよいと判断した。非住宅用では、経済産業省、環境省、農林水産省が試算しており、公共系建物および業務・産業分野で2,000~5,200万kW、低・未利用地や耕作放棄地を考慮した時、最大で15,000万kWとの試算されている。一方、環境省の平成22年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査では非住宅用の太陽光発電の経済性については固定価格買い取り制度のもとでも成立せず、今後の技術開発による低コスト化や継続した補助金が必要とされている。技術革新による低コスト化が実現した時、最大で7,200万kWの導入可能量が、補助金に加えて工場・発電所・上下水施設等での設置範囲の拡大があった時には最大で10,000万kWの導入が見込まれている。これらの数値については、特に非住宅用について、予測の困難さが言及されていることを付記する。以上、上記の試算および今後の技術開発によって少ないスペースで多くの発

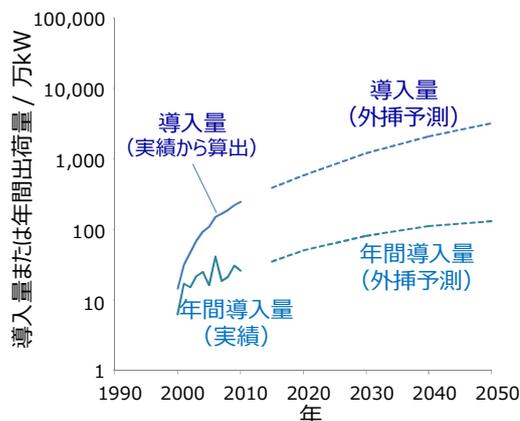


図(3)-3 太陽光発電の年間出荷量、導入量の実績および予測

電量が得られることを鑑み、本研究では、図(3)-2に示される導入量は生産規模、設置個所の観点からは不可能ではないと想定した。

太陽光発電の稼働率については、日発電量曲線は既報¹⁾を参考にした。既報は良好な日照条件の設置場所の実測データをもとにしており、年間の稼働率が15.6%と高い数値である。本報告では、既報の値の8割にあたる12.5%を2010年の年間稼働率として設定した。導入の拡大とともに良好な日照条件の場所が少なくなっていくことを想定し、2020年、2030年、2040年、2050年の稼働率は、11.7%、10.9%、10.1%、9.3%と低下していくと仮定した。

【風力発電】風力発電が今後どのような速度で社会に普及していくのかについては、日本風力発電協会により公表されている2010年度までの導入実績を集計し、外挿することで今後の年間導入量の予測を行った(図(3)-4)。寿命を20年とし年間導入量を積算することでその時点における国内の導入量を算出した。この試算では、2050年にはおよそ3,200万kWの導入量と外挿された。



図(3)-4 風力発電の年間導入量、導入量の実績および予測

風力発電の導入ポテンシャルについては、各省の報告書において極めて大きな数値が報告されており、3,200万kWとの数値については、生産規模、設置個所の観点からは不可能ではないと想定した。

風力発電の稼働率は、コスト等検証委員会では陸上で20%、洋上で30%が用いられている。しかし、実際の稼働率については疑問の声も聞かれる。そこで本研究では、既設の風力発電について公表されているデータを表(3)-3に示す箇所について収集した。収集されたデータから出力加重平均を算出したところ、21.6%となった。洋上風力発電である「せたな町洋上浮力発電所」は34.9%と高い稼働率であった。今後の稼働率については、陸上・洋上それぞれの導入の推移など不確実性が大きいため、本研究では、21.6%の稼働率を評価に用いることとした。発電の時間変動特性を設定することが困難であるため、一日を通して一定の発電を行うものと簡略化して取り扱った。

表(3)-3 風力発電の稼働率実績の集計結果

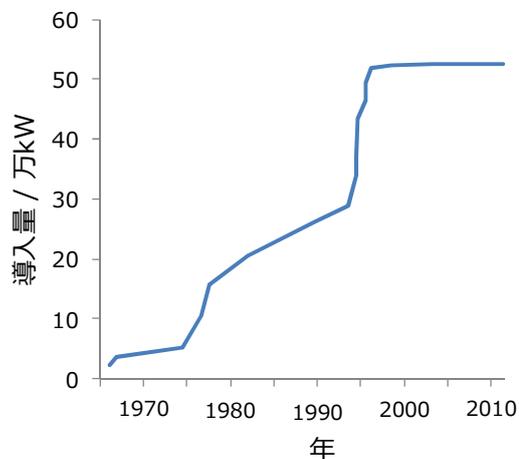
名称	稼働率	定格出力 (kW)	出典
上ノ国町風力発電所	24.7%	500	1)
苫前夕陽ヶ丘風力発電所	20.9%	600	2)
		600	
		1,000	
寿都温泉ゆべつのゆ風力発電所	7.6%	230	3)
島牧ウインドファーム	25.0%	4,500	4)
浜中町ふれあい交流・保養センター風力発電所	20.7%	600	5)
苫前ウィンピラ発電所	17.9%	23,100	6)
		7,500	
興部町風力発電所	11.6%	600	7)
稚内市水道事業風力発電所	3.8%	1,980	8)
さらきとまないウインドファーム	27.7%	14,850	9)
恵山風力発電所	3.2%	1,500	10)
		1,400	
せたな町洋上浮力発電所	34.9%	1,200	11)
寿の都風力発電所	25.1%	1,800	12)

瀬棚臨海風力発電所	33.3%	12,000	13)
風太風力発電所	28.9%	9,950	14)
市民風力発電おおま	27.5%	1,000	15)
稲庭高原風力発電所	21.6%	1,980	16)
グリーンパワーくずまき風力発電所	29.4%	21,000	17)
能代風力発電所	18.3%	14,400	18)
仁賀保高原風力発電所	23.5%	24,750	19)
風車村シンボル風車	6.5%	300	20)
ウインドファーム立川	17.1%	800	
中山峠風力発電設備	19.3%	250	21)
郡山布引高原風力発電所	21.6%	64,000	22)
		1,980	
里美風力発電所	18.6%	600	23)
吉岡風力発電所	6.8%	300	24)
銚子屏風ヶ浦風力発電所	24.8%	1,500	25)
東京臨海風力発電所	16.3%	1,750	26)
三浦ウインドパーク	16.0%	400	
		400	27)
横浜市風力発電所	12.9%	1,980	28)
上越市風力発電施設1号機	12.2%	600	
上越市風力発電施設2号機	6.3%	750	29)
上越市風力発電施設3号機	6.3%	750	
名立区風力発電施設	9.9%	600	30)
内灘町風力発電所	17.4%	1,500	31)
スズキ研修センター風力発電設備	3.9%	40	32)
東伊豆町風力発電所	25.3%	1,800	33)
スズキ湖西工場風力発電設備	14.5%	1,500	34)
大須賀浄化センター風力発電設備	18.1%	660	35)
浜名湖カントリークラブ風力発電所	3.5%	1,000	36)
田原風力発電所	28.8%	1,980	37)
田原臨海風力発電所	20.8%	22,000	38)
田原リサイクルセンター風力発電所	23.4%	1,980	39)
くさつ夢風車	5.0%	1,500	40)
潮風の丘の風車	16.8%	600	41)
高田工業団地風力発電所	15.4%	1,500	42)
北条砂丘風力発電所	18.3%	13,500	43)
鳥取放牧場風力発電所	17.8%	3,000	44)
隠岐大峯山風力発電所	23.7%	1,800	45)
江津高野山風力発電所	17.0%	20,700	46)
計	-	299,560	

- 1) <http://www.town.kaminokuni.lg.jp/hotnews/files/00000300/00000365/w-date.xls>
- 2) 平成12～22年度実績(3基合計) <http://www.town.tomamae.lg.jp/section/kikakushinko/lg6iib0000000sfb.html>, <http://www.town.tomamae.lg.jp/section/kikakushinko/lg6iib0000000rks.html>, <http://www.town.tomamae.lg.jp/section/kikakushinko/lg6iib0000000mcf.html>
- 3) 日本自然エネルギー株式会社 グリーン電力認定実績(<http://www.natural-e.co.jp/green/owner.html>)の四半期での認証発電電力量から計算(平成20～22年度)
- 4) Jパワー各風力発電所データ(<http://www.jpower.co.jp/wind/win01600.html>)
- 5) 平成14・15年度実績(<http://www.hokkai.or.jp/hamanaka/koho/0405koho/p6.pdf>) 平成16年度実績(<http://www.hokkai.or.jp/hamanaka/koho/0505koho/p4.pdf>)
- 6) Jパワー各風力発電所データ(<http://www.jpower.co.jp/wind/win00200.html>)
- 7) 平成13～21年度実績(http://www.town.okoppe.lg.jp/gaiyo/windpower/gaiyo_8windpower_2untendata.html)
- 8) 日本自然エネルギー株式会社 グリーン電力認定実績(<http://www.natural-e.co.jp/green/owner.html>)の四半期での認証発電電力量から計算(平成20～22年度)
- 9) Jパワー各風力発電所データ(<http://www.jpower.co.jp/wind/win01200.html>)
- 10) 平成19～22年度実績(平成23年度函館市経済概要参考資料(<http://www.city.hakodate.hokkaido.jp/keizai/kikaku/jigyougaiyou/2305.pdf>))
- 11) 平成16年実績(新エネルギー財団ホームページより(<http://www.nef.or.jp/award/kako/h16/p05.html>))
- 12) 平成19年度実績(広報すつつ2009年3月号3pより(<http://www.town.suttu.lg.jp/kouhou/200903/3.pdf>))
- 13) Jパワー各風力発電所データ(<http://www.jpower.co.jp/wind/win00900.html>)
- 14) 平成19年10月～平成20年9月実績(広報すつつ2009年3月号3pより(<http://www.town.suttu.lg.jp/kouhou/200903/3.pdf>))
- 15) 2009年度実績(<http://www.h-greencity.org/hatsuden.html>)
- 16) 平成18～22年度実績(<http://www3.pref.iwate.jp/webdb/view/outside/s14Tokei/bnyaBtKekka.html?c=B0801&r=I154&searchJoken=B08%3AB0801%3A1154>)
- 17) Jパワー各風力発電所データ(<http://www.jpower.co.jp/wind/win00300.html>)
- 18) 日本自然エネルギー株式会社 グリーン電力認定実績(<http://www.natural-e.co.jp/green/owner.html>)の四半期での認証発電電力量から計算(平成20～22年度)
- 19) Jパワー各風力発電所データ(<http://www.jpower.co.jp/wind/win00400.html>)
- 20) 2000年1月時点実績(<http://www.pref.tochigi.lg.jp/kankyoseisaku/home/keikaku/archive/shinenergy/pdf/5.pdf>)
- 21) 平成11～17年度実績(<http://www.thr.mlit.go.jp/koriyama/facilities/energy/wind/jisseki.html>)
- 22) Jパワー各風力発電所データ(<http://www.jpower.co.jp/wind/win01000.html>)
- 23) 平成14～22年度実績(<http://www.satomi-kanko.jp/wind/powerdata.htm>)
- 24) 平成18～22年度供給電力量(<http://www.pref.gunma.jp/06/q1310014.html>)
- 25) 日本自然エネルギー株式会社 グリーン電力認定実績(<http://www.natural-e.co.jp/green/owner.html>)の四半期での認証発電電力量から計算(平成20～22年度)
- 26) Jパワー各風力発電所データ(<http://www.jpower.co.jp/wind/win00500.html>)
- 27) 2004～2010年度実績(http://www.city.miura.kanagawa.jp/kankyou/wind_power.html)
- 28) 平成19～22年度実績(<http://www.city.yokohama.lg.jp/kankyo/ondan/furyoku/q-a/>)
- 29) 平成18・19年度実績(<http://www.city.joetsu.niigata.jp/soshiki/kankyo/furyoku.html>)
- 30) 平成18年度実績(<http://www.city.joetsu.niigata.jp/soshiki/kankyo/furyoku.html>)
- 31) 平成15～22年度実績(http://www.town.uchinada.lg.jp/webapps/open_imgs/info/0000000142_0000016500.pdf)
- 32) 2004年実績(<http://www.suzuki.co.jp/release/d/4050121b.htm>)
- 33) 平成16～22年度実績(<http://www.town.higashiizu.shizuoka.jp/bg/furyoku/riyoritu/>)
- 34) 2004年実績(<http://www.suzuki.co.jp/release/d/4050121b.htm>)
- 35) 平成19年度実績(http://www.city.kakegawa.shizuoka.jp/hiroba/shinsunkan/gesueiseibi_080620.html)
- 36) 日本自然エネルギー株式会社 グリーン電力認定実績(<http://www.natural-e.co.jp/green/owner.html>)の四半期での認証発電電力量から計算(平成20～22年度)

- 37) Jパワー各風力発電所データ (<http://www.jpowers.co.jp/wind/win01700.html>)
 38) Jパワー各風力発電所データ (<http://www.jpowers.co.jp/wind/win00600.html>)
 39) 平成19～22年度実績 (<http://www.city.tahara.aichi.jp/section/kankyou/recyclecenter/jyoukyou/jisseki.html>)
 40) 平成14～22年度実績 (<http://www.city.kusatsu.shiga.jp/www/contents/122268353763/activesqr/common/other/4db6b3b3002.pdf>)
 41) 2003年度実績 (<http://hpl.tcbnet.ne.jp/~taiyou-e/furyoku.html>)
 42) 平成17～22年度発電実績 (<http://www.daisen.jp/p/1/10/2/4/01/1/>)
 43) 平成18～23年売電実績 (<http://www.e-hokuei.net/mkpage/img/141150322339.pdf>)
 44) 平成18～22年度売電実績 (<http://tkigyo-toubu.sakura.ne.jp/JISSEKI.HTML>)
 45) 平成16～22年度実績 (<http://www.pref.shimane.lg.jp/kigyo/denki/fuuryoku/ooji/>)
 46) 平成21・22年度実績 (<http://www.pref.shimane.lg.jp/kigyo/denki/fuuryoku/ooji/>)

【地熱発電】地熱発電が今後どのような速度で社会に普及していくのかについては、予測が難しい。これまでの導入実績は図(3)-5の通りで、1990年代の後半以降、頭打ちとなっている。環境省の平成22年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査では、技術革新があった時、最大で518万kWの導入可能量が見込まれている。「国立公園に関わる規制」および「温泉施設に対する影響評価」の見直しが進んでいる一方、自然保護や温泉への影響の観点から反対する声も根強く、将来の導入量推移を予測するのは困難である。そこで、



図(3)-5 地熱発電の導入量実績

本研究では2050年に518万kWの導入量となるよう、線形で導入量が増えると仮定した。この時、2020年、2030年、2040年の導入量は162万kW、278万kW、395万kWとなる。稼働率は、80%と仮定した。

【最適化のアルゴリズム】前述の数値データおよび既報と同様の各種発電技術の特性パラメータを入力として、設備容量制約、負荷追従制約等の制約条件のもと、2010年、2020年、2030年、2040年、2050年の電力網のコストを線形計画法により最小化した。ここで、太陽光、風力の発電は電力網の側から制御を行わないものとした。本研究では、将来の電力価格を予測することが目的ではなく、再生可能エネルギーが導入された際の電力網の運用を知り、CO₂削減効果の評価のためのデータを得るとともに、課題を抽出することを主目的としており、太陽光、風力等の設置・運用コストや政策的コストは線形計画法における最小化では考慮しなかった。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

これまでにデータ整備が十分に進んでいなかった発電技術の特性に関して追加調査を行い、従来型発電技術や今後大規模導入が見込まれる発電技術に関するこれまでの実績や技術的実装可能性を考慮した将来予測を可能とした。

(2) 環境政策への貢献

コスト等検証委員会のCall for Evidence (根拠に基づく情報提供の照会) (平成23年12月22日～平成24年2月20日)に情報提供を行った。提供した情報は、平成24年3月14日の第9回コスト等検証委員会の「配布資料2-1. Call for Evidenceで得られた情報を踏まえた対応について(案)(発電原価)」において議論された。提出された意見には「現在の報告書の内容を変更する必要があるものではない。」と判断されたものが多く見られるなか、当テーマからの意見はすべて「試算結果を参考値として示す。」と反映された。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

特に記載すべき事項はない

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 古山通久：化学工学会 札幌大会 2011, シンポジウム <東日本大震災後のエネルギーシナリオを考える>, E216 (2011), 「脱原発ははたして可能か?～実装可能な技術 で考える～」
- 2) 古山通久：化学工学会 第43回秋季大会, 同シンポジウム, V2015 (2011), 「ポスト大震災の電力需給アンバランス解消に向けて」
- 3) 古山通久：第2回新エネルギーフォーラム（2011）「ポスト3.11 の電力需給とエネルギービジョン」
- 4) 古山通久：東風公民館校区主催講演会（2011）「みんなで実行! 無理なく協力節電」
- 5) 古山通久：日本伝熱学会関西支部伝熱技術フォーラム平成23年度第1回例会兼化学工学会エネルギー部会熱利用分科会 第22回研究会（2011）「原発減少社会における電力需給を考える」
- 6) M. Koyama : 11th International Conference on Clean Energy (ICCE-2011), Taichung, Taiwan, 2011
“Future Japanese Energy System with Decreasing Nuclear –Exploration for A Golden Mean Way with A Minimum Regret” (keynote lecture)
- 7) 古山通久：第3回国家経営勉強会（2011）「原発減少社会におけるエネルギーの将来～電力に関する中庸の議論を中心に～」
- 8) 古山通久：プロセスシステム工学第143委員会・平成23年度第5回研究会（2012）
「原発減少社会における電力需給～中庸の立場から」
- 9) 古山通久：化学工学会 第77年会, 同シンポジウム, XB216 (2012), 「発電部門の低炭素化」

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 日本経済新聞（2012年4月18日、27面）経済教室「再生エネ買い取り制度の課題（下）」を寄稿
- 2) 西日本新聞（2012年4月24日、29面）「九電 今夏の電力供給」にてコメント掲載
- 3) 西日本新聞（2012年5月6日、34面）「原発再稼働 どう考える」にてインタビュー記事掲載
- 4) 古山通久：サイエンスポータル（2011年9月2日）
<http://scienceportal.jp/HotTopics/opinion/202.html>

8. 引用文献

- 1) Y. FUKUSHIMA, M. SHIMADA, S. KRAINES, M. HIRAO, M. KOYAMA: J. Power Sources, 131, 1-2, 327-339 (2004)
- 2) 産業競争力懇談会2008年度推進テーマ報告「燃料電池自動車・水素供給インフラ整備普及プロジェクト」, 産業競争力懇談会, (2009)

(4) 低炭素化効果の評価

名古屋大学 大学院工学研究科 窪田 光宏

平成23年度予算額：692千円

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 未来エネルギーシステムに対して各エネルギー技術が導入された際の効果について、低炭素化効果の観点から評価を行った。具体的にはサブテーマ（2）で構築されたエネルギー需要予測モデルおよびサブテーマ（3）で構築された電源構成モデルを統合し、あるエネルギー技術が導入された際の温室効果ガス排出量の削減効果を定量的に予測するとともに、削減効果の寄与度合について評価を行った。

[キーワード] 温室効果ガス、排出削減効果

1. はじめに

未来エネルギーシステムの設計にあたっては、さまざまなエネルギー技術の中から適切な技術を選択し、適時適量導入していく必要がある。このためには各エネルギー技術の導入効果を定量的に把握・評価することが不可欠である。この際の評価指標としては省エネルギー性、経済性（イニシャル・ランニングコストなど）、環境負荷（温室効果ガス排出量など）などが考えられるが、本研究では特に低炭素化効果、具体的には温室効果ガスの排出量削減効果に着目した。そこで、サブテーマ（2）で構築されたエネルギー需要予測モデルおよびサブテーマ（3）の電源構成モデルを統合した上で、サブテーマ（1）のリスク評価結果も考慮してサブテーマ（2）により策定された各エネルギー技術の性能および普及のロードマップに従って各エネルギー技術がエネルギーシステムに導入された際の温室効果ガス排出量の定量的な予測およびその削減効果の評価を実施した。

2. 研究開発目的

各種エネルギー技術がエネルギーシステムに導入された際の低炭素化効果（ここでは温室効果ガス排出量）の定量的な把握を可能とすることを目的とした。

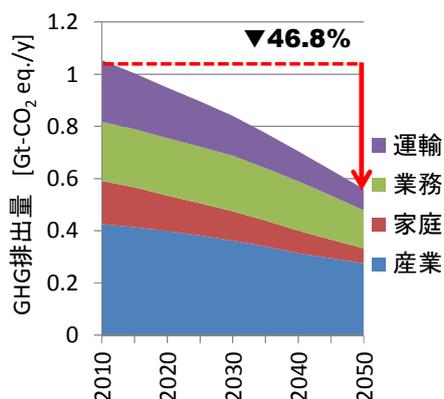
3. 研究開発方法

本テーマでは、各種エネルギー技術をエネルギーシステムに導入した際の低炭素化効果の定量的把握・評価を実施した。具体的な低炭素化効果の指標としては、温室効果ガス（GHG: Greenhouse Gas）排出量を用いた。一般に、エネルギー技術の導入に伴うGHG排出量の変化は燃料消費に伴う排出と電力使用に伴う排出双方の増減により生じる。そこで、サブテーマ（2）で構築されたエネルギー需要の将来予測モデルを用いて、あるエネルギー技術を導入した際の2010、2020、2030、2040、2050年における産業、業務、家庭、運輸部門の各需要家についての各種燃料の年間消費量および夏季、中間期、冬季の各平日・休日および夏季最大ピーク3日平均の7代表日についての電

力の日負荷曲線を決定した。つづいて各年の電力の日負荷曲線をサブテーマ（3）で構築された電源構成モデルへの入力として与え、2050年までの発電コストが最小化になるように最適計算を行い、電力使用時のCO₂排出原単位、CO₂排出量、総発電コストなどを決定した。以上得られたデータに基づいて、GHG排出量=Σ（各燃料消費量_i×燃料種ごとのGHG排出係数+電力消費量_i×電力使用時のCO₂排出原単位）（i：各需要家）によりGHG排出量を定量的に算出し、ベースケースとの比較からGHG排出量の削減効果を評価した。さらに、実装可能性の観点から評価されたエネルギー技術の性能および導入量予測を基準として、性能および導入量の変動がGHG削減効果に与える影響についての感度解析も実施した。なお、本計算にあたっては2050年までのエネルギー技術の性能および導入量予測が必要であるが、この点に関してはサブテーマ（1）、（2）により提示されたロードマップに従った。また、考慮したエネルギー技術についてはサブテーマ（2）の表(2)-1に掲げられた技術とした。

4. 結果及び考察

はじめに、本テーマにおけるベースケースの評価結果を示す。本テーマでは、サブテーマ(2)の表(2)-1で考慮した各エネルギー技術が予測通りの性能、普及率で市場に投入されるとした積極進展ケースを評価の基準とした。なお、積極進展ケースの詳細については、表(5)-2に掲載されている。図(4)-1に、解析により算出された部門別GHG排出量の経年変化を示す。



図(4)-1 積極進展ケース（本研究のベースケース）の部門別GHG排出量の経年変化

なお、本図縦軸のGHG排出量は独立行政法人国立環境研究所「日本のGHG排出量データの部門別CO₂排出量（間接排出量[電気・熱配分後]）」¹⁾における燃料の燃焼によるGHG排出量のうち、エネルギー転換部門における間接排出量を除いた値に対応している。つまり、日本全体のGHG排出量に対してはエネルギー転換部門、燃料からの漏出、工業プロセス、廃棄物からのGHGの間接排出量を加味していない値となっている。また、GHG排出削減率の基準としては解析により算出された2010年度のGHG排出量を用いた。本図に関する詳細な検討結果は（5）未来エネルギーシステム提案で示すが、考慮したエネルギー技術が予測通りの性能、普及率で導入されていった場合、2050年には2005年度比46.8%のGHG排出量の削減が可能であることが分かる。

図(4)-1に示した積極進展ケースを基準として、これ以降はエネルギー技術ごとのGHG削減効果を各部門について示す。ここで、各エネルギー技術のGHG排出削減量の算出にあたっては、積極進

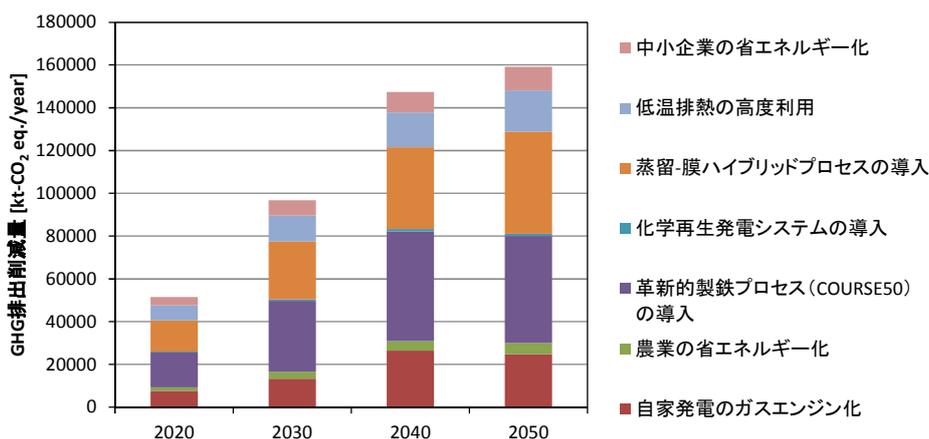
展ケースにおいて対象エネルギー技術のみ性能向上、普及が進まないと仮定した場合のGHG排出量を算出し、全技術が積極進展ケースに従って導入がなされる場合のGHG排出量（図(4)-1）との差分量（GHG排出量の増加分）を求め、その値を対象技術のGHG排出削減量とした。なお、対象エネルギー技術が電力を使用する場合や、普及が進まなかった際の代替技術が電力を使用する技術である場合はエネルギーシステム全体の電力需要量が増加するため、電源構成モデルにより算出される電力使用時のCO₂排出原単位が変化する。これに伴い対象技術の部門のみならず電力を使用する全需要のGHG排出量が増加するため、各エネルギー技術のGHG削減効果の和は図(4)-1のGHG削減量と必ずしも一致するものではない。

産業部門

図(4)-2に、表(2)-1の産業部門に関する各エネルギー技術を導入した際のGHG排出削減量を経年変化として示す。

本図より、エネルギー多消費型の素材産業である鉄鋼分野への革新的製鉄プロセス（COURSE50）および化学工業の蒸留プロセスにおける蒸留と分離膜とのハイブリッド化がGHGの排出削減効果が高く、いずれの技術も産業部門におけるGHG削減量の30%程度を担い得る可能性が示された（上述したように導入エネルギー技術ごと独立に電力使用時のCO₂排出原単位が変化するため、部門内における寄与割合はおおよそその値となる）。その他、低温排熱の高度利用（70～90℃級の低温排熱を200℃にヒートアップして高温蒸気発生を行うヒートポンプシステム）も約10%のGHG排出削減効果を有している。

産業分野においては、燃料消費と電力消費に伴うGHG排出量の比が約8：2（2010年度）となっており、燃料消費によるGHG排出が圧倒的に多い。積極進展ケースでは、2050年にはこの比が9：1まで拡大することが予測されており、産業分野のGHG排出量の削減に向けては燃料消費量の低減がキーポイントとなる。この点から、産業分野においては燃料消費によるGHG排出を低減可能な省エネルギープロセスや熱の高度利用技術などの積極的導入が重要と考えられる。



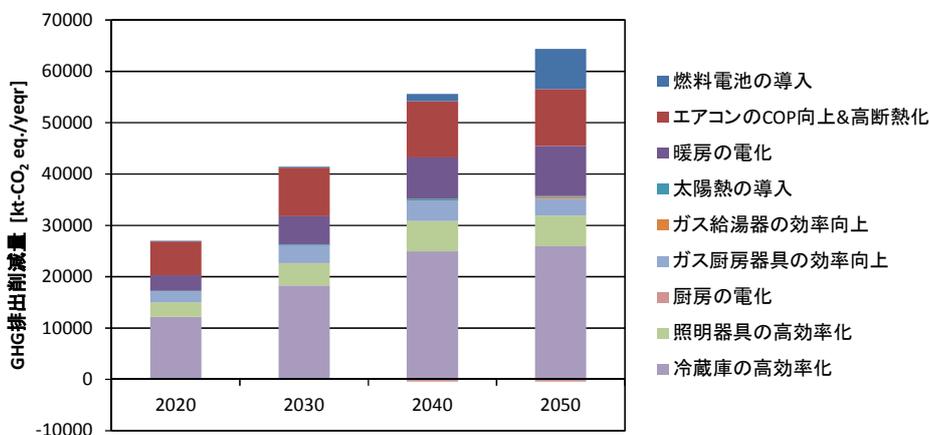
図(4)-2 産業部門の各エネルギー技術によるGHG排出削減量

家庭部門

図(4)-3に、表(2)-1の家庭部門に関する各エネルギー技術を導入した際のGHG排出削減量を経年変化として示す。

本図より、家庭部門においては冷蔵庫の高効率化の寄与が大きい。また、エアコンの成績係数（COP）および住宅の断熱性能の向上、暖房用エネルギー源である灯油を電力に代替する暖房の電化も家庭部門のGHG排出削減量の約15 %ずつを占め、その効果は大きい。

家庭部門は産業部門とは異なり、GHG排出量の約2/3（2010年度）が電力消費に起因していることから、電気機器の高効率化がGHGの排出削減を促進していく上で重要な役割を果たすと予想されるが、本結果からもその点が確認された。また、家庭部門のGHG排出の残り1/3は主に暖房・給湯需要のための灯油などの燃料の燃焼に起因している。このため、暖房の電化や断熱性の向上により、その排出削減が可能と言える。なお、暖房の電化については灯油の消費量が削減される一方、電力負荷は増大する。このため、電化暖房機器（エアコン）の効率、導入量、電力使用時のCO₂排出原単位の変化量によってはGHG排出削減効果が得られない可能性が考えられるが、本解析の結果、暖房用に投入されるエネルギー（灯油）のうち、50 %（北海道・東北地方）、80 %（関東地方以西）を電化してもGHG削減効果が得られることが明らかになった。



図(4)-3 家庭部門の各エネルギー技術によるGHG排出削減量

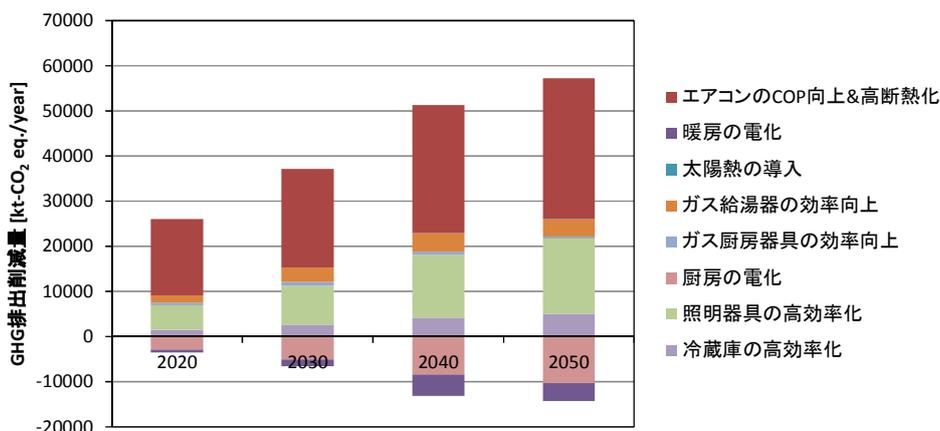
業務部門

図(4)-4に、表(2)-1の業務部門に関する各エネルギー技術を導入した際のGHG排出削減量を経年変化として示す。

本図より、業務部門においても家庭と同様に、エアコンのCOPおよび建築物の断熱性能の向上によるGHG排出量の削減効果が大きく、業務部門においてGHG削減を示す技術の削減効果の約55 %を占めている。また、業務分野の特徴として照明器具の高効率化の寄与が大きい点が挙げられる。これは業務分野の代表的な用途であるオフィスビルでは年間の電力消費量の約40 %を照明が占めるため（家庭分野では約15 %）²⁾、LEDなどの高効率電灯の使用によるGHG削減効果が顕著に表れたものと考えられる。

一方、業務分野では厨房および暖房の電化においてGHG削減効果が負の値、つまり両技術の導入によりむしろGHG排出量が増大してしまうという結果が得られた。家庭部門において暖房の電化によりGHG削減効果が得られたのと逆の傾向を示している。この原因として、上述したように既存技術において燃料消費により賄っていた需要を電化した場合、燃料消費量は減少するものの電力消費量が増大する。エネルギーシステム全体の電力消費量が増大すると電源構成モデルの最適解が影響を受け、電力使用時のCO₂排出原単位が変化する。この結果として、電力消費に伴うGHG排出量

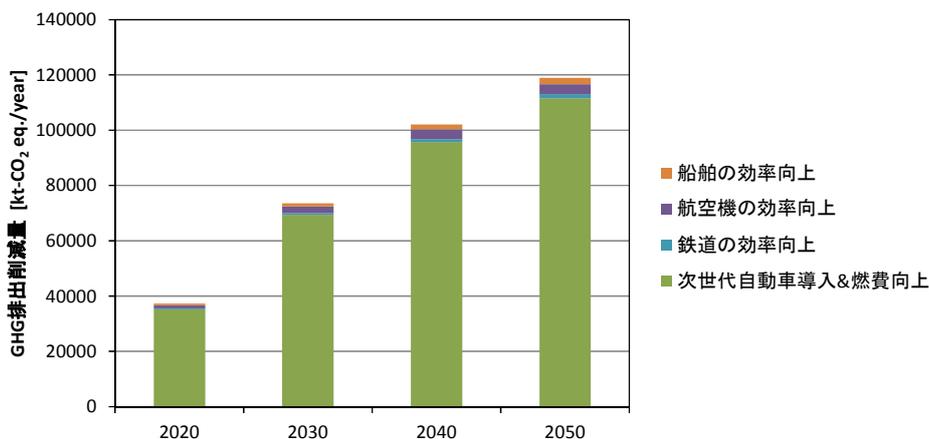
(電力消費量の増大分×電力のCO₂排出原単位)と燃料消費に伴うGHG排出量(燃料消費量の減少分×燃料種ごとのGHG排出係数)との間で、電力消費に伴うGHG排出増大量<燃料消費に伴うGHG排出減少量ならばGHGの削減が、電力消費に伴うGHG排出増大量>燃料消費に伴うGHG排出減少量ならばGHGの増大が生じることになる。本結果は、電力および燃料消費の需要を予測し、電力消費量に応じた最適電源構成によりCO₂排出原単位を算出してGHG排出量を求める本解析の特徴である。本モデルを用いると、需要変化に伴うエネルギーシステム全体の電源構成の変化までも考慮した検討が可能となり、個別技術単体の評価だけでなく、エネルギーシステムの中での各技術の導入効果や導入率の最適化が可能である。なお、積極進展ケースにおいて業務部門の厨房の電化が進まないとした解析を行った結果、GHG削減率が47.7%となり、積極進展ケースに対して削減率が0.9ポイント向上した。



図(4)-4 業務部門の各エネルギー技術によるGHG排出削減量

運輸部門

図(4)-5に、表(2)-1の業務部門に関する各エネルギー技術を導入した際のGHG排出削減量を経年変化として示す。



図(4)-5 運輸部門の各エネルギー技術によるGHG排出削減量

運輸部門においてはGHG削減効果のほとんどが自動車の燃費の向上および次世代自動車の導入

により達成されている。本モデルにおいては運輸・自動車に関して自動車の燃費の向上および遠距離・域内走行それぞれの次世代車の導入を検討しているため、本来であれば燃費の向上と次世代自動車の導入効果を切り分けて比較・検討することで、運輸部門で重要となるエネルギー技術が明確化される。しかし、上記3点の効果は相互が複雑に関連しているため現モデルでは効果の切り分けが困難であることから、今後、モデルの改良が必要とされる。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

各エネルギー技術の導入に伴うGHG排出量の削減効果を時間軸ごとに定量的に示すことが可能になった。また、機器性能の向上や導入量がGHG排出量の削減効果に及ぼす影響についても示すことが可能となった。

(2) 環境政策への貢献

需要予測モデルおよび電源構成モデルを統合することにより、個別技術の評価にとどまらず、エネルギーシステム全体の中における各エネルギー技術のGHG削減効果を定量的に示すことができるとともに、導入率の最適化なども可能であり、環境政策立案時の目標設定などのための有用なツールになりうると考えられる。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

特に記載すべき事項はない

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない

<その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない

(2) 口頭発表(学会等)

サブテーマ(2)菊池、サブテーマ(4)加藤の共著者として発表(各1件)

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない

(4) シンポジウム、セミナーの開催(主催のもの)

特に記載すべき事項はない

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない

(6) その他

特に記載すべき事項はない

8. 引用文献

- 1) 独立行政法人 国立環境研究所：日本の温室効果ガス排出量データ（1990～2010年度）確定値、<http://www-gio.nies.go.jp/aboutghg/nir/nir-j.html>
- 2) 省エネルギーセンター：オフィスビルのエネルギー消費の特徴、http://www.eccj.or.jp/office_bldg/01.html

(5) 未来エネルギーシステム提案

東京工業大学 原子炉工学研究所

加藤之貴

平成23年度 累計予算額：5,469千円

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 2050年までを視野にいたした日本の中長期エネルギーシステムを検討するためのエネルギー需給構造の評価ツールの提供を目指した。平成23年3月11日の東日本大震災以後のエネルギーシステムの変化を配慮し、実装可能な技術による我が国の将来のエネルギーシステム構築のためエネルギー需給構築の定量的な評価ツールを検討した。評価ツールを基にシナリオ評価を進め、エネルギー分野に関する低炭素化効果を定量評価した。各エネルギー技術のリスク評価を進め将来の実装可能性を工学的な視点で検討した。日間、季節間、年間変動を考慮してのエネルギー需要評価ツールを作成した。さらに、この需要に応じた系統側電力のエネルギー源、発電技術毎の供給構成を検討した。得られた、電源構成評価手法、エネルギー需要側評価手法の双方を用いた統合評価を可能としエネルギー需要・供給・省エネ技術に係る様々なオプションを設定したシナリオ解析を実現した。原発再稼働ありかつ40年で運転終了のケースにおいて、実装可能なエネルギー技術として産業排熱回収、電気機器の高効率化、次世代自動車導入などを積極的に導入することで、2050年までに4割以上のGHG排出の低減が可能であった。さらに太陽光、風力発電の導入で5割まで低減が可能であった。一方、一人当たりのGDPが年1%成長を基本としたが、それに対し同0%成長では6割以上の低減が試算された。火力発電については高効率な発電装置への置換が重要であることを示した。以上から需要側へのエネルギー技術の導入、電源構成の最適化により低炭素化が可能であったが、一方で発電単価上昇が課題であった。評価ツールの開発により様々なシナリオ解析に基づく課題抽出・制度提言を可能とした。

[キーワード] 二酸化炭素、エネルギーシステム、低炭素化、実装可能性、対策技術

1. はじめに

代表者と研究分担者は2010年に「実装可能なエネルギー技術で築く未来—骨太のエネルギーロードマップ2—」（実装骨太）¹⁾を編纂した。本研究はこれを発展させるものである。実装骨太ではエネルギー技術の積上げによる2040年における二酸化炭素排出量削減見通しを検討した。しかしながら、その評価は2040年単年のみの基礎的な評価に過ぎず検討として不十分であった。とくにエネルギー需要の日間、季節間、年間変化を配慮した動的な評価が無く、より実用に即したエネルギーの需要側、これに応じたエネルギー供給側の構成を検討する必要がある。そこで、本研究ではサブテーマ（1）～（5）が連携し、実装骨太著者グループらと各エネルギー技術の可能性、リスクを精査しさらにその成果を統合し、より実装性の高いエネルギーシステムの構築を検討した。同時に提案システムの精度の高い評価を目指すこととした。

さらに、平成23年3月11日の東日本大震災で大きく、かつ早急な日本のエネルギー需給構造の変革が必要になった。ここ数年のエネルギー技術選択が中長期のエネルギー需給のあり方に大きく影響するに至った。そこで、震災後を考慮し、2050年までを視野にいった、中長期エネルギーシステムの検討を進める必要が生じた。これらを背景に実装可能性を基準とした未来エネルギーシステムの構築を目指した。

2. 研究開発目的

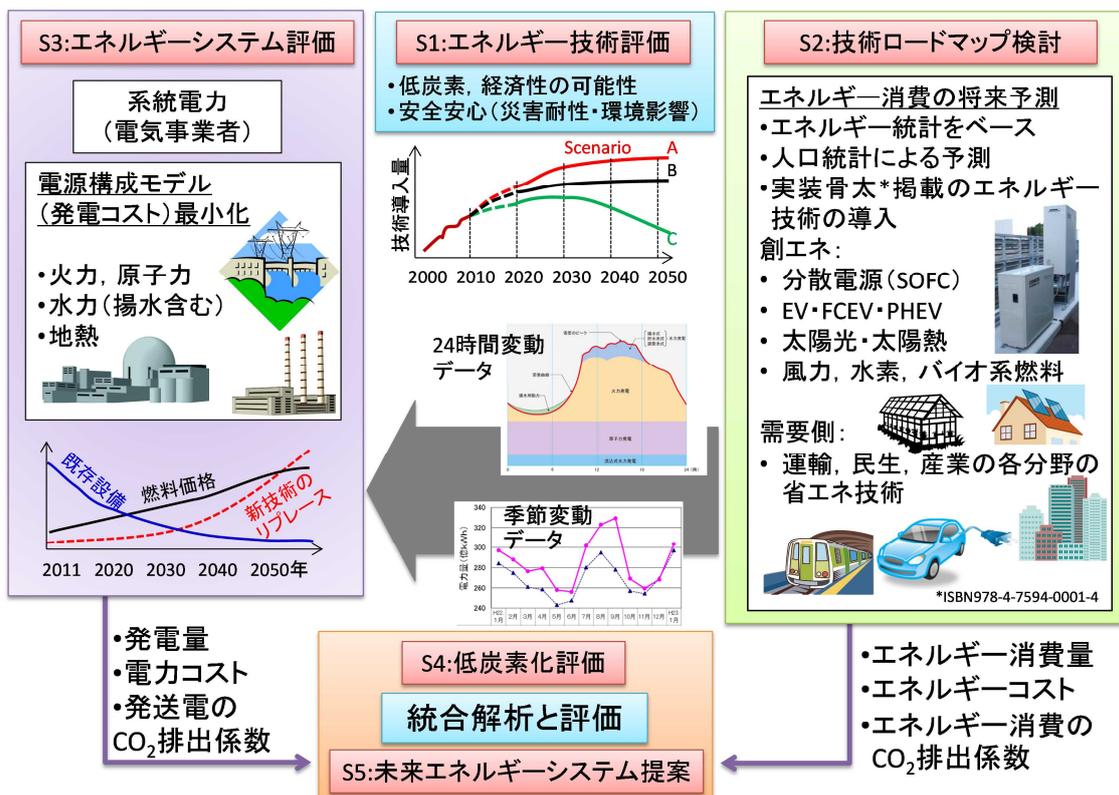
実装骨太において種々のエネルギー技術分野について技術可能性と技術のリスクをあわせて評価する手法を既に確立している。本研究では各技術の効果、さらに時系列的な技術進歩、技術リスク予測を進めることを目指す。サブテーマ（1）～（4）と連携し、各技術に関する将来予測をより詳細に精度高く進める。検討結果をもとに我が国のエネルギービジョンに寄与する、より実装性を基準とした未来エネルギーシステム構築を目指す。具体的には2050年までを視野にいった日本の中長期エネルギーシステムを検討するためのエネルギー需給構造の評価ツールの提供を目指す。東日本大震災以後のエネルギーシステムの変化を配慮する。実装可能な技術による我が国の未来エネルギーシステム構築のためエネルギー需給構築の定量的な評価ツールを検討する。評価ツールを基にシナリオ評価を進め、エネルギー分野に関する低炭素化効果を定量評価し、政策提言を示す。各エネルギー技術のリスク評価を進め将来の普及性を工学的な視点で検討する。選択されたエネルギー技術を利用しての将来のエネルギー需要を日間、季節間、年間変動を考慮しての導入シナリオを作成し、そのエネルギー需要評価ツールを作成する。さらに、この需要に応じた系統側電力のエネルギー源、発電技術毎の供給構成を検討するためのモデルを構築する。得られた、電源構成評価手法、エネルギー需要側評価手法の双方を用いた統合評価を行う。様々なエネルギー導入シナリオのもとで、日本全体の地球温暖化ガス発生量を評価し、望ましい未来エネルギーシステムの構成を示す。統合評価の結果をもとに政策提言の提示を目指す。

3. 研究開発方法

サブテーマ（1）～（4）の成果を総括し未来型エネルギーシステムの提案と提言を検討した。検討の流れを図(5)-1に示す。サブテーマ（1）エネルギー技術のリスク評価と解析で各技術の評価を進め、サブテーマ（2）リスク評価に基づく技術ロードマップ検討により各技術の将来展開を検討する。サブテーマ（3）エネルギーシステム評価研究にて電源構成評価を行う。提案されたエネルギーシステムに関して（4）低炭素化効果の評価を行い、各エネルギー技術の利用によるエネルギーシステムの低炭素化効果を評価する。本サブテーマ（5）ではこれらの成果を統合し、エネルギー技術導入による日本全体の低炭素化を評価するツールを作成し、エネルギー技術を導入したモデルに対して温室効果ガス（GHG）削減量をCO₂換算値で求め、GHG削減効果の評価を行い、未来に向けた新たなエネルギーシステム技術展開の方向性を提案する。技術の導入シナリオを複数立て、ケースごとに各エネルギー技術のエネルギー需要の2050年までの経時変化を算出する。

さらに、各要素技術の将来進展をモデル化しエネルギー需要シナリオを作成する。電気自動車、空調などを取り込むにあたり日間、年間のエネルギー需要変動を考慮し、これを2050年まで検討する。この需要に応じた供給側の検討を系統電力コスト、CO₂原単位を指標に最適化する。結果を

需要側にフィードバックし需要シナリオを再構築し、この連携によって最適化されたエネルギーシステムの構築を行う。構築したシステムにおいて、需要側基準でのGHG削減効果を2050年までの経時変化で算出する。計算結果をもとにエネルギー技術導入の効果を検討する。国民との対話を進め、進捗状況を開示し、参加者の意見を聴取し研究手法に反映する。これらの成果をもとに政策提言を行う。



図(5)-1 未来エネルギーシステム提案の検討評価の流れ (Sはサブテーマを示す)

4. 結果及び考察

サブテーマ(1)～(4)の作業を統合し、実装可能技術を用いた未来型のエネルギーシステムのシナリオ評価検討を進めた。需要側の各エネルギー技術の導入シナリオのケースを作成し、ケース毎のエネルギー需要側を試算し、これをもとにしたエネルギー供給側電源構成の最適化を行った。さらに日本全体のGHG発生量をケース毎に試算した。なお、ここでのGHG削減量とは、全GHG排出のうち「燃料の燃焼」に関する部分の「エネルギー転換部門(間接配分後)」（所内利用や送電ロス(SF6を含む)によるもの)を除いた分とした。

4.1 シナリオの作成

シナリオの作成にあたりエネルギー需要側における考慮した技術、電源構成モデルにおける考慮した技術項目を表(5)-1(a)、(b)に示す。未考慮の技術、観点も合わせて示した。各技術項目に関してサブテーマ(2)(3)において既存データをもとに実装可能性を基準に将来の技術普及、性能向上に関して外挿を行った。需要側のシナリオオプションを表(5)-2に示す。シナリオ策定に

は選択肢が無数にある。ここでは、「基本」、「積極進展」、「積極進展+再生可能エネルギー導入」、「低炭素化高度進展」のケースでシナリオを設定した。GDP変化の影響を考慮するため、基本/積極進展ケースではGDPを一人当たり年率1%成長と仮定し、低炭素化高度推進ケースではGDPの一人当たり年率0%成長を仮定した。一人当たりGDP変化と総実質GDPの変化を図(5)-2に示す。軽水炉発電は再稼働ありかつ40年での運転終了、または再稼働無しを想定した。積極進展ケースでは基本進展に対して自動車燃費向上、厨房電化、灯油電化、高温ガス炉の導入を考慮した。積極進展+再生可能ケースでは、電源構成側に積極的に太陽光、風力発電を導入し、さらに低炭素化高度進展ケースではGDPの成長を0%にした場合として検討した。

表(5)-1(a) エネルギー需要側における考慮した技術

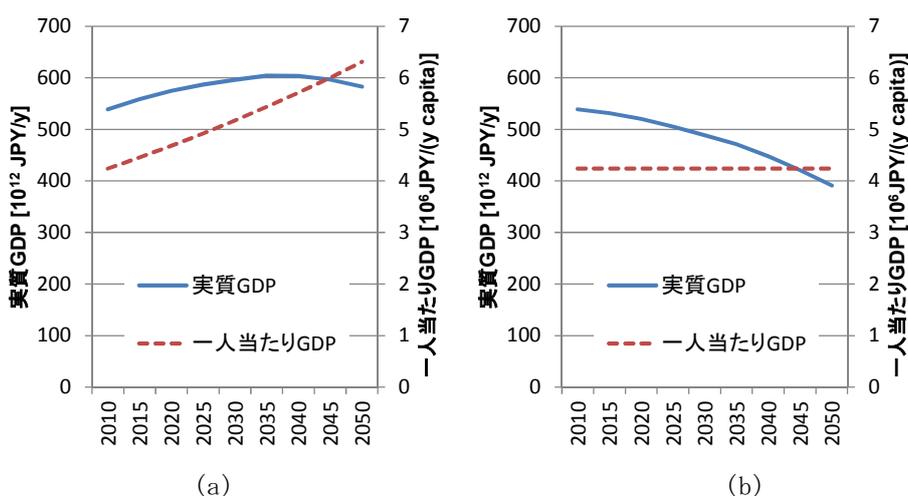
		技術および変動要因	
家庭・業務	考慮した技術	➤	エネルギー機器の効率 家電製品（エアコン、冷蔵庫）、給湯機器、照明機器
		➤	家庭用燃料電池（SOFC）の効率および導入率
		➤	太陽光・太陽熱の導入量
		➤	空調需要におけるエネルギー効率 建屋の断熱性能の向上
		➤	エネルギーの使用形態の変化 厨房の電化、給湯の電化、暖房の電化
	未考慮の観点	➤	デマンドコントローラ等の制御技術導入による省エネ効果
		➤	カーテンや簾などの導入やライフスタイルの変更による省エネ効果（電力量・電力）
		➤	各家電製品の使用時間の分散やライフスタイルの変更などの節電効果（電力）
		➤	産業構造の変化に伴う業務分野のエネルギー需要の変化
産業	考慮した技術	➤	省エネルギー技術の導入 膜-蒸留ハイブリッドシステム、低温排熱利用、クレーン・モータ等におけるエネルギー回生、農林分野における未利用バイオマスの利用、鉄鋼プロセスにおける水素利用や CCS 等による省 CO ₂ 技術、中小事業所における省エネ対策の徹底
		➤	自家発電における技術導入および効率改善 化学再生発電、ガスエンジン
	未考慮の観点	➤	産業構造の変化に伴うエネルギー需要の変化
		➤	資源リサイクルなど静脈産業によるエネルギー需要の変化
運輸	考慮した技術	➤	次世代自動車の普及 ハイブリッド車、燃料電池車、電気自動車
		➤	燃費の向上
	未考慮の観点	➤	モーダルシフトによる需要の変化
全分野共通	考慮した観点	➤	人口変化に伴うエネルギー需要の変化
		➤	GDP 変化に伴うエネルギー需要の変化
	未考慮の観点	➤	人口あたりのエネルギー消費量の変化
		➤	GDP あたりのエネルギー消費量の変化

表(5)-1(b) 電源構成モデルにおける発電技術項目

考慮した技術	➤	原子力、石炭火力、LNG火力、石油火力、LNG複合火力、水力*、揚水、地熱、太陽光、風力(*中小水力は一般水力と区別しないこととした。)
考慮していない技術	➤	波力、海洋温度差、熱電素子など

表(5)-2 統合解析のシナリオオプション(2050年目標)

項目	指標	基本	積極進展	積極進展+再生可能進展	低炭素化高度進展
人口変化		人口統計に準拠			
GDP変化		一人あたり年1%成長			同年0%成長
再生可能エネルギー	太陽光、風力発電導入	太陽光85GW、風力32GW(稼働率21.6%)	太陽光150GW、風力64GW(稼働率34.9%)	太陽光150GW、風力64GW(稼働率34.9%)	太陽光150GW、風力64GW(稼働率34.9%)
自動車	燃費向上	無	有		
自動車	域内燃料電池自動車+電気自動車割合	0%(2050)	80%(2050)	積極進展ケースに太陽光150GW、風力64GWを導入	積極進展+再生可能ケース、GDP成長率0.0%/ (人・年)、さらに種々のエネルギー技術の高度化を考慮
自動車	遠距離燃料電池自動車割合	0%(2050)	80%(2050)		
家庭	厨房電化	0	80%(2050)		
業務	厨房電化	0	80%(2050)		
家庭	灯油の電化	0	東北以北50%(2050)、関東以南80%(2050)		
業務	灯油の電化	0	50%(2050)		
軽水炉		再稼働ありかつ40年で運転終了、または再稼働無し			
高温ガス炉	基数(2050)	0	11	11	11



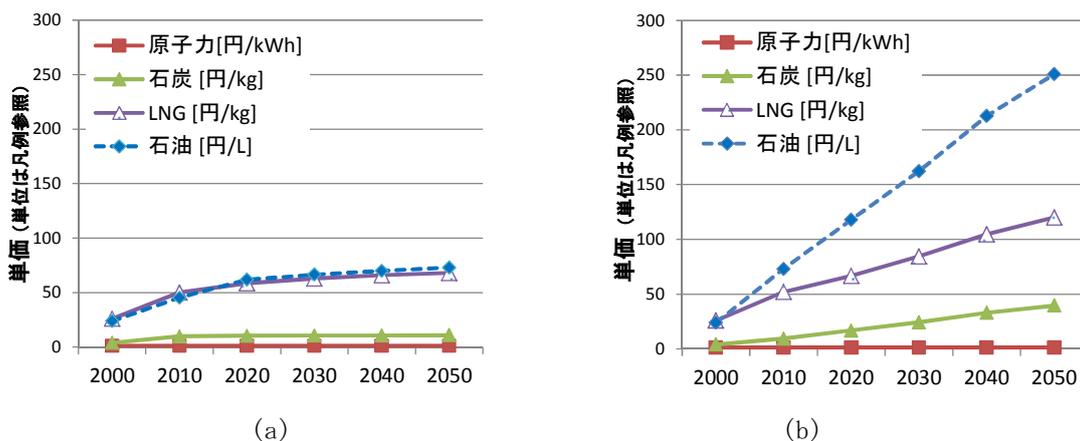
図(5)-2 一人あたりGDP変化と総実質GDPの変化

(a) 基本/積極進展ケース (一人あたり年1%成長)、(b) 低炭素化高度進展ケース (同0%成長)

表(5)-3 電源構成シナリオ

	原子力 発電	燃料価 格	太陽光発電 [GW]	PV稼働率 [%] *	風力 [GW]	風力稼働率 [%]	EV導入量 [GW]
電源①	再稼働 あり+ 40年運 転終了	新政策 シナリ オ	85	減少 (12.5⇒9.3)	32	21.6	50
電源②			150	減少 (12.5⇒9.3)	32	21.6	50
電源③			150	減少 (12.5⇒9.3)	64	34.9	50
電源④		現状外 挿	85	減少 (12.5⇒9.3)	32	21.6	50
電源⑤			150	減少 (12.5⇒9.3)	32	21.6	50
電源⑥			150	減少 (12.5⇒9.3)	64	34.9	50
電源⑦	再稼働 なし	新政策 シナリ オ	85	減少 (12.5⇒9.3)	32	21.6	50
電源⑧			150	減少 (12.5⇒9.3)	32	21.6	50
電源⑨			150	減少 (12.5⇒9.3)	64	34.9	50
電源⑩		現状外 挿	85	減少 (12.5⇒9.3)	32	21.6	50
電源⑪			150	減少 (12.5⇒9.3)	32	21.6	50
電源⑫			150	減少 (12.5⇒9.3)	64	34.9	50

*PV稼働率は普及に伴う好適地の減少を配慮し2010年の12.5%から2050年の9.3%に減少と仮定



図(5)-3 燃料価格変化のシナリオ (a) 新政策提案シナリオ、(b) 現状トレンド外挿シナリオ

電源構成の検討では表(5)-3に示す12ケースの電源構成シナリオについて検討を行った。燃料価格については内閣官房 国家戦略室 コスト等検証委員会の新政策シナリオを標準シナリオとし、現状変化を外挿したシナリオを第2シナリオとして検討した。図(5)-3にそれぞれの仮定した燃料価格の経年変化を示す。また、太陽光発電の稼働率は普及に伴う好適地の減少を配慮し2010年の12.5%から2050年の9.3%に減少するとした。風力は現状平均値から稼働率21.6%を基準とし、低炭素化高度進展ケースにおいては現在のトップランナー値である、34.9%を仮定した。

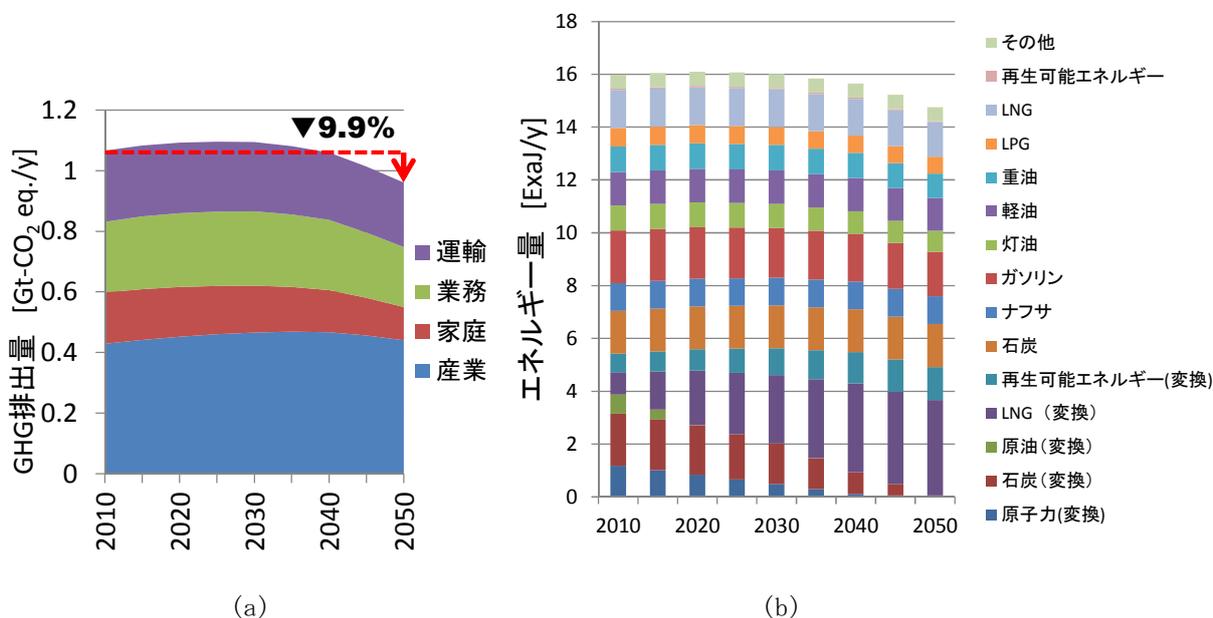
4.2 評価結果

基本ケース(電源①)についてエネルギー需要側評価および電源構成の最適化検討を行った。計算結果から得られた日本全体の年間GHG排出量[Gt-CO₂ eq./y]を図(5)-4(a)に示す。2010年～

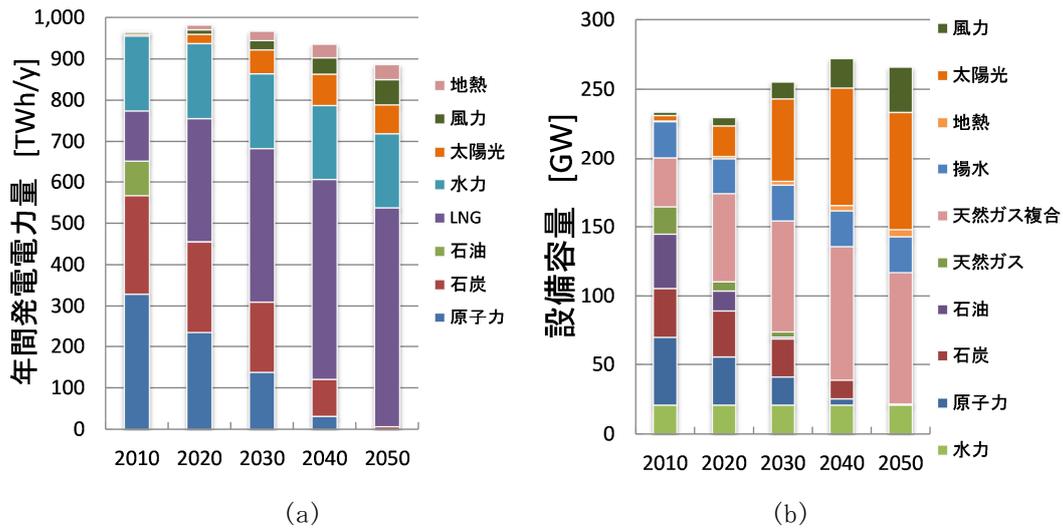
2050年までの「運輸」「業務」「家庭」「産業」ごとに積算した総計GHG削減量を示している。総計GHG排出量は2010年から2050年で9.9%減少すると算定された。図(5)-4(b)に一次エネルギー消費量内訳の経年変化を示す。転換は発電利用をあらわし、それら以外は他のセクターでの利用を示す。合わせて図(5)-5に最適化された電源構成の(a)年間発電電力量と(b)発電設備容量を示す。軽水炉の停止にともない、他技術での発電が必要になる。天然ガス複合発電(GCC)はGHG排出係数が小さく、石油・石炭発電から次第に移行することでGHG排出量削減に貢献している。しかし天然ガスGCCの導入量が多い方針をとり、発電所の建設を進めた後で天然ガスの価格が高騰した場合、エネルギー価格も高くなる。燃料価格が想定と異なる形で変動するリスクを考慮する必要がある。

この手法を用いて、積極進展ケース(電源①)についての同様の結果を図(5)-6、7に示す。積極進展ケースでは同46.8%のGHGが削減可能であった。図(5)-7より電源構成側への再生可能エネルギーの導入により、化石燃料使用量が減少しGHG削減量が向上することが明らかになった。

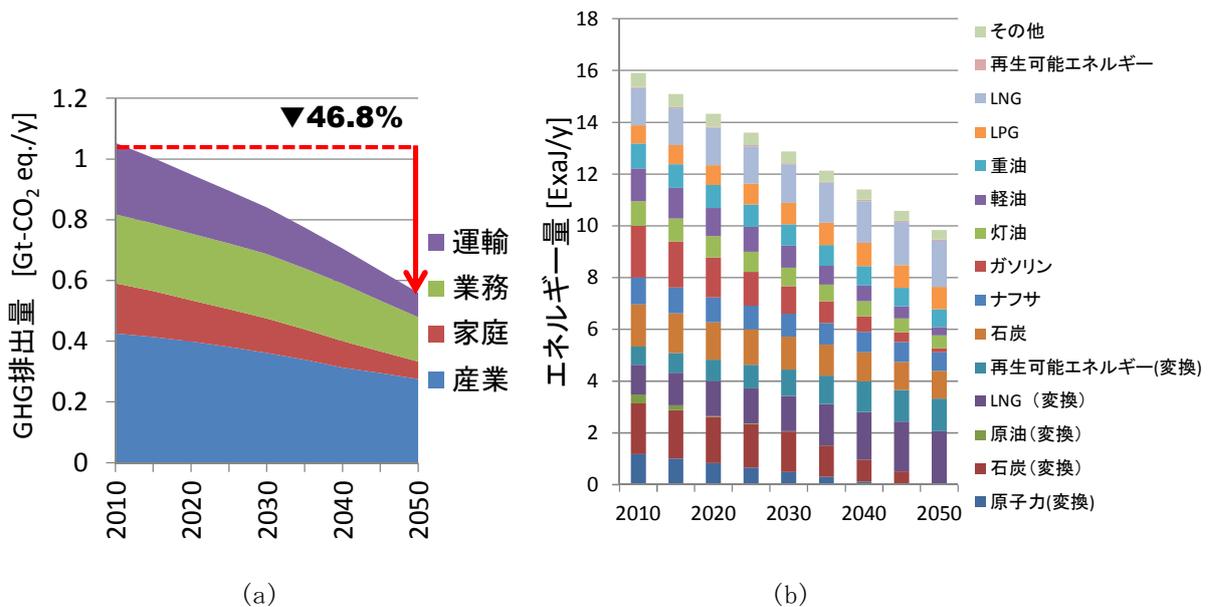
積極進展ケースにおける各電源構成シナリオ①~⑫について計算を行った。GHG排出削減量の結果を図(5)-8に示す。原発再稼働ケースでも40年での運転終了のため、2050年では原発が全て運転終了しており、原発再稼働無しのケースと傾向に差異は無い。再稼働あり、なしで共に再生可能エネルギーの導入によりGHG排出削減が向上することが示された。再生可能エネルギー導入の効果を評価するため、積極進展ケース+再生可能進展(電源③)(再生可能エネルギーを積極導入(太陽光 150 GW, 風力 64 GW))における計算結果を図(5)-9に日本全体の年間GHG排出量の経年変化として示す。再生可能エネルギー導入により、同52.7%削減が達成できると試算された。



図(5)-4 基本ケース(電源①)の日本全体の年間(a)GHG排出量、(b)一次エネルギー消費量の経年変化



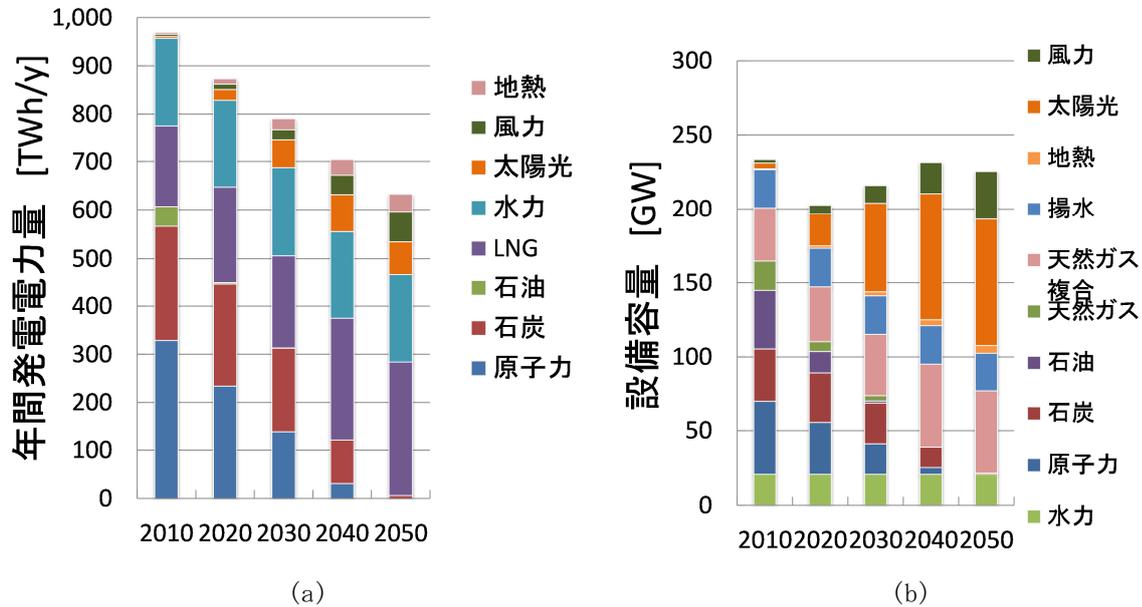
図(5)-5 基本ケース（電源①）の電源構成の(a)年間発電電力量と(b)発電設備容量



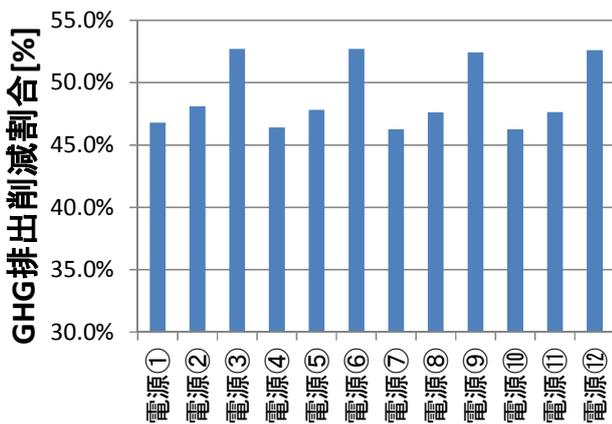
図(5)-6 積極進展ケース（電源①）の日本全体の年間(a)GHG排出量、(b)一次エネルギー消費量の経年変化

実装可能技術、再生可能エネルギーを高度に導入したケースとして低炭素化高度進展ケース（電源③）（積極進展ケース+再生可能エネルギー積極導入（PV 150 GW，風力 64 GW（稼働率34.9%））+GDP 伸び率0.0%/（人・年））における結果を図(5)-10～11に示す。を図(5)-10に示す通り、年間GHG排出量の同63.7%削減が達成できると試算された。図(5)-11(a)の電源構成側の年間発電電力量に占める再生可能エネルギーの割合がより増える。これを実現するため、図(5)-11(b)に示す通り再生可能エネルギーの設備容量が大きくなることが明らかになった。電源構成の最適化に

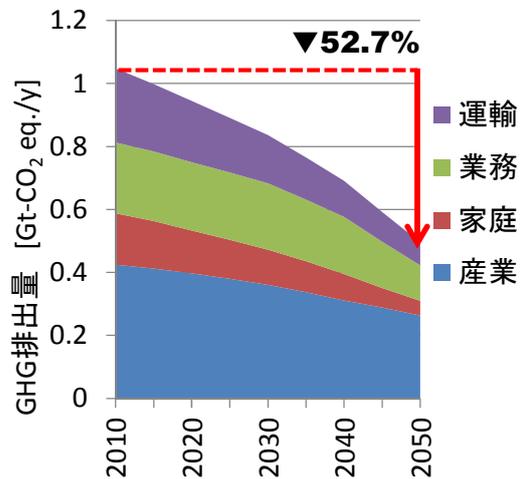
より低炭素化が可能であることが定量的に示された。以上より低炭素化実現に向けての技術導入効果を定量的に評価できる統合解析手法を確立した。



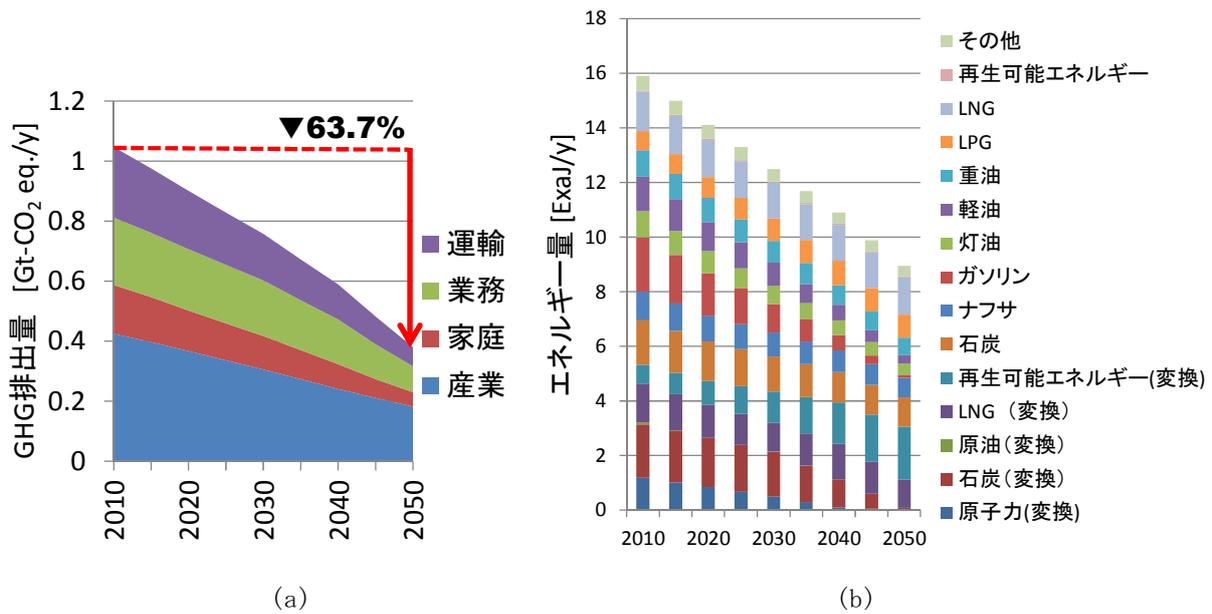
図(5)-7 積極進展ケース（電源①）の電源構成の(a)年間発電電力量と(b)発電設備容量



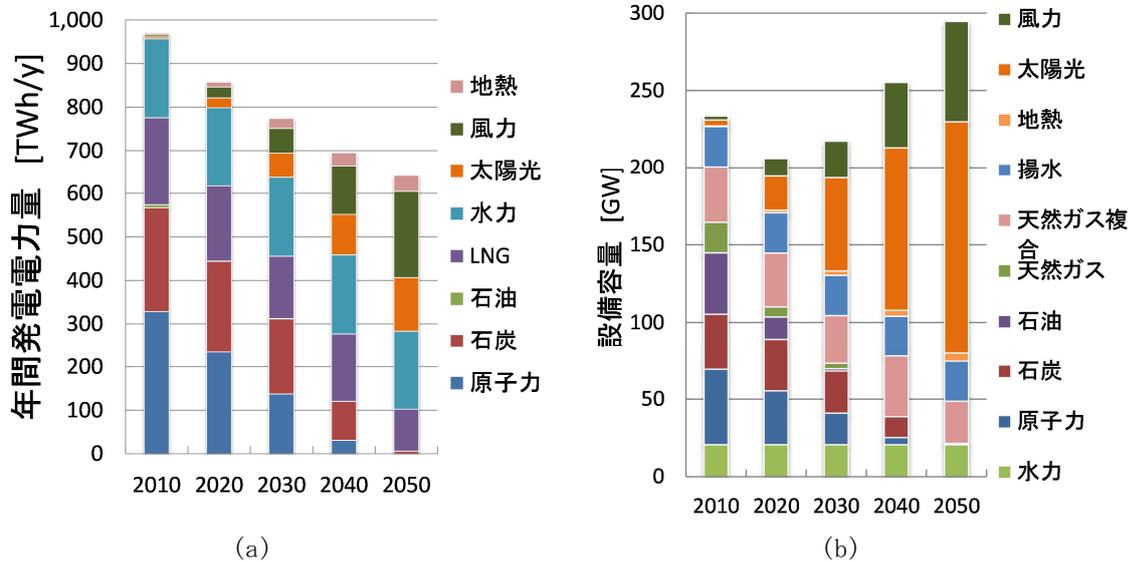
図(5)-8 積極進展ケースにおける各電源構成シナリオに対するGHG削減量効果



図(5)-9 積極進展ケース（電源③）（再生可能エネルギーを積極導入（太陽光 150 GW，風力 64 GW））における(a)日本全体の年間GHG排出量の経年変化



図(5)-10 低炭素化高度進展ケース（電源③）（積極進展ケース+再生可能エネルギー積極導入（PV 150 GW，風力 64 GW(稼働率34.9%))+GDP 伸び率0.0%/（人・年））における、日本全体の年間(a)GHG排出量、(b)一次エネルギー消費量の経年変化



図(5)-11 低炭素化高度進展ケース（電源③）の電源構成の(a)年間発電電力量と(b)発電設備容量経年変化

4.3 まとめ

本研究では実装可能なエネルギー技術の導入に基づく2050年までのエネルギー供給システム構成とエネルギー需要の推移、ならびにこれらを連成させた結果としてGHG排出削減効果を評価でき

るツールを開発し、エネルギー需要・供給・省エネ技術に係る様々なオプションを設定したシナリオ解析を実現した。サブテーマ（１）～（４）の検討ならびに以上の統合解析から政策提言として下記が導かれた。

未来エネルギーシステムの構築において導入が期待される技術として、表(5)-1(a)に示した実装可能なエネルギー需要側技術が候補であった。これらの技術が積極的に導入され、原発が再稼働ありでかつ40年で運転終了、GDPを一人当たり年率1%成長と仮定した場合、4割以上のGHG排出の低減が可能であった。さらに再生可能エネルギーを高度に導入した場合（太陽光（150 GW）、風力発電（32 GW））で5割以上の削減が可能であった。またGDPの一人当たり年率0%成長を仮定した場合、6割以上のGHG低減が可能であることが示された。以上から、実装可能なエネルギー技術の導入および電源構成の最適化により低炭素化が可能であることが定量的に示された。

火力発電については天然ガスのCO₂排出係数が小さいことから利用率の拡大が進むと考えられる。中でも、ガスタービン複合発電が高効率であり、今後既存のLNG火力発電設備の置換促進が重要である。天然ガス複合発電（GCC）はGHG排出係数が小さく、石油・石炭発電から次第に移行することでGHG排出量削減に貢献している。しかし燃料価格が想定と異なる形で変動するリスクを考慮する必要がある。

需要側では、産業分野においては燃料消費によるGHG排出を低減可能な省エネルギー技術や高度熱利用などが特に重要と考えられる。蒸留－膜ハイブリッドシステム、包括的な省エネルギープロセスシステムの導入、低温排熱利用ヒートポンプの導入によるGHG排出削減効果が大であった。業務、家庭部門では電気機器の効率向上、暖房の電化が有用である。エアコンのCOPおよび住宅の断熱性能の向上、照明器具の高効率化がGHG排出削減への寄与が大であった。運輸部門においては、燃費の向上および次世代自動車の導入の寄与が大であった。

再生可能エネルギー大規模導入時には、負荷変動が大きく既存の揚水発電容量(24 GW)では不足し新たな電力貯蔵技術が必須である。本研究では電気自動車の導入を想定したが、今後、これ以外の水電解水素やCO₂還元による燃料合成などの、ケミカルストレージなども有効と考えられる。併せて太陽光などは特に負荷変動が大きいゆえに電力会社のみでの需給調整は不可能である。この場合、最終供給責任を課す現行の垂直統合型の電力会社経営を想定した電事法の改正とともに再生可能エネルギーの固定価格買取制度の見直しも必須である。同時同量の達成のため、既存電力技術での調整力拡大に加え、クラスターでの需要・ストレージの能動制御に関する技術の進展が望まれる。

本研究では電源構成モデルにおいては簡単化のため、全てが電力網に接続しており、全体最適運用が可能であるとした。しかし東日本大震災では、東日本の50Hz圏内の30GW級の電源喪失によって電力が著しく不足に対し、西日本の60Hz圏内からの応援融通は周波数変換所がボトルネックとなった。このことから、耐災害面の観点から周波数変換所の整備が重要である。

本研究で検討したエネルギー利用技術において高温ガス炉は原子炉としての社会不安、潜熱蓄熱は低蓄熱密度の点で実用性に懸念があると判断されたが、これら以外は実用性があると評価され、技術的側面におけるリスクは小さいと考えられる。電気自動車、水力発電、燃料電池、農村地域のバイオマス利用、水素（燃料電池自動車）、潜熱蓄熱等は低炭素化に寄与が大きい技術であるがコストが依然高いと判断された。これらの普及には政策制度面での適正なバックアップが必要であり、経済面で導入がボトルネックとなる可能性が極めて高いといえた。

資源面のリスク検討より、出力密度の高い電動機、発電機を用いる技術には、Nd、Dyなどの希土類の資源制約に懸念があった。国家の元素戦略とともに、これらを使わない技術開発も必要である。また、蓄電池では、LiよりもCoに懸念があり、環境負荷とコストを考慮しながらリサイクルが必要であるといえた。

立地に関しては水力、原子力、水素ステーション、風力などは立地面の制約が大きいと評価された。農村地域においては、人口流出による林地資源管理機能の喪失がリスクである。リスク軽減のための対応が必要である。

耐災害面については太陽光や分散コジェネレーションシステムなどは耐災害面で適応性があり、災害時の自立機能の確保に有用であった。

環境影響面においては再生可能エネルギーのバッファとなりうる蓄電池を搭載した電気自動車は、現状では必ずしもCO₂の排出削減になり難いと評価された。

現在の全量の固定価格買取制度は電気だけを対象としている。発電用途以外のバイオマス、太陽熱や未利用熱の利用など、電力以外へ買取制度や補助金の範囲を拡充することは検討の価値がある。例えば、太陽熱温水器、薪ストーブを例に取れば、ガスや灯油の代替としての手当となる。そのためには、それらのライフサイクルでのCO₂排出削減効果の明確化に加え、太陽熱の温水量や薪の使用量などを集計するしくみと妥当な評価指標の整備が必要である。熱利用においては太陽熱やバイオマスなどの低エクセルギー源は温水、暖房などの低エクセルギー需要に直接利用することが効率的で有用である。また再生可能エネルギーの非定常電気出力の活用方法としてヒートポンプを用いた増熱、さらには化学物質に変換してエネルギー貯蔵が将来のエネルギー有効利用手法の候補となりえる。水素では高圧ガス保安法、太陽光では電力自由化を含む電気事業法の改正が必須となり、これらの制度設計と施行がボトルネックとなる可能性があると考えられる。

また、エネルギーシステムの精度の高い検討には設備の全国の蓄積量や広範な需要内訳データを公的な機関が整備することが望ましい。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

各サブテーマでは実装可能技術を用いた未来型のエネルギーシステムのシナリオ評価検討を行い、その実現課題を明らかにした。

サブテーマをもとに行った、統合評価より政策決定に資する、以下の成果を導いた。

エネルギー需要・供給・省エネ技術に係る様々なオプションを設定したシナリオ解析を実現した。実装可能なエネルギー技術が進展し積極的に導入されることで、4割以上のGHG排出の低減が可能。産業排熱回収、次世代自動車導入、灯油の電化などが有効。さらに太陽光、風力発電の導入で5割以上低減が可能。また、一方GDPが基本とした一人当たり年1%成長に対し同0%成長では6割以上の低減が評価できた。原発再稼働、40年で運転終了の場合、電源構成の最適化により低炭素化が可能であることが定量的に示された。

様々なシナリオ解析に基づく課題抽出・制度提言が可能になった。例えば、再生可能エネルギー大規模導入時には、負荷変動が大きく電力貯蔵技術が必須であることを明らかにした。併せて負荷変動が大きいゆえに垂直統合型の電力会社経営は困難であり、電事法・固定価格買取制度の見直しが必須であった。電力貯蔵技術としては蓄電池のみならず水素などのケミカルストレージ

が候補であった。

火力発電については高効率な発電装置への置換が重要。需要側には電気、熱利用技術が有効。家庭・業務部門ではエアコンなど電気機器の効率向上、暖房の電化、産業部門では低温排熱利用ヒートポンプ、蒸留-膜ハイブリッドシステム、包括的な省エネルギープロセスシステムの導入、運輸部門では、自動車の燃費向上・次世自動車の普及が有用であった。バイオマス、太陽熱や未利用熱など、電力以外への買取制度や補助金の範囲を拡充することは検討の価値がある。太陽熱やバイオマスなどの低エクセルギー源は温水、暖房などの低エクセルギー需要に直接利用することが効率的で有用である。また再生可能エネルギーの非定常電気出力の活用方法としてヒートポンプを用いた増熱、さらには化学物質に変換してエネルギー貯蔵が将来のエネルギー有効利用手法の候補となりえる。これらを明らかにした点に本研究の科学的意義があると判断する。

なお、将来のエネルギーシステム検討の上で、精度の高い検討には設備の全国の蓄積量や広範な需要内訳データを公的な機関が整備することが望ましい。

(2) 環境政策への貢献

本研究により得られた研究成果による環境政策への貢献は下記の3点である。

第一に、設備費や燃料費、負荷追従性等のデータをもとに将来の動向を推計し、電力網の発電コスト最小化の条件のもとでの電源構成を求める手法を開発し、そのツール化を行った。本ツールを用いることで、様々なシナリオのもとでのGHG排出削減効果を容易に推計可能となり、今後の削減達成目標の設定の際のエビデンスを提供することが可能となる。これにより少ないコストで再生可能エネルギー技術等の導入施策等の環境政策の実施前に、それが実現された場合の効果を推算することが可能となった。

第二に、分散電源の導入拡大により重要性がますます蓄電技術が、導入量の規模により変化し得ることを指摘した。(規模は小さいうちは~だがとの記載)具体的には、太陽光発電の導入量を150GWとしたケースでは、本研究が想定しているような電気自動車の二次電池の活用に加え、水電解水素やCO₂還元による燃料合成などの、ケミカルストレージの活用を考慮する必要がある。このことは環境政策としての二酸化炭素排出削減施策の実施において、その目標値の設定次第で、研究開発や導入を支援すべき技術が変化することを意味する。

そして第三に、解析結果をもとに、環境政策、特に二酸化炭素排出抑制政策における熱技術の重要性を指摘した。エアコンなど電気機器の効率向上や屋の断熱性能の向上など熱需要抑制技術の進展に加え、低温排熱利用などの熱利用技術による二酸化炭素排出削減ポテンシャルは大きく、継続的な研究開発や導入促進策が必要であることを定量的に示すことが出来た。このことは、熱利用技術に関する研究開発などを通じた、今後の実効性のある環境政策立案時にエビデンスとして活用することが可能である。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない

7. 研究成果の発表状況 ※【別添】H23研究等報告書作成要領 参照

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

特に記載すべき事項はない

<その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 加藤之貴: 化学工学会 札幌大会 2011, 同シンポジウム, E213 (2011)
「原発の事故の内容、収束に向けての技術的 内容、新型原子炉の研究開発況」
- 2) Yuktaka Kato, A. L. Dipu, M. Ujisawa: Proc. of 1st International Conference on Energy Efficiency and CO₂ Reduction in the Steel Industry (EECRsteel 2011), Düsseldorf, Germany, (2011)
“Feasibility Study on Carbon Recycling Iron-Making System“
- 3) 加藤 之貴: 化学工学会 第77年会, シンポジウム –化学産業技術フォーラム セッション 3「実装可能技術で築くエネルギーシステム」, 東京, XB213(2012),
「未来エネルギーシステムの構築に向けて」

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない

(4) シンポジウム、セミナーの開催(主催のもの)

- 1) 特別講演会: 電力システムにおける需給構造の変革(2011年11月8日、九州大学伊都キャンパス 稲盛財団記念館 稲盛ホール、28名)
- 2) 未来エネルギーシステムに関する対話シンポジウム(2011年12月10日、東京工業大学 大岡山キャンパス くらまえホール、98名) (第1回「国民との科学・技術対話」)
- 3) 第2回未来エネルギーシステムに関する対話シンポジウム(2012年1月13日、東北大学片平さくらホール、45名) (第2回「国民との科学・技術対話」)

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない

(6) その他

特に記載すべき事項はない

8. 引用文献

- 1) 加藤之貴、安永裕幸、柏木孝夫監修: “実装可能なエネルギー技術で築く未来一骨太のエネルギーロードマップ 2”、化学工業社、(2010)

Study on Future Energy Systems Designed by Feasible Energy Technologies for Japan

Principal Investigator: Yukitaka KATO

Institution: Tokyo Institute of Technology (Tokyo Tech)
2-12-1-N1-22, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550, Japan
Tel/Fax: +81-3-5734-2967
E-mail: yukitaka@nr.titech.ac.jp

Cooperated by: Waseda University, University of Tokyo, Kyushu University, Nagoya University

[Abstract]

Key Words: Carbon dioxide, Low carbon, Energy system, Feasible energy technology, GHG

An evaluation tool was developed to quantitatively discuss the future scenarios of energy system in Japan. Feasibilities of energy technologies for future energy system was first evaluated from the stand points of technological risks such as performance efficiency against competing technologies, acceptability of consumers, safety during operation, security of fuel and raw-material supplies. Energy demand side model was developed to evaluate the impact of introducing the evaluated feasible technologies. Power generation dispatch model developed in the preceding study was used updating the dataset for each technology option. The contributions of the feasible energy technologies to the reduction of GHG emissions during 2010 - 2050 were evaluated assuming a set of scenarios regarding the technology options and social changes.

We have set a many set of scenario options such as: Nuclear power plants operations are either a) re-started and decommissioned after 40 years or decommissioned after year 2012; annual GDP growth rate if 1% or 0% per capita. It was evaluated that emission reduction of over 40% of GHG was possible by positive introduction of selected feasible energy technologies. It was found that technology options such as recovery of low-quality waste heats in industry, energy shift from heating oil to electricity for heating in residential sector, introductions of next-generation vehicles in transportation sector can largely contribute to the reduction of GHG emission. It was possible that introduction of renewable energies of solar power of 150 GW and wind power of 64 GW reduced GHG emission over 50%. When annual GDP growth rate of 0% per capita is assumed, over 60 % reduction of GHG emission was possible in Japan. It was concluded that by appropriately selecting feasible energy technologies for introduction, we can design the future energy system with low-carbon emission even nuclear power plants were shut down

in future. However, it is noted that increase of electricity cost due to the escalation of fuel prices should be countered in future. The developed tool can be used to evaluate the future scenarios setting a variety of social and technology options.

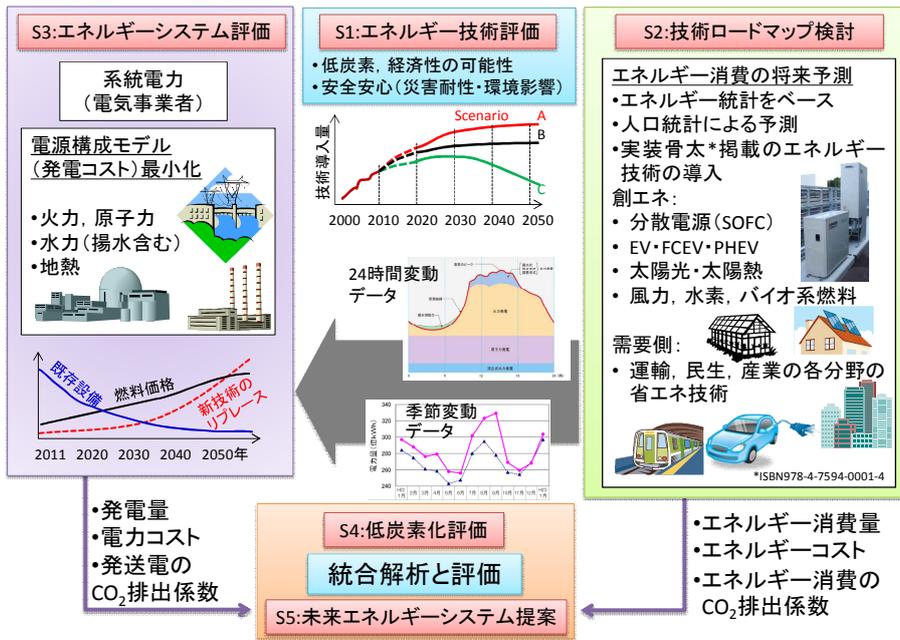


図-1 エネルギーシステム評価の流れ

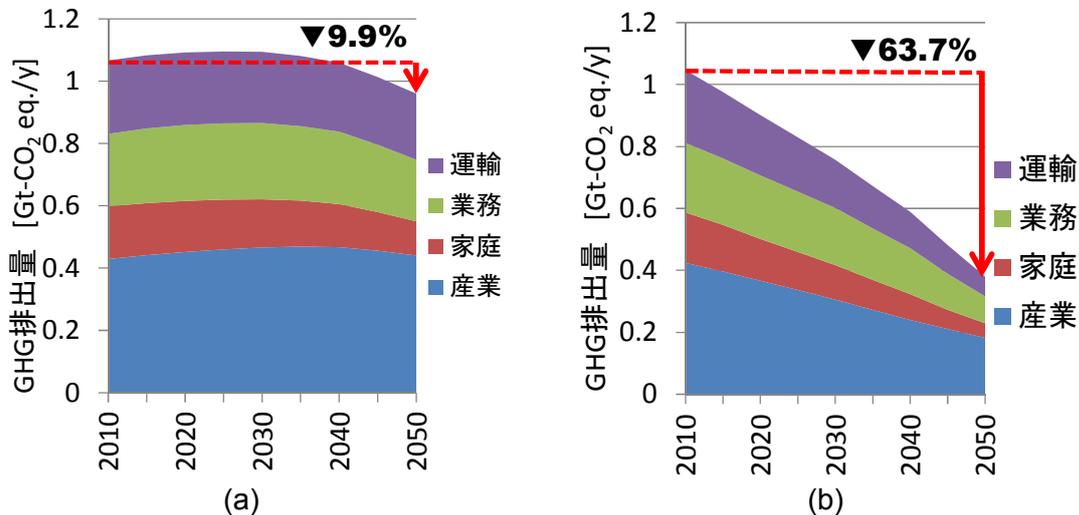


図-2 基本ケースの日本全体の年間 GHG 排出量の比較(a)基本ケース、(b)低炭素高度進展ケース

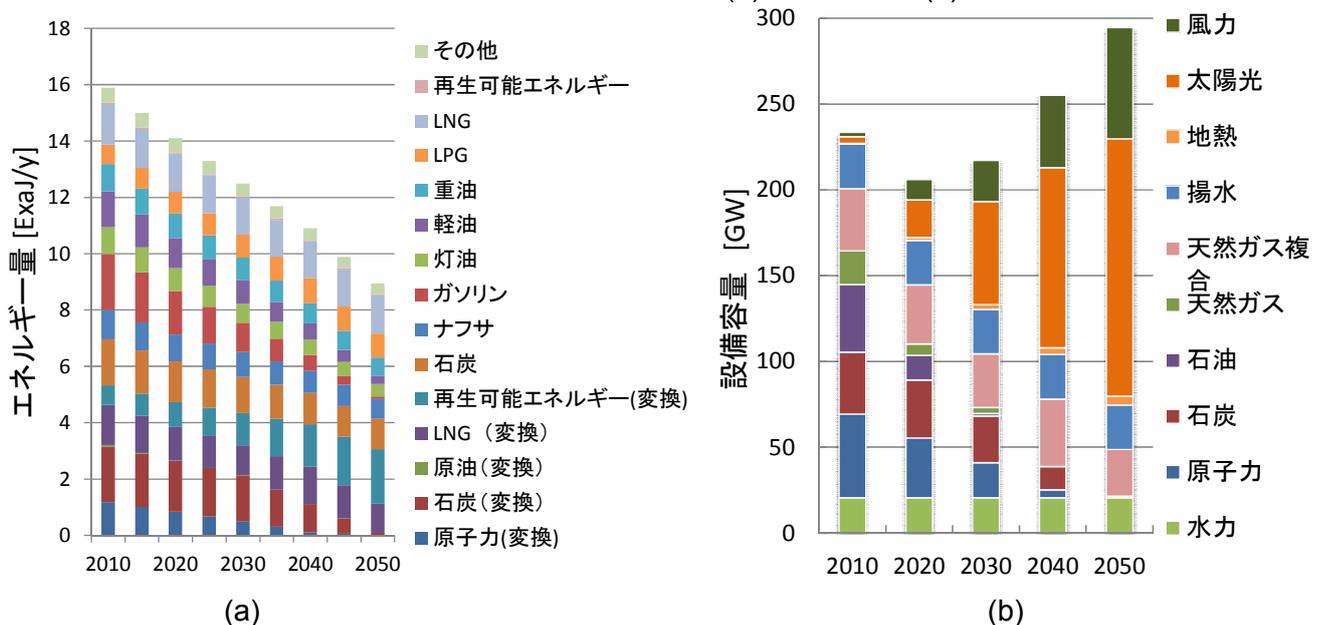


図-3 低炭素化高度進展ケースにおける各経年変化(a)一次エネルギー消費量、(b)電源設備容量