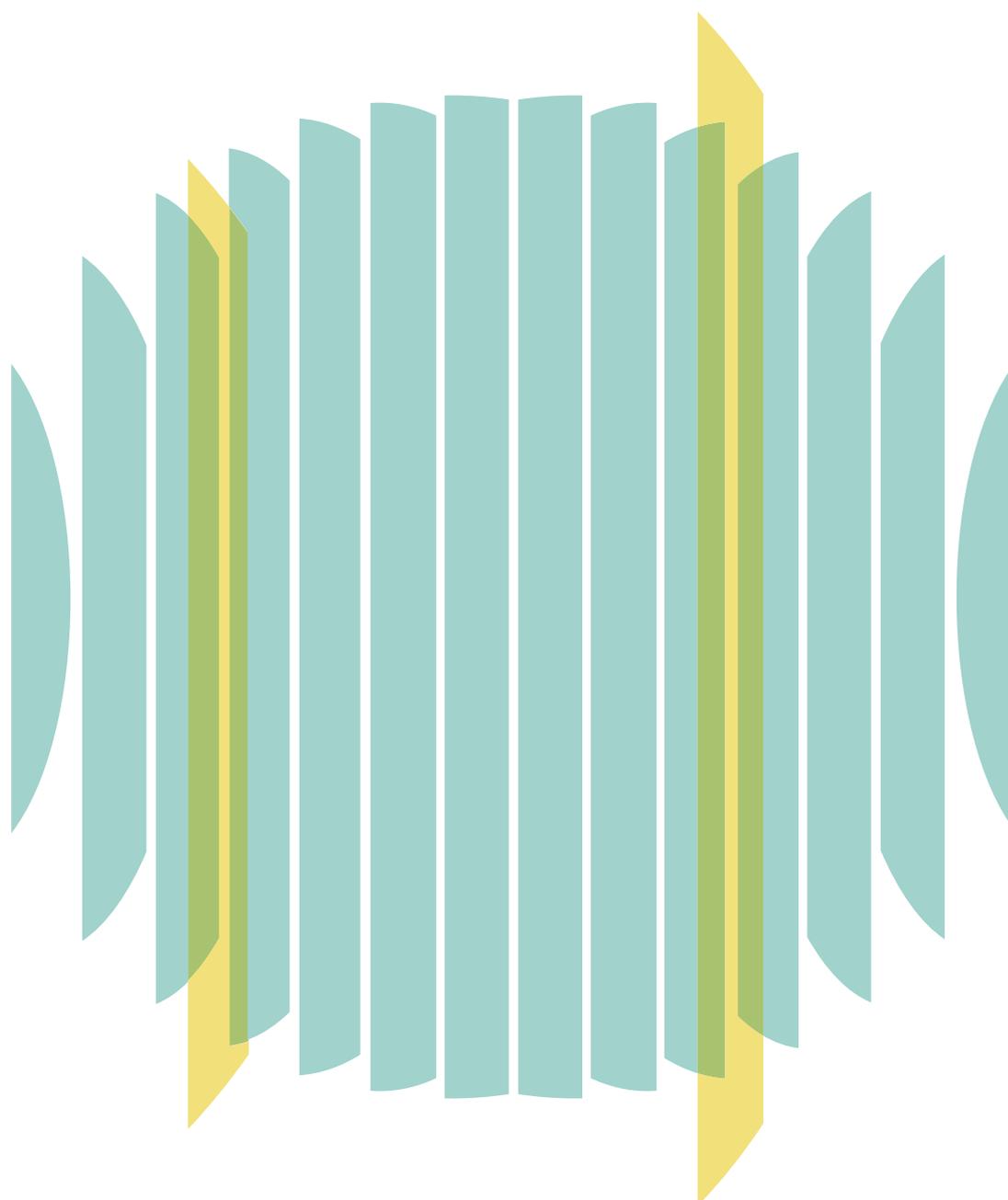


季報 エネルギー総合工学

Vol. 42 No. 4 2020. 1



一般財団法人 エネルギー総合工学研究所
THE INSTITUTE OF APPLIED ENERGY

目 次

【調査研究報告】

エネルギー分野の革新的技術研究開発とアメリカの ARPA-E

(一財) エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 部長 副主席研究員 黒沢 厚志 …………… 1

【調査研究報告】

大気中 CO₂ を除去するネガティブエミッション技術の動向
～パリ協定の長期目標達成のために～

プロジェクト試験研究部 副部長 加藤 悦史 …………… 6

【調査研究報告】

低炭素社会に向けた
水素エネルギー導入の意義とわが国の普及政策

プロジェクト試験研究部 特任参事 坂田 興 …………… 12

【調査研究報告】

外部電源供給可能な燃料電池自動車
が
山間地マイクログリッド運用に及ぼす効果

プロジェクト試験研究部 主任研究員 水野 有智 …………… 23

【研究所のうごき】 …………… 32

【編集後記】 …………… 34

エネルギー分野の革新的技術研究開発と アメリカの ARPA-E

黒沢 厚志 (プロジェクト試験研究部
部長 副主席研究員)



1. はじめに

気候変動枠組条約パリ協定では、今世紀後半に人為的な排出と吸収を世界全体でバランスすることが求められており、すべての温室効果ガス排出の合計でネット・ゼロ・エミッションを目指している。その達成には、エネルギー分野のイノベーションが必須であり、革新的技術研究開発のニーズは大きい。

以下では、アメリカで進められているエネルギー分野の革新技術研究開発をとりあげ、その概要を示すこととする。

2. ARPA-E の概要

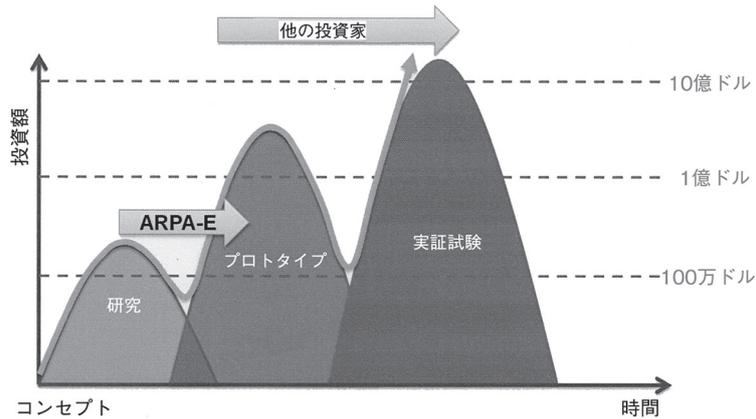
エネルギー高等研究計画局 (ARPA-E : Advanced Research Projects Agency Energy) は、技術優位性に関する危機感を指摘した 2007 年の 米国アカデミー報告書『強まる嵐を超えて』(Rising Above the Gathering Storm)⁽¹⁾を受け、エネルギーの製造・貯蔵・使用に関する施策によって、エネルギーと経済の安全保障を向上させる目的で、2007 年の「米国競争力強化法」(America Competes Act)によってエネルギー省 (DOE) 内に設立された。ARPA-E は、インターネットの原型や GPS を開発した国防高等研究計画局 (DARPA : Defense Advanced Research Project Agency) の成功例にならい、エネルギー分野でのイノベーションにより、ハイリスクだがハイインパクトな (影響力の大きな) 成果を上げることが意図している⁽²⁾。

公募形式は、対象分野を定めない OPEN 型で、包括公募、領域指定型公募、および中小企業向け (SBIR/STTR : The Small Business Innovative Research, Small Business Technology Transfer) 公募の 3 種類である。

技術目標が補助金公募 (FOA : Funding Opportunity Announcement) で公開され、提案者は示された目標達成に向けた提案を行う。プロジェクトは 2009 年から開始され、多様なエネルギー分野が対象となっている。なお、ARPA-E の予算は、設立以降、年約 3 億ドルで推移していたが、2018 - 2019 年度では 3 億 5,000 万ドル程度に増加している。トランプ大統領が議会で招かれて政治課題を説明する「年頭教書」で廃止を唱えているにもかかわらず、議会予算折衝段階で復活しているのが興味深い。

技術分野の共通目標である「プログラム」のもとに「プロジェクト」が展開される。プロジェクト選定においては革新性が重視され、多様性を確保するためアプローチの異なるプロジェクトが選ばれる。審査は、予備審査と本審査の 2 段階選抜となっている。前者の評価基準は、提案技術の最先端技術に及ぼすインパクト、科学的・技術的利点であり、ユニークさ、革新性等も評価対象となる。後者の基準は、予備審査項目に加え、プロジェクトチームの質、経験、能力、マネジメント計画の健全性も考慮される。プロジェクト期間は原則 3 年程度である。

技術開発段階でいうと、図 1 で示すように、いわゆる「死の谷」段階にあるステージの技術を中心に支援され、研究段階とプロトタイプ段階の技術群が中心となる。



(出所：ARPA-E ウェブサイトの図を編集部で和訳)

図1 ARPA-E が対象とする研究開発段階

3. ARPA-E のプログラム

プログラムは、便宜上、①電力関連、②省エネ・省資源関連、③運輸関連の3つに分類されている。基盤技術の中には電池のように電力と運輸の両方にまたがるものもある。

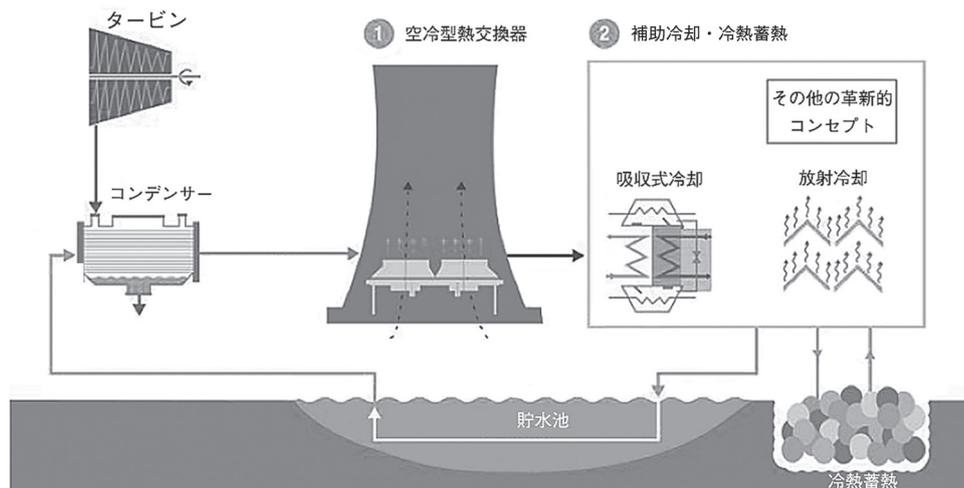
ARPA-E のウェブサイトを見ると、個別プロジェクトの状態が、終了、実施中、キャン

セルの状態に分類されている。表1に示すように、ARPA-E 開始から既に10年以上が経過し、終了したプログラムもある。また、途中でキャンセルされたプロジェクトも多い。

省エネ・省資源関連では、エネルギーに限らず、金属資源、水などの資源の節約もテーマとなっているのが興味深い。例えば、発電所冷却システム開発のARID (Advanced

表1 ARPA-E が対象とする研究開発段階

分類	終了したプロジェクト	継続中のプロジェクト
電力関係	IMPACCT：先進的なCO ₂ 回収技術のための革新材料およびプロセス GRIDS：ランピング・間欠送電が可能なグリッド規模の電力貯蔵 HEATS：先進的熱貯蔵技術（太陽熱および核熱、太陽熱利用合成燃料製造、自動車排熱） GENI：グリーン電力の送電網統合 Solar ADEPT：ソーラー発電の変換効率向上 FOCUS：フルスペクトル太陽エネ変換（熱&電気） REBELS：中温型燃料電池（一部継続中）	CHARGES：電力系統用の電力貯蔵性能試験 ALPHA：プラズマ加熱（磁気慣性核融合） GENSETS：分散コージェネ MOSAIC：集光型太陽電池（マイクロアレー） NODES：分散エネシステム最適化 GRID DATA：電力系統運用ソフト開発 IONICS：固体電解質（電池などへの応用を意図） INTEGRATE：天然ガス利用高効率分散電源 MEITNER：低コスト小型原子力発電 GO COMPETITION：電力系統に関するソフトウェアコンペ BREAKERS：直流遮断機 DAYS：長期間充放電型電力貯蔵 ATLANTIS：洋上風力
省エネ・省資源関連	ADEPT：電力変換の高効率化 BEET-IT：革新的空調機器を用いた建物のエネルギー効率向上（一部継続中） REACT：重要技術に使用するレアアース代替物質 METALS：電気/熱化学を活用した先進的軽量金属製造（一部継続中） SWITCHES：高効率システム制御用ワイドバンドギャップかつ低価格の電子デバイス（一部継続中）	DELTA：局所冷暖房システム ARID：発電所冷却システム（水節約型） MONITOR：メタン検知 ROOTS：植物地下部への炭素固定 SHIELD：高効率窓（単板） CIRCUITS：パワエレ半導体 ENLIGHTENED：光ICTデバイス PNDIODE：窒化ガリウムデバイス SENSOR：省エネ建築物用センサー HITEMMP：高温高圧の熱交換器用材料 DIFFERENTIATE：人工知能（機械学習）を利用した設計効率化
運輸関連	BEEST：蓄電池 Electrofuels：電気燃料（光合成によらないバイオ燃料合成） PETRO：遺伝子操作植物による石油代替燃料 AMPED：電池の先進的制御・保護 MOVE：天然ガス自動車用のガス貯蔵 TRANSNET：交通制御（ユーザー信号発信、高効率エンジン等）	RANGE：電気自動車用の高耐久性・低コスト次世代蓄電池 REMOTE：メタノトロフ細菌を利用した低排出の輸送用液体燃料製造 TERRA：バイオ燃料（情報技術や遺伝子技術などを利用） REFUEL：再エネ利用液体燃料 NEXTCAR：次世代自律運転 MARINER：大型藻類エネルギー



(出所：ARPA-E ウェブサイトの図を編集部で和訳)

図2 ARPA-E ARID プログラムにおける技術開発概要

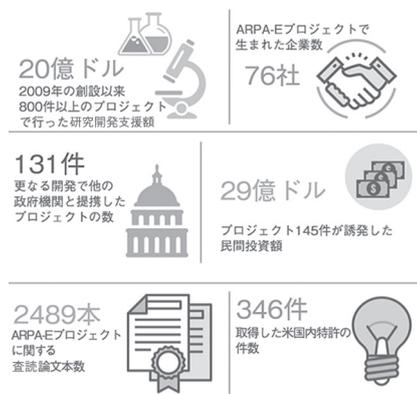
Research In Dry cooling) プログラムでは、図2に示すように、水節約型システム、乾式システムを含む14のプロジェクトを展開し、開発を進めている。

その方式別内訳は、空冷型熱交換器、吸収式冷却、放射冷却および冷熱蓄熱、排ガス中水蒸気回収および冷熱蓄熱、空冷復水器と冷熱蓄熱の組み合わせとなっている。通常、これらのシステムを組み合わせた場合、従来型システムと比較して設備が大型になり発電効率も低下するが、技術開発によって低コストで節水型のシステムを実現するとしている。

対象分野を定めないOPEN型プログラムには、OPEN2009(終了)に加え、OPEN2012、OPEN2015、OPEN2018の4つがある。加えて、特定の領域に属さないプログラムとして「エネルギーシステムの革新的コンセプト」(IDEAS: Innovative Development in Energy-Related Applied Science)がある。

4. ARPA-E の成果

DARPAは軍が成果を買い上げてくれるが、ARPA-Eでは市場化までをTech to Market チームが支援している。成功基準として(スタートアップとして買い上げ、起業などを含む)新規民間投資、別の政府系プロジェクト



(出所：ARPA-E ウェブサイトの図を編集部で和訳)

図3 ARPA-E の成果 (2019年3月時点)

への移行等をあげている。全体として見ると、図3に整理したように、20億ドルの投資で29億ドルの民間投資誘発効果をあげている。

また、過去の成功事例をARPA-Eとしてまとめた数編のレポートが公開されている⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。バイオ燃料を対象としたTERRAプログラムにおけるクレムゾン大学等のチームの例では、ロボット、センシング、コンピュータビジョン、機械学習、ゲノム決定を含む評価法を採用し、図4に示すような高温多湿環境および多様な土壌に適応可能なモロコシ品種が開発されている。

組織評価は米国アカデミー報告書“An Assessment of ARPA-E”⁽⁶⁾にあり、イノベーションを生み出す組織としての特徴などの点



図4 バイオ燃料向け高収量植物

では、概ね好意的である。同報告書では、うまくいかなかった事例の教訓蓄積、成果を見極める長期の視点を指摘している。

5. イノベーションサミットとピッチセッション

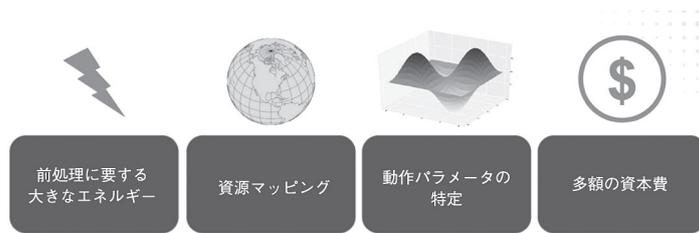
ARPA-E の広報活動を兼ね、「イノベーションサミット」と呼ばれる年1回のイベントが開催されている⁽⁶⁾。2019年のサミットはコロラド州デンバー郊外で7月8日～7月10日に開催され、2,000名以上が参加した。サミットは、政府、産業界、学界の著名人が登壇する「プレナリセッション」、技術、制度、ARPA-E スタッフのピッチ(ショートプレゼンテーショ

ン)をテーマにして構成する「パラレルセッション」、および ARPA-E のプロジェクト成果を中心とした「展示会」の3つで構成される。

展示会には、アメリカの公的研究機関に加え、企業、大学も多く出展している。2019年サミットでは、約280のブースが展開されたようである。展示会は、プロジェクト実施者に接触し詳細情報を収集できる場、開発成果の展開機会(企業、公的機関等)を提供するマッチメイキングの場となっている。

プレナリセッションでは、多数の講演があったが、ここでは、シーメンス USA 社のハンプトン最高経営責任者(CEO)の講演“Taking our Moonshot: Partnerships for a new era of clean, reliable power”を紹介する。シーメンス社の機器はアメリカの3分の1の電力を供給、オートメーションやデジタル化の活動を行う他、2050年を見据えて、分散エネルギー、E-モビリティ、サイバーセキュリティなどの課題に取り組み、世界的にクリーンで信頼できる電力供給を目指すとした。また、全米工学アカデミーによる過去にインパクトを与えた技術評価で最高点を得たのは、コンピュータ等ではなく、電力網であった。人口高齢化、都市化、デジタル化、グローバル化、気候変動がメガトレンドであり、電力供給が鍵となると述べた。コンピュータもメインフレームからクラウドへの分散型に移行するなかで、1977年に発電タービンのリモートモニタリングを開始した。現在は多様な機器がネットワークで接続され、サイバーセキュリティの重要性が増している。産業革命以降、人類は大量のエネルギー利用を進めてきた。新しい知見を使えば、太陽光、風力などの大量利用は可能であると総括した。

ピッチセッションでは、ARPA-E 関係者によるショートプレゼンテーションが展開され、現在実施中、公募中、または公募計画中のプログラムの概要を紹介するセッションである。2019年サミットでは、CCS 火力柔軟運用、CO₂ 利用(鉱物化)、木材 CO₂ 吸収と製品利



(出所：ARPA-E ウェブサイトの図を編集部で和訳)

図5 CO₂利用（鉱物化）における課題の例

用、培養肉、電動飛行機、電力系統リスク評価、自律運転、アナログコンピュータ、大型藻類、バイオエネルギー CCS (BECCS)、海底金属資源、プラスチック、低コスト原子力、小型核融合、産業電化、次世代空調などの話題が紹介された。

例えば、CO₂利用における鉱物化においては、図5に示したように、CO₂を鉱物化する時の反応エネルギーの点では有利ではあるが、前処理のエネルギー投入が大きいこと、資源マッピングが不十分であること、資本費削減が必要であることを課題として指摘している。

(7) ARPA-E イノベーションサミット ウェブサイト
<https://www.arpae-summit.com/>

6. おわりに

先端エネルギー技術研究を推進する ARPA-E 設立から約 10 年が経過した。研究開発リスクを意識しつつ、多様なアプローチにチャレンジし、ハイリスクだがハイインパクトを与えるアプローチを指向して研究開発が継続されている。市場化への支援も行い、社会実装を目指す方向性も見えてきたので、今後も ARPA-E の動向に注目したい。

参考文献

- (1) Rising Above the Gathering Storm : Energizing and Employing America for a Brighter Economic Future, National Academy Press (2007)
- (2) ARPA-E ウェブサイト <https://arpa-e.energy.gov/>
- (3) ARPA-E: The First Seven Years – A Sampling of project Outcomes (2016)
- (4) ARPA-E Impacts: A Sampling of project Outcomes, Volume II (2017)
- (5) ARPA-E Impacts: A Sampling of project Outcomes, Volume III (2018)
- (6) An Assessment of ARPA-E, National Academies (2017)

[調査研究報告]

大気中 CO₂ を除去するネガティブエミッション技術 の動向～パリ協定の長期目標達成のために～

加藤 悦史 (プロジェクト試験研究部
副部長)



1. はじめに

(1) パリ協定とネットゼロ排出目標

温暖化対策の国際ルール「パリ協定」は、2015年に開かれた国連気候変動枠組条約 (UNFCCC) 第21回締結国会議 (COP21) で採択され、その後の各国の速やかな批准により2016年11月に発効がなされた。この協定の目的は、産業化前からの地球の平均気温上昇が2℃を十分下回るとともに、1.5℃に抑える努力を追求すること (第2条1項) などによって、気候変動の脅威への世界的な対応を強化することである。

この長期的な気温に関する目標に向けて、今世紀後半に温室効果ガス (GHG) の人為的な発生源による排出量と吸収源による除去量との均衡を達成するために、できる限り早期に世界の GHG の排出量がピークに達し、その後は GHG 排出量の迅速な削減に取り組むことを「緩和」の長期目標としている (第4条1項)。

この「緩和」の長期目標は、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 『第5次報告書』 (2014年公表) の科学的知見、つまり、気温上昇を21世紀にわたって2℃未満に維持できる確率が66%以上の排出シナリオと整合的なものとなっている。さらに、IPCC 『1.5℃特別報告書』 (2018年公表) では、1.5℃および2℃の気温上昇が起きた場合の影響とリスクの違いを評価し、1.5℃に抑えるための排出経路の種類も分析している。この『1.5℃特別報告書』の政治的な位置づけは各国の状況によって異なるが、「国連気候行動サミット」 (2019年9

月) では、65カ国とカリフォルニアなど自治体レベルの主要な経済圏が、2050年までに二酸化炭素 (CO₂) 排出量を正味 (ネット) ゼロにすることを宣言した。

2. 排出目標達成に必要なネガティブエミッション技術

前述のように、政治的な長期目標として GHG あるいは CO₂ 排出量をネット・ゼロにすることが潮流となりつつある。その達成には、当然ながらエネルギーシステム全体の大きな転換が必要となる。従来から検討されてきた低炭素化に向けたエネルギーシステムへの転換では、発電部門での再生可能エネルギー・化石燃料と炭素回収貯留 (CCS) 技術・原子力の利用拡大、需要部門での電化促進と省エネルギー、産業部門での生産プロセスの変更など、部門ごとの個別対策の検討が主であった。

しかし、ネット・ゼロ排出の達成には、場合によっては、年間の CO₂ 排出量が正味で負 (ネット・ネガティブ) となることが求められる。つまり、従来の方策の検討に加え、エネルギーシステム全体で統合した低排出エネルギーキャリアやエネルギー貯蔵の利用、さらには排出削減が非常に難しい部門 (炭素を材料とする素材生産部門、運輸部門のうち長距離輸送・船舶・航空、農業部門など) からのどうしても避けられない排出を相殺するために、大気中から CO₂ を取り除く技術、いわゆる「ネガティブエミッション技術」 (Negative Emissions Technologies) の利用も必要となる。

3. ネガティブエミッション技術

(1) ネガティブエミッション技術の必要性

「ネガティブエミッション技術」は、「二酸化炭素除去技術」(Carbon Dioxide Removal Technologies)、「炭素除去技術」(Carbon Removal Technologies) などと呼ばれることもあるが、本稿では「ネガティブエミッション技術」という用語を用いることとする。

前述のように、今世紀後半あるいは2050年でのネット・ゼロ排出を達成するには、エネルギーシステム全体での大幅な転換に加え、排出削減が難しい部門からの排出を打ち消すため、また、より野心的な温度上昇抑制目標に対応するために、大気中からCO₂を取り除く必要がある⁽¹⁾⁽²⁾。

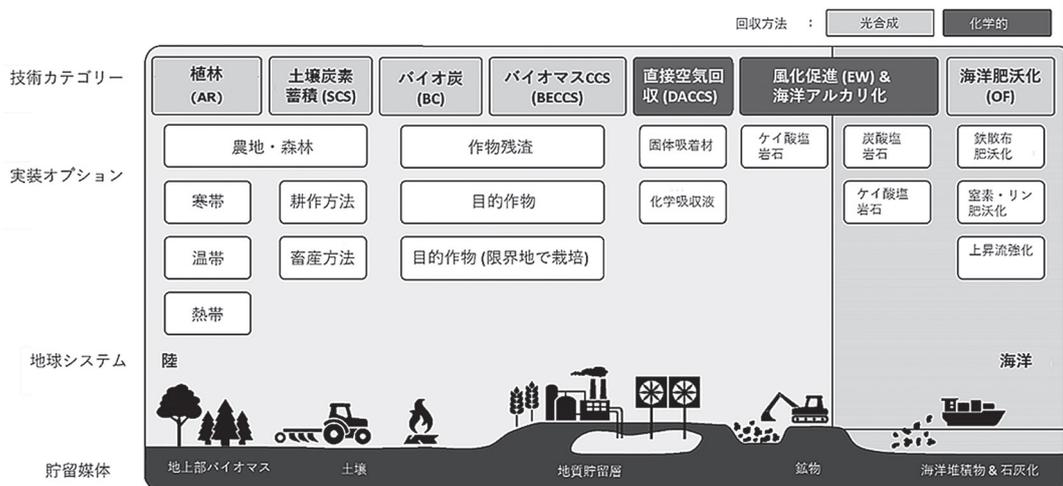
『IPCC第5次報告書』⁽³⁾では、2℃目標に対応するシナリオが統合評価モデルで分析しており、大規模植林、バイオマスエネルギーとCCS技術を複合したバイオエネルギーCCS(BECCS)による2つのネガティブエミッション技術が考慮されていた。しかし、そこでは、「大規模なネガティブエミッション技術は確立されたものではなく、その実現可能性について今後のさらなる検討が必要」とう位置づけられていた。

『IPCC1.5℃特別評価報告書』⁽⁴⁾に示された

1.5℃目標に対応する代表的な4つの排出経路では、ネガティブエミッション技術の必要量は、社会イノベーション(社会問題に対する革新的な解決法)の度合いによって異なるとしている。緩和・適応の観点から、中位的な社会経済シナリオでは、大規模植林とBECCSにより21世紀末に約16 GtCO₂/年、気温上昇のオーバーシュート(一時的に目標温度を超えること)を許容するが21世紀末には1.5℃目標に抑えるシナリオでは、BECCSの大規模利用により約24 GtCO₂/年、社会イノベーションによりエネルギー需要を極端に抑えるシナリオではBECCSを利用しないものの、大規模植林により約5 GtCO₂/年といった規模の大気中CO₂除去量が必要となっている。

(2) ネガティブエミッション技術とは

これまで検討されているネガティブエミッション技術としては、図1に示すように、陸域生態系を活用する「大規模植林: AR」および「農地土壌への炭素蓄積増加: SCS」、陸域生態系と工業的技術の複合による「バイオエネルギーCCS: BECCS」や「バイオ炭: BC」、工業的技術による「直接空気回収(DAC)によるCCS: DACCS」、鉱物を利用した「風化促進: EW」および「CO₂鉱物化」、海洋生態系を利用した「海洋肥沃化: OF」、海洋によ



(出所: 参考文献(5)を筆者が和訳)

図1 ネガティブエミッション技術の分類

る化学反応を利用した「海洋アルカリ化」やその他に沿岸生態系の回復を利用した「ブルーカーボン」などが挙げられる。

これらの技術はその炭素隔離時間の違いによって、生態系に10年単位から100年単位で一時的に大気中のCO₂を移動させるものと、地質・鉱物的により長い時間的尺度で炭素を隔離するものに分類することができる。前者には、大規模植林、土壌炭素蓄積、海洋肥沃化、ブルーカーボンがあり、後者には、BECCS、DAC、風化促進、海洋アルカリ化、そして中間的なものとしてバイオ炭がある。

各技術は、直接的あるいは間接的にエネルギーシステムに関わるもので、エネルギーシステムへの統合の検討も重要となる。例えば、BECCSは、バイオマスを発電に利用するとともに排気ガス中のCO₂を回収するシステム、あるいは、バイオマスから液体燃料やガス燃料を転換製造するプロセスにおいてCO₂を回収し隔離するシステムである。どちらも、ネガティブエミッションを実現しつつエネルギーサービスも供給する。バイオ炭もバイオマスから炭を製造する過程での熱供給が可能な技術である。逆に、DACシステムは、第2章第3節で詳述するが、大気中のCO₂を分離回収するために、外部からの電力・熱といったエネルギーを大量に利用する技術である。

また、ライフサイクルでの分析は重要である。例えば、BECCSとバイオ炭では、バイオマスの栽培や運搬、風化促進では岩石の採掘、粉砕、運搬といった工程でのエネルギー利用やGHG排出の考慮が必要となる。特に、陸域生態系が関与するネガティブエミッション技術では、社会の持続可能性の観点から、水・エネルギー・食料の連環（ネクサス）の考慮が必要となる。

これらの技術は今のところ大規模には利用されていない技術、あるいは研究開発途上の技術である。今後10年間で、各技術に対して、大気中CO₂の除去量に関するポテンシャル、副作用の理解、実現可能性の精査、スケー

ルアップとコスト低下に向けた研究開発実証、さらには社会実装に向けた政策展開が急務となっている。

学術機関・米国アカデミーズ（National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine）は、2019年に『ネガティブエミッション技術と信頼できる隔離：研究課題』⁽⁶⁾と題した報告書を出版した。この報告書では、現状での各技術による大気中CO₂の除去ポテンシャルとその制約、およびコストをまとめ、必要な研究分野の特定と研究開発につき込むべきリソースに関し提言を行っている。その中で、現状でのネガティブエミッション技術のポテンシャルとコストに関して、次のようにまとめている。

- ① 土地利用に基づく4つのネガティブエミッション技術（再植林、森林管理、農耕方法変更による土壌炭素蓄積増、BECCS）は、現時点においても広範囲に実施可能で、緩和戦略としてもコスト的にも見合う。
- ② ただし、土地利用に基づく技術は、食料生産や生物多様性への悪影響をもたらさないレベルでの実施が必須であり、その制約の中では、これら土地利用に基づく技術だけでは世界全体で年間10 GtCO₂といった、パリ協定達成に必要なCO₂除去量に達しない。
- ③ DACと鉱物化のCO₂除去ポテンシャルは大きく、革新的な技術となりうる。前者はコスト低下が課題、後者はメカニズムの解明も必要。
- ④ ブルーカーボンによるCO₂除去ポテンシャルは、他のネガティブエミッション技術と比較すると小さい。ただし、生態系回復や沿岸域の気候変化への適応といった面からの実施が期待されるため、CO₂除去の観点からは低コストとなりえる。

このように、全米アカデミーズの報告書では、副作用をもたらさないレベルでの土地ベースのネガティブエミッション技術の早期の利用と、DACや風化促進・鉱物化の研究開発によるスケールアップに向けた動きが重視されている。

これに加え、世界各地域でのネガティブエミッション技術の実施に向け、その地域ごとに適切なポートフォリオを探索する研究が必

要となる。一方、海洋を利用したネガティブエミッション技術の可能性に関しては、そのポテンシャルの実態の把握が遅れていることや、実施に向けたガバナンスの課題も多く、今後も基礎的な研究の継続とガバナンスに向けた議論が必要であろう。

(3) DACの研究開発動向

米国アカデミーズの報告書でも見たように、単一のネガティブエミッション技術、特に陸域生態系を利用した技術の問題点の指摘が増加するとともに、化学工学的に大気中のCO₂を直接回収するDAC技術に対する期待が高まっている。

DACは潜水艦や国際宇宙ステーションのような特定の分野で用いられてきた技術であったが、現在は数社のベンチャー企業が図2のような実証機の開発および商用化を進めている⁽⁷⁾。また、DACに関する学術論文も2015年以降増加している。DACシステムのコスト・効率分析、大気中から回収したCO₂の有効利用を含むエネルギーシステムモデルや統合評価モデルを使った場合のCO₂大規模排出削減に向けた経済分析も数多くなされている。

このような動きがあるものの、現在、CO₂市場は非常に小さく、DACで回収されたCO₂

は、温室での植物栽培、あるいは炭酸飲料水などに少量利用されているのみである。しかし最近になり、Power-to X (P2X) として合成燃料製造用のDAC実証設備の製造、石油増産用のCO₂利用(CO₂-EOR)としての大規模DAC設備建設が予定され始めた。

DACの今後の動きとしては、まず上述のP2XやCO₂-EORでのDAC利用の増加とそれによるコスト低下が期待される。さらに、大気中のCO₂の除去クレジット等のインセンティブが付加され、DACで回収したCO₂が経済性をもって地質的・鉱物的に隔離されること、そしてDACがネガティブエミッション技術としてスケールアップされることが理想である。現状でも、米国のCO₂回収貯留に関する税額控除法(45Q)やカリフォルニア州の低炭素燃料規制(LCFS: low-carbon fuel standard)でDACにクレジットが付与され、経済的に成り立つDACの条件も少しずつ整備されつつある。こういった動きを効果的に促進するため、大気中CO₂の除去量定量化に関する国際標準化など管理体制整備の加速も必要である。

現在商用化されているDAC技術は、化学吸収液システムと固体吸着材システムの2つに大別される。化学吸収液システムは、既存



(出所：スイスのヒンウィルで筆者撮影)

図2 スイス Climeworks 社製の DAC 商用設備

の工業プロセスをベースとしているため、早期のスケールアップが可能である。このシステムでは、強塩基性の水溶液を大気と接触させてCO₂を回収し、さらにCa(OH)₂水溶液と混合することにより炭酸カルシウムとして取り出す。ただし、炭酸カルシウムからCO₂を分離するための煅焼に900℃程度の高温の熱が必要で、この熱を得るために大きなエネルギーが必要となる。

一方、固体吸着材システム用に、広範囲な材料が研究されているが、商用化されている設備の多くではアミン材料が用いられている。また、固体吸着材システムでは、CO₂の吸着と再生に、加熱・冷却を用いるものと乾燥・湿潤を用いるものがある。どちらも70～100℃程度の比較的低温な熱を利用するため、システムとして排熱を利用できエネルギーコストは低いが、材料開発のさらなる進展とスケールアップが必要である。

化学吸収液システムと固体吸着材システムのいずれにおいても、大気中のCO₂を回収するためのファン等に用いる電気エネルギーよりも、回収したCO₂の再生に用いる熱エネルギーのほうが大きいので、熱エネルギーの低炭素化がDACによる大気中CO₂除去の効果に大きな影響を及ぼす。

(4) 風化促進技術の研究開発動向

ネガティブエミッション技術のポートフォリオアプローチが重要視されている中、近年、風化促進技術の検討も進みつつある。風化促進技術とは、大気中の炭素を化学的風化作用により玄武岩などの岩石と反応させ、最終的に海洋に運ぶ技術であり、海洋酸性化を防ぐ効果もある。玄武岩、カンラン石などを粉砕し、農地に散布する検討も多くなされており、そのポテンシャルは世界全体で4GtCO₂/年もあると推定されている⁽⁸⁾。ただし、適切な岩石の地理的分布、その粉砕と運搬にかかるエネルギー、利用可能な農地の存在が制約となるため、空間的に詳細な検討が重要となる。

粉砕した岩石の散布による風化促進は、土壤改良の効果もあり、植物の成長を促進する効果も期待されている。

そのため、BECCSでのバイオエネルギー作物栽培や植林といった、他のネガティブエミッション技術と組み合わせた利用に関する研究もある。

4. おわりに

世界的なネット・ゼロ排出に向けた必要性の理解と政治的目標の形成がなされつつある中、エネルギーシステム全体のゼロ排出化実現の困難さとそれを克服するためのネガティブエミッション技術を含む、技術展望が理解されつつある。英国は、2019年6月に2050年にネット・ゼロ排出を目指すことを法制化した⁽⁹⁾が、法制化の基礎となった勧告文書⁽⁹⁾では、ネット・ゼロ排出に向けたネガティブエミッション技術の必要性を明示している。また、スイス連邦政府は、2019年8月に2050年に向けた長期戦略を決定したが、その中でネガティブエミッション技術の役割を具体的に記載し、バイオマスへの蓄積、BECCS、DACCSを候補として挙げている。

ネット・ゼロ排出に向けたシステム転換において、ネガティブエミッション技術は、いわゆる次善策、「プランB」のためではなく、システム全体での統合された低炭素技術の早期の利用と並行して進めて行くことが必要である。そのためには、経済的かつ持続可能なネガティブエミッション技術のスケールアップに向けた研究開発投資が、システム転換（発電部門でのゼロ排出電力とエネルギー貯蔵システムの統合、需要側での可能な限りの電化とエネルギーマネジメント、産業部門での素材製造の新規プロセスや素材開発、CO₂再利用とCCSの活用、運輸部門での大型運輸でのゼロ排出水素キャリアやバイオマス利用も含むCO₂循環を通した低炭素燃料の拡大）と整合する形で行われることが重要となる。

参考文献

- (1) 黒沢厚志, 加藤悦史, 杉山昌広, 増田耕一, 「パリ協定と気候変動対策技術」, 化学工学論文集, 第43巻, 第4号, 171-177, 2017
- (2) 加藤悦史, 「2°Cおよび1.5°C目標に向けた大規模ネガティブエミッション技術の実現」, 環境情報科学, 第46巻第3号, 41-45, 2017
- (3) IPCC, Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014
- (4) IPCC, Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 pp, 2018
- (5) Minx et al., Negative emissions—Part 1: Research landscape and synthesis, Environmental Research Letters, 13, 063001
- (6) NASEM, Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine; Washington, DC: The National Academies Press, 2019
- (7) 石本祐樹, 杉山昌広, 「CO₂直接空気回収技術の研究動向」, エネルギー・資源, 第38巻第6号, 309-313, 2017
- (8) Beerling et al., Farming with crops and rocks to address global climate, food and soil security, Nature Plants, 4, 138-147, 2018
- (9) Committee on Climate Change, Net Zero: The UK's contribution to stopping global warming, May 2019, <https://www.theccc.org.uk/wp-content/uploads/2019/05/Net-Zero-The-UKs-contribution-to-stopping-global-warming.pdf>

低炭素社会に向けた 水素エネルギー導入の意義とわが国の普及政策

坂田 興 (プロジェクト試験研究部
特任参事)



1. はじめに

近年、水素が「環境に優しい技術」として話題になることが多く、ブームのような状況を呈している。実際、世界に先駆けて、わが国では燃料電池自動車の商業化が実現し、水素ステーションの設置も進んでおり、水素に関わる経済産業省の予算も増大している。

欧州等でも再生可能エネルギー（再エネ）の導入に連動する形で、水素の実証事業が進展している。しかし、水素エネルギーシステムの導入の意義や導入の前提条件等は、必ずしも明示され共有されているわけではない。

本稿では、世界とわが国の直面する課題の解決に対して、水素エネルギーシステムが貢献する可能性について、私見を交えて議論すると同時に、水素に対するわが国の基本的な政策を概説する。

2. 水素エネルギーシステムの貢献可能性

(1) 世界の直面している課題

世界の人口は2019年の77億人から2050年には97億人（約1.3倍）になると予測される⁽¹⁾。この間に世界の国内総生産（GDP）も現状の約50兆米国ドル/年から128兆米国ドル/年（約2.6倍）に増大し⁽²⁾、一次エネルギー需要も現状の約13G石油換算トン（toe）から約19Gtoe（1.45倍）になるとの見通し⁽³⁾がある。予測の前提によって変化するが、2050年時点では石油、石炭、天然ガスの化石燃料が一次エ

ネルギー需要に占めるシェアは68～79%となる、すなわち、化石燃料依存度は依然として高い状態が継続する⁽³⁾と見込まれている。

このような未来に対し、国際エネルギー機関（IEA：International Energy Agency）は、「現状政策シナリオ」では化石燃料の利用が増大し、持続可能性の危機に直面すると警告している。そして「低炭素政策を採用することにより、エネルギー安全保障および経済成長が促進される」とのメッセージを発信している⁽⁴⁾。

(2) わが国の直面するエネルギー・環境分野の課題

エネルギー資源に乏しいわが国においては、安全性（Safety）を大前提に、安定供給（Energy Security）、経済性（Economic Efficiency）、および環境適合（Environment）という「S+3E」の基本方針に照し、多様なエネルギー源を組み合わせることが必要である⁽⁵⁾。しかし、ここに以下のようなわが国固有の課題がある。

① エネルギー安全保障上の代表的な課題

第1の課題は、極端に低い自給率である。日本のエネルギー自給率は2017年時点で9.6%であり、経済協力開発機構（OECD）に加盟する35カ国中第34位であった⁽⁶⁾。もう1つの課題は、エネルギー資源の高い中東依存である。わが国では輸送部門のエネルギー消費の90%を石油系燃料に依存しているが、原油の90%近くを中東に依存しているため、産油国の政治経済動向の影響や、ホルムズ海峡お

よびマラッカ海峡の輸送リスクを排除することができないでいる⁽⁷⁾。

②地球温暖化対策

2015年12月の気候変動枠組条約（UNFCCC）第21回締結国会議（COP21）やパリ協定を踏まえ、わが国は「地球温暖化対策推進計画」⁽⁸⁾を決定した。その内容は以下に抜粋する。

- 中期目標として地球温暖化ガスについて「国内の排出削減・吸収量の確保により、2030年度において、2013年度比26.0%減の水準にする」
- 長期目標として「2050年までに80%の温室効果ガスの排出削減を目指す」

特に、長期目標に関しては、「このような大幅な排出削減は、従来の取組の延長では実現が困難である。従って、抜本的排出削減を可能とする革新的技術の開発・普及などイノベーションによる解決を最大限に追求するとともに・・・（以下略）」と、今後の課題解決に期待する認識を示している。

(3) わが国における持続可能性確保のための低炭素社会の構築

上述の世界とわが国が直面する課題を解決する方向性には、「低炭素化」という共通項がある。そこで、わが国としては、低炭素社

会の構築を目指すことにより、上述のエネルギー・環境面の課題および持続可能性の課題を解決する方策もありうると考えた。

図1に示すように、低炭素社会が実現した場合、究極の一次エネルギー供給の姿は、利用時に二酸化炭素（CO₂）を発生しないCO₂フリー一次エネルギーが採用されることになると予想される。

この場合、一次エネルギーとしては、①再エネ、②化石燃料+炭酸ガス回収隔離（CCS）、および③原子力エネルギーのいずれか、またはこれらの組み合わせが考えられる。

上述の実現に障害が少ない国もあるだろうが、わが国の場合、数値化はできず定性的ではあるが、以下のような状況が予想される。

- 再生可能エネルギー資源は国内にも存在する。しかし、大量かつ経済性の高い資源は、海外適地に存在する。
- 国内のCCSに関しては検討が進んでいるが、現状では大量のCO₂の地下貯蔵の適地は、海外に存在すると考えられる。

従って、わが国において低炭素化社会を構築するに足る大量のCO₂フリー一次エネルギーを獲得するには、海外からの輸送が必要ということになる。そのためには、大規模に長距離の輸送を可能にする技術が必要になる。

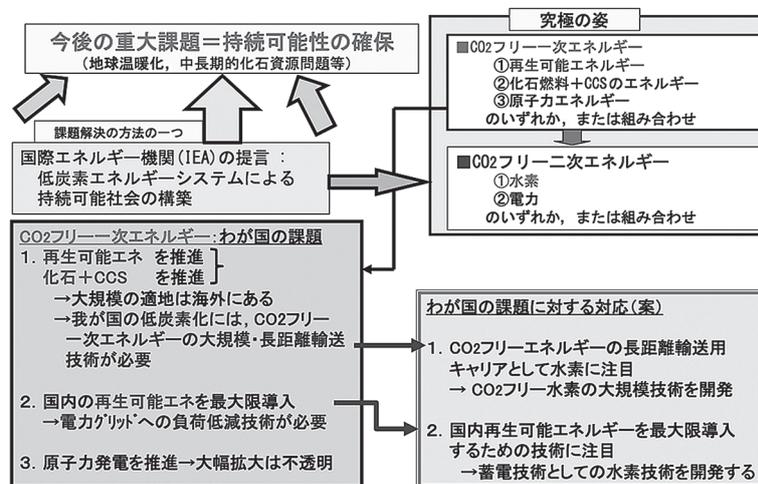


図1 低炭素社会のイメージと水素の役割

一方、国内再エネについては、量的・経済的な課題はあるものの、自給率の向上および分散エネルギーシステムの構築に貢献するとの観点で、最大限利用することが有益である。ただし、再エネによる電力は変動性電源であるため、既存の電力系統（グリッド）と接続する場合には、グリッドに負荷を与えるという問題が生じる。このため再エネ電力のグリッドへの負荷低減技術が必要となる。

原子力発電の国内での推進に関しては、今後の方向性が必ずしも明確でないため、2015年の「長期エネルギー需給見通し」で提示された「2030年のエネルギーミックス」以降の低炭素化への寄与については今後さらに議論が必要になると考える。

(4) 日本社会の低炭素化の課題～CO₂フリーエネルギーの日本への輸送方法～

CO₂フリーエネルギーは、国内よりも海外適地に大量に、そして経済的に存在すると考えられる。このエネルギーを日本に輸送するうえでの課題につき以下で考察しよう。

① 海外化石燃料由来のCO₂フリーエネルギーの利用

海外におけるCCSの適地として、豪州、中東、北米、欧州等が知られている。海外において、安価な化石燃料から水素とCO₂を製造し、このCO₂を海外のCCSサイトに貯蔵すると、得られた水素はCO₂フリーエネルギーになる。安価な化石燃料としては、褐炭、石炭、副生ガス等が考えられている。

このCO₂フリーの水素をわが国に輸送する際に、気体状態の水素では経済性に課題があることが知られている。そこで、水素を大規模、長距離輸送に適した形態（エネルギーキャリア）に変換して、タンカー等で日本に輸送する。ここで、化石燃料から水素を製造する技術、およびCCS技術に関しては技術的な蓄積があり、技術改良により実用が可能になると考えられる。従って、水素をエネルギーキャリアに転換し、輸送・貯蔵し、利用サイトで水素に戻すという、水素のサプライチェーン構築の技術が必要になる。

② 海外再エネ由来のCO₂フリーエネルギーの利用

風力発電および太陽光発電の適地として、豪州、アルゼンチン、中東などが広く知られている。この技術によるエネルギーは、製造時にCO₂が発生しないので、CO₂フリーエネルギーである。これらのエネルギーは通常は電力の形で得られる。従って、海外再エネ由来CO₂フリーエネルギーのわが国への輸送技術は、電力の大量・長距離輸送技術に帰着する。その候補として、送電と水素が考えられる。ここで、送電では、再エネ由来電力を海底送電線でわが国に送ることを想定している。水素という方法は、再エネ由来電力で水の電気分解を行い、得られた水素をエネルギーキャリアの形態でタンカー等を用いてわが国輸送することを想定している。

これらの技術の特徴を検討するため、図2のシミュレーションを行った⁽⁹⁾。

国内の100万kW級の発電所が稼働率90%

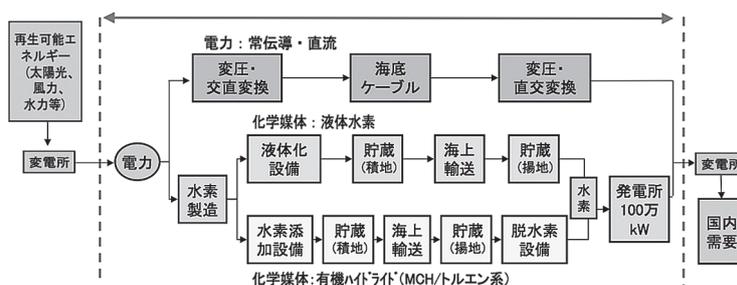


図2 海外再エネの日本への長距離・大量輸送

稼働した場合と同等の電力(80億kWh)を、海外から輸送する場合を想定した。図3には、国内の電力グリッドに入る直前における発電コストを距離に対してプロットした。

送電の場合、輸送距離が短いとコストが安価であるが輸送距離に敏感である。これに対して、水素エネルギーキャリア(液体水素、有機ハイドライド)の場合は、タンカー輸送で輸送距離が短いとコストが高いが、輸送距離の影響を受けにくいことが分かった。また、輸送距離4,000km付近で両者のコストが交差する点があり、それよりも短い距離では送電が安価で、それよりも長距離では水素キャリアが安価であることが示された。すなわち、電力の遠距離・大量輸送には水素が有利であることが示唆され、わが国への再エネ由来のCO₂フリーエネルギーの輸送には、水素が適している場合があることが示された。

以上のように、海外のCO₂フリーエネル

ギーを日本に輸送する技術として、水素システムを利用する可能性が示唆された。

3. 水素および水素システムの概要

上述のように、CO₂フリー水素のわが国への輸送媒体として水素が有用である可能性が示唆された。次に、水素エネルギーシステムについて概説する。

(1) 水素の性質

水素の一般的な性質を表1にまとめた⁽¹⁰⁾。水素は他の気体に比較して、極めて拡散しやすい。また燃焼範囲が広く、燃焼速度が速い等の特徴がある。また金属材料を脆化させる性質を有する点も注目される。

その他、その化学的な性質を利用して、水素化反応、水素化分解、水素化脱硫などが、石油精製や石油化学工業で利用されている。

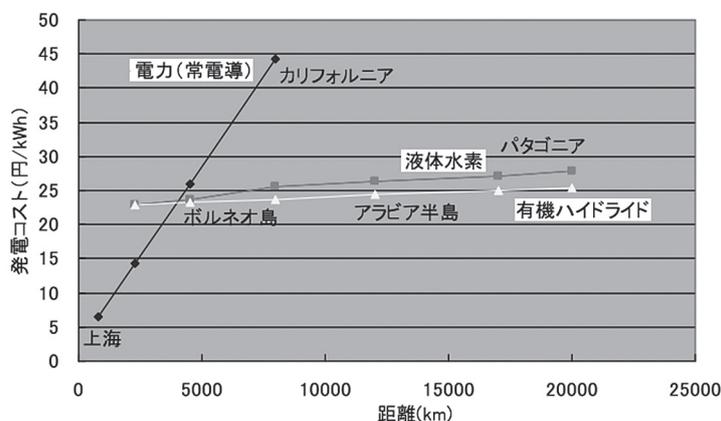


図3 海外再エネ由来電力の輸送コスト比較

表1 水素の基本的な性質

	水素	メタン	プロパン	ガソリン	水素の特性
拡散係数(空気中) [cm ² /s](1atm,20°C)	0.61	0.61	0.12	0.05 (ガス状)	拡散しやすい。 小孔から透過しやすい。
金属材料を脆化	あり	なし	なし	なし	金属を脆く割れやすくする。
最小着火 エネルギー(mJ)	0.02	0.29	0.26	0.24	着火しやすい。
燃焼範囲 (下限-上限)[vol%]	4.1-75	5.3-15	2.1-10	1.0-7.8	燃料可能濃度範囲が広い。
熱放射 (輻射率ε)	0.04~0.25	0.15~0.35	ガソリン並	0.3~0.4	熱放射による被害や類焼は少ない。
最大燃焼速度[cm/s]	346	43.0	47.2	42.0	爆風圧が大きい。ジェット火炎が保炎しやすい。
燃焼熱[MJ/Nm ³] 真発熱量	10.77	35.9	93.6	-	熱量を確保するのに高圧を要する。
沸点[°C]	-252.9	-161.5	-42	30~180	

(2) 水素エネルギーシステムの概要と普及可能性

① 水素エネルギーシステムの概要

図4にシステムの概要を示す。水素は多様な一次エネルギーから生産可能であり（水素の特徴（1））、生成した水素を貯蔵および輸送したのち、燃料電池、水素タービン等で利用する。

利用時に、化石燃料と異なりCO₂を発生しないことが水素の特徴（4）である。この（1）と（4）は、電気と共通した特徴である。水素は電力との相互変換が可能である点（特徴（2））は、電力→（水電気分解）水素→（燃料電池）電力の経路（パス）が成立することを指すが、電気と水素という異なるエネルギーシステムが交差する興味深い特徴である。

水素は分子であり貯蔵が可能であること（特徴（3））も、電気との大きな差異である。

② 水素エネルギーの普及可能性

わが国に低炭素化社会を構築することを目的として、CO₂フリーエネルギーを水素として導入した場合の、2050年までの世界および日本の水素需要を評価した。エネルギー総合工学研究所が開発した統合評価モデルGRAPEのエネルギーモジュールを用いた。水素は、

2020年から日本国内製造および海外7カ所からの輸入が可能と設定した。また水素の需要先は、運輸（燃料電池自動車、内燃機関）、発電（大規模水素火力発電）、定置（水素コジェネ、水素直接燃焼）を設定した。世界を15の地域に分割し、各地域におけるエネルギー需給、CO₂排出、技術オプション等を与えて、CO₂制約等の制約をみだし、世界全体のエネルギーシステムコストが最小になるようなエネルギー需給構造を探索・決定した⁽¹¹⁾。

この検討で用いた主要な前提は、次の3つである。

- | |
|---|
| ① CO ₂ 排出削減割合（2050年）：世界▲50%，
日本▲80% |
| ② 日本の原子力発電：新增設なし、炉寿命40年で
フェーズアウト |
| ③ 日本のCCS（2050年）：2億トン-CO ₂ /年
[比較例：12億トン-CO ₂ /年（@2015年）] |

この結果、わが国の電力分野では、図5に示すように、大規模水素火力発電が2045年頃から導入され、定置分野では2030年頃から水素が導入されるとの結果が得られた。

2050年に向けて、石炭、石油および天然ガス火力発電は、CCSとの組み合わせプロセスとなり、特に、天然ガスの占める割合が大きくなる。軽水炉は、2050年に向けてフェーズ

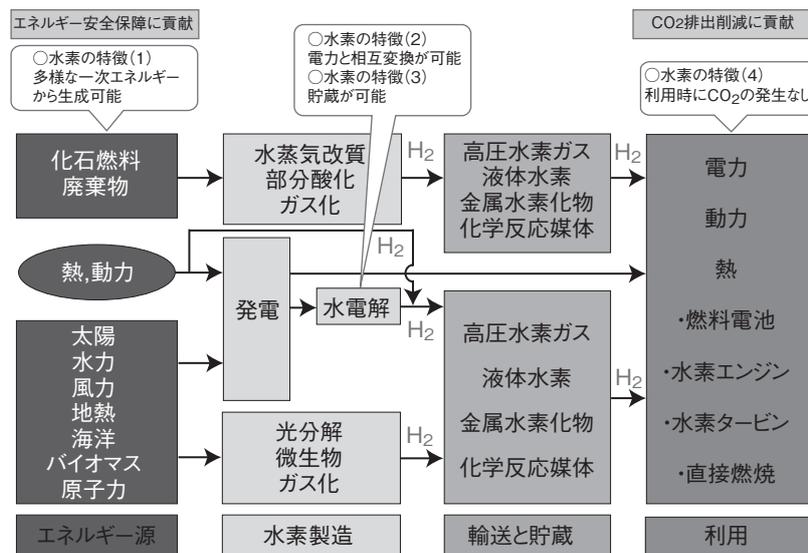


図4 水素エネルギーシステムの概念図

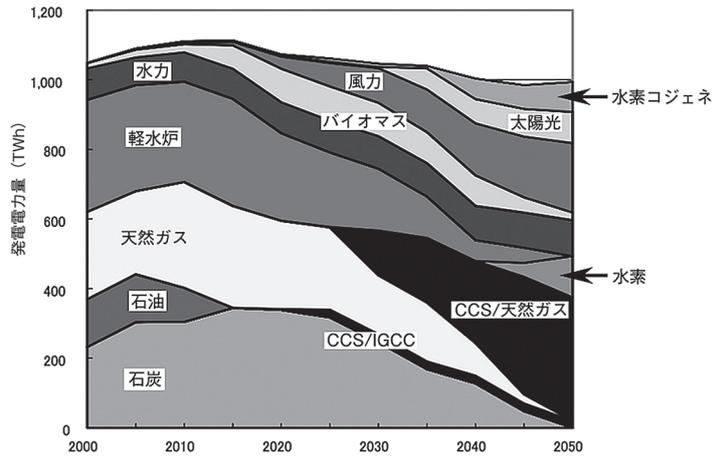


図5 日本の電源構成の推算結果

アウトする。また、再エネ（水力、バイオマス、風力、太陽光）は増大し、全体で発電部門のゼロエミッション化が進行する。

運輸部門、特に乗用車の分野では、2050年に向けて内燃機関が減少し、電気自動車、燃料電池自動車、プラグインハイブリッド車が主流となる。

2050年における水素の使用量は、世界では運輸部門を中心に約800Mtoe（3.12兆Nm³）程度、日本では水素火力発電、コジェネレーション、運輸部門で57Mtoe（2223億Nm³）程度になると計算された。

以上を総合して、2050年におけるわが国の一次エネルギー供給を推算すると、図6に示すように、水素は13%程度を占め、基幹エネ

ルギーの1つになり、広く利用されることになるとの結果が得られた。

③水素エネルギーシステムに対する視点

(a) エネルギーシフトの実現可能性

上述のように、厳しいCO₂排出制約の下では、水素が基幹エネルギーの1つとして用いられるとの結果が得られたが、このように新規エネルギーが基幹エネルギーとなった例があるであろうか？ わが国では、新規なエネルギーの大量導入の例として、液化天然ガス（LNG）のわが国への導入の例がある。過度の中東依存および硫黄酸化物等を原因とする大気汚染の解決を目指して、原因となる燃料（石炭、石油）を天然ガスに切り替えた事例である⁽¹²⁾。

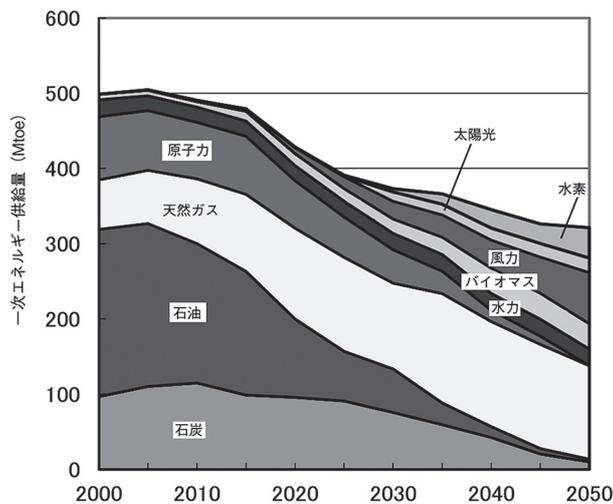


図6 日本の一次エネルギー供給の推算結果

(b) 水素エネルギーシステムの規模による整理

水素エネルギーシステムは、その導入規模や導入の目的により必要とされる技術および利害関係者（ステークホルダー）が変化する。そのため、表2のように整理すると、水素技術・事業の意義が明確にすることができる。

上述の地球環境統合評価モデル（GRAPE）による検討例は、地球規模の動向を対象としたものであり、主として大規模水素システムを対象として考慮したものである。これに対して、中規模の水素システムは、主として、わが国国内の再生可能エネルギー由来の電力を利用して、水の電気分解により水素を製造し、輸送・貯蔵して利用に供するシステムである。このシステムは、わが国のエネルギー自給率を高めると同時に、CO₂フリーエネ

ギーを産出するため、この面からみても、わが国のエネルギー・環境分野の課題に対する回答の1つになりうると考えられる。

このエネルギーシステムの特徴は、わが国への再エネ導入促進に対する水素の意義を発揮する場であることである。将来、再エネの大量導入が必要となる際に、変動性電源である再生可能エネルギーを電源して電力系統線に接続すると、余剰電力が発生すること等により、電力系統を乱す可能性が指摘されている⁽¹³⁾。このため、電力貯蔵技術が必要となるが、水素はその技術の候補になりうると考えられている。このように、水素を利用することにより、電力系統の安定化および分散型エネルギーシステムの確立に貢献すると考えられる。

これらのエネルギーサプライシステムは、Power-to-Gas と称されることがある。これに

表2 水素エネルギーシステムの規模による分類

システム	サプライチェーン	普及範囲	水素源	主要用途例/大義名分
大規模	海外製造 輸入して国内消費	国	再エネ 未利用資源	○水素発電/ 水素(CO ₂ フリー燃料)の大規模導入によりCO ₂ 排出削減 CO ₂ 削減によるパリ協定遵守 エネルギー安全保障向上(多様化)
中規模	国内で製造 国内で消費	地域	再エネ	○燃料電池車,Power to Gas/ 国内再エネ導入促進 (電力貯蔵,CO ₂ フリー調整火力電源の燃料,Power to Gas) 企業収益,雇用創出,地域活性化
小規模	国内で製造 域内で消費	小地域 離島等	再エネ	○地域電源/ 安価な電力供給

表3 わが国の Power-to-Gas プロジェクト

NEDO(原課:経済産業省・資源エネルギー庁新エネルギーシステム課)	環境省
①北海道における再エネ由来不安定電力の水素変換等による安定化・貯蔵・利用技術の研究開発(北海道苫前町) 豊田通商,NTTファシリティーズ,KHI,フレイシ・エナジー,テクノパ,室蘭工大	①建物及び街区における水素利用普及を旨とした低圧水素配送システム 実証事業(北海道室蘭市) 大成建設
②非常用電源を有する再エネ出力変動補償用電力・水素複合エネルギー貯蔵システムの研究開発(宮城県仙台市) 東北大学,前川製作所	②家畜糞尿由来水素を活用した水素サプライチェーン実証事業 (北海道河東郡鹿追町) エア・ウォーター
③再エネ利用システムの事業モデル構築と大規模実証に係る技術開発(福島県浪江町) 東芝,東北電力,岩谷産業	③小水力由来の再エネ水素の導入拡大と北海道の地域特性に適した水素活用モデルの構築実証(北海道白糠町・釧路市) 東芝ESS
④稚内エリアにおける協調制御を用いた再エネの最大有効活用技術(北海道稚内市) 日立製作所,北海道電力,エネルギー総合工学研究所	④再エネ電解水素の製造貯蔵および水素混合ガスの供給利用実証事業(秋田県能代市) NTTデータ経営研究所
⑤CO ₂ フリーの水素社会構築を旨としたPower to Gasシステム技術開発・実証研究(山梨県甲府市) 山梨県企業局,東レ,東京電力ホールディングス,東光高岳	⑤富谷市における既存物流網と純水素燃料電池を活用した低炭素サプライチェーン実証(宮城県富谷市) 日立製作所
	⑥使用済みプラスチック由来低炭素水素を活用した地域循環型水素地産地消モデル実証事業(神奈川県川崎市) 昭和電工
	⑦京浜臨海部での燃料電池フォークリフト導入とクリーン水素活用モデル構築実証(神奈川県横浜市・川崎市) トヨタ自動車
	⑧苛性ソーダ由来の未利用高純度副生水素を活用した地産地消・地域間連携モデルの構築(山口県周南市・下関市) トクヤマ

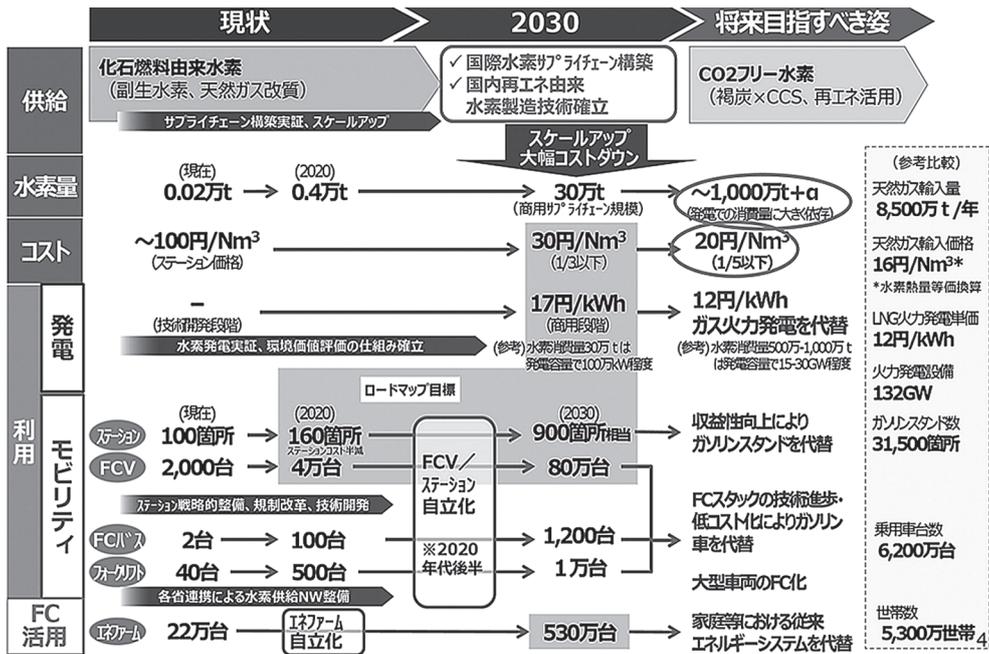


図8 水素基本戦略のシナリオ

て検討が続けられているが、施策の進捗状況について述べる⁽⁷⁾。(1) エネファーム、(2) 水素モビリティ、(3) 水素発電、(4) Power-to-Gas、(5) 国際サプライチェーンはいずれも順調に進捗している。特に(5)に関しては、海外で生産されたCO₂フリー水素は、大規模で長距離の輸送を経て、日本に移送されることを想定している。この際、水素ガスの長距離かつ大量輸送は経済的でないため、これに適した形態に変換して輸送する。これらをエネルギーキャリアと称する。現在のところ、大規模に検討されているのは、(1) 液体水素 (2) 有機ヒドライド (3) アンモニアを総括的に図9⁽¹⁷⁾に示した。

(3) 海外との交流

① 水素協議会

水素協議会 (Hydrogen Council) は、水素関連技術の普及に向けた広範なビジョンの提供・共有を活動目標とする民間トップグループによるグローバルな活動団体である。2017年に発足し、現在は11カ国53社で構成されている。わが国からは、ステアリングメンバーとしてホンダ、川崎重工業、トヨタ、JXTG エネルギー、岩谷産業が、サポーターメンバーとして、丸紅、三菱商事、三井物産、豊田通商が参加している。

同協議会は報告書“Hydrogen, Scaling up”の中で★印を付けて、「気候変動に関する政府

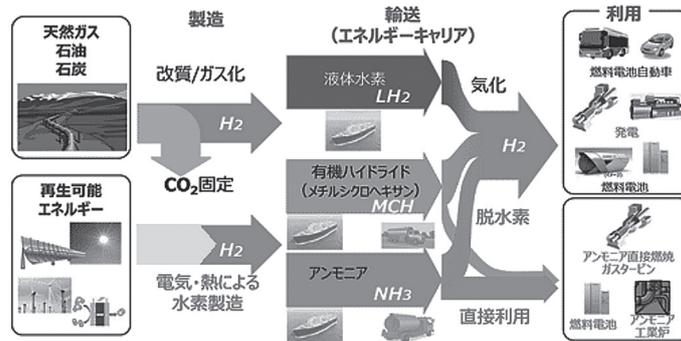


図9 水素輸送のためのエネルギーキャリア

間パネル」(IPCC)が示す2℃シナリオ達成のために、2050年までにエネルギー起源CO₂排出量の60%削減が必要であるとの前提のもとに、その実現に水素が活用されることで2.5兆ドルの市場および3000万人の雇用が創出されると試算している⁽¹⁸⁾。

② 水素閣僚会議

水素閣僚会議が2018年、2019年に東京で開催された。第1回では「東京宣言」を採択し、水素利用の増大に向けて技術のコラボレーション、規制の標準化等について合意した。第2回では、今後10年間で燃料電池車が計1000万台、水素ステーションが1万カ所等を目標とすることで合意した⁽¹⁹⁾。

5. 技術課題

水素エネルギーシステムの大規模普及に関わる技術開発は、国家プロジェクトとして広範囲に実施されている。社会実装および中長期的な大幅な経済性の向上については、表4に示すように、さらに革新的な技術開発が必要になると考える。また、抜本的なコストダウンを目指して、場合によっては基盤的研究を

実施する必要もあると考える。

また、水素分野以外のAI技術、自動運転技術などは、水素輸送のコストダウンに貢献する可能性がある。併せて、物質収支と経済収支の両面から整合性を持つ中間シナリオの構築も必要であろう。また水素同位体(水素、重水素、三重水素)の水電気分解に対する挙動の差異を利用する技術⁽²⁰⁾や、核スピン異性体(オルト水素とパラ水素)を有する特異な水素分子の特性⁽²¹⁾を活かした技術の進展なども、今後の展開が期待される。

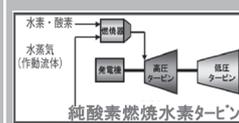
6. おわりに

水素エネルギーシステムが、世界およびわが国が直面しているエネルギー・環境面の課題解決に貢献できる可能性があることを、当研究所の研究結果を用いて、定量的に示した。わが国政府は、水素エネルギーシステム構築を進める施策を積極的に展開している。

今後とも、水素エネルギーのコストおよびエネルギー効率の向上に資する技術およびシステム開発の進展が必要である。物質収支と経済収支の両面から整合性を持つ中間シナリオの構築も必要であろう。

表4 今後の技術課題

システム	サプライチェーン	短期	中期	長期
大規模	海外製造 輸入して国内消費	<ul style="list-style-type: none"> ●H₂大量製造技術 <ul style="list-style-type: none"> －褐炭ガス化 －電解コストダウン ●H₂大量輸送技術 <ul style="list-style-type: none"> －水素キャリア技術 －LH₂, MCH, アンモニア ●H₂大量利用技術 <ul style="list-style-type: none"> －水素混焼発電 －水素NG混焼発電 －アンモニア微粉炭発電 ●チェーンシステム技術 	<ul style="list-style-type: none"> ●電解技術の高度化 <ul style="list-style-type: none"> －脱水素反応 －高温水蒸気電解 ●水素専焼発電 ●アンモニアタービン発電 ●チェーンシステム技術 ●水素分離膜(無機) 	<ul style="list-style-type: none"> ●光触媒水素製造 ●アンモニア電解合成 ●純酸素燃焼水素タービン発電(下図) <ul style="list-style-type: none"> －高効率, CO₂排出なし
中規模	国内で製造 国内で消費	<ul style="list-style-type: none"> ●電解コストダウン技術 ●再エネ電力と系統電力との統合制御技術(EM) ●Power-to-Gas技術 <ul style="list-style-type: none"> －P to X, P to L技術(メタネーションを含む) ●水素貯蔵技術 ●産業用・事業用水素利用技術 <ul style="list-style-type: none"> －FC, GE, GT 	同上 <ul style="list-style-type: none"> ●セクター間カップリングの構想 ●CO₂フリー熱利用技術 ●新規水素利用技術 ●国内水素輸送技術 <ul style="list-style-type: none"> －自動運転技術 	<ul style="list-style-type: none"> ●共電解 <ul style="list-style-type: none"> －水+CO₂→炭化水素 ●宇宙発電 ●超電導技術



[謝辞]

本稿をまとめるにあたり、内閣府、経済産業省およびNEDOの資料を引用させていただいた。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- (1) 「国連人口統計」, https://www.unic.or.jp/news_press/features_backgrounder/33798/
- (2) (公財)地球環境産業技術研究機構, 「長期社経済シナリオの策定」, https://www.rite.or.jp/system/research/alps/baselinescenario/data/ScenarioOutline_POPGDP_20110405.pdf RITE
- (3) 山下 (日本エネルギー経済研究所), IEEJ アウトルック 2018, 第11回 IEEJ/CNCP 研究成果発表会, 2017年11月8日
- (4) IEA, "World Energy Outlook 2012," 2012年
- (5) 経済産業省資源エネルギー庁資料 2019年7月9日 https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteiky/3es_graph01.html
- (6) 経済産業省資源エネルギー庁資料, 2019年7月23日 <https://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/energy2018/html/001/>
- (7) 経済産業省資源エネルギー庁講演資料, 2018年5月25日
- (8) 環境省, 「地球温暖化対策計画」(閣議決定), 2016年5月13日
- (9) (一財)エネルギー総合工学研究所, NEDO平成21年度成果報告書 09002794-0-1.pdf, 平成21年度エコイノベーション推進事業, 海外再生可能エネルギーの大陸間輸送技術の調査, 2010年2月
- (10) (一財)エネルギー総合工学研究所, 「エネルギー総合工学研究所における水素拡散, 燃焼基礎物性の研究について」(2008年7月30日)に加筆, <http://www.f-suiso.jp/bunkakai/H20bunkai-2.pdf>
- (11) Ishimoto et al. "Significance of CO2-free hydrogen globally and for Japan using a long-term global energy system analysis," International Journal of Hydrogen Energy, 42 (19), pp 13357-13367 (2017)
- (12) 三菱商事株式会社, 経済産業省資源エネルギー庁水素・燃料電池戦略協議会ワーキンググループ(第5回)配布資料, 2014年4月14日
- (13) 経済産業省資源エネルギー庁資料, 2018年5月15日 <https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/tokushu/saiene/shuryokudengen.html>
- (14) 経済産業省, 「第5次エネルギー基本計画」(閣議決定), 2018年7月3日, <https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/tokushu/saiene/shuryokudengen.html>
- (15) 経済産業省, 「水素基本戦略」(再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議で決定), 2017年12月26日, http://www.meti.go.jp/english/press/2017/pdf/1226_003b.pdf
- (16) 経済産業省, 「水素・燃料電池戦略ロードマップ」, 2019年3月12日, http://www.meti.go.jp/english/press/2016/0322_05.html
- (17) 村木茂, JSTサイエンスポータル, 2015年5月22日 https://scienceportal.jst.go.jp/columns/opinion/20150522_02.html
- (18) Hydrogen Council, "Hydrogen, Scaling up", 2017年11月, <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-scaling-up-Hydrogen-Council.pdf>
- (19) 経済産業省, ニュースリリース, 2019年9月27日 <https://www.meti.go.jp/press/2019/09/20190927003/20190927003.html>
- (20) 山西敏彦, 山本徳洋, 「トリチウム分離に係る工業技術」, 日本原子力研究開発機構, 2014年1月15日, https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/140115/140115_01d.pdf
- (21) 福谷, 「生産研究」Vol. 59 (5), p 416 (2007), https://www.jstage.jst.go.jp/article/seisankenkkyu/59/5/59_5_416/_pdf

外部電源供給可能な燃料電池自動車が 山間地マイクログリッド運用に及ぼす効果

水野 有智（プロジェクト試験研究部 主任研究員）



1. 背景

気候変動への国際的な危機感の共有や対策の実施に伴って、従来化石燃料に比べて高価と考えられてきた再生可能エネルギー（Renewable Energy）のコストダウンが進み、同時に普及が進んでいる。他方水素を、電力需要に対して過大に発電された変動型再生可能エネルギー（VRE：Variable Renewable Energy）の貯蔵媒体や、使用時に温暖化ガス排出のない運輸燃料として普及を目指す動きがある。この流れの中で、外部電源供給が可能な燃料電池自動車（FCV：Fuel Cell Vehicle）が製品化⁽¹⁾され、実際に2019年に発生した台風災害においては、経済産業省の要請によりメーカーから派遣されたFCV、プラグインハイブリッド自動車（PHEV：Plug-in Hybrid Electric Vehicle）等が非常用電源として活躍した⁽²⁾⁽³⁾。

このような技術進展、コストダウンを勘案すると、再生可能エネルギーを主要な電源としつつ、VREの間欠性を水素や蓄電池といったエネルギー貯蔵媒体によって補いながら安定的にエネルギーを供給する「低炭素排出で持続可能なエネルギーシステム」を構築することが現実的になってきている。例えば、小規模な集落において、再生可能エネルギーと蓄エネルギー機器を使った電力供給体制（マイクログリッド）を構築することが考えられる。このようなマイクログリッドが特に有効と考えられるのは、送配電線の敷設が困難な

離島や、集中型発電所からの稠密な送配電網の末端に設備利用率の低い配電線を長く伸ばす必要がある「陸の孤島」的な小規模集落への電力供給である。このような発想は深刻な少子高齢化と人口減少が進む日本において、2050年までに日本の約6割の地域で2010年と比較して人口が半減すると予想され、各種社会インフラの維持管理が困難になりつつある中で一考に値すると考えられる。

マイクログリッドの類似研究として、電気自動車（EV：Electric Vehicle）を補助電源とするVehicle to Grid（VtoG）の可能性を検討した事例は数多く⁽²⁾、中にはFCVの補助電源としての有効性を検討した研究もある⁽³⁾⁽⁴⁾。日本においても、電力システムの視点からEVを使ったVtoGの可能性について書いた文献やEVの住宅への統合を検討した研究などもある。また、水素をマイクログリッドに用いる可能性の検討では、日本国内の離島における水素を活用したマイクログリッドの実行可能性調査（フィージビリティスタディ）に関する研究⁽⁵⁾⁽⁶⁾がある。

本稿では、弊所が2018年に受託した調査研究事業『水素利用型分散電源からのコミュニティマイクログリッドの経済性検討』の内容に基づき、VREである太陽光発電（PV）と定置用蓄電池を備える山間地集落のマイクログリッドに、外部電源供給が可能なFCVを補助電源として導入した際に生じるメリットを評価する。

2. 検討方法

本稿では、以下の2つの山間地集落モデルをシミュレーションし、比較することで外部電源供給可能なFCVを山間地マイクログリッドの補助電源として導入した際に生じるメリットを評価する。

- ケース1：再生可能エネルギー電源と蓄電池のみを備えるケース
- ケース2：ケース1の設備に加えて、住民所有のFCVを補助電源として用いるケース

(1) 山間地集落モデル

ケース1, 2ともに2030年～2035年頃を想定して、2018年においても再生可能エネルギーの大規模導入が進む九州地方、宮崎県の山間部のある集落でのマイクログリッドをモデルとした。この集落は複数世帯からなり、マイクログリッド運営者が投資をして太陽光発電設備を備え、蓄電設備として定置用蓄電池を備える。住民の一部は自家用FCVを所有しており、ケース2では所有しているFCVを各家庭からマイクログリッドに接続し、必要に応じて集落に対して一定量の電源供給を行う。このように、FCVから集落への電源供給を本稿ではVehicle to Community (VtoC) と呼ぶ。

マイクログリッドの発蓄電設備と需要家は配電線で結ばれ、各設備は自動的に制御される。ただし、配電線と制御装置に関する費用は計上しない。

国土交通省の調査⁽²⁾によると、50世帯未

満の集落が全体の60%、100世帯未満の集落だと全体の80%となる。このことから、本検討で想定する集落の世帯数を代表的な規模である50世帯とした。また、一世帯当りの平均人数を、夫婦2人+同居人0.5人の2.5人/世帯とし、集落人口は125人とした。

(2) シミュレーション方法

シミュレーション対象とするマイクログリッドの構成図を図1に示す。1時間単位、1年で8,760ステップの電力需給バランスをシミュレーションする。マイクログリッドが備える発蓄電設備の容量は、各ステップにおいて電力需要を満たす電源供給手段がなくならない大きさに決定する。発蓄電設備の容量の決定要素は、PVパネルのパネル面積、定置用蓄電池の蓄電容量、PCS (Power Conditioning Subsystem) 容量、そしてケース2に限り補助電源とするFCVの台数とする。

発蓄電設備の容量の組み合わせは複数考えられるが、ここでは、ケース1, 2間で同等な設備容量の組み合わせを選出する。

最初にケース1で、試行錯誤的に設備容量を変更し、設備投資額をそれぞれの耐用年数で均等割した金額と、年間のマイクログリッド運用経費の合計額（本稿では年間支出合計と呼ぶ）が最小となる組み合わせを「代表」とする。設備の運用状況を表す指標として、定置用蓄電池の放電量（蓄電池満充電量－各ステップのSoC (State of Charge)）を取り上げ、放電量がケース1の代表と類似する組み

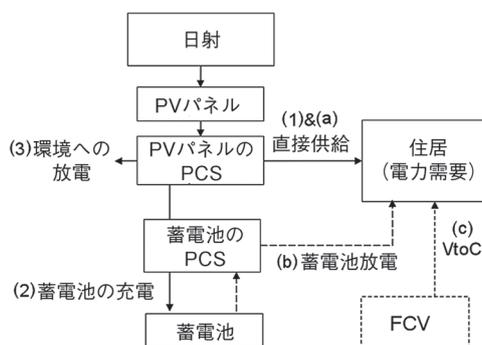


図1 マイクログリッドの構成図

合わせをケース2の代表とする。

発電についてのシミュレーションでは、日照パターンとPVパネルの発電効率、パネル面積から発電パターンを決定し、発電電力は各ステップにおいて、以下の3つの行き先に番号順で優先的に分配される。

- (1) 需要家への直接供給：太陽光発電設備から需要家に直接電力を供給する。
- (2) 蓄電池の充電：直接供給量 < 発電量のとき、かつ充電電池の State of Charge (SoC) が閾値以下であるとき、PCSの容量分蓄電池を充電する。
- (3) 環境への放電：直接供給量 + 充電量 < 発電量のとき、余った電力を環境に放出する、これを本稿では「捨電」と呼ぶ。

需要家への電源供給は以下のようにシミュレーションする。1人当り月平均電力需要を100kWhとし、集落人口125人であるから集落の年間総電力需要を150MWhとした。この150MWhを1時間毎の需要に振り分ける

電源供給パターンの形状は、文献値⁽³⁾を参考に、対象地域の気候の影響⁽⁴⁾を勘案し1時間刻み24時間分、春夏秋冬とその間の移行期8季節の5パターンを作成した。つまり、文献値に基づく夏期、冬期、春秋期の4季節分3パターンを基本とし、各時間帯の需要値を相加平均して、夏期-春秋期と冬期-春秋期間の移行期の2パターンを作成した。文献

値に含まれるコンセント、暖房、冷房、給湯エネルギー需要のうち、コンセントと冷房の100%、暖房の50%を電力需要としてシミュレーションを行う。暖房需要は電気暖房と電気以外の手段による暖房の分担を想定した。

以上の想定に基づく集落の電力需要パターンを図2に示す。この各時間帯の電力需要を以下の3つの方法で番号順に優先して供給し充足することとする。

- (a) 太陽光発電設備からの直接供給
- (b) 定置用蓄電池からの放電：需要量 > 直接供給量で、定置用蓄電池のSoCが0以上の時、PCSの容量分まで放電する。
- (c) FCVからのV to C：(a)でも(b)でも供給が不足するとき、FCVの水素タンク内水素の一部を車載の燃料電池での発電に使い、マイクログリッドに供給する。

(3) 各種設備の諸元

シミュレーションに必要な各種設備の性能、諸元は、参考文献や想定年代を考慮した技術進展を仮定して表1のように設定する。

発電設備のPVパネルの設備容量*はパネル面積(m²)で決める。想定年代の技術進展を想定して光電変換効率は19%とし、パネル単価は10万円/kWとする。パネルの設備費は、年間最大日射強度に光電変換効率とパネル面

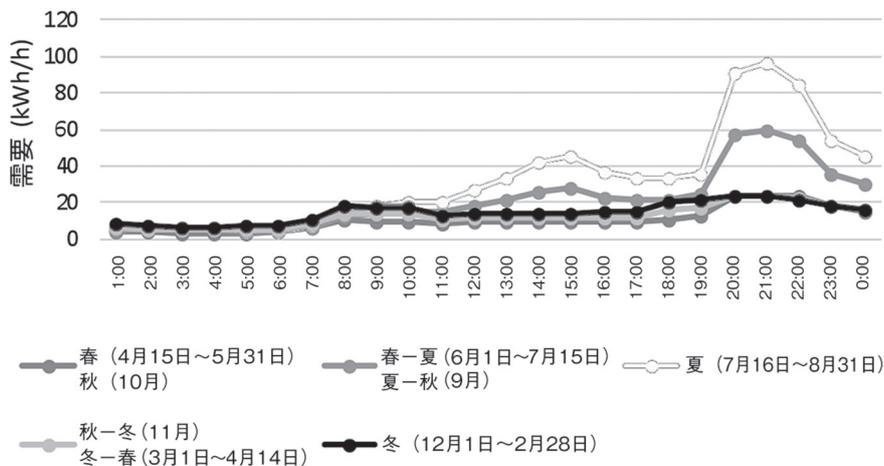


図2 集落の電力需要パターン

* P_p (PVパネル単位面積当りの電気出力 [kW/m²]) = I_h (水平面全天日射強度 [kW/m²]) × a (斜面日射強度 / 水平面日射強度) × η (直射日射強度 1kW/m²での光電変換による発電電力), ここで多結晶シリコン太陽電池の場合 $\eta = 0.17$ 程度, また, 傾斜角 30° なら, $a = 1/\cos 30^\circ = 1.15$ なので, $a \times \eta = 0.19$. 従って, $P_p = 0.19 \times I_h$

表 1 設備の諸元

設備	性能	設備投資額	維持管理費
PV パネル	効率：19% 耐用年数：25年	単価：10万円/kW	年間設備投資額の15%
蓄電池	PCS容量：100kW 充放電効率：80% 耐用年数：20年 SoC初期値：50%	セル単価：3万円/kWh PCS設備単価：4万円/kW	年間設備投資額の15%
FCV	最大VtoC発電出力：10kW 最大VtoC電源供給量：35kWh/台	FCV所有者への補助金：50万円/台	水素価格：90円/Nm ³ H ₂

積を乗じて求めた出力（kW）に単価10万円/kWを乗じて決める。パネルの耐用年数は25年とした。設備の維持管理費を年間に設備投資額の1.5%とした。日射強度パターンは、宮崎市の測候所の2016年度の1時間あたり日射強度データ⁽⁵⁾を用いる。

蓄電池システムの設備費は、電力の出し入れを司るPCSと蓄電池セルの容量を別個に想定し、性能、単価については2030年～2035年という想定時間断面を考慮して設定する。PCSの設備費単価は4万円/kW、設備容量は100kWに固定、充放電効率はレドックスフロー電池の値を参考に80%と設定する。蓄電池セルの設備単価は3万円/kWh、耐用年数は20年とする。年間の維持管理費として、PCSとセルの合計設備投資額の1.5%がかかるとした。計算にあたり、SoCの初期値を50%と設定した。充電電力量に充放電効率の80%を乗じた量が、SoCの増大に寄与すると想定した。

ケース2で取り扱うVtoCに用いるFCVは、住民が所有するものとする。稼働に必要な水素は、住民生活での通常利用の一環として集落外に出る際に、近郊にある街の水素ステーションで補給して来るものとする。住民に対するインセンティブとして、FCV購入時にマイクログリッド運営者より50万円の補助金を支給し、VtoCで消費される水素の費用は系統運営者が支払い、マイクログリッド運用経費に計上する。電源としてではなく、乗用車として使うことも考慮して、FCV1台からのVtoC電源供給量の上限をタンク満量の半分(35kWh)とし、発電出力はメーカーへのヒアリングに基づいて最大10kWとする。

実際には住民による乗用車としての使用で、タンク残量の都合上、常に1台から35kWhのVtoC電力が得られるとは限らないが、本検討では単純化し、常に1台から35kWh得られると想定する。FCV1台当りVtoC電源供給量上限の水素を使い切った後、次にVtoCに供用できるまでのインターバルを3日と設定する。3日というのは、FCV所有者が使い切ったことに気づくまでに1日、水素の補給に1日、天候不順等の余裕分としての1日からなる。この設定に基づき、ケース2のFCV台数は、任意の3日間において必要なVtoC電源供給量を35kWh/台で割った台数とした。

3. 検討結果

ケース1、ケース2のそれぞれにおいて、異なる設備構成について検討結果を述べる。この設備構成は、パネル面積－蓄電池容量－FCV台数（ケース2のみ）のハイフンでつないだ2つないし3つの数字で表す。例えば、ケース1でパネル面積1000m²、蓄電池容量100kWhの設備構成は「1000－100」と表記する。

(1) ケース1

ケース1で、発蓄電設備の設備容量を試行錯誤的に変化させ、パネル面積を1200m²～2,800m²まで、蓄電池容量を1,800kWh～850kWhまで、離散的に変化させたところ、年間支出合計が最も安価となるのはパネル面積2,000m²（設備容量396kW）、蓄電池容量900kWhの組み合わせとなった。このときの年間支出合計は595万円となった。これを「ケー

ス1代表」とした。「ケース1代表」の蓄電池 SoC の年間推移を 図 3 に示す。SoC が 200kWh を切る時間帯が、6月から7月前後に、深夜から明け方の8時間程度発生する。それ以外は概ね 400kWh ~ 900kWh までの領域で蓄電池が運用されており、年間のごく一部の時期に備えて、900kWh という設備容量を持っていることが分かる。

(2) ケース2

「ケース2代表」は、蓄電池の運用状況を表す指標として、蓄電池の放電容量（蓄電池満容量 - SoC）を設定し、「ケース1代表」の設備構成を基に試行錯誤的に検討した。図 3 から分かるように、「ケース1代表」における蓄電

池の常用領域は 400kWh ~ 900kWh の 500kWh であるため、500kWh を蓄電池容量の基準とした。その上で PV パネル面積を 200m² ずつ 2000m² ~ 1000m² まで変更した結果を図 4 に示す。PV パネル面積が縮小されると発電量が減少するため蓄電池への充電量が減少し、放電容量が増える = 曲線が上振れする傾向が見られる。ただし、図 5 に示す蓄電池容量を変化させた時の曲線の形状変化に比べると影響は小さいといえる。PV パネル面積が 1400m² 以下である3つの設備構成では、曲線がケース1代表から乖離し始めるため、PV パネル面積 1600m²（設備容量 317kW）をケース1と同等の運用が可能な最小のパネル面積とする。

次に、ケース2において、PV パネル面積を

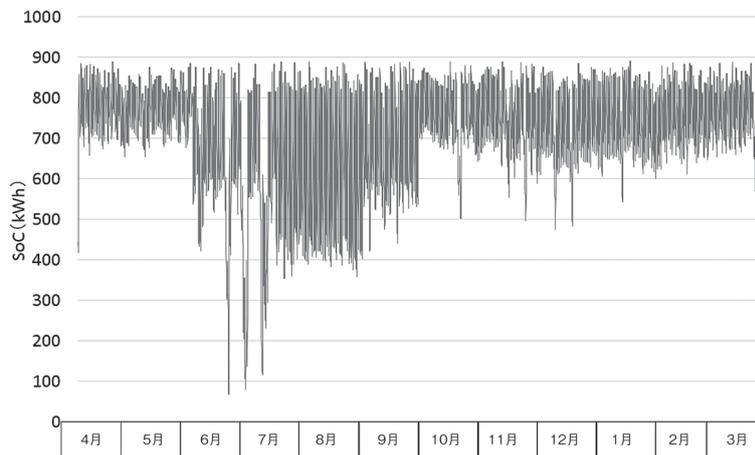


図3 ケース1代表（2000 - 900）の蓄電池残量の推移

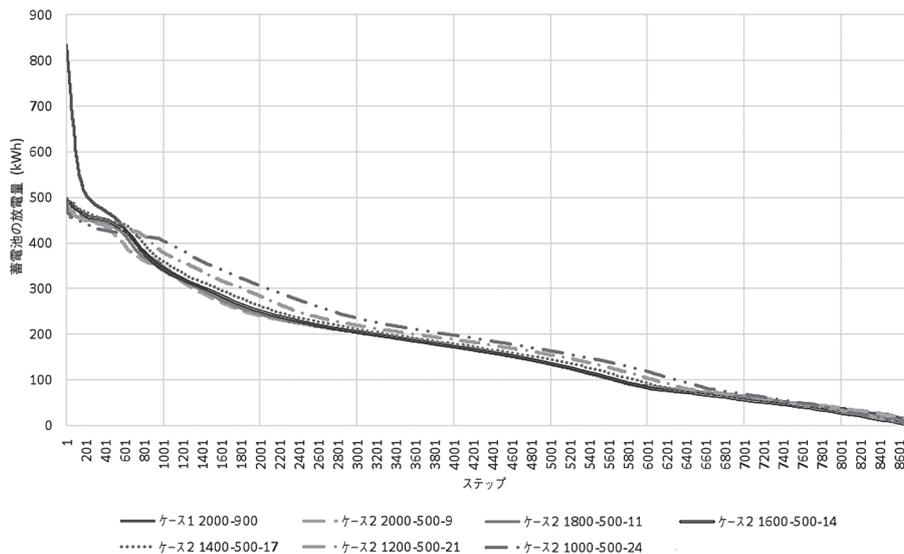


図4 蓄電池放電状況（ケース2のPVパネル容量が2000m²から1000m²へ200m²ずつ変化）

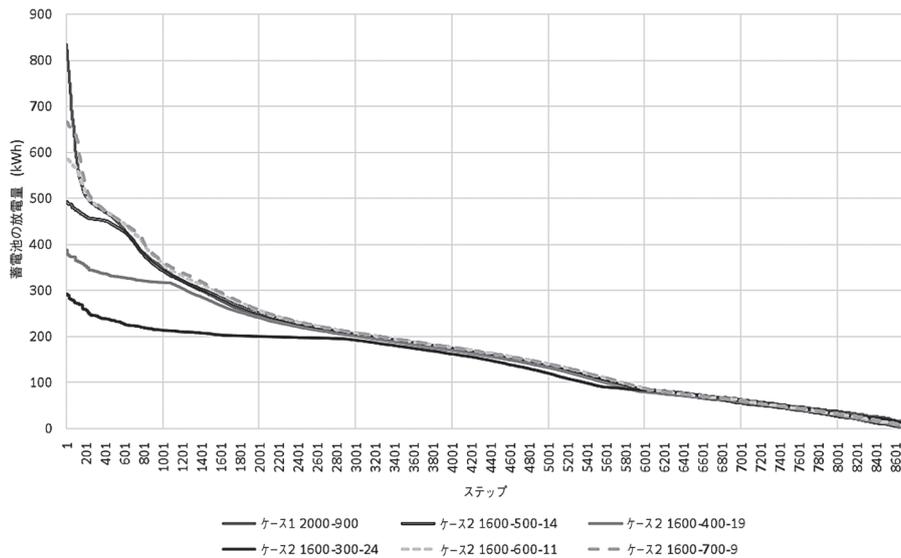


図5 蓄電池放電状況（ケース2の蓄電池容量が100kWhずつ変化）

1,600m²に固定して、蓄電池容量を100kWhずつ変更した場合の蓄電池運用状況の変化を図5に示す。蓄電池容量が大きくなると設備構成がケース1に近づくため、運用状況を表す曲線はケース1のそれに近づく。蓄電池設備を小さくすると、VtoCに必要なFCV台数が増え、ケース1の3分の1規模の300kWhの蓄電池容量に対しては、集落の世帯数の半分近い24台のFCVが必要となる。ここでは累積時間600時間以降に、ケース1に良く追随する500kWhを「ケース2代表」の蓄電池容量とする。

以上の議論に基づいて、パネル面積1,600m²蓄電池容量500kWh-FCV台数14台の設備構成

を「ケース2代表」とする。なお、このとき年間支出合計は479万円で、FCV-VtoCで1,576Nm³の水素が消費され、VtoC用水素に約14万円かかる。蓄電池の運用状況は図6のようになる。図3と比較すると、6月と7月の残量が極端に少なくなる時期をVtoCにサポートしてもらうことで設備容量を縮小でき、その結果、蓄電池を使い切るような運用となっている。

4. 考察

山間地集落に構築したマイクログリッド運用に対して外部電源供給可能なFCVが与える効果は以下のように整理できる。

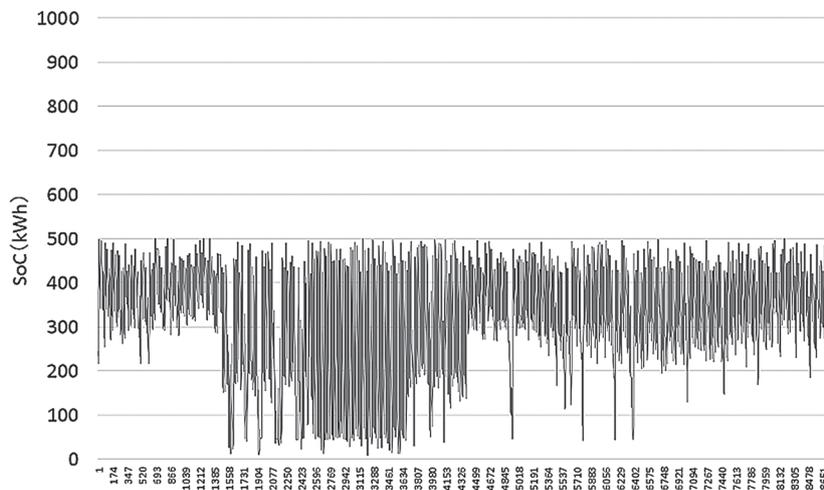


図6 ケース2代表（1600－500－14）の蓄電池残量の推移

- 住民に停電しない電力供給を行いながら、PV発電設備、蓄電池容量を縮減できる。
 - 再エネ発電設備の効率的な活用が可能
 - より狭小な集落にもマイクログリッド導入が可能
- 全体の10%未満の期間のために備えられている設備利用率が非常に低い蓄電池を、モビリティ用にも活用できるFCVで代替できる。

「ケース1代表」、「ケース2代表」のPVパネル発電電力の行き先を図7に整理した。ケース間で需要家への直接供給量と充電量は変わらないが、「ケース2代表」では、PVパネルが小規模になり総発電量が減少するため、捨電量が106MWh/年減少している。すなわち、外部電源供給可能なFCVの導入により、発電電力のうち有効に活用される割合が増えるといえる。

「ケース1代表」と「ケース2代表」を比較すると、「ケース2代表」では、PVパネルの容量が80%、蓄電池容量が56%になっている。

設備が小規模化することにより、狭小な集落に対してもマイクログリッドの導入が可能となる。図4から分かるように、PVパネル面積は蓄電池の運用状況に影響を与えづらいため、VtoC用のFCV台数を確保できる場合には、「ケース1代表」の50%程度まで面積を抑制できる。PV設備の面積を抑制できることは、敷地造成に伴う集落の環境破壊を軽減できる点からもメリットが大きい。ただし、VtoCはいわばエネルギー源を人間が手で運ぶことに等しいため、住民からするとマイクログリッドの利便性の低下につながりうる。

図4、図5から分かるように、「ケース1代表」、「ケース2代表」で蓄電池運用状況が極端に変わってくるのは、年間累計600時間程度、全体の約7%の期間となる。この期間の電力を供給する補助電源供給設備は、必ずしもFCVである必要はないが、FCVをVtoCに用いるメリットとしては、乗用車としての利用

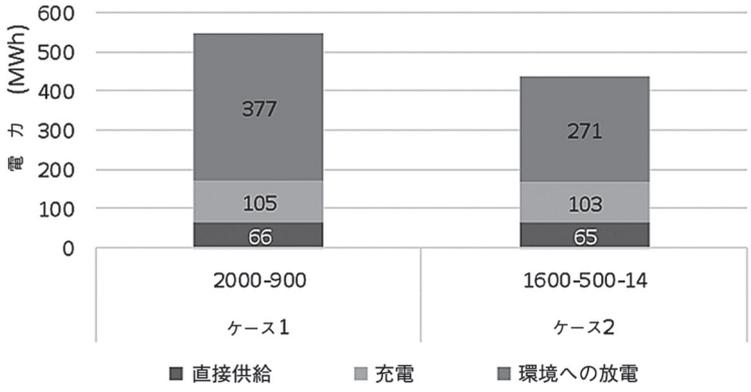


図7 発電電力の行き先

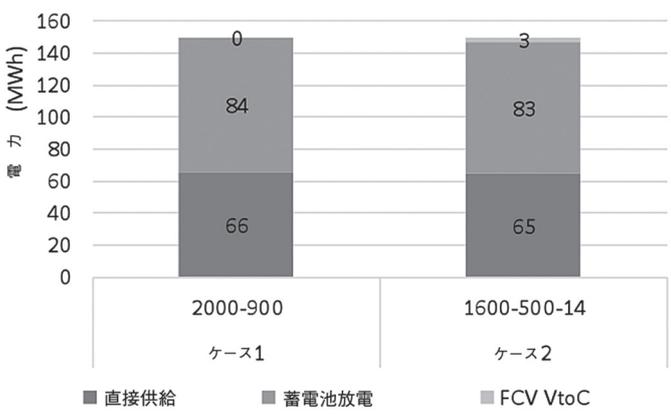


図8 集落の電力供給元

も可能なことから FCV 総体の設備利用率が高く、利用時に温暖化ガスの排出がなく、水素製造設備を集落外に持てるため、集落への設備投資額を抑えられることが挙げられる。

図 8 に示す集落の電力供給元によると、「ケース 2 代表」において FCV VtoC から供給される電力量は約 3MWh/年であり、需要全体の約 2%にあたる。このとき、FCV 1 台あたりの FCV VtoC 平均貢献回数は年間約 6 回となる。

「ケース 1 代表」と「ケース 2 代表」の年間支出合計を比較すると、前者は 595 万円/年、後者は 479 万円/年で、FCV の導入により年間 100 万円以上安価となった。ただし、これは目安であり、関連設備、水素といった諸々のコスト水準が異なれば、この関係が逆転する可能性がある。

5. 結言

本稿では、PV と定置用蓄電池を備える山間地集落のマイクログリッドに、外部電源供給可能な FCV を補助電源として導入した際に生じるメリットを評価した。FCV の導入により 1 年の 90% 以上の期間、蓄電池の運用状況を変えずに、PV 設備の容量を 80% に、蓄電池容量を 56% に縮小できることが分かった。その際、発電されたが利用先のない電力量を年間 106kWh 減少させられることも分かった。

本稿の検討では、2016 年度の 1 年間のシミュレーションしか実施しておらず、需要のデータについても文献値を基に単純化したモデルを使っている。また、今回はマイクログリッドにおける FCV のあるなしを比較したが、従来型の電力グリッドとの比較もコンセプトの妥当性を評価する上では必要となる。さらに、今回検討したマイクログリッドのモデルは、FCV を乗用車として通常運用している地域内にいつでも水素を補給できる水素ステーションがあることで成立するため、今回の検討ケースが実際に成立するのは限定的と考えられる。

今後、本マイクログリッドモデルの社会実装を試みる場合には、小規模水力等の電源を取り入れたシミュレーション、電力需要等の実データを用いた複数年度に渡るフィージビリティスタディ、VtoC に対する社会受容性調査に基づいたインセンティブ設定の検討、電力の品質の評価等が必要となると考えられる。

[謝辞]

本研究の実施にあたり、住友電気工業株式会社より有益な示唆、情報提供をいただきました。この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- (1) Honda Motor Co. Ltd, http://www.honda.co.jp/CLARITY/POWER_EXPORTER/ (Last access: 2018.06.09) : 本田技研工業株式会社, http://www.honda.co.jp/CLARITY/POWER_EXPORTER/ (Last access: 2018.06.09)
- (2) http://www.cev-pc.or.jp/xev_kyougikai/xev_pdf/xev_kyougikai_wg01-1_honda.pdf
- (3) http://www.cev-pc.or.jp/xev_kyougikai/xev_pdf/xev_kyougikai_wg01-1_toyota.pdf
- (4) 国土交通省, メッシュ別将来人口推計を活用した分析の展開, 一地域における生活関連サービスの利用可能性の分析—平成 28 年 6 月
- (5) Mwasilu, F., Justo, J. J., Kim, E. K., Do, T. D., & Jung, J. W.. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 34, 501-516, (2014)
- (6) Robledo, C. B., Oldenbroek, V., Abbruzzese, F., & van Wijk, A. J.. Applied Energy, 215, 615-629, (2018)
- (7) Alavi, F., Lee, E. P., van de Wouw, N., De Schutter, B., & Lukszo, Z.. Applied Energy, 192, 296-304, (2017)
- (8) Ota, Y., The transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan. B, A publication of Power and Energy Society, 133 (6), 497-500, (2013) : 太田豊, 電気学会論文誌 B (電力・エネルギー部門誌), 133 (6), 497-500, (2013)
- (9) Aachiq, M., Gari da Silva Fonseca Junior, J., Oozeki, T., Iwafune, Y., The transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan. B, A publication of Power and Energy Society, 135 (1), 27-34, (2015) : Mustapha Aachiq, Joao Gari da Silva Fonseca Junior, 大関 崇, 岩船 由美子, 電気学会論文誌 B (電力・エネルギー部門誌), 135 (1), 27-34, (2015)
- (10) Kurahashi, N., Kishita, Y., Kobayashi, K., Yamaguchi, Y., Fukushima, S., Umeda, Y., Prep.2012 The Japan Society for Precision Engineering Spring Meeting, L08, Mar. 14-16, 2012, Tokyo, Japan: 倉橋直人, 木下裕介, 小林和博, 山口容

- 平, 福重真一, 梅田靖, 精密工学会 2012 年度春季大会, L08, 2012.3.14-16, 東京
- (11) Murata, A., Prep. The Institute of Electrical Engineers of Japan H28 National Meeting, 7-016, Mar. 16-18, 2016, Sendai, Japan: 村田晃伸, 平成 28 年電気学会全国大会, 7-016, 2016.03.16-18, 仙台
- (12) Aizawa, Y., Murata, K., Sakata, K., Journal of the Hydrogen Energy Systems Society of Japan, 40 (4), 223-229, (2015) : 相澤芳弘, 村田謙二, 坂田興, 水素エネルギーシステム, 40 (4), 223-229, (2015)
- (13) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, <http://www.mlit.go.jp/common/001145902.pdf/> (Last access: 2018.06.09) : 国土交通省, <http://www.mlit.go.jp/common/001145902.pdf/> (Last access: 2018.06.09)
- (14) Engineering Advancement Association of Japan, Report of a study about realization of hydrogen energy supply and utilization system aimed at the revitalization of regional industry, (2007) : エンジニアリング振興協会, 平成 18 年度地域産業活性化をめざした水素エネルギー供給利用システムの実現化の調査研究報告書, (2007)
- (15) Takashima K., Ohnishi A., Okuoka K., Hirano Y., Azuma O., Tanikawa H., Imura H., Prep. Japan Society of Civil Engineers Chubu branch research presentation, VII-001, Mar. 10, 2010, Nonoichi, Japan: 高島健志, 大西暁生, 奥岡桂次郎, 平野勇二郎, 東修, 谷川寛樹, 井村秀文, 地域特性を考慮した住宅の冷暖房エネルギー消費原単位の作成, 土木学会中部支部研究発表会, VII-001, 2010.03.10, 野々市
- (16) Japan Meteorological Agency, <http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php> (Last access: 2018.06) : 気象庁, <http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php> (Last access: 2018.06.09)

研究所のうごき

(令和元年 10 月 1 日～12 月 31 日)

◇ 月例研究会

第 394 回月例研究会

日 時：10 月 11 日（金）14：00～16：00

場 所：航空会館 7 階 703 会議室

テーマ：

1. ARPA-E の動向について
((一財)エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部 部長 黒沢 厚志)
2. ネガティブエミッション技術の動向
(プロジェクト試験研究部 副部長 加藤 悦史)

第 395 回月例研究会

日 時：11 月 8 日（金）

研究会 14：00～16：00

場 所：航空会館 7 階 701・702 会議室

テーマ：

1. 台風 15 号による千葉の停電事象紹介
(プロジェクト試験研究部 参事 炭谷 一郎)
2. 再生可能エネルギーによる地域エネルギー利用事例紹介
(プロジェクト試験研究部 副部長 森山 亮)
3. パネルディスカッションによる意見交換
～地域のエネルギー利活用に関する一考察～
(プロジェクト試験研究部 部長 徳田 憲昭)

第 396 回月例研究会

日 時：12 月 13 日（金）

研究会 14：00～16：00

場 所：航空会館 5 階 501・502 会議室

テーマ：

1. 「IAEA 主催 OECD/NEA 共催 気候変動と原子力の役割に関する国際会議」の諸議論とそこからの示唆
(プロジェクト試験研究部 原子力グループ 研究員 高野 大志)
2. 世界の原子力に関する最新動向と今後に向けた考察
(企画部 部長 茶木 雅夫)

◇ 外部発表

[講演]

発表者：加藤 悦史

テーマ：Seminar on Global Carbon Budget 2019

発表先：Global Carbon Budget 2019 に関するセミナー（主催 国立環境研究所）

日 時：12 月 9 日

発表者：岡崎 徹

テーマ：再エネ大量導入に向け急速に顕在化しつつある蓄熱発電とその課題

発表先：機械学会研究会（東京大学本郷キャンパス）

日 時：12 月 23 日

[学会発表]

発表者：水野 有智, 石本 祐樹, 飯田 重樹

テーマ：A Feasibility Study of a Japanese Power to Gas Concept - A Case Study of Rokkasho Village -

発表先：EcoDesign 2019（於パシフィコ横浜）

日 時：11 月 25 日

発表者：加藤 悦史, 黒沢 厚志

テーマ：Analysis of Japanese energy system toward net-zero CO₂ emissions with TIMES-Japan -role of BECCS and DAC

発表先：12th IAMC Annual Meeting, Tsukuba, Japan, 2 - 4 December 2019

日 時：12 月 2 日

[寄稿・投稿]

寄稿者：飯田 重樹

テーマ：水素エネルギーシステム

寄稿先：化学工学誌 83 巻 10 号『化学工学年鑑 2019』（10 月号）

寄稿者：徳田 憲昭, 森山 亮

テーマ：未利用エネルギーによる発電

寄稿先：電気設備学会 10 月号 特集号：テーマ「電気設備の近未来」

発表者：酒井 奨

テーマ：CO₂の有効利用（CCU）とカーボンリサイクル（CR）

寄稿先：(一社)日本ボイラ協会『ボイラ・ニュース』
(11月号)

寄稿者：黒沢 厚志

テーマ：2050年に向けたエネルギー展望～エネルギー・資源学会における検討事例～

寄稿先：日本太陽エネルギー学会『太陽エネルギー』Vol.45 No. 6（2019年11月）

投稿者：加藤 悦史他

テーマ：Global Carbon Budget 2019

投稿先：“Earth System Science Data,” 11, 1783-1838, 2019, DOI: 10.5194/essd-11-1783-2019

発表日：2019年12月4日

◇人事異動

なし

編集後記

本季報では、当研究所の調査研究から、地球環境関係2件、水素エネルギー関係2件の計4件の報告を取り上げている。

地球環境については、パリ協定の目標達成を目指した取組として、大気中からCO₂を取り除く技術、いわゆるネガティブエミッション技術の研究開発動向について、また、エネルギー分野のイノベーションに向けアメリカのエネルギー高等研究計画局（ARPA-E）で進められている革新技術研究開発に関するプログラムについて紹介している。

また、水素エネルギーについては、海外のCO₂フリーエネルギーの導入により

低炭素社会を構築する方策に関し、その際の水素の有効性や水素の普及規模についての研究結果を報告するとともに、間欠性の再生可能エネルギーである太陽光発電と定置用蓄電池からなるマイクログリッドに、外部電源供給が可能な、水素を燃料とする燃料電池自動車を補助電源として導入した際のメリットを評価した結果について紹介している。

エネルギー・環境を巡る内外の情勢が絶えず変化する中、今後の事業活動に関する検討等のご参考となれば幸いです。

編集責任者 重政弥寿志

季報 エネルギー総合工学 第42巻第4号

令和2年1月20日発行

編集発行

一般財団法人 エネルギー総合工学研究所

〒105-0003 東京都港区西新橋1-14-2

新橋SYビル(6F)

電話 (03) 3508-8891

FAX (03) 3501-1735

<http://www.iae.or.jp/>

(印刷) 株式会社 吉田コンピュータサービス

※ 無断転載を禁じます。