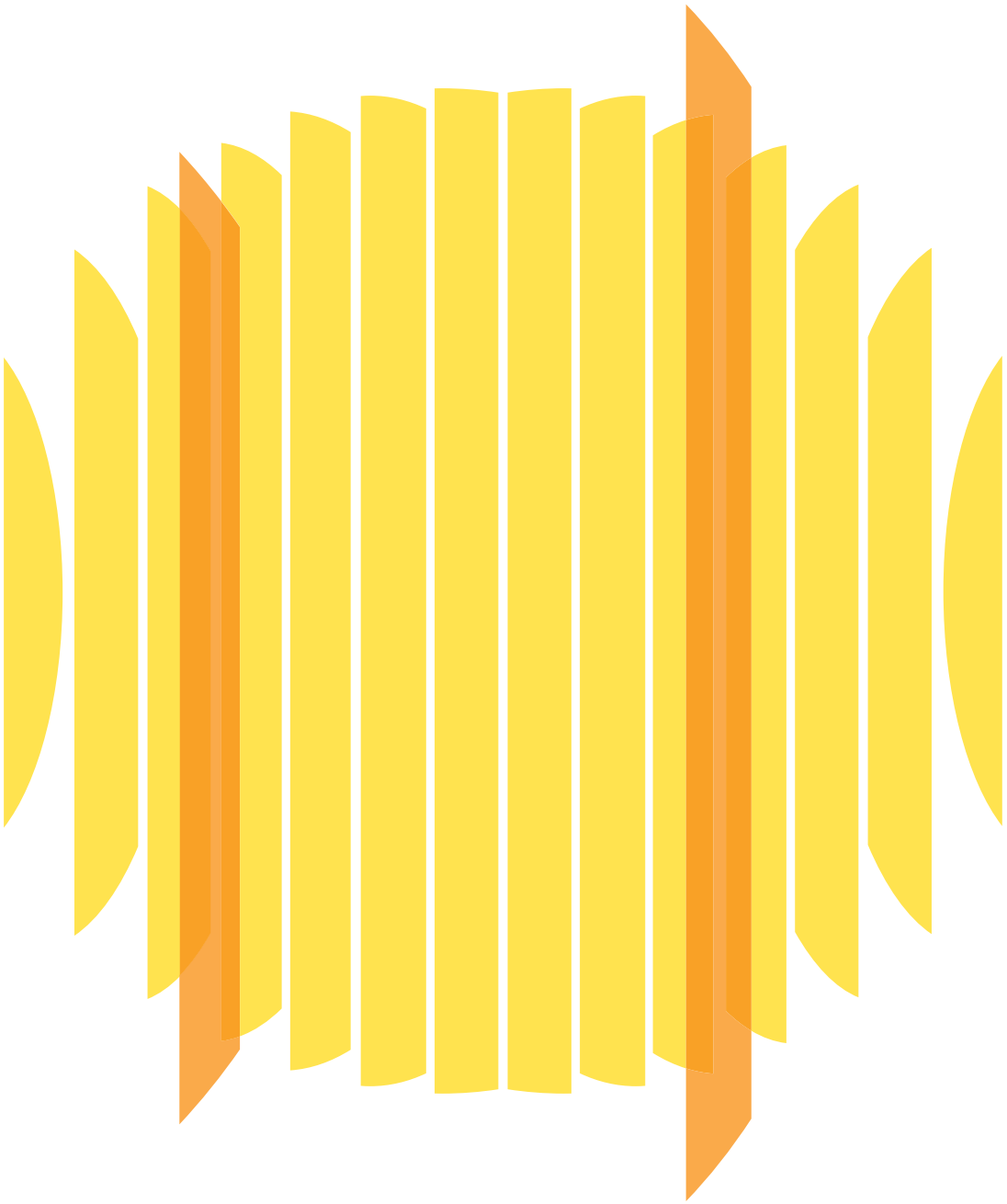
ISSN　0286—3162

季報　エネルギー総合工学

Vol. 40　No. 3　　2017. 10



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

【巻頭言】
急速に進展するデジタル化
一般社団法人　日本電機工業会
代表理事・専務理事　海老塚　清 …… 1

【寄稿】
水素社会への道と
水素エネルギーキャリアとしてのアンモニアの可能性
住友化学㈱　主幹
内閣府戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）
「エネルギーキャリア」サブプログラムディレクター　塩沢　文朗 …… 3

【寄稿】
エネルギーハーベスティングの動向と
エネルギー産業（電力，ガス，石油）への応用可能性
㈱NTT データ経営研究所
社会・環境戦略コンサルティングユニット
シニアマネージャー　竹内　敬治 ……16

【調査研究報告】
再生可能エネルギー火力発電システム研究会の成果
元（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
参事　小川紀一郎
（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長　理事　蓮池　宏
（一財）エネルギー総合工学研究所　主管研究員　川村　太郎
元（一財）エネルギー総合工学研究所　研究員　福見　拓也
JFE エンジニアリング㈱　主席　鈴木　康夫
JFE エンジニアリング（株）　環境本部経営スタッフ　後藤　典久
中国電力㈱　エネルギア総合研究所マネージャー　谷川　博昭
中国電力㈱　エネルギア総合研究所担当副長　和田　泰孝
（公財）廃棄物・３Ｒ研究財団　上席研究員　渡辺　洋一 ……28

【調査研究報告】
二酸化炭素回収・貯留（CCS）の国際標準化
プロジェクト試験研究部　環境グループ　主管研究員　山下　敏 …… 39

【研究所のうごき】 …… 49

【編集後記】 …… 52

巻頭言

急速に進展するデジタル化

海老塚　清（一般社団法人　日本電機工業会 代表理事・専務理事）

エネルギー市場の自由化，長期エネルギー需給見通しを踏まえたエネルギー産業の需給構造，事業形態の急速な変化と共に，IoT やビッグデータ活用，人工知能（AI）などデジタル化が急速に進展している。

デジタル化の世界的な潮流のなか，大量のセンサーデータや運用データを解析するプラットフォーム構築，解析結果から生まれるアプリケーション開発，顧客の求める総合的サービス・ソリューションの提供に，世界および日本の企業は，自らのバックボーンの強みを生かしてしのぎを削っている。日本のやや出遅れを指摘する声もあるが，高度なものづくり力や質の高い運用力，また様々な形態に適用する「モジュール化」や「システム化」力，そして結局これらを実現する「モノ」の力も日本の強みであり，これらを生かし日本企業は新たな強みの創造にチャレンジしている。

AI の進化も急速だ。全体では幼児のレベルとも言われるが，目的・判断基準が明確な事象や業務に対しては，ディープラーニングで進化し，処理能力としてもはや人間は太刀打ちできない領域もでてきて本格的実用化段階に入ってきており，自律分散的なエッジコンピューティングなど様々な形態での進化が期待される。

日本では日本語の壁から普及が遅れているが，IT 企業の提供する音声認識インターフェースは欧米で急速な普及をみせており，それぞれのサポートする機能や世界中で開発される関連アプリで提供されるサービスは急速に拡大して幅広い分野へ応用が予想され，どのような形態に進むか注目される。

本年はエネルギー基本計画の見直しの年にあたり，将来のエネルギー政策についての議論が開始されているが，世界的なエネルギーセキュリティリスクは増大し，地球環境保護の必要性への認識は高まっており，2030 年の先の将来をみてエネルギー政策の進むべき方

向性をしっかり議論し，世界に先駆け，様々な課題を解決するエネルギーシステムを構築してゆくことが求められる。今後，エネルギーはじめ様々なユーティリティ間のサービス相互補完や統合化も進んでゆくと考えられるが，デジタル化の進展はこれまで実現できなかったことを実現可能とし，提供できるソリューションは飛躍的に広がってゆく。グローバルの動きをしっかり捉えつつ，こうありたいという将来像を描く上で，いろいろな可能性が実現できる時代に入ってきた。

［寄稿］

水素社会への道と
水素エネルギーキャリアとしてのアンモニアの可能性

塩沢　文朗
住友化学㈱　主幹
内閣府戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）
「エネルギーキャリア」サブプログラムディレクター

1．“水素社会”の日本のエネルギー政策における位置づけ

政府がエネルギー政策の基本的方針を示す「エネルギー基本計画」において，初めて“水素社会”の実現に向けた取り組みを加速することを明記したのは2014年４月のことである。同計画では，水素を「（エネルギーの）安定供給と地球温暖化対策に貢献する」エネルギーと位置付け，水素について次のように記載している(1)。

「（水素は）無尽蔵に存在する水や多様な一次エネルギー源から様々な方法で製造することができるエネルギー源で，気体，液体，固体（合金に吸蔵）というあらゆる形態で貯蔵・輸送が可能であり，利用方法次第では高いエネルギー効率，低い環境負荷，非常事対応等の効果が期待される水素は，将来の二次エネルギーの中心的役割を担うことが期待される。」

そしてエネルギー基本計画は，“水素社会”を実現していくための取組みを戦略的に進めるとし，次のような取組み課題を掲げている。

（１）定置用燃料電池（エネファーム＊1等）の普及・拡大，

（２）燃料電池自動車（FCV）の導入加速に向けた環境の整備，

（３）水素の本格的な利活用に向けた水素発電等の新たな技術の実現，

（４）水素の安定的な供給に向けた製造，貯蔵・輸送技術開発の推進。

さらに同計画は，“水素社会”の実現は，国や地方自治体のみならず広範な分野の事業者の能動的な関与が必要な大事業であることから，日本としての“水素社会”の実現に向けたロードマップを策定することが不可欠とした。

これを受けて資源エネルギー庁に置かれた水素･燃料電池戦略協議会は，2014年６月に「水素・燃料電池戦略ロードマップ」をとりまとめている。その後，2016年３月に同ロードマップは改訂され，2020年までに家庭用エネファーム140万台，FCV ４万台；2030年までにエネファーム530万台，FCV 80万台の普及目標を掲げた。国は，この目標の達成を目指して，エネファームやFCVの普及の支援，水素ステーション（ST）等の必要なインフラの整備のための取り組みを進めている＊2。

エネルギー基本計画では，さらに「水素の利用技術の実用化については，定置用燃料電池や燃料電池自動車にとどまらず，水素発電にまで拡がっていくことが期待される」と記している。

2．水素エネルギーの導入の効果

実は，“水素社会”が実現するためには，発

＊1　エネファームとは，家庭用燃料電池コジェネレーションシステムの略称で，燃料電池実用化推進協議会（FCCJ）が家庭用燃料電池の認知向上を推進する取り組みとして，企業に関係なくこの略称を決定したもの。

＊2　エネファームは2017年５月までに累計で20万台以上，FCVは2016年末で約1,500台が普及。水素STは，2017年６月現在で91カ所まで設置が進んでいる。

電の分野で水素エネルギー＊3利用が拡がっていくことが不可欠である。燃料電池に係る導入目標が達成されたとしても，それは“水素社会”の端緒を開くに過ぎないものであるからだ。

エネファームとFCVの導入目標が達成された場合の普及効果を試算してみると，その効果はエネファームで2030年において日本の最終エネルギー消費量を約0.6 %，二酸化炭素（CO_2）排出量を約0.6 %削減；FCVで日本の化石燃料消費量を約0.3 %，CO_2排出量を約0.1 %削減する程度にとどまる。

この程度の効果に留まる理由の1つは，**図1**に示すように，エネファームが関係する「家庭部門」と，FCVの関係する「旅客自動車部門」の日本の全化石燃料消費量に占める割合がそれぞれ6%，11 %程度と少ないこと，そしてエネファーム，FCVの普及目標の水準が日本の世帯数約5,000万世帯，乗用車保有台数約6,000万台に比べるとまだ低いためだ。もう1つの理由は，FCVの普及台数が80万台程度であれば，必要となる水素量は石油精製の製油所等で化石燃料の改質により製造された水素（改質水素）で賄うことが可能だからだ。改質水素は製造の際にCO_2を排出する＊4。

この水素エネルギーが何から作られたものであるのかという点は，水素エネルギー問題を考えるうえで重要である。水素は水などの水素化合物に一次エネルギーを用いて取り出す二次エネルギーなので，水素を得るために用いる一次エネルギーの種類によっては，水素はCO_2フリーのエネルギーとはならないからだ。

エネファームとFCVの普及率を上げていくことは重要であるが，これだけでは水素エネルギー導入の効果には限りがある。しかし，これらの水素エネルギー利用機器が普及することは，“水素社会”の構築に向けて重要なことである。何故なら水素エネルギーの導入を進めていくためには，その供給チェーンの整備と水素エネルギーに対する社会からの受容を得ていくことが必要となるが，エネファーム，FCVの導入と利用の拡大を図ることは，これらの課題の解決に向けた道筋をつけていくことになるからだ。

日本で化石燃料を大量に消費している分野は，**図1**で示したように，発電分野，製造業分野である。エネルギー基本計画にも記されているように，発電分野では，既存のガスタービンでの一定程度の水素混焼は，既に技術的には可能である。さらに，後述するように，最近の技

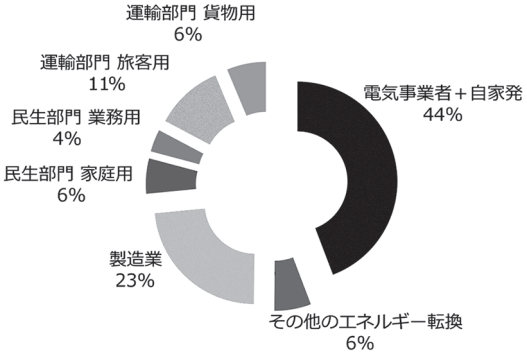


図1　日本の化石燃料の消費分野（2013年度）

＊3　ここで「水素」ではなく「水素エネルギー」と記したのには理由がある。後述するように，水素エネルギーは，（物質としての）水素の燃焼だけでなく，（アンモニア（NH_3）のような）水素以外の物質に姿を変えた物質の燃焼により，利用することが可能だからである。

＊4　FCVを通常の乗用車と同様に使用した場合，FCV 1台に年間必要となる水素量は約1,000 m^3なので，2030年において80万台のFCVの水素需要を満たすためには，約8億Nm^3/年程度（Nm^3は0℃ 1気圧の下で1 m^3となる体積量）の水素供給が必要になる。一方，国内の水素供給可能量は，製油所の水素製造装置等で製造されるものが約65億Nm^3程度あると見られている（「CO_2フリー水素チェーンに向けたアクションプラン研究会報告書」（一財）エネルギー総合工学研究所（2014年3月）及び「製油所からの水素供給能力評価調査報告書」（JPEC2012LP-01））。

術開発成果によって，発電分野への水素エネルギー導入の技術的，経済的可能性は一層高まっている。仮に，発電分野での化石燃料消費量の20% にあたるエネルギー量を水素エネルギーで代替できるようになると，日本の化石燃料消費量，CO_2 排出量は，ともに 10% 程度削減することが可能となる。さらに今後，様々な分野で電化率が一層高まっていく可能性が大きいことを考えると，発電分野で水素エネルギー利用が進むことの効果は極めて大きい*5。

3．日本が直面しているエネルギー環境制約

日本が化石燃料消費量の削減を進めることの重要性については一般的な理解があると思うが，これにとどまることなく，いま“水素社会”の構築に取り組むことの重要性を理解していただくために，日本が直面しているエネルギー環境制約の実態を改めて見ていきたい。

気候変動問題に対する世界の取組みは，2015年の「パリ協定」の締結によって新たな局面に入った。パリ協定で合意された重要な点のひとつは，世界全体の平均気温の上昇を産業革命以前に比べて２℃よりも十分に低く保つとともに，1.5℃に抑制する努力を追求することであるが，この将来の気温上昇抑制に係る目標と，気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が示した「気温上昇と CO_2 の累積排出量との間には比例関係がある」という科学的見解から導かれる論理的帰結は大きな意味を持つ。それは，いつの日かは CO_2 排出量をゼロかマイナスにしなければ，先の温度上昇に係る目標は達成できないことを示しているからだ。

世界では中国やインド，そしてこれまで気候変動対策に後向きだった産油国，そして多くの開発途上国もパリ協定に合意した。より実質的に意味があるのは，産業界や投資家といった経済活動を担う主体が，低炭素社会への転換をむしろ新たな事業機会ととらえ，CO_2 の大幅な排出削減に向けた取り組みを進めようとしていることだ。これがパリ協定の前後で起きた世界の潮流の大きな変化である。先ごろ米国のトランプ政権はパリ協定からの脱退を表明したが，米国でも今後，産業界や州レベルでの取り組みが進み，かなりのスピードで CO_2 の排出削減が進むとみられている。

日本も 2050 年に向けて CO_2 排出の 80% 削減を図るとしている（2012 年 4 月，閣議決定）。日本は 2012 年以降，一次エネルギー供給の 92 ～ 93% を化石燃料に依存しているので，化石燃料への依存を大幅に減らさない限り，このレベルの排出削減はできない。化石燃料が枯渇性資源であることを考えると，2050 年に向けてこのような高いレベルの化石燃料への依存をし続けることのリスクも大きい。

CO_2 を排出しないエネルギー源としては原子力エネルギーがあるが，現在建設中または停止している原子力発電所（以下，「原発」）のすべてが順調に稼働または再稼働したとしても，2050 年には多くの原発が寿命を迎え，その設備能力は，今後減少する。原発をめぐる厳しい世論に大きな変化が起きて，原発の建て替えや新設が進むようにならない限り，今後 2050 年に向けて日本の一次エネルギー供給の中で原子力エネルギーの割合が高まっていくことは考えにくい。

一次エネルギーは，化石燃料，原子力，そして再生可能エネルギー（再エネ）からなる（言い換えれば，それ以外のエネルギーはない）ので，上述のような状況を考えると，一次エネルギーを必要量確保しつつ，CO_2 の排出を 80% 減らすほどの規模で化石燃料への依存を大幅に減らすためには，再エネの大量導入に取り組むことが不可欠なことは明らかだろう。日本は「原発か再エネか」ではなく，「原発も再エネも」確保していかなければならない状況にある。

＊5　製造業分野への水素エネルギーの導入も同様に重要である。ただ，製造業分野ではさまざまなタイプの燃焼機器が使われているため，それぞれの燃焼機器において水素エネルギー利用技術の開発が必要となる。

4．水素エネルギーの重要性

そのために国内に賦存する再エネ資源を可能な限り活用していくことは重要だ。しかし日本は，その地理的環境（日射量，日射強度，風況等）から，質的にも量的にも国内の資源には恵まれていない。実際，このことは再エネのコストにも表れている。資源エネルギー庁の資料によると，2030年における日本の太陽光発電のコスト目標が14円/kWh，風力発電のコスト目標が８～９円/kWhであるのに対し，再エネ資源に恵まれている地域においては既に３セント/kWhという発電コストが実現している[(2)]。

これらの事実から明らかなことは，日本が直面しているエネルギー環境制約を克服するためには，資源に恵まれた海外の再エネ資源の利用を図る手立てを持つ必要があるということだ。国内の再エネ資源の活用を図ることは重要であるが，経済や国民生活に大きな負担を強いることなく導入できる再エネの量は限られている。

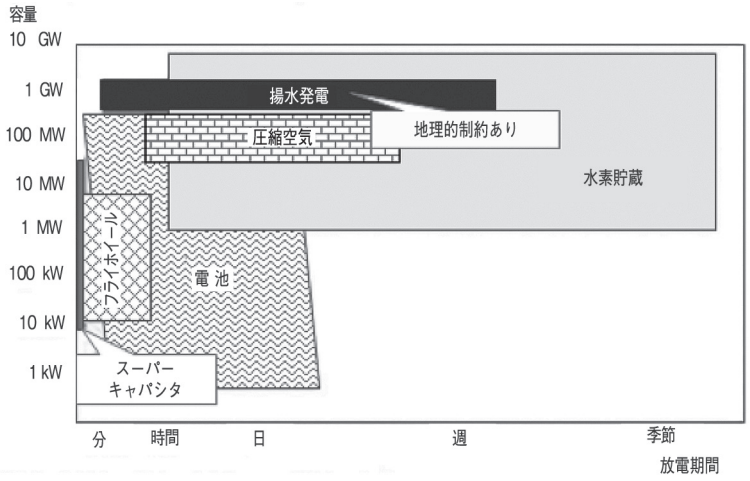
それでは，どのようにして海外から再エネの大量導入を図るのか。

太陽，風力エネルギー等の再エネは，ふつう電気や熱エネルギーに変換されて利用されるが，大量の電気や熱を長距離輸送することは困難である。さまざまなエネルギー貯蔵手段の中では，電力を蓄積できる量，時間の長さの両面ともに，化学エネルギーの形態での貯蔵がもっとも優れている。化学エネルギーの中でも水素は，地球上に豊富に存在する水と再エネから製造できる。こうした理由で，水素を始めとする水素化合物に姿を変えた化学エネルギー，すなわち水素エネルギーを海外からの再エネの大量導入手段として，利用することが重要となるのである。蓄電池が電気を貯める有力な手段として挙げられることがあるが，そのエネルギー貯蔵能力は，図２に示すように水素に遠く及ばない。

こういった理由で，再エネの大量導入手段として，水素エネルギーを活用し，“水素社会”の構築を図ることが重要なのである。

5．水素エネルギー導入の可能性と対象分野

先に，発電分野への水素エネルギーの導入が進むかどうかが，“水素社会”の実現の鍵を握ると記したが，それでは，水素エネルギーを日本の発電分野へ導入する技術的，経済的可能性はあるのだろうか？



出所：EnergyTechnology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells, JRC Scientific and Policy Report 2013を筆者が翻訳

図２　さまざまなエネルギー貯蔵媒体の特徴

発電分野におけるさまざまなCO_2排出削減手段の経済性に係る調査分析結果*6によると，水素エネルギーの導入は，原子力，火力発電への二酸化炭素回収・貯留（CCS）施設の付設という方策に次いで，競争力のある手段と考えられている。国内における原発やCCSの建設可能性，さらにはCCS建設コストに係る不確実性の大きさなどを考えると，これらの中でも水素エネルギーの導入は，現実性があり，かつ，経済的にも有力なCO_2排出削減の手段なのである。

水素エネルギーの経済性に関しては，水素のプラント引き渡し価格が30円/Nm^3-H_2以下になるとLNGによる発電コストと競合可能となるとの調査結果があり*7，そのコスト水準は，海外からCO_2フリー水素エネルギーを導入する場合でも，十分に実現可能性がある水準と考えられている。実際，2020年代後半にこのコスト目標をクリアすることを目指した取り組みが進められている(3)。なお，水素エネルギーの導入方法としては，後述のように，水素だけでなく水素をより一層，輸送・貯蔵しやすいエネルギーキャリアの形に変えて導入する取組みも進みつつあるが，その場合もこのコスト目標が開発にあたっての1つの目安とされている。

いったん発電分野で水素エネルギーの利用が始まると，量的にはエネファームやFCV向けの必要水素量とは比べものにならないほど大量の水素が必要となる。例えば，60万kWの水素専焼火力発電所1基で年間に必要とされる燃料水素の量は，Nm^3の単位で表した場合 約25億Nm^3で，これはFCVの250万台/年分の量となる。また，例えば，今後2030年までに新設・リプレースされるLNG火力発電所でLNGに50%の水素が混焼されるようになると，水素需要量は約220億Nm^3にのぼる。つまり，発電分野で水素エネルギーの導入が始まると，またたく間に水素需要量が国内水素源からの水素供給可能量（＊4を参照）を超え，海外からの水素エネルギーの大量導入が必要となる。海外から導入する水素エネルギーはCO_2フリーであることが前提として考えられていることから，それによってそれまでFCVやエネファーム燃料向けに用いられていた改質水素も，CO_2フリー水素エネルギーで置き換えられていくことになるだろう。こ

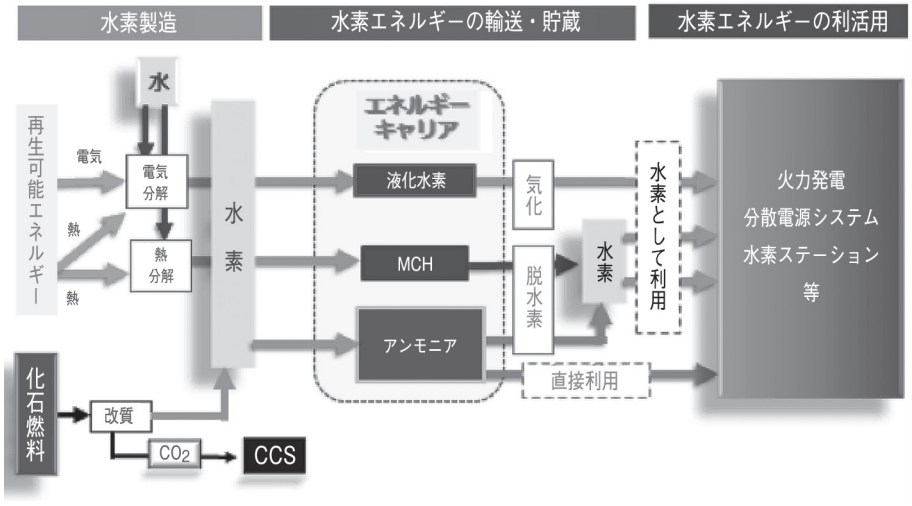


図3　CO_2フリー水素エネルギーのバリューチェーン

＊6　例えば,「2050年の低炭素社会に向けた水素エネルギーの位置づけと導入見通し」 松尾雄司, 川上恭章, 江藤諒, 柴田善朗, 末広茂, 柳沢明,（一財）日本エネルギー経済研究所, 2013年4月。

＊7　「CO_2フリー水素チェーン実現に向けたアクションプラン研究成果報告書（平成24年度)」,（一財）エネルギー総合工学研究所（2014)。但し，最近ではLNG価格の低下もあり，水素がLNGと競合可能となるためには，もっと水素価格が下がる必要があると言われている。しかし, LNGと水素の競争力の相対関係は, LNGの価格動向やCO_2排出へのペナルティの大きさ等により大きく変わり得ることから，現段階で確度の高い比較評価を行うことは難しい。

れによって，水素エネルギーの効果がフルに発揮されるようになり，“水素社会”への移行が加速される。

6．“水素社会”構築に必要な取組み

こうした“水素社会”の構築には，海外からのCO_2フリー水素エネルギーのバリューチェーンの構築が必要となる。そのためには，できるだけ安価で大量のCO_2フリー水素エネルギーを製造する技術，それを運搬・貯蔵する技術，そしてそれを利用する技術の開発と，それに加えて大量のCO_2フリー水素エネルギーを取り扱うことのできるインフラの整備が必要となる。

CO_2フリー水素エネルギーの製造から利用にいたるバリューチェーンとして，**図3**に示すようなものが構想され，その構築に向けた取り組みが進んでいる。順を追って見ていこう。

（1）CO_2フリー水素の製造

CO_2フリー水素を製造する代表的な方法は，再エネから得た電力または熱エネルギーで水を電気分解しCO_2フリー水素を製造する方法である。この方法では，安価な再エネ電力の確保と，電気分解コストの低減が重要となる。世界では再エネによる発電コストが近年になって大幅に下がっている。既に一部では3セント/kWhを切る電力も実現しているが，課題は，24時間安定的に水の電気分解に必要となる再エネを確保することにある。このため水力や風力等の他の再エネや，エネルギー貯蔵が可能な太陽熱との組み合わせ等によって，安定的に再エネ電力を確保し，それによって電解プロセスの稼働率の向上を図る方策が模索されている。

電気分解コストの低減のために，電解効率の向上と電解設備コストの低減にも取り組む必要がある。水の電気分解技術は既に存在するものの，現状の技術の電解効率にはまだ改良の余地がある。このためアルカリ水電解の改良に加えて，固体高分子膜電解，高温水蒸気電解技術の開発，改良などが進められている。また，電解装置の大型化などによる電解設備コストの低減も図られている。

理論的には高温の太陽熱等を利用して水を直接熱分解することにより，電気分解よりも高効率で水素製造を行うことが可能となるが，その研究開発はまだ基礎研究の段階にある。

（2）CCSを利用したCO_2フリー水素の製造

再エネからのCO_2フリー水素の製造コストが低減していく間のCO_2フリー水素の製造方法として，最近，注目されているのが化石資源の改質により水素を製造し，その際に発生するCO_2をCCSで貯留することによりCO_2フリー水素とすることである。これは技術の進歩によってCCSコストが低減したことにより可能になった。さらに，分離したCO_2を 石油増進回収（EOR，Enhanced Oil Recovery）に用いることができる地域ではCO_2をEOR向けに販売することも可能なので，この方式によってCO_2フリー水素製造コストを低減することもできる。

このような実用段階に達したCCSの利用から，再エネ利用によるCO_2フリー水素製造への段階的な展開を図るアプローチは，エネルギー資源とCCSの適地に恵まれた国々にとっては，技術進歩に応じたCO_2フリー水素の供給体制を整えることを可能とするものである。また，これは自国の化石資源を「座礁資産」とすることなく，水素エネルギー源として新たに活用する可能性を拓くものでもある。実際，中東の産油国の中には，このアプローチに大きな関心を示している国がある。

再エネからCO_2フリー水素を安価に，かつ，大量に製造できるようになるまでには若干の時間を要すると考えられることから，実際にもCO_2フリー水素の供給体制の構築は，こうした形で進んでいく可能性が高いように思われる。

（3）CO_2 フリー水素エネルギーの輸送

次に，製造した CO_2 フリー水素エネルギーをどのように運ぶか。特に発電分野に CO_2 フリー水素エネルギーを導入するためには，先に述べたような規模の大量の水素エネルギー輸送・貯蔵を可能とする技術が必要になる。

水素は水素エネルギーとして重要な物質なのだが，しかし，これを大量に輸送・貯蔵することは容易ではない。

水素は常温常圧では気体であり，体積当たりのエネルギー密度が大変に小さい物質である。エネルギー密度を高め，輸送，貯蔵しやすくするためには液体にすることが望ましいが，水素は－ 253℃ といった極低温まで冷却しないと液化しない。この極低温下では，真空断熱といった高度の断熱対策を講じた容器でも外部からの自然入熱が避けられず，水素の蒸発潜熱も非常に小さいことから，液化した水素からのボイル・オフ（自然蒸発）を完全に防ぐことはできない。また水素は金属を脆くする性質がある。このため金属脆化と高圧に耐え，漏洩の起きない特別な容器で輸送，貯蔵する必要がある。そして水素は爆発限界が極めて広く，最小着火エネルギーも非常に小さいため爆発しやすい。

以上のような水素の性質を考慮すると，水素を何らかの方法で長距離，大量輸送が可能な形にするための対策が必要となる。

（4）エネルギーキャリア

こういったことから，水素を輸送，貯蔵が容易な状態や別の物質に変えて，水素のもつエネルギーを運び，利用するというアイデアが生まれた。「エネルギーキャリア」とは，そうしたもののことである。

エネルギーキャリアの開発・利用は，内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）の１テーマとして取り上げられている。SIP は，2014 年 6 月から始まった府省・分野の枠を超えたプログラムで，総理大臣により任命されたプログラムディレクター（PD）が課題分野の基礎研究から実用化，事業化までを見据え，関係府省の施策を糾合して同分野でイノベーションを創造する役割を負う。「エネルギーキャリア」の PD は，村木東京ガス（株）アドバイザー，PD の補佐として東京工業大学の秋鹿名誉教授と筆者がサブ PD を務めている。

SIP「エネルギーキャリア」では，液化水素，メチルシクロヘキサン（MCH），アンモニア（NH_3）をその対象として取り上げている。以下にその概要を記す。また，関連する物性値は**表 1** に示す。

【液化水素】

水素を－ 253℃ まで冷却して液化し，水素の体積を気体状態の水素の約 800 分の１にして輸送，貯蔵するというアプローチ。利用時は，液

表１　各エネルギーキャリアの物性

	水素含有率（重量％）	水素密度（kg-H_2/m^3）	沸点（℃）	水素放出エンタルピー変化*（kJ/mol H_2）	その他の特性 **
液化水素	100	70.8	-253	0.899	強引火性，強可燃性，爆発性
圧縮水素（350気圧）	100	23.2	-	–	
圧縮水素（700気圧）	100	39.6	-	–	
メチルシクロヘキサン（MCH）	6.16	47.3	101	67.5	引火性，刺激性
アンモニア	17.8	121	-33.4	30.6	急性毒性，腐食性

＊　水素放出エンタルピー変化：水素を取り出す際に必要となるエネルギー。

＊＊「その他特性」の記載事項は，MSDSの「危険有毒性情報」のサマリーから引用。各物質の正確な特性については，それぞれの物質のMSDSを参照のこと。

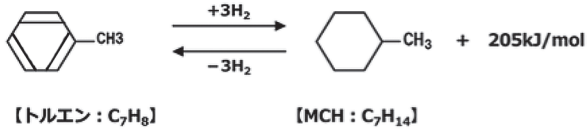


図４　水素エネルギーキャリアとしてのＭＣＨの利用

化水素を気化して利用する。この系では水素エネルギーの輸送，貯蔵を極低温（－ 253℃）で行うことが必要になる。

【メチルシクロヘキサン：MCH】

トルエンに水素を添加して MCH とすることによって水素の体積を気体状態の水素の約 500 分の１にして輸送，貯蔵するという**図４**に示すアプローチ。利用時は MCH を脱水素して，水素として水素エネルギーを利用するが，脱水素にはエネルギーが必要である。なお，脱水素後に得られるトルエンは MCH 用の原料として再利用する。

この系は，水素エネルギーの輸送，貯蔵を常温常圧で液体の MCH，トルエンで行えることが特長である。

【アンモニア：NH_3】

水素を空気中の窒素と反応させて NH_3 を合成，その NH_3 は，マイナス 33℃に冷却，または，約 8.5 気圧に加圧することによって液化し，気体水素の 1,350 分の１ または 1,200 分の１の体積で輸送，貯蔵するというアプローチ＊8。利用時には**図３**のように NH_3 を脱水素して，水素として水素エネルギーを利用することも可能だが，NH_3 のまま，NH_3 のもつ水素エネルギーを直接利用することも可能。なお，脱水素にはエネルギーが必要である。

７．NH_3 のエネルギーキャリアとしての可能性

この「NH_3 のもつ水素エネルギーを直接利用することもできる」ということが SIP「エネルギーキャリア」の成果として明らかにされたことにより，水素エネルギーキャリアとしての NH_3 の魅力が大きく高まり，世界的にもその可能性が注目されることになった。

そこで本稿では，紙幅が限られていることもあり，以下では NH_3 を中心に SIP「エネルギーキャリア」で明らかにされた成果とその成果からもたらされる可能性について記していきたい。なお，NH_3 は，1940 年代というかなり以前にエネルギーとしての利用が図られたことがあったが，国による本格的な研究開発の対象となったのは SIP「エネルギーキャリア」の開始された 2014 年の前年，2013 年と，ごく最近のことである＊9。以下の参考文献に示したプレス発表の内容から分かる通り，SIP「エネルギーキャリア」からは世界に先駆けた成果が次々と生まれている。

NH_3 がそのまま燃料として利用可能であるならば，利用時に NH_3 から水素エネルギーを取り出す際に必要となるエネルギー（脱水素エネルギー）が不要となり，これは水素エネルギーキャリアとしての大きなメリットである。これに加えて NH_3 は，特に発電用途向けの水素エネルギーキャリアに必要となる，以

＊８　液化条件により，液化後の体積が異なる。常圧下で -33℃に冷却し液化した場合には 1,350 分の１，常温下で 8.5 気圧をかけて液化した場合には 1,200 分の１となる。

＊９　実は，アンモニアは 1940 年代に内燃機関用の燃料として実際に利用されたことがある。（これについてご関心の向きは，筆者の国際環境経済研究所のサイトの記事「水素社会を拓くエネルギーキャリア (10)」（http://ieei.or.jp/2015/03/expl150317/）を参照。）
　また，1993 年から 2002 年まで新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）で行われた水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術研究開発（WE-NET）で，検討対象の物質の１つとして取り上げられたことがある。
　2013 年に文部科学省の「先端的低炭素化技術開発事業（ALCA）」で NH_3 をエネルギーキャリアの対象として取り上げ研究開発を開始。翌年，同研究開発は 2014 年に創設された SIP「エネルギーキャリア」に移行した。

下のような重要な要件を具備している

①既に大規模な商業サプライチェーンが確立しているので，水素エネルギー利用にあたっての大きな技術的課題の１つ，大量輸送，貯蔵に係る技術的問題はない。NH_3 は，世界で年間 1.8 億トンが製造され，1,800 万トンにのぼる大量の NH_3 が国際間で流通している。

②その製造コストの構造と標準的コストの水準はよく知られている。それらの情報から判断すると，NH_3 は発電用燃料として経済性が確保できる可能性が大きい。

③液化 NH_3 の体積当たりの水素密度は，**表１**に示したように，先に掲げた３つのエネルギーキャリアの中で最も大きく，炭化水素系の燃料に比べてインフラ設備規模が大きくなりがちな水素エネルギーキャリアの中で，比較的小規模で安価にインフラ設備を整備することが可能である。（なお，先述の NH_3 の液化条件は LPG とほぼ同様なので，NH_3 の輸送，貯蔵では LPG のインフラを利用することも可能である。）

これらに加えて，NH_3 は発電所で脱硝剤として既に相当量が使用されており，発電所においては NH_3 の取り扱い経験が既に蓄積されていることもメリットの１つである。

ここで NH_3 の取り扱い上の留意点についても記しておこう。NH_3 の物性に由来する懸念事項は，その臭気と急性毒性であるが，米国環境保護庁（EPA）が５年間かけて実施した最新の毒性評価の結果によると[(4)]，NH_3 には直接吸入や直接接触した場合の急性毒性はあるものの，発がん性等の深刻な毒性は認められていない。（なお，NH_3 は空気中や水中で急速に分解するので，通常は人が直接吸入や直接接触する可能性は小さい。）他方，NH_3 は着火温度が高く（651℃），また爆発限界も小さい物質であるため，米国では可燃性，爆発性のある物質としては区分されていない。実際，NH_3 は一定の管理の下で，世界で最も多量に使用されている化学物質の１つである。

８．SIP「エネルギーキャリア」における NH_3 関連の成果

それでは，NH_3 が有力な水素エネルギーキャリアの一つとして関心を集めることになった，SIP「エネルギーキャリア」での NH_3 の直接燃焼技術開発の成果の概要を次に紹介しよう。

（１）発電用ガスタービン

NH_3 は着火温度が高く（651℃），火炎速度も遅いこと，分子中に窒素原子（N）を含むことから，NH_3 を発電燃料として利用することについては，当初，燃焼の安定性と NH_3 の燃焼による NOx（Fuel NOx) の発生が課題として認識されていた。しかし，燃焼方法の工夫により，安定な燃焼が維持可能であり，NOx の発生も十分に抑制できることが東北大学などによる NH_3 の燃焼メカニズムの解明やシミュレーション計算等の基礎研究により明らかにされた。

NH_3 の直接燃焼で最も懸念されていた NOx の発生が抑制可能となるのは，燃焼気体中に若干余剰に残存する NH_3 の還元作用であることも解明された。NH_3 は燃料としても NOx の還元剤としても働くのである。NH_3 が還元剤として火力発電所やディーゼル・トラック排ガスの脱硝装置に吹き込まれていることを考えれば，これは不思議なことではない。

こうした基礎研究成果を踏まえて，NH_3 の直接燃焼による発電実証試験が，出力 50kW のマイクロガスタービン発電機を用いて（国研）産業技術総合研究所（AIST）の福島再生可能エネルギー研究所（FREA）で行われた。灯油と NH_3 の混焼，メタン（CH_4）と NH_3 の混焼，加えて NH_3 専焼等の試験が行われたが，いずれの場合も NOx の発生は通常の脱硝装置で除去可能なレベルに抑えることが可能であり，また，所期の出力で安定的に発電できる

ことが確認された[5]。

この成果をもとに，発電用ガスタービンメーカーが２MW の NH_3/CH_4 の混焼（熱量ベースで NH_3 20% 混焼）発電タービンの開発を 2017 年度内に行い，2018 年度には実証運転を行うこととしている。

加えて，さらに別の発電用ガスタービンメーカーによる数百 MW 級の NH_3 混焼ガスタービンの開発も進んでいる。これは，NH_3 は常圧で 500℃以上の環境下では水素と窒素（N_2）に分解するという性質を利用して，大型ガスタービン・コンバインドサイクル発電の排熱と NH_3 分解触媒を利用し，燃料の NH_3 を分解して水素を生成，それをガスタービンに供給して天然ガスとの混焼で発電するという開発アプローチで進められている。天然ガスと水素の混焼発電技術は既に確立されており，NH_3 の分解に関する大きな技術的困難もないことから，この実用化は技術的には比較的容易と考えられている。

（２）微粉炭発電ボイラー

CO_2 フリー燃料としての NH_3 の可能性が見えてきたことによって，電力業界主導による新たな取り組みも始まった。NH_3 を微粉炭発電ボイラー用燃料として用いる試みである。

こうした狙いでまず，（一財）電力中央研究所においてシングルバーナー微粉炭ボイラー実験炉（760kW）を用いた NH_3 の 20% 混焼（熱量ベース）実験が行われた。その結果，NH_3 の注入条件の調整により，NOx の排出を石炭専焼時と同レベルで抑えながら，CO_2 の排出を 20% 削減できることが確認された[6]。

この成果を受けて中国電力㈱は，実際に商用発電で使用している水島火力発電所２号機（15.6 万 kW）の微粉炭発電ボイラーで，2017 年夏に NH_3 混焼実証試験（混焼率 0.6 ～ 0.8%：熱量ベース）を行った。この結果，NOx による環境影響はなく，NH_3 が燃料として発電に寄与することが確認され，NH_3 の混焼率を上げる目途を得た[7]。この実証試験の結果は，比較的簡便で有効な方策が見当たらなかった既存の火力発電所における CO_2 排出低減手段の新たな可能性を示したという点でも意義があるものと評価している。

現在，この成果なども活用して，別の電力会社とボイラーメーカが共同で，既存石炭火力発電所の大型発電ボイラー（数十万 kW クラス）で NH_3 混焼による CO_2 排出低減を図るための改造試設計を始めている。

（３）NH_3 燃料電池

固体酸化物形燃料電池（SOFC）での NH_3 の燃料利用でも成果が上がっている。これは，動作温度が 700 ～ 1,000℃の SOFC では，（先にも記したように）NH_3 が 500℃以上の環境下では水素と窒素（N_2）に分解するので，NH_3 を直接，SOFC に供給することで水素に代えることができるという着想に基づくものである。

試験の結果 SOFC の燃料として NH_3 を用いた場合，純水素と同等レベルの発電特性（255W の直流発電で効率 53%）が得られることが確認された[8]。さらに，１kW の SOFC スタックでも 50% を超える直流発電効率で 1,000 時間以上の発電を継続している。今後は，燃料電池システム機器メーカーが１kW 級のコンパクトな SOFC パッケージ実証機の製作に取り組むこととしている。

NH_3 は輸送，貯蔵が容易なので，NH_3 を燃料とする SOFC の開発によって，データセンター，通信基地局等向けの電源など，分散型業務用発電などへの展開が期待される。

（４）工業炉における NH_3 利用

このほか，発電分野に次いで化石燃料消費量の大きな製造業で用いられる工業炉分野での取組みでも成果が生まれている。工業炉分野で NH_3 を利用する際の課題は，NOx の発生の抑制に加えて，火炎からの輻射伝熱を強化することであった。分子中に炭素（C）を含まない NH_3 の燃焼では，ススの燃焼による輻射伝熱効果が得られないからである。

これまでに10kWモデル燃焼炉を用いた研究でNH_3専焼，メタン（CH_4）へのNH_3の30%混焼の両ケースにおいて，酸素富化燃焼による火炎輻射の強化と火炎温度を均一化するための多段燃焼の組み合わせにより，これらの課題の克服に成功している。現在，工業炉の実用規模である100kWスケールの燃焼炉による実証が進められている。

このほか鋼板の前処理の脱脂工程用に開発されたNH_3混焼（30%）の脱脂炉は，CO_2排出の30%削減を実現したことにとどまらず，アルカリ脱脂以上の脱脂効果を実現[(9)]するという大きな成果を上げている。

9．CO_2フリーNH_3の経済性

NH_3は，経済性の面でも優れた水素エネルギーキャリアとなる可能性がある。

具体的に説明しよう。発電分野でのCO_2フリー水素エネルギーの目標価格水準は，先述のように水素のプラント引き渡し価格が30円/Nm^3-H_2以下になることで，これは，2020年代後半ごろまでに実現することが目標とされている。水素価格30円/Nm^3-H_2と熱量等価のNH_3の価格は，NH_3の通常の取引単位で表すと520～430ドル/t-NH_3（1ドル＝100～120円で換算）になるが，NH_3の価格水準を見ると，実は，NH_3の価格がこの水準を下回ることは珍しくないことが分かる[＊10]。

また，NH_3の生産プロセス，ハーバー・ボッシュ法（HB法）は，発明されてから既に100年以上の歴史があり，これまでにさまざまなエンジニアリングメーカーにより，数多くの工業的改良を加えられてきた歴史がある。このためこのプロセスによるNH_3の一般的な生産コストの構造は明らかになっていて，NH_3の生産コストは原料の天然ガスの価格にほぼ連動することが分かっている。実際，安価な天然ガスを原料とするNH_3の生産コストは安く，例えば，米国で3.2ドル/MMBtuの原料天然ガスを用いたNH_3の生産コストは148ドル/t-NH_3と推定され[(10)]，上述の水素30円/Nm^3と熱量等価の水準を大きく下回る水準にある。ただし，以上の価格は天然ガスを原料とするNH_3の価格であり，天然ガスを原料とするNH_3は製造時にCO_2を排出しているので，このプロセスで製造されたNH_3はCO_2フリーではない。

CO_2フリーのNH_3の製造は，天然ガスに代えてCO_2フリー水素を原料として製造することによっても可能であるが，CCS/EORを用いることによって，もっと安価にCO_2フリーNH_3を製造できる方法がある。それは通常の天然ガスを原料としてNH_3を製造するプロセスから排出されるCO_2をCCSで回収貯留する方法で，このプロセスにおいては，プロセス中で高濃度のCO_2が生成分離されるため，CO_2の回収，濃縮コストがより安価ですむためである[＊11]。さらにEORの場合には，回収されたCO_2がEOR向けに販売可能なのでCCSコストが低減する可能性がある。

こうしたことから，特にCO_2排出コストが生じるような環境の下では，NH_3は発電用燃料としてもLNGとそれほど遜色のないコスト競争力をもつ可能性がある。ちなみにCO_2の排出コストの将来の見通しについては，まだ多くの不確定要因があるものの，2030年度のGHG排出削減目標（2013年度比▲26%）を達成するための日本における限界CO_2排出削減コストは260～380ドル/t-CO_2に上ると分析されている[(11)]ので「LNGとそれほど遜色のないコスト競争力をもつ可能性がある」というのは，十分にあり得ることと考えられる。

将来的にはCO_2フリーNH_3の原料は，再エ

＊10　本稿の執筆時点（2017年9月）でのNH_3の国際価格は，約300ドル/t（FOB）を下回っており，輸送コスト等を入れても400ドル/tを切る水準にある。

＊11　IPCC Special Report, Carbon Dioxide Capture and Storage, Technical Summery（2005）によると，石炭または天然ガス火力発電所から排出されるCO_2のCCSコストが15～75ドル/t-CO_2であるのに対し，NH_3製造プラントからのCCSコストは5～55ドル/t-CO_2とされている。

ネから製造したCO_2フリー水素に置き換えていくことを目指すべきであるが，天然ガスからのNH_3製造プロセスとCCSの組み合わせには，先述のように大きなコストメリットがあることから，CO_2フリー水素の製造コストが低下するまでの方策として，CO_2フリーNH_3の製造においても天然ガスからのCCSの利用によるCO_2フリーNH_3の製造から始めていくことが現実的で，かつ，有望な方策となる可能性が高い。

10. CO_2フリーNH_3供給チェーンの社会への実装

以上をまとめるとCO_2フリーNH_3の供給，利用チェーンの現状は**図5**のようになる。

NH_3の輸送，貯蔵技術は既に存在する。また，供給側の技術の中で天然ガスを出発原料とするHB法によるNH_3製造とCCS/EORを組み合わせてCO_2フリーNH_3を得る技術は直ちに利用可能であり，比較的安価とみられるので，NH_3の利用に係る技術の実証が進めば，早い段階でCO_2フリーNH_3による水素エネルギー供給，利用システムを構築することが可能である。

将来的には，供給側技術の下段にある再エネからのCO_2フリー水素を原料とするCO_2フリーNH_3の製造に移行していくと考えられるが，実は，下段の供給チェーンの構築に向けた取り組みも始まろうとしている。具体的には，豪州やサウジアラビアの太陽エネルギーやノルウェーの水力等の豊かな再エネ資源を利用したCO_2フリー水素からCO_2フリーNH_3を製造し，日本に輸出するという構想である。これらの国々や国際エネルギー企業等との間での情報交換等も始まっている。

このようにNH_3を水素エネルギーキャリアとする水素エネルギーの製造から利用にいたるバリューチェーンは，かなりの現実味を帯びたものとなってきている。こうしたこともあって去る7月25日には，民間企業19社，公的研究機関3機関[*12]から成る「グリーンアンモニアコンソーシアム」が結成され，CO_2フリーNH_3のバリューチェーンの構築に関心を持つ関係者の間で情報交換や課題解決に向けた取り組みが開始された。また，「グリーンアンモニアコンソーシアム」とCO_2フリーNH_3の供給に関心を持つ海外の関係者との対話も始まっている。

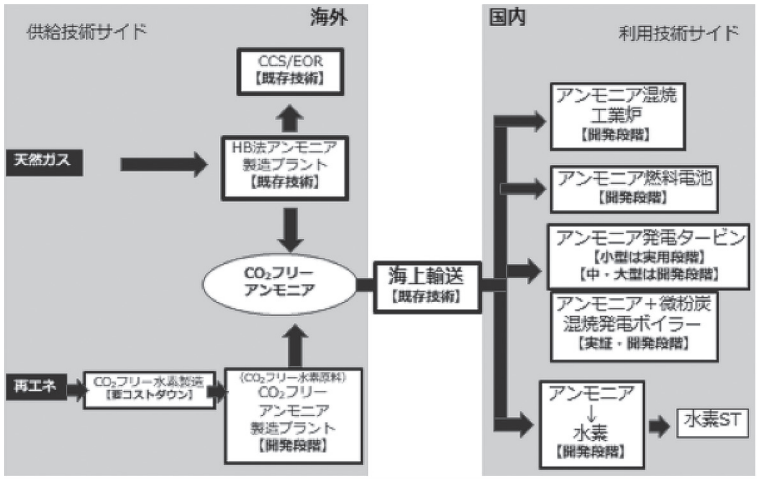


図5　CO_2フリーNH_3バリューチェーンを構成する技術等の現状

＊12 【議長】村木茂（東京ガス），【議長代理】塩沢文朗（住友化学），【参加企業】IHI，宇部興産，大阪ガス，JFEエンジニアリング，大陽日酸，中国電力，中部電力，東北電力，豊田自動織機，日揮，日揮触媒化成，日本触媒，ノリタケカンパニーリミテド，北海道電力，三井物産，三菱重工，三菱日立パワーシステムズ 【公的研究機関】海上・港湾・航空技術研空所，産業技術総合研究所，電力中央研究所

11. おわりに

本稿では，日本で“水素社会”の構築を目指すことの意義を確認した後，それに続いて“水素社会”の構築を図るうえで極めて重要となるCO_2フリー水素エネルギーのバリューチェーンの形成に係る課題や展望を，最近，大きな技術進展のあったNH_3を中心に説明してきた。しかし，将来，社会に実装されるそのバリューチェーンは，NH_3といった特定のものに限られることは必ずしもないだろう。例えば，FCV向けのバリューチェーンは，明らかに液化水素を水素エネルギーキャリアとするものに一日の長がある。エネルギーキャリアにはそれぞれ特徴があるので，エネルギーキャリアのうちどれかひとつだけが選択されるということではなく，周辺技術の進展やそれぞれのコスト環境等の変化に応じて，用途毎に適切なものが，その長所を生かした形で導入されるようになると考えている。時には，一度形成されたバリューチェーンが別のエネルギーキャリアのものに置き換えられることもあるだろう。少量，短距離の輸送であればエネルギーキャリアを用いることなく，水素を気体のまま，高圧容器に入れて輸送・貯蔵し，水素エネルギーとして利用するという，現在も利用されている方法も将来にわたって残るだろう。

重要なことは，日本のエネルギー環境制約の克服を可能とする，数少ない実際的方途である水素エネルギーの導入に向けて，今こそ関係府省，産業界が水素エネルギーに係る情報と認識を共有しつつ，一体となって取り組んでいくことだと強く考えている。

最後に本稿に記した意見や評価にわたる部分は，SIP「エネルギーキャリア」サブPDとしてのものではなく，筆者の個人の見解を記したものであることをお断りしておく。

参考文献

（1）「エネルギー基本計画」（2014年4月閣議決定）第3章第8節

（2）“Producing ammonia and fertilizers: new opportunities from renewables”, Cedric Philiber, Renewable Energy Division, International Energy Agency, 16 May 2017

（3）「水素・燃料電池戦略ロードマップ」，水素・燃料電池戦略協議会（2014年6月，2016年3月改訂）

（4）“Toxicological Review of Ammonia - Noncancer Inhalation”, Integrated Risk Information System, U.S. Environmental Protection Agency, September 2016

（5）http://www.jst.go.jp/pr/announce/20140918-2/index.html（灯油燃焼）；http://www.jst.go.jp/pr/announce/20150917/index.html（CH_4 − NH_3混焼）

（6）http://criepi.denken.or.jp/press/pressrelease/2017/01_10press.pdf

（7）https://www.jst.go.jp/pr/announce/20170629/index.html; http://www.energia.co.jp/press/2017/10697.html

（8）http://www.jst.go.jp/pr/announce/20150722-6/index.html

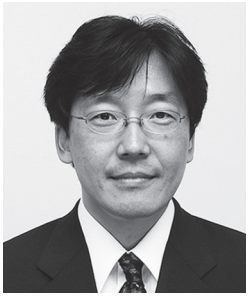
（9）https://www.jst.go.jp/pr/announce/20170626/index.html

(10) 平井 晴己，呂 正，高木 英行，村田 晃伸，「アンモニアの需給及び輸入価格の現状について」，（一財）日本エネルギー経済研究所　研究レポート，2015年9月

(11) 佐野 史典，秋元 圭吾，本間 隆嗣，徳重 功子，「日本の2030年温室効果ガス排出削減目標の評価」エネルギー・資源学会論文誌 Vol.37，No.1，2016，p. 51-60

［寄稿］

エネルギーハーベスティングの動向とエネルギー産業（電力，ガス，石油）への応用可能性



竹内　敬治
㈱NTT データ経営研究所
社会・環境戦略コンサルティングユニット
シニアマネージャー

1．はじめに

エネルギーハーベスティングは，周りの環境に様々な形態で存在する希薄なエネルギー，例えば，光，振動，熱（温度差），電波などを「収穫」して電気エネルギーに変換する技術である[1～4]。「収穫」は，英語でハーベストというので，エネルギーハーベスティングと呼ばれている。

本稿では，エネルギーハーベスティング技術の位置づけを明らかにした後，開発動向，市場動向を紹介し，電力，ガス，石油事業といったエネルギー産業への応用可能性を述べる。

2．エネルギーハーベスティング技術の位置づけ

環境中のエネルギーを収穫して電気エネルギーに変換する技術は，大変有用な電源技術である。電池の充電や取替え，燃料補給，電源配線が不要で，長期間の電力供給が可能となる。環境中のエネルギー源が枯渇するか，発電装置が故障しない限りは，半永久的に働き続ける。

このような技術には，大きく分けて，４つのニーズ（市場）がある。発電規模を横軸に，発電コスト縦軸にとって，４つのニーズを整理して**図１**に示す。

図の最も右側に配置されているものが，いわゆる再生可能エネルギーである。メガソーラー，風力発電，波力発電，潮力発電，水力発電，地熱発電などが該当する。発電規模は，キロワット～メガワット程度で，大規模なものでは１サイトでギガワットに達するものもある。これらの大規模な発電技術は，送電網に接続されることが前提のため，他の発電技術（火力発電など）に対する価格競争力が問われる。いかに安定して安価な電力を供給できるかが重要な市場である。

発電規模が小さくなってくると，送電網につなぐ意味がなくなるが，そこには別のニーズがある。送電網が整備されていない遠隔地

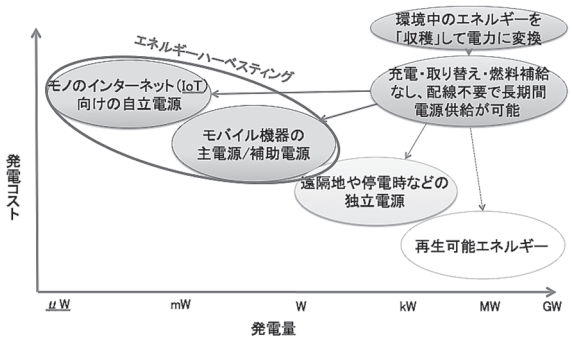


図１　環境エネルギーからの発電技術のニーズ[5]

や，停電などで送電網から一時的に切り離される地域の独立電源のニーズである。日本では，山奥や離島など，あまり適用地域は多くないが，途上国では，経済発展に電力供給網整備が追いつかず，送電網が届いていなかったり，頻繁に停電が起きたりする地域が多い。そのような地域では，環境のエネルギーから発電できる地産地消の独立電源技術が有用である。太陽光発電，風力発電，マイクロ水力発電などが実用化されている。送電網への接続が前提ではないため，発電コストは割高であっても，送電線敷設コストやディーゼル発電機の燃料調達・輸送コストよりも安ければ，導入が可能である。

最近，自動車の電動化の流れが加速しているが，例えば，走行中の電気自動車（EV）は，一時的に送電網から切り離されていると考えると，このカテゴリーに含まれる。EV の走行距離を伸ばすための発電技術として，回生ブレーキ，ルーフ等への太陽電池搭載，排ガスを利用した熱電発電，ショックアブソーバーからの振動発電などが開発され，一部は実用化されている。いずれも，数百ワット～１キロワット程度の発電規模である。

さらに発電規模が小さくなり，ミリワット～ワット程度になると，地域あるいは移動体の独立電源としては意味がなくなるが，そこには別の大きなニーズがある。モバイル機器の電源である。モバイル機器は，人間が持ち歩くことが前提のため，大きさ，重さに制約があり，電池の交換や充電が必要となる。機器自ら発電することで，電池の交換や充電の頻度を減らし，究極的は交換や充電を不要とすることができれば，非常に有用である。ポータビリティという便利さがあるために，高い発電コストも許容される。例えば単三乾電池の kWh 単価は，電力会社から購入する単価の 1000 倍以上である。また，エネルギー的にペイバックもしない。リチウムコイン電池から取り出せるエネルギーは，製造するために投入されるエネルギーの 0.2% 程度に過ぎない[6]。これらのことからも，モバイル機器の電源は，再生可能エネルギーとは全く異なる市場であることが分かる。

さらに発電規模が小さくなると，モバイル機器の電源としても役に立たなくなるが，発電規模マイクロワット～ミリワットの領域に，別の大きなニーズがある。IoT（モノのインターネット）向けの自立電源である。

あらゆるモノがネットワークにつながる IoT 社会を実現するためには，あらゆるモノに電源が必要となる。しかし，電池交換や電源配線が，経済的あるいはコスト的に困難な場合も少なからずある。そのような場合の電源技術として，周りの環境のエネルギーから発電する自立電源技術への期待が高まっている。発電コストとしては，モバイルニーズよりもさらに高いコストが許容される。電池切れに伴う機会損失のコスト，電池交換のための人件費，配線工事の人件費などよりも安ければ，導入のインセンティブとなる。

マイクロワットやミリワットの電力は，従来は使いみちがなかったが，近年，無線技術，センサー，マイコンなどの消費電力が大幅に低下を続けており，現在では，10 マイクロワット程度発電できれば何らかの用途が見出せる状況となっている。顕在化している市場は小さいが，トリオンセンサーなどの動きもあり，将来の市場拡大が期待される。

エネルギーハーベスティングは，これら４つのニーズのうち，後の２つ，小型電子機器の自立電源技術である。再生可能エネルギーのような大規模な発電技術ではないため，従来は，エネルギー産業の範疇に入らないものであった。しかし，近年，エネルギー産業でも，IoT の活用が課題となることで，エネルギーハーベスティングとの接点が生まれてきた。

３．IoT 機器電源の選択肢

エネルギーハーベスティング技術は，IoT 社会を実現するためには必須の技術であるが，

必ずしも全ての電源がエネルギーハーベスティング技術に置き換わるわけではない。IoT機器に対する電源技術選択の考え方を図２に示す。

IoT 機器の電源供給技術には，大きく分けて４つの選択肢がある。電源配線，一次電池，無線給電，そしてエネルギーハーベスティングである。

もし，IoT 機器までの電源配線が可能で，そのコストが安価であれば，電源配線が第１候補となる。このときのコストには，配線のための人件費・材料費だけでなく，例えば，配線ルートの図面管理のコストも入る。海外で現地の工員が作業する場合などの配線ミスのリスクや，断線のリスク，銅線の盗難のリスク，商用電源が停電になったときに，給電が停止するリスクなども電源配線のコストとなる。飛行機や自動車などの移動体の場合には，重量増による燃費の低下を考慮する必要がある。そのような，諸々のコストを考慮したうえでなお，電源配線が低コストであるなら，電源配線を選ぶべきである。

電源配線が技術的あるいは経済的に困難なケースでは，電池の利用が第２の候補となる。電池単体のコストのほかに，様々なコストがかかることを考慮する必要がある。例えば，電池交換や回収に人件費がかかる。電池切れ時にデータの欠測が生じる。顧客からのクレームが発生する可能性もある。電池は古くなると自己放電が進むため，在庫管理が必要である。電池交換時期の管理も必要であるが，容量や使用環境にばらつきがあるため，イレギュラーな交換作業が発生してしまう。それを防ぐために早めに定期交換すると，容量が残った大量の電池を廃棄することになる。電池の回収や廃棄にかかるコスト，環境負荷，企業イメージなど，様々なコストを考慮したうえで，電池を使うかの判断をするべきである。

電源配線も電池交換もしたくない場合には，無線給電が次なる電源の候補となる。近距離の非接触給電を利用するためには，IoT 機器と充電器とを近づける必要がある。電波による無線給電は，ある程度離れた場所に対しても可能であるが，長距離になるほど効率が低下する。また，電波法により出力が制限されているので到達距離に限界がある。人体の安全性，コスト等も考慮して無線給電の選択を判断することになる。

電源配線，電池交換，無線給電のいずれも使いたくない場合，エネルギーハーベスティングが第４の選択肢となる。エネルギーハーベスティング技術は，周りの環境中に，光，振動，温度差，電波などのエネルギーがあれば，そのエネルギーを電気に変換することで電源とすることができる。しかし，そもそも環境中にエネルギーがなければ役に立たないところが欠点である。単独では利用しづらい場合，他の電源技術と組み合わせる方法もある。例

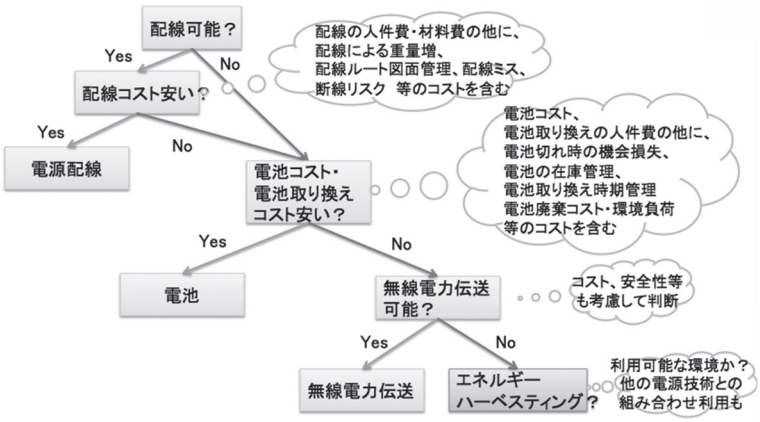


図２　IoT 機器に対する電源選択の考え方 (7)

えば，一次電池とエネルギーハーベスティングを組み合わせれば，一次電池交換の頻度を下げることができる。

エネルギー産業を対象とした場合，IoT 機器の電源技術として，エネルギーハーベスティングが活用できる状況は多い。なぜなら，油井などの遠隔地や，広大な敷地，人が立ち入ることが危険な場所など，電源配線，電池交換，無線給電のいずれにも適していない場所でのセンシングニーズがあり，一方，周りにエネルギー（光，振動，熱，漏れ磁場など）が豊富だからである。

今後，エネルギー産業において，IoT 化を進めるためのキーテクノロジーとして，エネルギーハーベスティング技術が活用されることが期待される。

4．エネルギーハーベスティング技術の開発動向

（1）様々なエネルギーハーベスティング技術

前述のとおり，エネルギーハーベスティング技術は，光，振動，熱，電波などの環境中に希薄に存在するエネルギーを電気エネルギーに変換する。ただし熱エネルギーなどは全て利用可能なわけではないので，エクセルギー（有効エネルギー）と言う方が正確である。

環境中のエネルギーの存在形態が様々であるために，それらを電気エネルギーに変換する技術も多様である。したがって，ひとくちにエネルギーハーベスティングといっても，その中には様々な技術が含まれている。具体的には，主に**表 1** に挙げたような技術が各種研究開発の対象となっている。

以下では，個々のエネルギーハーベスティング技術および関連技術について，実用化に向けた最近の研究開発動向を紹介する。

（2）光エネルギー利用技術

環境中には，太陽や人工照明などから発せられる可視光が豊富に存在する。光源によっては，近紫外線あるいは近赤外線を含むものもある。これらの可視光あるいはその付近の波長の環境電磁波を利用したエネルギーハーベスティング技術には，いわゆる太陽電池が該当する。様々な太陽電池技術が存在するが，それらのなかで，エネルギーハーベスティングという観点から注目されているのは，日蔭・曇天時などの自然光や，室内照明から効率的に発電できる技術である。電卓や腕時計などの実用製品には，アモルファスシリコン太陽電池が使用されている。室内環境下で，アモルファスシリコン太陽電池より効率が高い太陽電池技術として，色素増感太陽電池や有機薄膜太陽電池，ペロブスカイト太陽電池が注目されている。

現在，太陽光および室内光に対して，最もエネルギー変換効率が高い太陽電池は，薄膜 GaAs 太陽電池である（集光器や多接合技術を用いるものを除く）。コストが高いこともあっ

表 1　主なエネルギーハーベスティング技術と実用化事例 [8]

環境中のエネルギー	主なエネルギーハーベスティング技術	実用化事例
可視光（太陽光、室内光など）	各種太陽電池（アモルファスシリコン太陽電池、色素増感太陽電池、ペロブスカイト太陽電池、有機薄膜太陽電池など）	電卓、腕時計、雑貨、美顔器、電飾、スマートゴミ箱、屋外・屋内環境モニタリング、室内用BLEビーコン　など
力学的エネルギー	電磁誘導、静電誘導（エレクトレット、電気活性ポリマー、摩擦帯電など）、圧電発電、逆磁歪発電	腕時計、トイレ自動水栓、テニスラケット、照明等の無線スイッチ、防火シャッター、産業機械モニタリング、列車車軸モニタリングなど
熱エネルギー	熱電発電、熱磁気発電、熱電子発電、熱光発電、熱音響発電、焦電発電、熱機関など	腕時計、集蚊器、発電鍋、産業機械モニタリング、油井・製油所設備モニタリング、暖房ラジエータ自動制御、カセットガスヒーター、下水道氾濫検知　など
電波エネルギー	レクテナ	鉱石ラジオ、携帯ストラップ、空気汚染センサ　など
その他	バイオ燃料電池、微生物燃料電池など	服薬測定ツール、僻地の環境センサ　など

て，普及は進んでいないが，2017 年 8 月には，アウディが自動車車体に搭載する計画を発表した[(9)]。

（3）力学的エネルギー利用技術

力学的エネルギーを電力に変換するためには，まず，環境中に存在する力学的エネルギーをデバイス内に取り込んだ後に，そのエネルギーを電気エネルギーに変換するという，**図３**に示すような２段階のプロセスが必要である。

前者の，環境中の力学的エネルギーをデバイスに取り込む方法としては，①デバイスが外部から力を受けて変形する方式，②空気や水の流れを羽根で受ける方式，③外部環境の加速度変化（振動や衝撃）によって内部の錘に発生する慣性力を利用する，いわゆる振動発電などの方式がある。

①の方式で実用化しているものとしては，押して発電する無線式の照明スイッチがある。②の方式で実用化しているものとしては，トイレの自動水栓がある。水の流れで発電して，赤外センサーと電磁バルブを駆動させるものである。③の方式で実用化しているものとしては，列車の車軸ベアリングモニタリングシステム用電源の振動発電デバイスがある。

一方，２段階プロセスの後者，デバイス内部に取り込んだ力学的エネルギーを電気エネルギーに変換する原理としては，電磁誘導，圧電効果，静電誘導，逆磁歪効果の４種が知られている。コイルと磁石の相対運動により，誘導電流を発生させるのが電磁誘導発電の原理，チタン酸ジルコン酸鉛（PZT）などの圧電材料を歪ませて表面電荷を発生させるのが圧電発電の原理である。静電誘導発電には幾つかバリエーションがある。日本で研究が盛んなエレクトレット発電では，電荷を打ち込んで帯電させたエレクトレットをコンデンサの一方の電極とし，対向電極を移動させるなどの方法で静電容量を変化させて発電する。エレクトレットを使わず，２つの材料を接触させることで帯電させる，摩擦帯電方式の研究も，米国や中国を中心に盛んになってきている。逆磁歪効果を利用して発電するには，磁場をかけると変形する磁歪材料を歪ませて周りの磁場を変化させ，コイルに誘導電流を発生させる。発電用の磁歪材料としては，米軍が開発した Galfenol や Terfenol-D が使われるが，国産材料としての，鉄コバルト合金が注目されている。

デバイスが大きい場合には，４つの発電原理のうち電磁誘導が，最も発電効率が高い。従来，発電機といえば電磁誘導方式のものしかなかったのも，そのためである。しかし，エネルギーハーベスティング用途で，小型や薄型のデバイスを作製しようとすると，条件によっては，他の発電原理の方が有利になる場合もある。そこで，様々な原理の発電技術の開発が進められている。

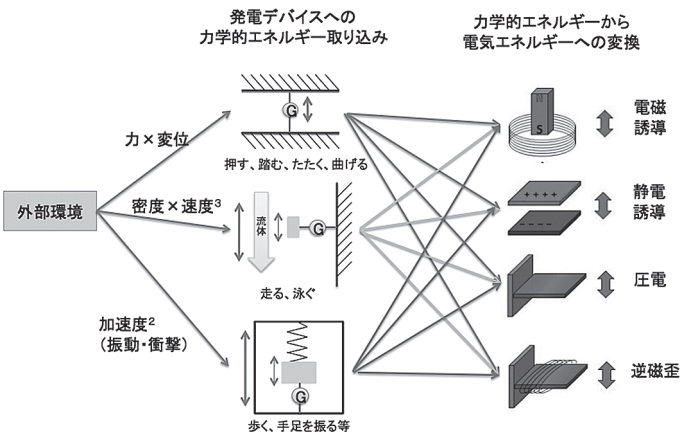


図３　力学的エネルギーからの発電技術[(10)]

（4）熱エネルギー利用技術

図4に示すように，熱（温度差エクセルギー）を利用した，様々な発電方式が研究されている。大型の発電設備では，熱機関（ランキンサイクルなど）が広く普及しており，発電効率も高い。しかし，エネルギーハーベスティング用途の小型発電では，熱機関の効率が低下するため，小型化しても効率が低下しない熱電発電デバイスの方が有利となる。熱電発電モジュールとして販売されている他，無線センサーの電源としてすぐに使えるように，熱電発電モジュールとヒートシンク，昇圧回路を組み合わせたユニットとして販売されているものもある。テルル化ビスマス（Bi_2Te_3）は，性能の良い熱電材料であるが，環境負荷が問題とされており，室温付近からせいぜい200℃程度までの温度環境でしか利用できない。環境負荷の小さい材料や，より高温領域で使用できる熱電材料も各種開発が進んでいる。

熱電発電は，温度差を与えると起電力を生じる熱電材料を利用した発電方式であり，構造が単純で可動部がないというメリットがあるが，熱伝導（格子振動）で失われるエネルギーが多いため，理論限界であるカルノー効率と比較して，実用上得られるエネルギー変換効率が非常に低い。

そのため，熱電発電のように熱から直接電気エネルギーを生成するのではなく，いったん別のエネルギーを経由する発電方式も研究されている。例えば，熱光発電は，熱源から発せられる輻射光から発電する方式である。熱音響発電では，ハニカム構造の細管の両端に温度差をつけることによって気体に自励振動を生じさせ，閉管のパイプ内を気体振動（＝音響）でエネルギーを移動させる。温度差を利用してバイメタルに自励振動を生じさせ，圧電素子などを連続して変形させることで発電を行う方式も提案されている。

圧電性を持った材料には，PZTなど焦電性も持っている材料も多い。温度変動から焦電効果を利用して発電する焦電発電の研究は，米国中心に行われている。

（5）電波エネルギー利用技術

環境中に存在する主な電波源としては，テレビ，ラジオの放送波，携帯電話やWi-Fiの基地局や端末から発せられる電波が挙げられる。

これらの環境電波を収穫して電力回生する電波ハーベスティングには，レクテナ（整流器つきアンテナ）と呼ばれるデバイスを使用する。レクテナは，宇宙太陽発電の地表側受電デバイスとして開発されてきた経緯があり，わが国にも要素技術はあるが，近年は，RFID（商品に付けられたIDタグを無線で読み取り，管理を行うシステム）が普及する欧州での研究開発が活発である。受電デバイスとしてのレクテナは，電波ハーベスティングと電波式の無線電力伝送とで共通の技術であり，無線電力伝送と

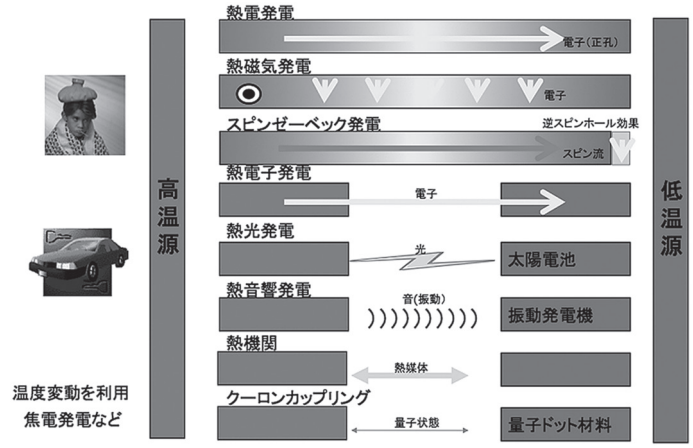


図4　熱エネルギーを利用した様々な発電技術[11]

しての用途開拓が普及の鍵となろう。

（6）その他のエネルギー利用技術

以上挙げた以外にも，様々なエネルギーハーベスティング技術の開発が進んでいる。例えば，生体が生成する有機物（体液中のグルコースや汗中の乳酸）を利用して発電するバイオ燃料電池や微生物燃料電池，体液（胃酸や尿など）を電解質として取り込んで発電する方式などがある。また，水の蒸発を利用する方式や，浸透圧差を利用する方式など，ポテンシャル差を利用する方式も研究されている。

（7）関連技術

エネルギーハーベスティング技術は，環境中に存在するさまざまな形態のエネルギーを電気エネルギーに変換するものであるが，単に電気エネルギーに変換しただけでは，有効に利用することが難しい。整流や昇降圧などの電源回路，蓄電デバイスと組み合わせることで，電子機器に一定電圧の直流電流を供給できるようになる。

電源回路自身が多くの電力を消費してしまうと，微小な発電量を有効に利用できない。エネルギーハーベスティング技術用途には，自己消費電力が極力小さく，起動に外部電源を必要としない電源回路が必要となる。そのような電源回路については，既に製品化されているものもある。

蓄電デバイスについても，エネルギーハーベスティング用途向けの要件がある。自己放電が少ない二次電池は，充放電サイクル数が不足して長期間のシステム運用ができず，一方，充放電サイクル面では問題が無いスーパーキャパシタは，自己放電によって微小な発電量を有効に蓄積できない。エネルギーハーベスティング技術向けの様々な要件を満たす蓄電デバイスとして，全固体薄膜リチウムポリマー電池，リチウムイオンキャパシタなどが販売されている。

近年，エネルギーハーベスティング向けの電源回路や蓄電デバイスに加えて，低消費電力のマイコン，センサー，無線技術（Bluetooth Low Energy，LPWA など）が市場に出回るようになったことで，エネルギーハーベスティング技術を活用することが容易になってきた。

5．エネルギーハーベスティング技術の市場動向

（1）昔からあるエネルギーハーベスティング製品

エネルギーハーベスティング技術を応用した製品は，近年急に現れたものではなく，昔からあった。例えば，20 世紀初頭，米国でラジオの公共放送が始まった当初，受信機は鉱石ラジオが一般的であった。鉱石ラジオは，ラジオ放送の電波のエネルギーだけで作動する。1920 年代に，英国で電力とガスの供給競争が繰り広げられていたときには，**図 5** のような，ガスの燃焼熱から熱電素子で発電して作動する「ガスラジオ」も使われていた。1930 年代には，自転車のランプを点灯させるためのダイナモが，英国で発明された。

真空管の時代には，微小な電力の用途は広がらなかったが，半導体トランジスタが発明され，電子回路の低消費電力化が進み，エネルギーハーベスティングの技術にさまざまな用途が生まれた。1970 年代には，卓上計算機の小型化・低消費電力化が急速に進み，太陽電池で作動する電卓が発売された。太陽電池で作動する腕時計が発売されたのも 1970 年代

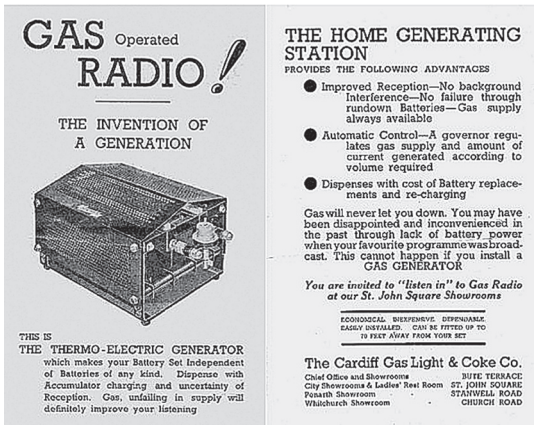


図 5　ガスラジオのパンフレット [12]

である。その後，1980年代には，腕の動きで発電して作動する腕時計，1990年代には体温と外気温の温度差で発電して作動する腕時計も発売された。流水で発電して赤外センサーと電磁バルブに給電する，トイレの自動水栓が発売されたのは1980年代のことであった。これらはすべて日本で生まれた製品である。

21世紀に入ってからは，海外を中心に応用製品が発売されている。例えば，オランダのスポーツ用品メーカーHEADは，2001年に圧電素子内蔵のテニスラケットを発売した。ボールを打った衝撃で発電し，その電力を利用してアクティブに振動を減衰させる仕組みを内蔵した2002年発売モデルは，テニス肘を防止するという触れ込みで，大ヒットした。HEAD社は，同じ仕組みを内蔵したスマートスキーや，スノーボードも次々に発売した。

熱電発電を利用した製品も，いくつか市販されている。例えば，プロパンガスを燃焼させて二酸化炭素（CO_2）を発生させ，集まった蚊をバキュームで吸い取る集蚊器（モスキート･トラップ）で，熱電発電が使用されている。調理をしながら携帯電話等を充電する発電鍋などのアウトドア製品も発売された。2015年には，岩谷産業が，熱電発電モジュールを内蔵した**図６**のような仕組みのカセットガスファンヒーターを発売した。

（２）スタンドアロン製品からIoT応用へ

近年の市場動向としては，無線技術の低消費電力化によって，無線センサー等のネットワーク化された製品への応用が広がっていることが挙げられる。かつてはスタンドアロン製品の駆動に使われたエネルギーハーベスティング技術は，IoTを実現するキーテクノロジーへと，その位置づけを変えつつある。

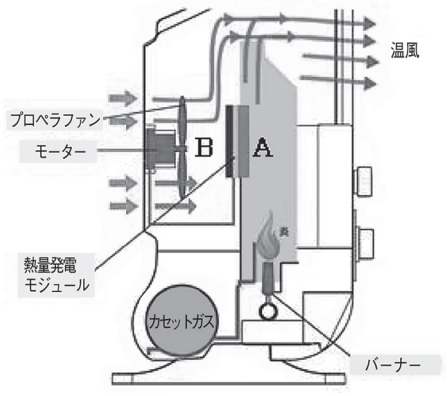


図６　岩谷産業カセットガスファンヒーター[13]

近年，エネルギーハーベスティング技術の応用が進む代表的な分野は，建物（ホーム・オートメーション，ビル・オートメーションなど）である。21世紀初頭，ドイツのEnOcean社（Siemens社からのスピンオフ）や米国のPulseSwitch Systems社（NASAからのスピンオフ）は，押して発電する無線式照明スイッチの製品化に成功した。これは，スイッチを押すときの指の力を利用して発電し，その電力を使って，ON/OFFの制御信号を，照明器など制御装置に組み込まれた無線受信機に送信するものである。スイッチを無線化することによって，壁内の配線が不要になり，ビルの配線工事のコストが３割程度削減され，工事期間も短縮できる。また，レイアウト変更が容易になるというメリットもある。国内外の多くのベンダーが参入を続けている。国内では，TOTOのウォシュレットの壁スイッチや，文化シャッターの防火シャッター安全装置に組み込まれている。

すでに普及しつつある照明スイッチと前述のトイレ自動水栓以外では，BEMS（ビル・エネルギー・マネジメント・システム）への応用が期待されている。建物内各所に配置した温湿度センサーやCO_2センサーからの情報をもとに，省エネ性と快適性を両立させる自動制御を行うBEMSの普及には，センサーの設置工事を簡略化できるエネルギーハーベスティング技術の活用が有効である。

建物内で，大きなポテンシャルを持つのが，BLE（Bluetooth Low Energy）無線規格を使用したビーコン（無線発信機）である。代表的な規格として，アップルのiBeacon規格がある。建物のセキュリティ用途もポテンシャルは大きい。ドアや窓につける開閉・施錠センサー，自動施錠システム，建物内の人感セ

ンサー（例えば，床に埋め込んだ発電センサー）などは，BEMSとの共用も可能であろう。

英国のPerpetuum社は，振動発電デバイスを開発し，工場内の無線センサーノード用電源として，GE社，Honeywell社，Emerson社にOEM供給しているが，近年は，鉄道車両の車軸ベアリングモニタリングシステムの販売で成功している。発電デバイス単体で販売するのではなく，センシングデータからベアリング状態を判別するアルゴリズムを開発し，無線でデータをクラウドに収集蓄積してウェブ経由でアクセスできるリアルタイムモニタリングシステムとして商用化している。

2016年，富士通株式会社は，図７のような，下水道氾濫検知ソリューションの販売を開始した。このソリューションでは，水位センサーを下水道のマンホール裏にとりつけ，水位情報を無線通信でクラウドに収集・蓄積して，水位モニタリング用アプリケーションで地図上にグラフ表示する。水位センサーと無線の駆動は，熱電変換ユニットと一次電池で行う。熱電変換ユニットの一方の電極には，蓄熱材がつけられており，一定温度を保つようになっている。もう一方の電極には，図８で示すように，マンホールの鉄蓋の温度が伝わる。マンホールの蓋は，晴れた日の日中には高温になるため，蓄熱材との温度差で発電することができる。熱電変換ユニットと一次電池を併用することによって，通常の使用条件では，５年間メンテナンス不要となった。

６．エネルギー分野（電力，ガス，石油）におけるエネルギーハーベスティング技術活用の可能性

前述のように，エネルギー産業は，エネルギーハーベスティング技術の活用に適した分野である。本章では，現状での具体的な活用事例や研究開発事例を紹介する。

（１）電気事業

電力供給を行う電気事業においても，エネルギーハーベスティングのニーズはある。センシングしたい箇所に電源が供給されていない場合，電源はあってもそれと絶縁したい場合などでは，別系統の電源が必要である。電力設備近傍では，光（太陽光），熱，振動，漏れ磁場などのエネルギー源が豊富にあり，エネルギー

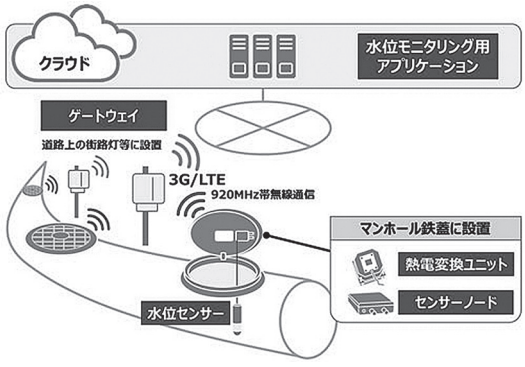


図７　富士通の下水道氾濫検知ソリューション [14]

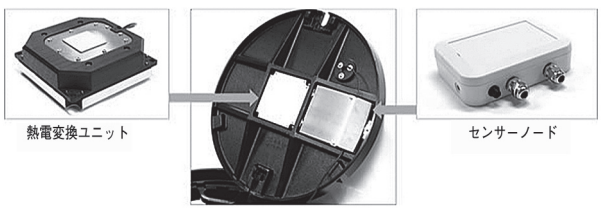


図８　マンホール蓋への装置搭載イメージ

ハーベスティング技術を活用しやすい。

発電所での活用事例としては，米国ネバダ州にあるNV Energy社のフォートチャーチル火力発電所の事例が有名である。従来は巡回でデータ収集を行っていたが，無線センサーネットを導入することで，今まで取得できなかったデータを取得することができるようになり，冷却水ポンプなどの問題を故障前に発見できるようになった。**図9**に示すように，センサーノードの電源には，Perpetuum社製の振動発電デバイスが使われ，無線技術はDust Networks社（現アナログ･デバイセズ社）のメッシュ無線技術が使われた。システム全体は，GE Energy社が構築した。

送配電設備のモニタリング用途で，漏れ磁場発電を活用した無線センサー製品が販売されている。Southern States社のSmart Tapは，送電線の障害発生時に，発生箇所の方向と発生場所までの距離を検出することができ，送電線設備の保守を効率化する。15kVから550kVまでの送電線で使用できる[16]。

太陽電池とメッシュネットワーク，衛星通信を活用して，遠隔地の農場用通信・エネルギーソリューションを提供するGotham Analytics社は，インフラ分野への進出を進めており，変電所，水力発電ダム，メガソーラーへの適用実績がある。顧客は，米国ニュージャージー州の電力・ガス会社PSE&G，カナダの電力・ガス・石油会社TransCanadaなどである[17]。

米国電力研究所（EPRI）では，**図10**に示す

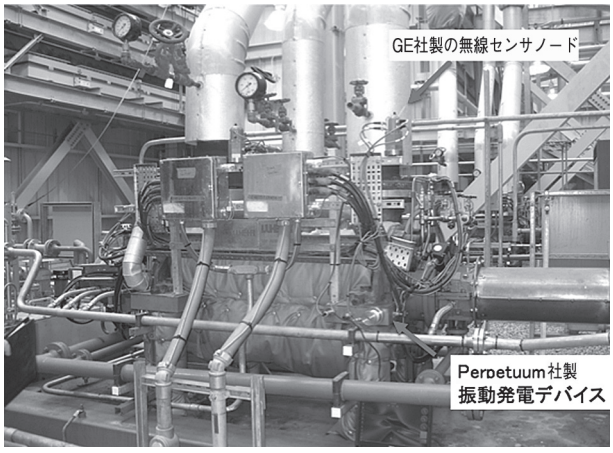


図9　フォートチャーチル火力発電所での無線モニタリング事例[15]

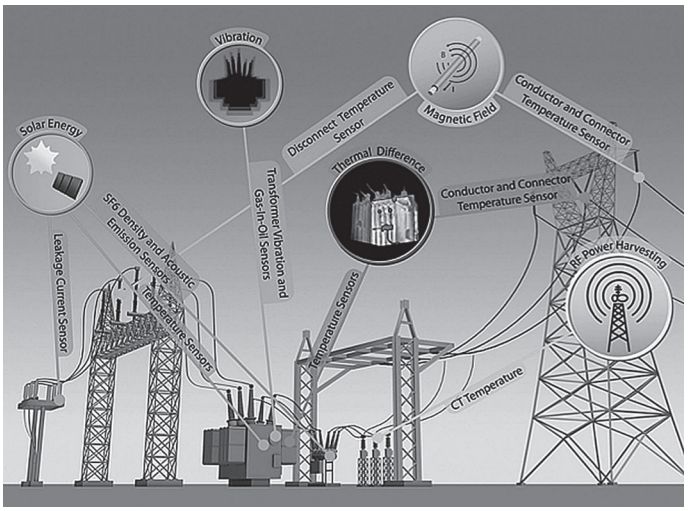


図10　EPRIのエネルギーハーベスティング研究[18]

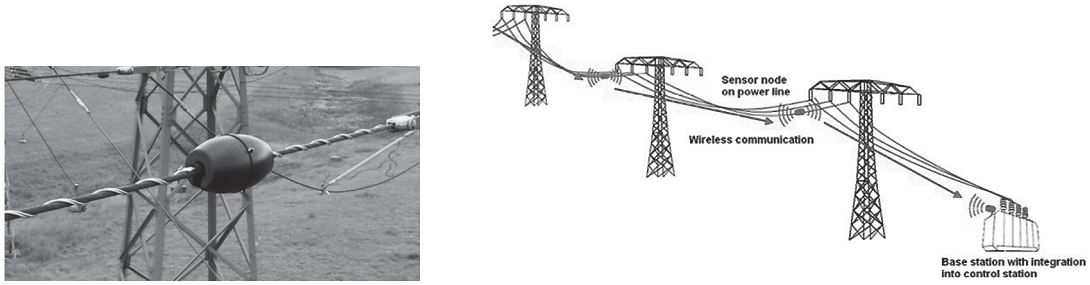


図 11　Fraunhofer 研究機構が開発した高圧送電線センサー ASTROSE [19]

ような，エネルギーハーベスティング技術の電力設備モニタリングへの活用に関する様々な研究を行っており多数の報告書を出版している。

送電線のモニタリングに関しては，ドイツの Fraunhofer 研究機構（エレクトロ・ナノシステム研究所及び信頼性・マイクロインテグレーション研究所）が，図 11 のような超高圧（110kV/220kV/380kV）送電線の無線モニタリングシステム ASTROSE を開発し，2014 年から実証実験を行っている。センサーノードは漏れ磁場で発電し，傾斜・風による発振・電流・短絡・温度を 15 分間隔で測定して，マルチホップ無線通信でデータを収集するものである。

（2）ガス事業

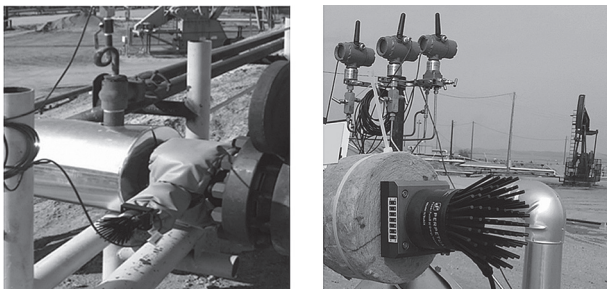
ガス事業においては，特に生産現場（ガス田）での無線センシングニーズが大きい。遠隔地にあるため，電源配線や電池交換は困難であり，熱が利用可能な環境も多い。例えば，アラスカのノーススロープにある石油・ガス基地では，高頻度の無線モニタリングの電源に熱電発電デバイスを活用している。非常に寒い環境のため，電池が使用できない一方，熱電発電デバイスの発電量が大きくなる。米国ノースダコタ州バッケンにあるシェールガス杭井でも，遠隔無線監視装置の電源に，熱電発電デバイスを活用している [20]。

英国ナショナルグリッドでは，総延長 7654km の高圧導管パイプラインの遠隔監視をヘリコプターで行っているが，エネルギーハーベスティング技術を活用して遠隔監視の効率化を目指している [21]。

米国のロスアラモス国立研究所は，2005 年に，ガスパイプラインのモニタリングのために，ガスの流れで発電して給電する方式について調査報告書を出版している [22]。

（3）石油事業

石油事業もガス事業と似た状況である。米国カリフォルニア州のサンホアキン・バレーにある石油増進回収法の油井では，圧力監視が重要であり，熱電発電デバイスを電源として無線で遠隔監視が行われている。図 12 のような，蒸気注入油井での高頻度（毎秒）の無線モニタリング電源に熱電発電デバイスを使



＜石油増進回収法の油井＞　　＜蒸気注入油井＞

図 12　熱電発電デバイス活用事例 [23]

用している事例もある。

ロイヤル・ダッチ・シェル社は，製油所の無線遠隔監視に早くから取り組んでいる。振動発電デバイスや熱電発電デバイスの活用を進めており，エネルギーハーベスティングデバイスの国際標準化を進めるISA 100.18WGの主査も務める。将来は，極多数（100万個程度）のセンサーを設置したい意向も示している[24]。

7．おわりに

エネルギー産業は，油井などの遠隔地や，広大な敷地，人が立ち入ることが危険な場所など，一般的な電源確保が困難な場所でのセンシングニーズがあり，一方，周りにエネルギー（光，振動，熱，漏れ磁場など）が豊富にあるため，IoT電源としてのエネルギーハーベスティング活用には適している分野である。

設備の老朽化，競争環境の変化，ベテランの高齢化による人材不足，新技術の導入などに伴い，人手に頼らないセンシングのニーズは高まっている。さらに，インフラ設備を活用したビジネス変革のツールの１つとしても，センシングデータの多重的な活用が期待される。

今後，エネルギー産業のIoT化が進むにつれて，電源技術としてのエネルギーハーベスティング技術の重要性は高まっていくと予想される。NTTデータ経営研究所では，エネルギーハーベスティングコンソーシアムを立ち上げ，会員の電力中央研究所などと，普及に向けた活動に取り組んでいるところである。

参考文献

（1）桑野 博喜（監修）『エネルギーハーベスティング技術の最新動向』，（CMC出版，2010年）
（2）鈴木 雄二（監修）『環境発電ハンドブック－電池レスワールドによる豊かな環境低負荷型社会を目指して』，（NTS出版，2012年）
（3）竹内敬治他『エネルギーハーベスティング－身の周りの微小エネルギーから電気を創る“環境発電"』，（日刊工業出版社，2014年）
（4）桑野 博喜，竹内敬治（監修）『エネルギーハーベスティングの設計と応用展開，（CMC出版，2015年）
（5）株式会社NTTデータ経営研究所作成
（6）“European Ecolabel for Batteries for Consumer Goods Final Summary Report”,Heidelberg（FRG），July 1997
（7）株式会社NTTデータ経営研究所作成
（8）竹内敬治「IoT実現に必要となるエネルギーハーベスティング技術」，情報未来 No.52（NTTデータ経営研究所，2016年）
（9）Audi Cooperates with Alta Devices on Automobiles with Solar Roofs
https://www.altadevices.com/audi-cooperates-alta-devices-automobiles-solar-roofs/
（Alta Devicesプレスリリース，2017年8月23日）
（10）株式会社NTTデータ経営研究所作成
（11）株式会社NTTデータ経営研究所作成
（12）http://www.aqpl43.dsl.pipex.com/MUSEUM/POWER/thermoelectric/thermoelectric.htm
（13）電気も電池も不要！ カセットガスで発電し，部屋全体を暖める世界初の『カセットガスファンヒーター』 8月27日（木）新発売 ～外部電力を使わない画期的なコードレスファンヒーター～（岩谷産業株式会社ニュースリリース，2015年8月6日）
http://www.iwatani.co.jp/jpn/newsrelease/detail.php?idx=1240
（14）ゲリラ豪雨対策に活用できる下水道氾濫検知ソリューションを販売開始　自然エネルギーを電力に変換する熱電変換ユニットをマンホールに搭載し，運用を大幅に効率化（富士通株式会社プレスリリース，2016年8月15日）
http://pr.fujitsu.com/jp/news/2016/08/15.html
（15）Roy Freeland, Vibration Energy Harvesting, Energy Harvesting 2011, 2011年2月7日
（16）https://www.southernstatesllc.com/products/smart-tap
（17）http://gothamanalytics.net/infrastructure.html
（18）http://transsensorsrobots.epri.com/power-harvesting-storage.html
（19）https://www.izm.fraunhofer.de/en/abteilungen/rf---smart-sensor-systems/key_research_areas/autarkic-sensor-systems/Astrose.html
（20）http://perpetuapower.com/use-cases/
（21）Quentin Mabbutt, The opportunities for off grid monitoring of the UK Gas Transmission Network（NTS），Energy Harvesting 2016, 2016年5月11日
（22）Dipen N. Sinha, Power Generation in Pipeline: Report, LA-UR-05-6354, Los Alamos National Laboratory, 2005年8月12日
（23）http://perpetuapower.com/use-cases/
（24）Ron Cramer, Oil and Gas Asset Integrity Monitoring, Energy Harvesting and Storage 2012, 2012年11月7日

［調査研究報告］

再生可能エネルギー火力発電システム研究会の成果

小川紀一郎※1（元（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　参事）

蓮池　宏※2（（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長　理事）

川村　太郎※3（（一財）エネルギー総合工学研究所 主管研究員）

福見　拓也※4（元（一財）エネルギー総合工学研究所 研究員）

鈴木　康夫※5（JFE エンジニアリング（株） 主席）

後藤　典久※6（JFE エンジニアリング（株） 環境本部経営スタッフ）

谷川　博昭※7（中国電力（株） エネルギア総合研究所マネージャー）

和田　泰孝※8（中国電力（株） エネルギア総合研究所担当副長）

渡辺　洋一※9（（公財）廃棄物・３Ｒ研究財団 上席研究員）

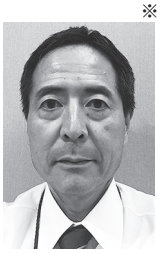
※1

※2

※3

※4

※5


※6

※7

※8

※9

１．はじめに

再生可能エネルギー火力発電システム（再エネ火力発電）は，再エネによる発生蒸気を既設火力発電所内にバイパス給水加熱器に導入して，基本的に発電所の水質系および運転操作性を変えることなく発電所の出力増加或いは燃料節減を図り，最終的には二酸化炭素（CO_2）削減を狙うシステムである。

以上が特徴の概要であるが，本技術の位置づけを理解頂く意味から，更に次の３点を補足する。いずれも詳細は，本文で紹介する。

① 火力発電の将来の在り方に応える方式であること

火力発電は実用性に優れ将来とも発電技術の中核として変わらない位置を占めるものと予想されている。一方，再エネは今後とも導入拡大が予想されるが，そのため火力発電は部分負荷或いは頻繁な発停操作に対応した技術が求められる。本システムは，再エネの熱を火力発電システムに有機的に結合した方式であるので，効率面および経済性面で上記ニーズに応えうる特性を有する。なお，自家発電プラントにおいて，工場内未利用エネルギーが存在する

場合には，現在でも適用可能である。

② 廃棄物系エネルギーの将来の在り方に応える方式であること

一方，再エネの中でも廃棄物系，特に中小自治体の廃棄物は，現状焼却処理されておりながら発電等エネルギー変換としての利用が遅れている。そのための一方式として，従来のごみ固形化燃料（RDF）に代えて，将来はSRF（Solid Recovered Fuel）という新しい廃棄物系燃料が検討されており，実用化された場合，発電用としての適用が期待される。

③ 類似技術としての実績があること

事業用火力では既に類似技術として既設火力発電所の給水の一部を（新設）ガスタービン排ガスで加熱する方式（リパワリング又は排気再燃サイクル）が実用化されている。しかし，同ガスタービン燃料はLNG等（火力発電用燃料）に限定されており，本システムで対象とするバイオマスを含む廃棄物系燃料，太陽熱，風力熱などの再生可能エネルギーを適用したものは実用化されていない。

産業用では，同一原理に基づくものが実用化されている。それはセメント製造プラントの排ガスを利用した熱回収装置からの発生蒸気を既存自家発プラントへ適用した例であり，その適用で燃料節減が図れ，設備改造費を約４年で回収し，現在も順調に運用されている。

さて，研究会に話を戻すと「再エネ火力発電」に関しては，過去数年にわたりフィジビリティスタディ[(1)][(2)]等を実施し，技術的には十分実用可能であるとの理解を得た。しかし今後の実用化展開に際しては，エネルギー発生源から利用までのストーリーを描き，課題，対応策，実用化シナリオ等を検討することが必要でそのために急遽有志による研究会を開催することとした。2016年９月より準備と開催案内等を行い，結果的には，11団体・企業の参加を得て11月末から2017年３月末の期間にて「再生可能エネルギー火力発電システム研究会」を実施した。限られた期間ではあったが，特に研究会メンバーの積極的な協力を頂き，所定項目の検討を行い，成果報告書[(3)][(4)]を取りまとめることができた。

２．研究会の目的と体制

（１）目的

再エネ火力発電システムの情報と価値観を共有し，技術開発の提言を纏めることにより，同システムの早期実用化と普及に資する。

（２）研究期間

平成28年11月28日～29年3月31日

（３）研究会組織と活動

研究会組織を**表１**に示す。企業・団体は50音順で示した。

次に，研究会の活動と構成を**表２**に示す。

表１　研究会の組織

正会員	（一財）石炭エネルギーセンター JFEエンジニアリング（株）＊ 中国電力（株）＊ パシフィックコンサルタンツ（株）
準会員	（株）神戸製鋼所 瀬尾高圧（株） 三菱重工業環境・化学エンジニアリング（株）
オブザーバ	（一財）新エネルギー財団 （一財）日本環境衛生センター 福山市経済環境局環境部 （公財）廃棄物・3R研究財団＊
事務局	（一財）エネルギー総合工学研究所＊

＊研究会幹事会メンバー

表２　研究会の活動と構成

総会	活動計画，予算等基本的事項を決定する。 正会員，準会員，事務局で構成
研究会	総会の下部機関で情報共有，研究の実質的内容を検討する。 正会員，オブザーバ，事務局で構成
幹事会	総会，研究会運営，各会資料・報告書作成等を行う。 上記各員が参加（本稿執筆企業および団体名と一致）

3．再エネ火力発電システムとは

（1）再エネ火力発電システムの概要

再エネ火力発電システムの概要は緒言でも述べた処であるが，ここで改めて技術的な面からの特徴を下記に挙げる。

① 給水を間接加熱することで安全性・実用性を重視したこと

本システムは，給水加熱に際しバイパス給水加熱器（BP ヒータ）を介して間接的に加熱しており，更に焼却炉発生蒸気の圧力は既存給水系圧力よりかなり低いレベルで設定しているので，仮に新設給水系で何らかの問題が発生した場合でも，既存火力発電所へ影響が及ばないよう，発電所の安全性を重視したシステムとしている。

② 廃棄物系燃料，再エネからの高効率発電を可能にしたこと

焼却炉の蒸気発生側から見た場合発電所の大型高効率発電システムと結合することにより，火力発電の高効率発電特性を得ることになり，例えば通常廃棄物発電では到達困難な発電効率 30％レベルも可能としたことである。

③ 既設発電所の火力発電燃料節減あるいは定格枠内で発電出力増大も可能にしたこと

発電所側から見た場合，蒸気タービンの抽気蒸気を発電用に活用できるので，燃料節減或いは発電出力の増加が可能となる。

④ 既設火力発電所適用の場合，タービンの蒸気量バランスが実績範囲内にあること

一般に給水系統は 2 系列存在し，給水系異常時には 1 系列で運転できる（その分タービン抽気量の減少と後部流量が増加する）ようになっているが，本システムの既設適用はその範囲に収まるよう設定することにより新たなタービン強度等の検討は不要。

⑤ 火力発電所の燃料を問わないこと

火力発電所のボイラ用燃料は，石炭，LNG，石油等あらゆる燃料を適用できる。

⑥ 組み合わせる再エネの種類を問わないこと

再生可能エネルギーからは，熱のみを利用するので廃棄物系，太陽・風力熱等，その種類を問わない。システムの概念を**図 1** に示す。

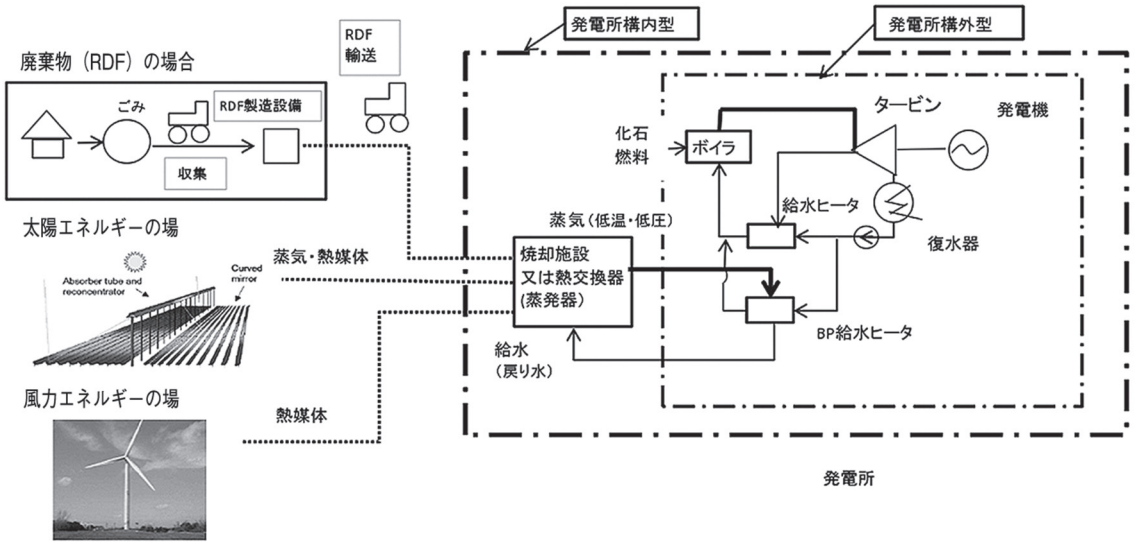


図 1　再生可能エネルギー火力発電システムの概念図

（2）類似例

① 火力発電所への適用例

1980 年代から 1990 年代にかけて国内電力需要の増大に対応し，電力会社は，それぞれの既存設備の特徴を生かした需要増大への対応策を図った時期があった。

その１つの方式として，ガスタービンを単体で導入し，その燃焼排ガスを既存ボイラの燃焼用空気として用いることにより既発電所の出力増加と効率向上を可能とする，いわゆるリパワリング方式または排気再燃方式が一部の電力会社で採用された。その際，ガスタービンの排気は高温過ぎて直接既存ボイラ（燃焼部）に導入できないので，その方策としてガスタービン出口煙道中に熱回収装置（給水加熱装置）を設け，燃焼ガス温度を妥当な温度に低下させる方法が採用された。これは，給水系の一部をバイパスして利用したリパワリングシステム（排気再燃サイクルー給水加熱方式）で，タービン出力増加という点では本技術と類似している点がある。

しかし，ガスタービン燃焼排ガスを加熱源とするためその燃料は LNG 等クリーンな燃料に限定されること，主給水の一部を分岐した上でガスタービン出口の排ガス回収装置で燃焼ガスにより直接加熱する点で本技術とは異なる。

図２に，再エネ火力発電システムとリパワリングシステムの概念を示す。

② 産業用火力発電所（自家発電）への適用例

セメント製造プラントにおける排熱を回収して発電所（自家発）に適用した例は，既に実用プラントで適用されている。その詳細は後述する。

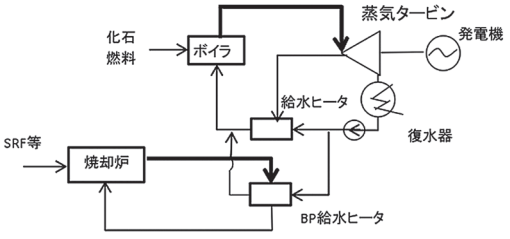
４．火力発電ならびに再エネの動向

火力発電は，まず供給安定性・経済性・環境性が求められる。石油・石炭・LNG 等の燃料のどれかに偏ることなく，各々の特質を踏まえた最適な電源構成が重要とされている。

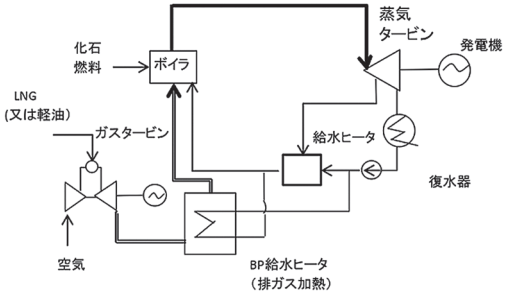
昨今太陽光等の再エネ電力が増加しているため，火力発電は再エネ需給のバランス調整用としての役割も期待されている。

火力発電の燃料価格は今後上昇が予想され，特に原油や LNG は大幅な上昇が予想されている。原油は大半が政情不安定な中東地域に依存し，供給リスクが高い。石炭はアジア各国の経済発展にともなって急激に需要が伸びており将来的には価格上昇が懸念される。天然ガスは，シェール・ガス革命により安定供給が期待され，アジア各国を中心に利用が進むとみられる。

火力発電向けの CO_2 削減方法として，LNG 利用拡大や CCS（炭素分離貯蔵）や経年火力の高効率化リプレース等が検討されている。しかし一方では，LNG への偏重による調達リスクの増大や CCS の高コスト性が指摘されている。本研究会提案の再エネ火力は，燃料費削減，CO_2 削減効果と改造費用や改造中の発電停止期間の低減面（リプレースに比して）から，魅力ある技術と考えられる。



＜再エネ火力発電システム＞



＜リパワリング（排気再燃）システム＞

図２　再エネ火力発電システムとリパワリングシステムの比較

5．再エネ利用の現状と再エネ火力発電システムへの期待

（1）廃棄物系燃料利用火力発電システム

① 廃棄物系エネルギーの利用の現状

まず，廃棄物系エネルギーとして一般廃棄物から取り上げその利用の現状を，発電用には不適な小規模施設が多いことと発電しても発電効率が低いことの２点から概説する。

a）小さい発電規模

平成９年５月以来，環境省（当時厚生省）はダイオキシン類排出削減を目的としたごみ処理広域化による焼却炉の施設規模 100 トン / 日以上での全連続燃焼化を推進している。そのため小型炉（100 トン / 日未満）の総数は減ったが，施設数としては依然として全焼却炉の半数近くを占める。施設規模の集約に地域性による制約があり必ずしも発電に適した規模にまで発電規模が拡大されていない。

b）低い発電効率

ごみ由来の成分による腐食対策で蒸気条件を低く押さえざるをえないため，必然的に発電効率が低くなっている。そのこともあり，実績の大半が 10％前後程度とかなり低いレベルにある。さらにごみ焼却施設の発電能力規模分布で見た場合，2,000kW 付近にピークがあることが指摘されているが，一般的に特別高圧系統の利用が容易でなく，高圧での系統連係では 2,000kW が上限とされている場合が多いことも発電効率が低めになる一原因と考えられている。

②廃棄物系燃料への期待

a）廃棄物系燃料の概要

廃棄物系燃料（RDF, RPF, SRF）は，種々の形状があり世界的に利用されているが，日本では，現状は一般廃棄物を原料とする RDF と主に産業廃棄物の廃プラスチックと古紙を原料とする固形燃料（RPF）がある。RDF の製造量は年間約 38 万トン（平成 24 年度），RPF の製造量は年間 125 万トン（平成 28 年度）であるが，どちらも昨今頭打ちである。一方，近年 EU（欧州連合）では，ごみ処理方式の１つである MBT システムにより，生ごみ，リサイクルごみを分離した後の廃棄物から可燃物を選別した燃料を固体回収燃料（SRF）と称し，サーマルリサイクル扱いとしている。今後，日本でも，生ごみのエネルギーを回収するためのメタン発酵の普及に伴い，分離された可燃ごみのエネルギー回収として，次に述べる日本型 MBT が期待される。

b）日本型 MBT システムと再エネ火力発電への期待

中小規模自治体では，前述のように規模が小さく発電等余熱利用は普及していない。

他方，全国の廃棄物処理施設の現状は，老朽化が進んでいる。耐用年数 20 年前後と言われている中で, 全国に約 1,140 ある施設（平成 27 年度）の約半数に上る約 630 施設（築 20 年超が約 420 施設, 築 30 年超が約 180 施設, 築 40 年超が約 30 施設）に更新時期が迫っており，余熱利用を含めた検討が必要とされている。

先に触れた日本型 MBT（メタン発酵＋ SRF 製造）システムは，生ごみと可燃ごみを分別収集または機械選別し，生ごみはメタン発酵によりガス発電を行い，可燃ごみは SRF にし焼却発電施設等で高効率発電または熱利用するというシステムである。同システムのイメージを**図３**に示す。

再エネ火力発電は，日本型 MBT システムの焼却発電施設に代わるもので，焼却炉は必要とするが，発電設備を新設することなく経済的に高効率発電を達成する方式として推奨される。可燃ごみは既に発酵性（生ごみ）成分が除去され，安全性・環境性面で優れた燃料に変えられているので，発電所においても化石燃料と同様の取り扱いが可能である。

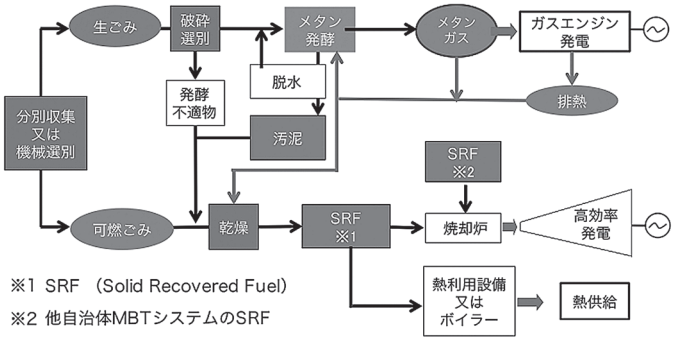


図３　日本型 MBT（メタン発酵＋ SRF 製造）システムのイメージ

（２）排熱利用火力発電システム（自家発電プラントへの適用事例）

宇部興産（山口県宇部市）は 2010 年から約 600m 離れて隣接するセメント工場の低温廃熱（280℃）を自家発（出力 145MW）の給水加熱に適用し，タービン抽気使用量を削減することにより増加出力を得る，いわゆる「再エネ火力の自家発適用版」を実際に行っている。その概要は以下の通りである。

自家発プラントより取り出した給水（87t ／ h × 34.5℃）をセメントキルン焼成工程のクリンカークーラ排熱で 158℃まで加熱し，同加熱温水を自家発プラントの低温給水系統に導入した。それにより，蒸気タービン（145MW）の抽気使用量が削減され，蒸気タービンの出力が約２MW 増大した。これを廃熱基準発電効率に換算すると，発電効率は高効率の 17%になる。

2010 年 6 月の運転開始当初は，廃熱回収熱交換器の伝熱面汚れに起因した熱回収量低下減少が見られたものの（対策済み），発電設備との連携運転および性能は，目標通りの特性と性能を得たことが確認されている。

本装置改造（排熱回収装置，配管等）費用数億円は，本システム運用後の燃料費節減（発電出力（約 2,000kW）対応）により，約 4 年で回収できた。

本成果は，平成 23 年度省エネ大賞「資源エネルギー庁長官賞」を受賞している。適用システムの概念を図４に示す。

（３）太陽熱利用火力発電システム

再エネ火力の一利用方式として，太陽熱との組合せも考えられる。本項では，研究会のメンバーが先に実施した概念検討結果から紹介する。

対象とする集光型太陽熱発電(CSP)技術には，

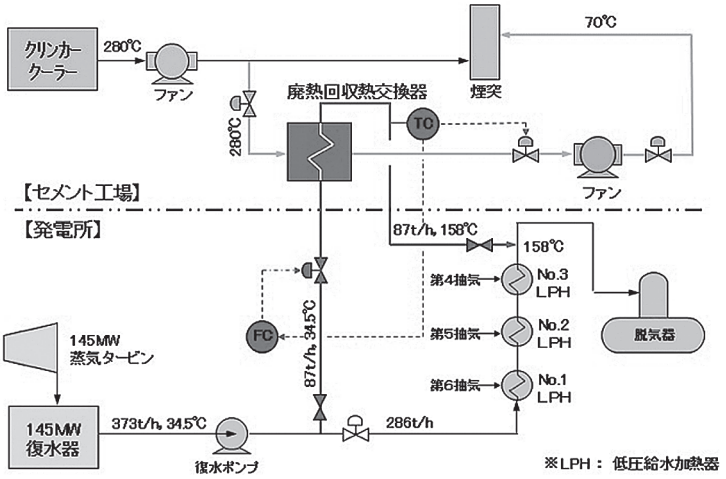


図４　省エネ設備導入後の設備フロー

パラボラ･トラフ型，リニア･フレネル型，タワー型等があるが，ここではリニア・フレネル型を採用した。集光効率は他方式より劣るものの，土地利用率が高いため必要土地面積が少なく設備費低減および強風対応可能等の理由による。

日射量データ（直達日射強度）としては，経済収支（年間入熱量）に用いる年強度（DNI）をNEDOの日射量データベース等から年平均964kWh/m^2・年とし，設備容量決定に用いる直達日射強度を春分の日の最高値である750W/m2（年平均換算6,570 kWh/ m^2・年）とした。検討結果の概要を以下に示す。

設備容量計算に用いる性能は，既存（仮想）火力発電所（出力700MW × 30MPa × 566℃ × 566℃，発電効率（発電端，LHVベース）44.8%）に対し熱入力５%相当で組み入れたところ，発生蒸気量約130t/h，（CSP寄与）出力約32,000 kW，発電効率約47.5%（CSP寄与分約2.7%）を得た。

それに対する土地必要面積は，310,000 m^2，また設備費用（CSPおよび発電所BP給水加熱器等）は文献[5]に基づき約87億円，年経費は10億円と推算された。

年間収支計算用の年間入熱量に対応する発電出力計算には，上述面積と年平均DNIを用い，発電所への熱入力約0.7%を得，冒頭火力発電所で出力約5,500 kW，発電効率約47.9%（CSP寄与分約0.4%）を得た。

上記年経費を年間平均出力で除した発電コストは，約30円/kWhとなり，同時期における太陽電池の発電コスト（30.1 ～ 45.8円/kWh）[6]と大差ないことが指摘された。なお，CSPの場合，わが国での実績が乏しく今後導入が進めばコスト低減代が大きいこと，更に本システムへのFIT（固定価格買取制度）の適用が可能になれば，日本における実用化の可能性が高くなると考える。

（４）風力熱電変換火力発電システム

再エネ火力の一利用方式として，風力熱電変換との組合せも考えられる。

風力熱発電を**図５**に示す。風車タワー頂部にて回転エネルギーを発熱機により熱に変換し，その熱は太陽熱発電と同じシステムを用いて高温蓄熱（～600℃）により安定化する。原理はIHクッキングヒータなどと同じで渦電流加熱を用いる。本技術の概要は下記の通りである。

① 熱交換器と蒸気タービンで風況に関係なく需要に応じた安定発電を行う。② 機械はカルノー効率に制限されるため，エネルギー効率が風力発電で電池と組み合わせた場合の2分の1程度になってしまう。しかし発電機の場合の電機子巻線が不要で渦電流発生部分は高電流密度にできるため10分の1まで重量が軽量化でき，建設コストを30%程度削減できる。③ 従来風力発電で蓄電池を利用する場合は，長周期になるほど蓄エネルギーコストがかさむが，風力熱発電は（高温溶融塩等によるエネルギー貯蔵であり）蓄エネルギーコストが相対的に小さいため7日間周期の風況と

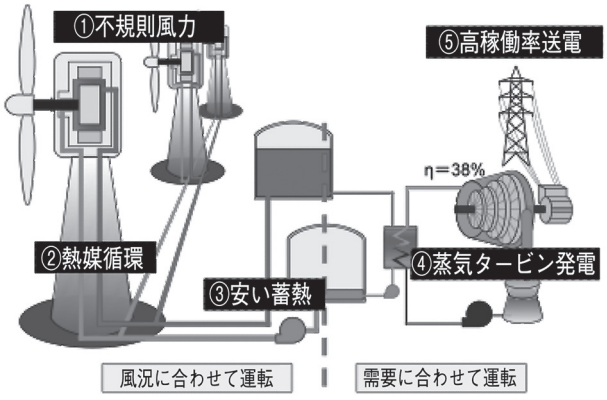


図５　風力熱発電（発熱特化）の基本構成

なっても従来型風力より小さなコストとなる。④ 送電線コストと需要地（都市）の変動許容力を考えると遠隔地では風力熱発電，都市近郊では従来型風力が適切であると考えられる。

6．再エネ火力発電システムの適用形態の検討

（1）組合せ候補の摘出

本システム適用に際しては，火力発電所と焼却炉の位置関係（構内型―構外型），火力発電の燃料種類（石炭，LNG 等），焼却炉の加熱源となる廃棄物等の燃料種類，発電所が事業用か産業用かなどで，多くの組合せが考えられる。研究会では発電所の燃料，発電所と焼却炉との位置関係，焼却炉燃料の種類など，候補項目を取り上げ，組合せ表を作成し，その可能性を定性的に評価したマトリックス表を作成して検討した。同結果を**表３**に示す。詳細は省略するが，事業用火力では，構内型（焼却炉は発電所構内設置）の場合は，焼却炉燃料は発電所としても受入れられる可能性の高い SRF，構外型組合せでは，焼却炉の位置関係（隣接建設の可能性を含め）が鍵を握る。

産業用適用の場合は，セメント製造工場の廃熱利用適用の事例もあり，未利用廃熱と自家発電プラントの存在が，その成立性を左右する。太陽熱或いは風力との組合せは，そのエネルギーとしての潜在量は大きく，将来の候補として注目すべきである。

（2）経済性検討結果

組合せを考える１つの方向性として，発電所における経済性試算を行った。条件は，構内型組合せにおいて，発電所（出力 34 万 kW）の燃料に石炭または LNG，焼却炉燃料に RPF を適用した場合で試算した。その際，設備費（焼却炉他）は 45 億円，RPF 価格は一定（3,000 円／トン）とし，燃料費（石炭　8,000 ～ 11,000 円／トン，LNG　40,000 ～ 100,000 円／トン）と利用率（ 40 ～ 90％）変化させた。その結果の例を**図６**に示す。

以上の検討結果から，全体的傾向としては LNG 火力の方が石炭火力より本システム採用の削減額は大きい。しかし，ここに各火力の利用率（稼働率）を考慮に入れる（例石炭火力 80％，LNG 火力 40％弱）とすると両者の年間燃料削減額はほぼ同等となる。更に燃料削減に伴う化石燃料による CO_2 低減効果（例えば CO_2 単価 3,000 円／ｔ・CO_2）を加味すると，

表３　再エネ火力組合せ候補マトリックス

再エネの種類＆区分				事業用						産業用	
				構内型			構外型			構内型	
大区分	中区分	小区分		石炭	LNG	油	石炭	LNG	油	石炭	油
廃棄物系	一廃	一廃	一廃	×	×	×	○	○	○	×	×
		固形燃料	RDF（SRF）	○（構内型にメリット発揮）	○（構内型にメリット発揮）	○（構内型にメリット発揮）	○（隣接型）	○（隣接型）	○（隣接型）	○	○
	産廃		RPF	○（構内型にメリット発揮）	△（CO2は負要因）～○（経済性は正要因）	○（構内型にメリット発揮）	○（隣接型）	○（隣接型）	○（隣接型）	○	○
		工場廃棄物	工場廃棄物	×	×	×	×	×	×	◎	◎
太陽	―			△（設置スペース要）	△（設置スペース要）	△（設置スペース要）	○	○	○	×	×
風力	―			△～○（蒸発器は構内）	△～○（蒸発器は構内）	△～○（蒸発器は構内）	△	△	△	×	×

記号：◎ 実績あり又は適用可能性が高い。
○ 適用可能と思われる。
△ 現状では不明。

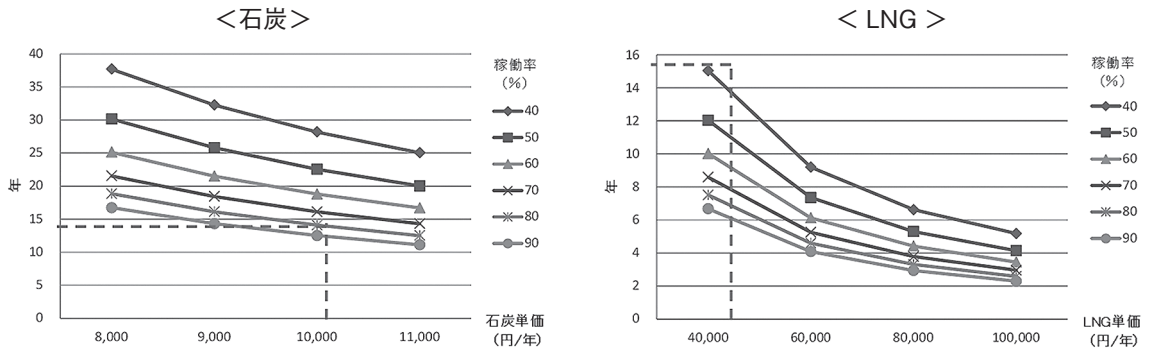


図６　再エネ火力ー単純償却年（3 分の 1 補助＋ CO_2 単価考慮）

石炭火力の方が LNG 火力より有利となるケースがある事が指摘された。例えば単純償却年で比較すると，石炭火力が約 20 年，LNG 火力が約 16 年であるが，CO_2 削減効果と FIT を適用したとした場合は，石炭火力が約 14 年，LNG 火力が約 15 年と逆転する試算結果も得た。

（3）経済性向上の方策案

上記の結果から，経済性向上の方向性としては，燃料費低減，設備費低減，運転経費低減，および利用率向上等が挙げられる。燃料費はエネルギー市場，設備費も程度の差はあれ素材・労務費等の外部要因で左右される面があるが，ここでは利用者の工夫余地が残されていると見られる利用率向上策を検討した。

検討結果を結論的に示すと，従来提案システムでは，焼却炉と発電設備は 1 対 1 対応，即ち焼却炉 1 施設に対し発電設備 1 施設（系列）を想定したが，もし焼却炉 1 施設に対し，発電設備は複数系列で利用可能とすれば，焼却炉蒸気を導入している発電設備が停止した場合でも他の運転中設備に切り替え利用できるので利用率は格段に向上する。同フロー案を図 7 に示す。その際，焼却炉は常に 1 施設とするが，建設費が焼却炉に比し格段に小さいバイパス熱交換器は必ずしも 1 台とする必要はなく，運用性等を勘案して各発電設備毎に設置する案もある。

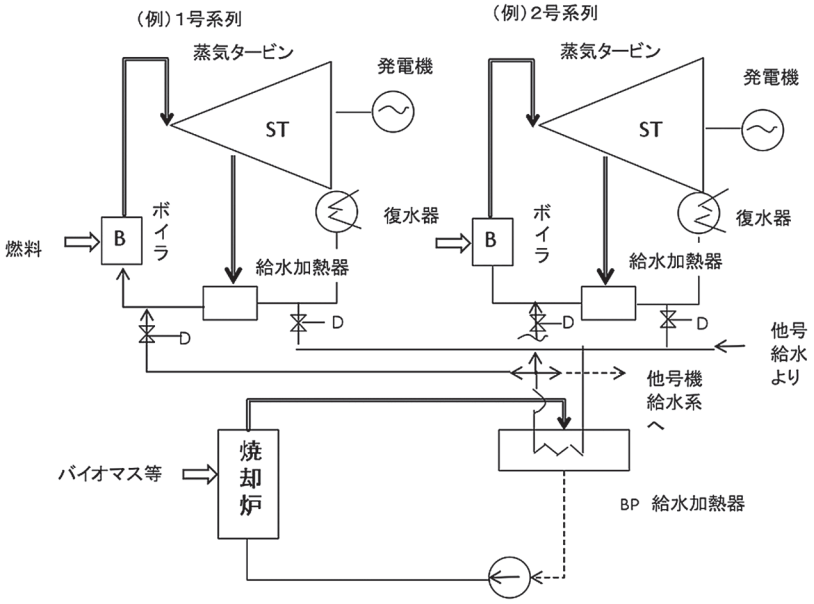


図７　再エネ火力利用率の向上方策案（特許出願済）

以上の考えによる効果が大きいのが現状利用率が低いLNGの場合である。先の**図６**に見られるように，現状の稼働率40％弱として，同値が80％に上昇すれば，LNG単価45,000円/tの場合，単純償却年が約16年から約７年と短くなる。LNG単価が上昇する局面となったらその効果は更に大きくなる。以上は焼却炉による発生蒸気を想定したシステムでの検討例であるが，蒸気発生が太陽または風力の場合でも，経済性が向上する特性は変わらない。

７．再生可能エネルギー火力発電システムの課題

本システム実現には，上流（エネルギー発生）から下流（発電）まで俯瞰して，安定した流れが確保できるかが重要である。その際，①経済性メリットの明確化，②SRF等廃棄物系燃料対応受皿システム構築，③現行RDF製造設備・発電所のFIT終了後の対応の３点が考慮点として挙げられた。

「経済性メリットの明確化」は，前項にて述べたような経済性成立条件を明確化して具体化を考える方向であり，「SRF等固形燃料対応受皿システム構築」は，将来構築が期待されるMBTシステムの開発実用化に伴って発生するSRFの受皿（高効率発電処理）を考える方向であり，更に「現行RDF製造設備・発電所のFIT終了後の対応」は，現在運転中のRDF発電設備（全国５カ所）がFIT契約終了に伴い（発電所としての経済性喪失により）閉鎖されると予定される時期（2022年頃）に継続生産されるRDFの受皿を考慮する事である。特に，「現行RDF製造設備・発電所のFIT終了後の対応」は急を要するといわれる。

８．まとめ

再エネ火力発電として，将来予想される火力発電所の運用形態に沿って，再生可能エネルギーによる発生熱を効率的に発電利用する方式を提案する。

一般廃棄物の将来の方向性として日本型MBTシステムが検討されているが，再エネ火力発電は，その発生SRFを高効率で経済的に利用可能な方式である。

再エネ火力発電の導入事例として，産業用としてセメント工場の低温廃熱（280℃）から自家発（出力145MW）へ適用し，2,000kW出力を得，約４年で回収した事例を紹介した。

将来の適用候補として，再エネに太陽熱（CSP）および風力熱との組合せの可能性を検討した。いずれも，条件が満たされれば，可能性は否定できないことを示した。

事業用火力発電における経済性検討結果と経済性向上を狙いとして利用率向上策案を紹介した。

９．おわりに

再エネ火力発電システムは，関係先の理解が浸透してないこと，普及に向かう十分なインセンティブが未だ働いていないこと等から具体的な動きは未だ見られない。しかし，本システムは日本の将来および世界においても必要とされる技術であると考える。

その普及への道筋を検討するには関係者の意見聴取とテーマを限定した検討が必要と考え本研究会を実施した。短期間の研究会ではあったが，目的を明確にし，また集中的に審議・作業を行うことによりほぼ計画通りの工程で，また内容的にも今後の方向性を論じるに参考となり得る情報整理はできたのではないかと考える。

本研究会に先立ちフィジビリティスタディ等を行っているが，改めてそれらの機会を与えて頂いた関係機関・団体に謝意を表する。また，本研究会講師（宇部興産㈱ 中村敏明氏（産業用プラント実例））および当所からの講師（プロジェクト試験研究部・吉田一雄参事（集光型太陽エネルギー関係），同・岡崎徹主管研究員（風力熱変換エネルギー関係））にも謝意を表する。

最後に，本研究会の立上げより，実施，取りまとめにわたり協力いただいた研究会会員各位に改めて謝意を表したい。

参考文献

（1）平成 26 年度環境省委託事業，平成 26 年度 CO_2 排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業，廃棄物等利用高効率火力発電システムの実用化研究成果報告書，一般財団法人エネルギー総合工学研究所，中国電力株式会社，平成 27 年 3 月
（2）小川紀一郎他，再生可能エネルギー利用火力発電システム－ RPF 利用火力発電システム実用化 FS，火力原子力発電 Vol.67 No.1（2016 年 1 月）
（3）再生可能エネルギー火力発電システム研究会成果報告書，平成 29 年 3 月，再生可能エネルギー火力発電システム研究会（非公開）
（4）小川紀一郎他，再生可能エネルギー利用火力発電システム研究会ー次段階展開を目指すためにー，都市清掃 Vol.70 No.338（2017 年 7 月）
（5）再生可能エネルギー発電設備の小型・産業用途を中心とした導入･運用展開，山内弘隆他共著，（株）情報機構，2013 年 9 月
（6）NEDO 再生可能エネルギー技術白書，2014 年

［調査研究報告］

二酸化炭素回収・貯留（CCS）の国際標準化

山下　敏（プロジェクト試験研究部 環境グループ　主管研究員）

1．はじめに

2015 年 12 月の第 21 回気候変動枠組条約締約国会議（COP21）において「パリ協定」が合意され，世界の平均気温上昇を産業革命前と比較して２℃未満に抑える目標とともに，更に 1.5℃に抑える努力を追及することに言及された。その達成のために，今世紀後半に温室効果ガスの人為的な排出と吸収のバランスを達成するよう，世界の排出ピークをできるだけ早期に迎え，最新の科学によって急激に削減するという目標が提示された。

国際エネルギー機関（IEA）が発行する最新の「エネルギー関連技術見通し」(ETP2017) [(1)] では，温度上昇を２℃程度に抑えるシナリオ（２DS）を達成するための技術が検討されている。

現状および予定されている政策を考慮した参照技術シナリオ（RTS, Reference Technology Scenario）では，2060 年における世界の二酸化炭素（CO_2）排出量は約 400 億 t- CO_2／年と，現在より緩やかに増加すると見積もられている。これは，COP21 で各国から提出された約束草案が定めた温室効果ガス排出削減対策を考慮したものである。これは，現在の対策では CO_2 排出量は増加を続け，温度上昇２℃未満，および温室効果ガスの排出と吸収をバランスさせるという目標は到底達成できないことを示している。

これに対して２DS における 2060 年の CO_2 排出量は約 90 億 t- CO_2／年と見積もられ，参照技術シナリオと比べ約 310 億 t- CO_2／年の大幅な削減が必要としている。これを達成するためにコスト対効果を最適化した排出削減技術の選択を行うと，**図１**に示すように，二酸化炭素回収・貯留（CCS）が削減量の 14％を担うとされ，効率化（40％），再生可能エネルギー（35％）に次ぐ大きな貢献が求められている。

現在，大規模な CCS プロジェクトは世界で 17 件稼動しており，更に建設中の４件が 2018 年までに稼動する予定である [(2)]。稼働中の大

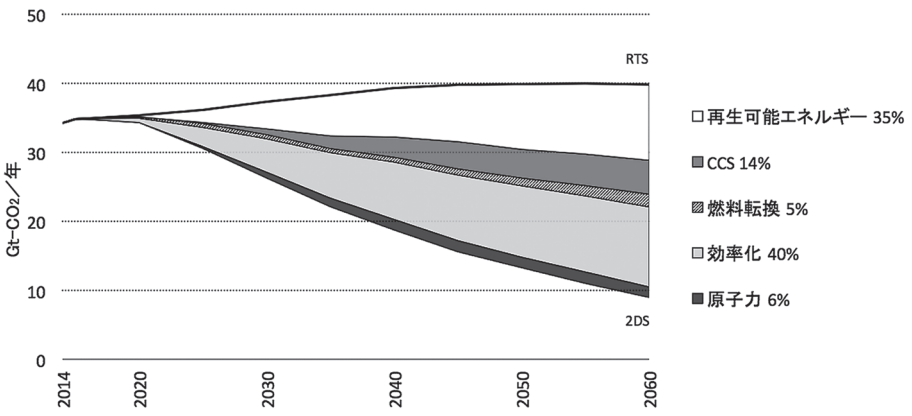


図１　温度上昇を 2℃未満に抑えるための CO_2 排出削減技術別の貢献度 [(1)]

規模 CCS プロジェクトが CO_2 を貯留する能力は年間約 3,000 万トンであるが，これは 2DS を達成するために将来期待される貯留能力より 2 桁小さい。CCS への取り組みは，現在の CO_2 排出削減量から見てまだ緒についたばかりで，本格的導入を目指した一層の努力が求められる。

CCS に関する国際標準化については，国際標準化機構（ISO）の中に設置された専門委員会（TC265）により，規格文書の作成が進められている。CCS の技術は発展途上であり，広く普及するためには多くの技術開発や検証のための実証が必要とされることから，国際標準化は時期尚早ではないか，との意見も見られる。しかし，CCS の実証・商用プロジェクトを進め，それを通じた技術革新を行っていくために，国際標準化が求められている。

従来の CCS 事業者は，その国・地域の規制，ガイドラインや国際標準等のうち CCS に関連または類似したものに基づきプロジェクトを進めてきたが，事業者・規制当局ともに技術的蓄積や知見が乏しく，双方の合意形成に長い時間と多くの努力が必要であった。

国際標準は，世界から集まる専門家により検討，作成され，国際的合意の手続きを踏んで発行されるため，信頼できる文書と考えられる。従って，規制当局が基準を作成するための参考や，事業者が地域住民への説明を行うための情報として，合理的で説得力のある根拠となる。つまり，CCS に特化し CCS プロセスを網羅した国際標準があれば，利害関係者の合意形成に使える効果的なツールとなり，効率的な CCS 事業の推進につながると考えられる。

本稿では，世界の CCS プロジェクトの概況について述べ，続いて当研究所（IAE）が参画している CCS の国際標準化への取り組みについて紹介する。

2．世界の CCS プロジェクトの現状

（1）稼働中の大規模 CCS プロジェクトの概況

CCS は**図 2** に示すように，以下 3 つのプロセスからなる。

① 回収：CO_2 発生源から CO_2 を分離・回収
② 輸送：回収場所から貯留場所への CO_2 の輸送
③ 貯留：貯留場所での地中への圧入・貯留

現在進められている CCS プロジェクトにおいては，様々な CO_2 発生源，貯留方法が採られている。世界の大規模 CCS プロジェクトについて，その概要を紹介する。

表 1 は，2017 年 8 月までに操業を開始した大規模 CCS プロジェクトの一覧である。ここでは，CO_2 回収能力が 80 万 t-CO2/ 年（石炭

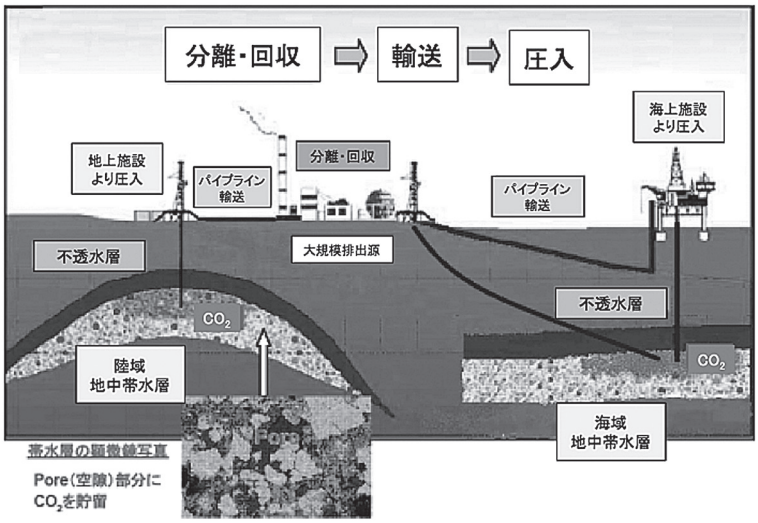


図 2　CCS の概要 (3)

表１　世界の大規模 CCS プロジェクト一覧 (2)

プロジェクト名	操業開始年	所在地	回収能力（Mt-CO_2/年）	CO2源	輸送	貯留
テレル天然ガス処理プラント（元ベール・ベルデ天然ガスプラント）	1972	米、テキサス州	0.4-0.5	天然ガス処理	パイプライン 316km	EOR
イーニド肥料 CO_2-EORプロジェクト	1982	米、オクラホマ州	0.7	肥料製造	パイプライン 225km	EOR
シュート・クリーク ガス処理施設	1986	米、ワイオミング州	7	天然ガス処理	パイプライン 最長460km	EOR
スライプナー CO_2貯留プロジェクト	1996	ノルウェー、北海	0.85	天然ガス処理	輸送なし（直接注入）	純粋な地中貯留 オフショア深部塩水層
グレート・プレイン合成燃料プラント／ウェーバーン・ミデール プロジェクト	2000	カナダ、サスカチュワン州	3	石炭ガス化	パイプライン 329km	EOR
スノーピット CO_2貯留プロジェクト	2008	ノルウェー、バレンツ海	0.7	天然ガス処理	パイプライン 153km	純粋な地中貯留 オフショア深部塩水層
センチュリー・プラント	2010	米、テキサス州	8.4	天然ガス処理	パイプライン 64～240km	EOR
エア・プロダクツ メタン水蒸気改質・EOR プロジェクト	2013	米、テキサス州	1	水素製造	パイプライン 158km	EOR
コフィービル ガス化プラント	2013	米、カンサス州	1	肥料製造	パイプライン 112km	EOR
ロスト・キャビン ガス化プラント	2013	米、ワイオミング州	0.9	天然ガス処理	パイプライン 374km	EOR
ペトロブラス サントス盆地 プレソルト油田 CCSプロジェクト	2013	ブラジル サントス盆地	1	天然ガス処理	輸送なし（直接注入）	EOR
バウンダリー・ダム CO2回収貯留プロジェクト	2014	カナダ、サスカチュワン州	1	石炭火力発電	パイプライン 66km	EOR
クエスト	2015	カナダ、アルバータ州	1	水素製造	パイプライン 64km	純粋な地中貯留 オンショア深部塩水層
Uthmaniyah CO2-EOR実証プロジェクト	2015	サウジアラビア 東部州	0.8	天然ガス処理	パイプライン 85km	EOR
アブダビCCSプロジェクト	2016	アラブ首長国連邦 アブダビ	0.8	鉄鋼製造	パイプライン 43km	EOR
イリノイ産業CO_2回収貯留プロジェクト	2017	米、イリノイ州	1	化学品製造（バイオエタノール）	パイプライン 1.6km	純粋な地中貯留 オンショア深部塩水層
ペトラ・ノバ CO_2回収プロジェクト	2017	米、テキサス州	1.4	石炭火力発電	パイプライン 132km	EOR

火力）以上または 40 万トン t-CO_2/ 年（石炭火力以外）を大規模と定義している。

大規模 CCS における輸送は全てパイプラインによるもので，輸送せずに近傍の深部塩水層に直接貯留しているものが２件ある。米国には石油増進回収（EOR）用 CO_2 を輸送するために約 7,600km のパイプラインが存在し，これを活用して 100km 以上離れた貯留場所に CO_2 を輸送しているケースが多い。

貯留については，13 件が EOR に CO_2 を活用するもので，残りの４件が深部塩水層への純粋な地中貯留である。EOR に用いる場合は回収した CO_2 が販売できるため，採算性の観点から多くのプロジェクトが EOR への活用を前提に設計されてきた。

表２は，**表１**と各プロジェクトの詳細情報 (4) より，17 件の大規模プロジェクトを地域・CO_2 源別に分類したものである。地域別では米国・カナダの北米が 12 件と多く，欧州はノルウェーが２件，その他の地域はブラジル，サウジアラビア，アラブ首長国連邦が各１件である。北米中心の取り組みではあるものの，徐々に他の地域に拡大しつつあり，2018 年までに新たに豪州，中国で大規模プロジェクトが稼動する予定である。

CO_2 源としては天然ガス生産井戸からの随

表２　地域・CO_2 源別 大規模 CCS プロジェクト

	天然ガス生産	産業プラント	発電	計
北米	4	6	2	12
欧州	2			2
その他	2	1		3
計	8	7	2	17

伴 CO_2 が８件と最多であり，産業プラントが７件，石炭火力発電の燃焼ガスが２件である。産業プラントの内訳は，肥料製造，水素製造，鉄鋼，化学（バイオエタノール）と多岐に渡る。更に 2017 年中に肥料製造，石油精製からの CO2 回収によるプロジェクトが稼動する見通しであり，産業プラント由来の CO_2 を貯留するプロジェクトが増加しつつある。

（２）大規模 CCS プロジェクトの進捗状況

図３に，稼働中の大規模 CCS プロジェクト数の推移を示す。この５年間で多くのプロジェクトが稼動し，2012 年時点７件であったプロジェクト数は２倍以上と大幅に増加した。2017 年中に，豪州の「ゴーゴン CO_2 圧入プロジェクト（天然ガス生産随伴ガス）」，カナダの「アルバータ・カーボン・トラック・ライン（肥料製造）」，「同（石油精製）」の３件が新たに稼動する予定で，これらを含めた世界の大規模プロジェクトによる CO_2 貯留能力は，年間約 3,600 万トンに達する見込みである。

この５年で多くのプロジェクトが稼動した背景には，多くの政策的支援が行われたことがある。特に北米地域では，米国エネルギー省，カナダ連邦政府，カナダ・アルバータ州による助成金プログラムの影響が大きく，その結果 2010 年以降に北米で８件の新規プロジェクトが稼動している。

一方欧州は，CCS 技術の大規模展開の必要性を認識してはいるが，大規模プロジェクトへの政策による支援の具体化が進んでおらず，詳細検討段階まで進んだにも関わらず，投資判断に至らず中断または中止となったプロジェクトも多い。2009 年以降の炭素価格下落による投資インセンティブの低下も，新規プロジェクトが進まない一因となっている [(4)]。

欧州の中でノルウェーは積極的に CCS に取り組んでおり，2016 年にはスライプナー CO_2 貯留プロジェクトが圧入開始 20 年を迎え，累計 1,600 万 t の CO_2 が安全に貯留された。スライプナー地区から採掘される天然ガスの中には４～９％の CO_2 が含まれるものがあり，欧州の天然ガスの品質基準である CO_2 濃度（2.5% 以下）を満たすために CO_2 を分離・除去する必要があった。ノルウェー政府は 1991 年以来オフショア石油・天然ガス生産を含む多くの部門に炭素税を導入しており，1996 年時点で１t 当たり 210 クローネ（１クローネ 14 円換算で 2,940 円），2017 年には 445 クローネ（同 6,230 円）の炭素税が課せられている [(5)]。元々 CO_2 を分離する必要があったこと，炭素税の負担が大きいことから，操業者である Statoil 社にとって CCS が経済合理性のあるものとなっている。

これらの動向より，政策的な支援，炭層税などの CO_2 排出削減へのインセンティブ，回収した CO_2 の販売などにより収益性を確保することにより，多くの大規模 CCS が成功していることが分かる。一方で，2019 年以降の稼動を見越して建設段階に進んでいる大規模プロジェクトは無く，これまでの５年間の様な大規模 CCS の進捗が期待できるかどうかは不透明である。財政面，技術面の障害により中止・検討中断に追い込まれるプロジェクトも見られ，トランプ政権のパリ協定からの離脱など，

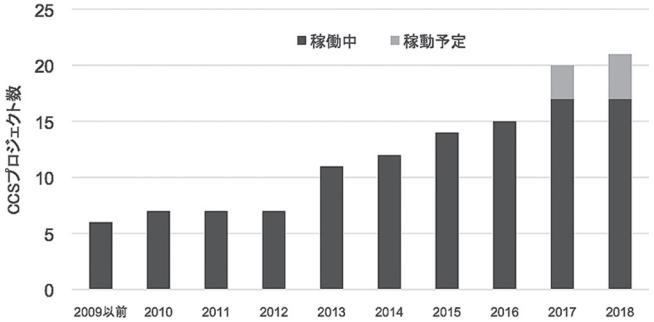


図３　稼働中の CCS プロジェクト数の変化 [(2)]

政策面の不透明さも存在する。

CCSがパリ協定の目標を達成するための手段として広く導入されるためには，この5年間の目覚しい進捗を停滞させないために，プロジェクトの採算性の確保につながる政策的な支援，制度整備，技術開発など，政策・技術両面において一層の取り組みが求められよう。

（3）日本におけるCCSの取り組み

日本では大規模CCSプロジェクトの実績は無いものの，2016年より苫小牧において10万t- CO_2/年規模の実証試験が開始されている。**表3**にその概要を示す[6]。

この実証試験は，苫小牧市の苫小牧港西港区石油精製施設に設置された水素製造装置から排出されたCO_2を分離・回収し，数km沖合の海底下の深部塩水層（深度 1,000 ～ 3,000m）に貯留する，回収から貯留までのCCSトータルシステムを扱う日本初の大規模実証試験である。10万t- CO_2／年という能力は2.1で紹介した大規模プロジェクト（40万t- CO_2／年以上）には及ばないものの，それに次ぐ大きな規模である。2012年より準備，設備設計，建設等を行い，2016年より圧入を開始，2017年8月までに約69,000tのCO_2を貯留している。

図4の配置図にもあるように，地上設備から2つの圧入井が海底の地下に伸びている。圧入部付近の海底・地上に6系統の地震計・受震ケーブルが設置され，地震や微小振動の発生状況を詳細に記録している。また圧入井と3カ所の観測井で地層の温度，圧力をモニタリングするとともに，海上・地上のCO_2濃度を定期的に計測している。これらの計測は圧入前の2015年度から圧入終了後2年間の2020年度まで継続され，CO_2が安定して貯留されていること，および貯留による振動の発生と地震によ

表3　苫小牧CCS大規模実証試験の概要

プロジェクト名	二酸化炭素削減技術実証試験事業（経済産業省委託事業）
実施場所	北海道苫小牧市、苫小牧港西港区および沿岸（数km以内）
実施主体	日本CCS調査株式会社 （2004年に24社の出資により設立、現在の株主数は35社）
期間	2012～2020年度（内CO2圧入期間：2016～2018年度）
排出源	製油所内水素製造装置
分離・回収方法	アミン溶液による化学吸収法
貯留層（深度）	萌別層（砂岩、深度 1,000～1,200m） 滝ノ上層T1部層（火山岩類、深度 2,400m～3,000m）
CO2圧入量	10万t-CO2／年 以上
貯留層タイプ	深部塩水層

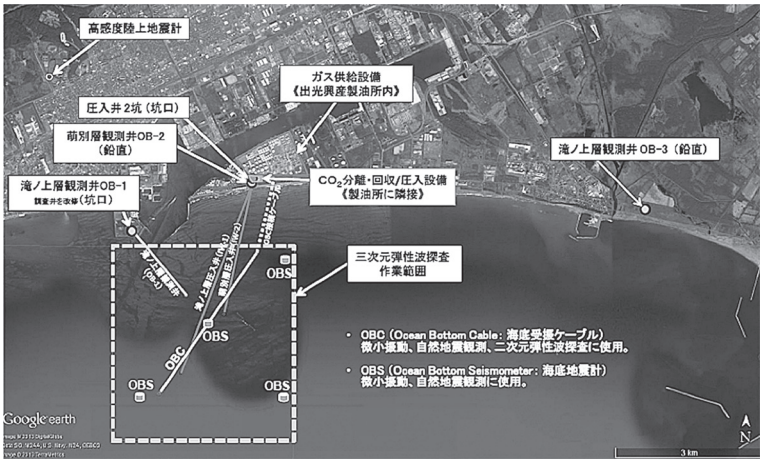


図4　苫小牧CCS大規模実証試験の配置図[7]

る影響などをモニタリングしている。

これらの観測データは，情報公開の一環としてホームページで公開されている。広報活動も，地域住民向けの講演会，パネル展示，現場見学会やイベント，子供が理解しやすい漫画による説明冊子の配布などが活発に行われている。これら地域住民の理解促進に対する活動は，CCS に対する社会受容性の向上に向けて重要な取り組みである。

9 年間の実証試験では CCS 技術の確立を目指しているが，並行して「CO_2 貯留適地の調査事業」が経済産業省と環境省の連携事業として推進されている[(8)]。2014 ～ 2021 年度の 8 年間で，国内の有望な貯留地点の探査，ボーリング調査等を行い，貯留層のポテンシャル評価を実施し，CO_2 貯留可能な地点を 3 カ所程度選定することを目指している。

これらの政策的取組みを通じて，日本においても商業ベースとされる 100 万 t- CO2 ／年クラスの CCS プロジェクトの可能性が検討されている。

3．TC265 の組織と活動状況

（1）TC265 設立と組織

2011 年にカナダが CCS の国際標準を策定することを提案し，投票の結果 ISO の技術管理評議会が新しい専門委員会（TC265）の設置を承認した。TC265 の概要を**表 4** に示す。カナダとともに中国が共同幹事国となっている。参加国は設立当初は 13 カ国であったが現在は 18 カ国に拡大しており，日本も設立当初より参画している。

図 5 に示すように，TC265 には 6 つの作業グループ（WG）が設置され，分野ごとに専門家が参画して規格開発の作業を行っている。

表 4　TC265 の概要

名称	Carbon dioxide capture, transportation and geological storage （二酸化炭素回収・輸送・貯留）
適用範囲	二酸化炭素回収・輸送・貯留（CCS）分野における設計、建設、操業、 環境計画とマネジメント、リスクマネジメント、定量化、 モニタリングと検証、及び関連活動の標準化
議長 幹事／共同幹事	カナダ カナダ／中国
参加国 （Pメンバー：18カ国）	オーストラリア、カナダ、中国、フランス、ドイツ、インド、日本、韓国、 マレーシア、オランダ、ノルウェー、サウジアラビア、南アフリカ、 スペイン、スウェーデン、スイス、英国、米国
参加国 （Oメンバー：10カ国）	アルゼンチン、チェコ、エジプト、フィンランド、イラン、イタリア、 ニュージーランド、カタール、セルビア、スリランカ
リエゾン機関 （7機関）	CO2GeoNet、CSLF、EIGA、GCCSI、IEA、IEAGHG、WRI

Pメンバー：投票権あり、投票・会議参加義務あり
Oメンバー：投票権なし、意見表明は出来る
リエゾン機関：情報交換のために参加する関連機関
下線：設立時に参加していた13カ国

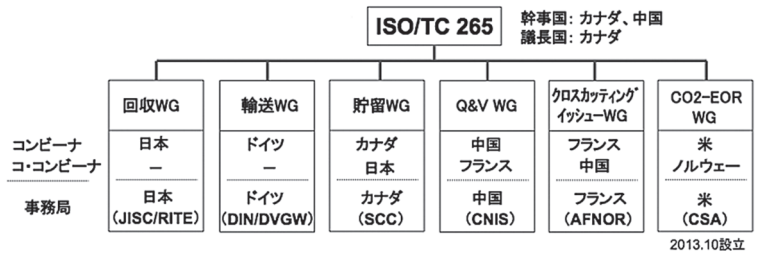


図 5　TC265 の組織図

WG1 から WG3 までは回収・輸送・貯留の主要な CCS 技術に対応し，WG4, 5 は CCS 全体に関わる WG 横断的な共通分野，WG6 は CO_2-EOR 技術に特化した分野を担当している。日本は WG1（回収）でコンビーナ（議長），事務局を，WG3（貯留）でコ・コンビーナ（共同議長）を務めるほか，全ての WG に専門家が参加しており，積極的に文書の作成に関与・貢献している。

（2）TC265 国内委員会の活動

TC265 に日本の代表として参加するに際し，日本としての意見を集約するために国内審議委員会が設置されている。**表 6** に国内委員会の組織図を示す。国内審議団体である（公財）地球環境産業技術研究機構（RITE）が事務局を務め，大学等の有識者・関連業界団体の代表などが委員となり，新規提案や規格案の審議，および規格の内容が日本にとって不利益なものとならないための対応などについて合意形成を行う。国内審議委員会で審議される具体的な内容は，TC265 の各 WG に対応した国内 WG により案が作成される。WG4，5 については，Q&V・クロスカッティングイッシュー WG で合わせて対応しており，IAE はこの WG の事務局を務めるとともに，TC265 の WG4，5 に専門家として参加し，規格開発に貢献している。

（3）TC265 の活動状況

規格開発の方針，進め方は，TC265 の総会で審議，承認される。実質的な文書作成は各 WG で進めるが，WG には決定権がなく，進め方について総会に諮って承認を得る必要がある。総会は参加国の代表が参加して定期的に開かれ，WG の活動について参加国のコンセンサスを得る場となる。ISO の代表機関は 1 国 1 機関と定められており，日本からは日本工業標準調査会（JISC）が登録されている。TC265 においては，RITE が JISC から委託され，日本の代表として活動している。

TC265 総会の開催状況を**表 5** に示す。第 2 回会合において TC265 が扱う範囲を定めたスコープ（適用範囲）や WG の組織，それぞれ

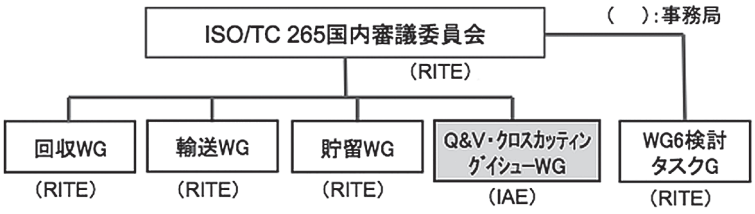


図 6　国内委員会組織図

表 5　TC265 総会の開催状況

回数	開催年月	開催地	特記事項
1	2012年6月	フランス，パリ	12ヶ国3機関より約60名参加
2	2013年2月	スペイン，マドリッド	TC265スコープ，ビジネスプランの決定，WG1～5の設置とリーダー国決定
3	2013年9月	中国，北京	WG6(EOR)の設置とリーダー国決定
4	2014年4月	ドイツ，ベルリン	認知に関するAd Hoc G設置
5	2015年1月	米国，バーミンガム	
6	2015年9月	ノルウェー，オスロ	
7	2016年5月	米国，ララミー	
8	2016年11月	日本，札幌	JISC/RITEがホスト，10ヶ国5機関より約90名参加 苫小牧CCSサイトの見学ツアー実施
9	2017年5月	中国，カラマイ	CO_2以外のGHGsの扱いを協議するAd Hoc G設置
10	2017年11月（予定）	豪州，シドニー	

の議長国，幹事国が決定され，方針と組織が定まった。その後文書の作成等の活動が本格的に開始され，ほぼ１年に２回の頻度で総会が開催されている。総会に合わせて各 WG 会合が行われ，WG の討議結果を総会で承認する，という手順で作業が進められている。

2016 年には第８回総会が札幌で行われ，会議に合わせて苫小牧 CCS の見学が行われた。総会においては開催国の CCS に関する取り組みが紹介され，CCS 関連の施設見学が行われるなど，専門家間の情報交換により政策動向や技術的知見の共有化が図られることが多い。

第９回総会は，中国でも有数の産油地帯である新疆ウィグル自治区カラマイ市で行われた。見学ツアーでは，原油が自噴した池がある黒油山，石油化学工場からの CO_2 回収設備，昨年開設された中国石油大学分校の石油技術研修センターなどが紹介された。CCS, CCUS（Carbon Capture, Utilization and Storage）への取り組みを紹介するフォーラムも行われ，EOR により石油増産と CO_2 排出削減の２つのメリットが享受できることもあり，中国が CCS に熱心に取り組んでいることが実感された。

４．CCS 国際規格の開発状況

（１）国際規格の開発手順

国際規格の開発は，作成された規格案を関係国に回付，承認を得て次の段階に進む，という手順を繰り返し，次第に高いレベルでのコンセンサスを得て発行に至る。開発手順を図７に示す。

新しい規格を開発するためには，提案を TC 内で投票にかけ承認を得る必要がある。投票したＰメンバーの３分の２以上が賛成するとともに，賛成Ｐメンバーのうち５カ国以上が専門家を指名して積極的に規格開発に参加することが承認の条件である（提案段階）。

承認後，WG の専門家メンバーにより作業原案（WD, working draft）が作成される。作成された WD 案について WG 内で議論・修正が繰り返され，コンセンサスを得た後に WG から TC に提出される（作成段階）。

TC に提出された WD は，委員会原案（CD, committee draft）の案として登録され，意見照会のためにＰメンバーに回付される（委員会段階）。回付された CD 案についてＰメンバーからのコメントが提出され，コメントへの対応と必要に応じて修正が加えられる。修正された CD 案は TC 総会でコンセンサスを得る場合もあるが，多くの場合は投票を行い，Ｐメンバーの３分の２の賛成により国際規格原案（DIS, draft International Standard）として登録される。

ISO 中央事務局は，登録された DIS を TC メンバーだけでなく全てのメンバー国に，投票のために回付する（照会段階）。投票でＰメンバーの３分の２以上が賛成した場合でも投票総数の４分の１以上の反対で否決されるため，TC 参加国以外から多数の反対があった場合は承認されず，修正後に再度投票を行う必要がある。

承認された DIS は編集上の修正を加えて国際規格の発行段階に進む場合もあるが，投票に付されたコメントに対応して DIS に技術的な修正を加え，FDIS（final draft International Standard）として再度投票を行い，承認されて発行段階に至ることが多い（承認段階）。

このように，国際規格は専門家による度重なるチェック，レビューと，国際的なコンセンサスの下に開発される。

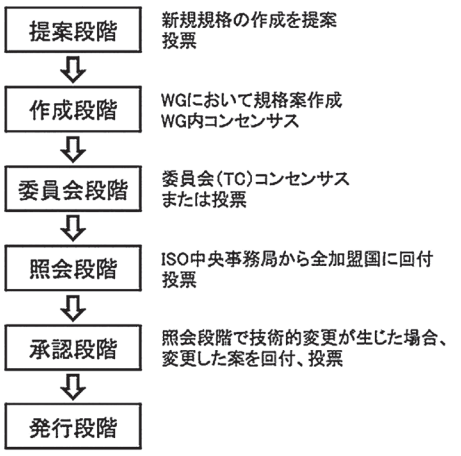


図７　国際規格の開発手順

（2）既に発行された CCS 関連の規格類

2017 年 9 月 10 日現在，TC265 により開発，発行されている規格類は，**表 6** に示すとおり 3 文書で，国際規格が 1 文書，技術レポート（TR, Technical Report）が 2 文書である。技術レポートは国際規格と異なり技術情報をまとめた参考資料の位置づけで，専門委員会内でコンセンサスを得て発行される。国際規格を作成する準備段階として作成され，発行後に国際規格の開発を行うことが多い。

ISO 27913 は，回収サイトから離れた場所で貯留する場合に CO_2 を輸送するためのパイプライン輸送の規格で，パイプラインに流れる CO_2 の特性，パイプラインの設計要件，材料，建設，運転を対象としている。現時点で CCS 関連の国際規格として唯一発行されたものであり，この規格を活用した各国の基準策定も進みつつある。

ISO/TR 27912 は CO_2 回収のシステム技術とプロセス，ISO/TR 27915 は CCS 工程における CO_2 量の定量・検証に関する技術レポートで，何れも技術レポートの発行に続いて，国際規格の作成が進んでいる。

（3）現在開発中の CCS 関連の規格類

現在 TC265 で作成中の文書は，**表 7** に示すとおり国際規格が 6 件，技術レポートが 2 件の合計 8 件である。

日本が主導する WG1 においては，CO2 回収システム全般を扱った技術レポートの発行に続き，その一部である発電プラントに設置される CO_2 回収設備に特化し，2 つの国際規格を作成しており，規格の適用範囲を少しずつ広げている。WG3 では地下貯留の国際規格が発行段階に進んでおり，近々発行される見通しである。WG6 が進めている CO_2-EOR 関連の国際規格も，専門委員会のコンセンサスを得て照会段階に進んでいる。

IAE が参加している WG4 では，CO_2 排出削減効果を定量化するために必要な定量と検証の分野で，技術レポートの発行を経て，国際規格の作成作業に入っている。WG5 では，CCS に関する用語のうち，各 WG の分野で共通して使用する分野横断的用語の定義について，

表 6　TC265 で作成された発行済の CCS 規格類

担当	規格番号	タイトル	発行年月日
WG1	ISO/TR 27912	Carbon dioxide capture — Carbon dioxide capture systems, technologies and processes 「CO2回収システム技術およびプロセス」（技術レポート）	2016.5.19
WG2	ISO 27913	Carbon dioxide capture, transportation and geological storage — Pipeline transportation systems 「パイプライン輸送システム」	2016.10.27
WG4	ISO/TR 27915	Carbon dioxide capture, transportation and geological storage — Quantification and verification 「定量と検証」（技術レポート）	2017.8.11

表 7　TC265 で開発中 CCS の規格類

担当	規格番号	タイトル（和訳）	開発段階
WG1	ISO 27919-1	CO_2 回収－パート1：　発電プラントと統合された燃焼後 CO_2 回収の性能評価方法	照会段階
	ISO 27919-2	CO_2 回収－パート2：　発電プラントと統合された燃焼後 CO_2 回収装置の性能を確実にし維持するための評価手順	作成段階
WG3	ISO 27914	地中貯留	発行段階
WG4	ISO 27920	定量と検証	作成段階
WG5	ISO 27917	用語（分野横断的用語）	承認段階
	ISO/TR 27918	統合CCSプロジェクトのライフサイクル･リスク･マネージメント（技術レポート）	委員会段階
	ISO/TR 27921	CO_2 流組成（技術レポート）	作成段階
WG6	ISO 27916	石油増進回収を用いる CO_2 貯留（CO_2-EOR）	照会段階

数ヶ月以内に国際規格を発行できる予定である。また，CCS プロセス全体を通したライフサイクル・リスク・マネージメントと，回収・輸送・貯留する CO_2 組成に関する分野について，技術レポートを作成中である。

TC265 が設立され CCS に関する国際規格作成の取り組みが始まって，６年が経過しようとしている。多くの手続き，国際的コンセンサスを得るための時間を要しているが，関係者が努力した結果，幾つかの国際規格，技術レポートが発行または発行間近となり，国際規格作成が着々と進行している。技術レポート発行後に国際規格化する努力も継続して行われている。今後これらの規格類を活用し，各国で基準の策定が進み，CCS プロジェクトの効率的な推進につながると期待される。

CCS 技術は発展途上であり，技術革新が続くとともに，新しい CCS プロジェクトにより適用分野も拡大していることから，技術的な内容の見直しや，新しい適用分野に対応した新規規格の開発などが必要である。プロジェクトの実績が増えることで技術情報も充実し，より質の高い規格への修正も求められる。今後も，CCS の活動の進捗に応じた国際標準化活動の継続が望まれる。

５．おわりに

パリ協定で掲げられた高い目標を達成するためには，これまでの対策の延長線上ではなく，抜本的な CO_2 排出削減の取り組みが必要となる。CCS は将来 CO_2 排出削減のための有力な選択肢であり，その本格的実現のためには多くの努力が必要となろう。

CCS 国際標準化の取り組みにより国際規格の発行が徐々に進み，それが各国の基準策定を促し，効率的な CCS 事業の推進につながりつつある。CCS の本格的普及に向けては，技術革新や実績の拡大に伴った国際規格の拡充や，修正・改良が欠かせない。今後も IAE として CCS 国際標準化活動の一端を担い，CCS の発展に向けて貢献していきたい。

［謝辞］

本稿は、RITE 委託事業「地球環境国際連携事業（CCS 国際連携事業（CCS 関連国際機関等との連携事業））における CCS 関連の規格化の Q&V とクロスカッティングイッシュー分野への対応業務」の成果の一部を含むものです。RITE および関係各位に感謝申し上げます。

参考文献

（１）IEA, Energy Technology Perspectives 2017
（２）Global CCS Institute,「世界の CCS の動向：2016，第２章　プロジェクト，政策，市場」, Melbourne, Australia.
（３）経済産業省 産業構造審議会地球環境小委員会（第 29 回）資料 6, 2006 年 5 月 17 日
（４）Global CCS Institute,「世界の CCS の動向：2015，第２章　プロジェクト，政策，市場」, Melbourne, Australia.
（５）NORWEGIANPETROLEUM.NO
http://www.　norskpetroleum.no/en/environment-and-technology/emissions-to-air/
（６）日本 CCS 調査株式会社 HP
http://www.japanccs.com/business/demonstration/overview.php
（７）水素・燃料電池戦略協議会 CO_2 フリー水素ワーキンググループ（第６回）資料２，「我が国の CCS 政策について」，平成 28 年 11 月 24 日
（８）経済産業省 HP，平成 30 年度経済産業省概算要求の PR 資料，2017 年８月

研究所のうごき

（平成 29 年 7 月 2 日～ 10 月 1 日）

◇ 月例研究会

第 369 回月例研究会

日　時：7 月 28 日（金）14:00 ～ 16:00

場　所：航空会館 5 階　501・502 会議室

テーマ：

1．OPTiM の第 4 次産業革命に向けた取り組みのご紹介～ AI・IoT・Robot・BigData を使った既存産業の再構築による大変革・大チャンス時代へ～

（㈱オプティム代表取締役社長　菅谷　俊二氏）

2．地域内や観光地における電動小型低速車の活用

（（公財）交通エコロジー・モビリティ財団　交通環境対策部　担当課長　熊井　大　氏）

第 370 回月例研究会

日　時：8 月 25 日（金）14:00 ～ 16:00

場　所：航空会館 5 階　701・702 会議室

テーマ：

1．世界潮流となった太陽光発電システム～基幹エネルギーとして行動する時代を迎えて～

（㈱ 資源総合システム代表取締役　一木　修氏）

2．洋上風力発電の現状と今後の展望

（（一社）日本風力発電協会　技術部長　海津信廣　氏）

◇ 外部発表

［講演］

発表者：木野　千晶

テーマ：Melting Test of Penetrating Tube through BWR-RPV Bottom Wall

発表先：25th International Conference on Nuclear Engineering（ICONE-25）（於上海）

日　時：7 月 3 日～ 7 日

発表者：蓮池　宏

テーマ：蓄エネルギーシステム概要

発表先：第 12 回再生可能エネルギー展示会　JCRE フォーラム：エネルギーネットワークの最前線～再エネ導入拡大に向けた蓄エネシステムの利用～

日　時：7 月 6 日

発表者：森山　亮

テーマ：低炭素社会に向けた再生可能エネルギーの役割と課題

発表先：日本機械学会　2017 年度年次大会　市民フォーラム

日　時：9 月 3 日

発表者：酒井　奨，入谷 淳一，小野崎 正樹

テーマ：CO_2 分離型化学燃焼石炭利用技術（ケミカルルーピング燃焼技術）の開発

発表先：日本機械学会　2017 年度年次大会（埼玉大学）

日　時：9 月 4 日

発表者：黒沢　厚志

テーマ：TIMES-Japan 及び GRAPE モデルによるシナリオ解析

発表先：自動車技術会主催　第 2 回次世代自動車動力システム特設委員会

日　時：9 月 12 日

発表者：坂田　興

テーマ：Hydrogen Supply Chain

発表先：2017 Saudi Aramco-JCCP Symposium on the Global Perspective of the Hydrogen Economy

日　時：9 月 13 日

［ポスター発表］

発表者：笹倉 正晴，石本 祐樹，飯田 重樹，坂田 興

テーマ：Scenario study for CO_2-free hydrogen dissemination focused on hydrogen combined power plants

発表先：7th World Hydrogen Technologies Convention（WHTC 2017）,Prague, Czech Republic

日　時：7 月 9 日～ 12 日

[学会発表]

発表者：日浦 俊哉, 鈴木　守, 蓮池　宏, 佐藤　隆, 中道　亮

テーマ：断熱圧縮空気エネルギー貯蔵システムによる風力出力制御～（1）実証設備の構築～

発表先：電気学会　B 部門大会（東京）

日　時：9月7日

発表者：発表者：黒沢 厚志, 加藤 悦史（エネルギー総合工学研究所）, 宮近 秀人（SRC）, 荻本 和彦（東京大学）, 山口 容平（大阪大学）

テーマ：最適化型モデルによる日本の低炭素エネルギーシステムの検討

発表先：環境経済政策学会　2017 年大会（高知工科大学）

日　時：9月9日～10 日

発表者：発表者：黒沢 厚志, 加藤 悦史（エネルギー総合工学研究所）, 宮近 秀人（SRC）, 荻本 和彦（東京大学）, 山口 容平（大阪大学）

テーマ：TIMES-Japan を用いた 2050 年の日本のエネルギー需給分析

発表先：化学工学会 第49回秋季大会（名古屋大学）

日　時：9月 20 日～ 22 日

[論文発表]

発表者：岡田 英俊

テーマ：（1）“Visualization Experiment on Zirconium Alloy-Steam Reaction"（Hidetoshi Okada, Shunsuke Uchida, Masanori Naitoh, Yukio Hanamoto and Masahiro Fujikawa）

（2）“Fission Product Release from Suppression Chamber.under Decompression Boiling"（Hidetoshi Okada,Shunsuke Uchida, Masanori Naitoh, Hidetoshi Karasawa and Yukio Hanamoto）

発表先：7th International Symposium on Energy（Energy 7）

日　時：8月 13 日～ 17 日

[寄稿]

寄稿者：小川 紀一郎 他

テーマ：再生可能エネルギー火力発電システム研究会（成果概要）

寄稿先：（公社）全国都市清掃会議『都市清掃』第 70 巻 338 号（7月号）

寄稿者：坂田　興

テーマ：平成 28 年の水素利用技術

寄稿先：日本機械学会誌『機械工学年鑑』特集号（8月号）

寄稿者：松井 一秋, 楠野 貞夫, 竹田 知幸, 林道　寛, 都筑 和泰

テーマ：平成 28 年における重要なエネルギー関係事項（Annual Energy Reviews - 2016）「原子力」

寄稿先：日本エネルギー学会誌（9月号）

寄稿者：坂田　興

テーマ：平成 28 年における重要なエネルギー関係事項　（水素）

寄稿先：日本エネルギー学会誌（9月号）

寄稿者：笹倉 正晴

テーマ：解説「水素エネルギー導入の国富流出に及ぼす影響評価」

寄稿先：水素エネルギー協会（HESS）会誌　第 42 巻　第 3 号（9月発行）

寄稿者：林道　寛

テーマ：9.2.1 Fukushima Daiichi

寄稿先：Advances and Innovations in Nuclear Decommissioning（Woodhead Publishing）（9月 10 日）

◇人事異動

○7月3日付

（兼務）

中村 雅人　　技術開発支援センター主管研究員　プロジェクト試験研究部兼務

○7月10日付
（嘱託採用）
Quang Dang Le　原子力工学センター嘱託研究員

○7月31日付
（出向解除）
朝川 文雄　　プロジェクト試験研究部主任研究員
岸下 竹志　　プロジェクト試験研究部主任研究員

○8月1日付
（出向採用）
野瀬　崇　　プロジェクト試験研究部主任研究員

（兼務）
中村幸一郎　エネルギー国際標準（ISO）センター長
重政弥寿志　プロジェクト試験研究部長，原子力工学センター長，原子力工学センター部長
蓮池　宏　　プロジェクト試験研究部長，技術開発支援センター長
小野崎正樹　プロジェクト試験研究部長

○9月1日付
（人事発令）
都筑 和泰　　中長期ビジョン策定タスクフォースメンバー
久田　司　　中長期ビジョン策定タスクフォースメンバー
森山　亮　　中長期ビジョン策定タスクフォースメンバー
酒井　奨　　中長期ビジョン策定タスクフォースメンバー
飯田重樹　　中長期ビジョン策定タスクフォースメンバー
加藤 悦史　　中長期ビジョン策定タスクフォースメンバー
鈴木 博之　　中長期ビジョン策定タスクフォースメンバー
臼井健一郎　中長期ビジョン策定タスクフォースメンバー
田中 健一　　中長期ビジョン策定タスクフォースメンバー
井野 大輔　　中長期ビジョン策定タスクフォースメンバー
髙橋 知慎　　中長期ビジョン策定タスクフォースメンバー
野村 和之　　中長期ビジョン策定タスクフォースメンバー

○9月30日付
（出向解除）
藤井 貞夫　　プロジェクト試験研究部部長（副主席研究員）

○10月1日付
（昇進）
都筑 和泰　　プロジェクト試験研究部部長（副主席研究員）兼原子力工学センター

（非常勤嘱託採用）
藤井 貞夫　　プロジェクト試験研究部参事

（出向採用）
松本 俊一　　プロジェクト試験研究部主管研究員

編集後記

今年７月，フランス，イギリスが相次いで，2040 年までにガソリン車とディーゼル車の販売を禁止するとの方針を打ち出した。それぞれ，二酸化炭素の排出削減，深刻化する大気汚染への対処という背景があるという。加えて，世界最大の自動車市場である中国も，大気汚染を理由として，様々な優遇策や規制を通じて電気自動車へのシフトを進めている。９月に開催されたフランクフルトモーターショーでも，世界の主要自動車メーカーは軒並み電動化車両を出展し，「電動化」へのシフトが主流となったとの報道があった。電気自動車，プラグイン・ハイブリッド車，燃料電池自動車，いずれが覇権を握るのかわからないが，まさに大変革の時を迎えつつあるといえる。

一方で，現時点のこれら環境対応車に対するシェアの低さから，政策の実現性を疑問視する見方がある中，この「電動化」の動きを実現・加速するためには，解決すべき様々な課題が山積している。自動車業界にとっては，生産拠点や従業者の雇用，関連企業問題などが大きな課題となるであろうし，消費者からみると，車両価格やラインナップ，１充電当たりの走行距離，充電時間，電池の寿命，充電・充填ステーションの問題などがハードルとして挙げられよう。政府の補助金などの優遇措置があるにしても，本格的な普及を図るには，是非ともクリアすべき課題である。

AI をはじめとする第４次産業革命関連技術を用いる「自動運転」との親和性が高く，また，スマートグリッドや水素社会の構築などの新たなエネルギーシステムを構成する重要な要素としても，これら電気自動車などに対する期待は高い。世界の動きに後れをとることのないよう，産学官一体となった取組が望まれる。

編集責任者　重政弥寿志

季報　エネルギー総合工学　第 40 巻第３号
平成 29 年10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 吉田コンピュートサービス

※ 無断転載を禁じます。