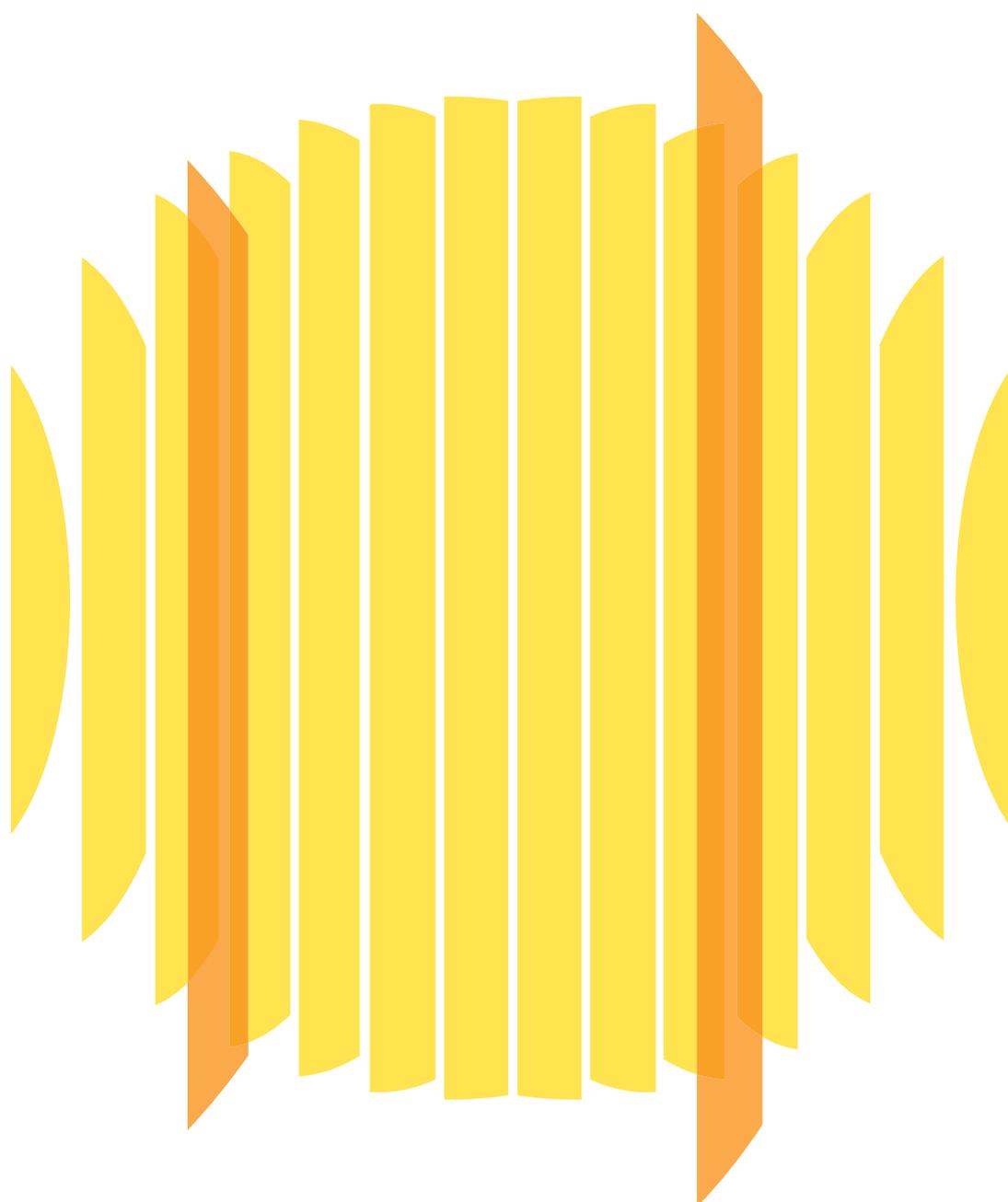


季報 エネルギー総合工学

Vol. 41 No. 3 2018. 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】

エネルギー大競争時代の只中で思うこと

電気事業連合会 専務理事 清水 成信 …………… 1

【寄稿】

再生可能エネルギー電源導入の現状と将来に向けた課題

東京大学大学院 新領域創成科学研究科

先端エネルギー工学専攻 准教授 馬場 旬平 …………… 3

【寄稿】

水素ステーション設備に使用する材料の選定について

高圧ガス保安協会 総合研究所 所長

佐野 尊 …………… 12

【調査研究報告】

カーボンサイクルエネルギーシステムの構築について

～CO₂リサイクルによる地球温暖化対策～

プロジェクト試験研究部 部長

橋崎 克雄

プロジェクト試験研究部 副部長

酒井 奨 …………… 25

【調査研究報告】

エネルギーに関する首都圏住民の意識

プロジェクト試験研究部 研究員

工藤 未奈…………… 37

【研究所のうごき】 …………… 47

【編集後記】 …………… 49

巻頭言

エネルギー大競争時代の只中で思うこと

清水 成信 (電気事業連合会
専務理事)



直近まで電力販売の最前線に身を置いてきた関係上、研究開発から多少距離を置く電力小売り自由化の話題で恐縮ではあるが、大規模工場など特別高圧を対象とした電力の部分自由化が開始されて間もなく20年。一昨年には、家庭用など低圧分野まで含めた全面自由化がスタートし、次いで昨年、ガスの全面自由化が実施に移されたことで、いよいよエネルギー大競争の時代へと突入した。今後も、当面、2020年の送配電部門の法的分離に向けた準備が本格化し、各種市場の整備も着実に進められていくことになる。このように、競争は着実に進展しその流れを止めることはなかろうが、ふと立ち止まり、あらためてこの20年、期待された自由化の成果をユーザーにしっかりと均霑できてきたのかと問い直してみれば、当事者として甚だ心許ないのも事実である。

自由化の目的は、言わずもがなで、競争の導入による電気料金価格の抑制ではあるが、加えて、競争は、自由度を増した事業者の創意工夫から生み出される商品力、サービス力の勝負でもある。とりわけ、電力の枠を超えた競争の進展は、ユーザーのニーズの刈り取りとシーズのマッチングを通じて、新たなイノベーションを生み出し、カスタマイズの努力を経て、革新的な技術やサービスとしてユーザーの下で生まれ育っていくことが期待されているが、今ある現実はどうか。依然、需要の伸びが見込み難いゼロサムの市場の中で、疲弊感すら漂う価格下げ競争だけが過熱化している、というのが現状ではなかろうか。

一方、自由化の流れとは全く別の世界で、ビジネスの構造を根本から破壊する可能性のある不連続な変革が否応なく起こりつつある。今更、私が言及するまでもなく、ものすごい勢いで進むデジタル化技術の革新。その下で、今後、製造業とサービス業との境がドン

ドン曖昧化していくといった構造変化が展望されるなか、たとえば自動車業界は、「100年に一度の大変革」あるいは「勝つか負けるかでなく、生きるか死ぬか」というショッキングな表現で危機感を募らせ、変革への対応を急がせている。

もちろん、こうした変化の流れは、エネルギー分野もその域外にはなく、事業領域を超えた協業の試みなど、いろんな取り組みが開始されようとしているが、行き着く先に何が生まれるのか、なかなか見えにくい。ただひとつ言えることは、おそらく想像を超えて多様化していくエネルギービジネスの世界で、その変化にいかに素早く対応し、ユーザーに対しその期待を上回るどのような新たな価値を提供していけるのかが、エネルギー大競争時代の生き残りのカギとなることは、今も昔も変わらないはずである。

総合工学の視点で先駆的な研究開発に取り組むエネ総工研の機関誌の巻頭を引き受けることさえ躊躇いを禁じ得ない身ではあるが、今がまさに新たな時代への変革の時であり、歴史が示す通りとおり技術革新が主役を果たす時、との思いは強い。

引き続き、新しいエネルギー技術や有望な情報を積極的にご提供いただけるようひたすら願うばかりである。

[寄稿]

再生可能エネルギー電源導入の現状と将来に向けた課題



馬場 旬平 (東京大学大学院 新領域創成科学研究科
先端エネルギー工学専攻 准教授)

1. はじめに

近年、世界的に再生可能エネルギー（再エネ）電源を導入する機運が高まっており、わが国でも急速に導入が進められている。本稿では主としてわが国の再生可能エネルギー電源の導入の現状と課題、今後必要とされるであろう事項について概観する。

2. FIT 導入後の再エネ導入

よく知られているようにわが国では2012年7月より再エネ電源の固定価格買取制度（FIT: Feed In Tariff）が導入され、その結果として再エネ電源の導入が急激に増大した。特にアセスメントなどの負担が軽く、容易にかつ短時間に設置が可能であった太陽光発電の普及は凄まじく、約6年で40GWもの設備が系統に接続されることとなった。日本の最大需要が約160GW程度と言われているので、その量

が如何に大きいかが理解して頂けるものと思われる。図1にはFIT制度を利用している太陽光発電設備の認定容量と運転開始容量の推移を示す。このグラフでは10kW以上のものと1MW以上の太陽光発電の累積容量も示しており、例えば、上から2番目の折れ線グラフと3番目の折れ線グラフの差の容量が10kW以上1MW未満の設備容量となる。この図からも分かる通り、1MW未満の設備が占める割合が約半分を占めており、これが問題の解決を難しくしている。

送電・配電のことを考えず、単に発電して売電をし、利益を最大化させたい、と考えた場合、発電所を何処に設置することが合理的か考えると、太陽光発電の場合、安くて広い土地がある場所に設置することになる。実際に、太陽光発電では九州地区や北海道地区に大量の設備が導入され、特に九州地区では需要に対する割合が急速に増大した。設備認定が年度を跨ぐと買い取り価格が大幅に下がる

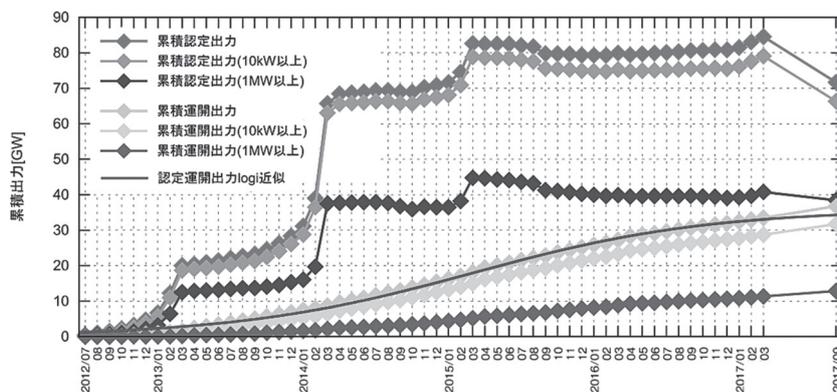


図1 FIT 導入後の太陽光発電認定容量と運転開始容量 (1)

ため、毎年、年度末に申請数が急増し、2014年3月にはほぼ1年分に匹敵する数の申請が行われてしまった。その申請容量が極端に多かったため、このままでは当時の規定では系統で受け入れることが不可能になるのではないかと危惧され、九州電力(株)は2014年9月に一度、申請に対する回答を一時保留し、現状の設備でどの程度、接続をしても問題が発生しないのか、再検討することになった。その結果、500kW以上の電源に対し年間30日まで無償で停止できるという規程(以降30日ルールと呼ぶ)の基では、2014年9月までに認定された容量、約14GW、全てを受け入れることは不可能であることが判明した。この結果の公表に当たり、大きな混乱が懸念されたが、比較的小さな混乱の発生で済んだことは不幸中の幸いであった。ただ、もはやこのままでは同様に地価が安く土地の取得が容易な別の地域に太陽光発電の認定申請が集中することが予想されたため、ある基準に則った計算をして年間30日以上、500kW以上の設備を停止しないと需給調整が難しいと判断された電力会社は指定電気事業者として、新たにその電力会社の管轄する地域に太陽光発電や風力発電を設備認定するために申請する場合、無制限無補償の停止を受け入れることを条件(指定ルール)に新規の受付を行うこととなった。電力需要の変動や大型発電設備の廃止などで、30日ルールで算出される受け入れ可能な容量は変化するので、一応毎年、再計算をしているが、指定電気事業者となった電力会社管内の厳しい状況に変化はなく、また、余裕ができた場合でも指定ルール設備の発電機会損失の軽減に割り当てるべきであるとの意見が大勢であることから、今後も指定電気事業者が解除される可能性はほとんどなく、また、大型太陽光発電設備については一部入札制度が開始され、制度も変更されたこともあり、系統接続要件が緩和されることはないと考えられる。また毎年、30日ルールでの受け入れ可能容量について指定電気事業者が再計算をして

いるが、ある仮定の基での計算であることと、要件緩和が見込めないし、要件を緩和しても電気事業者・再エネ事業者双方に利益があまりないことから、今後は再計算が大きな電力系統変更がない限りなされないことになると考えられる。

再エネ電源の大量導入にあたり、系統側での受け入れに関する問題は様々存在する。以下では主要な課題について考える。

3. 需給バランス維持の問題

わが国では再エネ電源からの出力は大中規模水力発電を除き、基本的に何の制御もせず、電圧などの制約に違反しない限り、発電できるだけ発電をして電力系統に潮流を流している。そのため、再エネの発電ポテンシャルが変化すれば、それに応じて潮流も変化することとなる。例えば太陽光発電の場合、日射量に応じて発電電力が時間毎に変化する。また、昼間帯の発電電力は多いが夜間はほぼ0となる。このような状態で再エネ電源の連系量を増加させれば、需給調整に自ずと限界が発生する。特に太陽光発電が多くなると昼間帯の負荷が大きく減少し、夕刻から夜にかけての点灯帯に需要ピークが現れる。実需要から再エネ電源などによる電力供給を差し引いた見掛けの需要を残余需要と言うが、この残余需要の1日の変化を示す曲線が、太陽光発電が増加すると、アヒルの背中のように似てくることから“Duck Curve”と呼ばれている。少し古いデータであるが2016年5月4日における九州電力管内での需給バランスと残余需要を図2に示す。残余需要を見ると完全にDuck Curveになっており、年々この谷が深くなっている。

Duck Curveの底では需給調整を担う火力発電などの電源の運転量が減少し、短時間の需給調整能力が必要確保できない懸念があることと、点灯時間帯に向かって急激に需要が増加するように見えるため、他の電源、特に

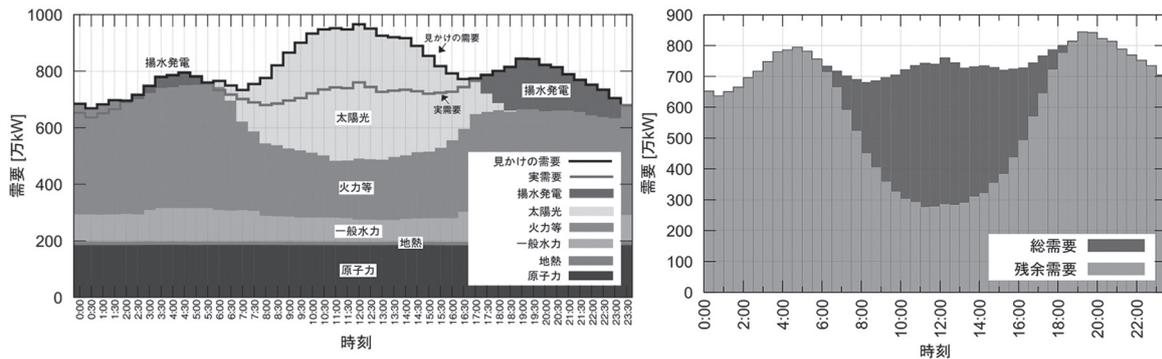


図2 九州電力管内の2016年5月4日における需給と残余需要 (2)

現在は主に火力発電機の出力増加や起動をしなくてはならないが、あまりに底が深くなると需要の変化に供給能力が追いつかなくなる危険性があり、こちらも懸念されている。これらの制約を踏まえて火力発電設備の出力を低下させられる能力が限界をむかえることを「下げ代不足」と呼んでいる。現在、再エネ電源の連系可能量を計算する場合にもこの最低運転量を基準としている。対策としては残余需要の底となる時間帯に需要を増大させるかや、火力機の調整能力の増加などが検討されている。

(1) 従来型電源の調整力の向上

火力機の調整能力の向上についても検討が進められている。「季報エネルギー総合工学」(Vol.40 No. 2) などでも言及があるためここでは多くを言及しない。ガスタービンコンバインドサイクル発電などではガスタービンの起動台数を変化させることで比較的柔軟に調整能力を確保可能であるため、九州電力(株)の試算でも調整力として期待される火力発電機として最後まで残る仮定となっている。また、汽力発電についても出力変化率を上げる方法が研究されている。但し、効率や機械の耐久性の問題が解決できるのか、など課題も存在する。

(2) 需要側機器による調整

従来の需給調整では供給側を調整することに主眼が置かれていたが、需要側を調整することも検討されつつある。需要を意図的に変化さ

せる手法のことを DR (Demand Response) などと言う。現状では主として発送電設備の投資を抑制するために、需要ピークを下げる目的での利用が考えられている。近年わが国でも「ネガワット」などと呼ばれ、2011年3月11日の大震災の後、電力供給が逼迫し、輪番停電が実施されたことなどで注目を集めている。一方で今後、太陽光発電などが増えた場合などに残余需要の谷を埋めるために特定の時間帯の負荷を増加させる必要性も唱えられている。この場合は「ポジワット」と呼ばれる。

需要を供給力に応じて変化させることは何も最近始まった話ではなく、わが国でも深夜帯料金と言う名前の TOU (Time Of Use) 制度が古くから存在し、電気温水器や電気炉などの需要を深夜帯に集めることに成功していた。ただし、この制度では動的に時間帯や料金が決められる訳でなく、深夜帯の需要の底を上げて負荷平準化をし、ベースロード電源を活用するためのものであった。今後は不安定な再エネ電源の出力に合わせ、如何に動的に価格を変化させるなどし、需要成形をするのが課題である。その場合、人間系を介すのでは限界があり、機械的に DR を実施する ADR (Automated DR) の普及が重要である。

このように需要側機器の有効利用には大きな期待が寄せられており、経済産業省では分散型・需要家側エネルギーリソースを統一的に制御するビジネスモデルを構築し、産業として育成することを目的として、「エネルギーリソース・アグリゲーション・ビジネス検討会」

(ERAB 検討会) を設置し、通信規格の拡張・国際標準化、取引ルールの策定など幅広い検討を進めている。この議論を踏まえバーチャルパワープラント構築実証事業などが実施され、ADR の能力の評価や需給調整機能の検証を行っている⁽³⁾。

DR はまだ発展途上にあり、課題も残されている。2018年1月22日に関東地方を中心に大雪が降った。関東地方の雪は通常であればすぐに溶けてしまうが、このときは翌日も気温が想定より上がらず、雪が長い時間溶けずにとどまっていた。また、低温が続いたため、暖房需要が想定外に伸び、想定されていた最大電力需要「厳気象 H1」を超過する需要が続いてしまった。それと同時に太陽光パネルに降り積もった雪が溶けずに長時間残り、太陽光発電設備からの電力供給が予想外に伸びず、更に火力発電機の計画外停止も重なり緊急融通が実施された⁽⁴⁾。このときに需給バランス調整のための「電源 I」として DR が発動されたが、22日から28日まで5日連続合計8回という高頻度での発動は需要家側も想定外であったため、DR 発動対象需要家より抑制が困難という意見が出され、途中で要請を緩めたため、実行率が低下したことが報告されている⁽⁵⁾。どのように DR をアグリゲートする会社がポートフォリオを作成しているのか知るよしもないが、経済的観点からは事業性などが検討されていると思われるし、ある暗黙の了解の基で需要家も DR に応募しているのかもしれない。しかし、応答可能電力、持続可能時間、回復可能時間などを考慮した需要モデルの確立など DR を確実な調整力として見込むための理論的な検討が更に必要ではないかと考えられる。

(3) 再エネ電源による調整

再エネ電源と言えども系統安定化のため制御することは当然のことである。しかし、まだわが国では一般の方からの理解が十分に得られているとは言えないことや、どのように制御

するのか、まだ議論が残っているなどの問題がある。世界的には既に出力制御を実施している国もあり、わが国でも九州電力管内の離島では実施されている。また、九州本土でも実施が秒読み状態となっている。現在、大規模な太陽光発電所や風力発電所などは送配電事業者とオンラインで通信が可能となっている。一方で、30日ルールの中小規模の太陽光発電設備などは、元々需給運用が厳しい場合には系統連系点の遮断器を手動で落とすことで対応することとなっていたため、オンラインで通信できない電力変換装置が普及してしまった。中小規模の太陽光発電設備の合計導入容量が大きく伸び、それに伴って設備数が非常に多くなってしまった。中小規模太陽光発電設備の出力制御が確実に実施できることが重要になっている。そのため、九州電力管内では複数回、通信訓練も実施されている⁽⁶⁾。訓練の結果、100%ではないもののほぼ確実に対応をする責任者と連絡が取れることが分かった。しかし、人間系を介する場合、一人の責任者が複数の設備の操作を現地に赴いて行う必要がある場合や、確実に出力制御を行う前日に連絡が取れるか確認がない。そこで、指定ルールの太陽光発電設備では送配電事業者が用意するスケジュール配信サーバにデータを読みに行き、自動的に出力制御を行う機能を具備することが義務化され、装換が進められている。

30日ルールの事業者と指定ルールの事業者が混在することとなっており、如何に制御を実施するかが課題となっている。現状では指定ルールの事業者の負担を低減させるため、最大限30日ルールの設備を停止させる手法が取られることになっているが、どう公平性を確保するのが課題となっている。公平性の確保が至上命題のようにになっているが、全設備を公平に扱うことは非常に困難であると考えられる。困難の源泉はほとんどの再エネ電源が分散されて設置されていることと、所有者の数が非常に多いことであると考えられる。本来、系統条件の良くない箇所に接続されて

いる電源と系統条件が良い箇所に接続されている電源では抑制制御量が異なることが想定される。分散設置されている電源を系統の制約条件などを加味し、全体として再エネ電源からの送電量を最大化するための、各電源の制御量を算出し、実際に制御をすることについては技術的に可能であると思われる。しかし、特に電源の所有者が異なっている場合には、同じ容量の設備を保有していても、売電電力量が異なってしまい、不公平であると苦情が出るのが懸念されている。そのため、現在ほどの電源もある期間を考えるとほぼ同じ発電機会を有するよう制御することが求められている。再エネ電源と送電設備の最大活用と言う観点で考えると、果たして全ての設備を公平に扱うのが妥当なのか疑問が残る。発電機会の公平化は諦め、経済的調整を導入すると言う議論もある。しかし、太陽光発電設備より本来どの程度発電できたのかを推定しなくてはならず、その精度の問題もあり、課題が多いと考えられる。

九州電力(株)が回答保留をした時期に、そのうち電力会社が電気ストーブを並べて、余剰分を消費しかねないと皮肉を込めて批判した学者がいた。しかし、本当に電気ストーブを並べることは悪い解であったのか？系統側で余剰電力を処理することも1つの解決法ではなかろうか。需給調整を再エネ電源でも可能にすれば問題は解決する。例えば風力のブレードのピッチ角制御をすることでできないこともないかもしれないが、機械にダメージを与える可能性もある。実際に電気鉄道では制動を掛ける際に電動機を発電機として利用し、発電した電力を可能であれば他の車両に供給し、不可能な場合でも車載の抵抗器で消費することで制動力を得ている。これは機械ブレーキへの負担を低減し、保守の手間を低減させるためである。機械系ではなく電気系で余剰エネルギーを処理することは利点があるため、様々な応用があり、批判に当たらないと考えられる。また、出力を上下に振る場合には発電可能な電力を確実に

把握し、ある程度出力を常に抑えておく必要がある、経済的な損失が発生する。多数の太陽光発電設備を制御するには多数の通信路が必要で、その確実性が危ぶまれる。手前味噌で恐縮であるが当研究室では不確実な通信線路を介した多数台太陽光発電設備の制御効果を研究しており、LFC（二次調整力）程度であれば多少、通信路に難があっても多数台であればかなり調整が効きそうであることが分かったが、もし低品質な通信路を用いて制御をすれば不確実性をどう織り込むのか十分な検討が必要であろう。

経済性の問題を抜きにすれば技術的にも太陽光発電設備からGF・LFC（1次・2次調整力）の供給は可能であろうが、通信路のコストを誰が負担し、維持して行くのかも議論となる。実際にオーストラリアのKing Islandではタスマニア電力が抵抗バンクを複数台用意し、更にサイリスタによる位相制御で消費電力が調整可能な抵抗器を追加して、風力発電の余剰電力を消費させながら、電力消費量を高速に微調整して系統安定化を図るシステムが導入され、良い成績を修めている⁽⁷⁾。この技術については電力供給を100%再エネ電源にする目標を立てているハワイの離島へも適用が検討されており、1つの解ではないかと思われる。この方法では再エネ電源からの発電量を確実に計測可能である。抵抗器を用いる方法では設備が大きくなる可能性もあり、これだけで解決できるとは思えないが、系統側に設置する蓄電池や余剰電力を水素製造に用いるPower To Gasも同様な切り口での解消法ではないか考えられる。King Islandの場合、再エネ電源も電力会社が保有しているため、このような思い切った対応が取れたのではないかと考えられるが、わが国では30日間停止可能というルールを年度にまたがって平準化して30日間停止、例えばある年に31日停止したら翌年は29日停止すると言ったバンキング・ボローイング制度を検討したが、事業者や投資家、法律家などから非常に強い反対意見が

出されて頓挫するような状況であることから、導入は難しい可能性もある。

4. 系統容量の問題

再エネ電源導入の大きな問題として、大量に再エネ電源が導入された地域と需要地が地理的に離れていることも挙げられる。人里離れた大規模な再エネ電源集積地から需要中心まで大容量の送電線を建設するのか、判断が求められている。最近、東北電力管内で280万kWの送電線増強工事に対し、約16GWもの応募があり、大混乱が発生した⁽⁸⁾。これと前後して、連系線をはじめとする送電線が有効に利用されていない、と言う主張がマスコミを賑やわせていた。送電線の利用については様々な要因を考慮しなくてはならず単純に年間の平均設備利用率を見ても実りある議論はできないと考えられる。送電線の利用には送電する発電設備と受電する需要設備の都合を考えなくてはならない。あまり良い例ではないが一般家庭の設備を考えてみる。平均的な一般家庭が1カ月間に消費する電力量は約300～400kWhと言われている。単相3線式家庭の基幹ブレーカの容量が40Aであるとする、この設備の平均利用率は約5～7%となる。家庭の需要は極端な例で、工場によっては利用率が100%近いものもあると聞いているが、到底、全体の需要設備の設備利用率は100%などとならない。また、重要な送電線になると、ルート断が致命的な事故となるため、2回線送電線を利用して、片回線が事故や修繕などで利用できなくてもある程度の送電容量を確保するため、熱容量から考えると利用率は低くなる傾向がある。修繕には長時間の回線停止が必要となるが、需要が低い時期など系統状況を勘案し、安定運用に支障がないよう計画を立てていた。しかし、最近は再エネ電源の増加に伴い、送電線の修繕のための、電源停止計画を立てることが困難になっている。利用率の向上は修繕計画の困難化の問題を誘起する可能性がある。

ただ、いずれにしても連系線の有効利用は重要な課題である。そのため、マージンの合理化など様々な検討が進められ、例えば従来、先着優先であった送電枠が間接オークションとなる。これは安定運用に必要なマージンを除いた空き容量を、スポット市場の入札の結果に従って送電可能か判断し、十分な容量がない場合には落札価格に従って優先順位をつける方法である。

一方で将来の発電所建設計画に必要な送電線を、費用を負担して作っていた場合でも、価格が十分に安くないと落札できず送電できないため、リスクとなってしまう可能性もある。今後は発送分離が行われるため、このような事例は発生し難いと考えられるが、送電線の建設には多くの資金と時間が必要であることには変わりはなく、相当のインセンティブがないと整備が難しい。風力発電事業が送電線の問題で停滞している実態を受け、風力発電のための送電網整備実証事業（送電線SPC事業）が実施されている。この事業では送電線建設コストの削減技術やビジネスモデルの確立を目標としている。しかし、連系先の電源がノンファーム接続となった場合や、需要地までの基幹送電線の混雑により発電が制限される可能性など、想定した設備利用率に到達しない可能性が高くなり、多くの事業者がフィージビリティスタディー（FS）の段階で経営が難しいことが判明している。

先述した通り、重要な送電線は1回線がダウンしても系統全体が連鎖的に停電しないように余裕を持って運用されている。そのため年間設備利用率はあまり高くすることは難しい。例えば関門連系線の場合、通常は九州側から関西・中部側に電力を供給しているため、万が一、関門連系線のルート断が発生した場合には九州側で周波数上昇、関西・中部側で周波数低下が懸念されている。現状では関西・中部側の周波数低下に対する対応が難しいと言われている。そのため、2回線の総熱容量の約半分の運用容量となっている。しかし、

一方で九州電力管内の状況が逼迫していることから関門連系線の更なる有効利用のため、九州側、関西・中部側での対策が検討されている。九州側で発電過多となることが想定されており、発電施設を緊急時に停止することが考えられている。緊急時に停止する場合には確実に必要な容量が確保可能で、かつ、事故除去後などに早急に出力を回復できることが求められるため水力発電と地熱発電設備を電制で制御することを軸に過周波数継電器(OFR)などと組み合わせて対策をする検討が進められている⁽⁹⁾。再エネの発電設備を停止することに対して疑問の呈する意見もあったが火力機よりも回復が早いこともあり、緊急時にはこれらの設備を対応の第一候補として挙げることとなっている。また、関西・中部側では供給力不足が懸念されるため、負荷遮断や揚水発電所の活用が検討されている。揚水発電所の活用では、緊急時に揚水運転を停止することで、供給力を確保することが検討されている⁽¹⁰⁾。しかし、揚水・発電運転をする場合には比較的大きなエネルギー損失が発生するため、誰がこの費用を負担するのかなどの課題もある。

5. 配電系統の問題

再エネ電源の多くは分散形電源として系統に連系されている。特に太陽光発電設備が大量に配電系統に接続されており、様々な問題が発生している。土地利用の関係で人口密度が低く、その結果、負荷密度が低い地域に大量の太陽光発電が導入されるケースが多くなっている。従来は電力潮流が川上から川下に一定方向に流れることを前提とし、経済的な設備形成を行っており、例えば配電用変電所から末端に行くに従って細い電線を使うようにすることや、途中の高圧自動電圧調整器(SVR)のタップを非対称にすることなどで、コストを抑制してきた。しかし、太陽光発電設備などの大量導入に対しては裏目に出してし

まった。末端の配電線路が細いため送電容量が不足し、またインピーダンスが高くなることで電圧上昇が発生し、電圧が逸脱するなど様々な問題が顕在化している。

また、送電系統と配電系統の協調の問題も存在する。欧州などでは配電会社と送電会社が別の場合が多く、お互いの協調をどうするのか議論が盛んに行われているが、わが国の場合には同一の会社なので、比較的対応は取りやすいと思われる。しかし、例えば配電系統側で無効電力制御による電圧調整をし、再エネの最大限導入を図った場合に、その無効電力注入が送電系統側に与える影響を考慮すると、別の問題が顕在化する可能性がある。また、送電系統側で容量制約や需給調整のために配電系統側の再エネを調整する場合、配電系統側の電圧制御などに影響を与えないのか考慮する必要があるなど、考慮すべき事項が存在し、整理が必要である。

6. 現状のままで再エネ電源は主力電源になりえるのか

長期的に再エネ電源を主力電源にすることが多くの国で目標として掲げられている。主力電源の定義は様々なものが存在すると思われるが、電力として消費されるエネルギーの多くの部分を供給する電源となることではないかと考えられる。kWhだけでなくkWでも大きなシェアを占めることになるであろう。その場合、従来型の電源が担っていた機能も再エネ電源が代替できるようにするか、他の代替手段を導入しなくてはならない。エネルギー需給バランスとは別の観点の問題を考える。誘導発電機を利用した風力発電や電力変換器を利用した太陽光発電など、現状の再エネ電源の大半は系統電圧が確立した状態でないと電力供給は不可能である。今後も電力変換器による連系が増加すると想定されるが、電力変換器は系統電圧を観測して自身が出力すべき電流を算出し、その通りになるように

電流制御をしている。このような制御をすることで、電力変換器の容量を抑制することが可能となっている。そのため過渡的な需給バランスなどは他の電源、特に同期発電機を有する電源が担うことになり、その負担は電力変換器による電力供給をする電源が増えることでより重くなる。どの程度まで電力変換器による供給を増やすことができるのかはまだ研究途上である。例えばアイルランドでは、SNSP (System Non-Synchronous Penetration : 系統容量に占める電力変換器などによる電力供給の割合) という指標を監視しており、2018年現在では最高70%に抑制するよう制御されている。将来的に75%まで引き上げる目標を立てているが、系統慣性も小さくなり、過渡的な電圧の周波数変動が大きくなることが予想されている⁽¹¹⁾。その程度の変動が発生しても系統を安定に運用可能な方策を打っているが、よりSNSPを上げて運用するには更なる対策の検討が必要であろう。対策の一例として電動発電機(M-Gセット)や同期調相機を導入する方法が提案されている。先述したKing Islandではディーゼル発電機にフライホイールを追加し、ディーゼルエンジンと同期発電機を繋ぐ軸の途中にクラッチを入れ、同期発電機を調相機運転が可能なものとして再エネ電源による供給が100%の時間帯を作り出している。また、沖縄の波照間島でもM-Gセットが導入され、同様に100%再エネ電源による供給時間帯を設ける計画である。

では、同期機の導入する代わりに電力変換器を用い、電圧を確立するモードで運転したらどうなるであろうか。系統で有効電力・無効電力の需給バランスが崩れると電圧を確立するモードで運転している電力変換器がバランスを崩れた分を調整することになる。過渡現象などで生じる需給バランスの崩れも補償する必要があり、定格出力より大きな容量の変換器が必要となる。現状の家庭用太陽光発電の電力変換器でも非常時用に自立運転モードに切り替えられるものがあるが、十分に容

量があっても過渡現象による過電流で停止してしまい、小さな容量の機器にしか供給できない場合があることが知られている。電力変換器で同期機の代替をすることは理論的に可能ではあろうが容量の増加は避けられないと考えられる。需給調整についても他電源に依存することで経済的なシステムを構築し、運用することができていたが、このままの状態では将来の電力系統に再エネ電源が接続可能なのか、議論が必要であろう。

7. 将来の電力系統の在り方

従来のような集中型電源のみに依存する系統になることはない可能性が高いと考えられる。再エネ電源の導入が進むと需要中心と発電中心の地理的な乖離が大きくなると考えられる。また、需要と発電能力(ポテンシャル)の時間的乖離も大きくなることが考えられる。地理的な乖離が大きくなることの対策として連系線を強化し、また時間的乖離の対策としてエネルギー貯蔵装置などを導入し、日本全体でスーパーグリッドのようなものを構築し電力系統をより強化することが1つの解として挙げられる。一方で、地方を中心に人口減少が進むことが想定され、当然そのような地域では需要も減少することになる。需要が減少した地域に対しても今まで通りの系統設計で良いのか検討する必要があるのではなかろうか。例えば現状でも近隣の大きな島や大陸から大きく離れた離島では、再エネ100%でも均等化発電原価(LCOE)を計算すると経済的に成立するとされる系統があり、実際に再エネ100%の系統も実現されている⁽¹²⁾。再エネの価格が低下した場合、需要の小さな僻地などでは再エネ100%のオフグリッド、あるいは弱い連系線で接続されたセミオフグリッド的な系統を構築すると言うアイデアもあるかもしれない。マイクログリッドのようなシステムが多数存在し、お互いが弱く連系していて、現状の日本のくし形系統のように、危な

くなったらすぐに連系線を切り、全域停電を防ぐシステムにするというアイデアもあるかもしれない。再エネ電源を大量導入した際にどのような将来像が描けるのか、まだ確たるものは存在しないと考えられる。様々なシナリオとそれに伴って必要となる様々な技術について研究開発が活発に進められることを祈念する。

参考文献

- (1) http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/statistics/index.html
- (2) <http://www.kyuden.co.jp/var/rev0/0055/4201/2ntja6f6cpd.pdf>
- (3) http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukaienergy_environment/energy_resource/001_haifu.html 等
- (4) 第28回調整力及び需給バランス評価等に関する委員会資料2
- (5) 第26回調整力及び需給バランス評価等に関する委員会資料2
- (6) 総合資源エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会 新エネルギー小委員会 系統ワーキンググループ (第14回) 資料3
- (7) Simon Gamble, "King Island Renewable Energy Integration Project" Isolated Power System Connect 2015
- (8) 総合資源エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会 新エネルギー小委員会 系統ワーキンググループ (第11回) 資料6
- (9) 総合資源エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会 新エネルギー小委員会 系統ワーキンググループ (第11回) 資料4-1
- (10) 総合資源エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会 新エネルギー小委員会 系統ワーキンググループ (第11回) 資料4-2
- (11) Ivan Duburych "Leading the Way Towards All-Renewable Synchronous Systems ", PSCC2018, 2018/06/11
- (12) Government of Tokelau "Tokelau Renewable Energy Project case study" March 2013

[寄稿]

水素ステーション設備に使用する材料の選定について

佐野 尊 (高圧ガス保安協会
総合研究所 所長)



1. はじめに

日本においては、2005年に世界に先駆け、最高充填圧力 35MPa の車載水素貯蔵容器（以下、車載容器）を搭載する燃料電池自動車への充填を想定した水素ステーション設備に関する技術上の基準を、一般高圧ガス保安規則（以下、一般則）に規定した⁽¹⁾。その後、車載容器において、最高充填圧力は 35MPa から 70MPa への高圧化が実現した。これに伴い、水素ステーション設備の最高充填圧力は 40MPa から 82MPa に上昇した⁽²⁾。日本では現在、水素社会の実現に向けて、多くの水素ステーションが建設されつつある。この目的のために、高圧水素環境で使用する材料の選定と使用範囲の構築が急務となっている。

これまでの水素ステーションの建設、関連する規制および支援プログラムの履歴を図 1 に示す。国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）における水素利用技術研究開発事業（以下、NEDO プログラム）が、水素ステーションに関する研究開発活動を支援しており、今後も継続される見通しである。

水素ステーションに使用される材料についての近年の動きとしては、まず 2011 年に、35MPa 車載容器に水素を充てんする水素ステーション設備に対して、一般高圧ガス保安規則関係例示基準（以下、一般則例示基準）が適用され、金属材料はオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L とクロムモリブデン鋼 SCM435 の使用が認められた⁽³⁾。SUS316L は

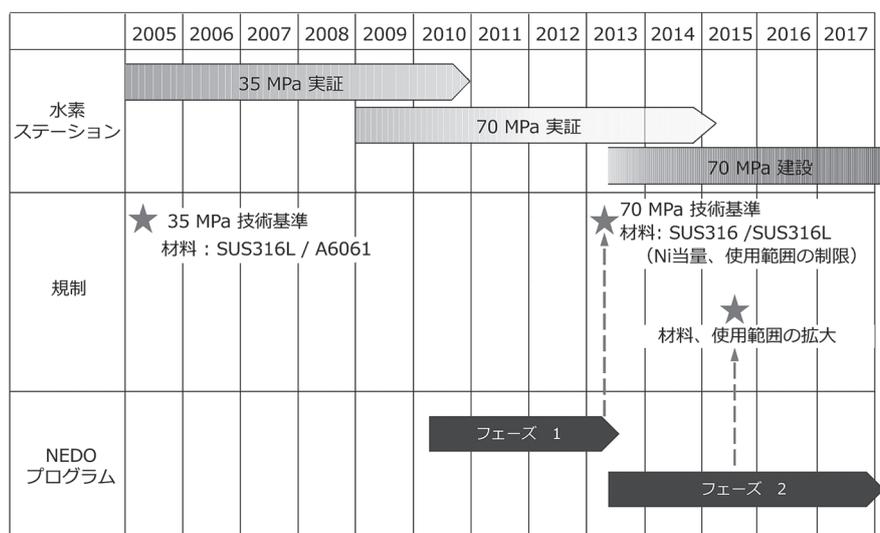


図1 水素ステーションの建設の履歴

高圧水素環境において、SSRT (Slow Strain Rate Test)、疲労試験および疲労き裂進展試験のすべての結果に水素の影響がない。SCM435 は高圧水素環境において、SSRT、疲労試験および疲労き裂進展試験のすべての結果に水素の影響がある。したがって、SCM435 は、使用中に定期的な超音波探傷試験により、損傷がないことの確認が義務付けられている。また、70MPa 車載容器に水素を充てんする水素ステーションの設備では、SUS316L とこれに替わる材料の使用が前提で、高圧水素環境における特性の検討が進められている。SCM435 の特性向上は見込めないで、使用は認められていない。

さらに、車載容器の最高充てん圧力が35MPa から70MPa へ高圧化したことに伴い、目標とする短い充てん時間以内に水素を急速充てんすると、断熱圧縮で車載容器の温度が上昇し、設計温度を超えるという新たな問題が浮上した。このために、充てん前に水素を -40°C 程度まで過冷却し、充てん後の温度を設計温度以下にするプレクールが必要となる。しかし、2章(2)④で後述するように、35MPa 水素ステーション設備で使用されているSUS316L であっても -40°C 近傍においては、水素の影響を顕著に受ける。

本解説では、70MPa 車載容器に水素を充てんする水素ステーション設備に使用する材料として、まずはオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316 および SUS316L を取り上げ、高圧水素環境における特性のデータと定量的評価方法の検討内容、材料の選定と使用範囲を構築した結果を示すとともに、その他の金属について検討した結果を以下に示す^{(4)~(8)}。

2. SSRT

(1) SSRT の位置づけ

金属材料の特性に及ぼす水素の影響については、古くから多くの研究があり、水素脆化、水素脆性という用語が一般化されている。し

かし、基本的なメカニズムは水素が塑性変形を助長することであり、時間依存形のき裂発生とき裂進展という過程を示し、水素誘起割れ、水素助長割れという用語が適切である。水素誘起割れは、広義の応力腐食割れに分類される。

金属材料の試験方法には、引張試験、衝撃試験、疲労試験、破壊靱性試験、疲労き裂進展試験などの方法がある。これらの試験を大気環境と高圧水素環境で行い、結果を比較すれば、水素の影響が定量的に評価できる。しかし、高圧水素環境における試験は困難であり、複数の試験方法を代表する簡便な試験方法が開発されてきた。現状では、SSRT が簡便な試験方法として一般的に認められている。SSRT が簡便であるのは、単なる引張試験で、ひずみ速度を遅くしただけであることに尽きる。ひずみ速度を遅くすることによって、時間依存形破壊の特性が、強調されて出現する。宇宙開発事業をパイオニアとして、金属材料の特性に及ぼす水素の影響の試験が数多く行われ、材料評価のデータベースが構築されてきた。その大半がSSRT のデータである⁽⁹⁾。

一方、SSRT は、試験ごとに試験条件が異なる。これはそもそもSSRT が水素の影響の有無という定性的評価であり、寿命予測のような定量的評価を意図していなかったことにある。定量的評価にSSRT データを活用するためには、試験条件をパラメータとして試験結果を検討し直す必要がある。

水素ステーション設備に一般則例示基準を適用する場合、応力を許容応力以下に制限する設計 (design by rule) となり、かつ損傷モードとしては疲労を考慮する。許容引張応力の基準となるのは、材料の引張特性 (耐力、引張強さ、伸び、絞り) である。したがって、引張特性と疲労特性に及ぼす水素の影響を、定量的に評価する必要がある。

以下では、SUS316L を代表とするオーステナイト系ステンレス鋼のSSRT データの影響因子を抽出し、その結果を用いて材料の引張

特性に及ぼす水素の影響を定量的に評価する方法を提案した結果を紹介する⁽⁴⁾。引用するデータは、NEDO プログラムの成果報告書および海外の文献データを参照している。

(2) SSRT データの検討

前述したとおり、SSRT データは試験条件が異なるために、オーステナイト系ステンレス鋼の SSRT データに影響を及ぼす因子を抽出した。影響を及ぼす因子として以下の6項目に着目し、SSRT データの検討を行った。

- | |
|---------|
| ① 化学成分 |
| ② 水素純度 |
| ③ 水素圧力 |
| ④ 試験温度 |
| ⑤ ひずみ速度 |
| ⑥ 試験片寸法 |

SSRT の試験結果は、水素環境における引張特性であり、オーステナイト系ステンレス鋼の場合は、そのうちで耐力が最も水素の影響を受けにくく、絞り (Reduction of Area) が最も水素の影響を受けやすい。以下では、引張特性のうちで絞りのみを代表として取り上げる。絞りに及ぼす水素の影響は、式(1)のように、水素環境における SSRT の絞りを大気環境または不活性ガス環境における SSRT の絞りで除した相対絞り比 (RRA : Relative Reduction of Area) で評価する方法が一般的である。

$$RRA = \frac{\text{水素環境の絞り}}{\text{不活性環境の絞り}} \dots\dots\dots (1)$$

以下では、上記①～⑥の各項目について、RRA を指標として検討した。

① 化学成分

オーステナイト系ステンレス鋼の RRA に及ぼす水素の影響は、Ni, Cr などのオーステナイト安定化元素の含有量に大きく依存する。オーステナイト安定化に及ぼす Ni の単位質量 (%) 当たりの係数を 1 とした場合、代表的な元素の単位質量 (%) 当たりの係数の数値例を表 1 に示す^{(10) ~ (14)}。表の元素ごとの係数に質量 (%) を乗じ、これらを加算した値がオーステナイト安定化の評価指標となる Ni 当量 (%) である。表 1 には、材料規格の化学成分に規定されていない N, Cu および Nb が含まれており、これらの元素は通常のミルシートには記載されていない。このために、本報における Ni 当量 (%) の式は、材料規格の化学成分のみで判別可能な式(2)とし⁽¹⁰⁾, L.Zhang らの論文⁽¹⁵⁾と同様に、SSRT データを式(2)により検討した。

$$Ni \text{ 当量} = 12.6 C + 0.35 Si + 1.05 Mn + Ni + 0.65 Cr + 0.98 Mo \dots (2)$$

② 水素純度

車載容器の容器保安規則関係例示基準 (JARI S001 (2004)) では、最高充てん圧力 35MPa の車載容器には、純度 99.99% 以上、かつ材料に有害となる成分を含まない水素の充てんが規定されている⁽¹⁶⁾。一方、SSRT の試験条件の水素純度の実績は、99.995% ~ 99.9999% (4N ~ 7N) となっている。水素以外の成分は RRA の変動を大きくする可能性が高いために、SSRT の試験条件の水素純度は、充てんする水素よりも純度の高いことが望ましい。水素純度 99.995% ~ 99.999% (4N ~ 5N), 99.9999% (6N) および 99.99999% (7N) の SSRT (室温, 70MPa) の RRA の比較を図 2 に示す。6N と

表 1 オーステナイト安定化と化学成分の関係^{(10) ~ (14)}

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	N	Cu	Nb	参考文献
12.6	0.35	1.05	1	0.65	0.98	-	-	-	(10)
48.6	1.14	0.85	1	1.44	2.03	48.6	-	-	(11)
9.56	-0.11Si ²	0.61	1	0.18	-	9.56	-	-	(12)
15.9	0.32	0.28	1	0.47	0.64	15.9	1	2.3	(13)
15.9	0.32	0.66	1	0.47	0.64	15.9	1	-	(14)

7NのRRAは一致している。一方、Ni当量が低い材料では、6Nと7Nは4N～5NよりもRRAが減少している。したがって、試験条件の評価基準として、水素純度は6N以上とした。

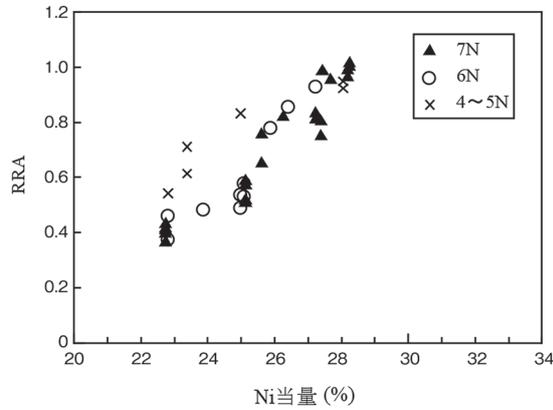


図2 SSRTのRRAに及ぼす水素純度の影響

③水素圧力

70MPa車載容器に水素を充てんするために、水素ステーションで使用する設備（蓄圧器、配管など）の設計圧力は、100MPaを超える。SSRT（室温、 $\phi 4\text{mm}$ 、ひずみ速度 $4.2 \times 10^{-5} \text{S}^{-1}$ ）のRRAに及ぼす210MPaまでの水素圧力の影響を図3に示す。Ni当量が低い材料では、RRAは水素圧力の増大に伴い減少するが、Ni当量が高い材料では、RRAは水素圧力に関係なく一定値（RRA = 1）を示す。また、Ni当量が中間の材料は（SUS316LNの結果）、35～70MPaを境としてRRAは水素圧力の増大に伴う遷移挙動（RRA = 1からRRA = 0.8へ）を示す。したがって、試験条件の評価基準として、水素圧力は40MPa以上とした。

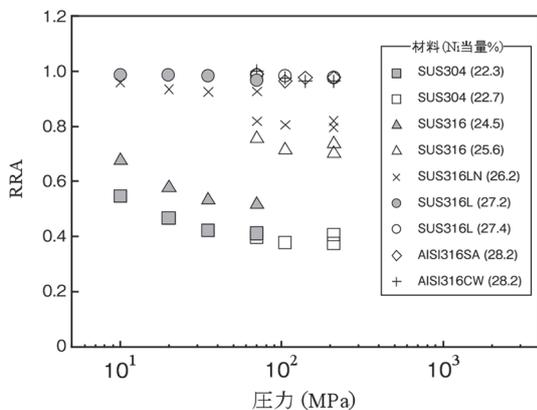


図3 SSRTのRRAに及ぼす水素圧力の影響

④試験温度

水素充てん時間の短縮（プレクール）および寒冷地における水素充てんを可能とするために、水素ステーションで使用する設備（蓄圧器、配管など）は、最低設計温度を規定する必要がある。例えば、ドイツTÜVの規格では、 -60°C までの低温水素環境に耐えることを要求している⁽¹⁷⁾。SSRT（70MPa、 $\phi 2\text{mm}$ 、ひずみ速度 $4.2 \times 10^{-5} \text{S}^{-1}$ ）のRRAに及ぼす $-188 \sim 27^{\circ}\text{C}$ の試験温度の影響を図4に示す。 $-73 \sim 27^{\circ}\text{C}$ の範囲では、試験温度の低下に伴いRRAは減少する。 $-123 \sim -73^{\circ}\text{C}$ の範囲では、RRAは最小値を示し、 -123°C 以下では逆に試験温度の低下に伴いRRAは増大し、 -188°C においてRRA = 1となっている。この試験温度依存性には、試験温度の低下に伴い増加する加工誘起マルテンサイト量と減速する水素拡散速度の関係が影響していると考えられる。

低温におけるSSRTでは、長時間にわたる圧力と温度の制御が困難であるために、室温におけるSSRTと比較して、特に高圧力の試験データが少ない。低温の試験データは、温度制御が容易な -40°C 以下が大半を占める。なお、 -123°C までの試験結果をそれ以上の温度における試験結果として扱うことは、保守的な評価となる。したがって、試験条件の評価基準として、試験温度は $-123 \sim -40^{\circ}\text{C}$ を -40°C とみなした。

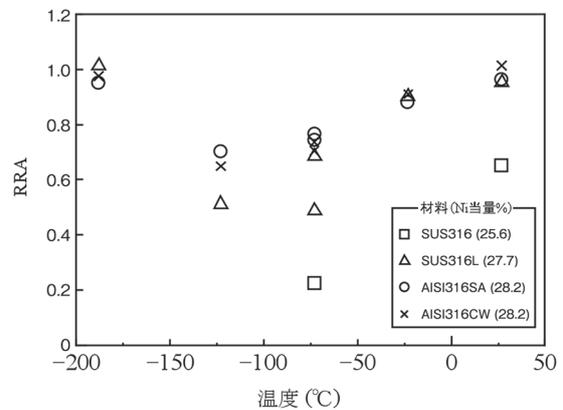


図4 SSRTのRRAに及ぼす試験温度の影響

⑤ひずみ速度

Ni 当量 22.4% の SUS304L は、室温、1.1MPa の低圧水素環境において、SSRT の RRA がひずみ速度 ($4.2 \times 10^5 \sim 4.2 \times 10^2 \text{ S}^{-1}$) の影響を受けることが報告されている⁽¹⁸⁾。Ni 当量 24.8% の SUS316 の SSRT (室温、70MPa) の RRA に及ぼすひずみ速度の影響を図 5 に示す。70MPa においても 1.1MPa の水素環境の場合と同様に、RRA はひずみ速度の低下に伴い減少する。しかし、 $4.2 \times 10^5 \text{ S}^{-1}$ 以下では、RRA は一定値を示し、ひずみ速度の影響がなくなる。したがって、試験条件の評価基準として、ひずみ速度は $5.0 \times 10^5 \text{ S}^{-1}$ 以下とした。

⑥試験片寸法

オーステナイト系ステンレス鋼は、大気環境における引張試験で延性破壊する。この場合、内部でデンプル破壊が先行し、最終的に試験片表面でせん断縁 (シャーリップ) を形成する。オーステナイト系ステンレス鋼の SSRT において RRA が減少する場合、試験片の表面からき裂が発生し、進展するために、表面近傍の破面は水素誘起割れ破面、内部はデンプル破面となる。試験片外周長さに対して試験片断面積が大きいほど、破面全体に占めるデンプル破面の割合が増加し、RRA も増大する。このために、試験片の断面積 / 外周長さの値が重要となる。試験片直径 $\phi 2 \text{ mm}$ と $\phi 4 \text{ mm}$ の SSRT (室温、70MPa、ひずみ速度 $4.2 \times 10^5 \text{ S}^{-1}$) の RRA の比較を、図 6

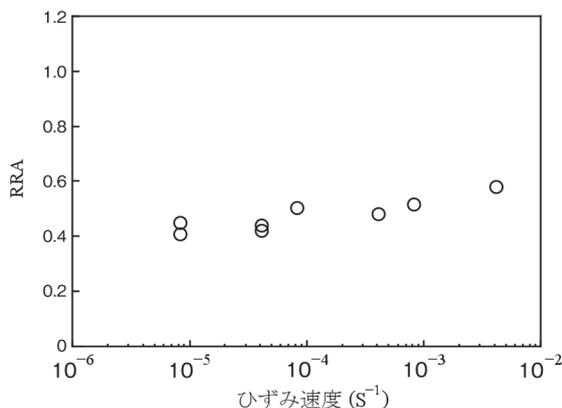


図 5 SSRT の RRA に及ぼすひずみ速度の影響

に示す。試験片直径 $\phi 2 \text{ mm}$ と $\phi 4 \text{ mm}$ の RRA は一致している。したがって、試験条件の評価基準として、試験片の断面積 / 外周長さは 1mm 以下とした。 $\phi 4 \text{ mm}$ 以上で、断面積 / 外周長さは 1mm を超える。この評価基準は、矩形断面の試験片にも適用する。

3. 材料の選定

(1) 材料の選定基準

高圧ガス設備に使用する材料は、設計規格に規定されている材料で、耐力、引張強さ、伸びおよび絞りが JIS 材料規格の規定値を満足することを確認すれば、設計規格で温度ごとに規定されている許容引張応力の値が適用できる。高圧水素環境の場合も、この規定は変わらない。絞りが水素の影響を最も受けやすいために、設計圧力と設計温度の範囲の水素環境における絞りが大気環境における絞りと同等である材料は、耐力、引張強さおよび伸びについても、水素環境の結果は大気環境の結果と同等になる。そこで、大気環境の引張試験結果またはミルシート記載の絞りに、設計圧力と設計温度を満足する試験条件の RRA を乗じ、その値が材料規格の規定値以上とする材料の選定基準を式 (3) で提案する。

$$\text{引張試験またはミルシートの絞り} \times \text{RRA} \geq \text{材料規格の絞り} \dots\dots (3)$$

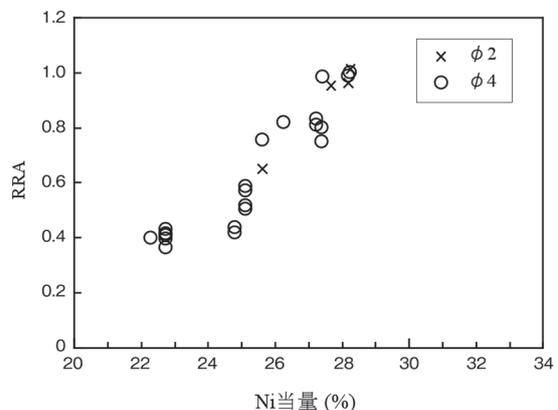


図 6 SSRT の RRA に及ぼす試験片寸法の影響

(2) 材料の選定

35MPa 車載容器に水素を充てんする水素ステーション設備で使用実績のある SUS316L、および新たに使用が見込まれる SUS316 について検討を行った。JIS 材料規格における SUS316 および SUS316L の絞りは、保守的な評価となるように規定値の最大である 60% とした^{(19) ~ (23)}。しかし、ミルシート記載の絞りを調査した結果、実績値は 75% を超えるので、RRA が 0.8 以上で式 (3) を満足する。

2 章での検討結果に基づき、室温 (20℃) および -40℃ における RRA と Ni 当量の関係を図 7 および図 8 に示す。

以下では、RRA と Ni 当量 (%) の関係を式 (4) により近似する

$$RRA = A + B \tanh[(Ni \text{ 当量} - D)/C] \dots\dots (4)$$

ここで、RRA の上部柵 = A+B, 下部柵 = A - B, 傾き = B/C, D は RRA=A に対応する Ni 当量である。図 7 は水素圧力 45 ~ 210MPa の範囲において、図 8 は水素圧力 40 ~ 70MPa の範囲において、近似式と一致している。

図 7 において、室温は正確な試験温度が不明な場合が多い。そこで、試験温度が不明な場合に最もデータ数の多い 20℃ を室温とみなす。また、図 8 において、-40℃ の結果は 2 章 (4) に示したとおり、保守的な評価となるので低温 (-123 ~ -40℃) の結果を代表している。

85℃ における RRA と Ni 当量の関係を図 9 に示す。図 9 には、比較のために 20℃ および -40℃ の近似式を示す。85℃ の RRA データは極めて少なく、2 章の試験条件の評価基準を満足するデータはない。しかし、85℃ の RRA は水素圧力 45 ~ 90MPa の範囲において、同じ Ni 当量に対して 20℃ および -40℃ の RRA よりも大きくなる傾向を示している。したがって、85℃ の RRA を 20℃ または -40℃ の RRA と同等以上とすることは、保守的な評価となる。

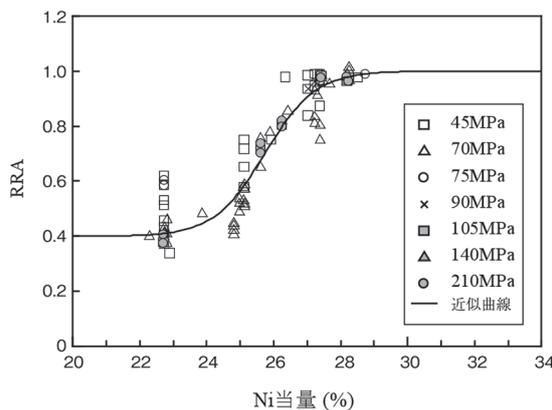


図 7 20℃ における RRA と Ni 当量の関係

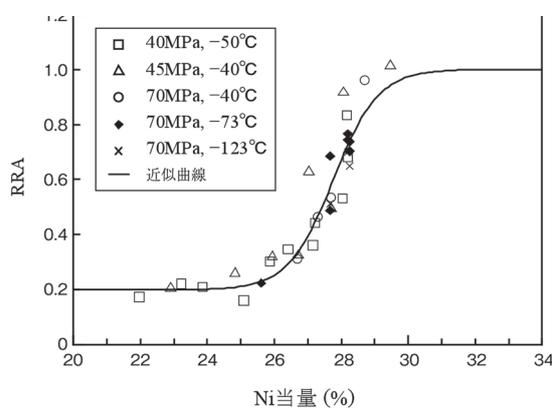


図 8 -40℃ における RRA と Ni 当量の関係

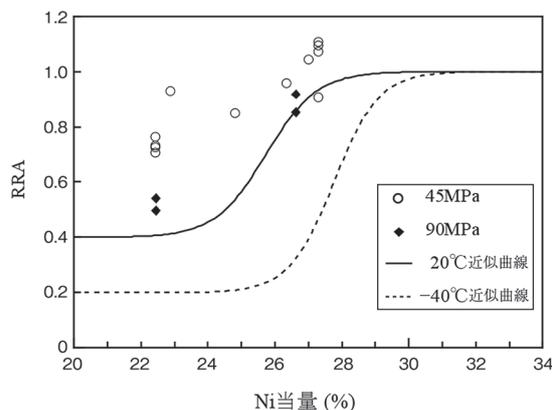


図 9 85℃ における RRA と Ni 当量の関係

以上の結果から、SUS316 および SUS316L は絞りの実測値が 75% を確保していれば、Ni 当量が 28.5% 以上の場合には 圧力 70MPa において温度 -40 ~ 85℃ で、Ni 当量が 26.3% 以上の場合には 圧力 90MPa において温度 20 ~ 85℃ で、材料の選定基準を満足する。

(3) 疲労特性に及ぼす水素の影響

SUS316 および SUS316L は、SSRT の RRA による材料の選定基準を満足する Ni 当量の範囲においても、Ni 当量が小さいほど水素の影響を受けやすくなる。そこで、高圧水素環境における疲労特性についても検討を行った。SUS316L (Ni 当量 27.3%) の高圧水素環境 (室温, 90MPa) と大気環境における疲労試験で得られた S-N 曲線の比較を図 10 に示す。ここで、縦軸の応力振幅は引張試験結果の引張強さで基準化している。

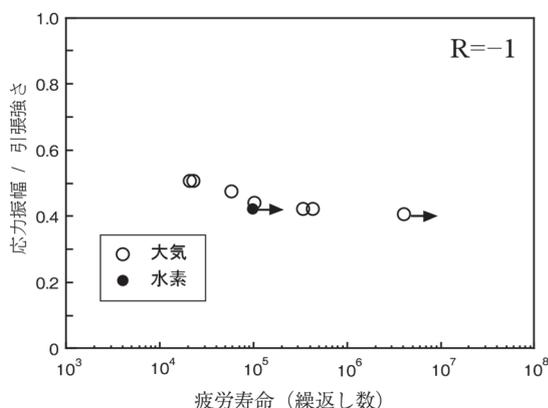


図 10 高圧水素環境と大気環境における疲労試験結果

高圧水素環境と大気環境では、高サイクル疲労試験結果に差異が認められない。また、大気環境における 10^7 回疲労強度は引張強さに対する比が 0.4 倍以上である。疲労特性に及ぼす水素の影響は、低サイクル疲労で影響が大きく、高サイクル疲労で影響が小さくなる⁽²⁴⁾。したがって、高圧水素環境において RRA が減少しない材料では、高圧水素環境において 10^7 回疲労強度は、引張強さに対する比が 0.4 倍以上になると予測できる。

応力を許容引張応力以下に制限する設計 (design by rule) において、許容引張応力の基準強度を引張強さとし、安全係数を 4 とする場合を想定する。 10^7 回疲労強度は引張強さの 0.4 倍以上であるから、許容引張応力 (引張強さの 0.25 倍) 以上であり、 10^7 回疲労強度に対する安全係数は 1.6 となる。

4. 材料の使用範囲

3章の結果から、Ni 当量によって選定した材料には使用範囲 (圧力と温度) の制限があり、これが規制の対象となる。SUS316 および SUS316L の使用範囲を図 11 に示す。Ni 当量によって、材料が使用できる圧力および温度が異なる。なお、常用の圧力の上限が一般則で定められているために、図の上限圧力は 82MPa である。

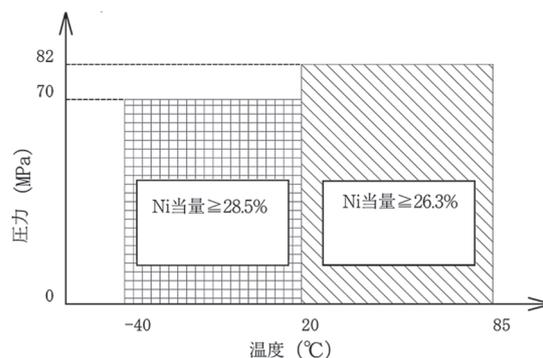


図 11 SUS316 および SUS316L の使用範囲

図 7～図 9 に最新の SSRT データを追加して、RRA と Ni 当量の関係を図 12 に示す。追加した SSRT データには、水素純度 99.999% (5N) の結果が含まれている。しかし、試験雰囲気酸素、一酸化炭素、二酸化炭素、水および窒素の成分は、ISO⁽²⁵⁾ および ASME⁽²⁶⁾ の規定値を満足することを確認し、水素純度の評価基準 (6N 以上) は適用除外とした。この図を適用することにより、選定した材料の使用範囲 (圧力と温度) が大きく拡大した。

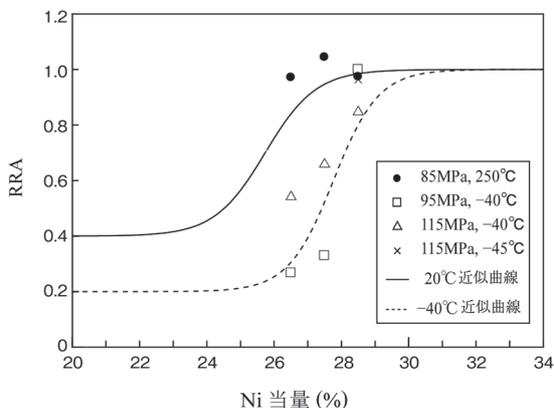


図 12 RRA と Ni 当量の関係 (最新データを追加)

以上の結果から、図 12 の SUS316 および SUS316L の使用範囲を再構築した結果を図 13 に示す。図 13 は、最新の一般則例示基準にも示されており、すでに適用されている。SUS316 および SUS316L は絞りの実測値が 75% を確保していれば、上限圧力 82MPa において、Ni 当量が 28.5% 以上の材料は、温度 -45℃ から 250℃ で、Ni 当量が 27.4% 以上の材料は、温度 -10℃ から 250℃ で、Ni 当量が 26.3% 以上の材料は、温度 20℃ から 250℃ で、材料の選定基準を満足する。

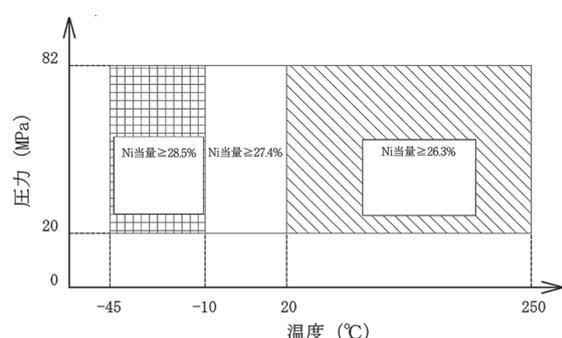


図 13 選定した材料の使用範囲 (最新の結果)

20MPa 以下の圧力では、水素ステーション以外の高圧ガス設備での使用実績があり、これまでも設備の使用者および設計者が水素の影響のない材料を選定し、使用していることから、Ni 当量の制限はない。また、-10℃ から 20℃ までの温度で必要な Ni 当量 27.4% は、近似的に得られた値であり、今後の SSRT データの取得による確認が期待されている。

5. 鋼種拡大の検討対象の材料

前章までは、SUS316 および SUS316L が水素ステーションの材料として選定され、使用範囲が構築されるまでの過程を示した。本章

以降は、その他の金属について検討した結果を示す。

NEDO プログラムのフェーズ II において、鋼種拡大の検討の対象となっている材料は、グループ 1 とグループ 2 に大別できる。グループ 1 は、水素の影響がない範囲 (圧力と温度) を確認して、その使用範囲を構築する材料である。また、グループ 2 は、水素の影響を定量的に確認し、その使用条件 (圧力、温度、応力など) の確立を必要とする材料である。

(1) グループ 1 の材料

- ① SUS316 および SUS316L の Ni 当量制限材
- ② SUH660
- ③ XM-19 (HRX19 を含む)

上記 ① の結果は、4 章に示した。② および ③ の結果は、6 章に示す。

(2) グループ 2 の材料

- ① SNCM439
- ② SCM435

上記 ① および ② の材料は、水素ステーションの蓄圧器に使用する低合金鋼である。一般則の規定では、70MPa 水素ステーションの材料として SNCM439 および SCM435 は使用できない。

SNCM439 について、室温 20MPa の水素環境における引張試験の結果の一例を表 2 に示す⁽²⁷⁾。相対特性 (RTS と RRA) の不活性環境は、大気である。

相対引張強さ (RTS : Relative Tensile Strength) の定義を式 (5) に示す。

$$RTS = \frac{\text{水素環境の引張強さ}}{\text{不活性環境の引張強さ}} \dots\dots (5)$$

表 2 SNCM439 の引張試験 (水素環境) 結果⁽²⁷⁾

焼戻し温度 (°C)	引張強さ (MPa)	RTS	絞り (%)	RRA
500	1190	1.00	11	0.23
550	1056	1.01	17	0.31
600	946	0.99	30	0.49
650	798	0.98	40	0.60

表2の結果から、SNCM439はRRA < 1となるが、RTSは焼戻し温度に関係なくほぼRTS = 1が確保できる。また、SNCM439は、焼戻し温度を高くし、強度を低減すれば、RRAが向上する。この方針で、材料特性に及ぼす水素の影響が定量的に調査されている。

SCM435について、115MPaの水素環境におけるSSRTの結果の一例を表3に示す⁽²⁸⁾。不活性環境は、-45℃の場合に窒素、室温(RT)と120℃の場合に空気である。

表3の結果から、SCM435はRRA < 1となるが、RTSは試験温度に関係なくほぼRTS = 1が確保できる。したがって、引張強さを基準として、想定される破壊モードに対処できる使用条件の確立が検討されている。

6. SUH660 および XM-19 の結果

(1) SUH660 の結果

JISのSUH660は高強度耐熱ステンレス鋼である。水素ステーションの材料としての使用を可能とするために、JIS B 8265⁽²⁹⁾に広い温度範囲(350℃まで)の許容引張応力が設定された。JIS B 8265の許容引張応力は、ASME規格の許容引張応力と整合している。

SUH660について、115MPaの水素環境におけるSSRTの結果の一例を表4に示す⁽³⁰⁾。

表4において、試験温度-45℃の場合に、

圧力は106MPaである。また、不活性環境は、-45℃の場合に窒素、他の場合に空気である。

SUH660のRTSおよびRRAは、圧力115MPaにおいて、温度-45~120℃の範囲でほぼ1となり、水素の影響はない。温度200℃では、RTSが増大し、RRAが低下する傾向が認められる。この結果から、一般則では、SUH660が水素ステーションに使用できる材料として選定され、使用温度の上限(120℃)が設定された⁽³¹⁾。

(2) XM-19 の結果

XM-19(TPXM-19を含む)はASME規格の材料であり、JISの材料としては規定されていない。水素ステーションの材料としての使用を可能とするために、JIS B 8265⁽²⁹⁾に広い温度範囲(650℃まで)の許容引張応力が設定された。JIS B 8265の許容引張応力は、ASME規格の許容引張応力と整合している。

HRX19の結果として表5に示すように、XM-19のRTSおよびRRAは、圧力100MPa超において、温度-45~200℃の範囲でほぼ1となり、水素の影響はないと判断される。この結果から、一般則では、XM-19が水素ステーションに使用できる材料として選定され、使用温度の上限(200℃)が設定される見通しである。

表3 SCM435のSSRT(115MPa)の結果⁽²⁸⁾

試験温度(℃)	引張強さ(MPa)	RTS	絞り(%)	RRA
-45	886	0.99	36	0.51
RT	820	0.97	47	0.64
120	835	0.99	47	0.65

表4 SUH660のSSRTの結果⁽³⁰⁾

試験温度(℃)	引張強さ(MPa)	RTS	絞り(%)	RRA
-45	1133	0.98	52	1.06
50	1103	1.02	50	1.11
120	1071	1.01	45	0.98
200	1073	1.05	36	0.54

(3) HRX19の結果

日本では、水素ステーションに使用する材料として、HRX19が開発されている。この材料は、化学成分の一部を XM-19 の規定値の範囲内で、さらに狭い範囲に限定している。そして、最終工程の熱処理を行い、材料の高強度化を図っている。引張強さの規定値は、XM-19 の 690MPa 以上に対して、HRX19 は 800MPa 以上である。また、HRX19 は、溶接性に優れている。現状の水素ステーションでは、ねじ込み式継手が多く使用されている。今後の水素ステーションでは、HRX19 の適用によって、ねじ込み式継手が溶接継手に替わる可能性がある。HRX19 について、高圧の水素環境における SSRT の結果の一例を表 5 に示す^{(7) (8)}。水素環境の圧力は、- 45℃ の場合に 106MPa、室温と 120℃ の場合に 115MPa、200℃ の場合に 135MPa である。不活性環境は、- 45℃ の場合に圧力 0.1MPa の窒素、その他の場合に大気である。HRX19 の RTS および RRA は、圧力 100MPa 超において、温度 - 45 ~ 200℃ の範囲でほぼ 1 となり、水素の影響はない。

一般則では、HRX19 は水素ステーションに使用できる材料として、選定されていない。ただし、HRX19 は、XM-19 としてならば使用できる。しかし、高強度と溶接性という付加価値を活かすことはできない。付加価値を活かすために、材料名称の識別と許容引張応力の設定が必要である。現状では、HRX19 は個別の審査で、使用の認可が得られる。今後は、

JIS の規格材料とし、JIS B 8265 で許容引張応力を設定することが望まれる。

(4) 極低温環境における適用

今後の水素ステーションでは、従来の圧縮水素に替わって、液化水素の使用が計画されている。水素の昇圧には、液化水素ポンプを使用する。ポンプなどの機器を構成する材料は、極低温の液化水素環境に適合する必要がある。

①低温使用限界

SUH660 および XM-19 を極低温の液化水素環境で使用するために、破壊靱性試験を行い、低温使用限界を確認する必要がある。

弾塑性破壊靱性 J_{IC} 試験を、ASTM 規格 E1820⁽³²⁾ に従い、標準試験片 (ICT) を用いて、除荷弾性コンプライアンス法によりき裂進展を測定し、温度 - 253℃ の液化水素環境、大気圧の条件で行った⁽³³⁾。SUH660 および XM-19 の試験片は延性破壊する。弾塑性破壊靱性 J_{IC} は極めて高く、試験の有効条件を満足しない。見掛けの弾塑性破壊靱性 J_Q の値を表 6 に示す。 J_{IC} は、 J_Q 以上と判断される。 J 積分表示の J_Q を式 (6) により、応力拡大係数表示の K_{JQ} に換算する。

$$K_{JQ} = \sqrt{\frac{E}{1-\nu^2} J_Q} \dots\dots\dots (6)$$

K_{JQ} の値を表 6 に示す。低温使用限界の判定基準は、JIS B 8267⁽³⁴⁾ において平面ひず

表 5 HRX19 の SSRT の結果^{(7) (8)}

試験温度 (°C)	引張強さ (MPa)	RTS	絞り (%)	RRA
-45	969	0.98	73	1.01
RT	819	0.99	77	1.04
120	743	1.03	77	1.05
200	717	1.07	76	1.04

表 6 SUH660 および XM-19 の破壊靱性⁽³³⁾

材料	J_Q (kJ/m ²)	K_{JQ} (MPa√m)
SUH660	133	177
XM-19	209	215

み破壊靱性 K_{IC} の値に基づいている。 K_{JQ} の値 (177 および $215\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$) は、 K_{IC} の値 ($132\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$) を満足する。したがって、SUH660 および XM-19 は、温度 -253°C まで使用できる。

以上の結果から、SUH660 および XM-19 の低温使用限界は、SSRT の試験温度 (-45°C) から液体水素温度 (-253°C) まで拡張された。

② SSRT の結果

SSRT は低ひずみ速度の引張試験であり、通常は中空丸棒試験片を用いる。この試験方法では、試験片外表面に水素環境を設置する。しかし、この試験方法では、可動部分の負荷軸を水素環境からシールすることが困難である。現状では、100MPa 超の高圧において、 -50°C ま

での試験温度が限界で、極低温の試験には成功していない。

物質・材料研究機構 (NIMS) の緒形俊夫博士が、新しい SSRT の試験方法を開発した⁽³⁵⁾。中空丸棒試験片 (円筒試験片) を用い、試験片内表面に水素環境を設置する。可動部分の負荷軸のシールは、水素環境と無関係である。

試験装置および試験片の概略を図 14 に示す。過去に、内圧円筒試験片の軸荷重制御疲労試験の例は数多くあるが、内径を小さくした内圧中空丸棒試験片を、引張試験 (SSRT) に適用した例はない。

この試験方法で得られた 90MPa の水素環境における SSRT の結果を表 7 (SUH660) および表 8 (XM-19) に示す⁽³³⁾。不活性環境は、ヘリウムである。

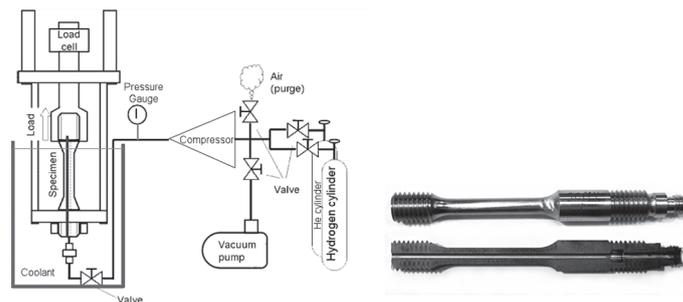


図 14 試験装置および中空丸棒試験片⁽³⁵⁾

表 7 SUH660 の SSRT の結果⁽³³⁾

試験温度 ($^\circ\text{C}$)	引張強さ (MPa)	RTS	絞り (%)	RRA
-240	1522	0.99	39.6	0.96
-160	1300	1.01	40.0	1.04
-80	1175	1.00	41.6	1.03
27	1064	0.99	37.6	0.99

(中空試験片を用いた結果。数値は試験片 2 本の平均値。)

表 8 XM-19 の SSRT の結果⁽³³⁾

試験温度 ($^\circ\text{C}$)	引張強さ (MPa)	RTS	絞り (%)	RRA
-240	1660	0.99	33.8	0.90
-160	1213	1.00	55.2	0.97
-80	902	0.99	65.6	1.00
27	700	1.00	68.5	0.98

(中空試験片を用いた結果。 -240°C と -160°C の場合は試験片 3 本の平均値、 -80°C と 27°C の場合は試験片 2 本の平均値)

表7および表8の結果から、SUH660およびXM-19の相対特性(RTSとRRA)は、圧力90MPaにおいて、温度-240~27℃の範囲でほぼ1となり、水素の影響はない。SUS304、SUS304L、SUS316、SUS316Lなどの材料は、従来の中実試験片および新しい中空試験片を用いるSSRTの結果においても同様に、低温側への試験温度の低下に伴いRRAが減少し、-100℃付近で最小値を示した後に、RRAが増大するという特有な温度依存性を示す⁽³⁶⁾⁽³⁷⁾。しかし、SUH660およびXM-19は、このような特有な温度依存性を示さない。

今後、より多くのデータを取得することが期待されている。

7. おわりに

日本における水素ステーション設備に使用する材料の評価と選定の現状を示した。NEDOプログラムは進行中であるが、大きな成果が得られ、今後の成果の拡大が期待されている。主な成果は、以下のとおりである。

- (1) オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316 および SUS316L の高圧水素環境における最新の SSRT データに選定基準を適用し、圧力 82MPa 以下の水素ステーション設備に使用する材料の選定と使用範囲を構築した。SUS316 および SUS316L は絞りの実測値が 75% を確保していれば、Ni 当量が 28.5% 以上の材料は、温度 - 45℃ から 250℃、Ni 当量が 27.4% 以上の材料は、温度 - 10℃ から 250℃、Ni 当量が 26.3% 以上の材料は、温度 20℃ から 250℃ で、使用可能である。
- (2) 高強度ステンレス鋼 SUH660 および XM-19 について、広い温度範囲で水素の影響がないことを実証し、液化水素環境で使用するための低温使用限界 (- 253℃) を設定した。

[謝辞]

本解説は、一般財団法人石油エネルギー技術センターおよび九州大学と共同で実施した、

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 委託事業、水素利用技術研究開発事業、燃料電池自動車および水素供給インフラの国内規制化、国際基準調和・国際標準化に関する研究開発、水素ステーション用金属材料の鋼種拡大に関する研究開発事業の成果であり、事業を統括するステアリング委員会 (委員長: 小林英男・東京工業大学名誉教授) と材料基準分科会の審議を経た。ここに記して、関係各位に謝意を表する。

また、本解説は、ASME 2016 および ASME 2017 PVP Conference における発表⁽⁵⁾⁽⁷⁾、および高圧ガス誌において掲載した論文⁽⁴⁾、解説⁽⁶⁾⁽⁸⁾ の内容を含むことを付記する。

参考文献

- (1) 一般高圧ガス保安規則 (2005)
- (2) 一般高圧ガス保安規則 (2012)
- (3) 一般高圧ガス保安規則関係例示基準, 9. ガス設備等に使用する材料 (2011)
- (4) 山田敏弘, 小林英男, 「水素ステーション設備に使用する材料の選定基準」, 高圧ガス, Vol.49, No.10, pp.885-893 (2012)
- (5) H. Kobayashi, T. Yamada, H. Kobayashi and S. Matsuoka, "Criteria for Selecting Materials to be Used for Hydrogen Refueling Station Equipment", ASME PVP 2016, 64033
- (6) 小林英男, 山田敏弘, 小林英男, 松岡三郎, 「水素ステーション設備に使用する材料の選定と使用範囲の構築」, 高圧ガス, Vol.53, No.12, pp.1005-1014 (2016)
- (7) H. Kobayashi, T. Sano, H. Kobayashi, S. Matsuoka and H. Tsujigami, "Current Status of Evaluation and Selecting of Materials to be Used for Hydrogen Refueling Station Equipment in JAPAN", ASME PVP 2017, 66250.
- (8) 小林英男, 佐野尊, 小林英男, 松岡三郎, 「日本における水素ステーション設備に使用する材料の評価と選定の現状」, 高圧ガス, Vol.54, No.12, pp.1143-1154 (2017)
- (9) R. J. Walter and W. T. Chandler, "Effect of High-Pressure Hydrogen on Metals at Ambient Temperature, Final Report", NASA CR-102425 (1969)
- (10) 平山俊成, 小切間雅彦, 「Fe-Cr-Ni 系マルテンサイト変態に対する化学組成の影響」, 日本金属学会誌, Vol. 34, pp.507-510 (1970)
- (11) T. Angel, J. Iron Steel Inst., 177, 165 (1954)
- (12) 武本敏彦, 村田康, 田中照夫, "Cr-Ni オーステナイト鋼の機械的性質および磁気的性質に及ぼす合金元素と加工熱

- 処理の影響”, 鉄と鋼, Vol.76, No.6, 894-901 (1990)
- (13) 野原清彦, 小野寛, 大橋延夫, “準安定オーステナイトステンレス鋼における加工誘起マルテンサイト変態の組成および結晶粒度依存性”, 鉄と鋼, Vol.63, No.5, 772-782 (1977)
- (14) 大嶋貴之, 羽原康裕, 黒田光太郎, “Cr-Mn-Ni オーステナイト系ステンレス鋼の機械的性質と加工誘起マルテンサイト変態に及ぼす合金元素の影響”, 鉄と鋼, Vol.93, No.8, 544-551 (2007)
- (15) L. Zhang, M. Wen, M. Imade, S. Fukuyama and K. Yokogawa, “Effect of Nickel Equivalent on Hydrogen Gas Embrittlement of Austenitic Stainless Steels Based on Type 316 at Low Temperatures”, *Acta Mater.*, 56, 3414-3421 (2008)
- (16) 容器保安規則例示基準, 圧縮水素自動車燃料装置用容器の技術基準, JARI S 001, (2004)
- (17) Vd TÜV514 Requirements for Hydrogen Fueling Stations, TÜV (2010)
- (18) D. Sun, G. Han, S. Vaodee, S. Fukuyama and K. Yokogawa, “Tensile Behavior of Type 304 Austenitic Stainless Steels in Hydrogen Atmosphere at Low Temperature”, *Material Science and Technology*, 17, 302-308 (2001)
- (19) JIS G 3214, 圧力容器用ステンレス鋼鍛鋼品, 日本規格協会 (2005)
- (20) JIS G 3459, 配管用ステンレス鋼鋼管, 日本規格協会 (2012)
- (21) JIS G 4303, ステンレス鋼棒, 日本規格協会 (2005)
- (22) JIS G 4304, 熱間圧延ステンレス鋼板および鋼帯, 日本規格協会 (2005)
- (23) JIS G 4305, 冷間圧延ステンレス鋼板および鋼帯, 日本規格協会 (2005)
- (24) Y. Wada, R. Ishigaki, Y. Tanaka, T. Iwadate and K. Ohnishi, “Effect of Hydrogen Gas Pressure on The Mechanical Properties of Low Alloy Steel for Hydrogen Pressure Vessels”, *ASME PVP2007*, 26535
- (25) ISO/TS 14687-2 (2008) .
- (26) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. VIII Div.3, KD-10 (2010)
- (27) H. Arashima, S. Masada, H. Itoh and K. Ohnishi, “Phenomenological Aspect of Hydrogen Environment Embrittlement of SNCM439 Steels”, *Iron and Steel*, Vol.96, No.2, pp.20-27 (2010)
- (28) H. Matsunaga, M. Yoshikawa, R. Kondo, J. Yamabe and S. Matsuoka, “Slow Strain Rate Tensile and Fatigue Properties of Cr-Mo and Carbon Steels in a 115 MPa Hydrogen Gas Atmosphere”, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol.40, pp.5739-5748 (2015)
- (29) JIS B 8265, 圧力容器の構造 - 一般事項, 日本規格協会 (2017)
- (30) H. Matsunaga, M. Nakamura, M. Yoshikawa, J. Yamabe and S. Matsuoka, “SSRT Properties of SUS316, SUS316L and SUH 660 in High Pressure Hydrogen Gas at High Temperature”, *CAMP-ISIJ (The Iron and Steel Institute of Japan)*, Vol.28, p. 815 (2015)
- (31) 一般高圧ガス保安規則 (2016)
- (32) ASTM E1820-11, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness (2011)
- (33) 辻上博司, 遠藤暁子, 緒形俊夫, 中村潤, 高林宏之, 「液化水素ポンプ昇圧型水素ステーション用高強度材料の水素適合性・低温靱性評価」, 圧力技術, Vol.55, No.6, pp.312-318 (2017)
- (34) JIS B 8267, 圧力容器の設計, 日本規格協会 (2015)
- (35) T. Ogata, “Evaluation of Hydrogen Embrittlement by Internal High-Pressure Hydrogen Environment in Specimen”, *J. Japan Inst. Metals*, Vol.72, pp.125-131 (2008)
- (36) 福山誠司, 孫東昇, 張林, 文矛, 横川清志. 「SUS316 型ステンレス鋼の低温における水素環境脆化に及ぼす温度の影響」, 日本金属学会誌, Vol.67, No.9, pp.456-459 (2003)
- (37) T. Ogata, “Hydrogen Embrittlement Evaluation in Tensile Properties of Stainless Steels at Cryogenic Temperatures”, *Advances in Cryogenic Engineering Materials, Trans. ICMC*, Vol.54, pp.124-131 (2008)

[調査研究報告]

カーボンサイクルエネルギーシステムの構築について
～CO₂リサイクルによる地球温暖化対策～

橋崎 克雄[※] (プロジェクト試験研究部
部長)



酒井 奨^{※※} (プロジェクト試験研究部
副部長)

1. はじめに

2015年11月、パリで開催された「国連気候変動枠組み条約第21回契約国会議」(COP21)において、温室効果ガス(GHG)排出削減に向けた日本の約束草案が提出され、わが国が2030年度のGHG排出量を2013年度比で26%削減することが決まった。さらに、2016年5月に閣議決定された「地球温暖化対策計画」には、2050年までに80%の温室効果ガスの排出削減を目指すことが明記され、より一層の排出削減に努めていくこととなった。

そして、2018年7月に発表された「第5次エネルギー基本計画」では、2030年のエネルギーミックスの確実な実現へ向けた取組の更なる強化を行うとともに、新たなエネルギー選択として2050年のエネルギー転換・脱炭素化に向けた挑戦が謳われている。

これに対し、わが国の二酸化炭素(CO₂)排出量は、2014年度で年間12.7億トンに上り、その削減策として炭素回収貯留(CCS)技術の開発、人工光合成技術や藻類バイオ燃料製造などのCO₂有効利用(CCU)技術の開発が行われてきた。CCS技術は大量のCO₂処理が可能であり、CO₂削減の有効な手法と考えられるが、昨今CCU技術においても大量のCO₂処理が可能なエネルギーシステムの構築が必要と提言される状況になっている。

現状、わが国において太陽光や風力などの

変動する再生可能エネルギー電源については、ダイヤモンドコントロール、揚水、火力等の調整電源が必須であり、再生可能エネルギーだけで3E+S(安定供給、経済効率性の向上、環境への適合、安全性)を満たすエネルギーシステムを構築できるとは言い難い。従って、今後とも化石燃料を利用したガスタービン・コンバインドサイクル(GTCC)発電や石炭ガス化複合発電(IGCC)、超々臨界(USC)といった石炭火力発電は、調整電源として必要最低限の量が共存し続けると予想される。そこでは、過去40年にわたり環境負荷低減のために開発され、世界最高水準にあるクリーンコール技術(CCT)を駆使しながら、排出される大量のCO₂の処理が可能なエネルギーシステムを組み込んでCO₂排出量の削減に努めていくことが責務と考えられる。

本稿では、CO₂の大量処理が可能なエネルギーシステムを紹介する。

2. 日本のエネルギー消費構造と低炭素化に向けて

わが国のエネルギー消費フローを図1に示す。わが国の一次エネルギー消費量はおよそ20,000PJ弱である。中国、米国、インド、ロシアに次ぐ世界第5位の消費量であるが、一次エネルギー自給率は7%強と低く、日本のエネルギー政策は国際情勢の影響を受けやすい環境に

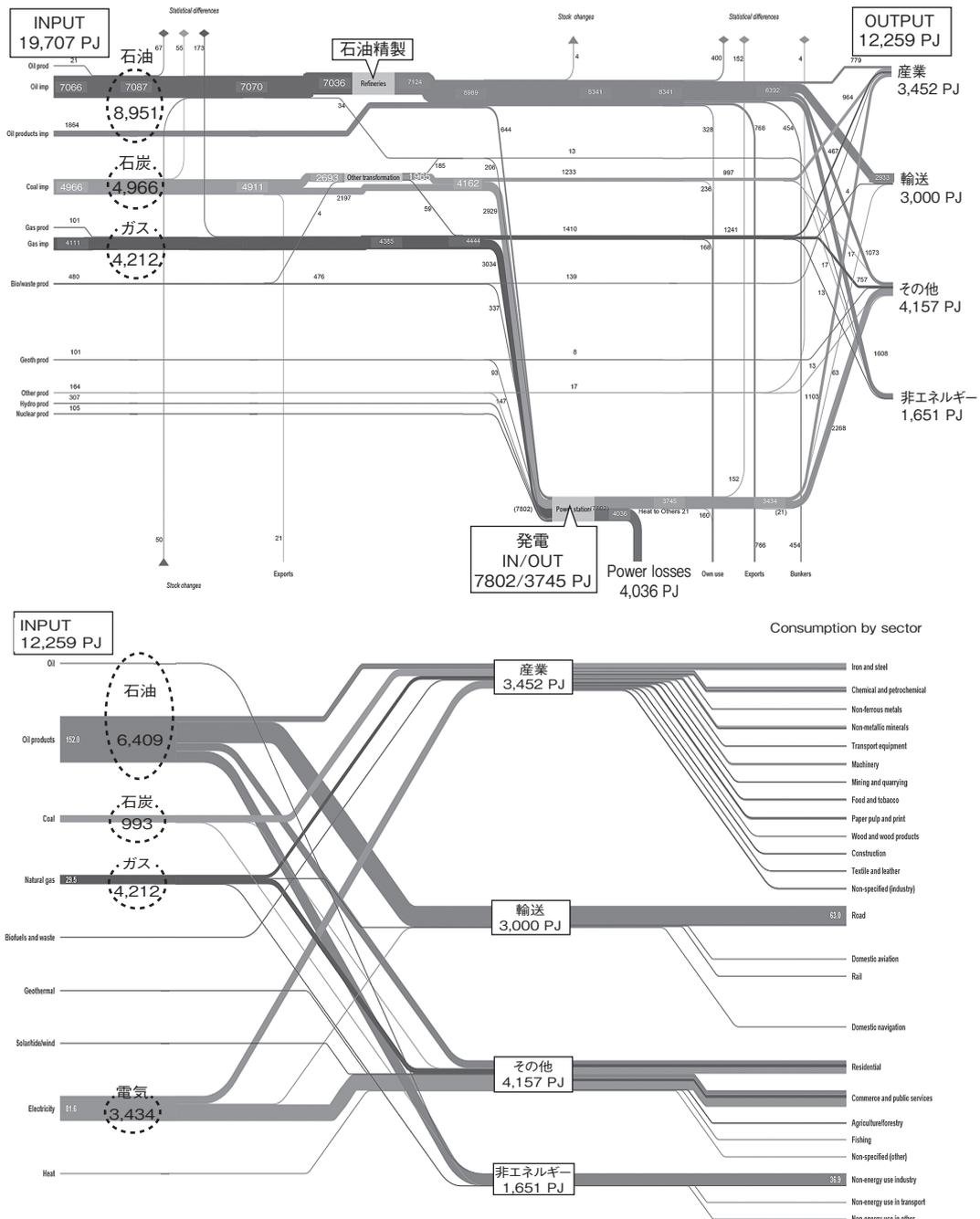


図1 日本のエネルギー消費フロー (1)

ある。「第5次エネルギー基本計画」においても、再生可能エネルギーを主力電源としていくことは、わが国の自給率向上とCO₂排出量削減に大きく寄与する。しかし、地勢上、開発可能な賦存量には限界があり、またその普及には系統安定化問題など、多くの解決すべき課題が残っている。図1でも示すとおり、再生可能エネルギーによる電力を増大させるには、産業分野の生産プロセスの電化が進まない限り、輸送分野

と民生分野で利用して行くしかない。すなわち、電気自動車の普及と住宅・業務機器の電化である。但し、中・長距離バスやトラックといったヘビーデューティユースの車両までもが電動化されるとは考え難い。その結果、産業分野と大型車両の輸送分野が最後まで化石燃料に依存し続ける分野になると予想される。

また、エネルギー転換分野（発電分野）では、再生可能エネルギーの増大と共に化石燃料（石

炭、天然ガス)の使用量が減少するが、安定電源を必要とする産業分野に対しては、引き続き化石燃料を用いた発電電力の供給が続けられていくと予想される。

図1のようなエネルギー消費フローに対し、将来の脱炭素化、低炭素化を目指し挑戦的な複数のエネルギー供給の選択肢を図2に示す。

本稿では、カーボンサイクルエネルギーシステムを論ずるため、図2中の再エネ最大+(火力)だけに的を絞る。

将来の低炭素化に向け、火力発電分野においては、2016年に開催された「次世代火力発電の早期実現に向けた協議会」(経済産業省)

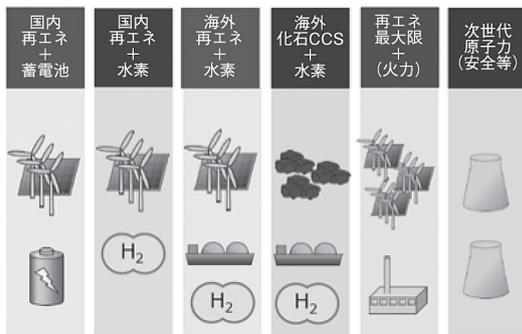


図2 わが国のエネルギー供給の選択肢⁽²⁾

で、2030年までの火力発電技術の高効率化とCCS技術に関する技術ロードマップが議論され、CCU技術と両立させるため、経済性と環境負荷低減を目指す方針が打ち出されている。

国際エネルギー機関(IEA)によれば、2050年までに気温の上昇を2℃以下にするには、世界のCO₂大気放出量を15Gt/年以下にする必要があるとし、現在の世界のCO₂排出量35Gt/年弱であり、CCSで見込まれている14%のCO₂削減量だけではもはや達成は困難と言われている。特に、CCSの適地やその貯留容量に乏しいわが国では、CCU技術を活用したCO₂削減策も構築していくことが重要と考えられる。

CO₂削減手法では、図3に示す「CO₂固定化有効利用分野の技術戦略マップ2010」(経産省)の中で、変換・有効利用分野のCCU技術の開発に注目が集まりつつある。その背景のひとつには、再生可能エネルギーの普及で安価となってきた再生可能エネルギー電力・熱を利用して、エネルギーポテンシャル的に最低位にあるCO₂を原料として変換利用できる環境が整いつつあることが挙げられる。

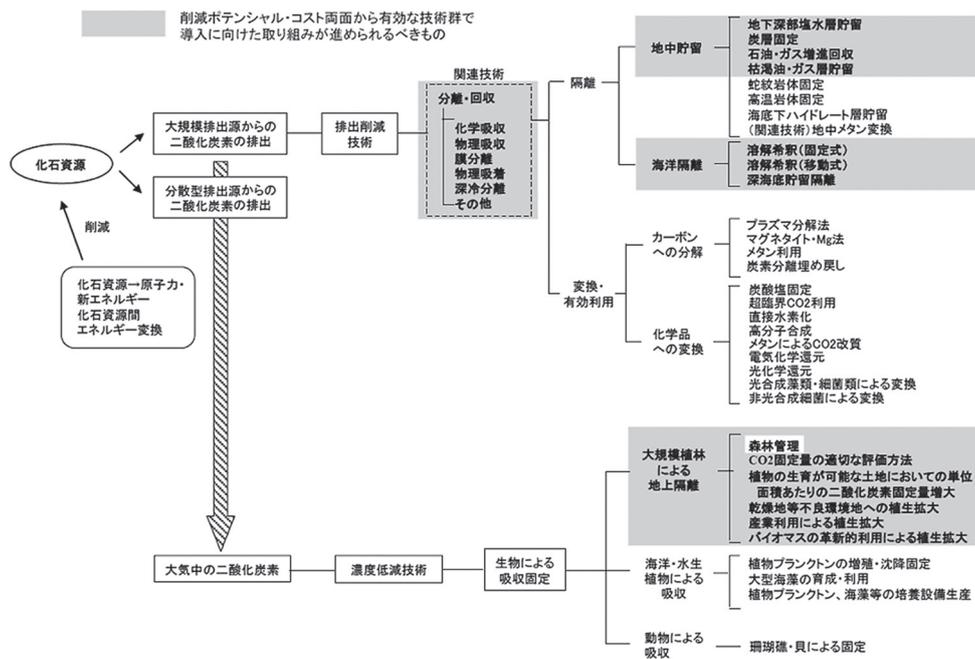


図3 CO₂削減手法マップとCCU技術⁽³⁾

3. CO₂の変換利用

火力発電から排出されたCO₂を何に変換利用するかは大きな選択である。表1にCO₂を多く使用するか化成品の一例を示す。わが国のCO₂排出量と比べてもその使用量は遥かに小さく、化成品以外への用途を模索すべきことは明らかである。また、石油増進回収 (EOR)

表1 各種化成品のCO₂利用量⁽⁴⁾

化成品種	世界需要 (万トン/年)	必要CO ₂ 量 (万トン/年)
尿素	18,000	13,200
メタノール	6,000	1,000
無機炭酸塩	25,000	7,000
ポリウレタン	1,000	50
ポリカーボネート	500	100
ホルムアルデヒド	2,500	500
ジメチルエーテル	>2,000	>500
ギ酸	100	90
食品	800	800

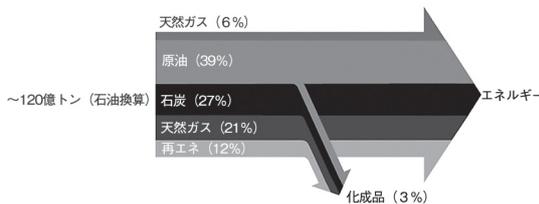


図4 世界のエネルギー需要⁽⁵⁾

用途も6,000~8,000万t/年と言われ、同様に恒久的な対策とは言い難い。図4に世界のエネルギー需要とその流れを示すが、図に示される通り、CO₂を原料として変換利用する先は、もはや燃料(合成燃料)として使うエネルギー分野しかないことがわかる。問題は、どのような合成燃料に変換すべきであるかである。第1章でも述べたように、最後まで化石燃料に頼らざるを得ないと思われる産業分野や大型車両の輸送分野で利用でき、火力発電の燃料としても利用できれば、CO₂で石油、石炭、天然ガスに代替することが可能となる。すなわち、再生可能エネルギーで合成された燃料の有効エネルギー源分だけ一次エネルギー消費量を削減することが可能となる。

後述するが、この合成燃料の燃焼から発生するCO₂を分離回収して再び合成燃料に戻せば(カーボンサイクル)、CO₂排出量を飛躍的に低減させることが可能となる。

4. 合成燃料の特性

現在世界中で、CO₂と再生可能エネルギー電力・熱を利用して製造された水素とを合成した燃料の研究がなされている。図5にそのような各種燃料のエネルギー密度特性を示す。

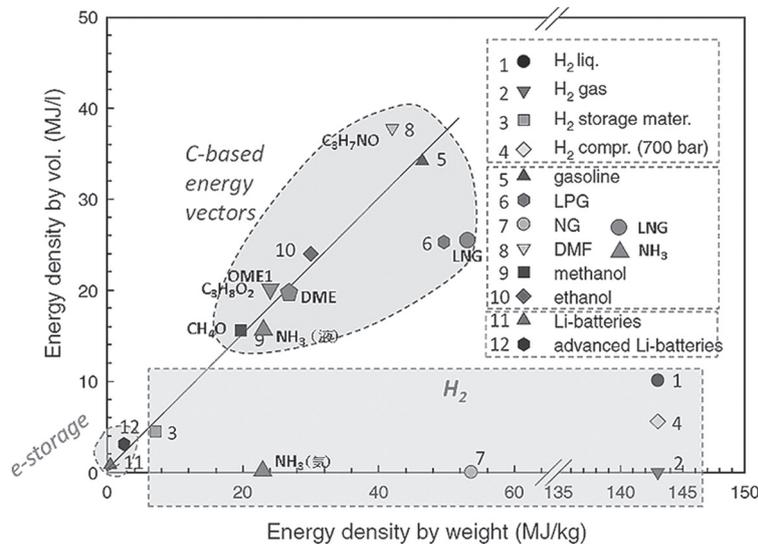


図5 各種エネルギー媒体の特性⁽⁶⁾

従来よりC1化学の分野では、天然ガスや石炭を原料としてメタノール (CH₄O)、ジメチルエーテル (DME:C₂H₆O)、さらにはメタン (CH₄) 合成もよく研究されている。再生可能エネルギーを利用しない点を除けば、合成燃料の製造法は技術的にも確立し商用生産も行われている。

DMEは、セタン価が高く、ディーゼルエンジン燃料として使用可能であり、軽油と異なり、硫黄を含まず、すすの発生もほとんどないといった利点をもつ。

常温で液体のメタノールは、輸送、貯蔵等の取り扱いが石油同様に容易である。また、オクタン価が高いので圧縮比を高めればエネルギー効率の向上が期待される。また、発電用燃料としても、燃料電池、化学再生ガスタービン発電などのような利用法が期待される。

エタノールはメタノール同様、取り扱いや輸送も容易で、単位重量当りの発熱量もメタノールより3割程度大きく、燃料としては優れたものである。昨今、銅触媒を用い、常温

で電気化学的にエタノールを容易に合成できたとの報告も聞かれ、今後大いにその研究開発が期待される場所である。

これら期待される合成燃料と現状の軽油、ガソリンの物性値を表2にまとめた。メタノール、エタノールはガソリンに近い物性を持ち、またDME、OME1は軽油に近い物性を持っている。合成燃料として今後大型自動車の運輸部門、さらには産業部門、エネルギー転換部門の発電用燃料の代替品として利用可能と考えられる。

5. 再生可能エネルギー利用による燃料合成

今回、合成燃料を製造する前提として、エネルギーポテンシャル的に最低位にあるCO₂を原料として利用し、高位のエネルギーポテンシャルを持つ物質に変換するため、そのエネルギー源に再生可能エネルギーを用いることが必須条件となる。図6にそのフローを示す。

表2 各種燃料の物性値

	原油	LNG	ガソリン	軽油	メタノール	DME	エタノール	OME1
高位発熱量 (kcal/kg)	1500	13080	11200	11000	5420	7560	7100	—
低位発熱量 (kcal/kg)	9850	12180	10500	10300	4745	6880	6400	5490
液比重 (kg/ℓ)	~0.85	0.425	~0.75	0.84	0.796	0.668	0.79	0.86
セタン価	—	—	~12	38~53	3	>55	8	50
オクタン価: RON	—	—	91	—	109	—	110	—
沸点 (°C)	—	-162	20~210	180~360	65	-25	78.3	42
引火点 (°C)	~35°C	-187	-43	50~70	11	-41	13	-18
発火点 (°C)	—	537	~300	約250	464	350	423	—
爆発限界 (Vol %)	1~16	5~15	1.4~7.6	0.5~7.5	6.7~36	3.4~27	4.3~19	—

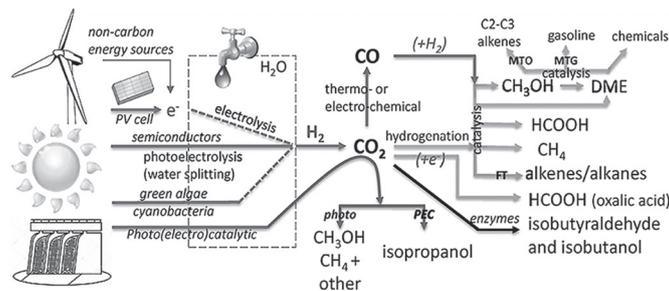


図6 再生可能エネルギーを用いたCO₂の燃料変換⁽⁷⁾

大量な CO₂ 排出量への対応を可能とするには、現段階では、太陽光、風力、水力発電電力を利用した電解水素による CO₂ 還元、太陽熱などを利用した高温水蒸気電解水素による CO₂ 還元が期待される。現在、再生可能エネルギーを利用して CO₂ から合成燃料を製造するプロセス開発は、特に欧州で“Power to Fuel”という形で進められ始めている。特に積極的に取り組んでいる会社がアウディ社で、同社の新合成燃料は“e-fuel”, “e-gasoline”, “e-diesel”などと称されている。また、一部ベンチャー企業では“Blue-Fuel”などとも呼ばれ積極的な開発が行われている。これらは“CO₂ to Fuel”であるが、欧州の高いディーゼル油、ガソリン価格（1.7～1.8 ドル/ℓ, 18～20 円/kWh 程度相当）を勘案すれば比較的参入しやすい市場分野ではないかと考えられる。

この再生可能エネルギーを利用した“CO₂ to Fuel”変換技術は、大別して4分野に分けられる。その分類と主な内容を表3に示す。技術的には、いかに水素を製造するか、CO₂をCOに還元するかに集約される。一旦、水素、CO、CO₂が共存する合成ガス（シンガス）にさえ変換合成できれば、後は既存のC1化学技術で図6に示すあらゆる合成燃料に変換可能である。

熱還元反応は、主に再生可能エネルギーを利用して電解水素を製造し、CO₂と反応させてメタネーションによるメタン合成やメタノール合成をしようとするものである。基本的に発熱反応であり、トータルとして水素の直接利用よりもエネルギー効率を落としてしまうが、大量のCO₂変換利用に対しては、反応装置のスケールメリットが得やすく、かつ既存インフラで貯蔵、輸送、利用が可能のためそのメリットは大きい。

熱化学変換は、主に太陽熱を利用した1,000℃級の高温場での金属酸化物の酸化還元反応を利用しCO₂をCOに、またH₂Oも共存の下に合成ガスを製造しようとするものである。現在、当所でもオーストラリアの連邦科学産業研究機構（CSIRO）と調査研究に取り組もうとしている手法であり、太陽光を一旦電気に変換することなく熱として直接利用するため、高いエネルギー利用効率が期待される。多量のCO₂処理を考えた場合、熱還元反応ほどではないがスケールメリットもある程度期待される。

電気化学変換は、触媒の下、再生可能エネルギー電気を利用した電気化学反応で所要の燃料を合成しようとするものであるが、反応

表3 主な CO₂ to Fuel 関連反応技術

分類	反応式
熱還元反応	<ul style="list-style-type: none"> • rWGS (Reverse Water-Gas Shift) to form CO $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$ (⇒syngas chemistry ⇒fuels) • Hydrogenation to form methanol, (DME) $\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$ • Hydrogenation to form methane (Sabatier reaction) $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ • Hydrogenation to form formic acid $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{HCOOH}$ • Hydrogenation to form ethanol $2\text{CO}_2 + 6\text{H}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + 3\text{H}_2\text{O}$ • CO₂-reforming of methane (Dry reforming) $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{H}_2 + 2\text{CO}$ (4H₂ + 2CO → 2CH₃OH)
熱化学変換	<ul style="list-style-type: none"> • $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow 3\text{FeO} + 1/2\text{O}_2$ and $3\text{FeO} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}$ (⇒Total reaction $\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + 1/2\text{O}_2$) • $x\text{M} + y\text{CO}_2 + (1-y)\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{M}_x\text{O}_y + y\text{CO} + (1-y)\text{H}_2$ (M: Metal)
電気化学変換	<ul style="list-style-type: none"> • $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$ (酸化サイド) • $\text{CO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$ (以下還元サイド) • $\text{CO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{HCOOH}$ • $\text{CO}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow \text{HCHO} + \text{H}_2\text{O}$ • $\text{CO}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$ • $\text{CO}_2 + 12\text{H}^+ + 12\text{e}^- \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + 3\text{H}_2\text{O}$ • $\text{CO}_2 + 8\text{H}^+ + 8\text{e}^- \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
光電気化学変換	<ul style="list-style-type: none"> • $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}^+ + \text{O}_2$ (酸化サイド) • $6\text{H}^+ + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$ (還元サイド)

上 CO₂ を一旦活性化させなければならず、そのエネルギーの大きさから表 3 に示す反応は実際には起こり難い。これをアシストする形で高活性な電気化学触媒の開発や、高温場として熱エネルギーを併用し反応を進めやすくするなどの取組みが行われている。なお、これら電気化学反応は、電位が近いため反応生成物が混合物となる可能性が高い。従って、選択性も触媒開発の重要な課題の 1 つとなるであろう。

また、プラントとして考えた場合、1 プラントとしての反応槽の大きさは制限される。このため、多量の CO₂ 処理を考えた場合、必ず複数槽での対応になると予想される。

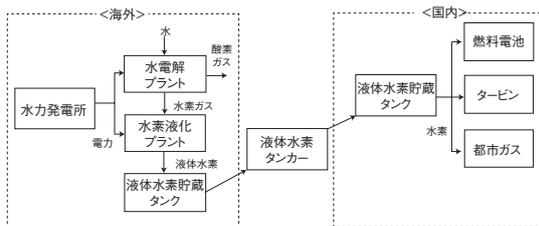
6. わが国における過去の検討事例

実は、このような“CO₂ to Fuel”の検討はわが国においても既に検討が行われている。

1993 年度～2002 年度に行われた「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) が始まる直前の新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の「石油代替エネルギー等輸送技術に関する調査」がある。本内容の一部を紐解き以下に紹介しておく。

表 4 エネルギー輸送媒体と形態、利用形態

サイクル名称	輸送媒体の形態		利用形態 (国内)
	(海外→国内)	(国内→海外)	
液体水素サイクル	LH ₂	—	LH ₂
メタノール/CO ₂ サイクル	CH ₃ OH	CO ₂	CH ₃ OH
メタノール/CO ₂ サイクル	CH ₃ OH	—	CH ₃ OH
メタノール/CO ₂ サイクル	CH ₃ OH	HCOOCH ₃	H ₂
アンモニアサイクル	NH ₃	—	H ₂ , NH ₃
シクロヘキサン	C ₆ H ₁₂	C ₆ H ₆	H ₂



WE-NET 自身は、カナダ、東南アジアなど海外の安い水力発電電力を利用し、現地で水電解して製造した水素を液体水素化して輸入し、国内で燃料電池自動車や水素発電などに利用しようという広大な構想であった。現在折りしも CO₂ 排出量削減問題から再生可能エネルギーの導入が急速に進み始め、その構想が現実味を帯びてきている。当時検討されたエネルギー輸送媒体と形態、利用形態を表 4 に示すが、この中で“CO₂ to Fuel”として、本題のカーボンサイクルエネルギーシステムに相当するメタノール/CO₂サイクルの検討が行われている。比較のために液体水素サイクルと、メタノール/CO₂サイクルのブロック図を図 7 に示す。

当時と今日の技術レベルの差によりその経済性検討結果の解釈には注意を要するが、“CO₂ to Fuel”が検討する値のあるコンセプトなのか否か、当時の検討結果は非常に興味深いところである。そこで、当時の検討結果について液体水素サイクルとメタノール/CO₂サイクルの違いを比較してみる。表 5 と表 6 に、両サイクルの図 7 に基づく経済性検討結果の一部を示す。東南アジアとカナダでの発電規模をそれぞれ 100 万 kW、日本までの輸送距離を 5,000km, 10,000km, 現地での電力単価を 2 円/kWh, 5 円/kWh とした場合のキロカロリー当りの国内導入エネルギー価格が表 5 と表 6 の最下段に示されている。kWh 当りで見れば、液体水素 10～12.5 円/kWh, メタノール 10～11.7 円/kWh であり、若干メタノール/CO₂サイクルの方が有利である。また、輸

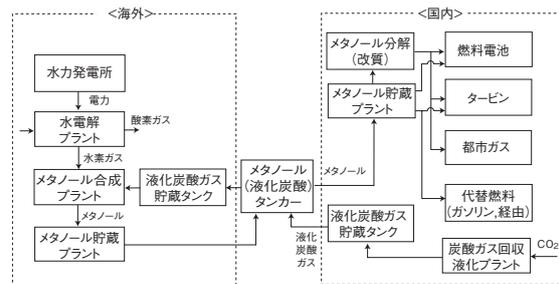


図 7 液体水素サイクルとメタノール/CO₂サイクル (3)

表5 液体水素サイクルの経済性検討結果

発電規模	100万kW		400万kW	
	輸送距離	5,000km	10,000km	5,000km
H ₂ 製造量(万Nm ³ /h)	20	20	80	80
総設備費(億円)	2232	2593	6612	7737
製造コスト(円/Nm ³ -H ₂)	16.34+5.0E	16.34+5.0E	12.29+5.0E	12.29+5.0E
貯蔵コスト(円/Nm ³ -H ₂)	9.63	12.36	7.28	7.53
輸送コスト(円/Nm ³ -H ₂)	8.52	11.13	6.02	9.63
合計コスト(円/Nm ³ -H ₂)	34.5+5.0E	39.8+5.0E	25.6+5.0E	29.5+5.0E
電力単価 2円/kWh (円/Nm ³ -H ₂)	44.5	49.8	35.6	39.5
(円/10 ³ kcal)	14.7	16.4	11.8	13.0
電力単価 5円/kWh (円/Nm ³ -H ₂)	59.5	64.8	50.6	54.5
(円/10 ³ kcal)	19.6	21.4	16.7	18.0

表6 メタノール/CO₂ サイクルの経済性検討結果

海外発電規模	100万kW		400万kW	
	輸送距離	5,000km	10,000km	5,000km
発電電力量(億kWh)	87.6	87.6	350.4	350.4
電解水素量(億Nm ³)	20.0	20.0	80.0	80.0
メタノール製造量(万トン) (T/D)	95.4 (2,610)	95.4 (2,610)	381 (10,440)	381 (10,440)
CO ₂ 必要量(万トン) (T/D)	138 (3,780)	138 (3,780)	551 (15,100)	551 (15,100)
メタノール製造コスト (円/kg-MeOH)	21.6+9.2E	21.6+9.2E	16.6+9.2E	16.6+9.2E
メタノール貯蔵コスト (円/kg-MeOH)	0.7	0.85	0.42	0.43
CO ₂ コスト (円/kg-MeOH)	23.3	25.3	21.4	21.7
輸送コスト (円/kg-MeOH)	9.7	12.7	6.9	11.0
合計コスト (円/kg-MeOH)	55.3+9.2E	60.5+9.2E	45.3+9.2E	49.7+9.2E
電力単価 2円/kWh (円/kg-MeOH)	73.7	78.9	63.7	63.1
(円/Mkcal)	13.6	14.6	11.8	12.6
電力単価 5円/kWh (円/kg-MeOH)	101.3	106.5	91.3	95.7
(円/Mkcal)	18.8	19.7	16.9	17.7

送距離が長ければさらにメタノール/CO₂ サイクルの方が有利となる傾向が伺える。このことから、既存のインフラを十分活用できるメタノール/CO₂ サイクルもわが国のエネルギーシステムとして有力な候補の1つになると考えられる。

7. カーボンサイクルエネルギーシステムによる火力発電からのCO₂排出量削減

火力発電と再生可能エネルギー発電は、図2に示したとおり、わが国のエネルギー供給の選択肢の1つである。ここでは、わが国における火力発電と再生可能エネルギー発電の共存の可能性について論ずる。

石炭火力発電は、安定・安価なベースロード

電源として、わが国の電力供給を支える重要な電源に位置付けられてきたが、今後排出CO₂を管理できない限り、市場から淘汰されていくであろう。一方、今後の大規模導入が期待される再生可能エネルギーは不安定電源であり、ガス火力も含めた火力発電なしではトータルとして安定な電力供給は不可能である。今後は、低CO₂排出で安定かつ調整機能をも併せ持つ火力発電が求められてくるであろう。

低CO₂排出火力発電の実現のためには、これまでの高効率化技術の適用だけでは、もはや2005年比でCO₂排出量80%削減は到達できず、これまでCCS技術として開発してきたCO₂分離回収装置の実装は避けて通れなくなると予想される。さらに、ここで回収されたCO₂を再生可能エネルギーを利用して再燃料化し、合成燃料として再利用できるようなカーボンサイクルエネルギーシステムが構築できれば、エネルギー問題の解決は大きく前進すると思われる。

カーボンサイクルエネルギーシステムでは、石炭、天然ガスを初めとする化石燃料(カーボン燃料)について、「燃焼」→「CO₂回収」→「再カーボン燃料化(合成燃料化)」→「燃焼」のサイクルを組むことで回収できなかったCO₂しか排出されない。これを「人為的カーボンサイクル(ACC: Anthropogenic Carbon Cycle)エネルギーシステム」と言ってもよいであろう。

5章で述べたように、欧州では自動車用燃料として、CO₂をメタノール、DME、OMEなどの合成燃料にする研究開発が多く進められ、実用化されているプラントも存在する。但し、回収したCO₂を合成燃料として運輸分野で利用したり、産業分野でCO₂分離回収を行わない場合は、そのままCO₂が大気に放出されてしまうためCO₂削減効果は半減してしまう。あくまでも、再回収して再利用しなければ大幅なCO₂削減効果は期待できない。その意味において、火力発電でカーボンサイクルエネルギーシステムを組めば、最も安いCO₂回収コストで、しかも大量のCO₂処理が可能のため、大きなCO₂削減効果が期待できる。

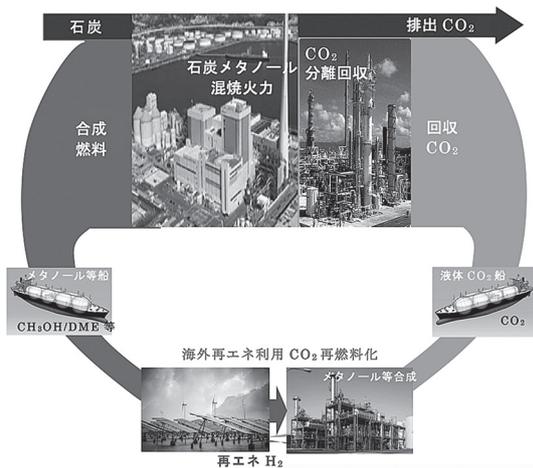


図8 CO₂回収型石炭・メタノール混焼火力によるカーボンサイクルエネルギーシステム

図8は、CO₂回収型石炭・メタノール混焼火力によるカーボンサイクルエネルギーシステムを示している。石炭火力発電から回収したCO₂と再生可能エネルギー電力で製造した水素を利用してメタノール(CH₃OH)を合成し、そのメタノールを石炭火力で混焼利用しようとするものである。石炭とメタノールは燃焼熱、燃焼排ガス量ともほぼ同じであり、ボイラの燃料供給部を一部改造するだけで既存インフラを利用することも可能である。また、CO₂分離回収量の増加と共に、メタノールの混焼率が増大し、石炭の使用量は減ることとなる。石炭が合成燃料(液体燃料)に代替されることで、調整用火力としての適性も改善されると思われる。

図9は、カーボンサイクルエネルギーシステムの環境性・経済性を示している。石炭火力のCO₂回収率が50%で、そのカーボンを利用して合成した燃料を再度石炭火力と混焼するカーボンサイクルを組めば、トータルとして石炭火力から排出されるCO₂の量は約半減する訳であるからCO₂排出原単位はほぼ半分となる。90%のCO₂回収率であればCO₂排出原単位はおよそ10分の1となっていく。CO₂回収率が高くなるほど、再生可能エネルギー電力で製造した素量を多く要するため、CO₂回収型石炭・メタノール混焼火力発電の発電単価は上昇していく。すなわち、カーボンサイクルエネルギーシステムと

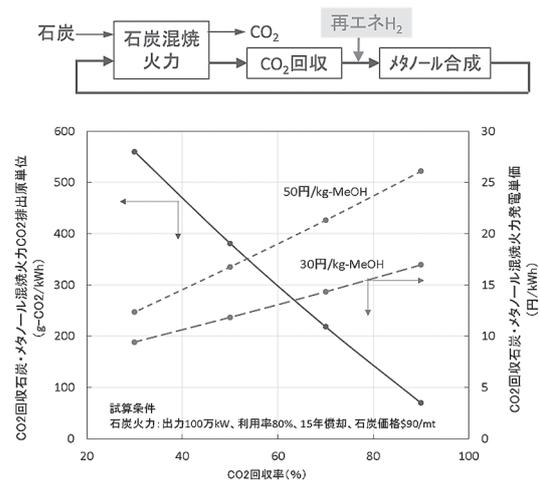


図9 カーボンサイクルエネルギーシステムの環境性・経済性

することで、石炭火力のCO₂排出原単位が大きく減少する代わりに発電単価は上昇していく。カーボンサイクルエネルギーシステムでは、CO₂排出原単位の減少度合いと発電単価の上昇度合いを社会情勢と照らし合わせながら推進できることも1つのメリットと言えよう。なお、図中では、メタノールの製造コストが30円/kg、50円/kgの場合で試算を行ったが、これはメタノールを合成する際の再生可能エネルギー電力単価に大きく依存することを示している。

このカーボンサイクルエネルギーサイクルを組む上で重要なことは、できる限り再生可能エネルギー発電設備の利用率が高い、電力が豊富で安価な場所で合成燃料を製造しなければならないことである。欧州では北海の風力発電電力やノルウェーの水力発電電力が豊富に、しかも高い設備利用率から安価に電力を入手しやすい。わが国の場合、風力、太陽光とも設備利用率の低さから水電解装置のコスト負担が大きく、製造水素の単価が高くならざるを得ない。地勢学的に非常に不利な状況にある。

図10に世界の風力発電と太陽光発電を合わせた設備利用率の分布図を示す。わが国に最も近い、再生可能エネルギーの利用に適した場所がオーストラリアであることがわかる。従って、わが国でカーボンサイクルエネルギーシステムを構築するために、オーストラリアの再生可能

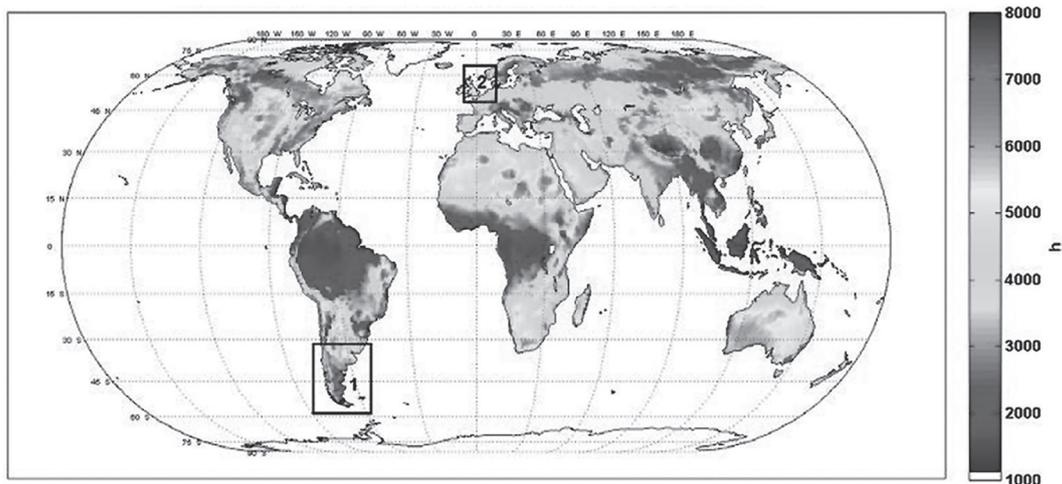


図 10 世界の風力・太陽光設備の設備利用率分布 (8)

エネルギーを活用していくことは両国にとっても非常に有意なことではないかと考えられる。また、24時間稼働を目指すために、太陽熱発電システム (CSP: Concentrating Solar Power) を利用することも有望視される。

表 7 に CO₂ の輸送費を 10,000 円/トン、水素製造設備、メタノール合成設備と再生可能エネルギー電気の電力単価を加味した合成燃料 (メタノール) の製造コストを試算した結果を示す。メタノール価格を図 9 で示した 30～50 円/kg とするならば、再生可能エネルギー電力価格は 2～3 円/kWh にしなければならないことがわかる。この電力価格は昨今の再生可能エネルギーの普及により、もはや実現不可能な数字ではなく、現実味を帯びた数値となりつつある。

表 7 合成燃料 (メタノール) のコスト

電力単価 (円/kWh)	2	3	4	5
CO ₂ 量 (kg)	1000			
必要H ₂ 量(kg)	136			
電気料金 (円/kg-CH ₃ OH)	21.0	31.5	42.0	52.5
CO ₂ 代 (円/kg-CH ₃ OH)	13.8			
H ₂ 設備償却費 (円/kg-CH ₃ OH)	7.8			
メタノール設備償却費 (円/kg-CH ₃ OH)	5.0			
メタノール単価 (円/kg-CH ₃ OH)	47.6	58.1	68.6	79.1
メタノール単価 (円/kWh)	7.6	9.2	10.9	12.6

8. メタンによるカーボンサイクルエネルギーシステム

合成燃料の 1 つとして、CO₂ と水素のメタネーションによるメタン合成も選択肢として考えられる。メタンの場合、液化天然ガス (LNG) にして既存インフラに流通させることが可能である。GTCC の発電燃料としても利用可能であるが、GTCC の排ガス中 CO₂ 濃度が石炭火力より低いため、排ガスからの CO₂ 分離回収率は高くなる。しかし、発電効率が石炭火力よりも高いため、カーボンサイクルエネルギーシステムとして評価する際には、この点が有利に働くであろう。本件は、今後の検討課題として継続評価していく予定である。

また、欧州では LNG を燃料とするトラックや乗用車などが販売されている。LNG スタンドもかなりの箇所に建設され、既存インフラを活用できるメリットがある。わが国でも昨今、LNG トラックが発表されているが、圧縮天然ガス (CNG) の市場は既に形成されているため、既存インフラの活用が可能である。さらに、都市ガスとして既存インフラを利用し流通利用することも可能である。但し、注意しなければならないのは、液体燃料のメタノール、DME、OME 同様、一旦分散利用し、大気中に CO₂ が放出されてしまえばその大量回収は困難であり、CO₂ の削減効果は半減程

度までしか及ばない点である。あくまでも、既存インフラを最大限活用したCO₂削減対策の一部と捉えるべきであろう。

9. まとめ

2050年にCO₂排出量を2005年比80%削減を達成することを考えれば、従来のCCS技術、CCU技術の開発だけでは、もはや石炭火力の規模感に合ったCO₂排出量削減対策として不十分である。再生可能エネルギーと火力との共存を求めて行こうとするのなら、再生可能エネルギーと火力の双方の長所を活かし、短

所はうまく補いながらエネルギーシステムを構築すべきである。本稿のカーボンサイクルエネルギーシステムは、あくまでも既存の技術、インフラを最大限活用しながら、可能なかぎり早期に、大きなCO₂削減効果が期待できるのではないかと提起したものである。オーストラリアからの大量の石炭輸入を再生可能エネルギー利用の合成燃料の輸入導入へと転換するカーボンサイクルエネルギーシステムの構想図を図11に示す。

現在、図12に示すとおり、再生可能エネルギー導入による賦課金はすでに単年度で2.1兆円を超えている。この賦課金は再生可能エネ

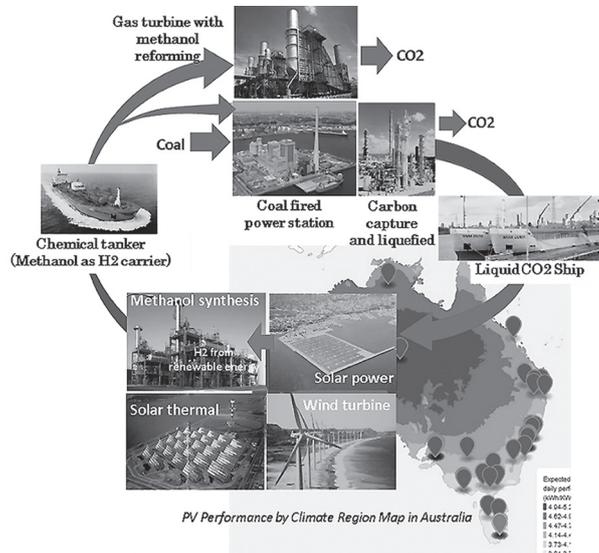


図11 オーストラリアを軸としたカーボンサイクルエネルギーシステム

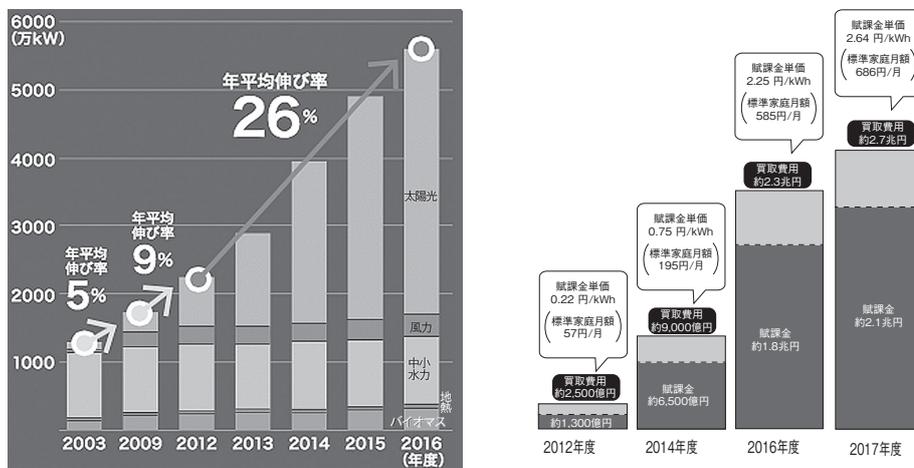


図12 わが国の再生可能エネルギー導入量と賦課金の状況⁽⁹⁾

ルギーの導入により今後さらに増えようとしている。表7に示す合成燃料コストでカーボンサイクルエネルギーシステムを導入しようとした場合、発電単価が現状より15円/kWh高くなったとしても、2.1兆円の課徴金があれば約2,000万kWの既存石炭火力をCO₂回収型石炭・メタノール混焼火力に改造しカーボンサイクルエネルギーシステムを導入することが可能となる。

この合成燃料の利用により、エネルギー転換部門、産業部門、運輸部門で既存インフラを大きく変更することなく、少なくともCO₂排出量を半減させる方向に向かわせることは可能ではないかと考えられる。さらに、CO₂の大量回収が可能な分野でCO₂を回収して再利用すれば、CO₂排出量はさらに削減される。再生可能エネルギーを電源としてだけでなく、火力発電のCO₂削減策の道具としても使い、共存の道を早期に考え実行していく必要があるのではないかと考える。

[謝辞]

本稿は、平成29年度NEDO委託事業「次世代火力発電等技術開発／次世代火力発電基盤技術開発／CO₂有効利用技術開発」での成果を一部利用したものであり、執筆に当たりご協力頂いたNEDO、および関係各位の皆さまに心より感謝申し上げます。

参考文献

- (1) IEA データよりエネルギー総合工学研究所が編集
- (2) 第5次エネルギー基本計画(案)平成30年5月16日にエネルギー総合工学研究所が加筆
- (3) 「CO₂固定化有効利用分野の技術戦略マップ2010」、経済産業省
- (4) M. Aresta et al., J. CO₂ Util. 3-4 (2013) 65-73
- (5) Utilization of CO₂; M. Behrens, FHI-AC
- (6) G. Centi and S. Perathoner, Greenhouse Gas Sci Technol. 1:21-35 (2011)
- (7) G. Centi and S. Perathoner, Greenhouse Gas Sci Technol. 1:21-35 (2011)
- (8) Mahdi Fasihi et al. / Energy Procedia 99 (2016) 243-268
- (9) 「日本のエネルギー 2017年度版」、資源エネルギー庁

[調査研究報告]

エネルギーに関する首都圏住民の意識

工藤 未奈 (プロジェクト試験研究部
研究員)

1. はじめに

2011年3月11日に太平洋三陸沖を震源として発生した東日本大震災により引き起こされた福島第一原子力発電所の事故により、2012年5月には、国内の全ての原子力発電所が発電停止となった。その後、新規制基準に適合するとされた原子力発電所が再稼動されたのが、2015年8月であり、2018年8月までに再稼動済みの原子炉は関西電力4基、四国電力1基、九州電力4基である。また、福島第一原子力発電所の汚染水問題はいまだ解決していない状況である。

このような中で当研究所では、エネルギーに係わる技術および政策の検討には、長期的な視点からエネルギー問題に対する意識とその経年的な変化を把握することが重要であると考え、定期的にアンケート調査の実施・分析を行っている。

調査はインターネットによって行い、福島第一原子力発電所の事故前後(2010～2017年)の首都圏住民の意識の変化から、事故が首都圏住民に与えた影響をみることを目的としている。

2. 調査設計

(1) 調査の概要

本調査は、首都圏(東京都、神奈川県、埼玉県、千葉県)の満20歳以上の男女を対象にし、割当法(2015年国勢調査結果から、首都圏における性別・年代別人口構成に合わせて、年代の区分を20代、30代、40代、50代、60歳以

上として回収数を割当て方法)を用いたインターネットによる調査をアンケート調査会社に依頼し、実施した。また、全体の回収数を500と設定した。

インターネット調査の流れは、以下の通りである。

- ① 予定回収数と想定回収率から配信数を決定
- ② 登録モニターからランダムに選んだモニターに対し、アンケート協力のメールを配信
- ③ モニターがメールに記載されているアンケート用回答WEBページから回答
- ④ メール配信後1週間程度経過しても、モニターがアンケート回答をしない場合、アンケート回答の督促メールを配信
- ⑤ 予定回収数に達するまで回答を受け付け、回収数に達した時点で終了

(2) 調査の実施期間

2010～2018年の調査は、以下の日程で実施した。

- 2010年：平成22年10月22日～11月08日
- 2011年：平成23年10月21日～11月22日
- 2012年：平成24年10月29日～11月11日
- 2013年：平成25年10月28日～11月10日
- 2014年：平成26年10月27日～11月9日
- 2015年：平成27年10月26日～11月8日
- 2016年：平成28年10月24日～11月6日
- 2017年：平成29年10月23日～11月5日

(3) 質問の内容

調査する内容については、以下に示す通り、4つの調査項目を設定し、それぞれについて質問事項を作成した上で、アンケート調査を実施した。

① 社会や生活に関する意識

- Q1. 今の日本の社会への満足度
- Q2. 特に記憶に残ったニュースや出来事
- Q3. 特に関心のある問題や事柄
- Q4. ニュースや事件などの情報源
- Q5. ふだんの生活の中で不安を感じるもの
- Q6. ふだんの生活への安心度
- Q7. 自分の住まいの近くに作られることを受け入れられない施設
- Q8. 受け入れたくない施設の受け入れ判断時に 特に強く重視すること
- Q9. 受け入れたくない施設の受け入れ決定に対する態度

② エネルギー問題に関する意識

- Q10. エネルギー問題についての関心度
- Q11. 日本のエネルギー問題について重視するもの
- Q12. 今後の世界のエネルギー使用量についての予測
- Q13. 今後の日本のエネルギー使用量についての予測
- Q14. 今後の日本のエネルギー供給問題についての安心度
- Q15. 20年後の日本の新エネルギーの可能性についての認識
- Q16. 20年後の日本の省エネルギーの可能性についての認識
- Q17. 20年後の日本の二酸化炭素の排出量低減可能性についての認識
- Q18. 現在の日本の発電量の最も多い電源の認識
- Q19. 20年後の日本の発電量の最も多い電源の予測
- Q20. 今後の日本のエネルギー源で重視するもの
- Q21. エネルギーや環境の問題への効果的対応についての意見
- Q22. エネルギーや環境の問題のための利便性制限の許容度
- Q23. エネルギーや環境の問題のための出費額の許容度
- Q24. エネルギーや環境の問題に関して信頼する人・組織

③ 原子力発電に関する意識

- Q25. 原子力発電についての関心度
- Q26. 原子力発電の利用
- Q27. 原子力発電の今日の有用性
- Q28. 原子力発電の20年後の有用性
- Q29. 原子力発電への安心度
- Q30. 原子力発電の制御可能性
- Q31. 原子力発電所の運営に対する信頼度
- Q32. 原子力発電に関係する情報公開の満足度
- Q33. 放射性廃棄物の適切な処理・処分の可能性
- Q34. 原子力発電の発電コストへの貢献度
- Q35. 原子力発電のエネルギー安定供給への貢献度
- Q36. 原子力発電の環境問題解決への貢献度
- Q37. 原子力発電の利用減による活動制限の有無の認識
- Q38. 原子力発電の利用減による活動制限の許容度
- Q39. 日本の原子力発電関係の技術水準の評価
- Q40. 原子力発電の利用についての態度決定理由

④ 福島第一原子力発電所事故に関する意識

- Q41. 福島第一原子力発電所事故についての関心度
- Q42. 電力会社や政府の事故に対する対応の適切さ
- Q43. 電力会社や政府の事故に関する国民への情報提供の適切さ
- Q44. 事故による水や食品の放射性物質の汚染についての安心度
- Q45. 大地震や大津波にも安全を保てる原子力発電所の可能性
- Q46. 新規規制基準に適合していると判断された原子力発電所の再稼働についての意見

3. 意識調査の結果

意識の変化という観点で分析した調査の結果の主なものは、以下の通りである。

(1) 社会や生活に関する意識

自分の住まいの近くに作られることを受け入れられない施設として、2017年の調査結果

から多い順に並べたところ、上位が原子力関連施設となった。「放射性廃棄物処理処分施設」の回答割合は、増減はあるものの6割を超える状況が続いており、「原子力発電所」の回答割合は、事故後の2011年調査で大きく増加し、その後は、6割を超える中での増減であったが、2017年調査では6割を下回った。(図1参照)

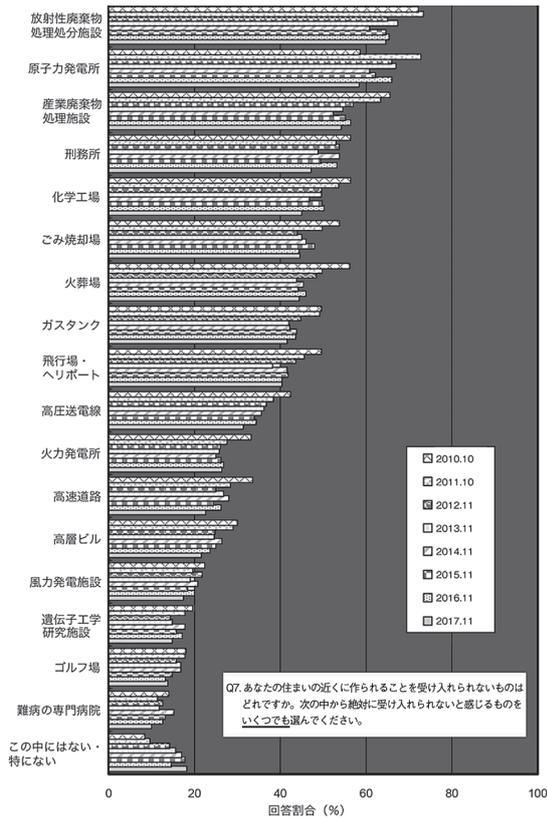


図1 自分の住まいの近くに作られることを受け入れられない施設

(2) エネルギー問題に関する意識

①重視するエネルギー源

今後の日本のエネルギー源で重要と思うものは、どの時点の調査においても「新エネルギー」が圧倒的に多く、6割を超えている。事故後に、

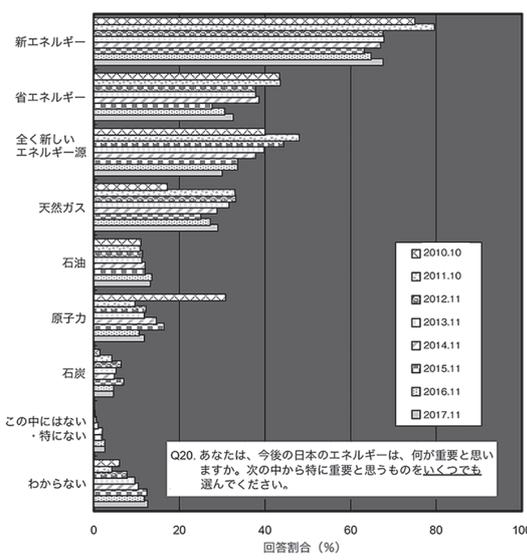


図2 今後の日本のエネルギーで重視するもの

「天然ガス」は大きく増加し、その後は減少傾向にあったが、2016年調査から再び増加している。また、「原子力」は事故後に大きく減少し、その後は増減があるものの大きな変化は見られない。(図2参照)

②新エネルギーの可能性についての認識

「20年後の日本では、熱心に取り組めば新エネルギーを主要なエネルギー源にすることができるかと思うか」という質問に対して、「できる」という回答(できる, どちらかといえばできる)は、事故後の2011年調査で増加したが、その後は減少傾向が見られる。しかしながら、ここ3年は54%前後でほぼ一定している。「できない」という回答(できない, どちらかといえばできない)は、増減はあるものの最近、横ばい傾向である。(図3参照)

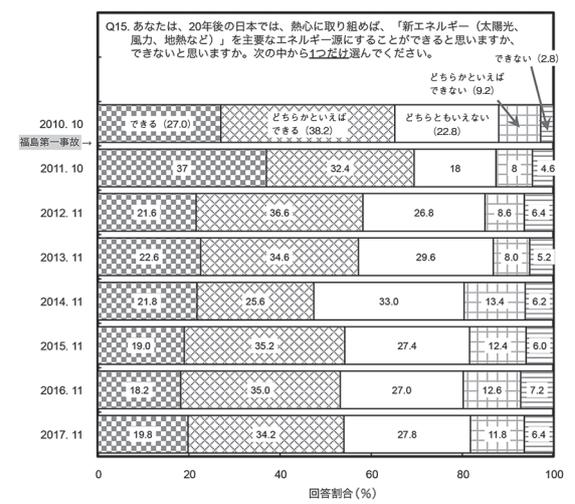


図3 20年後の日本の新エネルギーの可能性についての認識

(3) 原子力発電に関する意識

①原子力発電への安心度

「原子力発電の安全性について、安心していいのか?」という質問に対して、「安心である」という回答(安心, どちらかといえば安心)は、事故後の2011年調査で大きく減少した。その後は全体として、ゆるやかな増加傾向が見られる。

「不安である」という回答(不安である, ど

ちらかといえは不安である)は、事故後の2011年調査で大きく増加したが、その後は全体として、ゆるやかな減少傾向が見られる。(図4参照)

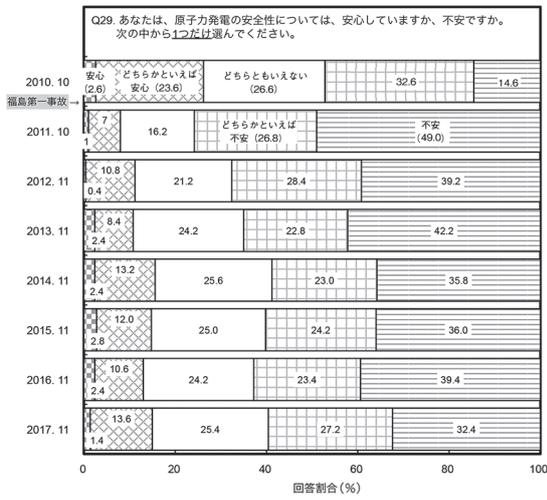


図4 原子力発電への安心度

②原子力発電の今日における有用性

「原子力発電は今日において有用か?」という質問に対して、「有用である」という回答(有用, どちらかといえば有用)は、事故後の2011年調査で大きく減少し、その後も全体として、ゆるやかな減少傾向が見られる。

また、「無用である」という回答(無用, どちらかといえば無用)は、事故後の2011年調査で大きく増加したが、その後は、増減はあるものの大きな変化はない。(図5参照)

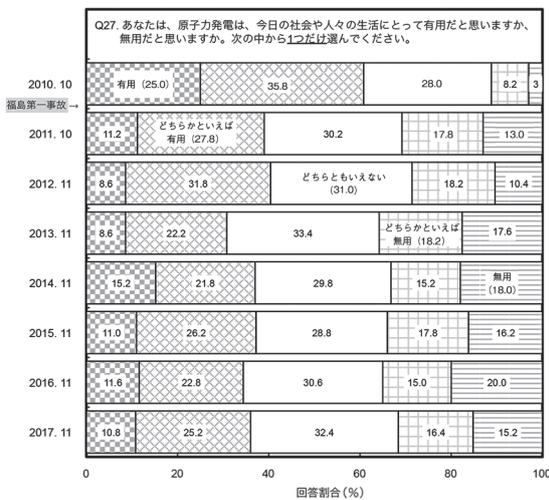


図5 原子力発電の今日における有用性

③原子力発電の20年後の有用性

「原子力発電は20年後において有用か?」という質問に対して、「有用である」という回答(有用, どちらかといえば有用)は、事故後の2011年調査で大きく減少したが、その後は全体として、ゆるやかな増加傾向が見られる。

また、「無用である」という回答(無用, どちらかといえば無用)は、事故後の2011年調査で大きく増加したが、その後は全体として、ゆるやかな減少傾向が見られるものの、4割を超える状況が続いている。

20年後の社会においては、今日の社会よりも原子力発電が無用であるという意見が多い。(図6参照)

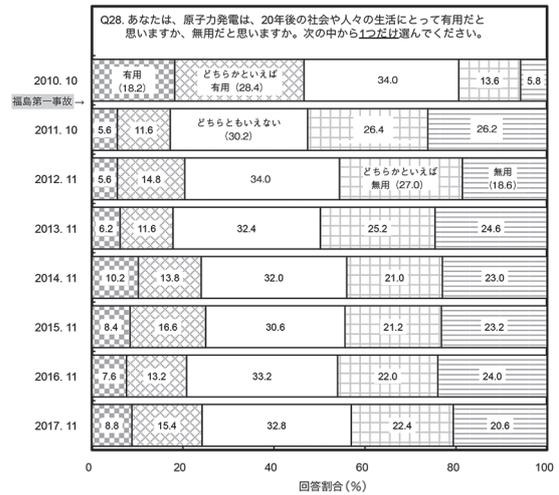


図6 原子力発電の20年後の有用性

④原子力発電の利用減による活動制限の有無の認識

「原子力発電の利用を減らす(又はやめる)ことで、産業・運輸・民生の各部門で活動が制限されるか?」という質問に対して、「制限される」という回答(制限される, どちらかといえば制限される)は、全体として、ゆるやかな減少傾向が見られる。

また、「制限されない」という回答(制限されない, どちらかといえば制限されない)は、全体として、ゆるやかな増加傾向が見られる。(図7参照)

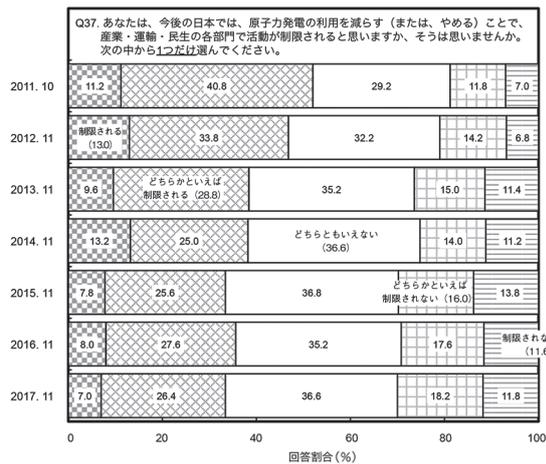


図7 原子力発電の利用減による活動制限の有無の認識

⑤原子力発電の今後の利用

「原子力発電の利用を続けるべきか?」という質問に対して、「新設や増設をしながら続ける」は、事故後の2011年調査で大きく減少し、その後は全体として、ほぼ横ばい傾向である。また、「現状程度のまま続ける」も事故後の2011年調査で大きく減少し、その後は、全体としてゆるやかな増加傾向がみられる。

反対に、「すぐにやめるべき」は、事故後の2011年調査で大きく増加し、その後は増減を繰り返しているが大きな変化はない。また、「徐々にやめていくべき」も事故後の2011年調査で大きく増加し、その後は、わずかな減少傾向がみられるものの、現在も4割近くとなっている。(図8参照)

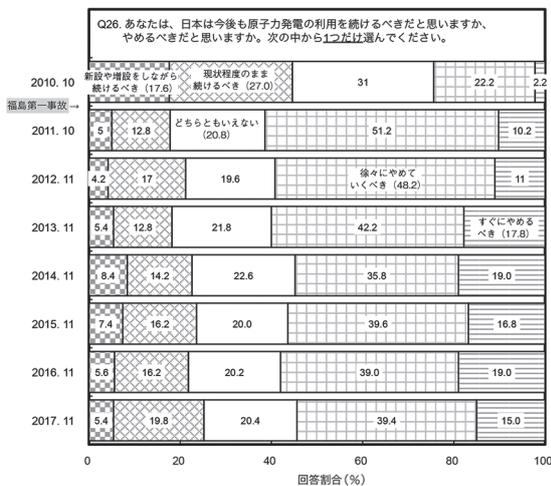


図8 原子力発電の今後の利用

⑥原子力発電の制御可能性

「原子力発電の制御は可能か?」という質問に対して、「可能である」という回答(可能, どちらかといえば可能)は、事故後の2011年調査で大きく減少し、その後は、増加はあるものの、同じ傾向が続いている。

また、「不可能である」という回答(不可能, どちらかといえば不可能)は、事故後の2011年調査で大きく増加した。その後は全体として、ゆるやかな減少傾向が見られるものの、4割を超える状況は続いている。(図9参照)

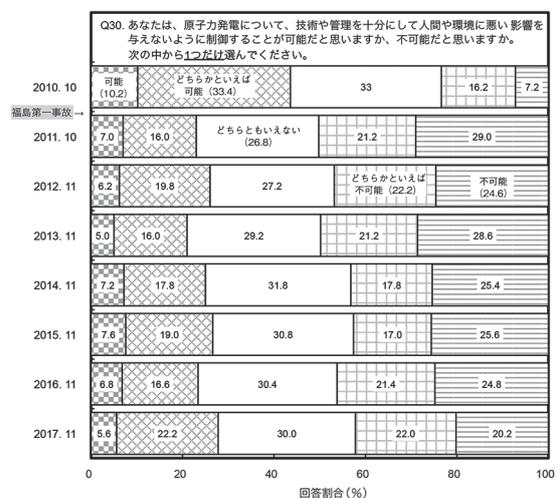


図9 原子力発電の制御可能性

⑦原子力発電所の運営に対する信頼度

「原子力発電は適切に運営されているか?」という質問に対して、「適切である」という回答(適切に運営されている, どちらかといえば適切に運営されている)は、事故後の2011年調査で大きく減少し、その後は全体として、ゆるやかな増加傾向が見られる。

また、「適切に運営されていない」という回答(適切に運営されていない, どちらかといえば適切に運営されていない)は、事故後の2011年調査で大きく増加した。その後は全体として、ゆるやかな減少傾向が見られる。(図10参照)

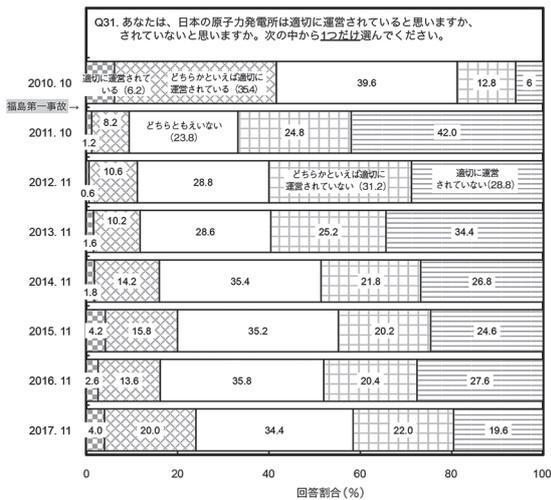


図 10 原子力発電所の運営への信頼度

⑧放射性廃棄物の適切な処理・処分の可能性

「放射性廃棄物の処理・処分を適切に行うことができるか?」という質問に対して、「適切に行うことができる」という回答（できる、どちらかといえばできる）は、事故後の2011年調査で大きく減少し、その後は全体として、ゆるやかな増加傾向が見られる。

また、「適切に行うことができない」という回答（できない、どちらかといえばできない）は、事故後の2011年調査で大きく増加した。その後は全体として、ゆるやかな減少傾向が見られるものの、5割を超える状況が続いている。（図 11 参照）

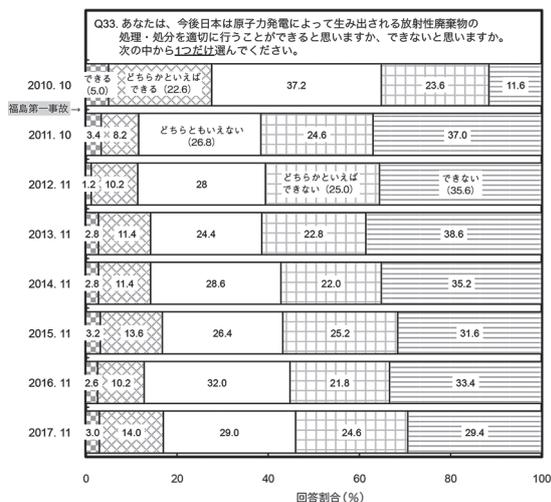


図 11 放射性廃棄物の適切な処理・処分の可能性

(4) 福島第一原子力発電所事故に関する意識

①福島第一原子力発電所事故についての関心度

福島第一原子力発電所事故については、「関心がある」という回答（関心がある、どちらかといえば関心がある）は、減少傾向が見られるものの8割を超えている。（図 12 参照）

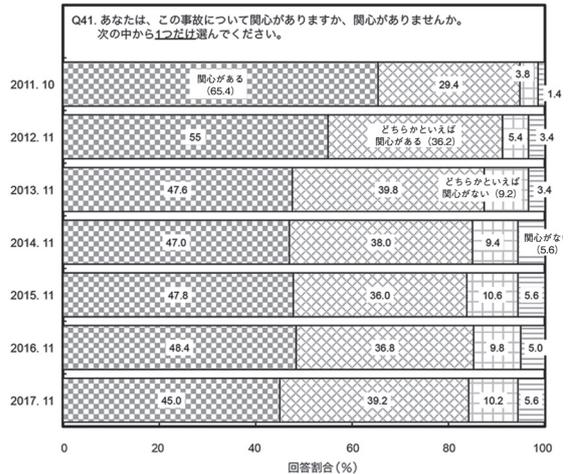


図 12 福島第一原子力発電所事故についての関心度

②電力会社や政府の事故に対する対応の適切さ

2011年調査および2012年調査は、事故直後の対応についての質問であった。2013年調査以降は、質問を少し変えて、現在の事故対応についての質問となっている。

「適切である」という回答（適切、どちらかといえば適切）は、事故直後（2011年、2012年調査）と比べて、現在は全体として、ゆるやかな増加傾向が見られる。

また、「不適切である」という回答（不適切、どちらかといえば不適切）は、事故直後と比べて、現在は全体として、ゆるやかな減少傾向が見られる。（図 13 参照）

③電力会社や政府の事故に関する国民への情報提供の適切さ

2011年調査および2012年調査は、事故直後の情報提供についての質問であった。2013年調査以降は、質問を少し変えて、現在の情報提供についての質問となっている。

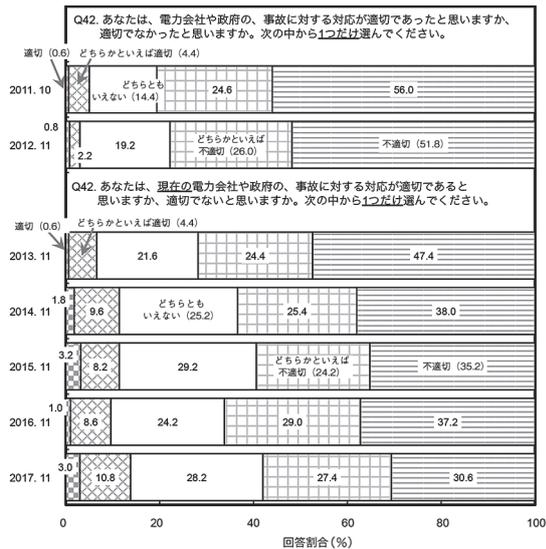


図 13 電力会社や政府の事故に対する対応の適切さ

「適切である」という回答（適切，どちらかといえば適切）は，事故直後（2011年調査，2012年調査）と比べて，現在は全体として，ゆるやかな増加傾向が見られる。

また，「不適切である」という回答（不適切，どちらかといえば不適切）は，事故直後と比べて，現在は全体として，ゆるやかな減少傾向が見られる。（図 14 参照）

④新規規制基準に適合していると判断された原子力発電所の再稼働についての意見

2014年調査からの質問で，「原子力規制委員会が『新規規制基準に適合している』と判断した原子力発電所の再稼働について賛成か？」という質問に対して，「賛成である」という回答（賛成，どちらかといえば賛成）は，全体として，ゆるやかな増加傾向が見られる

また，「反対である」という回答（反対，どちらかといえば反対）は，45%前後で推移している。（図 15 参照）

この質問の回答を男女別で見ると，女性よりも男性の方が「賛成である」という回答が多い。

「反対である」という回答は，男性が4割程度，女性が5割程度という状況に変化はない。（図 16 参照）

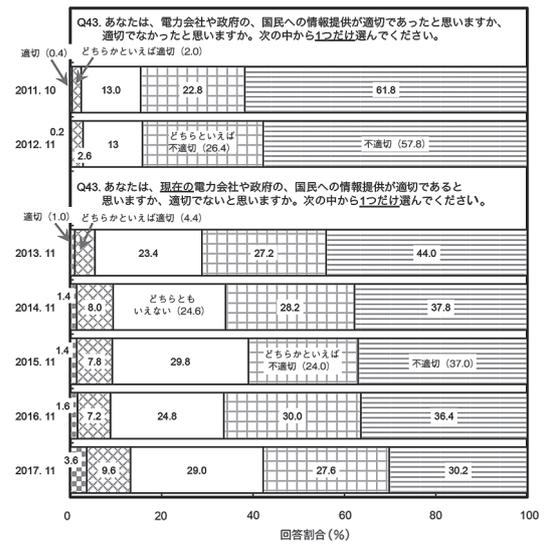


図 14 電力会社や政府の事故に対する情報提供の適切さ

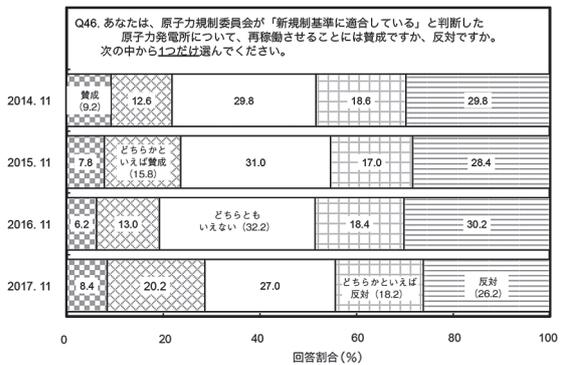


図 15 新規規制基準に適合していると判断された原子力発電所の再稼働についての意見

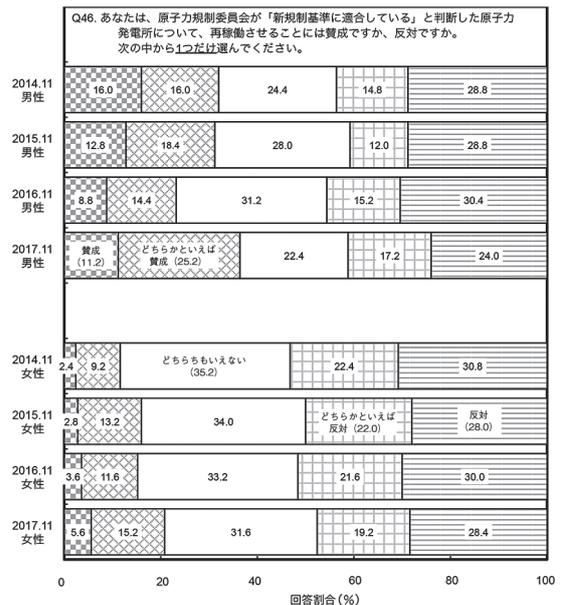


図 16 男女別にみた新規規制基準に適合していると判断された原子力発電所の再稼働についての意見

さらに、回答を

賛成：賛成，どちらかといえば賛成
 反対：反対，どちらかといえば反対
 中間：どちらともいえない

のように3つに分類して、年代別および男女別に見ると、「賛成」という回答は、2017年調査においては、20代の男性が最も多く5割を超えた。続いて、40代の男性、60代以上の男性、50代の男性、30代の男性であり、いずれも3

割を超えている。女性は、いずれの年代でも3割にも満たなかった。

「反対」という回答は、年代が高いほど多く、最も多かったのは、60代以上の女性で6割を超えた。続いて、60代以上の男性、50代の男性、50代の女性で4割を超えた。

「どちらともいえない」という回答は、年代が低いほど多くなる傾向が見られた。(図17参照)

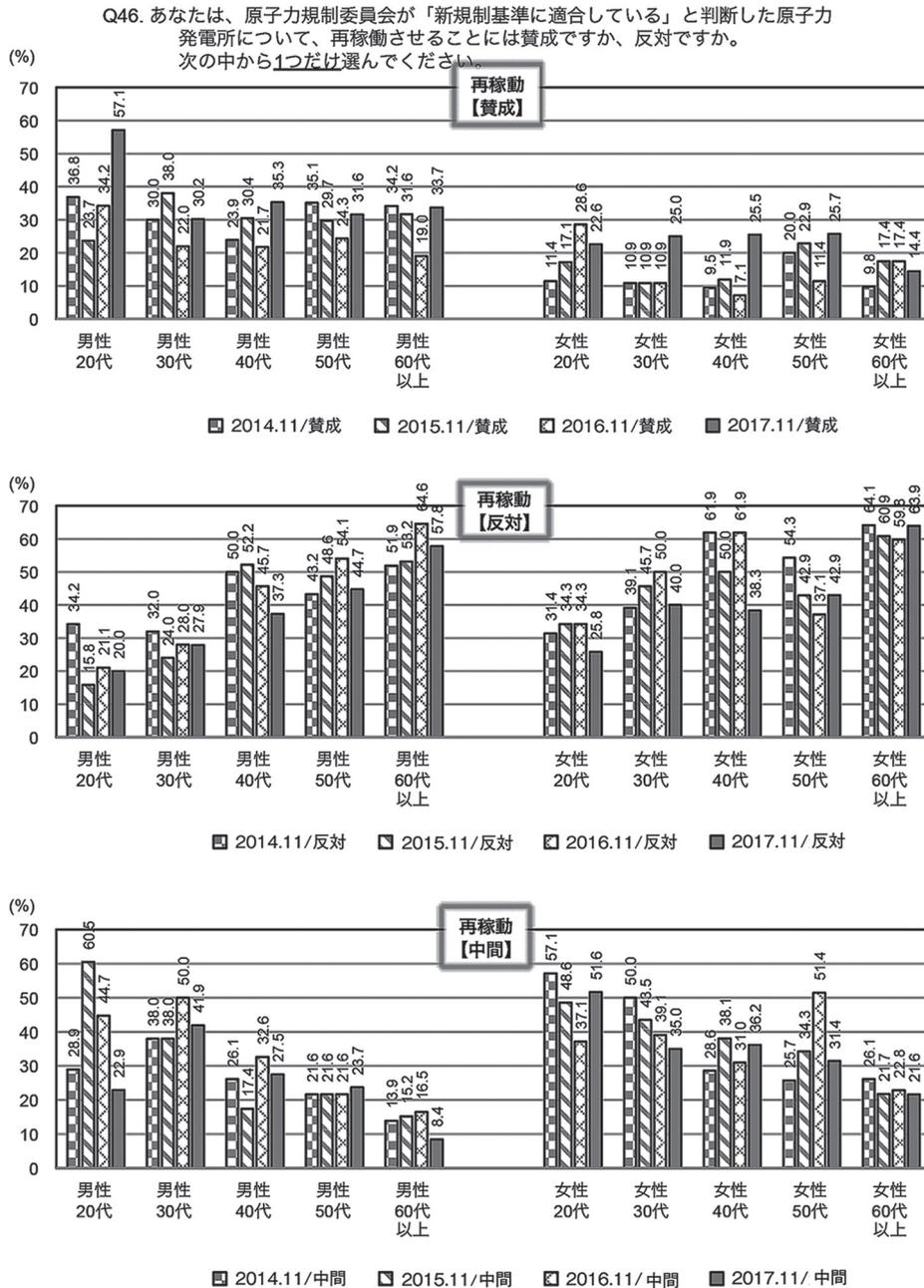


図17 男女別・年齢別にみた新規基準に適合していると判断された原子力発電所の再稼働についての意見

4. まとめ

2011年3月に発生した東日本大震災により引き起こされた福島第一原子力発電所の事故前と事故後の首都圏住民の原子力発電に関する意識は、以下に示すように、事故後に否定的な方向に移行し、現在も大きな変化は見られない。しかしながら、わずかではあるが、回復傾向と受け取ることができる結果が出ているものもあるため、今後も調査を継続し、その変化を見ていく予定である。

(1) 原子力発電に対する意識について

原子力発電に対する評価は、事故の発生後の2011年調査で厳しいものとなり、現在もそういった状況に大きな変化がないことが、以下の調査結果から分かる。

- ①「今後の日本のエネルギー源で重視するもの」として、事故後に「原子力」の割合が大きく減少し、現在も2割に満たない状況である。
- ②「原子力発電の安心度」については、事故後に「不安」回答（不安、どちらかといえば不安）が大きく増加し、その後は減少傾向が見られるものの、現在も6割近くである。
- ③「原子力発電の今日の有用性」については、事故後に「無用」回答（無用、どちらかといえば無用）が大きく増加し、現在も大きな変化は見られない。
- ④「原子力発電の20年後の有用性」については、事故後に「無用」回答（無用、どちらかといえば無用）が大きく増加し、現在も4割を超える状況にある。
- ⑤「原子力発電所の再稼働」については、「賛成」回答（賛成、どちらかといえば賛成）は、

2016年調査までは2割程度、2017年調査では3割近くとなった。これに対して、「反対」回答（反対、どちらかといえば反対）は4割を超えており、反対が賛成を上回っている。

- ⑥「原子力発電の利用」については、事故後に「廃止」回答（すぐにやめる、徐々にやめていく）が大きく増加し、現在も5割を超える状況にある。

(2) 原子力発電への意識変化の要因について

原子力発電への否定的な回答が多い要因としては、以下の調査結果による、福島第一原子力発電所の事故による日本の原子力技術、管理能力、情報提供等に対する不信感にあると推測される。

また、人々の意識の中で、新エネルギーによる発電への期待、省エネルギーに対する意識が高まっていることと、原子力発電所の停止による影響の大きさをあまり感じていない傾向にあることなどが関係していると思われる。

- ①「原子力発電の制御可能性」については、事故後に「不可能」回答（不可能、どちらかといえば不可能）が大きく増加し、減少傾向が見られるが、現在も4割を超えている。
- ②「放射性廃棄物の適切な処理・処分の可能性」については、事故後に「不可能」回答（適切にできない、どちらかといえば適切にできない）が大きく増加し、減少傾向が見られるが、現在も5割を超えている。
- ③「原子力発電所の運営に対する信頼度」については、事故後に「不適切」回答（適切に運営されていない、どちらかといえば適切に運営されていない）が大きく増加し、減少傾向が見られるが、現在も4割を超えている。
- ④「事故後の電力会社・政府の対応の適切さ」

については、「不適切」回答（不適切，どちらかといえば不適切）が，現在も6割近くとなっている。

⑤「事故に関する電力会社・政府の情報提供の適切さ」に関する意見では、「不適切」回答（不適切，どちらかといえば不適切）が，現在も6割近くとなっている。

⑥「原子力発電の利用減による活動制限の有無の認識」については、「制限される」回答（制限される，どちらかといえば制限される）が減少傾向にある。

研究所のうごき

(平成30年7月2日～10月1日)

◇ 月例研究会

第380回月例研究会

日時：7月13日(金) 14:00～16:00

場所：航空会館5階 501・502会議室

テーマ：

1. 反応・分離を技術革新する電子・イオンの制御科学～持続可能な反応プロセスを目指して～
(国立研究開発法人 科学技術振興機構 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニットフェロー 尾山 宏次 氏)
2. CO₂を有効利用したエネルギーシステムの構築
(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 橋崎 克雄)

第381回月例研究会

日時：8月10日(金)

研究会 14:00～17:00 交流会 17:15～19:30

場所：航空会館5階 501・502会議室(研究会)
航空会館8階 801会議室(交流会)

テーマ：

1. 原子力ーその対立の構図
(国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 広報部 広報専門監 佐田 務 氏)
2. 諸外国の革新炉導入に向けた研究開発戦略について
(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 主管研究員 松本武志)

第382回月例研究会

日時：9月14日(金)

研究会 14:00～17:00 交流会 17:15～19:30

場所：航空会館5階 501・502会議室(研究会)
航空会館2階 204会議室(交流会)

テーマ：

1. 現場・現実のデータから見えてきた福島第

一原子力発電所事故

(東京電力ホールディングス(株) 福島第一
廃炉推進カンパニー プロジェクト計画部
安全・解析グループ 溝上 伸也 氏)

2. 福島第一原子力発電所の事故事象進展の検討・評価

((一財)エネルギー総合工学研究所 原子力
工学センター 安全解析グループ部長 茶木
雅夫)

3. 福島第一原子力発電所事故の未解明問題の
検討結果を踏まえた安全性向上のための取
り組み

(東京電力ホールディングス(株) 福島第一
廃炉推進カンパニー プロジェクト計画部
安全・解析グループ 溝上 伸也 氏)

◇ 外部発表

[講演]

発表者：石本 祐樹

テーマ：各国政策

発表先：水素エネルギー協会 特別講演会 WHEC
2018 報告会

日時：9月5日

発表者：飯田 重樹

テーマ：WHEC2018 概要

発表先：水素エネルギー協会 特別講演会 WHEC
2018 報告会

日時：9月5日

発表者：酒井 奨, 橋崎 克雄, 鴻野 健二, 小野崎
正樹

テーマ：クリーンコールテクノロジーとCO₂有
効利用技術について

発表先：日本機械学会 2018 年度年次大会
(関西大学千里山キャンパス)

日時：9月10日

発表者：小野崎 正樹

テーマ：Japanese perspective on drivers to de-
carbonise industry

発表先：HiTeMP Forum, The University of
Adelaide

日 時：9月17日

[学会発表]

発表者：川村 太郎, 松岡 成樹, 蓮池 宏 他

テーマ：水を作動媒体としたバイナリー発電シス
テムの研究開発 その1-システムおよ
び実証試験設備の設計開発-

発表先：第27回日本エネルギー学会大会
(日大駿河台キャンパス)

日 時：8月8日～9日

発表者：川村 太郎, 松岡 成樹, 蓮池 宏ほか

テーマ：水を作動媒体としたバイナリー発電シス
テムの研究開発 その2-実証試験概要
および実用化へ向けた評価-

発表先：第27回日本エネルギー学会大会
(日大駿河台キャンパス)

日 時：8月8日～9日

発表者：加藤 悦史

テーマ：Evaluation of Japanese energy system
toward 2050 with TIMES-Japan - deep
decarbonization pathways

発表先：10th International Conference on
Applied Energy (ICAE2018)

日 時：8月22日～25日

発表者：黒崎 厚志, 加藤 悦史

テーマ：世界水需給と持続可能性に関する一考察
発表先：環境経済政策学会 2018年大会(上智大学)

日 時：9月8日～9日

発表者：黒崎 厚志

テーマ：CO₂利用の世界動向

発表先：化学工学会 第50回秋季大会(鹿児島大学)

日 時：9月18日～20日

[寄稿]

寄稿者：蓮池 宏, 日浦 俊哉, 伊藤 雅一, 光岡
正隆, 林 泰弘

テーマ：圧縮空気エネルギー貯蔵システムによる
風力発電の出力制御

寄稿先：『日本ガスタービン学会誌』 Vol.46 No. 4
(7月号)

寄稿者：飯田 重樹

テーマ：2017年の水素利用技術

寄稿先：日本機械学会『機械工学年鑑2017』

日 時：平成30年8月

発表者：飯田 重樹

テーマ：WHEC2018 (World Hydrogen Energy
Conference) 見聞録

寄稿先：『水素エネルギー協会誌』 Vol.43 No. 3
(9月号)

寄稿者：飯田 重樹

テーマ：平成29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機関誌えねるみく
す』 Vol.97 No. 5 (9月号)

◇人事異動

○7月31日付

(退職)

岡田 英俊 プロジェクト試験研究部 参事

○9月30日付

(出向解除)

清水 秀高 プロジェクト試験研究部 主任研究員

編集後記

現在、当研究所では、「中長期ビジョン～2050年に向けたエネルギー技術展望～」の作成を進めている。これまで、概ね5年毎に当研究所の中長期ビジョンを策定してきているところであるが、今回は、本年が創立40周年ということもあり、当研究所が有するエネルギー環境シミュレーションモデル GRAPE や TIMES-Japan を用いた分析を行うとともに、エネルギー技術の現状と課題を整理し、国内外の有識者の意見を聴きつつ、2050年超に向けたエネルギー技術展望について検討を進めてきたものである。

パリ協定に準拠するCO₂排出シナリオや「長期エネルギー需給見通し」等によるエネルギー需要想定、及び再エネや原子力等の主要エネルギーについていくつかの技術導入ケースを想定して、2030年及び2050年における発電構成や各部門のエネルギー供給構成等を分析するとともに、その達成に向けた技術課題や取組状況等を整理し、2050年超に向けたエネルギーシス

テムに関する大きな流れとして、①再エネの大量導入に伴う電力化と蓄エネルギーが進むケース、②海外の豊富で安価な再エネにより製造したCO₂フリー水素の大量輸入・活用を行うケース、③国内CCS市場が不透明な中で炭素燃料が必要な分野ではCO₂の循環利用により低炭素化を図るケースについて提案している。

10月12日の当研究所「エネルギー総合工学シンポジウム」は、本中長期ビジョンを基に「2050年超に向けたエネルギーシステムのメガトレンド」とのテーマで開催したところであり、その議論等を踏まえ、近日中に中長期ビジョンを公表する予定である。当研究所としては、本検討が国内外で広く参考とされ、関係者がエネルギー・環境について議論するための素材として活用されることを期待するとともに、当研究所としても整理した課題の解決に向けて取り組んでいきたいと考えている。

編集責任者 重政弥寿志

季報 エネルギー総合工学 第41巻第3号

平成30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 吉田コンピュータサービス

※ 無断転載を禁じます。