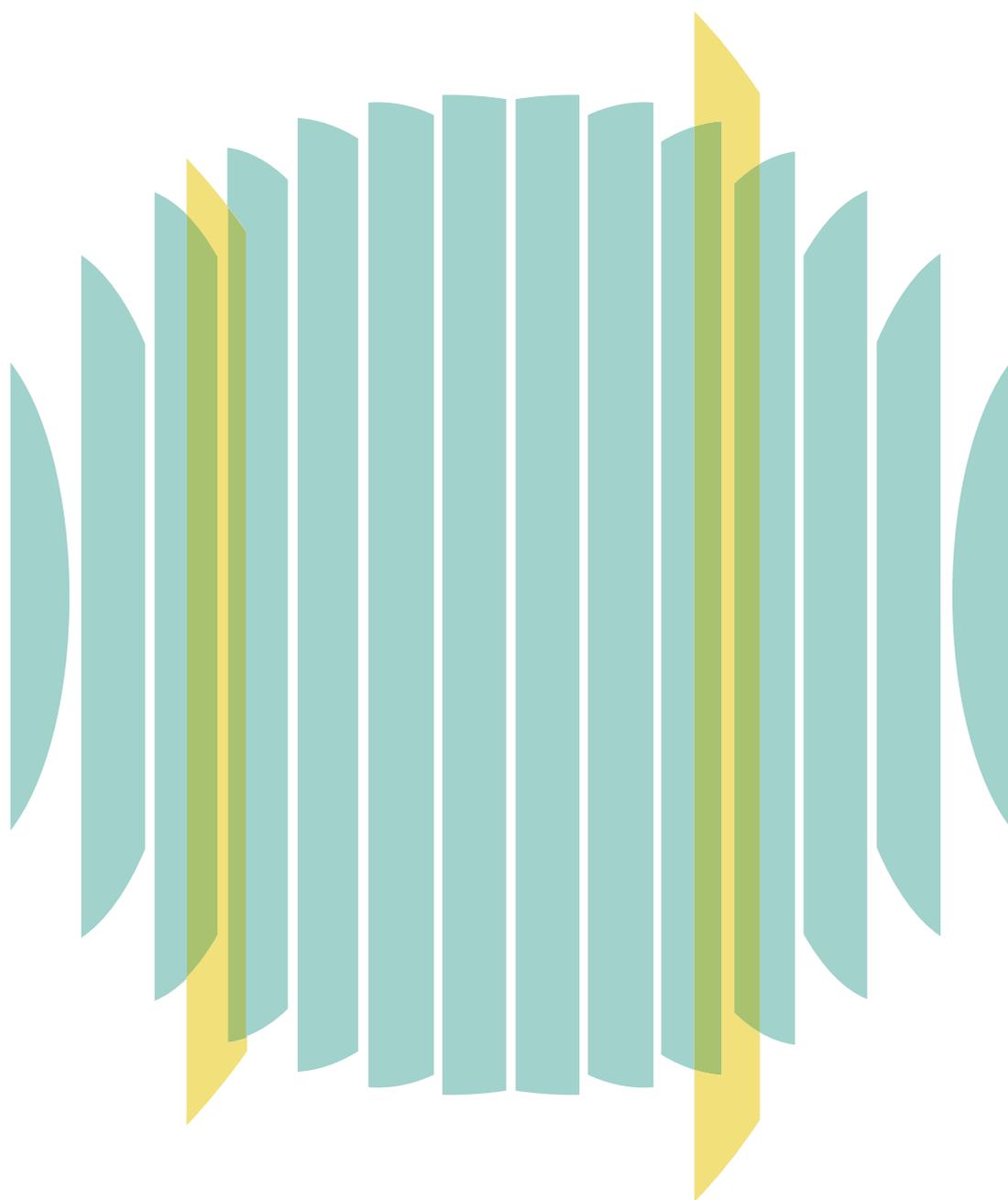


季報 エネルギー総合工学

Vol. 44 No. 4 2022. 1



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

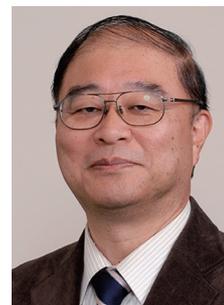
目 次

特集 第34回エネルギー総合工学シンポジウム
— 総合工学的視点からの2050年カーボンニュートラル —
令和3年12月8日(水) 13:30～16:00
Web開催

【開会挨拶】	(一財) エネルギー総合工学研究所 理事長	寺井 隆幸 …… 1
【講演1】	カーボンニュートラルの背景と国際動向 プロジェクト試験研究部 地球環境グループ 研究理事	黒沢 厚志 …… 3
【講演2】	再生可能エネルギーのポテンシャル プロジェクト試験研究部 新エネルギーグループ 部長	森山 亮 …… 7
【講演3】	原子力の役割 原子力技術センター 原子力チーム 部長	都筑 和泰 …… 13
【講演4】	カーボンリサイクル プロジェクト試験研究部 炭素循環エネルギーグループ 部長	橋崎 克雄 …… 18
【講演5】	変わる電力システム プロジェクト試験研究部 電力システムグループ 部長	炭谷 一郎 …… 24
【講演6】	水素エネルギーへの期待 プロジェクト試験研究部 水素グループ 副部長	石本 祐樹 …… 29
【講演7】	ネガティブエミッションの役割 プロジェクト試験研究部 地球環境グループ 副部長	加藤 悦史 …… 36
【質疑応答】	テーマ：総合工学的視点からの2050年カーボンニュートラル モデレーター：飯田 重樹 理事 プロジェクト試験研究部 部長 回答者：黒沢 厚志 森山 亮 都筑 和泰 橋崎 克雄 炭谷 一郎 石本 祐樹 加藤 悦史	…………… 42
【閉会挨拶】	(一財) エネルギー総合工学研究所 専務理事	中村幸一郎 …… 49

【調査研究報告】	東京電力福島第一原子力発電所事故進展シナリオの推定 原子力技術センター 主任研究員	木野 千晶 …… 50
【研究所のうごき】	……………	61
【編集後記】	……………	64

開 会 挨拶



寺井 隆幸 (一財) エネルギー総合工学研究所
理事長

皆様こんにちは。エネルギー総合工学研究所理事長の寺井でございます。私は、昨年3月に東京大学を定年退職いたしました。昨年8月から当研究所の理事長を務めさせていただいております。今後とも、どうぞよろしくお願い申し上げます。

改めまして、本日はお忙しい中、当研究所のシンポジウムにご参加、ご視聴いただきまして、ありがとうございます。当研究所では、これまで毎月実施しております月例研究会や各種研究会とともに、毎年、「エネルギー総合工学シンポジウム」を開催してまいりました。しかしながら、ここ数年間はコロナ禍の影響と諸般の事情からシンポジウムの開催を断念してきておりましたので、今回の開催は2018年以来3年ぶりということになります。今回は、新型コロナ感染症の拡大防止のために、フルオンラインでの開催といたしましたが、400名を超える方々にご登録いただいております。誠にありがとうございます。心よりお礼を申し上げます。オンラインということで、何かとご不自由をおかけすることもあるかと存じますが、どうぞよろしくお願い申し上げます。

当エネルギー総合工学研究所では、1978年の設立以来、「エネルギーの未来を拓くのは技術である」という共通認識の下で、その時々エネルギー情勢を踏まえつつ、俯瞰的、長期的、総合工学的な観点から産学官の連携を図り、エネルギーや環境技術に関する調査・研究・評価・普及などに精力的に取り組んでまいりました。本シンポジウムや各種研究会は、その成果を広く世の中に公開し、ご議論をいただくためのものと位置づけております。

さて、昨年10月に菅前首相が、2050年までのカーボンニュートラル実現を宣言されてから早くも1年以上が経ちました。また、先日、英国のグラスゴーで開催されたCOP26（国連気候変動枠組条約第26回締約国会議）でも世界のさまざまな国々で、国によって状況は異なりますが、2050年、2060年、2070年のカーボンニュートラルの宣言がなされ、特にヨーロッパを中心に、そのための取り組みが非常に加速されています。わが国でも、

「第6次エネルギー基本計画」が閣議決定され、カーボンニュートラルへのマイルストーンとして、2030年のCO₂を中心とした温室効果ガス排出量を、2013年度比で46%削減する、さらには50%削減の高みを目指して挑戦を続けるという、新たな削減目標が示されています。前回の「第5次のエネルギー基本計画」では温室効果ガス排出量の削減目標は26%削減でしたので、この46%削減は極めて厳しい目標設定です。ましてや、2050年の温室効果ガス実質排出量ゼロということになりますと、製造業や運輸も含めた産業はもちろん、我々の社会生活も抜本的に変える必要が出てくるものと思います。

具体的には、資源制約やリサイクル、省エネルギーを大前提として、原子力や太陽光・風力などの再生可能エネルギーを含めたゼロエミッション電源の大規模な活用や、電力や水素を中心としたエネルギーの輸送や貯蔵、CO₂の回収・貯留や再利用などが必須になってくると考えられます。なおかつ、SDGs（持続可能な開発目標）にありますように、貧富の差をなくし、持続的な経済発展を行うという極めて挑戦的な課題が我々に突き付けられているものと考えられます。そのためには、個々の要素技術の研究開発とともに、社会全体のエネルギーシステムの在り方についての検討や、そのゴールに至るまでのロードマップ、あるいはアクションプランの策定なども極めて重要な課題となります。当研究所では、2018年に、「2050年に向けたエネルギーシステムのメガトレンド」というタイトルでシンポジウムを開催し、翌年1月にその内容を「中長期ビジョン～2050年に向けたエネルギー技術展望～」という形で取りまとめ、検討結果をご報告させていただきましたが、そのような活動につきましても、より厳しい新しい境界条件の下で、現在、鋭意、努力しながら実施しているところございます。

本日は、現在の国際情勢を踏まえて、エネルギーシステムの在り方を検討する上で前提として重要になるであろう、要素技術的な側面について、現在の状況と今後の展開についての調査結果をご報告させていただくことにいたしました。講演の後にディスカッションの時間も設けてございますので、様々な視点からのご質問やご忌憚のないご意見をいただければ幸いです。なお、本日の報告内容は、先般、当研究所が技術評論社から出版いたしました『図解でわかるカーボンニュートラル』および昨年出版いたしました『図解でわかるカーボンリサイクル』が基になっておりますので、あわせてご覧いただければ幸いです。

以上をもちまして、開会のご挨拶とさせていただきます。それでは、これから2時間半の長丁場となりますけれども、どうぞよろしくお願い申し上げます。

[講演1]

カーボンニュートラルの背景と国際動向

黒沢 厚志 (プロジェクト試験研究部
地球環境グループ 研究理事)



1. パリ協定とカーボンニュートラル

国連気候変動枠組条約 (UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change) は、1994年に発効した条約であり、その目的は気候システムに対して危険な人為的影響を及ぼさないレベルでの温室効果ガス (GHG) 濃度の安定化です。この条約は、締約国に GHG の排出・吸収状況の報告や、地球温暖化対策のための国家計画策定と実施などを義務付けています。

これまでには、年1回のペースで締約国会議 (COP: Conference of the Parties) が開催され、2015年にパリで開催された COP21 では、世界全体としての GHG 削減枠組であるパリ協定が合意されました。パリ協定は、長期的にみた場合の世界全体での平均気温上昇を 2℃以下に抑制することを目標としており、可能であれば 2℃よりさらに低いレベルに抑制すべきとしています。そのため、今世紀後半には人為起源の GHG の正味排出量をゼロにすることを記載しています。協定には、その他にも、5年ごとに国別目標 (NDC: Nationally Determined Contribution) と呼ばれる国別の中期 GHG 排出目標提出、グローバル・ストックテイクと呼ばれる国別の GHG 削減(緩和策)、気候変動影響への対応(適応策)、およびファイナンスの集約作業による長期目標と世界全体進捗の整合性確認、損失と損害、資金、技術開発・移転、国連ベースや自主的協力などを含む市場メカニズムなどの条文が含まれています。さらに、協定には、今世紀中葉を想

定した各国の長期戦略提出も盛り込まれています。

日本は2020年10月に2050年カーボンニュートラル宣言を行いました。その後も何らかの形でカーボンニュートラル宣言を行った国は世界で150カ国以上に達し、世界のエネルギー起源二酸化炭素 (CO₂) 排出に占める割合は9割近くになっています。また、2021年11月には、COP26がグラスゴーで開催され、その決議をみると、温度目標については2℃から1.5℃とさらに踏み込み、2050年の世界全体でのカーボンニュートラルと整合的になっています。

2. エネルギーにおける脱炭素チャレンジ

2018年時点での日本のエネルギーフローを図1に示します。左側の一次エネルギー供給では、化石燃料(石炭、石油、天然ガス)の比率が高く、水力、原子力、地熱が続いています。廃棄物からのエネルギー、太陽エネルギーおよび風力エネルギーは図中の新エネなどに含まれます。供給されたエネルギーは、発電や石油精製などの転換を経て、電力、石油製品やガスとなり、産業、業務、家庭、運輸などの最終エネルギー需要に供されますが、転換や配送などから、損失となるエネルギーも一定割合で存在することにも注意が必要です。

一次供給における化石燃料比率が高い現状で、エネルギーの供給や転換に加えて、素材産業・長距離貨物運輸・既存建築物を含むエ

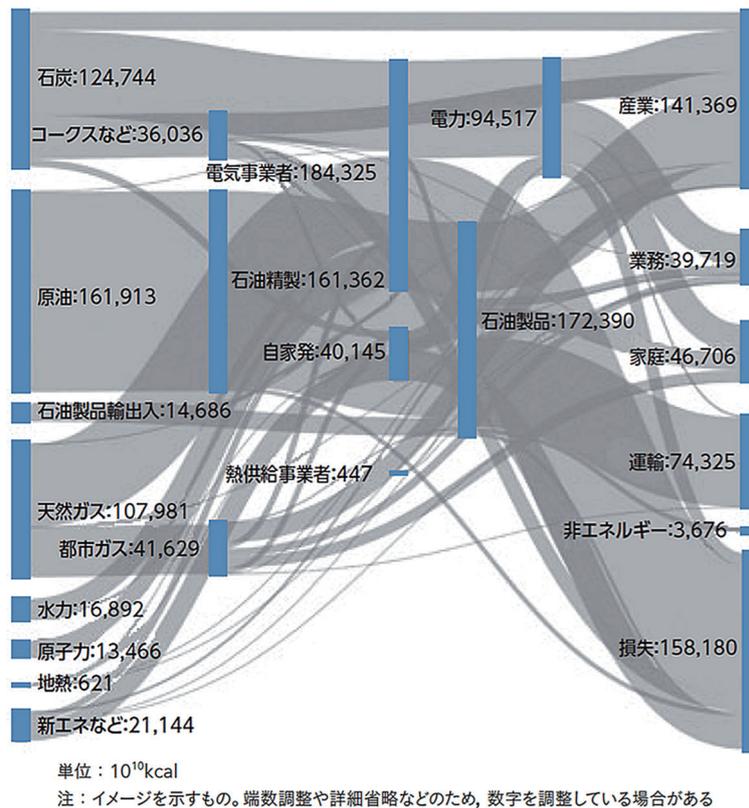


図1 2018年の日本のエネルギーフロー (1)

エネルギー需要の両者で、カーボンニュートラルに向かうことは、新しいエネルギーシステムへの破壊的変革をとまなう移行を意味し、ライフスタイルや産業活動全般に対する社会的制度を含めた総合的対策が必要となります。

3. 温室効果排出量ギャップ

それでは、パリ協定が掲げる温度目標は、現実的に見て達成可能なのでしょうか。

環境分野における国連の主要機関である国連環境計画 (UNEP: United Nations Environment Programme) が毎年発行していますギャップ・レポートでは、各国が提出した2030年頃のNDC積み上げをさらに延長したGHG排出量と、パリ協定温度目標を達成する場合の経路とにギャップがあることを強調しています。2℃や1.5℃目標の達成には、まず早期に世界全体のGHG排出量をピークとし、その後に減少に向かわせるためのGHG削減の上乗せを求めています。

2020年版レポートに示された図2をみると、2℃目標の場合、2030年GHG排出はCO₂以外のGHGを含めたCO₂等価換算で41Gt-CO₂e (中央値)で、1.5℃目標の場合は25Gt-CO₂e (同)となります。図2では、いずれも幅を持って示されています。

NDCには、追加的条件なしのものと条件付きのもの2種類があります。条件付きは、その実施に当たって、主に途上国に対する資金・技術・能力形成などの支援を前提としています。2種類のNDCを勘案した2030年時点における世界排出量のギャップは、2℃目標 (66%確率で達成) の場合、条件なしで15Gt-CO₂e、条件付きで12Gt-CO₂e、1.5℃目標の場合、条件なしで32Gt-CO₂e、条件付きで29Gt-CO₂eとなります。現状のCO₂等価GHG排出量が50Gt-CO₂eを超えることや、2050年までに必要なGHG排出経路をみますと、ギャップ解消に向けた削減努力は長期間継続しなければならず、技術的、社会的にみた場合、難度の高い道が待っています。

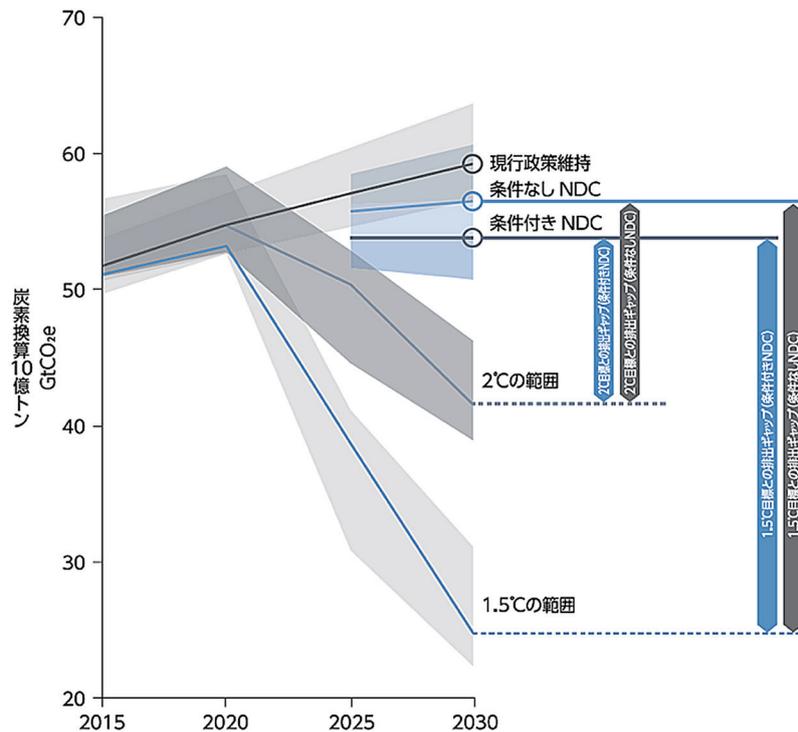


図2 世界のGHG 排出量ギャップ (1)

4. グリーン成長戦略とエネルギー研究開発

日本では、2050年カーボンニュートラルという全体目標は決まりましたが、エネルギー需給システムの具体的な構成については、2030年のGHG排出量を、2013年比で46%削減する方針が国際的に宣言され、「第6次エネルギー基本計画」に反映されました。なお、2050年のエネルギー需給構成の具体的な姿は提示されていません。

政策の方向性としては、2020年12月に、「2050年カーボンニュートラル」への挑戦を「経済と環境の好循環」につなげるための産業政策である「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」において、分野横断的な政策ツールとしてのグリーンイノベーション基金、カーボンプライシングなどの経済的手段、金融、規制改革・標準化、および国際連携が示され、重要分野の実行計画が2050年までの工程表とともに示されました。

研究開発の促進は、長期的なイノベーションを誘発するものとして重要です。国際エネルギー機関（IEA：International Energy Agency）が2021年5月に公開した“Net Zero by 2050: a Roadmap for the Global Energy Sector”は、エネルギーおよび産業プロセスからのCO₂を2050年に正味でゼロにするためのロードマップとして、必要な政策アクションと技術の組み合わせの一例を示し、同時に2050年までのCO₂排出経路を示しています。その中で、2050年時点でのCO₂削減における既存技術の寄与度と新技術の寄与度はほぼ半々であることを指摘しています。

図3に、日本のグリーン成長戦略に含まれる技術群を示します。既存技術の普及を先行させると同時に、新技術の開発を段階的に進め、コスト、量、ビジネスモデルおよび制度整備などの点において、両方の技術群を社会が受け入れられるようにしておくことが必須です。

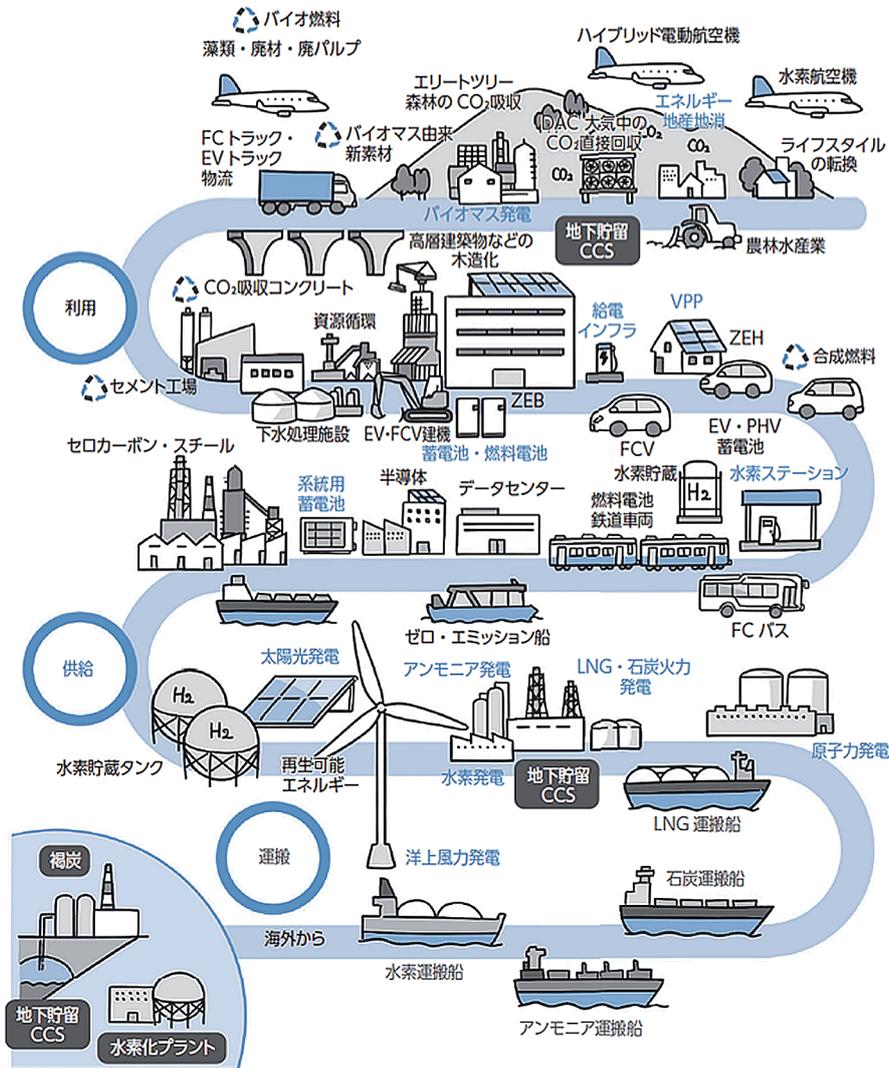


図3 日本のグリーン成長戦略に含まれる技術群 (1)

参考文献

- (1) (一財) エネルギー総合工学研究所, 『図解でわかるカーボンニュートラル』, 技術評論社, 2021年9月

再生可能エネルギーのポテンシャル

森山 亮 (プロジェクト試験研究部
新エネルギーグループ 部長)



1. カーボンニュートラルの実現に向けて

2020年10月、政府は2050年までに温室効果ガス(GHG)の排出を全体としてゼロにする、カーボンニュートラルを目指すことを宣言しました。GHGの排出を全体としてゼロにするということは、GHGの排出量から、植林や森林管理などによる吸収量を差し引いて、合計を実質的にゼロにすることを意味しています。

図1はわが国のカーボンニュートラル宣言に伴って、今後削減が必要なGHGの量を示したものです。縦軸は年間のGHG排出量を示しており、排出削減目標において比較される2013年度には約14億トンのGHGが排出されていました。

2015年に提出された日本の約束草案では2013年度と比べて2030年度のGHG削減割合を26%にする目標が掲げられていましたが、2021年にはこの目標が46%の削減割合に変更となりました。

2013年のGHG排出量の内、二酸化炭素(CO₂)の排出量は9割以上となっており、CO₂排出量の内、約9割がエネルギー起源であるため、エネルギー分野における脱炭素が重要であることが分かります。

このようなGHGの削減に向けて、再生可能エネルギー(再エネ)の導入が果たす役割は大きいと言えます。

2. 再生可能エネルギー導入の現状と目標

2012年から施行された固定価格買取制度(FIT制度)や電力自由化によって、事業者が再エネ事業に参入する障壁が緩和されたり、事業性に見通しが立ちやすくなったりしたため、再エネの設備導入が進んでいます。

FIT制度による再エネ設備の導入量は、2020年度において6万MWを超え、そのうち、90%以上が太陽光発電となっています。太陽光発電を規模別で見ると、2020年度の10kW

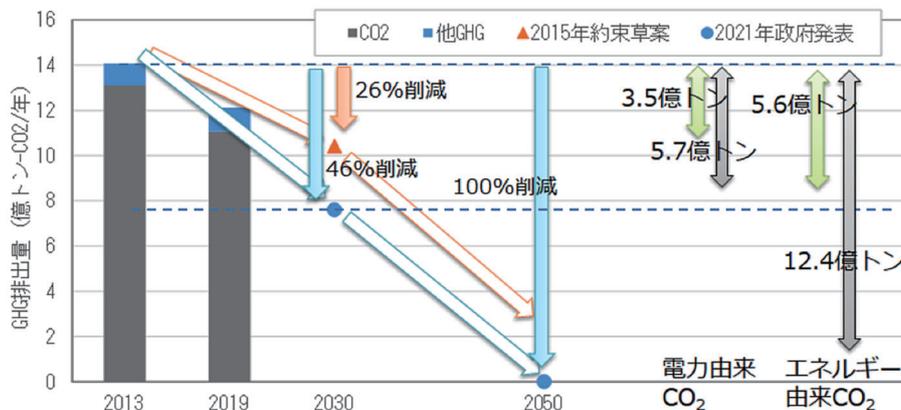


図1 GHG 排出削減目標

未満の住宅用の設備容量は0.8万kW、10kW以上の非住宅の設備容量が約5万MWで、非住宅のうち1MW以上の大規模なものは半分弱の2.3万MWとなっており、メガソーラーと呼ばれる大規模太陽光発電所が多く導入されてきたといえます。これに対し、バイオマス発電は約2,700MW、風力発電は約2,000MWとなっています。

図2はFIT制度による再エネによる発電量と再エネの買い取り金額の推移を表しています。

発電量はFIT制度の開始以降順調に増加しており、2020年度には10万GWhを超えました。これらの電力量は、FIT制度によって電力会社（2017年のFIT制度改正によって、小売り電気事業者から送配電事業者に買取義務者が変更）に高い価格で全量買い取ら

れています。再エネ電力量の増加とともに買い取り金額も増加しており、2020年度には約3.5兆円になっています。この買い取り金額の内、電力会社が発電せずに済んだ回避可能費用を引いた分が国民負担で賄われているので、この国民負担をいかに減らすかということがカーボンニュートラルの実現に向けた1つの課題です。

図3に2020年度のFIT制度による再エネ設備の導入実績と2030年の再エネ設備導入目標の比較を示します。

2015年の長期エネルギー需給見通しで示された2030年度の再エネ設備の目標（図中（旧）で示す）は約9.5万MWであり、2020年度の実績である約6万MWですでに目標の半分以上が達成されていました。この実績値はFITの設備のみであり、FIT以外の再エネ設備を

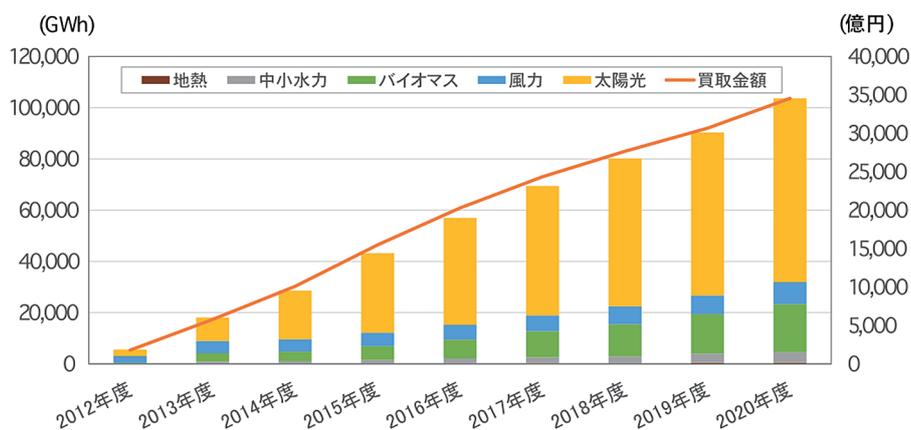


図2 FIT制度による再生可能エネルギーの導入実績 (1)

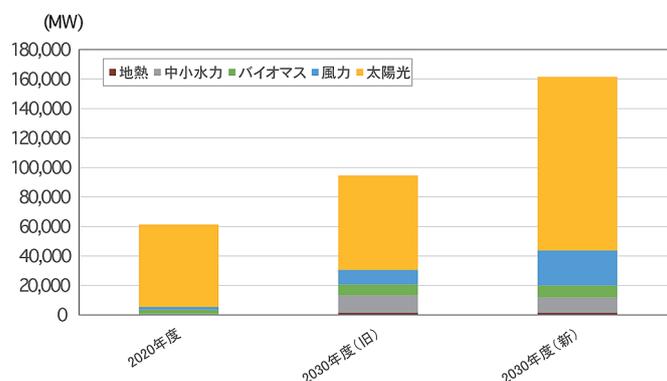


図3 再生可能エネルギー発電設備容量の目標比較

考慮するともう少し数値はあがります。

これに対し、2021年に策定された「第6次エネルギー基本計画」では、目標（図中（新））が約16万MWにアップしたので、今後9年間で現状の3倍弱の設備容量を増加させるというかなり野心的な目標が設定されたといえます。

3. 再生可能エネルギーのポテンシャル

このような野心的な目標値に資する程度の再エネの量があるのかどうかを、わが国の導入ポテンシャルから見ることにします。

図4は、再エネの量とその量を求める条件について図示したものです。賦存量は理論的に算出されるエネルギーのことで、利用できないエネルギーも含まれています。例えば、日本の太陽光発電の賦存量を考えますと、面積当たりの太陽光エネルギーに日本の国土面積を乗ずることによって概算できます。実際に太陽光発電のパネルを設置できる面積には限りがありますので、賦存量はあくまで理論的な最大量を表しています。

これに対し、導入ポテンシャルは設備の設置可能性を考慮して求めたものです。さらに導入可能量としては経済的に成立するかどうかといった観点も考慮されるので、設置可能な面積があっても系統接続に要する費用や土地の造成費用が莫大で、FIT制度を利用して事業が成立しない場合には除外されます。

実際の導入ポテンシャルや導入可能量は、今まで利用できなかった土地が法改正で利用できるよなったり、FIT制度の導入によって経済性が成立するよなったり、さらには技術革新によって、これまで設置できなかったところに設置できるようよなったり、社会的もしくは技術的要件によって変化する量です。

設備容量としての再エネの導入ポテンシャルは、経産省や環境省において見積もられています^{(2)~(5)}。太陽光発電の導入ポテンシャルは130~320GW、風力発電の導入ポテンシャルは1,800GW程度であり、2015年度における日本の発電設備容量総計（約260GW）を上回る導入ポテンシャルがあることが分かります。

一方、再エネの中でも出力が一定もしくは調整可能な安定電源と呼ばれる水力、バイオマス、地熱はそれぞれ14, 3, 6~23GWと比較的低い導入ポテンシャルです。

設備容量としての導入ポテンシャルに一定の設備利用率を考慮して発電量に換算すると、図5のよなになります。

風力発電は発電量としてのポテンシャルが高く、日本の発電実績を超えていることが分かります。これらの内、今後開発が期待されている洋上風力発電の量が大半を占めています。

導入ポテンシャルが低いバイオマスについては、現在国内で排出される廃棄物の量をベースに計算しているため、低い値となっていますが、森林資源の有効利用や海外からのバイ

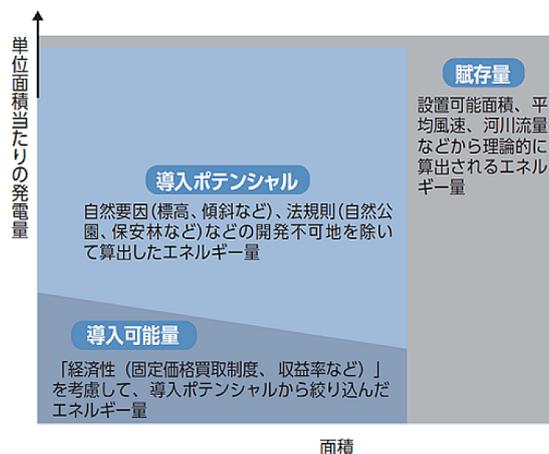
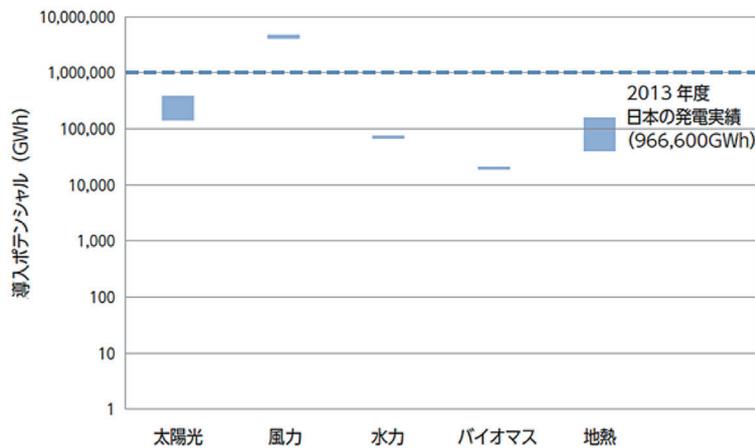


図4 エネルギーのポテンシャルイメージ⁽⁶⁾



導入ポテンシャルを発電量に換算するにあたり、設備利用率 (太陽光：13%、風力：25%、水力：55%、バイオマス：80%、地熱：80%)を想定した

図5 再生可能エネルギーの導入ポテンシャル⁽⁷⁾

オマス輸入を考慮すると、ポテンシャルは増加します。

4. 再生可能エネルギー導入の課題

再エネの導入ポテンシャルは大きく、将来のカーボンニュートラル実現に向けてその取り組みに期待が寄せられていますが、実際の再エネ大量導入には様々な課題があります。特に、再エネの導入コストや導入適地については、解決のための技術開発が実施されています。

近年、太陽光発電や風力発電については、導入量の拡大とともに設備コストが急速に低減しています。

国際再生可能エネルギー機関 (IRENA) の報告⁽⁸⁾によると、太陽光発電の設備コストは、約10年前の2010年と比較して、2018年には設備コストは数分の1まで低減しています。フランスやイギリスではkW当たり5,000ドル以上だったものが、1,000ドル程度まで低減しています。日本について見ると、同じく2010年のkW当たり5,000ドル程度から急激にコストの低減が起こっていましたが、ここ数年は2,000ドル程度で下げ止まりしており、他の国と比較しても高いコストであることが示されています。

日本における設備コストが海外と比較して高い要因は、土地造成費用、架台のコスト、自然災害対応などが言われていますが、太陽光発電だけではなく、風力発電も落雷や台風など自然環境の条件が厳しい日本において設備コストが比較的高いという課題があります。

前述の通り、風力発電は導入ポテンシャルが高いことからカーボンニュートラルの実現に向けて、その寄与が期待されていますが、風力発電の導入適地については、まだ課題も多いです。

世界風力エネルギー協会 (GWEC) によると⁽⁹⁾、日本の近海は風況が良く、特に、太平洋側で年平均風速が高いことが示されています。洋上風力発電の技術ポテンシャル (年平均風速、水深および排他的経済水域を考慮した適地に一定の設備容量を考慮したもの) は1,897GWであるものの、風車の支柱が海底まで到達している着床式洋上風力発電の技術ポテンシャルはそのうち1割にも満たない122GWです。残りは、風車自体が海洋に浮いている浮体式洋上風力発電の技術ポテンシャルであるため、現在実証レベルにある浮体式洋上風力の技術開発が重要となります。

5. 再生可能エネルギー大量導入に向けた施策

経済産業省が2021年6月に策定した「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」⁽¹⁰⁾において示されている成長が期待される14分野の中でも、洋上風力と太陽光・地熱産業が取り上げられています。

洋上風力産業の取り組みについては、投資を呼び込む、インフラの整備、サプライチェーンの形成、などが挙げられている他、電力インフラの構築として、発電の適地である北海道・東北と需要地である関東を結ぶ長距離直流送電も検討されています。

太陽光産業については、ペロブスカイト太陽電池というフィルム状の次世代太陽電池の研究開発が進められています。これが商用化すれば、大掛かりな架台も不要になり、建物の壁面や車など移動体の屋根にも取り付けることができ、低コスト化および適地の拡張に貢献することが期待されています。

6. 再生可能エネルギー大量導入に向けた課題

前述の再エネのポテンシャルが十分に利用され、再エネによる発電容量や年間の発電量が現在の日本の需要量を上回ったとしても、

特に、自然変動電源である太陽光発電や風力発電の大量導入が実現した場合、その場その場で需要に応じた電力を供給する「同時同量」を満たすことが困難になってきます。

現在は、太陽光発電や風力発電による発電量と需要にギャップがある場合、火力発電や揚水を含む水力発電といった調整電源でバランスをとっています。しかしながら、太陽光発電の設備容量が多く、火力発電などで調整しきれない時には、再エネの発電を抑制する出力制御が必要になり、すでに九州エリアでは、図6で示しますように、年間に60回以上の出力制御が実施されています。2021年度は90回以上の出力制御が見込まれています⁽¹¹⁾。

今後再エネの導入量が増えていくと、回数の増加はもとより、再エネの発電量への寄与も大きくなっていくと考えられます。再エネで発電した電力を有効に利用するためには、電力の需要と供給の時間・空間的なギャップを埋める蓄エネルギー技術の導入も必要になってきます。

7. 地域エネルギーの利活用

再エネの大量導入については、地域エネルギーの利活用も大事な視点です。

これまでは、火力発電のような大規模集中型の発電設備で日本の電力供給が賄われてき

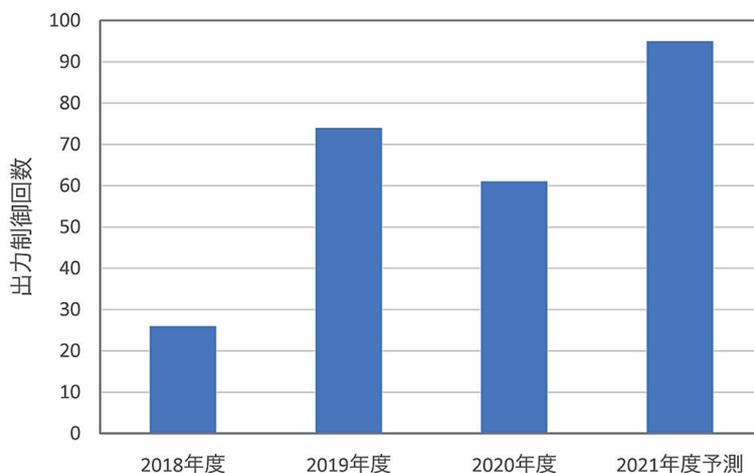


図6 九州エリア 本土の出力制御の実施回数⁽¹¹⁾

ました。石炭や天然ガスといった輸入燃料を港湾設備などで集中して受け入れることができ、設備も港湾地域に建てることで、大規模で効率が良い発電が実施できていました。

一方で、太陽光や風力などの再エネは、ある程度の偏在はあるものの、日本全国に薄く広く賦存しているため、発電設備を分散化することができます。したがって、自治体などの地域単位で再エネ設備を導入し、その地域でエネルギーを利用する地産地消という考え方が成立しやすくなります。

地域での需給バランスをとりながら再エネを導入していくことによって、地域からカーボンニュートラルを進めていくという取り組みも始まっています。

8. おわりに

最後にカーボンニュートラルに向けた再エネの大量導入についてまとめると、再エネの導入ポテンシャルは高く、今後もカーボンニュートラルの達成に向けて最大限の導入努力は必要ですが、再エネの導入に関する課題や導入によって電力システム全体に及ぼす課題も多いため、様々なエネルギー技術オプションを検討しつつ、将来のカーボンニュートラルに向けて着実に進めて行くことが必要です。

参考文献

- (1) 資源エネルギー庁, 「なっとく! 再生可能エネルギー」
(https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/index.html)
- (2) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), 「再生可能エネルギー技術白書第2版」, 2014年2月
- (3) 環境省, 「再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書」, 2011年3月
- (4) 経済産業省, 「バイオマスエネルギー利用の現状について」, 総合資源エネルギー調査会 第30回新エネルギー部会, 資料1, 2009年
- (5) 農林水産省, 「バイオマスの活用をめぐる状況」, 2021年12月
- (6) 国家戦略室, 「各省のポテンシャル調査の相違点の電源別整理」, 第7回コスト等検証委員会, 参考資料3, 2011年12月13日
- (7) (一財) エネルギー総合工学研究所, 『図解でわかるカー

ボンニュートラル』, 技術評論社, 2021年9月

- (8) 国際再生可能エネルギー機関 (IRENA), “Renewable Power Generation Costs in 2018”, May 2019
- (9) 世界風力エネルギー会議 (GWEC), “Offshore wind technical resource maps”
- (10) 経済産業省, 「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」, 2021年6月
- (11) 九州電力(株), 過去の出力制御実績

[講演3]

原子力の役割

都筑 和泰 (原子力技術センター
原子力チーム 部長)



1. 原子力の評価

当研究所においては、震災前より継続して、エネルギーに関する公衆調査を毎年実施してきております⁽¹⁾。調査対象は首都圏の500人であり、webを利用して実施しております。その中の原子力の利用を続けるべきかどうかについての設問については、震災直後に「やめるべき」とする意見が急増し6割強に達しました。その後、若干の減少はあるもののほぼ横ばいで推移しており、2017年の時点でも「徐々にやめていくべき」と「すぐやめるべき」を合わせると半数を超えております。このように国内においては、依然として原子力について厳しい見方をしている方が多いということが分かります。

一方、海外においては状況が異なります。

図1に示す通り、中国やロシアは積極的に原子力発電所の建設を進めております。また、欧米においても、少数ではあるものの大型軽水炉建設プロジェクトは実施されております。さらに、並行して小型モジュール炉(SMR)を含む新型炉の開発に積極的な投資が行われております。

原子力は最初の商用炉が運転してから既に60年以上経過し、世界の電力の約1割を供給しているという実績のある低炭素電源です。そのこともあり、多くの低炭素エネルギービジョンにおいては、図2に示す通り、2100年に向けて原子力の着実な増加を見込んでおります。このように、原子力は世界的にはカーボンニュートラル実現のための有効なツールの1つと認識されていると言えます。

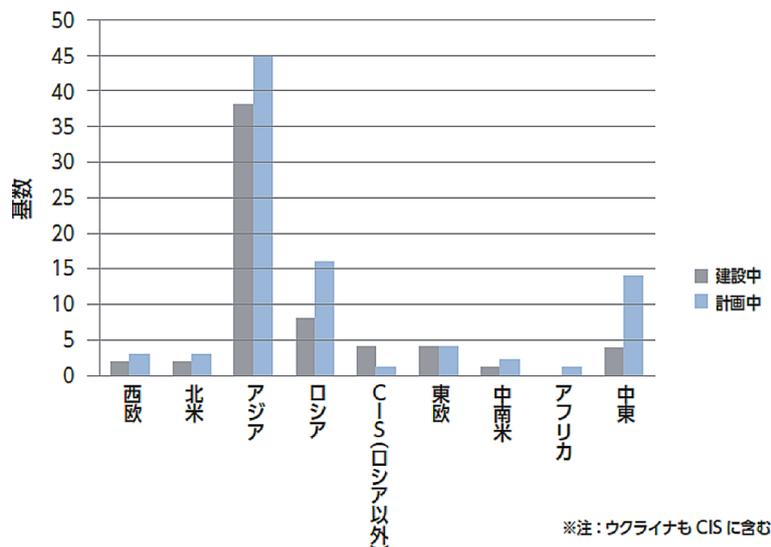


図1 世界の建設中・計画中の原子力発電所⁽²⁾

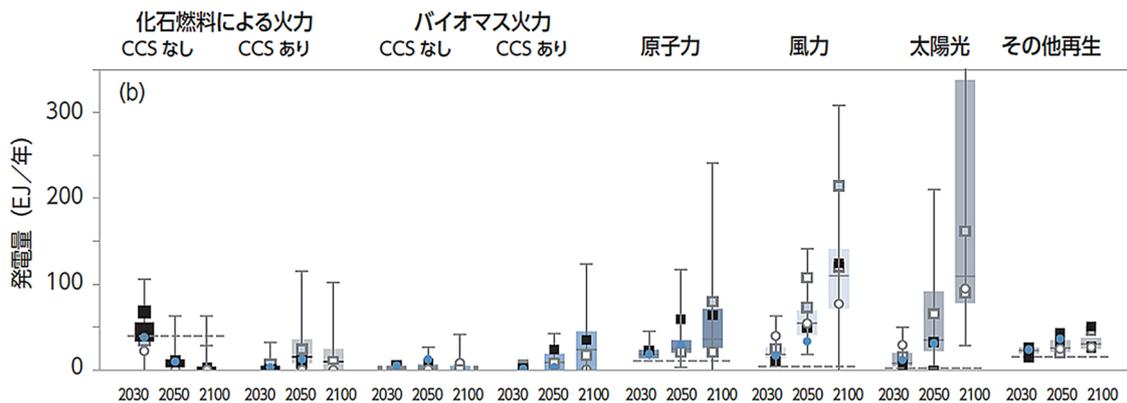


図2 IPCCの1.5°Cシナリオにおける一次エネルギー消費量の推移⁽³⁾

2. 原子力の特長

(1) CO₂ 排出

原子力は、発電時には二酸化炭素 (CO₂) を排出しませんが、燃料の製造やプラントの建設・解体にCO₂を発生するので、全くCO₂を排出しないというわけではありません。これは再生可能エネルギーも同様なのですが、原子力については、「実はCO₂削減に寄与しない」と思っている人が少なくないというアンケート結果も報告されています⁽⁴⁾。

単位発電量当たりのCO₂排出量を定量的に比較するため、いわゆるライフサイクルアセスメントがいくつかの機関で実施されていま

す。その一例を図3に示します。この計算は、計算の前提条件やデータの精度に応じて少くない不確実性を持ちますので、再生可能エネルギーと原子力の順位については議論が残ります。しかし、少なくとも、「火力発電よりは明らかに少なく、他の再生可能エネルギーとは概ね同等」という結論は大きく変わることはありません。従いまして、火力発電を原子力発電に置き換えることにより、CO₂排出は確実に低減可能と言えます。

(2) 発電コスト

原子力を含む各種電源の発電単価についても様々な検討が行われております。ここで

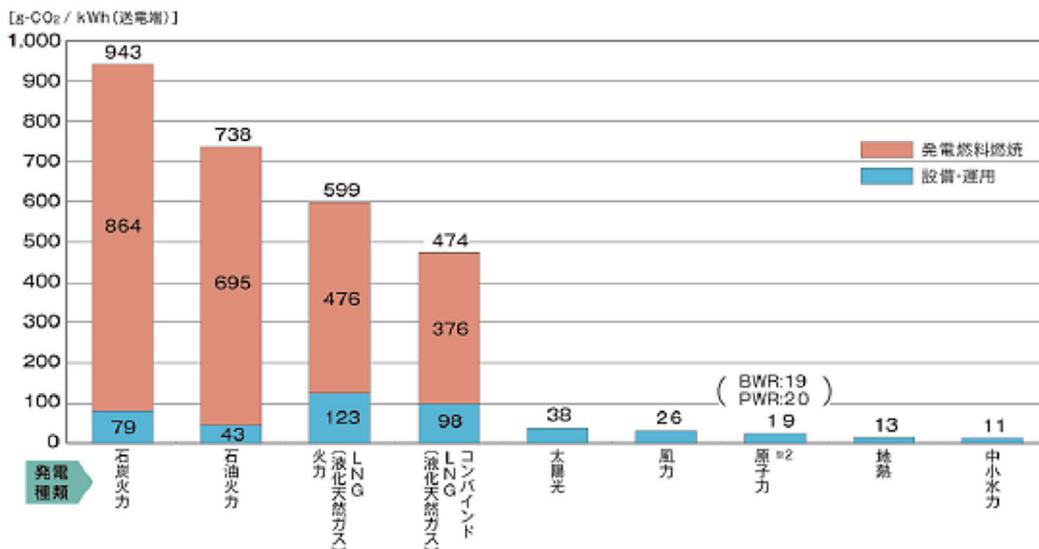


図3 主要発電技術の単位発電量当たりのCO₂排出量比較⁽⁵⁾

は、図3に経済協力開発機構／原子力機関(OECD/NEA)の検討結果を示します⁽⁶⁾。原子力は他電源と比べてコストが低い方であると評価されております。一方、欧米における最近の原子力発電所の新規建設の状況を見ると、とても「原子力はコストが低いとは思えない」という方も多いかと思えます。実際、国際的な金融グループであるラザード(Lazard Limited)においては、図4の結果を大幅に上回るようなコスト評価をしております。

このようなコスト上昇の詳細な分析は公表されておりませんが、工期の長期化に伴う人件費や金利負担、周辺のインフラ整備など、純粋なプラント建設費以外の要因が大きいと推察されます。結局のところ、原子力発電は順調に建設し、順調に運転することができれば他電源と比べて相対的に安価であるが、欧米諸国においては数10年にわたる建設経験の途絶もあり、その状況が実現できていないということだと理解しております。

図4でもう1つ着目すべきは原子力(長期運転)が非常に安く評価されているということです。原子力は初期投資が大きい一方で燃料費や運転費は小さいという特徴があるため、初期コストの回収が終了すれば他のほとんど

の電源よりも低コストとなりえます。その意味で、国内においても再稼働を早期に実施することは経済的には合理的であると言えます。

(3) 供給安定性

原子力発電は、核燃料のエネルギー密度が非常に高いこともあり、1年間程度は燃料交換なしで連続した定格出力運転が可能です。また、国内に保管されている燃料のみで3年程度は運転可能です。従いまして、海上輸送トラブルを含む燃料供給途絶に対しては非常に強い電源と言えます。また、原子力の燃料であるウランは輸入に頼ってはおりますが、その供給元は多様であり、主要供給国の政情は中東諸国と比較して安定しております。エネルギー密度が高いことに加えて、ウラン調達が安定的であることも原子力の供給安定性を高めています。

3. 原子力の課題

これまで述べてきた通り、原子力はカーボンニュートラル実現のための有効なツールの1つと位置付けることができます。その将来利用に向けた主要な課題は以下の通りです。

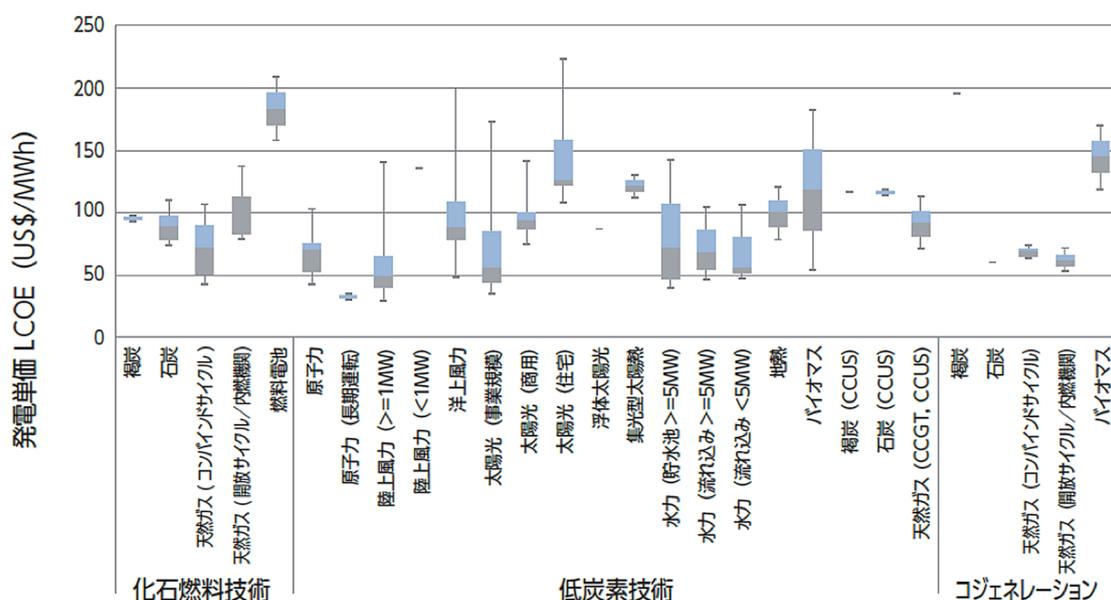


図4 各発電技術の発電コスト評価⁽⁶⁾

これらの全てを取り扱うには紙幅が足りませんので、ここではこれらの課題に関連するいくつかのトピックについて紹介いたします。

- より高い安全性
- 放射性廃棄物処理・処分
- 経済性
- 多様な用途

(1) 軽水炉の改良

前述した通り、現在 400 基以上の原子力発電所が運転中で、建設中のプラントも数 10 基あります⁽²⁾。最近革新炉関連のニュースが増えている中ではありますが、実際に運転し、建設しているものの大部分は大型軽水炉です。従いまして、原子力の将来を見据えた場合、その改良は依然として重要です。主要な課題は福島第一原子力発電事故を踏まえた安全性のさらなる向上と、経済性向上であり、そのために必要な技術開発が進められております。その主要な技術開発項目は以下の通りです。

- 非常用電源に依存しない静的安全系の活用
- 万一炉心が溶融するような事故が発生しても被害を最小限にとどめられるような設計対応
- 工期短縮・工期順守に資する技術開発、工法開発
- プラントの発電効率向上
- プラント長寿命化

(2) 小型モジュール炉への期待

近年、アメリカ、イギリス、カナダなどを中心に小型モジュール炉の開発が積極的に進められております。その主要な期待事項は以下の通りです。

- 需要の規模と整合：新興国や中規模の都市については、中小型の炉の方が適する場合があります。また、遠隔地における熱電供給などを想定したさらに小規模な炉も検討
- 初期投資額が小さい：小型炉の kW あたりの単価には議論があるが、少なくとも初期投資額は一般に小さい。
- より高い安全性：プラント内の核燃料自体が少

ない上、固有安全、受動安全などの活用により、各炉型が高い安全性を宣伝している。

- モジュール化：可能な限り工場でモジュールを生産し、現地工事は最低限とする。また、量産化によりさらなるコスト低減を目指す。
- 需要地近接：高い安全性を前提として需要地に近接して立地ができれば、熱利用を含む多様な用途が想定可能である。
- 負荷追従性：変動性再生可能エネルギーとの共存を目指す。
- 高温化：発電効率の向上、産業利用、水素製造、排熱利用など。
- 高速中性子利用：Pu の活用による長期運転、廃棄物減容など

(3) 核融合

核融合は、核のエネルギーを使うという意味では原子力発電と同様ですが、基本となる反応は、原子力発電が「核分裂」、核融合は文字どおり「核融合」と全く異なります。核融合炉を持続的に発生させるためには、かなり大型の装置が必要となり、現在、わが国も含めた 7 極の国際協力により、核融合実験炉 ITER がフランスで建設されているところです⁽⁷⁾。

建設は 2010 年代半ばより本格的に着手し、2021 年 3 月の段階で、大型コイルの搬入作業が進められているなど、建設作業が進められておきます。プラズマの点火は 2025 年の予定です⁽⁷⁾。

核融合炉は、プラズマが不安定になったり燃料供給を止めたりすると、動作原理上すぐに停止するため、炉心溶融に相当するような事故は起こりません。また、高レベルの放射性廃棄物も発生しません。また、燃料は豊富にあります。これらの点から将来の有力な低炭素電源として期待される場所ではありますが、開発初期段階の予想に反して、かなり大型の装置が必要となっており、実現の遅れやコストが高が懸念されています。もっとコンパクトに核融合ができるといった趣旨で、ベンチャー企業が活動を行っており、こちらの動きも注目に値します。

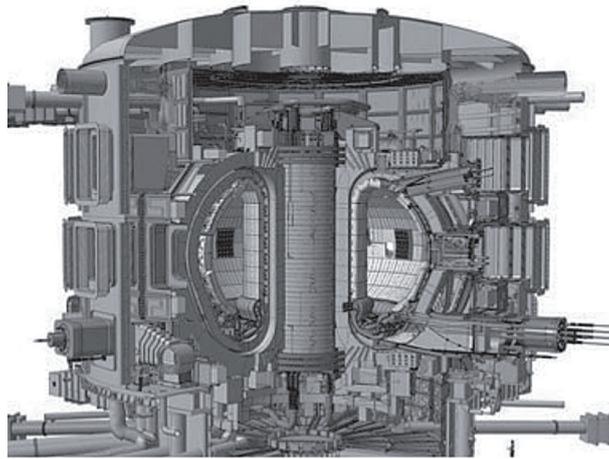


図5 ITER 概要 (7)

4. まとめ

福島第一原子力発電所の事故を受けて、原子力に対する国内の評価は低下した状態が継続しております。その一方、中国、ロシアを中心に既設炉を改良した大型軽水炉の導入が着実に進んでおりますし、アメリカ、イギリス、カナダなどを中心に小型モジュール炉の開発も積極的に進められているなど、海外では原子力を積極的に推進する動きもあります。

他の講演でもありましたが、カーボンニュートラル実現は、原子力があっても容易ではないというのが実情です。再生可能エネルギーや二酸化炭素回収貯留などに楽観的な想定をすれば原子力なしでカーボンニュートラルを実現することは不可能ではありませんが、その実現がさらに困難となることは明らかなです。よって、今後も原子力技術の維持涵養していくことは重要と考えています。

参考文献

- (1) (一財) エネルギー総合工学, 「平成 29 年度エネルギーに関する公衆の意識調査」, 2018 年 3 月,
(<https://www.iae.or.jp/report/list/general/questionnaire-survey/>)
- (2) 原子力産業協会, 「世界の原子力発電開発の動向 2020 年度版」, 2020 年 6 月
- (3) Intergovernmental Panel on Climate Change, “Global Warming of 1.5°C,” October 2018
(<https://www.ipcc.ch/sr15/>)

- (4) 高野大志, 「気候変動対策における原子力の役割と技術的, 社会的課題～「気候変動と原子力の役割に関する国際会議」を踏まえて～, 季報エネルギー総合工学, Vol.43 No.2, 2020 年 7 月
- (5) 電力中央研究所, 「日本における発電技術のライフサイクル CO₂ 排出量総合評価」, 総合報告 Y06, 2016 年 7 月
- (6) 経済協力開発機構/原子力機関 (OECD/NEA), “Projected Costs of Generating Electricity - 2020 Edition,” December 2020
- (7) 量子科学技術研究開発機構, 「ITER 計画」, 2021 年
(<https://www.fusion.qst.go.jp/ITER/>)

カーボンリサイクル



橋崎 克雄 (プロジェクト試験研究部
炭素循環エネルギーグループ 部長)

1. カーボンリサイクル

カーボンリサイクルとは、二酸化炭素 (CO₂) を資源として捉え、これを排ガスなどから分離・回収し、化学品、燃料、および鉱物などに加工して原材料として再利用することで、大気中への CO₂ 排出を抑制していくことです。

2020 年 12 月に策定された「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」、および 2020 年度第 3 次補正予算で創設された 2 兆円の「グリーンイノベーション基金」に基づき、2021 年 7 月「カーボンリサイクル技術ロードマップ」(2019 年 6 月経済産業省発表) が改訂されました。カーボンリサイクル技術は、カーボンニュートラル実現に向けたキーテクノロジーと位置付けられ、取り組みのさらなる加速が図られることとなりました。

そして、日米首脳会議の場で菅前首相は

2030 年温室効果ガス削減目標を「46%」(2013 年度比) と公約した 2021 年 4 月 22 日を境に、わが国は 2030 年「46%削減」、2050 年「カーボンニュートラルの実現」を目指し、社会が大きく動き始めることとなりました。

2. カーボンリサイクル技術ロードマップの改訂

カーボンリサイクル技術ロードマップ改訂版での CO₂ 利活用法を図 1 に示します。特に、改訂版には以下の 3 点が織り込まれました。

- ① DAC (直接大気回収：大気中から CO₂ を直接回収する技術) や合成燃料 (CO₂ と水素を合成して製造されるカーボンフリーな脱炭素燃料) の開発追加
- ② カーボンリサイクル製品 (汎用品) の普及開始時期を 2040 年頃に前倒し

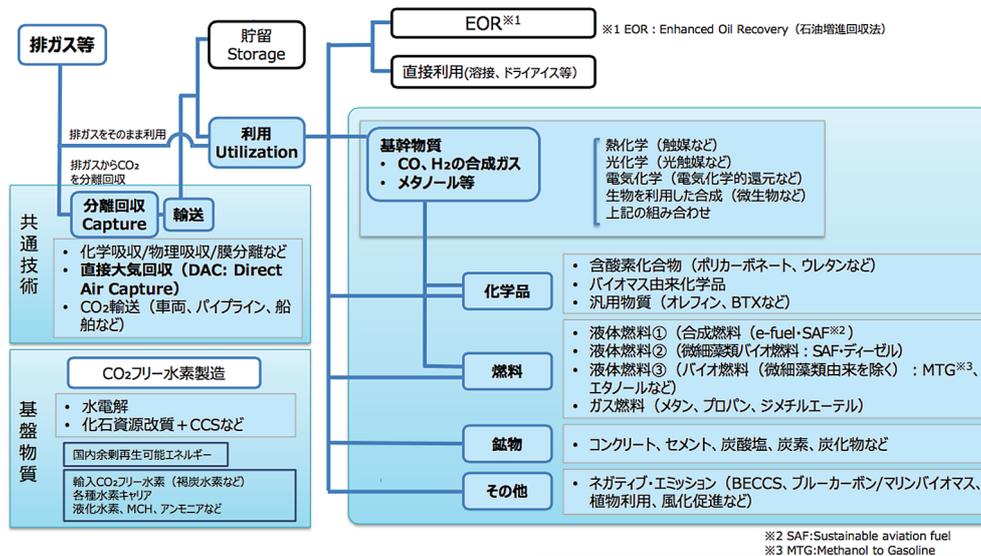


図 1 カーボンリサイクル技術ロードマップ改訂版 (1)

③ 国際連携（米国・豪州・アラブ首長国連邦（UAE）との協力覚書の締結、日米気候パートナーシップの締結等）の取り組みの追記

カーボンリサイクル技術には基幹物質としてCO₂フリー水素が必要です。水素自体は、導入目的の変遷はあったものの、1970年代のオイルショック時代から現在に至るまで、化石燃料代替エネルギーとして、そして海外の再生可能エネルギーを輸入するエネルギーキャリアとして検討されてきた歴史があります。また、CO₂分離回収・輸送技術も共通技術として重要視されています。

3. CO₂ 分離回収・輸送技術開発

CO₂を含む排ガスからCO₂を分離・回収する技術は、石油精製や天然ガス精製の分野では古くから実用化されています。その代表的なものとして、以下に示す、①化学吸収法、②物理吸収法、③物理吸着法、④膜分離法などです。現在、回収CO₂トン当たり、化学吸収法で4,000円/t-CO₂程度のところ、固体吸収法や物理吸収法を用いることで2,000円台/t-CO₂、将来は膜分離法で1,000円台/t-CO₂程度を目指す開発が進められています⁽²⁾。

① 化学吸収法

工業的に広く普及しており、燃焼後分離ではほとんどがこの方法が採用されています。装置は、吸収塔と再生塔からなり、排ガスを吸収塔に通して吸収液と接触させ、CO₂をガスから除去します。CO₂を多く含んだ吸収液は再生塔に送られ、加温してCO₂が分離されます。CO₂が希薄になった吸収液は、吸収塔に戻され、繰り返し使用されます。

吸収液は、一般的に、アミン系水溶液が用いられ、各社独自の添加剤が加えられ、高効率化（吸収液の再生エネルギーの低減化）が図られています。

② 物理吸収法

物理吸収法も化学吸収法と同様に吸収塔と再生塔からなり、吸収塔ではガス圧力を高くしてCO₂を吸収液に溶解させます。再生塔ではガス圧を下げ、CO₂を吸収液から放出させます。

世界では、吸収液に低温のメタノールを用いたレクチゾール法（Rectisol法）や、ポリエチレングリコールのジメチルエーテル溶液を用いたセレクソール法（Selexol法）が普及しています。レクチゾール法は、運転温度が-40~-60℃と低く、H₂S（硫化水素）やCOS（硫化カルボニル）を0.1ppm以下まで除去することもできます。セレクソール法は、吸収液が熱化学的に安定で、吸収液の損失が小さいのが特長です。

③ 吸着分離法

吸着分離法には、ゼオライトなどの固体吸着剤を用い、圧力差を利用して吸着と脱着を繰り返すPSA（Pressure Swing Adsorption）、温度差を利用するTSA（Thermal Swing Adsorption）、両者を併用する、PTSA（Pressure and Temperature Swing Adsorption）法があります。

PSAは、一般的に水素製造装置の水素純度を上げるために使用されています。これらはいずれも、複数の吸着塔を切り替えて使用されます。一般的に回収されたCO₂濃度は低く、高濃度CO₂を得ることは難しいとされています。

④ 膜分離法

膜分離法は、膜を中空糸状に束ねてカートリッジ化したものを使用することが多いと言われています。前述の分離回収法と異なり、分圧差があれば再生に要するエネルギーが不要です。よって、膜に導入するガスが高圧の場合は、有利となります。一般的に、分離対象の分子径と分離膜の孔径の差異でガスが分離される分子篩と、膜への親和性の違いを利用した溶解拡散があります。前者の例では、水素分離膜として、ポリイミドやポリスルホンの膜が実用化されています。

4. CO₂ 輸送

CO₂ は、常圧のままを冷却すると昇華して固体（ドライアイス）となりますが、約5気圧以上の圧力下で気体を冷却すると、三重点（-56.6℃）で液相域が現れ始めます。従って、CO₂ は、トラックやパイプライン、船で輸送されますが、輸送方法に応じて適切な状態（圧力、温度）を選ぶ必要があります。

大量に、かつ国際的にCO₂を輸送する唯一の方法は船舶輸送です。この時のタンク設計値は、気液固相の三重点より少し圧力が高い条件（1.0MPaG、温度が-50℃程度）が採用されています。液体CO₂の輸送船は、ノルウェーのYara社が1,800トンクラスの船を3隻所有し、ノルウェー、デンマーク、オランダ、イギリスの間のCO₂輸送に使われていて、小型船については技術的な問題はありませぬ。現在、日本でも、500～1,000トン級のCO₂/LPG兼用輸送船の検討が進められています。

5. CO₂ 有効利用技術開発

現在、CO₂は石油増進回収法（EOR：Enhanced Oil Recovery）、溶接のシールガス、飲用などの直接利用だけではなく、以下に示

す、①化学品、②バイオ燃料、③e-Fuelsといった合成燃料の製造プロセスにおいてもすでに部分的に使われていて、そこにCO₂の市場が存在します。しかし、その量は世界のCO₂排出量に比べれば遥かに小さく、約2億トン／年に過ぎません⁽³⁾。よって、CO₂排出量の大幅削減には、CO₂分離回収・貯留技術（CCS：Carbon dioxide Capture and Storage）以外には、一次エネルギー源（原油、石炭、天然ガス）由来のCO₂を、再生可能エネルギー（再エネ）を利用して燃料などのエネルギー源に再転換する「カーボンリサイクル」という方法しかないと思われます。

① 化学品

CO₂を有効利用できる化成品の製造プロセス全体のフローを図2に示します。CO₂を出発原料に、水（水蒸気）、（再エネ）水素、メタンを利用して水素還元する各反応プロセスは、すでに商業化されているものもあれば、研究中、実証中のものもあります。この中で以下の4つは今後、重要な反応になると思われます。

- 共電解反応 / レドックス反応 / 光触媒
- ポリカ反応
- MTO (Methanol to Olefin)
- FT (Fischer-Tropsch) 合成

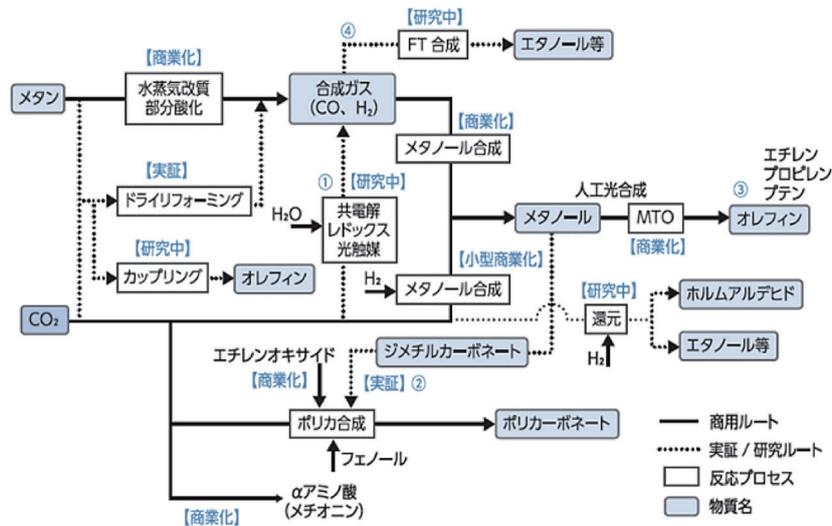


図2 CO₂を有効利用可能な化学品製造プロセスの全体フロー⁽⁴⁾

② バイオ燃料

バイオ(生化学反応/光合成)プロセスによるCO₂フリー合成燃料製造は、図3に示すように、植物や廃棄物をガス化や化学反応プロセスを通じた合成や微細藻類を利用した合成が必要なため、大規模に生産するに当たっては、原材料の確保が課題となります。原料調達は地域の事情(バイオマスなどの地域偏在性など)に影響されるため、その普及は限定的になると考えられます。

③ e-Fuels

化学反応プロセスによるCO₂フリー合成燃料の製造は、図4に示すように、大量のCO₂、水素を人為的に分離・回収、電解などで製造するため、大規模化が比較的容易で、大量

のCO₂削減効果が見込めます。人為的であるので、既存インフラに適合した合成燃料を製造することも可能です。例えば、ガソリン代替となる高オクタン価のメタノールを脱水して、高セタン価のジメチルエーテル(DME: DiMethyl Ether)や、さらに重合させて常温、常圧で液体のポリオキシメチレンジメチルエーテル(OME: Polyoxymethylene Dimethyl Ethers)を製造することで、ディーゼル油の代替にすることも可能です。

6. 炭素循環エネルギーシステム

2050年カーボンニュートラルを実現させるためには、既存インフラを活用し、エネルギー供給の安定化を図りながら、効果的なCO₂削

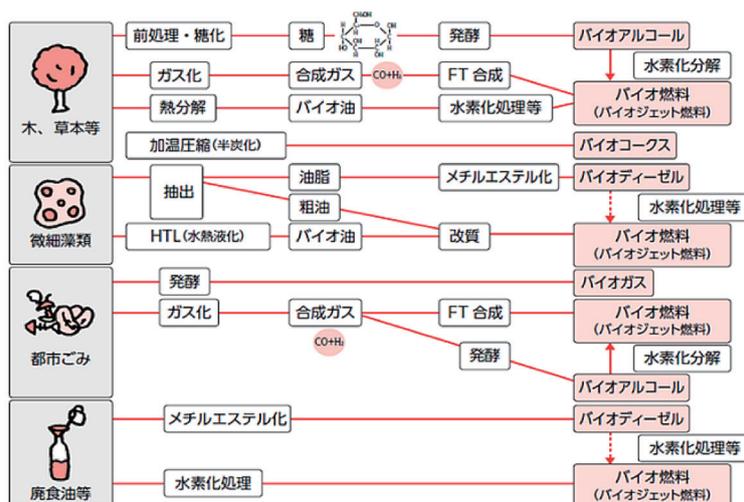


図3 バイオ(生化学反応/光合成)プロセスによるCO₂フリー合成燃料製造⁽⁵⁾

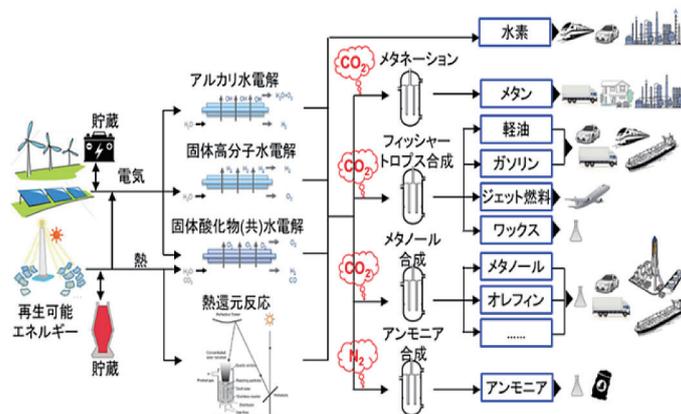


図4 化学反応プロセスによるCO₂フリー合成燃料製造⁽⁵⁾

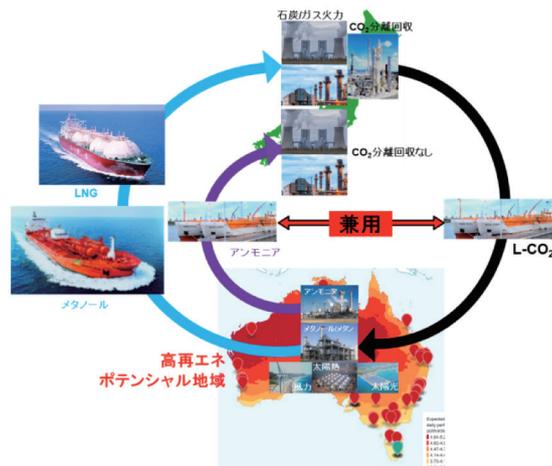


図5 ACC with NH₃ エネルギーシステム (4)

減策を推進していくことが必要です。そして、水素などの新エネルギーへの移行期にマッチしたわが国独自の新しいエネルギーシステムが求められています。

現在、わが国では、(株)JERAによる石炭火力発電からのCO₂排出量削減対策としてのアンモニア(NH₃)混焼が発表され⁽⁶⁾、NH₃の活用がエネルギー転換(発電)部門における当面の大きなCO₂削減策として取り上げられています。そして、「第6次エネルギー基本計画」にも盛り込まれています。2030年まではコスト面も考え、当面ブルーNH₃(化石燃料由来のNH₃)を中心に展開されていくでしょう。最終的にはグリーンNH₃(CO₂を排出せずに製造されたNH₃)への展開が期待されていますが、再エネの発電コストが安価になってきたとは言え、船舶による水素系燃料の1隻当たりのエネルギー輸送量は、炭化水素系に比べて4分の1～5分の1程度と小さく、荷役基地を含めた輸送コストが物理的なコストネックになることが予想されます⁽⁵⁾。

そこで、図5に新しいハイブリットなエネルギーシステムを示します。グリーン水素(CO₂を排出せずに製造された水素)をベースとした炭化水素系燃料、CO₂分離回収・輸送、そしてグリーンNH₃を組み合わせた「ACC with NH₃ エネルギーシステム」(ACC: Anthropogenic Carbon Cycle)です⁽⁴⁾。液化

炭酸ガスとNH₃の輸送時の物性には大きな差はなく、兼用船化が可能と考えられます。この兼用船化により、NH₃や液化炭酸ガスの輸送時の船舶利用効率の向上を図りながら、炭化水素系燃料、水素系燃料を同時並行的に輸入できるようにすれば、利用可能なエネルギーの選択肢が広がり、安定供給の確保が実現できるというものです。

このエネルギーシステムであれば、基本的にCCSを必要とせず、炭化水素系燃料でありながらもCO₂分離回収を行うため、CO₂フリー燃料化を図ることが可能です。また、ほぼすべての技術が既存技術の延長線上に位置づけられるレベルであり、実現へのハードルも高くなく、早期実装も可能です。

カーボンリサイクル技術ロードマップ改訂版には、直接空気回収(DAC)と合成燃料が織り込まれましたが、DACが実現できれば、CO₂輸送は必ずしも必要ありませんが、合成燃料の導入を少しでも安価に図ろうと考えた場合、「ACC with NH₃ エネルギーシステム」は非常に有効的、かつ現実的な手段だと考えられます。

参考文献

- (1) 経済産業省 2021年7月26日プレスリリース
- (2) 内閣府「革新的環境イノベーション戦略」, 2020年1月
- (3) Michele Aresta et al., "The changing paradigm in CO₂

- utilization”, Journal of CO₂ Utilization, pp.3-4, pp.65-73,
(2013)
- (4) (一財)エネルギー総合工学研究所,『図解でわかるカー
ボンニュートラル』, 技術評論社, 2021年9月
- (5) (一財)エネルギー総合工学研究所,『図解でわかるカー
ボンリサイクル』, 技術評論社, 2020年9月
- (6) (株)JERA プレスリリース,「2050年におけるゼロエミッ
ションへの挑戦について」, 2020年10月13日
- (7) 小野崎正樹, 橋崎克雄,「火力発電の脱炭素化に向
けたカーボンリサイクル活用の検討」, 火力原子力発電,
72巻5号, 2021年5月

[講演5]

変わる電力システム

炭谷 一郎 (プロジェクト試験研究部
電力システムグループ 部長)



1. はじめに

電力システムは、発電所、送配電線、変電所、情報通信設備および需要家設備までを含む、現代社会の中でも有数の巨大システムであり、最も重要なインフラの1つであることは言うまでもありません。電気が止まると水道、通信、交通、金融機関などのインフラが停止し、市民生活とともに、経済活動も完全に停止する恐れがあります。

近年の再生可能エネルギー（再エネ）などの分散型電源の増加にともない、電力の流れはこれまでの発電所から需要家への片方向から双方向へ変化するとともに、電力システム改革に伴う新たなプレイヤーの出現により、電力システムは一層複雑化しています。

2050年に二酸化炭素（CO₂）の排出量と吸収量を均衡させる「カーボンニュートラル」達成に向け、再エネを電力システムに大量導入する必要がありますが、その達成は容易ではありません。電力の安定供給を維持しつつ再エネ大量導入を進めるには、送電線の空き容量不足や、これまで主に火力発電所などが担ってきた需給調整力、慣性力への対策が必要です。さらに、再エネ増加にともなう賦課金の増加や電力システムへの設備投資による需要家負担コストの低減など、解決すべき課題は多いです。

2. 電力業界をとりまく環境の変化

(1) 5つのD

電力業界は、2050年に向けて大きな事業環

境の変化に直面しています。これは、以下の「5つのD」で示すことができます。この流れは不可逆的に進み、将来が不透明でも後戻りはできません⁽¹⁾。

① De-Population：人口減少・過疎化の進展

日本の人口は既に減少局面を迎え、2050年には約1億人、その約4割が高齢者になると予想されています。人口減少・高齢化の進展により、電力需要は減少すると考えられ、さらに、人口減少と都市への集中により、2040年には自治体の半数が消滅する可能性が指摘されています。

② De-Carbonization：脱炭素化

日本は、2050年のカーボンニュートラルを宣言し、「第6次エネルギー基本計画」に再エネの主力電源化を一層加速することが織り込まれました。

③ De-Centralization：分散化

再エネの普及による分散型電源のコスト低下とともに、災害時などの強靱性（レジリエンス）の観点からも分散型電源の活用によるエネルギーの地産地消への期待が高まっています。

④ De-Regulation：電力自由化・電力システム改革

発電・小売市場の自由化および送配電事業の法的分離は2020年度までに完了しました。今後は、安定供給、経済性、環境、安全（3E+S）を基本として新たな価値を生み出す制度設計が求められています。

⑤ Digitalization : デジタル化・DX

電力業界では、新しいプレーヤーの参入とともに、デジタル技術を活用する新たなビジネスモデルへの転換が進められています。スマートメーターなど、電気事業の有する膨大なデータを活用した他業種との協働による価値創造にも期待が高まります。

(2) 変わる電気の価値

電気には表1に示すような価値があります。太陽光・風力発電などの再エネは、燃料費が不要で発電の限界費用が安いいため、電力量(kWh)の価値は下がっていきます。その一方、電力供給では需要と供給が絶えず一致する「同時同量」が求められ、再エネ導入拡大に伴い、発電所の設備容量(kW)と需給調整力(Δ kW)の価値は高まります。

さらに、再エネによるグリーン電力など、電気的环境価値への注目が急速に高まっています。

(3) 再エネ主力電源化の国内外の動向

政府は、2021年10月に閣議決定した「第6次エネルギー基本計画」において、2030年の再エネ電力量の比率を36～38%程度と野心的目標を設定しました⁽²⁾。また、経済産業省は、基本政策分科会(2020年12月)において、2050年の再エネ電力量比率を約5～6割(参考値)と提示しました⁽³⁾。

また、国際エネルギー機関(IEA)は2021年5月に公表した「Net Zero by 2050」⁽⁴⁾において、太陽光と風力発電がリードして、再エネの電力量シェアを2020年の29%から2050年までに90%近くまで押し上げ、原子力、水素、そして炭素回収・有効利用・貯留(CCUS)が再エネを補完するとの「正味での排出量ゼロ」(ネットゼロエミッション)のシナリオを公表しました。

3. 再エネ主力電源化に向けた電力システムの課題と展望

(1) 再エネ主力電源化に向けた電力分野の課題

再エネの主力電源化を進めるためには多くの課題がありますが、代表的なものを以下に示します。

① 再エネ電源の拡充

四方を海に囲まれたわが国の特徴を活かし、2050年に向けての主力電源と期待される洋上風力は、風況が良い北海道・東北・九州エリアを中心に高いポテンシャルがあります。

日本風力発電協会(JWPA)は、「洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会」⁽⁵⁾において、2030年までに10GW、2040年までに30～45GWの洋上風力の導入目標を掲げています。海域利用に関する統一的なルールがない、システムの高コスト、送電方法などの課題は多いですが、洋上風力発電システムは、事業規模が大きく部品も多いため関連産業への波及効果が大きく、システムの競争力を確保した上で、将来の基盤産業としての期待も高いです。

太陽光発電は、環境への影響、立地面の制約、システム価格の高止まりにより、新規導入量が至近では低水準に留まっています⁽⁶⁾。太陽光発電の導入拡大に向けて、国土交通省は、2030年時点で新築戸建住宅の6割に太陽光発電設備を導入する目標を示しました。

② 電気料金高騰の懸念

2012年に開始した固定価格買取制度(FIT制度)による再エネ賦課金は毎年金額が増加し、2021年度は1kWh当たり3.36円となり、家庭用電気料金では単価の約15%を占め大きな負担となっています⁽⁷⁾。

表1 電力の3つの価値

電力量(kWh)	電力(kW)	調整力(Δ kW)
時間当たりに発電・使用する電力の合計量	ある瞬間に発電・使用する電力の大きさ	発電と需要を一致させるために電力を調整する能力

さらに、再エネ大量導入のための系統増強費用の増加および高度成長期に建設された送配電設備などの老朽化への対策にも、多額の費用が必要となります。

③ 安定供給の確保

出力が安定せず慣性力を有しない再エネ電源（VRE）の増加により、電力の需給調整は従来よりも困難になりました。石炭火力発電の段階的廃止（フェードアウト）により、供給力および調整力不足の懸念も高まっています。再エネ主力電源化に際しては、中長期的な電力の安定供給確保について万全を期す必要があります。

(2) 日本の電力系統の特徴

日本の電力系統には、以下の特徴があります。① 国土が細長く、電力系統は直線状で串型形状です。② 東側3エリアは50Hz、西側7エリアは60Hzと2種類の周波数があります。③ エリア間の連系は1点が多く、連系送電線の容量が小さいです。これは、戦後の9電力体制では、各エリアの電力系統の独立性が高く、他エリアに事故を波及させないようにするためです。なお、欧州では国の間の連系線が多く、電力系統がメッシュ状になっています⁽⁸⁾。

(3) 再エネ主力電源化に向けた電力系統の技術的課題と対応

出力が絶えず変動する再エネを電力系統に大量導入する際の技術的な課題とその対応の方向性について表2に示します。

電力広域的運営推進機関（OCCTO）は、将来の再エネ電源対応およびレジリエンス向上のため、全国大での広域連系系統のマスタープランの中間整理⁽⁹⁾を2021年5月にとりまとめ、2022年度中に完成予定です。中間整理によると、洋上風力発電が45GW導入される場合（電源偏在シナリオ）の投資規模は約3.8兆円から4.8兆円と試算されました。また、北海道と本州を結ぶ海底直流送電などの必要性が高いルートは具体化を検討しています。

また、再エネの大量導入により、電力需給は大きく変化しました。図1に再エネの導入が最も進んでいる九州エリアの例を示します。2018年5月3日（木）は大型連休中で、年間で最も需要が低い時期ですが、日射条件が良く12時の断面で太陽光発電が需要の約81%を占めました。太陽光発電の出力制御を可能な限り回避するため、火力発電の出力を最小限に絞るとともに、従来は夜間に揚水運転していた揚水発電所を昼間の太陽光発電の余剰分を用いて揚水運転するなど、発電所の役割

表2 再エネ主力電源化に向けた電力系統の技術的課題と対応

課題	問題点と対応状況
①再エネの送電容量の確保	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 大規模再エネの適地と大規模需要地が離れ、送電線容量が不足。局所的なアクセス線容量不足も発生。 ● 空間的ギャップ ⇒ 日本版コネク&マネージによる対応、地域間連系線の強化、将来の再エネポテンシャルを踏まえたマスタープランの作成
②再エネの出力変動への対応	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 電力の需要と供給は常にバランスを取る必要があり、現在は調整力として火力・揚水発電に依存。 ◆ 再エネ増加に伴い調整力が不足すると、再エネの出力制御が増加の懸念 ● 時間的ギャップ ⇒ 火力発電の調整力の維持、グリッドコードの整備、需給調整市場の整備、EVなど分散型エネルギー資源(DER)の活用
③系統の安定性の確保	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 再エネ(非同期電源)増加により慣性力が不足し、大規模電源脱落などに広域停電のリスクが高まる。 ● 直流と交流のギャップ ⇒ 一定量の同期電源の維持、同期調相器の設置、疑似慣性力機能の導入

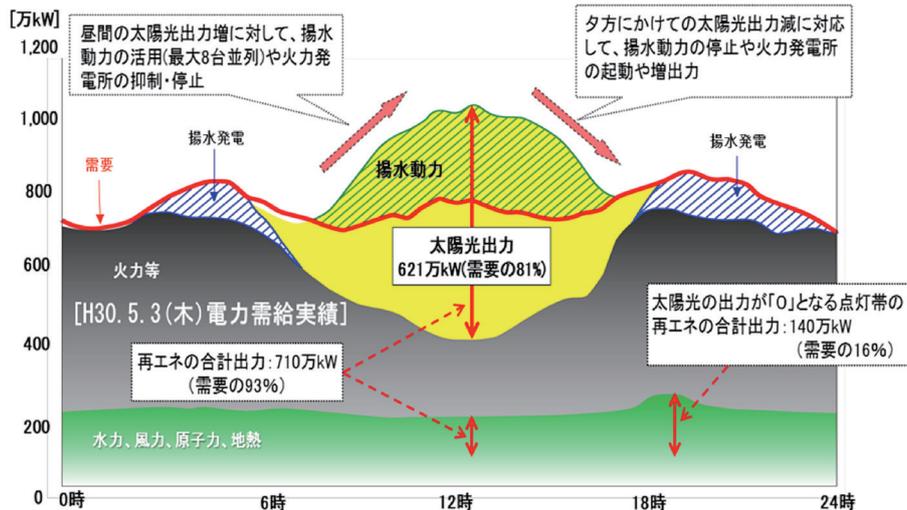


図1 再生エネ大量導入による電力需給の変化⁽¹⁰⁾

が大きく変化しました。

一般送配電事業者10社が会員である送配電網協議会は、2021年5月に「2050年のカーボンニュートラルに向けて～電力ネットワークの次世代化へのロードマップ」⁽¹¹⁾を公表しました。これによると、2050年の再生エネ電源比率は、電力量(kWh)で50%程度、最大電力(kW)で90%超としています。既存系統の有効活用や系統整備とともに、需給調整・系統安定化技術の高度化、遠隔分散型グリッドの導入などの方策が示されています。

4. 地域エネルギー供給の新たな可能性

大規模電源、長距離高電圧送電が中心であった電力システムから、地域の再生エネや需要家側資源を含む分散型エネルギーリソース(DER)を活用する分散型システムへの転換への動きが、地域の自治体や新電力を中心に進んでいます。これは、近年の台風などの自然災害の激甚化による長時間停電の増加により、災害に対するレジリエンスの観点からも注目されています。

例えば、CHIBA むつざわエナジー（千葉県睦沢町）が供給するスマートウェルネスタウンは、2019年9月の台風15号による系統電力の長期間停電時において、タウン内の道の駅およ

び住宅への電力供給を可能としました⁽¹²⁾。また、電気自動車(EV)は、大容量蓄電池を分散型電源として活用する系統安定化への貢献、動く蓄電池として停電時の電源確保など、電力システムと一体となった運用が期待されます。

ドイツのシュタットベルケ（電気、ガス、水道、交通などの公共インフラを整備・運営する自治体出資の公的企業）は、地方自治体単位でエネルギー・交通などの公共サービスを提供する公益事業体の成功例とされています。日本の地域エネルギー供給システムは、現時点では収益性を確保するビジネスモデルが十分に描けていない課題がありますが、2020年の電気事業法改正により創設された配電事業ライセンスの活用などの制度面の整備を含め、今後の展開が期待されます。

5. 最後に

2011年の東日本大震災を契機に加速した電力システム改革により「一般電気事業者」の制度がなくなり、安定供給は各事業者がそれぞれの責任を果たすことにより確保されることになりました⁽¹³⁾。電力システム改革は、広域的運用と市場メカニズムにより効率的な安定供給確保を目指していますが、電力供給の最終責任を誰が担うかは不明確になりました。

中長期的な観点からの供給責任を担保する仕組みとして容量市場が創設されましたが、2020年9月の初回入札では上限価格での落札となりました⁽¹⁴⁾。また、2020年12月から2021年1月の寒波および液化天然ガス(LNG)不足などに起因する需給逼迫時に、日本卸電力取引所(JEPX)のスポット価格が高騰する⁽¹⁵⁾などの市場メカニズムの課題が発生しています。このように新たな市場を作り、失敗のたびにそれを運用面の問題とすることが繰り返されています。各事業者は複雑な制度と向き合い、問題が顕在化するたびに将来の事業が見通せない状況に陥っています。

また、カーボンニュートラルの達成に向けて、非効率な石炭火力のフェードアウトの方針⁽¹⁶⁾が示され、石油火力は稼働率低下による採算性悪化などによる廃止が計画されるなど、火力発電の供給力低減が加速すると見通されます。

再エネの大量導入に向けて、現在の電力の安定供給は、「旧一般電気事業者」の長年のDNAである「使命感」により保たれてきた側面があります。電力・エネルギー分野は、制度が複雑で理解が難しい反面、これまで何とか安定供給が確保されてきたことから国民の関心が低いですが、大きな分岐点に立っています。

一度低下した供給信頼度を元に戻すことは容易ではありません。今後の電力システムの制度設計においては、各事業者が責任を持って安定供給を支える意識とともに、事業者の健全な投資意欲を引き出す工夫、社会全体で電力の安定供給とそれに見合ったコストをどのように負担していくかの議論が求められています。

参考文献

- (1) 竹内 「2050年のエネルギー産業－日本のエネルギー大転換－」, 経済産業省 次世代技術を活用した新たな電力プラットフォームの在り方研究会, 2018年10月30日
- (2) 経済産業省 「エネルギー基本計画」, 2020年10月
- (3) 資源エネルギー庁 「2050年カーボンニュートラル

の実現に向けた検討」, 経済産業省 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会, 2020年12月21日

- (4) International Energy Agency, “Net Zero by 2050,” May 2021
- (5) 日本風力発電協会, 「洋上風力の主力電源化を目指して」, 経済産業省 洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会, 2020年12月15日
- (6) 太陽光発電協会 「太陽光発電の現状と自立化・主力化に向けた課題」, 経済産業省 調達価格等算定委員会, 2021年10月29日
- (7) 資源エネルギー庁, 「国内外の再生可能エネルギーの現状と今年度の調達価格等算定委員会の論点」, 経済産業省 調達価格等算定委員会, 2021年10月4日
- (8) 資源エネルギー庁, 「系統制約の緩和に向けた対応」, 2018年1月24日
- (9) 電力広域的運営推進機関, 「マスタープラン検討に係る中間整理」, 2021年5月20日
- (10) 九州電力(株), 「再エネ出力制御に向けた対応状況について」, 2018年10月
- (11) 送配電網協議会, 「2050年のカーボンニュートラルに向けて～電力ネットワークの次世代化へのロードマップ」, 2021年5月
- (12) パシフィックパワー(株), 「自治体新電力「CHIBA むつざわエナジー」の地域資源を生かした防災エネルギー拠点づくり」, 環境省シンポジウム, 2019年10月31日
- (13) 資源エネルギー庁, 「電力システム改革の概要」, 2014年10月
- (14) 電力広域的運営推進機関, 「容量市場メインオークション約定結果」, 2020年9月14日
- (15) 資源エネルギー庁, 「今冬の電力スポット市場価格高騰に係る検証について」, 経済産業省 電力・ガス基本政策小委員会, 2021年2月17日
- (16) 資源エネルギー庁 「石炭火力検討ワーキンググループ 中間取りまとめ概要」, 2021年4月23日

水素エネルギーシステムへの期待

石本 祐樹 (プロジェクト試験研究部
水素グループ 副部長)



1. 最近の水素への高い期待の理由

最近の水素への期待の高まりについて、「カーボンニュートラル」に起因する複数の理由が考えられます。

カーボンニュートラルを達成するには、原則的にすべての部門で対策を取る必要が生じ、対策の難しい部門でも導入が検討されています。また、一次エネルギー源を脱炭素するため、再エネの導入量が増加しますが、風力や太陽光は気象条件によって変動するため、エネルギー貯蔵技術としての水素およびエネルギーキャリアが求められる可能性があります。さらに、需要と供給のバランスから脱炭素できる資源が地域内で十分に調達できない場合は、地域外からの輸送技術としての水素およびエネルギーキャリアが求められます。

2. 水素のカーボンニュートラルへの寄与

カーボンニュートラルへの水素の寄与を一

言で表現すると、「水素が持つエネルギーの輸送・貯蔵の性質により、エネルギー分野、産業分野の様々な需要を直接・間接に脱炭素する」となります。

図1に水素サプライチェーンとそのカーボンニュートラルへの貢献を示します。エネルギー利用に起因する二酸化炭素(CO₂)排出を削減するには、エネルギーのサプライチェーンを通して発生するCO₂を削減する必要があります。水素は利用時にCO₂を排出しないため、製造・輸送時にCO₂を排出しないようにすることによりサプライチェーン全体でCO₂を排出しないようにすることができます。ただし、CO₂を利用して炭素を含む合成燃料を製造・利用する場合はこれから除かれます。また、水素のサプライチェーン構成する機器の製造・廃棄に伴うライフサイクルのCO₂排出を考慮することも必要ですが、社会全体のCO₂排出量が低下することでこのようなCO₂排出も低減していくと思われま

図1に示すように水素のサプライチェーン

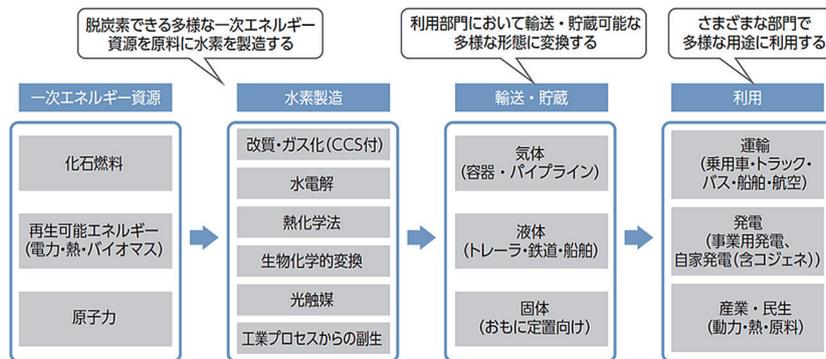


図1 水素サプライチェーンとそのカーボンニュートラルへの貢献⁽¹⁾

は、一次エネルギー、水素製造技術、貯蔵輸送技術、利用技術、輸送規模を組み合わせることで、新規なエネルギーのサプライチェーンの創出、または、現在のエネルギーのサプライチェーンを代替できる可能性があります。カーボンニュートラルの目標に対する水素への期待の高まりは、様々な分野を脱炭素できる多様性にも起因していると考えられます。

一方、この多様性のため、技術オプションの組み合わせの自由度が高く、関係するステークホルダーも多様であるため、水素導入を詳細に検討するとすぐに導入できる技術と社会実装までに時間が必要な技術が混在しています。この点が水素に対する期待と不安が交錯している一因であると考えられます。本稿では、水素のサプライチェーンの段階ごとにその特徴を述べ、続いて、サプライチェーン全体に影響する日本と世界の水素に関連した政策について述べます。

なお、水素エネルギーという言葉について、水素は二次エネルギーで一次エネルギー資源から変換するため、水素エネルギーという言葉は適切ではないと指摘される場合もあります。ここでは、水素のサプライチェーンがエネルギーを輸送・貯蔵するエネルギーシステムであると考え水素エネルギーという言葉を使うこととします。

3. 技術開発の方向性

水素は、石炭、石油、天然ガスなどの化石資源、水力、風力、太陽光などの再生可能エネルギー（再エネ）からの電力を用いた水の電気分解、発酵などによる生物化学的な水素製造、集光型の太陽熱や高温ガス炉という方式の原子炉からの熱を用いた熱化学法、太陽光と光触媒を用いて水を分解するなど様々な一次エネルギーから製造可能です。また、製品を生産する過程において、製品とは別に水素が発生する場合があります、これらを副生水素と呼んでいます。代表的な副生水素発生源は、水酸化ナトリウム（苛性ソーダ）の製造工程や、製鉄所のコークス製造工程です。副生水素の経済的な競争力は高い一方、副産品であるため、製造量は主製品の生産量に依存します。したがって、普及初期は、新規の設備導入が不要な副生水素や既存設備の設備利用率を上げるなどによって水素を製造することが経済的に有効と考えられます。中長期的には、カーボンニュートラル達成の要求からCO₂排出量制約や水素需要の増大が見込まれ、炭素回収・貯留（CCS：Carbon Capture and Storage）を行った化石燃料由来の水素、再エネ由来の水素への移行が必要となります。

図2に様々な水素製造技術の成熟度評価

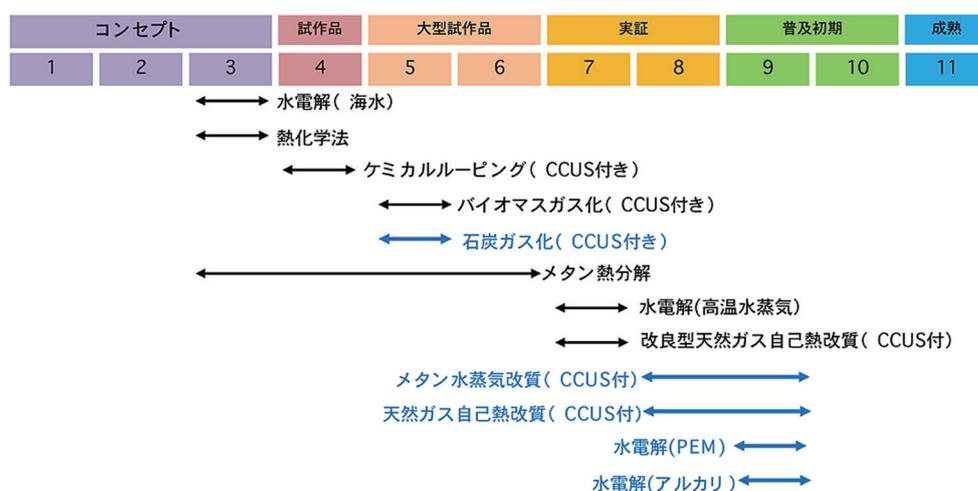


図2 水素の技術成熟度の分布 (2)

(TRL : Technology Readiness Level) を示します。TRL は、NASA (米航空宇宙局) などが技術開発時に用いる指標として開発されたもので、実環境で利用できる技術レベルを TLR 9 として TRL 1 ~ 9 の 9 段階で表示することが多いですが、図の例は、普及も含めて 11 段階で整理しています。天然ガスの水蒸気改質や石炭ガス化による水素製造は、成熟技術ですが、CCS を備えた技術について実証から普及初期という評価になっています。また、アルカリ水電解は、産業分野では成熟技術ですが、エネルギー向けには大型化や低コスト化が必要ということから普及初期という評価をしていると思われます。政府・研究機関などの将来想定・分析では、図 2 で青色の矢印で示した CCS 付き化石燃料改質や水電解が量的な寄与をすると期待されています。しかし、利用可能な資源や水素製造規模など技術の多様性を考慮しますと、これらの技術のみに限定せず、TRL の比較的低い技術への投資も継続することが必要と考えられます。

図 3 に水素の色分けの例を示します。色分けの意図は、特定の原料や製造法の水素を市場で優遇もしくは排斥するためであると考えられます。色分けは、原料と製造水素あたりの CO₂ 排出量の組み合わせで行われることもあります。しかし、CO₂ 排出を計上する範囲と閾値には任意性があり、それがそれぞれの水素製造技術の評価や普及に及ぼす影響を注視することが重要です。評価指標は、水素の「よさ」をバランスよく示すことが求められ、水素の「よさ」を CO₂ 排出量に基づく色だけで評価するのはミスリードの可能性があり、水素を含んだエネルギー利用技術全体について、

温室効果ガスの排出量やその他の環境負荷を含む環境性、経済性、労働や健康といった社会性を含む総合的な評価が求められます。

4. 水素輸送・貯蔵技術

一般に物質を大量に輸送する場合、重量密度や体積密度の高い状態で輸送することが経済的です。水素を輸送する場合、圧縮することが簡便ですが、高い圧力では、水素の気体の性質が理想気体から外れていくため、圧力の増加分ほど密度が増加しなくなります。また、圧力に耐えるため、容器の肉厚が増加し、輸送の効率は徐々に低下します。そこで、水素の密度を高め、移送などの取り扱いが容易になるなどの利点があるため、水素を冷却や化学反応により液体にする輸送方法が開発されました。このような水素を輸送するための担体をエネルギーキャリアと呼びます。エネルギーキャリアに変換する場合、液化や化学反応の際の熱や電力の供給、設備が必要となり、用いる物質により特性が異なります。アンモニアや合成メタンは、水素に戻さず直接利用する場合も多いと想定されるため、本稿では、これらを「エネルギーキャリア」と呼んでいます。広義のエネルギーキャリアは、他の二次エネルギーを含む場合もあるので留意して下さい。

水素の輸送・貯蔵技術は、輸送距離や経路、輸送・貯蔵量、貯蔵期間、輸送先の需要技術により、適切な選択を行う必要があります。図 3 にモード別の水素およびエネルギーキャリアの輸送範囲を示します。本図で示す輸送範囲は、輸送方法の特性や経済性を考慮して



図 3 水素の色分けの例 (3) (4)

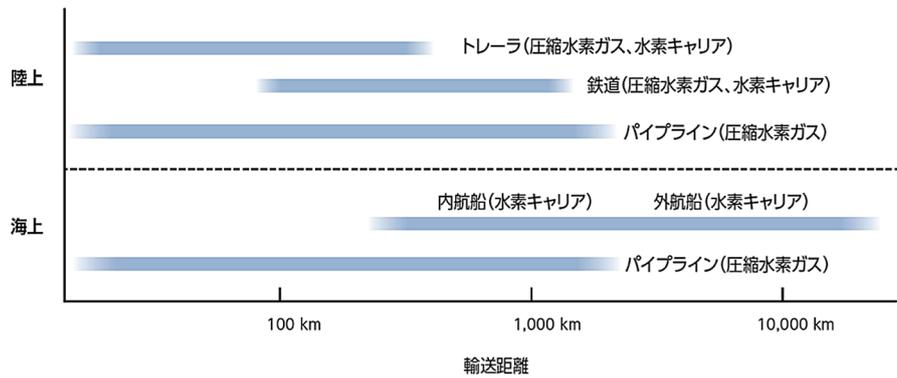


図4 モード別の水素およびエネルギーキャリアの輸送範囲⁽¹⁾

いますが、条件によっては、範囲外での適用も可能な場合もあるでしょう。陸上では、トラック、鉄道、パイプラインによる輸送が、海上では、船舶（内航船、外航船）とパイプラインによる輸送が可能です。当研究所の分析によれば、輸送距離の増加とともに経済的な輸送手段が、トレーラ、鉄道、船舶の順に変化していく結果を得ています。

輸送手段は、需要量や距離のほか、用途などを考慮して最適な輸送方法を選ぶことになります。また、輸送元と輸送先が長期間決まっている場合は、パイプラインも重要な選択肢です。さらに、輸送貯蔵技術に限りませんが、新たな水素関連機器の規制の最適化も重要な課題です。

図5に液体のエネルギーキャリアとして研究や実証が進められている液化水素、メチルシクロヘキサン（MCH）などの有機ヒドライド、アンモニア、メタン（合成メタン）の特徴を示します。これらエネルギーキャリア

の特性、各工程の技術的な成熟度は異なり、さらに用途や供給する条件によりエネルギーキャリアの優位性も変化するため、一般論としての「最適なキャリア」はなく、想定するサプライチェーンの条件を考慮して利用するエネルギーキャリアが選ばれることになるでしょう。また、輸入を想定する場合、チェーンの大型化や原料水素コストのさらなる低減も日本到着時の水素コスト低減に有効です。

図6にエネルギーキャリアを用いた水素の国際輸送の経済性分析結果を示します。主な分析条件は、日本への輸入水素量25億m³N/年、設備利用率90%、輸送距離10,000km、日本側貯蔵日数使用量の36日分、プラント寿命30年、割引率5%、2030年を想定しています。図6に示すように、日本輸送時の水素コストに大きな差はなく、キャリアそれぞれにコストに寄与する部分が異なるため、重点的にコスト低減を検討する技術分野が異なることが分かります。また、海外で製造する水

圧縮水素	産業分野で多く用いられている水素の輸送形態。
液化水素 H ₂ (< 20K)	重量当たりエネルギー密度が高く、高純度水素が供給可能。 液化機の大規模化や高断熱の貯蔵タンク、タンカーの開発、低コスト化が必要。
メチルシクロ ヘキサン	常温、常圧で液体のため、貯蔵・輸送に既存の石油インフラが使用可能。 脱水素プロセスが吸熱反応のため、低反応温度化、安価な熱源の探索。
アンモニア	毒性があるが、国際貿易されている化学物質として管理されたプラント内では取り扱いの手段確立。 直接利用技術が実用化されれば、効率の向上が見込める。
メタン	CO ₂ と水素から合成、天然ガスの主成分で、既存インフラや機器が利用可能 CO ₂ の調達、メタネーション技術の大規模化、利用後のCO ₂ の帰属などの制度設計などが課題

図5 エネルギーキャリアの特徴

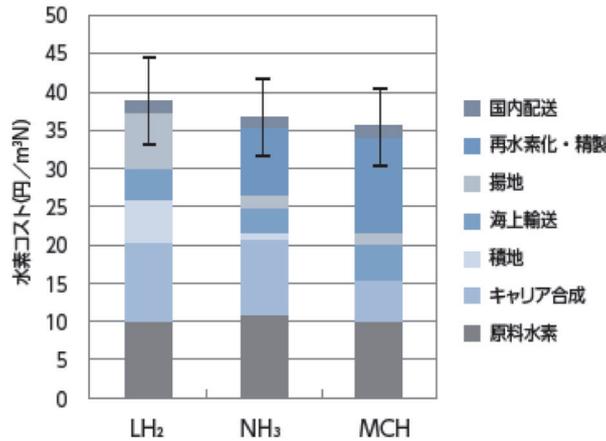


図6 エネルギーキャリアを用いた水素の国際輸送の経済性分析結果⁽⁵⁾

素は約9円/m³Nと安価な水準を想定していますが、さらなる水素コストの低減も日本到着時のコスト低減につながります。

5. 水素需要技術

世界全体の水素利用技術の量的ポテンシャルと市場シェアの分析例を図7に示します。それぞれの円の大きさが量的ポテンシャルを、横軸がそのセグメントでの潜在的な市場シェアを示しています。

水素の需要量が多い技術は、発電、トラック、乗用車（小型・中大型）、業務用車両（バンなど）の燃料、高温の熱利用、ガス導管への注入、炭素有効利用（CCU）との組み合わせによるメタノールなどの製造、製油所、アンモニア・メタノール製造です。また、高い市場シェアが期待されるのは、アンモニア・

メタノール製造、製油所、フォークリフト、業務用車両（バンなど）です。多くの需要技術での利用が期待されるが、原料として水素を用いる場合を除いて、水素は動力・熱に変換して用いるため、バッテリーや代替燃料などとの競合が生じます。貯蔵量や輸送距離、需要技術の効率など、それぞれの特性により、ユーザーが水素または競合技術を選択するでしょう。また、国際エネルギー機関（IEA）の「エネルギー技術の展望2020」(ETP2020)⁽⁶⁾のSDS（Sustainable Development Scenario, 2070年カーボンニュートラル）においては、2050年に世界全体の電解水素、炭素回収・有効利用・貯留（CCUS）付きの化石燃料由来の水素製造量の割合は、それぞれ約50%で、水素需要量は、現在の3～4倍の規模となっています。

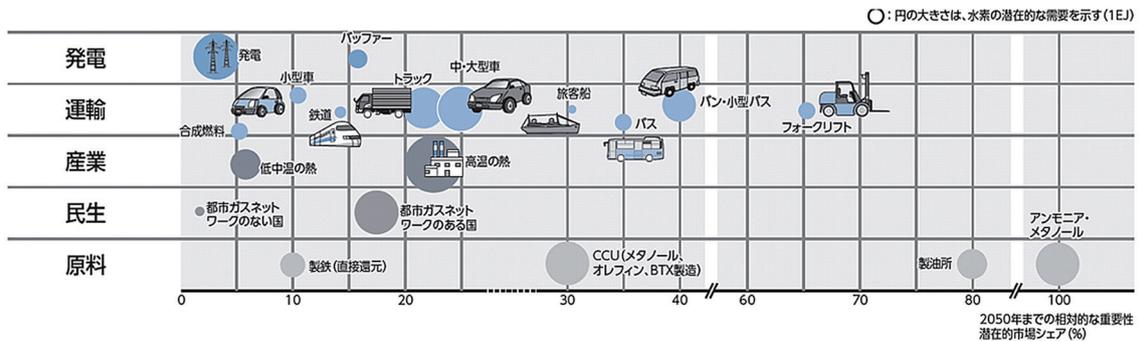


図7 世界全体の水素利用技術の量的ポテンシャルと市場シェアの分析例⁽⁷⁾

6. 各国の動向

日本における政府のプロジェクトによる大規模な水素・燃料電池の研究開発は、1978年のムーンライト計画とその後の「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プロジェクト」(WE-NET: World Energy Networkプロジェクト)に始まり現在に至っています。

2011年の東日本大震災とそれに伴う原子力発電所の事故により、日本における水素の位置づけが大きく変化しました。それまで水素は、燃料電池自動車を中心とした運輸部門やエネファームなど定置部門における利用が主に想定されていましたが、2014年のエネルギー基本計画において、水素を発電部門で大規模に利用することが言及されました。2020年12月の

2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略⁽⁸⁾では、水素導入量について2030年最大300万トン、2050年2000万トンの目標値が設定されました。これら一連の水素関連政策の流れのうち、近年の概要を図8に示します。文書は、エネルギー政策を所管する経済産業省資源エネルギー庁の名前で作成されているものが多く、予算規模も大きいですが、省庁間にまたがる内容は内閣官房、大学や研究機関の基礎研究は文部科学省、道路や船舶、建物に関連する内容は国土交通省、CO₂削減の実証事業やCO₂削減量の評価手法開発などを環境省が行うなど、水素に関連するプロジェクトを実施する省庁の範囲は広いです。

図9に各国の水素政策の概要を示します。日米欧中を中心に世界各国で水素の戦略や

<p>水素基本戦略：2017年12月 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議（内閣官房）</p> <ul style="list-style-type: none"> 政府全体の水素に関する取り組みの戦略 低コスト水素利用、国際水素サプライチェーン開発、国内再エネ導入拡大と地方創生、電力部門での利用、モビリティでの利用、産業利用、FC技術活用、革新的技術活用、他 導入目標と解釈できる数値が公表。
<p>第5次エネルギー基本計画：2018年7月（エネ庁）</p> <ul style="list-style-type: none"> 2050年に向けた日本のエネルギー需給の長期的なビジョンを示す。 再エネの主力電源化、調整力の脱炭素化、送電ネットワークの次世代化（送電事業効率化、投資、制度改革） 水素社会実現に向けた取り組みの抜本強化
<p>水素・燃料電池戦略ロードマップ：2019年3月改訂 水素・燃料電池戦略協議会（エネ庁）</p> <ul style="list-style-type: none"> 2019年3月改訂、水素・燃料電池戦略協議会による文書。 水素戦略の目標を達成するための2025年、2030年の技術性能・コスト目標を設定、そのためのアクションプランを決定。有識者WGで分野ごとのフォローアップを実施（6月）。
<p>水素燃料電池技術開発戦略：2019年9月 水素・燃料電池戦略協議会（エネ庁）</p> <ul style="list-style-type: none"> ロードマップの目標を達成するため、6月の課題共有ウィークの議論に基づき、重点分野を抽出。
<p>2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略：2020年12月</p> <ul style="list-style-type: none"> 温暖化対策を「成長の機会」と捉える時代に突入したと認識 予算、税、規制改革・標準化、国際連携など、あらゆる政策を盛り込んだ実行計画を定めた14の重要分野に水素が含まれる。 2030年に水素導入量を最大300万トン（含むアンモニア）とすることを目指すなど高い目標。

図8 近年の日本の水素政策の流れ

<p> 大規模に水素製造利用を推進</p> <ul style="list-style-type: none"> 水素基本戦略等一連の政策文書が整備 海外からの輸入も想定し、FCV、水素ステーション導入、海外水素インフラ実証、Power to gasプロジェクト等を進める グリーンイノベーション基金など大型政策 	<p> 水素は再エネ導入のための手段</p> <ul style="list-style-type: none"> 2020年7月に水素戦略を発表 HORIZON Europeで研究開発を推進。 再エネからの水素製造、産業・自動車以外の水素利用も盛んに検討 再エネ水素の「認証」など制度面も整備
<p> 足元からの普及を重視</p> <ul style="list-style-type: none"> 複数年計画で研究開発を実施、評価ツールの整備も実施 フォークリフトなどニッチでも競争力がある機器の普及が進む。 自国資源による水素製造・利用（H2@Scale） Earth Shotによる水素製造コストの大幅引き下げ計画（10年で1USD/kgを達成） 	<p> 国主導で産業育成・導入</p> <ul style="list-style-type: none"> 第13期五か年計画で水素・燃料電池技術を明言 産業連盟による業界団体設立、ロードマップ作成 導入分野は運輸部門（バスや商用車）が中心 重点都市を指定して普及を競わせる

図9 各国の水素政策の概要

ロードマップが策定されています。また、資源国（豪州、カナダ、中東、南米）を中心とした低炭素水素の供給（輸出）に向けた動きも活発になっています。

7. まとめ

水素は、様々な脱炭素の一次エネルギー資源と多様なエネルギー需要技術を結ぶ媒体として、エネルギーシステムのカーボンニュートラルの達成に寄与することから、近年水素への期待が高まっています。その水素は二次エネルギーであり、様々な一次エネルギー資源から製造することができます。また、圧縮・液化などの状態変化や化学変化により輸送・貯蔵可能な状態・物質に変換し、多様な技術で利用可能です。本稿で述べた水素およびサプライチェーンの特徴から、水素は、エネルギーシステムをカーボンニュートラルとするための黒衣としての働きを担うと言ってよいでしょう。

参考文献

- (1) (一財)エネルギー総合工学研究所,『図解で分かるカーボンニュートラル』,技術評論社,2021年9月
- (2) <https://www.iea.org/articles/etp-clean-energy-technology-guide>
- (3) The North American Council for Freight Efficiency, (<https://nacfe.org/emerging-technology/electric-trucks-2/making-sense-of-heavy-duty-hydrogen-fuel-cell-tractors/>)
- (4) CertifHy, <https://www.certify.eu/>
- (5) 水野有智,石本祐樹,酒井奨,坂田興,「国際水素エネルギーキャリアチェーンの経済性分析」,エネルギー・資源,2017年5月
- (6) International Energy Agency, Energy Technology Perspectives 2020, (September 2020)
- (7) Hydrogen Council, “Hydrogen, Scaling Up” (2017)
- (8) 経済産業省,「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」,2020年12月

ネガティブエミッションの役割

加藤 悦史 (プロジェクト試験研究部
地球環境グループ 副部長)



1. 世界全体での人為的 CO₂ 排出の推移

産業化以降の人類の活動により、化石燃料の利用により排出される二酸化炭素 (CO₂) は増加の一途を辿ってきました。2020 年の世界全体での化石燃料および産業プロセス由来の人為的 CO₂ の排出量は、新型コロナウイルスのパンデミック (世界的大流行) の影響により、 $34.8 \pm 2 \text{ Gt-CO}_2$ と、2019 年より大きく減少しました。ただし、この減少は一時的なもので、2021 年の排出推定値は $36.4 \pm 2 \text{ Gt-CO}_2$ と、2020 年より 4.9% 上昇しています。この値は、前年の 2019 年排出量とほぼ同等であり、図 1 で示しますように、過去の排出トレンドの延長上にあります。

人為的に排出された CO₂ は、地球規模の炭

素循環によってどのような収支になっているのでしょうか。この 10 年を見ると、図 2 に示しますように、排出の 89% が先ほどみた化石燃料および産業由来の排出となっています。その他に、森林伐採など土地利用の変化による排出が 11% を占めます。一方、排出された CO₂ は、陸域生態系と海洋によって、それぞれ 29% と 26% が吸収され、残りの 48% が大気中に残存しています。

このような CO₂ の排出と吸収のバランスにより、図 3 に示しますように、大気中の CO₂ 濃度は増加し、産業化前の 280ppm から現在の 415ppm を超える値となっているわけです。また、累計でみた産業化以降の人類の CO₂ 排出量は 2475 Gt-CO_2 と推計されています。

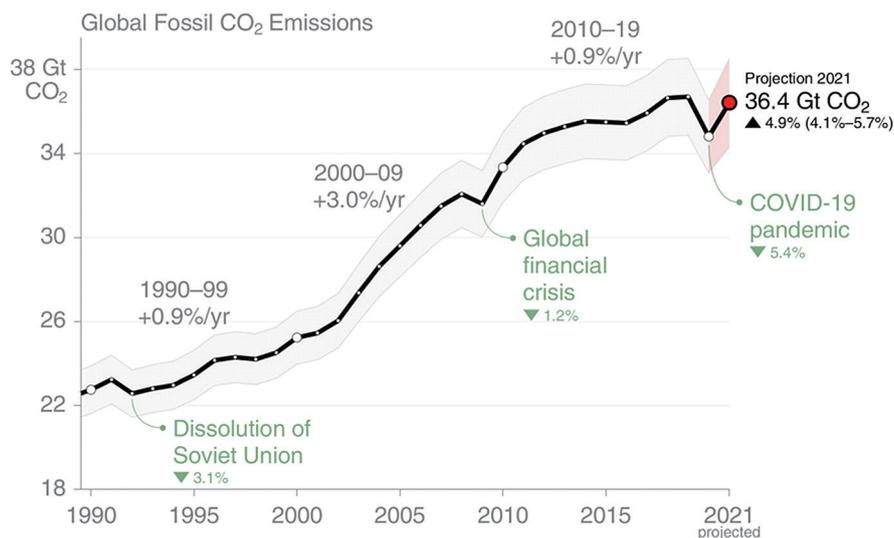


図 1 化石燃料起源および産業プロセスからの CO₂ 排出 (1)

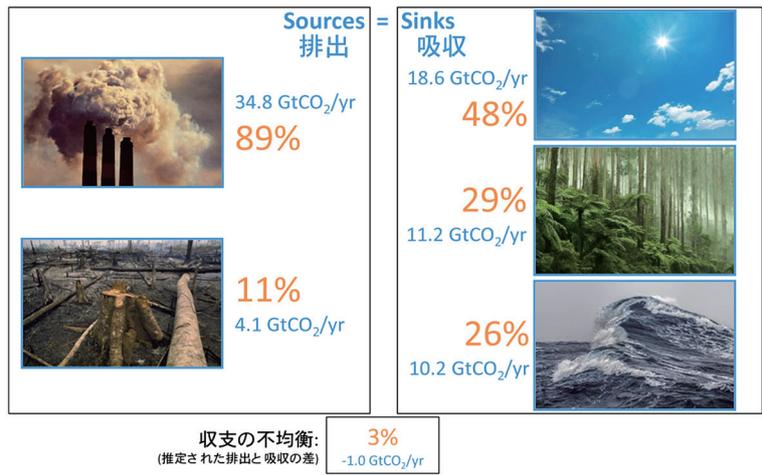


図2 人為的 CO₂排出の行方 (1)

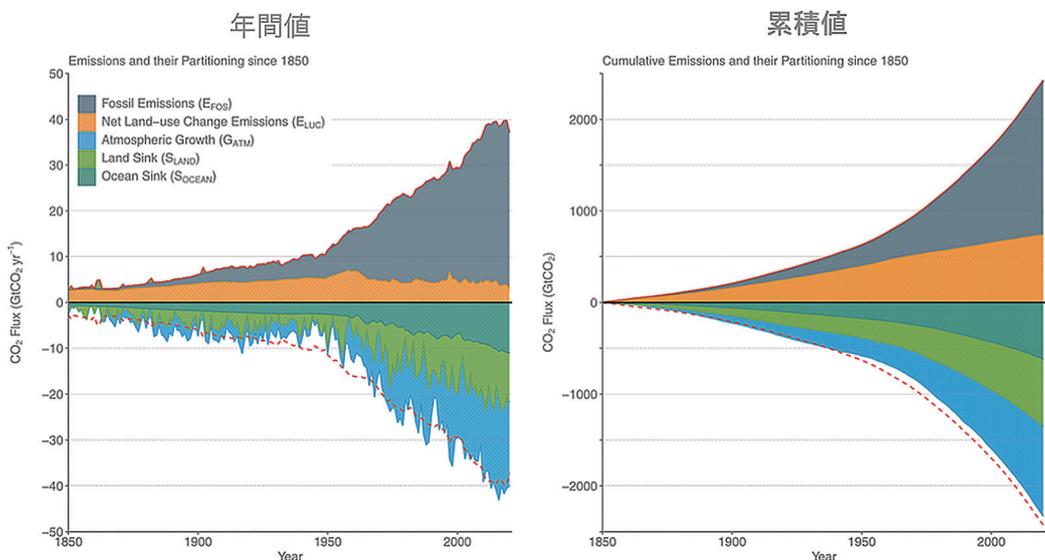


図3 産業化以降の人為的な CO₂排出と吸収のバランス (1)

2. パリ協定の長期目標と炭素管理の必要性

2015年11月の国連気候変動枠組条約第21回締結国会議(COP21)においてパリ協定が採択され、すでに5年以上が経過しました。依然として世界全体の排出量はパリ協定が目指す経路とは大きく乖離しているわけですが、2020年前後より、今世紀半に向けたカーボンニュートラルへの各国の戦略表明が進み始めています。つまり、パリ協定の第4条1項に

書かれている、「できる限り早期に世界の温室効果ガス(GHG)の排出量をピークアウトし、今世紀後半には人為的な温室効果ガス(GHG)の排出と吸収による除去の均衡」、つまり人為的なGHG排出を正味でゼロ(ネットゼロ)にする長期目標に整合的な動きが各国から表明されているわけです。

2021年8月、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)から出版された第一作業部会の「第6次評価報告書」では、最新の気候科学のレビューにより、産業化以降の温暖化を

1.5°C, 1.7°C, 2°C に抑えるための「残余カーボンバジェット」が記載されています。産業化以降の人為起源の累積の炭素排出と温暖化のレベルには直線的な関係があるので、温度上昇をあるレベルまで抑えるためには、人為的な排出量の累積値の上限がおおよそ決まるというわけです。1.5°C, 1.7°C, 2°C に抑えるための残余カーボンバジェットは、図4に示しますように、それぞれ420 GtCO₂, 770 GtCO₂, 1270 GtCO₂であり、現時点の排出が今後続く場合には、残りはそれぞれ11年, 20年, そして32年分となります。

このように、パリ協定の長期的な温度抑制目標の達成には、今後排出可能なCO₂の量には厳しい制約があり、気温上昇を1.5度以下に抑える排出シナリオでは、2050年頃に世界

全体の排出量がネットゼロCO₂となる経路が描かれています。

図5では、各シナリオのネットCO₂排出(実線)と総排出量(灰色面)と総吸収量(0以下の黄色およびオレンジ面)が描かれています。この総吸収量を達成するために必要とされる技術が、大気中から人為的にCO₂を除去するネガティブエミッション技術(NETs: Negative Emissions TechnologiesあるいはCDR: Carbon Dioxide Removal)と呼ばれるもので、これは典型的な4つの経路すべてに必要となります。

このうち「P3シナリオ」を例にとり、その排出経路の内訳を図6で説明します。まず、2030年から2055年頃に向け、各エネルギーセクターの急激な排出削減が必要となります。発電および民生部門に関しては、長期的にはほぼゼロエ

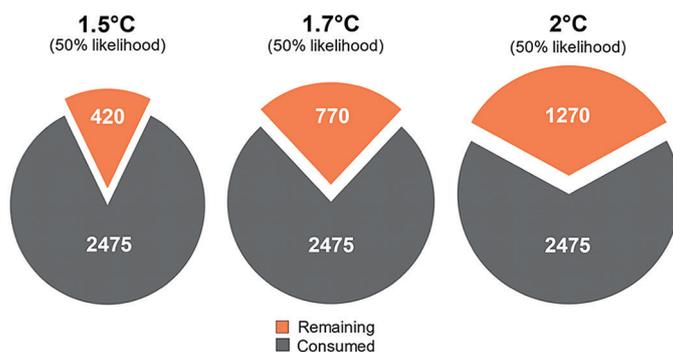


図4 残余カーボンバジェット (1) (2)

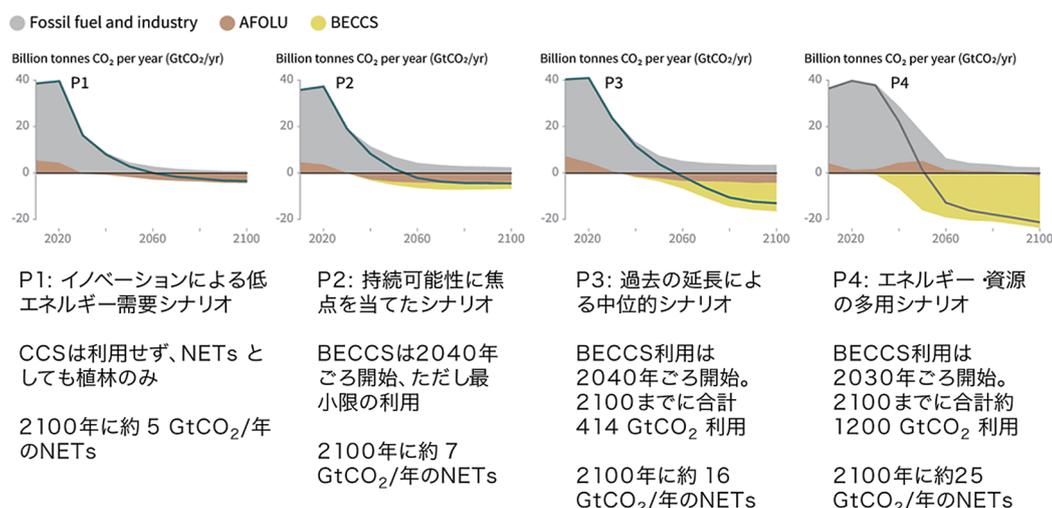


図5 1.5°Cシナリオにおける人為CO₂排出経路の4類型 (3)

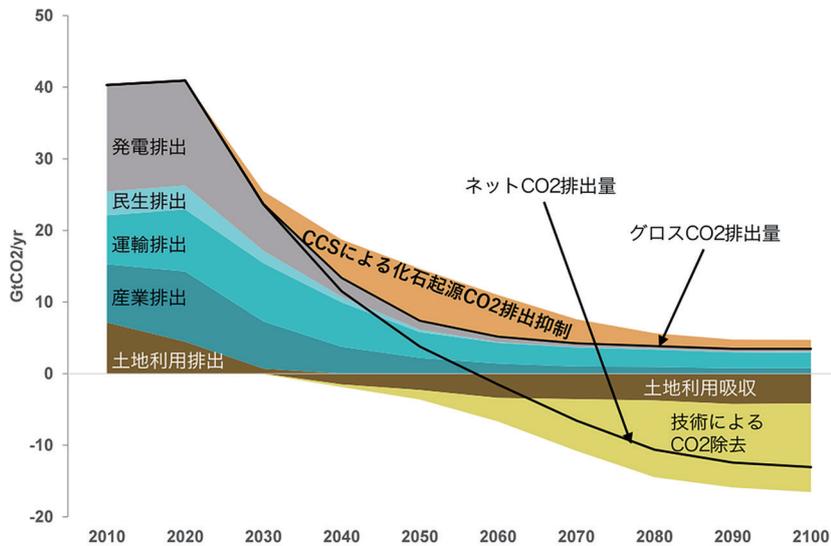


図6 1.5°CシナリオのCO₂排出経路の内訳⁽⁴⁾

ミッション（大気中へのCO₂排出ゼロ）の達成がなされる一方、運輸と産業部門に関しては、「hard-to-abate セクター」と呼ばれる重工業や長距離運輸等の排出が一部残る形になるため、人為的な土地利用や工業的技術にCO₂を除去するネガティブエミッション技術を2030年過ぎから利用していることが分かります。

3. ネガティブエミッション技術詳細とポートフォリオ

このように、大気中のCO₂を除去・隔離する技術が必要となるわけですが、その方法と

して、さまざまな技術が期待されています。主要なネガティブエミッション技術を図7に示します。

大気中から回収したCO₂の隔離時間の違いによって、自然生態系の中へ数十年単位で一時的に大気中のCO₂を移動するものと、地質・鉱物的により長い時間スケールで炭素を隔離するものに分類することができます。技術的に成熟しており、現在でも低コストで利用可能な自然生態系を活用したネガティブエミッション技術の利用開始と、長期間に隔離可能な技術の研究開発実証によるスケールアップが、この10年で求められています。

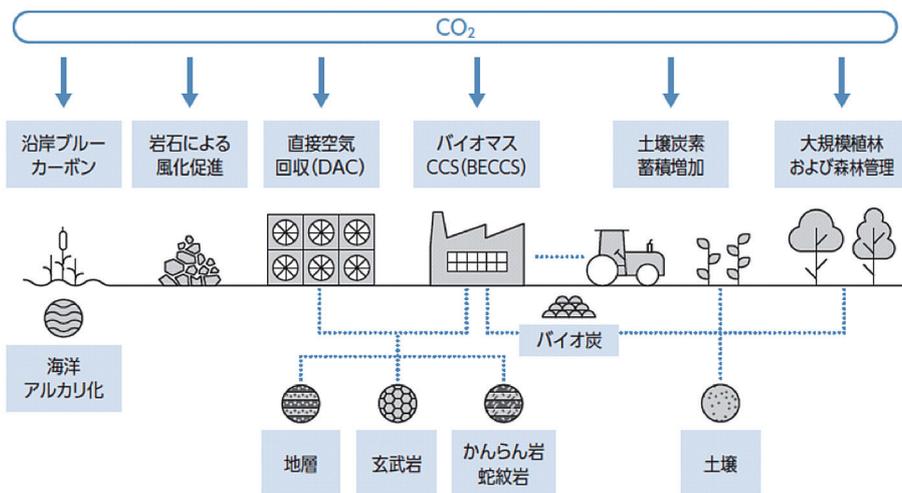


図7 主要なネガティブエミッション技術⁽⁵⁾

4. 直接空気回収に対する関心の高まり

ここ数年、ネガティブエミッション技術のうち大気中CO₂の直接空気回収(DAC: Direct Air Capture)が注目を集めています。DACを開発する民間企業もあり、本稿では3件の海外事例を紹介します。いずれも2010年前後に「スタートアップ」として動き出し、現在では年間1万t-CO₂のスケールの実施段階に移行しつつある状況となっています。

カナダで2009年に設立されたCarbon Engineering社は、アメリカのOxy Low Carbon Ventures社と共同で、「1 PointFive プロジェクト」によって、年間100万t-CO₂規模のDAC設備を2022年建設開始する予定となっています。

スイスでは、2009年設立のClimeworks社が開発したDACが、2021年現在、ヨーロッパを中心として15プラントが稼働中です。2020年にはDAC開発に1.1億ドルの民間投資を受けたことが発表されています。

アイスランドでは、DACと地中でのCO₂鉱物化を組み合わせた「Orcaプロジェクト」で、年間4000t-CO₂を除去する設備(モジュラー型のDAC設備1基で500t-CO₂)が2021年に稼働しました。

アメリカでは、2010年設立のGlobal Thermostat社が以前からDACの低コスト化を表明しています。また、米国エネルギー省から250万米ドルの資金を得たエンジニアリング会社Black & Veatch社がGlobal Thermostatの回収技術を利用し、2021年7月、年間10万t-CO₂のDACCSプロジェクトを開始しています。

5. 様々な課題

これまで見たように、ネガティブエミッション技術の必要性の理解がなされ、研究開発の実施が始まってきていますが、様々な課題の解決が必要です。

まず、ネガティブエミッション技術は、緩

和策の代替ではないという点について、政策的な理解が重要とされています。つまり、1.5°Cの温暖化抑制シナリオ例でも見たように、緩和策とネガティブエミッション技術のいずれも同時に実施していく必要があります。排出削減の目標として、排出総量、除去量を個別に設定する案も考えられています。

また、土地利用ベースの自然生態系を利用した技術(nature based solution)の過大評価に注意することも必要である。例えば、植林として「1兆本の木イニシアチブ」(trillion of trees)が提唱されていますが、利用可能な土地、食糧生産との競合、炭素蓄積増加に関する検証など、炭素除去能力が過大に推定されている可能性も指摘されています。また、生態系を利用するため、気候変化の影響や、実施後の人為的な攪乱によって、大気中にCO₂が放出されるリスクも考慮する必要があります。

一方、海洋ベースの技術については、効果、実施可能な時空間スケール、気候、環境、社会経済との相互作用などについて理解が不十分であり、さらなる研究が求められます。

CO₂除去という目的を達成するためには、制度設計や、実施に向けたインセンティブ設計、およびビジネス化が課題となります。この点において、今世紀半ばから後半にかけて想定されるビジネスの規模は大きいです。つまり、100ドル/t-CO₂の技術を年間10Gt-CO₂規模で実施するのであれば、その市場は年間10兆ドルと想定されています。そのため、すでに自主的炭素市場では大気中のCO₂除去に特化した市場も動き始めており、CO₂除去量の計算ルールとして、透明性の確保、科学に基づいた方法論、国際標準の策定が課題となっています。

6. まとめ

パリ協定の長期目標達成のためには、2030年頃からの大規模なネガティブエミッション技

術の利用が科学的に指摘されていることを見してきました。その後の 2050 年に向けたネガティブエミッション技術のスケールアップの重要性とそのポートフォリオの確立が必要です。

そのためには、コスト的に見合いかつ副作用を避けた土地利用関連のネガティブエミッション技術の早期実施および革新技术(DAC, 鉱物化など)によるスケールアップに向けた研究開発(RD&D)がこの10年で必要です。そのような認識に加え、将来の市場を見込みのもと、RD&D およびガバナンスに向けた動きは着実に動き始めています。

CO₂ 除去の必要量と他の SDGs (持続可能な開発目標) との関連(コベネフィット, 副作用)を総合的に考慮した、地域ごとに最適な技術ポートフォリオによる実施プランを策定する必要があります。

参考文献

- (1) Pierre Friedlingstein et al., "Global Carbon Budget 2021," ESSD, November 2021
- (2) IPCC, "Climate Change 2021 : The Physical Science Basis," August 2021
- (3) IPCC, "Global warming of 1.5°C ," October 2018
- (4) IAMC & IIASA, "IAMC 1.5°C Scenario Explorer and Data hosted by IIASA," August 2019
- (5) (一財)エネルギー総合工学研究所, 『図解でわかるカーボニュートラル』, 技術評論社, 2021年9月

総合工学的視点からの 2050 年カーボンニュートラル

モデレーター	飯田 重樹	(一財)エネルギー総合工学研究所 理事 プロジェクト試験研究部 部長
回答者	黒沢 厚志	プロジェクト試験研究部 地球環境グループ 研究理事
	森山 亮	プロジェクト試験研究部 新エネルギーグループ 部長
	都筑 和泰	原子力技術センター 原子力チーム 部長
	橋崎 克雄	プロジェクト試験研究部 炭素循環エネルギーグループ 部長
	炭谷 一郎	プロジェクト試験研究部 電力システムグループ 部長
	石本 祐樹	プロジェクト試験研究部 水素グループ 副部長
	加藤 悦史	プロジェクト試験研究部 地球環境グループ 副部長

はじめに

飯田：モデレーターを務めさせて頂く水素エネルギーグループの飯田です。皆さんから沢山の質問を頂いています。順番に進めて行きたいと思しますので、よろしくお願い致します。

カーボンニュートラルの背景と国際動向

COP26 の排出権取引が日本に与える影響

飯田：まず始めに、背景的な部分の講演に対する質問で、「COP26 で色々なことが決まったと聞いている。例えば、国際排出権取引は日本に対してどういう影響がありそうなのでしょうか？」という質問です。

黒沢：COP26（国連気候変動枠組条約第 26 回

締約国会議）では、非常に沢山のことを決議しています。その中で、基本ルールに当たる決議として、国際的に協力して温室効果ガス（GHG）の排出を削減していくアプローチがあります。市場メカニズムを利用する場合の枠組みには、政府・国連ベースと民間ベースの 2 つがあります。

政府・国連ベースというのは国と国との取引、民間ベースというのは民間が行ったものを場合によって、国の削減としてお互いに認めるというアプローチです。

そこで、日本は国内だけではなくて海外と協力して削減してお互いにメリットがある形で進んでいけば良いと思っています。

再生可能エネルギーのポテンシャル

浮体式洋上風力の技術開発課題

飯田：次に、再生可能エネルギー（再エネ）

の関係のところ、浮体式洋上風力について質問が来ています。「浮体式洋上風力の技術開発に関する主な課題はどのようなものがありますでしょうか？」という質問です。

森山：浮体式洋上風力は、先ほどの講演の中でもお話した通り、今後の再エネの大量導入に向けた重要な技術の1つだと考えられます。現状では、NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）においてグリーンイノベーション基金の「洋上風力の低コスト化プロジェクト」が実施されており、主に技術課題も含んだ低コスト化に焦点が当てられています。そのプロジェクトでは、浮体式洋上風力を国際競争力のあるコスト水準で商用化することが目標にされています。

低コスト化の方法としましては、浮体を量産化すること、施工技術を工夫することが挙げられています。低コスト化への技術課題としましては、浮体の基礎の最適化、係留システムの低コスト化、高電圧のケーブルによる洋上送電の低コスト化も挙げられています。

再エネ大量導入のための技術課題

飯田：「再エネのポテンシャルを活かして最大限の導入をするためには系統の技術とか、蓄エネルギーなどが必要と考えられるが、どのような技術が必要で、課題はどのようなところにあるのでしょうか？」という質問も来ています。

森山：再エネも大量導入の話とこれからの課題について、私の講演の中でお話しさせていただきました。これにつきましては、先ほどの水素の話だとか電力システムとも深く関わっています。基本的には、再エネの中でもポテンシャルがあるのは太陽光、風力ですので、需給バランスをどうとっていくのかというのが1つの大きな課題です。

それを電力システムで解決する方法、余剰

分を使って水素製造をするという方法など、エネルギー貯蔵技術が必要になるというお話をさせて頂きました。エネルギー貯蔵というのは、エネルギーを生み出すことがないので、設備として追加しますと、おカネだけかかるというふうになります。そこで、この蓄エネルギー技術をいかに安価にするかということが重要になっています。今日は、蓄エネルギー技術の詳細までお話しできませんでしたが、『図解でわかるカーボンニュートラル』の本でも、1章を蓄エネルギー技術に充てて、電池や蓄熱、空気貯蔵するという技術について紹介しています。また、電力を水素で貯めるというのも有望です。どのエネルギー貯蔵方法が良いのか、技術オプションを適材適所で考えながら、再エネを導入していく必要があると思っています。

原子力の役割

福島第一原子力発電所事故の要因と改善努力

飯田：原子力についてもいくつか質問が来ています。「再稼働を計画している原発には軽水炉の改良はどこまで適用されているのでしょうか？」というご質問です。

都筑：福島第一原子力発電所事故には、色々な要因があると思います。一番大きいことは、自然災害の想定が少し甘かったことです。そのために、想定を超えた大津波によって複数あった非常用電源が全部流されてしまいました。それから、シビアアクシデント（過酷事故）対策についても少し考えが甘かったことだと思っています。これらにつきましては、厳しい新規制基準に対応しておりまして、少なくとも同程度の災害に対して問題が起こるということはなかりと期待しています。

一方、「まだ想定外はないか？」と問われ

ば、いつまでたっても何らかの可能性は残りますので、常に改善を続けながらやっていくことが重要だと思っています。

飯田：「核融合のコンパクト化では、どのような方式、炉型が検討・研究されているのでしょうか？」という質問についてはいかがでしょうか？

都筑：「球状トカマク型」という炉型があります。これまでの楕円形よりも少し球に近い形でやっていくようなものです。それから、ヘリカル型も含め、多様な可能性が考えられているところです。

原子力水素の製造法

飯田：「原子力水素が注目されていますけれども、原子力の電気で水を分解したほうが、高温での IS 法等よりも良いのではないのでしょうか？」という質問も来ています。

都筑：おっしゃる通り、腐食性の媒体を使わないという意味であれば、電気分解のほうが有利かと思います。一方で、原子力というのはあくまでも熱を作るものであり、その熱でタービンを回して電気を作り、その電気で水素を造るというプロセスが必ずしも効率が良いものではないという面もあります。それらを総合的に考えた上で、IS 法（ヨウ素（I）と硫黄（S）を用いた化学反応による水素製造プロセス）が期待できるということで研究が進められていると理解しています。

小型モジュール炉（SMR）の可能性

飯田：原子力の色々な新しい検討についても色々な質問が来ています。「革新炉としての SMR が話題になっていますが、どの程度可能性があると考えて良いのでしょうか？」という質問です。

都筑：SMR には色々な期待があるのですけれども、その一方、これまでスケールメリットを得るために炉を大きくしてきたのに、それに逆行し、炉を小さくして安くなるのかというと、不明瞭なところがあります。

日本のように遠隔地に発電所を置いている国ですと、大型炉の代わりに小さい炉を複数置くということは必ずしも効率的ではありませんし、また、規制が厳しい国ですと、新しい規制に対応していくという課題もあって、必ずしも楽観視できません。今後、慎重に動向を見ていく必要があると思います。

カーボンリサイクル

直接利用の一番の問題は「輸送」

飯田：次に、カーボンリサイクルの関係の質問に移って行こうかと思います。「再エネから水素を得て、さらに再エネを使って炭化水素燃料にして、加えて、燃焼後、面倒な CO₂ を分離回収してリサイクルもするということが、アンモニアとか水素を直接利用するほうが得策ではないのでしょうか？」という質問がきています。

橋崎：一番問題視しているのは輸送です。ヨーロッパのように陸続きであれば、水素をパイプラインで輸送できます。ただ、日本が再エネで造った水素などを海外から輸入して来るとなると、当然、一番ポテンシャルが高いのがオーストラリアとなりますから、当然、パイプラインでは運べません。そうした時、船で運ぶことが考えられますが、一隻で運べるエネルギーは、今の LNG 船の場合で 5 ペタジュール、今、設計されている液体水素船では 1 ペタジュールくらいになります。そうしますと、船の数が 5 倍要ります。これは水素だけでなくアンモニアについても言えるので

すけど、船隻が沢山要するという事は、インフラ整備のコストが非常にかかってくるということです。そこで、二酸化炭素（CO₂）を回収して炭化水素燃料を造ると、経済的にはお釣りがくると捉えられます。

今から莫大なインフラ整備費用がかかる水素やアンモニアの直接利用よりも、CO₂を炭化水素に変えて輸送するほうが安くつくのでカーボンリサイクルが成り立つのではないかと提言しているのです。

飯田：既存インフラを使うというのが、最も現実的な解という話だと思います。

CO₂の直接空気回収（DAC）の可能性と課題

飯田：また、CO₂輸送に関連して、DACの質問が来ています。「DACシステムができれば、CO₂を輸送する必要性はなくなるのでしょうか？」という質問です。

橋崎：まさにその通りだと思います。DACができれば、どこでCO₂を回収しようが輸送はなくなると思います。CO₂を回収した場所で地中に埋めるのか、それとも再エネや水素と一緒にしたり、LNGやメタノールといった燃料やガス燃料にしたりして日本に持ってくるのか。私が提案しているカーボンリサイクルのシステムでは、DACがオーストラリアで実現できれば輸送は必要ないということになります。

飯田：加藤さん。DACの実現可能性について、コメントをお願い致します。

加藤：現在考えられているDACは、エネルギー多消費型の技術です。しかも低炭素のエネルギーが入らないと意味がないということで、それが可能な場所をうまく選定していくことになります。その場所で回収したCO₂から燃料が造れば運搬は必要ないということになると考えています。

研究開発が非常に重要で、今、どれくらいスケールアップできるか、入力エネルギーをどれだけ少なくできるかという観点で、技術開発がなされていると思っています。

変わる電力システム

直流電力系統の可能性

飯田：電力システムに話を移します。「太陽光・風力発電の増加により、火力発電などの同期発電機の比率が下がり、系統の安定性低下が問題になるということですが、発想を転換して、電力系統を交流から直流に変えるということはできないのでしょうか？」という質問が来ています。

炭谷：直流系統にすれば、送電線のリアクタンス分がないため、火力発電などの同期発電機から構成される交流系統に固有の安定度という問題は解決します。送電ケーブルは、交流ですと充電電流が大きく長距離では損失が大きくなるため、例えば本州と北海道を結ぶ海底送電線などの長距離の海底ケーブルなどは直流送電が採用されます。また、最近、需要家に近い系統では、直流のメリットを活かすために直流配電の検討がなされていますし、一部では実証が始まっています。

その一方、直流には、変圧および大電流の遮断というのが難しいという問題や、交直の変換装置が必要という問題があります。

そういった意味で、当面は、既存の交流系統をベースに、直流のメリットを活かせる、例えば、大規模な洋上風力の送電などには直流を適用するという事になると考えています。

系統の調整力

飯田：調整力に関してです。「再エネが主力電

源化していくと調整力が必要となりますが、その市場の構築の海外、国内の状況や将来的な見通しはどのような状況でしょうか？」という質問です。

炭谷：調整力に関しては、各エリアの一般送配電事業者がそれぞれのエリアにおいて公募により調整力を調達してきましたが、2021年4月に需給調整市場の一部が開設されました。需給調整市場の商品は、応動時間などにより5種の区分があります。最も早い「一次調整力」から「二次調整力」「三次調整力」と応動時間が遅くなっていきます。その中の最も遅い「三次調整力②」から市場で調達できるようになりました。今後は、対象商品が順次拡大する予定です。

また、海外においては、例えば、大きく4つの同期系統から構成される欧州では、やはり広域での系統運用が基本となっています。そういった意味で、欧州では、卸電力市場の広域統合に伴って、需給調整市場も広域統合へとルール整備と実証が加速している状況になっています。欧州では、ルールの制定とともに色々な意味で市場の統合が進んでいくという状況にあると理解しています。

電力供給コストの将来見通し

飯田：固定価格買取制度（FIT）の賦課金に関連する質問も来ています。「政府の再エネ導入拡大方針によって、FIT 賦課金の増加ですとか、それから系統増強のための巨額の投資、既存の火力発電所の稼働率低下などで、電力供給コストが大幅に上昇し、国民の負担増、産業競争力低下の懸念があると思います。将来の見通しおよび対応策というのはあるのでしょうか？」という制度面を含めた質問です。この辺りいかがでしょうか？

炭谷：大変難しい課題です。2050年の再エネ導入目標として、政府は50%程度を参考値と

して示しています。そういった意味で、カーボンニュートラルに達するために再エネの導入加速は不可避です。今回の「第6次エネルギー基本計画」の議論の中で、RITE（地球環境産業技術研究機構）から「再エネ導入が進むと、2050年に電気料金が大幅に上昇する可能性」についての指摘もありました。しかし、将来の再エネの発電コスト、系統増強の費用、さらに原子力を含めた既存電源の稼働はどうなるかといったことなどを現時点で見通すのは、極めて困難です。例えば、燃料調達などは諸外国の情勢にも左右されます。そのような複雑な要因が関係しますので、現時点で見通すには難しいところがあります。

そういった意味で、色々な新技術の開発、コスト削減、制度設計において、例えば10年単位を設定して、PDCA（Plan-Do-Check-Act）を廻しながら可能な限り電気料金の低減と安定供給の確保を図っていくということが現実的な対応であると考えています。

飯田：短期的な対応と長期な話の両方を見て進めていく必要があるというところかと思えます。

水素エネルギーへの期待

水素の取り扱いにおける課題

飯田：では、水素の関係に移りたいと思います。「水素は取り扱いの容易な物質ではないというふうに理解していますが、本日の講演ではこの辺りについて特段言及されていません。全体で見れば、水素の取り扱いは大きな課題とはならないということなのでしょうか？」という質問です。

石本：水素は、利用や貯蔵の形態によって適切に取り扱う必要があります。これまでにない用

途で用いるための規制や技術開発が必要で、その部分がコストアップにつながると思います。例えば、常温常圧で液体であるガソリンに比べ、燃料電池車（FCV）で用いる場合は水素を700気圧まで昇圧する必要があります。この部分でも経済性の改善をしながら、安全に取り扱えるように技術開発や規制の最適化が進んでいると思います。FCVは新しい用途ですので、取り扱いもこれまでにない技術が求められます。

取り扱いに関しては、やはり課題があって、それに対して技術開発が進められているということだと思います。

水素コストの将来イメージ

飯田：水素のコストについての質問です。「再エネ由来の水素ですとか、化石由来の水素があるが、将来はどのような水素製造法が主流になると考えられるのでしょうか？コスト的なイメージはどうなるのでしょうか？」という質問が来ています。

石本：最終的には再エネから大量に水素ができるというのが理想的だと思います。そこに至る道はいくつかあって、最初は、CCUS（炭素回収利用貯留）付きも含めて化石由来の水素が出てきて、その後、再エネ由来の水素が徐々に増えてくると思います。

ただ、遠隔地や集中して水素を利用できる場所とか、量と輸送の必要性なども踏まえて設備が決まってくるということだと思います。

ネガティブ・エミッション技術の役割

国内における技術開発の状況

飯田：「ネガティブ・エミッション技術の国内における状況についてお教え下さい」という質問が来ています。

加藤：ネガティブ・エミッション技術は、簡単にできるものと長期的な研究開発が必要なものに分けられると思います。

簡単にできるものに、バイオ炭とかコースタル・ブルー・カーボン（沿岸のブルー・カーボン）があります。バイオ炭については、農林水産省や国土交通省からも既にクレジット化しようという動きがあります。バイオ炭に関しては「Jクレジット」で、クレジット化されていく方向になっています。そちらのほうで、ライフサイクルでどのくらいCO₂の排出量を抑えることができるか、除去しているかといった検討も始まっています。

また、コースタル・ブルー・カーボンに関しては、「ジャパンプルーエコノミー技術研究組合」が結成されており、こちらでは「Jブルークレジット」という形で、例えば、アマモを増やしてCO₂除去をするという動きが始まっています。

長期的な研究開発が必要なもの、大規模化していかなければいけないほうに関しては、例えば、BECCS（CCS付きバイオエネルギー）やDACがあります。BECCSでは、福岡の三川発電所で、環境配慮型CCS実証事業（バイオマス発電のプラントの排出を50%ほど回収）が行われています。

DACに関しても、やはり、国内で研究開発が始まっています。2020年度のNEDOの「ムーンショット目標4」という事業で、7件のプロジェクトと関連研究が採択され、研究が始まっています。また、産業界の方でもDACは必要であるという議論がありまして、COCN（産業競争力懇談会）でもどうDACを考えていくかという検討も行っていると思います。

風化促進に関しては、なかなか進んでいないのですが、研究ベースでは、早稲田大学の中垣隆雄教授が発表もされておりまして、国内でのポテンシャルなどの検討も始まっています。

最後に、全体的なポートフォリオが重要ですので、それぞれの技術のライフサイクルア

セスメント（LCA）について、私も関係している「LCA 日本フォーラム」で色々検討しているという状況にあります。

おわりに

カーボン・ニュートラルへの現実的な解は？

飯田：全体像に関する質問を最後にしようと思います。「原子力、再エネ、水素、CO₂リサイクルなど、全てのエネルギー技術の総動員が必要と理解しましたが、将来の理想はあるにしても、時間軸を考えた時に現実的な解を見出すのが難しいように感じています。その辺りをどのようにお考えになっているのか意見を伺いたい」という質問です。

黒沢：非常に難しい問題です。「これをやれば良い」というものはありません。ただ、基本的に、全てのアプローチをやってみる、且つ安いもの、CO₂を沢山減らせるものであれば、それを優先してやるべきだと考えています。

カーボンニュートラルは、達成が非常に難しい目標で、ゼロになるまで必死になって頑張らないとできないことです。できるものからやっていって、革新技術の開発を待つて難しいものにもチャレンジしていくといった形で2030年の目標に近づけることが必要だと思います。

飯田：まだまだ多くの質問が寄せられているのですけれども、この辺で質疑応答のセッションを終りたいと思います。

議論しなかった論点につきましては、私どもの本『図解でわかるカーボンニュートラル』の中にも色々なデータが示されていますので、参考にして頂ければと思います。

これで質疑のセッションを終わらせて頂きます。ありがとうございました。

閉 会 挨拶

中村幸一郎 (一財) エネルギー総合工学研究所
専務理事

本日は皆様、師走のお忙しい中、ご参加ご視聴いただき、また種々ご質問いただき、大変ありがとうございました。

近頃、「脱炭素ショック」、「エネルギー危機」と言う言葉が耳目を集めております。カーボンニュートラルの目標とエネルギー安定供給をどのように両立させるのか、そのことの難しさや種々の思惑から出てくる、いろいろな課題や問題を捉えての言葉だと思えます。

そのような指摘や状況に対応していく上でも、やはり、移行期での具体的な道筋、そして、2030年を経て50年に向けての合理的な道筋を示していくことが非常に重要ではないかと思っております。今日の説明でも、既存インフラの最大限の活用、ネガティブエミッションについての2030年頃からの大規模利用、という報告がありました。具体性や合理性が求められる流れでの話ではないかと理解しております。

そういった道筋を示して行くに当たっては、モデルシミュレーションのようなマクロ的・バックキャスト的なアプローチとエネルギー源毎、需要分野毎に、現在と将来展望を踏まえたミクロ的・フォアキャスト的なアプローチを両用することが大切だと思っております。当然のことながら結果にはギャップが出てまいります。

今日のシンポジウムでは「総合工学的な視点から」としておりましたが、現状、各分野ごとの束ねであり、我々としては、これに有機的なつながりを持たせつつ、今申し上げた、ギャップの解析や検討にチャレンジしていくことが必要でないかと考えております。

どうか引き続き、皆様方のご指導ご支援をお願い申し上げます。

以上を持ちまして本日のシンポジウム、閉会とさせていただきます。本シンポジウムが皆様のご参考になったことを願っております。本日は誠にありがとうございました。

[調査研究報告]

東京電力福島第一原子力発電所事故進展シナリオの推定

木野 千晶 (原子力技術センター
主任研究員)



1. はじめに

2011年(平成23年)3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震および同時に発生した津波により、東京電力福島第一原子力発電所(1F)は全電源を喪失し、結果的に大量の放射性物質を環境へ放出した。この事故は国際原子力事象評価尺度(INES)において、チェルノブイリ原子力発電所事故と同程度のレベル7(深刻な事故)に分類されるものであった。津波発生時、4号機～6号機は定期検査中であつたが、1～3号機が運転中であり、津波による外部電源喪失などにより注水機能を失つた結果、深刻なダメージを受けた。

エネルギー総合工学研究所(エネ総研)は事故発生以降、継続的に1F事故進展シナリオの推定に精力的に取り組んできた。特に2011年より経産省事業を受託し、エネ総研が長年開発してきたシビアアクシデント(過酷事故)解析コード(SAコード)SAMPSON^(注1)を用いた事故進展解析などを通じて、1F事故進展シナリオの推定に貢献してきた。

また、経済協力開発機構/原子力機関(OECD/NEA)のプロジェクトであるBSAF(Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station)⁽¹⁾⁽²⁾、ARC-F(Analysis of Information from Reactor Buildings and Containment Vessels of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station)に参画し、世界中の原子力研究機関との議論を通じて得られ

た最先端の知見を取り込みながら、事故進展シナリオを詳細化してきた。

本稿ではこれまでのエネ総研の取り組み(経産省事業、OECD/NEAプロジェクト)およびエネ総研が提唱する最も確からしい1F事故進展シナリオについて述べる。シナリオ分析は特に被害の大きかった1～3号機に着目している。1F事故進展シナリオは現在においても諸説存在することから、本稿で述べるシナリオは東京電力の事故調査報告⁽³⁾およびエネ総研独自の分析を通じて得られた推定であることに留意されたい。

2. 1F事故進展シナリオ推定に向けたエネ総研の取り組み

(1) 経産省事業への参画

表1に示す通り、エネ総研では2011年度より、経産省委託・補助事業を受託し、SAコードSAMPSONによる1F事故解析や専門家及び有識者で構成される事故シナリオ検討会を通じて、1F事故進展に関する評価を進めた。以下、その概要を示す。

① SAコードSAMPSONによる事故進展評価

SAMPSONは1993年から通商産業省(当時)の委託事業「革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)」として10年計画で開発された国産のSAコードである⁽⁴⁾。ImPACT事業終了後も福島第一原子力発電所の事故進

注1:コード名SAMPSONは、Severe Accident Analysis Code with Mechanistic, Parallelized Simulations Oriented towards Nuclear Fieldsの略称。

表1 エネ総研が参画した1F事故関連の経産省事業

年度	受託機関	プロジェクト名
2011	エネ総研	経産省委託事業，平成23年度「発電用原子炉等事故対応関連技術基盤整備事業（事故進展シナリオ把握に資する過酷事故事象解析コード開発（機構論的モデル型）」
2012	エネ総研	経産省委託事業，平成24年度「発電用原子炉等事故対応関連技術基盤整備事業（過酷事故解析コードを活用した炉内状況把握）」
2013	エネ総研/IRID*	経産省委託事業，平成25年度「発電用原子炉等事故対応関連技術基盤整備事業（過酷事故解析コードを活用した炉内状況把握）」
2014	エネ総研/IRID	経産省補助事業，平成25年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金（過酷事故解析コードを活用した炉内状況把握）」
2015	エネ総研/IRID	経産省補助事業，平成26年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金（事故進展解析及び実機データ等による炉内状況把握の高度化）」
2016	エネ総研/IRID	経産省補助事業，平成26年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金（総合的な炉内状況把握の高度化）」
2017	エネ総研/IRID	経産省補助事業，平成27年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金（総合的な炉内状況把握の高度化）」

※ IRID：国際廃炉研究開発機構

展，原子炉压力容器及び格納容器内のデブリ分布把握を目的とした経産省による委託・補助事業で高度化され，現在も開発を継続中である。SAMPSONは原子力施設内のシビアアクシデント事象を，11個の独立した解析モジュールを組み合わせて解析する。他のSAコードに比べ，可能な限り物理現象を正確に捉えることを目指しており，空間分解能の面からも詳細な解析が可能である。国産コードであるため，ソースコードへのアクセスが容易で，海外のシビアアクシデント解析コードを利用する場合と比較して，低コストにて改良可能であることに利点を有する。

エネ総研ではSAMPSONを用いた1F事故解析を通じた事故進展評価に取り組んできた⁽⁵⁾～⁽⁷⁾。解析対象となる期間は，特に事故進展や放射性物質放出の影響が顕著であった事故発生後3週間程度とし，事故中に測定された圧力や水位などを再現可能な熱水力的条件を明らかにすることを主目的とした。1号機については原子炉スクラム後5時間頃からの格納容器(PCV)圧力上昇を压力容器(RPV)からのリークを仮定して再現するなど，概ね事故中におけるRPVおよびPCVの圧力挙動を再現することが可能となった。2号機についても圧力挙動は良好に再現できており，特に，2号機で特徴的な挙動が見られる3月14日18時以降のRPV圧力について，第1圧力ピークで少量のデブリ

落下，第2圧力ピークで大規模デブリ落下，第3圧力ピークで主蒸気逃し安全弁(SRV)の完全閉を仮定することで説明可能であることを示した。また，第2圧力ピーク直前に再冠水が発生したと想定し，炉心に残存する燃料棒からの水素発生を考慮することで，PCV圧力上昇を説明可能であることを示した。3号機については，現象論的に不明な点が多く，必ずしも圧力挙動などを的確に説明するまでには至っていないが，3月14日の0時以降における圧力挙動がRPVからペDESTALへの断続的なデブリ移行挙動による可能性が高いことなどを示した。

② 事故シナリオ検討会

SAコードによる1F事故解析では，設定した入力・境界条件により解析結果が大きく異なる。SAMPSON事故解析によるデブリ分布推定の不確かさ低減のため，エネ総研は，経産省事業に参画している機関（日本原子力研究開発機構(JAEA)，日立GEニュークリア・エナジー(株)，(株)東芝，東京電力(株)）の協力を得ながら，実測値や格納容器内部調査結果と比較して，最も確からしい事故進展シナリオについて検討した。本検討は合計6回の対面による検討会およびメールによるやりとりを通じて議論を深めた。この検討会で議論され，コンセンサスが得られた内容は，エネ総研が提唱する事故進展シナリオに反映されている。

一方で、専門家の中でコンセンサスが得られていない現象、可能性のみが指摘された現象なども多数存在している。本稿ではその中でも特に議論のあった部分について紹介する。

a. 1号機について

3月11日20時7分から3月12日2時45分のRPV圧力の減少が主にRPVからのリークであることでコンセンサスが得られたが、そのリーク発生個所の特定は困難という認識で一致した。

3月12日4時から3月14日20時までの炉心注水系（CS）からの断続注水期間では、RPV・PCV圧力に注水に起因する明確な圧力の変化は見られないため、注水はほとんど炉内に届いていないという意見が多数であった。但し、圧力に変動を与えない程度の注水の存在は否定できない。ペDESTAL床面のコンクリートを浸食する現象（MCCI: Molten Core Concrete Interaction）については、コンクリート浸食がかなり長期間続いた可能性が指摘された。

b. 2号機について

第1のRPV圧力ピークの圧力上昇および上昇速度の収束のメカニズムが議論され、消防車注水により水位が有効燃料底部（BAF）に到達した、溶融金属が下部プレナムへ落下した、炉心部からシュラウドを通じたダウンカム部への伝熱により蒸発が促進したなどの案が提起された。

第2のRPV圧力ピークでは、RPV/PCV圧力が大幅に上昇しており、これはデブリと水の大規模な接触によるという共通理解が得られたが、デブリと水の大規模な接触がどこで起こったか（BAF上、下部プレナム、その両方）については議論が分かれた。

第3のRPV圧力ピークにおいても、デブリと水の接触によるものと考えられるが、主な蒸気がデブリの落下（スランピング）により下部プレナムで発生したのか、既に下部プレナムに存在するデブリの崩壊熱のみで説明

できるかどうかについては意見が分かれた。

c. 3号機について

3月13日15時～21時にPCV圧力が上昇しているが、その原因についてはRPVからドライウエル（D/W）へのリークもしくは圧力抑制室（S/C）における温度成層に起因した不完全凝縮という説が提起された。リークの主たる候補として、トップヘッドフランジが挙げられた。特に、3号機はトップヘッド付近が高温状態となり、1・2号機と比較して損傷が激しかった可能性が指摘された。

3月14日11時頃までにはPCV内がドライアウトし、11時以降のD/W圧力低下はドライアウトにより蒸気発生がなくなり、また水素爆発により注水が停止したことでPCVリークおよび凝縮による圧力低減効果が顕著になった結果であるという意見が出された。

3月14日12時以降、PCV圧力が上昇しており、消防車注水により炉内全体に大きな蒸気流を形成し、S/Cでの凝縮が生じることでPCV圧力が低下した可能性が指摘された。この場合、非凝縮性ガスのみでPCV圧力が上昇しているとすれば、消防車注水と同時に圧力が低下するメカニズムが説明できないことになる。逆にPCV圧力上昇が蒸気によるものであった場合、消防車注水による冷却・蒸気凝縮効果によってPCV圧力が低下したと説明できる。消防車注水が停止していた間に蒸気でPCV圧力が上昇したとすれば、デブリが新たに水と接触するようなイベントが当該時刻周辺で起きたことを示唆しているのではないかという意見も出された。

(2) OECD/NEA プロジェクトへの参画

エネ総研は、1F事故進展評価に関する幅広い知見を得るため、OECD/NEAプロジェクト（BSAF・ARC-F）に参画してきた。BSAFプロジェクトではSA解析コードを用いた各機関により実施された1F事故解析結果の比較検討がなされた。

BSAFプロジェクトはフェーズ1と2に分

かれ、フェーズ1においては日本をはじめ8カ国^(注2)より16機関が参加した。フェーズ2においては10カ国^(注3)より14機関が参加した。

ARC-Fプロジェクトは1F事故の状況を詳細に探り、今後の軽水炉の安全性向上のための研究に役立てることを目的としたBSAFプロジェクトの後継プロジェクトであり、日米欧中韓等の世界12カ国の原子力研究機関が参加している。

BSAFプロジェクトのフェーズ1では事故後6日間を解析対象とし、各機関がSAコードによる解析で用いる条件を共通とする「Commonケース解析」および、各機関の裁量で解析条件を調整する「Best Estimate解析」が実施された。「Commonケース解析」では、測定値と解析結果の乖離が大きく、特に原子炉隔離時冷却系(RCIC)、高圧注水系(HPCI)、PCVベント、注水に起因していることが明らかとなった。「Best Estimate解析」では、各機関が測定値を再現するように解析条件を調整したが、各機関の解析結果に各コードのモデリングに起因した差異が生じた。主なモデリングの差異として、RPVリーク発生経路・条件、デブリ表面積の評価、炉心から下部ヘッ드의デブリ落下経路、RPV下部ヘッ드의破損モード、PCVリーク発生経路・条件などであった。

BSAFプロジェクトのフェーズ2では、事故後21日間を解析対象として、事故進展シナリオとその不確かさについて議論された。また、核分裂生成物(FP)挙動とソースターム評価についてもターゲットの1つとされた。本プロジェクトを通じて特定された事故進展分析における重要な課題として、炉心支持板を通じたデブリの移行、下部ヘッ드의破損モード、格納容器へのデブリ移行、RPV下部構造物(例えば、制御棒案内管、計装配管など)へのデブリの付着、長期的なMCCI挙動、格納容器破損モードが挙げられた。

ARC-Fプロジェクトの主なタスクは、①事故シナリオおよびFP挙動に関する分析・評価、②1F内部調査などのデータ・情報の集約・管理、③将来の長期プロジェクトに向けた議論となっている。このうち①については、以下の7つのグループに分けて議論が進められている。

- Group 1: Overall coordination of activities for Unit-1, Unit-2 and Unit-3
- Group 2: In-Vessel melt progression
- Group 3: Ex-Vessel melt behavior and MCCI
- Group 4: FP transport and source term
- Group 5: Hydrogen transport and combustion
- Group 6: Backward source term analysis
- Group 7: Forward offsite consequence analysis

エネ総研はGroup 3と4に参加している。Group 3では、MCCIによる1号機ペDESTALのコンクリート浸食状況の評価、Group 4では、2号機・3号機で確認されたシールドブラグの高汚染問題について検討を進めている。

3. 1F各号機の事故進展シナリオ

(1) 1号機の事故進展

1号機は地震発生後、14時52分に非常用復水器が自動起動していたが、津波による全電源喪失によりその機能を失い、炉心の水位は下がり続けた結果、メルトダウンに至ったと考えられている。

図1には事故発生直後から3月12日15時までに測定された1号機のRPV・PCV圧力を示す。測定値は限られているが、3月11日20時頃のRPV圧力が7MPaを示しているのに対し、3月12日3時頃の圧力は0.9MPaとなっていることから低下傾向にあると言える。同時間帯におけるPCV圧力は3月12日0時頃に0.6MPa、2時半頃に0.84MPaに達していることから、メルトダウンの過程でRPVの圧力バウンダリが破損し、RPV圧力が低下し、PCV圧力が上昇した可能性が示唆される。

3月12日5時以降、PCV圧力は0.7MPa程

注2: 参加国は、日本、フランス、ドイツ、韓国、ロシア、スペイン、スイス、アメリカの8カ国。

注3: 参加国は、日本、フランス、ドイツ、韓国、ロシア、スペイン、スイス、アメリカ、カナダ、フィンランドの10カ国。

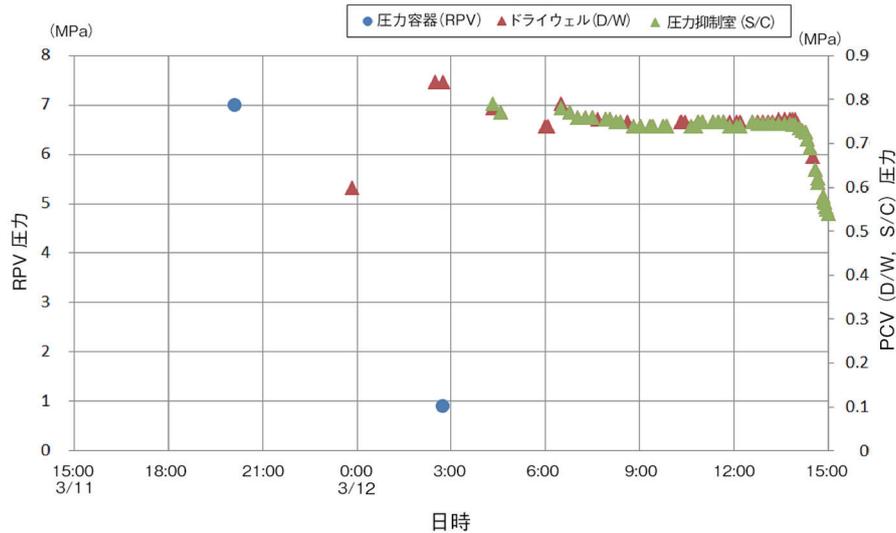


図1 1号機の圧力容器 (RPV)・格納容器 (PCV) の圧力 - 事故発生直後から 3/12 15 時まで -

度で保たれていることから、トップヘッドフランジリークが発生していたと考えられる。この時間帯においては、炉心内のデブリが PCV へ落下し、ベDESTAL床面のコンクリートを浸食する現象 (MCCI) が発生していると推定される。MCCI が発生した場合、コンクリートの分解に伴うガス発生が PCV 圧力の上昇要因となる。トップヘッドフランジリークとバランスすることで PCV 圧力が 0.7MPa 程度で保持されていると推察される。

図2には3月12日12時から16日12時までに測定された1号機PCV圧力を示す。3月12日14時30分に格納容器ベントが実施され

たことから、一時的に PCV 圧力は低下するが、その後も圧力上昇・下降を繰り返しており、MCCIによるガス発生が継続していることを示している。また、炉心がヒートアップする過程で燃料棒被覆管やチャンネルボックスより水素が発生することが知られており、3月12日15時36分に水素爆発が発生した。MCCIが継続している期間、何度か注水が試みられているが PCV 圧力に目立った変化は見られていない。日立 GE ニュークリア・エナジー(株)による MAAP (米国電力研究所 (EPRI) により開発された SA コード) を用いた感度解析によれば、注水が成功し、デブリに水が到

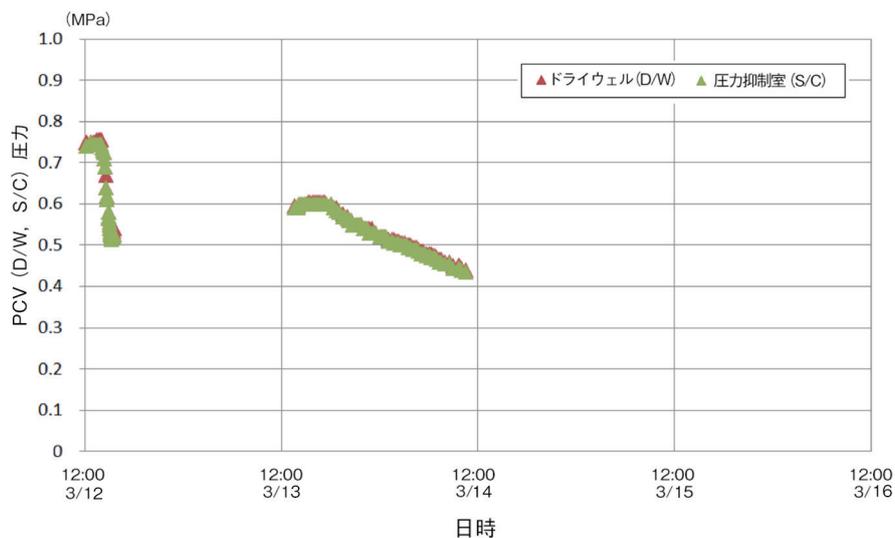


図2 1号機の格納容器 (PCV) 圧力 - 3/12 12時から 3/16 12時まで -

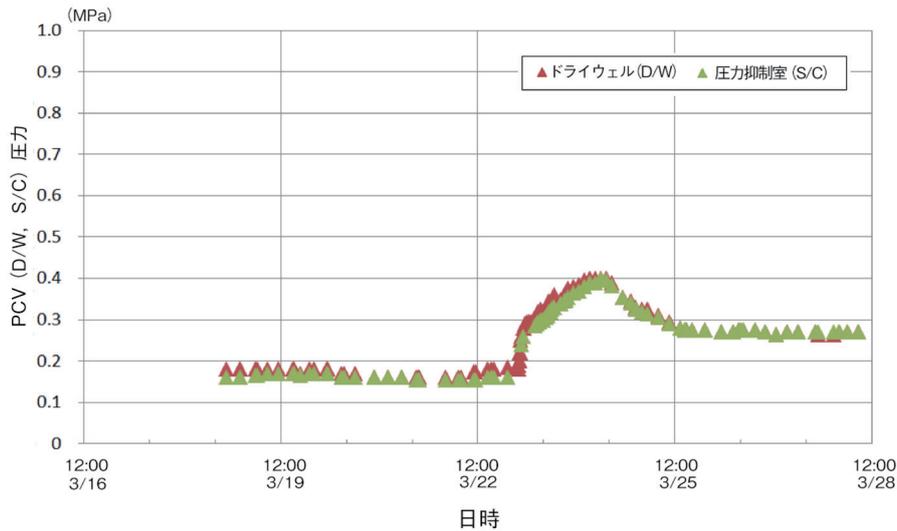


図3 1号機の格納容器 (PCV) 圧力 - 3/16 12時から 3/28 12時まで -

達していれば、PCV 圧力に一定の変化が生じることが示唆されていることから、この時間帯の注水はデブリに到達していた可能性は低いと考えられている⁽⁸⁾。

図3には3月16日12時から3月28日12時までに測定された1号機PCV 圧力を示す。東京電力によるプレスリリースによれば、3月23日2時30分に給水系からの注水を開始しており、そのタイミングに合わせてPCV 圧力の急激な上昇が見られる。これは注水ラインを切り替えた結果、水がデブリに到達するようになったと考えられる。その後、注水は継続的に実施され、PCV 圧力も0.2MPaから

0.3MPaを推移していることから、水がデブリに到達していたことを示唆している。結果として、デブリは冷却されMCCIによるコンクリートの浸食が停止し、事故は収束に向かっていったと推察される。

(2) 2号機の事故進展

図4には事故発生直後から3月14日18時までに測定された2号機RPV およびPCV 圧力を示す。2号機は14時50分に原子炉隔離時冷却系 (RCIC) を手動起動しており、全電源喪失後においても動作し続けたとみられている。本来、RCICは、炉内から排出される蒸気のみ

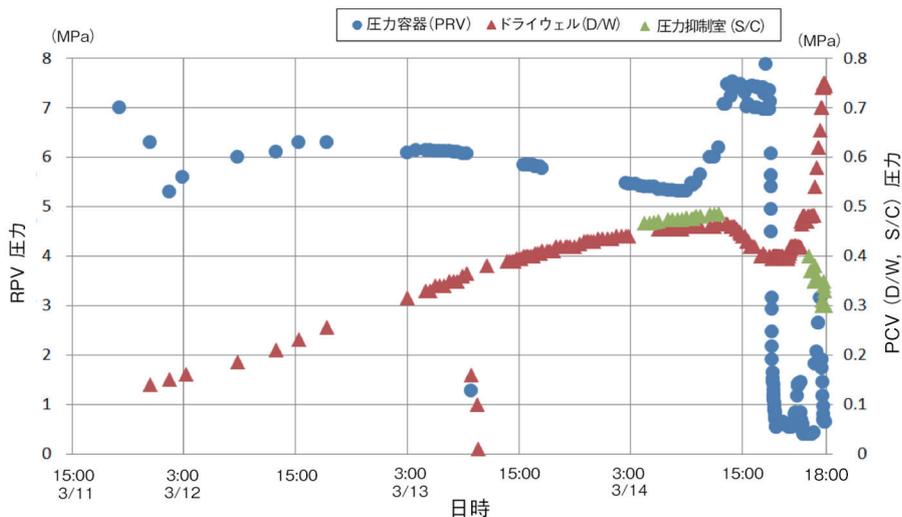


図4 2号機の圧力容器 (RPV)・格納容器 (PCV) の圧力 - 事故発生から 3/14 18時まで -

で動作すると想定されており、電源喪失により炉心水位が調整できない条件下では、RCICタービンに水が入り込みその機能を喪失すると考えられてきた。一方で、測定値より明らかにRCICが作動し続けた傾向が見られており、圧力は6 MPa付近で保持され続けている。

主蒸気配管に水が入り込んだ状態でRCICが動作し続けたメカニズムは未解明のままであるが、高温高圧の水がタービン内でフラッシングにより蒸気となり、タービンを回し続けた可能性などが考えられている⁽⁹⁾。エネ総研では二相流状態によるRCICタービン効率の劣化を考慮したSAMPSON解析を実施し、概ね測定されたRPV圧力挙動が説明可能であることを示している⁽¹⁰⁾。二相流によるタービン効率の劣化を定量的に評価するためには、実機相当のRCICタービンを用いた実条件下における実験が今後必要となる。

PCV圧力は継続的に上昇し続けている。これはRCICタービンが作動し続けたことにより、RCICタービンから排気された水蒸気がS/C内にて凝縮し、温度成層化を引き起こしていたと考えられる。S/C内にて温度成層化が発生していた場合、排出された水蒸気の凝縮率が低下し、D/Wの圧力上昇要因となり得る。さらに東京電力の評価によれば、S/Cが格納されているトラス室に津波によって海

水が侵入し、S/Cを外側から冷却していた可能性が指摘されている⁽¹¹⁾。

3月14日9時頃より、RPV圧力が上昇に転じ、12時頃からは上昇速度が増加している。これは3月14日9時頃にRCICによる原子炉注水が停止し、さらに12時頃に完全に停止(トリップ)した結果、蒸気排出が停止した影響と考えられる⁽¹²⁾。同時間帯にて、S/Cへの蒸気供給が停止した結果、S/C圧力も低下傾向を示している。RCIC停止後、炉内水位は低下し続けることから、メルトダウンに至ったと推定されている。

図5には3月14日18時から3月15日6時までに測定された2号機RPVおよびPCV圧力を示す。14日の18時頃に東京電力の運転員によるSRV強制開操作が実施されており、RPV圧力が急激に低下している。SRVの強制開以降、3月15日1時30分頃にかけて、RPV圧力に3つのピークが見られており、この時間帯で炉心内の燃料棒・構造物が熔融・移行していたと推定される。またこの時間帯には東京電力の運転員によるSRVの開閉操作が実施されており⁽¹³⁾、圧力挙動に大きな影響を与えたと考えられる。エネ総研の評価では、1つ目の圧力ピークは少量(数トン程度)のデブリが、2つ目の圧力ピークは100トン程度のデブリが落下し、デブリに蓄えられた

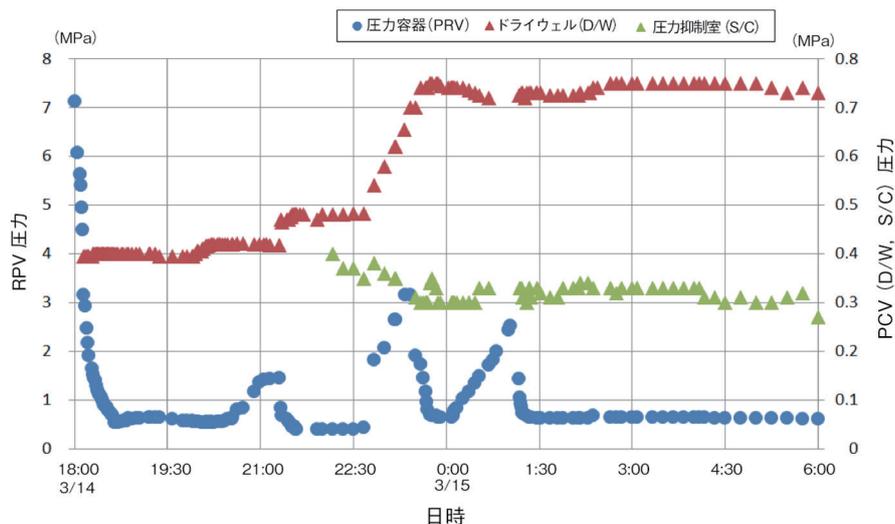


図5 2号機の圧力容器 (RPV)・格納容器 (PCV) の圧力 - 3/14 18時から 3/15 6時まで -

熱に起因した蒸発が促進されたことにより説明可能であることを示している⁽⁶⁾。両ピーク共に、圧力の低下は運転員によるSRV開閉操作記録より、SRVが強制的に開いたことによるものと推定している。3つ目の圧力上昇は下部プレナムへ落下したデブリの崩壊熱のみで概ね説明可能である。圧力低下はSRVが強制的に開いたことによるものと推定している。

3月14日の18時以降、PCV圧力も段階的な上昇を示している。20時頃に0.4MPaから0.42MPaに上昇しており、この時点において、炉内で水素が発生していた可能性が高く、SRVはわずかに開いていたことを示唆している。さらに第1のRPV圧力ピークが見られる21時頃において、0.48MPaまで圧力が上昇している。第1のRPV圧力ピークが見られる直前でSRVは自重で閉止し、圧力ピーク頂点においてSRVが強制的に開いたと考えられているが、SRVが閉止している期間に炉内に蓄積された水素がS/Cを通じてPCVに流れ込み圧力が上昇したと推定されている。第2のRPV圧力ピークが見られる23時頃よりPCV圧力は0.74MPaまで上昇しており、さらなる水素発生があったことが示唆される。それ以降、PCV圧力は0.74MPa付近で推移しており、トップヘッドフランジリークが発生していた可能性が示唆される。

図6には3月15日0時から3月18日0時までに測定された2号機RPVおよびPCV圧力を示す。3月15日2時以降、RPV・PCV圧力に大きな変動は見られず、炉心から下部プレナムへのデブリ移行はほぼ終了していると考えられる。PCV圧力は、8時頃から11時頃にかけて減少しているが、この圧力変動を説明するために必要なPCVリーク面積は300cm²と評価されており⁽¹⁴⁾、現在の2号機PCVの高い気密性と矛盾している。この圧力低下についてはS/Cにおける凝縮効果の可能性⁽¹⁴⁾が指摘されているが、今後も議論を必要とすると考えられる。

3月15日12時半頃から15時半にかけてRPV圧力・PCV圧力に変動が見られている。さらにD/Wの格納容器雰囲気モニター(CAMS)の値も急上昇しており、16時10分に最高値である138Sv/hを示していることから、RPVバウンダリが破れた可能性が示唆されている⁽¹⁵⁾。よって、この時間帯でRPV下部ヘッドの破損が生じ、デブリがPCVベデスタルへ移行したと推定している。但し、消防車注水は継続しており、下部プレナムのデブリはある程度冷却されていると考えられる。よって、PCVベデスタルへ落下したデブリは小規模であり、残ったデブリは注水により冷却され続ける。また、PCVベデスタルへ落下したデブリによるMCCIも限定的であると推定できる。

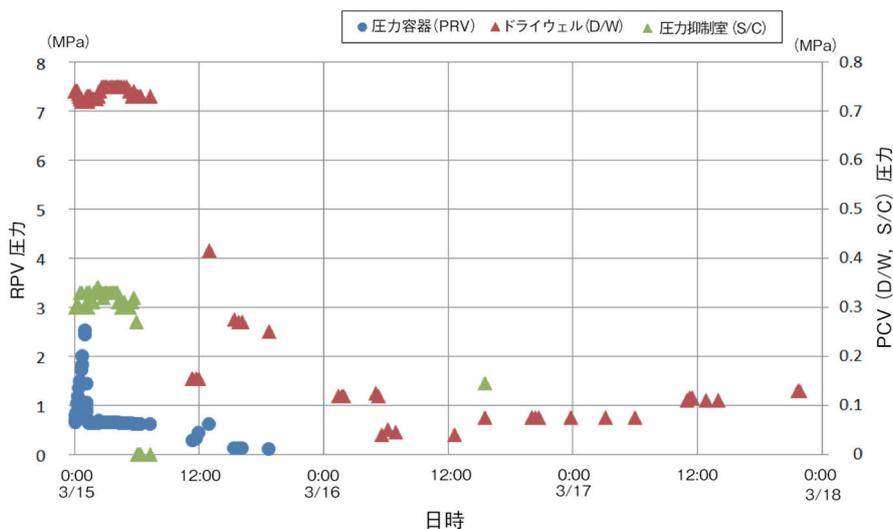


図6 2号機の圧力容器 (RPV)・格納容器 (PCV) の圧力 - 3/15 0時から 3/18 0時まで -

(3) 3号機の事故進展

図7には事故発生直後から3月13日12時までに測定された3号機RPVおよびPCV圧力を示す。3号機は1,2号機と異なり、直流電源は機能喪失を免れた。よって、15時05分にRCICを手動起動しており、その後も運転員によって炉心水位が調整されながらRCICは継続的に動作していたとみられている。結果として、RPV圧力は7MPa付近を保持できている。また、2号機と同様にS/Cにおいて温度成層化が起きているとみられ、PCV圧力は上昇し続けている。

3月12日11時半頃にRCICが自動停止したことから、1時間後に高圧注水系（HPCI）

が自動起動した。HPCIは炉内の大量の蒸気を排出することから、RPV圧力は急激に低下していることが、測定値から読み取ることができる。3月13日2時42分にHPCIを手動停止し、炉内からの排気がなくなったためRPV圧力は急激に上昇している。よって、3月13日9時に強制的に自動減圧系（ADS）を作動させ、RPV圧力を低下させた。その後、13日9時頃からは消防車による注水を開始したが、炉心水位の回復が間に合わず、13日午前にはメルトダウンに至ったと推定されている。

図8には3月13日6時から3月14日12時までに測定された3号機RPVおよびPCV圧力を示す。13日の9時頃までにD/W圧力が

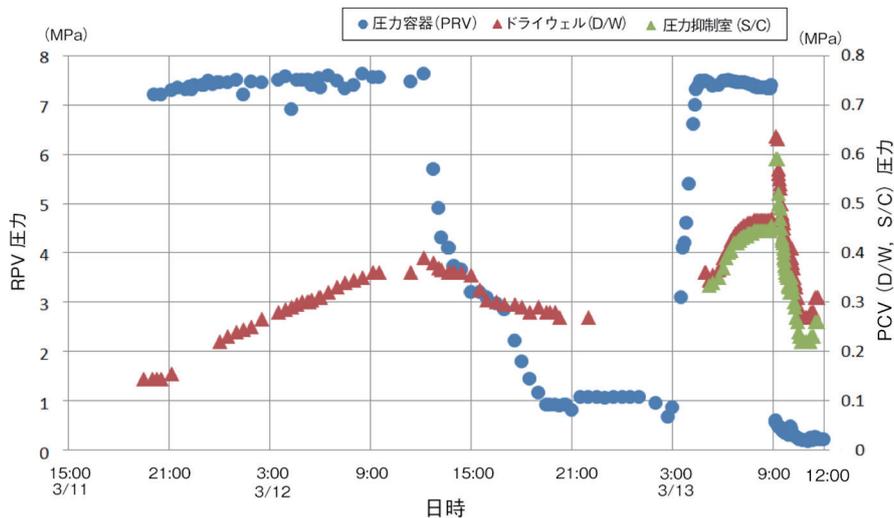


図7 3号機の圧力容器（RPV）・格納容器（PCV）の圧力－事故発生直後から3/13 9時まで－

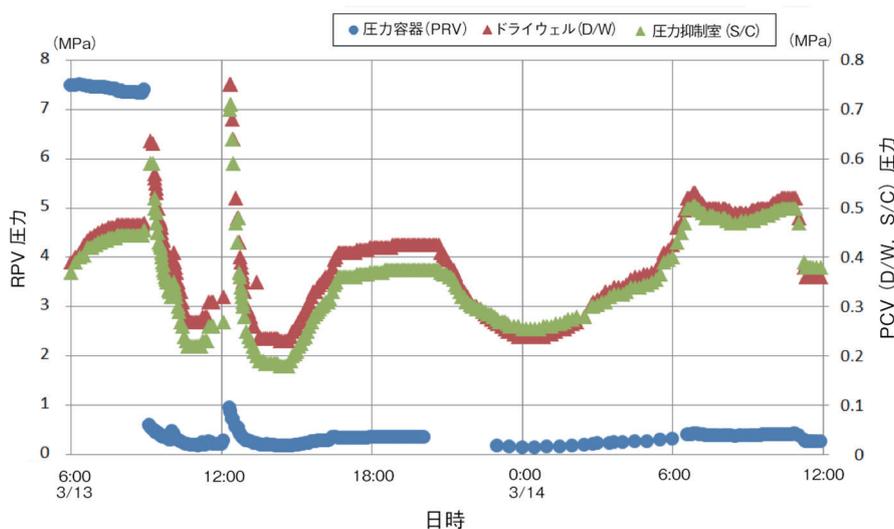


図8 3号機の圧力容器（RPV）・格納容器（PCV）の圧力－3/13 6時から3/14 12時まで－

S/C 圧力を上回っており、この時点では RPV バウンダリが破損し、PCV へのリークが発生していたと推定される。特に大きな圧力ピークは3月13日10時頃および12時頃に見られており、このタイミングで大規模なスランピングが発生したと推定できる。3月13日15時頃より再度圧力が上昇を開始しており、S/C ベントが何らかの事情で閉じた可能性が高い。3月13日17時から21時までは PCV 圧力の上昇傾向が抑制され、21時以降 PCV 圧力は低下傾向を示しており、炉内がドライアウトし、蒸気発生が収まりつつある状況が考えられる。

3月14日0時以降、再度 PCV 圧力は上昇に転じており、この時刻で RPV 破損およびペダスタルへのデブリ移行が開始した可能性が高い。但し、PCV 圧力挙動にデブリが大量落下したような圧力ピークは見られないことから、断続的な移行挙動であったと考えられる。3月14日7時以降は圧力上昇が抑制されており、蒸気・非凝縮性ガス発生による圧力上昇要因とリークや凝縮による圧力低下要因がバランスしている状態であると推定している。リーク個所はトップヘッドフランジが最も有力であると考えられる。

図9には、3月14日3時から3月17日3時までに測定された3号機 RPV および PCV 圧力を示す。3月14日11時に水素爆発が発生し、

一時的に PCV 圧力は低下するが、12時以降再度上昇に転じている。このメカニズムについて現状は不明であるが、水素爆発によって一時的にトップヘッドフランジに隙間が生じ、圧力が低下し、さらに一度変形したトップヘッドフランジはすぐに戻らずリークが継続し、その後フランジのシール面が再び馴染んでリーク面積が縮小した結果圧力が上昇に転じるなどは1つの可能性として考えられる。その後、段階的に D/W からのリーク面積が拡大した結果、圧力が低下し続けていくと推定している。

4. 今後の展開

エネ総研では今後も新たな知見を取り込みながら、事故進展シナリオの詳細化を継続していく予定である。1F の事故進展シナリオの理解は、1F 廃炉や廃棄物処理に向けた炉内状況把握、今後の原子炉の安全性向上の観点から重要性は高く、継続的な分析が望まれている。近年では原子力規制庁も事故進展シナリオの分析を再開しており、JAEA や大学などにおいても盛んに研究が進められている。OECD/NEA も ARC-F に続く新しい 1F に関するプロジェクトの立ち上げが始まっており、さらに新たな分析結果が得られることが期待される。

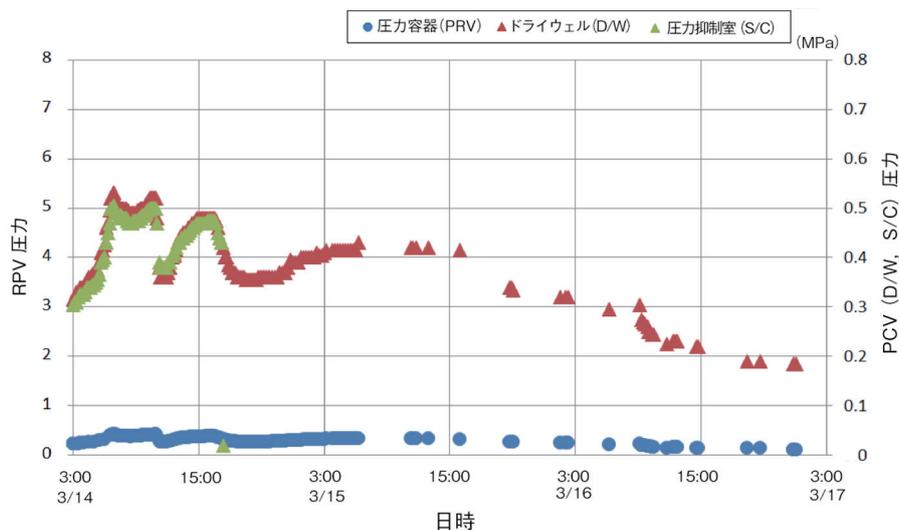


図9 3号機の圧力容器 (RPV)・格納容器 (PCV) の圧力 - 3/14 3時から 3/17 3時まで -

事故進展シナリオの高度化において、解析技術の果たす役割は大きく、エネ総研ではSAMPSONをベースとしたより詳細な解析技術の開発を進めていく。事故中の測定値には限界があり、内部調査で得られる情報は現時点では限定的であることから、測定値や内部調査結果を踏まえながら、解析を用いた情報の補完が必須となる。一方で、SA解析コードの機能の限界から、解析結果には不確かさが大きい。エネ総研では、JAEAなどが保有する詳細解析技術を取り込みながら、最先端の解析技術を通じた1F事故進展分析への貢献を目指していきたい。

参考文献

- (1) OECD/NEA, "Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Phase1 Summary Report," NEA/CSNI/R (2015) 18, February 2016
- (2) OECD/NEA, Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Summary Report, NEA No.7525, 2021
- (3) 東京電力, 「福島原子力事故調査報告書」, 2012年
- (4) 茶木雅夫, 木野千晶, 手塚健一, 「過酷事故解析コードSAMPSONの最新動向」, 日本原子力学会2021年秋の大会, 3G_PL02, 2021年
- (5) Suzuki H., Kino C., et al., "Three Weeks Analysis of the Fukushima Daiichi Unit 1 NPP by the SAMPSON Code," Proceedings of the 12th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-12), Qingdao, China, October 14-18, 2018
- (6) Kino C., Chaki M., et al., "Three Weeks Analysis of the Fukushima Daiichi Unit 2 NPP by the SAMPSON Code," Proceedings of the 12th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-12), Qingdao, China, October 14-18, 2018
- (7) Pellegrini M., Chaki M., et al., "Three Weeks Analysis of the Fukushima Daiichi Unit 3 NPP by the SAMPSON Code," Proceedings of the 12th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-12), Qingdao, China, October 14-18, 2018
- (8) Sakai, T., Fujii, T. and Nishida, K., "Water Injection Influence for Accident Progression in Fukushima Dai-ichi Unit 1", Proceedings of 13th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM 13), Seoul, Korea, October 2-7, 2016
- (9) 都築宣嘉, 「過酷事故条件下における原子炉隔離時冷却系(RCIC)の挙動に関する研究」, 季報エネルギー総合工学, Vol.42, No.2, pp.52-63, 2019年7月
- (10) Kino, C., Morita, Y. and Chaki, M., "Development of Reactor Core Isolation Cooling System Model for SAMPSON," ATH2018, Orlando, USA, November 11-15, 2018
- (11) 東京電力ホームページ: 福島原子力事故発生後の詳細な進展メカニズムに関する未確認・未解明事項の調査・検討結果「第5回進捗報告」について, (添付資料2-2) 2号機の格納容器圧力変化について (<https://www.tepco.co.jp/press/release/2017/pdf2/171225j0122.pdf>)
- (12) 東京電力ホームページ: 福島原子力事故発生後の詳細な進展メカニズムに関する未確認・未解明事項の調査・検討結果「第5回進捗報告」について, (添付資料2-6) 2号機14日12時頃からの格納容器圧力挙動について (<https://www.tepco.co.jp/press/release/2017/pdf2/171225j0126.pdf>)
- (13) 東京電力ホームページ: 福島原子力事故発生後の詳細な進展メカニズムに関する未確認・未解明事項の調査・検討結果「第5回進捗報告」について, (添付資料2-12) 炉心損傷後のSRVの動作について (<https://www.tepco.co.jp/press/release/2017/pdf2/171225j0132.pdf>)
- (14) Nozaki, K., et al., "Inference of containment depressurization scenario of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Unit-2 during the Morning of March 15th, 2011," Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.58, pp.426-433, 2021
- (15) 東京電力ホームページ: 福島原子力事故発生後の詳細な進展メカニズムに関する未確認・未解明事項の調査・検討結果「第5回進捗報告」について, (添付資料2-10) 2号機の15日のCAMS測定値急上昇について (<https://www.tepco.co.jp/press/release/2017/pdf2/171225j0130.pdf>)

研究所のうごき

(令和3年10月1日～12月31日)

◇ 月例研究会

第413回月例研究会

日 時：10月8日(金) 14:00～15:15

テーマ：

高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全確保の考え方～国際基準と海外事例の紹介～
(日本原子力学会 フェロー(バックエンド部会)
田辺 博三氏)

第414回月例研究会

日 時：11月12日(金) 14:00～15:00

テーマ：

EUはグリーンになれるか?～2050年カーボンニュートラルを目指す欧州連合のエネルギー戦略とCCUS取り組み状況
(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)

◇ 外部発表

[講演]

講演者：黒沢 厚志

テーマ：産業熱の脱炭素化

発表先：高温炉の産業熱応用に関するワークショップ

発表日：10月7日

講演者：坂田 興

テーマ：Opening Keynote: Latest Research and Study on the hydrogen-related Industries

講演先：Connecting Green Hydrogen Japan 2021

日 時：10月13日

講演者：酒井 奨

テーマ：CO₂分離回収・利用・貯留(CCUS)の政策動向、国内外開発状況、課題と今後の展望

講演先：日本計画研究所(JPI) セミナー(南麻布)

日 時：10月14日

講演者：橋崎 克雄, 酒井 奨

テーマ：カーボンリサイクルによる循環エネルギーシステム

講演先：JX 金属(株) 講演会

日 時：10月15日&28日, 11月11日&25日

講演者：岡崎 徹

テーマ：脱炭素社会に必須の蓄熱発電と国内外の技術開発動向・事業展望

講演先：(株)技術情報センター

日 時：10月19日

講演者：橋崎 克雄

テーマ：カーボンリサイクル技術の基礎、研究の最前線

講演先：(株)情報機構 Zoom 開催セミナー

日 時：10月19日

講演者：酒井 奨

テーマ：CO₂分離回収・利用・貯留(CCUS)の最新動向

講演先：日本ナレッジセンター「ライブ(Zoom生中継)配信」セミナー No.211015

日 時：10月21日

講演者：小野崎 正樹

テーマ：国際的なネットワークを利用したカーボンリサイクルによる脱炭素化

講演先：JCOAL 第2回 WEB セミナー

日 時：10月25日

講演者：岡崎 徹

テーマ：再生可能エネルギー導入拡大に貢献する蓄熱発電

講演先：日本学術会議 触媒化学・化学工学分科会

日 時：11月6日

講演者：橋崎 克雄

テーマ：カーボンリサイクル技術の動向とメタネーションの展望～カーボンリサイクル技術に関する世界の動向～

講演先：(株) 技術情報協会

日 時：11 月 8 日

講演者：加藤 悦史

テーマ：カーボンニュートラル社会に向けたネガ
ティブエミッション技術の必要性とその
動向

講演先：(国研) 産業技術総合研究所 ゼロエミッ
ション国際共同研究センター

日 時：11 月 9 日

講演者：黒沢 厚志

テーマ：カーボンニュートラルと 2050 年のエネル
ギー需給

発表先：第 30 回原子力エネルギーシステム研究会
シンポジウム（主催：日本原子力学会中
部支部）

発表日：11 月 11 日

講演者：石本 祐樹

テーマ：脱炭素に貢献する水素キャリアの展望

講演先：第 37 回燃料電池セミナー

日 時：11 月 17 日

講演者：酒井 奨

テーマ：CO₂ 分離回収技術の基礎とプロセス評価
および最新研究開発動向

講演先：R&D 支援センター「CO₂ 分離回収【WEB
セミナー】」No.211199

日 時：11 月 24 日

講演者：松本 俊一

テーマ：水素燃焼タービン発電技術と世界の開発
動向

講演先：エネルギーシステム研究会「第 10 回技
術講習会」

日 時：11 月 26 日

講演者：小野崎 正樹

テーマ：カーボンリサイクルで 2050 年温暖化ガス
排出実質ゼロを目指す政策の方向性と関係

事業者の取るべき戦略

講演先：(株)日本計画研究所

日 時：11 月 29 日

講演者：小野崎 正樹

テーマ：カーボンリサイクルで 2050 年温暖化ガス
排出実質ゼロを目指す政策の方向性と関係
事業者の取るべき戦略

講演先：日本計画研究所

日 時：11 月 29 日

講演者：橋崎 克雄

テーマ：2050 年カーボンニュートラル実現に向け
た技術開発動向と展望～カーボンリサイ
クルの現状と課題～

講演先：産業技術総合研究所「エネルギー技術シ
ンポジウム 2021」

日 時：11 月 29 日

講演者：岡崎 徹

テーマ：脱炭素化に有効な蓄熱発電と、電力市場
JEPX でのビジネスモデル

講演先：(株)情報機構セミナー

日 時：12 月 6 日

講演者：炭谷 一朗

テーマ：再生可能エネルギーの電力系統への大量
導入に向けた課題と対応

講演先：産業技術総合研究所 ゼロエミッション
国

際共同研究センター他

日 時：12 月 14 日

講演者：橋崎 克雄

テーマ：脱炭素化に向け我が国独自の新しいエネ
ルギーシステムを考える

講演先：第 55 回 化学工学の進歩講習会
（主催：化学工学会）

日 時：12 月 15 ～ 16 日

[学会発表]

発表者：Yuki Ishimoto

テーマ：Contributions of hydrogen energy system
analysis on finding clues for R&D prioritization

発表先：IEA EGRD Webinar, Hydrogen in the Energy System Decarbonization

発表日：11月24日

発表者：石本 祐樹, 加藤 悦史, 笹倉 正晴, 黒沢 厚志, 飯田 重樹

テーマ：カーボンニュートラルに向けた世界及び日本のエネルギーシステムへの水素の寄与

発表先：第41回水素エネルギー協会大会

発表日：11月29～30日

[寄稿]

寄稿者：川村 太郎, 渡邊 建次, 岡崎 徹

テーマ：圧縮/液化空気によるエネルギー貯蔵技術

寄稿先：火力原子力発電, Vol. 72, No.10

発行日：10月20日

編集後記

昨年11月に国連気候変動枠組条約第26回締約国会議（COP26）が英国で開催された。日本でも2050年カーボンニュートラル、昨年10月の第6次エネルギー基本計画の閣議決定を受け、関心は高かった。これら動向を鑑み、当研究所は昨年12月8日、3年ぶりに「総合工学的視点からの2050年カーボンニュートラル」と題して「第34回エネルギー総合工学シンポジウム」を開催した。

関心の高さもあり参加者約330名と盛況であった。参加者各位にはこの場で御礼申し上げる。質問も多く、30分確保していた質疑の時間内に全てお答えできずに申し訳なく思う。シンポジウムの概要は質疑応答を含めて本号の記事を読んで頂ければご理解頂けると考え、省略させて頂き、以下にはCOP26とシンポジウムに関して思うところを簡潔に述べる。

COP26は全体的には前進したものの、最後で石炭火力の「廃止」から「削減」への変更を象徴されるように、インド、中国や新興国と西側先進国の立場の違いも明確になった。インドと中国で世界人口の約3分の1、二酸化炭素（CO₂）排出量でも両国で世界の約3分の1を占め、CO₂

排出量は日本の10倍以上である。単純に言うと、日本がカーボンニュートラルを達成しても、インドと中国のCO₂削減が1割未達なら日本のCO₂削減量は相殺されてしまう。人口が減少していく日本にとって、今後、インド、中国や新興国は、日本にとって益々重要な市場となる。CO₂削減でこれらの国々と協力する可能性もある。日本の将来に向けて、環境問題と経済の両立は大きな課題と推察する。

シンポジウムでは予想以上に原子力に関する質問が多かった。最近、欧米でも原子力を見直す機運が高まっており、インド、中国や新興国も原子力拡大、導入の予定である。参加者の関心の高さや日本の原子力の現状への思いの表れであろう。日本は福島第一原子力発電所事故の当事国であり、難しい面も多い。本号の最後に、この事故の進展に関する当研究所の調査研究報告を廃炉や将来的な安全対策の参考にと掲載した。

当研究所は、今年も技術を中心に様々な活動、情報発信をしていく所存である。当研究所の活動が本号をお読みの皆様の今後の事業活動に少しでもご参考となれば幸いである。編集責任者 茶木雅夫

季報 エネルギー総合工学 第44巻第4号

令和4年1月20日発行

編集発行

一般財団法人 エネルギー総合工学研究所

〒105-0003 東京都港区西新橋1-14-2

新橋SYビル（6F）

電話（03）3508-8891

FAX（03）3501-1735

<https://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。

季報 エネルギー総合工学 第44巻第4号

令和4年1月20日発行

編集発行

一般財団法人 エネルギー総合工学研究所

〒105-0003 東京都港区西新橋1-14-2

新橋SYビル(6F)

電話 (03) 3508-8891

FAX (03) 3501-1735

<https://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。