

## 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）

の関係のところで、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 CO<sub>2</sub> を分離回収してリサイクルもするというのですが、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（CO<sub>2</sub>）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、CO<sub>2</sub>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。

#### CO<sub>2</sub>の直接空気回収（DAC）の可能性と課題

飯田：また、CO<sub>2</sub>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、CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>を回収しようが輸送はなくなると思います。CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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、CO<sub>2</sub> 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、CO<sub>2</sub> 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。