

[s:dit]

# CDIT

Coastal Development Institute of Technology

特集

## 脱炭素社会の実現に向けて

～カーボン・ニュートラル・ポートの形成～

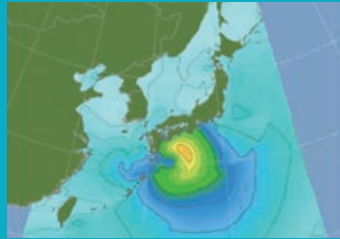
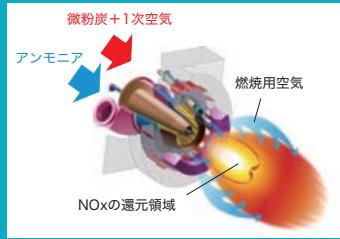
〈巻頭座談会〉

上村 多恵子 氏〔京南倉庫株式会社 代表取締役社長〕

村木 茂 氏〔東京ガス株式会社アドバイザー〕

西尾 保之 氏〔国土交通省港湾局産業港湾課長〕

宮崎 祥一 (司会)〔一般財団法人沿岸技術研究センター理事長〕



表紙写真

読者の皆様に機関誌「CDIT」の発信する情報を、よりダイレクトにお伝えするために、毎号ご紹介する記事内容より写真等を一部抜粋・掲載しております。記事内容ともども毎号新しくなる表紙写真にもご注目ください。

○特集 p.16	○特集 p.37	○特集 p.41	○沿岸 レポート p.52
○特集 p.15	○特集 p.41	○特集 p.39	○特集 p.26
○特集 p.16	○特集 p.37	○特集 p.38	○座談会 p.12
○特集 p.16	○沿岸 レポート p.51	○特集 p.34	

3

特集

## 脱炭素社会の実現に向けて ～カーボン・ニュートラル・ポートの形成～

4

〈巻頭座談会〉

カーボン・ニュートラル・ポート  
～港湾における脱炭素への挑戦～

- 上村 多恵子氏 京南倉庫株式会社 代表取締役社長
- 村木 茂氏 東京ガス株式会社アドバイザー
- 西尾 保之氏 国土交通省港湾局産業港湾課長
- 宮崎 祥一(司会) 一般財団法人沿岸技術研究センター理事長

14

国際水素サプライチェーン構築に向けた取り組み

- 小山 優 川崎重工業株式会社 水素戦略本部 プロジェクト総括部 推進部 担当部長

18

燃料アンモニアのサプライチェーンについて

- 中山 伸一郎 三菱商事株式会社 次世代発電燃料事業部 燃料アンモニア・水素導入室

23

港湾向けトラックのFC化について

- 佐々木 隆 日野自動車株式会社 電動パワートレーンシステム開発部 部長
- 渡邊 浩章 日野自動車株式会社 車両企画部 大型トラック・バスFC車開発担当 チーフエンジニア

26

水素駆動型RTGの開発と課題

- 浅見 織音 株式会社三井E&Sマシナリー 運搬機システム事業部企画管理部 戦略企画Gr 兼 水素ビジネス推進室
- 市村 欣也 株式会社三井E&Sマシナリー 運搬機システム事業部企画管理部 戦略企画Gr

28

船舶への陸電供給について

- 白石 哲也 一般社団法人港湾荷役機械システム協会 専務理事

30

脱炭素社会に向けた水素焚きガスタービンの開発

- 井上 慶 三菱重工業株式会社 総合研究所 燃焼研究部 燃焼第二研究室長

36

燃料アンモニアを利用した火力発電について

- 須田 俊之 株式会社IHI 戦略技術統括本部 戦略技術プロジェクト部 カーボンソリューション担当部長

40

横浜港における自立型水素燃料電池システムの導入事例について

- 中村 仁 横浜市港湾局政策調整課 担当課長

44

水素の輸送・取扱い等について

- 中島 康広 岩谷産業株式会社 技術・エンジニアリング本部 水素技術開発部長
- 前田 和真 岩谷産業株式会社 技術・エンジニアリング本部 水素技術開発部

48

きになる用語解説

CO<sub>2</sub>の回収・貯留・利用技術  
生物を利用したカーボンリサイクル技術

50

沿岸レポート

50

必要とされる沿岸気象海象情報の提供のために  
～波浪情報部の活動～

- 山本 浩之 一般財団法人沿岸技術研究センター波浪情報部 業務課長

52

津波・沿岸防災技術の普及に向けて

～津波に関する出版物の刊行～

53

CDIT News

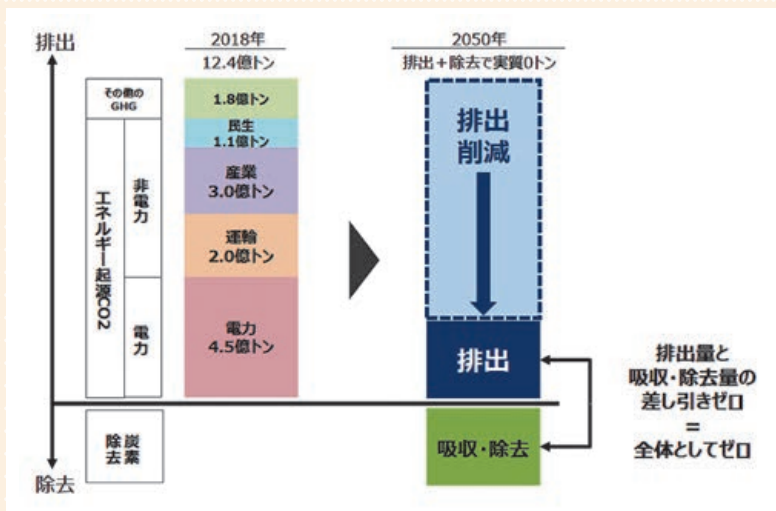


# 脱炭素社会の実現に向けて

## ～カーボン・ニュートラル・ポートの形成～

今後の世界の持続的発展に向けて地球規模での温暖化対策が求められる中、我が国においても、2050年カーボン・ニュートラル、脱炭素社会の実現を目指して、官民を問わず温室効果ガスの排出削減対策が加速化しています。我が国の輸出入を担う物流拠点であり、かつ様々な企業が立地する産業拠点である港湾においては、脱炭素化に配慮した港湾機能の高度化等を通じたカーボン・ニュートラル・ポート (CNP) の形成に向けた取り組みが進められています。

本特集では、「CNPの形成」に焦点をあて、巻頭座談会で有識者や行政関係者により現状と課題、今後の展開や期待等への議論を深めるとともに、つづく特集記事で関係する事業者の方々から各分野における取り組みや動向等を解説・紹介していくこととしています。



「カーボン・ニュートラル」とは、温室効果ガスの排出量と吸収・除去量の差し引きをゼロにすること、つまり、排出を完全にゼロに抑えることは現実的に難しいため、排出せざるを得なかった分、同じ量を吸収・除去することで実質の排出量をゼロにすることです。

カーボン・ニュートラルの概念図

(出典：資源エネルギー庁ウェブサイト [https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyoo/carbon\\_neutral\\_01.html](https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyoo/carbon_neutral_01.html))



カーボン・ニュートラル・ポート (CNP) 形成のイメージ

(出典：国土交通省ウェブサイト <https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/r02/hakusho/r03/pdf/np208000.pdf>)

## カーボン・ニュートラル・ポート ～港湾における脱炭素への挑戦～



上村 多恵子

京南倉庫株式会社  
代表取締役社長



村木 茂

東京ガス株式会社  
アドバイザー



西尾 保之

国土交通省 港湾局  
産業港湾課長



宮崎 祥一(司会)

一般財団法人  
沿岸技術研究センター  
理事長

### 1 2050年、脱炭素社会の実現

**司会(宮崎)**▷今日は沿岸センターの機関誌CDITの座談会のためにお時間を頂きありがとうございます。新型コロナウイルス感染拡大防止のため、皆様方にはそれぞれご自身のオフィスからウェブでご参加いただいています。よろしくお願いいたします。

先日、8月9日にIPCC(国連の気候変動に関する政府間パネル)が報告書を公表しました。産業革命以降の世界の平均気温の上昇幅が、今後20年以内に1.5°Cに達するとの予測を盛り込んだ報告書です。パリ協定は産業革命以降の気温の上昇を2°C未満、できれば1.5°Cにとどめるという目標を掲げています。実現には、世界全体でのCO<sub>2</sub>の排出削減が欠かせません。

世界的な脱炭素への動きの中で、わが国では2050年のカーボン・ニュートラル、脱炭素社会の実現を宣言し、昨年12月には成長戦略会議においてグリーン成長<sup>1)</sup>(文末の用語説明を参照。以下同)戦略が取りまとめられました。今年の6月には、骨太の方針や成長戦略実行計画においてカーボン・ニュートラル、脱炭素化がしっかりと位置付けられています。まさしく政府を挙げて、あらゆる政策を総動員して

の脱炭素化、カーボン・ニュートラルへの取り組みが本格化してきていると思います。

そのような中、国土交通省港湾局は、わが国の貿易量の99.6%が経由する物流拠点であり、かつわが国CO<sub>2</sub>排出量の約6割を占める発電、製鉄、化学工業等が立地する産業拠点でもある港湾において、水素・アンモニア等の次世代エネルギーの大量輸入や貯蔵・利活用等、脱炭素化に配慮した港湾機能の高度化や、臨海産業の集積等を通じての温室効果ガスの排出を全体としてゼロにするカーボン・ニュートラル・ポート(以下CNP)の実現を目指すということで検討会を設置し、また、港湾関係者においてもいろいろな取り組みが始まっているものと承知しています。

本日はCNPを目指す上での現状の取り組み、課題、さらには今後の展望についてお話を伺い、港湾、沿岸域、海洋にかかる技術の開発普及を使命とする当沿岸センターに期待されることなどを考えていきたいと思っています。

まず、皆様にはCNPの背景となるカーボン・ニュートラルについての現状認識から伺いたいと思います。

### 2 加速化する カーボン・ニュートラルへの取り組み

**西尾**▷港湾局でも、カーボン・ニュートラル実現に向けた



取り組みが活発化しています。私が所属する港湾局産業港湾課の中に脱炭素化事務局という組織をつくり、CNPの形成に向けた施策を展開しています。CNPの形成は対象範囲が非常に広い施策なので、局内の関係課や地方整備局はもちろん、省内の関係局、関係省庁、関係団体、民間の事業者の皆様と連携して取り組みを進めているところです。

そうした中で最近特に感じることは、カーボン・ニュートラルに対する国内外の動きが、政府、民間ともに非常に速いということです。ご案内のとおり毎年のように台風や豪雨、洪水、大規模土砂災害などが発生していて、気候変動に伴う自然災害の激甚化、頻発化を抑制する観点からも、地球温暖化対策は待ったなしの課題です。

2050年カーボン・ニュートラルに向けて、欧米先進国は2030年までの野心的な目標をコミットする中、わが国も温室効果ガスの排出削減に関する中期目標として、従来、2013年度比で26%削減だった目標を7割以上引き上げる46%削減を目指し、さらに50%削減の高みに向けて挑戦を続けるとされています。

その実現に向けて、従来の施策の積み上げでは限界があり、革新的技術開発や実装のための社会システムを含め、政策的なイノベーションを促進するアプローチが必要だと思っています。このため昨年12月にグリーン成長戦略を策定し、令和2年度の第3次補正予算で2兆円のグリーンイノベーション基金も創設するなど、政府全体でカーボン・ニュートラル実現に向けた取り組みを推進しています。

### 3 アンモニアの燃料としての期待

**村木**▷エネルギーに関して言えば、エネルギー供給の大勢を占めている化石燃料（石油・石炭・天然ガス）は、日本はほとんど輸入に依存しています。原子力が稼働していた時期でも、8割を輸入に依存していました。現在は原子力の稼働が落ちているので、依存度は約9割まで上がっています。これから脱炭素をしていくとなると、化石燃料に依存するわけにいかないの、いかにカーボンフリー<sup>2)</sup>、クリーンな燃料を導入そして輸入していくかということになります。

日本では原子力は厳しい状況にありますし、再生可能エネルギーの導入をこれから推進していくとしても、日本の電力需要の5割、6割ぐらいまでしか行かないだろうと思います。電力のほか輸送用や工業用の燃料を含む一次エネルギー供給全体で見ると、日本国内で調達できるカーボンフリーのクリーン燃料は、3割前後にとどまると思います。残りの約7

割は、どうやってクリーン燃料を日本に輸入していくかになると思います。

その時に重要な役割を果たすであろうと期待されるのが、水素、燃料アンモニアだと思います。日本は海外からクリーンな水素をいかに輸入するかということで、アンモニア、液化水素、有機ハイドライド<sup>3)</sup>といった液状の水素エネルギーキャリアでの輸入について取り組んでいます。

時間とコストを考えると、最も早く実現するのが燃料アンモニアだと思います。これはNH<sub>3</sub>（アンモニアの化学式）ですから燃やしてもCO<sub>2</sub>が出ません。日本は、アンモニアを発電用、工業用、さらには船舶の燃料として使う技術開発を世界に先行して進めており、この実現の可能性が高まってきました。一方、アンモニアはすでに化学品や肥料で大量に生産され、国際的に流通しているので、海運での物流、貯蔵の技術はすでに確立されています。水素キャリアの中では、インフラの形成が比較的早くできることが特徴だろうと思います。

これから本格的にアンモニアを燃料として輸入するプロジェクトを推進したいと考えています。これからアンモニアを利用するであろう発電事業者や工業用の需要家、エネルギー業界、さらには商社、技術開発をしているメーカーなどによる連携をクリーン燃料アンモニア協会として推進しています。いかに効率的に、経済合理性をできるだけ高めて、広範囲に活用できるインフラ整備をしていくかが鍵になります。まさにグランドデザインをしっかりとつくっていくことが重要だろうと思います。今回、港湾局がスタートされたCNPプロジェクトと連携して燃料アンモニア輸入インフラ構築を進めることは国にとって非常に重要な取り組みだと認識して、現在進めようとしています。

### 4 水素エネルギーの活用

**上村**▷私はこの分野の専門家ではないのですが、物流業を営んでいますことから、環境問題には早くから取り組んできました。荷主、お得意先、ステイクホルダーを巻き込んで一緒にグリーン物流<sup>4)</sup>を進めてきました。具体的には、ダイレクト配送により走行距離を減らしたり廃棄物を減らすことでCO<sub>2</sub>を減らす。静脈物流にも取り組んできました。経産省や環境省のプロジェクトにも、物流企業として参加させていただきました。

私は金融庁の金融行政アドバイザーでもありますが、金融庁では「グリーン国際金融センター」という構想を研究し

ています。TCFD<sup>5)</sup>(気候関連財務情報開示タスクフォース)の方針に沿って情報開示をする。今度、東京証券取引所の中ではプライム市場<sup>6)</sup>という形で選別区分けされるので、グリーンファイナンス<sup>7)</sup>、グリーントランジション<sup>8)</sup>をどう進めていくか。グリーンボンド<sup>7)</sup>なども取引できるようにして、そういったグリーン金融市場をどうつくっていくかということにも関わりを持っています。

また、京都府の「水素みらいプロジェクト検討会」の委員でもあるのですが、取り組みが早く2018年の末から、検討会を随分やってきました。京都は「京都議定書、COP3」誕生の地として、地球温暖化対応の推進をうたっています。京都の中には世界的ないろいろな技術を擁する企業も多くあるので、そういう検討会が置かれています。ようやく実装実験が緒についたかなというところです。

未来の水素エネルギー活用として、物流分野では工場や倉庫、フォークリフトの導入、コンビニ配送のFC<sup>9)</sup>トラックの導入、交通分野では路線バス、燃料電池を使った列車、また防災拠点における自立型エネルギーの供給システム<sup>10)</sup>として使えないか。観光や宿泊の電熱供給とか、京都府の本庁舎は非常用電源に加えて、燃料電池システムを導入することで冗長性、リダンダンシーを確保していく検討もしています。早い時期からワーキンググループが立ち上がって、物流分野、防災分野などに使えないかということで取り組んできました。

ただ、まだ「面」ではなく、ところどころの「点」というか、一番現実的なのは水素を使ったフォークリフトに変えていくということ。水素ステーションも、目標を決めていくつか設置していくことになっています。そういう検討会にも参加しています。

## 5 アンモニアの輸入ハブ基地の必要性

**司会**▷次に物流拠点としての港、産業拠点としての港、あるいは大都市臨海部としての港にフォーカスして、カーボン・ニュートラルの面から見た港の現状やCNPの取り組み状況についてお話をお伺いしたいと思います。

**村木**▷アンモニアは日本では化学品として使われ、若干は生産されていますが多くは輸入です。年間約100万tが使われています。アンモニアを燃料として発電用に使った場合、今の発電総量の10%をアンモニアでカバーしようとする3000万tが必要になり非常に大きな量です。アンモニアは世界で2億tがつくられていますが、国際的に取引されてい

るのは2000万tです。日本が発電用、工業用でエネルギーとして大量に使うとなると、今まで化学品、肥料の市場で使われていたものとはケタが違う量が必要になります。

日本のアンモニア輸入基地は小規模です。石油、LNGは海外から大型タンカーを導入して活用していますが、燃料アンモニアも大型のタンカーで大量に輸入し、それを国内で活用する方式を取っていきたくて考えています。そのためには、大型輸入ハブ基地を形成し、現状2万~2.5万tくらいの船で国際的物流が行われているのを、5~8万tの大型船で輸送コストをできるだけ下げ、少しでも安くアンモニアを国内に輸入することを目指したいと思います。

アンモニアはプロパンと似たような性状で、マイナス33°Cで液体になります。8気圧でも液体になるので液体による船での2次輸送は比較的簡単です。大型の輸入ハブ基地に輸入し、そこから国内へ船を中心に2次輸送していくことで、発電所だけではなく工業用需要家など幅広く流通させることができます。これにより日本の脱炭素化に大きく貢献できるのではないかと考えています。

アンモニアは発電所などに供給するだけではなくて、基地周辺で、アンモニアをフォークリフトの燃料として使う、脱水素して水素を車両燃料として使う、更にはアンモニアガスタービンで発電するなど、アンモニアを輸入するCNPの周辺での脱炭素化にも資することができるだろうと思います。

もう一つ、アンモニアは船の燃料のゼロエミッション化に関して大きく期待されています。IEA(国際エネルギー機関)では、2040年代には船の燃料の半分くらいがアンモニアになるだろうと予測しています。アンモニアは船の燃料としてのバンカー供給も視野に入れて物流ネットワークを幅広くしっかりと形成していくことが重要だと思います。LNGとは異なるインフラ形成になると思います。

まずは輸入ハブ基地、さらには供給ネットワークの形成と言った全体を通じて、CNPの一翼を大きく担う形をとっていければと考えています。国と連携してグランドデザインをつくり、どうすれば日本にとって最適な形で導入が進められるかをしっかり検討していきたいと思っています。

## 6 アンモニアの需要と調達の見通し

**司会**▷どうもありがとうございます。燃料アンモニアによる発電のお話をいただきましたが、市場での実用化の目処はいつ頃とお考えでしょうか。

**村木**▷アンモニアの利用は、日本ではまず発電だと思いま

す。最初に商業利用が開始されるのは、石炭火力でのアンモニア混焼です。アンモニアを20%混焼すればCO<sub>2</sub>が20%減りますし、50%に上げれば50%減り、脱炭素化の中で批判はあるものの簡単には止められない石炭火力での低炭素化に活用できます。

一方、ガスタービンの燃料として使う技術開発も進んでいます。小型から大型のガスタービンをアンモニアを使ってゼロエミッション電源化をしていく開発が2025年くらいを目標に進んでいます。それ以外に、工業炉でアンモニアと天然ガスを混焼してCO<sub>2</sub>を下げる開発も進めており、具体的には、ガラス溶解炉での実証を進める予定です。更に、船の燃料として、アンモニアを船舶用のディーゼルエンジンで使う開発が2025年くらいを目標に進められています。

このようにアンモニア利用の技術開発は大きく進んでいます。石炭混焼でのアンモニアの本格的な商業的導入は2027年前後にスタートし、それから石炭混焼での利用拡大と様々な分野への展開と大きく拡大して行くと思っています。

**司会**▷もう一点、わが国の発電の10%をアンモニアで賄おうとしたら3000万tが必要。一方で、国際取引は現在2000万tくらいだというお話でした。アンモニア生産側の今後の増産の見込み、また、どういうエリアから日本に輸入されるのか、伺えればと思います。

**村木**▷供給側については、現在は世界で生産2億t、国際物流で2000万tと申し上げました。これからの燃料利用での大きな市場に対してクリーンアンモニアが本格的に供給できるかという課題に対して2種類の供給ソースを考えています。一つは、天然ガスからアンモニアをつくり、そこから出てくるCO<sub>2</sub>は、たとえば枯渇ガス田に圧入するCCSや石油採掘を進めるためのエンハンスド・オイル・リカバリー（EOR）に活用して地中に固定化して除去し、クリーンなアンモニアとして供給する方式で、これをブルーアンモニアと呼んでいます。それから、再生可能エネルギーから電気をつくり、その電気で水を電気分解してできるCO<sub>2</sub>フリーの水素でアンモニアをつくるグリーンアンモニアの二つ供給ソースを考えています。

天然ガスが潤沢で、地中に固定化できる場所があるのはアメリカ、オーストラリア、中東そしてロシアあたりです。生産者と日本企業が連携して燃料市場専用のアンモニアプラントを建設すれば供給力は十分にあると思います。

再生可能エネルギーからアンモニアをつくることに関しては、再生可能エネルギーが潤沢で安くできるであろうオーストラリア、チリ、中東そしてロシアなどの可能性が高いと見

ています。

2030年くらいまでの供給のポテンシャルは、1000万tぐらいいは十分にあるだろうと思います。需要をしっかりと立ち上げれば、それに対応して供給側も整えていけると思います。その中でクリーンなアンモニアである、ブルーアンモニアとグリーンアンモニアをしっかりと調達していくことが重要だと思います。

## 7 既に始まっている 神戸港におけるCNPへの取り組み

**司会**▷続いて上村様から、委員を務めていらっしゃる神戸港におけるCNPのご紹介も含めて、お話をいただければと思います。よろしくお願いします。

**上村**▷CNPと聞いて、「これだ!」と思いました。先ほど「点ではなく面だ」というお話をしましたが、カーボン・ニュートラルという大きな社会変換をするには、面的なダイナミズムが必要です。その時に港を核としたCNPの構想は、非常に重要だと思います。

CNPは、港そのもののカーボン・ニュートラル化と、水素やアンモニアなどのサプライチェーンをどう構築していくのかという総元締めとしての入口の役割があると思います。

港には公共の岸壁もありますし、企業が持っている専用岸壁もたくさんあります。バルク戦略港湾を以前につくってありますが、2050年に向かつての脱炭素社会の中で、電力・エネルギー関連の立地もあるし、その原材料も扱う。いろいろなエネルギー企業が集積している、需要や供給の企業が集積しているのが港湾です。面として、湾としての企業群、それに加えて港湾そのものが一緒になって考えていく、進んでいく。それが、目標達成に大きな割合を占めるだろうと思っています。

神戸港は、そういうところからも、ものすごくポテンシャルが高いと思います。大阪湾に立地する神戸港はカーボン・ニュートラルに取り組む世界的な大企業、川崎重工業、関西電力、大阪ガス、岩谷産業等々多くの企業群が立地しています。かつ、商社、耕運機械メーカー、港運、倉庫、運送など、全部が一緒になってCNPに取り組もうという姿勢、面としての地域のダイナミズムがあります。産・官・学がまとまっています。

すでにCGS<sup>11)</sup>(Cogeneration System)として、ポートアイランドを中心に水素社会の実装・実証実験が動いています。液化水素燃料を使って、中央市民病院、下水処理センター、神戸の国際会議場、ポートアイランドのスポーツセ





ンターなど、水素社会のまちづくりがポートアイランドを中心にできている強みがあると思います。水素の輸入基地として専用の輸入船もできて、この秋から輸入していく運びになっています。

カーボン・ニュートラルの取り組みの裾野は大変広いですから、すでにできているCGSを中心にステップを踏みながら実装できていく。それから、一般市民は水素と言うと何となく水素爆発みたいなイメージを持ったりしますが、すでに生活の中で水素を使っている安心感があります。市民のイメージは非常に大きいですし、市民の理解ができていくことはカーボン・ニュートラルを進めて行く上で大変重要なことだと思います。

神戸港は国際的な港でもあるので、すでに世界でCNPを実行している港と組んでやっていけるでしょう。神戸港のCNPブランドイメージをつくりやすい下地は大きいと思います。また、カーボン・ニュートラルの実現には需要と供給、卵とニワトリの関係があると思います。どちらが卵か、ニワトリか。ニワトリが供給側、卵が需要側とするならば、ある程度、卵の実装・実証が済んでおり、これから大切なのは供給です。供給から大きくやっていこうではないかという投資に対する意欲、パワーがあることが一番の特色です。かなり神戸港のCNPのアピールをしています(笑)。

具体的に、短期的には、つくる・運ぶ・貯めるの中で、オーストラリアからだ聞いていますが水素運搬船で輸入する。もちろん既存の水素発電、CGSでも使い、荷役機器、RTG<sup>12)</sup>、フォークリフト、ガントリークレーン、ステドラルキャリアと言った機械を導入し、空調や照明にも利活用して拡大していく。それから、陸上電力の供給、船舶のFC化に使う実証実験を港で行う。

とにかくやれるところからやるということでしょうが、将

来的には国内の水素基地として、各地方へ内航船で運んで行く大きな基地のステーションになっていく。それに伴って、さらに分散型の小型発電機などの温冷熱を活用したり、コンテナ用のトラクターヘッドへ燃料電池を導入するという計画があります。このCNPを全国に水平展開していきたいですね。

**司会**▷神戸港では、地域として、面として前向きに取り組む姿勢があり、すでに水素社会の実装が始まっている。「市民の理解が進んでいる」というお話をいただきましたが、市民の理解を進めるために神戸市ではどんな取り組みをいらっしゃるのでしょうか。

**上村**▷私は神戸市民ではないのですが、「ポートアイランドの中で病院やスポーツセンターの電力は水素でできている」といったことは、新聞や広報にもどんどん出ています。神戸の首長さんを始め、生活とエネルギー、水素社会を常にアピールしていらっしゃいます。

## 8 なぜ港湾で、脱炭素を目指すのか

**司会**▷次に、西尾課長に港湾局のCNPへの取り組み、政策的なねらいなどをお伺いできればと思います。

**西尾**▷まずは、なぜ港湾でカーボン・ニュートラルに向けた取り組みが重要であるのかということについてお話ししたいと思います。わが国のCO<sub>2</sub>排出量は年間約11億tですが、その約6割を占める火力発電、製鉄所、化学工業といった産業の多くは、港湾・臨海部に立地しています。

水素やアンモニアはかなりの部分が港湾を經由して輸入されることが想定されるので、港には水素等の需要主体と供給主体が隣接して立地していることになります。このため、港湾地域から脱炭素化に向けた先導的な取り組みを行うことは、2050年、カーボン・ニュートラルを実現する上できわめて効果的、効率的であると考えています。2019年にIEAが発表した「水素の未来」というレポートでも、水素エネルギーが多様なエネルギー課題の解決策となること。その利用拡大のための短期的項目の一つとして、工業集積港をクリーン水素利用拡大の中核にすることが挙げられています。その意味でも、今進めているCNPの取り組みの方向性は正しいと思っています。

CNPが目指す姿は大きく2点あります。1点目は、水素などのサプライチェーンの拠点として受け入れ環境を整備する。水素やアンモニアを、港でどう受け入れていくかという役割です。2点目は、港湾地域の面的、効率的な脱炭素化



を実現する。港湾のターミナルや港湾周辺に立地する産業で脱炭素化を進めていく取り組みです。

具体的な取り組みとしては、港湾ターミナルにおいて、船舶のアイドリングストップと呼んでいます。停泊中の船舶への陸上からの電力供給や、そこへの電力供給等を念頭に置いた自立型水素電源の導入、これは災害時のバックアップ電源としても使えると思います。また、荷役機械の水素燃料電池化等を検討しています。

また、港湾臨海部に立地する石炭火力発電所における燃料アンモニアの混焼、LNG火力における水素の混焼などの検討も行われています。大量に見込まれる水素、燃料アンモニアの需要にも対応する港湾での受入環境の整備も、関係者が連携して取り組んでいるところです。さらに船舶燃料も、将来的には燃料アンモニアや水素の比率が高まると予想されています。港湾においても、新たな燃料に対するバンカリングへの対応も必要になるかと考えています。

CNPの幅が広がってしまいますが、たとえば国内の洋上風力発電で発生する余剰電力を水素化し、内航船を活用して国内の需要地へ運ぶ海上輸送ネットワーク構築に向けた検討も併せて行っています。

CNPは広い取り組みになりますが、いかに受け入れて面的に使っていくかが一番大事かと思っています。単なる点で、1社が取り組みをするのでは広がりが出てきません。できるだけ多くの事業者が参加した取り組みが可能となるよう、施策の検討を進めているところです。

**司会**▷どうもありがとうございます。ブルーカーボン<sup>13)</sup>、藻場の造成がCNPの施策の概念に入っていると聞いたことがあります。その取り組みはどんな感じですか。

**西尾**▷ブルーカーボンはCO<sub>2</sub>を吸収する機能があり、カーボン・ニュートラルを港で実現していく上では一つのツールと考えています。港を整備する時、藻場、干潟、護岸を環境共生型にするという方法もあります。そういった港の整備を通じてブルーカーボンをつくっていくことも、CNP形成計画の中に位置付けることを考えています。

## 9 CNPの実現に向けての課題と解決策

**司会**▷次に、CNPの実現に向けて乗り越えなければならない課題や解決に向けての方策などについてお話を伺いたしたいと思います。

**村木**▷私はこれまでアンモニアの話をしました。アンモニアは「水素をいかに効率的に海上輸送で運ぶか」という発想

からスタートしています。直接燃料として使えるメリットも活用して導入を進めていこうということですが、水素のファミリーでもあり、アンモニアの導入を通じて水素のサプライチェーンとマーケットを拡大してコストを下げるという先兵的な役割もあると思います。

エネルギー面で見るとこれまで使ってきた化石燃料は非常に使いやすいですし、長い歴史の中で輸送方法等々の合理化も進み、コストも安くなっています。それに比べて、再生可能エネルギーも含めて、クリーン燃料はどうしてもコストが高くなることは否めません。いかにコストを下げ、かつ幅広く利用できるようにして脱炭素化を加速していくかが、きわめて重要だろうと思います。

既存のインフラ、プレイヤーに対して新たなクリーンエネルギーを入れていくことで生じる問題をいかに整理しながら解決していくかについて、CNPを核にして、いかに国内に大きく展開する国内インフラを形成していくか、さらにはCNP周辺にどういう形で脱炭素化の効果を進めていくかなど、しっかり準備、議論をしていくべきではないかと思っています。

また、大型のハブ基地をつくって、2次輸送を入れて国内で展開していくことについて、どういうやり方をすれば経済合理性も含めて日本にとって最もいい形でできるかについて、しっかり検討準備をしていくことも重要だろうと思います。

港を中心として、その周辺に低炭素化、脱炭素化をいかに効果的に広げていくかを進め、アンモニアや水素のインフラができれば日本の余剰再生可能エネルギーから水素やキャリアをつくって活用することもできると思います。そういうダイナミックなシナリオを、しっかりと考えていく必要があるのではないかと思います。

**司会**▷ありがとうございました。発電のために燃料アンモニアを輸入するのは別に、水素をNH<sub>3</sub>の形にして輸入して、日本国内でまた水素を取り出す。アンモニアには、2本建ての輸入があるということですね。

**村木**▷その通りです。水素を液体で輸送し水素として使う場合、3つのキャリアがある中で、アンモニアとメチルシクロヘキサン<sup>3)</sup>は脱水素して、液化水素は気化して使うことになります。最終的には、どれが一番コストが安い。様々なマーケットに対してどのキャリアが最適な形で使えるかで、キャリアの導入が決まるだろうと思います。

2019年にIEAが出した水素レポートにおいて、「オーストラリアから日本へ水素を運ぶキャリアとしては、アンモニアが最も安いオプションになる」と明記されています。現時点で、アンモニアが一番安いのは間違いのないと思います。ただ、

10年先、15年先、技術開発が進む中で、進化していく可能性は十分にあると思います。アンモニアだけですべて解決できることではないだろうと思います。

## 10 CNPを促進するための仕組みづくり

**上村**▷時代の大きな変わり目の中で、利用が先か、生産・供給が先かという、まずはニワトリから、供給が先だと思っています。それが今回のCNPの大きな政策だと思うので、そこはしっかり認識し、知らしめていくことが一番大事なことです。そして、使う時には値段的に安く、利用しやすいように、同時に進めていかなければならない。ステップ・バイ・ステップの中で、需要と供給が相互に進化を目指しながら行こうとは思っています。

今、これを金融面から推し進めていこうという方向があります。企業に気候関連財務情報開示タスクフォース(TCFD)としてしっかり開示させ、それを格付けする、評価する。それが株主への説明であり、投資を促すものであり、金融の好循環を生んでいく。グリーンファイナンス、つまり企業の環境活動を通じて新しい市場を確立していこうという流れがあります。低炭素、脱炭素にあまり積極的でないところは、投資家からも選別されていく。金融面では金融で取り組み自体を促そうという大きな流れがありますが、CNP検討会で港も「認証制度」のようなものをつくろうという議論があります。

日本の各港がCNP形成の計画をつくり、応募していただく。選ばれたところは、より民間投資がしやすい、また、低利融資、優遇税制、行政からの集中重点投資が得られるとか、認証制度があれば、CNP形成を有効に促進することができるのではないかと思います。公共のポートだけではなく、港湾の企業と一緒に、専用岸壁でも地域や港湾としての協議会をつくる。そこはそこでまた別の認証制度をつくっていくという施策も考えられます。

また、そのこと自体が企業の格付けの中で評価されていく。カーボン・ニュートラルをめぐる投資、ESG投資<sup>14)</sup>として新しいトラジション・ボンドを確立するための流れが何か要るだろうと思います。それには認証制度は有効に働くのではないかと思います。

**司会**▷金融面からの取り組み、それから港でも認証制度をつくって企業の取り組みを促進、支援する必要があるというご提案をいただきました。「安く」というのは大変重要ですね。

**上村**▷今、水素は100円/Nm<sup>3</sup><sup>15)</sup>ぐらいでしょうか。2030

年に30円、2050年に20円ぐらいの目標がありますが、その間コストはかかっても使う。それが、みんなの理解が得られることになっていくのでしょうか。その間の負担はどこが持つのか。その課題は大きいですね。

あと、神戸では「水素スマートシティ神戸構想」をつくっています。港町は港を中心に市街地ができていますから、水素にしてもアンモニアにしても企業や市民生活へ運ぶ走行距離が短くて済みます。非常に短距離にある。そして、市民に見えるということで、わかりやすいのではないかと思います。

## 11 CNPへの道筋 ～CNP形成計画策定マニュアル～

**西尾**▷CNPの形成には、様々な取り組みが必要で、日本でもいろいろな港で取り組んでいきますが、港々で立地企業も違いますし、既存のインフラも違います。港ごとに最適なCNPの形成に向けた計画をつくれるような知見を、国として整理していきたいと考えています。その指針となるべく、現在、CNP形成計画策定マニュアルを策定する作業を進めています。

本年1月から、神戸港も含めて全国6地域、7港湾において、整備局が地域の繋ぎ役となって官民一体となった検討会を開催し、CNP形成のイメージを先行して検討しました。また、こうした検討を踏まえ、本省において本年6月からCNPの形成に向けた検討会を開催し、施策の方向性、マニュアルの取りまとめを進めているところです。年内を目途にマニュアルの初版、最終的な取りまとめも公表しようと考えています。マニュアルづくりと併せて、水素等を使用するための新たな技術開発も並行して進めていく必要があります。また、それを実証し、導入を拡大し、自立した商用化へ進むように、行政としてもさまざまな支援を行っていく必要があると考えています。

また、今後いろいろな技術の標準仕様化も必要になると思います。そういったところは、これから沿岸センターとも関連してくる可能性もあると思います。

水素やアンモニアの次世代エネルギーは、「コストが高いことが課題だ」という話がありましたが、港湾地域において多くの事業者が利用することで調達コストの低減が図られ、普及が促進される側面もあると思います。できるだけ多くの事業者に参画していただいたCNP形成計画を策定し、その進捗を管理しながら、それに対する支援を官民一体となって進めていくことが重要だと思います。

水素、アンモニアの輸入拠点港湾の整備は、非常に大き

な課題だと思います。その際に、本省の検討会でも議論していますが、オープンアクセスタイプの輸入ハブで、大口、小口、さまざまな方が使える施設を時期を逸することなく整備する。上村さんから「まず供給サイドで」という話もありましたが、「まずはこういう方向に進んで行く」ということを示すことも、港湾サイドとしては重要だと思います。

認証制度の話も、非常に重要な取り組みだと思います。民間事業者が取り組んだことがしっかりと評価され、それに対する支援もそうですし、港湾の競争力が高まるような制度をこれから検討していきたいと考えています。

**司会**▷マニュアルを使ってCNP形成計画をつくるのは港湾管理者ですか。それとも、地域の協議会か、企業単位ですか。

**西尾**▷CNP形成計画は、港湾管理者がつくることを想定しています。重要港湾以上の港湾は、ぜひ計画をつくっていただきたいと思います。つくる際には協議会といった行政、民間、関係団体等が入った場を設置していただき、そこの意見を十分踏まえた形で計画を作成する方法が望ましいと考えています。重要港湾以上の港湾は125港あります。先ほどCNPの取り組みとして二点あるとお伝えしましたが、一点目は水素などを受け入れる。二点目は、港で面的に脱炭素化を行うことです。二点目の取り組みは、125港全部でやっていただきたいと思います。一方で一点目の水素等の受け入れは、全部の港が巨大な受入基地になるわけではありません。そこは、拠点となる港について対応していくものと考えています。

**司会**▷村木さんからもお話があったハブアンドスポークのようなことはマニュアルの中に含まれているのでしょうか。

**西尾**▷現在のマニュアル案では、どこを拠点にするかという政策的な中身は入っていません。ただ、今後、最適配置や拠点については別途検討していく必要があると思っています。

**司会**▷最後に皆様から、今日のお話全体を通じてCNPへの今後の期待、特に強調されたいこと、補足されたいことなどをお話いただければと思います。

## 12 日米両国がCNPについて協力することが決定

**西尾**▷臨海コンビナートを擁する日本の港湾では、今、大きなエネルギー転換が迫られています。また、臨海部は昨今の製鉄所の高炉停止などに伴う産業構造の転換やインフラの老朽化といった課題も抱えています。CNPの形成は一義的には温室効果ガスの削減を目的に進めていきますが、環境対策と経済成長の好循環を生み出す観点もしっかり重視

して、政策を進めていきたいと思っています。

政府全体でも、脱炭素化を新たな投資と需要を生み出す成長のチャンスと捉えています。港湾の競争力という観点では、環境面も含めて、荷主や船会社が選択したくなる港、企業が立地したくなるようなクオリティの高い港湾を目指して、関係省庁と連携しながらCNPの形成に向けた取り組みをこれからも加速していきたいと思っています。

温室効果ガス削減は、日本だけ頑張っても限界があり、世界全体で取り組まなければいけない問題です。国際的な協力ということで、今年4月の日米首脳会談の時に、日米で世界の脱炭素化をリードしていくことが確認されました。また、日米コアパートナーシップの中で、「日米両国がCNPについても協力する」とされています。首脳会談の文書に港湾政策が入ることは珍しいことですが、CNPの取り組みが政府全体として重要な位置づけにあることの証であると言えます。今後、日本で先導的な取り組みを進めていきますが、それを海外にも発信し、普及していきたいと考えています。

## 13 カーボン・ニュートラルでバリューチェーンの構築を

**村木**▷西尾課長から、アンモニアの輸入ハブ基地について「オープンアクセス型のターミナルにする」という話がありましたが、今までエネルギーの輸入基地で、その本格的なものはありません。潜在の利用者が幅広く活用できる仕組みにして脱炭素化を大きく加速しようということと、日本企業がアンモニアでも水素でも海外での生産から輸入、利用まで、バリューチェーン<sup>16)</sup>を構築できる仕組みをつくっていくことに繋がる重要な取り組みだと思います。

エネルギーに関しては、日本は様々な努力を重ねてきましたし、エネルギーの生産という上流に参入する努力も行ってきました。しかし利益を生んでいる上流はメジャーや国営エネルギー企業が抑えていてなかなか入っていけなかった歴史があります。アンモニア、水素は、それを変えるいいチャンスではないかと思っています。サプライチェーン全体にプレゼンスを持ち、コストダウンと日本の産業の発展に貢献できるスキーム構築にチャレンジしていく必要があると考えています。

ある研究機関の試算によると、何も努力をしないで脱炭素化を進めてカーボン・ニュートラルを目指すとなると、電力価格が倍以上に上がってしまい、素材産業を含めて日本の産業は立地が非常に難しくなるリスクがあります。

その意味では、国の支援と企業の努力がいかに相乗効果



を生んで、最適なスキームで脱炭素化を進めるかをしっかり検討していく必要があると思います。新たな官民連携の大きなチャレンジでチャンスだと思います。

日米コアパートナーシップの中でCNPが位置付けられたというお話がありました。アンモニアを特に石炭火力の低炭素化に使うことについては、東南アジアを中心として海外への展開も考えています。今アジアには20億kWの石炭火力があつて、簡単にやめられないところが多く、この低炭素化は大きな課題です。日本のアンモニアの石炭混焼技術の展開は東南アジア諸国と連携強化にも繋がると考えています。その中で、CNPというコンセプト、ハブ基地をつくってそこから2次輸送していくやり方を海外にも展開するチャンスがあると思いますし、このプロジェクトはいろいろな広がりが出てくる可能性があると思います。CNPのプロジェクトと連携して、燃料アンモニアのハブ基地を中核とした燃料アンモニアの物流システムの検討、構築を早急にしっかり進めていきたいと思っています。

## 14

### 認証制度でカーボン・ニュートラルに寄与する技術開発の促進を

**上村**▷カーボン・ニュートラルという名称を聞いた時に、よくできている名前だなと思って感心しました。カーボン・ゼロではない。ニュートラルだという。中立ということです。ゼロにするのではなく、何かでカーボンは出すけれども、限りなく少なくしつつ何かで補う。そういうことを言おうとしているのだと思います。

外形標準として、金融面においてある意味、企業を評価していくTCFDが決まっていくことは、この方向に動かざるを得ない。国際会計基準(IFRS)がIFRIC(国際財務報告基準解釈指針委員会)で決まった時も、企業社会が括られてその方向へ行くわけですが、それと同じようなものだと腹に落とすことがカーボン・ニュートラルをやっていく上で大事なことだと改めて思います。

水素やアンモニアがもう少し安価になって、社会、企業の中でコストを下げる意味でも使われていく。それをするにはニワトリが先か、卵が先か。これは完全にニワトリ、供給が先なんだと。これも産官学に落としてやっていくことが大事だと思います。

沿岸センターには確認審査・評価(港湾関連民間技術の確認審査・評価事業)というものがあります。例えば、カーボンが少ない、CO<sub>2</sub>排出が少ないコンクリートや吸収するコンクリート等々も出てきています。あらゆる材質や工法を

めてCNPに寄与するものを認証していく。それが国のスペックとしても使われ、入札の時の条件になったりもする。量が少しですと、どうしても価格が高くなってしまいますので、予定価格を上げてでも、こういうものを積極的に材質、工法として使っていくようにしたいですね。沿岸センターの確認審査や評価を受け、それを後押しする、そういうものを進めていただきたい。

また、CNPの隣には必ずブルーカーボンとなるものを併せてつくる。そういうものをつくる場所が現れたら、沿岸センターで認証していくことも考えられます。人工的にブルーカーボンを生み出す、そういう材質も広まりながら、ESG投資やSDGs投資<sup>17)</sup>に新しい技術、工法が繋がりがながらグリーン成長を促していく。そういう好循環をぜひ作っていきたい。

さらに、カーボン・ニュートラルに関連する企業が作る協議会や、ほかの企業、研究機関、大学へも、「港湾でこんな形で取り組んでいます」と港湾分野にはCNPがあることを、もう少し広報していけば社会全体に広がっていくと思います。期待しています。

**司会**▷皆様からのお話を伺い、わが国のカーボン・ニュートラルへの様々な取り組みが本格化、急速化している状況や、カーボン・ニュートラルの中のトップランナーとして港湾局を中心にCNPに取り組んでいらっしゃる事がわかりました。今日のお話も踏まえ、沿岸センターとしてもわが国がカーボン・ニュートラルを目指す上で、たとえば水素やアンモニアなどの安定供給や産業立地の実現に向けてインフラ環境の整備、あるいは125の港々々でのCNPの実現に寄与する港湾技術の普及、啓発にも取り組んで、カーボン・ニュートラル社会の実現に貢献していきたいと思っています。引き続きご指導、ご助言等を賜れば幸いです。今日はどうもありがとうございました。



**《用語説明》****1. 【グリーン成長】**

日本政府が東日本大震災・原発事故を受けて、原発依存度低減の方針の下導入を進めることを決めた再生可能エネルギー、省エネルギーを「グリーンエネルギー」と呼び、これらの導入・拡大によるエネルギーシフトを、経済成長につなげていこうという考え方。

**2. 【カーボンフリー (CO<sub>2</sub>フリー)】**

製品の使用段階だけではなく、製造段階においてもCO<sub>2</sub>を排出しないこと。例えば、燃料であれば、燃焼する際にCO<sub>2</sub>を排出しない水素、燃料アンモニアを、風力等の再生可能エネルギーによりCO<sub>2</sub>を排出しない製法を用いて製造する場合を指す。

**3. 【有機ハイドライド (メチルシクロヘキサン等)】**

適切な触媒反応を介して水素を可逆的に放出する有機化合物。特にメチルシクロヘキサン (MCH) は、気体の水素をトルエンと触媒反応させて、容積が約1/500となる物質で、常温常圧で安定した液体であることから、水素の貯蔵や輸送を容易にするものとして利用される。

**4. 【グリーン物流】**

物流システムの改善により物流段階におけるCO<sub>2</sub>排出量を削減する取り組みの総称。

**5. 【TCFD】**

気候関連財務情報開示タスクフォース (Task Force on Climate-related Financial Disclosures) の略称。気候変動が金融市場に重大な影響をもたらすと認識が主要国間で広がったことを背景に、金融安定理事会 (FSB) が2015年に設立。投資家などに投資の対象企業の財務が気候変動から受ける影響の考慮を求めたり、企業に情報開示を促したりする。

**6. 【プライム市場】**

東京証券取引所が現在の4つの市場区分 (市場第一部、市場第二部、マザーズ及びJASDAQ (スタンダード・グロス)) を2022年4月から3つに見直すとした市場区分のうちの一つ。他にスタンダード市場とグロス市場があり、プライム市場はグローバルな投資家との建設的な対話を中心に据えた企業向けの市場。

**7. 【グリーンファイナンス】**

各種の環境問題を解決する事業 (グリーンプロジェクト) に投資するファイナンス。具体的には、環境に良い影響を与える、空気や水・土の汚染除去や温室効果ガス排出量削減、エネルギー効率改善や再生可能エネルギーへの投資がある。この投資に使われる債権を「グリーンボンド」という。

**8. 【グリーントランジション】**

環境配慮や持続可能性のある社会への移行のこと。一般的に、CO<sub>2</sub>排出量の観点から「グリーンボンド」の発行基準を満た

さないものの、低炭素経済社会等に移行 (トランジット) するための事業を使用用途とする債権を「トランジションボンド」という。

**9. 【FC】**

燃料電池 (Fuel Cell) のこと。トラックや船舶のFC化に向けた取り組みが実施されている。

**10. 【自立 (分散) 型エネルギーの供給システム】**

需要のある地域に必要な電力を賄える小さな発電設備を分散配置し、系統電力と効率的に組み合わせたもの。平常時の効率的な電力利用だけでなく、災害や事故などにより系統電力が使用できない場合においても、分散型電源による安定的な電力利用ができる。

**11. 【CGS】**

コジェネレーションシステム (Cogeneration System) の略称。2つのエネルギーを同時に生産・供給する仕組みのこと。現在の主流は「熱電供給システム」と呼ばれるもので、まず発電装置を使って電気をつくり、次に発電時に排出される熱を回収して、給湯や暖房などに利用するもの。

**12. 【RTG】**

タイヤ式門型クレーン (Rubber Tired Gantry Crane) の略称。

**13. 【ブルーカーボン】**

海洋生物によって大気中のCO<sub>2</sub>が取り込まれ、海域で貯留された炭素のこと。また、ブルーカーボンを隔離・貯留する海洋生態系 (ブルーカーボン生態系) を指す場合もある。

**14. 【ESG投資】**

環境 (Environment) ・社会 (Social) ・ガバナンス (Governance) 等の企業が持続的成長を目指す上で重視すべき非財務情報も考慮した投資のこと。

**15. 【Nm<sup>3</sup>】**

標準状態 (0°C、1気圧) の空気量のこと、ノルマル立方メートルと読む。

**16. 【バリューチェーン】**

原材料や部品の調達活動、商品製造や商品加工、出荷配送、マーケティング、顧客への販売、アフターサービスといった一連の事業活動を、個々の工程の集合体ではなく、価値 (Value) の連鎖 (Chain) として捉える考え方。

**17. 【SDGs投資】**

SDGs (国連が定めた2016年から2030年までに世界が達成すべき「持続可能な目標 (Sustainable Development Goals)」) の略称で、貧困や飢餓の撲滅、エイズ蔓延防止など主に途上国が抱える課題を中心とした8つの目標に、健康と福祉の増進、技術革新、気候変動への対応等の先進国の課題や環境問題に係る目標を加え、グローバルな環境や社会に関する17の目標と169の小目標で構成される。) を考慮した投資のこと。

# 国際水素サプライチェーン構築に向けた取り組み



## 小山 優

川崎重工業株式会社 水素戦略本部  
プロジェクト総括部 推進部 担当部長

### はじめに

世界中で異常気象による山火事や洪水などの自然災害が発生しており、地球温暖化による影響と考えられ、脱炭素化は待ったなしの状況である。水素は使用時にCO<sub>2</sub>を排出しないことから脱炭素の切り札である。

日本では資源エネルギー庁より産学官の知見を集約した「水素・燃料電池戦略ロードマップ」<sup>1)</sup>が2014年に策定・公開され、より具体化した「水素基本戦略」<sup>2)</sup>が2017年12月に承認された。この中で水素は再生可能エネルギーと並ぶ将来の重要なエネルギーの選択肢と位置付けられ、輸送・発電・産業およびビルや家庭などすべてのセクターでの水素利用推進が掲げられており、水素発電とこれを支える国際液化水素サプライチェーンの商用化を2030年代初頭に開始するとしている。

川崎重工業では、この水素基本戦略を念頭においた技術開発および実証を進めており、水素エネルギーの社会実装に向けて、国際水素サプライチェーンの構築に向けた取り組みを行っている。

本稿では、はじめに世界のエネルギーを取り巻く状況と水素利用への動きを説明し、当社のCO<sub>2</sub>フリー水素チェーンのコンセプトと技術・安全・運用上の成立性の実証を目的として取り組んでいるパイロット実証について紹介する。さらに水素社会実現に向け、経済性を含めた商用化の成立性を見極める商用化実証および設備導入から運用に至るまで経済的に自立する商用化への取り組みを紹介し、最後に日本政府が脱炭素化に向けて新たに取り組む「カーボンニュートラルポート (CNP) 形成の推進」への貢献について述べる。

## 1. エネルギーを取り巻く状況

2015年12月に開催された第21回国連気候変動枠組条約締約国会議 (COP21) では、世界全体の温室効果ガスの削減目標が設定された。世界の平均気温上昇を産業革命前と比較して

2°C未満に抑制することが定められ、さらに1.5°Cに気温上昇を抑える努力目標も規定された。この目標を達成するには、21世紀後半までに温室効果ガスの排出量を実質ゼロにすることが必要不可欠となり、世界中が脱炭素へと大きく舵を切った。このとき日本は2030年までに26%削減 (2013年比) の約束草案を提出している。また、2020年10月に菅内閣総理大臣が2050年カーボンニュートラル・脱炭素社会の実現を目指すことを宣言され、2030年までに温室効果ガスを46%削減、2050年までに実質ゼロとする目標の引き上げが行われた。

脱炭素を達成するために再生可能エネルギーと電池の導入が必要となるが、規模やコストのハードルが高いため、水素の利用を加速させたいという動きも世界中で広がっている。日本は世界に先駆けて2014年エネルギー基本計画に水素エネルギーを盛り込み、水素・燃料電池戦略ロードマップを策定、2017年には水素基本戦略を打ち出した。世界各国の政府もこれに追随し、水素ロードマップや国家水素戦略を策定している。

また、水素エネルギーへの移行の動きは民間企業にも広がっており、エネルギー・資源、プラント、産業ガス、輸送機器などのグローバル企業13社が集まり、水素社会の早期実現に向け活動するHydrogen Council (水素協議会)<sup>3)</sup>が2017年に発足、参画企業数は現在123社となっている。

## 2. 国際水素サプライチェーンの構築

水素エネルギーを安価で安定的に供給するためには、国内での製造だけでは困難であり、海外で製造した水素の大量輸入が有望な選択肢となる。そこで当社は2010年より、豪州ビクトリア州ラトロブバレーの未利用資源である褐炭をガス化し、精製・液化した水素を専用運搬船で日本まで海上輸送する国際水素サプライチェーンの構築に取り組んでいる。水素は極低温 (-253°C) で液化し、気体の1/800の体積となる。また、高性能断熱技術 (二重殻真空断熱) の採用で、LNGと同等の長期



貯蔵を実現する。さらに、液化水素は高純度（99.999%以上）で輸送するため、日本国内で脱水素のエネルギーを必要とせず、蒸発させるだけで燃料電池に供給可能となる。純度を要求されるFCV用燃料（99.97%以上）にも適しており、毒性もなく、無臭のため、市街地での輸送、貯蔵、利用に適している。

当社の液化水素による国際水素サプライチェーン構想に対し、前述の豪州褐炭以外の未利用エネルギーや再生可能エネルギー由来の水素についても多数の国や企業からフィージビリティスタディ（事業成立性検討）の相談が到来している。また、水素利用に関しては、早期に水素ガスタービンの開発に着手し、社会実装の検討も開始している。当社はサプライチェーン全体の技術を一社で保有する世界で唯一の企業として、技術開発・実証を進めており、次章より現在の状況を紹介する。

### 3.パイロット実証事業

2015年度より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）の助成を受けて、液化水素運搬船の輸送容量が商用の約1/120スケールの豪州褐炭由来水素による国際水素サプライチェーンパイロット実証事業を進めている。実証事業の全体構成を図1に示す。本事業では、褐炭からの水素製造および長距離大量海上輸送の技術・安全・運用上の成立性を実証することを目標としている。

パイロット実証事業において船陸間の液化水素荷役実証を

行う神戸液化水素荷役実証ターミナル「Hy Touch 神戸」は、神戸市の沖合に浮かぶ神戸空港島の北東部、約1万㎡の用地に建設されている。2020年5月末、当初計画通り事業主体のHySTRAへの引き渡し完了し、2021年6月には、当社神戸造船所にて建造を終えた液化水素運搬船「すいそふるんていあ」とターミナル間の液化水素による世界初の船陸間荷役実証に着手している。また、豪州で進められていた水素製造プラント、水素液化プラント、積荷基地の建設も完了し、2021年度中には、豪州褐炭由来の液化水素を日本に輸送する実証試験を行う予定である。

#### 3.1 ターミナル概要

神戸液化水素荷役実証ターミナルは、液化水素の貯蔵を行う液化水素タンク、液化水素の船陸間荷役を行うローディングアームシステム（LAS）、および付帯設備から構成される（図2、表1）。また、水素ガスを取り扱う付帯設備として、液化水素タンクから蒸発する水素ガス（BOG：ボイルオフガス）を圧縮するBOG圧縮機、圧縮した水素ガスを貯蔵するBOGホルダー、および液化水素荷役中に発生する水素ガスを処理するベントスタックを備える。BOGホルダーに貯蔵した水素ガスは、ターミナル内設備のガス置換や、液化水素を船から揚荷するバックアップ手段としての加圧圧送などに使用される。また、液化水素タンクへの液化水素充填のため、液化水素ローリーの受入設備も有している。

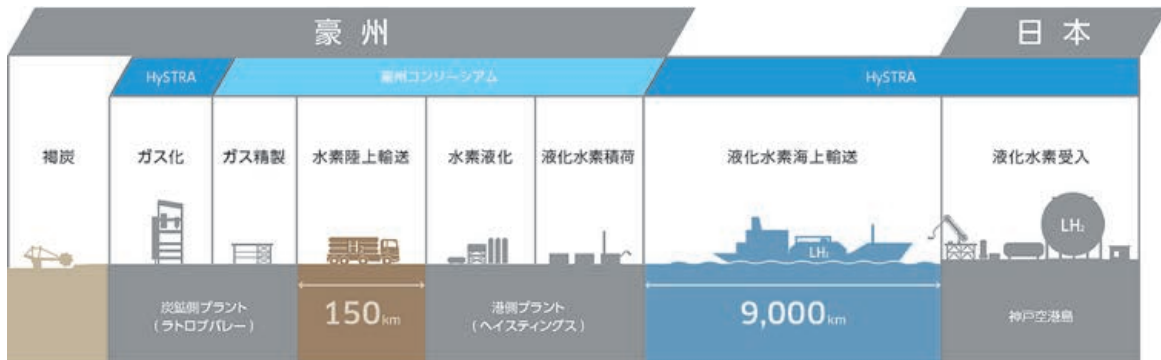


図1 パイロット実証全体構成(提供：HySTRA)

表1 神戸液化水素荷役実証ターミナル 主要目

機器名称	主要目
液化水素タンク	容積 2,500m <sup>3</sup> 直径 19m 構造 球形真空2重殻
ローディングアームシステム	口径 6インチ 構造 真空2重断熱 その他 緊急離脱機構
BOG処理設備 (BOG: Boiling Off Gas)	BOG圧縮機 BOGホルダー ベントスタック
その他設備	ローリー受入設備等



図2 建設中のターミナル外観

### 3.2 液化水素タンク

液化水素タンクは、実証試験により豪州から輸送される液化水素の受入・貯蔵に使用される他、液化水素運搬船との荷役実証のため日本国内から陸送される液化水素の貯蔵に使用される。液化水素は-253℃という極低温であるため、高度な断熱技術を用いて入熱による蒸発を防止しなければならない。そのためタンクの構造は魔法瓶と同じ真空2重断熱方式を採用している。この液化水素タンクが建設されるまでは、種子島宇宙センターに設置されている容積600m<sup>3</sup>のものが国内最大サイズであったが、このタンクは2,500m<sup>3</sup>の容積であり、国内最大容量を大きく更新した。

### 3.3 ローディングアームシステム

LASは海上に係留される船舶と接続して荷役を行うために陸上側に設置される設備である。船舶が着岸した後、船側配管のマニホールドと接続し、荷役作業に使用される。世界中に極低温(-253℃)の液化水素に対応したLASは存在せず、液化水素運搬船と同様に世界初の実証設備となる。このLASは、揺動する船と地上の固定配管とを安定的に接続し、従来のLNG用のLASよりも断熱・密封性能を向上させた真空二重フレキシブルホースを採用している(図3)。



図3 ローディングアームシステム外観

### 3.4 液化水素運搬船

液化水素運搬船「すいそふるんていあ」(図4)は、真空二重断熱方式の貨物タンクを1基搭載しており、蓄圧式シリンダー型を採用している。貨物タンクの内槽支持構造は、強度と断熱性能が高いGFRP(ガラス繊維強化プラスチック)を適用している。2017年度に本船の詳細設計・建造に着手し、同年に貨物タンクの製造を開始、2019年6月に船体の起工を行い、2020年10月に海上試運転において健全性を確認した。2021年6月からは、神戸液化水素荷役実証ターミナルに着岸、ターミナルと連携して液化水素の荷役を含む各種実証試験に着手している。



図4 海上試運転中のすいそふるんていあ

表2 すいそふるんていあ 主要目

全長	116メートル	航海速力	13ノット <sup>(*)</sup>
全幅	19メートル	航続距離	11,300海里 <sup>(*)</sup>
定員	25名	推進方式	電気推進

(\*)1ノット=1海里/時=1.852km/時

## 4. ガスタービン発電での水素利活用

ガスタービンは多様な燃料に対応できるという特長を有するが、水素は天然ガスに比べて燃焼速度が速く、燃焼温度も高くなるため、窒素酸化物(NOx)の発生抑制と安定燃焼を実現する燃焼器の開発が必要となる。燃焼方式としては、燃焼安定性に優れた拡散燃焼に水を噴射してNOxを抑制する「ウエット方式」と、空気と燃料の混合方法などを工夫することによりNOxを抑制し、高効率化を可能とする「ドライ低NOx方式」の両方式の技術開発と実証試験を行った。

ウエット方式の水素ガスタービンは、NEDO助成事業「水素CGS活用スマートコミュニティ技術開発事業」(2015~2018年度)へ適用し、水素コージェネレーションシステム(水素CGS)として実証を行った(図5)。実証設備は神戸市ポートアイランドに建設され、2017年12月に設備が完成、試運転を経て2018年3月より水素と天然ガスの混焼および水素専焼による熱電併給の実証試験を開始した。同年4月に行った実証試験では、水素専焼での運転に世界で初めて成功すると共に、近隣の公共施設へ電力約1.5MW、熱(蒸気)約1トン/時を同時



図5 水素コージェネレーションシステム



供給し、水素エネルギーによる熱電併給も達成した<sup>4)</sup>。

この実証事業と並行して、当社では微小な水素火炎を用いたマイクロミックス燃焼技術を新たに開発し、ドライ低NOx方式の水素専焼燃焼器も開発した。この燃焼器をNEDO助成事業「ドライ低NOx水素専焼ガスタービン技術開発・実証事業」(2019～2020年度)において、神戸市ポートアイランドの実証設備へ搭載し、2020年5月に世界初となるドライ方式での水素専焼運転にも成功した。

## 5. 商用化への取り組み

2030年初頭の国際液化水素サプライチェーンの商用化を実現するには、パイロット実証事業で取り組んでいる褐炭からの水素製造および長距離大量海上輸送の技術・安全・運用上の成立性検証と並行して、機器サイズは商用規模(大型化)としつつ、プラント構成はミニマム系列として経済性を含めた商用化の成立性を見極めるための実証が必要である。当社は、機器システム・部品メーカーと連携し、商用化に必要な大型機器の開発を目標としたNEDO助成事業「液化水素の輸送貯蔵機器大型化および受入基地機器に関する開発」に、2019年度より着手している。さらに液化水素運搬船の商用化では、液化水素のBOGを推進システムへ利用する技術や大型液化水素貯蔵タンクシステムに適用する新たな断熱方式の開発にも着手している。日本の船級機関である日本海事協会からは、「液化水素運搬船用貨物タンクシステムの設計基本認証」も取得した。日本が水素の大量利用の実現により世界の脱炭素化をリードするためにも、当社は液化水素の大量輸送技術開発・実証に引き続き取り組んで行く。

## 6. 脱炭素に向けた新たな取り組み

脱炭素社会実現に向け、これまでに述べた製品・技術の面的な利用を加速させる新たな日本政府の取り組みとして、国土交通省港湾局が中心となって進める「カーボンニュートラルポート(CNP)形成の推進」がある。この政策の概要を説明し、当社の取り組みについて述べる。

国土交通省は2021年7月に2050年のカーボンニュートラル社会実現に向けて、2030年度までの10年間に重点的に取り組む分野横断・官民連携のプロジェクト、政策パッケージをとりまとめ、我が国のCO<sub>2</sub>排出量の約5割を占める運輸・民生部門の脱炭素化等に向けた地球温暖化緩和策、気候危機に対応した防災・減災・国土強靱化等の観点からの気候変動適応策等に戦略的に取り組む「国土交通グリーンチャレンジ」を取りまとめた。この中には、分野を横断する6つの横断的な重点プロジェクトが含まれており、「港湾・海事分野におけるカーボン

ニュートラルの実現、グリーン化の推進」はその1つである。具体的な取り組みとして、水素・アンモニア等の輸入・貯蔵、利用等を図るカーボンニュートラルポート形成の推進<sup>5)</sup>が提示された。これを受けて、2021年4月からは、国土交通省港湾局が指定する国際拠点港湾、重要港湾(125港)への展開が進められている。この取り組みは、当社の取り組む国際水素サプライチェーン構築の中で取り組んでいる水素技術の開発・実証と親和性が高いため、神戸港、名古屋港では検討会に参加、さらに小名浜港や北九州港のCNP検討会や四国地域、坂出港の勉強会では、当社の水素社会実現に向けた取り組みや製品・技術を説明し、CNP形成に向けた具体的な検討の協力を行っている。この取り組みは今後さらに拡がると思われる。

## おわりに

本稿では国際水素サプライチェーン構築に向けた液化水素の海上輸送および船陸間荷役、水素ガスタービン発電等の実証事業の取り組みを説明し、現在の状況を紹介した。さらに、商用化に向けた計画や脱炭素社会実現に向けた新たな日本政府の政策であるカーボンニュートラルポート形成への取り組みについて述べた。

来るべき水素社会において、海上輸送した液化水素を港湾に設置した受入れターミナルで大規模に受け入れ、近隣で水素を大量に消費するサプライチェーンを構築することは、港湾での環境面での貢献に加え、エネルギー源の多様化や新たなエネルギー産業創出による地域経済の活性化にも寄与する。また、今後、世界の港湾に水素受入ターミナルが建設されることを見据え、液化水素荷役ターミナルに関する国際規格・基準の整備に主体的に取り組むと共に、ターミナルや港湾での水素の利活用にも積極的に協力していく。これらの取り組みを通じ、水素社会の実現、更には脱炭素社会の実現に貢献する。

### 【参考文献】

- 1) 経済産業省ホームページ、水素・燃料電池戦略ロードマップ [http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso\\_nenryodenchi/report\\_001.html](http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso_nenryodenchi/report_001.html) (2014年6月24日)
- 2) 経済産業省ホームページ、水素基本戦略 <http://www.meti.go.jp/press/2017/12/20171226002/20171226002.html> (2017年12月26日)
- 3) Hydrogen Councilホームページ <https://hydrogencouncil.com/en/> (2017年1月)
- 4) NEDOニュースリリース、世界初、市街地で水素100%による熱電供給を達成 [https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_100945.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100945.html) (2018年4月20日)
- 5) NEDOニュースリリース、世界初、ドライ低NOx水素専焼ガスタービンの技術実証試験に成功 [https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101337.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101337.html) (2020年7月21日)
- 6) 国土交通省ホームページ、カーボンニュートラルポート(CNP)の形成について <https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001390169.pdf>



# 燃料アンモニアのサプライチェーンについて



## 中山 伸一郎

三菱商事株式会社

次世代発電燃料事業部 燃料アンモニア・水素導入室

### 1. はじめに

我が国は、エネルギー調達を海外からの石油・天然ガス・石炭等の輸入に大きく依存しており、2010年代のエネルギー自給率は10%前後で推移している。エネルギー政策の基本方針であるS+3Eの実現にあたっては、再生可能エネルギーの導入を積極的に進めつつ、海外から安定的に競争力のあるエネルギー調達を継続する必要があると考えられる。特に、気候変動対策としての温室効果ガス排出量削減は、速やかな対応が求められており、新たなエネルギー源として水素利用の検討が行われてきた。水素の大規模利用にあっても国内水素供給は限定的である為、海外から調達する必要があるとあり、内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）ではエネルギーキャリアに関する検討が実施され、その中でアンモニアにも注目が集まった。

アンモニアは、①水素の効率的なキャリアであること、②物性が安定しておりエネルギーとして直接利用できること、③製造技術が確立し年間約2億トンの生産が有ることから、次世代

エネルギーとしての期待が高まっている。エネルギー輸入国である我が国にとって、脱炭素社会における有効な手段、また、ゼロエミッション火力としてのアンモニアを利用した発電、船舶燃料としての検討が進められており、その検討状況について報告する。

### 2. エネルギー基本計画におけるアンモニアの位置付け

先般公表された第6次エネルギー基本計画の素案<sup>2)</sup>において、既存のエネルギー源に加えて水素・アンモニアが新たに言及された。2030年度に向けた温室効果ガスの新たな削減目標の達成に向けて野心的な見通しが示され、総発電量9,300～9,400億kWhに対して、水素・アンモニアで電源構成1%程度を賄うことが想定されている。アンモニアに関しては既設の石炭火力への混焼技術の導入・普及により2030年時点で年間300万トンの需要が想定されている。さらに、2050年のカーボンニュートラルの実現に向け、水素・アンモニア発電が電源構成の10%程度を占めることが参考値として公表されている。

同素案において、火力発電は安定供給を前提とし、再エネの瞬時的・継続的な発電電力量の変化にも対応可能な設備容量を確保する一方、調達リスク・発電量当たりのCO<sub>2</sub>排出量の観点や、備蓄性/保管の容易性といったレジリエンス向上への寄与度等の観点を踏まえ、LNG・石炭・石油における適切な火力のポートフォリオを維持するとされている。また同時に、火力発電の継続と脱炭素を並行して実現させ得る燃料アンモニアの導入検討が進められている。

仮に、石炭火力発電において20%のアンモニア混焼を行うと、CO<sub>2</sub>排出は20%抑制される。国内大手電力会社の保有する全石炭火力発電において20%混焼を実施した場合、約4,000万トンのCO<sub>2</sub>排出抑制

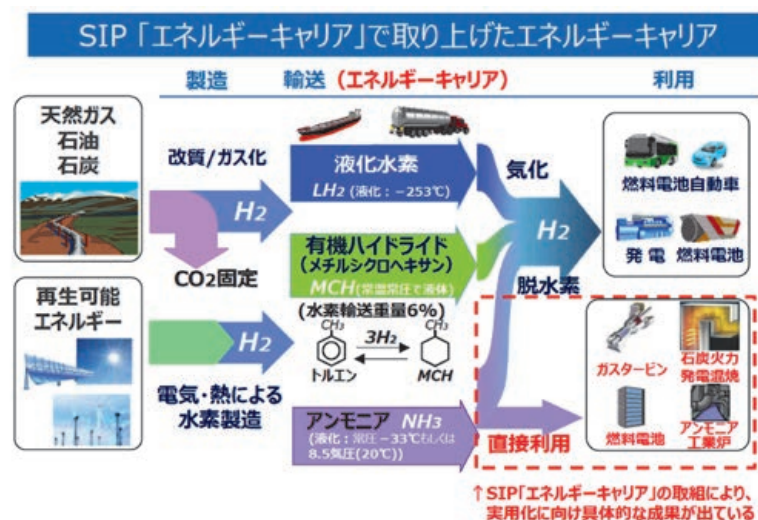


図1 SIP「エネルギーキャリア」で取り上げたエネルギーキャリア<sup>1)</sup>

となるが、これは国内電力部門からの排出量の約1割を削減することになる。また、国内大手電力会社の保有する全石炭火力発電をアンモニア専焼にリプレースした場合、約2億トンのCO<sub>2</sub>排出抑制効果が有り、これは現在の国内電力部門のCO<sub>2</sub>排出量を半減することになる。

国際海事機関(IMO)は2008年を基準年とし、2030年までに国際海運全体の平均燃費を40%以上改善、国際海運からのGHG総排出量を2050年までに50%以上削減、早期にGHG排出ゼロの目標を掲げている。アンモニアは船舶燃料としての活用も検討されており、国際海運分野における脱炭素対応において、船舶用燃料としての活用も期待されている。

### 3. 既存のアンモニア市場規模と 燃料アンモニアの導入に向けた課題

現在アンモニアは、肥料用途を中心とした市場で取引されて

おり、全世界生産量は約2億トン/年である。その中で、貿易量は1割程度の約2千万トン/年に留まり地産地消の傾向がある。

アンモニアの取引価格は基本的に需給に影響される。熱量換算価格で他燃料と比較すると、基本的に他燃料よりも価格は高く、かつ変動が大きいことがわかる。(図4参照) 従って、アンモニアを燃料用途で活用する際には、安定的かつ競争力ある価格で調達可能な仕組みを作る必要がある。

アンモニアは冷凍品・中圧品・高圧品の3形態にて輸送され、LPG等その他ガス系貨物と同型の物流設備が使用されるが、アンモニアは金属腐食性を持つ為、焼鈍等の特殊加工を追加で施す必要がある。設備投資・運賃の高額化並びに設備のアンモニア専用化が進む傾向にある。

国内では宇部興産、三井化学、昭和電工、日産化学がアンモニアを製造しており、中圧品内航船(1,000トン以下)・高圧品ローリー(約10トン)等により輸送される。一方、輸入品は、

#### 燃料アンモニア利用によるCO<sub>2</sub>削減と消費量

- 将来的なアンモニア専焼(アンモニア火力発電)へのリプレースによって電力部門の5割のCO<sub>2</sub>排出削減。石炭火力での20%混焼によっても、電力部門の1割の削減が可能。
- 他方、石炭火力1基(100万kW)で年間50万トンの燃料アンモニアが必要となる。

ケース	20%混焼 <sup>(※1)</sup>	50%混焼 <sup>(※1)</sup>	専焼 <sup>(※1)</sup>	(参考) 1基20%混焼
CO <sub>2</sub> 排出削減量 <sup>(※2)</sup>	約4,000万トン 電力部門のCO <sub>2</sub> 排出の約1割	約1億トン	約2億トン 電力部門のCO <sub>2</sub> 排出の約5割	約100万トン
アンモニア需要量	約2,000万トン	約5,000万トン	約1億トン	約50万トン

※1 国内の大手電力会社が保有する全石炭火力発電で、混焼/専焼を実施したケースで試算。

※2 日本の二酸化炭素排出量は約12億トン、うち電力部門は約4億トン

図2 燃料アンモニア利用によるCO<sub>2</sub>削減と消費量<sup>3)</sup>

- 現在、世界の原料用アンモニア生産は年間約2億トン程度。そのうち貿易量は1割(約2000万トン)に留まり、ほとんどが地産地消されている。
- 日本の原料用アンモニア消費量は約108万トン(2019年)。うち、国内生産は約8割、輸入は約2割(インドネシア・マレーシアより)。

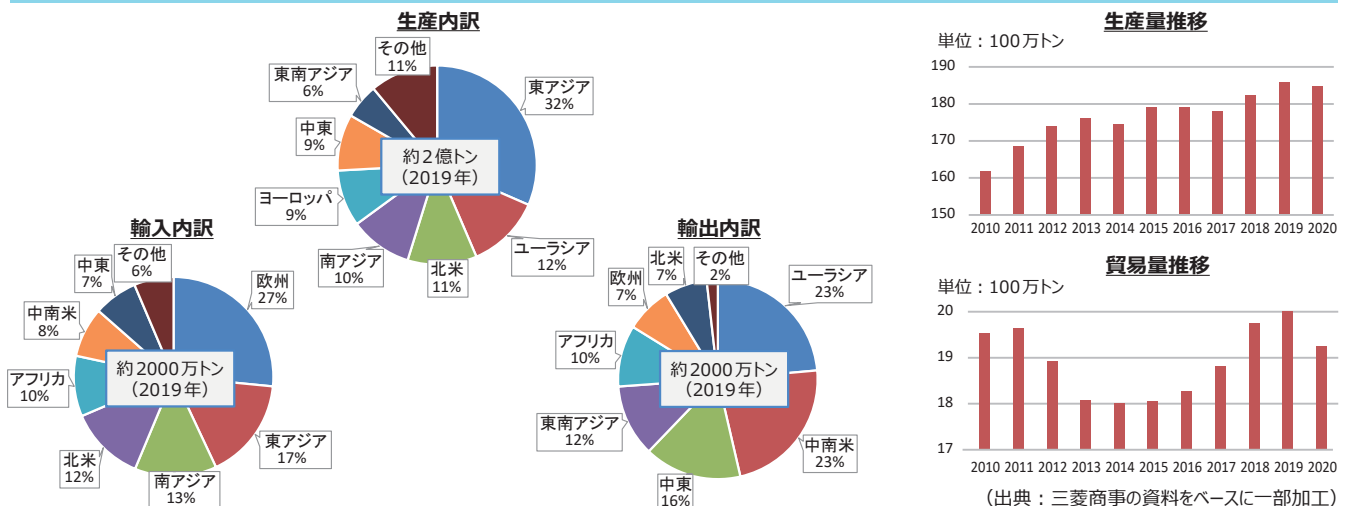


図3 アンモニア市場に関する現状<sup>3)</sup>

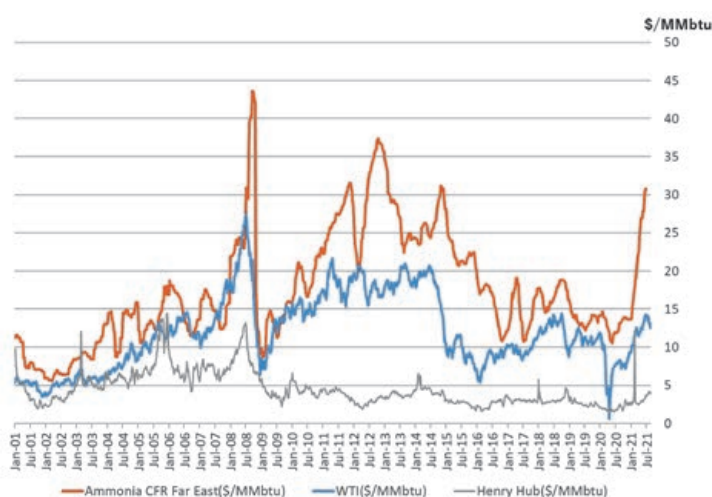


図4 アンモニアと原油・天然ガスの価格推移（三菱商事調べ）

表5 アンモニア輸送形態<sup>4)</sup>

輸送形態	圧力	温度	ロット	輸送方法
冷凍品	常圧	摂氏 -33.3度	15,000トン 以上	大型船
中圧品	約3~4kg/cm <sup>2</sup>	摂氏±0度	200トン~ 1,000トン	小型船
高圧品	~18kg/cm <sup>2</sup>	常温	10トン前後	ローリー・ パイプライン

冷凍品大型船で輸送され、本邦3拠点及び韓国1拠点の輸入タンク（新居浜/住友化学、水島/旭化成、名古屋/東レ、韓国麗水/南海化学）において一時受入された後、中圧・高圧品として二次転送されている。

我が国では国内品の物流が太宗を占めてきた歴史から、タンク容量及び受入栈橋は小規模である傾向にある。対して韓国・台湾は比較的早い時期に輸入品への切替を行った経緯もあり、比較的大規模設備で輸入されている。

燃料用途のアンモニア消費が想定される既存石炭火力発電所では、現在は脱硝用途でアンモニアを消費しており、概ね小型

（約1千トン未満）の受入設備にて内航船やローリー等による小口配送・納入（約10~数百トンロット）が行われている。

石炭火力発電プラント1基（100万kWh）への20%混焼を行う場合、50~60万トン/年のアンモニア使用が想定されるが、中圧・高圧での小規模物流は現実的でなく、大規模物流インフラ構築が必要となる。

#### 4. 供給拠点の開発

##### (1) 燃料アンモニア製造方法

アンモニア（NH<sub>3</sub>）の一般的な製法は、水素（H<sub>2</sub>）と窒素（N<sub>2</sub>）の二種類の原料をハーバー・ボッシュ法により化学合成して製造される。窒素源は空気中に約8割存在する窒素が使用され、水素源は経済合理性の観点から大半が天然ガス、石炭等の化石燃料（=炭化水素）が使用されている。この化石燃料の改質反応による水素製造時に、CO<sub>2</sub>が同時に発生するが、CCS（EORを含む）やカーボンリサイクルにより処理することで、化石燃料由来のアンモニアの低炭素化が図られる。

また、別のアンモニアの低炭素化の方法として、再生可能エネルギーを用いた水（H<sub>2</sub>O）の電気分解による水素製造がある。水の電気分解では、水素（H<sub>2</sub>）と酸素（O<sub>2</sub>）が発生し、CO<sub>2</sub>は発生しない。

現在の技術と再生可能エネルギーのコストからすると、化石燃料（天然ガス）由来のアンモニア製造はCO<sub>2</sub>処理コストを勘案してもコスト競争力に優れ、導入時期に於いては天然ガス由来+CO<sub>2</sub>処理したアンモニアの検討が主になされている。燃料アンモニアの社会導入促進に当たっては、燃料アンモニアの低炭素の価値が担保される様、一般社団法人クリーン燃料アンモニア協会が中心となり、ライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量評価を考慮した形での、化石燃料由来のアンモニア(+CO<sub>2</sub>処理)や、再生可能エネルギー由来のアンモニア等の定義・認証システムについての議論が進められている。

#### <燃料アンモニア製造方法>

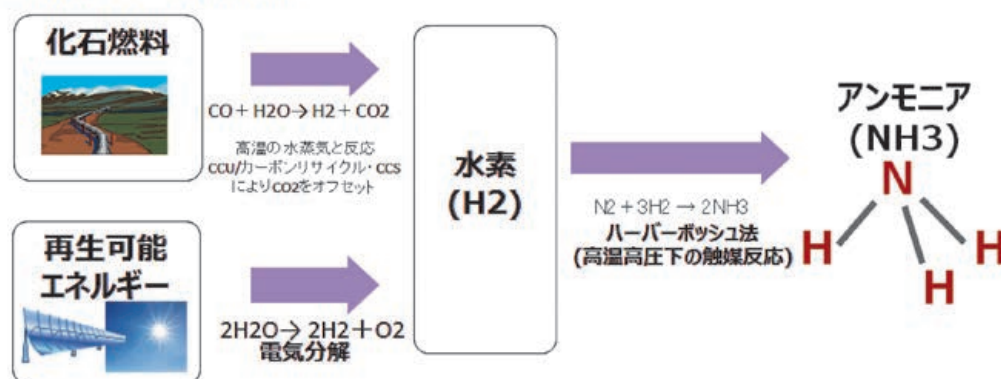
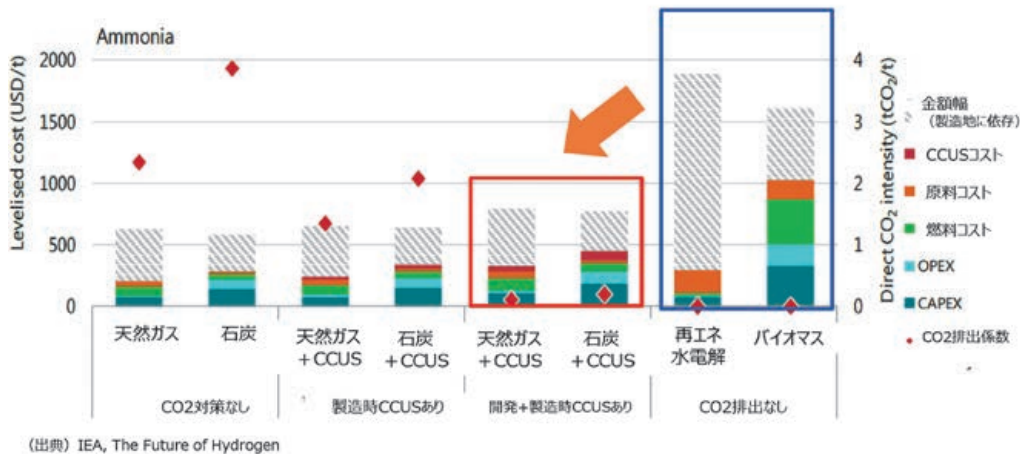


図6 アンモニアの製造方法<sup>5)</sup>



&lt;製造方法毎のコスト比較（2018年）&gt;

図7 製造方法毎のコスト比較<sup>5)</sup>

## (2) 生産の適地

生産地においては、産油・ガス国/再生可能エネルギー生産やCO<sub>2</sub>処理方策等の観点から踏まえて経済性を担保していく必要がある。

北米は豊富な天然ガス埋蔵量に加え全国にパイプライン網が整備されており、また、天然ガス市場 (Henry Hub) が存在する。原料ガスのインフラが充実していることに加えて、CO<sub>2</sub>パイプライン網が存在、商業ベースでCO<sub>2</sub> EORが行われ、CO<sub>2</sub>販売の蓋然性が高い為、有力な供給候補地と考えられる。同様に豪州、中東諸国もガス埋蔵量、CO<sub>2</sub>をCCS処理する適地が存在するという観点から、有力な供給候補地と考えられる。

また、2020年には日本エネルギー経済研究所が、サウジアラビアでのブルーアンモニア製造、本邦向けに輸送し、サプライチェーン実証を行っており、斯様の知見活用も重要となる。

## (3) 米国における燃料アンモニア製造・供給の考察

戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) /エネルギーキャリア「CO<sub>2</sub>フリー水素利用アンモニア製造・貯蔵・輸送関連技術の開発」(三菱商事研究開発期間：平成29年11月1日～平成31年3月31日)において、米国における既存インフラを利活用する形での、燃料アンモニア生産コスト及びCO<sub>2</sub>処理についての考察を紹介する。

### ①生産コスト

ルイジアナ州Geismerに於いて、天然ガスからアンモニアを製造し、プロセスから回収したCO<sub>2</sub>をDenbury社 (CO<sub>2</sub>パイプラインを所有するEOR油田・ガス田開発会社)へ販売するケースを想定して生産コストの考察を行った。

・諸前提条件に基づき算出した米国CO<sub>2</sub>フリーアンモニアの日本着 (CFR Japan) コストは、IEEJが推定している\$350/MT程度に収まる可能性があるとの検討結果となった。

表8 プラント検討前提条件の主要項目/コスト試算前提条件<sup>4)</sup>

項目	詳細
立地	Geismer, ルイジアナ州
生産能力	3,300MTPD. 1系列
稼働時間	8,000時間/年
CO <sub>2</sub> 回収率	プロセス：全量、排ガス：90%。 合計：>95%
天然ガス調達	プラントBLで天然ガスグリッド (SONAT or TETCO)へ接続
CO <sub>2</sub> パイプライン	プラントBLでDenbury社CO <sub>2</sub> パイプラインへ接続
出荷	隣接するミシシッピ川より出荷

・比較的低炭素で同じ天然ガス由来燃料のLNGは、日本着コストはアンモニア換算で約\$200~250/MTの水準であるが、天然ガスを直接-162°Cに冷却し、液化するLNGに比し、天然ガスを化学的に (エネルギーを消費して) 加工し、炭素 (CO<sub>2</sub>) を除いた形で-33°Cで液化するアンモニアは、製造工程における消費エネルギー見合いの経済性が劣後するため。アンモニアの燃料使用実現に際しては、この経済性の溝を埋め合わせる政策支援 (補助金乃至はCO<sub>2</sub>チャージ等) の設計・導入が重要である。

### ②CO<sub>2</sub>処理

・米国では過去約40年間に亘りCO<sub>2</sub> EORが実施されており、2016年時点で約145のCO<sub>2</sub> EORプロジェクトが稼働し、0.3MMbbl/日の原油が生産されている。米国CO<sub>2</sub> EOR市場は、Permian (TX,NM州) /Gulf Coast (TX,LA州) /Rocky Mountain (WY州) /Midcontinent (TX,KS州) の主要4地区に分布し、これらの地区合計で米国市場の約90%を占める。

・2016年時点のCO<sub>2</sub>供給量は約76Mil MT/年あり、内、天然由来 (CO<sub>2</sub>田からの産出) が54Mil MT/年 (72%)、工業由来 (排ガス、化学工業等由来) が22Mil MT/年 (28%)を占める。CO<sub>2</sub>の潜在的な供給量は両ソース合計で33.5Tcf (≒32年間

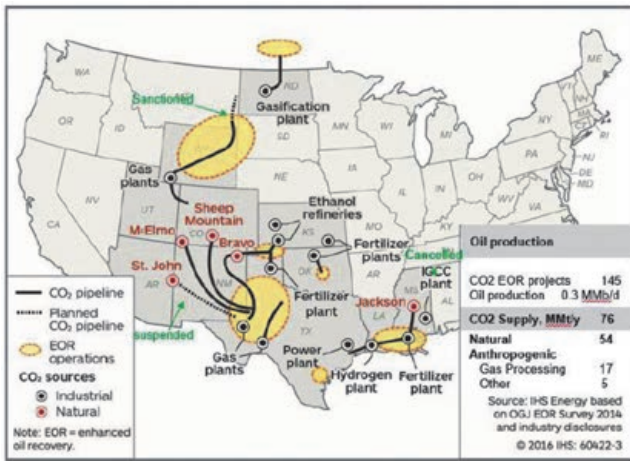


図9 米国CO<sub>2</sub>供給ソース、CO<sub>2</sub> EORオペレーション纏め<sup>4)</sup>

分)存在するが、天然由来のCO<sub>2</sub>供給能力は減少傾向にあり、工業由来のCO<sub>2</sub>源開拓への要求が高まっている。

## 5. 本邦での輸入受入基地

国土交通省にて、国際物流の結節点・産業拠点となる港湾において、水素・アンモニア等の次世代エネルギーの大量輸入や貯蔵・利活用等を図るとともに、脱炭素化に配慮した港湾機能の高度化等を通じて温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする「カーボンニュートラルポート (CNP)」の形成検討が開始されている<sup>6)</sup>。燃料アンモニアの大規模受入基地の整備を進めるに当たっては、CNPの検討と連携を図り平仄を揃え進めていくことが重要となる。

燃料アンモニアの基地整備の課題として、①最適な立地選定(港湾制約・需要地分布等を考慮)、②安全・環境上の問題への対応(地震津波災害等への対応、プロセッシング関連設備の安全管理)、③港湾設置に対する地域コンセンサスの形成等が考えられる。

## 6. おわりに

次世代エネルギーとして期待される燃料アンモニアの大規模サプライチェーン構築において、2030年300万トン/年の国内利用、2050年1億トン/年規模の国内外利用を見据え、以下の観点での取組が重要と考える。こうした取組を通じ、日本企業による中長期的な燃料アンモニアの安定調達を達成し、且つ、アジア諸国への技術やノウハウの展開へと繋げ得ることが期待される。

- (1) 既存の肥料・化学市場への影響が及ばない様、燃料需要立ち上がりのタイミングと合わせた生産拠点の開拓・輸送方法の整備。
- (2) 我が国がコントロール出来る形で燃料アンモニアを確保する為、日系企業が主体となった生産拠点開発、及び、導入初期からの計画的な最適ロジスティクス整備。
- (3) 燃料アンモニア導入官民協議会やCNP検討会等に基づく、官民一体のAll Japanによる導入促進を前提としたグランドデザインの検討・政策支援等の取組。

### 【参考文献】

- 1) 内閣府. SIP (エネルギーキャリア) の取組み～水素エネルギーキャリアとしてのアンモニアの役割, 2018年5月
- 2) 資源エネルギー庁. エネルギー基本計画 (素案), 2021年7月
- 3) 資源エネルギー庁. 「燃料アンモニアサプライチェーンの構築」プロジェクトの研究開発・社会実装の方向性, 2021年8月
- 4) 三菱商事. 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) / エネルギーキャリア「CO<sub>2</sub>フリー水素利用アンモニア製造・貯蔵・輸送関連技術の開発」, 2019年3月
- 5) 燃料アンモニア導入官民協議会. 燃料アンモニア導入官民協議会中間取りまとめ, 2021年2月
- 6) 国土交通省港湾局. カーボンニュートラルポート (CNP) の形成について, 2021年3月



図10 カーボンニュートラルポートのイメージ<sup>6)</sup>

# 港湾向けトラックのFC化について



## 佐々木 隆

日野自動車株式会社  
電動パワートレーンシステム開発部  
部長



## 渡邊 浩章

日野自動車株式会社 車両企画部  
大型トラック・バスFC車開発担当  
チーフエンジニア

## 1. 日野の環境への取り組み

日野は地球環境への責任を果たすべく、『日野環境チャレンジ2050』を2017年10月に公表。2050年までのカーボンニュートラル実現を含む「環境負荷ゼロ」へ、3つの方向性でチャレンジしている。(図1)

3つの方向性とは、電気自動車や燃料電池車という次世代の車づくり、ハイブリッド車や代替燃料を使った従来技術の向上、そして物流全体の効率化による取り組みである。これらを上手く組み合わせ2050年のカーボンニュートラルを目指している。

一方で、商用車はお客様が仕事の道具として使われておりCO<sub>2</sub>排出量が少ない等の環境にやさしいだけでは使って頂けない。お客様にとって、たくさん儲かる、たくさん積める、たくさん走れるなど、従来のディーゼル車に比べ商用車ならではの機能と環境対応の両立が不可欠となっている。

## 2. 商用車の役割と用途

主な電動車にはハイブリッド車 (HEV)、バッテリーEV車

(BEV) そして燃料電池車 (FCEV) があるが、HEVは、全ての商用車においてCO<sub>2</sub>削減効果が期待できる。また、BEVとFCEVは、強み・弱みがあり、積載量・移動距離等のお客様のニーズに合わせて、最適な電動商用車を準備していく必要がある。(図2)

商用車の電動化を推進するにあたっては、2027～30年にかけて世界でCO<sub>2</sub>等の規制が予定されており、それまでは普及拡大期、それ以降は本格的な普及期と捉えている。普及拡大期では、自社とパートナーの技術を活用し、スピーディーに電動車を市場投入していくとともに、本格的な普及期に備え、最適なプラットフォームをパートナーと協業で開発していく。

一方、商品軸では、足元はインフラ整備が不要で確実にCO<sub>2</sub>を削減できるHEVの市場導入を拡大しながら、BEVを都市内向けの車両から市場投入。FCEVは実証試験を実施し、インフラ整備と連動しながら実用化を目指す予定である。

## 3. FC大型トラックのメリット

走行距離が長く、積載量が大きい大型トラックの電動化とし

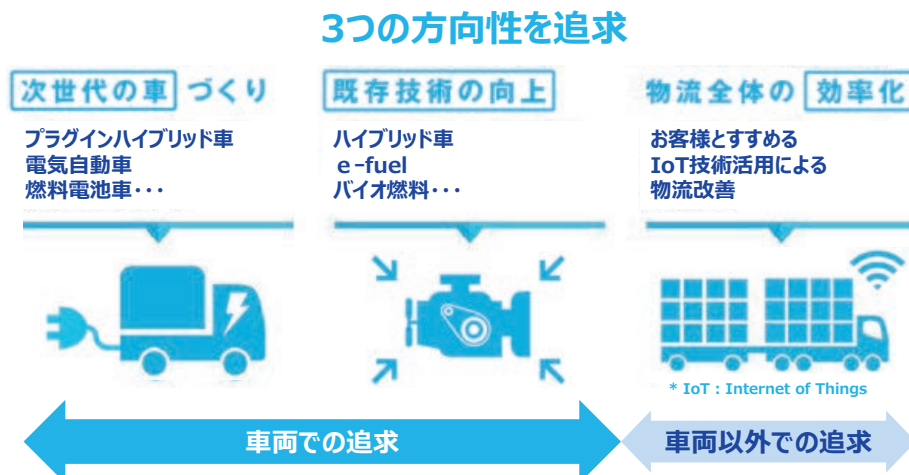


図1 日野環境チャレンジ2050



## 商用車はお客様のニーズに合わせて「適材適所」



図2 商用車の使われ方



図3 FC大型トラックのメリット

では、ゼロエミッションであることは当然のことながら、以下の商用車の機能の観点でFCEVが最適と考えている。

- ・BEVに対し、走行距離が長い
- ・エネルギーの充填時間がBEVに対し短い
- ・BEVに対し、積み荷（重量）が多い

また、FC大型トラックは水素使用量が多いことにより水素需要に貢献することができ、更に災害時の給電対応などの付加価値もある。(図3)

### 4. FC大型トラック普及への課題

しかしながら、FC大型トラックはBEVに対しては前述のように優位性があるものの、従来のディーゼル車に対しては下記のような主に3つの課題があり、これらの課題を国はじめ関係各所と連携して解決すべく推進中である。

1) 水素タンク・バッテリー等が従来のディーゼル車に

対し追加されるため、荷台のスペースや積み荷重量を減らさなければならない点である。自動車メーカは部品の小型化や軽量化を推進するとともに、安全性を確保した上でこれらの規制緩和に向けて関係各所と調整を図る。(図4)

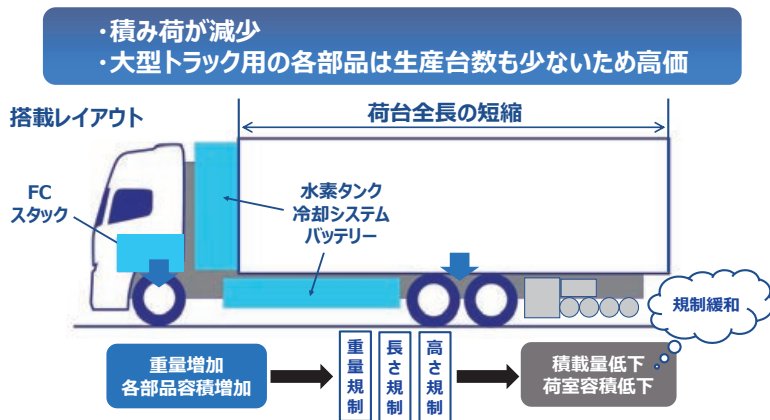


図4 FC大型トラックの課題

- 2) ディーゼル車並みの水素充填時間とするためには、水素ステーションの大型化と充填規格を新規に開発する必要がある点である。現行のバス用ステーションでの充填時間は約30分となり、ディーゼル車の平均的な給油時間10分程度に対し大幅に長くなる。この間はトラックの稼働が止まってしまう、運送事業者にとっては大きな問題となる。なお、新規格はNEDO事業にて開発中である。
- 3) 現状では、車両購入費、燃料費などの車両を使っていたための総費用がディーゼル車に比べて高額になってしまう点である。自動車メーカーとしてはコスト低減に全力を尽くすとともに、当面は車両購入費用と水素費用に対する国・自治体の補助金が必要である。

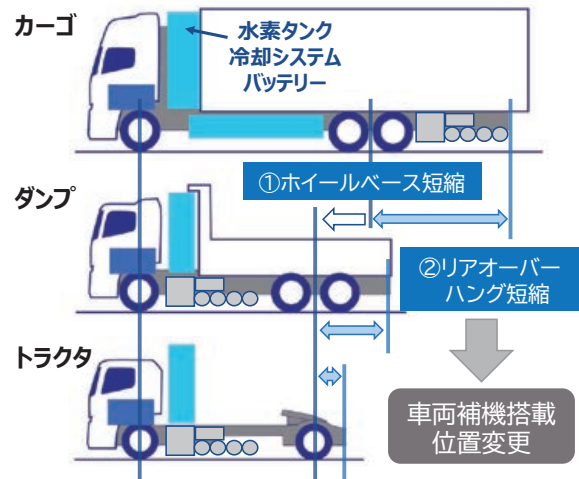


図5 港湾トラック

### 5. 港湾トラックへの対応

大型トラックは、カーゴ、ダンプ、トラクタに分類される。港湾トラックで求められている車は、ダンプとトラクタである。これらの車両はカーゴ系に比べホイールベースが短く、燃料電池、水素タンクなどのFCユニット搭載スペースが狭くなり車両成立がより厳しくなる。(図5)

これを解決するには、電動化部品の小型化・軽量化が必要である。さらに、ダンプ車両は大きな上物架装を動かすために必要なPTO (Power Take Off : 動力取出し装置) を電動化する技術開発も必要となる。このようにダンプ・トラクタのFCEV化は、カーゴ系のFCEV化と比べ更なる技術開発が必要である。

### 6. FC大型トラック普及に向けて

水素を使ったモビリティ社会実現のためには、供給側と需要側の好循環が重要と考える。車両と水素インフラ両方が同時にないとお客様には買っていただけない。車両メーカーとしての車両性能の向上、コスト低減と、一方で安定して安価なCO<sub>2</sub>フリー水素の供給設備が普及のカギとなる。(図6)

この観点から、海外からの安価でCO<sub>2</sub>フリー水素が陸揚げされ、発電所なども含め大きな水素需要が見込める港湾地区は、供給と需要の好循環を創り出せる場所であり、燃料電池トラック普及が進む場所の一つとして期待したい。

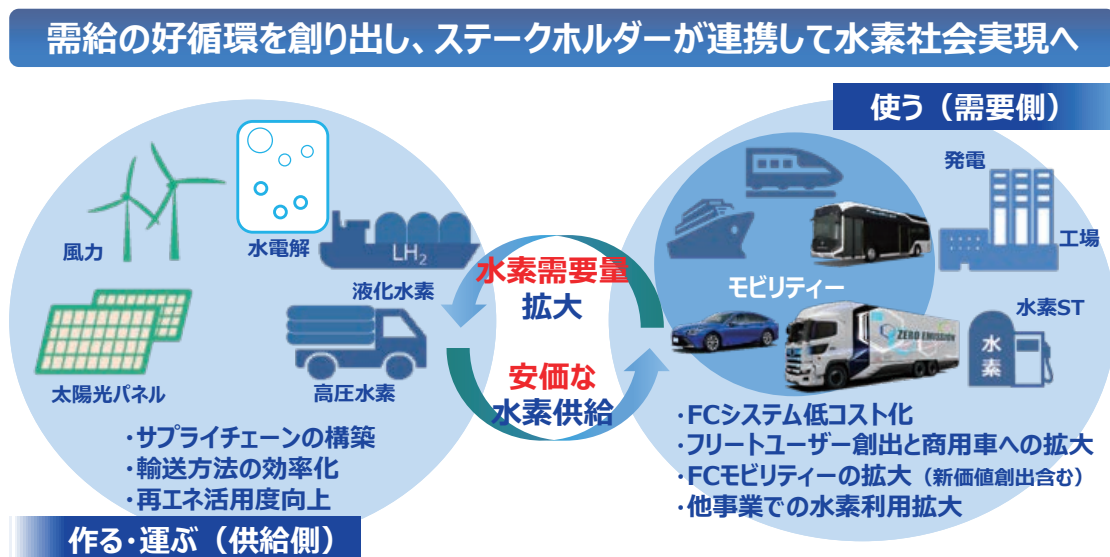


図6 水素循環社会

# 水素駆動型 RTG の開発と課題



## 浅見 織音

株式会社三井E&S マシナリー  
運搬機システム事業部企画管理部  
戦略企画 Gr 兼 水素ビジネス推進室



## 市村 欣也

株式会社三井E&S マシナリー  
運搬機システム事業部企画管理部  
戦略企画 Gr

## 1. はじめに

2020年10月に日本政府は2050年カーボンニュートラルの実現を目指すことを宣言した。国土交通省ではカーボンニュートラルポート（以下、CNP）の形成に取り組んでおり、コンテナターミナル（以下、CT）内における荷役機器、特にラバータイヤ式ガントリクレーン（以下、RTG）の様に、ディーゼルエンジンを搭載した荷役機器の脱炭素化に注目が集まっている。

## 2. RTGの低炭素・脱炭素化

従来型のRTGには400～500kW程度のディーゼル発電機セットが搭載されており、1時間あたり20リットル以上の軽油を消費している。当社では、巻下時のエネルギーを蓄電池に蓄積し、巻上加速時のエネルギーに再利用するハイブリッド型RTGについて、2004年に米国ロングビーチ港でフライホイール式の実証試験を実施、2007年に名古屋港ヘスーパーキャパシタ式の初号機を、2011年に神戸港ヘリチウムイオン蓄電池式の初号機を納入した。リチウムイオン蓄電池式ハイブリッド型RTGの軽油消費量は従来型の50%程度である。

### 2.1. 水素駆動型 RTG の開発

米国ロサンゼルス・ロングビーチ港では2030年までに港湾地区における排出ガスをゼロに（ゼロエミッション化）するクリーン・エア・アクション・プランが推進されている。当社では、この動きに対応し、いち早く水素燃料電池（以下、FC）を電源とするRTG（以下、ゼロエミッショントランスターナ<sup>®</sup>注1）の開発に着手した（図1）。

図2に、従来のハイブリッド型RTGの駆動系構成図を示す。ゼロエミッショントランスターナ<sup>®</sup>では、ディーゼルエンジン、交流発電機、整流器等で構成されるパワーユニットを燃料電池、水素タンク、補機類等で構成されるFCパワーパックに変換し、リチウムイオン蓄電池を大容量化する。



図1 ゼロエミッショントランスターナ<sup>®</sup>イメージ図

従来のハイブリッド型RTGでは巻下時のエネルギーを蓄電池に蓄積し、巻上時にはディーゼルエンジン発電機セットで得られるエネルギーと蓄電池から得られるエネルギーを併用して荷役していたが、ゼロエミッショントランスターナ<sup>®</sup>では、蓄電池を大型化しFCパワーパックで発電したエネルギーを全て大容量蓄電池に蓄積し、大容量蓄電池から供給される電力で荷役することにより、FCの小型化と定常運転化を図っている。

本開発は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）の「燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業／研究開発項目III（燃料電池の多用途活用実現技術開発）」の助成対象として2021年6月に採択された。助成期間は2023年3月までであり、当社大分工場に設置された開発試験用トランスターナ<sup>®</sup>（写真1）にFCパワーパックを実装し、従来のディーゼルエンジン発電機セットで駆動するRTGと同等の荷役能力を発揮出来ることを実証する。

### 2.2. 水素駆動型 RTG の課題

#### 1) 水素供給体制の整備

仮に、現時点で水素駆動型RTGが実用化できたとしても、水素を安価、大量かつ安定的に供給する体制が整備されなければ、荷役作業に投入してゆくことは不可能である。RTGのみならず、荷役機器の水素駆動化ではCTオペレータ、荷役機器メーカー、水素供給事業者、行政機関が一体となって検討を実施



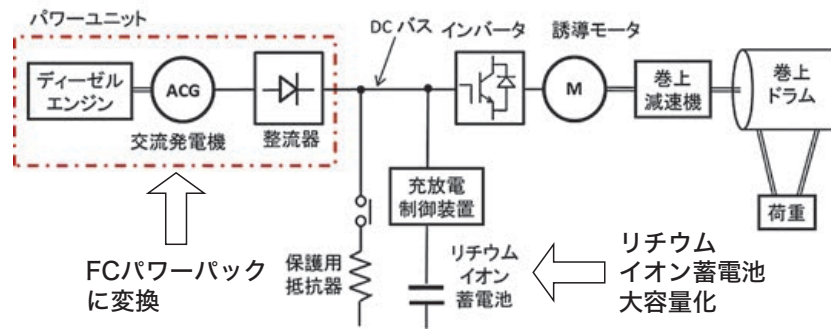


図2 RTG駆動系構成図



写真1 開発試験用トランステーナ®

し、安定的な水素サプライチェーンを構築する必要があります。

一方、安定的な水素サプライチェーンが構築されるまでには、なお相当の時間を要すると見られ、当面のRTG導入においては、将来水素サプライチェーンが構築できた際に、水素駆動型へ容易に改造できるものを導入しておくことが望ましい。すなわち、ディーゼル発電機セットをFCパワーパックに、軽油燃料タンクを水素燃料タンクに換装するのみで、電気制御部品や機械部品はそのまま流用できるようにすべきである。

## 2) 水素燃料電池、水素タンク等機器の小型化

CTにおいては、コンテナの蔵置密度を上げ土地を有効活用することが重要課題である。このため、RTGは狭隘なスペースで運用されており、機器の搭載スペースは少なくRTG本体からの張り出し寸法は厳しく制限され、機上に搭載するFCや水素タンクを小さくする必要がある。

FCについては、回生エネルギー蓄電再利用システム（ハイブリッドシステム）の蓄電池容量を向上させ、FC自体の出力を小さくすることが効果的である。それにより、水素消費量を少なくすることが可能となり、水素タンクの小型化を図ることができる。ただし、FCと蓄電池の費用バランスに注意し、一方を小さくするために他方が高価になりすぎないようにする必要がある。

また、水素タンクを小さくするためには液体水素の利用が最も効果的であるが、輸送、貯蔵、充填のための技術開発が必要

であり、実用化までに相当の時間を要すると見込まれる。このため、当面は、RTGにも水素乗用車と同様の圧縮水素ガスタンクを搭載することになる。圧縮水素ガスタンクの小型化を図るには、より高圧のものを用いることが望ましい。なお、トヨタ自動車の水素乗用車ミライでは初代が35MPa、第二世代が70MPaの圧縮水素ガスタンクを採用している。

## 3) 水素のRTGへの充填作業

水素駆動型RTGの導入に際しては、水素充填作業を容易にする必要がある。これには、充填頻度、充填時間、作業の手間を現状のディーゼル給油に近づける必要がある。

充填頻度は最低でも1日1回、望ましくは数日に1回を目指すべきである。しかしながら、高圧ガス保安法第24条の2第1項、高圧ガス保安法施工令第7条第2項により、300m<sup>3</sup>以上の圧縮水素は特定高圧ガスとなり、保安法第24条の3により技術基準に適合することが求められる。300m<sup>3</sup>の水素では、RTGを数時間程度しか稼働できないと想定されており、法的規制緩和も視野に入れて議論する必要がある。

充填時間は、供給水素圧と機上水素タンクの圧力差によるところが大きい。水素を加圧して充填する場合、高圧ガス保安法第5条第1項に規定される第一種製造者として、事業所ごとに都道府県知事の許可を受けなければならない。一方、両者の差圧で充填する場合、高圧水素を輸送する必要があるが、RTG機上タンクが70MPaの場合、82MPa以上の水素を輸送する必要があり、水素供給業者との調整が必要である。

## 3. おわりに

本稿では、水素駆動型RTGの課題や検討事項について説明した。RTGの機動性、すなわちオペレーションの自由度を活かしつつ低炭素化・脱炭素化を図ることを念頭に検討する必要がある。

本稿が、CNPの計画等に携わる方の参考になれば幸いである。

注1) トランステーナ®は当社子会社であるPACECO CORP.の登録商標です。当社はPACECO CORP.のライセンスとして、トランステーナの開発・製造を行っています。

# 船舶への陸電供給について



## 白石 哲也

一般社団法人港湾荷役機械システム協会  
専務理事

### 1. 陸電供給とは

欧州代替燃料観測機構 (EAFO) によれば、陸電供給とは停泊中の船舶がエンジンを停止して陸上の電源に接続することであり、船舶の電力負荷は船内のサービスを中断することなく陸上の電源に切り替えられる。これにより、周辺地域への NOx、SOx、CO<sub>2</sub> 等の排出が排除される。

陸電供給は、欧州では OPS (Onshore Power Supply)、ロサンゼルスでは AMP (Alternative Marine Power)、ロングビーチ等では Cold Ironing と呼ばれる他、SSE (Shore Side Electricity)、Shore Connection、Shore-to-ship Power 等としても知られている。

陸電供給は、フェリー、クルーズ船、LNG 運搬船、タンカー、コンテナ船等の、停泊時に大量の電力を消費し、高レベルの大気汚染物質を排出する船舶に特に適用されている。

高圧タイプの陸電供給設備の概念図を図1に示す。電源ケーブルが棧橋から伸びて船のレセプタクルに差し込まれ、船内機器を操作するための電力を供給する。これにより、船は通常は発電機を駆動するディーゼルエンジンを停止できる。

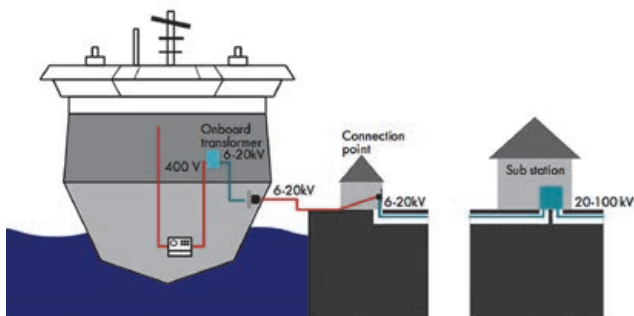


図1 陸電供給の概念図(出典：EAFOホームページ)

2005年度に国土交通省が行った試算では、我が国の全ての内航船が船舶アイドリングストップを実施した場合、年間100万トン程度のCO<sub>2</sub>が削減可能という結果が得られている。

### 2. 海外の状況

#### (1) 米国

米国は、コンテナ船、大型客船を中心に陸電供給が行われており、システム導入への取り組みが活発な地域である。特にカリフォルニア州は2009年1月にカリフォルニア大気資源局 (CARB) が入港船舶に対する規制を発表した<sup>1)</sup>。そして2014年1月1日より入港する50%の船舶に対して陸電の搭載もしくは同等の対策を行う等の規制をスタートさせたが、2020年8月にはコンテナ船及びクルーズ船については2023年1月1日より受電率100%を要求する旨 CARBより提案があった。

#### (2) 欧州

公共電力の周波数が50Hzであるヨーロッパは、陸電供給導入に関して60Hzの北米地域に比べて遅れを取っていたが、逐次導入が進められている。本年6月頃には、アントワープ、ブレーメン、ハンブルク、ハロパ、ロッテルダムの港が、2028年までに最大級のコンテナ船への陸電供給を実施する旨の共同コミットメントを発表した。同港らは、陸上電力利用に関する税の公平化や公的資金による助成を求めている。

#### (3) 中国

中国では、上海、深圳、寧波、広州、青島、大連、天津、廈門の主要8大港において陸電設備が用意されている。そして「船舶と港汚染防止行動方案 (2015—2020年)」と「全国港陸電設置方案」の中の陸電供給能力を基に、公務船、コンテナ船、フェリー、郵便船、3000t級以上の客船と5万t級以上の貨物船が陸電供給出来る港に停泊し、かつ停泊時間が3時間以上の場合は陸電を使用することとしている。

### 3. 国内の状況

#### (1) 実証実験

日本でも陸電への取り組みは船舶アイドリングストップと

して2006年度に国土交通省港湾局と環境省等が連携し、東京港竹芝ふ頭において貨客船を対象とした実証実験を皮切りに、2007年度には実通電試験、2008年度には技術検討会が開催され、2009年、大阪、北九州、苫小牧等において実船を使った実証実験が行われた。

上記3港は、いずれもフェリーを対象船舶としているが、大阪南港はAC6.6kV 60Hzの高電圧による無停電切替受電、北九州港はAC450V 60Hzの低電圧による無停電切替受電、苫小牧港は積雪寒冷地域並びに50Hz地域で周波数変換器による無停電切替受電をそれぞれ特徴としており、当協会も実施に協力させて頂いた。

## (2) 礫子火力発電所

国内において、陸電供給が定期的に実施されている事例として電源開発(株)礫子火力発電所がある。同発電所では、燃料である石炭を千葉のコールセンタから、専用の7,000DWT石炭運搬船2隻で毎日2~3隻分搬送し、発電所の岸壁で船に設置されているセルフアンローダ装置により陸揚げし、ベルトコンベヤで10万t貯蔵可能なサイロに貯蔵される。

そして、石炭運搬船が接岸後、岸壁に設置された陸上電力の給電ケーブルを接続し、発電所に接岸中は陸上からの電力で作業している。陸上からの給電周波数は50Hzであるが、船内に装備した周波数変換装置で60Hzにしている。

## 4. 関連する規格

### (1) IEC/ISO/IEEE

陸電供給システムを世界的に普及させるためには、世界共通の規格が望まれる。そのため、IEC (国際電気標準会議)、ISO (国際標準化機構) に加えてIEEE (米国電気電子学会) の3団体の共通規格として、同システムの規格が80005シリーズとして開発されることとなった。

IEC/ISO/IEEE 80005-1は、陸上から船舶にAC1,000V以上の電力を供給するための陸上及び船上の高圧陸上電源接続(HVSC)システムに関する要件(設計、据付及び試験)を取りまとめたものであり、2019年3月に第二版が制定されている。IEC/IEEE 80005-2は、高圧及び低圧の陸上電源接続システムの通信要件と手順を取りまとめたものであり、2016年6月に第一版が制定された。IEC/ISO/IEEE 80005-3は、ノルウェーの提案により検討を開始したものであり、陸上から船舶にAC400V以上1,000V未満、250A以上の電力を供給するための陸上及び船上の低圧陸上電源接続(LVSC)システムに関する要件(設計、据付及び試験)を取りまとめようとしているが、2021年7月時点で制定作業中である。

### (2) IMO

IECにおける陸電供給システムに関する検討とは別に、2017年に中国からIMO (国際海事機関) に対し、陸電システムの配置要件や定期的検査要件をSOLAS条約に定めるための新規作業計画の提案があった。これに対し日本側は、同システムの技術要件がIECの規格で制定が進められており、技術要件の重複や齟齬を避け、オペレーション関連事項にのみ焦点を当てたガイドラインとすべき旨提案したところ、これが認められ、陸電供給に関するオペレーション関連事項について検討が進められている<sup>2)</sup>。

今後IMOがオペレーション要件のガイドラインを作成した後、IECでIEC/ISO/IEEE 80005シリーズへの展開を検討することとしている。

## 5. 今後の課題

今後、陸電供給を導入・拡大していく上では、技術面、コスト面、制度面、運用面などの課題を解決していく必要がある。

技術面については、欧米では実際に大容量の電力が船舶に供給されているが、先述したとおりIECとIMOとで並行して検討が行われていることから、それぞれの進捗を見守る一方で、操作の安全性、有資格者の配置等の課題を検討しつつ、多種多様な船舶への適応や、高潮、停電などの緊急時にも対応した供給システムの構築が必要である。

また、設備の導入において、現在、高度に利用されている港湾地区での設備用スペースの確保や既存の荷役活動等にできるだけ支障を与えない施工方法、陸上・船舶の設備費用の分担などの課題がある。また、船舶での使用電力の周波数が60Hzであるため、東日本の50Hz地域での電力供給には、周波数を変換する設備が必要となり、追加費用が発生する。このような導入初期段階にかかる費用に対して、インセンティブや各種支援制度の活用などの検討を今後行っていく必要がある。

実際に利用する観点からは、運航への影響を少なくすることを前提とした効率的かつ安全な接続方式、供給設備の規格化、利用指針となるガイドラインなども必要であり、電力料金の設定についても、利用者の負担が大きくならないような枠組みを定めることが望まれる。加えて、大型船舶に必要な大容量の電力のためには、安定した供給源の確保が不可欠であり、電力会社との十分な協議が必要と思われる。

### 【参考資料】

- 1) 山路泰伸：「船舶への陸上電力供給システムの現状紹介」、日本マリンエンジニアリング学会誌第46巻第5号、2011
- 2) 丹羽康之、佐藤公泰：「陸上から船舶への給電設備に係る国際規格改訂への取り組み」、海上技術安全研究所報告第19巻第2号、2019



# 脱炭素社会に向けた 水素焼きガスタービンの開発



## 井上 慶

三菱重工業株式会社 総合研究所  
燃焼研究部 燃焼第二研究室長

### 要旨

脱炭素社会に向けた動きが世界で加速する中、三菱重工株式会社（以下、当社）は、水素焼きのガスタービン複合発電（GTCC）の開発に取り組んでいる。現在、大型ガスタービンで天然ガスに水素を30vol.%混ぜて燃焼させるガスタービン燃焼器の開発を完了し、引き続き、水素専焼（水素100vol.%）に対応できる燃焼器の開発を進めている。当社はヨーロッパ、北米での水素焼きGTCCプロジェクトに参画し、2020年代半ばからの実用化を目指している。大容量・高効率GTCCによる大規模な水素需要を喚起することで、当社は国際的な水素サプライチェーン構築を牽引し、脱炭素社会の実現に貢献していく。本報では、脱炭素社会の実現に向けて、水素を利用した当社の発電用ガスタービンの検討開発状況、および世界の水素発電プロジェクトへの参画状況を中心に脱炭素社会実現に向けた取り組みを紹介する。

### 1. はじめに

2015年、第21回気候変動枠組条約締約国会議（COP21：21st Conference Of the Parties）で採択された地球温暖化防止の国際的枠組み“パリ協定”により、世界各国の政府や金融機関、投資家、企業が脱炭素化への取り組みを表明している。2020年からは協定の実運用が始まり、CO<sub>2</sub>排出量の削減目標達成に向けた動きが活発になっている。北欧の環境先進地域を含むEUは、2050年のカーボンニュートラルに向けた指針を表明し、二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）排出量世界第1位の中国、2位のアメリカの両国が温暖化対策で協力していく共同声明を発表した。エネルギーの消費大国であり、その大部分を輸入に依存する日本も、2050年までにカーボンニュートラルを目指すことを宣言した。

日本の一次エネルギーの変換先は主に電力であり、全体の

44%を占める。その中でCO<sub>2</sub>を発生する火力発電は約8割を占め<sup>1)</sup>、その依存度は依然として高い。脱炭素社会の実現に向けて、火力発電設備の中でCO<sub>2</sub>排出量が最も少なく、かつ高効率な発電方式であるカスタービンコンバインドサイクル（GTCC：Gas Turbine Combined Cycle）は、今後も旺盛なエネルギー需要に対応することに加えて、導入が進む再生可能エネルギーの発電量変動に対応できる高い運用性や、環境負荷に配慮した化石燃料の有効活用が求められている。

当社は、火力発電の脱炭素化技術に取り組んでいる。その中でGTCC発電設備については、その特徴を活かし、①燃焼ガス温度の高温化<sup>2)</sup>をはじめとする更なる高効率化・大容量化を進めてCO<sub>2</sub>削減を図ること、②増大する再生可能エネルギーによる発電量の変動に迅速・柔軟に対応できるようにガスタービンの運用性を高める技術開発<sup>3)</sup>を進めること、さらに、③燃焼してもCO<sub>2</sub>を排出しない水素（H<sub>2</sub>）や、アンモニア（NH<sub>3</sub>）を燃料とするガスタービンの技術開発を進めることで、2050年の脱炭素社会の実現を目指している。日本では脱炭素社会に向けた水素基本戦略<sup>4)</sup>として2030年頃に水素発電の商用化を目指すことを掲げており、技術開発・商品化から電力事業者への設備導入を進める必要がある。当社は、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）にご支援を頂き、発電用大型ガスタービンにおいて、燃料の天然ガスに水素を体積比で30%混ぜて燃焼できる燃焼器の開発に成功した<sup>5)</sup>。これにより水素社会へのスムーズな移行を促すことが期待される。また、当社はNEDOのご支援により、水素100%専焼に対応する燃焼器の開発を進めている。当社と同様に、他のガスタービンメーカーも水素焼き燃焼器の開発を進めており<sup>6)・9)</sup>、世界的に水素焼き燃焼器の開発が活発化している。

本報では、脱炭素社会の実現に向けて、水素を利用した当社の発電用ガスタービンの開発状況、および世界の水素発電プロジェクトへの参画状況を紹介する。

## 2. 脱炭素社会と発電用ガスタービン

脱炭素社会実現のため風力発電や太陽光発電に代表される再エネ発電の普及・拡大が今後も世界的に進むと見られる。2060年には再エネ利用によるCO<sub>2</sub>削減が全体量の約3割になる試算<sup>10)</sup>がある。気候や気象条件による出力変動が大きい再エネ発電は、余剰電力の有効利用が課題であり、蓄電池や水素等への変換によるエネルギー貯蔵が必要とされる。特に、変動周期が長く、大きいエネルギー容量が必要とされる場合は、水素等に変換して利用することが有効である。GTCC発電は、再エネの急激な出力変動に追従する高い運用性を有し、電力需要と再エネのギャップを柔軟に埋めることが可能である。また、水素を燃料とすることで大量かつ安定な水素需要を生むため、その期待はますます高まっている。

将来の脱炭素化に向けた当社のシナリオを図1に示す。中期的には、CO<sub>2</sub>回収 (CCUS : Carbon dioxide Capture, Utilization

and Storage) を活用した化石燃料由来の水素 (ブルー水素) の普及が見込まれる。GTCCは、これまでの安価で、安全で、安定的な化石燃料による発電を続けながら、発電効率を高めてCO<sub>2</sub>排出量を減らすこと、また、ブルー水素の利用を推進し、CO<sub>2</sub>を発生しない水素燃料やアンモニア燃料の混焼により発電するシナリオが考えられる。更に長期的には、コスト削減と技術革新により再生可能エネルギー由来の水素 (グリーン水素) が主流となり、これを利用した水素専焼発電により、CO<sub>2</sub>排出ゼロを達成するシナリオが考えられる。

大容量・高効率の発電用ガスタービンにおける水素利用には次の環境的・経済的メリットがある (図2)。

まず、既設のガスタービン設備の最小限の改造で、低炭素化あるいは脱炭素化が可能なことである。ガスタービン燃焼器と燃料供給系統以外の大規模な改造が不要なため投資コストを抑制でき、水素転換へのコストを下げ水素社会へのスムーズなシフトを促すことが期待される。

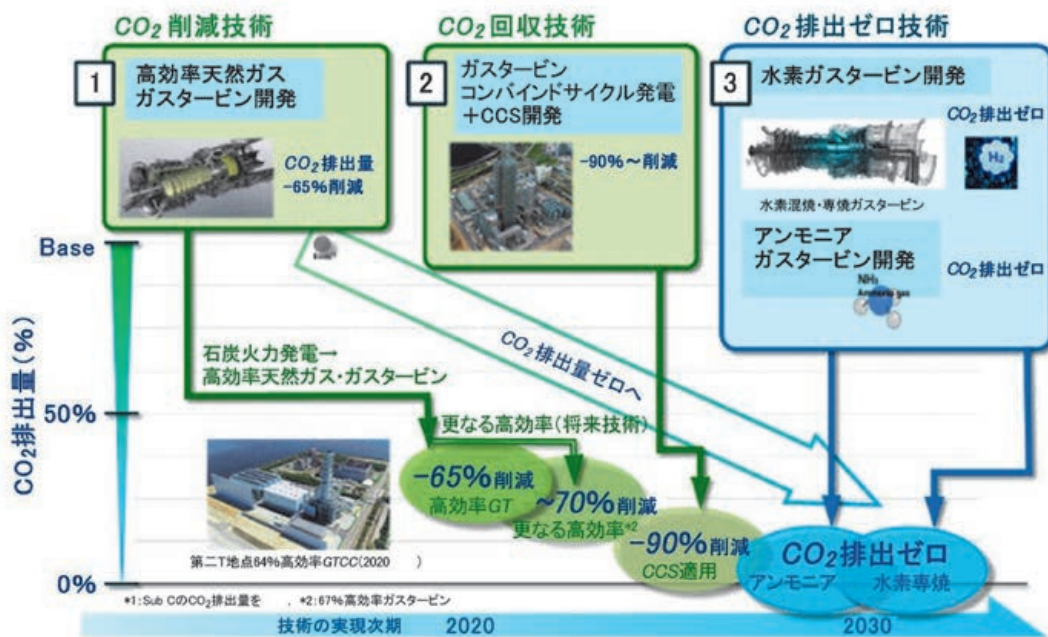


図1 脱炭素化に向けた当社のシナリオ



図2 水素焚きガスタービンにおける環境的、経済的メリット



次に、液体水素のみの利用にとどまらず、メチルシクロヘキサンやアンモニアといった水素キャリアで輸送されたものを水素化し、燃料として利用できるため、キャリアへの柔軟性が向上することや、燃料電池車等に比べて、低純度な水素を利用でき、水素コストの低減に貢献できる。

最後に、水素焚きガスタービンは1つの発電設備で燃料電池車200万台相当の水素を消費するため、大規模な水素需要が喚起され、サプライチェーンの拡大、水素コストの削減を促進することが期待される。

以上から、大容量・高効率の発電用ガスタービンにおける水素利用には脱炭素社会を実現するために、欠かすことのできない重要な役割があると考えられる。

### 3. 水素焚きガスタービン

水素焚きガスタービンの開発における重要な要素は、水素を燃焼させる燃焼器、燃焼技術の開発である。発電用大型ガスタービンの高効率化に伴うタービン入口温度（燃焼温度）の上昇によりNOx排出量は指数関数的に増加する。このため、当社の大型ガスタービン用燃焼器は、燃料と空気を予め混合して燃焼器内に投入する予混合燃焼方式として、ドライ低NOx (DLN : Dry Low NOx) 燃焼器を採用し、NOx排出量の低減を図っている。この方式は、従来の拡散燃焼方式に比べて燃焼器内の局所的な高温領域を低減できるため、拡散燃焼方式で採用される蒸気・水噴射によるNOx低減手法が不要で、サイクル効率の低下はない。一方、安定燃焼範囲が狭く、燃焼振動や逆火（フラッシュバック）の発生リスクがあり、未燃分が排出しやすい傾向がある。

水素は天然ガスと比較して燃焼速度が速い。そのため、予混合燃焼器で天然ガスと水素を混焼、あるいは水素専焼させた場合、天然ガスのみを燃焼させた場合よりも火災が燃焼器の上流に遡上する逆火が発生するリスクが高くなる。逆火により、当該部が焼損する可能性があるため、水素焚きガスター

ビン燃焼器は逆火発生の防止とともに、低NOx化と安定燃焼を図る必要がある。図3に、当社の水素混焼・専焼に対応する水素ガスタービン燃焼器の概要を示し、次項に開発状況を述べる。

#### (1) 水素混焼 Dry Low NOx (DLN) マルチノズル燃焼器

水素混焼による逆火発生リスクの上昇を防止することを目的として、従来のDLN燃焼器をベースに開発した水素混焼燃焼器を図4に示す。空気は圧縮機から燃焼器に供給され、旋回翼（スワラー）を通過して、旋回流となる。燃料はスワラー面に設けられた微小な孔から供給され、旋回流により周囲の空気と急速に混合する。一方、旋回流の中心部（以下、渦芯）には、低流速の領域が存在し、ここを火災が遡上することで逆火が発生すると考えられる。そこで、水素混焼燃焼器ではノズルの先端から空気を噴射して渦芯の流速を増加させ、渦芯の低流速領

		燃焼方式	低NOx技術	水素含有量 (Vol%)
大型 ガスタービン	既存技術	Type 1: 拡散燃焼器	N <sub>2</sub> 希釈 水/水蒸気添加	100%
	開発中	Type 2: 予混合燃焼器 (DLN)	ドライ	30%
	開発中	Type 3: マルチクラスター (DLN)	ドライ	100% (目標)
中小型 ガスタービン	既存技術	H-25 拡散燃焼器	水/蒸気噴射	100%
	開発中	H-25 マルチクラスター (DLN)	ドライ	30%
	開発中	H-25 マルチクラスター (DLN)	ドライ	100% (目標)
	既存技術	H-100 予混合燃焼器 (DLN)	ドライ	30%
開発中	H-100 マルチクラスター (DLN)	ドライ	100% (目標)	

図3 水素ガスタービン燃焼器

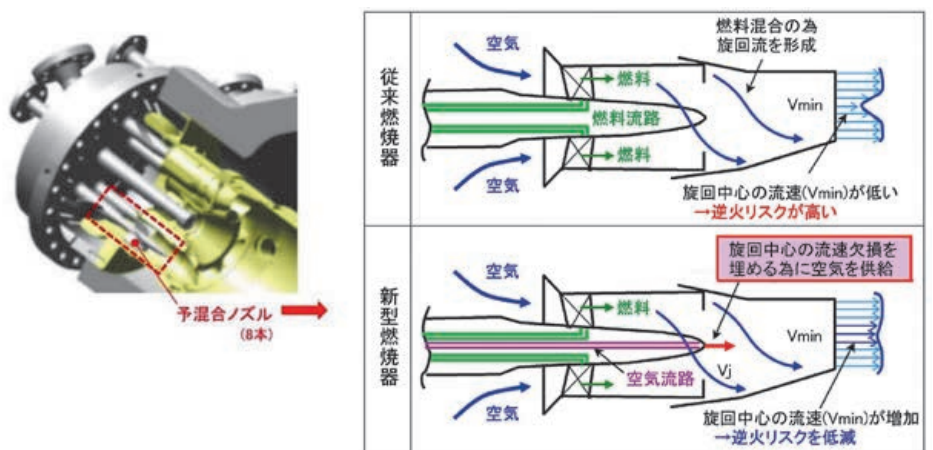


図4 水素混焼燃焼器



域を排除することで逆火発生の防止を図っている。

ガスタービン燃焼器の代表的な燃焼特性として、NO<sub>x</sub>と燃焼振動が挙げられる。これらの特性は燃焼圧力の影響を受けるため、実機相当の圧力条件での検証が必要となる。そこで、フルスケールの水素混焼燃焼器1本（実機では16本ないし20本の燃焼器を配置）を使用した実機圧力燃焼試験（以下、実圧燃焼試験）により、水素混焼の燃焼特性を評価した。試験の空気及び燃料条件として、タービン入口温度1600°C級ガスタービンの定格負荷相当条件における、水素混合割合に対するNO<sub>x</sub>の変化を図5に示す。水素混合割合の増加に伴って、NO<sub>x</sub>が上昇する傾向となった。これは、燃料中の水素割合が増加することにより、燃焼速度が上昇して燃焼器内に形成される火炎の位置が上流へ移動し、燃料と空気の混合が不十分な状態で燃焼するためと考えられる。しかし、水素30vol.%を混合した条件においても、天然ガスでの運転時（＝水素0vol.%）とほぼ同等であり、運用可能な範囲内であることを確認した。同条件での燃焼振動の圧力レベルの変化を図6に示す。燃焼振動圧力レベルについても、天然ガスでの運転時と比較して同等以下であり、水素混合割合の変化に対して感度が小さいこと確認した。また、水素30vol.%混焼において逆火は発生しなかった。以上の結果から、逆火の発生や燃焼振動レベルの上昇を伴わずに運用できる目途を得た。

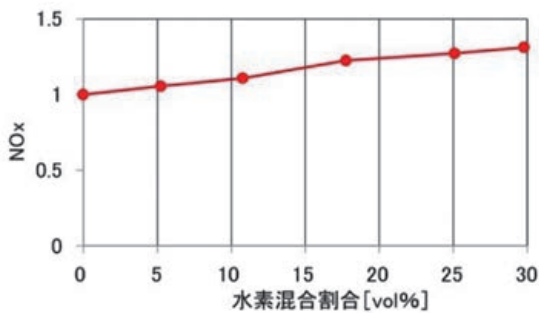


図5 水素混合割合に対するNO<sub>x</sub>変化  
（水素0%時のNO<sub>x</sub>を1とする）

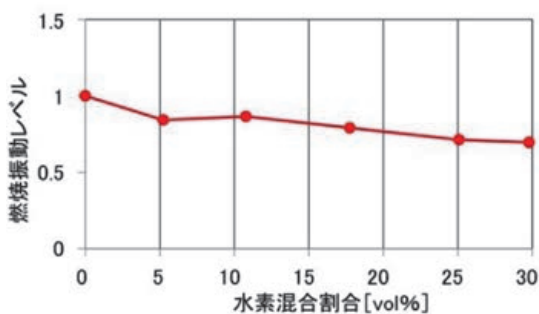


図6 水素混合割合に対する燃焼振動レベル変化  
（水素0%時の燃焼振動を1とする）

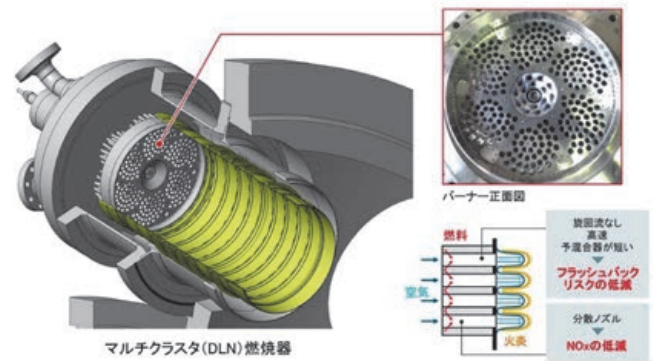


図7 マルチクラスタ燃焼器

## (2) 水素専焼マルチクラスタ燃焼器（図7）

水素が更に高濃度になると、前項の水素混焼燃焼器に採用した旋回流による燃料と空気の混合方式では、渦芯部の低流速域で逆火の発生リスクが高くなる。そこで旋回流を利用せず、より微小なスケールで空気と水素を混合できる混合方式の方が逆火耐性が高いと考えられる。水素専焼燃焼器は、革新的低炭素石炭火力発電の実現を目指す実証試験発電所である大崎クールジェンに適用中の石炭ガス化複合発電（IGCC：Integrated coal Gasification Combined Cycle）用マルチクラスタ燃焼器<sup>11)</sup>をベースとして開発を進めている。上述の水素混焼燃焼器の燃料供給ノズル（8本）に対して、より数多くのノズルを有し、1本のノズルの孔を小さくし、空気を供給するとともに、そこに水素を噴射して小さなスケールで混合させ、火炎を分散することで、高い逆火耐性と低NO<sub>x</sub>燃焼を両立できる可能性を有する。

## (3) 拡散燃焼器

拡散燃焼器は、燃料と燃焼用空気を別々に燃焼室内に噴射する。予混合燃焼方式に比べて火炎温度が高くNO<sub>x</sub>排出量が増加するため、蒸気・水噴射によるNO<sub>x</sub>低減対策が必要になる。一方、比較的、安定燃焼範囲が広く、燃料組成変動への許容範囲も広い。

当社の拡散燃焼器を図8に示す。これまで、小型から中型のガスタービン発電設備においてオフガス（製油プラント等で



図8 拡散燃焼器

発生する副生ガス)の燃料利用により幅広い水素含有割合(～90vol.%)の燃料に関する実績を有するとともに、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: World Energy NETwork)プロジェクトへの参画<sup>12)</sup>の際に、水素専焼による燃焼試験にも成功している。後述のとおり、本拡散燃焼器をオランダのバッテンフォール・マグナム発電所の水素焚き転換プロジェクトに適用することを検討している。

#### 4. 海外での脱炭素に向けた ガスタービンプロジェクト

海外では、水素の製造、輸送、貯蔵、そして利用までを視野に入れた包括的な水素利用プランが多く示されている。例えば、大規模な再エネ由来のグリーン水素の生産から利用までのシステム、あるいは、化石燃料由来のブルー水素の生産・利用において水素製造時に発生するCO<sub>2</sub>をCCSで処理することも含めたシステムなどの開発が進められている。水素の利活用を通して、雇用を創出するとともに、既存インフラの再利用、複数の産業セクターにおける燃料多様化など様々な効果が期待され、国、自治体、企業の連携によりプロジェクトが進められている。ここでは、その中で、当社が参画する欧州、及び米国での水素ガスタービンプロジェクトを3件紹介する。1件目は、スウェーデンのエネルギー企業であるバッテンフォール社(Vattenfall)が運営する出力132万kW級の天然ガス焚きGTCCを水素焚きに転換するプロジェクトである。同プロジェクトは、図9に示すオランダ最北部のフローニンゲン(Groningen)州に位置するバッテンフォール・マグナム(Vattenfall Magnum)発電所に、当社が納入したM701F形ガスタービンを中核とする発電設備3系列のうち1系列を2027年までに100%水素専焼の発電設備へと切り替えるものであり、これまでに初期フェーズスタディー(FS:実

現可能性調査)を実施した。既存技術である拡散燃焼器の適用を検討し、水素燃焼への転換が可能であることを確認した。天然ガス焚きでは44万kWのGTCC発電設備1系列につき年間約130万トンのCO<sub>2</sub>を排出するが、水素焚きへの転換によりそのほとんどを削減できる。当社はガスタービンに関する具体的な改造範囲の計画、設計等、同プロジェクトの実現に向けて検討を継続中である。

2件目は、イギリス東海岸のハンバー川流域の三角州地帯における同国内最大規模の産業クラスター(Humber Cluster)の脱炭素化事業のプロジェクトである。ここでは、グローバルに事業展開する脱炭素化関連産業の企業・機関が連携し、天然ガスから製造した水素(ブルー水素)の活用や、CO<sub>2</sub>の回収・除去技術を適用し、2040年までにCO<sub>2</sub>排出実質ゼロ達成を目指す。当社は、このプロジェクトにおいて、産業クラスターにあるソルトエンド(Saltend)発電所(図10)に納入した天然ガス焚きGTCC発電設備のM701F形ガスタービンを水素焚きに転換する技術検討・フェーズスタディーに着手し、水素混焼率30vol.%から始め、将来的に水素専焼を視野に入れて検討を進めている。

3件目は、米国ユタ州のインターマウンテン電力が計画する水素を利用したGTCC発電プロジェクトである。当社は84万kW級のM501JAC形ガスタービン2基を中核とするGTCC発電設備を受注し、2025年に30vol.%の水素混焼、2045年までに水素専焼での発電を目指す。本プロジェクトは、石炭火力発電設備更新により建設されるもので、水素混焼率30vol.%GTCCへの更新により、最大で年間460万トンのCO<sub>2</sub>排出量削減に寄与できる見込みである。燃料の水素は、当社が参画するユタ州内の再エネ由来電力によるエネルギー貯蔵事業からの活用が期待されており、発電した電力は、インターマウンテン発電所からロッキー山脈をまたいで、カリフォルニア州、及び



図9 オランダのバッテンフォール・マグナム発電所



図10 イギリスのソルトエンド発電所



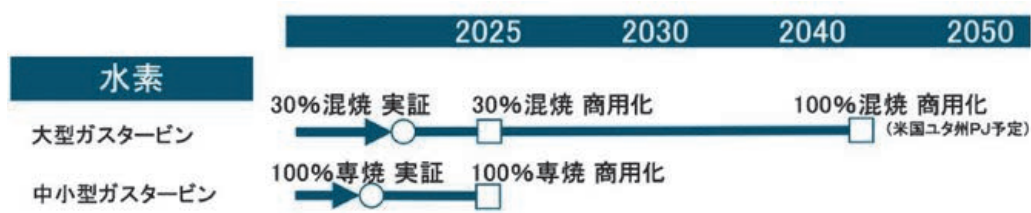


図11 実用化に向けたスケジュール

ユタ州に供給される。

当社は、これらを含めた国内外での水素利用発電のプロジェクト参画を通じて、当社が掲げるエナジートランジション（低環境負荷エネルギーへの転換）を進め、火力発電への水素利活用の需要を喚起していくとともに、水素の供給・輸送・貯蔵に関する国際的な水素バリューチェーンの構築にも関わることで、脱炭素社会の実現に貢献していく。

## 5. 実用化に向けたスケジュール

2020年代半ばからの水素発電の具体的な導入時期に向けて、これまでの要素技術開発の成果をもとに実機ガスタービンを用いた実証を進める。当社ガスタービン開発は、基本設計の段階で各要素の検証試験をして、その成果を詳細設計に反映し、最終的に実機を用いて実証する。この開発サイクルを同一の工場内で実施することで、より迅速かつ確実な開発・製品化を進めている。水素ガスタービンについても実用化に向けて図11に示すとおり、大型ガスタービン水素混焼（30vol.%）を実証し、商用化を開始する。その後、大型ガスタービン水素専焼の米国ユタ州プロジェクトでの商用化を目指す。中小型ガスタービン水素専焼についても、H-25ガスタービンを用いて実証を予定している。

## 6. まとめ

本報では、水素を利用した当社の発電用ガスタービンの開発状況、および世界の水素発電プロジェクトへの参画状況を紹介した。本報で紹介した水素焼きガスタービンの開発内容は、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：New Energy and industrial technology Development Organization）の助成事業（水素社会構築技術開発事業：プロジェクトコードP14026）の成果の一部である。同助成事業において水素・天然ガス混焼方式のガスタービンの燃焼器の開発に取り組み、30vol.%の混焼条件においてガスタービンの運転が可能な目途を得た。また、同助成事業のもと、水素専焼燃焼器の開発を進めている。

当社は、2020年半ば頃から開始が期待されるCCSを組み合わせた化石燃料由来の水素利用、2050年の再エネ由来の水素利用が主流になる社会に向けて、当社の開発する水素焼きガスタービンを通して、国際的な水素サプライチェーン構築を牽引し、脱炭素社会の実現に貢献していく。

## 謝辞

本報で紹介した水素混焼燃焼器、水素専焼燃焼器は国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）のご支援により研究開発したものである。ここに感謝の意を表す。

## 【参考文献】

- 1) 資源エネルギー庁, 令和元年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書2020) <https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2020html/index.html>
- 2) 石坂浩一ほか, 1700°C級超高温ガスタービンの要素技術の開発, 三菱重工技報, Vol. 54, No.3, pp.23-31 (2017)
- 3) 松見勇ほか, 負荷変動に対応するMHPSのガスタービン技術, 日本ガスタービン学会誌, Vol.47, No.1, pp.14-20 (2019)
- 4) 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議, 水素基本戦略, (2017) <http://www.meti.go.jp/press/2017/12/20171226002/20171226002-1.pdf>
- 5) 井上慶ほか, 水素・天然ガス混焼ガスタービンの開発, 三菱重工技報, Vol.55, No.2, pp.1-5 (2018)
- 6) York, et al., Development and Testing of a Low NOx Hydrogen Combustion System for Heavy-Duty Gas Turbines., ASME. J. Eng. Gas Turbines Power. Vol.135, No.2, 022001 (2013)
- 7) Magnusson, et al., Operation of SGT-600 (24 MW) DLE Gas Turbine with Over 60% H2 in Natural Gas., Proceedings of the ASME Turbo Expo 2020, GT2020-16332 (2020)
- 8) Ciani, et al., Sequential Combustion in Ansaldo Energia Gas Turbines: The Technology Enabler for CO2-Free, Highly Efficient Power Production Based on Hydrogen., Proceedings of the ASME Turbo Expo 2020, GT2020-14794 (2020)
- 9) 堀川敦史ほか, 2MW級ガスタービン用水素専焼ドライ低NOx燃焼器の開発とエンジン実証試験, 日本ガスタービン学会誌, Vol.49, No.4, pp.284-293 (2021)
- 10) 経済産業省, CCSを取り巻く状況 CCSの実証および調査事業の在り方に向けた有識者検討会, [http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/sangi/ccs\\_jissho/pdf/001\\_05\\_00.pdf](http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/sangi/ccs_jissho/pdf/001_05_00.pdf)
- 11) 遠山克己, 大崎クールジェンプロジェクトの進捗状況, 日本ガスタービン学会誌, Vol.47, No.4, (2019), pp.223-230
- 12) 久留正敏ほか, 水素利用国際クリーンエネルギーシステム(WE-NET)用主機の開発, 三菱重工技報, Vol.35, No.1, pp.56-59 (1998)



# 燃料アンモニアを利用した火力発電について

## 須田 俊之

株式会社IHI 戦略技術統括本部 戦略技術プロジェクト部  
カーボンソリューション担当部長

### 1. はじめに

2020年10月26日に政府が日本として「2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」ことを宣言したことにより、脱炭素に向けた動きが加速している。カーボンニュートラルを達成するための方策の一つとして、利用時にCO<sub>2</sub>を発生しない水素エネルギーの推進が重要と考えられる。水素は自然からは直接採取できない2次エネルギーであり、化石燃料からの変換による製造や、太陽光・風力発電などの再生可能エネルギーからの製造が必要となる。日本は1次エネルギーの90%以上を海外の化石燃料に依存しており、海外でCO<sub>2</sub>フリー水素を製造し日本に輸入・利用することで、国内利用時のCO<sub>2</sub>を直接的に削減できるとともに、海外の再生可能エネルギーを水素の形で輸入できるため、エネルギーセキュリティの向上（供給構造の多様化）にも寄与すると考えられる。

一方で、水素は輸送しにくいという特徴がある。複数検討されているエネルギーキャリアの中では、アンモニアの社会実装が早いと考えられており、昨今注目を集めている。アンモニアは、他のキャリアに比較して、①単位体積当たりの水素含有量が大きい、②液化しやすく既存の製造・輸送・貯蔵の技術やインフラを活用できる、③水素に再変換することなく直接燃焼が可能である、などの特徴から、早期に社会実装が可能と考えられている。アンモニアは既に肥料や化学原料として広く流通しており、鉄触媒により窒素と水素からアンモニアを合成するハーバー・ボッシュ法という完成された製法があること、また、アンモニアは可燃性ガスであり、火力発電用燃料として直接利用できることがチェーン構築上の大きなメリットと言える。

### 2. アンモニアを火力発電で利用する場合の課題

アンモニアはエネルギーキャリアとして有望な物資であるが、燃焼の面で従来の石炭や炭化水素燃料とは異なった特徴が

あり、火力発電での利用にはいくつか課題がある。例えばガスタービンで燃料として用いられる天然ガスと比べると、アンモニアは燃焼速度が約1/5、発熱量が約1/2、断熱火炎温度が200～400℃低い等の特徴があり、火炎を安定させること、完全燃焼させるために十分な滞留時間を確保すること、輻射伝熱量の低下に対する対応、などが課題となる（図1参照）。特に重要なのが、分子中に含まれる窒素原子由来のFuel-NOxやN<sub>2</sub>Oの生成が予想されるため、これら窒素酸化物の生成を抑制した燃焼手法（バーナや炉）の開発が必要であることである。Fuel-NOxやN<sub>2</sub>Oの生成メカニズムについては、特に石炭燃焼の分野において長く研究されてきており、低NOx燃焼法も開発されている。石炭燃焼においては、石炭中の窒素分はHCNやNH<sub>3</sub>の形で気相に放出され、それが酸化されることでNOxが生成する。一方で、NH<sub>3</sub>によりNOxが還元される反応もあるため、これら酸化還元反応を制御することが低NOx化のカギとなる。例えば、空気を2段階で投入する2段燃焼や、低NOxバーナなどが開発されている。これら技術を適切に応用すれ

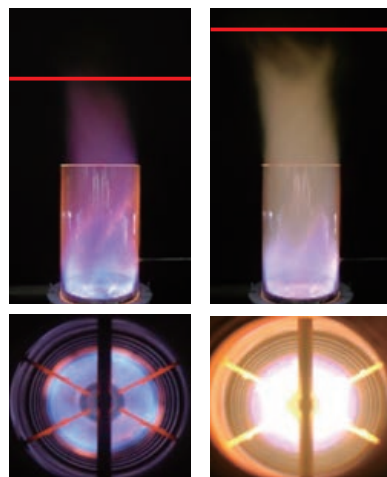


図1 火炎の比較

左：都市ガスのみによる火炎 右：都市ガスとアンモニアの混焼時火炎

ば、アンモニア燃焼においても早期に低NO<sub>x</sub>燃焼法が開発できる可能性がある。

### 3. 各種火力発電での利用技術

IHIでは、国からの支援のもと、石炭火力、ガスタービン、固体酸化物型燃料電池(SOFC)を利用した発電におけるアンモニア利用技術の確立を行ってきた。以下、石炭火力・ガスタービンにおける開発状況について簡単に述べる。

#### 3.1 石炭火力発電への適用

石炭火力からのCO<sub>2</sub>排出原単位は0.8kg-CO<sub>2</sub>/kWh程度と他の火力発電よりも大きい事が課題であるが、例えばアンモニアを発熱量ベースで20%混焼させることでCO<sub>2</sub>排出量はおおよそ20%削減となり、CO<sub>2</sub>削減効果大きい。一般に石炭火力では、石炭を数十μmまで粉砕してバーナで炉内に吹き込み燃焼させる微粉炭燃焼と呼ばれる手法が主流であるが(図2)、この発電所にどのようにアンモニア燃焼を適用させるかが課題である。IHIでは、アンモニアの投入・燃焼方法、発電所としての性能の変化の予測、必要なアンモニア供給設備の検討、など実施し、アンモニア燃焼適用の可否について検討した。

最も重要となる燃焼については、アンモニアを石炭と一緒に安定して燃焼させるため、アンモニア混焼が可能な微粉炭バーナを開発した(図3)。本バーナではアンモニアの投入方法を工夫することにより、安定した燃焼とともに、NO<sub>x</sub>の生成を抑制できる還元領域にアンモニアを投入することで低NO<sub>x</sub>化を図るものである。基本的にはバーナの交換によってアンモニア混焼の適用が可能となるため、既存の石炭火力設備を利用しつつ最小限の改造でアンモニア混焼によるCO<sub>2</sub>削減が可能となる。

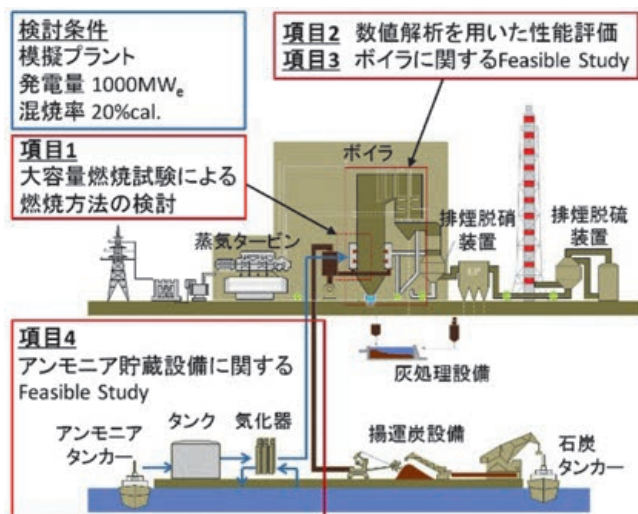


図2 石炭火力発電所(微粉炭燃焼)

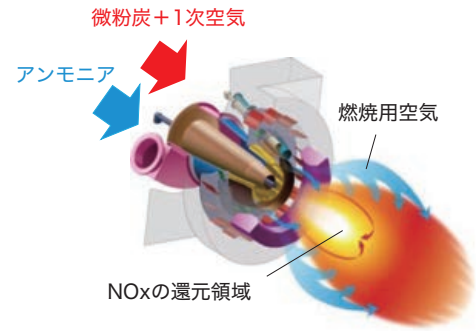


図3 アンモニア混焼微粉炭バーナ模式図

本バーナの性能を確認するため、IHIの燃焼試験設備を用いた燃焼試験を行った。試験設備の外観を図4に示す。本設備は微粉炭を燃焼させた際の燃焼挙動、排気ガス特性を探るための設備であり、今回、アンモニア供給設備を追設することで試験を行った。アンモニア混焼率は発熱量ベースで20%とした。

図5にアンモニア20%混焼時の火炎の様子を示す。火炎は微粉炭専焼時と同等で安定しており、火炎の安定性については問題無いことが分かった。排気ガス中のCO<sub>2</sub>濃度は、20%アンモニア混焼によって13.3%から10.6%へと20%削減されていることが確認できた。排気ガス中の未燃アンモニアについては、試験全体を通して、煙突部でアンモニアは検知されておらず、投入したアンモニアはすべて火炉内で分解、燃焼されており、アンモニアを安全に燃焼できることがわかった。課題で



図4 燃焼試験設備

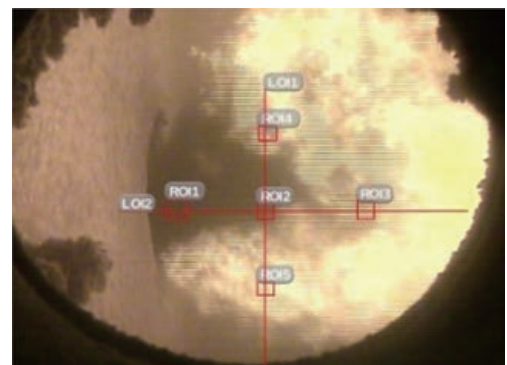


図5 アンモニア混焼火炎

あったNOxについては、石炭専焼と同等もしくはそれ以下であった。以上の結果より、石炭火力において、アンモニアを安定して混焼可能であることを確認することができた。

### 3.2 ガスタービン

ガスタービン燃焼器においてアンモニアを利用する場合、安定して燃焼させる技術（失火・不完全燃焼などの抑制）や、アンモニアからのFuel-NOxの生成を抑制する燃焼器コンセプトが重要となる。天然ガスを燃料としたガスタービンで発生するNOxは、空気中窒素分起源のThermal-NOxであり、燃料中の窒素分を起源とするFuel-NOxは発生しない。Thermal-NOxは温度依存性が高いため、ガスタービンにおける低NOx手法は希薄予混合燃焼など高温場の発生を抑制する手法が主流であるが、Fuel-NOxの場合、二段燃焼など還元雰囲気を利用した低NOx手法を用いる必要がある。IHIでは、数値解析や燃焼器単体の加圧燃焼試験等により、安定燃焼・低NOxを達成するアンモニア/天然ガス混焼燃焼器の研究開発を進めた結果、新しく開発した燃焼器を商用ガスタービンに搭載、原理実証試験を実施した。

図6に試験設備の概略図を示す。設備は主に、天然ガスコンプレッサ、アンモニア供給装置、ガスタービンエンジン、脱硝装置の4つで構成されている。ガスタービンエンジンにはIHI製2MWe級ガスタービンであるIM270を用いた。設備改造は燃焼器のみとし、開発したアンモニア/天然ガス混焼用燃焼器を搭載、それ以外のエンジン構成部品については天然ガス焚き用標準品を使用した。タービン出口には、選択還元方式の脱硝装置を設置した。アンモニアは液体状態でタンクに貯留し、液体のままポンプで加圧した後、気化器で気化させる構成とした。試験では、起動から2MWe発電までの運転を天然ガス専焼にて行った後、発電出力を2MWeで一定に保持した状態で、

アンモニアの供給を増加させ、アンモニアを20%（低位発熱量基準）まで安定して混焼させた。

ガスタービンの運転の結果、微粉炭燃焼の場合と同様に、アンモニア混焼率が増加するとCO<sub>2</sub>濃度は単調に減少し、直接的な低減が可能であることが分かった。NOx濃度はアンモニア混焼開始とともに急増するが、アンモニア混焼率5%以上では大きく変化しないことがわかり、天然ガス混焼時よりはNOx濃度は高くなるものの脱硝装置通過後のNOx濃度は環境規制値7ppm@16%O<sub>2</sub>以下まで低減可能であった。その他成分は、COは3ppm以下、NH<sub>3</sub>、THC (Total Hydro Carbon)、N<sub>2</sub>Oは1ppm以下であり、いずれも計測器の定量下限値以下であった。以上の結果より、ガスタービンでアンモニアを安定して混焼可能であることを実証することができた。

なお、現在はアンモニアを気化させるのではなく液体のまま燃焼器に投入する手法の試験を実施しており、2020年度末の時点で70%の混焼まで成功している。今後、100%アンモニアでの専焼を目指した研究開発を実施していく予定である。

## 4. アンモニアの受入・供給設備

ここでは火力でのアンモニア利用時に必要となるアンモニアの受入・供給設備の検討状況について簡単に述べる。

### 4.1 アンモニア受入・貯蔵

2030年に300万トン、2050年には3,000万トンのアンモニア需要が想定されており、アンモニアの輸入・貯蔵等が可能となる環境の整備が求められている。国内港湾においては、大量に輸入されるアンモニアを複数ユーザーが多様な用途に活用することで港湾・臨海部におけるカーボンニュートラルを推進することが可能となることから、これを実現するためのアンモニア受入・貯蔵設備は非常に重要な設備と位置付けられる。上

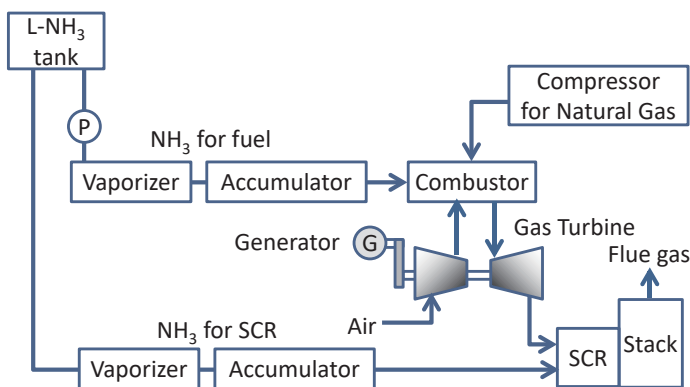
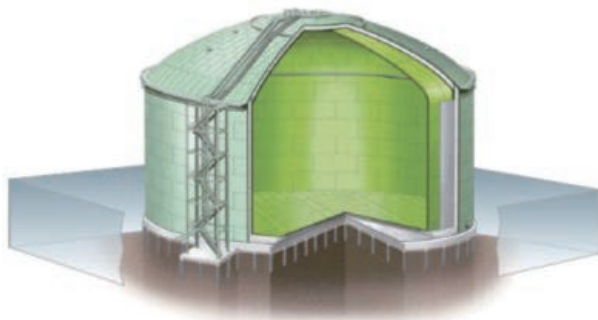


図6 燃焼試験設備概略図

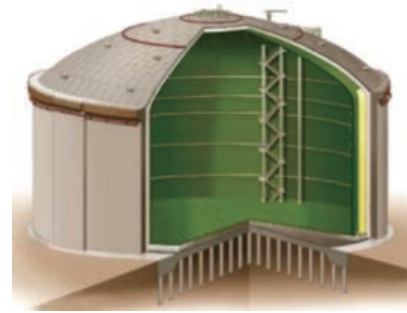


図7 2MWe 級ガスタービンIM270





金属二重殻タンク



PC二重殻タンク

図8 アンモニアタンク外観

記の実現に向けて、限られたCNPの敷地を有効に利用して最大限のアンモニアを受入・貯蔵するためには貯蔵タンク設置面積の最小化と、貯蔵タンク容量の大型化が求められる。国内にはアンモニア貯蔵タンクとして防液堤を有する金属二重殻式タンクの設置実績があるが防液堤を有する分設置面積が大きくなる傾向となる。

LNG貯蔵タンクなどですでに実績のあるPC(プレストレストコンクリート)タンク(タンク外槽の外側にPCが設置されているタンク型式)を採用することで、貯蔵タンクに必要な設置面積をほぼタンク本体設置面積とすることができ、設置面積の最小化が可能となる。タンク容量に関しては、現在アンモニアタンク内槽材として使用されているSLA材では板厚制限により貯蔵容量4万トン程度が最大となる。大容量化に際しては、より高強度の内槽材を使用する必要があるが、鋼材はアンモニアに対してSCC(Stress Corrosion Cracking: 応力腐食割れ)感受性を有しており、内槽材鋼種のSCC耐性を検証し大容量化に適用可能な鋼種を早期に選定する必要があり、IHIにおいてもアンモニアタンク大容量化に向け材料選定を実施中である。

#### 4.2 アンモニア供給

アンモニア供給の主要設備としてアンモニア気化設備が挙げられる。燃料アンモニアを効率よく気化させるためにはCNP周辺から取水可能な海水を熱媒とすることが望ましいが、発電設備へ燃料アンモニアを供給する場合、アンモニアの物性上発電設備との取り合い圧力近傍において常温下で凝縮が生じることから、海水を熱媒とするだけでは不十分であり、アンモニア気化設備の2次側にアンモニアガスが凝縮温度を下回らないように加温するシステムが必要となる。加温器の熱源は発電所が隣接する場合は発電効率に影響を与えない範囲で供給可能な蒸気等を利用するのが望ましいが、CNP等で発電所が隣接しな

い場合には別途熱源を準備する必要が出てくるので計画時に注意が必要となる。

上記以外に、将来的にCNP運営のカーボンニュートラル化を促進する為、受入・貯蔵設備にアンモニア燃料バンカリング設備を有することによって、アンモニア船着棧、離棧時にアンモニア船をサポートするアンモニア燃料タグボート(実用化開発中)や、アンモニアの船用燃料導入後のアンモニアバンカリング船への燃料供給を可能とし、CNP運営及び国際海運のカーボンニュートラル化に貢献することが期待できる。

## 5. まとめ

本稿では、微粉炭焚ボイラおよびガスタービンにおけるアンモニア混焼技術開発の状況とともに、アンモニア受入・供給設備についても概略を述べた。現在、石炭火力での20%混焼については実証段階にあるが、さらに混焼率を上げるための研究開発を継続して実施する必要がある。早期社会実装が可能となるよう、今後も力を入れて研究開発を進める予定である。

## 6. 謝辞

本稿で述べた研究の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「エネルギーキャリア」(管理人:国立研究開発法人 科学技術振興機構(JST))、および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(JPNP16002)の支援によって実施されました。ここに謝意を表します。

# 横浜港における自立型水素燃料電池システムの導入事例について

中村 仁

横浜市港湾局政策調整課 担当課長

## 1. はじめに

横浜市港湾局は2015年度に自立型水素燃料電池システム※（(株)東芝（現：東芝エネルギーシステムズ（株））製、H2One™）を全国の官公庁として初めて導入した。翌2016年度には太陽光発電設備を追加設置することで、グリーン水素による自立型水素燃料電池の運用を開始し、2021年度現在も継続して運用している。

2020年10月の内閣総理大臣所信表明演説における「2050年カーボンニュートラル」宣言を受け、国土交通省港湾局により「カーボンニュートラルポート」の形成が掲げられたこのタイミングで、一般財団法人沿岸技術研究センター様から本取組を紹介する貴重な機会をいただいたので、港湾管理者としては現在でも唯一の取組事例である本事業を改めて設備の導入経緯から振り返ってみたい。

※製品名は「自立型水素エネルギー供給システム」であるが、特定調達契約による入札を実施した際に名称を一般化して「自立型水素燃料電池システム」と称したため、本市港湾局ではこの名称を使用している。



2011年3月 計画停電時の風景(出典：日本経済新聞社)

## 2. システム導入までの経緯

今年、東日本大震災から10年を迎えた。10年前の2011年3月の未曾有の大震災により東京電力管内で計画停電が実施され、同年7月～9月には電力使用制限令が発令された。大口電力需要家は前年度の使用最大電力から15%削減することが求められたが、これらの経験が本事業の背景にある。

### 2.1 東日本大震災の経験を踏まえた港湾計画の改訂

本市は2014年12月に改訂した横浜港港湾計画において「港のスマート化」という考え方を位置づけた。一部を抜粋して次のとおり紹介する。

#### ■基本的な考え方

- 世界の主要港はCO<sub>2</sub>排出削減等の社会的責任を果たして、荷主企業等に選ばれる港となることを目指し、環境対策に力を入れているため、温暖化対策やエネルギー利用の効率化を着実に進めることが必要
  - 東日本大震災の経験を踏まえ、大規模地震等の災害発生時においても、物流機能が継続できるよう、公共インフラの耐震化を進めるとともに、コンテナターミナルや倉庫等の稼働のためのエネルギー確保が必要
- ⇒①エネルギー利用効率化、②低炭素化及び③災害時における事業継続性の確保を目指すため「港のスマート化」を進めていく。

### 2.2 埠頭における電力使用最適化の検討と水素エネルギーへの着目

2014年度は港湾計画の改訂と平行して大黒ふ頭内の普通倉庫・冷蔵倉庫・バース等を対象に調査を実施し、大黒ふ頭全体の電力使用状況の把握を試みていた。

同時に次の一步を踏み出す方法を模索していたが、2014年12月にトヨタ自動車が燃料電池自動車MIRAIを発売したことによる“水素エネルギー”への関心の高まりを受け、計画改訂

の翌年度の6月、電力ピークカット等によるエネルギー利用の効率化や、非常用電源の活用等の実証事業を行うこととして、本システムを導入することを決定した。

### 3. 自立型水素燃料電池システムの選定や設備概要等

前例のないシステムを実証事業として導入するため、システムや設置場所の選定理由を次のとおり整理したうえで、システム概要を定めた。

#### 3.1 システム選定の考え方

- 次の理由から(株)東芝製のH2One™を採用した。
- ・クリーンエネルギーである水素を使用すること
  - ・ふ頭が孤立した場合でも水素の調達可能な地産地消方式であること
  - ・設置場所が都市ガス未整備地域であること
  - ・高圧ガス貯蔵に伴う離隔距離を確保する必要がなく、省スペースで設置可能であること
  - ・技術者が常駐する必要がないこと
  - ・非常用電源としての利用が可能であること
  - ・高いデザイン性によりPR効果があること

#### 3.2 設置場所選定の考え方

BCP対応の実証としての要素があることから、大黒ふ頭(島式ふ頭を仮定の離島としても想定)の津波避難施設に指定されている「横浜港流通センター(以下「Y-CC」という)」を選定した。



Y-CC全景及びシステム設置場所(Y-CCパンフレットを加工)

#### 3.3 システム概要・外観

(下図参照)

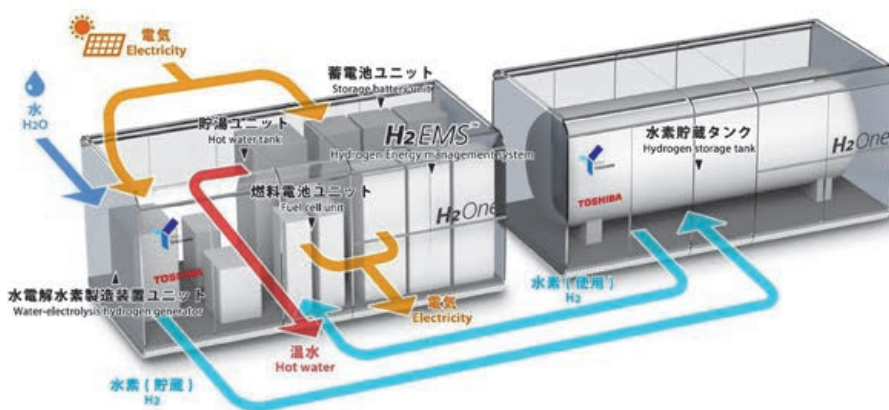
### 4. 自立型水素燃料電池システムの予算執行・発注手続き等

通常の港湾整備事業は伝統的なスキームの下で国と港湾管理者による様々な調整が行われ、段階を踏まえて実施されるが、本件はこれらのスキームとは全く異なり、イレギュラーの連続であった。

#### 4.1 事業費

冒頭で官公庁初の導入と紹介したが、(株)東芝としてもハウステンボス(株)に次ぐ2件目の成約で実績に乏しく、補助制度などは整っていなかったため「全額市費」で導入した。

2015年度のシステム本体の製造及び設置工事、2016年度の太陽光発電設備の設置工事を合わせた総事業費は約1億5千万円であった。なお、本市の導入後に環境省が本システムを対象とする補助制度を設けたと聞いている。



自立型水素燃料電池システム概要



自立型水素燃料電池システム外観



太陽光発電システム外観@Y-CC屋上

水電解水素製造装置	水素貯蔵タンク	純水素型燃料電池システム
固体高分子型 水素発生：1Nm <sup>3</sup> /h 発生水素純度：99.999%	容量：12.8m <sup>3</sup> (104Nm <sup>3</sup> , 0.82MPa 貯蔵時) 規格：第二種压力容器 総重量：約10 t	定格出力：700W×3機 発電効率：55% 総合効率：95%
PCS及び蓄電池システム	収納コンテナ	太陽光パネル
PCS容量：25kW 蓄電池容量：44kWh	外寸：W4.95m×H2.3m×D2.4m (×2台) デザイン：みなと色彩計画対応 総重量：約9.5 t	設置場所：物流棟屋上 パネル容量：24.5kW 耐風圧：6,000 N/m <sup>2</sup>

自立型水素燃料電池システム仕様概要

(出典：横浜市港湾局)



## 4.2 発注・入札

本件は先進的と言えば聞こえは良いが、換言すれば“ひらめき”により推進したこともあり、特に時間の制約が厳しかった。また、設置場所が市有施設ではなく、外郭団体（当時）であるY-CCが所有する施設への設置であったことも煩雑さを増した要素であった。

詳細は割愛するが、解決策として本体製造を物品調達（WTO入札）で先行させて、時間を稼ぎながら、基礎・電気・配管・本体据付工事などをY-CCへ工事委託することで乗り切った。

なお、翌年度予算で執行した太陽光発電設備もY-CC屋上への設置であるため工事委託で実施した。

## 4.3 その他の調整事項

### （臨港地区の用途制限）

燃料電池を有する本システムは、「新エネルギー利用等のための施設」に該当するため、単独で商港区へ設置することはできなかったが、建築部局から建築物ではないとの見解を得たうえで、Y-CCの附属施設として整理した。

### （みなと色彩計画）

横浜港では独自に配色等を指定する計画を運用している。例えばこの計画に従えば赤色は使用できないため、企業ロゴ以外の赤色はすべて変更した。

### （消防協議）

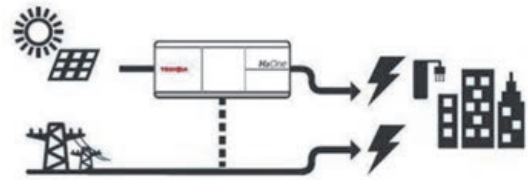
本システムの燃料電池は水電解により発生した水素を使用する仕組みで火気を使用しないため、本来消防局への届出は不要であったが、当時は消防局にとっても初めての設備であったため、届出・査察等の対応が必要となった。

## 5. 自立型水素燃料電池システムの運用等

実証事業として導入したため、複数パターンでの運転方法を切り替えながら運用していた。また、(株) 東芝等によるバーチャルパワープラント（VPP）実証事業に本システムが日本で初めての水素システムとして参画し、VPP事業でも有用であることの確認に貢献した。

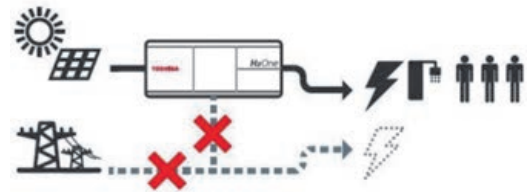
### 5.1 運転方法

「ピークカット運転モード」と「BCP運転モード」に大きく分けられる。(株) 東芝の水素エネルギーマネジメントシステム「H2EMSTM」は非常に細かい制御が可能であるため無数のパターンでの運転が可能である。前者については曜日や季節によって運転方法を切り替えていた。後者は、なかなか確認する機会に遭遇しないため、定期点検時の仮想停電状況下でBCP運転を実施し、仕様決定時に定めた3日間の情報通信に必要な電力供給が可能であることを確認した。



【ピークカット運転モード】

太陽光パネルの発電量が多い時間帯に水素を製造、貯蔵し、太陽光パネルの発電量が少ない時間帯または需要の多い時間帯に貯めた水素で燃料電池や蓄電池から電力を供給することで、施設の電力ピークカット（ピークシフト）を試みる。



【BCP運転モード】

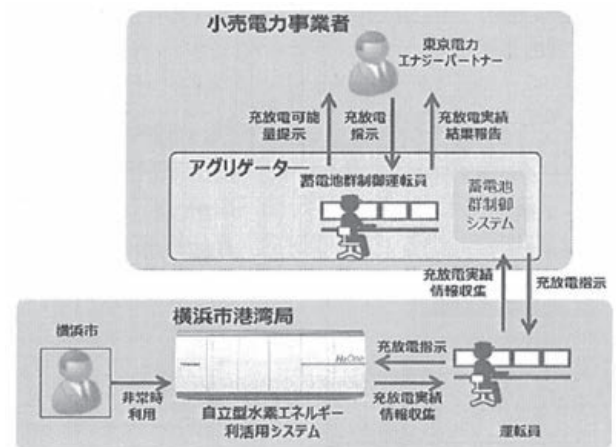
災害時の系統電力遮断時に自立運転し、災害用負荷（非常用コンセント等）に電力を供給する。  
※災害時にY-CC防災センターの情報通信機能を3日間維持できる電力を水素として貯蔵する仕様。

（出典：東芝エネルギーシステムズ(株)）

### 5.2 バーチャルパワープラント（VPP）としての活用

2016年度に東京電力エナジーパートナー（株）、(株) 東芝及び本市温暖化対策統括本部が連携して実施した「スマートレジリエンス・バーチャルパワープラント構築事業」に関連させた運転（以下「VPP運転」と言う）を試みた。

水素エネルギーを活用したVPP運転は我が国でも初めての取組だったが、蓄電池群の制御と水素燃料電池システムとの連携により、VPP事業のさらなる規模拡大が可能であることが確認された。



蓄電池群制御システムと水素エネルギー利活用システムの連系全体図  
（出典：VPP構築実証事業報告書／東電EP(株)・横浜市・IBJL東芝リース(株)）

### 5.3 視察対応等

本システム導入時はテレビ、新聞等でも多数の取材を受け、国・地方自治体・海外機関から年間100名以上の視察を受け入れてきた。また、東芝自身のセミナーや展示会などで導入事例として取り上げられるなど、我々が新たなシステムを率先して導入することで、民間企業の技術開発に一定の貢献をしたと考えている。

なお、視察参加者の中で港湾関係者がほとんどいなかったのは非常に残念なことであった。

## 6. 2050年カーボンニュートラル宣言を受けて

世界的な脱炭素の動きの中で、水素をはじめとする次世代エネルギーの利活用についていよいよ港湾管理者が考える時代が来たかもしれない。

### 6.1 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ける位置づけ

本システム導入後3年も経過すると、H2One™ 自体の導入事例が増えたほか、他の燃料電池システムの導入が進んできたこともあり、直近2〜3年は粛々と運転を続けていた。

しかし、2020年10月の「2050年カーボンニュートラル」宣言によって状況が変わり、再び問い合わせを受けることが多くなった。2020年12月に公表・2021年6月に更新された「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」にて、港湾はカーボンニュートラルレポートの形成を目指すとして、その工程表の中に「非常時にも活用可能な自立型水素等電源の導入促進」という項目が設けられたためかもしれない。

建築物へ設置する燃料電池は「定置式」という呼称が一般的かと思うが、自立型という文言が付されてグリーン成長戦略に記載されたことは、これまでの我々の率先した取組が国土交通省港湾局に評価されたものだと思われ担当としては受け止めている。

### 6.2 直近の自立型燃料電池システム

本システム導入時に担当者の間では5年後、10年度にどれだけ陳腐化しているだろうかと話していたことを思い出す。本市が(株)東芝と購入契約を締結した2015年時点では出力700Wであった純水素型燃料電池は、2021年現在出力100kWまで大型化が進んでいる。一方で、純水素の供給方法



については当時から大きな進展はなく、水素サプライチェーンの構築は引き続きの課題である。

また、H2One™ は本市が導入した複数コンテナ型の販売は終了し、ワンコンテナモデルとして規格が統一された。当時は導入側のニーズやコストに応じて仕様を決定していたが、導入事例の検証により燃料電池出力・水素貯蔵量・運送効率などを勘案して決定されたのであろう。

## 7. おわりに

カーボンニュートラルレポート形成の一環として、本製品のような燃料電池システムをはじめとして、港湾での水素の利活用を普及させるためには2つのポイントがあると考えられる。

ひとつ目は水素(純水素)の調達方法である。東芝製品を採用したため本稿では(株)東芝(現：東芝エネルギーシステムズ(株))に関する説明が多くなってしまったが、採用理由は§3.1に記載しているとおり、水素を地産地消(太陽光発電による水電解)で調達し、統合されたシステムで運用できる製品は他になかったためである。

現在でも、純水素を水電解以外の方法で調達する場合、オンサイトで都市ガス改質により調達する事例もあるが、カードルやローリー車による輸送が一般的である。純水素をいかにしてふ頭内で調達できるのが本システムのような定置式燃料電池システム、ひいては水素エネルギー普及のポイントとなると改めて実感している。

ふたつ目は港湾管理者の関心である。港湾管理者は国土交通省との緊密な連携のもとに様々な整備事業を行うため、予算面の制約から国土交通省の補助対象とならない事業を進めることは難しく、必然的に水素の利活用に関心が高まらないという状況であったと考えている。

しかし、後者についてはカーボンニュートラルレポートの形成という大方針の下で、現在、国土交通省によって実証事業や税制の特例措置の検討も進めていただいている。これに加えて、他省庁の事業の活用も視野に入れながら、様々な関係機関や民間事業者の方々と共に港湾の脱炭素化に引き続き取り組んでいきたい。

	2021年	2022年	2023年	2024年	2025年	~2030年	~2040年	~2050年
①カーボンニュートラルレポート	○カーボンニュートラルレポート(CNP)の形成 CNP形成マニュアル確定 CNP形成計画に基づく取組を進める港湾等において重点的な実証						★目標(2050年時) 港湾におけるカーボンニュートラルの実現	
	陸電・自立型水素等電源導入実行可能性調査 実証、陸上電力供給電源のCN化					CN化実装・コスト低減	CNP形成の全国への展開	
	港湾荷役機械・大型車両等のFC化実行可能性調査 実証						陸上電力供給のCN化導入拡大	
	LNG/FCガソリン等の拡大 LNG/FCガソリン等の利用促進等						自立型水素等電源、荷役機械・大型車両等のFC化導入拡大	
	水素・アンモニア燃料船への燃料供給等技術開発					実証	水素・アンモニア燃料船商用的拡大に対応した燃料供給体制の整備	
	港湾・臨海部に立地する事業者の脱炭素化の取組み、実証支援						全国での港湾立地企業の脱炭素化展開	
	○水素・燃料アンモニア等の資源確保に資する海外における港湾投資の検討 事前調査					水素・燃料アンモニア等の資源輸出のための海外における港湾投資の支援	海外からの水素・燃料アンモニア等の輸入体制の確立	

カーボンニュートラルレポート施策における自立型水素燃料電池システムの位置付け(出典：『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月更新)』)

# 水素の輸送・取扱い等について



## 中島 康広

岩谷産業株式会社  
技術・エンジニアリング本部  
水素技術開発部長



## 前田 和真

岩谷産業株式会社  
技術・エンジニアリング本部  
水素技術開発部

## 1. まえがき

### ▶脱炭素へ向けた世の中の動向

世界的な脱炭素の動きが加速する中で、菅内閣総理大臣は2020年10月の所信表明演説にて「2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」ことを宣言した<sup>1)</sup>。また、同年12月には、「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」が経済産業省にて策定され、成長が期待される産業14分野において、政策を総動員することが発表された<sup>2)</sup>。この14分野の中の1つに水素産業が明記されており、水素産業の現状と課題、今後の取り組み、成長戦略の工程表がまとめられている。

また、国土交通省においても国際物流の結節点・産業拠点となる港湾において、水素、アンモニア等の次世代エネルギーの大量輸入や貯蔵、利活用等を図るとともに、脱炭素化に配慮した「カーボンニュートラルポート（以下、CNP）」の形成に取り組むこととしている<sup>3)</sup>。

水素エネルギー社会の実現に向けて、経済産業省では水素関連技術開発をメインとして推進、国土交通省では港湾における社会実装をメインとし、両輪で推し進めることとしている。

### ▶岩谷の水素事業の歴史

こうした世の中の動きに先駆け、当社はいち早く水素をエネルギーとして着目してきた。さらに水素がエネルギーとして活用されると高密度な輸送形態が必要となるため、水素を極低温（-253℃）まで冷やし、体積を約800分の1にできる液化水素の有効性にも着目した。1965年、いち早く液化水素のフィージビリティスタディ（FS）に着手し、1978年には、我が国初の商業用液化水素製造プラントを稼働させた。さらには1986年、当社が宇宙開発事業団（現：JAXA 宇宙航空研究開発機構）へ供給した液化水素により、初の国産H-I型ロケット1号機の打ち上げに成功した。また、2006年には商業用大型液化水素

プラント「株式会社ハイドロエッジ」を設立し、当時ロケット用燃料に限定されていた液化水素を一般産業用にも展開した。今日においては、液化水素販売シェア100%の国内唯一の液化水素サプライヤーとなっている。

現在、当社の商業用液化水素製造プラントは全部で3拠点存在する。2006年に、前述した国内初となる商業用大型液化水素プラント、「株式会社ハイドロエッジ」を大阪府堺市に設立し、以降、2009年に千葉県市原市の「岩谷瓦斯株式会社千葉工場」、2013年に山口県周南市の「株式会社山口ロキッドハイドロジェン」の運転を開始している。当社は液化水素の製造以外にも、約半世紀にかけて積み上げてきた液化水素を安全に取り扱うノウハウをもとに液化水素の輸送、利活用で様々な取り組みを行っている。

## 2. 陸上における水素の輸送と荷役

### ▶水素の基礎物性

水素は、無色無臭で、最も密度の小さい物質である。また、沸点が-253℃と極低温で、常温常圧で気体の水素も常圧で-253℃まで冷却すると液化水素となる<sup>4)</sup>。このような物性から、メタンが主成分である天然ガスに比べ、重量あたりのエネルギー密度が高く、拡散しやすい一方、液化水素に変換するためには-253℃まで冷却しなくてはならず、多量のエネルギーと断熱技術が必要となる。

### ▶陸上における水素輸送

水素の大量輸送は、前章の極低温に冷却した液化水素として輸送する方法と、常温水素ガスのまま圧縮し圧縮水素として輸送する方法がある。液化水素は、常温水素ガスに比べ、約800分の1の体積にすることができる。陸上液化水素輸送用タンクローリーのタンク幾何容積は約20m<sup>3</sup>、40フィートコンテナは約40m<sup>3</sup>であり、それぞれ約1,500kg、3,000kgの水素を貯蔵、輸送することができる。一方、圧縮水素は一般的に15



～20MPaに圧縮し、常温水素ガスに比べ、150～200分の1の体積となる。陸上圧縮水素輸送用トレーラーは長尺容器を約20本束ねており、約250kgの水素を貯蔵、輸送することができる。したがって、液化水素の40フィートコンテナは圧縮水素トレーラーと比べると、12倍水素輸送能力が高いと言える(図1)。一方で、液化水素は-253℃という極低温の物性を持つため、容器外部からの入熱により少しずつ蒸発してしまうという問題が発生する。そのため、液化水素の容器は魔法瓶のような真空二重殻構造で、いかに容器の断熱性能を高め、蒸発ガスを減らすかということが、水素の輸送や貯蔵において重要となる。タンクローリーあるいは40フィートコンテナでは、スーパーインシュレーションという軽量かつ高度な断熱方式を用いている。

輸送形態	幾何容積 (概算値)	水素輸送量 (概算値)
圧縮水素トレーラー	14 m <sup>3</sup>	250 kg
液化水素ローリー	20 m <sup>3</sup>	1,500 kg
液化水素40フィートコンテナ	40 m <sup>3</sup>	3,000 kg

図1 水素輸送形態と水素輸送量

### ▶陸上における液化水素受入設備と荷役

通常の水素の販売においては、タンクローリーあるいは40フィートコンテナで液化水素を輸送し、水素ユーザー敷地内の貯槽に液化水素を充填(荷役)していく。水素ユーザー

の液化水素受入設備とタンクローリーの概略フローを図2に示す。ローリーと貯槽、その間の液化水素配管では、外部からの入熱を防ぐために、真空二重の構造となっており、水素ガスを利用する際には、送ガス蒸発器により水素を気化させ、ユーザーへと供給する。

液化水素の荷役手順の大きな流れは、主に、フレキシブルホース接続、気密確認、置換、加圧、送液の5段階である。受入設備とローリーをフレキシブルホースで接続した後、水素ガスにより接続部の気密確認を行い、漏れがないことを確認する。その後、ホース内の水素純度を高めるために水素置換作業(パージ)を行う。水素漏洩がなく水素純度も条件を満たしたら、ローリーに付帯する加圧蒸発器によりローリータンク内を加圧し、荷役準備は完了である。最後にローリー液出口弁を開とし、ローリータンク内圧力によって液化水素の送液を開始する。

### ▶液化水素陸上輸送・荷役の安全規制

液化水素受入設備や、液化水素のタンクローリーあるいは40フィートコンテナは高圧ガス保安法の適用を受けている。その中でもタンクローリーあるいは40フィートコンテナは、高圧ガス保安法一般則2条12項にある移動式製造設備に該当する。移動式製造設備が満たすべき技術上の基準については、基本的に同法一般則8条に詳細が規定されている。特に、水素ステーション向けの液化水素貯槽に充填するものに関しては、同法一般則8条の3項に規定があり、充填ホースの基準、緊急遮断装置の設置等、具体的に規定されている。

他にも、高圧ガスの移動に係る保安上の措置として、移動監視者が必要となる場合がある。特に水素ステーション向け液化水素貯槽に充填する際には、充填する液化水素重量に関わらず、移動監視者が必要となる。(同法一般則49条17項)

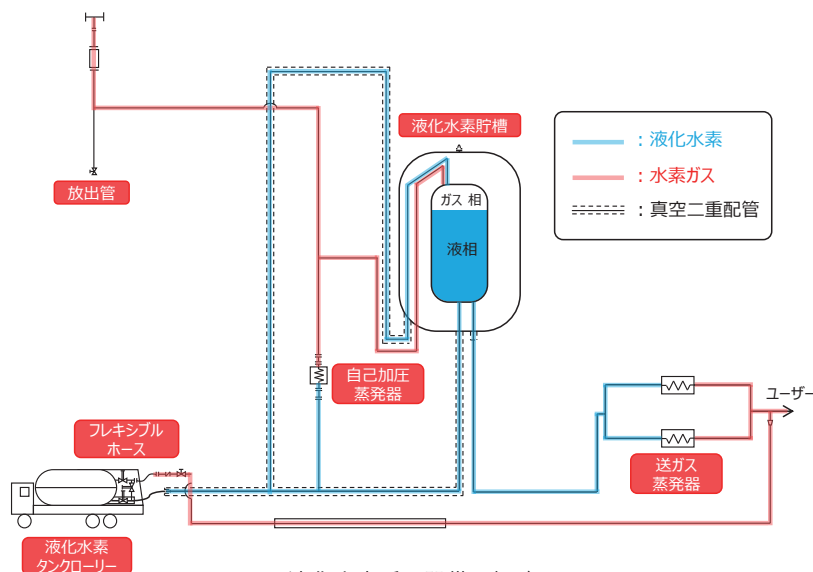


図2 液化水素受入設備の概略フロー

## 3. 港湾における水素の輸送

### ▶港湾における水素輸送の例

2050年カーボンニュートラル実現に向けた港湾における取組みにおいて、水素輸送の例が挙げられている<sup>5)</sup>。具体的には、海外水素の輸入を目的とした「受入岸壁、貯蔵施設等の確保」や船舶燃料のカーボンフリー化を目指した「水素等燃料船へのバンカリング(燃料充填)」、受入貯蔵設備から水素発電所までの「パイプライン等による水素等の配送」と記載されている。今後、港湾においても様々な目的で水素の輸送が行われることが想定されるが、輸送の形態はそれぞれの目的で大きく異なる。「受入岸壁、貯

蔵施設等の確保」では、海外からの大規模水素輸入を目的としており、エネルギー密度の高い液化水素等が採用される。「水素等燃料船へのバンカリング（燃料充填）」については、現在の燃料電池車のように高圧の水素ガス（数十MPa程度）が採用される場合や、船舶燃料としてより多くの水素が必要となる場合は、上記同様液化水素の可能性も考えられる。この点については、必要水素量、技術実現性、容器重量、法規制等、様々な面から検討する必要がある。「パイプライン等による水素等の配送」については、主に水素受入基地から水素発電所への輸送が想定され、低圧の水素ガス（数MPa程度）が採用される。

#### ▶港湾における水素輸送に関する当社の取り組み

こうした港湾における水素輸送について、当社の取組みを紹介する。「受入岸壁、貯蔵施設等の確保」に関して、オーストラリアにある未利用資源の褐炭や、風力や太陽光などの再生可能エネルギーから水素を大量に製造し、日本に輸入する事業を現在検討している。特に褐炭から製造した水素の輸入事業に関しては、現在、実証段階に進んでいる（次章参照）。また、「水素等燃料船へのバンカリング（燃料充填）」に関しては、大阪・関西万博等での船舶商用化を目指し、水素燃料電池船と船舶用水素ステーションの開発を進めている。さらに、「パイプライン等による水素等の配送」に関しても、大手電力会社との水素専焼発電あるいは天然ガスとの混焼発電の検討を進めている。

## 4. 海外水素輸入へ向けた取り組み

### ▶海外水素輸入の目標と現状

2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」においては、国内の水素需要の高まりに合わせ、国内外合わせて年間300万トンの水素を導入すると発表している<sup>6)</sup>。特に海外からの水素輸入について、2017年に策定された「水素基本戦略」<sup>7)</sup>にもあるように、2030年に年間30万トンの水素を輸入する目標を立てている。水素エネルギー社会の実現、さ

らにはCNPの実現には、安価で大量なCO<sub>2</sub>フリー水素サプライチェーン構築が不可欠であると言える。これに先立ち、2016年には当社、川崎重工業、電源開発、シェルジャパンの4社でCO<sub>2</sub>フリー水素サプライチェーン推進機構（以下、HySTRA）を設立し、「未利用褐炭由来水素大規模海上輸送サプライチェーン構築実証事業」を進めている。2030年には、本実証試験を踏まえ、未利用の褐炭から水素を大量に製造・液化し、液化水素運搬船で日本に輸入することを目標としている。HySTRAは国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、NEDO）の助成の下、図3のような上流から下流までの日豪サプライチェーンを実証する。具体的には、①液化水素の長距離大量輸送技術の開発、②液化水素荷役技術の開発、③褐炭ガス化技術の開発の実証を行う<sup>8)</sup>。現在、神戸市にある液化水素受入基地および豪州にあるガス化設備はそれぞれ当社および電源開発にて運営中、川崎重工業が建造した液化水素運搬船は船舶としての試運転をほぼ終えている。

### ▶当社の運用する液化水素受入基地

当社の運営する液化水素受入基地（正式名称：神戸液化水素荷役実証ターミナル）の設備概要について紹介する。基地設備概要を図4に示す。液化水素受入基地は、液化水素の貯蔵を行う液化水素タンク（容量：2,500m<sup>3</sup>）、基地と船舶で液化水素の荷役を行うためのローディングアームシステム（以下、LAS）、その他設備で構成される。液化水素タンクは前述のように真空二重の構造となっており、高い断熱性能を維持している。LASはこの実証試験用に世界で初めて開発され、真空二重のフレキシブルホース型を採用している。将来的には、現在のLNG受入基地にて採用されているスイベルジョイント型が見込まれるため、2022年にその型式のLASを設置し、追加試験を実施予定である。その他設備としては、試験中蒸発した水素ガス（ボイルオフガス：以下、BOG）を圧縮するBOG圧縮機、それを貯蔵するBOGホルダー（容量：300m<sup>3</sup>、圧力約2MPa）、

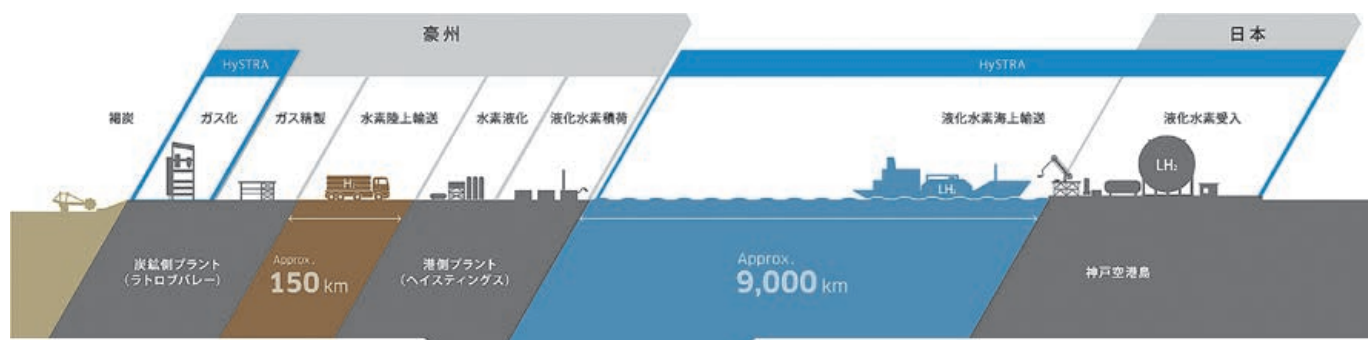


図3 日豪サプライチェーン実証全体

水素ガスを放出するためのベントスタックがある。

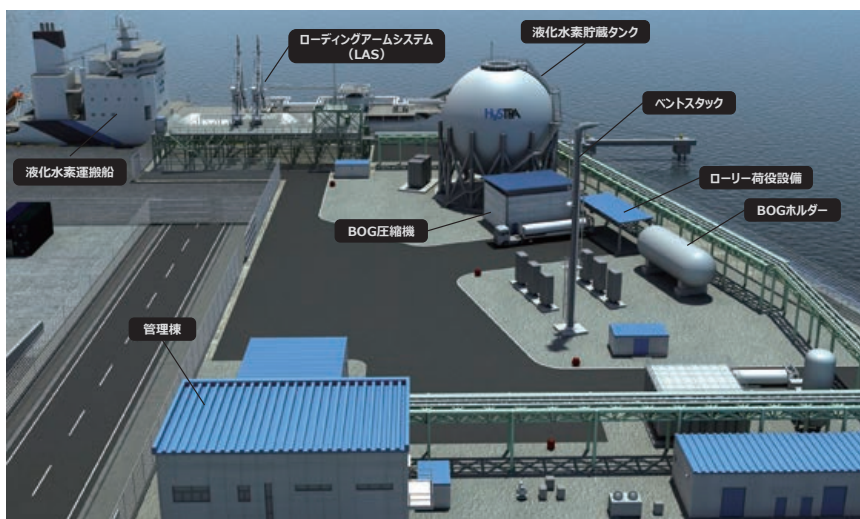
### ▶液化水素受入基地の運用体制

現在、本受入基地は岩谷グループ約30名で運用している。また、本設備は高圧ガス保安法が適用されており、高圧ガスの製造に係る事業の実施を統括管理する高圧ガス製造保安統括者（免状不要）と運用体制各直に1名の保安係員（有資格者）を置いている。また、港則法第23条第4項での危険物運搬許可で求められる荷役安全管理体制の構築も行っている。

### ▶液化水素の荷役実証と今後

液化水素運搬船と受入基地での実証試験項目は主に、液化水素運搬船の開発とその運搬船との安全な液化水素の荷役、の2

点である。特に今回は港湾での水素取扱いとなる後者の安全な荷役について簡単に説明する。荷役設備の概略フローを図5に示す。荷役そのものについては、前述した陸上におけるタンクローリーでの荷役と基本的に同様であり、LAS接続、気密確認、置換、加圧（またはポンプ駆動）、送液の5段階からなる。液化水素運搬船からの揚荷では、付帯する液化水素用ポンプにより送液し、反対に液化水素運搬船への積荷では、基地タンクの水相の圧力を上げ、送液している。また、液化水素送液中は大量のBOGが発生するため、BOG圧縮機により圧縮し、BOGホルダーへと貯蔵する。さらにBOGが発生する場合はベントスタックを使用し、大気中に放散する。



液化水素運搬船 主要目			液化水素荷役実証ターミナル 主要目		
液化水素貨物タンク	容量	1,250m <sup>3</sup> ×1基(水素積載量75トン)	液化水素貯蔵タンク	容量	2,500m <sup>3</sup> (水素貯蔵量150トン)
	断熱	真空二重殻SI断熱		断熱	真空二重殻パライト断熱
船体部	寸法	全長116m×幅19m×深さ10.6m	LAS	方式	真空二重フレキシブルホース型

図4 液化水素受入基地の設備概要

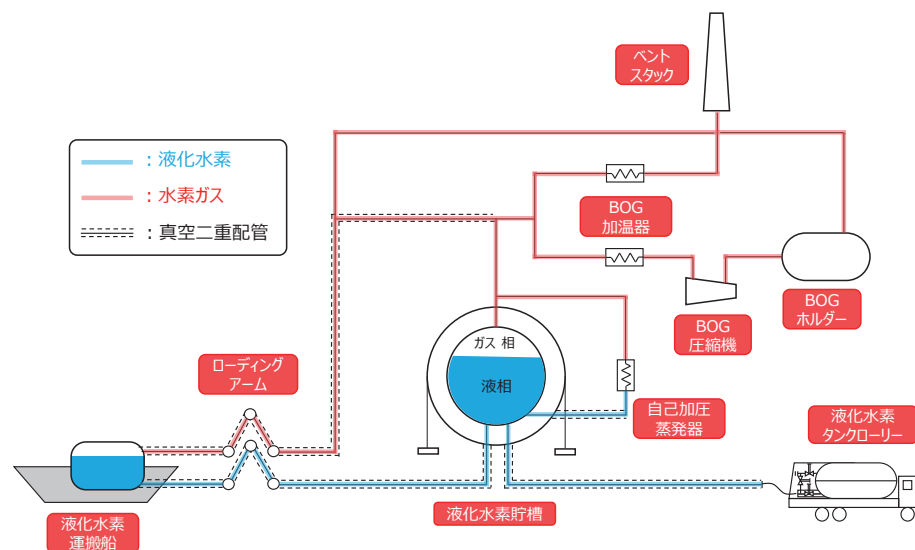


図5 液化水素受入基地の概略フロー

本実証試験を通して、大規模な液化水素設備の安全な運用方法を構築するために、運用・実証データを取得している。さらに、今後はそれらのデータを踏まえ、将来の液化水素受入基地の規模・仕様を検討していく。来るべき2030年の水素エネルギー社会の構築に向け、本実証で得たノウハウを活用していきたい。

### 【参考文献】

- 1) 第百三回国会における菅内閣総理大臣所信表明演説 ([https://www.kantei.go.jp/jp/99\\_suga/statement/2020/1026shoshinhyomei.html](https://www.kantei.go.jp/jp/99_suga/statement/2020/1026shoshinhyomei.html))
- 2) 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略 (<https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201225012/20201225012-1.pdf>)
- 3) 第1回カーボンニュートラルポート (CNP) の形成に向けた検討会 (令和3年6月8日(火)) 資料1 (<https://www.mlit.go.jp/common/001408123.pdf>)
- 4) 高圧ガス保安協会基礎物性 (<https://www.khk.or.jp/hydrogen/foundation.html>)
- 5) 第1回カーボンニュートラルポート (CNP) の形成に向けた検討会 (令和3年6月8日(火)) 資料2 (<https://www.mlit.go.jp/common/001408124.pdf>)
- 6) 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略 (<https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201225012/20201225012-1.pdf>)
- 7) 水素基本戦略 ([https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/saisei\\_energy/pdf/hydrogen\\_basic\\_strategy.pdf](https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/saisei_energy/pdf/hydrogen_basic_strategy.pdf))
- 8) 未利用褐炭由来水素大規模海上輸送サプライチェーン構築実証事業 事業進捗状況の説明 (<https://www.nedo.go.jp/content/100927613.pdf>)



## CCSとCCUS

「カーボンニュートラル」を実現するためには、排出する温室効果ガスの総量を大幅に削減した上で、排出量をゼロにすることが難しい分野の排出分を相殺すべく「吸収」や「除去」を行う必要があります。例えば、植林を進めることにより光合成に使われる大気中のCO<sub>2</sub>の吸収量を増やすこと、あるいは、CO<sub>2</sub>を回収 (Capture) し、貯留 (Storage) する『CCS』技術、さらに回収・貯留したCO<sub>2</sub>を利用 (Utilization) する『CCUS』技術を駆使して大気中に存在するCO<sub>2</sub>の回収量を増やすことが考えられます。

【出典：資源エネルギー庁HP スペシャルコンテンツ「カーボンニュートラル」って何ですか？(前編)～いつ、誰が実現するの？  
[https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/carbon\\_neutral\\_01.html](https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/carbon_neutral_01.html)】

## カーボンリサイクル

『CCUS』でこれまで一般的だったのは「EOR (原油増進回収技術) への利用 (油田からできるだけ原油を回収するための圧入剤として水などの代わりに炭酸ガスを使う)」又は「ドライアイスや溶接などへの直接利用」でしたが、これらの方法だけでは、利用されるCO<sub>2</sub>の量は限られてしまいます。

そこで、CO<sub>2</sub>を“資源”として捉え、素材や燃料に再利用するという『カーボンリサイクル』によってCO<sub>2</sub>の利用をさらに促進する取り組みが経済産業省・資源エネルギー庁の提唱により進められています。

令和元年 (2019年) 6月にとりまとめられた「カーボンリサイクル技術ロードマップ」におけるCO<sub>2</sub>の利用先としては①化

## ブルー水素とブルーアンモニア

燃焼時にCO<sub>2</sub>を排出しないことで化石燃料の代替として有望視されている水素、アンモニアについても、その製造過程においてCO<sub>2</sub>の排出が避けられないことから、この製造段階で発生するCO<sub>2</sub>を『CCS』または『CCUS』を用いて回収することで「カーボンニュートラル」な水素、アンモニアとすることができます。このような水素、アンモニアはそれぞれ『ブルー水素』、『ブルーアンモニア』と呼ばれます。一方、風力発電などの再生可能エネルギーを用いて水の電気分解によって製造される水素、アンモニアは、製造過程においてもCO<sub>2</sub>を発生しないことから、それぞれ「グリーン水素」、「グリーンアンモニア」と呼ばれます。

学品 ②燃料 ③鉱物 ④その他が想定されています。

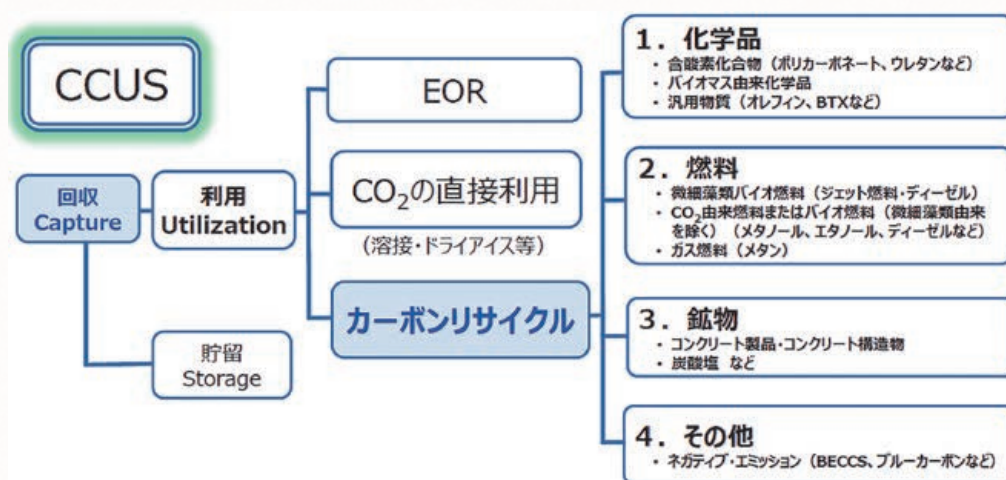
①化学品では、具体的には、ウレタンや、プラスチックの一種でCDなどにも使われるポリカーボネートといった「含酸素化合物 (酸素原子を含む化合物)」が考えられています。また、『バイオマス』由来の化学品や、汎用的な物質であるオレフィン (ポリプロピレンやポリエチレンなどの樹脂の総称) も利用先となり得ます。

②燃料では、光合成を行う小さな生き物「微細藻類」を使ったバイオ燃料や、『バイオマス』由来のバイオ燃料が利用先として考えられています。

③鉱物では、「コンクリート製品」や「コンクリート構造物」が

考えられています。具体的には、コンクリート製品などを製造する際に、その内部にCO<sub>2</sub>を吸収させるものなどです。

④その他としては、バイオマス燃料とCCSを組み合わせる『BECCS』、海の家藻や海草がCO<sub>2</sub>を取り入れることで海域にCO<sub>2</sub>が貯留する『ブルーカーボン』などが考えられています。(これらは総称して「ネガティブエミッション」と呼ばれます。)



【出典 (本文・図とも)：資源エネルギー庁HP スペシャルコンテンツ 未来ではCO<sub>2</sub>が役に立つ?!「カーボンリサイクル」でCO<sub>2</sub>を資源に  
[https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/carbon\\_recycling.html](https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/carbon_recycling.html)】



## バイオマス

「バイオマス」とは、生物から生まれた資源のこと。森林の間伐材、家畜の排泄物、食品廃棄物など、さまざまなものが資源として活用されています。

これらのバイオマスは、燃料にしたり発電したり熱を供給するなど、エネルギーとして利用することもできます。バイオマスによるエネルギーは、使用すればCO<sub>2</sub>を排出するものの、CO<sub>2</sub>を吸収して成長する木材などを材料として使うことから、全体で見れば大気中のCO<sub>2</sub>の量に影響を与えない「カーボンニュートラル」なものです。

【出典：資源エネルギー庁HP スペシャルコンテンツ 知っておきたいエネルギーの基礎用語～地域のさまざまなモノが資源になる「バイオマス・エネルギー」  
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/biomass.html>】

## BECCS

「BECCS」とは、BioEnergy with Carbon Capture and Storageの略でCCSとバイオマスエネルギーを結びつけた技術を指す造語。「カーボンニュートラル」なバイオマスの燃焼によって排出されたCO<sub>2</sub>を回収し、地中などに貯留すれば、「ネガティブエミッション」になるというものです。

【出典：(一財)環境イノベーション情報機構HP (EIC ネット) 環境用語集「BECCS」  
<https://www.eic.or.jp/ecoterm/?act=view&serial=4606>】

## ブルーカーボン

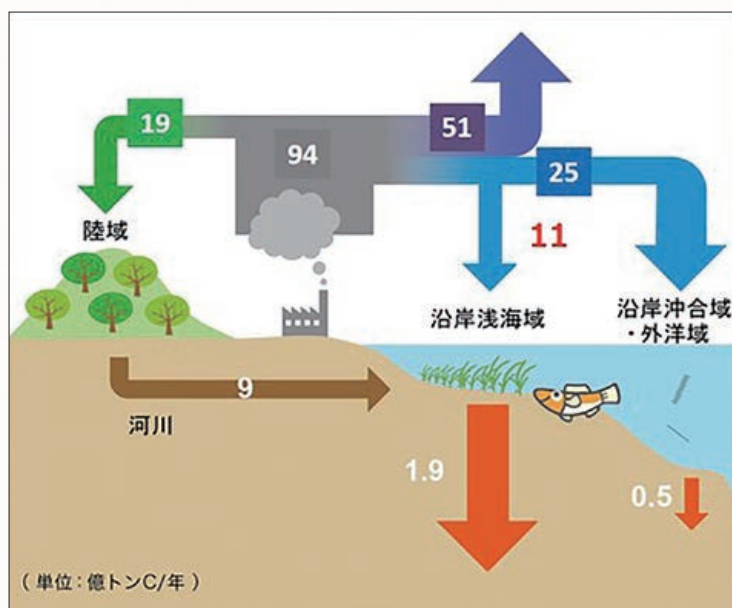
「ブルーカーボン」とは、藻場・浅場等の海洋生態系に取り込まれた(captured)炭素のこと。2009年10月に国連環境計画(UNEP)により命名されました。陸域や海域の生物によって吸収・貯留されている炭素はこれまでグリーンカーボンと呼ばれていましたが、最近では森林など陸域のものをグリーンカーボン、海域のものをブルーカーボンと区別するようになりました。

ブルーカーボンを隔離・貯留する海洋生態系(海草藻場、海藻藻場、湿地・干潟、マングローブ林)は、CO<sub>2</sub>吸収源対策の新しい選択肢として提示され、「ブルーカーボン生態系」と呼ばれます。

ブルーカーボン生態系のCO<sub>2</sub>隔離・貯留のメカニズムは、大気中のCO<sub>2</sub>が光合成によって浅海域に生息するブルーカーボン生態系に取り込まれ、CO<sub>2</sub>を有機物として隔離・貯留する、又は枯死したブルーカーボン生態系が海底に蓄積するとともに底泥に埋没し続けることにより、ブルーカーボンとしての炭素が蓄積されるものです。岩礁に生育するコンブやワカメなどの海藻においては、葉状部が潮流の影響により外洋に流され、その後、水深が深い中深層に移送され、海藻が分解されながらも長期間、中深層などに留まることによって、ブルーカーボンとしての炭素が隔離・貯留されるものです。

国土交通省港湾局では港湾におけるCO<sub>2</sub>吸収源対策としてブルーカーボン生態系等の活用等を検討しています。

【出典：国土交通省HP 港湾 ブルーカーボンとは  
[https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan\\_tk6\\_000069.html](https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_tk6_000069.html)】



### 【CO<sub>2</sub>の循環(億トンC/年)】

(億トンC：CO<sub>2</sub>の中に含まれる炭素の重量を億トン単位で表したもの)

- 人間活動からの排出 **94**
- 大気中への残留 **51**
- 陸域の吸収 **19**
- うち河川から海域への流入 **9**
- 海域の吸収 **25**
- (うち沿岸浅海域の吸収 **11**)
- 沿岸浅海域における海底泥土への貯留 **1.9**
- 沿岸沖合域・外洋域における海底泥土への貯留 **0.5**

【出典：(国研)港湾空港技術研究所HP 沿岸環境研究グループ ブルーカーボンー沿岸生態系の炭素隔離機能  
<https://www.pari.go.jp/unit/ekanky/research/bluecarbon2.html>】



# 必要とされる沿岸気象 海象情報の提供のために

～波浪情報部の活動～

一般財団法人沿岸技術研究センター  
波浪情報部業務課長 山本 浩之

## 1.はじめに

波浪情報部は、沿岸技術研究センター（当時は財団法人沿岸開発技術研究センター）内に1995年に設置された。現在は職員3名（審議役、調査役、課長）で主に港湾局向けに沿岸気象海象情報配信システム（Coastal Oceanographic and Meteorological Information System、略して通称カムインズ）による気象海象情報提供サービスを担当している。この部は所属職員全員が気象予報士資格を持ち、海洋土木など工学系の技術者が多い当センターにあっては少し雰囲気異なっている。以下では波浪情報部の事業内容を紹介する。

## 2.カムインズの運用

### 2.1 役割の変化

波浪情報部ではカムインズの運用を1997年から開始した。当初、カムインズは各地方整備局（当時は港湾建設局）の管轄する港湾工事の安全管理のための予測情報提供が主な役割であった。その後の港湾工事の減少、一方での港湾施設やその利用者に対する安全管理の要求の高まりによって、近年は防災情報提供の役割が増してきている。これにより、以前は翌日の港湾工事業の実施是非の判断をするために工事海域の波高が1mを超えるかどうかを見極めることが重要であったが、現在はそれに加えて翌日の防災体制を判断する波高6m（地域によって基準の波高は異なる）を超えるかどうかを予測することが求められている。このため、日本全国の港湾の波浪について、平常時の波高1m程度から災害を引き起こす高波高時まで幅広い波浪状況に適應できる予測精度が必要となっている。

### 2.2 システム概要

現在運用中のカムインズは、2017年にシステム更新を行っており、カムインズとしては第四世代となる。カムインズの特徴を次にあげる。

- ・気象庁の海上風予測を入力して第三世代波浪モデル WAVEWATCH III（以下、WW3）による独自運用の予測計算を行っている。
- ・港湾内等のポイント予測については、波浪変形（屈折・回折など）を考慮に入れた計算を行っている。
- ・予測結果は一日に3回発表し、最長10日先まで予測している。
- ・オンラインの波浪観測値を利用した波浪予測の補正機能を持っている。
- ・独自の海象予測情報に加えて、気象庁の発表する気象情報も提供している。
- ・情報提供の方法はWebを基本としており、さらに異常時の防災情報として携帯端末へのメール配信を行っている。
- ・提供した予測情報について観測値を用いた予測精度の分析・検証を行っている。

### 2.3 情報提供例

カムインズの具体的な情報提供イメージを持てるように、幾つか実際の状況提供画面の例を紹介する。

#### ① トップ画面

カムインズのトップ画面例を図1に示す。トップ画面ではユーザの指定する地域の注意報警報の発表状況、波浪予測の分布図と時間変化図、台風情報、地震・津波情報を表示することで、トップ画面をひと目見ただけで現在の気象海象状況を即座に把握できるように工夫されている。

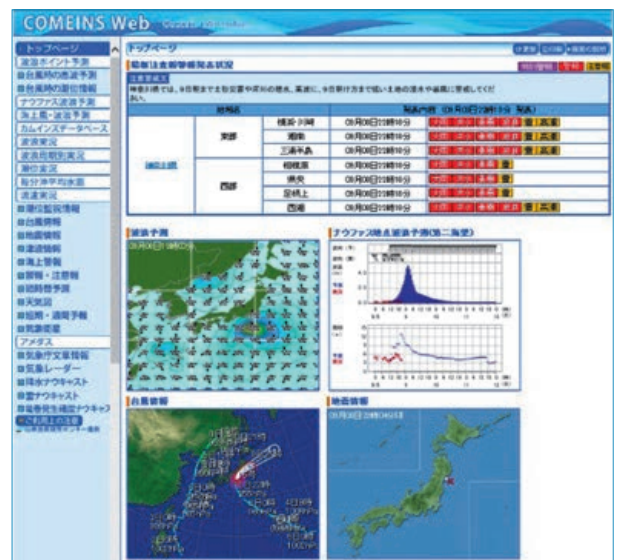


図1 トップ画面例

#### ② 海上風波浪予測画面

次に海上風波浪予測画面を図2に紹介する。これは、WW3によって計算された日本付近の2分（約3.7km）格子の10日先までの予測計算結果を可視化したもので、動画表示機能も備えている。10日先までの気象擾乱の移動に伴う日本付近の波浪状況の把握に効果的である。



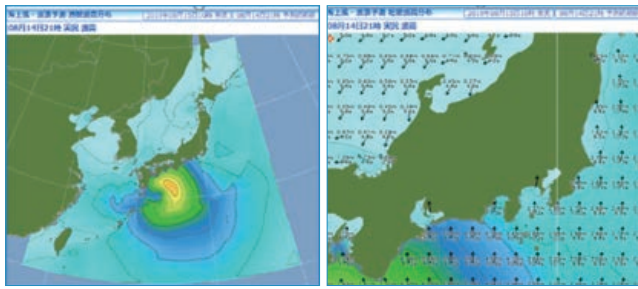


図2 海上風波浪予測画面例

### ③波浪ポイント予測画面

WW3の波浪予測を基に各港湾向けに防波堤等の設置状況を条件に入れた波浪変形（屈折・回折など）を考慮した波浪ポイント予測の提供例を図3に示す。港内の概観図上に指定位置の波浪予測値等を表示したり、最長10日先の波高、周期、風向風速の予測時間変化図を表示する。

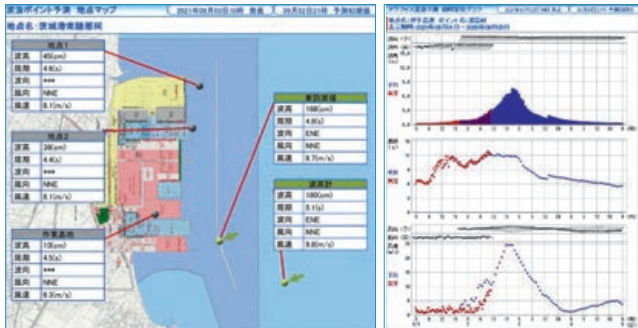


図3 波浪ポイント予測画面例

### ④防災メールの提供

カムインズでは、主に港湾の運用管理における防災・減災対応を支援する目的で、担当者の所持する携帯端末向けに予め設定した条件に基づきメールを配信するサービスを行っている。メール配信はPUSH型の情報提供であり、即時性の求められる緊急時の防災情報提供手段として重要な役割を果たしている。以下に示す項目についてメールの配信条件をサーバ側で設定して運用している。

ナウファス地点波浪予測、波浪ポイント予測、波浪実況、台風情報、地震情報、遠地地震情報、津波情報、沖合津波観測情報、注意報・警報・特別警報、海上警報、気象情報、南海トラフ地震情報、土砂災害警戒情報、河川洪水情報、火山情報、天気予報

#### 2.4 なぜ気象予報士なのか

波浪情報部の職員は、なぜ気象予報士資格を持っているのか、その理由は、カムインズ運用のように独自の波浪予測を行いユーザに情報を提供するためには、組織が気象庁の予報許認可を取得して気象予報士が業務に従事することが気象業務法に定められているからである。このことが、最初に説明したように、当センターにあっては波浪情報部が少し雰囲気異なる集団となる理由にもなっている。

## 3. SIP事業への参画

### ①SIP事業の概要説明

SIP事業は内閣府総合科学技術・イノベーション会議が科学技術イノベーション実現のために創設した国家プロジェクトであり、波浪情報部ではSIP II期（2018～2022年度）の「国家レジリエンス」の募集課題のうち、「IVスーパー台風被害予測システム開発」のテーマにおける、「高潮・高波のハザード予測システムに関する研究開発」のサブテーマに参画している。SIP事業では新規技術を開発するだけでなく、その成果を社会実装に繋げることが求められる。

### ②高潮・高波のハザード予測システムに関する研究開発

気象庁のアンサンブルGPVデータを利用して高潮・高波予測を行うシステムを開発し、台風来襲時に大阪湾や東京湾を対象とした実証実験を行っている。図4に高潮・高波のハザード予測システムの概要を示す。

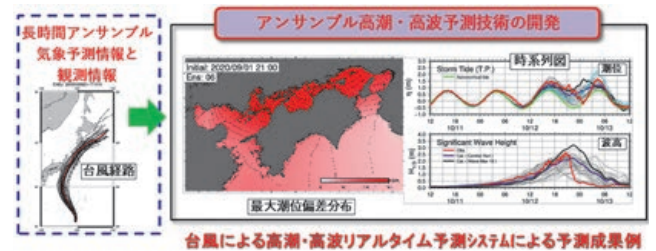


図4 高潮・高波のハザード予測システムの概要

## 4. 調査部との連携

ここまでは、波浪情報部の予測に関する事業の特徴を紹介してきた。波浪情報部は当センターを構成する部門の一つであり、調査部門等との連携を図ることで、当センターの持つ技術力に大きな幅をもたらしている。例えば、調査部の受託業務である港湾の防災・減災を検討する業務では、ハード対策とソフト対策は両輪であるが、防災情報の提供はソフト対策の重要な要素であり、カムインズは有用なツールとなる、あるいは地球温暖化を考慮した高潮・高波対策を考える上で将来の気象擾乱はどう変化するのか、これには気象予報士の知見が活かされるなど、多くの例を上げることができる。

## 5. 今後

これまで波浪情報部ではカムインズを通じて港湾向けの安全管理並びに防災対策の支援情報として、港湾構造物等の影響を考慮した精度の高い波浪予測情報等を提供してきた。今後も波浪モデルやデータ同化手法等の予測技術の改善、確率的な予測表現導入や高度化するICTへの対応等情報提供内容の向上など、日々の情報提供業務を行いながら中長期的な視点を持って取り組んでいきたい。



わが国は津波の常襲地域であり、津波に対する知見や経験が豊富である。津波に関するわが国の技術的知見を広く世界に情報発信することは当センターの業務の一つとして考えられることから、津波災害の危険性が高い国内外諸地域における人的被害軽減に貢献することを目的とし、津波に関する被害、現象、予警報及び被害軽減策等の技術的知見を紹介する書籍「絆～津波からいのちを守るために」、書籍「TSUNAMI」、絵本「津波は怖い！」を出版している。

### 1. 書籍「絆～津波からいのちを守るために～」

当センターは国際津波・沿岸防災技術啓発事業組織委員会編集・出版事務局として、東日本大震災から10年の節目となる2021年3月11日に書籍「絆～津波からいのちを守るために」を編集・発刊した。

東日本大震災発生から10年、国連総会で「世界津波の日（11月5日）」が創設され5年が経過した今、「南海トラフ地震」などの巨大地震に備えて、私たちはいかにして命を守ることができるのか。津波・防災の研究者や実務者、東日本大震災の被災地で活動する団体・企業等、50人を超える著者が、今後の津波防災・減災のために未来に残すべきメッセージを伝えている。（図1）



図1 「絆～津波からいのちを守るために～」

### 2. 書籍「TSUNAMI」

書籍「TSUNAMI」は、津波から生き延びるために必要な知識を伝えることを主たる目的とし、読みやすい平易な本にした。こ

のTSUNAMI本は、日本語版（2008年11月）を最初に出版し、引き続いて、インドネシア語版（2009年6月）、英語版（2009年10月）、韓国語版（2009年12月）を出版している。

2011年3月11日にマグニチュード9.0という大地震とそれによる大津波で東日本大震災となった。この災害は、多くの津波に見舞われてきた我が国においても過去に起きたことがないほどの巨大津波災害であった。この災害によって新たな多くの教訓が得られた。これらの教訓も取り入れた日本語改訂版を2016年3月に発刊した。

更に、世界の人達に我が国で得られた津波の教訓を知ってもらうために2009年に出版した英語版の改訂版としてWorld Scientific社から2018年3月に出版した。津波災害の経験のない国の人であっても、外国旅行中に津波に遭遇するかもわからない。津波経験のある国の人でも経験のない国の人でも是非「TSUNAMI」の英語版を読んでいただければと思っている。英語版には図2に示すようにハードカバーとソフトカバーの2種類がある。



図2 「TSUNAMI」改訂版

### 3. 絵本「津波は怖い！」

小学生や中学生でも簡単に読み、尚且つ、正確な津波知識が身に付く簡易本として「津波は怖い！」と題する絵本を出版してきた。

「津波は怖い！」と題する絵本は、日本語版を2010年4月、インドネシア語版を2010年10月に出版した。2010年2月27日にマグニチュード8.8のチリ沖地震が発生したときに災害調査団員から本簡易本がチリ側に提供され、スペイン語に翻訳された。

2011年の東日本大震災が起こったこともあって、この津波災害から得られた教訓や写真画像を採用して、絵本「津波は怖い！」を大改訂した。（図3）



図3 絵本「津波は怖い！」



## NEWS 01

## 東日本大震災から10年、「絆～津波からいのちを守るために～」出版 (2021.3.11)

東日本大震災から10年となるこの日、巨大地震に対し私たち一人一人が自分の命を守るために何をすべきか／何ができるかなどをとりまとめた書籍を発刊しました。(詳細はP.52「沿岸レポート」参照)

## NEWS 02

## 新評議員会長及び新理事長を選任 (2021.6.29)

第15回評議員会及び第35回理事会が開催され、磯部雅彦新評議員会長及び宮崎祥一新理事長が選任されました。(P.55「CDIT人事情報」参照)

## NEWS 03

## 沿岸技術研究センターの調査研究事業が「全建賞」を受賞 (2021.6.25)

当センターが、巨大台風、高潮等異常気象時に想定される場内水位や波浪が及ぼす人工島への影響及び圧密沈下による空港施設への影響についての検討を実施した「那覇空港滑走路増設事業」が「全建賞」を受賞しました。

(注：全建賞は、一般社団法人全日本建設技術協会が昭和28年(1953年)に創設して以来、日本の社会経済活動を支える根幹的なインフラ整備や、その時々々の国民ニーズに沿った取り組みに対して与えられる。)



## NEWS 04

## 「根入れ式鋼板セル工法および鋼矢板セル工法の技術マニュアル」発刊 (2021.6)

近年の船舶の大型化や大規模地震対策に鑑み、大水深への適用が可能で急速施工にも優れた工法であり、今後もその需要が見込まれる根入れ式鋼板セル工法及び鋼矢板セル工法の技術マニュアルをとりまとめ、発刊しました。詳しくはCDITホームページ「書籍販売」をご覧ください。

## NEWS 05

## 民間技術評価事業・評価証を交付 (2021.4、2021.7)

令和2年度(上半期分(2件)及び下半期分(8件))の技術に対して、「港湾関連民間技術の確認審査・評価委員会」(委員長：善功企 九州大学名誉教授)で審査・評価を行い、その結果を踏まえて、以下のとおり評価証を交付しました。

なお、例年、評価証授与式を行っていましたが、新型コロナウイルス感染防止の観点から、評価証の発送をもって授与式に代えさせていただきました。

## 【上半期】(2021年4月)

## ●更新(2件)

## 五洋建設株式会社殿、錦城護謨株式会社殿

「真空圧密ドレーン工法(キャップ付ドレーンを用いた圧密排水工法)」

## 黒沢建設株式会社殿、株式会社ケーティービー殿

「SCストランド一全素線塗装型PC鋼より線一」

## 【下半期】(2021年7月)

## ●部分変更(2件)

## 株式会社クボタ殿

「ラクニカンジョイント(ステップ型)一鋼管杭、鋼管矢板の機械式継手一」

## みらい建設工業株式会社殿、株式会社ダイフレックス殿、株式会社サーファステクノロジー殿

「SQS被覆システム一超速硬化ポリウレタン樹脂吹付被覆システム一」



●更新 (6件)

五洋建設株式会社殿、大新土木株式会社殿

「汚濁拡散防止システム」

日本製鉄株式会社殿、株式会社不動テトラ殿

「水硬性スラグコンパクションパイル材料【エコガイアストーン】」

五洋建設株式会社殿

「水中位置監視システム「水中ポジショニングシステム」」

東洋建設株式会社殿

「土質系遮水材 HCB-F (ハイブリッドクレイバリア・フライアッシュ)」

五洋建設株式会社殿

「変形追随遮水工法「Clay Guard 工法」」

五洋建設株式会社殿

「自動潜水管理システム」

NEWS 06  
CDIT 創立記念日 (2021.9.27)

沿岸技術研究センターは、昭和58年(1983年)9月27日に運輸大臣(当時)の設立認可を受け財団法人として発足しました(平成24年に一般財団法人に移行)。今年で創立38周年になります。この日は創立記念日として休業としています。

NEWS 07  
第23回国土技術開発賞表彰式 (2021.9.28)

建設分野における優れた新技術及びその開発に貢献した技術者を国土交通大臣が表彰する「国土技術開発賞」の表彰式が海運クラブにおいて開催されました(Web併用)。



赤羽一嘉国土交通大臣(当時)、モニター画面は受賞者の方々

	技術名	受賞者
最優秀賞	免制振構造を利用した壁柱架構システム	大成建設(株)
優秀賞	吸水性泥土改質材と改質土の活用技術	五洋建設(株) ジャイワット(株)
	化学的手法を用いた基礎ぐい工事の施工品質検査技術	清水建設(株)
入賞	リアルタイム自動配筋検査システム	清水建設(株) シャープ(株)
	ダム防災操作訓練シミュレータ	(独)水資源機構
	供用中のダム再生工事の合理化工法	鹿島建設(株)
	摩擦ダンパーを用いた橋梁の損傷制御耐震補強工法	首都高速道路(株) 青木あすなろ建設(株)
	カルシア改質土の土運船混合管理システム	東洋建設(株)
創意開発技術賞	土質変化に対応する泥水二次処理剤自動添加システム	(株)タック
	消雪パイプ高圧洗浄の効率化技術	(株)山高建設
	ICT活用による消雪ブロック据付作業の効率化	(株)森川組

NEWS 08  
コースタル・テクノロジー2021をWeb開催 (2021.10~)

当センターで実施した調査・研究等の成果を「コースタル・テクノロジー2021」にて報告(動画配信)します。詳しくはCDITホームページをご覧ください。

配信開始: 2021年10月(予定)

配信方法: YouTubeからの動画配信

NEWS 09  
「ジャケット工法技術マニュアル(改訂版)」発刊 (2021.10)

2000年1月に発刊され、国内のジャケット式構造物の設計の手引きとして広く利用されてきたジャケット工法技術マニュアルについて、近年の引用・参照規格や基準等の改訂、関連規格の新設などを踏まえ、関連規格等との整合を図るとともに、これまでの実績やその後の研究による多くの知見をもとに検討を加えた改訂版を発刊しました。詳しくはCDITホームページをご覧ください。



## 2021年度 海洋・港湾構造物 資格認定試験、 関連研修会・講習会を実施 (2021.7~2021.11)

2021年度の資格試験等について、下記のとおり実施しています。詳細については、CDITホームページをご覧ください。

### 【維持管理】資格更新 (CPD単位不足者向け) 研修会 (基本オンライン方式)

開催日程：2021年10月8日 (金)

開催場所：東京23区内

### 【維持管理】基礎講座講習会

講習期間：2021年9月7日 (火) ~11月5日 (金) 17:00 (予定)

受講対象者：特に受講資格は必要ありません。

講習方法：8項目の講習内容毎に、パワーポイントを用いた説明をオンデマンド配信します。興味のある内容から、順次、視聴できます。

申込期間：2021年7月27日 (火) ~9月30日 (木)

### 【維持管理士】資格認定試験

開催日程：2021年11月7日 (日) (予定)

開催場所：東京23区内、大阪市内、福岡市内、札幌市内の4会場 (予定)

試験日程：13:00より択一試験及び記述試験 (予定)

申込締切：2021年9月24日 (金)

### 【設計士】資格認定試験 [設計士補試験及び設計士筆記試験]

開催日程：2021年7月4日 (日)

開催場所：東京23区内、大阪市内、福岡市内

### 【設計士】面接試験

開催日程：2021年12月上旬~中旬の日曜日 (1日のみ)

開催場所：東京23区内

受験資格：設計士補試験及び設計士筆記試験合格者 (両試験の合格年度は同年度の必要はありません)

申込受付期間：2021年10月中旬~11月中旬頃

その他：面接項目の一つとして、事前に「技術課題」が設定されます。詳細については、受験資格者にご案内します。

沿岸技術研究センターは、今後の誌面づくりに反映させるため、皆様のご意見ご感想をお待ちしております。詳細は沿岸技術研究センターHPをご覧ください。

URL:<http://www.cdit.or.jp/>

### 【編集後記】

今号の特集はカーボンニュートラルでした。座談会、特集記事の企画調整にあたっては、人事異動により経験者が不在、緊急事態宣言下ということであり、非常に時間を要しましたが、国土交通省港湾局及び港湾局OBのご協力のもと、多数の執筆者にご参加、ご執筆いただきました。ありがとうございました。おかげをもちまして、充実した内容になっています。特に、港湾局脱炭素事務局には、常に的確な助言をいただきましたことに感謝申し上げます。(MT)



## 世界津波の日・「2021年濱口梧陵国際賞」授賞式 (2021.11)

わが国の津波防災の日である11月5日が国連総会で「世界津波の日」に制定されたのを機に創設された沿岸防災技術分野で顕著な功績を挙げた国内外の個人又は団体を表彰する「2021年濱口梧陵国際賞」の授賞式が開催される予定です (Web併用)。

### CDIT 人事情報 (令和3年6月29日付け)

●評議員会長 **磯部 雅彦** 高知工科大学学長  
東京大学名誉教授

昭和52年3月 東京大学大学院工学系研究科修士課程  
修了  
昭和58年4月 横浜国立大学工学部土木工学科助教授  
昭和62年1月 東京大学工学部土木工学科助教授  
平成4年1月 東京大学工学部土木工学科教授  
平成17年4月 東京大学大学院新領域創成科学研究科長  
(平成19年3月まで)  
平成21年4月 東京大学副学長 (平成23年3月まで)  
平成25年4月 高知工科大学副学長  
平成27年4月 高知工科大学学長  
現在に至る

●理事長 **宮崎 祥一**

昭和61年3月 九州大学工学部水工土木学科卒業  
昭和61年4月 運輸省入省  
平成26年7月 国土交通省港湾局計画課長  
平成29年7月 防衛省大臣官房審議官  
令和元年7月 内閣官房内閣審議官  
令和2年11月 (一財) 沿岸技術研究センター 審議役  
令和3年6月より現職

## 本 部

〒105-0003 東京都港区西新橋1-14-2 新橋エス・ワイビル5F  
TEL. 03-6257-3701 FAX. 03-6257-3706

## 関西支部

〒651-0084 兵庫県神戸市中央区磯辺通3-2-11 三宮ファーストビル605  
TEL. 078-230-6566 FAX. 078-230-6577

## 東北事務所

〒980-0014 宮城県仙台市青葉区本町2-9-8 日宝本町ビル702  
TEL. 022-796-1331 FAX. 022-796-1341

## 九州事務所

〒812-0013 福岡県福岡市博多区博多駅東2-4-17 第6岡部ビル7F  
TEL. 092-292-5057 FAX. 092-292-5067

[ sí:dit ]

# CDIT

Coastal Development Institute of Technology

発行 一般財団法人 沿岸技術研究センター  
〒105-0003 東京都港区西新橋1-14-2 新橋エス・ワイビル 5F  
TEL. 03-6257-3701 FAX. 03-6257-3706  
URL <http://www.cdit.or.jp/>  
2021年10月発行 第56巻