

特集：2050年脱炭素社会実現に向けた今後のアプローチ

2050年脱炭素社会実現に向けた今後のアプローチ

Next Approaches for the Realization of a Decarbonized Society by 2050



齋藤 潔^{*1}
SAITO Kiyoshi

キーワード：VPP, DR, アンモニア, 水素, 再生可能エネルギー, CCS, CCUS

Key Words：VPP, DR, Ammonia, Hydrogen, renewable energy, CCS, CCUS

カーボンニュートラル実現のために、エネルギー関連分野においては、CO₂排出量削減に向けて厳しい目標が掲げられている。

エネルギー生産時には、必要な一次エネルギーの転換が求められ、化石燃料から水素やアンモニアをエネルギー源とした発電が今後一気に広まっていくであろう。ただし、これだけでは、カーボンニュートラルに向けて要求される発電量は満足することはできないため、分散再生可能エネルギー電源の大量導入も求められている。

2030年には、電源構成の38%もが再生可能エネルギーに期待されている。太陽電池については、これまでに着実に導入が進められ、すでに電源構成の10%ほどを占めるところまで来ている。国土を海に囲まれる我が国においては、洋上風力発電なども重要技術となっていく。これらの技術導入によって供給側では、大幅なCO₂排出量削減が可能なことは間違いがないが、電力供給体系が不安定化するのには必至である。

このため、従来の延長線上でのデバイスや個別システムの開発や高性能化だけでは立ちいかなくなる。今後は、1日の中でさえも天候にも強く影響を受けながら目まぐるしく変わるエネルギーの需給の中で、ITやIoT技術を駆使しながら、仮想発電所（VPP）やエネルギーマネジメントシステム（EMS）のような技術によって高度エネルギーマネジメントを実現する必要がある。

再生可能エネルギー電源の導入によって電源の小型分散化が進んでくると、このVPPによって分散電源をまとめ上げ、うまく制御することが求められる。ベース電源が重要であることは引き続き間違いがないが、小型の分散電源をどのようにまとめ上げていくのかも非常に重要な技術的課題となる。VPPを通して電力を統合・制御する専門事業者としてのアグリゲーターから、需要側に電力

抑制をする下げDRや電力使用の利用促進を要請する上げDRなどさかんに多様な要求がなされてくるであろう。

一方で、需要側でも多様なEMSサービスが構築されてきている。家庭用のHEMS、ビル用のBEMS、産業用のFEMS、これらを連動した地域レベルでのCEMS等である。需要側でのエネルギーの最終消費の50%は熱であることから、電力と熱が混在する中で、EV用まで含めた蓄電池やヒートポンプ給湯機の蓄熱槽などを有効に活用して熱電のバランスを考えながら、需要側に設置された再生可能エネルギー電源の自家消費、電力逼迫時や再エネ過剰時のDRによる供給側からの強制的指令等への柔軟な対応が求められる。

以上需給側それぞれの在り方について述べたが、今後は、さらにエネルギーの需要側と供給側を個別事象として捉えるのではなく、需給体系全体として柔軟かつ強靱な広域エネルギーマネジメントが実現されることが求められる。

再生可能エネルギーを直接使った水電解により生成した水素を使って蓄エネルギーし、燃料電池等で発電するシステムも有効となる。この技術は、グリーン水素活用技術であり、電源の分散化も容易であるとともに高速なDR要請に応えられるため、今後大きな発展が期待される。

エネルギー輸送には液体水素やアンモニア輸送も検討されている。エネルギーセキュリティーを考えれば、電力一辺倒となることは危険でもあり、天然ガスを輸送する都市ガスパイプラインが液体水素やアンモニア輸送に代わる日が来るかもしれない。メタネーションの技術開発も進んでいるため、そのままメタンを輸送することも考えられる。エネルギー輸送体系がどのようになっていくのかは、今後注視していく必要がある。

また、完全なる脱炭素を実現することは事実上不可能であるため、カーボンニュートラルの実現にはCO₂吸収も求められている。いかに上手にCO₂を自然界に吸収させたり、CCSやCCUSで回収や貯蔵を進めることも重要

原稿受付 2022年10月16日

*1 早稲田大学

〒169-8555 新宿区大久保3-4-1

E-mail: saito@waseda.jp

となろう。この貯蔵にかえてエネルギーを使うような本末転倒にならないことを願う。

このようにエネルギー需給システムが、IT、IoT技術を使って高度に制御されることが求められる中で、デジタルツインのような技術によってエネルギーマネジメントの効果を予測したり検証したりする技術も必要である。例えば、熱利用がなされる需要側のEMS技術では、熱利用機器が外部環境等に効率が大きく影響を受けるため、その効果がどのようになっているのかわからないまま、技術開発が進んでしまっているような状況である。

いずれにしても我が国はこれまでデバイスや単体システム構築には強い技術力を発揮してきた。ところがエネルギーマネジメントのようなソフト的要素を多様に含む管理技術や大規模システム化には常に後塵を拝してきた。

効率が良くて壊れないものを作れば売れるかのような日本神話はスマートフォンで完全に崩れされたと思っている。

エネルギー分野でもIT、IoTを駆使したソフトとしてのエネルギーマネジメント技術によって外部からも機器やセンサが容易に制御されることを容易とするプラットフォーム化を早期に進め、電力安定化と脱炭素化を両立できるスマートなエネルギー需給体系を構築することが重要である。まさにSociety5.0が求めているITを活用した全体最適化の実現がエネルギー分野でも求められる。

エネルギー分野では優れた個別技術を有する日本が今度こそ統合システム化の流れに乗り遅れることなく、新たな技術の幕開けをけん引していくことを強く願っている。

特集：2050年脱炭素社会実現に向けた今後のアプローチ

BW イデオルの浮体式洋上風力発電について Floating Offshore Wind Turbine by BW IDEOL



ピエール・ラガレ^{*1}
Pierre LAGARDE

ブルーノ・ゲシェ^{*1}
Bruno G. GESCHIER

トマス・ショネ^{*1}
Thomas CHOISNET

山田 睦^{*2}
YAMADA Mutsumi

木村 健太郎^{*2}
KIMURA Kentaro

キーワード：浮体式，洋上風力，コンクリート，合成繊維係留索，バージ式，ダンピング・プール

Key Words：Floating, Offshore Wind, Concrete, Synthetic Mooring Line, Barge Type, Damping Pool

1. 緒言

南フランスのラ・シオタに本拠を置くBWイデオルは、技術的・経済的に実現可能な浮体式洋上風力発電システムソリューションの技術開発・展開を目的に、2010年に設立されました。BWイデオルは、技術革新に与えられる賞や起業家賞を数々受賞しており、官民による大規模で権威ある多くの支援を受けています。2021年にはオスロ証券取引所に上場いたしました。

業界を変える特許取得済みの「ダンピング・プール[®]」技術は、既存のすべての洋上風力タービンに適合することができます。現地調達率の最大化、建設から設置、メンテナンス、撤去までの全プロセスの最適化は、設立当初から大切にしている優先事項です。またコスト競争力のあるソリューションにより、水深や地盤の制約を受けることなく、最高の風力資源を利用したプロジェクトを開発することが可能です。

BWイデオルのエンジニアリングチームには、再生可能エネルギー業界、オフショア石油・ガス業界、航空宇宙業界等の出身者を中心とした80人以上の専門家が在籍しています。このチームの豊富な経験とノウハウの恩恵を受けて、2018年からフランスの大西洋と日本の北九州の2カ所で本格的な浮体式風力発電設備の運用がスタートしています。また、BWイデオルは、共同開発事業者および技術プロバイダーとして携わっているフランス地中海で初のプレコマーシャル浮体式洋上風力発電プロジェクト（EolMedプロジェクト）をはじめとして、その他世界各地の商業規模の浮体式洋上風力発電プロジェクトに携わっています。2022年にはパートナー（Elicio,

Baywa）と共に、世界初の商業規模の浮体式洋上風力発電入札（スコットウィンド）において、スコットランド北東部沿岸の約1GWの開発権利を獲得しており、この急成長する浮体式洋上風力発電市場におけるグローバルリーダーとして位置づけられています。

BWイデオルは、特許取得済みの浮体式洋上風力発電システムの技術プロバイダーであるだけでなく、2030年までに10GWのプロジェクトを開発、建設、稼働することを目指し、EPCIパッケージプロバイダーや共同開発事業者としても活動をしています。また、BWイデオルは、実現可能な浮体式洋上変電所と、業界で最も先進的であるとされるユーザーフレンドリーなモニタリングシステムを開発しました。更には、オフショア石油・ガス生産資産の脱炭素化を目指したPower to Platformプロジェクトや、グリーン水素製造プロジェクトにも取り組んでいます。

2021年には、世界最大級の海洋コングロマリットであるBW Groupの一社でありFPSOの世界的プレーヤーであるBW Offshore社と戦略的資本提携を行ないました。これにより、BWイデオルは、資本集約的で複雑な海洋アセットの設計、所有、オペレーション等の広範かつ補完的な専門知識を持つBW Offshore社のサポートを受けることができるようになりました。詳細情報: <https://www.bw-ideol.com/en>

当誌面では、BWイデオルの浮体式洋上風力発電システム技術の概要について触れたいと思いますが、誌面の関係で、その中でも特に設計・建造・設置についての概要にとどめる旨を御承知いただければと思います。設計・建造・設置に関するより詳細な内容や、設置後に行なわれるオペレーション・メンテナンスや撤去については、別の機会に触れられればと思っています。

原稿受付 2022年9月12日

*1 Ideol SAS

*2 イデオルジャパン合同会社

〒104-0031 中央区京橋2-7-14

E-mail: mutsumi.yamada@bw-ideol.com

2. BW イデオルの浮体式洋上風力発電システムの概要

2.1 開発の背景と戦略

BWイデオルはオフショア石油・ガス分野において数十年前から存在している既存の浮体式洋上構造物（セミサブ式、スパーブイ式、テンションレッグ式プラットフォーム等）について慎重に検討・分析しました。その結果、洋上風力タービンを搭載したこれらのタイプの浮体では、政府の支援やFITが減少または消滅し始めるとコストが市場の期待に届えられない、という結論に達しました。そこでBWイデオルは、市場の期待にえられるコスト競争力を有し、さらに技術的に期待される拡張性を有した浮体式洋上風力発電システムを、ゼロから開発することになりました。この取組みにより、「ダンピング・プール®」という画期的な浮体技術についての極めて重要な特許を自社で取得し、複数の資金調達をもたらし、そして最終的にはフランスと日本における2基の本格的な浮体式洋上風力発電の実証機的设计、建設、設置につながったのです。

BWイデオルは、上述の通り現在2基のフルスケール浮体式洋上風力発電設備の稼働に携わっています。

まず、EUの資金提供を受けた2 MWの「フロージュンプロジェクト（Floatgen Project）」（Fig. 1）ですが、フランス北大西洋沿岸のル・クロワジック沖で、SEM-REVというテストサイトの送電ケーブルに接続されています。このプロジェクトの浮体基礎は、建設請負業者のBouygues Travaux Publicsによってサン・ナゼール港にてコンクリートで建設され、ナイロン製の係留索を用いて水深約33mの海域に係留されています。

このBWイデオルが所有する浮体式洋上風力発電設備は、優れた性能を実証しており、ロイド・レジスターのプロセスにより認証されています。さらに、荷重解析とシミュレーションについての報告書は第三者機関（ABS）によっても承認されています。

一方、「ひびき」（Fig. 2）は、NEDOの次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究として、コンソーシアムのメンバーである日立造船が建設した実証機です。日本海事協会の認証を受け、Aerodyn社製の3.2MW 2枚羽根洋上風力タービン設置後、2018年に北九州市響灘沖約15kmで試運転調整を実施しました。鋼製浮体で構成され、チェーン係留索で水深約54mの海域に設置されています。

BWイデオルのエンジニアリングチームは、高度な資格や経験を持つオフショア海洋技術等の専門家が多数在籍しています。協力会社やコンサルタントへの外注に頼るのではなく、コアコンピタンス（空気力学、流体力学、船舶工学、機械・構造工学、方法工学、設置工学、LV・MV電気工学、HSQ専門家、O&M専門家など）を完全に社内内で内製統合し、様々な経験を活かし、ソリューションの開発プロセスを最適化し、迅速なデリバリーと継続的改善を確実にすることを、常に戦略として

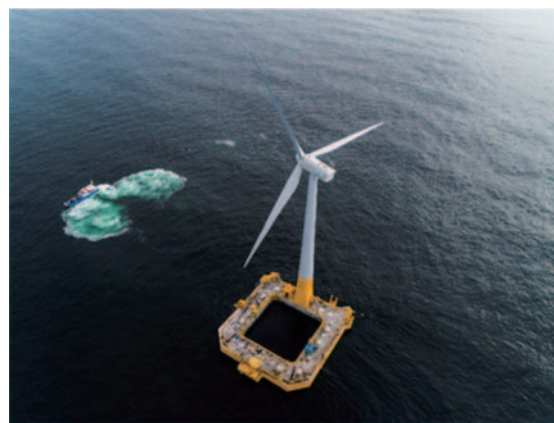


Fig. 1 Floatgen Project (Atlantic Sea, France)



Fig. 2 Hibiki Project (Hibikinada, Kitakyushu city)

追及しています。

エンジニアリング会社という側面から見たBWイデオルの主な事業目標は、「ダンピング・プール®」技術を商業規模で展開し、エンジニアリング、設計サービス、そしてIPロイヤルティから収益を得ること、さらには係留ソリューションやその洋上設置に重点を置いたEPCIパッケージのプロバイダーとしても収益を上げることです。

また他方、BWイデオルは、浮体式洋上風力発電産業の初期段階において、エンジニアリング会社という側面だけでなく、独自の実績に基づく経験とノウハウを活かしたプロジェクトの共同開発事業者としての側面も持っています。例えば、2022年のスコットウィンドの入札においてBWイデオルが落札に成功したことは、このような「エンジニアリング会社と共同開発事業者としての二刀流のアプローチ」が成長戦略として大いに機能していることを裏付けるものです。

2.2 BWイデオルの浮体式洋上風力発電システムの浮体基礎について

BWイデオルの浮体式洋上風力発電システムの浮体基礎は、四角い浮体の中央に「ダンピング・プール®」と呼ばれる大きな開口部を設けたリング状の構造物です。浮体安定化の原理は、大きな開口部に閉じ込められた水

の振動を利用して、うねりによって浮体に加えられる加振力を相殺するという革新的なものです。この特許技術により、コンパクトで喫水の浅い浮体基礎を実現することができます。

フロージェンやひびきでは浮体基礎の底部に水平スカートを設け、流体力学的な慣性力と減衰力を高めていましたが、昨今の10MWを超える洋上風力タービン用浮体では、ピッチ固有周期が極限波周期よりも十分に大きく（22秒以上）なったため、水平スカートは省略されるようになりました。

風力タービンは、浮体基礎の後方にあるデッキに設置されます。風力タービンと浮体下部構造は、トランジション・ピースによって接続されます。



Fig. 3 Typical "Ring Floater" Foundation, and Wind Turbine Generator

Fig. 3は、浮体式洋上風力発電システムの主要構成要素を示したものです。これらには以下のものが含まれます。

- ユーティリティ設備を備えた浮体
- 風力タービンとトランジション・ピース
- 浮体基礎に固定された鋼製係留インターフェース構造物、係留索（チェーン・合成繊維ロープ）およびアンカーから構成される係留システム
- 風力タービンで発電された電力を海底に設置されたケーブルに送るアレイ間ケーブル（IAC）のパワー

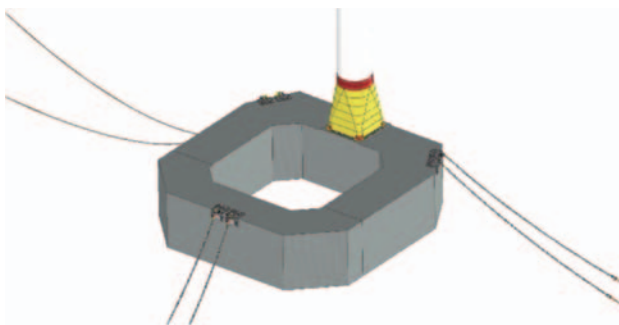


Fig. 4 Typical "Ring Floater" Foundation overview

リンクシステム（Iチューブ、ベンドスティフナー、ハングオフ等）

浮体へのアクセスは、主として浮体側面に設置されたボートランディングのはしごから行ないます。「ダンピング・プール[®]」の優れた効果により、フロージェンではボートから浮体への乗り込みが有義波高2.3mまで実証されておりますが、さらに大きな波高でも可能であると考えています。

3. 浮体式洋上風力発電システムの技術的詳細

3.1 技術開発とTRL（技術成熟度）について

BWイデオルには、特許取得済みの浮体式洋上風力発電システムの設計に尽力をしてきた10年以上に及ぶ経験があります。BWイデオルの哲学は、常にサイト条件と風力タービンに特化した浮体式洋上風力発電のシステムを開発・進化させ続けることです。日々の設計業務と並行して実施している研究開発の目的は、顧客のプロジェクトコストとリスクを削減し、ソリューション全体、その主要コンポーネント、建設と設置、O&M、デコミッショニングの最適化に取り組むことです。

一連の水槽実験は、初期の開発段階に始まり実際のプロジェクトを通じてすでに完了しています。主な水槽実験については、以下を参照ください。

2011/2012年にフランスで実施された概念設計による複数回の水槽実験

2014年フランスで実施されたフロージェンプロジェクト向けの水槽実験

2015年に日本で行なわれた「ひびき」プロジェクト向けの複数回の水槽実験

2016年にフランスで実施された「ひびき」プロジェクト向けの水槽実験

2018/2020年にフランスで実施されたEolMedパイロットファームプロジェクト向けの複数回の水槽実験

2022年にフランスで行なわれた大型風力発電タービン（15～20MW以上）向けの水槽実験

前述のように、2018年以降、2基のフルスケール浮体式洋上風力発電設備が稼働しています。日本では3.2MWの2枚羽根風力タービン（ひびき）、フランスでは2MWの3枚羽根風力タービン/Vestas V80（フロージェン）です。どちらも今日まで厳しい気象海象を乗り越えてきました。また、収集したデータから、設計モデルに対するベンチマークを行なうことができます。これにより、設計の最適化と安全マージンの縮小が可能となり、さらなるコスト削減を実現します。

地中海のグリュイッサン近郊に設置される30MWのEolMedパイロットファームプロジェクトの設計作業は認証機関の承認のもと完了し、プロジェクト開発者のQAIR、パートナーのTotalEnergiesと共同で建設が進められています。また現在、日本、フランス、米国、韓国、イギリス等でプロジェクトの共同開発事業者とともに、

多数のプレコマーシャルおよび商業規模のプロジェクトを開発中です。これらのプロジェクトでは、最大16MW（場合によってはそれ以上）の風力タービンが検討され、設計のベースとして使用されています。

BWイデオルの現在のTRLは7+であると評価されていますが、すでにTRL 8～9に踏み入っていると言えます。

TRL / 内容 / 日付 / 状況

1. 基礎理論の着想段階 / IV-2010 / コンセプト
2. 技術要素の適応, 応用範囲の明確化 / I-2011 / 特許出願
3. 分析・実験によるコンセプトの実証 / II-2011 / 基本設計の解析報告
4. 実験室環境での検証 / III-2012 / 5 MW 機でのモデルテスト
5. 実用環境下での検証 / IV-2012 / 5 MW 機でのFEEDの完了
6. プロトタイプ実証 / III-2018 / フロージェン運転開始
7. 実物大実証 / III-2019 / フロージェンの認証
8. 商用機実証 / III-2023 / EolMedパイロットファームの運開
9. 商業規模での技術展開 / IV-2026 - 2027 / [500MW以上の] 商用プラントの運開

3.2 設計

3.2.1 一般 浮体の復原性によって、浮体基礎のサイズが決まります。しかし、風力タービンが大きくなればなるほど、浮体基礎のサイズの決定要因はサイトの固有条件よりも風力タービンが支配的になります。そのためBWイデオルは、ますます大きくなる風力タービンのサイズに適応するための標準化ソリューションに取り組んでいます。

現在、15～16MW（およびそれ以上）の風力タービン用の設計標準化に取組み中で、設計・エンジニアリングプロセスの迅速化、建設・設置方法の最適化、および調達・購買活動の効率化を目指しています。それでも、係留システムについてはサイトの条件により固有のものとなることには変わりはありません。

3.2.2 コンクリート製浮体の寸法と大型洋上風力タービンへの対応 コンクリート製浮体は鋼製浮体より重いのですが、カーボンフットプリントの面で環境負荷が小さく、また大量生産に適しています。特に大規模ウインドファームでは、コンクリート製浮体は鋼製浮体に比べて大きなコストメリットがあります。

鋼製浮体との比較において、コンクリート製浮体の性能の指標として質量を用いる事は適切ではありません。

コンクリートの密度にはばらつきがあるため、コンクリート製浮体の性能を評価するための最も適切な物理的パラメータは、コンクリート体積になります。

また、仮に鋼製の浮体を採用する場合で鋼材の現地調達が必要とされるときでも、BWイデオルの鋼製浮体は

競合他社に比べてはるかに高い競争力を維持することができます。コンパクトなサイズ、浅い喫水、曲げ加工が不要なシンプルな構造により、高度に工業化された製造プロセスを用いた連続生産が可能です。

さらにBWイデオルのソリューションは大型洋上風力タービンへの対応に優れています。2 MWのフロージェンの浮体寸法は36m x 36m x 9.5mですが、出力が+700%（16MW）になった場合でも、浮体のおおよその寸法は53m x 53m x 17m程度です。つまり、長さや幅が50%、深さが70%、コンクリートの体積が180%増加するに留まり、風力タービンが大型化した場合でも浮体はコンパクトであり続けます。

3.2.3 オフショアサイトの条件と係留システム BWイデオルの特許取得済み浮体式洋上風力発電システムは、ほぼすべてのサイト条件で使用できるように開発されています。例えば、フランスのフロージェンは、浮体式の設備では極めて困難とされる浅い海域（水深わずか33m LAT）での設置にチャレンジし、設置後4年以上にわたり順調に稼働しています。

一方、設置海域が大水深（たとえば1000m）の場合でも、係留索のコストが大幅に増加することはない、ということも注目すべき点です。BWイデオルは、水深に影響を受けやすい「カテナリー係留システム」ではなく、主にラインの伸縮によって復元力を得る「セミトート係留システム」の導入を提案しています。水深の増加に対して、係留索の長さの増加分は相対的に抑えられ、張力は逆にわずかに減少することが想定されます。また、水深が深くなると、水深に対する浮体のオフセット（水平方向の変位）の比率が減少するため、インターアレーケーブルにプラスの影響を与えることが想定されます。

一方、主に水深の影響を受けるのはアンカーであり、アンカーは水深が深くなるにつれて、より大きな引き抜き角度に耐えるように設計されなければなりません。

BWイデオルの係留設計理念は、安全性、操作性の最大化、系統への確実な電力供給の確保であり、一方向に最低2本の係留索を持つ完全冗長係留システムを体系的に提唱しています。

オフショア石油・ガス産業における長年にわたる経験から、係留索は様々な理由で切断される可能性があることが分かっています。一方向あたり2本の係留索を使用することで、安全係数が低くなるため、1本の係留索の破断荷重と長さを減らすことにも貢献します。また、係留索を二重化することにより、保険料を大幅に削減することができます。そのため、私たちの典型的な係留レイアウトは6本の係留索で構成されています。

係留索は通常合成繊維ロープで作られ、チェーン係留索と比較した場合に、環境負荷、部品数、物流コスト、生産キャパシティリスクを低減することができ、また設置の作業性向上が期待出来ます。

3.2.4 安全性・操作性 安全性と操作性（そして系統への確実な電力供給）は、当初からBWイデオルの浮体の主要な推進要因として認識してきました。2011年には、風車メーカーや認証機関の方々との最初のリスクアセスメントを実施し、それ以降継続的な改善のために定期的に更新しています。

浮体に内部隔壁を追加したり、非損傷時復原性に適合したりと、いくつかの安全対策が可能です。また、フロージェンは、フランスで初めてヘリコプターによる吊り上げ試験に成功した洋上風力発電設備でもあります。

BWイデオルの2基のフルスケール浮体式洋上風力設備は、4年以上にわたって損傷することなく稼働しており、安全性と操作性の面で貴重な経験をもたらしています。これらをはじめとしたBWイデオルの経験やノウハウは、顧客、現地認証、サプライチェーンの制約等から生じるあらゆる設計要件に対応するための鍵であり、無くてはならないものです。

3.2.5 設計プロセス BWイデオルの設計プロセスは、いくつかの「設計ループ」を基本としています。ループ0は、プロジェクトの全体の固有性や特殊性に基づくフィジビリティの検証を行ないます。ループ1は、基本的にFEED設計です。ループ2は、認証に必要な詳細設計です。最後に、ループ3は、調達品とAs-Builtデータを定義します。各設計ループではそれぞれ異なるレベルの入力データを反映していきます。

3.3 浮体の建造

3.3.1 一般 BWイデオルは技術を開発する際に、浮体式洋上風力発電設備の最終設置場所から可能な限り近くでの浮体製造を行なう事を最も重要な使命と戦略の一つであるとしてきました。コンパクトな浮体寸法、港湾内での取り回しが容易な浅い喫水、コンクリートと鋼材が選択できる浮体材料、シンプルな構造、柔軟性のある進水方法、そしてもちろん、スケジュール通り・予算通りのプロジェクト遂行性、環境に配慮した調達を志向すること、などが、当社の特許技術の設計とそのたゆみない改善を支える原動力となってきました。

3.3.2 容易な浮体基礎の建造 BWイデオルの浮体基礎は、鋼材でもコンクリートでも建造が可能ですが、コンクリート製の場合と鋼製の場合では、建造の手法が全く異なります。

ここではコンクリート製浮体基礎の建造を紹介します。コンクリート製浮体基礎の建造に関してはすでに様々な工法が試され、証明されており、世界中の主要な建設会社に既に十分な知見があります。コンクリート製浮体基礎を建造する場合、BWイデオルが推奨する工法には、3つの主要なステップがあります。①底部スラブのコンクリート打設 (Fig. 5)、②ガントリースリップフォーミング工法による壁と隔壁のコンクリート打設、③プロセスをスピードアップするためにプレファブ化されたコンクリートデッキの据付です。



Fig. 5 Floatgen project bottom slab pouring in Saint Nazaire harbor

15MW以上の浮体式洋上風力発電タービンの搭載を想定して設計されたBWイデオルのコンクリート製浮体を建造することが可能な港や造船所は、世界中のほとんどの国にあります。また、コンクリート製浮体の進水は、スロープを用いる方法、乾ドック、半潜水式バージ、機械式シップリフト (Syncrolift®) などの方法を用いて行なうことができます。

3.3.3 連続生産 基数が限定的なプロジェクト (例：フロージェン プロジェクト) の場合は、以下のYouTubeサイトで紹介している建設方法が実施されました。

<https://www.youtube.com/watch?v=tkRUD-U8UZM>

また、プレコマーシャルやコマーシャルスケールのプロジェクトの建設方法については、以下のYouTubeサイトで紹介している連続生産のための建設方法が、複数の世界有数の建設会社によって確認され、検証されています。

<https://www.youtube.com/watch?v=mqGLe0fMG8A>

BWイデオルと複数の世界有数の建設会社は、今後数年間で予定されている商業規模のプロジェクトの期待に応えるため、1つの生産ラインあたり年間最低20基のコンクリート製浮体を建造することができると結論付けています。

3.4 風車の組立てとバラスト

コスト増だけでなく危険を伴う沖合での作業を減らすため、BWイデオルの浮体は、岸壁で陸上クレーンを用いて安全に風車を組み立てられるように設計されています。建造後の浮体基礎が湾内にリリースされた後、浮体基礎はバラストの設置と風車の組立てのために岸壁に係留されます。そして風車の組み立て時には、岸壁で恒久的なバラストが浮体基礎内に設置されます。

作業中も、浮体基礎は常に水平に保たれることを基本としています。そのため、浮体基礎には風車の組立てに必要な喫水まで一時的に水バラストを注水し、タワー・風力タービンの据付と並行して水バラストを排出していきます。



Fig. 6 Floatgen at quay-side

BWイデオルの浮体は喫水が浅いため、一定の規模の港であれば、港湾内での建造・風力タービン組立て・コミッショニングが可能です。岸壁では、風力タービン搭載前の浮体は貨物船と同じようにフェンダーを介して係留することが出来ます。

3.5 洋上輸送と設置

洋上設置は2つのフェーズに渡って行なわれます。

- 海底へのアンカーと係留索の設置は、係留索が納入され次第、浮体の建設中に実施されます。
- 係留索およびIACの浮体への接続は、最初の浮体が設置場所に到着次第開始されます。

ここでは浮体式洋上風力発電設備の設置について概要に触れておきます。

■洋上作業に必要な以下の機器を、洋上工事の拠点となる港に搬入する

- サクションアンカーまたはドラッグアンカーまたは杭式アンカー
- 係留索（チェーンおよび合成繊維ロープ）
- リギング及び設置用補助具
- ウインチ（ある場合）
- 作業船

■動員コストを最小限に抑えるため、地元の曳航船と地元の機器供給会社による作業が好ましい

■可能であれば、船舶の待機リスクを減らし、安全性を最適化させるために、洋上輸送と設置は比較的気象海象条件が穏やかな春と夏の間に実行されることが望ましい

■船舶の利用料、現地の天候、海岸までの距離、機器の利用可能性に応じて、運転に関わる設計とエンジニアリングを最適化し、作業可能な期間を増やすことが可能

■洋上輸送や設置のすべての作業は、マリンワランティサーバイヤーの承認（設計、調達、操作）が必要

4. 結言

この度は、BWイデオルの浮体式洋上風力発電についてということで、「ダンピング・プール®」の技術開発の背景の説明に始まり、設計、建造、設置についての概要に触れてきました。緒言で述べたとおり、誌面の関係で今回触れられなかった設置後に行なわれるオペレーション・メンテナンスや撤去については、別の機会に触れられればと思っています。

参考文献

- (1) Floatgen project website: <<https://floatgen.eu/en/actualites/frances-first-offshore-wind-turbine-produces-electricity>> (accessed on 1 August 2022).
- (2) Choynet T., Rogier E., Percher Y., Courbois A., Le Crom I., Mariani R. Performance and Mooring Qualification in Floatge: the First French Offshore Wind Turbine Project, Journées de l'Hydrodynamique 2018.
- (3) Alexandre A., Percher Y., Choynet T., Buils Urbano R., Harries R. Coupled Analysis and Numerical Model Verification for the 2MW Floatgen Demonstrator Project with Ideol Platform, IOWTC 2018.
- (4) <<https://www.youtube.com/watch?v=tkRUD-U8UZM>> (accessed on 1 August 2022).
- (5) Ideol's floating foundation: construction methods <<https://www.youtube.com/watch?v=mqGLE0fMG8A>> (accessed on 1 August 2022).
- (6) BW Ideol Company website:<<https://www.bw-ideol.com/en>> (accessed on 1 August 2022).
- (7) NEDO website, Demonstration Project of Next-Generation Floating Offshore Wind Turbine <<https://www.nedo.go.jp/floating/>> (accessed on 1 August 2022)

特集：2050年脱炭素社会実現に向けた今後のアプローチ

超臨界地熱資源の開発

Development of Supercritical Geothermal Resources



石川 一樹^{*1}
ISHIKAWA Kazuki

キーワード：超臨界地熱，葛根田，湯沢，八幡平，九重，NEDO

Key Words：Supercritical Geothermal Resources, Kakkonda, Yuzawa, Hachimantai, Kuju, NEDO

1. 緒言

2021年10月22日に閣議決定された第6次エネルギー基本計画において、我が国では、2050年のカーボンニュートラル実現に向けた野心的な目標として2030年度温室効果ガス46%削減（2013年度比）、さらに50%削減の高みを目指すという目標が掲げられた。

再生可能エネルギーの主力電源化に向けて、様々な発電方式の開発が進められているが、導入が急速に拡大している太陽光発電や風力発電と比較して、気象状況や季節変動、時間帯等の影響を受けることがなく、安定した出力が得られることが特徴である地熱発電はベースロード電源として期待されている電源である。

近年の地熱開発では、山葵沢・秋ノ宮地域（秋田県）において、2019年5月に大規模（10,000 kW以上）な国内地熱発電所としては実に23年ぶりとなる山葵沢地熱発電所（認可出力：46,199 kW）が運転開始したほか、松尾八幡平地熱発電所（認可出力：7,499 kW）、滝上バイナリー発電所（認可出力：5,050 kW）、山川バイナリー発電所（認可出力：4,990 kW）等が運転を開始している。さらに、安比地域（岩手県）や小安地域（秋田県）、木地山・下の岱地域（秋田県）等でも大型の新規地熱開発が進捗しており、FIT制度導入以降における地熱開発の拡大は徐々に実を結んできている。

しかし、2030年までに設備容量を最大148万 kW、発電電力量を68億 kWh とする大きな目標が掲げられている中で、第6次エネルギー基本計画策定時点での導入量としては59.3万 kW 程度、調査・開発途上の新規開発計画の公表出力でも、合計11.4万 kW（第47回調達価格等算定委員会における日本地熱協会作成資料より）であり、

導入目標を達成するためには、更なる調査・開発案件を発掘し、加速させていく必要がある。

我が国における地熱資源はアメリカ、インドネシアに次ぐ世界第3位のポテンシャルを秘めているとされている一方で、

- i) 地熱発電の適地は温泉の適地でもあることから、温泉事業者をはじめとした地元の方々と資源を共有し、共生していくための「地元理解の醸成」と「温泉資源への影響についての確認」が重要であり、開発の着手までに時間を要する。
- ii) 我が国の地形・地質は複雑であるため、地下構造の把握が非常に難しいことから、資源の調査には多額の費用と時間を要し、開発リードタイムが長い。
- iii) 一本の掘削に数億円を要し、複数本の掘削が必要となる井戸が、必ずしも地熱資源を発掘できるとは限らないことから、初期投資が多額となり、投資リスクも高い。
- iv) 資源の大半が北海道・東北・九州の山間部に集中しており、その多くは国立・国定公園内に存在していることから、開発には法規制をはじめとした社会的制約が大きい。

など、特有の課題を抱えており、そのポテンシャルを十分に活かし切れていないのが現状となっている。

2016年に策定された「エネルギー・環境イノベーション戦略（内閣府）」において、温室効果ガス排出量を削減するポテンシャル・インパクトが大きい革新的技術の一つとして「超臨界地熱発電」の技術分野が特定され、2050年頃の普及を目指すためのロードマップが策定された（Fig. 1）。現在は、グリーン成長戦略（内閣府，2021）により、地熱分野の成長戦略として超臨界地熱発電技術の工程表が掲げられている。

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という）では、この地熱発電における大幅な発電容量増加への寄与が期待される革新的技術

原稿受付 2022年9月12日

*1 新エネルギー・産業技術総合開発機構
新エネルギー部 熱利用G
〒212-8554 川崎市幸区大宮町1310
ミューザセントラルタワー 15階
E-mail: ishikawakzk@nedo.go.jp

の実現に向けた研究開発として、超臨界地熱資源の開発に関する研究開発に取り組んでおり、本稿ではその成果の一部について紹介する。

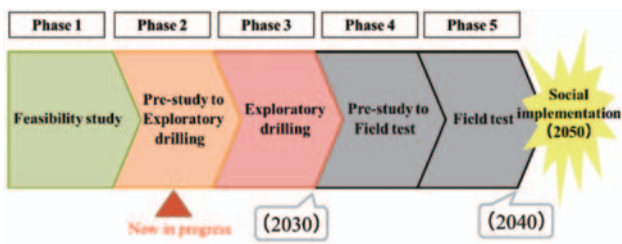


Fig. 1 Roadmap for supercritical geothermal development

2. 超臨界地熱資源の概要

2.1 従来地熱資源の概要と発電方式

従来型の地熱発電は深さ1～3 km程度の地中から生産井と呼ばれる井戸にて取り出した蒸気（一般的には気液二相流を汽水分離により蒸気を分離し活用）により蒸気タービンを回して発電している。汽水分離された後の熱水は還元井により地下に戻しており、その還元熱水は地球の熱で温められ、再び蒸気として取り出すという仕組みとなっており、地熱が再生可能エネルギーといわれる所以である。

この方式は「フラッシュ方式」(Fig. 2)と呼ばれ、我が国の大規模地熱発電所は大半が本方式である。実現するには約200～300℃の蒸気・熱水を取り出す必要がある。（細かくはシングルフラッシュ方式とダブルフラッシュ方式が存在するが、ここでは割愛。）

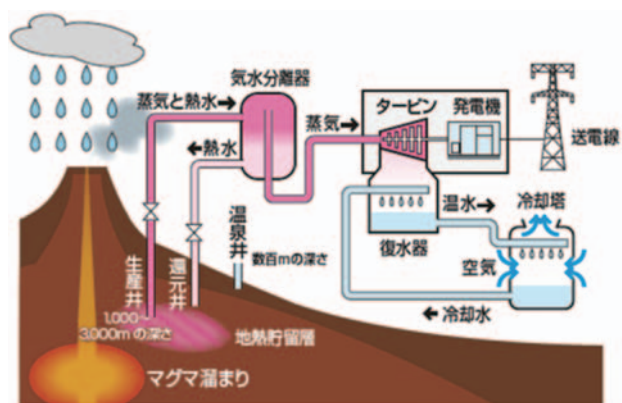


Fig. 2 Flash steam geothermal power generation (Single-Flash)

*2 超臨界水：物質は温度や圧力の変化により、分子間相互作用と運動エネルギーの兼ね合いから、固体・液体・気体と状態を変化させる。気液共存線の終点が臨界点（374℃，22.1 MPa）であり、この温度・圧力以上の状態の水を超臨界水と言う。超臨界水の密度は液体の1/10～1/2程度で、水蒸気（気体）に比べて数百倍大きい。

また、フラッシュ方式では発電に利用できない低温の熱水（約150℃以下）を沸点の低い不活性ガスなどに熱交換し、二次媒体を蒸気化させてタービン駆動に用いる方式を「バイナリー方式」(Fig. 3)と呼ぶ。比較的小規模な発電とはなるが、使用する二次媒体によっては100℃以下の熱水でも発電することが可能である。浴用に使用する前の高温温泉水を活用したバイナリー発電も注目を浴びており、年々プラント数は増加している。

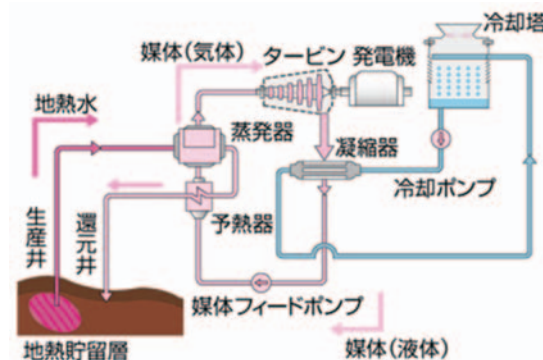


Fig. 3 Binary geothermal power generation

2.2 超臨界地熱資源の特徴

超臨界地熱資源は、天水（雨水）を起源とする従来の地熱資源とは異なる概念であり、地下のより深部にあるマグマ（海水）起源の超臨界水^{*2}状態となって胚胎する流体を活用する点が特徴的である（Fig. 4）。プレートテクトニクスによって地下に引き込まれた海水に起因する水分が、マグマの上部に高温・高圧（超臨界状態）で賦存していると考えられており、この地熱資源を発電に活用しようという試みが超臨界地熱発電である。

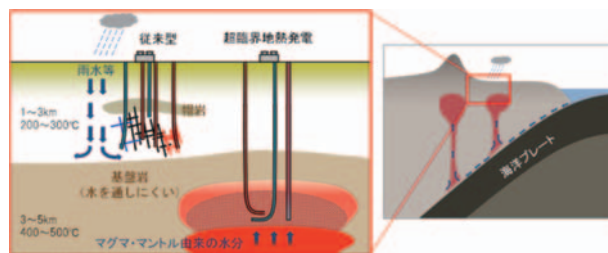


Fig. 4 Supercritical geothermal system concept

従来型地熱流体は深度1～3 km程度に存在しているが、それに対して超臨界地熱流体はそれより深い深度3～5 km程度に存在していると考えられており、温度は従来型地熱流体が200～300℃に対して超臨界地熱流体は400～500℃と高温である（Table 1）。

超臨界地熱資源を活用するメリットとしては、「生産井一本あたりの生産能力が従来の数倍以上と高い」ことから、「単位kWあたりの敷地改変面積を低減することが可能」となり、「環境への負荷が低い」という点が挙げられる。

超臨界地熱流体を利用することで、地熱発電容量の更なる増大が期待されるが、一方で「高温・高圧環境下における坑井素材および掘削技術に関する対策」、「流体に含まれる不純物によるスケールや腐食への対策」、「資源探査の手法が確立していない」等の技術課題と経済性の克服が必須となる。

なお、発電方式については、従来地熱のフラッシュ方式に近い「直接利用」とバイナリー方式に近い「間接利用」の両面から検討を進めている。

Table 1 Comparison between conventional and supercritical geothermal systems

	Depth	Temperature	Origin of geothermal fluid	Power generation capacity
Conventional Geothermal	1~3km	200-300℃	rainfed	~30,000kW
Supercritical Geothermal	3~5km	400-500℃	Seawater	~150,000kW

2.3 海外の動向

海外においても従来の開発深度より深部の高温域領域をターゲットとすることで生産量を増大しようとする試みがいくつかの国で進められている (Fig. 5)。

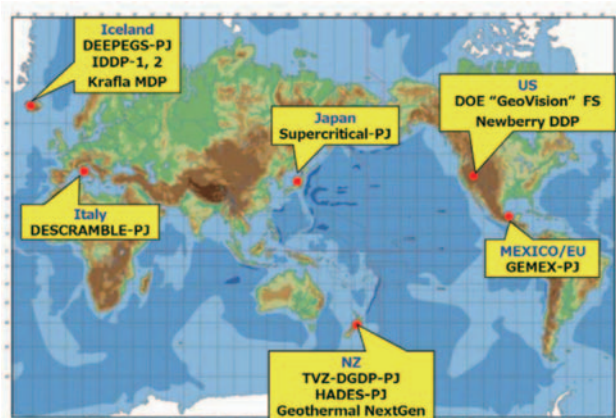


Fig. 5 Global trends in supercritical geothermal resource development

特に成果を挙げているのは、アイスランドの大深度高温域への掘削プロジェクト (IDDP: Iceland Deep Drilling Project) であり、2008～2012年にかけて、IDDP-1号井を掘削、噴気試験^{*3}にも成功し、坑口において温度450℃、圧力14 MPa、出力3万 kW相当の過熱蒸気の噴気が確認された (Fig. 6)。

その後、2016～2017年にかけて IDDP-2 号井を掘削し (深度 4,650 m)、坑井内温度 427℃ および圧力34 MPaが確認されたことにより、地熱流体が超臨界状態で存在しているであろうとの知見を得たが、坑井トラ



Fig. 6 Discharge Test of IDDP-1

ブル^{*4}により現状では噴気試験までには至っていない。なお、後年には次の掘削計画 (IDDP-3) も計画されている。

現在は、IEA-GIA (国際エネルギー機関・地熱実施協定) においても、地熱プログラムの一つのテーマ (Deep Roots of Volcanic Geothermal Systems) として大深度高温域の地熱システムが取り上げられ、アイスランド以外でも、イタリア、米国、メキシコおよびニュージーランドといった地熱開発先進国で同様のプロジェクトが始まっている。

我が国では、1990年代後半に岩手県葛根田地域で「NEDO地熱探査技術等検証調査/深部地熱資源調査」が実施され、海外よりも先んじて、深度4,000 m級の調査井が掘削された実績がある。このプロジェクトでは、掘削ターゲット付近にて高濃度のガス発生が継続した影響により掘り止め、プラグによる閉塞を行ったため、地熱資源の噴気は確認できなかったものの、国内最高となる温度500℃以上 (推定) が確認されている。その後は、残念ながら本調査は継続されなかったが、東日本大震災以降の再エネ電源が見直される流れを受け、2018年から超臨界地熱資源開発に係る研究開発を行っている経緯にある。

3. 我が国の超臨界地熱資源開発のポテンシャルと課題

2018年度から2020年度にかけて、超臨界地熱資源開発事業におけるフィージビリティスタディ (Phase1) を目的とした各種研究開発を実施した。超臨界地熱資源の探査フィールド選定のための基礎資料を作成することを目的として、日本国内で超臨界地熱資源の賦存が期待される地域を選定し (Fig. 7)、地表から試錐によって到達できる可能性のある深度5,000 mまでに推定される超臨界地熱資源量を容積法で算出した結果、資源ポテンシャルの合計は約6.5 GWe (P50^{*5}) と試算された (Fig. 8)。

* 4 坑井トラブル: 蒸気井内部のトラブル。坑井のケーシング損傷や機器の坑井内抑留、スケールによる詰まり等様々なトラブルが発生する。

* 5 P50: モンテカルロ法による期待値評価であり、累積確率分布関数の90%, 50%, 10%に対応する資源量をそれぞれP90, P50, P10と表現する。P50とは50%以上の確率で達成される量という意であり、推定資源量として表現している。(P90は保守的の数値, P10は楽観的の数値)

* 3 噴気試験: 蒸気井の蒸気を実際に坑口から噴出させ、蒸気流量や温度・圧力等の計測を実施する試験。



Fig. 7 Wells that recorded high temperatures (> 250 °C)

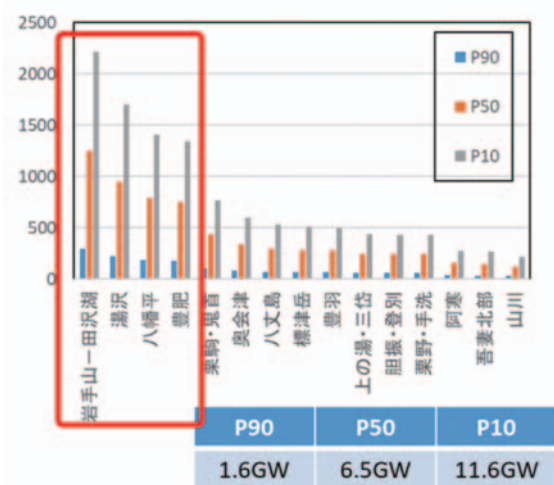


Fig. 8 Estimated amount of supercritical geothermal resources

また、調査井掘削ステージ (Phase3) に向けた詳細検討における重要テーマを以下のとおり整理しており、これらの課題を一つずつ解決していく必要がある。

【テーマⅠ】超臨界地熱資源探査および評価

- i) モデルフィールド資源量評価
- ii) 地質構造試錐掘削
- iii) 探査技術手法開発

【テーマⅡ】掘削技術

- i) 調査井掘削工事仕様
- ii) 高温表セメント・耐腐食性ケーシング開発
- iii) 坑内冷却技術
- iv) 超臨界地熱井仕上げ技術

【テーマⅢ】人工貯留層造成技術

- i) 地殻応力測定技術手法開発
- ii) 水圧破碎手法開発
- iii) 数値シミュレーション開発

【テーマⅣ】地上設備

- i) 噴気試験仕様
- ii) 蒸気清浄化装置
- iii) 熱交換装置

これらのテーマの中から、昨年度までのプロジェクト

における代表的な事業テーマと成果の概要を以降に紹介する。

3.1 超臨界地熱資源探査および評価

3.1.1 モデルフィールド資源量評価 全国5地域 (仙岩地域^{*6}, 後志地域^{*7}, 豊肥地域^{*8}, 八幡平地域, 湯沢南部地域) において、電磁探査および微小地震観測等を実施し、3次元の比抵抗構造解析により、3次元温度構造を推定した。また、地表調査結果およびシミュレーション結果を総合評価し、地下5 km以浅に比較的若い年代のマグマが定置した箇所を特定、各地域において超臨界地熱資源量がそれぞれ出力10万 kW発電できる可能性を提示した。代表して、岩手県八幡平市に位置する八幡平地域の成果を示す。

i) 地表調査

MT法電磁探査^{*9}では、標高-10 kmまでを対象に測定を行い、データの3次元解析の結果、安比岳南方に熱源に関連するとみられる深部低比抵抗帯を検出した (Fig. 9)。微小地震観測では、深部低比抵抗帯内は震源分布が少なく、超臨界領域に推定される延性的な環境を反映している可能性が確認された。

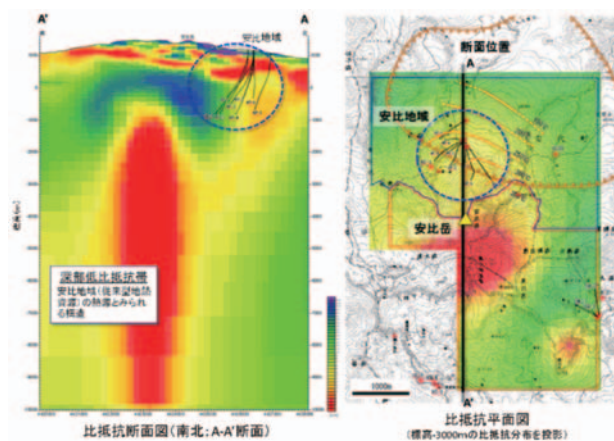


Fig. 9 Resistivity structure in Hachimantai area

ii) 地熱構造モデルの構築

深部低比抵抗帯と地熱構造の関係を考察し、超臨界領域を含む地熱構造モデルを提示した。深部の温度分布の推定は、既存検層データの外挿推定により行い、この推定温度分布を基に容積法により超臨界地熱資源量を試算した。

iii) 資源量評価

超臨界領域に超臨界流体の流動が存在し、超臨界領

* 6 仙岩地域：岩手県から秋田県にまたがる岩手山から田沢湖にかかる地域

* 7 後志地域：北海道南西部に位置するニセコ町周辺地域

* 8 豊肥地域：大分県と熊本県にまたがる涌蓋山を中心とした地域

* 9 MT法電磁探査：地層を構成する物質の比抵抗の違いに着目し、地下の構造や状態、地下資源の存在などを調査する探査法

域の上面に石英充填不透水層^{*10}と呼ばれる不透水構造が分布するという説を採用し、地熱構造モデルを模した数値モデル上で、想定される地熱流体の流動・加熱機構を再現した。生産予測シミュレーション^{*11}の結果では、出力 100 MWを超える発電の可能性を提示した。(Fig. 10, Fig. 11)

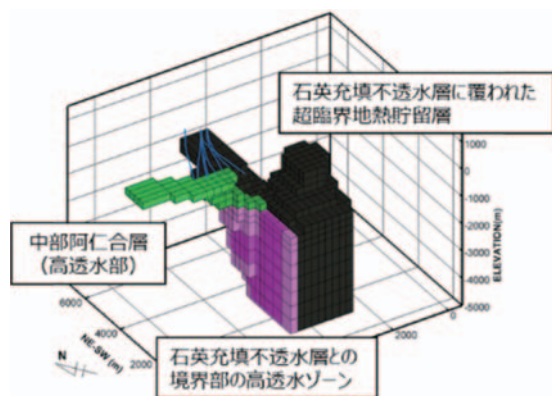


Fig. 10 3D model for production prediction

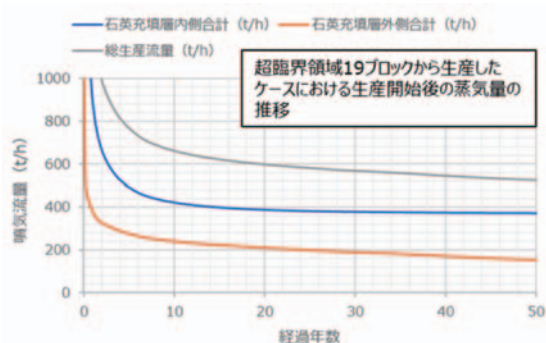


Fig. 11 Prediction calculation of steam production

3.1.2 探査技術手法開発

i) 革新的超臨界地熱場観測技術開発

超臨界地熱場を解明するための探査手法として、光ファイバー DAS^{*12} (Distributed Acoustic Sensor) 計測技術を主体とする弾性波探査技術の研究開発を実施した。本技術は、坑井内に光ファイバーを挿入し、その光

ファイバーを温度センサーおよび地震計センサーとして活用し、人工震源装置から発生させた地震波を解析することによって、より深部の断層系を推定することを可能とする技術となっている。実証試験として大沼地熱発電所の坑井において深度約 2 km まで光ファイバー設置して測定を実施し、その結果、発電所南西の位置に深さ 2.8 ~ 3.0 km に広がる地震波の高反射ゾーンの存在が明らかとなった (Fig. 12)。既存データと比較、検証した結果、本探査技術の有効性が確認された。

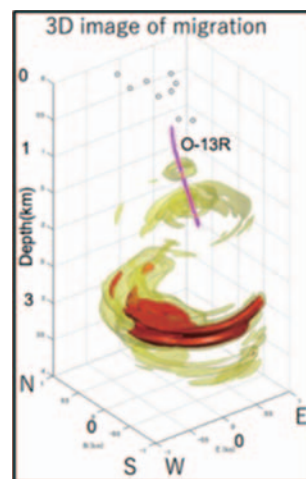


Fig. 12 Example of 3D seismic reflection zone inferred from DAS

3.2 掘削技術

3.2.1 高温表セメント・耐腐食性ケーシング開発

i) ケーシング材料開発

想定される超臨界地熱貯留層深度の環境は極めて高温かつ酸性 (400℃, pH=3前後) であり、高温強度および全面腐食、局部腐食への耐性が大きな問題となる。調査井のケーシングでは、低合金鋼を用いることにより、ある程度局部腐食の回避が可能であることから、全面腐食を中心に検討し、以下の成果を得た。

候補材の酸性熱水腐食試験と総合評価においては、17Cr鋼の耐食性が極めて高く、TN110SS (Cr-Mo鋼) は 400℃ よりも 300℃ の環境で腐食が進むことがわかったことから、超臨界環境では TN110SS、亜臨界環境では 17Cr を調査井ケーシング候補材として選定した。

また、アルミナやジルコニアを用いたセラミックスコーティングは高い耐食性を示すことを確認できたものの、溶射でのコーティングとなることから、長尺管内部にコーティングする手法について課題が残った。

ii) セメント材料開発

超臨界水および酸性環境となる超臨界地熱調査井の坑井用セメントに要求される条件等の技術的課題を明確化し、これを解決するためのアルミナセメントの改良や遅硬化剤について検討を行った。鋼管内部セラミックスコーティング技術の評価・検討においては、坑井用アルミナセメントシステム (HASFL) の改良を行い、以下の性

*10 石英充填不透水層：深部のマグマが冷え固まる過程で生成される石英（シリカ）を主成分とした水分を通さない岩石層。超臨界地熱資源はこの不透水層の下に賦存していると想定されている。

*11 生産予測シミュレーション：対象地域の適正発電規模を評価することを目的として、地熱貯留層の構造や流体流動を再現できる数値モデルを構築し、開発規模（出力）やシナリオを検討するためのシミュレーション

*12 光ファイバー DAS：光ファイバーの分解能が高いことを利用して、本技術では、坑内に設置する地震計および温度計として適用されている。DASとは、distributed acoustic sensor（分布型センサー）であり、地上から人工震源により起震し、地下での反射波を光ファイバー DASで観測する。反射面は断層系と想定されており、断層系を直接捉える新しい探査手法。

能を達成した。既製品や他の研究開発品と比較して良好な性能を得られている (Table 2, Fig. 13, Fig. 14)。

- ・初期強度：11.3 MPa @250℃ ×24 h
- ・長期安定性：11.9 MPa @400℃ ×28 日
- ・耐酸性：GWC^{*13}より良好
- ・材料コスト：600円/kg 程度
- ・シッキングタイム^{*14}：200℃×6 h以上

Table 2 Cement material candidate for supercritical geothermal wells

名称	GWC (Geothermal Well Cement)	ThermaLock	Modified ThermaLock	TSRC (Thermal Shock Resistant Cement)	本プロジェクト HASF, HASFL
状態	製品化	製品化	DESCRAMBLE PJTで使用	研究段階	試作中
メーカー	宇部興産 テルナイト	BNL バリバートン	BNL バリバートン	BNL	AGCセラミックス テルナイト
ベース材	ポルトランドセメント+シリカ	アルミナセメント (CaP)+フライアッシュ	アルミナセメント (CaP)+フライアッシュ	アルミナセメント (CaC)+フライアッシュ	アルミナセメント (CaC)+シリカ
シッキングタイム (TT)	200℃×6hr	100℃×3hr~	200℃対応可	85℃×6hr~	200℃×6hr
長期安定性	耐熱性	~300℃	~300℃	~500℃	~600℃
	耐酸性	耐酸性 (Mg ₂ SO ₄ 等)	耐CO ₂ 性、耐酸性 (pH0.5, H ₂ SO ₄ , NaCl+Mg ₂ SO ₄ 等)	N/A	耐酸性 (pH2, H ₂ SO ₄ , H ₂ S, HCl)

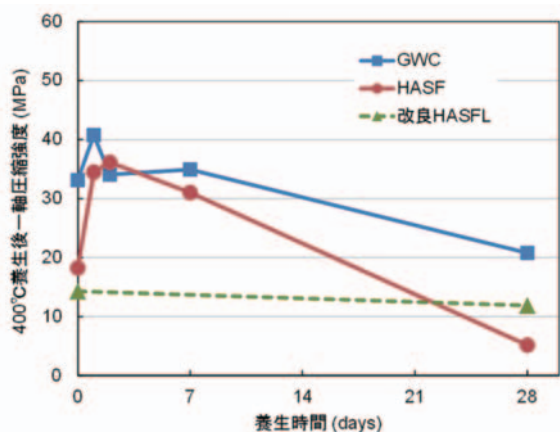


Fig. 13 Uniaxial compressive strength with curing time at 400℃

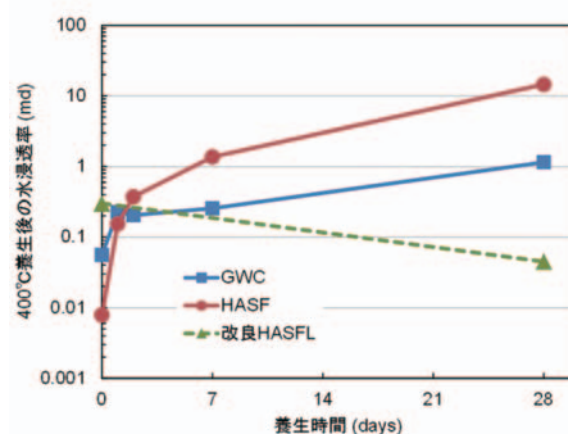


Fig. 14 Water permeability with curing time at 400℃

3.3 人工貯留層造成技術

3.3.1 超臨界地熱貯留層THMCシミュレータ^{*15}開発

超臨界地熱環境下においては、「熱」「水理」「岩石力学」「地化学」が相互に影響し合う連成現象により、流体の生産や還元に伴う応力場の変化や鉱物の溶解析出等が生じ、貯留層の水理特性や生産能力に顕著な影響を与える可能性がある (Fig. 15)。

こうした超臨界地熱環境で生じうる基礎的なTHMC連成現象を考慮するための、有限要素法に基づく2次元、3次元対応の超臨界地熱貯留層THMC連成シミュレータを開発した。

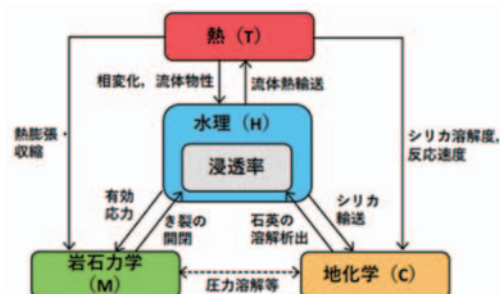


Fig. 15 Coupled THMC processes in supercritical geothermal environment

- *13 WGC: Geothermal-Well Cement 地熱発電所の坑井に使用される高温高压環境下での強度特性・硫酸塩に対する化学抵抗性に優れた地熱井セメント。
- *14 シッキングタイム: 地熱井掘削の坑井仕上げやプラグ等におけるセメンチング作業において、使用する温度圧力でポンプ圧送が可能な流動性を維持する時間。
- *15 THMCシミュレータ: T (thermal: 熱), H (hydro: 水), M (mechanics: 力学), C (chemical: 化学), それぞれの挙動、およびその連成作用を考慮して、地下で発生している現象と状態を解析するシミュレータ。
- *16 石英溶解析出反応: 超臨界地熱貯留層においては、マグマ起源の水であると考えられていることから、シリカ (石英) 成分が多分に含まれていると想定されている。このマグマ起源の超臨界水に含まれたシリカ成分が温度・圧力によって溶解・析出の反応が起こることから、超臨界水を地下から地上に取り出した際の反応について、考慮する必要がある。

また、開発した地化学計算法を用いての予想的な評価の結果、開発手法によっては、深部地熱流体の減圧から冷却パスにおけるpHの変化として、過熱蒸気は高温状態ではpHが高くなり (アルカリ性)、冷却するとpHが低くなる (強酸性) との予測が得られた (Fig. 16)。このような計算結果は、IDDP-1における観察結果と概ね整合的であることも確認できた。

本シミュレータにより、超臨界地熱貯留層内で生じうる基礎的な岩石力学挙動、石英溶解析出反応^{*16}、及びそれらが浸透率、生産流量に及ぼす影響について評価が可能となった。また、石英溶解析出反応が生産流量の変動に顕著な影響を与える可能性がある等の結果が得られた。

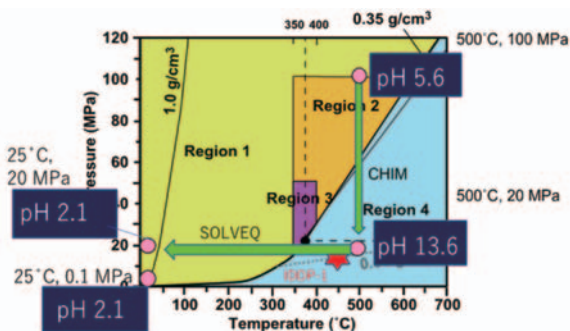


Fig. 16 Behavior of supercritical geothermal fluids

3.4 地上設備

3.4.1 蒸気浄化装置の検討 超臨界地熱資源の生産井から得られる過熱蒸気には、シリカが随伴していると推定されている。シリカが随伴したままでは発電設備を構成する機器に流入させた直後に大量のシリカスケールを生成させることになり、発電設備の連続運転を妨げる可能性が非常に高い。

この過熱蒸気中のシリカを発電設備より上流で除去する技術の候補として、「湿式（船舶用排ガス脱硫サイクロンスクラバ等）」と「乾式（サイクロン集塵機等）」のサイクロンスクラバを検討した。

超臨界地熱井から生産される蒸気条件および地熱流体中のシリカ濃度（55.2 mg/kg）等を想定したうえで、スクラバ出口での蒸気圧力と温度を試算し、スクラバ出口での蒸気中シリカ濃度の目標値を従来の地熱発電所と同程度（0.1 mg/kg）と定めて検討した。

その結果、今後、仮説検証のための実証試験が必要であるが、湿式スクラバであれば、スクラビング水の液滴を微細化して噴霧することでシリカを除去できる可能性があることを確認した（Fig. 17）。

これに対して、乾式スクラバでは、過熱蒸気中で推定されるシリカ粒径は遠心力で除去できないほど微細であることから、適用は困難であることを確認した。

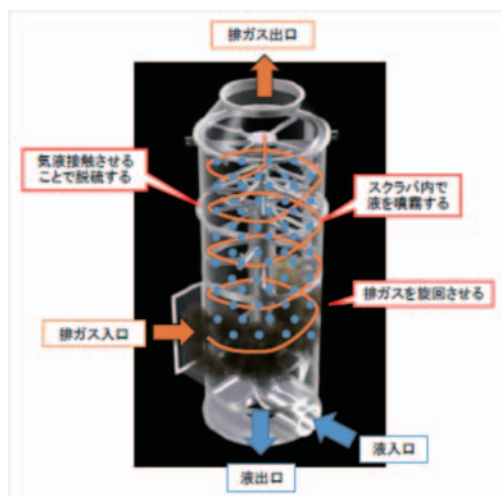


Fig. 17 Image of wet scrubber system

4. 今後の展望

NEDOでは、ロードマップにおける（Phase1）として、2018～2021年度で「超臨界地熱発電技術研究開発」事業を実施してきた。2021年度からは、新規事業「地熱発電導入拡大研究開発」における研究開発項目である「超臨界地熱資源技術開発」にて、ロードマップの（Phase2）を進めている。これまで実施してきた研究課題を継承し、我が国の超臨界地熱資源の賦存が期待される有望域（岩手県八幡平地域、岩手県葛根田地域、秋田県湯沢南部地域および大分県九重地域の計4地域）での資源量評価スタディ（精査）を中心に、物理探査、地化学調査等の補完調査を行い、地下構造モデルの精緻化と資源量評価の精度向上を図っている。また、次のフェーズとなる調査井掘削（Phase3）に向けて、各地域において掘削仕様の検討およびコスト試算や社会的制約条件等に関する評価も実施している。

併せて、大深度でも精度の高い断裂系探査が期待される光ファイバー DASによる超臨界地熱資源探査技術の開発も様々なフィールドでの実証試験・検証を進めている。超臨界地熱資源の探査技術として、世界的に地熱系での実施は初めての試みであり、今後は事業化に向けてその有効性・適用性を検証していく計画である。

超臨界地熱発電の実現に向けては長い道のりとなっており、上記の資源量評価技術、資源探査技術以外の技術開発についても乗り越えるべき課題は多い。NEDOでは、本稿で紹介した「超臨界地熱資源技術開発」に加え、地熱発電普及拡大に向けた環境関連課題への対策として「環境保全対策技術」、IoT-AI技術を活用することで設備利用率向上を目的とした「地熱発電高度利用化技術開発」も下記体制により実施しており（Fig. 18）、超臨界地熱発電実現に間接的に寄与する技術開発も多い。これらの技術もさらに発展させながら、国内で地熱開発に携わる多くの事業者、大学、研究所等の知見を集め、オールジャパンの体制を構築することで、世界に先駆けての実用化を目指して一つずつ課題を乗り越えていく所存である。

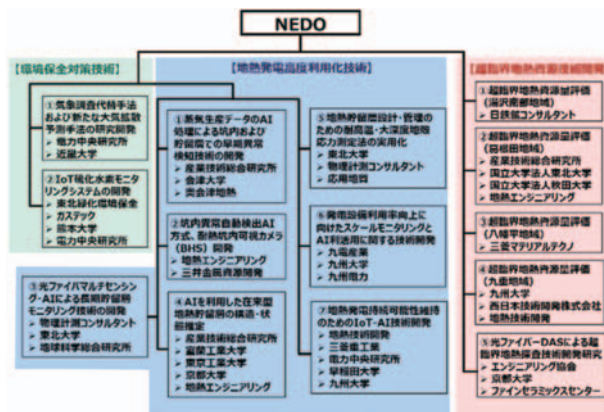


Fig. 18 Organization chart of NEDO geothermal development project

特集：2050年脱炭素社会実現に向けた今後のアプローチ

アンモニア利用発電技術の今後の展望

Future Prospects of Ammonia Utilization Technology in Power Generation



小崎 貴弘^{*1}
KOZAKI Takahiro



花岡 亮^{*2}
HANAOKA Ryo

キーワード：アンモニア，ガスタービン，ボイラ，火力発電，カーボンフリー，新燃料

Key Words：Ammonia, Gas Turbine, Boiler, Thermal Power Plant, Carbon Free, New Fuel

1. 緒言

発電分野において温室効果ガスの排出削減が求められており，日本政府は第6次エネルギー基本計画において，二酸化炭素の排出量の具体的な目標を明確に示した。その数値目標をFig. 1に示す。これによると，2030年における野心的な見通しにおいて温室効果ガス削減割合は46%削減とあり，そのときの電源構成において水素・アンモニアが1%を占めるものと示されている。水素は炭素原子を含まず，燃焼させても二酸化炭素の排出がないことからその有効利用に期待が寄せられている一方で，その輸送や貯蔵は技術的にも経済的にも難しいことが分かっている。

その解決策の1つとして，水素をアンモニアに変えて輸送・貯蔵することが考えられる。アンモニアは水素と比較すると液化し易いことから，経済的かつ現実的な水素の輸送・貯蔵媒体であり，更には可燃性のガスであることから，火力発電所等で新しい燃料として直接利用することが可能である。

本稿では，現在研究されている燃料としてのアンモニアの直接利用技術として，石炭火力発電所における微粉炭との混焼技術および，ガスタービンにおける天然ガスとの混焼および液体アンモニアの噴霧燃焼技術について，これまでIHIが研究開発を行ってきた最新の情報について紹介するとともに，今後の研究開発方針について論じることで日本の将来におけるエネルギー計画について考えたい。

	(2019年 ⇒ 現行目標)	2030年ミックス (野心的な見通し)
省エネ	(1,655万kl ⇒ 5,030万kl)	約6,200万kl (省エネ率の最終目標：約35,000万kl)
電源構成		
再生可能エネルギー	(18% ⇒ 22~24%)	36~38%
水素・アンモニア	(0% ⇒ 0%)	1%
原子力	(6% ⇒ 20~22%)	20~22%
LNG	(37% ⇒ 27%)	20%
石炭	(32% ⇒ 26%)	19%
石油等	(7% ⇒ 3%)	2%
(+ 非エネルギー起源ガス・吸収源 上記と同等の引上げ)		
温室効果ガス削減割合	(14% ⇒ 26%)	46% 更に50%の減みを目標とする

Fig. 1 6th Strategic energy plan and energy composition target⁽¹⁾

2. アンモニアの特徴と活用する上での利点

2.1 水素輸送・貯蔵媒体としてのアンモニア

水素は燃焼させても二酸化炭素を排出しないことから，カーボンフリーの燃料として注目されているが，その液化温度は常圧下で-253℃である。パイプラインで接続されていない日本においては，輸送効率向上のために液化させる必要があるものの，それには莫大なエネルギーを使用することになる。また，そのような低温度域で使用可能な金属材料は非常に高価なものとなることから，大型化についても経済的な課題が残る。

水素を貯蔵・輸送する方法としては，Fig. 2に示すようにいくつかの手段が考えられるが，トルエン (C_7H_8) に水素を付加しメチルシクロヘキサン (C_7H_{14}) とする方法がまずは挙げられる。メチルシクロヘキサンは比較的安定している物質であるものの，単位質量あたりの水素含有割合は6%程度であり，その輸送効率は良いとは言いがたい。その一方で，アンモニアは常圧下における液化温度が-33℃であることから容易に液化が可能であり，輸送・貯蔵のために必要な機器に使用する材料についても，特殊な金属を使用する必要はない。また，輸送効率の面においても単位質量あたりの水素含有割合も18%であることから，アンモニアは水素の輸送・貯蔵媒体として優れた性質を有していると言える。

更には，アンモニアは肥料の原料としてこれまでも世界中で製造されており，生産や輸送・貯蔵に関する技

原稿受付 2022年9月12日

*1 (株)IHI 資源・エネルギー・環境事業領域
カーボンソリューションSBU 技術センター 開発部
E-mail: kozaki5334@ihi-g.com

*2 同上
E-mail: hanaoka5401@ihi-g.com

術・経験が蓄積されている。更には火力発電所において、排ガス中の窒素酸化物を分解除去する脱硝装置内においてアンモニアを日常的に使用していることから、アンモニアを新たに燃料として使用することについても他の燃料と比べると、その心理的な抵抗は小さいものと考えられる。

このようなことから、アンモニアは水素を輸送・貯蔵する媒体として大きなメリットがあり、かつ可燃性のガスであることから、カーボンフリーの新しい燃料として火力発電への適用が非常に期待されている。

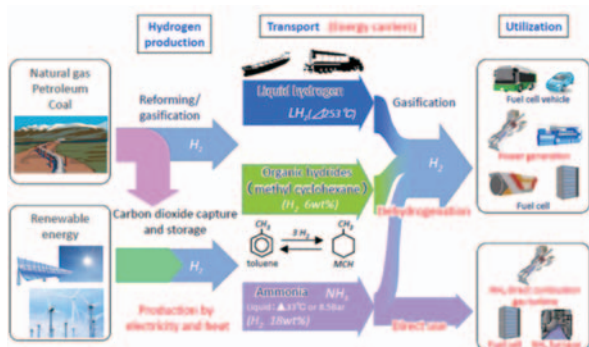


Fig. 2 Characteristics of hydrogen storage media⁽²⁾

2.2 燃料としてのアンモニアの特性

アンモニアは可燃性のガスであることから、火力発電所で使用する際に再度水素へ分解する必要はなく、直接燃料として使用することが可能である。しかしながら、燃料としてのアンモニアには、メタンやプロパンといった他の可燃性ガスと比較して燃焼速度が著しく遅く、また窒素原子を含んでいることから、燃焼時に窒素酸化物を生成してしまう懸念がある。Table 1にアンモニアと他の可燃性ガスとの特徴比較を示すが、アンモニアの最大燃焼速度はメタンやプロパンの1/5程度であり、低位発熱量も低いため、他のガスと同じ発熱量を得るためには必然的に投入するガス流量は大きくなることになる。

Fig. 3は天然ガス専焼時と天然ガスに熱量比で50%のアンモニアを混焼させた際の火炎の長さを相対的に示している。アンモニア混焼時は火炎の伸長が確認され、燃焼速度が遅いことが伺える。

以上のことから、アンモニアを燃料として火力発電所等で利用する上で、着火の安定性および窒素酸化物の排出抑制という2点が大きな懸念事項である。

Table 1 Comparison of combustible gases properties

Characteristics	Ammonia	Hydrogen	Methane	Propane
Boiling temp. (°C)	-33.4	-253	-161	-42.1
LHV (MJ/kg)	18.6	120	50.0	46.4
Combustible Equivalence ratio	0.6 ~ 1.4	0.1 ~ 7.1	0.5 ~ 1.7	0.5 ~ 2.5
Adiabatic flame temp. (°C)	1800	2110	1950	2000
Max. combustion velocity (m/s)	0.07	2.91	0.37	0.43

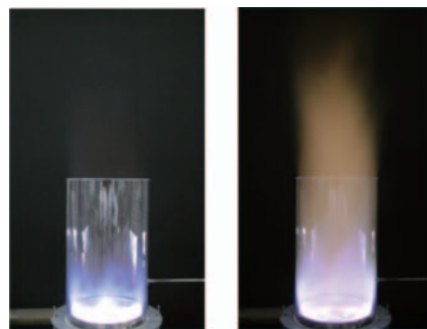


Fig. 3 Natural gas firing flame and 10% ammonia cofiring flame⁽³⁾

2.3 アンモニアの毒性について

アンモニアは可燃性であることから、その取り扱いには十分に注意をする必要であるが、更には毒性を有しているという点でも配慮が必要である。アンモニアには強い刺激臭があることは既知の通りであると思うが、高濃度のアンモニアガスに晒されると、視覚障害や呼吸障害を引き起こす可能性がある。そのため、アンモニアをリークさせないよう細心の注意・対策を講ずることが大前提ではあるが、万が一リークした場合にもそのリークアンモニアをいかに検知し、アンモニアの供給を停止すると共に、周囲の作業員等に早く周知するかという点がアンモニアを取り扱う上で非常に重要となってくる。その上で、リーク箇所の確認や補修は必要な保護具を身に着け対処することが必要である。

3. 石炭火力発電所における燃料アンモニアの利用

3.1 微粉炭とアンモニアの混焼技術について

IHIでは2016年より石炭火力発電所への燃料アンモニア適用を目指し、微粉炭とアンモニアの混焼技術開発に取り組んできた。数値シミュレーションおよび試験的検討を通じて熱量比20%条件での微粉炭とアンモニアの混焼技術を確立した。本稿では、その概要について示す。

3.2 数値シミュレーション

微粉炭とアンモニアの混焼において、最も懸念されることは先に述べた通り、窒素酸化物(NO_x)の排出である。微粉炭燃焼場において、窒素酸化物の排出を抑制するためには、どのような方法でアンモニアを投入することが効果的か、数値シミュレーションにて検討を行なった。

最初に、微粉炭の専焼状態をCFDにて模擬し、その排ガス温度や組成の分布の定義を行なった。次に、その温度場に対して、①アンモニアガスを微粉炭とその搬送空気中に混合する、②燃焼空気へ混合し供給する、③別ポートからアンモニアのみを燃焼場へ供給するといった3通りの供給方法について、化学量論計算にて排ガス NO_x 値および CO 値を求め、評価を行なった。Fig. 4にその投入位置と結果を示す。

この結果から、アンモニアは空気と予混合させるのではなく、酸素濃度の低い火炎の中に直接供給する方法が

NO_xの発生抑制に最も効果的であることが確認され、この結果を元にアンモニア混焼バーナの具体的構造の検討とその燃焼性の確認を試験的に実施した。

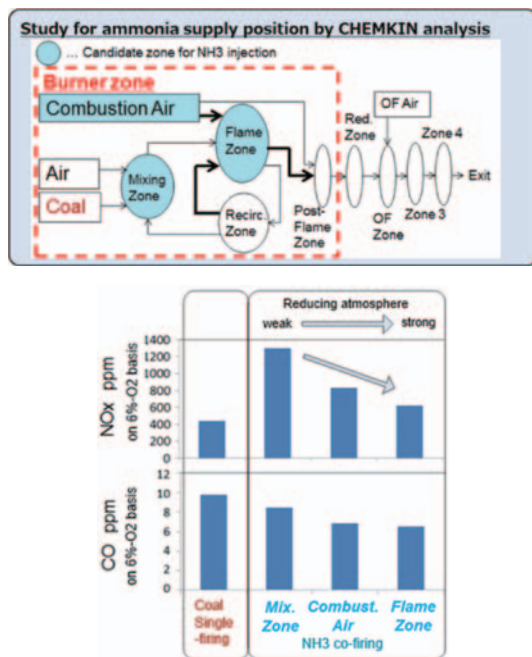


Fig. 4 Schematic and results of stoichiometric calculations⁽²⁾

3.3 試験装置

試験の検討は、IHI相生事業所内にある大規模燃焼試験炉を使用した。本試験炉は投入熱量10 MWの単一バーナ炉であり、実際の発電所で使用されているバーナに近いスケールで試験が可能である。新たに設置したアンモニア供給設備は最大供給量400 kg/hであり、この燃焼試験炉において熱量ベースで20%まで混焼可能なものである。アンモニアは液化アンモニアタンクから温水式の気化器を通して気化させ、パuffer槽などを介することでバーナまで安定供給が可能な仕様である。Fig. 5に試験炉の主要な系統とアンモニア供給設備の外観を示す。

バーナはIHIの標準微粉炭バーナをベースとし、そこにアンモニアの投入位置や流速などを変化させた燃焼試験を行なうことで各パラメータを評価し、その最適点を検討した。Fig. 6にIHIの標準微粉炭バーナの概形を示す。燃焼排ガスやガス中のばいじんは試験炉より後流のダクト内の固定位置で採取・分析し排ガス中のNO_x濃度、石炭灰中の未燃分割合、排ガス中の未燃NH₃濃度および一酸化二窒素(N₂O)濃度について、石炭専焼時と比較・評価を行なった。N₂Oは温室効果ガスの一つであり、大気中で長く滞留し、地表から放出された熱を吸収する能力も高いことから二酸化炭素の300倍程度の温室効果があるとされている。そのため、アンモニア燃焼時にはその排ガス中の濃度に十分注意する必要がある。



Fig. 5 Air and gas system in combustion test furnace and ammonia supply system overview⁽²⁾

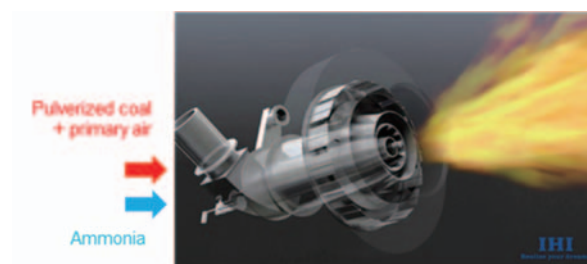


Fig. 6 Pulverized coal and ammonia co-firing burner⁽²⁾

3.4 燃焼特性

Fig. 7は燃焼試験時における微粉炭専焼時の火炎およびアンモニア混焼時の火炎の様子である。図中 (a)の写真が微粉炭専焼時の火炎であるが、アンモニア混焼することで着火位置投入により、若干着火位置がバーナポートから離れる様子が伺える(図中 (b))。これは、前述の通りアンモニアの燃焼速度が遅いことが要因と考えられる。図中 (c)はアンモニア混焼時において、燃焼空気が通過する旋回ペーンの開度を調整した状態のものである。その着火位置は石炭専焼時と同等であり、アンモニア混焼時においても燃焼空気の旋回を適切に調整することで着火の安定性は維持できることが示される結果である。

Fig. 8は石炭専焼条件とアンモニアを20%混焼させた場合の燃焼特性を示している。懸念していた窒素酸化物は燃焼試験を行なった範囲の空気比(空気過剰率)および二段燃焼率においては少なくとも石炭専焼時と同程度となることが確認された。また、その際の燃焼灰中の未燃分割合についても、燃焼試験を行なった条件において

は石炭専焼時と同程度となることが確認された。

また、排ガス中の N_2O 濃度と未燃アンモニア濃度については、双方とも検出下限値以下であり、燃焼性能という点で問題ないことを確認した。

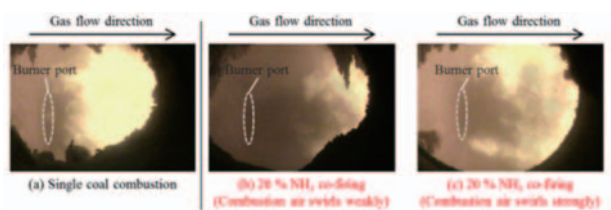


Fig. 7 Coal solo-firing flame and ammonia co-firing flame⁽³⁾

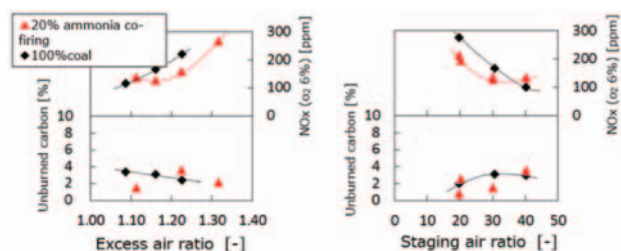


Fig. 8 NO_x and unburned carbon ratio comparison between coal solo-firing and ammonia co-firing cases^{(2),(4)}

3.5 大規模実証試験に向けて

IHIはこれまでの自社内の燃焼試験設備を通じて、微粉炭とアンモニアの熱量比20%混焼時の特性については十分な知見が得られたものの、ボイラプラント全体における中長期的な影響については、実際に運転を行なっているプラントでの確認が必要である。

現在、Fig. 9で示すように株式会社JERA殿の碧南火力発電所（愛知県碧南市、出力100万kW）において、熱量比20%のアンモニア混焼の実証試験を行なうべく準備を進めている。実証試験では、48本全てのバーナからアンモニアを供給、混焼させる予定で、2023年度から試験を開始する予定である。この実証試験を通じて、プラントの中長期的な性能の確認はもとより、起動停止や出力変化といった動特性についても問題ないことを確認し、アンモニア20%混焼ボイラプラントとしての運用方法を実証・確立する予定である。



Fig. 9 20% ammonia co-firing demonstration test in 1000 MW coal firing power plant⁽⁵⁾

4. ガスタービンにおけるアンモニアの活用

4.1 ガスタービンにおける燃料アンモニア活用について

IHIでは同じく2013年よりガスタービンを対象に燃料アンモニアの適用を目指し、その混焼技術開発に取り組んできた。自社製のガスタービンを用いた試験的研究を通じて、その熱量比20%混焼技術を確認した。更に現在は、液化アンモニアを直接燃焼させる技術の開発に取り組んでいる。

4.2 試験装置

試験に用いたガスタービン設備の写真をFig. 10に示す。試験にはIHI製の2 MW級シンプルサイクルガスタービンであるIM270を使用した。タービン出口には脱硝装置(SCR)を設置し、排ガスに含まれる NO_x 濃度を環境規制値以下に低減した。ガスタービンの起動から定格負荷までの運転は天然ガスのみで行ない、発電出力が2 MWで安定したことを確認した後、燃料用ガスアンモニアを供給開始した。各燃料の流量は制御可能であり、熱量比20%まで任意に混焼率を調整可能となっている。

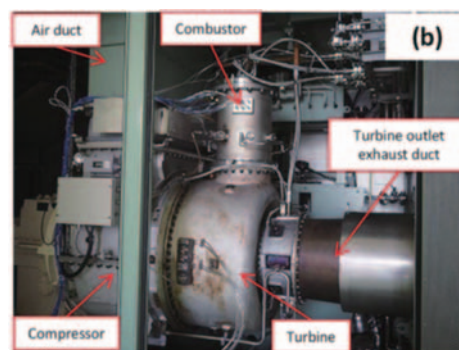


Fig. 10 Overview of IHI's 2MW gas turbine⁽⁶⁾

4.3 ガスタービンにおけるアンモニアの燃焼特性

燃焼試験では、ガスタービン出力を定格の2 MW一定に保ちながら、アンモニアの供給量を徐々に増加させ、混焼率を発熱量比で0%から20%まで増加させた。その際の天然ガスとアンモニアそれぞれの流量の変化の様子をFig. 11に示す。まず、混焼率20%以下となるすべての試験条件において、燃焼器やガスタービン構成部品に異常音、異常振動、異常温度は確認されず、アンモニア混焼による発電運転に問題が無いことを確認した。

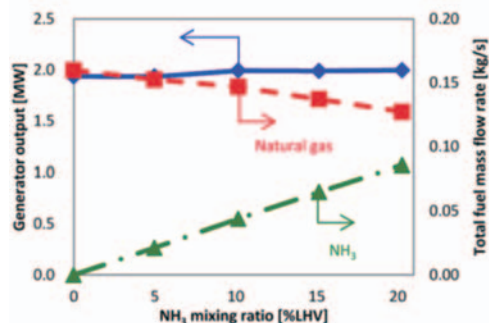


Fig. 11 Relation between NH_3 and natural gas flow rate⁽⁷⁾

次に、Fig. 12 にアンモニア混焼率とタービン出口および脱硝装置出口における NO_x 濃度の関係を示す。図中混焼率 0% の点で示される天然ガス専焼時と比較すると、アンモニア混焼時に NO_x は大きく増加することが分かり、アンモニア混焼率 5% 条件では天然ガス専焼時の 2 倍以上となっている。また、タービン出口の NO_x 濃度はアンモニア混焼率 20% で最大となり、約 290 ppm (酸素濃度 16% 換算) となるが、アンモニア混焼率とその NO_x 濃度は比例関係にはならないことも試験結果から分かる。

その一方で、脱硝装置出口の NO_x 濃度は、アンモニア混焼率を変化させても、試験設備のある横浜市の環境規制値である 7 ppm (酸素濃度 16% 換算) 以下に保たれ、脱硝装置 (SCR) によって環境規制値以下に低減することが可能であることが確認された。また、タービン出口の未燃 NH_3 、CO、THC 濃度は、いずれも 3 ppm 以下であり、投入したアンモニアおよび天然ガスは燃焼器内ではほぼ完全燃焼しており、 NO_x 以外の成分についても排ガスの正常に問題が無いことを確認した。

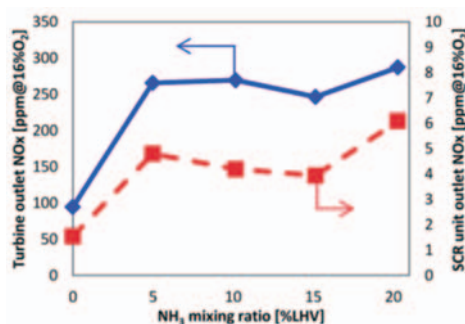


Fig. 12 Relation between NH_3 mixing ratio and NO_x ⁽⁷⁾

4.4 ガスタービンにおける液体アンモニアの燃焼特性

一般的にガスタービンの燃焼器内の圧力は 0.8 MPa 以上となるため、アンモニアを液体のまま安定して噴霧できると考えられる。アンモニアをガス化する方式では、気化設備やその他付随する設備が必要となり、また負荷変動への対応では、調整能力は気化器やアキュムレータの容量に依存するため、負荷変動応答性を求める場合にはより大型の設備が必要となる。

これに対し、液体アンモニア直接噴霧方式では、供給能力はポンプサイズのみ依存するため、混焼比率に応じた流量調整が容易となり、更には暖気が不要で素早い負荷変動に対応できるという大きな利点がある。その一方で、燃焼器内で液体アンモニアが蒸発するため、局所的な火炎温度の低下によりガスタービンの発電端効率が低下する可能性がある。

IHI では、ガスタービンにおける液体アンモニアの直接噴射燃焼技術確立を目指し、試験的な検討を実施した。Fig. 13 に大気圧リグ試験およびガスタービン試験で得られたアンモニア混焼率と排ガス NO_x 値の相関を示す。尚、アンモニア混焼率 0% の条件における排ガス中

の NO_x 濃度を基準として正規化して示している。

この結果によると、 NO_x 濃度は全ての試験条件において、アンモニア混焼率の増加により上昇する傾向にあることが明らかである。また、アンモニアガス燃焼と液体アンモニア直接噴霧燃焼の比較では、大気圧リグ試験、ガスタービン試験の両方で NO_x 濃度の差異は小さく、燃焼挙動に大きな違いは無いことが分かる。

また、大気圧リグ試験とガスタービン試験の結果を比較すると、どちらのアンモニア供給方法においても、大気圧リグ試験の NO_x 濃度が高い傾向にある。これは燃焼器の圧力が高いガスタービン試験の方がラジカルや活性種の濃度が低下するためであると考えられる。

次に未燃 NH_3 の排出の傾向を確認したところ、ガスタービンの高圧燃焼条件では未燃 NH_3 の排出が抑制されており、アンモニアガス燃焼の混焼率 25% までの条件、液体アンモニア直接噴霧燃焼の混焼率 60% までの条件では、計測下限値以下の濃度であった。液体アンモニア直接噴霧燃焼では、混焼率 70% の条件で少量の未燃 NH_3 の排出が確認されたが、その濃度は環境基準値以下であり、ガスタービン性能への影響は軽微であった。しかしながら、さらに混焼率を高めた 70% 以上の条件においては、燃焼挙動が悪化して未燃 NH_3 が急激に増加し、さらには失火する可能性もある。今後より高い混焼比率を達成し、最終的に 100% アンモニア専焼を達成するためには、未燃 NH_3 の排出を抑制する燃焼器の開発が必要となる。

また、先に述べたように N_2O 濃度は高い温室効果を有するガスであり、アンモニア混焼による温室効果ガス低減効果を評価する上で極めて重要であることから、各条件においてその濃度を測定した。Fig. 14 にその結果を示す。 N_2O 濃度は、最も高い結果となった液体アンモニア直接噴霧燃焼の混焼率 70% の条件で正規化している。

アンモニアガス燃焼の混焼率 25% までの条件では、濃度は計測下限値以下であった。一方で、液体アンモニア直接噴霧燃焼では、混焼率 10% 付近から微量の N_2O の排出が確認され、混焼率 70% まで単調に増加する傾向が確認された。混焼率が低い条件で液体アンモニア直接噴霧燃焼の N_2O 排出量がアンモニアガス燃焼よりも大きくなるのは、燃焼器内で液体アンモニアが蒸発することにより火炎温度が低下し、 N_2O の生成しやすい火炎温度となる領域があることが原因であると考えられる。今回試験を行なった条件内では、 N_2O 濃度は混焼率 70% の条件で最大となったが、この時の発生 N_2O に伴う温室効果増分は、アンモニア混焼によって削減された二酸化炭素による温室効果減少分と比べると十分に小さいと言え、混焼率 70% 条件において 68% 以上の温室効果ガス削減効果を得られることを確認した。

しかし、前述した未燃 NH_3 の排出と同様に混焼率 70% 以上の条件における N_2O 濃度の増加の程度によっては、100% アンモニア専焼の達成に向け、 N_2O の排出を抑制するような燃焼器の開発が必要となる可能性がある。

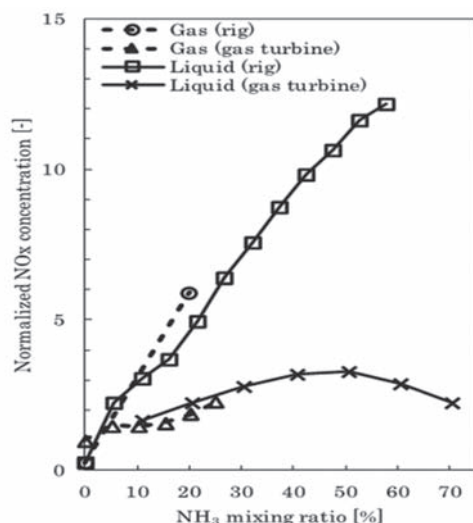


Fig. 13 Normalized NO_x emission with NH₃ co-firing in Gas Turbine⁽⁸⁾

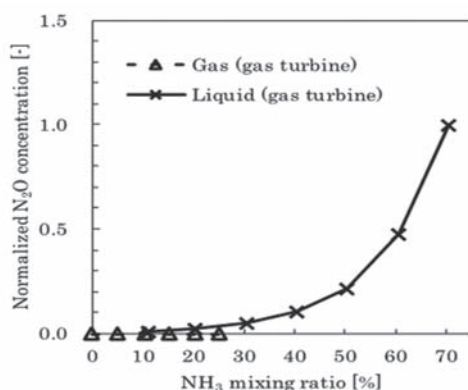


Fig. 14 Normalized N₂O emission with NH₃ co-firing in Gas Turbine⁽⁸⁾

5. 今後の展望

第6次エネルギー基本計画における二酸化炭素削減目標達成のため、現在再生可能エネルギーの利用推進に対し官民一体となって強力に進められている。その一方で、電力系統の安定化のためには、常に電力の需要と供給を一致させる調整が必要不可欠となっている。電気エネルギーは貯めておくことが困難な一方で、再生可能エネルギーはその特性上、その時の気象条件によってその出力が不安定になるという特徴があることから、既存の大型火力発電用ボイラやガスタービンは電力系統安定化のためにはならないものである。石炭火力発電ボイラはその経済性および燃料資源の安定性に秀でており、ガ

スタービン火力は電力負荷の変動分を即時調整できる大きな利点を有する。これら既存の発電所において、その利点を残しつついかに温室効果ガス排出量の削減を可能とするか、そのような技術が天然資源に乏しい日本においては求められているのではない。

その一つのアプローチとして、余剰となった再生可能エネルギーを用いて水素を製造し、アンモニアという形に変えて輸送・貯蔵を行ない、既設の大型発電インフラでそれを燃料として使用する技術は、二酸化炭素排出量の削減と電力の安定供給の双方を実現できる可能性を有している。今後は燃料アンモニアの利用拡大技術の更なる開発と、アンモニアバリューチェーンの構築を通して持続可能な社会の実現に向け、鋭意取り組む所存である。

謝辞

これらの成果は、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）ならびに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）の委託を受け得られたものである。ここに記し謝意を表したい。

参考文献

- (1) 経済産業省 資源エネルギー庁エネルギー基本計画の概要
<<https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005-2.pdf>>
- (2) 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」終了報告書ウェブサイト
<<https://www.jst.go.jp/sip/k04.html>>
- (3) 藤森俊郎 第58回燃焼シンポジウム（2020）基調講演資料。
- (4) 第24回 動力・エネルギー技術シンポジウム 講演論文集（2019），No. D123。
- (5) 株式会社JERA プレスリリース
<https://www.jera.co.jp/information/20210524_677>
- (6) 伊藤慎太郎，内田正宏，藤森俊郎，小林秀昭 日本燃焼学会誌 Vol. 61, NO. 198, pp. 368-375。
- (7) 伊藤慎太郎，内田正宏，須田俊之，藤森俊郎，2MW級ガスタービンによるアンモニア/天然ガス混焼発電実証試験，日本燃焼学会誌 Vol. 61, NO. 198（2019）pp. 289-292。
- (8) 内田正宏，伊藤慎太郎，須田俊之 2MW級ガスタービンにおける液体アンモニア直接噴霧燃焼技術の開発，日本ガスタービン学会誌 Vol. 49, NO. 3（2021），pp. 160-164。

特集：2050年脱炭素社会実現に向けた今後のアプローチ

脱炭素社会を目指した水素・アンモニアガスタービンの開発について Development of Hydrogen / Ammonia Gas Turbine for a Carbon-free society

野勢 正和^{*1}
NOSE Masakazu

長橋 裕明^{*1}
NAGAHASHI Hiroaki

萩田 達哉^{*1}
HAGITA Tatsuya

盛下 光寛^{*1}
MORISHITA Mitsuhiro

中村 聡介^{*1}
NAKAMURA Sosuke

由里 雅則^{*1}
YURI Masanori

キーワード：ガスタービン、水素、アンモニア、燃焼器、コンバインドサイクル

Key Words : Gas Turbine, Hydrogen, Ammonia, Combustor, Combined Cycle

1. 緒言

脱炭素社会を目指した様々な取組みが世界中で進められている。EUは地球環境にとって企業の経済活動が持続可能であるかを判断する仕組み「EUタクソノミー」を定めた。天然ガスによる発電は、脱炭素の移行期に必要な経済活動としてタクソノミーに含まれるものの、要件を満たすには、再生可能エネルギーへの代替や他の脱炭素化技術との併用が求められる。また、日本では、政府発表の「2050年カーボンニュートラル宣言」を受け、第6次エネルギー基本計画が策定された。国内の温室効果ガス排出の8割以上を占めるエネルギー分野の取組みとして、一次エネルギーの主な変換先である電力については2030年度に電源構成の1%を水素・アンモニア発電でまかなう目標が設定された⁽¹⁾。

水素はカーボンフリーな燃料として、化石燃料を代替あるいは補完するために最も有効であると考えられる。それは現在化石燃料を利用している分野で使われている設備やシステムを活用しながらカーボンフリーに転換できる可能性が高いからである。国内外に多く存在する既存のガス火力発電インフラの活用、例えば、既設のガス配管から送られる天然ガスを熱分解して水素を製造（いわゆるターコイズ水素）、分解に必要な熱はガスタービンの排熱を利用することや、製造された水素をガスタービンで天然ガスと混焼、または水素専焼することなどが考えられる。これらは一度に設備投資をする必要がなく、投資コストを抑えた経済合理性の高い水素発電を実現できる可能性がある。

水素の製造から輸送・貯蔵、そして利用も含めたバリューチェーンにおいて大容量・高効率のガスタービン

での水素利用には脱炭素社会実現に向けて大きなメリットがある。（Fig. 1）

- (1) 既設のガスタービン設備を最小限の改造で、低炭素化あるいは脱炭素化することが可能なことである。ガスタービン用燃焼器と燃料供給系統以外の大規模なリニューアルを必要とせず投資コストを抑制でき、カーボンニュートラル社会へのスムーズなシフトを促すことが期待される。
- (2) 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多様な水素キャリアに対応できることや、低純度な水素の利用が可能であり、水素コスト低減に貢献できる。
- (3) 出力50万kWクラスの大型水素専焼ガスタービン（100%水素専焼）は1つの発電設備で燃料電池車200万台相当の水素を必要とするため、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も期待される。

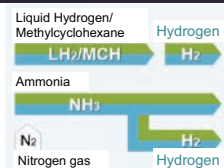
Minimal investment



Power providers can transition to low-CO₂ or CO₂-free systems with minimal modifications*.

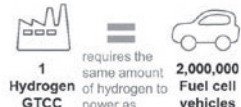
*Detailed scope is subject to plant specification

Carrier agnostic



Hydrogen Gas Turbines can be fueled with H₂ transported by any type of carrier as well as less pure forms of H₂ – thus contributing to significant cost reduction.

Driver of demand



Increasing demand for hydrogen will drive infrastructure expansion and further cost reduction.

Flexible operation

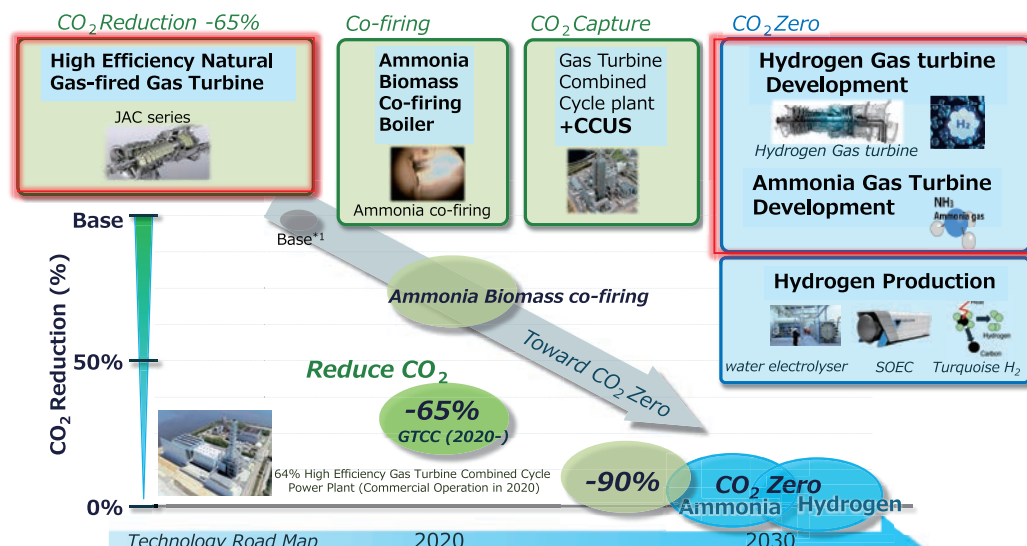


Gas Turbines can address gaps in power demand and renewable supply as a flexible energy source.

Fig. 1 Environmental and economic advantages of hydrogen gas turbines

原稿受付 2022年9月27日

*1 三菱重工業(株) エナジードメイン
エナジートランジション&パワー事業本部
GTCC事業部 ガスタービン技術部
〒676-8686 高砂市新井町新浜 2-1-1

Fig. 2 CO₂ zero power generation technology roadmap

- (4) 今後も増大する再エネの急激な供給力変動（気象・季節）に追従できるガスタービンの高い起動・負荷変化特性を生かし、水素ガスタービンになっても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。

三菱重工業株式会社（以下、当社）は発電分野においてFig. 2に示すように、JAC形ガスタービンの開発による高効率化・大容量化を進めて二酸化炭素（CO₂）削減を実現してきた。また、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も行っている。更に一層のCO₂排出削減を進めるために、CO₂回収（CCUS）と組み合わせたカーボンリサイクルの導入、そして、CO₂を排出しない水素（H₂）やアンモニア（NH₃）を利用したガスタービン複合発電（GTCC）の開発を進めている。これまで大型ガスタービンで天然ガスに水素を30vol%混ぜて使用できるガスタービン燃焼器の開発を完了し⁽²⁾、現在50vol%まで混焼割合を拡げている。また、中小型ガスタービン用の燃焼器にて水素100%専焼（ドライ）の燃焼試験を実施し、得られた知見を大型ガスタービン用の燃焼器にも展開している。これらの開発を進めていく中で、2022年6月には米国の高効率・大型GTCC（M501G形天然ガス焼き）発電プラントにて水素20vol%混焼の実証試験に成功した⁽³⁾。実機を使用した水素混合燃料による燃焼実証試験としては最大規模のもので、水素ガスタービンの実用化に向けた非常に大きな一歩となった。

本稿では、水素やアンモニアを利用した当社の発電用ガスタービンの開発・検証状況と、実用化に向けたスケジュールを中心に脱炭素社会実現に向けた取組みを紹介する。

2. 水素焼き燃焼器の開発

水素焼きガスタービンは、既設の天然ガス焼きガスタービンの燃焼器と燃料供給系統以外の大規模なリニューアルを必要としない。その為、開発のキーポイントは水素焼きに対応できる燃焼技術と燃焼器となる。

Fig. 3に水素焼き用燃焼器の開発のベースとなる当社ガスタービン用燃焼器の燃焼方式と特徴を示す。拡散燃焼器は、燃料と燃焼用の空気を別々に燃焼器内に噴射する。予混合燃焼方式に比べて燃焼器内の火炎温度が局所的に高くなり窒素酸化物（NO_x）排出量が増えるため、蒸気・水噴射によるNO_x低減対策が必要になる。一方で、比較的、安定燃焼範囲が広く、燃料性状変動への許容範囲は大きい。

予混合燃焼器は、燃料と空気を予め混合して燃焼器内に投入する。この方式は、拡散燃焼方式に比べて燃焼器内の局所火炎温度を低減できるため、蒸気・水噴射によるNO_x低減手法を用いることなく、サイクル効率の低下もない。一方で、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、未燃分も排出しやすい傾向がある。マルチノズルタイプの予混合

Combustor Type	Diffusion Combustor	Premixed Combustor (DLN)	
		Multi-Nozzle	Multi-cluster
Combustion method			
NO _x	△ Water injection required due to High NO _x	○ Low NO _x without water	○ Low NO _x without water
Flashback	○ Low risk of flashback due to diffusion flame	△ High risk of flashback due to large flame propagation space	○ Low risk of flashback due to small flame propagation space
Cycle Efficiency	△ efficiency drop occurs due to water injection	○ No efficiency drop due to no water	○ No efficiency drop due to no water

Fig. 3 Combustion method and characteristics of MHI's gas turbine combustor

燃焼器は、予混合方式の燃料ノズルと8本と、それらの中心に燃焼の安定化を図るパイロット火炎用の燃料ノズル1本を有する。ノズル部には旋回翼（スワラー）が設置され、スワラーを通過した空気とノズルから噴射された燃料がより均一に混合されることで、燃焼器内の火炎温度がより低減され、低NO_x燃焼が可能である。マルチクラスタタイプの予混合燃焼器は、マルチノズルタイプの燃料ノズルに対して、より多くのノズルを有する。マルチノズルタイプのようなスワラーは無いが、1本あたりの燃料ノズルを小さくして燃料と空気をより小さなスケールで混合させ火炎が分散することで、高い逆火耐性と低NO_x燃焼が両立できる。

水素は天然ガスと比較して燃焼速度が速い特性がある。そのため、予混合燃焼器にて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逆火の発生リスクが高くなる。逆火により火炎が予混合ノズルの上流に遡上し、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用の燃焼器は逆火発生防止に向けた改良を中心に、低NO_x化や安定燃焼化を図る必要がある。Fig. 4に、当社の水素混焼・専焼に対応する水素ガスタービン用燃焼器の概要を示すとともに、次項に開発状況について述べる。

















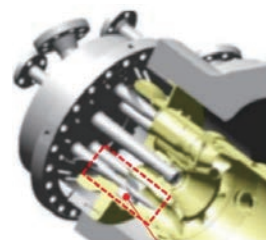
		Combustor Type	Low Nox Tech.	Turbine inlet temperature	H ₂ density (Vol %)
Large flame Gas turbines	Ready	Type 1: Diffusion 	N2 dilution, Water/ Steam injection	1200 ~1400°C class	
	Under development	Type 2: Pre-Mix (DLN) 	Dry	1650°C class	
		Type 3: Multi-Cluster (DLN) 	Dry	1650°C class	
Small & Middle flame Gas Turbines	Ready	H-25 Diffusion 	N2 dilution, Water/ Steam injection	1260 ~1300°C class	
	Under development	H-25 Multi-Cluster 	Dry	1300°C class	
			Dry	1300°C class	
	Ready	H-100 Pre-Mix 	Dry	1380°C class	
	Under development	H-100 Multi-Cluster 	Dry	1300°C class	

Fig. 4 Hydrogen-fired combustor

2.1 水素混焼用Dry Low NO_x (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ぐことを目的として、従来のDLN燃焼器をベースとして開発された水素混焼燃焼器の概要をFig. 5に示す。圧縮機から燃焼器内部に供給された空気は、旋回翼（スワラー）を通過して、旋回流となる。燃料はスワラーペーンの表面に

設けられた小さな孔より供給され、旋回流により周囲の空気と急速に混合される。一方、旋回流の中心部には、流速の低い領域（以下、渦芯）が存在し、ここを火炎が遡上することで逆火が発生すると考えられる。そこで新型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上昇させ、渦芯の低流速領域を補うことで逆火の発生を防止している。



Premixing nozzles (8 nozzles)

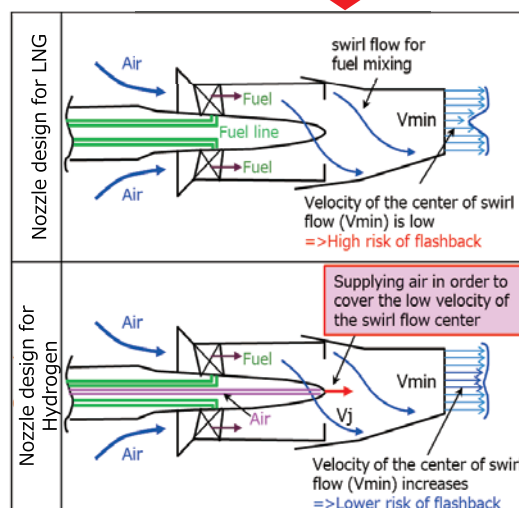


Fig. 5 Outline of Combustor for hydrogen co-firing

2.1.1 水素30vol%混焼の燃焼試験 天然ガスと水素の混焼がNO_x、燃焼振動といった燃焼特性に与える影響を確認するため、実機ガスタービン相当の運転条件にて、フルスケールの水素混焼燃焼器1本を使用し、実機圧力燃焼試験（以下、実圧燃焼試験）を実施した。タービン入口温度1600℃級ガスタービンの定格負荷相当の条件における、燃料中の水素混合割合に対するNO_xの変化をFig. 6に示す。水素混合割合の増加に伴って、NO_x

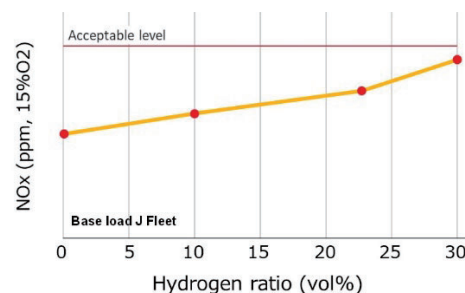


Fig. 6 Relationship between hydrogen concentration in fuel and NO_x concentration

が僅かに上昇する傾向が確認された。これは、燃料中に水素が混合することにより、燃焼速度が上昇して燃焼器中の火炎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。しかしながら、水素30vol%を混合した条件においても、NO_xは許容値以下で運用可能な範囲内にあることが確認された。また、燃焼振動の圧力レベルは水素混合割合の変化に対して、あまり影響を受けないことが確認された。逆火についても水素30vol%混焼において確認されなかった。以上の結果より、逆火の発生やNO_x、燃焼振動の著しい上昇を伴わずに運用できる用途を得た。

2.1.2 水素50vol%混焼の燃焼試験 更に水素混焼率を増加させるための施策として、Fig. 7に示すように、燃焼器中央に配置されたパイロット火炎用の燃料ノズルをフラッシュバックのリスクを伴わない拡散燃焼方式とし、そこから水素100vol%を投入する方式を検討した。予混合ノズル（8本）からは水素30vol%の燃料を投入して、燃焼器全体で合わせて50vol%水素まで水素混焼率を増加させる。また、拡散燃焼部分でのNO_x生成量の増加は、当該部に水を噴射することで抑制可能である。この燃焼器を試験体として、実圧燃焼試験を実施した。NO_xは許容値以下で運用可能な範囲内であり（Fig. 8）、逆火の発生や燃焼振動の著しい上昇を伴わずに安定に運用できることを確認した。この試験で50vol%水素混焼の運用が可能であることが確認されたことで、EUタクソミーで設定されている2030年末までに建設が認められたガス火力発電事業についてCO₂排出量270[g/kWh]を超えない⁽⁴⁾用途を得た。

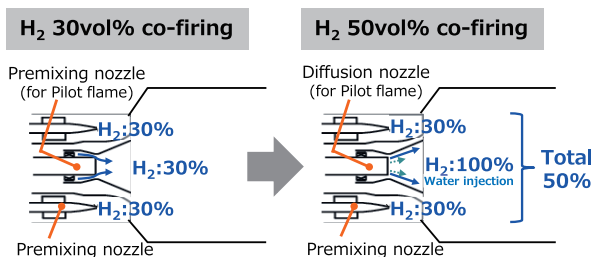
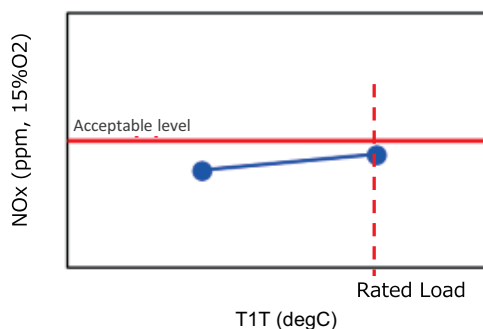


Fig. 7 Combustor for 50vol% hydrogen co-firing

Fig. 8 Relationship between turbine inlet temperature and NO_x concentration

2.2 水素専焼用マルチクラスタ燃焼器

水素が更に高濃度になると、前項のマルチノズルタイプの水素混焼燃焼器に採用される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発生する逆火のリスクが更に高くなる。そこで旋回流を利用せず、より小さなスケールで空気と水素を混合できる混合方式が、逆火への耐性があると考えられる。Fig. 9に示す水素専焼燃焼器は、大崎クールジェンに適用されているIGCC用マルチクラスタ燃焼器⁽⁵⁾をベースとして開発を進めている。

中小型H-25ガスタービン向けに開発中の水素専焼用マルチクラスタ燃焼器1本を用いたフルスケールの実圧燃焼試験を実施した。試験では、実機運転を模擬した条件のもと、水素100%専焼で、燃焼温度の低い状態から徐々に負荷を上昇させた。Fig. 10に示すようにNO_x値は負荷上昇とともに徐々に増加するが、途中、燃焼振動レベルの急激な上昇や逆火の発生は無く、定格負荷相当の燃焼温度に到達できた。引き続き、実機検証に向けて開発を進めるとともに、得られた知見、技術を大型ガスタービン向けマルチクラスタ燃焼器にも展開中である。

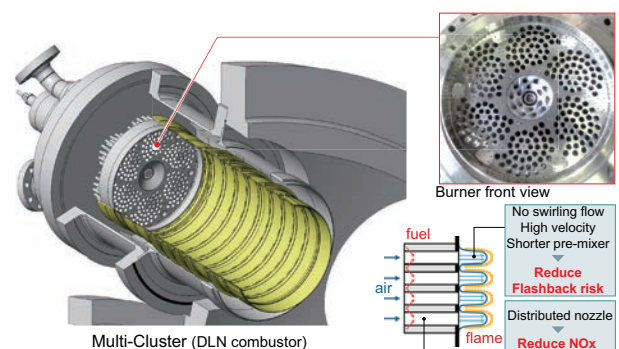
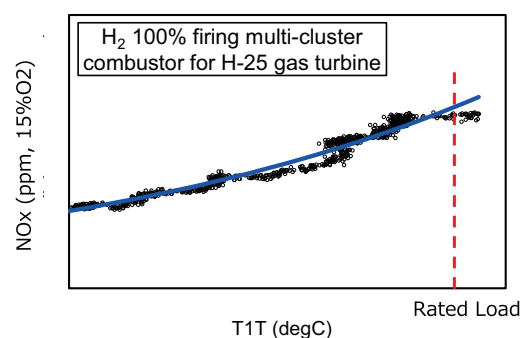


Fig. 9 Outline of multi-cluster combustor

Fig. 10 Relationship between turbine inlet temperature and NO_x concentration

2.3 拡散燃焼器

当社は、1970年代からコージェネレーション市場向けに水素リッチ燃料を扱う小型から中型のガスタービンを多く手掛けている。採用される拡散燃焼器（Fig. 11）は、オフガス（製油プラント等で発生する排ガス）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（World Energy NET WORK（WE-NET））プロジェクトへの参画の際に、水素専焼による燃焼試験にも成功している。



Fig. 11 Diffusion combustor that hydrogen fired is possible

3. アンモニアガスタービン

水素の大量輸送・貯蔵には課題があり、水素のバリューチェーンについては、パイプラインなどガスの大規模インフラが利用可能な欧米での実用化が先行する可能性がある。翻って日本国内で水素社会を実現するためには、アンモニア（ NH_3 ）の活用も有効な手段と考えられる。水素を運搬・貯蔵するためのキャリアの中で、アンモニアは液体水素やメチルシクロヘキサンに比べて体積あたりの水素密度が大きく、水素を効率良く運搬・貯蔵できる。また、液化石油ガスなどの既存インフラの転用が可能であり、ハンドリングに優位な点がある。更に、カーボンフリーな燃料として直接燃焼することも可能であることから、発電設備へ早期に導入することにより、将来のカーボンフリー燃料としての活用が期待される。当社ではFig. 12に示すアンモニアを利用したガスタービンシステムの開発に取り組んでいる。

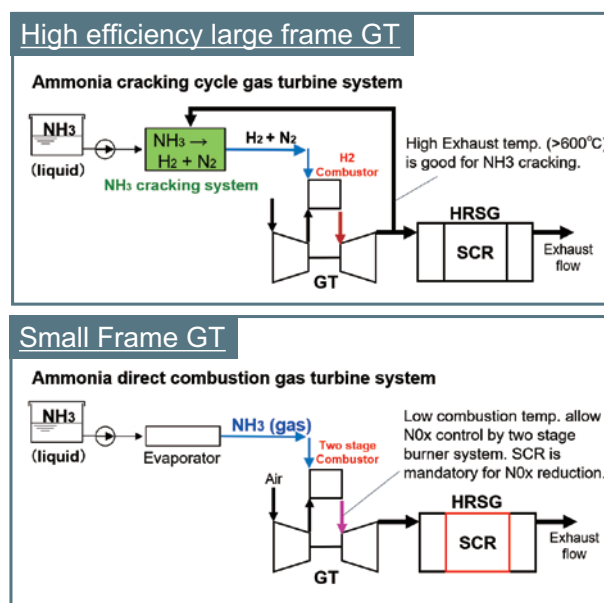


Fig. 12 Ammonia fueled gas turbine

3.1 アンモニア直接燃焼ガスタービンシステム

当社のH-25形ガスタービン（出力4万kW級）を対象に、ガスタービン発電の燃料としてアンモニアを専焼できる中小型ガスタービンシステムの開発に着手している。アンモニア（ NH_3 ）の直接燃焼では、燃焼速度が天然ガスの主成分であるメタンの約1/5と遅いため、燃焼が不安定になりやすいことや、燃料中の窒素（N）が燃焼により酸化することで大量に発生する NO_x の課題があり、 NO_x 排出量を低減する燃焼器の開発と高効率の脱硝装置を組み合わせたガスタービンシステムを構築し、実用化を目指している。

燃焼器の開発では、拡散燃焼器をベースとしたリッチ・リーン二段燃焼方式の検討を進めている（Fig. 13）。燃焼器の上流域で燃料アンモニアと空気（一次燃焼空気）を化学量論（当量比 $\phi = 1$ ）以上の燃料過濃の状態に燃焼させた後、二次燃焼空気との急速混合により即座に希薄燃焼の状態に移行させて NO_x の発生を抑える。フルスケールの燃焼器1本を使用するアンモニアの燃焼試験装置（Fig. 14）を用意し、試作燃焼器の燃焼安定性、 NO_x 排出量、アンモニア燃料切替え時の特性などを試験で確認しながら、開発を進めている。

過去、このような大出力ガスタービンにアンモニア直接燃焼を適用した例はなく、大規模な水素・アンモニアの需要を喚起してカーボンフリーに貢献できると考える。

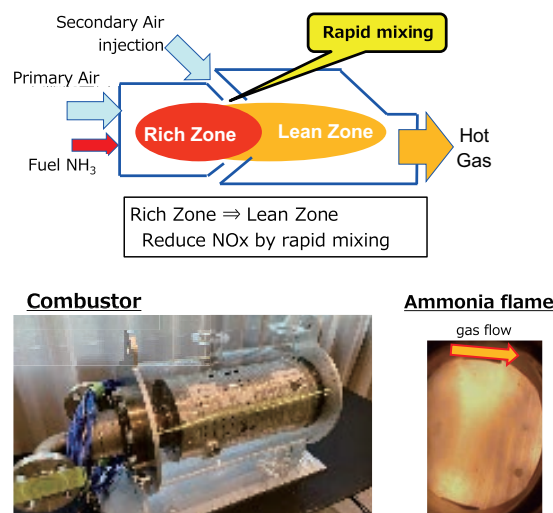


Fig. 13 Rich/Lean 2-stage combustor for ammonia direct combustion gas turbine system



Fig. 14 Combustion test facility

3.2 アンモニア分解サイクルガスタービンシステム

中小型ガスタービンよりも燃焼ガス温度の高い大型ガスタービンでアンモニアを燃焼させる際は、燃料由来のNO_xが更に大量に発生すること、先述のリッチ・リーン二段燃焼方式では燃焼器の大型化や複雑化など設計上の制約や技術課題が多いことを考慮する必要がある。そこで、当社の大型ガスタービンではガスタービンの排熱を利用してアンモニアを水素と窒素に分解したものを開発済みの水素混焼用燃焼器、又は、開発中の水素専焼燃焼器により燃焼させるシステムの検討を進めている。

アンモニア分解ガスの燃焼では、アンモニア分解時に若干量残留するアンモニアの一部が燃焼器内でフェューエルNO_xとして変換され、燃焼器内で元々生成されるサーマルNO_xに上乗せされて排出されるものと予想される。そこで、NO_xの排出規制値を満足するための残留アンモニアによるNO_x増加量を把握する目的で、天然ガスとアンモニア分解ガスの混合燃料（燃料組成：水素20vol%、窒素6.7vol%、天然ガス73.3vol%、微量のアンモニア）を1650℃級の水素混焼用ガスタービン燃焼にて混焼させる実圧燃焼試験を実施した。Fig. 15に、タービン入口温度1650℃（定格条件）における燃料中のアンモニア濃度と排ガス中のNO_x濃度の関係を示す。アンモニア濃度が増加するとともにNO_x濃度が線形で増加する結果となり（図中●印）、アンモニアのNO_xへの転換率（図中CR: Conversion ratio）は、約90%であった。また、逆火の発生や燃焼振動の著しい上昇を伴わずに安定に運用できることを確認した。

本システムの実用化に向けて、引き続き、主要機器であるアンモニアの分解装置の検討、発電システムとの熱の授受やシステム全体の運用性の検討を進めている。

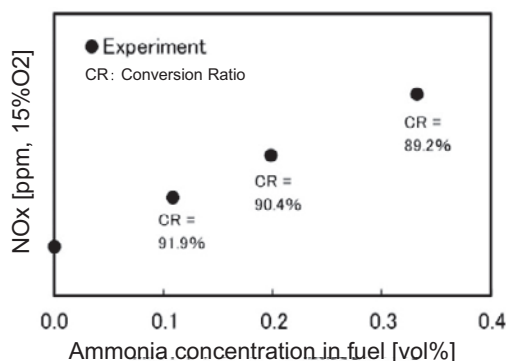


Fig. 15 Relationship between ammonia concentration in fuel and NO_x concentration

4. 実用化に向けた実証スケジュール

水素発電の実用化に向けて、今後、要素開発の結果をもとに実機ガスタービンを用いた実証が進められる。当社はガスタービンの開発、設計、製造、実証を高砂製作所（兵庫県高砂市）にて実施している。基本設計の段階で各要素の検証試験を実施し、結果を詳細設計に反映、最終的に実機を用いた実証を行う開発サイクルを同一工

場内で実施することで、迅速かつ、信頼性の高い製品の実用化を進めてきた。水素ガスタービンの開発・実証に関連して、当社は世界初の水素関連技術の実証設備である「高砂水素パーク」(Fig. 16)を高砂製作所に整備し、2023年から運用を開始する。既存のGTCC実証設備を拠点に水素製造、貯蔵設備を追加することで、次世代水素製造技術から水素ガスタービンによる発電までの一貫したプロセスの実証試験が可能となる。同設備内の水素を利用して大型ガスタービン水素混焼（30vol%）の実証、またH-25ガスタービンを用いた中小型ガスタービン水素専焼の実証を行う。2025年には米国プロジェクトを含めた水素混焼（30vol%）の実用化を開始、更に大型ガスタービンは2030年の水素専焼を目指す。アンモニア焚きについても、同様に中小型H-25ガスタービンで実証を行い、実用化を目指す。

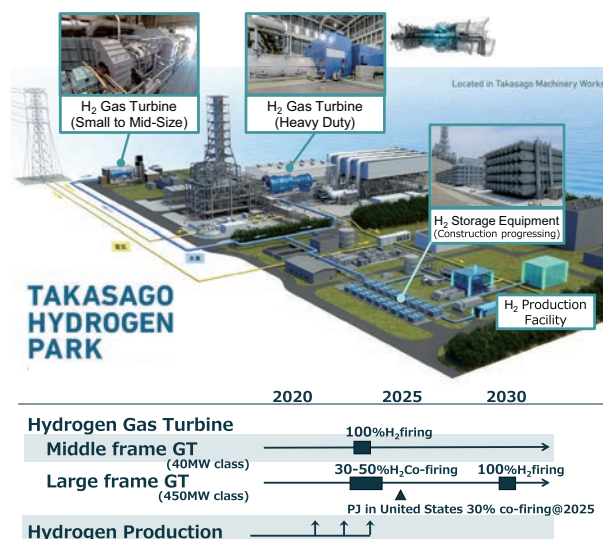


Fig. 16 Takasago Hydrogen Park and verification test schedule for commercialization

5. 水素ガスタービンプロジェクト

当社は水素焚きガスタービンを通して国内外で水素の利活用が先行する地域での事業開発などに参画し、社外との協業を推進しながら製品の実用化を目指している。

ここでは米国における水素焚きガスタービンプロジェクトを2件紹介する。

5.1 米国マクドノフ・アトキンソン発電所での水素燃料混焼実証プロジェクト

当社グループの三菱パワーアメリカ（当社の米国現地法人）は、2022年6月に米国の電力会社ジョージア・パワー（Georgia Power）および世界有数の独立した非営利エネルギー研究開発組織である電力研究所（The Electric Power Research Institute : EPRI）とともに、Fig. 17に示すジョージア州のマクドノフ・アトキンソン発電所で、当社納入のM501G形天然ガス焚きガスタービンを使い、部分負荷および全負荷の両条件下において、水素と天然ガスの混合燃料による燃焼実証試験に成

功した。今回の実証試験は、ジョージア・パワーにおける、未来のエネルギーグリッドを構築して運営発電施設全体のCO₂排出削減を強化する取り組みの一環として、当社との協力により臨んだものである。高効率・大型GTCC発電設備で世界で初めて行われた20vol%の水素混合燃料による燃焼実証であり、この種の試験としては史上最大規模のものになる。20vol%の水素混合燃料を使うことで、天然ガス燃焼時に比べて、タービン入口温度・エミッション・メンテナンス間隔の影響を及ぼさずにCO₂排出量は約7%削減される。実証試験は当社のDLNマルチノズル燃焼器が使用され、以下の項目を確認した。

- (1) ガスタービンの全負荷領域で水素混合比率20vol%の運転を達成した。
- (2) 水素混焼により部分負荷で発生する一酸化炭素(CO)の排出量が低減した。これにより燃焼効率が改善して、エミッション規定を遵守しつつ運転できる最低負荷を10% (絶対値) 下げる効果を確認した。
- (3) 水素混合比率20vol%の運転でも天然ガスの運転と

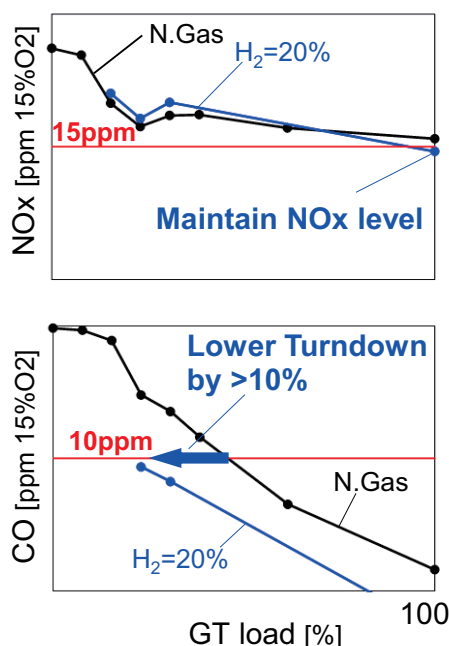


Fig. 17 The world's largest hydrogen co-firing verification at McDonough-Atkinson power plant

同じNO_xレベルを維持できることを確認した。

- (4) 天然ガスと水素混合燃料の切替え時、特に水素を遮断する際にタービン入口温度の上昇なく安全に運用できる運転制御ロジックの検証に成功した。

当社はこのプロジェクトにおいてエンジニアリング、計画立案、水素混合燃焼装置・機器の提供、運転制御、試運転ならびにリスク管理を担当した。本プロジェクトは、当社がこれまで培ってきた水素燃焼の経験に加え、100vol%水素専焼に向けた技術開発をたゆまず推進している成果の結集であり、水素ガスタービンの実用化に向けた非常に大きな一歩となった。

5.2 米国インターマウンテンGTCC発電プロジェクト

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発電プロジェクトにて当社は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が計画されている。本プロジェクトは、石炭火力発電所の設備更新により建設されるもので、水素混焼率30vol%のGTCCへの更新により、最大で年間460万トンのCO₂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生可能エネルギー由来電力による先進的クリーンエネルギー貯蔵事業からの活用が期待されている。この事業はFig. 18に示すように、①米国西海岸の安価な再生電力で水電解によりグリーン水素を製造し、②この地域に豊富に存在する地下岩塩空洞にそのグリーン水素を貯蔵、③電力必要時に岩塩空洞よりグリーン水素を取り出しGTCCで発電する。発電された電力は、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、及びユタ州に幅広く供給され、この地域における水素のバリューチェーンを構築するものとなる。

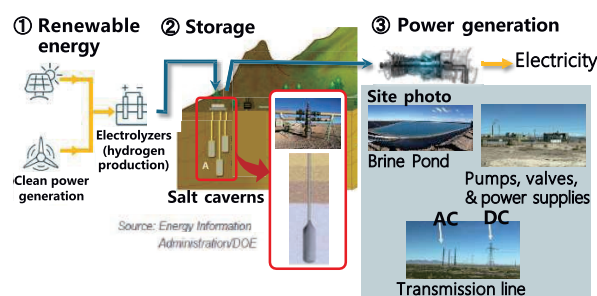


Fig. 18 Intermountain power plant project

6. 結言

本稿では、水素・アンモニアを利用した当社の発電用ガスタービンの開発・検証状況と、実用化へのスケジュールを中心に脱炭素社会に向けた取組みを紹介した。

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。引き続き、水素専焼方式の開発を進めるとともに、実用化に向けて実機の実証に

取り組む。また、アンモニアを利用した直接燃焼ガスタービンシステムとアンモニア分解サイクルガスタービンシステムについても開発を進め、カーボンフリー発電システムのラインアップを拡充する。

当社はCO₂削減に貢献できる水素・アンモニアガスタービンの開発・実用化を通して世界中のパートナーと協調し、グローバル社会の脱炭素実現に向けて一層取り組む。

謝辞

本稿の第2章に記載した内容は、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）の助成事業（水素社会構築技術開発事業：JPNP14026）の成果の一部である。また、第3章に記載したアンモニア分解ガスによるGTCCの開発は、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）の助成事業（水素社会構築技術開発事業：JPNP14026）により進められた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- (1) 資源エネルギー庁, 2030年度におけるエネルギー需給の見通し（関連資料）, <https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20211022_03.pdf>（参照日 2022年9月1日）.
- (2) 井上ほか, 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 (2018).
- (3) 三菱重工業株式会社, プレスリリース, 三菱重工, ジョージア・パワー, 米国電力研究所が世界最大の水素燃料混焼実証 マクドノフ・アトキンソン発電所のGTCC発電設備で成功, (2022), <<https://www.mhi.com/jp/news/220615.html>>（参照日 2022年9月1日）.
- (4) 電力中央研究所, SERC21005, EUにおける「タクソノミー」の動向, <<https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/discussion/download/21005dp.pdf>>（参照日 2022年9月1日）.
- (5) 吉田ほか, 日立におけるガスタービン燃焼器の開発について, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 41, No. 1, (2013), pp. 59-64.

特集：2050年脱炭素社会実現に向けた今後のアプローチ

VPPの活用について

Practical Use Case of VPP



山崎 裕之^{*1}
YAMAZAKI Hiroyuki



恩田 徳雄^{*1}
ONDA Norio



青山 光正^{*1}
AOYAMA Mitsumasa



丸山 敏春^{*1}
MARUYAMA Toshiharu

キーワード：バーチャルパワープラント、デマンドリスポンス

Key Words：Virtual Power Plant, Demand Response

1. VPPとは

これまでの電力システムは、最大需要に合わせて発電設備を建設するとともに、需要の変動に合わせて火力設備の発停止や出力増減を行うことで、安定供給を維持してきた。東日本大震災以降、再生可能エネルギーが大量に導入され、経年火力設備の休廃止も進んだことにより電力の需給バランス維持は益々困難を極める状況にあるが、ガスタービン発電設備による安定供給への貢献は議論の余地もない。

一方、震災時には多くの発電設備が被災し、節電など需要側の取り組みの重要性が認識された。さらに、厳気象期における燃料在庫低下リスクや世界的な燃料価格高騰リスクの高まりにより、非常時だけでなく定期的に需要側をコントロールする取り組みの重要性が再認識させられたところである。

また、レジリエンスの観点から、工場や家庭の太陽光発電、家庭用燃料電池などのコージェネレーション、蓄電池、電気自動車など、需要家側に導入される分散型エネルギーリソースの普及が進んでいる。

このような背景から、大規模発電所に依存した従来の電力システムが見直されるとともに、需要家側のエネルギーリソースを活用する仕組みの構築が進められている。発電設備、蓄電池、電気自動車など工場や家庭が保有するエネルギーリソースを、IoTなどの情報技術を用いて束ねて遠隔から統合制御することで、電力の需給バランス調整に活用することができる（Fig. 1）。一つ一つのリソースは小さいが、あたかも一つの発電所のように機能させることから、「仮想発電所：バーチャルパワープラント（VPP）」と呼ばれている。VPPは、電力不足時

の供給や太陽光発電など余剰電力の吸収などの機能として活躍が期待されている。

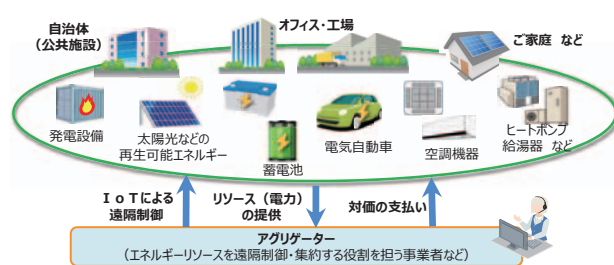


Fig. 1 Schematic view of Virtual Power Plant

需要家側エネルギーリソースの保有者もしくは第三者が、需要家側エネルギーリソースを制御することで、電力需要パターンを変化させることをデマンドリスポンス（以下、DRという）という。DRは需要パターンによって、需要を抑制させる「下げDR」と需要を増加させる「上げDR」の二つに区分される。

2. VPP・DRの活用

2.1 発電コストの削減

VPP・DRにより、年間のピーク需要を下げたり、別の時間帯に移したりすることで、電力負荷の平準化が可能となる。Fig. 2 に年間の電力需要をkWの大きい順に左から並べたデュレーションカーブを示す（電力広域的運営推進機関公開データ⁽¹⁾より作成）。電力需要のピーク時間は年間で見るとごくわずかであるが、このピーク需要を満たせるように発電設備は待機している。このピーク需要を抑制できれば発電設備の維持費や設備投資を抑制することができる。2020年度（2024年度向け）から入札が始まった容量市場では、需要抑制を行う下げDR（ネガワット）も発電（ポジワット）と同等の価値として入札に参加している。2025年度向けのオークショ

原稿受付 2022年9月9日

*1 東北電力(株) 事業創出部門
クリーンエネルギーサービユニット
〒981-8550 仙台市青葉区本町一丁目7番1号

ンでは火力電源等を含む全国の落札容量のうち、約3% (475kW) がDRを含む発動指令電源 (単体の期待容量が1,000kW未満の電源や安定的供給力を提供できない自家発・DRなどを単独または組み合わせることで、期待容量が1,000kW以上の供給力を提供するもの) が落札している。

また、ピーク時間帯では燃料費が高い電源が稼働しているため、ピーク需要を抑えることで、ピーク電源の焼き増しコストを抑えることができ、より経済的なエネルギー利用が可能となる。

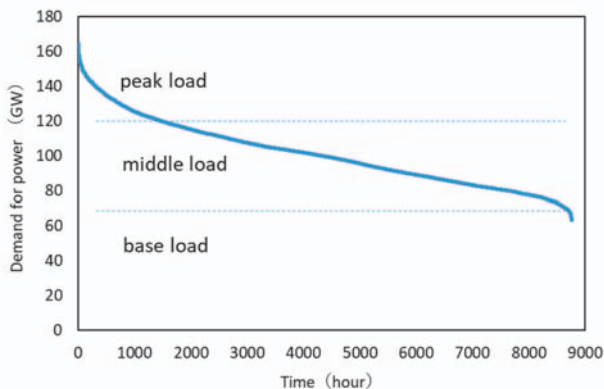


Fig. 2 Load duration curve in 2021fy

2.2 再生可能エネルギーの利用拡大

太陽光や風力など再生可能エネルギーは、天候により発電出力が変動するため、火力や揚水など他の電源の出力を調整することで変動を吸収し、需給を一致させている。特に、太陽光が出る昼間帯は、火力発電設備の最低負荷運転や昼間帯のDSS、揚水発電設備の揚水運転による需要の創出が行われているが、発電量が需要を上回るケースが増えたため、太陽光の出力を抑制することで需給バランスが維持されている (Fig. 3)。

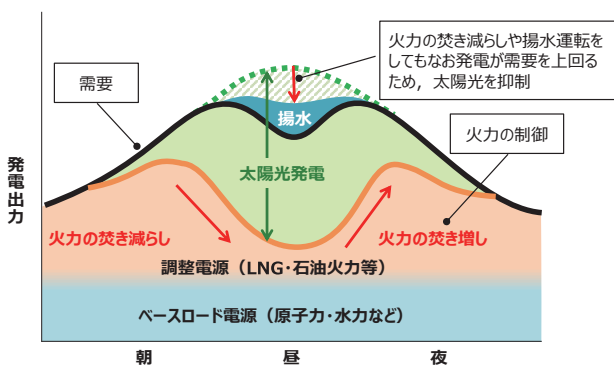


Fig. 3 Daily load and generation curve

再エネの出力制御は、太陽光の出力が大きく、需要が低い春や秋に実施されることが多い。このような時期にVPP・DRにより需要を創出することができれば、出力制御が回避でき、再生可能エネルギーで発電した電力を

有効に活用することができる。具体的には、蓄電池や家庭にあるエコキュートなど需要家側のエネルギーリソースを制御し、当初の計画を上回る需要を創出することにより、需要と供給のバランスを保ち、より多くの再生可能エネルギーの導入に貢献することが期待される。

2.3 ネガワット取引

VPP・DRを用いて、一般送配電事業者、小売電気事業者、需要家、再生可能エネルギー発電事業者などに対し、調整力、インバランス回避、電力料金削減、出力抑制回避などの各種サービスを提供する事業のことをエネルギー・リソース・アグリゲーション・ビジネス (ERAB: Energy Resource Aggregation Businesses)⁽²⁾ という。

Fig. 4にERABの全体イメージを示す。ERABでは「アグリゲーター」と呼ばれる事業者が、需要家のエネルギーリソースや分散型エネルギーリソースを統合制御し、VPP・DRを用いてエネルギーサービスを提供する。なかでも需要家とVPPサービス契約を直接締結してリソース制御を行う事業者を「リソースアグリゲーター (RA)」, リソースアグリゲーターが制御した電力量を束ね、一般送配電事業者や小売電気事業者と直接電力取引を行う事業者を「アグリゲーションコーディネーター (AC)」と呼ぶ。アグリゲーターの中にはACとRAを兼ねる事業者も存在する。

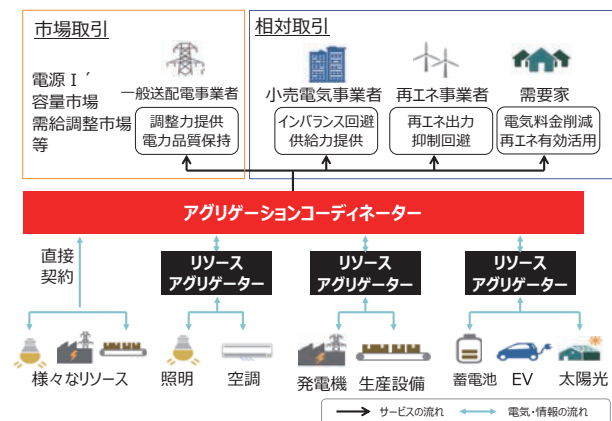


Fig. 4 Overall image of ERAB

2022年4月からは、電気事業法の改正により新たにアグリゲーターライセンス制度が始まり、VPP・DRにより合計出力1,000kW以上の供給力を集約し、小売電気事業者や一般送配電事業者に供給する事業者は「特定卸供給事業者」と位置付けられ、届け出が必要となった。このようなことから、VPP・DRは発電設備と同様に、需給の安定を担う重要な位置づけとして期待されている。

アグリゲーターとの事前の契約に基づき、電気のピーク需要のタイミングで節電を行うインセンティブ型の下げDRのことを「ネガワット取引」という。アグリゲーターとの契約により需要を抑制できる需要家であれば、事

業者に限らず一般家庭もDRに参加することができ、需要家はこの取り組みに参加することにより報酬を手にもすることもできる。

ネガワット取引は、小売電気事業者が計画値同時同量を達成するために需要抑制量を調達するもの（類型1）と、一般送配電事業者が需給調整のために需要抑制量を調達するもの（類型2）に分けられる。

3. 具体的な活用事例

3.1 小売DRの活用（類型1）

小売電気事業者は、計画値同時同量制度のもと、自社の顧客の需要量を予測し、その予測に応じて供給力を調達する義務を負う。計画値同時同量制度の具体的なフローをFig. 5に示す。小売電気事業者は、実需給の1日前に需要を予測し、需要・調達計画を提出するが、実需給までの間、気候等の変化により需要予測の変更は生じうる。予測の変更に応じて供給力の追加調達／削減が行われるが、特に供給力が不足する需給ひっ迫時は、市場価格が高騰し追加調達コストが大きくなるため、DRを有効に活用することで、調達コストの低減が期待される。

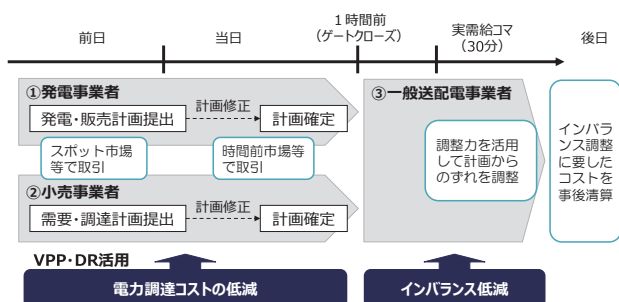


Fig. 5 Schedule for 30 minutes balancing rule

また、小売電気事業者は、需要計画と需要実績を30分ごとに一致させることが求められ、計画と実績の差はインバランス料金で精算される。このため、実績が計画を上回ることが想定される場合には、DRを行うことでインバランスの低減にも貢献できる。

3.2 調整力への活用（類型2）

VPP・DRは、一般送配電事業者が公募する電源I'（厳気象対応調整力（以下電源I'））に2017年度から活用されている。2022年度向けの公募結果では、落札量364万kWのうちVPP・DRは223万kW（約63%）を占め、落札容量全体に占める割合は年々増加している。

Fig. 6に電源I'の発動の流れを示す。発動は実需給の3時間前までに簡易指令システムを通して一般送配電事業者からアグリゲーターに通知される。アグリゲーターは指令を受けて、メール等により需要家に需要抑止依頼を行う。依頼を受けた需要家は、自家用発電機の起動や生産調整、空調の温度調整などにより需要抑制を行う。需要抑制方法は、需要家が直接手動操作するケースや自動制御するケースがあり、需要家側の設備構成や費

用対効果によって選択される。需要家にとっては、既存設備を活用できるほか、基本報酬（kW）と従量報酬（kWh）を得られるメリットがある。



Fig. 6 Instruction flow for power reserve flexibility from TSO

Fig. 7はある需要家に対し電源I'発動した事例を示す。16時～19時（30分×6コマ）にDR発動した結果、基準となるベースライン（発動しない場合に想定される需要）から需要を下げていることが分かる。DRの制御量は、ベースラインと実際の電力量の差分を評価する。ベースラインの設定方法は、ERABガイドライン⁽²⁾に定められており、「High 4 of 5（当日補正あり）」と呼ばれる標準ベースラインが使われていることが多い。

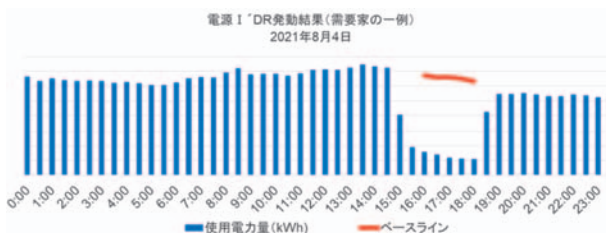


Fig. 7 Example result of Demand Response

電源I'で取引されている容量（kW）と調整力（ΔkW）の価値は、2024年度以降、容量市場（kW）と需給調整市場へ（ΔkW）に完全移行される。VPP・DRはリソースの特性に応じて、各市場での活用が期待される。

3.3 再生可能エネルギーアグリゲーション

再生可能エネルギーは、2012年に固定価格買取（FIT：Feed in Tariff）制度が導入されてから、加速度的に導入が拡大してきた。FIT制度では電源、容量ごとに10～20年間、固定価格で電力を買い取るよう電力会社（2017年度以降は一般送配電会社）に義務付けられたため、再エネ発電事業者はローリスクで事業を行うことができた。一方、電力会社が再エネ電力を買い取ったコストは賦課金として広く国民が負担するため、その負担額が年々増大するなどの課題も認識されるようになった（2012年：0.22円/kWh → 2022年：3.45円/kWh）。2050年カーボンニュートラルに向けて、再エネ導入をさらに進めていくには、こうした負担はできるだけ抑えていく

ことが望まれる。

また、FIT制度は、電力需給や競争によって価格が決まる電力市場からは切り離された制度であり、再エネ発電事業者はいつ発電しても同じ価格で買い取ってもらえるため、電力の需要と供給のバランスを意識する必要はなかった。しかし、今後再エネを主力電源としていくためには、火力など他の電源と同じように、需要と供給のバランスなど電力市場の状況を踏まえた発電を行う自立した電源にしていく必要がある。

そこで、再エネを電力市場に統合するための措置として、2022年4月からはFIP（Feed in Premium）制度が始まり、FIT制度は段階的に終了することとなった。FIP制度では、再エネ事業者自身が電力市場等で電力を売電し、その売電価格に対して一定のプレミアム価格（補填額）が上乘せされる（Fig. 8）。そうすることで、再エネの投資インセンティブを確保するとともに、国民負担の抑制を狙った制度である。FIT制度のような固定買取ではないが、電力市場が高騰した場合には、固定買取以上に収益を得られる機会が存在する。

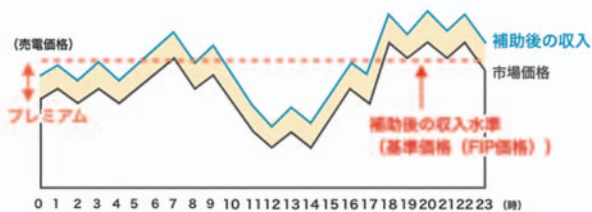


Fig. 8 Revenue with subsidy from FIP

FIP制度では、アグリゲーターや蓄電池を活用した新たなビジネスモデルが期待されている。

アグリゲーターとの連携面では、FIP制度では再エネ発電事業者は発電計画提出や計画値同時同量の義務、インバランスのリスクを負うため、アグリゲーターが発電量予測と計画提出業務、インバランリスクの負担、市場取引の代行を行うことで、再エネ発電事業者の業務負担やリスクを軽減するサービスを提供している（Fig. 9）³⁾。

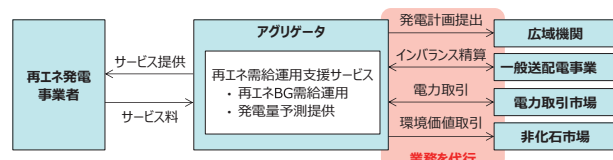


Fig. 9 Business model of Renewable energy aggregation services

また、再エネ電源に蓄電池を併設したビジネスモデルでは、変動する再エネ電力を蓄電池で成形したり、一旦蓄電池に貯めてから時間をずらして放電（発電シフト）することにより、インバランスの低減、市場価格が高い時間帯を狙った売電、再エネ出力制御の回避などが期待される（Fig. 10）。

再エネアグリゲーションサービスによるインバランリスクの負担や、蓄電池併設による再エネ発電の成形や発電シフトなど、これら関連したビジネスモデルの発展は、再エネ発電事業者の事業性を向上させるだけでなく、需給の安定化にも寄与し、火力など他電源の効率的な運用にも貢献するものである。

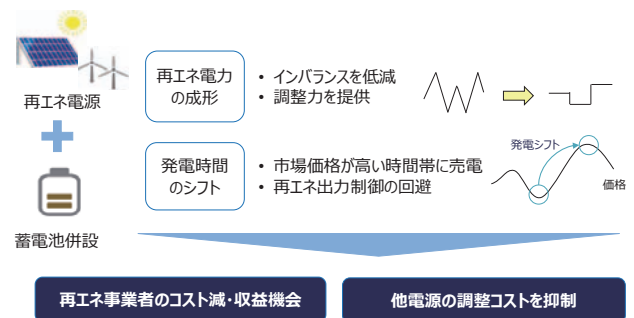


Fig. 10 Effect of battery in renewable power plant

4. 今後の展望

VPP・DRの活用は、カーボンニュートラルの実現、電力の安定供給とそれに関わる社会コストの低減に向けて、今後益々期待される。経済産業省では、分散型エネルギーリソースを活用した新たなビジネスモデル構築を推進するため、アグリゲーション技術の確立、制御技術の高度化などの実証事業を実施している。アグリゲーターの取り組みとしては、工場など自家発電機や空調・生産調整など更なるリソースを発掘するほか、これからBCP目的等で設置される蓄電池のマルチユース提案や、スマートシティなど新たな街づくりプロジェクトへの参画を通して、設備導入段階からVPP・DRの活用を織り込むことで、さらなる拡大が期待される。

参考文献

- (1) 電力広域的運営推進機関 系統情報サービス
<<https://www.occto.or.jp/keitoujouhou/>>
(参照日 2022年8月30日)
- (2) 経済産業省 ERABガイドライン
<<https://www.meti.go.jp/press/2020/06/20200601001/20200601001.html>> (参照日 2022年8月30日)
- (3) 東北電力VPPサイト 再エネアグリゲーション事業
<<https://vpp.tohoku-epco.co.jp/saiene-aggregation/>>
(参照日 2022年8月30日)

特集：2050年脱炭素社会実現に向けた今後のアプローチ

苫小牧におけるCCS大規模実証試験と二酸化炭素貯留適地調査事業の概要

Outline of the project “Tomakomai CCS Demonstration Project” and “Investigation of potential sites for CO₂ storage in Japan”

岩上 恵治^{*1}
IWAGAMI Keiji

渡部 克哉^{*2}
WATANABE Katsuya

キーワード：CCS, 苫小牧, 二酸化炭素, 分離回収, 貯留, モニタリング, 貯留適地, 貯留可能量

Key Words: CCS, Tomakomai, carbon dioxide, CO₂, carbon capture, storage, monitoring, potential sites for CO₂ storage, CO₂ storage capacity

1. 緒言

「CCS (Carbon dioxide Capture and Storage: 二酸化炭素回収・貯留)」とは、地球温暖化の原因とされるCO₂を工場や発電所などから大気中に排出される前に回収し、地中深くの地層に送り込んで安定的に貯留する技術をいう。また、回収したCO₂を資源として有効利用する「CCU (Carbon dioxide Capture and Utilization)」と併せて「CCUS」と呼ばれることもある。

経済産業省、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」）および日本CCS調査株式会社（以下、「JCCS」）の3者（以下、「3者」）は、2012年度から苫小牧におけるCCS大規模実証試験事業を実施し、2019年11月22日に目標としていた累計圧入量30万tを達成した。⁽¹⁾

この実証試験事業は、出光興産(株)北海道製油所（以下、「製油所」）の水素製造設備から発生する、約52%濃度のCO₂を含むPSA (Pressure Swing Adsorption) オフガスの一部を、隣接するCO₂分離・回収/圧入設備までパイプラインにより輸送してCO₂を分離・回収し、2坑の圧入井（傾斜井）により、海岸から3～4 km離れた海底下の異なる深度の2層の貯留層（萌別層、滝ノ上層）へ圧入・貯留するというものである。CO₂分離・回収から貯留までのCCSプロセス全体を一貫プロセスとして実証試験を行った点で、我が国において先駆けとなる事業である。苫小牧CCS実証試験の全体概要をFig. 1に示す。

本稿では最初にこの実証試験の全体像と将来への展望に向けた課題についての概要を述べ、次に我が国のCCS事業展開において不可欠であるCO₂貯留適地に関係し、JCCSが2014年以降受託している「二酸化炭素貯留適地調査事業」の概要について述べる。

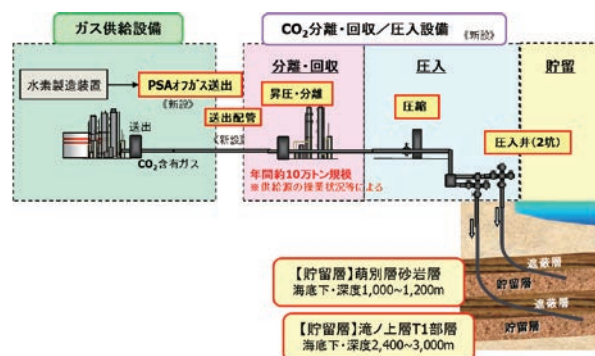


Fig. 1 Project scheme

2. 苫小牧CCS大規模実証試験の概要

2.1 実証試験の目的

本実証試験は以下を主な目的として推進された。

- ① CCSの実証：実用プロジェクトと同等の設備構成で我が国として初となるCO₂の分離・回収から貯留までのCCSプロセス全体を一貫システムとして実証すること。
- ② CCSの安全性の実証：一連の操作を通じて、CCSが安全かつ安心できるシステムであることを実証すること。
- ③ CCSの理解：実証試験やCCSに関する情報を広く公表し、CCSへの理解を深めること。
- ④ CCSの実用化：操業技術を獲得するとともに実用化に向けた取り組みを行うこと。

2.2 実証試験のスケジュール

2008～2011年度において実証試験候補地点の調査・検討を行い、多くの候補地点の中から国の検討会を経て、2012年2月に苫小牧での実施が決定された。実証試験は、Fig. 2に示すように2012年度にスタートし、2023年度までの計画で継続中である。

2015年度までの最初の4年間で、設備の設計・建設・試運転、坑井の掘削およびモニタリング（監視）設備の設計・設置を完了した。

これに並行して、2013年度から2014年度には「海洋汚染等および海上災害の防止に関する法律」（以下、「海洋

原稿受付 2022年9月16日

*1 日本CCS調査(株) プラント技術部

*2 日本CCS調査(株) 地質調査部

〒100-0005 千代田区丸の内1-7-12サピアタワー 21F



Fig. 2 Project schedule

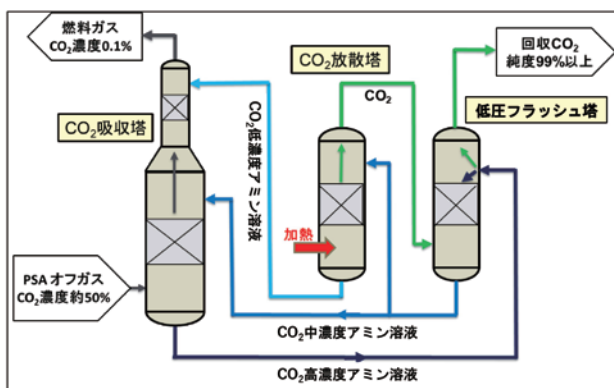
汚染防止法」) に対応した海洋環境調査 (四季調査) を、2014年度末からは完成したモニタリング設備による連続観測を、それぞれCO₂圧入前のベースライン調査として実施した。

2016年4月にCO₂の圧入を開始、各種調査および監視計画見直しによる中断をさみ、2019年11月22日に累計CO₂圧入量300,110tを達成した。

現在は、モニタリングおよびCCSの理解活動を継続実施するとともに、設備の信頼性改善・維持およびCCSとCCUの連携運用技術の検討を実施中である。

2.3 地上設備

製油所から供給されるオフガスにはCO₂が約52%含まれており、他は水素、メタンなどの可燃性ガス成分からなる。このオフガス中のCO₂を分離・回収設備で分離し、濃度99%以上の高純度CO₂として回収する。本実証試験で採用した分離・回収プロセスは、天然ガス処理プラントやアンモニアプラントなどで多くの商業実績がある活性アミン水溶液を使用した化学吸収プロセスである。Fig. 3に分離・回収法フローを示す。

Fig. 3 CO₂ capture process

このプロセスはいくつかの優れた特徴を持つ。一つは高いCO₂回収率が容易に実現できることである。実証試験ではオフガスのCO₂吸収塔出口CO₂濃度を0.1%以下まで低減するが、この時のCO₂回収率は99.9%以上に相当する。

また、エネルギー消費量も注目される。このプロセスの吸収液は、吸収塔でCO₂を吸収したCO₂高濃度アミン溶液の再生に減圧を利用できるという特性があり、溶液再生に必要なエネルギー消費量が少ないことで知られている。加えて、省エネルギー型のプロセススキームで

ある、二段吸収法を採用した。

二段吸収法は、吸収塔でのCO₂吸収を、溶液再生度が異なる溶液によって二段階で行う方法で、吸収塔下部ではCO₂中濃度アミン溶液で、吸収塔上部ではCO₂低濃度アミン溶液で吸収を行う。CO₂低濃度アミン溶液は、吸収塔出口での低いCO₂濃度を達成するために高い再生度が求められ、放散塔で外部からのスチーム加熱による再生が必要である。一方、CO₂中濃度アミン溶液は低圧フラッシュ塔で、外部の熱を使わずに必要な再生度を得ることができる。すなわち、低圧フラッシュ塔では、減圧によって溶液からCO₂を放散するとともに、放散塔頂からの余熱の再利用により溶液を再生する。このように、二段吸収法の採用によってスチーム加熱による再生に必要なアミン溶液量を大幅に減らすことができるので、溶液再生に必要な外部からの加熱量を大幅に低減できる。実際に、実証試験で、分離・回収に要するエネルギー消費量 (溶液再生熱量 + 溶液循環動力) は、設計時の目標値より良好な結果を得ている (3.1.1にて後述)。二段吸収法は、CCSとしては世界で初めて本実証試験で採用された。

CO₂除去後の可燃性ガスはボイラー設備へ供給して、アミン溶液再生用ボイラーおよび発電用タービン等に有用な熱源となるスチーム生成の燃料として活用した。

圧入設備では、回収したCO₂を超臨界状態 (圧力7.38MPa, 温度31.1℃を超える領域で、液体と気体の両方の性質を持った状態。液体に近い (高い) 密度と気体を持つ拡散性を兼ね備える) まで昇圧し、圧入井へ送る。圧縮機には、実用規模の事業で使われる遠心式圧縮機を採用した。

CO₂の圧入量は10万t/年規模としているが、この量は製油所の操業状況によって変動する。なお、地上設備の設備能力はCO₂量として25.3 t/hで、この量は22万t/年に相当 (365日稼働換算) している。

2.4 圧入井と貯留層

圧入井の坑跡を含む地質断面図 (模式図) をFig. 4に示す。実証試験の貯留層は、萌別層砂岩層と滝ノ上層T1部層 (火山岩類) の2つの深部塩水層である。萌別層は層厚約200mで、深度約1,000 ~ 1,200mに分布し、その上部には層厚約200mの遮蔽層が分布している。滝ノ上層T1部層は層厚約600mで、海底下約2,400 ~ 3,000mに分布し、その上部には層厚合計約1,100mの複数の遮蔽層が分布している。2坑の圧入井はともに陸上から海底下の貯留層に向けて掘削した傾斜角 (鉛直からの角度) が大きな高傾斜井である。萌別層圧入井は、掘削長3,650m, 垂直深度1,188m, 最大傾斜角約83°で、坑口位置から坑底までの水平距離 (水平偏距) が3,058mの高傾斜井であり、その偏距率 (水平偏距と垂直深度の比) は国内で最大である。滝ノ上層圧入井は、掘削長5,800m, 垂直深度2,753m, 最大傾斜角約72°で、水平偏距は国内最長の4,346mとなる高傾斜井である。

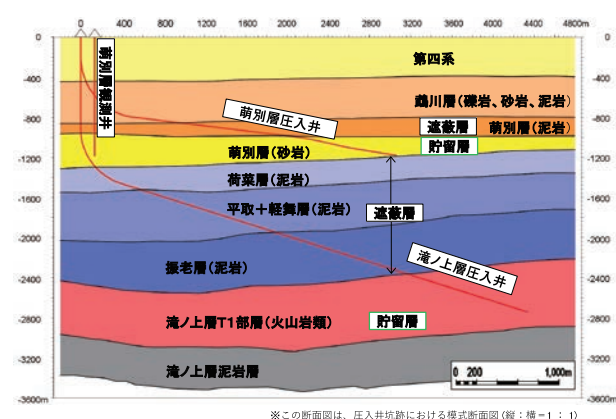


Fig. 4 Schematic diagram of geological layers and injection wells

2.4 モニタリングおよび海洋環境調査

現状、日本におけるCO₂の海底下の地中貯留は、海洋汚染防止法に則り、環境大臣の許可を得て実施する。許可を得たCCS事業者（本実証試験では経済産業省）は、申請時に提出する「監視計画」に基づいてモニタリングを実施する必要がある。

実証試験の「監視計画」では、貯留層の温度・圧力の観測や弾性波探査によるCO₂の分布範囲の把握に加えて、海洋環境調査として、海域の流況観測、採水・採泥等による水質・底質・プランクトン・底生生物の調査、海底面のビデオカメラ撮影による底生生物の観察・気泡の発生の有無の観察等を年4回（四季調査）実施した。

Table 1 Monitoring equipment/Monitoring work and monitored items

観測設備／観測作業	監視項目	観測頻度
圧入井・プラント設備	坑内：温度・圧力 坑口：圧入温度・圧力・CO ₂ 圧入量	連続・リアルタイム観測
観測井	坑内：温度・圧力、微小振動、自然地震	連続・リアルタイム観測
常設型海底受振ケーブル（OBC）	微小振動、自然地震、二次元弾性波探査の受振	連続・リアルタイム観測 二次元弾性波探査実施時
海底地震計（OBS）	微小振動、自然地震	連続・リアルタイム観測（貯留地点直上） ＋連続観測（貯留地点周辺）
陸上設置地震計	微小振動、自然地震	連続・リアルタイム観測
二次元弾性波探査	貯留層中のCO ₂ 分布範囲	繰り返し観測
三次元弾性波探査	貯留層中のCO ₂ 分布範囲	繰り返し観測
海洋環境調査	海洋データ（物理的・化学的特性、生物生息状況等）	四季調査

「監視計画」および微小振動・自然地震観測に係る観測設備／観測作業と監視項目をTable 1に示す。監視項目に対する圧入前の基礎データの取得、海水・海洋生物等の事前調査等を実施した上で、2016年より圧入開始とともに監視を開始した。

3. 得られた成果と課題

3.1 実証試験の成果

実証試験では、各種産業分野で既に確立している要素技術を組み合わせた実証試験全体が一体システムとして機能することを実証するとともに、CCSが安全かつ安心できるシステムであることを確認した。また、CCSの理解を深める活動を継続的に行い、CCS実用化に向けた取

り組みから得られた知見、課題の整理を行った。

3.1.1 地上設備 2016年4月から開始したCCS一貫システムの操作を通じて、設備全体として、実証試験を進める上で十分な性能と運転性が備わっていることを確認した。実証試験では、設計時のエネルギー消費量の目標値（1.22GJ/t-CO₂）よりも良好な結果1.16 GJ/t-CO₂を達成した。この値は省エネルギーシステムを採用しない場合の1/3～1/2に相当し、エネルギー消費量はCCSとしては世界で最小レベルにある。

3.1.2 圧入実績 萌別層へは、2019年11月の圧入停止までに累計300,012tを圧入した。圧入開始前の萌別層の測定点初期圧力9.3 MPaGに対して、計画最大圧入レート年間20万tにおいても圧力上昇の最大値は10.07 MPaGとなった。この圧力値は、萌別層の遮断層破壊を避けるために設定した上限圧力12.63 MPaGに対して十分に低い。また、圧入開始以降の測定圧力・温度はあらかじめ想定した範囲内にあった。萌別層の圧入性状は良好であり、解析の結果、今回採用したチュービング径（3.5インチ）において圧入井1坑で年間約50万tが安定的に圧入可能であることが確認され、チュービング径を4.5インチに大きくすることで年間約100万t規模での圧入の可能性があることが示された。

2018年2月からは滝ノ上層への圧入も開始し、萌別層との2層同時圧入の実証も行った。しかし、滝ノ上層の圧入性状は予想よりもかなり低いという結果が得られ、滝ノ上層へは累計98tの圧入にとどまり、不均質性が高い火山岩層の圧入性状を予測することの難しさが課題として明らかになった。

3.1.3 モニタリングおよび海洋環境調査 これまでのモニタリングの結果、坑井内の温度・圧力挙動に異常が認められないこと、微小振動や自然地震発生状況にCO₂圧入に伴う変化が認められないことが確認され、さらに圧入したCO₂が事前の想定どおりに貯留層内に留まっていることが推定された。さらに、海洋環境に変化が認められずCO₂の漏出、またはそのおそれがある事象は確認されなかった。以下に監視成果を紹介する。**【弾性波探査によるCO₂の分布範囲の把握の結果】**

CO₂の分布範囲の把握には三次元弾性波探査を利用し、複数回の探査結果を比較することで、CO₂圧入量増加に伴うデータの変化について解析した。

弾性波探査の解析結果例をFig. 5に示す。CO₂圧入前の三次元弾性波探査（ベースラインデータ）に対する、2017年度および2019年度の三次元弾性波探査の反射波波形的変化量をそれぞれ平面図上に投影して可視化したものである。

左図（約6万t圧入時）と右図（約30万t圧入時）とを比べると、CO₂圧入量の増大に伴って萌別層圧入井の坑跡に沿って周辺より明度の高い領域の拡大が見られる。明度の高い領域それぞれが、その時点における萌別層内のCO₂貯留分布範囲を示していると考えられる。

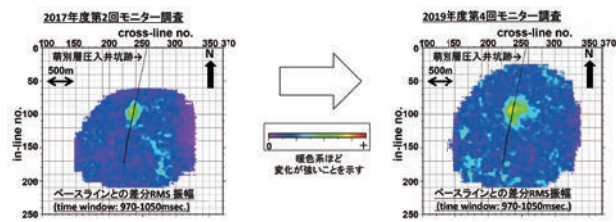


Fig. 5 Comparison of results of 3D seismic survey in 2017 and 2019

注1) RMS (Root Mean Square) 振幅: ある任意の往復走時の間 (時間ウインドウ) の内において計測された信号の二乗平均平方根。波動の強度 (実効値) を表す際に用いられる。

注2) 平面図: 各年度の三次元弾性波探査とCO₂圧入前の三次元弾性波探査との差分記録から萌別層を含む区間のRMS振幅を抽出して水平面上に投影したもの。上方から萌別層の差分RMS振幅を見ていることに相当する。

この弾性波探査の結果等から、萌別層に圧入したCO₂は事前の想定どおりに貯留層の上部付近に限定して存在し、貯留層区間外への漏洩等の異常は生じていないものと考えられる。

3.1.4 社会的受容性の醸成および国際活動 実証試験の円滑な推進のためには、地元の自治体、漁協等の関係機関および住民の理解と協力が不可欠である。苫小牧市や周辺地域・関係者および広く国内に向けた、CCSおよび実証試験に係る情報発信活動を実証試験開始時から継続して行っている。さらに、有事における情報発信活動および地元ステークホルダーとのコミュニケーションの実績を検証した上で、社会的受容性醸成活動の総括を行った。

一方、都市近郊でCCSが進められている実証試験は海外から多くの関心を集め、実証試験センターへの視察者は50ヶ国以上1,400名を超えている (2019年度まで)。海外に向けた情報発信および情報収集活動も継続的に実施している。また、CSLF (炭素隔離リーダーシップフォーラム、CCS技術の進展を目指す閣僚レベルの国際組織) から、実証試験が商業規模のCCSの推進に寄与するものであるとして、2016年10月に認定プロジェクトに認定され、2022年6月に目標達成プロジェクトとして表彰を受けた。

3.2 実証試験にて確認された課題

以上、我が国におけるCCSの魁となる苫小牧実証試験とそこで採用された技術の概要および得られた成果について述べた。周知のとおり、2050年カーボンニュートラル社会の実現に向けては、CO₂分離・回収技術をはじめとする多くの新技術の開発が進められていると同時に、社会実装に向けた環境整備が進められており、ここでは本実証試験で確認された課題について述べる。

3.2.1 CO₂多排出産業へのCO₂分離・回収技術の展開 CO₂分離・回収技術には大きく燃焼前回収 (Pre-Combustion Capture: Pre-CC) と燃焼後回収 (Post-Combustion Capture: Post-CC) に分類され、実証試

験では、技術的および経済的に有利な特徴を有するPre-CCを採用している。一方、このような特徴を有しながらも前記した通り、CO₂分離・回収に多くのエネルギーが必要となっており、今後、Post-CCを含む多排出産業への技術展開、更にはCCS事業の商業化、これに伴う社会負担軽減に向けては、必要エネルギーの低減が大きな課題であることが確認された。

3.2.2 圧入貯留・監視計画に関する法整備 我が国にはCCSに特化した法令がないため、実証試験では、地上設備については現存の適用法規を適用したが、圧入・貯留設備と圧入時の安全基準等は鉱業法/鉱山保安法に準拠した。CO₂の海底下廃棄 (地中貯留) については、海洋汚染防止法が適用されている。

CCSプロジェクトが実施されている海外においては、CO₂貯留に関する法的枠組みの導入が少なからず進んでおり、今後我が国においても、CCS導入へのインセンティブとなりうる制度の整備と並行して法規整備が急がれることが課題として確認された。

3.2.3 社会的受容性の醸成 改めて述べるまでも無く、CCS事業実施にあたっては地元住民、関係者の理解を得ることが欠かせない。実証試験を実施した苫小牧市においては周辺を含む地域の皆様のご理解と、行政および事業者一体となった周知活動、情報開示による信頼構築により、当初の事業目標を無事完遂することができた。

今後推進される新たな事業においても、この社会的受容性の醸成が、行政と歩調を合わせ最優先に取り組むべき活動であることが確認された。

3.2.4 CO₂貯留適地の調査に基づくCO₂圧入坑井数の確保 2022年より、「CCSを計画的かつ合理的に実施することで、社会コストを最小限にしつつ、我が国のCCS事業の健全な発展を図り、もって我が国の経済および産業の発展やエネルギーの安定供給確保に寄与することを目的とする。」を基本理念に『CCS長期ロードマップ検討会』²⁾が経済産業省主導で進められている。同年5月の中間とりまとめおよび参考資料の中には、「IEA試算から推計すると、我が国のCCSの想定年間貯留量は、2050年時点で年間約1.2～2.4億tが目安」であること、「仮に2030年からCCS事業を開始 (操業開始) する場合、CO₂圧入井1本当たりの貯留可能量を年間50万tとした場合でも、2050年までの20年間で、毎年12本～24本ずつの圧入井を増やしていく必要が生じることとなる」と記載されている。加えて、「CCSの事業化をする上で、貯留適地の特定は不可欠であるため、2014年から、3D弾性波探査などの調査を実施中」と記載されており、必要なCO₂貯留適地の確保も、重要な課題のひとつである。

次章ではJCCSが受託している「二酸化炭素貯留適地調査事業」について概説する。

4. 二酸化炭素貯留適地調査事業の概要

4.1 調査事業の経緯

貯留適地とはCO₂を安全に安定的に地中貯留できる場所のことである。経済産業省と環境省の連携事業として、二酸化炭素貯留適地調査事業（以下、「適地調査事業」）が2014年度に開始された。

日本の海域にてCO₂貯留可能量を推定する調査は、1990年代から行われてきた。2005年に公益財団法人地球環境産業技術研究機構（RITE）が行った調査⁽³⁾では、日本周辺の水深200m以浅の海域および陸域において、約1,460億tのCO₂貯留能力があると推定され、また、2008年～2012年にNEDO／国立研究開発法人産業技術総合研究所（AIST）が行った調査⁽⁴⁾では、日本周辺の水深200m～1,000mの海域において、約900億tのCO₂貯留能力があると推定された。なお、これらの結果はデータ密度の粗い2D弾性波探査（概査）データを用いた簡易地質解析に基づくものであり、例えば断層評価等が行われていない。

2013年度に経済産業省、環境省それぞれが委員会を開催し、上記調査の報告書の結果をもとに日本周辺海域における今後の優先調査区域を抽出した。

2014年度から開始されたJCCSによる適地調査事業では、これらの優先調査区域での新規弾性波探査データ取得や地質評価を手始めに、日本周辺海域における深部塩水層を対象とした評価が実施されている。抽出した優先調査区域での新規弾性波探査データ取得や地質評価を実施した。手始めに、日本周辺海域における深部塩水層を対象とした評価が実施されている。

JCCSは、適地調査事業の開始時から2022年度まで継続して同事業を受託し、貯留適地選定プロセス等を整備しつつ、弾性波探査、地質解析・貯留可能量評価、CO₂挙動予測シミュレーション等を通じて、各地点の貯留ポテンシャルの評価を実施してきた。また、適地調査事業では、大学や研究機関の有識者から構成される委員会を年3回程度開催し、評価結果や進め方について助言を頂いている。

4.2 貯留適地選定プロセス

4.2.1 安定的に地下貯留するための地質条件 CO₂を安定的に地中貯留するための地質条件として以下があげられる。

- ① 貯留層に十分な貯留能力がある（貯留層が圧力上昇を吸収する十分な広がり・連続性を持つ）
 - ② 遮蔽層が貯留層を覆っている（遮蔽層がCO₂圧入圧力により破壊されない十分な強度、CO₂が漏出しにくい十分な遮蔽能力を持つ）
 - ③ CO₂が地下に留まるような地質構造となっている（背斜構造や緩傾斜の同斜構造である）
 - ④ CO₂が漏洩する断層などの経路がない
 - ⑤ 過去に周辺で地震が集中して発生していない
- 条件①は貯留量に関わることから重要であるが、CO₂

の貯留場所からの漏洩に関係する②～⑤の条件も、安全、安定的に貯留するためには欠かせない条件である。また、良好な性状を持つ貯留層と遮蔽層のペアを抽出することは評価上の重要課題である。一般的には、貯留層は浅部のほうが良好な性状を示すのに対して、遮蔽層は深部ほど遮蔽能力が高い傾向を示す。

条件③の地質構造について補足する。CO₂は超臨界状態での地中貯留が望ましいが、地層水よりも比重が小さく上方に移動するため、背斜構造や緩傾斜の同斜構造はCO₂を閉じ込めるのに有利な構造となる。貯留層の深度の上限は、CO₂が超臨界状態となる深度で概ね海底下800m程度、深度の下限は岩石粒子間の孔隙が保持される深度3,000m程度としている。

適地調査事業では、弾性波探査データ等を用いた詳細評価を通じて、これらの地質条件を満たしている地域を抽出している。

4.2.2 貯留適地の絞り込み 貯留適地調査事業では、Fig. 6に示す貯留適地の選定フローを基に調査を進めてきた。現在、評価が最も進んでいる数地点は、調査井掘削の手前（Fig. 6の破線の位置）までである。なお、経済産業省が現在進めるCCS長期ロードマップ検討会の中間とりまとめ⁽²⁾では、調査井掘削は事業者主導により実施されることとなり、従って適地調査事業の中ではFig. 6の破線以降は実施されないこととなった。

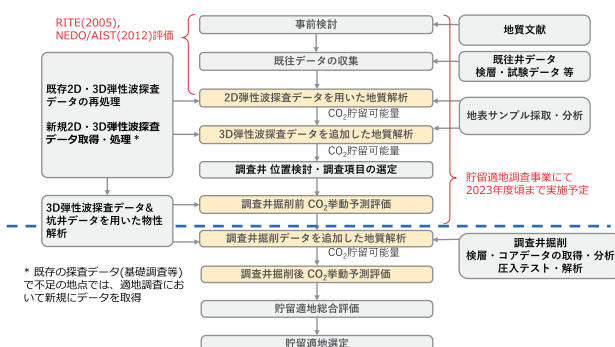


Fig. 6 Workflow of geological evaluation of potential CO₂ storage sites

地質解析とCO₂挙動予測評価の概要は以下のとおりであり、同一地点であっても新たにデータが追加されるごとに複数回実施する場合がある。

- 1) 地質解析：3D弾性波探査データの振幅等の属性値と坑井データ等を用いて堆積物の堆積環境、堆積システムを検討し、貯留層/遮蔽層の分布予測を行っている。
- 2) CO₂挙動予測評価：調査井掘削により入手可能となる遮蔽能力および圧入性状等の詳細岩石物性情報を含まない簡易的な貯留層モデルに基づいたCO₂挙動予測シミュレーションにより、一定程度の貯留が可能か、貯留量に影響を与えるパラメータは何かを評価することを目的として実施している。

日本近海では、四つのプレートの境界周辺に活断層が発達し、一般的に地殻変動が活発で地質構造が複雑であり、かつ堆積盆の規模が比較的小さく、貯留層性状の側方変化が比較的大きいとの特徴があることから、比較的早い評価段階から3D弾性波探査データが必要である。また、貯留岩の供給源となる岩体が一般的に火山岩であるため、貯留層の浸透率が低い場合が多い。そのため、圧入性状を評価する上で、調査井掘削によるデータ取得、試料採取、圧入試験が重要となる。

4.3 調査実績およびこれまでの成果

4.3.1 調査実績 2021年度までの地質解析の実績は、主に3D弾性波探査データを用いて評価した地点が13地点、3.9万km²、2D精査データを用いて評価した地点が8地点、5.1万km²である。そのうち適地調査事業で新規に3D弾性波探査データを取得した地点は4地点で合計面積は約1,000km²であり、地質解析範囲全体からするとその割合は小さい。また、CO₂挙動予測シミュレーションは3D弾性波探査データによる評価を経て貯留適地候補となる地点を対象として、これまで9地点で実施した。今後、調査井掘削が実施されれば、調査井掘削で得られる様々なデータにより、貯留層/遮蔽層の特定、圧入性状把握、遮蔽能力把握等が可能となり、それにより詳細かつより精度の高いCO₂挙動予測シミュレーションを行うことができる。

4.3.2 これまでの成果 適地調査事業の2022年3月までの暫定的な成果をFig. 7（横軸：容積法による地点ごとの貯留可能量、縦軸：その地点数）に示す。

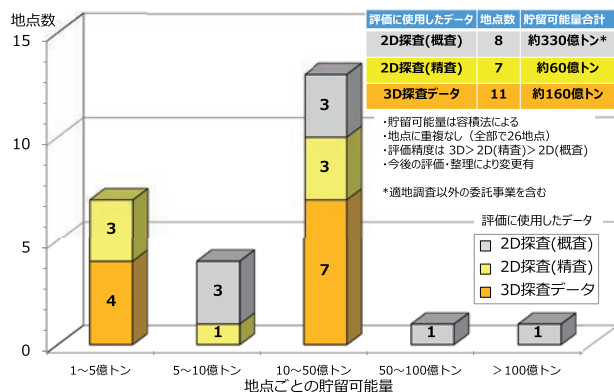


Fig. 7 Results of geological evaluation of potential CO₂ storage sites (March 2022)

3D弾性波探査データを用いて貯留可能量を求めた地点は全部で11地点、貯留可能量の合計は約160億tであり、貯留地点数、貯留可能量ともに相当の国内貯留ポテンシャルが存在する。

なお、Fig. 7に示す貯留可能量はRITEで用いられた容積法⁽³⁾により、CO₂に置換されうる孔隙容量を求めたものであり、遮蔽能力、坑井配置、圧入性状、CO₂の移動等までは考慮していない。

また、3D弾性波探査データを用いた評価であっても、3D弾性波探査データや坑井データの品質、貯留可能域と既存坑井との位置関係等により評価精度は異なる。例えば、貯留可能域内に既存坑井があるケースでは、既存坑井で確認された貯留層/遮蔽層の広がりを評価するため、精度は比較的高いと言えるが、貯留可能域と既存坑井が遠く離れている場合は精度が低くなる。

本稿は経済産業省、環境省、NEDOより受託した事業の成果を中心にまとめたものである。

参考文献

- (1) 経済産業省、NEDO、JCCS、「苫小牧におけるCCS 大規模実証試験 30 万t圧入時点報告書（「総括報告書」）」（2020）。
- (2) 経済産業省、CCS長期ロードマップ検討会中間とりまとめ（2022）。
- (3) 地球環境産業技術研究機構（RITE）、全国貯留層賦存量調査、平成17年度二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業二酸化炭素地中貯留技術研究開発成果報告書（2006）。
- (4) 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）、水深200m以深の海底下貯留ポテンシャル評価、平成20年度～平成24年度成果報告書 革新的ゼロエミッション石炭ガス化発電プロジェクト 発電からCO₂貯留までのトータルシステムのフィジビリティ・スタディー 全体システム評価（2013）。

特集：2050年脱炭素社会実現に向けた今後のアプローチ

脱炭素社会実現に向けた定置用蓄電池開発の現状と今後の展望

Current Status and Future Prospects of Stationary Storage Battery Development for Realization of a Decarbonized Society



小林 弘典*¹
KOBAYASHI Hironori

キーワード：脱炭素化社会，再生可能エネルギー，蓄電池，リチウムイオン二次電池，全固体電池

Key Words：Decarbonized Society, Renewable Energy, Storage Battery, LIB, All-Solid-State Battery

1. 緒言

近年，世界各国で二酸化炭素の排出量削減を達成すべく様々な取り組みがなされている。蓄電池のアプリケーションとして最も注目を集めているのが自動車の電動化である。Fig. 1に国内の各部門における二酸化炭素排出量を示す⁽¹⁾。日本国内では二酸化炭素総排出量の内，運輸部門が17.7%を占めており，自動車全体で運輸部門の87.6%を占めている。そのため，二酸化炭素排出量の削減のためにはガソリン自動車から走行中に二酸化炭素を排出しない電動車両への移行は不可避となる。

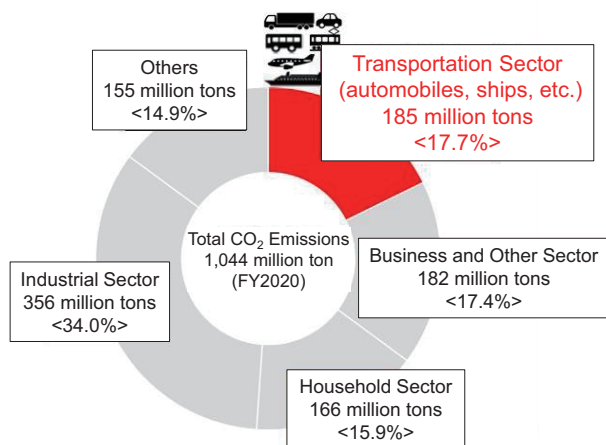


Fig. 1 Carbon dioxide (CO₂) emissions in each sector in Japan

特に，欧州では各国政府が相次いで2025～2040年までに国内のガソリン車とディーゼル車の販売を禁止する方針を表明したこともあり，急速に電動車両へのシフトを進めようとしている。2021年の電気自動車（EV）／プラグインハイブリッド自動車（PHEV）の世界での販売台数は，メーカー別ではテスラが世界で約94万台，

次いで，比亞迪股份有限公司（BYD）が約59万台を販売している。Fig. 2に各自動車メーカーのEV／PHEVの販売台数の推移を示す⁽²⁾。テスラが順調に販売台数を伸ばしていることがわかる。2021年は全世界でEVとPHEVを合計すると約650万台が販売されてきている。これは，2020年の販売台数の約2倍であり，自動車の世界での販売台数の10%に迫ってきており，自動車の電動化は自動車業界に大きなインパクトを与えるまでになってきている。

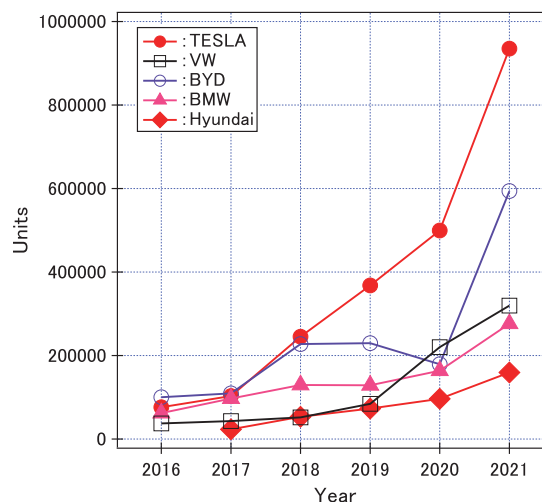


Fig. 2 EV/PHEV sales by year for each automaker

ガソリン自動車はエンジンでガソリンを駆動エネルギーに変換することで走行するが，EV及びPHEVでは高エネルギー密度であるリチウムイオン二次電池（LIB）を駆動電源として搭載する。富士経済のレポートでは，2020年時点で世界での車載用LIBの市場規模は4.4兆円であるが，2025年に市場規模が大幅に増大して9.4兆円の市場になることが予測されている⁽³⁾。EV用の蓄電池としてLIBを搭載することで走行距離の長距離化が実現されてきたが，ガソリン自動車と同等の走行距離をEVで

原稿受付 2022年9月19日

* 1 国立研究開発法人産業技術総合研究所
〒563-8577 大阪府池田市緑丘1-8-31
E-mail: hironori-kobayashi@aist.go.jp

実現するには現在のLIBのエネルギー密度でもいまだ不十分なため、LIBをさらに高性能化した次世代電池、さらには、現状のLIBを超える革新電池実現に向けた研究開発が世界中で活発に行われている。

また、近年、発電時の二酸化炭素排出量を削減すべく太陽光発電や風力発電に代表される再生可能エネルギーの導入が拡大してきている。ただ、これらの発電は気象条件によって出力が変動するため電力系統への悪影響がでてきている。蓄電池を太陽光発電や風力発電の大規模発電サイトや電力会社の送電系統に設置することで、電力系統との連系の課題を解決することができることに加え、発電した電力の効率的な活用が可能になる。新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）二次電池技術開発ロードマップ2013【定置用二次電池ロードマップ】によると、系統連系用途としては20年以上の寿命並びに揚水発電に匹敵する低コストが求められている⁽⁴⁾。一方、需要家側でも蓄電池の導入の動きが広がっている。需要家用途は業務・産業用途（ビル、工場、データセンター等）と家庭用途に分類できるが、蓄電池をこれらの場所に設置することで停電対策としての予備電力確保をすることができる。また、太陽光発電と併設することで省エネに加えて二酸化炭素排出量を削減することができる。いずれも、15年以上の寿命が求められている。

本稿では、今後の導入が期待される定置用蓄電池について、筆者の専門であるLIBを中心に述べさせて頂く。

2. 定置用蓄電池に求められる要件と現状

定置用蓄電池に求められる用途別特性項目としては、高安全性・高信頼性を示すことが全てにおいて優先するのは当然であるが、車載用蓄電池以上の長寿命が要求されることに加え、低コスト化も期待されている。定置用途では設置スペースの制約が緩和されるため、鉛電池、ニッケル水素電池、レドックスフロー電池、ナトリウム硫黄電池、LIB、革新電池等の候補は多岐にわたる。また、利用するシーンに応じて必要とされる電池は異なってくる。Table 1に車載用及び定置用蓄電池に期待されるコストを⁽⁵⁾、Fig. 3に定置用蓄電池の利用シーンとソリューションとなる電池を示す。車載用と比較して、定置用のコストは高いが、とはいえ、現状からは大幅に低コスト化する必要がある。また、全ての用途においてLIBが幅広く用いられている。

Table 1 Target prices for automotive and storage batteries

Application	Target Price
Automotive Battery Packs	10,000 yen/kW or less as soon as possible until 2030
Energy Storage Systems for Business and Industry	70,000 yen/kW in FY2030 (including construction cost)
Energy Storage System for Home Use	60,000 yen/kW or less in FY2030 (including construction cost)

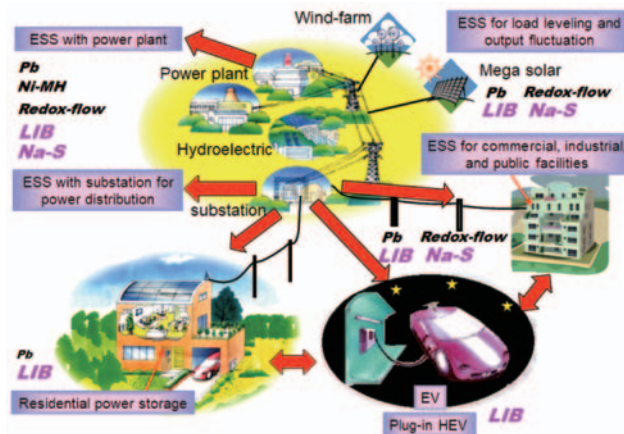


Fig. 3 Expected application for various types of storage batteries

蓄電池を併設した風力発電や太陽光発電の大規模サイトでは、電力負荷平準化に対応する「長周期対応運転」と変動対策に対応する「短周期対応運転」の用途に蓄電池が用いられる。「長周期対応運転」では自己放電が小さいこと、「短周期対応運転」では高レートで連続運転可能なことなど、運転モードにより蓄電池に求められる性能は異なっている。風力発電サイトでは、電力需要が落ち込む夜間に発電した電力を貯蔵するために、夜間の発電量に相当する蓄電容量が要求される。加えて、秒～数10分オーダーの風力発電による出力変動を抑制するために蓄電池の介在が必要となる。また、太陽光発電サイトでは、急峻な出力変動を抑制する役割を蓄電池が果たす。例えば、国内における電力会社の送電系統では、レドックスフロー電池（北海道電力南早来変電所）、ナトリウム硫黄電池（九州電力豊前発電所）、LIB（東北電力西仙台・南相馬変電所）が導入されている。ただ、定置用蓄電池には、20年以上のカレンダー寿命が要求されることに加え、揚水発電並みの低コストが期待されることから現時点で幅広く導入されていない。一方、需要家設置の大規模太陽光発電所ではLIBが、風力発電所ではナトリウム硫黄電池が導入されているケースが多い。最近、北海道北部風力送電により北豊富変電所に世界最大級のLIBの大規模蓄電池施設（72万kWh）が設置された。

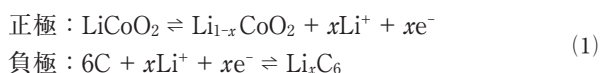
業務・産業用蓄電池としては、ビル、工場、病院、集合住宅、データセンター、無線基地局等の様々な利用シーンが想定される。工場や病院では停電対策としての予備電力確保は極めて重要であり、また、太陽光発電と併設することでピークカットによる電気料金の削減や蓄えた電気を必要に応じて利用することで省エネを実現することができる。加えて、二酸化炭素排出量の削減につながることから、脱炭素化経営が求められる中、企業価値の向上に貢献する。今後の導入促進が最も期待されているのは実は電波基地局である。停電対策としての予備電力確保のために鉛蓄電池が従来は用いられていたが、今後はLIBへの置き換えが進むことが期待されている。

家庭用蓄電池としてはLIBが幅広く導入されている。住宅では蓄電池設備の設置スペースが限られることからエネルギー密度の高いLIBに有利に働いていることに加えて、太陽光発電との組み合わせに対しての導入補助金制度がLIBを対象として過去に実施されてきた影響が大きいと考えられる。また、家庭用太陽光発電システムの固定価格買取制度（FIT制度）が2019年以降に順次満了しているが、その後は電力会社に売電するよりも自家消費をして電力会社から購入する電気をその分だけ減らした方が経済的であることが明らかになってきた。太陽光発電で発電した電気を蓄電池にためて必要な時に消費することで、より大きな経済的メリットが得られることに加え、停電時のバックアップ電源となることから、住宅用蓄電システムの導入が進んでいる。

富士経済のレポートによると2020年の系統設置用途、業務・産業用途及び家庭用途のLIBの市場規模（世界）はそれぞれ18.3 GWh, 5.9 GWhと3.4 GWhで、2025年にはそれぞれ40.9 GWh, 23.8 GWhと6.4 GWhと約2倍以上の規模の市場になると予測されている⁽⁶⁾。

3. リチウムイオン二次電池の原理と特徴

LIBは、充電時にリチウムイオンが正極から電解質を通過して負極へ移動することで、電気エネルギーを化学エネルギーに変換して蓄電し、逆に放電時には負極から電解質を通過して正極へリチウムイオンが戻ることで電気エネルギーを発生させる。電解質に有機電解液を用いているため4V級の高電圧で作動すること、最も軽い金属の元素であるリチウムイオンを用いることから鉛蓄電池やニッケル水素電池等と比較して高いエネルギー密度が実現できている。現在、LIBの正極に使用される材料としては、リチウム、遷移金属（コバルト、ニッケル、マンガン等）を含んだ酸化物が主流で、負極はグラファイトなどの炭素材料が主流となっている。式(1)に示すように充電時には左から右に反応が進行し、放電時には右から左に逆反応が進行する。Fig. 4にLIBの動作原理について示す。



式(1)に示したように、LIBにおいては、正極がリチウムイオンの供給源となるため、正極に含有されるリチウム量のうち、充放電時に活用しうる量が電池容量と関係することとなる。

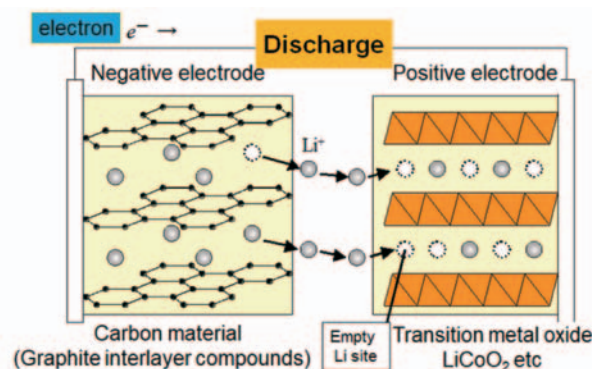


Fig. 4 Operating principle of LIB

Fig. 5にLIBの内部構造の模式図を示す。主要構成材料として正極活物質、負極活物質、電解液、セパレータ、有機電解液がある。正極／負極電極では活物質に加えて電子伝導性を担保するための導電助剤（カーボン）や電極と集電体を結着させるためのバインダーで構成される。また、イオン電導を担保する有機電解液は正極／負極電極並びにセパレータに含浸された状態で存在している。電池のエネルギー密度は本質的には正極活物質と負極活物質の組み合わせによって決まる。正極活物質と負極活物質の電位差、活物質（正極または負極）の実効容量によって材料レベルでのエネルギー密度が算出できる。

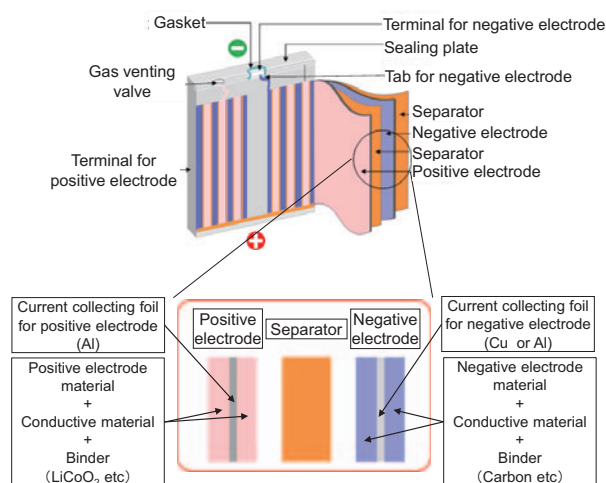


Fig. 5 Schematic drawing of internal structure of LIB

LIBの性能を表す代表的な指標としては、エネルギー密度、入出力密度、寿命等が挙げられる。重量エネルギー密度（Wh/kg）が大きくなると電池セルの軽量化、体積エネルギー密度（Wh/L）が大きくなると電池セルのコンパクト化をすることができる。出力密度（Wh/kg）や入力密度（Wh/kg）が大きくなると高い周波数調整力を持つことになる。

定置LIBに求められる特性項目としては、高安全性・高信頼性を示すことが全てにおいて優先するのは当然であるが、寿命とコストが重要視される。系統用途の場合には、蓄電池の設置スペースに比較的余裕があるため、

必ずしもエネルギー密度は重視されず、周波数調整用途では入出力が重視されることもある。現在、市場に流通しているLIBは主に3パターンの正極材料と負極材料の組み合わせで整理をすることができる。Fig. 6にTYPE別の電池設計の概念図を示す。正極材料（層状酸化物）と負極材料（カーボン）を組み合わせたTYPE-Aの電池、正極材料（層状酸化物）と負極材料（チタン酸リチウム）を組み合わせたTYPE-Bの電池、正極材料（オリビン鉄酸化物）と負極材料（カーボン）を組み合わせたTYPE-Cの電池に分類することができる。TYPE-Aの電池は3種類の中で最もエネルギー密度が高くなるため自動車用途をはじめ幅広く利用されている。一方、TYPE-BとTYPE-CはTYPE-A以上の長寿命と安全性を実現できる特徴を有するため、定置用途ではこれらの採用例も多い。

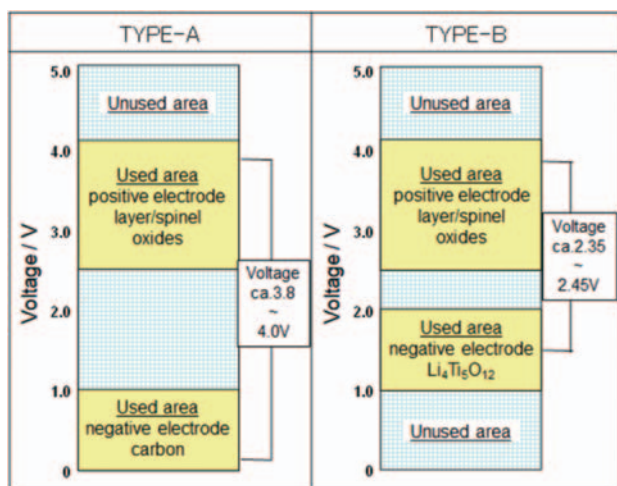


Fig. 6-1 Schematic drawing of each type of battery and battery manufacturers corresponding to each cell

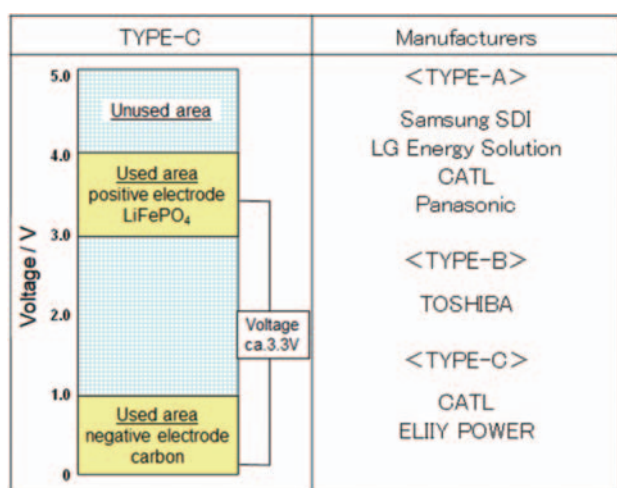


Fig. 6-2 Schematic drawing of battery designed by TYPE and corresponding manufacturers

TYPE-Aの電池では、正極材料に多くの選択肢があるため目的の性能に応じた材料選択が可能である。層状酸化物であるニッケルコバルト酸リチウム $[\text{Li}(\text{NiCoAl})\text{O}_2]$ や三元系 $[\text{Li}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})\text{O}_2]$ のニッケルの比率を増やしたハイニッケル系 $[\text{Li}(\text{Ni}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2})\text{O}_2]$ が採用されている。高エネルギー密度化に適した材料であるが、構造中から酸素が抜けやすいため、過充電時の熱安定性が必ずしも高くはない。負極材料のカーボンとしては黒鉛が主に使われてきた。最近、テスラ用の円筒型セルでは黒鉛にシリコン系材料を加えることで、さらなる高エネルギー密度化を実現した例もある。

TYPE-Bの電池では、負極にチタン酸リチウム ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) を用いていることが特徴である。平均電位は約1.55 Vとカーボン材料と比較して高い電位を示すため、低温での充放電時においてもLiのデンドライトが生成しない。また、低い電位領域 (0 V付近) での電解液との副反応が生じないため長寿命化も実現できる。

TYPE-Cの電池は、正極にオリビン鉄酸化物 (LiFePO_4) を用いていることが特徴である。構造中に安定な PO_4 の骨格構造をとるため、過充電時の酸素の放出が抑制されることから、熱的に安定となる。また、ほかの正極材料と比較して平均電位が約3.4 Vと低いことから高い電位領域 (4.2 V以上) での電解液との副反応が生じないため長寿命化も実現できる。

4. LIBの今後の展望

4.1 新規材料開発によるアプローチ

車載用LIBの更なる高エネルギー密度化を実現するために、高容量な正極・負極材料系の開発も進展してきている。例えば、TYPE-Aの電池では、次世代正極材料として層状酸化物系のニッケルの比率を増やすことで高容量が期待できるハイニッケル系が活発に検討されている。Table 2に示すように、ニッケル含有量比を0.8まで高めた材料を実用化することで、現在、主流のニッケル含有量比が0.5～0.6の材料と比較して、少なくとも10～25%の高エネルギー密度化が可能となる。一方で、ニッケルの含有比率の増加に伴い熱安定性の低下及びガス発生量の増加が実用化に向けた大きな課題であった。最近、韓国の電池メーカーがこれらの課題を解決しており、量産を開始してきている。

Table 2 Electrochemical properties of Ni-based positive electrode materials

Composition	Ni content ratio $\text{Ni}/(\text{Ni}+\text{Co}+\text{Mn})$	Effective Capacity Density	Volumetric Energy Density
$\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$	0.333	160 mAh/g	2700 Wh/L
$\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$	0.5	170 mAh/g	2900 Wh/L
$\text{LiNi}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_2$	0.6	190 mAh/g	3300 Wh/L
$\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$	0.8	210 mAh/g	3600 Wh/L

また、TYPE-Aの電池では、次世代負極材料としては、シリコン系材料が活発に検討されている。黒鉛・非晶質炭素負極を凌駕する高容量が期待できる一方で、微粉化によるサイクル低下の課題解決は難しく、黒鉛・非晶質炭素負極との複合化により重量当たり30%程度シリコン系負極を含有した負極電極の実用化を当面の目標として検討が進められている。

TYPE-Bの電池では、さらなる高エネルギー密度化を実現できる TiNb_2O_7 も実用化目前となっている。TYPE-Cの電池は、現在、FeをMnで置き換えたLi(MnFe)PO₄が検討されており、一部、実用化されている。約20%のエネルギー密度の向上が期待できる。

4.2 新規製造プロセス開発によるアプローチ

材料の置き換えではなく製造プロセスを変更することで、さらなる高エネルギー密度化を目指す取り組みがなされている。エネルギー密度に寄与しない部材を削減する手法として、電界紡糸法による電極上へのセパレータの直接成形が検討されている。セパレータの薄膜化が実現でき、製造プロセス簡略化につながる可能性もあることから、東芝やKRIが技術開発に取り組んでいる。一方、従来よりも厚い電極を作製することで高エネルギー密度を実現しようとする取り組みもなされている。京セラ株式会社が米ベンチャーの24Mテクノロジーズとの共同開発で実用化した「クレイ型リチウムイオン蓄電池」では、電解液を練り込んだ粘土（クレイ）状物質で電極を構成することで、電極の厚さを従来の3～5倍にできるとの報告がされている⁽⁷⁾。また、APB株式会社の全樹脂電池でも、電極をゲルポリマーで構成することで、従来に比べて大幅に電極の厚膜化ができるとの報告がされている⁽⁸⁾。いずれの技術も、従来に比べて電極を大幅に厚膜化することで高エネルギー密度を実現している。

4.3 新型蓄電池開発によるアプローチ

LIBでは理論的にエネルギー密度の限界があるため、LIBとは異なるメカニズムで反応する新型電池開発についての研究開発も活発に行われている。Fig. 7に示したNEDOのロードマップでは、2025年度頃から全固体電池が、2030年頃に革新型蓄電池が採用され始め、現状のLIB（液系LIB）を置き換えていくとの予測が示された⁽⁹⁾。

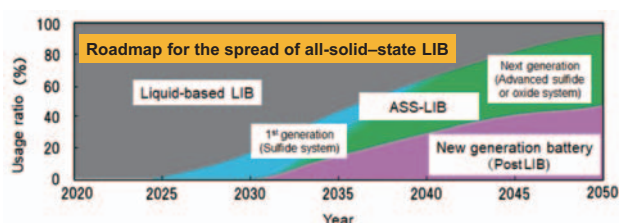


Fig. 7 NEDO roadmap regarding the spread timing of all-solid-state LIB (ASS-LIB) and innovative storage batteries

革新型蓄電池としては、リチウム硫黄電池、金属-空気電池、金属負極電池、フッ化物電池等を挙げることができる。いずれも、LIBの性能限界を超える500～700 Wh/kgを実現する可能性を秘めている電池系である。全固体LIBでは硫化物系の早期実用化が期待されている。また、リチウム硫黄電池やリチウム-空気電池では負極にリチウム金属を用いるため、デンドライト発生や充放電効率が低い等の改善すべき課題があり、定置用で求められる長寿命を実現するのは容易ではないと考えられる。

上記のロードマップに示されていないが、最近、寧徳時代新能源科技股份有限公司（CATL）がナトリウムイオン二次電池（SIB: Sodium-ion Secondary Battery）とLIBを一つのパックに統合したABバッテリーパックソリューションを発表したことから、SIBが注目を集めている⁽¹⁰⁾。LIBと比較してSIBはナトリウムの資源量が多くかつ特定地域に偏在していないため、コストに加えて安定供給の面でもメリットが期待できる電池系ではあるが、エネルギー密度が劣る点や濫用時の安全性に不安が大きいことから車載用として実用化されてこなかった。CATLはSIBの特徴として急速充電性能や低温特性に優れていると報告している。最近、リチウムやニッケル資源の調達コストが大幅に上昇してきていることもあり、今後の展開が注目される。

5. 全固体LIBの研究開発の進展

近年、全固体LIBが次世代電気自動車用蓄電池として注目を集めてきている。NEDOのロードマップでは性能および普及の観点で全固体LIBがポスト先進LIBに位置づけられており、硫化物系全固体LIB実用化に向けた国家プロジェクトが2018年の4月に開始された⁽¹¹⁾（現在、最終年度である）。全固体電池では、有機電解液とセパレータ部分を固体電解質で置き換えるが、固体電解質には、ドライポリマー、硫化物系や酸化物系等の多くの種類がある。その中で、硫化物系固体電解質では、有機電解液のイオン導電率に匹敵する $10^{-2} \text{ S cm}^{-1}$ オーダーを示す他の固体電解質と比較してはるかに高いイオン導電率を示すことに加えて、優れた機械的特性（柔らかい性質）を兼ね備えているため、室温下での加圧のみで電極/固体電解質の接合体を容易に作製できる。冷却システムやバッテリーマネジメントシステム等を簡略化することで、電池パックとして体積当たりのエネルギー密度の大幅向上が期待できること、かつ、有機電解液を不燃性の無機固体電解質で置き換えることで、究極に安全な電池を実現できることから大型化に適している。加えて、Fig. 8に示したように全固体LIBでは液系LIBのさらなる高性能化（長寿命、超急速充電）や課題の解決（安全性、過充電や高SOC/高温での耐久性）も期待できる。国内ではトヨタ自動車が全固体電池を搭載した移動体の走行試験を報告するなど研究開発をリードしてきている。一方、固体電解質と水との反応で硫化水素が発生する課題

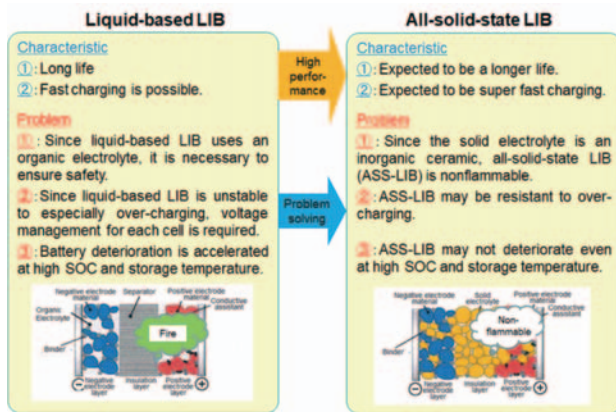


Fig. 8 Summary of comparison between (liquid-based LIB and all-solid-state LIB

が存在し、車両火災までを想定した実使用時における安全性については慎重に検証をする必要がある。加えて、量産化によりLIBの低コスト化が進んでいる現状で、初期導入時の全固体LIBのコストをいかに下げるかは普及に向けた極めて重要な課題である。

定置用蓄電池では、系統連系用途では大容量の蓄電システムが設置されるため、また、家庭用途では屋内に電池が設置される場合もあるため安全性の向上は極めて重要である。全固体LIBは電解液の代わりに無機のセラミックスを電解質に用いていることから消防法の可燃物の対象から外れるため、施工時の設置の手続き等の簡略化や設置スペースの削減を実現できる可能性がある。LIBの電解液には、消防法で可燃物（第4類 引火性液体 第二石油類）に該当するジメチルカーボネートやジエチルカーボネート等の引火性有機溶媒が含まれている。そのため、蓄電池を設置する市町村の消防庁に届け出をし、火災予防条例を満たす必要があったが、この手続きが不要になることに加え、予防条例の規定を適正に緩和することで省スペース化を図ることも可能になる。

6. 結言

今回、定置用蓄電池の最近の開発動向についてLIBを中心に解説をした。当面の間はLIBやナトリウム硫黄電池を中心に定置用蓄電池の普及がなされていくと考えられる。また、海外を中心にレドックスフロー電池の高エネルギー密度化を目指した研究開発が活発に行われており、今後の動向が注目される。ポストLIBである全固体LIBに関しては、電気自動車に採用され普及することで低コスト化が実現されれば、定置用蓄電池としても普及する可能性は十分にある。産業技術総合研究所電池技術研究部門では車載用途を目指した全固体LIBの研究開発に国家プロジェクトに参画しつつ、取り組んでいる。最後に、本稿が今後のLIBの研究開発の参考資料として些少なりともお役に立つことができるのであれば望外の喜びである。

参考文献

- (1) 国土交通省ホームページ
<http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html>
(参照日 2022年9月19日)。
- (2) 兵庫三菱自動車販売グループホームページ
<<https://www.hyogo-mitsubishi.com/news/data20220301100000.htm>>
(参照日 2022年9月19日)。
- (3) 2022電池関連市場実態総調査 上巻 電池セル市場編, (2022), p. 8, 富士経済
- (4) NEDOホームページ
「二次電池技術開発ロードマップ2013」
<<http://www.nedo.go.jp/content/100535728.pdf>>
(参照日 2022年9月19日)。
- (5) 経済産業省ホームページ
<https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/joho/conference/battery_strategy/battery_saisyu_torimatome.pdf>
(参照日 2022年9月19日)。
- (6) 2022電池関連市場実態総調査 上巻 電池セル市場編, (2022), p. 19, 富士経済。
- (7) KYOCERAホームページ
<<https://www.kyocera.co.jp/tech/new/enerezza.html>>
(参照日 2022年10月1日)。
- (8) APBホームページ
<https://apb.co.jp/all_polymer_battery/>
(参照日 2022年10月1日)。
- (9) NEDOホームページ
先進・革新蓄電池材料評価技術開発（第2期）」中間評価分科会 事業原簿【公開】
<<https://www.nedo.go.jp/content/100927228.pdf>>
(参照日 2022年9月19日)。
- (10) CATLホームページ
<<https://www.catl.com/en/news/665.html>>
(参照日 2022年10月1日)。
- (11) LIBTECホームページ
<<https://www.libtec.or.jp/consignment-business/2nd-term/>>
(参照日 2022年10月1日)。

特集：2050年脱炭素社会実現に向けた今後のアプローチ

原子力技術 小型モジュール炉の開発動向と安全機能の特徴

Development Trends and Safety Features of Small Modular Reactors



宇井 淳^{*1}
UI Atsushi

キーワード：小型モジュール炉，受動的安全系，カーボンニュートラル

Key Words：Small Modular Reactor, Passive Safety Systems, Carbon Neutral

1. 緒言

2011年3月の東京電力福島第一原子力発電所（以下、「1F」という）事故以降、50基以上稼働していた国内の原子力発電所は一度すべて運転を停止した。事故後に設置された原子力規制委員会の新規制基準等に基づく再稼働のための適合性審査等を経て2022年9月現在再稼働しているのは西日本の10基であり、24基は廃炉を既に決定している。

2021年6月の「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」⁽¹⁾では、原子力発電は可能な限り依存度を低減するとしつつも、実用段階にある脱炭素の選択肢であり、海外で進む次世代革新炉開発に高い製造能力を持つ日本企業も連携して参画し、小型モジュール炉（SMR）、高温ガス炉、核融合炉など多様な原子力技術のイノベーションを加速していく方針が示されている。同年10月の第6次エネルギー基本計画（閣議決定）⁽²⁾でも同様に、原子力発電所は可能な限り原発依存度を低減するが、再生可能エネルギーの拡大を図る中で、小型モジュール炉技術の国際連携による実証に取り組むとしている。

2022年2月にロシアがウクライナを侵攻して以降、同年5月の「クリーンエネルギー戦略」の中間整理⁽³⁾では、ウクライナ侵攻に伴う電力需給逼迫も踏まえ、エネルギー安全保障の確保とそれを前提とした脱炭素化に向けた対応の整理の検討が始まり、原子力の再稼働の推進やサプライチェーン・技術・人材維持の取組を支援するとともに、革新炉の世界標準の獲得、戦略的チーム編成、海外規格の認証取得、軽水炉SMRである米国のNuScaleやカナダのBWRX-300プロジェクトに国内メーカーも参画し、主要なサプライヤーになることを目指すとして、経済

産業大臣から首相、環境省大臣及び有識者に説明された。その後、内閣総理大臣を議長とする「GX（グリーン・トランスフォーメーション）実行会議」⁽⁴⁾が2022年7月に開始され、8月24日の第2回会議では、原子力発電所の再稼働加速（緊急対策）、再稼働への関係者の総力の結集、安全性の確保を大前提とした上で運転期間の延長などの既設原発の最大限の活用、今冬まで最大9基の稼働確保、新たな安全メカニズムを組み込んだ次世代革新炉の開発・建設、2030年に20～22%の実現、2050年カーボンニュートラル（CN）の実現・安定供給（政策再構築）を本年秋までにとりまとめていくこととなり、原子力発電を最大限活用する方向に政府は舵を切った。

日本に限らず、先進国の多くは、2050年CNの実現やウクライナ侵攻等を踏まえ、過度な化石燃料依存からの脱却に向けて原子力発電所の新規建設の方針とそれに向けた政策支援策を具体化する動きがある。米国エネルギー省（DOE）は、「革新的原子炉実証プログラム」を開始し、2基の原子炉の建設や8種の新型炉の研究開発を支援するとともに、老朽石炭火力をSMR等で置換可能と分析している。英国は「エネルギー安保戦略」として2050年までに原子力発電の割合を25%とするため建設ペースを加速することとした。フランスは2050年に大型革新軽水炉14基を建設することとし電力会社EDFを完全国有化した。韓国でも尹大統領となってからは2030年に原発割合を30%以上にし、2基増設する政策の方向性を示した。

では、新たな安全メカニズムを組み込んだ次世代革新炉とはどのような原子炉であろうか。GX実行会議では次世代革新炉として、次世代軽水炉、SMR、高温ガス炉、高速炉、核融合炉などを挙げている。本稿ではそれらのうち、SMRについて取り上げ、国内外のSMRの開発動向や安全上の特徴などを概説する。

2. 小型モジュール炉（SMR）とは

SMRの定義は国や組織により差があるが、おおよそ

原稿受付 2022年9月12日

*1 （一財）電力中央研究所 エネルギー・トランスフォーメーション研究本部 研究統括室
〒240-0196 横須賀市長坂2-6-1
E-mail: ui@criepi.denken.or.jp

300 MWe以下のモジュールとして製造、構成される原子炉を指している。モジュールとは、パワーモジュールとして小型炉を複数並べて利用することを指すとともに、最近では原子炉システムの大部分を工場で製造して組み立ててしまうモジュール生産方式を意味していることが多い。

特徴として、以下の項目が挙げられる。

- (1) 自然循環により炉心や格納容器を冷却する受動的安全系など革新的な安全設計を備えている
- (2) 炉心サイズが小さいため放射性物質の量が少なく事故時の放射線影響のリスクを低減でき、その結果防災エリアを縮小できる
- (3) 燃料取替不要または交換頻度を下げることでメンテナンス性能を高める
- (4) 電力需要小の地域や電力グリッド未発達地域への普及が可能
- (5) 熱供給、水素製造、海水淡水化など非発電用途への併用または専用などの自由度が拡大し、投資対効果の向上に繋がる
- (6) モジュール化と工場での建設により、現場での工事期間の短縮、コスト削減、早期投資回収が容易となり、また段階的に発電容量を増加できるため、初期投資の抑制や経済的負担を下げるができる

IAEAが2年ごとに発行しているSMR Book⁽⁵⁾では、SMRを、陸上と洋上の立地の違い、原子炉で発生する熱をタービンの回転運動に伝える冷却材の種類、核分裂に用いる中性子の速度域、原子炉のサイズ等に応じて、Table 1のように分類している。

Table 1 Categorization in the IAEA⁽⁵⁾ and SMR examples

	Land based	Marine based
Water cooled SMRs	IRIS, DMS, IMR, SMART, NuScale, BWRX-300, mPower, etc.	FNPP (KLT-40S), RITM-200M, ACPR50S, OFNP, etc.
High temperature gas cooled SMRs	GTHTR300, HTTR, STARCORE, GT-MHR, etc.	
Fast neutron spectrum SMRs	4S, ARC-100, BREST-OD-300, etc.	
Molten salt SMRs	smTMSR-400, FUJI, KP-FHR, etc.	CMSR
Micro-sized SMRs	MoveluX, AURORA, eVinci TM , MMR TM , etc.	

3. SMRの技術及び安全面の特徴

本章では、国内外で開発が進むSMRについて、安全機能を中心にその特徴について紹介する。通常の産業と比べ原子力は、燃料にウランやプルトニウムを用いることから放射線が発生する点で安全の観点が異なる。原子力安全とは、放射線影響から人と環境を護ることである。そのためには、「通常運転」、「運転時の異常な過渡変化」、及び「事故」時も含めあらゆるプラント状態において、

①原子炉の停止（原子炉の核分裂の連鎖反応を止め、出力が上昇する事故を起こさない）、②冷却（核分裂の連鎖反応の停止後でも発生する炉心の崩壊熱を除去し、燃料を溶融させない）、③閉じ込め（放射性物質を環境に放出しない）、を達成することが重要となる。①については、制御棒を挿入したり、中性子を吸収するボウ酸水を炉心に注入することで達成される。1F事故では、地震発生直後に①と②は達成されたものの、その後津波に襲われ外部電源や非常用電源等の喪失により、②の炉心冷却ができなくなり、③を達成できなかった。現在再稼働している既設の原子炉は、その点を改良したりアクシデントマネジメント策を構築して安全性を高めている。後述するSMRにおいては、電源が無くても自然循環などにより②及び③が達成される仕組みが多く導入されている点に留意されたい。

3.1 陸上のSMR

3.1.1 NuScale NuScaleは、米国NuScale Power社の開発する一体型加圧水型軽水炉（PWR）モジュールである。1つのモジュールのサイズは直径4.5 m、高さ23 mであり、原子炉容器を包み込むように蒸気発生器や格納容器が配置する構造となっている。炉心に冷却水を送り込む再循環ポンプ等は備えておらず、加熱された冷却水の比重の違いに起因する自然対流で循環する（Fig. 1）。1モジュールで77 MWe、12モジュールで最大924 MWeの出力で稼働可能である。耐用年数は60年、運転サイクルは24ヶ月、設備利用率は95%以上としている。このモジュールは、原子炉プールに漬けた状態で運用する。全交流電源喪失や炉心溶融に至るような事故時において、外部電源や非常用電源によるポンプ駆動による炉心への注水が無い状態でも、炉心から格納容器を介して原子炉プールに放熱することで、炉内冷却保持が達成され、燃料から発生する崩壊熱を除去できるしくみ

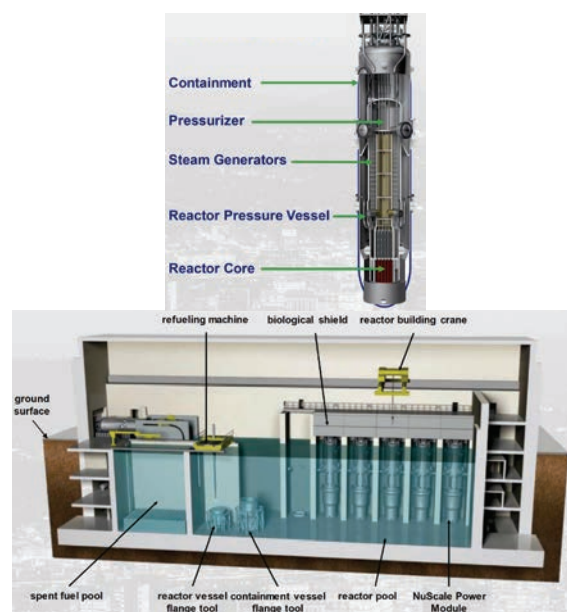


Fig. 1 Configuration of NuScale⁽⁶⁾

となっている。また、原子炉プールの沸騰により約30日後にプール水が空になった状態でも個々のモジュールは空冷で半永久的に長期炉心冷却が可能という設計になっている (Fig. 2)。その結果、炉心溶融が生じる発生頻度は、 3×10^{-10} /炉年 (30億年に1回の頻度) であるとしている。これは従来の原子炉よりも、事故のリスクが数桁低いことになる。

またNuScaleは、再生可能エネルギーとの共存のための負荷追従運転が可能としている。具体的には、

(1) モジュール毎のOn/Offの切替, (2) 制御棒挿入による出力の変更, (3) タービンバイパスによる調整, の3種類の方法を組み合わせることにより、変動する電力需要に柔軟に対応できるとしている。

日揮やIHIなどの国内企業は、NuScaleの研究開発に出資しているとともに、NEXIP (Nuclear Energy X Innovation Promotion) 事業のひとつである資源エネルギー庁の社会的要請に応える革新的原子力技術開発支援事業においても、NuScaleの実証に関する研究に取り組んでいる。

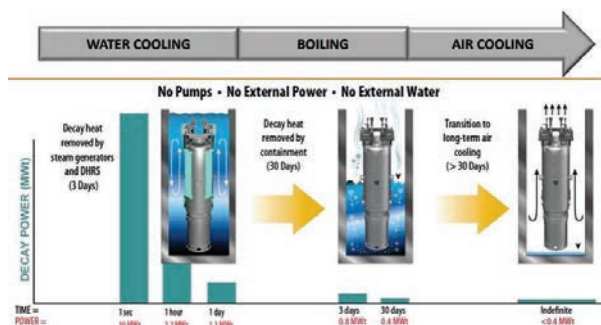


Fig. 2 Long-term decay heat removal without offsite power or water injection⁽⁷⁾

3.1.2 BWRX-300 GE-Hitachi及び日立GEは、米国の規制当局NRCの設計認証 (Design Certification) を取得しているESBWRをベースとして、自然循環の沸騰水型軽水炉 (BWR) であるBWRX-300の開発を進めている。

原子炉压力容器に繋がる大口径配管を排除することで、大破断及び中破断事故 (冷却材喪失事故) を設計基準事故から不要にするという設計思想で作られており、その結果、従来のBWRと比べ、電動駆動のECCSポンプ等の大型機器やサプレッション・プールを削除した構成となっている (Fig. 3)。事故時の非常用炉心冷却系としては、自然循環による静的安全システムである非常用復水器を備えており、電源や人的操作無しで7日間の冷却が可能としている。炉心に装荷する燃料集合体は、“Proven Technology”である既設のBWRと同一の設計とし、工場完成型一体据付建設手法を採用することで、許認可取得の審査の長期化リスクの抑制、工事期間や投資回収期間の短縮などが期待される。従来の商業BWR (1100 ~ 1400 MWe) に比べ、300 MWeと炉心サイズが小さい (炉心の放射性物質の量が少ない) ため、米国

では先進的小型炉に適した緊急時計画範囲 (EPZ) を敷地境界まで縮小することが検討されている。

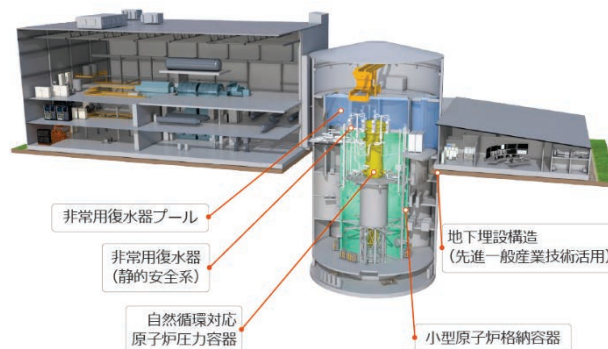


Fig. 3 BWRX-300⁽⁸⁾

カナダのオンタリオ州営電力会社OPGはBWRX-300を選定し、2028年建設完了を目指し詳細設計及び許認可の準備を進めている。サスカチュワン州営電力会社SaskPowerも2030年代中盤の運転開始を目指しBWRX-300最大4基の建設を計画している。米国の国営電力会社TVAはBWRX-300の設計、許認可、詳細プロジェクト計画を推進すると公表している。

3.1.3 多目的小型軽水炉 三菱重工は、2000年代に開発を進めてきた一体型モジュール炉 (IMR) をベースに、発電だけでなく船舶の動力としても利用できる多目的の小型軽水炉の開発を進めている。通常運転時の炉心は自然循環で冷却する構造とし、一次冷却材ポンプを不要としている。従来のPWRでは、原子炉容器と蒸気発生器は分離した構造であるが、一体型炉では原子炉容器の外周に蒸気発生器が密着する構造となり、主要な冷却材配管が無くなることから大口径配管破断事故の発生を原理的に排除している。また、事故時に動的機器が不要な受動的な安全系を採用し、非常用復水器により炉心を冷却するとともに、シビアアクシデント時には予めタンクに蓄えていた冷却水を重力落下で原子炉容器を水没させ、さらに静的に格納容器の外壁を冷却するシステム構成とし、従来の商業原子炉より炉心損傷確率を百分の一以下にするとしている。原子炉建屋を地下立地とすることで航空機衝突等への耐性を強化するとともに、原子炉の二重格納により放射性物質の閉じ込め機能を強化し、安全性を向上させている (Fig. 4)。

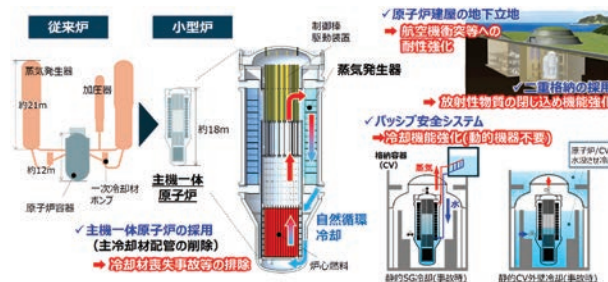


Fig. 4 Small Modular LWR for Multi-purpose use⁽⁹⁾

初期投資リスクを低減し、他電源や従来の商業原子炉と競合可能な高い経済性を実現するために、設備合理化による物量の低減、原子炉建屋のコンパクト化、先進建設工法の活用による建設工期の短縮、モジュール設計・工法による建設費低減を図るとしている⁽¹⁰⁾。

3.1.4 HTTR HTTRは、日本原子力研究開発機構(JAEA)の大洗にて稼働している熱出力30 MWtの高温ガス炉である。

燃料は、直径0.6 mmの球形のウラン燃料をSiCのセラミックスで被覆して焼結した粒子構造である。それを円柱状に固め、さらに六角形の黒鉛構造体の中に納めて炉心を構成している。運転中の核分裂により発生する放射性物質は、SiCの被覆構造内に閉じ込められる (Fig. 5)。

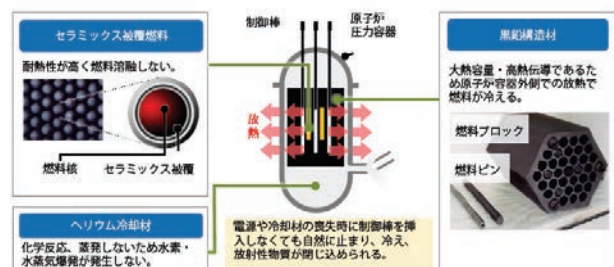


Fig. 5 Inherent safety features of the high temperature gas reactors⁽¹¹⁾

HTTRの出力密度 (炉心の単位体積当たりの発熱量) は、既設の商業軽水炉などと比べ低いため、1次系の配管破断等によりヘリウムが放出される冷却材喪失事故が起きた場合でも、被覆粒子燃料が溶融することなく空冷で冷却されて事故は終息する。

950℃という熱源は、軽水炉の約300℃の温度域と比べるとかなり高温であり、ヨウ素 (I) と硫酸 (S) の化学反応を利用したIS法という水素製造に利用できるとして、その実証試験が計画されている (Fig. 6)。

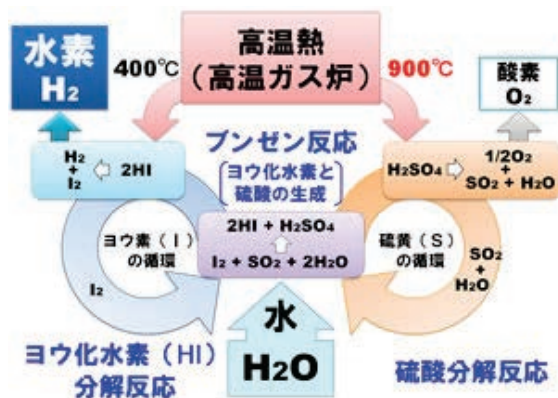


Fig. 6 Iodine-Sulfur hydrogen production process⁽¹²⁾

3.1.5 マイクロサイズSMR 三菱重工業は、離島、僻地、災害地用の電源として、多目的利用を可能とするポータブル原子炉の開発を進めている。トラックのコンテナな

どに収容可能なサイズであり、電気出力は500 kW_e、燃料交換が不要、長期間の遠隔・自動運転が可能であり、メンテナンスフリーの実現を目指している。黒鉛など熱伝導率の高い固体材料で全炉心を構成するため、環境への放射性物質の漏洩や、冷却材喪失事故などの事故要因を排除している (Fig. 7)。

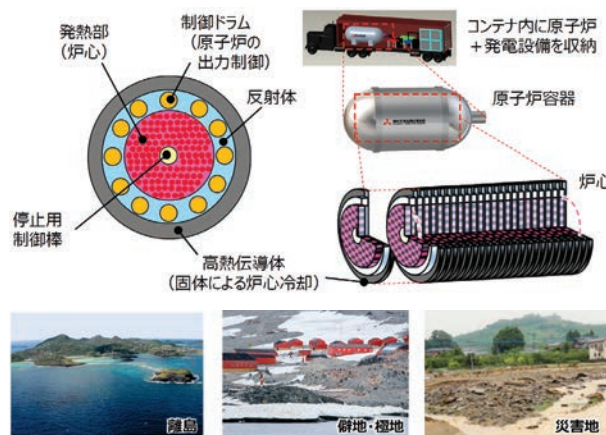


Fig. 7 Micro-sized SMR⁽⁹⁾

東芝は、水素化物減速ヒートパイプ冷却超小型炉 MovelluX™の開発を行っている。コンテナで輸送可能なサイズの10 MWt程度の原子システムであり、用途として発電、熱供給、高温水蒸気電解による水素製造など、様々な形態のエネルギーの供給を目指している (Fig. 8)。

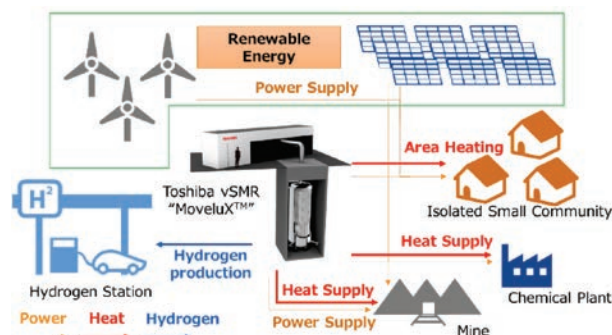


Fig. 8 Image of application of MovelluX™⁽¹³⁾

3.2 洋上のSMR

3.2.1 FNPP (KLT-40S) 洋上の原子力発電所の開発や運用は、世界ではロシアが先行している。陸上のSMRも含め、最も早く商業運転を開始したSMRは、ロシアで開発された洋上で稼働する浮体式原子炉 (FNPP) Akademik Lomonosovである。2020年5月からシベリアのベヴェクにおいて操業開始し、ビリビノ原子力発電所のリプレースとして鉾山の電源供給やベヴェク市の暖房網への熱供給を行っている (Fig. 9)。炉心には、原子力砕水船の動力としても用いられている改良型KLT-40S原子炉を2基搭載している。発電容量は52 MW_e × 2基、燃料は二酸化ウラン (UO₂)、ウラン235の濃縮度は18.6%であり、通常の商業軽水炉の最大5%よりも

高くし、燃料交換の頻度を下げ、長期運転を可能としている。Akademik Lomonosovの浮体構造自体には推進の動力は無く、サンクトペテルブルグにて建設され、北極海を曳航してペヴェクに運ばれた。3年毎に燃料交換を行い、12年に一度フィンランドとの国境に近いムルマンスクまで曳航して定期点検を行う。



Fig. 9 Akademik Lomonosov operating in Pevek⁽¹³⁾

3.2.2 OFNP (Offshore Floating Nuclear Power Plant)

Akademik Lomonosovは沿岸に係留して発電するのに対し、MITのBuongiorno教授やGoley教授らの研究チームは、沖合で稼働する浮体式原子炉（OFNP）のコンセプトを提唱し、その成立性の研究を進めてきた。洋上で操業する石油採掘リグとして円柱状の浮体構造物が実用化されており、その中に実証済みの商業軽水炉を小型炉から大型炉まで、そのまま搭載するという発想である（Fig. 10）。特徴としては、以下の点が挙げられる。

- (1) 沖合では地震や津波の影響が少なくなり、火山の噴火の際は曳航により離隔距離を確保できるので、外的自然ハザードが下がる
- (2) 周辺に海水が豊富のため最終ヒートシンクが枯渇しないので、炉心溶融事故を実質的に排除しやすい
- (3) 沖合で稼働するため住民の避難を不要または負担を緩和するとともに立地自由度を拡大できる

これらが達成できれば、1F事故の教訓や課題を容易に解決できることになる。

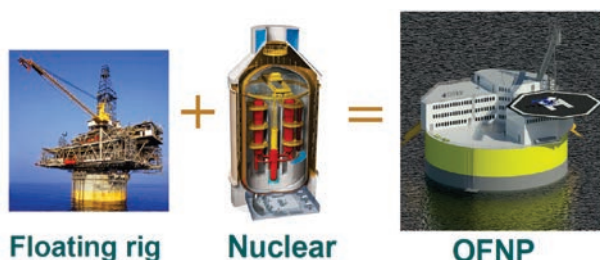


Fig. 10 Concept of OFNP⁽¹⁴⁾

国内でも、産業競争力懇談会（COCN）の浮体式原子炉プロジェクト⁽¹⁵⁾、⁽¹⁶⁾やNEXIP事業⁽¹⁷⁾において、国内へ

の導入に向け成立性の検討が進められている（Fig. 11）。船舶や潜水艦で用いられる原子炉は、揺動や傾きの影響を受けにくいように一次系を高圧にして沸騰させない加圧水型軽水炉（PWR）が主流である。一方、浮体構造物は直径80 m、高さ110 mの規模であり、喫水が70 mほどあるため、北米の沖合での波による揺動の周期は10～20秒、傾きは1万年に一度の大波でも4°程度との評価があり、安定している。そのため同プロジェクトでは、炉心で沸騰させた蒸気で直接タービンを回す沸騰水型軽水炉（BWR）も浮体構造物に搭載する原子炉の一つとして検討している。浮体揺動時に炉心を流れる冷却水の流量や出力の変動を評価する試験及び原子炉シミュレータによる解析から、これまでの評価では揺動によるBWR炉心への影響は少なく、成立する見通しが高いととらえ研究を継続中である。

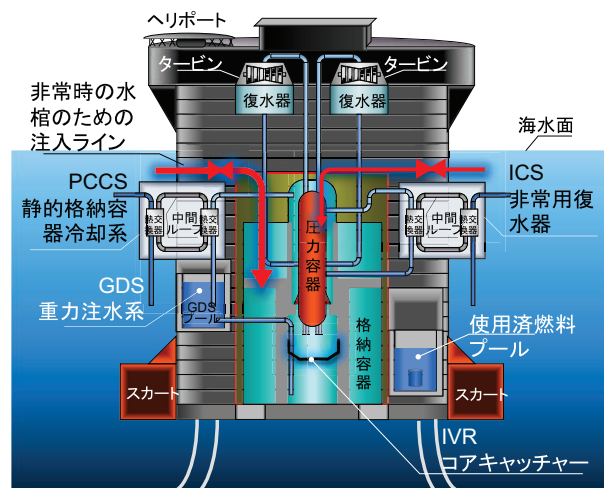


Fig. 11 OFNP developed in COCN and NEXIP projects⁽¹⁷⁾

4. SMRの導入に向けて

国内へのSMRの導入を考えた場合、その地域の電力需要やグリッド（電力ネットワーク）の規模、電気事業者のニーズ（出力規模、基数、用途）等とのマッチング、操作性やメンテナンス性（必要となる運転員や作業員数）、立地適合性（日本の地震や津波等のハザードを踏まえた立地場所固有の評価）、投資回収性、許認可や建設期間を踏まえた運転開始までの見通し、取替燃料の調達しやすいなどが関わってくると考える。

それぞれのSMRは、建設や運転の許可（ライセンス）を得るために、立地する国の規制当局の審査が必要となる。我が国では、安全設計の基本方針の妥当性及び立地条件の適否の確認を目的とした原子炉設置許可申請を行い、原子力規制委員会の審査を受けて許可を得ることが最初のステップとなる。米国では、規制当局NRCが、NuScaleのために固有の設計審査基準を制定し、設計認証（Design Certification）申請書にどのような情報を記載する必要があるかを明確にした⁽¹⁸⁾ことで、短期間での申請を可能にした。国内の既設炉の再稼働を想定した現

行の原子力規制委員会規則、旧来の安全審査指針やECCS評価指針など、SMRには適していないところも見受けられるため、国内への導入においては規制要件、解釈及びガイドについて検討が必要と考える。申請する側も、先行して審査しているNRCの議論やSafety Review Plan (NUREG-0800) 等が参考になるであろう。

5. 結言

我が国のCO₂排出量（年間約11億トン、世界の約3.4%）を2050年に実質ゼロにすることがカーボンニュートラル（CN）であるが、そのうちの4割は発電部門である火力発電（LNG、石油、石炭）から発生する⁽⁹⁾。太陽光や風力などの再生可能エネルギーは国内にも普及してきたが、電源構成における再エネ比率を高めた場合、2050年に実現できる最大規模の蓄電池や揚水水力発電の導入を想定しても、電源供給の過剰と不足の差が大きいことから再エネが8割を超えると安定供給が難しくほぼ毎日停電が発生するため、導入できる限界は55%程度という試算もある⁽²⁰⁾。そのため再エネ導入だけによるCN達成は困難であり、原子力発電や、CO₂を回収して地中に貯留するCCS（Carbon dioxide Capture and Storage）の火力発電の導入が不可欠と考えるのが現実的であろう。安全確保を前提とした上で原子燃料サイクル（使用済燃料のリサイクル）が成立する次世代軽水炉やSMRを、将来は電気自動車への充電や水素燃料の製造にも利用することで、発電部門だけでなく運輸部門のCO₂も削減する方策が選択肢として考えられる。我が国の原子力関係技術が衰退する前に、人材の維持や技術力の向上とともに、SMR等の次期原子炉に適した規制制度の制定や、原子力発電事業に投資しやすくなるような国の施策等を遅滞なく進めていく必要がある。

参考文献

- (1) 内閣官房, 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.cas.go.jp/jp/seisaku/seicho/seichosenryakukaigi/dai6/index.html> > (accessed on 12 September, 2022).
- (2) 第6次エネルギー基本計画（閣議決定）< <https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005-1.pdf> > (accessed on 12 September, 2022).
- (3) 資源エネルギー庁, クリーンエネルギー戦略 中間整理, < https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/green_transformation/pdf/008_01_00.pdf > (accessed on 12 September, 2022).
- (4) 内閣官房, GX（グリーントランスフォーメーション）実行会議, < https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gx_jikkou_kaigi/index.html > (accessed on 12 September, 2022).
- (5) IAEA, Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, 2020 Edition < https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf > (accessed on 12 September, 2022).
- (6) K. Langdon, NuScale Small Modular Reactor (SMR) Overview, INPRO Dialogue Forum (2019) < <https://nucleus.iaea.org/sites/INPRO/df17/IV.5-KenLangdon-NuScale.pdf> > (accessed on 12 September, 2022).
- (7) Energy global news, < <http://www.energyglobalnews.com/nuscale-to-explore-smr-deployment-in-jordan/> > (accessed on 12 September, 2022).
- (8) 日立GE, BWRX-300, < https://www.hitachi-hgne.co.jp/activities/advanced_reactor/index.html > (accessed on 12 September, 2022).
- (9) 三菱重工, 三菱革新炉開発の取組み, 原子力小委員会 第1回革新炉WG, (2022).
- (10) 谷口, 革新的軽水小型炉の開発, 配管技術, (2022).
- (11) JAEA, 高温ガス炉とこれによる熱利用技術の研究開発, < https://www.jaea.go.jp/04/o-arai/research/research_03.html > (accessed on 12 September, 2022).
- (12) 木村, 岩城, 水素化物減速ヒートパイプ冷却超小型炉 MoveLuXTMにおける熱流動分野の取組と課題, 日本原子力学会2021年秋の大会予稿集, (2021), 2J_PL03.
- (13) Rosatom, < <https://www.rosatom.ru/journalist/news/teplo-ot-plavuchey-aes-vpervye-bylo-podano-v-gorodskuyu-teplovuyu-set-goroda-peveka/> > (accessed on 12 September, 2022).
- (14) J. Buongiorno, M. Golay, N. Todereas, Offshore Floating Nuclear Power Plant, (2021) < https://www.iaea.org/sites/default/files/21/07/iaea_webinar_marine-based_smrs_ofnp_m_golay_18may2021.pdf > (accessed on 12 September, 2022).
- (15) 産業競争力懇談会 浮体式原子力発電, 2020年度研究会最終報告, < <http://www.cocn.jp/report/45c42632047539b955658446818a95f00ec74583.pdf> > (accessed on 12 September, 2022).
- (16) 産業競争力懇談会 浮体式原子力発電, 2021年度プロジェクト 最終報告, < <http://www.cocn.jp/report/2d24cd957f9f32f2f975ae1d37b5f75f257037b4.pdf> > (accessed on 12 September, 2022).
- (17) 宇井, 国内における浮体式原子力発電の検討状況(4) NEXIPにおける浮体式炉の熱流動研究と過酷事故の実質的排除への展望, 日本原子力学会2022年秋の大会予稿集, (2022), 2L_PL04.
- (18) U.S.NRC, NuScale Power, LLC, Design-Specific Review Standard and Scope and Safety Review Matrix, NRC-2015-0160, ML15355A295 (2015).
- (19) 資源エネルギー庁, 2050年カーボンニュートラルの実現に向けた検討, 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 第33回会合 (2020).
- (20) 小竹, et al., 2050年エネルギーミックスの検討(2) - 4年間の実測データに基づいた電力需給の試算と非電力部門のCN化 -, 日本機械学会2021, W081-02, (2021).



旅先での愉しみ

What Makes My Business Trip More Enjoyable



船崎 健一*1
FUNAZAKI Ken-ichi

2020年1月前後から始まった新型コロナウイルス感染症拡大は私たちの生活様式を一変させましたが、学会活動の形も大きく変容しました。所謂オンライン講演会やハイブリッド講演会の登場です。この方式が普及し一般化した2021年頃にはほぼ全ての講演会がオンライン化され、その結果、移動や宿泊に時間やお金をかけずに研究成果の報告や最新情報の入手が出来るようになりました。ZoomやTeamsなどオンラインツールの便利さを一度知ってしまうと、対面での講演会の行く末を不安に感じたのも事実です。一方で、何か物足りなさ、味気なさを感じた人も少なくなかったと思います。その理由の一つには、講演会や打ち合わせが終了した後の飲食付きの交流会、懇親会がなくなってしまったことや、その土地での美味しい料理やお酒、観光地巡りなどが味わえないことが大きかったと思います。研究成果を聴講したり講演を行ったりと頭脳をフル回転させた後にご褒美を頂戴することは、講演会参加の醍醐味とも言えるからです。また、別の狙いを持って学会や社用の出張を愉しんでいる方も少なくないでしょう。私にとっては、見知らぬ街やお気に入りの場所でランニングすること、即ち「旅ラン」がお愉しみの一つです。

私は体質的に太りやすく、油断するとじりじりと体重が増えてしまいます。私のダイエット法は主としてランニングですが、これによって3回大幅に体重を落とすことに成功しました。初めの2回は修士と博士の時代ですが、博士課程の頃は大学周辺から広瀬川沿いのコースおよそ20kmをかなりの頻度で走っていました。大学主催の駅伝大会にも出て、院生の部(?)で優勝したこともあります。3回目のダイエットは2003年から2004年頃にかけてですが、この間の減量が最も振れ幅が大きく、少なくとも当時20kgは落としたと思います。大学に赴任後年1kgペースで蓄積された脂肪を過激とも言える速度で落としたため、大学内では船崎重病という噂が流れた?とも後で聞きました。多少肉が付いている方が長生きできるとは言いますが、それでもあの頃には戻りたくはありませんね。

体重が落ちるとランニングがより軽快になり、走るこ

とがとて楽しくなり、出張先でもランニングを行うのが習慣になりました。私のお気に入りの場所は、出張機会の多い東京、横浜です。東京は皇居一周を含むコースがもっとも走り甲斐のあるコースで、読者の皆様も走られたことがあるかと思います。このコースの最大の魅力は、一周約5kmのノンストップランが可能なこと。このコースには47都道府県の花のプレートが約100m間隔で設置されていますが、そのプレートに時折目をやりつつ、多くのランナーと競い合いながら一周すると、かなりの達成感が得られます。横浜は、みなとみらいや赤レンガ倉庫、山下公園、港の見える丘公園、外人墓地などを通るコースがおすすめで、このコース周辺の景色は最高です。東京、横浜以外では、お城巡り、お壕巡りもお気に入りです。江戸城や大阪城など、台地の縁にあるお城の周囲は意外と高低差があるため結構負荷レベルが高いのですが、姫路城、松本城、越後高田城(私の地元)などの平城などは私のような高齢者には走りやすいコースです。また別の意味で思い出があるコースとしては、熊本城と仙台北城跡(青葉城址)です。ともに地震との関連で特別な思いがあるのですが、特に2011年3月11日の朝、青葉城址から見た本当に穏やかだった太平洋の様子と、その数時間後三陸沿岸を襲った大津波とのギャップが私の脳裏に深く刻まれています。

ASMEなどで海外に行った時も何度か走りました。治安の良くないアメリカではほぼホテル内のトレッドミル上でのランニングでしたが、ヨーロッパではベルリン、グラスゴー、ストックホルム、など平坦な地形の都市でランニングを経験しました。デュッセルドルフでは道に迷ってしまい、見知らぬ女性ランナーに助けられたという、少し恥ずかしい経験もしていますが。

これと言った趣味もなく、強いて上げれば鉄旅くらいの私ですが、その旅に付随する愉しみについて紹介しました。本学会は定期講演会開催地の選定にかなりの労力を掛けていますが、その分なかなか普段行けない場所で開催されるため、旅ラン愛好者としては大変助かりました。また、その結果として47都道府県制覇(1泊2日条件)も達成できましたが、まだまだ国内には未踏の地も多く、今後も魅力的な開催地での定期講演会開催を期待しています。私自身学会活動も旅ランもいつまで続けられるか分かりませんが、気力知力体力(+財力)が許す範囲で継続できたらと考えています。

原稿受付 2022年9月20日

*1 岩手大学 理工学部
〒020-8551 盛岡市上田4丁目3-5
E-mail: funazaki@iwate-u.ac.jp

Asian Congress on Gas Turbines 2022報告

国際委員会

アジア圏でのガスタービン研究開発の情報交換の場として2005年からAsian Congress on Gas Turbines (ACGT, アジアガスタービン会議)が開催されている。当初は日本、韓国2か国でのスタートであったが、その後中国、インドと徐々に参加国が増え日中韓印持ち回りで夏ころに隔年開催する形に落ち着いている。

前回のACGT2020は新型コロナウイルスの対応のため中国 Qingdao (青島)で開催予定であったものが1年延期の末にフルリモート開催となった。その後関係者で協議の上、続くACGTは2022年に予定通り開催すること、開催地は韓国となることを決定した。さらに韓国内で検討が重ねられ、開催地は韓国東海岸の景勝地である Gangneung (江陵)にて開催されることが決定された。

ACGT2022はGangneung-Wonju National University (江陵原州大学)のDaesik KIM先生が中心となり当初は現地開催として準備が進められた。共催組織は、Gas Turbine Society of Japan (GTSJ), Korean Society for Fluid Machinery (KSFM), Chinese Society of Engineering Thermophysics (CSET), Indian Institute of Technology Bombay (IIT Bombay)である。依然として中国、インドの出国制限が厳しく、日本からの出国もビザに加えPCR検査も都合3回(韓国入国前、入国後、日本入国前)必要でありハードルが高いことからハイブリッド開催で実施されることとなった。この極めて流動的かつ厳しい状況下で開催準備を進めていただいた韓国現地委員会及び関係者の皆様には感謝とともに敬意を表したい。

開催期間は8月24日～26日の3日間で江陵原州大学(図1)にて4つのパラレルセッションで進められた。今回からOEMセッションとしてスポンサーシップ付きの発表セッションを募っており、日本からはKHI, MHIが参加して学会プログラムとWebページに明記されていた。発表申し込みに関しては106件(韓国83, 日本5, 中国10, インド6, ベトナム2)あったが、No-Showも多く最終的に発表された数は体感的に8割程度であった。オンラインでの発表者については事前に発表ムービーを投稿する形であったが、リモートから直接説明でも良いとされていたものの、実態はネットワーク負荷のことを考えてか発表者がオンライン上にいるにもかかわらず発表ムービーを再生する形式が多かった。韓国国内でも対面開催の学会はまだ少ない時期であったため久しぶりの再会を喜ぶ姿が多くみられ質疑も活発であった。現地参加者のほとんどは韓国からであったが、ハイブリッド開催のチャンスを活かし現地にはインドから3名、ベトナム

ム、日本からそれぞれ1名の参加であった。

キーノート講演は協賛4か国からそれぞれ1件ずつであり、すべて国際エネルギー機関(IEA)が提唱したNet Zero 2050に向けた動きに対応したものとなっている。日本のNet Zeroに向けた動きは非常に評価が高く、好意的なコメント多いのが印象的であった。

1. “Carbon-Free Electricity for Net-Zero Korea”, Dr. Seung Joo CHOE (Director, R&D Center for Future Green Technology, KIMM, Korea)
2. “International Liquefied Hydrogen Supply Chain”, Dr. Katsuya MORIMOTO (Technology Group Manager, Hydrogen Strategy Division, Kawasaki Heavy Industries, Japan)
3. “Role of GT towards Net-Zero Emissions”, Dr. Ravikanth AVANCHA (Technology Manager, Aerothermal Sciences, GE Research, India)
4. “Improving the Operational Flexibility of Heavy-duty Gas Turbines”, Prof. Xiaoyi ZHANG (Professor, Shanghai Advanced Research Institute, China)

会期2日目の終了後にACGTの関係者会議が4か国の代表者により実施され、当学会からは国際委員会から谷委員長、渡辺委員の2名が出席した。韓国側より今回の実施報告のちに意見交換が行われ、次回のACGTは2024年にインドで開催されることが確認された。8月のインドは酷暑なので11月から12月を予定している。日本での次回開催は2026年の予定である。

最後になるが、当学会からご参加、ご協力いただいた皆さんに厚く御礼申し上げるとともに、2024年にインドで開催されるACGT2024に多くの方々が出席されるようお願いする次第である。



図1 ACGT2022の会場の江陵原州大学

第34回ガスタービン教育シンポジウム報告

吉田 征二
YOSHIDA Seiji

2022年9月8日(木)と9日(金)の二日間にわたり本会主催の第34回ガスタービン教育シンポジウムが東京都調布市にある国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)調布航空宇宙センターで開催された。本シンポジウムの対面での開催は2019年以来の約3年ぶりとなる。新型コロナウイルス感染症拡大対策のため参加者数を減らしたので、参加者数は従来よりも少なく39名(学生:16名, 社会人:23名)であった。

本シンポジウムは、学生や若手技術者などガスタービン初学者を対象に、ガスタービンに関する基礎知識を学んで頂くことを主目的に、第一線で活躍されている各専門家の方々による講義と、実際のガスタービンとその関連の製造および研究開発施設の見学を併せた企画である。関東地区では毎年、関西地区では隔年で開催してきた。

今回は新型コロナウイルス感染症対策として、参加者数を減らす、会場の換気を行う、参加者にマスクの着用をお願いする等を行い、また従来行っていた懇親会は行わなかった。

1日目は、開会のあいさつの後、3件の講義(1)「ガスタービン概論」(山根敬氏)、(2)「ガスタービンと伝熱工学」(村田章氏)、(3)「JAXAの研究紹介」(石井達哉氏)が行われた。その後、試験設備見学として、飛行実験機やYS-11のコックピットが展示されている展示室、航空機用ジェットエンジンを地上静止条件で運転し各種試験を行う地上エンジン運転試験設備、マッハ数1前後の遷音速で巡航する航空機の空力特性の把握に用いられている遷音速風洞、CFDを初めとする数値シミュレーションを行い、またVirtual Reality技術を用いてシミュレーション結果の可視化を行うスーパーコンピュータシステムを見学した。

2日目は、前日に引き続き4件の講義、(4)「ガスタービンと流体工学」(山本誠氏)、(5)「ガスタービンと燃焼工学」(齊藤圭司郎氏)、(6)「ガスタービンと材料工学」(高木圭介氏)、(7)「ガスタービンと制御工学」(垣内大紀氏)が行われた。それぞれの講義ではガスタービンの

基礎から最新の技術動向までを専門家の立場から説明がなされ、受講者にとって今後の研究や仕事などを行ううえで役立つ内容となっており、講義の最後には時間が許す限り質疑応答が活発に行われた。

本シンポジウムでは本会が出版する「ガスタービン工学」を教材として用いており、これに沿った講義を講師の方々をお願いしている。ただ、本教材は300ページ近いもので、2日間の講義では時間の都合もあり、教材の一部分しか扱うことができなかった。今回参加された方々には教材を各々の現場で活用して頂き、ガスタービンの知識をさらに深めるのに役立てて頂ければ幸いである。

また、全講義終了後、2日間の講義に出席した参加者全員に修了の証として受講証が手渡された。また、参加者には、今後の教育シンポジウムの運営及び教材に関するアンケートにご協力頂いた。アンケート結果は次回以降の企画及び教材の改定に反映する予定である。

最後に、講義や資料の作成・準備にご尽力して頂いた講師の方々に感謝するとともに、会場の提供、見学会の実施において色々のご協力頂いたJAXAの関係各位に深く感謝いたします。

(集会行事委員会委員)



講義風景

第51回ガスタービンセミナーのお知らせ

「ガスタービンの最新技術動向および脱炭素社会への展望」をテーマとして、第51回ガスタービンセミナーを下記の通り開催致します。学会の会員、非会員を問わず、皆様のご参加をお待ちしております。

- 日 時 : 2023年1月24日 (火) 10:00 ~ 16:45 (現地受付開始 9:30)
1月25日 (水) 10:00 ~ 16:15
- 開催方式: ハイブリッド開催 (東京大学 武田先端知ビル 武田ホールおよび Zoom)
〒113-0032 東京都文京区弥生2丁目11-16
千代田線根津駅1番出口から徒歩5分
南北線東大前駅1番出口から徒歩10分
丸の内線、都営大江戸線本郷三丁目駅2番出口から徒歩25分
- 主 催 : 公益社団法人 日本ガスタービン学会
- 協賛依頼中: エネルギー・資源学会, 可視化情報学会, 火力原子力発電技術協会, 計測自動制御学会, 自動車技術会, コージェネレーション・エネルギー高度利用センター, スマートプロセス学会, ターボ機械協会, 電気学会, 日本液体微粒化学会, 日本エネルギー学会, 日本ガス協会, 日本機械学会, 日本金属学会, 日本航空宇宙学会, 日本航空技術協会, 日本材料学会, 日本セラミックス協会, 日本鉄鋼協会, 日本伝熱学会, 日本トライボロジー学会, 日本内燃機関連合会, 日本内燃力発電設備協会, 日本燃焼学会, 日本非破壊検査協会, 日本品質管理学会, 日本複合材料学会, 日本マリンエンジニアリング学会, 日本溶射学会, 日本陸用内燃機関協会, 日本流体力学会, 腐食防食学会, 溶接学会
- セミナープログラム (予定)

テーマ: 「ガスタービンの最新技術動向および脱炭素社会への展望」

第1日目 【1月24日 (火)】

※講演時間には質疑応答の時間を含む

「セッションⅠ: 航空分野脱炭素化の最新動向」			
1	10:00-11:00	国の航空機産業政策として「航空分野の脱炭素」に向けた今後の方針について	経済産業省 岩永健太郎 氏
2	11:00-12:00	(仮) 電動化・水素化の動向を理解するための基礎	東京大学 姫野 武洋 氏
3	13:30-14:30	エアラインパイロットによるCO ₂ 削減について	日本航空 (株) 毛利 洋志 氏
「セッションⅡ: 水素の最新技術動向」			
4	14:30-15:30	(仮) Energy Transition、水素パーク関連	三菱重工業 (株) 講師調整中
5	15:45-16:45	水素航空機向けのコア技術開発	川崎重工業 (株) 饒 雅英 氏

第2日目 【1月25日 (水)】

「セッションⅢ: 航空用ガスタービンの最新技術動向」			
6	10:00-11:00	航空機・航空エンジン安全性向上のための技術開発	(国研) 宇宙航空研究開発機構 賀澤 順一 氏
7	11:00-12:00	(調整中)	(株) 本田技術研究所 講師調整中
「セッションⅣ: 持続可能な航空燃料 (SAF) の活用に向けた取り組み」			
8	13:30-14:30	SAF の認証取得プロセスについて	(一財) 日本航空機エンジン協会 橋本 康 氏
9	14:45-16:15	「パネルディスカッション」 (仮) 官・民あるいはメーカー・ユーザそれぞれの視点に立った SAF に対する討論	座長 (株) IHI 塚田 央 氏 討論者調整中

6. 参加要領

- 1) 参加費 (税込) : ◆主催および協賛団体会員 2日間 33,000円 1日のみ 25,300円
 ◆会 員 外 2日間 44,000円 1日のみ 33,000円
 ◆学 生 無料

- 2) 申 込 方 法 : 日本ガスタービン学会ホームページよりお申し込みください。【申込締切: 2023年1月18日(水)】
 また、参加費につきましても、2023年1月18日(水)までに以下の方法にてお支払い下さい。
 支払い期日に間に合わない場合には、事務局までご連絡ください。

- ・郵便振替 00170-9-179578
 - ・銀行振込 みずほ銀行 新宿西口支店 (普) 1812298
 - ・PayPal (クレジットカード決済) ※後日、支払先情報をメールにてお送りします。
- *口座名はいずれも、「シャ）ニホンガスタービンガッカイ」です。

- 3) 事 務 局 : 公益社団法人 日本ガスタービン学会
 〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13-402
 Tel. 03-3365-0095 Fax. 03-3365-0387
 URL. <https://www.gtsj.or.jp> E-Mail. gtsj-office@gtsj.or.jp

訂 正

9月号に掲載した記事において、一部に誤った情報を掲載しておりましたので、この場を借りてお詫び、訂正させていただきます。関係者の方々には大変ご迷惑をおかけし申し訳ございませんでした。

ガスタービン学会誌 9月号 Vol.50 No.5 P.308

(誤) 海外ではNASA, Pratt & Whitney (P&W) 社, General Electric (GE) 社が共同開発したEPM-102⁽¹⁷⁾, 国内では物質材料研究機構 (NIMS) とIHI社が共同開発したTMS[®]*8 -138やTMS[®]-138Aがある⁽¹⁸⁾。

(正) 海外ではNASA, Pratt & Whitney (P&W) 社, General Electric (GE) 社が共同開発したEPM-102⁽¹⁷⁾, 国内では物質材料研究機構 (NIMS) とIHI社が共同開発したTMS[®]*8 -138がある⁽¹⁸⁾。

(誤) その後, Rolls-Royce (RR) 社のTrent1000の中圧タービン動翼に適用されている⁽²⁰⁾。

(正) また国内開発合金がRolls-Royce (RR) 社のTrent1000に適用された実績も報告されている⁽²⁰⁾。

株式会社IHI 航空・宇宙・防衛事業領域
 技術開発センター 材料技術部
 關根 伸仁

○ 本会協賛行事 ○

主催学協会	会合名	協賛	開催日	詳細問合せ先
気象影響防御技術コンソーシアム	第7回WEATHER-Eyeオープンフォーラム	協賛	2022/12/6	URL : https://www.weather-eye.jp/
日本機械学会	No.22-115「空力騒音入門講座 騒音計測の基礎と実例」	協賛	2022/12/7	URL : https://www.jsme.or.jp/event/22-115/
日本金属学会	日本金属学会シンポジウム「タンゲステン材料科学」	協賛	2022/12/8-9	URL : https://jim.or.jp/EVENTS/symposium/symposium_001.html
日本機械学会 関西支部	第384回講習会「実務者のための騒音防止技術」	協賛	2023/1/24-25	URL : https://jsmekansai.org/



▷ 入 会 者 名 簿 ◁

〔正会員〕

漆山 諒(IHI)

平川 和明(本田技術研究所)

水谷 孝治(三菱重工航空エンジン)

〔学生会員〕

鎌田 祥彰(九州大学大学院)

沼野 翔泰(高知工科大学大学院)

市枝 和典(東京都立大学)

次号予告 日本ガスタービン学会誌2023年1月号 (Vol. 51 No. 1)

特集 日本ガスタービン学会創立50周年記念特集

論説・解説

巻頭言 福泉 靖史(日本ガスタービン学会会長)

海外からみた日本のGT開発とGTSJ(仮題)

Prof. Joeg R. Seume, Ph D. (Leibniz Universitaet Hannover)

ガスタービン学会 国際関係の広がり役割の深化 仲俣 千由紀(IHI)

ガスタービン学会半世紀の歩みと将来展望 筒井 康賢, 吉識 晴夫

民間航空機用ガスタービンエンジン 平塚 真二, 村田 亮, 陶山 修二(日本航空機エンジン協会)

防衛装備庁における航空用ジェットエンジンの研究開発

宮入 嘉哉, 平野 篤, 山根 秀公, 高村 倫太郎(防衛装備庁航空装備研究所)

発電用ガスタービンの高温・高効率化の進展と将来展望 正田 淳一郎(三菱重工業)

産業用ガスタービン(大型発電用)(仮題) 奥山 知視, 井須 威博(東芝エネルギーシステムズ)

シーメンス製重負荷型ガスタービンについて(仮題) 山形 通史, 門脇 徹(富士電機)

産業用中小型ガスタービンの進展と将来展望 合田 真琴, 中安 稔(川崎重工業)

ガスタービン熱・流体数値解析技術 山本 誠(東京理科大学), 黒瀬 良一(京都大学), 山本 悟(東北大学)

伝熱・冷却技術 船崎 健一(岩手大学)

燃焼技術, 新燃料 山本 武(宇宙航空研究開発機構)

タービンを支える材料プロセス技術の変遷 村上 秀之(物質・材料研究機構)

蒸気タービン(仮題) 田沼 唯士(帝京大学)

第50回定期講演会報告

全体報告 岡本 光司(東京大学)

先端技術フォーラム報告 黒瀬 良一(京都大学), 菊地 亮太(京都大学), 古川 雅人(九州大学), 伊東 正雄(東芝エネルギーシステムズ), 澤 芳幸(ヴァイナス), 桜井 旭(アンシス・ジャパン), 富永 純一(JFEエンジニアリング), 藤澤 信道(早稲田大学)

※タイトル, 執筆者は変更する可能性があります。

2022年度役員名簿

会長 福泉 靖史 (三菱重工)

副会長 山本 誠 (東京理科大)

法人管理担当執理事 猪亦 麻子 (東芝エネルギーシステムズ), 飭雅英 (川崎重工), 黒木 英俊 (三菱重工)(兼務), 鈴木 雅人 (産総研), 辻田 星歩 (法政大)

公益目的事業担当執理事 石坂 浩一 (三菱重工), 及部 朋紀 (防衛装備庁), 桂田 健 (JALエンジニアリング), 黒木 英俊 (三菱重工), 鈴木 雅人 (産総研)(兼務), 高橋 徹 (電中研), 寺本 進 (東大), 山本 悟 (東北大), 渡邊 裕章 (九州大), 渡邊 啓悦 (荏原)

理事 岩井 裕 (京大), 清野 幸典 (東北電力), 仲俣 千由紀 (IHI), 藤原 仁志 (JAXA), 柳内 秀之 (本田)

監事 今成 邦之 (IHI), 二村 尚夫 (JAXA)

2022年度委員名簿 (順不同)

2022年11月4日現在

○は委員長

倫理規定委員会 ○猪亦 麻子 (東芝ESS), 飭雅英 (川崎重工), 桂田 健 (JALエンジニアリング), 黒木 英俊 (三菱重工), 辻田 星歩 (法政大)

自己点検委員会 ○猪亦 麻子 (東芝ESS), 飭雅英 (川崎重工), 桂田 健 (JALエンジニアリング), 黒木 英俊 (三菱重工), 辻田 星歩 (法政大)

運営委員会 ○辻田 星歩 (法政大), 猪亦 麻子 (東芝ESS), 飭雅英 (川崎重工), 桂田 健 (JALエンジニアリング), 黒木 英俊 (三菱重工), 後藤 尚志 (IHI), 酒井 義明 (東芝ESS), 鈴木 雅人 (産総研), 塚原 章友 (三菱重工), 寺本 進 (東大), 松岡 右典 (川崎重工), 松沼 孝幸 (産総研), 村田 章 (東京農工大), 山本 悟 (東北大)

企画委員会 ○黒木 英俊 (三菱重工), 猪亦 麻子 (東芝ESS), 太田 有 (早大), 桂田 健 (JALエンジニアリング), 鈴木 雅人 (産総研), 塚原 章友 (三菱重工), 辻田 星歩 (法政大), 村田 章 (東京農工大), 安田 聡 (三菱重工), 山本 悟 (東北大), 輪嶋 善彦 (本田), 渡辺 紀徳 (東大)

国際委員会 ○谷 直樹 (IHI), 伊藤 優 (東大), 岡井 敬一 (JAXA), 岡村 泰博 (IHI), 風見 秀樹 (本田), 岸根 崇 (三菱重工), 渋川 直紀 (東芝ESS), 鈴木 雅人 (産総研), 都留 智子 (川崎重工), 福田 雅文 (高効率発電システム研究所), 船崎 健一 (岩手大), 山本 誠 (東京理科大), 渡辺 紀徳 (東大)

学術講演会委員会 ○岡本 光司 (東大), 糟谷 宏樹 (東芝ESS), 櫻井 毅司 (都立大), 富永 純一 (JEFエンジニアリング), 中山 健太郎 (川崎重工), 范 勇 (産総研), 平川 香林 (IHI), 平野 孝典 (拓殖大), 藤澤 信道 (早大), 古澤 卓 (東北大), 水野 拓哉 (JAXA), 三戸 良介 (三菱重工), 山積 弘信 (本田), 渡邊 裕章 (九大)

集会行事委員会 ○桂田 健 (JALエンジニアリング), 石坂 浩一 (三菱重工), 尾崎 喜彦 (川崎重工), 河上 誠 (日立), 小島 充大 (富士電機), 澤 徹 (東芝ESS), 泰中 一樹 (電中研), 高山 祐輔 (三井E&Sマシナリー), 仲俣 千由紀 (IHI), 中村 織雄 (本田), 西村 英彦 (三菱重工), 樋口 隆幹 (防衛装備庁), 久枝 孝太郎 (IHI), 吉田 征二 (JAXA)

ガスタービン技術普及委員会 ○高橋 徹 (電中研), 石田 克彦 (川崎重工), 井筒 大輔 (三菱重工), 岡村 直行 (JAXA), 小田 豊 (関西大), 垣内 大紀 (IHI), 窪谷 悟 (東芝ESS), 多田 暁 (JALエンジニアリング), 寺本 進 (東大), 西田 啓之 (電中研), 林 明典 (三菱重工), 林 明宏 (富士電機), 姫野 武洋 (東大), 村田 章 (東京農工大), 山本 誠 (東京理科大), 渡辺 紀徳 (東大)

学会誌編集委員会 ○新関 良樹 (徳島文理大), 壹岐 典彦 (産総研), 岩井 裕 (京大), 加藤 千幸 (東大), 金子 雅直 (東京電機大), 黒瀬 良一 (京大), 阪井 直人 (川崎重工), 佐藤 哲也 (早大), 渋川 直紀 (東芝ESS), 清野 将人 (東北電力), 清野 幸典 (東北電力), 高橋 俊彦 (電中研), 田中 望 (IHI), 中野 賢治 (IHI回転機械エンジニアリング), 西内 昌義 (荏原エリオット), 西江 俊介 (三井

E&Sマシナリー), 野原 弘康 (ダイハツディーゼル), 原 浩之 (三菱重工), 平野 篤 (防衛装備庁), 福谷 正幸 (本田), 松崎 裕之 (元東北発電工業), 三ヶ田 一裕 (JALエンジニアリング), 村上 秀之 (NIMS), 森澤 優一 (東芝ESS), 柳内 秀之 (本田), 山下 一憲 (荏原), 山本 悟 (東北大), 渡邊 啓悦 (荏原)

論文委員会 ○山本 誠 (東京理科大), 青塚 瑞穂 (IHI), 壹岐 典彦 (産総研), 岩井 裕 (京大), 大北 洋治 (JAXA), 小田 剛生 (川崎重工), 鈴木 雅人 (産総研), 田頭 剛 (JAXA), 寺本 進 (東大), 中谷 辰爾 (東大), 姫野 武洋 (東大), 山田 和豊 (岩手大), 山本 武 (JAXA), 吉岡 洋明 (東北大)

ガスタービン統計作成委員会 ○村田 章 (東京農工大), 飯塚 清和 (IHI), 井田 真澄 (ターボシステムズユニテッド), 恵比寿 幹 (三菱重工エンジン&ターボチャージャ), 澤 徹 (東芝ESS), 前田 泰宏 (ヤンマーパワーテクノロジー), 眞鍋 壮 (三菱重工), 矢嶋 理之 (川崎重工), 山上 展由 (三菱重工)

産官学連携委員会 ○渡辺 紀徳 (東大), 壹岐 典彦 (産総研), 今村 満男 (IHI), 岡崎 正和 (長岡技科大), 飭雅英 (川崎重工), 岸部 忠晴 (MHI原子力研究開発), 北山 和弘 (東芝ESS), 幸田 栄一 (電中研), 西澤 敏雄 (JAXA), 野崎 理 (高知工科大), 原田 広史 (超合金設計研究所), 松崎 裕之 (元東北発電工業), 山根 秀公 (防衛装備庁), 輪嶋 善彦 (本田)

広報委員会 ○寺本 進 (東大), 壹岐 典彦 (産総研), 酒井 義明 (東芝ESS), 多田 暁 (JALエンジニアリング), 谷 直樹 (IHI), 藤澤 信道 (早大), 山本 誠 (東京理科大), 吉田 征二 (JAXA)

表彰委員会 ○山本 誠 (東京理科大), 猪亦 麻子 (東芝ESS), 桂田 健 (JALエンジニアリング), 黒木 英俊 (三菱重工), 山本 悟 (東北大)

将来ビジョン検討委員会 ○高橋 徹 (電中研), 小田 豊 (関西大), 賀澤 順一 (JAXA), 酒井 義明 (東芝ESS), 柴田 貴範 (岩手大), 柴田 良輔 (本田), 寺本 進 (東大), 仲俣 千由紀 (IHI), 半澤 徹 (東北電力), 姫野 武洋 (東大)

男女共同参画推進委員会 ○森川 朋子 (三菱重工), 池田 亜矢子 (NIMS), 猪亦 麻子 (東芝ESS), 川岸 京子 (NIMS), 川澄 郁絵 (本田), 都留 智子 (川崎重工), 山上 舞 (IHI)

調査研究委員会 ○川岸 京子 (NIMS), 大北 洋治 (JAXA), 岡崎 正和 (長岡技科大), 岡田 満利 (電中研), 長田 俊郎 (NIMS), 寛 幸次 (東京都立大), 金久保 善郎 (IHI), 岸部 忠晴 (MHI原子力研究開発), 東部 泰昌 (川崎重工), 野上 龍馬 (三菱重工航空エンジン), 日野 武久 (東芝ESS), 輪嶋 善彦 (本田)

創立50周年記念事業実行委員会 ○渡辺 紀徳 (東大), 太田 有 (早大), 佐藤 哲也 (早大), 鈴木 伸寿 (東芝ESS), 高橋 徹 (電中研), 新関 良樹 (徳島文理大), 姫野 武洋 (東大), 船崎 健一 (岩手大), 松沼 孝幸 (産総研), 山本 誠 (東京理科大)

IGTC2023実行委員会 ○太田 有 (早大), 大石 勉 (IHI), 小田 豊 (関西大), 岸根 崇 (三菱重工), 黒瀬 良一 (京大), 酒井 祐輔 (川崎重工), 鈴木 正也 (JAXA), 玉井 亮嗣 (川崎重工), 塚原 章友 (三菱重工), 寺本 進 (東大), 姫野 武洋 (東大), 平川 香林 (IHI), 武藤 昌也 (名城大)

IGTC2023総務委員会 ○姫野 武洋 (東大), 小田 豊 (関西大), 鈴木 正也 (JAXA), 藤澤 信道 (早大)

IGTC2023論文委員会 ○黒瀬 良一 (京大), 井上 智博 (九大), 岩井 裕 (京大), 岡井 敬一 (JAXA), 齋藤 敏彦 (三菱重工), 酒井 英司 (電中研), 佐藤 彰洋 (IHI), 柴田 貴範 (岩手大), 鈴木 正也 (JAXA), 田頭 剛 (JAXA), 高橋 徹 (電中研), 谷 直樹 (IHI), 都留 智子 (川崎重工), 寺本 進 (東大), 堀川 敦史 (川崎重工), 武藤 昌也 (名城大), 山本 誠 (東京理科大), 渡邊 裕章 (九大)

IGTC2023行事委員会 ○岸根 崇 (三菱重工), 石川 智貴 (東芝ESS), 風見 秀樹 (本田), 佐藤 賢治 (三菱重工), 塚原 章友 (三菱重工), 堂浦 康司 (川崎重工), 中村 龍司 (三菱重工), 平川 香林 (IHI)

IGTC2023展示委員会 ○酒井 祐輔 (川崎重工), 川澄 郁絵 (本田), 庄司 烈 (JAXA), 須原 亮 (川崎重工), 竹田 敬士郎 (川崎重工), 玉井 亮嗣 (川崎重工), 原田 純 (川崎重工), 廣瀬 彬 (GE), 藤木 貴子 (IHI), 前田 大輔 (三菱重工), 森澤 優一 (東芝ESS)

IGTC2023財務委員会 ○大石 勉 (IHI), 平川 香林 (IHI)

編集 後記

コロナの感染拡大が叫ばれてからはや2年半、正直これだけ長くこうした生活が続くとは思っても見ませんでした。至近やっと治療薬の登場と「Withコロナ」を意識した生活様態の定着に拠り出口が見えつつある様にも思えます。ふとコロナ前の状況を顧みてみましたところ、3年前の今頃はというと「ラグビーワールドカップ」が日本で開催され、日本代表が並み居る強豪を次々と撃破し、史上初のベスト8に進出、国内中が沸き立っていた時であったことに驚いておりました。時間間隔のズレというか、コロナの圧倒的閉塞感に拠るものかははっきりしませんが、随分と昔のことに感じるのは私だけでしょうか。こうした事例を見ますと、読者の皆さまはきっと違うやにも思いますが、人間の時間感覚の曖昧さを強く感じますとともに、日々時間感覚を大事に事に臨む重要性を痛感しているところです。

今回の特集では「2050年脱炭素社会実現に向けた今後のアプローチ」と題し、今後の発電技術とその付帯技術から、エネルギー貯蔵技術、さらには新たなエネルギー利用技術と、広範に渡り造詣深い著者の方々にご無理を申しその最新情報をご執筆頂きました。今回、横断的に最新の技術動向をご覧頂くことで、現状技術の延長線では到達の難しい2050年脱炭素社会の実現に向け、新たなエネルギーの創出形態から利用形態に至るまで、読者の皆様のそれぞれの業態やご事情等に応じた考察が頂ける素材を提供させて頂けたのでは無いかと感じているところです。

2050年脱炭素社会の実現に向けては、誰かがその任務を負うのではなく、お一人お一人がそれぞれの持論を持ち、その実現に向けた活発な議論を酌み交わしつつ、技術的なブレークスルーを自分事として捉え、時間軸を常に意識しつつ各々の立場の中で着実に進めて行かなければ、近づくことさえも難しい難題と個人的には感じております。またエネルギーの創出から利用形態に至るまで、「脱炭素社会」は現状社会形態とは異なる不連続なものであると予想され、少なからず現状の生活形態や産業構造も転換することは必須とも思えます。ここ日本という資源の無い国にあってそれをどうやって成し遂げるかは、世界各国が進めるやり方とは一線を画したオリジナルモ

デルを創造する必要があるのかも知れません。2050年まであと28年、今しっかりと考えを尽くすことが未来を作る礎になると感じております。

最後に今回の特集を纏めるにあたり、企画案の段階から様々な議論やご助言を頂きました皆様に改めて御礼申し上げますとともに、お忙しい時間を割いて頂き、貴重な記事をご提供頂きました著者の方々に心から敬意を表したいかと思います。今回の特集記事が、読者の皆様のご今後のご研鑽の一助となれば幸いです。（清野 幸典）

- 11月号アソシエイトエディタ
清野 幸典（東北電力）
- 11月号担当委員
佐藤 哲也（早稲田大学）
田尻 敬次（荏原エリオット）
平野 篤（防衛装備庁）
三ヶ田 一裕（JALエンジニアリング）
清野 将人（東北電力）

（表紙写真）

今回の表紙については、【論説・解説】の著者より流用およびお借りしています。

詳細については、下記記事をご参照ください。

- ・「BWイデオルの浮体式洋上風力発電について」
..... (P.395 ~ 400)
- ・「超臨界地熱資源の開発」 (P.401 ~ 407)
- ・「アンモニア利用発電技術の今後の展望」
..... (P.408 ~ 413)
- ・「脱炭素社会を目指した水素・アンモニアガスタービンの開発について」 (P.414 ~ 421)
- ・「VPPの活用について」 (P.422 ~ 425)
- ・「苫小牧におけるCCS大規模実証試験と二酸化炭素貯留適地調査事業の概要」 (P.426 ~ 431)
- ・「脱炭素社会実現に向けた定置用蓄電池開発の現状と今後の展望」 (P.432 ~ 437)
- ・「原子力技術 小型モジュール炉の開発動向と安全機能の特徴」 (P.438 ~ 443)

だより

♣事務局

2年ぶりに対面形式で九州福岡にて開催された定期講演会も盛況のうちに終わり、創立50周年記念行事も対面とWebによるハイブリッド形式により行われることになり、見学会も2年ぶりに北海道にて開催されることとなりました。（記念行事と見学会は書いてある時点ではまだ開催されていません）行事が目白押しとなった今年の秋はまだまだ予断を許しませんが新型コロナウイルスによる感染症の波もようやく出口が見えてきているのかな、と感じる日々です。個人的にも各地で行われる催事、展覧会にひさびさに足を運ぼうかなと思うことが増えてきました。とはいえ、今年の冬もコロナ感染症第8波が来る、とか、インフルエンザが流行する、とも言われていますので、適宜ワクチンを活用するなどして万

感染した場合でも重症化を防ぎたいと思っています。

感染症が拡大・まん延していた時期は、感染のリスクを避けるために出勤するのも多少ためらうことが多く、事務局も早々にリモートワークを取り入れることになりました。常日頃環境の変化にイマイチ乗れない私は、最初はリモート接続やZoomの扱いに不慣れなこともあり、やっぱり事務所に出勤したいなあ、と思うことも多かったのですが、徐々に慣れてくるにつれ、確認したいことが出来たりすると、自宅からファイルを開覧・作成できることにメリットを感じることも多くなりました。これからは出勤とリモートワークを上手く活用しながら業務を進めていきたいと思っています。

（田頭 味和）

学会誌編集および発行要領（抜粋）

2018年7月13日改定

1. 本会誌の原稿はつぎの3区分とする。
 - A. 依頼原稿：学会誌編集委員会（以下、編集委員会）がテーマを定めて特定の人に執筆を依頼する原稿。執筆者は本学会会員（以下、会員）外でもよい。
 - B. 投稿原稿：会員から自由に随時投稿される原稿。執筆者は会員に限る。
 - C. 学会原稿：本学会の運営・活動に関する記事（報告、会告等）および会員による調査・研究活動の成果等の報告。
- 1.2. 技術論文の投稿については、「技術論文投稿要領」による。
- 1.3. 英文技術論文の投稿については、Instruction to Authors, JGPP (International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems) による。
2. 依頼原稿および投稿原稿は、論説・解説、講義、技術論文、寄書（研究だより、見聞記、新製品・新設備紹介）、随筆、書評、情報欄記事の掲載欄に掲載することとし、刷り上がりページ数は原則として以下のとおりとする。

論説・解説、講義	6ページ以内
技術論文	「技術論文投稿要領」による
寄書、随筆	3ページ以内
書評	1ページ以内
情報欄記事	1/2ページ以内
3. 原稿の執筆者は、本会誌の「学会誌原稿執筆要領」に従って原稿を執筆し、編集委員会事務局（以下、編集事務局）まで原稿を提出する。編集事務局の所在は付記1に示す。
4. 依頼原稿は、編集委員会の担当委員が、原稿の構成、理解の容易さ等の観点および図表や参考文献の書式の観点から査読を行う。編集事務局は査読結果に基づいて、執筆者への照会、修正依頼を行う。
5. 投稿原稿のうち技術論文以外のものは、編集委員会が審査し、本会誌への掲載可否を決定する。
6. 投稿原稿のうち技術論文の審査、掲載については、「技術論文投稿要領」に従う。
7. 依頼原稿の執筆者には、学会事務局から原則として「学会誌の執筆謝礼に関する内規」第2条に定めた謝礼を贈呈する。
8. 非会員の第一著者には掲載号学会誌1部を贈呈する。
9. 本会誌に掲載された著作物の著作権は原則として本学会に帰属する。本学会での著作権の取扱いについては別途定める「日本ガスタービン学会著作権規程」による。
10. 他者論文から引用を行う場合、本会誌に掲載するために必要な事務処理及び費用分担は著者に負うところとする。

付記1 原稿提出先および原稿執筆要領請求先（編集事務局）
 ニッセイエブロ(株) 企画制作部
 学会誌担当：高橋 邦和
 〒105-0003 東京都港区西新橋1-18-17 明産西新橋ビル
 TEL：03-5157-1277
 E-mail：eblo_h3@eblo.co.jp

技術論文投稿要領（抜粋）

2021年7月11日改定

1. 本学会誌に投稿する和文技術論文（以下和文技術論文）およびJGPPに投稿する英文技術論文（以下英文技術論文）は次の条件を満たすものであること。
 - 1) 和文技術論文の責任著者は、論文投稿時および論文掲載時に、本学会の正会員または学生会員であること。英文技術論文についてはこの限りではない。
 - 2) ガスタービン及びエネルギー関連技術に関連するものであること。
 - 3) 和文技術論文は「学会誌原稿執筆要領」に従って執筆された日本語原稿、英文技術論文は「Instruction to Authors」に従って執筆された英語原稿であること。
 - 4) 一般に公表されている刊行物に未投稿であること。ただし、以下に掲載されたものは未投稿と認め技術論文に投稿することができる。
 - ・本学会主催の学術講演会・国際会議のプロシーディングス
 - ・特許および実用新案の公報、科学研究費補助金等にかかわる成果報告書
 - ・他学協会の講演要旨前刷、社内報・技報、官公庁の紀要等の要旨または抄録
2. 技術論文のページ数は、和文技術論文は原則として刷り上がり8ページ以内とする。ただし、「学会誌の掲載料に関する内規」第2条に定めた金額の著者負担で4ページ以内の増ページをすることができる。英文技術論文は「Instruction to Authors」に定める。
3. 和文技術論文のカラー図は電子版と本学会ホームページ上の「技術論文掲載欄」に掲載し、冊子体にはモノクロ変換した図を掲載する。著者が「学会誌の掲載料に関する内規」第3条に定めた金額を負担する場合には、冊子体もカラー印刷とすることができる。
4. 投稿者は、「学会誌原稿執筆要領」「Instruction to Authors」に従って作成された原稿電子データを、「技術論文原稿表紙」とともに技術論文投稿システム(Editorial Manager)から提出する。
5. 投稿された論文は、論文委員会が「論文査読に関する内規」に従って査読を行い、掲載可否を決定する。
6. 論文内容についての責任は、すべて著者が負う。
7. 和文技術論文の著作権に関しては、別途定める「日本ガスタービン学会著作権規程」、および「学会誌編集および発行要領」第5章第16条を適用する。英文技術論文の著作権に関しては、別途定める「日本ガスタービン学会著作権規程 (Copyright Regulations of the Gas Turbine Society of Japan)」, および「英文論文集発行要領」第6章を適用する。

日本ガスタービン学会誌

Vol. 50 No. 6 2022.11

発行日 2022年11月18日

発行所 公益社団法人日本ガスタービン学会

編集者 新関 良樹

発行者 福泉 靖史

〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13

第3工新ビル402

Tel. 03-3365-0095 Fax. 03-3365-0387

郵便振替 00170-9-179578

銀行振込 みずほ銀行 新宿西口支店

(普) 1703707

印刷所 ニッセイエブロ(株)

〒105-0003 東京都港区西新橋1-18-17

明産西新橋ビル

Tel. 03-5157-1277

©2022, 公益社団法人日本ガスタービン学会

複写複製をご希望の方へ

公益社団法人日本ガスタービン学会では、複写複製に係る著作権を一般社団法人学術著作権協会に委託しています。当該利用をご希望の方は、学術著作権協会 (<https://www.jaacc.org/>) が提供している複製利用許諾システムを通じて申請ください。