

三菱重エグループ

カーボンニュートラル ハンドブック

三菱重工 | MISSION NET ZERO



三菱重工業株式会社

〒100-8332 東京都千代田区丸の内 3-2-3 丸の内二重橋ビル
〒220-8401 神奈川県横浜市西区みなとみらい 3-3-1 三菱重工横浜ビル

www.mhi.com

お問合せ先
<https://solutions.mhi.com/jp/contact-us-cn/>



2024年3月更新

CONTENTS

三菱重工グループ カーボンニュートラル宣言	2
カーボンニュートラル=Net Zeroとは	3
Scope1、2、3とは	4
水素の“色”について	4
三菱重工グループのカーボンニュートラル社会実現に向けたバリューチェーン	5
三菱重工グループのカーボンニュートラル ロードマップ	7
既存インフラの脱炭素化	9
カーボンフリー発電	
① 水素・アンモニア燃料転換	9
脱炭素社会の実現を目指す「高砂水素パーク」と「長崎カーボンニュートラルパーク」	9
② GTCC+CCS	11
③ 原子力発電	13
バイオマス	
④ バイオマス・SAF燃料転換	15
エネルギーソリューション	
⑤ エナジーソリューションプロバイダー	17
⑥ LNGサプライチェーン事業	19
再生可能エネルギー	
⑦ 地熱発電	19
カーボンフリー燃料製造	
⑧ ターコイズ水素製造	20
⑨ グリーン水素製造	22
グリーンスティール(製鉄)	
⑩ グリーンスティールメイキング(製鉄プロセスの脱炭素化)	25
工場のカーボンニュートラル化	
⑪ CO ₂ 削減施策の見える化	27
⑫ 三原カーボンニュートラル先行実現プロジェクト	28
水素エコシステムの実現	29
カーボンフリー燃料サプライチェーン事業	
水素・アンモニア供給事業	
米国 グリーン水素プロジェクト	30
米国 Entergy社との協業	30
英国 水素焚き転換プロジェクト	31
日本 水素キャリアサプライチェーン	31
コージェネ用ガスエンジン商品機で都市ガス・水素混焼の試験運転に成功	32
原子力(高温ガス炉)の高温熱を活用した水素製造	33
水素コンプレッサ	33
水素ステーション向け液体水素昇圧ポンプ	34
CO ₂ エコシステムの実現	35
ブリーズ・コンセプト	35
CO ₂ 回収装置(CO ₂ NTAIN)	37
CO ₂ NNEX	40
CO ₂ 利用技術(CO ₂ NVERT)	42



三菱重工グループ カーボンニュートラル宣言

三菱重工グループは、2021年10月29日に2040年カーボンニュートラル“MISSION NET ZERO”を宣言しました。
CO₂削減に貢献できる当社グループの製品・技術・サービスを通じて、世界中のパートナーと協調し、新しいソリューション、イノベーションで、グローバル社会全体のNet Zero実現に貢献していきます。



私たち三菱重工グループが掲げる2040年カーボンニュートラル宣言“MISSION NET ZERO”。まずはその目標を表1に示します。第1の目標は、当社グループのCO₂排出量 (Scope1、2)を、2030年までに50%削減(2014年比)、2040年までにNet Zeroにすることです。第2の目標は当社グループ製品の使用によるお客さまのCO₂排出量が大部分を占めているScope3から、CCUSによる削減貢献分を差し引いた、バリューチェーン全体からのCO₂排出量を、2030年に50%削減(2019年比)、2040年にNet Zeroにすることです。日本を含めた主要先進国のNet Zero達成時期の2050年よりも、10年前倒しで達成します。革新的技術を導入し、経済性と信頼性を両立するソリューションを提供することで、トランジションコストを低減し、持続可能な社会の実現に貢献します。



目標年	当社グループのCO ₂ 排出削減 Scope 1, 2	バリューチェーン全体を通じた 社会への貢献 Scope 3 + CCUS 削減貢献
2030年	▲ 50% (2014年比)	▲ 50% (2019年比)
2040年	Net Zero	Net Zero

表1 2040年カーボンニュートラル宣言

カーボンニュートラル=Net Zeroとは？

カーボンニュートラルとは、「CO₂の排出量から吸収量と除去量を差し引いた合計をゼロにする」ことを意味します。つまり、CO₂排出を可能な限り削減した上で、排出せざるを得なかった分については、植林や再利用により「吸収」または地下貯留などで「除去」することで、差し引きゼロ、つまりNet Zero (正味ゼロ)にするとということです。

図1にカーボンニュートラルのイメージを示します。

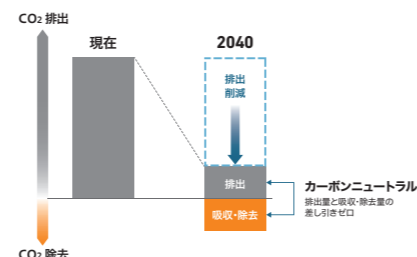


図1 カーボンニュートラルのイメージ

Scope1、2、3とは？

GHGプロトコル*で規定された、CO₂排出のScope1、2、3の定義を図2に示します。Scope1は、当社グループ自らのCO₂の直接排出であり、主に燃料の燃焼により発生します。例えば、工場の生産設備で必要となる熱源を所内ボイラーで賄う場合、このボイラーからの排ガスとして放出されるCO₂が対象になります。Scope2は、他社から供給された電気、熱・蒸気の使用に伴う間接排出であり、電気の使用が主要因となります。例えば、ビルや

工場で電力会社から購入した電気を使用する場合、その電気の発電過程で発生したCO₂などが対象になります。Scope3は、当社グループの上流および下流に位置する他社の排出であり、上流側は原材料が生産される過程や輸送される時に発生するCO₂など、下流側は当社グループの製品、例えば納めた発電機器の運転に伴い発生するCO₂や廃棄されるときに発生するCO₂などが対象になります。

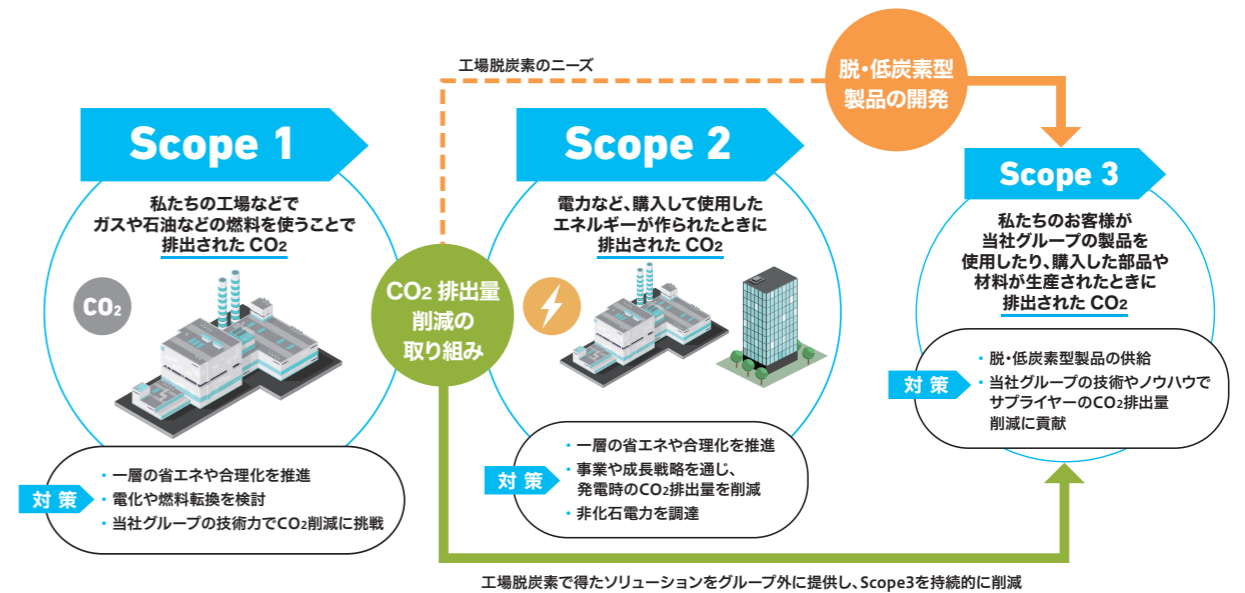


図2 CO₂排出削減Scope

* GHGプロトコル

世界的に推奨されている温室効果ガス(GHG)排出量の算定、報告の基準。米国の環境シンクタンク世界資源研究所(World Resources Institute:WRI)と持続可能な開発のための世界経済人会議(World Business Council for Sustainable Development:WBCSD)が主導し、各国政府機関も関与して開発された基準。

GHG Greenhouse gas

水素の“色”について

同じ水素でも原料や製造方法によって、水素が作られる過程でCO₂が発生している場合があります。それを区別するため、表2のように色分けをする考え方が広まっています。
グレー水素は、天然ガスなどを水蒸気改質反応させて得られる水素です。CO₂も同時に発生し大気に放出しているため、地球温暖化対策上、使用を抑制していく必要があります。
ブルー水素は、天然ガスなどを水蒸気改質反応させて得られる水素であり、同時に発生するCO₂を回収・貯留して大気放出しないため、カーボンフリー水素になります。ただし、貯留できる場所の確保が必要となります。
ターコイズ水素は、メタン直接分解によって得られる水素です。副産物として固体炭素を生成し、CO₂を放出することはなく、有効物としてタイヤ等の原料にすることができます。
グリーン水素は、再生可能エネルギーから水の電気分解などによって製造された水素です。

パープル水素は、原子力由来の高温核熱や電気を利用し、メタン直接分解や高温水蒸気電解などによって得られる水素です。グレーに対して、ブルー、ターコイズ、グリーンおよびパープルは、大気へCO₂を排出しないためカーボンフリー水素とみなされ、アンモニアも原料水素の色に応じて同様に色分けされています。一方で、水素の色によらず、水素のバリューチェーンで放出されるCO₂の量で統一的に低炭素水素を比較評価する考え方も広がっています。

水素の種類	エネルギー源	水素製造プロセス
グレー水素	化石燃料など	CH ₄ など→水蒸気改質→H ₂ +CO ₂ →大気放出
ブルー水素	化石燃料など	CH ₄ など→水蒸気改質→H ₂ +CO ₂ →回収・貯留
ターコイズ水素	燃焼熱・廃熱など・電気	CH ₄ →直接分解→H ₂ +C→貯蔵・有効利用など
グリーン水素	電気(再生)	H ₂ O→水電解→H ₂
パープル水素	核熱(原子力)、電気	CH ₄ など→直接分解→H ₂ +C→有効利用 H ₂ O→高温水電解など→H ₂

表2 水素の色分け

カーボンニュートラル社会実現に向けたバリューチェーン

図3に2040年カーボンニュートラル目標達成に向けたロードマップを示します。Scope1、2については、省エネ、自社技術の導入、脱炭素電力の導入により2040年にはCO₂排出ゼロを目指します。Scope3については、燃料転換、省エネ/電化でCO₂削減しますが、CO₂排出削減が困難な産業分野が存在するため、排出量を完全にゼロとすることはできません。このような産業には、Carbon dioxide Capture Utilization and Storage (CCUS) を活用し、その削減貢献を加味して、2040年のネットゼロを目指します。

なお、Scope3+CCUS削減貢献の定義には含まれませんが、当社が提供する原子力発電プラントやバイオマス発電プラントは、運転中にCO₂を排出しないことから、これらの導入量や稼働率が向上することで、CO₂排出量の低減に貢献していきます。

CCUS Carbon dioxide Capture Utilization and Storage

Scope1、2のCO₂排出量は2019年で約700千トン=70万トン規模であるのに比べて、Scope3は1,500百万トン=15億トン規模であり、2,000倍と圧倒的に多くなっています。これは、発電機器などの製品使用がCO₂排出の主要因になっており、その約7割を火力発電プラントの運転に伴うCO₂排出で占めているためです。カーボンニュートラルとなるNet Zeroを達成するために、燃やしてもCO₂が発生しないカーボンフリー燃料への転換、すなわちエナジートランジションを進めることが最優先課題となります。

図4に三菱重工業グループのカーボンニュートラル社会実現に向けたバリューチェーンを示します。

第1に、脱炭素(含むカーボンニュートラル)エネルギーを使用できる製品を開発し、既存インフラの脱炭素化を進めていく必要があります。特にカーボンフリー発電技術、バイオマス発電・ガス化技術、エナジーソリューションを柱に、脱炭素化を推進して

いきます。また、カーボンフリーの大規模安定電源である原子力発電の最大限活用に向けて、既設原子力発電プラントの再稼働、革新軽水炉(SRZ-1200)の2030年代半ばの実用化、将来の多様なニーズに対応する小型炉、高温ガス炉、高速炉、マイクロ炉の開発を推進していきます。

第2に、バリューチェーンの上流に位置するエネルギーの脱炭素

化を図る必要があります。従来の化石燃料から水素・アンモニアのサプライチェーンに切り替えた水素エコシステムを構築していきます。

第3に、脱炭素化が難しい産業分野に対して、排出されるCO₂の回収・輸送・貯留、利用までのCCUSに関わる製品・技術・サービスを通じてCO₂エコシステムを構築していきます。

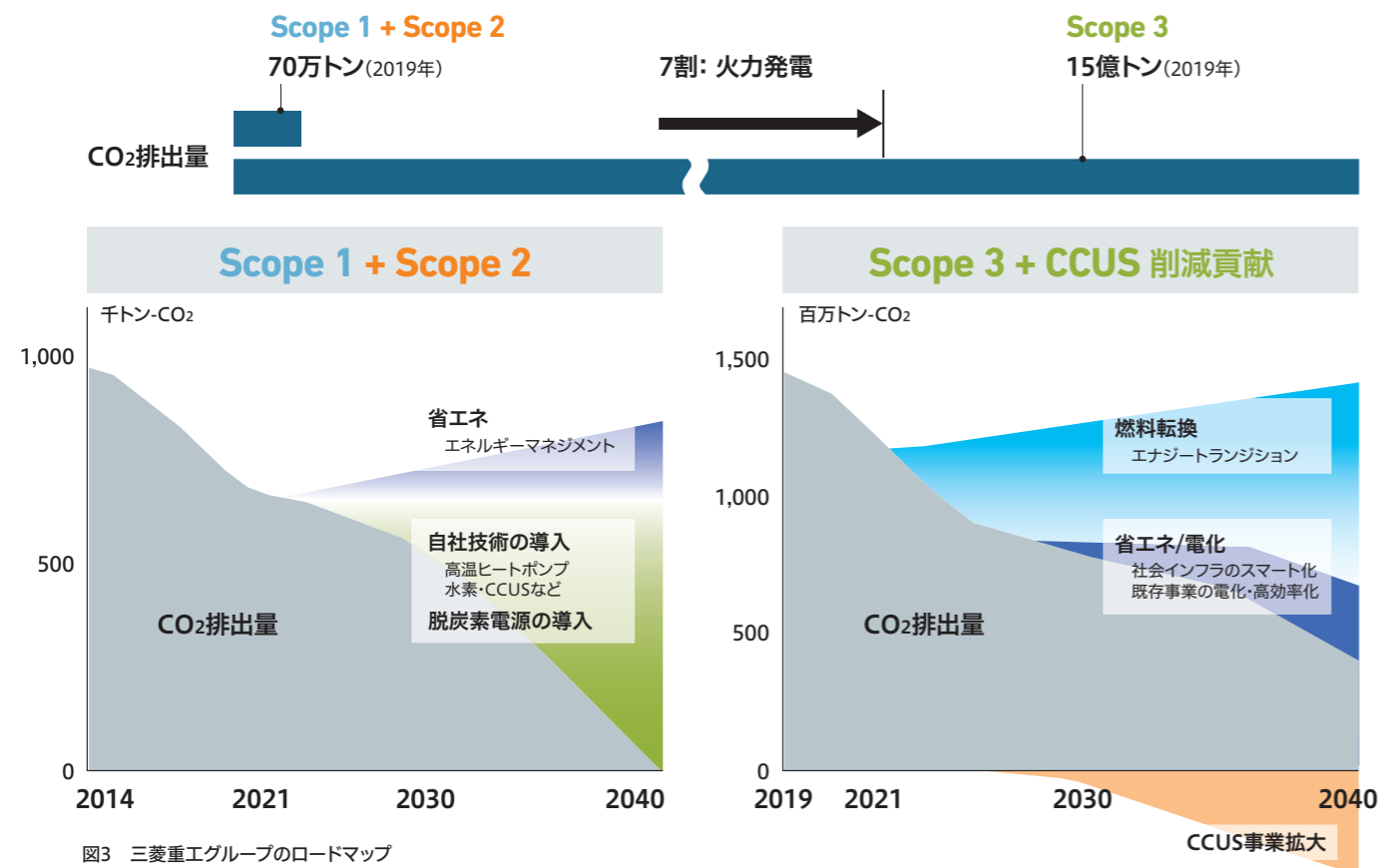


図3 三菱重工業グループのロードマップ

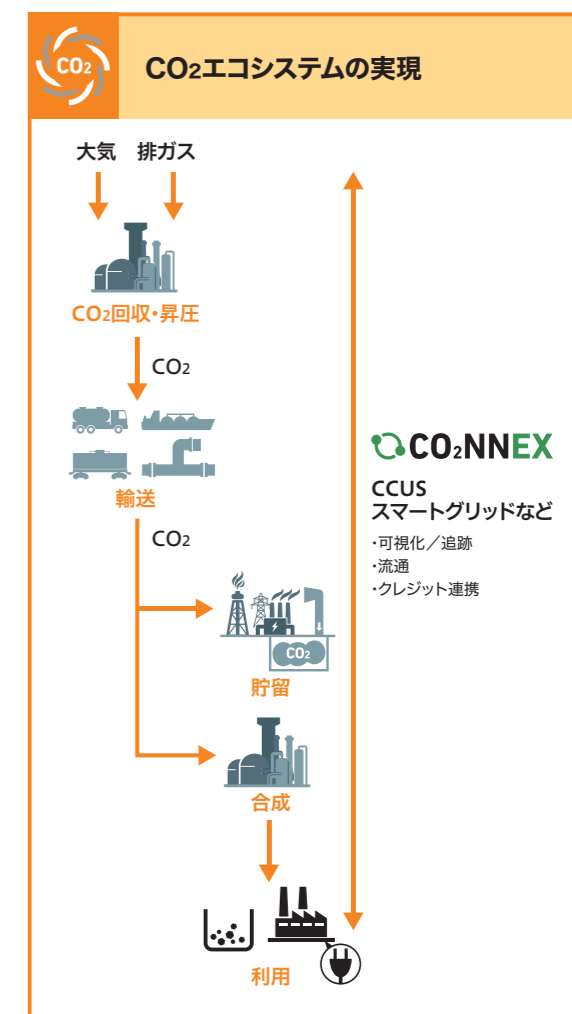
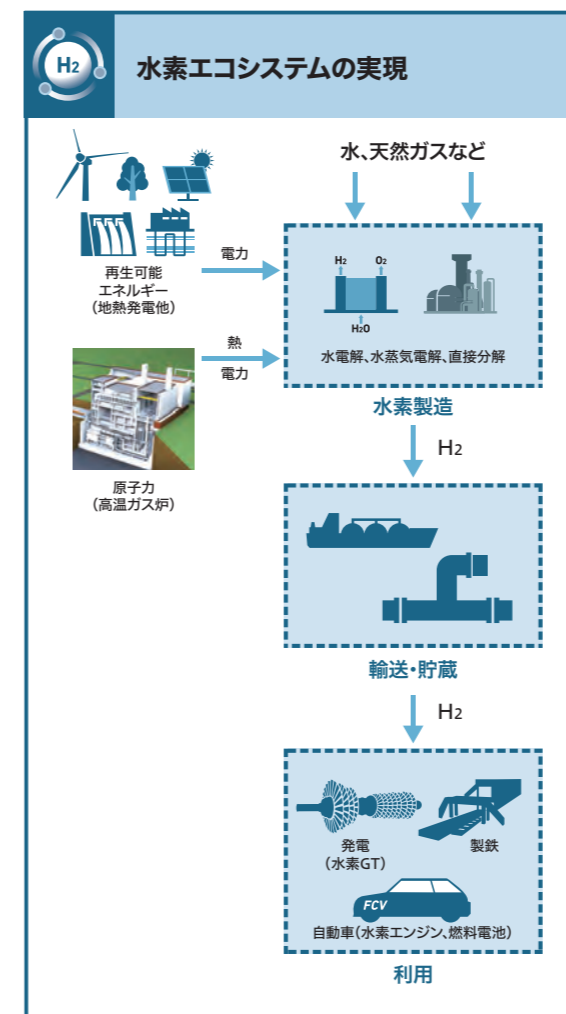


図4 三菱重工業グループのカーボンニュートラル社会実現に向けたバリューチェーン

カーボンニュートラル ロードマップ

三菱重工業グループのカーボンニュートラル実現に向けたロードマップを表3に示します。三菱重工業グループでは、既存インフラの脱炭素化、水素エコシステムの実現を推進、CO₂エコシステムの実現に貢献していきます。以下ロードマップの内容を紹介いたします。

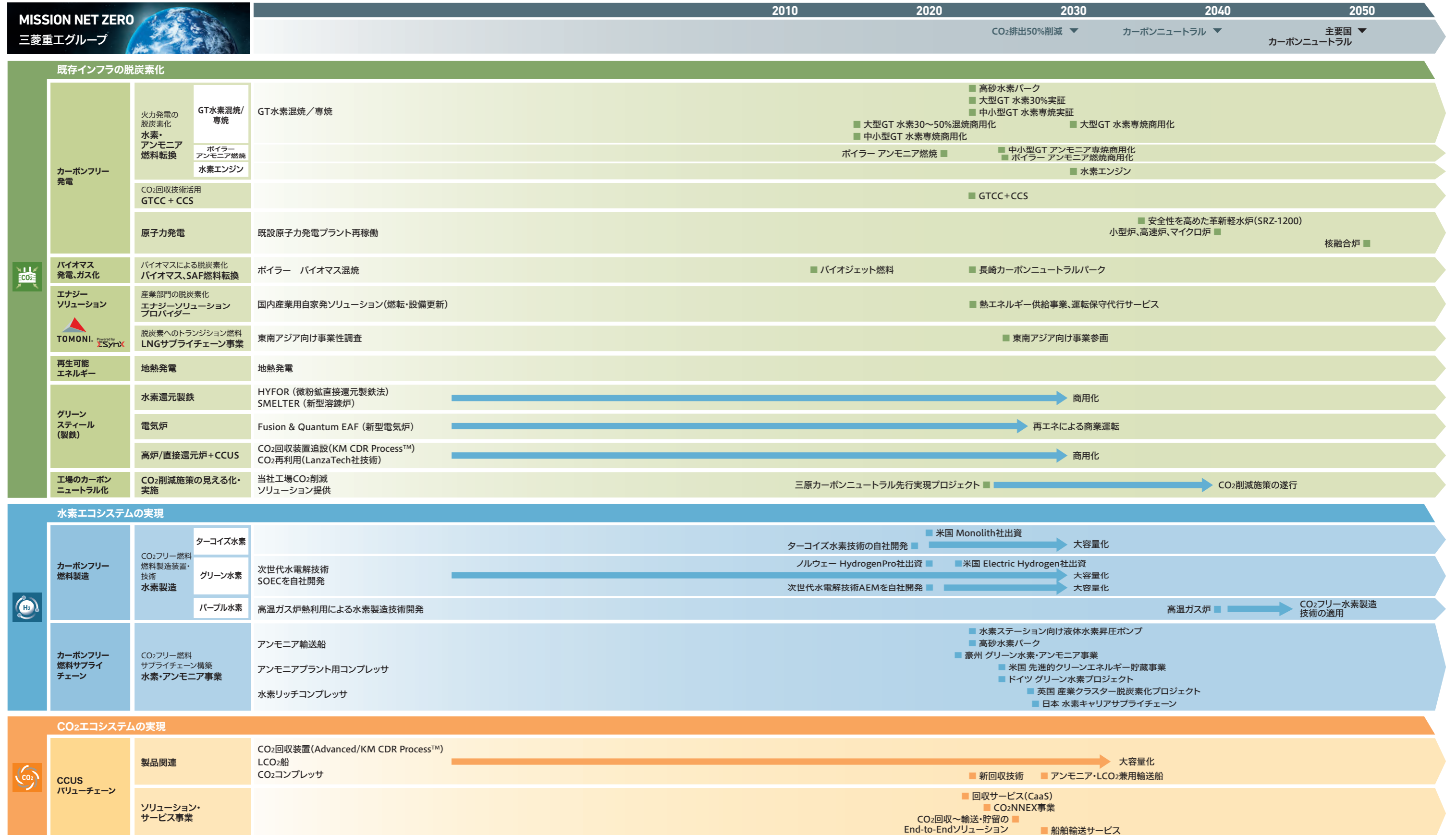


表3 三菱重工業グループのカーボンニュートラル ロードマップ



既存インフラの脱炭素化

カーボンフリー発電

1 水素・アンモニア燃料転換

1970年代から製油所・製鉄所などの副生ガスである水素を多く含む燃料を扱うガスタービンを手掛け、2015年以降は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)による助成事業を活用し、最新鋭機での水素燃焼技術開発に取り組んでいます。2018年には水素を体積比で30%混ぜた燃料で、J形ガスタービン燃焼器を用いて、1,600°Cでの安定燃焼を達成し、2022年には50%混焼試験に成功しました。また、2023年には最新鋭1650°C級JAC形ガスタービン実証設備にて水素30%混焼を達成しました。現在2025年の水素専焼に向けて技術開発を進めています。大型ガスタービンでは2025年の商用化に向け水素30%を超える混焼実証を計画、2030年以降に水素専焼での商用化も見込まれます。また、中小型ガスタービンでは2030

年前半に水素専焼での商用化を目指します。図5、6に水素ガスタービンのイメージと水素専焼用燃焼器の写真を示します。国内での水素社会を実現するためには、キャリアとしてのハンドリングに優れたアンモニアの活用も有効です。また、ガスタービンの排熱を利用してアンモニアから水素を分離する技術を開発しているほか、燃料としてアンモニアを100%直接利用する40MW級ガスタービンシステムの開発にも着手し、2025年の実機運転・商用化を目指します。アンモニアは、石炭焚きボイラーでも直接利用が可能で、石炭火力の脱炭素化に向けた活用も期待されています。ボイラーでの多様なニーズに応えられるよう、複数の燃焼方式において、NOx(窒素酸化物)の発生を抑制するアンモニア専焼バーナーの開発を進めています。

2028年度までに石炭焚きボイラーでアンモニア燃焼の実証を行い、早期商用化を目指します。

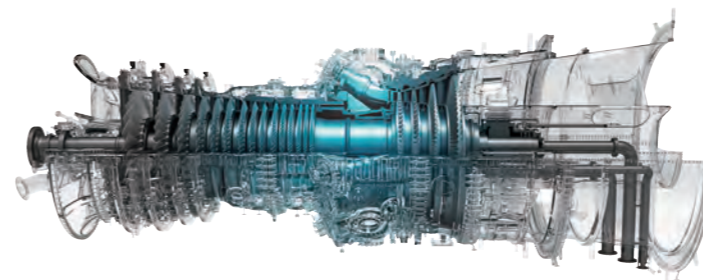


図5 水素ガスタービンのイメージ

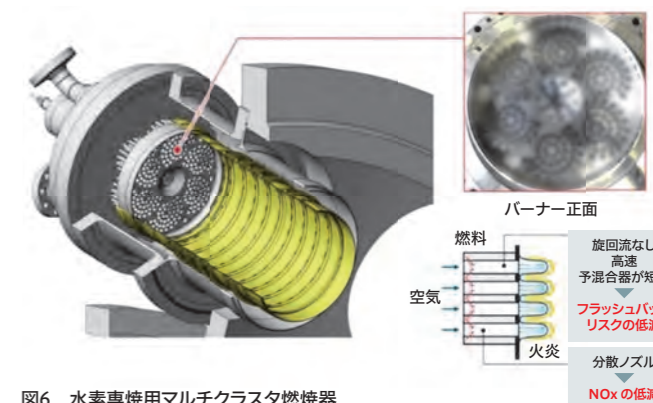


図6 水素専焼用マルチクラスタ燃焼器

脱炭素社会の実現を目指す「高砂水素パーク」と「長崎カーボンニュートラルパーク」(図7-1、図7-2)

水素を燃料とする水素ガスタービンの早期商用化に向け、開発・設計・製造・実証拠点を置く高砂製作所に水素製造から発電までにわたる技術を世界で初めて一貫して検証できる「高砂水素パーク」の整備を進めています。2023年度の稼働開始に向け、水素製造・貯蔵およびガスタービンでの水素燃焼技術の試験・実証運転に着手できるよう準備を進め、実証設備での30%混焼試験に成功しました。水素製造設備は、水電解装置の採用に加え、メタンを水素と固体炭素に熱分解するターコイズ水素の製造など、次世代水素製造技術の試験・実証を順次行う予定です。この実証設備を活用することにより、水素の本格普及、水素発電の社会実装に大いに貢献することが期待されます。



図7-1 高砂水素パーク

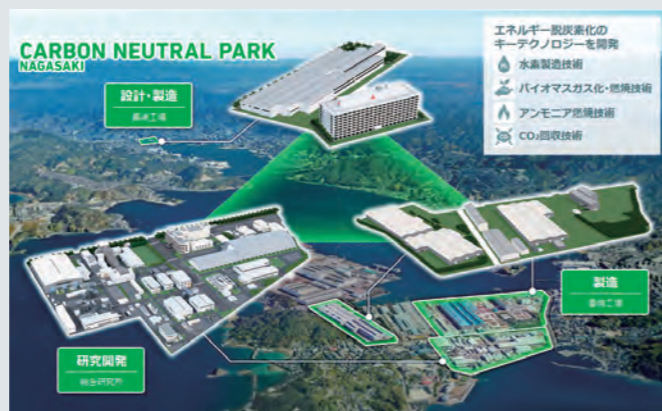


図7-2 長崎カーボンニュートラルパーク

大容量水素製造と水素GTCCシステムとの一貫での実機実証を、同一場所で実施(世界初)

水素製造装置

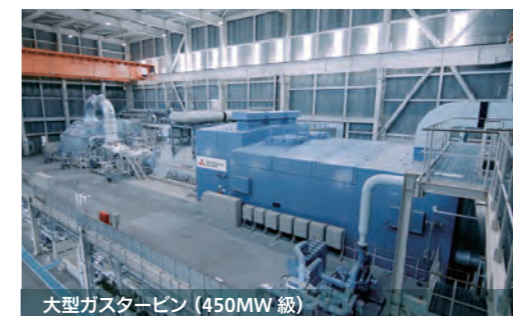


水電解装置 (5MW 級)

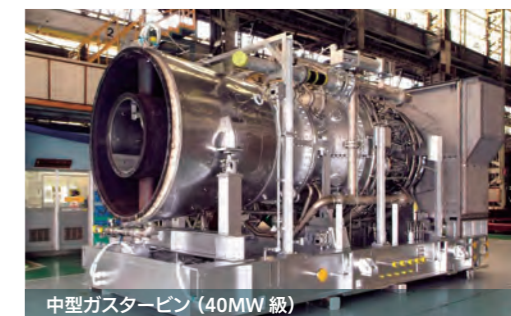


SOEC

実証発電設備



大型ガスタービン (450MW 級)



中型ガスタービン (40MW 級)



既存インフラの脱炭素化

2 GTCC + CCS

CO₂エコシステムの実現に貢献するCarbon dioxide Capture & Storage (CCS) 技術を有するエンジニアリングセグメントとエナジードメインが協業し、GTCCなどの高効率発電システムとCCSとの組み合わせにより、CO₂排出量を可能な限り削減した電力を提供していきます。本技術を使い、カナダ・アルバータ州のガスタービン発電所向けCO₂回収に関する基本設計、及びスコットランドの発電所向けGTCC発電設備・CO₂回収プラントに関する基本設計を受注し、商用規模CCS導入のサポートにより、世界のネットゼロ達成に貢献しています。



MHIET

【水素100%で安定燃焼できる技術を確認、製品化に向けた相模原工場内の水素専焼エンジン発電セットの実証試験】

物流・冷熱・ドライブシステムドメイン (LT&Dドメイン) の三菱重工エンジン&ターボチャージャ (MHIET) では、従来のディーゼルエンジンやガスエンジンを母体とした水素エンジンの開発と実用化に向けた取り組みを強化しています。MHIETは、国立研究開発法人 産業技術総合研究所 (産総研) と、水素エンジンの燃焼研究に2019年度から共同で取り組んできました。MHIET製のレシプロガスエンジンを改良した単気筒エンジンを、産総研 福島再生可能エネルギー研究所 (福島県郡山市) に設置、水素の燃焼特性に合わせて、水素燃料供給方法、着火方法、給気弁閉じ時期、空気過剰率などを見直すことで、水素専焼・予混合方式での安定燃焼条件を明確にし、CO₂を排出せずクリーンな水素を100%として安定燃焼できる条件を見出しました。6気筒換算で340kW、16気筒換算で920kWまでの試験運転に成功しました。また、製品化に向けた次の段階として、6気筒の500kWクラス水

素専焼エンジンを開発するとともに発電セット化し、MHIET相模原工場内に水素エンジン発電セットおよび水素供給設備を建設、2024年度の実証試験開始を目指します。本実証試験では、新たに設計した水素100%を燃料とする6気筒水素エンジンの燃焼安定性、性能、信頼性等の検証に加え、水素の特徴を考慮し、発電装置として求められる安全性評価や性能検証を実施します。レシプロエンジンは、低・脱炭素社会の実現に向けた燃料転換 (エナジートランジション) においても、その機構上、さまざまな燃料を燃焼させることができ、中でも水素エンジンを用いた発電セットは、純水素を燃料とすることで、燃料消費によるCO₂を排出することなく、分散型電源の脱炭素化に貢献します。MHIETは実証試験を通じて、水素利用拡大による脱炭素社会実現を目指します。



図8 産総研 福島再生可能エネルギー研究所に設置された水素エンジン



図9 実証設備

MHIET

【バイオガス発電・バイオディーゼル】

バイオガス発電は、廃棄物とされている下水処理、生ゴミ処理、家畜糞尿等の有機性資源をメタン発酵させ、発電に利用することで、地球温暖化防止・廃棄物減量とともに、再生利用を促進、再生可能エネルギーの増大、環境保全、電力不足対応に寄与するものです。世界的に化石エネルギーに代わる新しい資源としての「バイオガス」を求める声も多く、様々な研究・開発が行われてきました。現在、日本で稼働中のバイオガスプラントでは「消化ガス」と同様に「分別」「調整」を経て約35~55°C程度の嫌気性環境下で「消化(嫌気性消化処理)」、20日~1ヶ月かけて発酵が行われガスを抽出します。「バイオガス」の化学成分は、主に「メタン (CH₄)」(約6割)と「二酸化炭素 (CO₂)」(約4割)で構成されています。一方、本発生ガスには、硫化水素などの腐食成分、またシロキサン化合物等エンジンに重大なダメージを及ぼす成分も含まれており、設備側で一定の基準値まで除去していただく必要がありますが、都市ガスをベースとした標準仕様のガスエンジンを一部改造することで運転が可能です。MHIETは、これまで国内の食品リサイクル施設や浄化処理施設等に300~600kWクラスのバイオガス発電装置を計5基納入しており、いずれも安定して運転を継続しています。バイオディーゼル燃料 (BDF) とは、一般的に、生物由来の油種 (パーム油・菜種油等) や廃食用油などに特殊な化学処理をして製造される、ディーゼルエンジン用の燃料のことを指し、地球温

暖化対策が緊急の課題となる中、BDFは、化石燃料の代替燃料として期待されている燃料です。代表的なBDFに、原料をメチルエステル化して得られる Fatty Acid Methyl Ester (FAME) と、代替航空燃料 (Sustainable Aviation Fuel: SAF) と類似の製法で、水素化処理して得られるHydrotreated Vegetable Oil (HVO) があります。ともに、燃料性状 (密度・粘度・発熱量等) は軽油と異なり、FAMEは軽油にBDFを数%~数十%混合させて使用するのが一般的ですが、HVOは100%でも使用可能なドロップイン燃料です。なお、代替航空燃料 (SAF) の詳細は、後述の「4. バイオマス・SAF燃料転換」の通りです。FAMEは、環境対策を目的に、一部の先進国において、FAMEを含有した軽油 (混合率上限5~7%) が一般軽油として販売されています。FAMEは軽油に比べ劣化しやすいことが特徴で、濃度が高いほど、用途、管理方法、使用期限等に制約が課されることがあります。一方、最近注目されてきた次世代BDFのHVOは、劣化しにくいという特徴があり、発電及び船用エンジンで、欧州規格のEN15940に適合したHVO燃料単独、及び軽油と混合した使用を承認しており、続けて車両搭載用エンジンの実証試験も実施中です。また、高濃度FAME使用による環境負荷低減を目指し、実証試験を実施中です。



既存インフラの脱炭素化

3 原子力発電

当社は、1970年の美浜1号機運転開始以来、国内24基の加圧水型軽水炉(PWR)プラントを全て納入した実績を有しています。また、PWRプラントの建設・保守だけでなく、原子燃料の製造、使用済み燃料の中間貯蔵(キャスク)や燃料サイクル施設、高速炉開発など、原子力のほぼ全ての分野に対応しています。

原子力発電は、運転中にCO₂を排出せず、気象条件に左右されず安定して発電ができる、カーボンフリーの大規模安定電源です。また、昨今エネルギー安全保障への関心が急速に高まっており、原子力の高いエネルギーセキュリティの観点もあり、世界的に原子力への期待が高まっています。

2050年カーボンニュートラルの実現に向けて、まずは当社が納入したPWRだけでなく沸騰水型軽水炉(BWR)も含めた既設原子力発電プラントの再稼働支援や再稼働後の安全安定運転の

実現などを通じて、原子力発電プラントの安全性向上に努めていくとともに、燃料サイクルの確立に向けた取り組みを着実に進めていきます。さらに、世界最高水準の安全性を実現する革新軽水炉(SRZ-1200)を2030年代半ばに社会実装すべく、開発・設計を推進しています。

加えて、将来の多様化する社会ニーズに応じて、分散型電源である小型軽水炉、大量安定な水素製造を実現する高温ガス炉、資源の有効活用や高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減に資する高速炉、離島や災害地向けのポータブル電源としてのマイクロ炉について、国の支援を得つつ開発を進めていきます。長期的には、恒久的な夢のエネルギー源である核融合炉の実用化にも挑戦していきます。

【革新軽水炉(SRZ-1200)】

原子力の継続活用のため、新設・リプレースが必要という認識の下、2030年代の市場投入を目指して、ブルーブナ技術をベースに安全性を高めた革新軽水炉SRZ-1200の開発を推進しています。革新軽水炉SRZ-1200は、あらゆる自然災害に対する耐性を強化するとともに、多重化多様化した安全対策によりプラントの安全性を向上させています。さらに、新たな安全メカニズムとして溶融炉心対策の最新技術であるコアキャッチャーや世界初となる当社独自開発の放射性物質放出防止システムを導入し、世界最高水準の安全性を実現します。また、従来炉と比べて出力調整機能も強化することで、再生可能エネルギーの発電量変化等に柔軟に対応可能な運転性を確保します。当社は、早期実用化に向け、PWR4電力(関西電力、九州電力、四国電力、北海道電力)と共同で、標準プラントの基本設計を進めており、今後、許認可向けデータ取得を目的とした実証試験等を国の支援も受けつつ進めていく計画です。当社は革新軽水炉SRZ-1200の実現により、将来のカーボンニュートラル社会とエネルギーの安定供給の両立に貢献していきます。

【小型軽水炉】

革新軽水炉(SRZ-1200)開発で培った技術を活かして、将来の多様化する社会ニーズに応えるべく、小規模グリッド向けに小型軽水炉の開発も推進していきます。当社の小型軽水炉は、主要機器を原子炉容器内に統合し、一体型原子炉とすることによって大口径配管の破断に伴う原子炉冷却材喪失事故の発生を原理的に排除するなど、革新的な技術を採用して高い安全性を実現します。発電出力は30万kWを想定しており、2040年頃の市場投入を目指して開発を進めていきます。

【高速炉】

国内では、資源の有効利用、高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減等の観点から、使用済み燃料を再処理し、回収されるプルトニウム等を有効利用する核燃料サイクルの推進を基本的方針としており、高速中性子によるプルトニウムの核分裂反応を利用する高速炉を開発しています。

当社は、高速炉実験炉“常陽”や原型炉“もんじゅ”において、中心的な役割を果たしてきた実績を踏まえ、高速炉実用化研究・開発を推進してきました。その後、2018年に原子力関係閣僚会議に

て決定された「高速炉ロードマップ」では、2050年までの国内実証炉運転開始を目指すことが目標として掲げられ、2023年に三菱重工が国内実証炉開発の中核企業に選定されました。国内実証炉開発に当たっては、国際協調の枠組みも活用して効率的に開発を進めることが重要であり、従前から取り組んでいる日仏協調での高速炉技術開発に加えて、米国テラパワー社のNatrium炉の開発協調について、22年1月に覚書を締結しました。三菱重工は、高速炉の中核企業として、国際協調の枠組みも活用しながら高速炉技術に研鑽を図り、2050年までの実証炉実現に向けて取り組んでいきます。

【マイクロ炉】

マイクロ炉は、離島、僻地、災害地用電源など多目的利用を可能とするポータブル原子炉として開発を進めています。当社独自の全固体原子炉として、環境中への冷却材のリークや、それに伴う事故発生要因を排除した、これまでにない革新的な安全概念を採用しています。また、燃料交換を長期間不要化し、メンテナンスフリーで遠隔・自動運転が可能な原子炉の実現を目指します。

【核融合炉】

夢のエネルギーである核融合エネルギーは、世界のエネルギー問題の解決、地球温暖化対策に貢献できる潜在力を有しており、当社は国際プロジェクトであるITER計画や発電実証を目指す原型炉開発計画に取り組み、核融合エネルギーの実用化に向けて研究開発等に取り組んでいます。

世界7極(日本、欧州、ロシア、米国、中国、韓国、インド)が参加するITERプロジェクトでは、主要機器であるトロイダル磁場コイル、ダイバータなどの製作を担当しています。トロイダル磁場コイルは極めて厳しい製造公差の要求を満足する必要があり、当社は原子力機器の設計・製作で培った技術力を活かし、世界に先駆けて製造・出荷を果たし、高い評価を得ています。当社は、原子力製品の製作で培ってきた技術力を活かし、夢のエネルギーである核融合炉の開発・実用化に挑戦していきます。

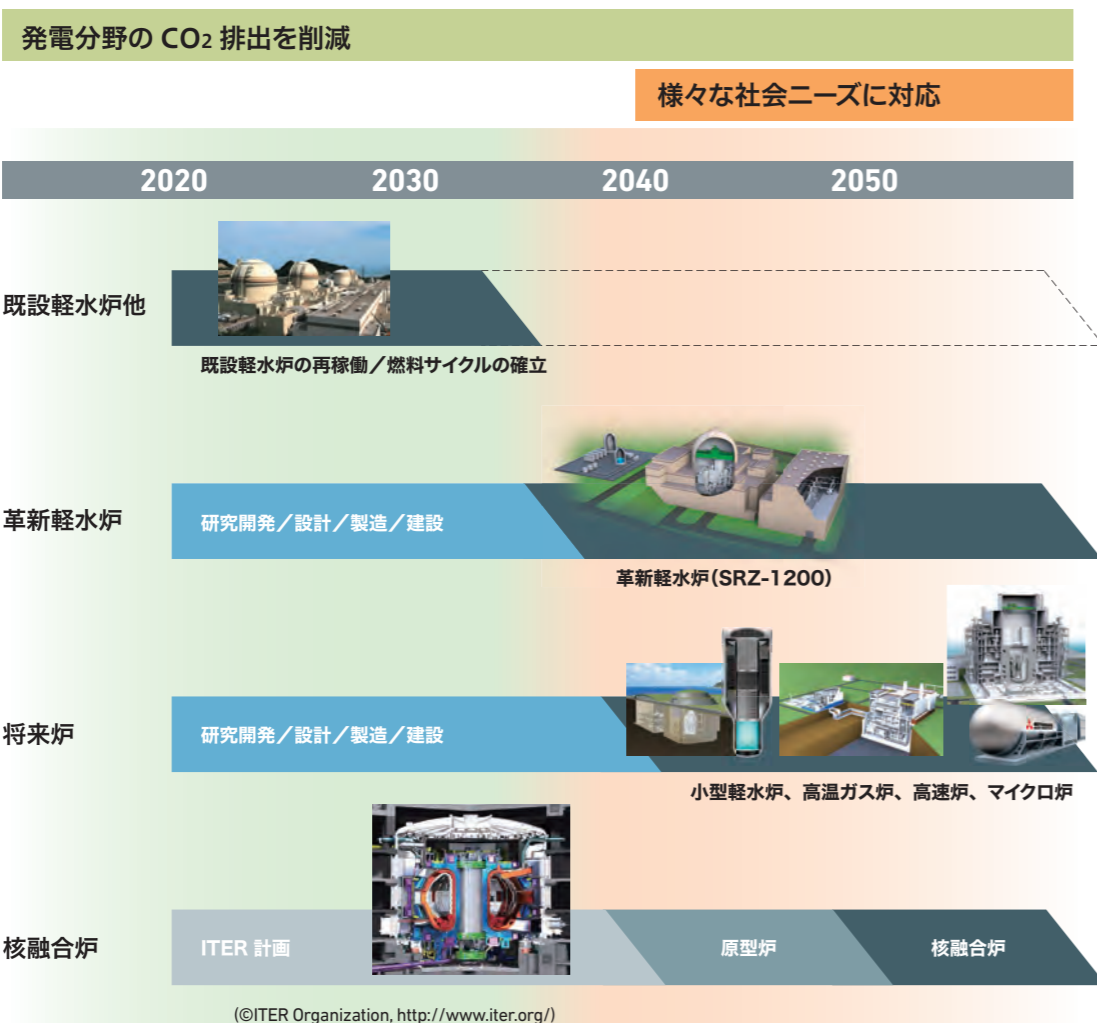


図10 カーボンニュートラルに向けた原子力ロードマップ



既存インフラの脱炭素化

バイオマス

4 バイオマス・SAF燃料転換

バイオマスは、発電やジェット燃料のカーボンニュートラル化への活用が期待されており、バイオマスのボイラー燃焼や持続可能な代替航空燃料(Sustainable Aviation Fuel: SAF)向けバイオマスのガス化などの技術を通して、カーボンニュートラルを目指した燃料転換を提案していきます。SAFは通常のジェット燃料に比べてCO₂排出を削減できることが期待される持続可能な航空燃料として、脱炭素の切り札と位置付けられています。図11にバイオジェット燃料製造設備の外観を示します。この設備で合成された木質バイオマス由来のSAFが、世界で初めて日本航空の羽田空港から新千歳空港までの航空旅客便に供給されました。このプロジェクトは、SAFの国内供給網の構築、普及促進を見据え、SAF

の製造者・利用者が一体となって実施されたものです。バイオマスガス化によるSAF製造以外にも、①水素エコシステムで開発している「グリーン水素製造装置」による電解水素と、②CO₂エコシステムで紹介している「CO₂回収設備」により燃焼排ガスから回収したCO₂を用いた、カーボンニュートラルなSAFの製造方法も検討しています。具体的には、図12のように、CO₂とH₂を主体とするガスを逆シフト反応によりH₂とCOを主体とするガスに転換し、さらにFT法(Fischer-Tropsch法)により燃料合成するプロセスを適用するものです。

SAF Sustainable Aviation Fuel



パイロットプラント全景



バイオマスガス化設備

図11 バイオジェット燃料製造設備

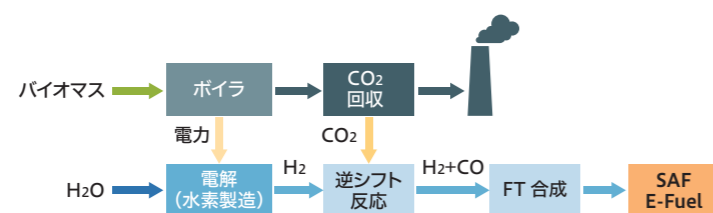


図12 SAFフロー図

なお、後述 10 グリーンスティールメイキング(製鉄プロセスの脱炭素化)に記載のとおり、当社グループ会社のプライメタルズテクノロジーズ(Primetals Technologies Ltd.: PT社)は、COやCO₂を発酵させて化学品やSAF(LanzaJet)にする米国のバイオテック企業LanzaTech社に出資しています。製鉄プラント(高炉/直接還元炉)などの産業用ガスからCO₂を回収し、当該CO₂をバイオリアクター内で微生物がH₂と一緒にエタノールなどの高級アルコールに変換、その後LanzaTech子会社のLanzaJet社のプロセスを適用してSAFに変換します。

MHIRJ

ZeroAvia社へのエンジニアリング提供

当社グループ会社のMHIRJ アビエーショングループ(MHIRJ)は、ZeroAvia社の推進技術をリージョナルジェット機に採用するため、同社との業務提携を開始しました。民間航空機業界のゼロエミッション開発を牽引するZeroAvia社は、MHIRJとの契約拡大により、リージョナルジェット機用燃料電気エンジンの納入計画を大きく前進させました。この業務提携の一環として、MHIRJはエンジニアリングサービス、航空機の統合運用、業界屈指のOEMメーカーとしてのノウハウを提供し、リージョナルジェットに搭載するZeroAvia社製の水素電気パワートレインの認証取得をサポートします。

ZeroAvia社は10~20席程度の小型航空機用600kWパワートレイン「ZA600」の認証取得計画をすでに進めており、2025年の就航を予定しています。

同時に、2~5MWのモジュール式パワートレインである「ZA2000」の開発も進めており、2027年までに40~80席のターボプロップ機をサポートすることを目標としています。この技術を拡張した「ZA2000R」パワートレインにより、早ければ2020年代後半にゼロエミッションのリージョナルジェット機での空の旅が可能になります。

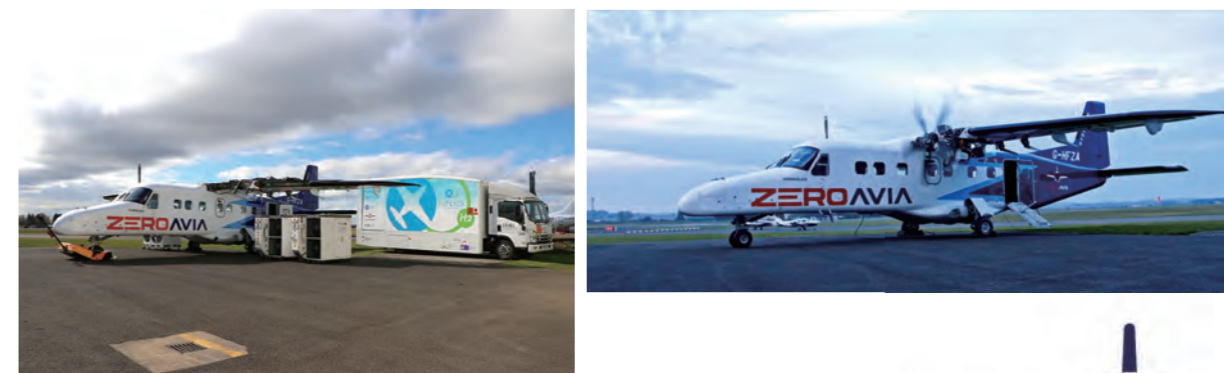


図13 初の実用的なゼロエミッション航空機用パワートレイン | 米国・英国 | ZeroAvia社



SAF 100%への取り組み検討

CRJシリーズ航空機は、SAF(Sustainable Aviation Fuel)含有率50%の燃料の使用がすでに承認されており、MHIRJは、CRJシリーズが将来的にSAFを100%使用できるように取り組みを続けています。SAFが航空業界の脱炭素化のための重要なポイントであることを認識し、当社の航空機によるSAF使用100%を目指して業界のパートナーと協力していきます。





既存インフラの脱炭素化

エネルギーソリューション

5 エネルギーソリューションプロバイダー (図14)

日本国内のCO₂排出量の約4分の1は、石油化学・製紙・鉄鋼・セメントなどの産業分野が占めています。自家発電設備においては、保有設備に必要な電力や蒸気を確保できる一方、現有設備のさらなる効率化(省エネ)、脱炭素化と経済性確保のバランスなどの複雑かつ多岐にわたる課題があります。当社は国内産業用自家発のシェアNo.1であり、様々な課題に対し、現有の自家発電設備を有効活用しつつ、お客様個別のニーズに即した自家発電設備全体に対するエネルギーソリューションを提供します。

具体的な提案として、短期的には自家発電設備の改造や更新による高効率化・運用性改善・燃料転換、TOMONIなどのデジタルソリューションによるエネルギー利用の最適化や、中長期的には水素・アンモニアへの燃料転換・新設(脱炭素化)までを含む、

総合的でサステナブルな提案をしていきます。加えて、発電設備の効率的活用に向け、運用最適化/保守の最適化、電力・蒸気の安定調達に向けたビジネス・エンジニアリングサポートなどのビジネスを含むエネルギー総合サービスのエネルギーソリューションプロバイダーに向けて取り組んでいきます。従来の省エネ・節電・コスト削減対策から、さらに既設プラントの脱炭素化、TOMONI※を活用した運用最適化、余剰電力の活用、保守代行サービスも含めたエネルギー最適化を、ワンストップで提供していきます。国内産業用のトップシェア企業として、日本の産業分野の脱炭素化に貢献すべく、産業用ビジネスを強化、拡大する方針です。

※ TOMONIは、お客様およびパートナーとの強固な協働と共に、発電プラントの設計、運用・保守、および各種システムのノウハウにより脱炭素化を加速するインテリジェントソリューションです。TOMONIは、高度な制御機能、人工知能(AI)、機械学習と多層的なサイバーセキュリティを活用して、エネルギーシステムをよりスマートにすることで収益性を向上し、最終的には持続可能な未来に向けて自律性を高めることを目指します。



電源計画・運用シミュレーションによる脱炭素技術の選択

また、発電セクターにおける脱炭素を達成するための技術の選択は、単に平均化されたコストで比較するのではなく、再エネやカーボンプライス等の導入影響も考慮した運転条件を想定し、進めていく必要があります。この課題に対し当社は、地域固有に構成される発電設備やそれをつなげる送電ネットワークを模擬したモデルを構築し、将来必要となる電力量に対して、どのような発電種別をどの地点から供給するのが最適か、市場ルールも踏まえたシミュレーションを行う機能を整備してきました。この

機能により、電源計画の初期段階から最適な技術の選択をサポートし、脱炭素の目標を達成しながら、高い運用性と経済性の追求、投資に伴うリスク管理を実現します。この分析は、主に、改造を含む既存設備を前提として運用最適化を検討するものと、長期の需要を満たすために新旧の技術構成を検討するものがありますが、当社はモデル構築が先行する欧米以外の地域を対象とした分析実績を積み重ねており、国内外幅広い地域を対象とした提案が可能です。

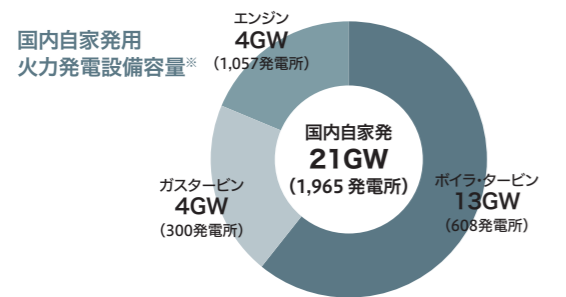
- 日本国内のCO₂排出量の約1/4を占める産業分野(石油化学・製鉄・鉄鋼・セメント等)では、自家発電設備を有しており、その多くはボイラを使用し電力と熱・蒸気を供給するシステム
- ボイラから再エネ電力への切替のみでは、工場で使用する熱・蒸気の供給ができず、課題

当社は国内自家発シェア No.1

「熱・蒸気」の供給も考慮した複雑なプロセスを熟知

既存の「電力」「熱・蒸気」の供給システムを維持し多様なメニューで脱炭素を実現

- ・ガスへの燃料転換、ガスタービンへの置換
- ・さらには水素等の脱炭素燃料への転換など



※ 出展: エネ庁電力調査統計(2020年度)自家発電所数、出力

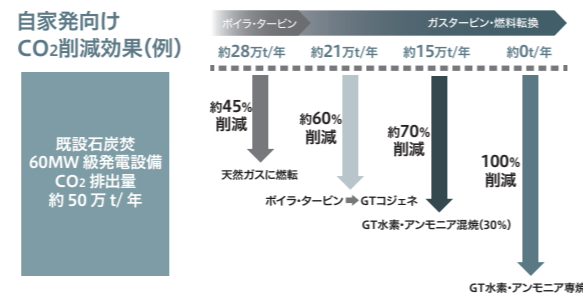


図14 国内産業用自家発向けの脱炭素化

また産業セクターにおいても、自社の分散電源技術を用いて脱炭素化に取り組んでいきます。現在注力しているのが、生活様式のデジタル化が進み、必要不可欠な社会インフラとなったデータセンターです。常時快適なデジタルサービスを提供するために24時間365日、大量の電力が消費されており、脱炭素化の対象となっています。データセンターの適地としても知られるシンガポールでは、同国の脱炭素化実現に向けて環境に配慮した新規

性の高いデータセンターが求められており、当社製ガスタービンが生み出すグリーン電力でのデータセンター稼働について同国のKeppel Data Centresと検討を進めています。サステナブルかつ信頼性の高い発電設備を計画・供給することで社会のデジタル化を支えています。この他、大きな産業が集まりCO₂排出量の多い港湾やコンビナートの脱炭素化(Carbon Neutral Port)についても貢献していきます。

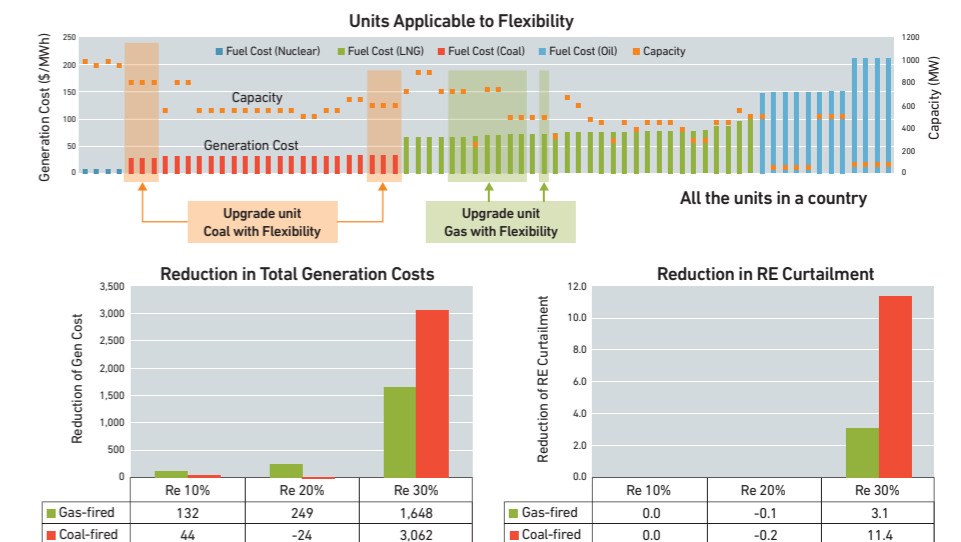
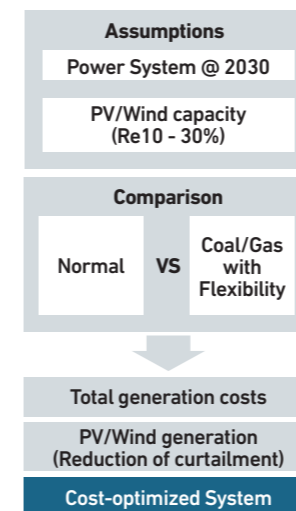


図15 電源運用シミュレーションによる既設設備の改造効果評価例



既存インフラの脱炭素化

6 LNGサプライチェーン事業 (図16)

東南アジアなどの新興国では、低コストである石炭火力発電が主流であり、急速な脱炭素化は経済発展の妨げとなります。そこで、前段階のトランジション発電燃料として、kWh当たりのCO₂排出量が石炭の半分以上となるLNGが期待されており、LNGサ

プライチェーン (Gas to Power) の構築を進めています。さらに将来的にはLNGから水素・アンモニアバリューチェーンの構築へと展開をすることで、経済性と持続性を最大限維持しながら、段階的な脱炭素化に貢献していきます。

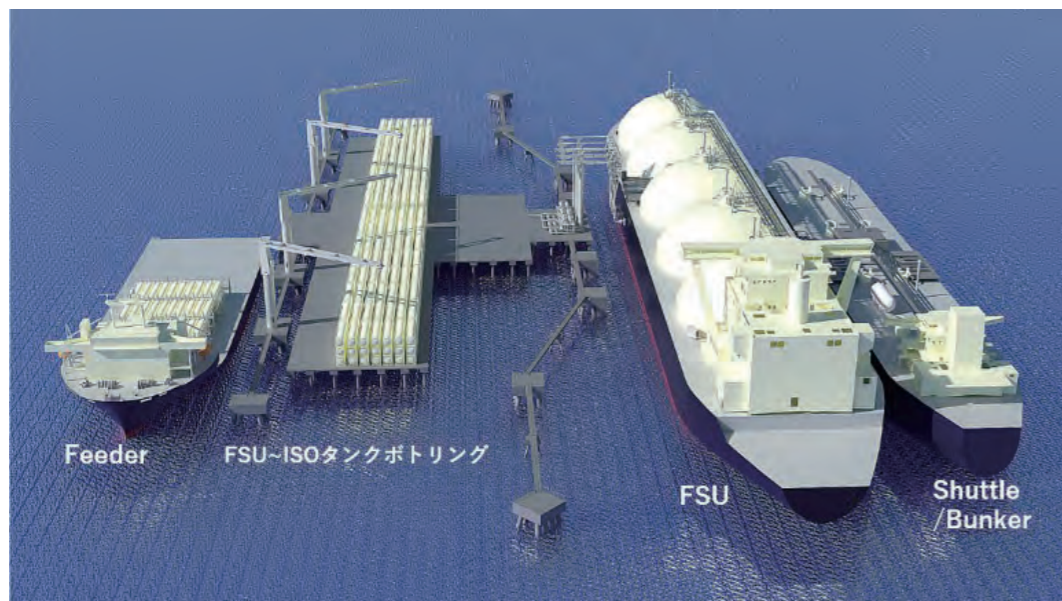


図16 Gas to Power

再生可能エネルギー

7 地熱発電

地熱発電は、地球内部に存在するマグマの熱エネルギーをそのまま利用するため、地上で燃焼させることはありません。そのため、CO₂の大気への排出量が極めて少なく、地球温暖化防止に有効な発電方式です。また、地球内部の膨大な熱エネルギーを利用する再生可能エネルギーの一つでありながら、天候に左右されることがなく、火力発電とほぼ肩を並べる高い稼働率もメリットの一つです。

当社はこれまで、主力のフラッシュ式地熱発電タービンを、既に100基以上、合計出力300万kW以上、世界中の13カ国に供給しています。

なお、地下から得られる熱源の温度や量といった条件は各地熱地点により様々であることから、低温の熱源でも発電可能なバイナリー式発電システム※(ターボデン社製ORC)も手掛けており、幅広い顧客ニーズに的確に応えることが可能となっています。当社は地熱発電の導入を通して、世界規模でのサステナブルなエネルギーミックスに貢献していきます。

カーボンフリー燃料製造

三菱重工のターコイズ水素製造技術

8 ターコイズ水素製造

ターコイズ水素の特徴

メタン熱分解によるターコイズ水素製造技術は、天然ガスを高温下で固体の炭素と気体の水素に分解する技術で、従来、工業用材料であるカーボンブラック等の炭素素材の製造に使われてきた技術です。当社では、同時に生成される水素の燃料利用に注目し、プラズマ等電力を使う方式よりも遥かに効率よく水素を製造できる反応形態を見出しました。

図17にターコイズ水素製造技術の概要を示します。既に確立されている天然ガスの供給インフラと需要家の間、または需要家の消費機器の上流にターコイズ水素製造プラントを追設することで脱炭素を実現します。天然ガス焼き火力発電所 (GTCC) を例にとると、ガスタービンの燃焼器を水素燃焼へ対応した仕様に換装するだけで、水素焼きへ更新することができます。また、

副生炭素は固体であるため、常温常圧で気体となるCO₂よりも容易に固定化・貯蔵を行うことができます。このターコイズ水素との組合せにより、既存火力の大幅な低炭素化、更には脱炭素化が可能です。メタン熱分解を行う反応器形態としては流動床方式を選定し、図18に示す連続式加圧流動床試験装置を建設し開発を加速しています。圧力容器の中に流動床反応器、加熱ヒータを設置するとともに、触媒供給及び副生炭素払出機構も備え、連続的なメタン熱分解反応試験を行うことが可能です。代表的な試験結果を図19に示します。高温加圧下での連続運転に成功しています。今後は図20に示すロードマップで開発を進め、2030年頃の商用化を目指します。

現状のLNG発電インフラに追設することで脱炭素化が可能

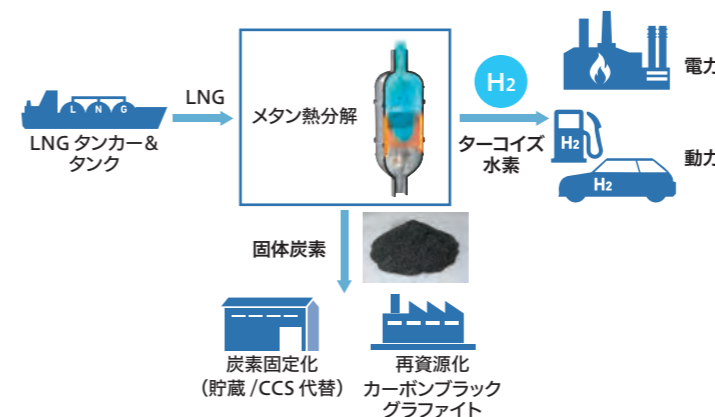


図17 ターコイズ水素製造技術の概要

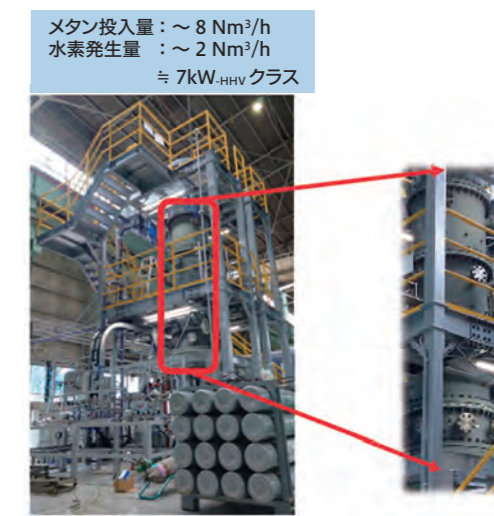


図18 連続式加圧流動床試験装置

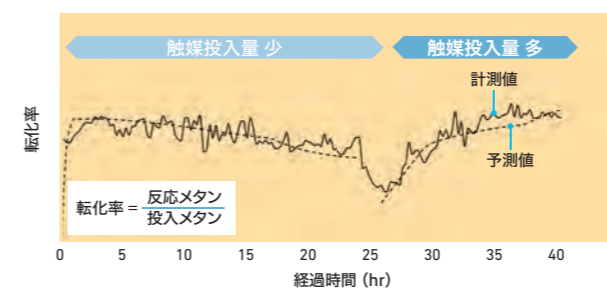


図19 連続メタン熱分解反応試験結果

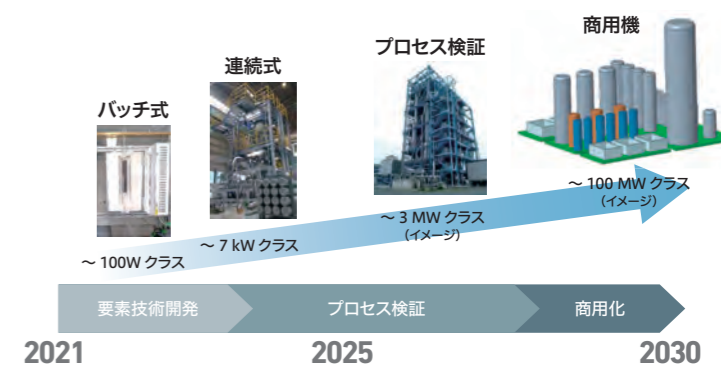


図20 開発ロードマップ



既存インフラの脱炭素化

出資事例(Monolith社)

米国統括拠点であるMitsubishi Heavy Industries America, Inc.(米国三菱重工)を通じて、再生可能エネルギー由来電力を利用した天然ガスのプラズマ熱分解により、CO₂排出を大幅に削減し、水素と固体炭素を取り出す革新的技術を持つ米国のMonolith, Inc.(モノリス社)に出資しています。図21にモノリスプロセスを示します。当社グループが戦略的に取り組むエナジートランジション(低環境負荷エネルギーへの転換)事業にお

ける革新的代替技術の一つとして、水素バリューチェーンの強化・多様化につなげていくのが狙いです。

2014年には、カリフォルニア州で建設した実証設備において、カーボンブラック700トン/年の製造実証に成功しています。現在は、ネブラスカ州で図22に示す1万4,000トン/年の製造プラントを運転中で、カーボンブラック18万トン/年の生産容量を持つ商用プラントの建設計画も進んでいます。

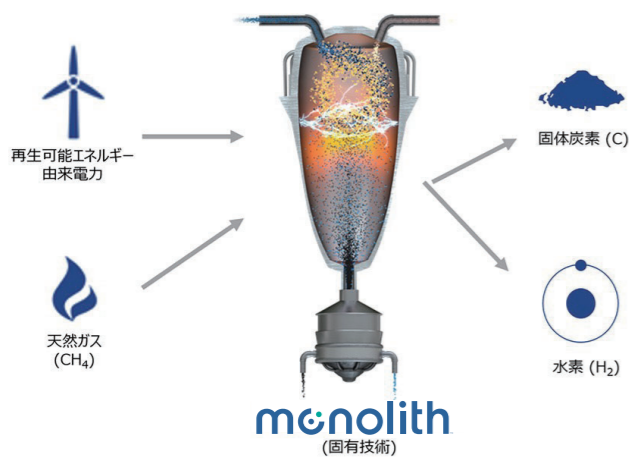


図21 モノリスプロセス



図22 米国ネブラスカ州にて運転中の1万4,000トン/年の製造プラント

原料	作り方	CO ₂ 排出	当社関連技術
水	電気分解 水	無し ¹⁾	AEM SOEC (話HydrogenPro社)
	水蒸気		
炭化水素化合物	光触媒(人工光合成)	無し	
	天然ガス	改質(SMR/ATR) 無し ³⁾	ターコイズ水素(メタン熱分解)
	石炭	ガス化 有り ²⁾	石炭ガス化(IGCC)
	バイオガス(草木系、廃棄物等)	ガス化 有り ⁴⁾	SAF製造
水素キャリア	メチルシクロヘキサン	無し ¹⁾	Ammonia cracking cycle gas turbine system アンモニアクッキング
	アンモニア		
副生ガス	水+塩	無し ¹⁾	ガスタービン 拡散燃焼器
	原油	石油精製関連(ナフサクラッキング等) 有り ²⁾	
	石炭	コークス製造(COG, BFG, LDG) 有り ²⁾	

1) 電力及び熱源による 2) 脱炭素には CCS が必要 3) 熱源による 4) CCS との組み合わせでネガティブエミッションとすることが可能

表4 水素の製造方法

三菱重工のグリーン水素製造技術

9 グリーン水素製造

当社では、発電用途での水素利用に焦点を当て、高圧・高効率・大容量な固体電解質水蒸気電解(SOEC:Solid Oxide Electrolysis Cell)、アニオン交換膜(AEM:Anion Exchange Membrane)水電解及び、メタン熱分解によるターコイズ水素製造の3種類の水素製造技術開発に取り組んでいます。また、これらの電解装置を用いる合成燃料製造技術開発にも取り組んでいます。図23に脱炭素発電へ向けた技術開発ロードマップを示します。これら要素技術の総合的長期実証は当社の高砂水素パークにて、要素技術開発は長崎カーボンニュートラルパークにて実施しています。

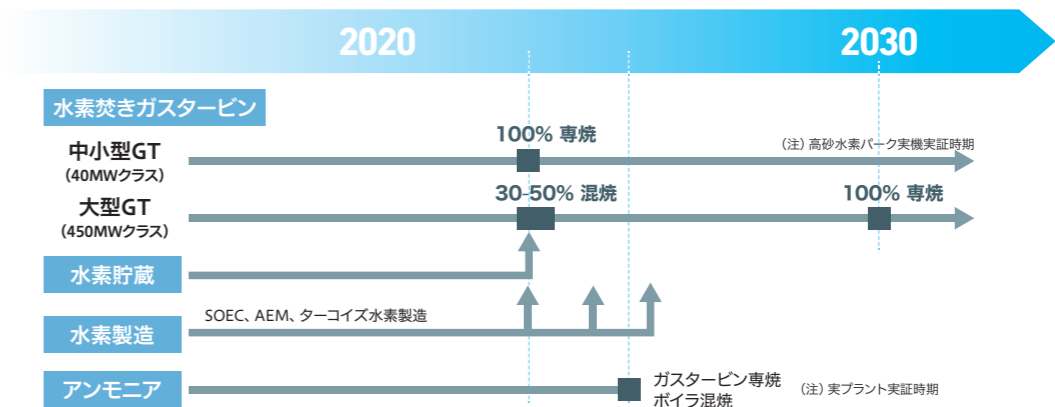


図23 脱炭素発電へ向けた技術開発ロードマップ

高圧・高効率・大容量な固体電解質水蒸気電解(SOEC:Solid Oxide Electrolysis Cell)

SOECでは水蒸気を電気分解し、他方式を圧倒する高い効率で水素を製造することができます。当社は、独自技術でオールセラミックス製の円筒形SOECの開発に成功しました。その性能を図24に示します。セルスタック1本で1kWを超える水素製造量と1万時間を超える安定運転を実現しています。

更に、図25に示すセル数百本からなるカートリッジ運転を実施

し、水素製造0.1MW-HHV, 30Nm³/hを達成しています。現在、図26に示すような本カートリッジを4基搭載した試験機を高砂水素パークに建設中です。図27に、今後の開発ロードマップを示します。今後は、数MW級システムを開発し高砂水素パークで実証運転を行う共に、商用化の加速を進めます。

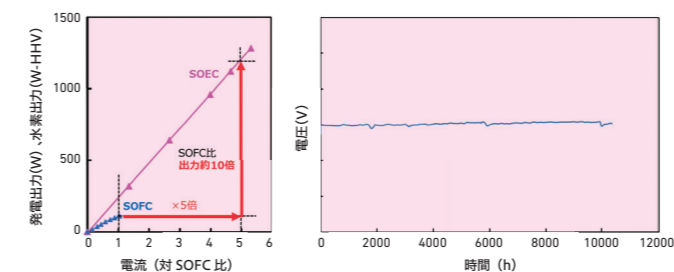


図24 SOEC試験結果

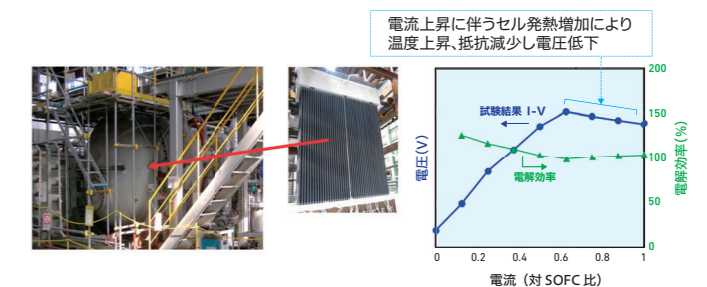


図25 カートリッジ運転



既存インフラの脱炭素化



図26 SOEC(高砂水素パーク)

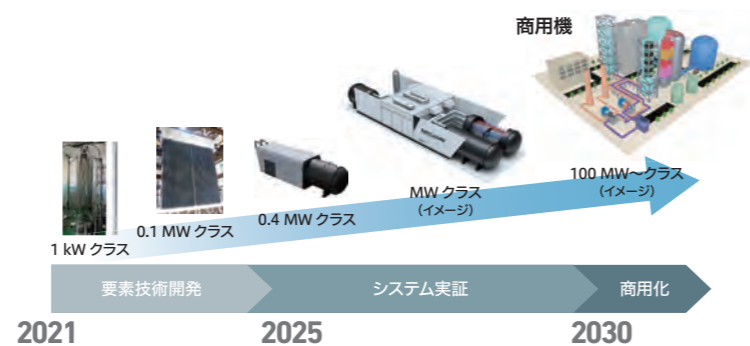


図27 開発ロードマップ

アニオン交換膜(AEM:Anion Exchange Membrane)水電解

当社ではPEFC・PEM電解の経験を活かし、アルカリ電解よりもコンパクトで高効率が期待できるAEM電解槽の開発に取り組んでいます。図28に開発目論見を、図29に開発中のkWスケール電解装置を示します。図30に示すロードマップに沿って開発を推進中です。

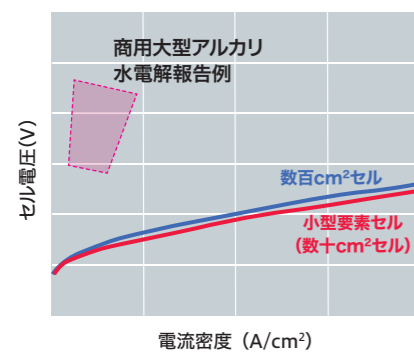
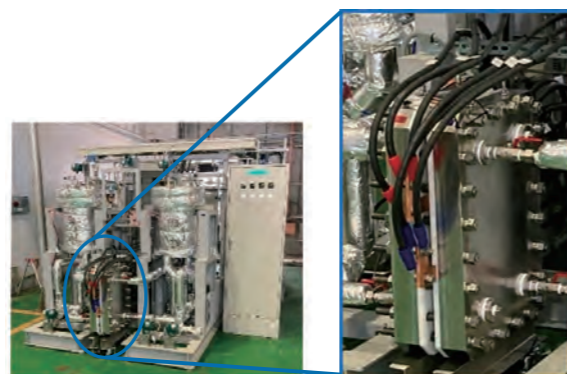


図28 開発目論見



(a) kW 級設備

(b) 数百 cm² セル

図29 電解装置(kWスケール)

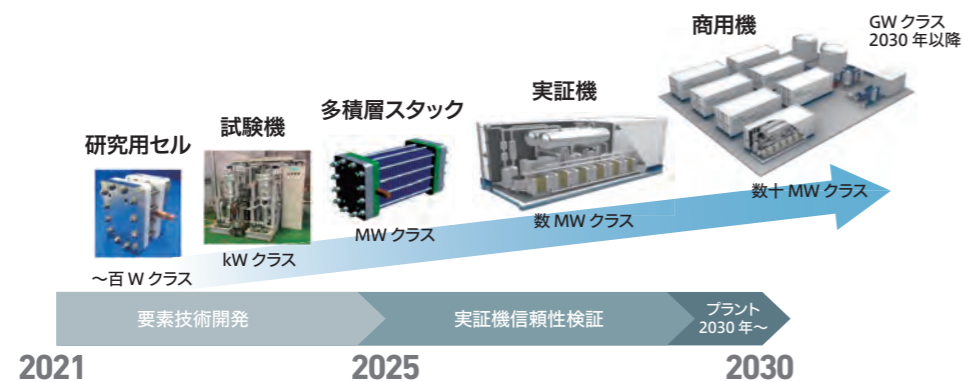


図30 開発ロードマップ

出資事例

HydrogenPro社

米国三菱重工を通じて、5 MW級(水素製造能力2.4トン/日)電解装置を開発・生産しているHydrogenPro社に出資しています。当社は同機を高砂水素パークに導入し、長期信頼性確認運転を行うと共に水素ガスタービンの開発加速の為に、製造した

水素を水素混焼試験に活用しています。また、米国ユタ州で進められているAdvanced Clean Energy Storageプロジェクトにおいて220MWの水電解装置を納入しています。



図31 HydrogenPro社 水電解装置

Electric Hydrogen社(EH2)

米国三菱重工を通じて、Electric Hydrogen社に出資しました。Electric Hydrogen社は、インダストリアル、インフラストラ

クチャー向け大容量(100MW級)の大型クリーン水素装置の製造を行うことで、商用化を加速させる予定で進めています。



PEM Proton Exchange Membrane



グリーンスティール(製鉄)

10 グリーンスティールメイキング(製鉄プロセスの脱炭素化)

現在、鉄鋼業界から排出されるCO₂は世界全体で約9%に相当します。中でも高炉による製鉄プロセスは、鉄鋼1tあたり約2.0tのCO₂を排出する最大の要因となっています。Net Zeroのグリーンスティールを実現するためには、中長期的には以下3通りの製鉄プロセスに集約されると言われています。

- 水素還元製鉄：還元ガスとしてグリーン水素(天然ガスを代替)を使用する直接還元製鉄
- 再生可能エネルギーの利用：電気炉(EAF)等を利用し、鉄スクラップや直接還元鉄(Direct Reduced Iron:DRI/ Hot Briquetted Iron:HBI)を溶融・製錬
- 高炉/直接還元炉+CCUS：高炉や天然ガスベースの直接還元炉のプロセスから排出されるCO₂を回収し、貯留/再利用

プライメタルズテクノロジーズ(Primetals Technologies Ltd.:PT社)は、製鉄プロセスの脱炭素化を実現するグリーンスティール・ソリューションのリーディングカンパニーであり、これら3通りの製鉄プロセス全てに対応しています。

【水素還元製鉄】

MIDREXプロセス：直接還元製鉄について、PT社は鉄鉱石ペレットフィードからDRI/HBIを製造するMIDREXプロセスのライセンスとして、天然ガスを還元ガスとする多数のプラントをMIDREX社と協働し納入しております。近年、MIDREXプロセスは、天然ガスをグリーン水素に完全に置き換えることが可能となり、水素の供給状況に合わせて段階的に水素投入量を増やすなど、顧客と水素還元製鉄への移行について協議中です。

HYFORプロセス：PT社は、あらゆるグレードの鉄鉱石の(微)粉鉱を、さらなる処理なしに直接投入可能な水素ベースの直接還元製鉄HYFOR(Hydrogen Fine Ore Reduction)プロセスの開発も実施中です。当該プロセスは、水平流動床ベースで還元ガスとして水素を使用し、プロセス温度が低く高効率で、かつ鉄鉱石のペレット化設備が不要であることが特徴です。2021年にはパイロットプラントが稼働し、各種鉄鉱石の品質適合性を確認しており、大型化に向けて最適なパラメータを検討中です。

HyREXプロセス：PT社は、90年代後半に粉鉱(Hematite、Sinter Fines)を原料とする直接還元製鉄プロセス(Finored)を開発し、2000年代前半には天然ガスを還元ガスとする商業プラント2基を納入済みです。近年HyREXプロセスを水素(～100%)で稼働させるための開発を実施中です。

SMELTER(新型溶錬炉)：低品位の鉄鉱石活用に対応するPT社の戦略的革新技術の一つであり、電極からのショートアーク放電による還元雰囲気下で操業し溶融と製錬を行う電気炉です。従来の高炉に代わり、上記の直接還元製鉄プロセスからのDRI/HBIを、溶鋼(グリーンホットメタル)に変換可能です。



図32 水素還元製鉄(HYFORパイロットプラント)

【再生可能エネルギーの利用】

鉄スクラップのリサイクルと溶融は、再生可能エネルギーで駆動することで最も低いカーボン・フットプリントを実現します。PT社の新型電気炉QUANTUM EAFは、現時点で最もエネルギー効率の高い電気炉であり、鉄スクラップを装入・溶融する前に、電気炉の排ガスにさらすことで効率的にスクラップを予熱可能です。また、鉄スクラップは供給量が限定的でかつ不純物が含まれるため、高級鋼の生産に制約となりますが、PT社が開発したFusion EAFは、最終製品の品質に合わせ、鉄スクラップ、DRI/HBI、溶鉄の混合比率を最も柔軟に変更可能な電気炉です。さらに、近年の電気炉大型化に伴い大量の電力を消費することとなるため(最大300MW程度)、系統障害を最小化し、電力効率を最大化することが不可欠ですが、PT社は、無効電力を最小限に抑え、力率を大幅に改善した、大型電気炉(高電圧・大容量)向け電源システムの構築に適したソリューションActive Power Feederを提案しています。



図33 新型電気炉(Quantum EAF)

【高炉/直接還元炉+CCUS(炭素の回収と利用・貯蔵)】

高炉プロセスの割合が減少し、水素還元製鉄が運開したとしても、2050年以降も高炉の割合は一定程度維持されると思われるため、高炉ベースの製鉄プラントの排ガスからの炭素を回収、利用、貯蔵する(CCUS)が必要となります。CO₂回収と貯蔵(CCS)については、PT社は三菱重工エンジニアリングセグメントと協働し、同社のCO₂回収プロセス(KM CDR Process™)を鉄鋼業界に適用していきます。先行してCCSを展開しつつ、前述のバイオ発酵技術によるCO₂再利用とあわせ2030年頃までにCCUSを商用化予定です。また、回収したCO₂の再利用(CCU)については、排ガス中の炭素をバイオエタノールやバイオ燃料等に変換する独自のバイオ発酵プロセスを開発している米国バイオテクノロジー企業LanzaTech社と提携しています。PT社は2014年からLanzaTech社にマイナー出資しており、また同社と協働しベルギーの顧客の高炉プロセス向けに取り組む商業規模ベースのCO発酵プラントの実証プロジェクトは2022年に運開予定です。中期的には、製鉄プロセスの排ガスをCO₂/H₂発酵により航空燃料(SAF)の製造に適用することも目指しています。(P15参照)



既存インフラの脱炭素化

工場のカーボンニュートラル化

11 CO2削減施策の見える化

CO2削減施策の優先順位を可視化する「MAC(Marginal Abatement Cost)カーブ」

工場等で排出されるCO2を削減し、カーボンニュートラルを実現するには、「MACカーブ(限界削減費用曲線)」を活用したカーボンニュートラル化ロードマップが有効です。MACカーブはCO2削減の打ち手を、削減効果と費用で棒グラフに表したものです。

MACカーブの作成は、まず、工場にある設備がそれぞれ消費するエネルギー量を算出することから始まります。次いで、各設備を脱炭素化するための手段を検討していきます。

ある工場をカーボンニュートラル化する場合のMACカーブのイメージを、図34に示します。棒グラフは、単位CO2削減量あたりのコストを縦軸、想定されるCO2削減量を横軸とし、コストが低い順に個々の対策を表示しています。

図34の緑の部分はコストもCO2も削減でき、優先的に取り組むべき打ち手を示しています。青の部分はCO2を減らせますが、コストや時間がかかるため、今後の導入や新技術の開発を検討すべき施策を指します。

MACカーブを作成すると、施策ごとのCO2削減量と必要なコストが一目でわかるため、CO2削減の目標設定が容易になり、取り組むべき対策の優先順位が可視化されます。当社はいち早く自社工場のMACカーブを作成しました。設備単位でのCO2排出量の推定、省エネ・カーボンニュートラル施策と優先順位の設定などに関して知見を有していますので、お客様の工場設備に合った可視化の提案が可能です。

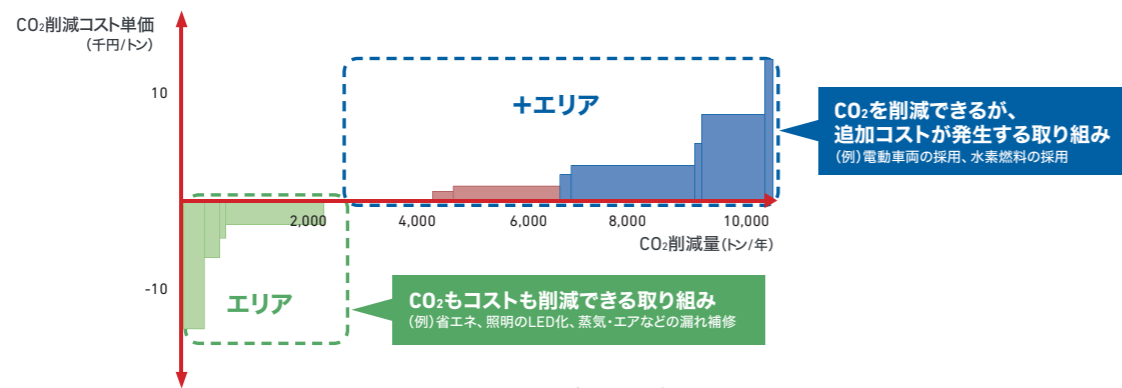


図34 MACカーブのイメージ

工場のカーボンニュートラル化に向けたステップ

工場のカーボンニュートラル化を実現するには、まず各工程や業務が真に必要なエネルギー量を算定し、徹底した省エネやエネルギーの有効利用を具体的に組み込みます。その上で、再生可能エネルギー等の非化石エネルギーの利用を検討します。

CO2を削減するための手法は世の中に数多く存在します。その多くが、投資や追加コストが必要となるものですが、まずは必要とするエネルギー量を最小化することで、コスト削減とCO2排出削減を両立する取り組みをやり切ることが重要です。

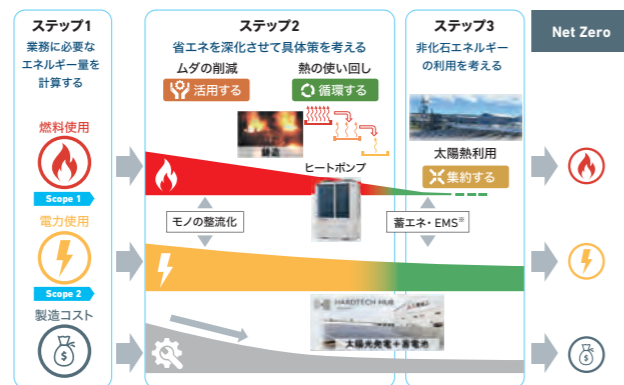


図35 工場のカーボンニュートラル化に向けたステップ ※ EMS: エネルギーマネジメントシステム

12 三原カーボンニュートラル先行実現プロジェクト

プロジェクトの全体像

当社は、省エネや脱・低炭素化の打ち手の実装イメージをお客様に示すため、三原製作所(広島県三原市)を「実践的なカーボンニュートラルを実証する場」として、カーボンニュートラル工場の実現を目指しています。

三原製作所は紙工機械(段ボール製造装置)や新交通システムを主力製品とし、「いかにCO2を排出しない工場を構築できるか」というテーマを掲げ、生まれ変わりつつあります。

工場をカーボンニュートラルにするために、まずはエネルギーの使用実態の把握から始め、2023年度末のCO2排出量ゼロを目標に2022年6月より脱・低炭素化に取り組んだ結果、CO2排出量は97.8%削減(2021年度比)される見通しです。



図36 三原製作所和沖工場内に設置された太陽光発電設備

CO2排出量ゼロに向けたプロセス

三原製作所ではカーボンニュートラル化に向けて、以下4つのプロセスで活動を行っています。

- 省エネ・合理化 (Scope1, 2):カーボンニュートラルに向けて最も優先すべき重要なプロセスであるエネルギー使用量を削減(一部実現済)
- 現状技術の活用 (Scope1):ヒートポンプや電化など既存の高効率技術や設備を導入しCO2排出を削減(各設備の導入を検討中)
- 新製品・新技術による解決 (Scope1):難易度の高いCO2排出源に対して、当社で新たな製品や技術を開発(開発を計画中)
- 再生可能エネルギーの導入 (Scope2):和沖工場内に16.8MWpの太陽光発電設備を設置(完成済)

これらのプロセスを通じた成果によって、CO2を減らす実践的なノウハウを獲得し、MISSION NET ZERO(2040年カーボンニュートラル)の実現可能性を高めていきます。当社は自社の製品およびサービスを通じて、お客様に対してカーボンニュートラルのより具体的な実現イメージと、個々の対策や具体的なソリューションを提案していきます。

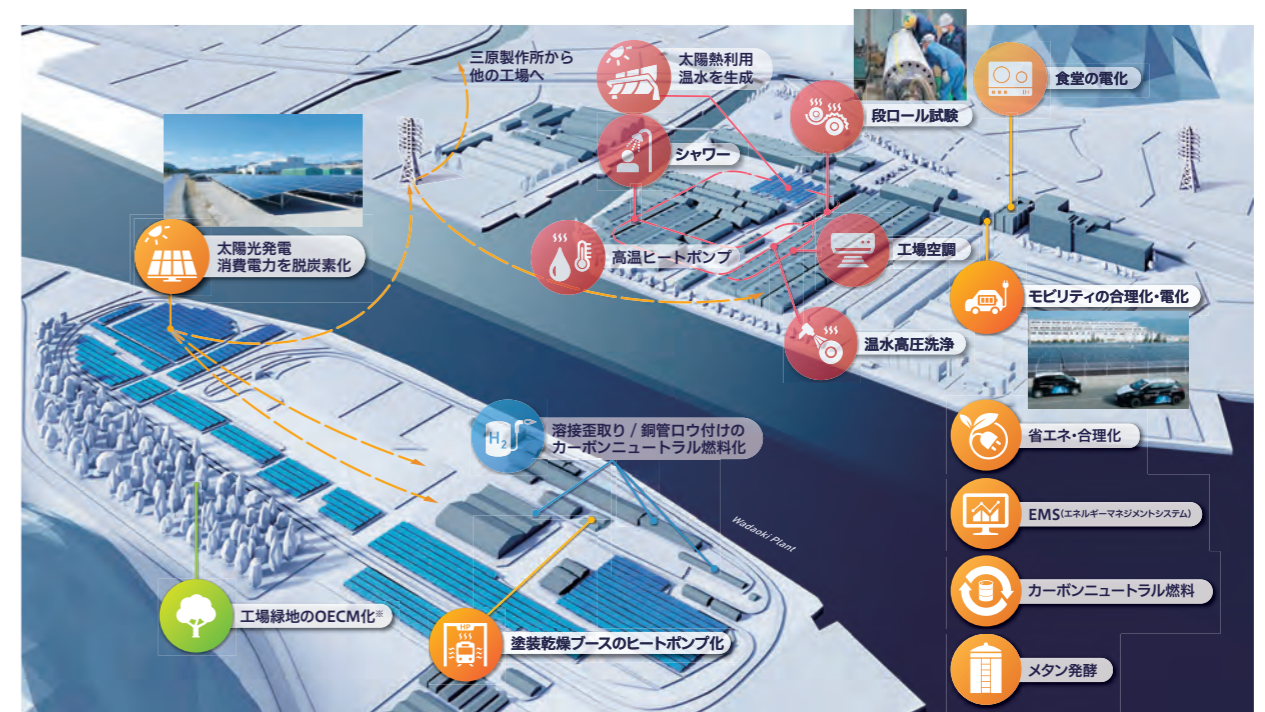


図37 三原製作所カーボンニュートラル工場のイメージ ※ OECM: Other Effective area-based Conservation Measures



水素エコシステムの実現

水素エコシステムの実現には、水素を「使う」だけでなく、「作る」「貯める」「運ぶ」のバリューチェーン全体での取り組みが必要です。そのためには顧客、株主、パートナーなど当社のステークホルダー、そして社会全体に対して、三菱重工グループの水素技術の実現性と可能性を世間に浸透させ、水素エコシステムの実現性を高めていくことが重要です。

図38、39に、水素・CO₂の事業開発マップを示します。エネルギー分野では、製品群のバリューチェーン上流に位置する水素・アンモニアなどCO₂フリー燃料の製造や供給事業に対して、当社グループのコア製品の強みを活かし、先行する地域での事業開発などに参画して社外との協業を推進し、実用化を目指します。

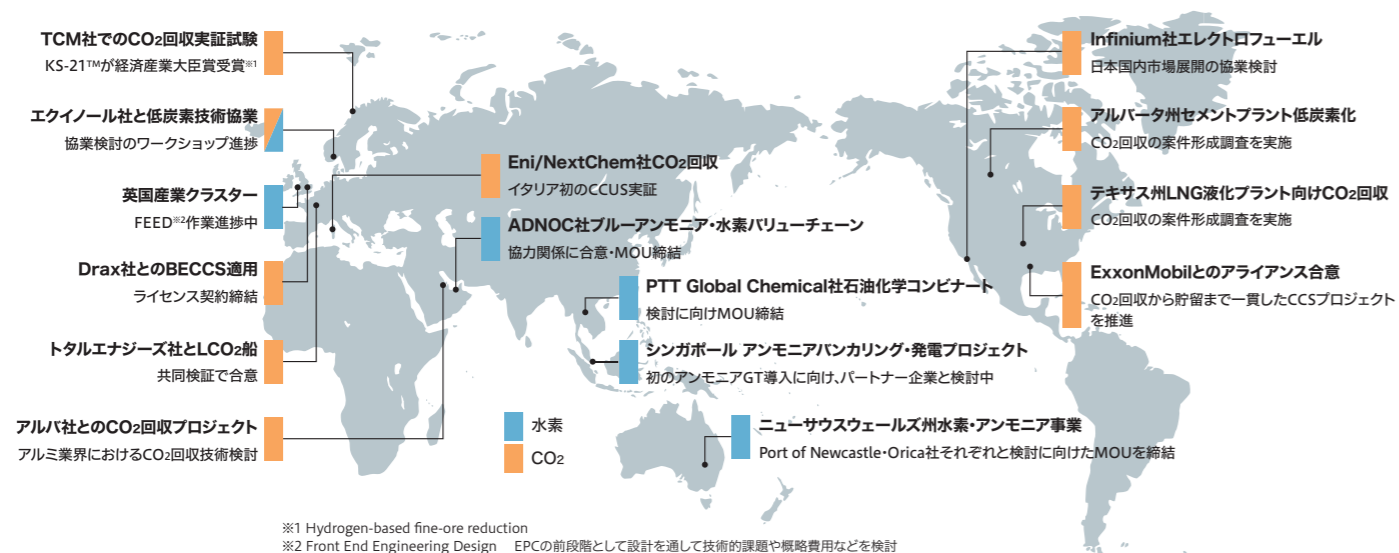


図38 事業開発マップ (世界各国 水素・CO₂プロジェクト)

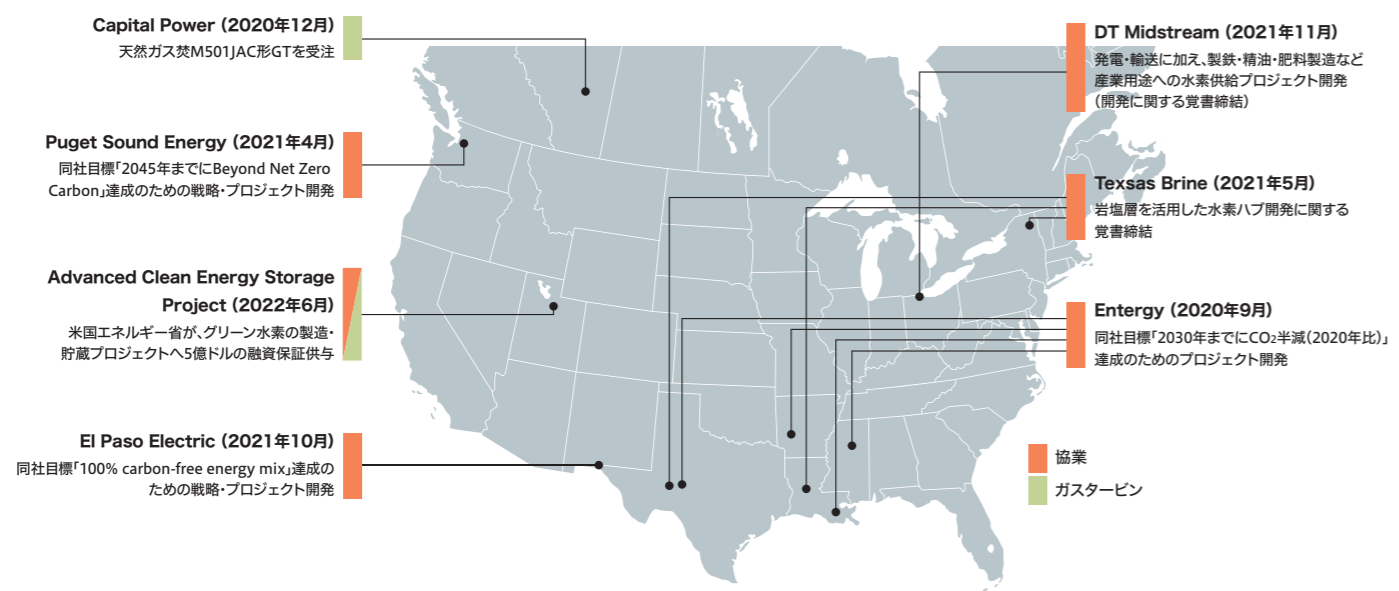


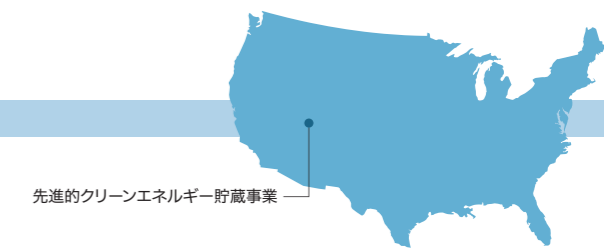
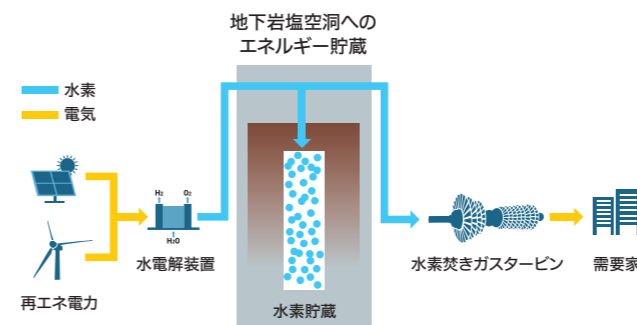
図39 事業開発マップ (米国での水素プロジェクト)

カーボンフリー燃料サプライチェーン事業

水素・アンモニア供給事業

米国 グリーン水素プロジェクト (図40・図41)

米国のAdvanced Clean Energy Storageプロジェクトは、再生可能エネルギーを利用した水の電気分解により取り出した水素をユタ州の岩塩空洞に貯蔵して、発電をはじめとするエネルギー生産に活用する事業です。当社は、岩塩空洞の開発・運営会社であるChevron社と共同で、100%再生可能エネルギー由来では世界最大級となるこのグリーン水素ハブの開発を進めています。この貯蔵施設では、220MWの水電解装置を使って、1日あたり最大100トンの水素製造を実現します。

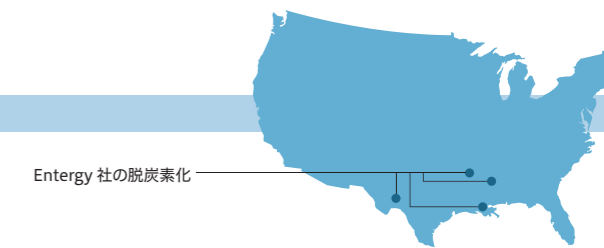


ここで製造・貯蔵した水素は、ユタ州で発電事業を行う Intermountain Power Agencyが建設を進める、当社製M501JAC形ガスタービンを中核とする840MW級GTCC発電所(IPP Renewed Project)に供給されます。この発電所は、2025年に水素混焼率(体積比)30%で運転を開始し、2045年までに水素100%での運転を目指します。



米国 Entergy社との協業 (図42)

2020年9月、米国南部4州(アーカンソー州、ルイジアナ州、ミシシッピ州、テキサス州)におけるEntergy社のユーティリティ事業に関し、同社フリートの脱炭素化に協力するMOUに調印しました。Entergy社と協力し、水素ガスタービン・コンバインドサイクル発電プラントの開発のみならず、カーボンフリー電力による水素の製造・貯蔵・輸送、大容量バッテリーによる蓄電システムの検討など、包括的に事業に取り組みます。



英国 水素焚き転換プロジェクト (図43)

英国の東海岸にあるハンバー川流域で進められている、同国内最大規模を誇る産業クラスターの脱炭素化事業計画に参画します。本事業計画は、Equinor社などグローバルに事業を展開する脱炭素化関連産業の14企業・機関が、天然ガスから製造した水素の活用やCO₂の回収・除去技術を駆使することにより、2040年までに同産業クラスターにおけるCO₂排出実質ゼロ達成を目指します。当社は、域内電源である天然ガス焚きガスタービン・コンバインドサイクル(ソルトエンド発電所)で稼働している当社製ガスタービンの燃料を水素に転換する、技術検討とフィージビリティ・スタディー(事業性調査)を手掛けていきます。

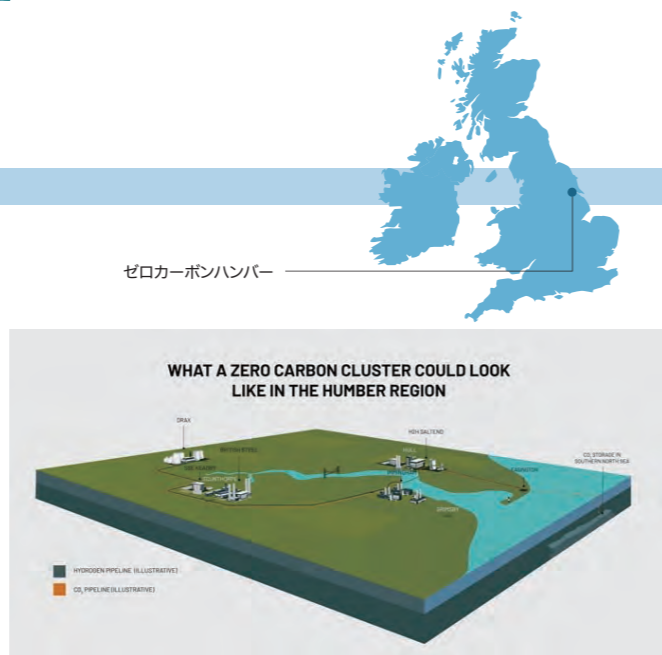


図43 ゼロカーボンハンバー

日本 水素キャリアサプライチェーン (図44)

日本では再生可能エネルギー資源が得られにくく、CO₂を貯留できる場所も限られるので、海外の再生可能エネルギーの豊富な地域やCO₂を貯留できる地域で安価な水素を製造し日本に輸送することが検討されています。輸送の方法として、液体水素、トルエンに水素を結合したメチルシクロヘキサン(MCH)、大気中

の窒素と水素を結合したアンモニア、回収したCO₂と水素を反応させて得たメタンなど様々な方法が検討されています。エナジードメインでは、日本で構想されている様々な水素キャリアにも対応できるガスタービンを主とする利用技術の開発を進めています。

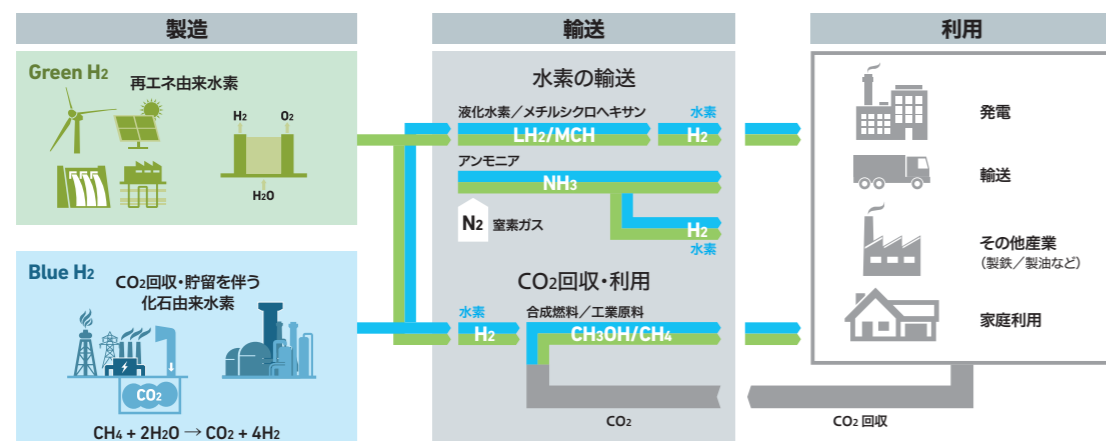


図44 水素キャリアのサプライチェーン

日本 コージェネ用ガスエンジンで都市ガス・水素混焼の安定燃焼に成功

東邦ガス株式会社とMHJETは、コージェネレーションシステム(コージェネ)用の450kWガスエンジン商品機(GS6R2)を用いた都市ガス・水素混焼実証に共同で取り組み、定格発電出力、水素混焼率35%(体積比)での試験運転に国内で初めて成功しました。本実証は、既にお客様に設置済みのコージェネに対し大幅な改造を加えることのない範囲で都市ガス・水素混焼運転を実現するための知見獲得を目的に、東邦ガス技術研究所(愛知県東海市)において、MHJET製ガスエンジン商品機を用いて行ったものです。都市ガス・水素混焼においては、異常燃焼(バックファイア、ノッキング、ブレイグニッション)の発生が課題となりますが、空気と燃料の投入比率の調整等により、安定した燃焼状態での運転を確認しました。

また、5.75MWガスエンジン(KU)の単筒試験機での水素混焼試験を実施し、定格相当出力において水素混焼率50%(体積比)までの安定燃焼を確認しました。本実証試験を通じて、KUガスエンジンにおける、発電および蒸気利用における水素混焼時のCO₂排出係数:0.27kg-CO₂/kWhレベルの実現見通しを確立しました。同レベルは、持続可能な経済活動を分類する「EUタクソノミー」規則における天然ガスに係る技術的基準において、移行期の活動に分類されている基準です。今後、プラント補機や制御仕様なども含めた生産化に向けた仕様を決定し、2025年度中の商品化を目指します。幅広い産業界でコージェネレーションシステムとして使用されるKUガスエンジン(3.65~5.75MW)の水素混焼化により、分散型電源の低炭素化に貢献します。

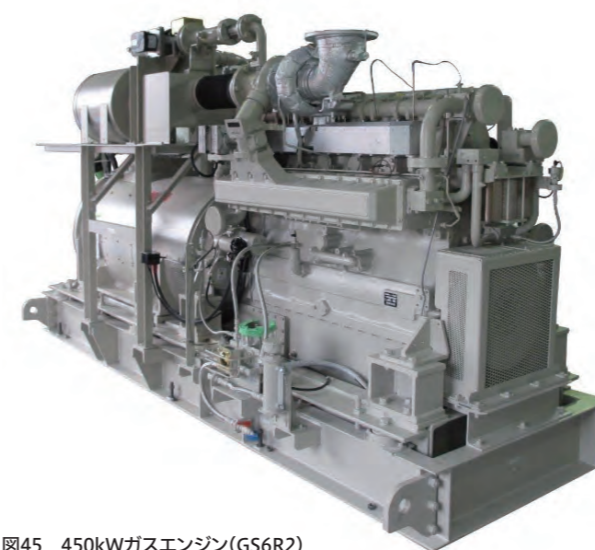


図45 450kWガスエンジン(GS6R2)

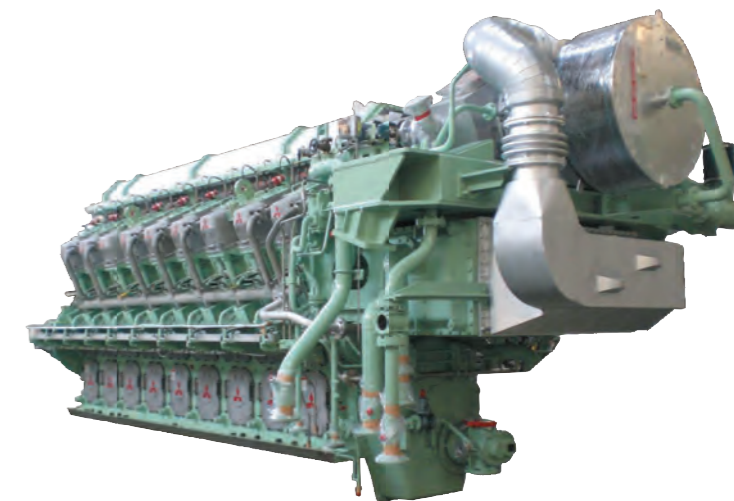


図46 5.75MWガスエンジン(KU)



水素エコシステムの実現

日本 原子力(高温ガス炉)の高温熱を活用した水素製造

高温ガス炉は、炉心・燃料の構成材に耐熱性の高い黒鉛(減速材)や炭化ケイ素(SiC)のセラミック材料(燃料被覆)を、核熱を取り出す冷却材に化学的に安定なヘリウムガスを用いることにより、軽水炉(300°C程度)に比べてはるかに高温(~950°C)の熱を取り出すことが可能な原子炉です。また、万一の事故時にも炉心内の熱を原子炉外表面から自然に放熱・除去でき、炉心溶融を起こさない”固有の安全性”を有する安全性に優れた原子炉です。当社は、高温ガス炉の高温の核熱を利用して、大量かつ安定的な水素製造を可能とする高温ガス炉プラントを開発し、産業界の脱炭素化に貢献していきます。

高温ガス炉水素製造実証事業への参画(図47)

2022年4月、当社は日本原子力研究開発機構(JAEA)と共同で、2030年代前半の実用化を目指し、高温ガス炉を活用した水素製造技術の実証事業を開始しました。本事業では、JAEAが有する高温ガス炉試験研究炉(High Temperature engineering Test Reactor: HTTR)に水素製造設備を新たに接続して、高温ガス炉から得られる高温核熱を利用することで、水素を安定的に製造できることを実証する計画です。

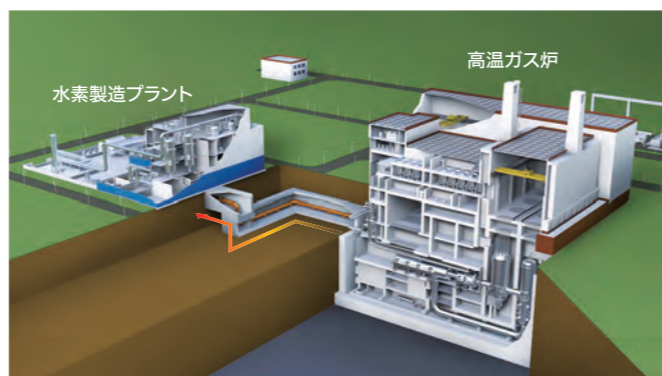


図47 高温ガス炉-水素製造プラント(イメージ図)

高温ガス炉実証炉開発 中核企業に選定

2023年7月に、当社は国が推進する高温ガス炉の実証炉開発を担う中核企業に選定されました。今後、中核企業として高温ガス炉実証炉の開発を推進し、国が目指す2030年代の実証炉運転

開始に向け、研究開発、設計及び建設まで一括して取り組んでいきます。

日本 水素コンプレッサ(図48)

水素発電をはじめ、車両燃料や家庭熱源といった裾野の広い水素需要が拡大すると、水素を大容量で扱う場面が増えていきます。水素製造、輸送・貯蔵、利用の各工程で昇圧が必要で、大容量の水素を効率よく昇圧する高圧力比のコンプレッサは水素社会を実現するためのキーコンポーネントとなります。水素は地球上で最も軽い気体(分子量2)で圧縮しにくいいため、経済的に効率よく昇圧するにはインペラ(羽根車)の回転数を可能な限り速く(高周速化)する必要があります。また、水素には材料を脆くする特性(水素脆化)があるため、水素コンプレッサには、脆化に耐える材料選定と高周速化の両立という高い技術力が要求されます。当社の遠心式水素コンプレッサは、水素の昇圧に高周速インペラを適用することで、1ケーシングあたりの圧力比を上げ、機器のコンパクト化かつ軽量化を図るとともに、メンテナンスにかかる時間も短縮します。さらに長時間の連続運転が可能です。

当社では、2,600台以上のコンプレッサ製造の実績のもと、高速の遠心コンプレッサ技術を用いた水素リッチガスを昇圧するコンプレッサを提供しています。さらに純度の高い水素に対応すべく、超高速コンプレッサの提供にむけた取り組みを進めています。

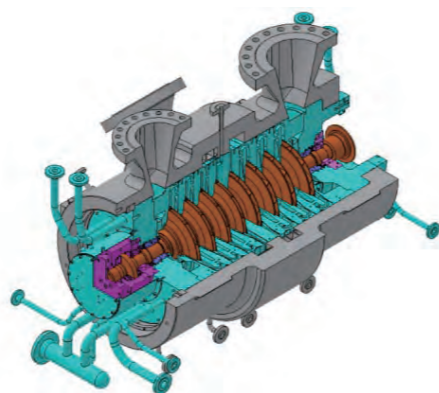


図48 水素コンプレッサ

日本 水素ステーション向け液体水素昇圧ポンプ(図49)

運輸分野における脱炭素化に向け、燃料電池自動車(FCV)の普及に向けた取り組みが進められており、特にFCVの利点である航続距離の長さや充電時間の短さを活かせるFCトラック等の商用車の導入拡大が期待されています。そして、FCV導入拡大に向け、燃料である水素の供給ステーション整備が今後必要となってきます。経済産業省が策定した「水素基本戦略」では、日本国内に水素ステーションを2030年までに1000ヶ所設置することが計画されており、現行の水素ステーションの圧縮機昇圧型に比べて、エネルギー消費量を抑えることができ、更に専有面積の省スペース化や設備・ランニングコストの低減が可能な液体水素昇圧ポンプの需要が増大してくる見込みです。当社は、水素ステーション向けに新たに90MPa級の超高压型液体水素昇圧ポンプを開発しました。この超高压液体水素昇圧ポン

プは往復動ポンプ構造であり、引火性雰囲気でも自らが引火源とならない防爆仕様を備えたモーターによる駆動(流量コントロールを容易にするインバーター制御)方式を採用しています。また、気化しやすい極低温流体である液体水素を取り扱うため、吸い込み部を真空断熱容器で没水するサブマージ型としています。さらに、これまで当社の実績では40MPa程度だった液体水素昇圧ポンプの圧力を90MPaまで高めたことで、短時間により多くの水素燃料をFCVに充填することができます。現在、米国FirstElement Fuel社の試験場にて長期耐久試験を実施しており、2024年頃の商用化を目指します。当社は、宇宙ロケットや船用LNG開発などで培った極低温技術をベースに新たなソリューションを展開し、環境にやさしい水素社会の実現に貢献していきます。



図49 水素ステーション向け液体水素昇圧ポンプ

2020年時点で年間約400億トンと言われる世界のCO₂排出を、2050年までに完全なゼロに抑えるためには、現在推進している様々な施策に加えて、年間約40億トンから130億トンのCO₂排出量を回収する手立てが求められます。

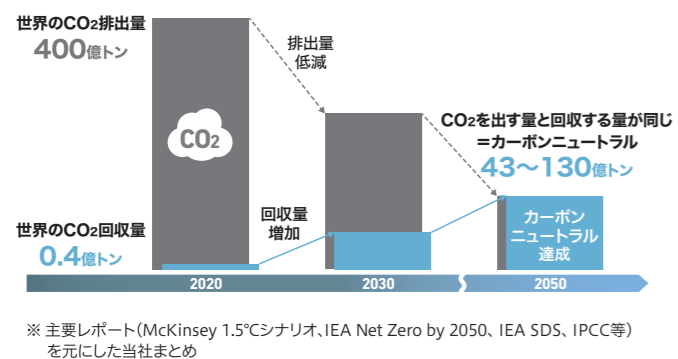


図50 世界のカーボンニュートラル達成シナリオ

COP21にて通称「パリ協定」として合意された、世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて2°Cより十分低く保つ「2°C目標」とともに、1.5°Cに抑える努力を追求する「1.5°C目標」では、カーボンバジェットと言われる、排出しても良い累積のCO₂の総量が定められました。1.5°C目標でのカーボンバジェットは(現在から1.5°C上昇に至るまで)4,000~5,000億トンで、2°C目標でのカーボンバジェットは11,500~13,500億トンとされています。仮に毎年400億トンのペースでCO₂排出が進むと、1.5°C目標ならば10年、2°C目標ならば30年で到達する計算になります。そこで、CO₂排出を減らすことと並行して、CO₂を能動的に回収しそれを処理することにより、2050年の年間43~130億トンも

ブリーズ・コンセプト

当社のCCUSビジネスコンセプトを「ブリーズ(そよ風)」コンセプトと呼んでいます。これは、地球の温度上昇を可能な限り低く抑えることにより22世紀以降の子供達に涼しいそよ風を残そう、という趣旨でつけた名前です。このブリーズ・コンセプトのビジョンは「CO₂を解決する。Solving CO₂ for Good.」です。世界各国が合意した大義のために、CO₂に関する技術、ビジネス、社会貢献など様々な面で、今できるあらゆる手段を推進する、それがブリーズ・コンセプトのビジョンです。

のCO₂排出量を差し引きゼロ(「Net Zero」)にさせるという考え方がCCUSとなります。CCUSとはCarbon dioxide (CO₂) Capture, Utilization and Storageの略で、CO₂回収、利活用および貯留のことです。図50の下側の青色棒グラフの拡大に対して、貢献する事業活動が、当社のCCUS、CO₂エコシステム実現に向けた施策となります。

CCUSは2020年代後半より本格的な市場の立ち上がり期待されます。制度としては初期投資やオペレーションに対する補助金、CO₂の輸送・貯留の規制料金、CO₂固定量に応じた税制控除、カーボン・リサイクル燃料などCO₂利活用に対する補助金、さらに企業の投資を促すことにつながる比較的高いカーボン・プライシングや炭素国境調整メカニズム等の整備が進もうとしており、制度設計や補助金制度の進捗が早い英国、欧州、米国、カナダにおいて、大型のCCUSプロジェクトが計画されています。また、日本では、2023年にJOGMECが「先進的CCS事業」の7案件を選定し、制度設計やグリーン・イノベーション基金等の補助金制度が動き始め、これからCCSやCCUの検討が本格化しますが、長期CCSロードマップの中間報告に記載されました。



図51 ブリーズ・コンセプトのビジョン

CO₂NTAIN・CO₂NNECT・CO₂NVERT

ブリーズ・コンセプトでは当社の事業領域を3つに定めてカテゴリー分けして、それぞれに注力しています。頭にCOが付く英単語をもじってCO₂NTAIN、CO₂NNECT、そしてCO₂NVERTとしています。CO₂NTAINは「とじこめる」。即ちCO₂回収や回収したCO₂の貯留です。CO₂NNECTは「つなぐ」。未だ立ち上がっていない当社を含むCCUSのバリューチェーンやサプライチェーンにおけるプレーヤーをつなぎます。当社はCO₂の液化輸送船、コンプレッサ、液化装置、ガスホルダー、港湾設備などのエンジニアリングを有します。また、CCUSをグリッドとしてデジタルにつながるプラットフォーム「CO₂NNEX」にも取り組んでいます。さらにCO₂NNECTでは装置や技術に留まらず、当社はCCUSの事業そのものとしてCO₂の回収やアグリゲーション、輸送、需要供給のマッチング、中間貯留や最終貯留などのソリューション・サービスへの参入を進めています。CO₂NVERTは「いかす」。静脈産業として厄介ものとされるCO₂に、価値を見出し、流通させます。CO₂の価値は、カーボン・リサイクルにおける材料としての資源、カーボン・クレジットのような削減し認証されることで得られる環境価値、そして補助金やカーボン・プライシングのように削減する行為や排出してしまうこと自体で換算される正や負の金銭的価値などです。当社では、カーボン・リサイクルによる肥料製

造、炭酸ジメチル製造、メタノール合成といった自社技術に加え、合成燃料e-Fuel製造、微細藻類を使った各種ケミカル品の生成など新しい領域の技術を開発するスタートアップ企業への投資を行っています。さらに、上述のCO₂NNEXによりCO₂の需要側と供給側を効率良くつなぐことでCO₂利活用、CCUの拡大に貢献します。CO₂NNEXでは、カーボン・クレジットとの連携や、透明性有るデータとしてCCUSによる環境貢献を定量的に証明し、認証機関につなげることで価値に転換するという試みも進めています。

当社は、既存のCO₂回収技術に加えて、新たな排ガス源からのCO₂回収技術による実証試験等を実施し、さらに液化CO₂(LCO₂)の長距離大量輸送技術などの開発もすすめることで、テクノロジーによりCCUSバリューチェーンの構築をリードします。また、CO₂NNEXの実際のCCS/CCU/CCUSへの適用検討のデジタル実証を2022年から進めており、フィジカルCCUSの商用立ち上がりに完成したプラットフォームの実装を提供します。またCCUSソリューション・サービス事業に関しては、輸送、貯留、利活用などの有力企業とのパートナーングや独自のサービスを産み出すことで、製造業に留まらないCCUSへの関与の仕方を模索します。

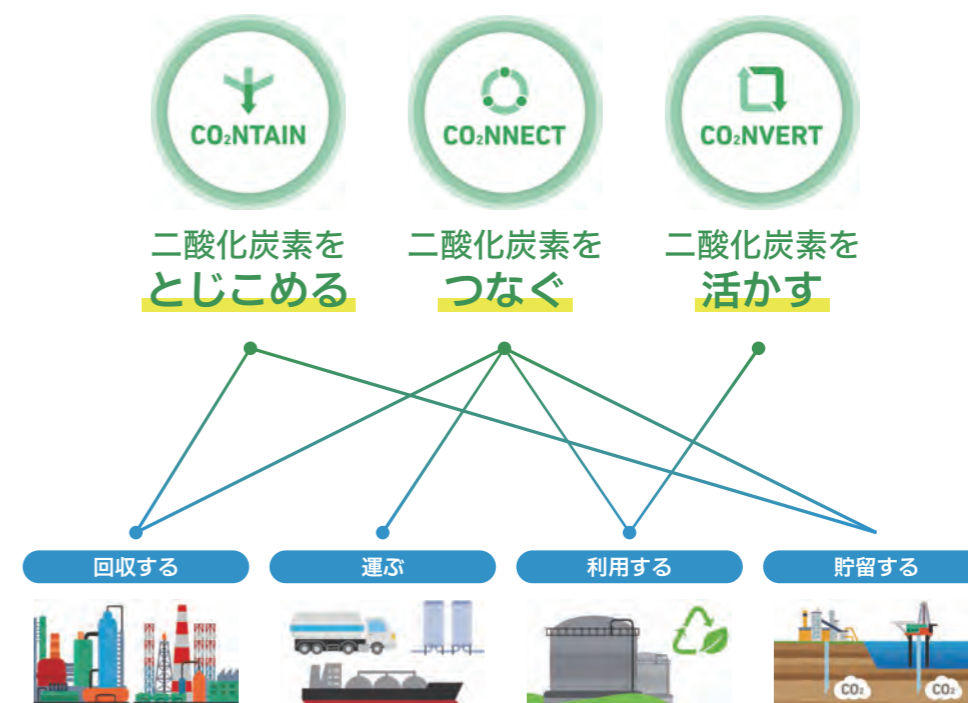


図52 当社CCUS事業領域

CO₂回収装置 (CO₂NTAIN)

CO₂は、大きく3つの排出源から回収されます。一つは石油や天然ガスの採掘時に随伴して含まれるCO₂を分離・回収するもの。次に化学プロセス等の際に発生するCO₂を分離・回収するもの。そして化石燃料や炭素成分を含む燃料を燃焼させた際に発生する排ガスに含まれるCO₂を分離・回収するもの。当社は、2点目のプロセスからと3点目の排ガスからのCO₂回収において、1990年代からの商用実績を有し、2022年現在商用稼働するCO₂回収量では世界トップレベルのシェアを持ちます。回収技術としては下表5に纏めています。当社はその中で、化学吸収法と呼ばれる技術に強みを持ちます。

技術カテゴリー	特徴	開発状況	企業
化学吸収法 (液体吸収)	<ul style="list-style-type: none"> CO₂を液体中に溶解させ分離し、吸収液中の成分と反応させ吸収 排ガスからの分離に適する 大型の実績(1日5000トン)がある 一般にアミン系溶媒が用いられることが多い 	<ul style="list-style-type: none"> 商業化済 吸収液の開発や設備(初期費用や運転コスト)のコストダウン、技術適用範囲の拡大が焦点 	MHI, Shell, Fluor, Aker, Carbon Clean, Toshiba
固体吸着法	<ul style="list-style-type: none"> 固体の吸着剤表面や細孔にCO₂分子が吸着する方式 吸着後は熱や圧力により、吸着したCO₂を脱着する 吸着剤として有名なものは、活性炭、ゼオライト等があり、宇宙ステーション等にも使用される 	<ul style="list-style-type: none"> 商業化済 設備の大型化、材料開発、低エネルギー化、技術適用範囲の拡大が焦点 	Air Liquide, Air Products, Svante, CO ₂ Solutions
膜分離法	<ul style="list-style-type: none"> 浸透圧による分離方式 高圧、高濃度ガスからの分離に適する(排ガス等からのCO₂回収は不利) 	<ul style="list-style-type: none"> 天然ガス用には商業化済 高分子膜など新しい技術はパイロット試験段階が多い 材料開発が焦点 	Air Liquide MTE

表5 CO₂回収技術 ※ 現在主要なCO₂回収技術より商用化観点にて3つのカテゴリーを選択し表示

関西電力と共同で開発した「KM CDR Process™」は、他の既存技術と比較してエネルギー消費が30%低減できます。このプロセスは、独自のアミン系CO₂吸収液「KS-1™」を使用しているため、CO₂の吸収・分離効率に優れます。そのため、お客様のCO₂回収装置の運転コスト低減に貢献します。また、新たに開発したプロセス「Advanced KM CDR Process™」および吸収液「KS-21™」は、「KS-1™」に比べてさらにCO₂吸収・分離効率向上に加え、運転中のCO₂吸収液の劣化も少なくなります。当社ではこのようにCO₂回収技術のたゆまぬ向上に努めています。化学吸収法を使ったKM CDR Process™は図53の様な

プラント構成となります。図中左側からくる排ガスを冷却し、その排ガスが中央の吸収塔に入り、その中でアミン系CO₂吸収液と触れ合うことで吸収液にCO₂が取り込まれます。CO₂が取り込まれたアミン系CO₂吸収液は、図中右側の再生塔の中で温められることによりCO₂を分離(再生)します。このように分離されたCO₂は再生塔上部より取り出し、圧縮されて次のプロセスに運ばれます。取り出されるCO₂純度はほぼ100%で、排ガスからのCO₂回収率は設備によっては99%を超えることも可能になります。

<https://www.mhi.com/jp/news/211019.html>

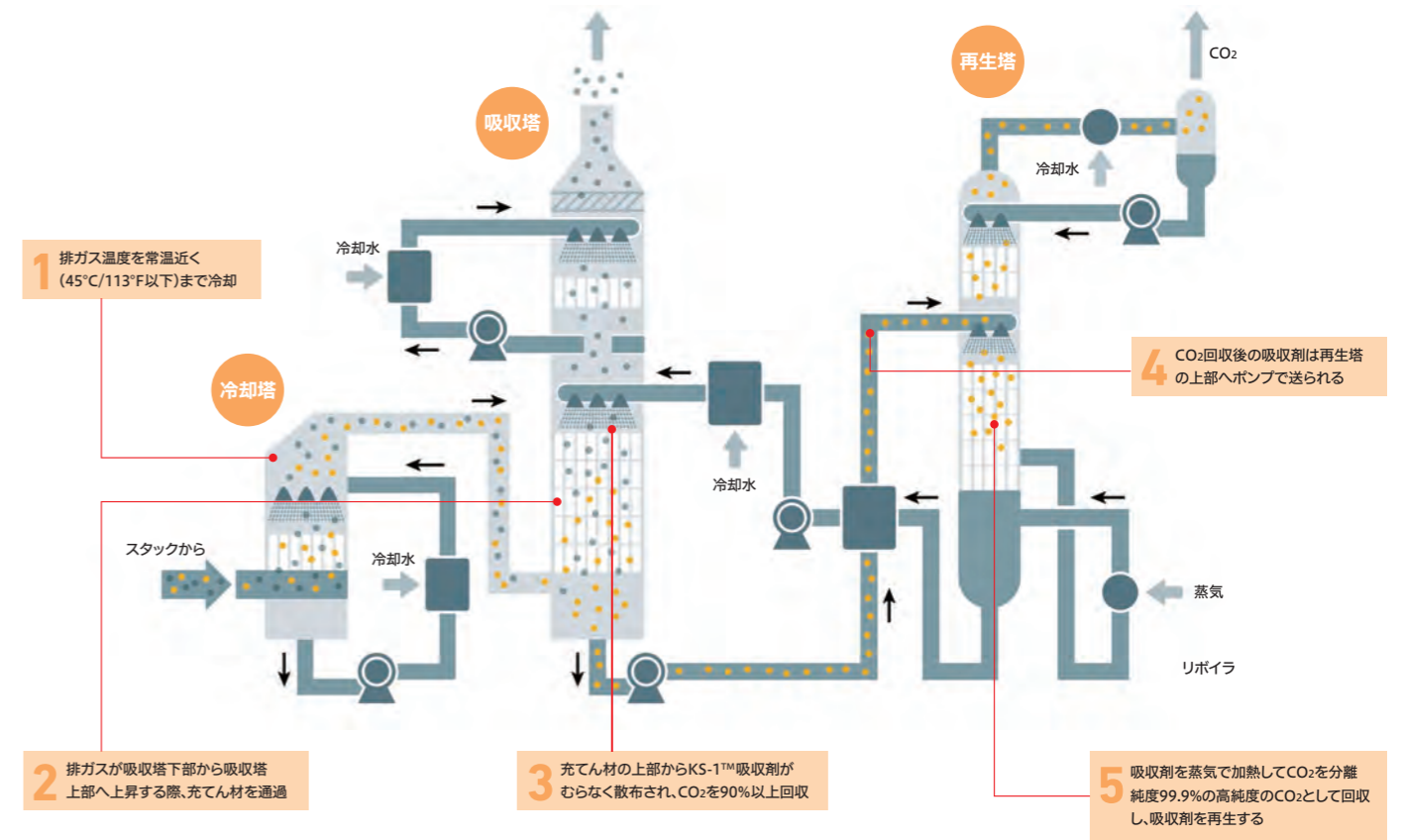


図53 KM CDR Process™ プラント構成

当社の得意とする排ガスからのCO₂回収は、火力発電所だけでなく、下図54のように多様な排出源にその技術の適用を展開していきます。ごみ焼却施設、LNG製造施設、製鉄所、セメント工場、化学プラント、そして船舶などです。これらは前章までのCO₂排出を削減したり燃料転換により排出自体が無くなったりする努力をしても、どうしてもCO₂排出が残ってしまう産業ということで「削減しにくい産業 (hard-to-abate industries)」と称されます。それぞれの排出源は、排ガスに含まれる微量成分や、排ガス温度、設置スペースといった諸条件により難易度が違います。また、回収量も一日数万トンといった超大型のものから、一日数百キロという超小型のものまで多様です。当社は、市場性を見ながらオールラウンドに回収技術を適用できるように開発を続けています。

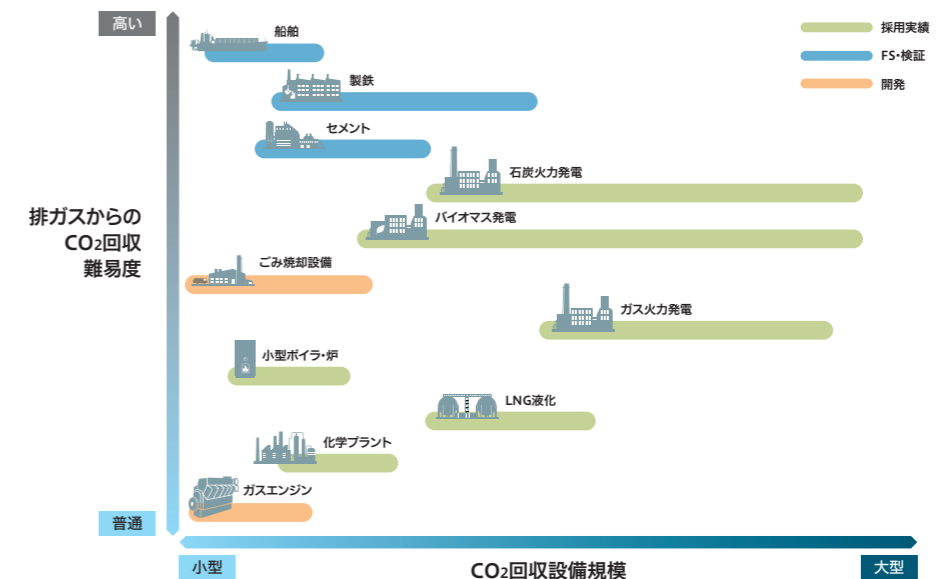


図54 当社がCO₂回収適用検討を進める様々なCO₂排出源

液化CO₂輸送船(LCO₂船)

CCUSでは大量のCO₂を輸送する必要があります。その量は、例えば英国ハンバーのCCSにおいてはパイプラインで年間最大約2,800万トンのCO₂を移送し貯留サイトへ貯蔵する計画です。パイプラインは、世界的にCCSの計画においては、最も一般的な方法です。CO₂のパイプライン自体は、2022年現在未だ天然ガス等の移送のパイプラインほど多くはありませんが、米国ではすでに約8,000kmにおよぶCO₂パイプラインを有しており、今後さらに建設される計画です。一方で、パイプライン敷設のための土地収用が難しいケースが多く、敷設工事により別の環境汚染を発生させる恐れがあり、また柔軟な移送ルートを選択できない、といった課題があります。

少量のCO₂輸送には、現在と変わらずトラックや鉄道輸送が使われます。それらは、高压ガスタンクあるいはLCO₂タンクでの輸送となります。また、ドライアイスのコンテナ輸送ということも実施されています。これらトラックや鉄道一輛での輸送量は限定的で、数トン～数十トンとなります。一方で、CCUSのように年間数百万～数千万トンのCO₂を輸送するには、トラックや鉄道で

その全てを受け持つことは非常に困難です。そこで、超大量のCO₂を、例えば数千kmの長距離を輸送するためには、現在一次エネルギーの輸送で使われるような、大型の輸送船が必要になります。現在は欧州において食品添加用CO₂の輸送用に2,000トン以下1,000トンクラスの小型LCO₂船が使用されていますが、当社では、今後、一次エネルギーの輸送に使われるような大きさの大型LCO₂船の需要が必ず高まると想定しています。大規模排出エリアで例えばパイプラインで集積されたCO₂が港湾部で液化され、それがLCO₂船により貯留サイトまで輸送されて地下注入される、またはLCO₂を利活用するコンビナートへ運ばれて、資源リサイクルとして使われることが考えられます。当社では、LCO₂を大量に、かつ低コストで輸送することができる液化ガスハンドリングの技術開発やLCO₂船に必要な製品開発を行っています。またNEDOプロジェクトに活用される液化CO₂船舶輸送の実証試験船を2023年11月に建造しました。



図55 CO₂輸送の全体像
出展: Fact Sheet Transporting CO₂, Global CCS Institute



図56 LCO₂船舶輸送の実証試験船「えくすくろ」

CO₂コンプレッサ

各産業設備から排出されるCO₂や、回収装置で回収されたCO₂をパイプラインで輸送し、貯留サイトに貯蔵するにはCO₂ガスを効率よく昇圧する必要があります。当社では一軸多段式、ギアド式のCO₂コンプレッサを有し、容量や用途、貯留サイトに合わせた最適なソリューションを提案しています。一軸多段コンプレッサは複数のインペラを1つのケーシング内に保持する構造で高压化に適しています。高ボス比インペラ、高減衰シールを適用し、高压下での回転軸(ロータ)の安定性を実現しています。

ギアドコンプレッサは、各インペラの回転数を最適化、各段の間冷却器で高効率化が可能です。2017年に世界最大級のギアドコンプレッサを米国ペトラノヴァ炭素回収プロジェクト(Petra Nova Carbon Capture Project)に納入した経験にもとづき、現地据え付け作業日数を最小化し、プラントの建設期間の短縮に向けて、コンプレッサと周辺機器とのコンパクトモジュール化を進めています。

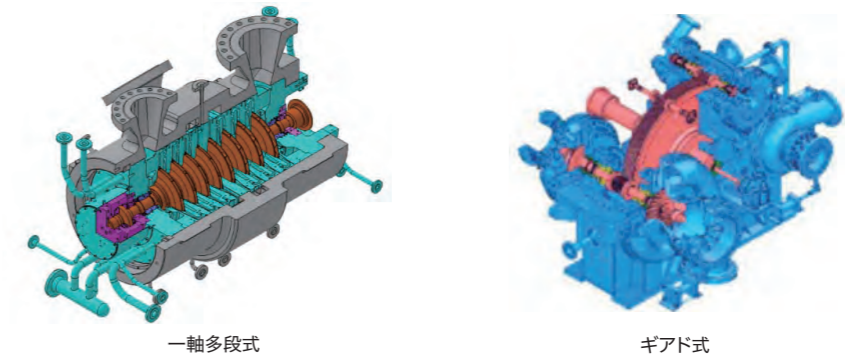


図57 CO₂コンプレッサ

CO₂NNEX

CO₂NNEXは、CCUSのスマートグリッドを構成する当社独自のデジタル・プラットフォームです。CO₂メーター類をつなぐIoT技術、改竄不可能な形で環境価値を証明するブロックチェーン技術、CO₂の発生源や輸送経路や使用用途などを追跡するトレーサビリティ技術、クレジット認証や他のシステムとの連携を可能にするAPI技術等様々なIT技術が使われるため、当社は同様なIT基盤の実績を多数持っているIBMと共創しながらこのシステムを開発しています。CO₂の流通量が2040年に向けて現在の100倍以上になり、それに向けて小規模や大規模のCCSやCCUあるいはCCUSのチェーンが構築されていきます。これらは全てCO₂削減に向けた環境貢献が主な目的であり、CO₂の実際の回収、輸送、利活用、貯留の追跡と定量的な証明が必要になってきます。

CCS/CCU/CCUSのチェーンはそれぞれつながり合うことで、CO₂の価値を最大化させ、環境価値を離れた場所へ正しく移転することが可能になると考えます。CO₂を排出し回収されたものは、ある時は販売され、ある時は処理費用を払って貯留されます。Direct Air Capture(DAC)により、直接大気中から吸収されるCO₂や、バイオマスボイラからの回収されるCO₂などは、正しく固定・貯留されることでカーボンバジェット自体を増やすカーボン・ネガティブにつながるため、それらのCO₂の価値は高まり、他よりも高く取引されると考えられます。CO₂NNEXではそれらの異なる価値の売買のマーケットプレイスにもなり、最終的にはCO₂の需要と供給を正しく調整することで、CO₂エコシステム全体のコスト効率が向上すると考えます。



図58 CO₂NNEXのイメージとPR動画

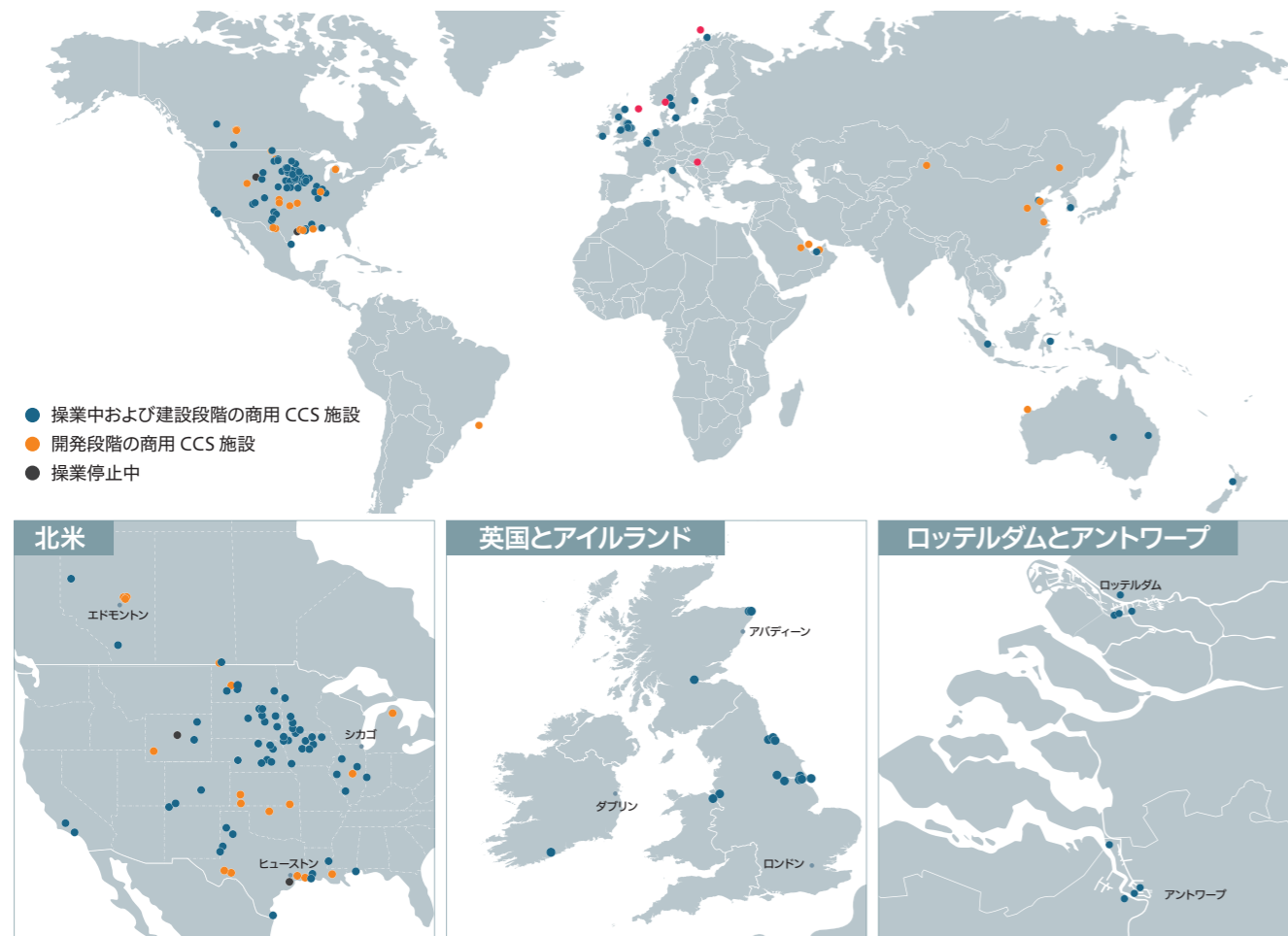


図59 大型CCSプロジェクトの地図 出典: Global status of CCS in 2021, Global CCS Institute

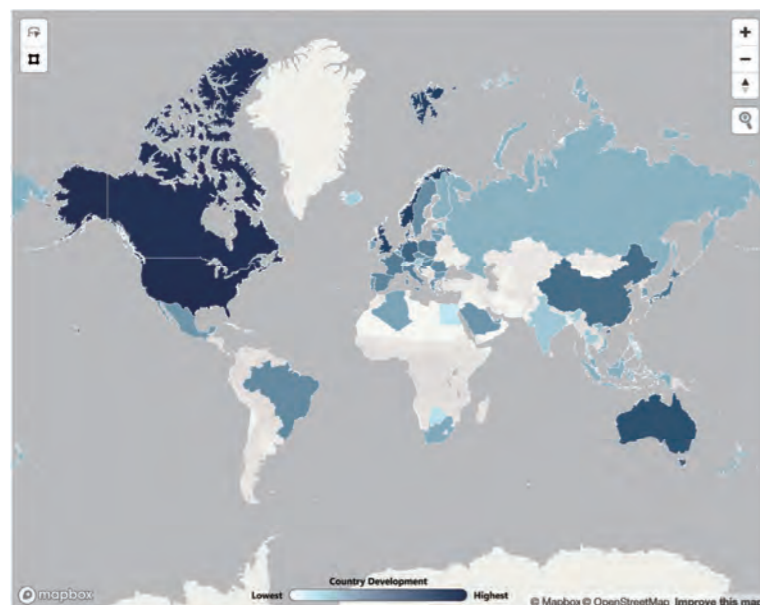


図60 CCS導入に対する制度的準備度 出典: CCS Readiness index, Global CCS Institute

CO₂利用技術 (CO₂NVERT)

CO₂利用分野ではスタートアップとの連携を強化しています。当社グループのCO₂回収技術やバリューチェーンソリューションとスタートアップのCO₂利用技術によるソリューションを組み合わせることで、CO₂エコシステムの実現を目指しています。

Infinium社(エレクトロフューエル)

米国三菱重工を通じて、CO₂ および再生可能エネルギーからクリーン燃料「エレクトロフューエル (Electrofuels™)」を生成する革新的技術を持つ米国カリフォルニア州の Infinium (インフィニウム社) に出資しています。航空機や船舶、トラックなどの燃料をネットゼロカーボン燃料に転換できる独自技術を有するインフィニウム社との関係を強化することにより、エナジートランジション (低環境負荷エネルギーへの変換) におけるCO₂ 回収・利用分野での展開を強化・多様化していくのが狙いです。



Cemvita社(バイオ技術でのCO₂利用)

米国三菱重工を通じて、バイオ技術を活用したCO₂利用ソリューションを提供する米国テキサス州ヒューストンのCemvita Inc. (センビタ社)に出資しています。センビタ社は、革新的なバイオ合成技術を用いて、化学品、鉱山、オイル&ガスなどの重工業分野での脱炭素ソリューションを開発・提供するバイオテクノロジーのスタートアップ企業です。同社のバイオ製造プラットフォームは、CO₂を原料として利用し常温・常圧下でさまざまな化学品を生成することを特徴とすることから、経済性が高くクリーンなソリューションの提供が期待されます。

