

水素発電 ハンドブック (第5版)

製造から発電にわたる一貫した水素技術の実現に向けて

元素周期表

1

1

H

Hydrogen

1.008

2

2

He

Helium

4.003

3

Li

Lithium

6.941

4

Be

Beryllium

9.012

11

Na

Sodium

22.99

12

Mg

Magnesium

24.31

19

K

Potassium

39.10

20

Ca

Calcium

40.08

21

Sc

Scandium

44.96

22

Ti

Titanium

47.87

23

V

Vanadium

50.94

24

Cr

Chromium

52.00

25

Mn

Manganese

54.94

26

Fe

Iron

55.85

27

Co

Cobalt

58.93

28

Ni

Nickel

58.69

29

Cu

Copper

63.55

30

Zn

Zinc

65.38

31

Ga

Gallium

69.72

32

Ge

Germanium

72.63

33

As

Arsenic

74.92

34

Se

Selenium

78.97

35

Br

Bromine

79.90

36

Kr

Krypton

83.80

37

Rb

Rubidium

85.47

38

Sr

Strontium

87.62

39

Y

Yttrium

88.91

40

Zr

Zirconium

91.22

41

Nb

Niobium

92.91

42

Mo

Molybdenum

95.95

43

Tc

Technetium

(99)

44

Ru

Ruthenium

101.1

45

Rh

Rhodium

102.9

46

Pd

Palladium

106.4

47

Ag

Silver

107.9

48

Cd

Cadmium

112.4

49

In

Indium

114.8

50

Sn

Tin

118.7

51

Sb

Antimony

121.8

52

Te

Tellurium

127.6

53

I

Iodine

126.9

54

Xe

Xenon

131.3

55

Cs

Cesium

132.9

56

Ba

Barium

137.3

57-71

Lanthanoid

72

Hf

Hafnium

178.5

73

Ta

Tantalum

180.9

74

W

Tungsten

183.8

75

Re

Rhenium

186.2

76

Os

Osmium

190.2

77

Ir

Iridium

192.2

78

Pt

Platinum

195.1

79

Au

Gold

197.0

80

Hg

Mercury

200.6

81

Tl

Thallium

204.4

82

Pb

Lead

207.2

83

Bi

Bismuth

209.0

84

Po

Polonium

(210)

85

At

Astatine

(210)

86

Rn

Radon

(222)

87

Fr

Francium

(223)

88

Ra

Radium

(226)

89-103

Actinoid

104

Rf

Rutherfordium

(267)

105

Db

Dubnium

(268)

106

Sg

Seaborgium

(271)

107

Bh

Bohrium

(272)

108

Hs

Hassium

(277)

109

Mt

Meitnerium

(276)

110

Ds

Darmstadtium

(281)

111

Rg

Roentgenium

(280)

112

Cn

Copernicium

(285)

113

Nh

Nihonium

(278)

114

Fl

Flerovium

(289)

115

Mc

Moscovium

(289)

116

Lv

Livermorium

(293)

117

Ts

Tennesine

(293)

118

Og

Oganesson

(294)

57

La

Lanthanum

138.9

58

Ce

Cerium

140.1

59

Pr

Praseodymium

140.9

60

Nd

Neodymium

144.2

61

Pm

Promethium

(145)

62

Sm

Samarium

150.4

63

Eu

Europium

152.0

64

Gd

Gadolinium

157.3

65

Tb

Terbium

158.9

66

Dy

Dysprosium

162.5

67

Ho

Holmium

164.9

68

Er

Erbium

167.3

69

Tm

Thulium

168.9

70

Yb

Ytterbium

173.0

71

Lu

Lutetium

175.0

89

Ac

Actinium

(227)

90

Th

Thorium

232.0

91

Pa

Protactinium

231.0

92

U

Uranium

238.0

93

Np

Neptunium

(237)

94

Pu

Plutonium

(239)

95

Am

Americium

(243)

96

Cm

Curium

(247)

97

Bk

Berkelium

(247)

98

Cf

Californium

(252)

99

Es

Einsteinium

(252)

100

Fm

Fermium

(257)

101

Md

Mendelevium

(258)

102

No

Nobelium

(259)

103

Lr

Lawrencium

(262)

原子番号

元素名

1

H

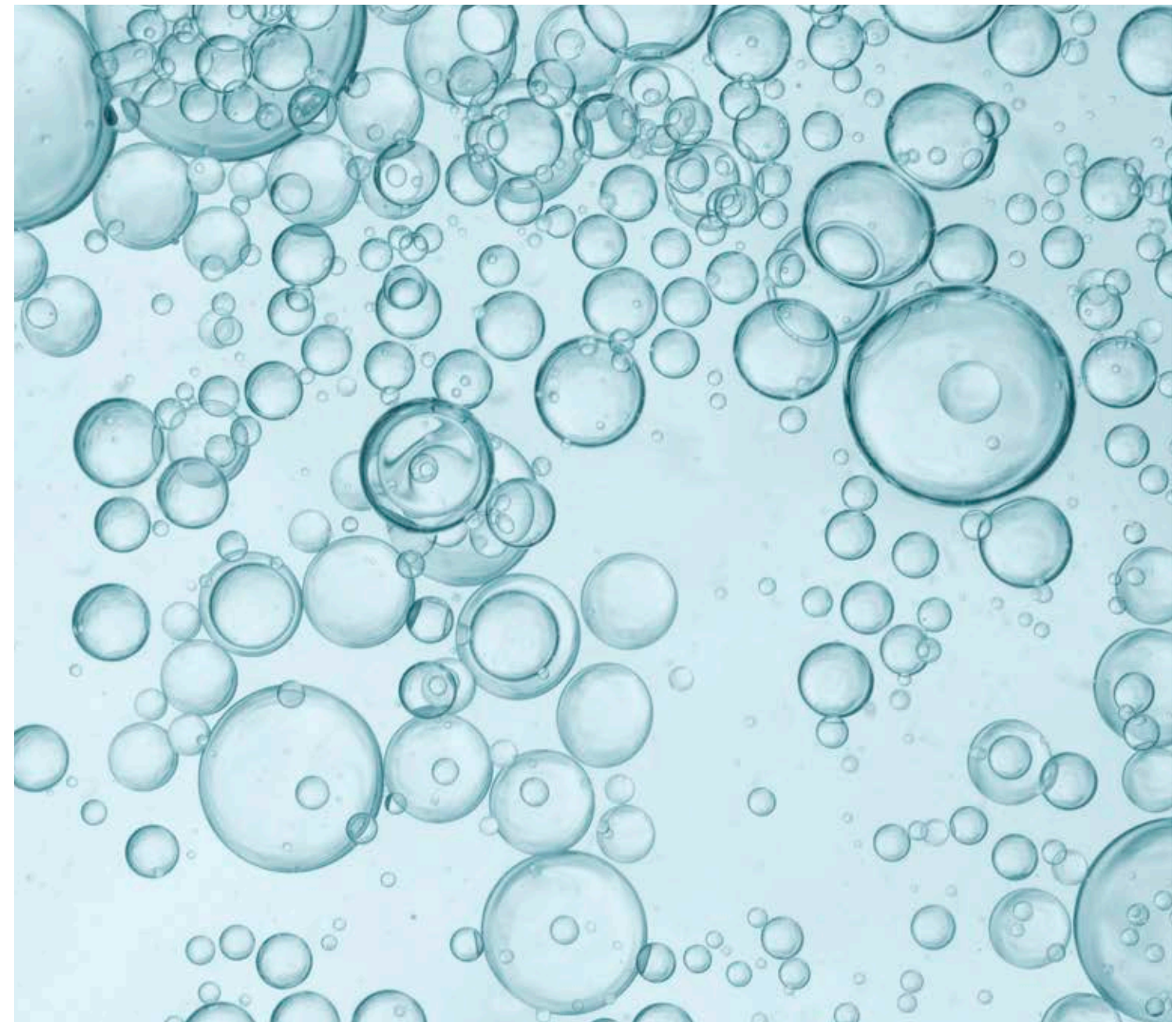
Hydrogen

1.008

元素記号

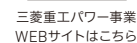
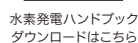
原子量

出典：「科学技術週間」（文部科学省）<https://www.mext.go.jp/stw/series.html>



三菱重工業株式会社
エナジードメイン

〒100-8332 東京都千代田区丸の内3-2-3
power.mhi.com/jp



METP-11GT02-J1-D-0,(1.5)24-12,ZEG

INTRODUCTION

水素。

原子番号 1。

誰もが最初に覚える元素。

水の惑星 地球において、生物に不可欠な水を構成し、宇宙でもっとも豊富に存在し、もっとも軽く、速く拡散し、そして燃える。

「燃える」は文明の基である。エネルギーを生み出す根源となるからだ。

エネルギーは人々の生活に密接に関わり、国や国際社会のなかでも最重要課題である。

同時に、CO₂削減方針は国際的に明確に示されている。

それゆえ、エネルギーの世界は今、大きな転換期を迎えている。

再生可能エネルギーなどのエネルギーソースの多様化と新時代のベストミックス。

水素は燃焼においてCO₂を排出しない、クリーンなエネルギーである。

生成AIの普及、途上国の経済発展と、今後、さらに増加が見込まれる世界の電力需要で、

水素発電は、そのクリーンさと豊富な存在ゆえ、有力な選択肢である。

激しく燃える水素をコントロールし、最大限に活用する水素発電。

技術開発は国家レベルで開発競争が行われ、多くの課題に技術者達が挑む。

INDEX

3 カーボンニュートラル社会の実現に向けて

5 水素社会は、未来の話ではない。もうはじまっている

13 水素ガスタービン30%混焼技術の実証運転成功

<技術論文>

20 カーボンニュートラルの達成に向けた水素・アンモニア焚きガスタービンの取り組み

31 脱炭素社会の達成を目指す“高砂水素パーク”“長崎カーボンニュートラルパーク”の取り組み

42 脱炭素社会の達成を目指す水素製造技術の開発

54 便覧

「水素発電ハンドブック」(第5版)発行にあたって

この度、三菱重工「高砂水素パーク」にて、実証用ガスタービン発電設備による水素燃料30%の混焼運転に成功し、水素製造においても自社技術開発の高温水蒸気電解(SOEC※)のデモ機(400kW級)が稼働しました。

本改訂では、上述の水素発電・製造技術の検証・実証をはじめとする三菱重工の取り組みはもとより、水素エネルギーに関する新たな動向や開発者による技術論文の紹介について内容を更新しました。

皆様のお役に立つ一冊となれば幸いです。

※SOEC: Solid Oxide Electrolysis Cell

カーボンニュートラル社会の実現に向けて

CO₂を排出しない発電技術で、脱炭素化に貢献します。



世界は今、地球温暖化、気候変動という課題に対応するため、「脱炭素革命」ともいえる大きな変化に直面しています。その一方で、人口増加や経済発展、AIの急速な普及を背景とするデータセンターの新增設によって、電力需要が増大しており、経済成長と地球温暖化対策をいかに両立するかが世界共通の重要課題となっています。こうした状況下で、風力発電、太陽光発電など、電気の出力を自然条件に依存する再生可能エネルギーが普及拡大し、安定的な電力供給に対するニーズは、一層高まりを見せています。

そのようななか、三菱重工グループは、2021年10月に2040年カーボンニュートラル宣言「MISSION NET ZERO」を発表しました。カーボンニュートラル社会の実現は地球規模の課題であり、三菱重工は、脱炭素分野での実績を誇るリーダーとして、気候変動対策をリードしていく責任があると考えています。CO₂削減を推進できる製品・技術・サービスを通して、世界中のパートナーと協調し、カーボンニュートラル社会の実現に貢献していきます。

以前より三菱重工は、グループ各社の連携のもと、「エナジートランジション」という再生可能エネルギー拡大と経済性、安定供給の両立に向けたソリューションの道筋を示し、また、この実現に向けた技術開発の方向性を定めてきました。三菱重工は、これまで培った高効率な発電技術・環境技術の開発により「火力発電の脱炭素化によるCO₂削減」に向け、水素・アンモニアなど燃焼時にCO₂を排出しない燃料の発電利用に取り組んでいます。

このハンドブックで紹介する水素発電技術は、化石燃料を用いた火力発電のなかで発電量あたりのCO₂排出量が現在もっとも少ないガスタービン・コンバインドサイクル(GTCC)の燃料を、天然ガスから水素へと転換するもので、世界規模での脱炭素化に大きく貢献する技術です。三菱重工の水素発電技術は、既存の火力発電設備を最大限利用し、水素へ燃料転換することにより、導入コストの抑制を可能にします。

現時点で世界の電力供給の大半を占めている火力発電の脱炭素化において、水素発電は重要な役割を担うことになります。また、水素コストの低減が課題とされるなか、三菱重工グループは、水素製造・発電技術をはじめとする多岐にわたるソリューションの提供により、水素バリューチェーンの発展と、これによるコスト低減の好循環を生み出し、水素社会の実現に貢献することを目指します。

三菱重工は、液体燃料として水素を利用するロケットエンジンや水素製造設備など、さまざまな水素関連製品の製造・納入実績を有し、発電利用においても1970年代から現在まで、約50年にわたり水素を含有する副生ガス利用の豊富な実績を有しています。また、機器供給だけでなく水素やアンモニアの製造、輸送、貯蔵から利用に至るまでの燃料バリューチェーン全体についても取り組んでいます。私たちは、確かな技術力で、カーボンニュートラル社会の実現に向けエネルギーの脱炭素化を促進することで地球環境の保全に貢献していきます。



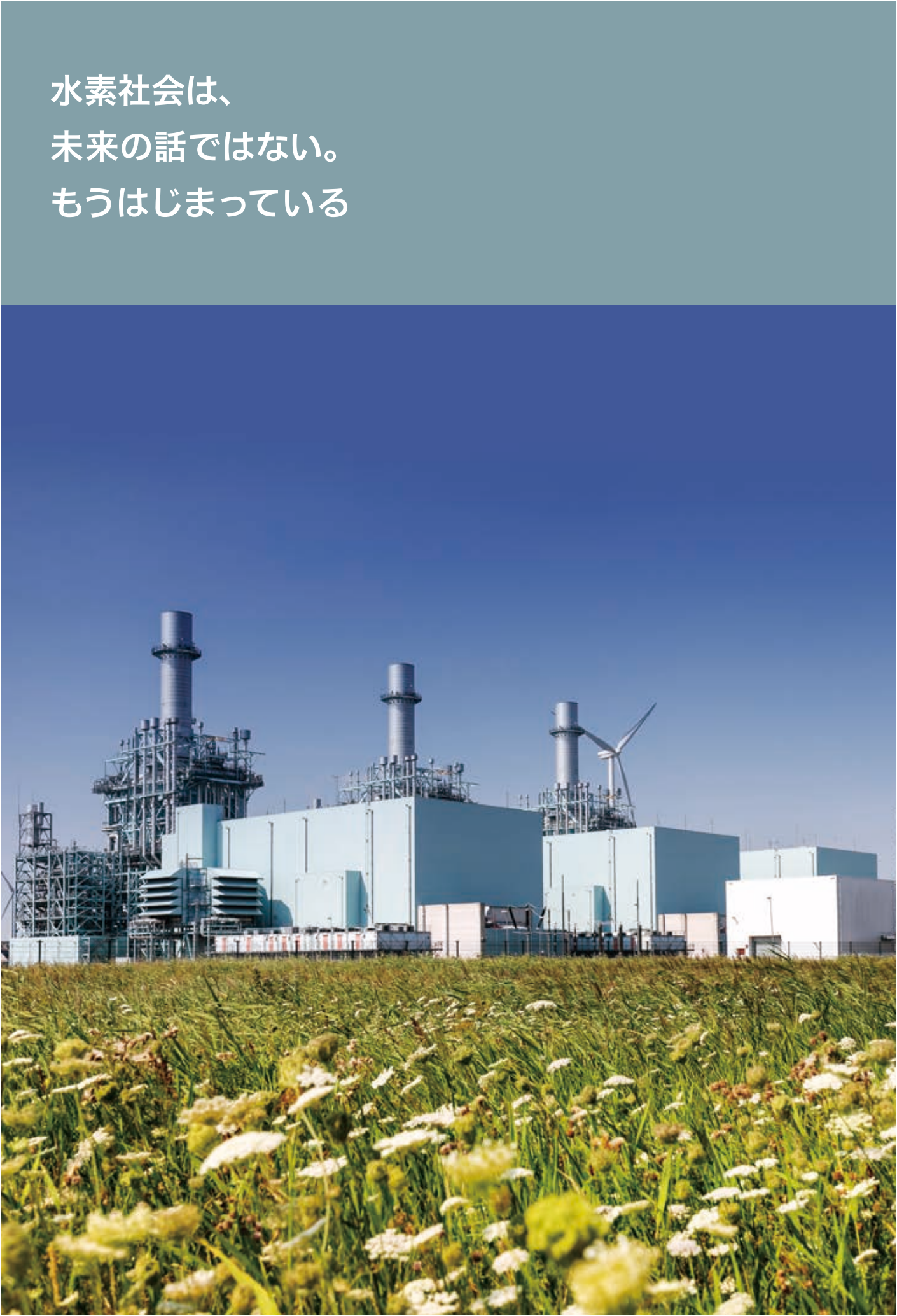
世界最高速マッハ6.7で飛んだX-15の燃料はアンモニアだった！

カーボンフリーで期待のアンモニア燃焼は実は古い技術で、アンモニアエンジン搭載の高高度極超音速実験機ノースアメリカンX-15は1961年に飛行を開始し、1967年にマッハ6.7の世界最高速記録を樹立しています。有人有翼動力機としてのこの記録は、今でも破られていません。アンモニアは、人類に夢を与えてくれる燃料なのですね。



なぜロケットの燃料に液体酸素・液体水素が使われてるの？

ロケットエンジンから噴出される燃焼ガスの速度が早いほど、推進力が大きな良いエンジンと言えます。そして燃焼ガスが軽い物質ほど加速しやすいため、噴出速度は高速になります。つまり酸素と水素が燃焼して発生するH₂Oを主とした燃焼ガスが、他の燃料を用いた場合の燃焼ガスより軽い物質だからなのです。



水素社会は、 未来の話ではない。 もうはじまっている

水素社会へ、世界が動き出した

198か国・機関が参加した気候変動に関する国際会議COP28では、各国の置かれた環境を考慮した分野別の貢献およびゴールまでの道筋について合意され、脱炭素技術として水素発電を加速させる必要性について言及された。また、札幌で開かれたG7環境相会合の共同声明では、水素とアンモニアを発電燃料として利用することが盛り込まれた。

各国の水素政策の取り組みを見てみよう。アメリカはクリーン水素の年間生産量を2030年までに1,000万トン、2040年までに2,000万トン、2050年までに5,000万トンへ拡大する目標を掲げ、クリーン水素関連のプロジェクトに5年間で95億ドルの支援策が打ち出され、活用促進のための拠点となるクリーン水素ハブの整備や、クリーン水素に係る研究開発等への支援が行われている。これに対してEUでは、2030年にEU域内で年間1,000万トンのグリーン水素を製造

するとともに、EU域外から年間1,000万トンのグリーン水素を輸入する目標を掲げ、「グリーンディール産業計画」のもと、政策の1つとして「欧州水素銀行」が創設され、EU域内でのグリーン水素の製造支援の取り組みが始まっている。また、シンガポールでは水素活用の実現に向けて、研究開発やインフラ整備等への支援策が進捗している。そして、中東のUAEはCOP28開催に先駆けて国家水素戦略2050を公式発表した。2031年までに世界有数の水素生産国になることを目指し、供給面では2031年までに年間140万トン、2040年までに年間750万トン、2050年までに年間1,500万トンの水素生産の実現を掲げている。かたや、水素の利用面では2031年に自国向けに210万トン、輸出向けに60万トンの年間需要を見込んでいる。一方、日本でも「水素社会推進法案」および「二酸化炭素の貯留事業に関する法律案」がまとまり、2050年カーボンニュートラルの実現に向けて着実に歩みを進めている。

グローバルでのエナジートランジションの加速

エナジートランジションの加速には3つの要因が挙げられる。1つ目として、ウクライナ侵攻に伴うエネルギー危機が起こり、鈍化すると思われたエナジートランジションの動きが欧州を中心に加速。輸入に頼る燃料と異なり、再生可能エネルギーは地域ごとの自立した電源であるため、積極的に開発していく機運が高まった。2つ目として、2022年8月にアメリカでIRA(Inflation Reduction Act)が成立し、

気候変動対策として多くのインセンティブが10年以上にわたって保障されることになり、さまざまなプロジェクトが活発化した。そして、3つ目は、アジア太平洋地域でもエナジートランジションの動きが旺盛になった。国家戦略として脱炭素戦略を推進するシンガポールや、クリーンエネルギーの輸出国を目指すオーストラリアなどで、水素をはじめとする脱炭素技術への関心が高まりつつある状況である。

三菱重エグループの「MISSION NET ZERO」

「MISSION NET ZERO」とは、三菱重エグループが掲げる2040年カーボンニュートラル宣言である。第1の目標は、三菱重エグループのCO₂排出量(工場などでガスや石油などの燃料を使うことで排出されるCO₂および、購入して使用した電力などのエネルギーが作られたときに排出されるCO₂)を2030年までに50%削減(2014年比)、2040年までにNet Zeroにすることである。

第2の目標は、バリューチェーン全体からのCO₂排出量を、2040年までにNet Zeroにすること。中間目標として2030年までに50%削減(2019年比)することである。これらは三菱重エ製品の使用によるお客様のCO₂排出量削減に、CCUS(Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage)による削減貢献分を加味したものである。三菱重エグループでのCO₂排出量が約70万トン規模(2019年)であるのに比べて、バリューチェーン全体のCO₂排出量は15億トン規模であり、約2,000倍と圧倒的に多くなっている。これは、発電設備などをはじめ一次エネルギー利用がCO₂排出の主要因となっており、そのなか

の製品利用約4割を火力発電設備の運転に伴うCO₂排出で占めているためである。Net Zeroを達成するために、燃やしてもCO₂を発生させ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る。

また、エナジートランジションを推進する上では、再生可能エネルギーの大幅な普及拡大が効果的な選択肢となるが、同時に経済成長に伴うエネルギー需要の増大に応えながらエネルギーの安定供給を維持することも重要である。欧米のように再生可能エネルギーが潤沢な国々、アジアなどの再生可能エネルギーに乏しい国々では、最適解は異なってくる。三菱重エグループが掲げるエナジートランジションとは、お客様や地域の状況に応じて、社会コストを最小化しながら温室効果ガスを削減する現実的なソリューションを提供し、エネルギーの安定供給をもたらすことである。そのために多種多様なニーズに応えられるよう、革新的な技術を導入し、持続可能な社会の実現に貢献する。



目標年	三菱重エグループの 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

Scope 1,2: 算出基準は、GHGプロトコルに準じる。
Scope 3 : 算出基準は、GHGプロトコルに準じる。但しこれに独自指標のCCUSによる削減貢献分を加味。

エナジートランジションとソリューション

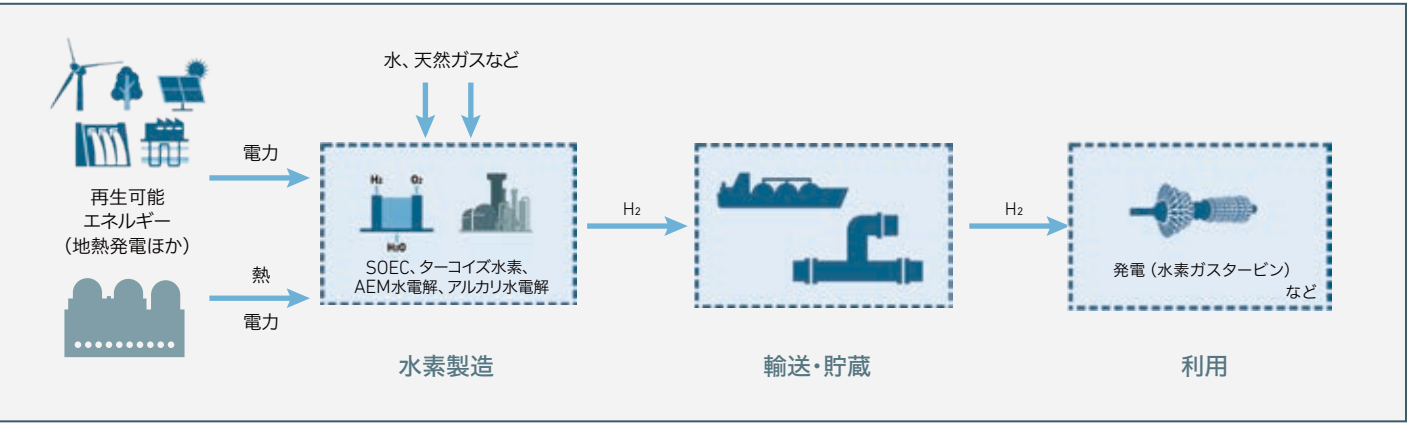
三菱重工グループは、カーボンニュートラル社会の実現に向けたエナジートランジションを推進する上で「既存インフラの脱炭素化」「水素エコシステムの実現」「CO₂エコシステムの実現」を3つの柱として掲げ、ソリューションを提供していく。既に世界の大型プロジェクトに参画して、支援している。

既存インフラの脱炭素化

CO₂排出の主要因である発電機器をはじめ、既存インフラの脱炭素化を進めるために、水素やアンモニアなどのカーボンフリー燃料を使用できる発電技術をはじめ、バイオマス発電、ガス化技術などの開発・実用化を推進する。

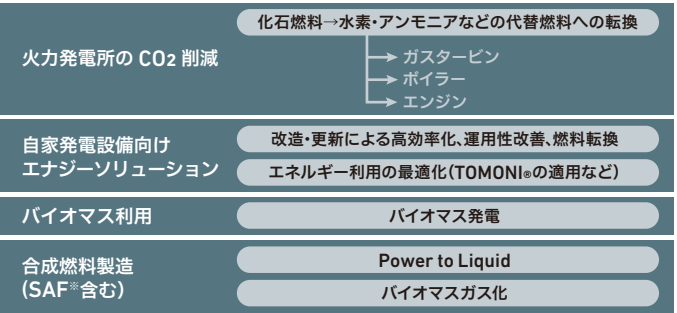
水素エコシステムの実現

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ために、化石燃料から水素・アンモニアに切り替えた際の製造・輸送・貯蔵・利用に至るまでの一連のエコシステムの構築に取り組む。



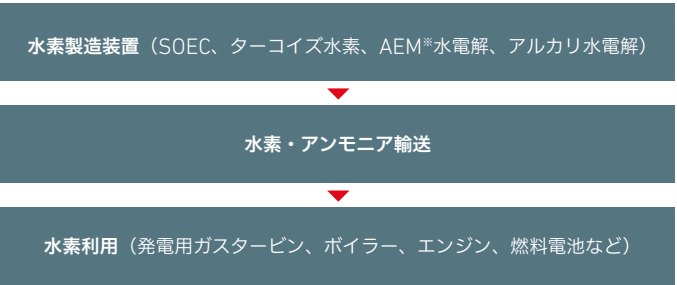
CO₂エコシステムの実現

脱炭素化が難しい産業分野に対しては、排出されるCO₂を回収することが有効。回収-輸送-貯留-利用まで関わるエコシステムにおいて必要な機器・製品やサービスの提供に取り組む。



※SAF:Sustainable Aviation Fuel

など



※AEM: Anion Exchange Membrane

三菱重工の水素プロジェクト

M701F形ガスタービンの水素焚き転換に向けて

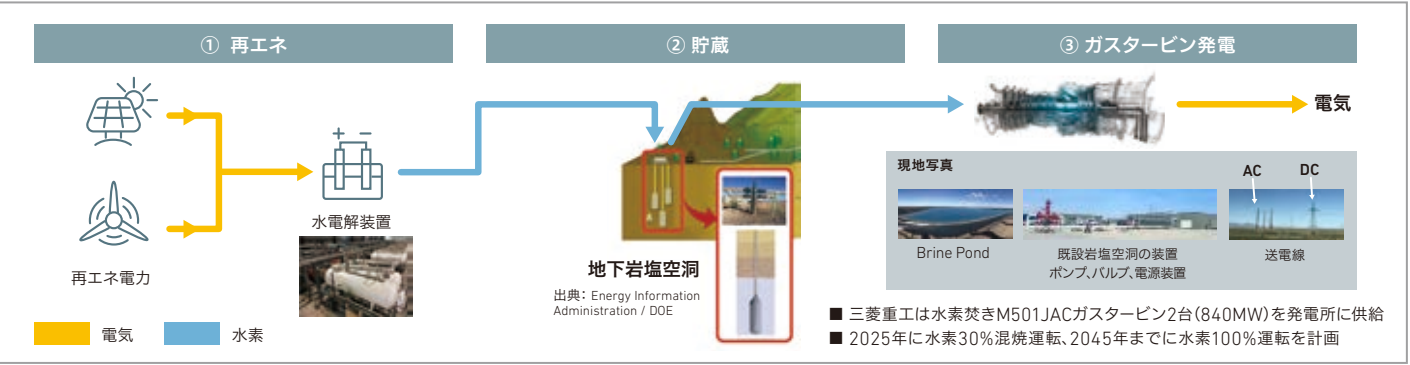
三菱重工は、英国東海岸にあるハンバー川流域の三角州地帯において進行中の同国内最大規模を誇る産業クラスター(Humber Cluster)の脱炭素化事業計画に参画している。このプロジェクトは、ノルウェーに本拠を置く大手エネルギー企業エクイノール社(Equinor ASA)など、グローバルに事業を展開する脱炭素化関連産業の14企業・機関が、「ゼロ・カーボン・ハンバー・パートナーシップ (Zero Carbon Humber Partnership:ZCH)」のもとに連携。天然ガスから製造した水素の活用やCO₂の回収・除去技術を駆使することにより、2040年までに同産業クラスターにおけるCO₂排出実質ゼロ達成を目指すものだ。このなかで三菱重工は、北部の



ゼロ・カーボン・ハンバー・パートナーシップ (Zero Carbon Humber Partnership:ZCH)
出典: Zero Carbon Humber WEBサイト

岩塩空洞へのグリーン水素貯蔵

三菱重工のグループ会社である三菱パワーアメリカは、シェブロンU.S.A.社傘下のマグナムデベロップメント社と共同で、米国ユタ州でAdvanced Clean Energy Storageプロジェクトを推進している。風力や太陽光などの再生可能エネルギーで水の電気分解を行い、製造されたグリーン水素を、各5,500トン以上の水素貯蔵量を有する2つの巨大な岩塩空洞に貯蔵。それを発電所などに供給するというものだ。2022年6月、米国エネルギー省より融資保証の供与を受け、世界最大のグリーン水素プロジェクトは実行段階に入り、2025年の運転開始に向けて、現地工事が佳境を迎えている。



産業クラスター、ソルトエンド (Saltend Chemicals Park)にある天然ガス焚き120万kW級GTCC発電所で稼働している、三菱重工製M701F形ガスタービン3基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 (事業化調査、FS)を手掛けていく。このプロジェクト参画を三菱重工グループの戦略的事業であるエナジートランジションにおける弾みとして、火力発電事業者の水素利活用に向けた需要を喚起していく。また、これらの技術と密接に連携しながら、水素の供給・輸送・貯蔵に関する国際的な水素バリューチェーン構築にも関わることで、脱炭素社会の実現に貢献する。



ソルトエンドGTCC発電所

三菱重工は、世界最先端の水素燃焼技術を有している。その水素ガスタービンは、既存の発電所設備に対して、最小限の改造で適用が可能となる。燃焼試験では、2018年には既に水素30%混焼を達成しており、2025年頃に水素100%専焼を目指している。温暖化ガスの問題が指摘されるようになって久しいが、いよいよその出口が近づいてきた。世界全体をサステナブルな社会へと変革するためには、大型水素発電は欠かすことはできない。技術開発も着々と進展している。大きな障壁であるグリーン水素の大量製造および調達コストも、やがて下げることができるだろう。三菱重工は、カーボンフリーな水素社会の実現のために、あらゆる角度から技術を提供できる企業として、世界中の期待を背負い、その使命を果たしていく。

三菱重工の脱炭素化技術開発の拠点とその取り組み

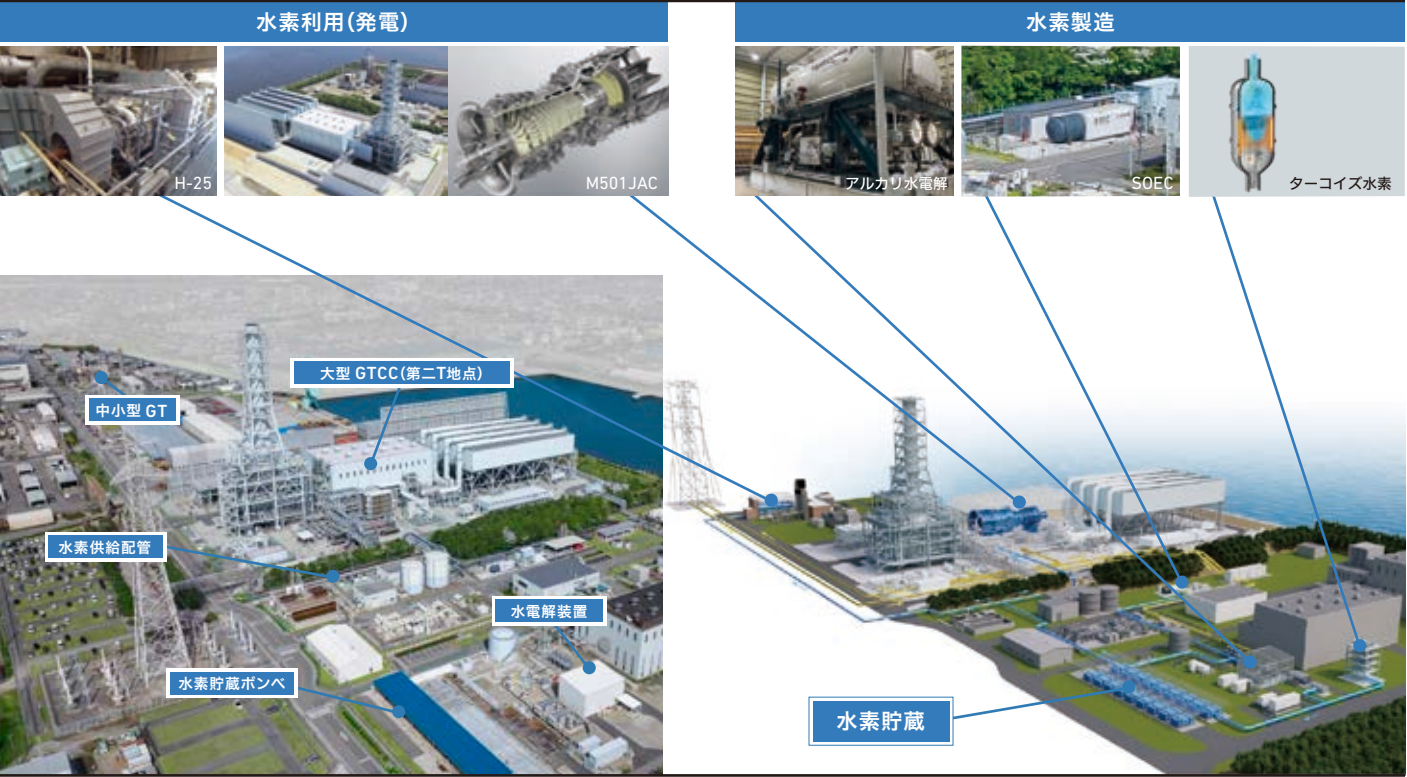
世界初の水素製造・発電実証設備「高砂水素パーク」において
高温水蒸気電解(SOEC)のデモ機が稼働開始

三菱重工は、水素ガスタービンの早期商用化に向け、水素の製造から発電まで世界で初めて一貫して技術検証できる「高砂水素パーク」(兵庫県高砂市)を2023年に本格稼働させた。技術検証を通して製品の信頼性向上を図るとともに、水素発電・製造技術の社会実装に貢献することが主眼。水電解装置による水素製造に加え、今後は次世代水素製造技術の導入を順次拡充し、ガスタービン実機での水素混焼・専焼(100%水素)の実証を行う。同パーク内は水素の製造・貯蔵・利用の3エリアに分かれ、「製造」エリアに、世界最大級の水素製造能力1,100Nm³/hを持つ、ノルウェーのハイドロジェンプロ社製アルカリ水電解装置を設置、稼働を開始した。同設備で製造した水素は、「貯蔵」エリアに設置した総容量3万9,000Nm³の水素貯蔵設備に貯蔵。また、水素燃焼の実機検証は、「利用」エリアにある実証設備複合サイクル発電所(第二T地点)で大型のJAC形ガスタービン(45万kW級)、および燃焼試験設備で圧縮機駆動用に設置された中小型のH-25形ガスタービン(4万kW級)を使って実施される。水素製造では、自社技術により開発を進めている高温水蒸気電解(SOEC)、AEM水電解、メタンを水素と固体炭素に熱分解することでCO₂を出さずに水素を得るターコイズ水素製造技術についても、長崎カーボンニュートラルパークで要素技術を開発した上で、統合的に実際の運転条件で長期実証を順次行う。高砂水素パークは、「作る」「貯める」「使う」バリューチェーンを構築して、水素エコシステムを実現する重要な拠点となる。

そしてこの度、同パーク内で、次世代の高効率水素製造技術であるSOECのデモ機の運転を開始した。SOECは、三菱重工が既に開発・製品化した固体酸化物形燃料電池(SOFC: Solid Oxide Fuel Cell)の技術を応用したもので、高効率であるという利点に加え、三菱重工独自の円筒形セルにより高圧化を可能にする技術として開発を推進。今回稼働したデモ機は、長崎カーボンニュートラルパークでの要素技術開発を経て、SOFCに採用していた技術に基づき設計・製作した400kW級のもので、高砂水素パークに設置し、運転を開始した。その成果を、さらなる高出力・大容量化につなげていく。また、本SOECデモ機は、約500本のセルを組み合わせたカートリッジを複数台搭載したモジュールで構成。デモ運転においてモジュールの電解効率は3.5kWh/Nm³(101%-HHV:高位発熱量換算)となり、高効率での運転を確認できた。これは、三菱重工が目指すシステム効率90%-HHV超実現に向けての大きな前進といえる。

高砂水素パークでは今後も、水素「製造」エリアでAEM水電解、ターコイズ水素といった特性の異なる水素製造装置の製品化に向けた実証を進めていく計画である。また、「利用」エリアに設置した第二T地点のJAC形ガスタービンを用いた水素50%混合燃料での実証運転に向け、「貯蔵」エリアにおいて水素貯蔵設備の総容量を現在の約3倍となる11万7,000Nm³まで拡張するなど、さらなる設備の拡充を図っていく。

HYDROGEN PARK TAKASAGO



高砂水素パークの発電・水素製造実証設備の紹介

【水素ガスタービン】燃焼器のコントロールが鍵を握る

三菱重工はこれまで数十年天然ガスを燃料にガスタービンを作ってきた知見があるが、水素は天然ガスとは全く特性の違う燃料であり、極めて燃えやすい特徴を持つため、これまでとは異なる発想で燃焼器を作る必要がある。頻出する課題に対し、さまざまな部門の関係者が集まって徹底的に議論を重ね、期待に応えるべく、基本に忠実に商用化を目指している。



【アルカリ水電解装置】日本の様式に合わせて調整

高砂水素パークに設置したアルカリ水電解装置はノルウェーのハイドロジェンプロ社製の世界最大クラスの5MW級のもので、運転にあたっては同社と調整を進めて水素の製造・供給にこぎつけた。同型機が適用される米国ユタ州のAdvanced Clean Energy Storageプロジェクトの成功に向け、長期信頼性検証を進めるとともに、水素製造のノウハウの蓄積とさらなる改善に取り組んでいる。



【SOEC】将来的には水蒸気を熱回収で作る高効率なシステムへ

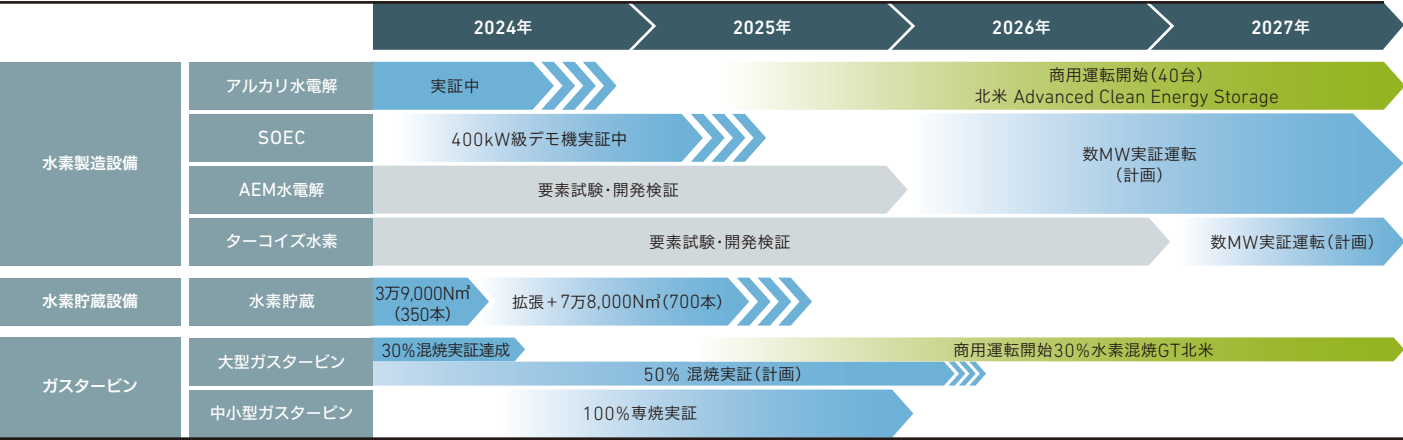
従来の燃料電池の技術・設備を最大限に活用し、400kW級SOECデモ機の設計を最短で進めて試運転を完了、運用を開始した。現在は機器単体での実証であるが、将来的には原料の水蒸気を熱回収で作るなど高効率なシステムとして運用し、水素ガスタービンの燃料の一部として水素製造する計画である。



高砂水素パークの水素製造設備は、社内外から大きな注目を集めている。三菱重工には長崎造船所や高砂製作所に限らず、さまざまな技術を持つ多くの社員がおり、部門間の垣根を越えて技術の開発・

実証を進めている。関係者間の連携を密にし、チーム一丸となって水素製造技術を確立して、来るべき水素社会に貢献する。

高砂水素パーク実証スケジュール



「長崎カーボンニュートラルパーク」において
エネルギー脱炭素化のキーテクノロジーの開発が加速

三菱重工は、エネルギー脱炭素化に関する技術開発の中心拠点として「長崎カーボンニュートラルパーク」を長崎市内に整備し、2023年に運用開始。研究開発・設計・製造部門が一体となって、製品技術の実用化に向けて取り組んでいる。なかでも総合研究所長崎地区は当拠点の象徴ともいうべき研究施設で、水素製造、バイオマス合成燃料製造、CO₂回収に関する要素技術開発をはじめとする研究開発が行われている。水素製造は、次世代の水素製造技術であるSOEC、ターコイズ水素、AEM水電解の開発を進めており、また、火力発電

の脱炭素化に向けたアンモニア燃焼技術の開発にも取り組んでいる。さらに、長崎造船所においては、設計・製造を担う長崎工場と、製造を担う香焼工場で培った各種熱エネルギー機器の設計・製造の機能を活用しながら、製品化や事業化に向けた研究開発を加速させていく。こうして、長崎カーボンニュートラルパークでキーテクノロジーを開発した後、水素製造・発電実証設備である「高砂水素パーク」で水素製造実証運転、水素ガスタービンと連携した発電実証を実施する。

CARBON NEUTRAL PARK NAGASAKI



長崎カーボンニュートラルパークでの取り組み

■ 水素製造技術

SOEC



ターコイズ水素



AEM水電解



原料	水蒸気	天然ガス	水
製法	電気分解	メタン熱分解	電気分解 + 膜処理
進捗状況	実証中	開発中	開発中
特徴	電力の消費量が少ない	既存の天然ガスインフラを活用	装置の低コスト化・小型化が可能

■ 燃焼技術・ガス化技術

アンモニア燃焼

バイオマスガス化・燃焼

一般的な水素製造方法の紹介

原料	作り方	CO ₂ 排出	三菱重工関連技術
水	電気分解 水 アルカリ水電解(AEL) プロトン交換膜水電解(PEM) アニオン交換膜水電解(AEM)	無し※1	 AEM水電解  SOEC  アルカリ水電解 (HydrogenPro社)
	水蒸気 高温水蒸気電解(SOEC)		
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) 熱分解(メタン熱分解)	有り※2 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 脱水素反応	無し※1	アンモニア(NH₃)  アンモニアクラッキング
	アンモニア クラッキング		
	液体水素 クロード法		
副生ガス	水+塩 ソーダ電解	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: 電源、熱源による ※2: 脱炭素にはCCS必要 ※3: 熱源による ※4: CCSすると、ネガティブ

三菱重工の水素製造技術・燃焼技術の紹介

【SOEC】世界に先駆けて効率的に水素を製造

SOECは開発・製品化済のSOFCの技術を応用したもので、他の電気分解方法と比べて、より効率的に大容量の水素を作ることが可能。セル単体での要素試験において水素製造量や耐久性が優れていることを確認し、三菱重工独自技術の円筒形セルスタックを数百本束ねたカートリッジを複数搭載した400kW級デモ機の運転に成功

した。スチームパワー発電における高温高圧の蒸気・ガスのハンドリング技術と組み合わせ、世界トップレベルの大きさと性能を兼ね備える三菱重工のSOECの開発を推進し、今後高砂水素パークでの実証を経て、世界に先駆けて商用化を目指す。

【ターコイズ水素】メタンを熱分解して水素と固体炭素を生成

メタン(CH₄)が主成分の天然ガスを、三菱重工のボイラーで培った流動床技術を活用し約800℃で反応させる。既存の天然ガス発電設備の近くに本プロセスを追設し、ガスタービンの燃焼器を水素用に交換することで、水素供給インフラが整っていない地域でも水素

発電が可能となる。現在は長崎カーボンニュートラルパークで得られた知見を基に、高砂水素パークに建設予定の実証ユニットの設計に注力。2027年の実証運転、そして大規模水素製造に向けて着実に進めていく。

【AEM水電解】小型・低コストに優れた次世代の水電解技術

AEM水電解は、固体高分子電解質膜を使った電解技術による水素製造技術で、従来のアルカリ水電解と同様の安価セル部材でありながら、PEM※水電解と同等の低消費電力が可能。加えて高電流密度運転が可能で、電解槽の小型化と低コスト化が可能となる。また、出力

変動や起動停止が頻繁な再生可能エネルギーとの親和性にも優れる。現在、大型スタックに向けて、積層体のシール性、流量分配等を考慮した多積層化の開発を実施。2026年にMW級で実証試験を行い、2030年以降の実用化を目指す。 ※PEM: Proton Exchange Membrane

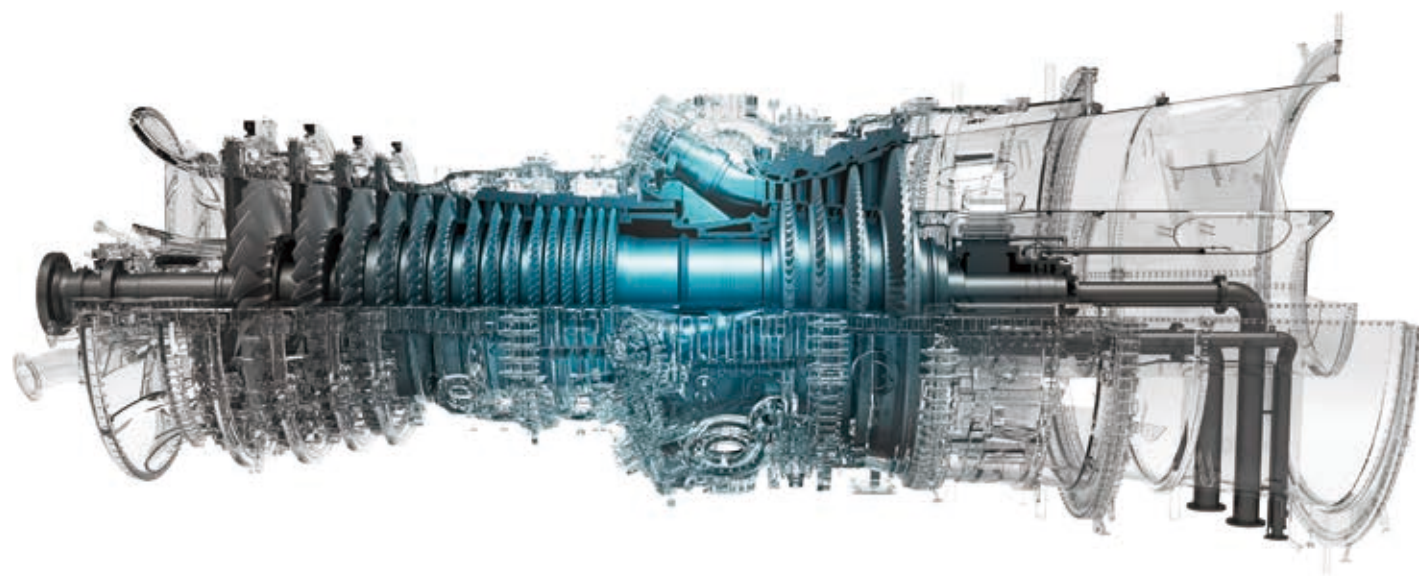
【アンモニアバーナー】研究所と工場が一体となって開発を推進

三菱重工では、火力発電の脱炭素化に向けたアンモニア燃焼技術の開発にも取り組んでいる。ボイラーで50%以上の燃料をアンモニアに転換すべく、アンモニアバーナーの開発を推進。燃焼速度が遅く、火災の保持が難しい点や適切な燃料濃度でないと多量の窒素酸化物(NO_x)を排出してしまうアンモニア特有の課題を、実機スケールでの燃焼

試験で克服。既存プラントからのCO₂排出をいち早く削減するとともに、東南アジアをはじめ再生可能エネルギー資源に恵まれず、石炭焚きを当面の主要電源とせざるを得ない国のエナジートランジションへの現実的施策として提供していく。

水素ガスタービン

30%混焼技術の実証運転成功



水素エネルギーへの期待と技術

旺盛なエネルギー需要と世界的な脱炭素化という、アンビバレントに挑む

「電力は産業の要。需要があれば供給するのが電力会社であり、電気を作るために必要となるのが発電設備である。一方、CO₂を排出する発電に対する社会の目は年々厳しくなっている。電力は欲しい、しかしCO₂は出したくない。ならば、CO₂ゼロの火力発電に挑戦するのが、技術者の使命」

こう語るのは、三菱重工 エナジードメイン GTCC事業部 ガスタービン技術部 技監・技師長、谷村聡。燃焼時にCO₂を排出しない、水素を燃料としたガスタービン開発の先頭に立つ人物だ。

日本の一次エネルギーの主な変換先は電力で、実に全体の約47%を占める。そして、発電の燃料別電力量割合は、天然ガス33.8%、石油等

8.2%、石炭30.8%と火力発電が72.8%を占めている。(2022年度現在)。
出典:https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2024/pdf/2_1.pdf

エネルギーの選択肢が着実に増えるなかで、今なお、その多くを担っているのが火力発電だ。

「従来から化石燃料を使用する火力発電は、技術革新による高効率化などによってCO₂削減の努力を続けてきました。最新のGTCCのCO₂排出量は、石炭火力の半分以下。しかしガス火力もCO₂を排出していることには変わりはない。その事実から目を背けることはできないのです。技術者だからこそ、世界の課題、そして期待には敏感です。旺盛なエネルギー需要とCO₂削減。このアンビバレントで高い要求に、技術者は応えなければならない」

水素社会実現への確かなロードマップ

「私たちが取り組んでいるのが、水素ガスタービンの開発です」
谷村が注力するのは、火力発電でありながら発電時にCO₂を排出しない水素発電。

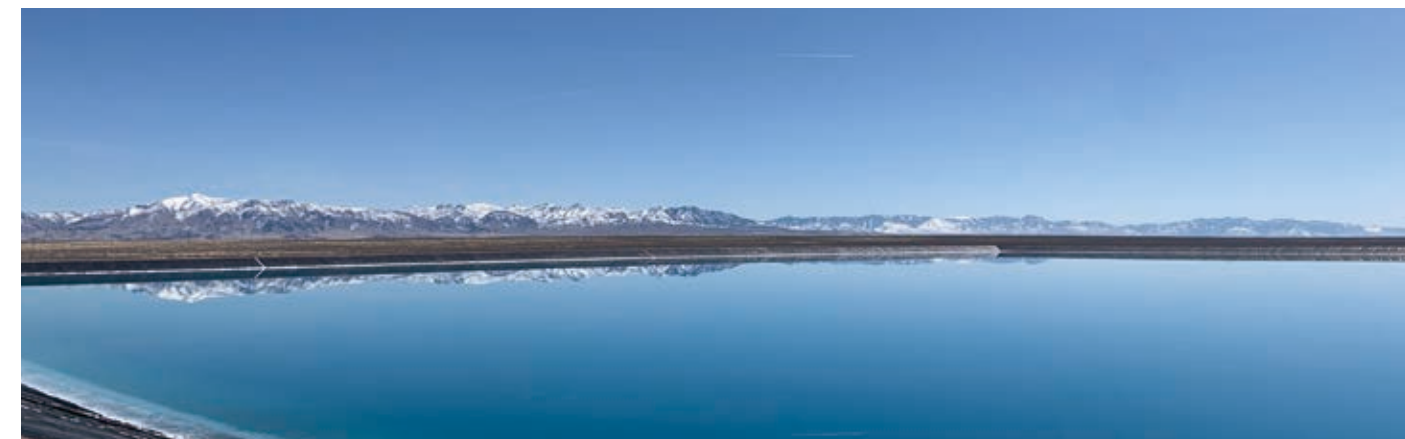
日本の水素基本戦略では、2030年に向けて水素発電の実現を目指すことが掲げられている。
だが、この先の約6年で、水素発電の実現は可能であろうか。技術開発に成功しても、発電所のリニューアルを実施できる事業者がどれだけ存在するのか。また、燃料となる大量の水素はどうやって確保するのか。

これに対して谷村は、「リニューアルの予定があるところから水素発電設備を入れたとしても、たったの6年では、水素発電への転換は進まない。そこでわれわれは、既存のガスタービン設備を使って水素発電ができるシステムを考えたのです」と答える。

谷村らは、ガス火力の燃料である天然ガスに水素30%を混ぜ安定的に使用することができるガスタービン用燃焼器を開発。水素の燃焼により懸念されるNO_xの排出も、既存のガス火力レベルに抑制。84万kW相当の出力に対応できる技術で、従来のGTCCと比較し、発電時のCO₂排出を約12%削減できる見通しである。

この技術は、燃焼器以外の発電設備の大規模なリニューアルを必要としない。水素転換へのコストのハードルを下げ、水素社会へのスムーズなシフトを促すという戦略である。

しかし、既存の設備に水素を混ぜることは簡単なことなのだろうか？ 混合、燃焼、水素の性質と挙動。それらに起因する天然ガスとは異なる条件があるはずだ。谷村が実現した水素混焼技術とはどのようなものなのだろうか。技術的ブレークスルーは？ そしてその次の一手は？ ここで、谷村の、水素との戦いの軌跡を紹介する。

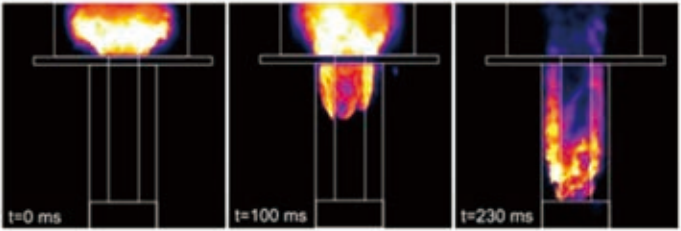


水素30%混焼の商用化が、水素社会への大きな扉を開く

燃えやすい水素との戦い

水素は燃えるときに出るのは水だけ、というクリーンなエネルギー。だが、クリーンであるという利点とは裏腹に、扱いにくい物質でもある。激しく燃えることから、爆発のイメージがつきまとう。燃焼性が高く静電気程度のエネルギーが加わると着火する、燃焼範囲も広い。燃焼性が高い水素ならではの難しさがあるというわけだ。そのため、水素30%混焼を実現するためには、技術者は多くの課題をクリアしなければならない。

逆火。燃焼振動。そして、NOx。これらが、水素30%混焼実現に立ちはだかる壁である。水素の特性と、水素と空気の混合に由来する、「逆火」。逆火とは、燃焼器内の火炎が、投入される燃料を伝って逆戻りしてしまう現象のことである。水素は速く燃えるため、逆火が起こりやすい。燃焼器以外の場所で燃料が燃えることは絶対に避けなければならない。逆火を防止できなければ、水素ガスタービンの成功はない。



出典:University of Michigan at the 2014 University Turbine Systems Research Workshop

燃焼器を破壊する燃焼振動を制御する驚くべき技術

燃焼器内は1,650℃の高温になるが、非常に高い熱負荷を与えられた燃焼器の筒は、自身が持つ特定の音響固有値によって非常に大きい音を発することが分かっている。これが燃焼振動という現象である。

音の振動が燃焼により生じる火炎の振動と一致すると、増幅して非常に大きな力が発生する。特に短い区間で燃焼する水素では、炎と振動が一致しやすくなり、燃焼振動を起こしやすい。かなりの音なのだろうか？「『うるさい』なんてものではない。ひとたび燃焼振動が起こったら、燃焼器が一気に破壊されます」ごう音とともに燃焼器を破壊する、燃焼振動。「これを避けるため、

優れた物質であっても、それをコントロールし、設備には耐久性を持たせ、品質の高い成果を継続的に得ることができなければ、それは技術とは言えない。その課題を解決するのが技術者である。三菱重工は高砂水素パーク内に立地する第二T地点(定格出力:56.6万kW)で、タービン入口温度1,650℃級の最新鋭JAC形ガスタービンを使い、部分負荷および100%負荷において、都市ガスに水素を30%※混ぜた混合燃料による実証運転に成功。試験に用いられた水素は高砂水素パーク内のアルカリ水電解設備で製造されたもので、同一敷地内で製造・貯蔵された大量の水素を使用した、地域の電力網に接続された状態での水素30%混合燃料による大型ガスタービンの発電実証運転は、世界初(2023年11月時点)となる。そして、水素50%混合燃料による燃焼器単体での燃焼試験にも既に成功しており、ガスタービン実機での実証に向けて燃焼器の開発に挑んでいる。水素30%混焼運転から、さらに水素50%混焼運転の実現へ。社会実装への期待がまた一つ大きく高まっていく。

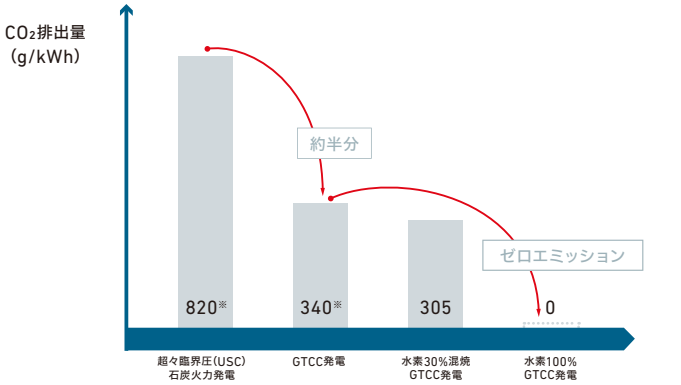
※:水素混合比率は体積比で表示

100%水素燃料による発電、水素専焼ガスタービンを実現する

夢のCO₂フリー火力発電—水素100%

1kWhの電気を発電したときのCO₂排出量を示す排出原単位は次のような値である。

一般的な石炭火力発電: 863g-CO₂ /kWh
超々臨界圧(USC)石炭火力発電: 820g-CO₂ /kWh
GTCC発電: 340g-CO₂ /kWh
水素30%混焼ガスタービン: 305g-CO₂ /kWh
そして、ゼロへ。



※出典:経済産業省WEBサイト
(https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11402477/www.meti.go.jp/committe%20e/kenkyukai/energy_environment/jisedai_karyoku/pdf/001_01_00.pdf)

水素燃焼技術の開発状況

水素30%混焼ガスタービン開発に成功した今、谷村が挑むのは、燃焼時にCO₂を排出しない火力発電、水素100%専焼技術だ。

だが、水素が高濃度になれば、逆火の危険度は高まる。さらにNOxも増えてしまう。水素専焼向け燃焼器は、水素と空気を効率よく混ぜ、安定的に燃焼させる技術が不可欠となる。

「水素と空気の混合にも、重要な条件があります」と谷村の語りにも熱がこもる。「水素、空気は広い空間では混ぜりにくい。旋回流を使ってよく混ぜようとすると、比較的大きな空間を要するのです。このことが、逆火の危険度を高めてしまう。短い時間で混合するためには、できるだけ狭い空間で混ぜなければなりません。しかしそれでも

また、燃料の吹き出し口と、火炎の距離がより近くなり、逆火が起こりやすくなってしまいます。さて、どうするか。そこで考えたのが、火炎を分散し、より細かく、小さく燃料を吹き出す方法です。

そのカギとなる技術が、燃料供給ノズルです。通常8本のところを、より数多くのノズルのついたマルチクラスター燃焼器を改良設計。1本のノズルの孔を小さくし、空気を送るとともに、そこに水素を吹いて混合するという方法を採用しました。この方法だと旋回流を利用しないため、より小さなスケールで混合でき、低NOx燃焼も実現できます」まさに優秀だが扱いにくい水素。ノズルの改良による混合方式に関する発想の転換。厳しい条件と戦う技術者の現場である。

水素ガスタービン燃焼器 開発状況

	燃焼方式	低NO _x 技術	性能	水素含有量	開発・運用状況
Type 1	拡散燃焼	N ₂ 希釈 水/水蒸気添加	燃焼温度 1200℃～1400℃級	100%	開発完了
Type 2	予混合燃焼	ドライ式 低NO _x	燃焼温度 1650℃級	30%	開発完了
				50%	2022年燃焼試験成功
Type 3	マルチクラスター	ドライ式 低NO _x	燃焼温度 1650℃級	100%	2025年以降 開発完了予定

水素燃料供給とサプライチェーンの構築 — そして未来へ向けて

水素100%専焼技術を実現するために求められるのは、ガスタービンだけではなく。水素の供給源の吟味、パイプラインを持たない日本への運搬の方法、原料物質から水素を取り出す技術の開発、その際に出るCO₂を回収・貯留する技術。水素ネットワーク、電力ネットワーク。水素燃焼技術とともに水素インフラの成熟が待たれる。

「ガスタービンの効率を上げたからといって、全体の効率がよくなるわけではありません」と谷村は水素活用の全体像を見据える。「国内では、海外で生産した水素を運び、燃料電池車や産業に利用することが想定されています。一方、海外では製造時のCO₂をCCSによって処理するシステムなど、水素供給の段階から、利用までの青写真が示されています。欧州は、既存の天然ガスパイプラインが発達しているというアドバンテージもあり、供給までを視野に入れた総合インフラとして、水素活用を進めています」ガスタービンを開発する技術者だからこそ、包括的な水素利用プランの必要性をビビッドに捉えている。「パイプラインが発達していないわが国においては、水素運搬は大きな課題であることは間違いありません。再生可能エネルギーや石油、天然ガスから水素を取り出す構想があります。不安定とされる再生可能エネルギーを水素に変換しておけば、エネルギーの貯蔵・運搬ができるというメリットも大きい。今のところ、液体水素、メチ

ルシクロヘキサン(MCH)またはアンモニア(NH₃)の形で運ぶことが有力視されていますが、需要をさらに増やすことで、運搬のスケールメリットも出てくるはず。三菱重工は、燃料としてアンモニアを100%直接利用する4万kW級ガスタービンスистেমの開発にも着手し、2025年以降の実機運転、商用化に向けて検証中です」

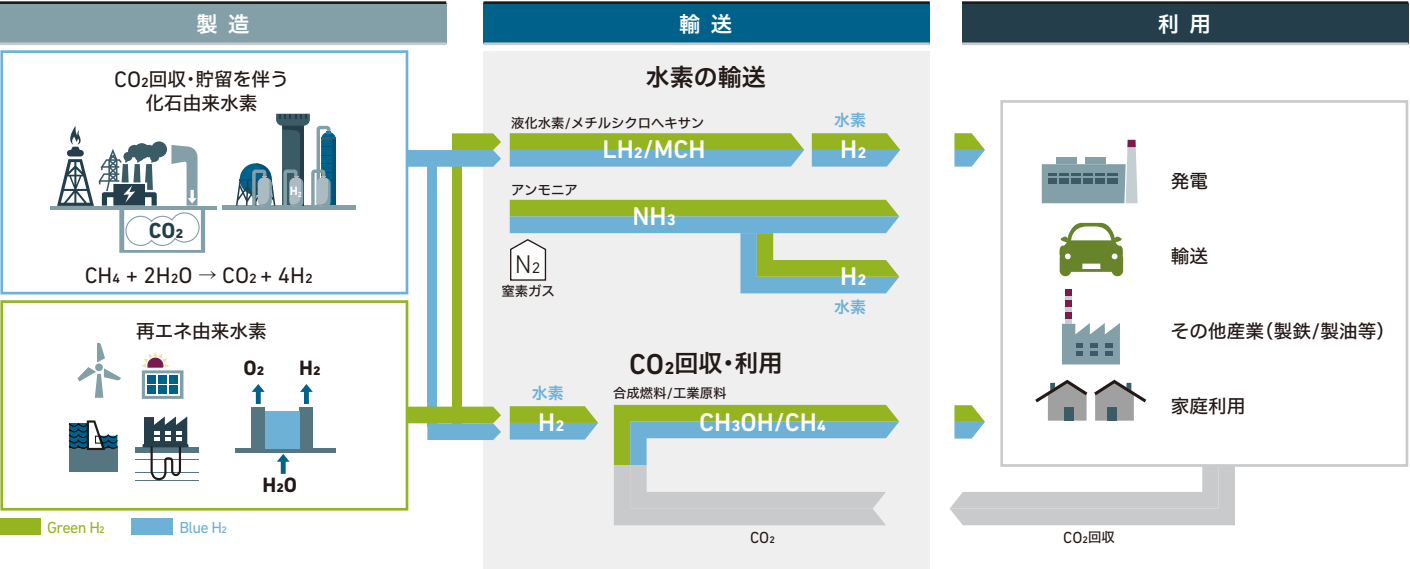
ガスタービンの技術者は水素製造から消費までを見据える。「インフラ整備、多様な利用方法を含んだ水素利用ビジョンが必要です。例えば、技術的改良の必要がない水素20%混焼、出力50万kW、効率60%のガスタービンで使用される水素の量は、1.4t /hです。これは、燃料電池車10～13万台の水素使用量にあたる数字。水素利用を本気で進めるのであれば、水素を使用するタービンを積極的に増やすなど、スピード感を持って水素インフラを拡充させることが絶対に必要。そのためには、水素ガスタービンは、来る水素社会を牽引するはず」

人類が「火」を手にし、意識的に使用してから既に50万年の時を経た。ついに、CO₂フリーの燃焼を手に入れ、カーボンニュートラル社会を支えるエネルギーに目途が立ちつつある。

2025年 水素100%専焼技術 完成へ—————。



世界の水素サプライチェーン例



三菱重工業株式会社
エナジードメイン
GTCC事業部 ガスタービン技術部

技監・技師長 谷村 聡

1986年三菱重工業入社。
ガスタービン技術部に所属し、以降大型ガスタービン燃焼器の開発とともに技術者人生を歩む。
1300℃級ガスタービン燃焼器の開発をはじめ、1500℃級、1600℃級、1650℃級という高火炎温度燃焼器の低NO_x化技術開発におけるキーパーソンとして全体を取りまとめる。
基礎設計から、現地での燃焼調整までガスタービン燃焼器開発に関わる全分野に精通する燃焼器のエキスパート。

TECHNICAL REVIEW

技術論文



三菱重工は、高効率な発電技術の開発をしている。その開発の1つである最新鋭のガスタービン発電技術において、水素「混焼」は既に可能となり、さらに次のステップを目指している。また、電力市場のニーズは多様化しており、エナジートランジションに貢献する技術開発を進めている。ここからは、燃料として直接燃焼できるアンモニア焼きガスタービン、水素製造技術およびその開発・実証設備、水素製造技術の特徴や開発状況について三菱重工技報を通して紹介する。

■ カーボンニュートラルの達成に向けた水素・アンモニア焼きガスタービンの取組み

カーボンニュートラルの早期達成に向けて取り組み続ける水素・アンモニア焼きガスタービン燃焼器・燃焼技術の開発状況と、今後の実証スケジュール。

■ 脱炭素社会の達成を目指す“高砂水素パーク”“長崎カーボンニュートラルパーク”の取組み

2023年より部分運用を開始した高砂水素パークでの水素焼きガスタービンの開発状況と、長崎カーボンニュートラルパークで進める水素製造を含む脱炭素技術の取組み。

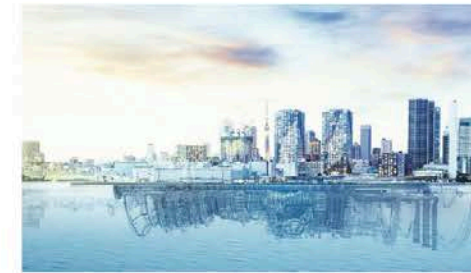
■ 脱炭素社会の達成を目指す水素製造技術の開発

三菱重工が開発に取り組む水素製造装置であるSOEC、AEM水電解、ターコイズ水素(メタン熱分解)に焦点を当て、技術の特徴や開発状況を紹介。

出典:三菱重工技報
著者所属名は作成時のものです

カーボンニュートラルの達成に向けた 水素・アンモニア焼きガスタービンの取組み

Hydrogen/Ammonia-fired Gas Turbine Initiatives for Carbon Neutrality



江川 拓*1
Taku Egawa

長橋 裕明*1
Hiroaki Nagahashi

林 明典*2
Akinori Hayashi

福場 信一*3
Shinichi Fukuba

佐藤 賢治*4
Kenji Sato

中村 聡介*5
Sosuke Nakamura

三菱重工業株式会社(以下、当社)は、2050 年カーボンニュートラルに向けてカーボンフリー発電システムのラインアップの拡充を進めている。水素利用のガスタービンは、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、水素 100%専焼(ドライ)の燃焼器についても燃焼試験を実施して実用化へ向けた開発を進めている。さらにアンモニア利用のガスタービンでは、中小型ガスタービンにてアンモニア 100%専焼の燃焼システムを鋭意開発中である。今後 2025 年にかけて、これら発電システムの実機実証試験を順次実施し、早期の実用化を目指す。

1. はじめに

世界では二酸化炭素(CO₂)の排出量を 2050 年前後にネットゼロにする共通目標が共有されつつあり、各国が高い目標を掲げるだけでなく、目標達成に向けた実行段階に入っている。日本では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、第6次エネルギー基本計画の中で 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⁾。

当社は、“MISSION NET ZERO”を宣言し、カーボンニュートラルの達成に向け、エナジートランジションと、社会インフラのスマート化の両面において脱炭素化を推進している。図1に示すようにエナジートランジションにおける脱炭素化では、火力発電で排出される CO₂を“減らす”・“回収する”・“出さない”取組みを進めている。即ち、①石炭火力から低炭素・高効率であるガス火力(ガスタービン複合発電(以下、GTCC:Gas Turbine Combined Cycle))への置換え、ならびにガスタービンでの水素混焼、石炭火力でのアンモニア、バイオマス混焼を進めて CO₂を減らす。②GTCCと CO₂回収装置を備えた発電所の全体最適化による、CO₂の回収・貯留・有効利用(CCUS: Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage)を進める。そして、③CO₂を排出しない水素(H₂)専焼やアンモニア(NH₃)専焼へのガスタービン導入燃料への転換を進める。これまで、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)のご支援のもと、大型ガスタービンにおいて燃料の天然ガスに水素を 30vol%混ぜて使用する水素混焼燃焼器の開発、及び、水素専焼(ドライ)燃焼器の開発を進めてきている。さらにアンモニア利用 GTCC システムの開発にも着手して、表1に示すカーボンフリーガスタービンシステムのラインアップを拡充してきている。これら発電システムにて 2030 年のエナジートランジションによる脱炭素化を目指している。

*1 エナジードメイン GTCC 事業部 ガスタービン技術部

*2 エナジードメイン GTCC 事業部 ガスタービン技術部 主席技師

*3 総合研究所 燃焼研究部

*4 エナジードメイン GTCC 事業部 ガスタービン技術部 グループ長

*5 エナジードメイン GTCC 事業部 ガスタービン技術部 次長

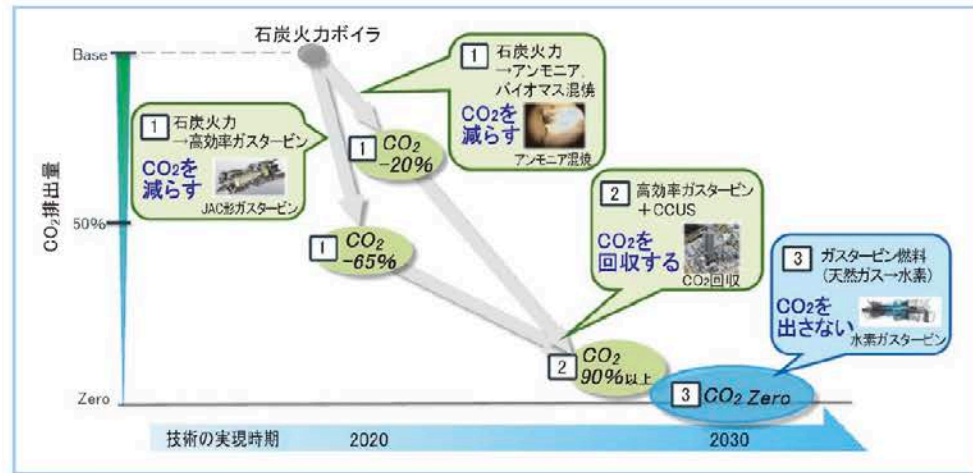


図1 火力発電インフラの脱炭素化に向けた当社の取組み

表1 当社のカーボンフリーガスタービンシステムのラインアップ

機器	概要	適用時期
水素ガスタービン	30%混焼 天然ガス・低NOx燃焼器に30vol%の水素混合天然ガスを供給するもの。既設ガスタービンをそのまま、あるいは最小の改造で適用可能。	2018年 開発完了
	専焼 マルチクラスタ燃焼器による水素専焼燃焼器を開発中。	開発完了予定 大型機:2025年 小型機:2023年
アンモニア分解 GTCC	ガスタービンの排熱を利用しアンモニアをH ₂ +N ₂ に分解し、それをガスタービンの燃料とする。 天然ガスとアンモニア分解ガス(H ₂ +N ₂)の混焼、アンモニア分解ガスの専焼に対応し、排ガス温度の高い大型機に向く。	開発中
アンモニア直接燃焼 GTCC	分解装置が不要でありシステムが簡素になる。 アンモニア燃焼に伴うNOxの発生量が多く、専用燃焼器の開発が必要。また、排ガス脱硝装置も必須となる。	2024年に開発を完了し、実証を目指す。

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。大容量・高効率の水素焚きのガスタービンには、水素の製造から輸送・貯蔵・利用も含めたバリューチェーンにおいて、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でき投資コストを抑制できること、②出力50万kWクラスの大規模水素焚きガスタービン（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水素コスト低減が期待されること、③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可能なこと、④再生可能エネルギー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、電力需要と再生可能エネルギーのギャップを柔軟に埋めることが可能なこと、といったカーボンニュートラル社会の達成に向けて大きなメリットがある。

一方、水素の大量輸送・貯蔵には課題があり、エネルギーの大部分を輸入に頼る日本で水素社会を実現するためには、アンモニア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、既存の運搬・貯蔵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、GTCC 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。

本報では、これらカーボンニュートラル達成に向けた当社取組みの中で、水素・アンモニア焚き

ガスタービンに焦点をあて、主な開発項目となるガスタービン燃焼器、燃焼技術の開発状況と、今後の検証スケジュールについて紹介する。

2. 水素・アンモニア焚きガスタービンの開発状況

2.1 水素燃焼・アンモニア燃焼の課題

天然ガス焚きガスタービンから水素・アンモニア焚きガスタービンへの改造は、燃焼器、燃料供給システムの追加で対応可能であり、本体は流用できるため改造範囲が最小限にとどまることが特徴である。従って、水素・アンモニア焚きガスタービンの開発におけるキーポイントは、ガスタービン燃焼器、燃焼技術の開発である。

図2に当社ガスタービン用燃焼器に採用される燃焼方式と特徴を示す。拡散燃焼方式は、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（NOx）排出量が増えるため、蒸気・水噴射による NOx 低減対策が必要になる。一方、比較的、安定燃焼範囲が広く、燃料性状変動への許容範囲は大きい。

予混合燃焼方式は、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 NOx 低減手法を用いる必要が無く、サイクル効率の低下もない。低 NOx 化と CO₂ 削減（高効率）を両立できるため、燃焼器開発のベースとなる。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。

形式	拡散燃焼方式	予混合燃焼方式
構造		
燃焼特性	・燃料と燃焼用空気を別々に噴射 ・高温スポットが生じやすい（NOx高） ・火炎が安定	・燃料は空気と混合され噴射 ・高温スポットが生じにくい（NOx低） ・火炎が不安定：燃焼振動、フラッシュバックリスク
特徴	・燃料性状変動への許容範囲が大きい ・燃料系統が簡素 ・NOx対策（蒸気/水噴射）による性能低下	・CO ₂ 削減（高効率）と低NOx化を両立 ・燃料系統が複雑
燃焼器		マルチノズル燃焼器 マルチクラスタ燃焼器

図2 拡散燃焼方式と予混合燃焼方式

ガスタービン燃料として主に使用される天然ガス（主成分：メタン（CH₄））と、水素、アンモニアの低位発熱量、燃焼速度の比較を図3に示す。水素は、メタンに比べて発熱量、燃焼速度ともに高く、燃焼速度は約7倍である。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火炎位置が上流に移動し、空気と十分に混合する前に高い火炎温度で燃焼するため、NOxが増加する。また火炎が燃焼器の上流に遡上し当該部が焼損する逆火（フラッシュバック）の発生リスクが高くなる。そのため、水素焚きガスタービン燃焼器は、逆火発生の防止に向けた改良を中心に、低 NOx 化や安定燃焼化を図る必要がある。

一方、アンモニアはメタンに比べて発熱量が 1/3、燃焼速度が 1/5 程度と低いいため燃焼が不安定になりやすく、火炎を安定に保持することが課題となる。また、表2に示すようにアンモニアは窒素分（N）を含んでいるため、燃焼の過程で大量の Fuel NOx が生成される。これは、天然ガス等の燃焼時に生成されるサーマル NOx と比較して桁違いに多い。NOx の発生メカニズムが異なるため、これまでの NOx 低減手法とは異なるアプローチが必要となる。

これら異なる特徴を有する水素、アンモニア燃料に対応する当社ガスタービン燃焼器および燃

焼技術の開発状況について、次節に紹介する。

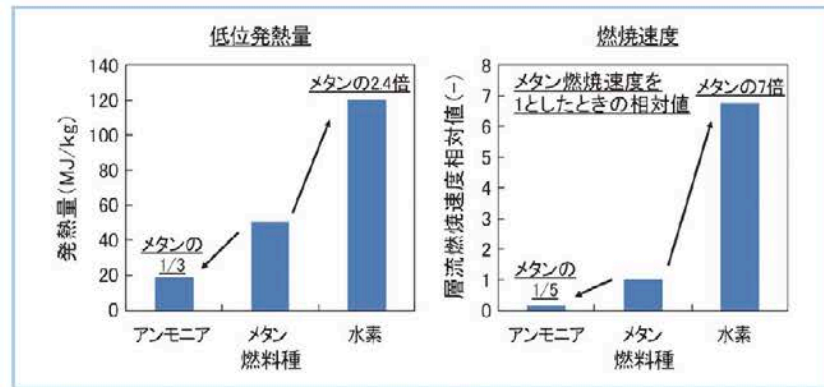


図3 メタン、水素、アンモニアの低位発熱量、燃焼速度の比較

表2 NOx 発生メカニズム

燃料	NOx 発生メカニズム	NOx 発生量 (未対策時)
通常燃料 (LNG 等)	高温燃焼場にて空気中の窒素が酸化反応することで窒素酸化物が生成 (Thermal-NOx) $N_2(\text{空気}) + O_2 \rightarrow NOx$ ※NOx 発生要因は N_2 の熱分解	数百 ppm オーダー
アンモニア (NH_3)	燃料の酸化反応により窒素酸化物が生成 (Fuel-NOx) $NH_3(\text{燃料}) + O_2 \rightarrow N_2 + H_2O + NOx$ ※NOx 発生要因は燃料の化学反応	数千 ppm オーダー

2.2 水素焚き燃焼器の開発

(1) 水素混焼用 Dry Low NOx (DLN) マルチノズル燃焼器

水素混焼による逆火発生リスクの上昇を防ぐことを目的として、従来の DLN マルチノズル燃焼器をベースとして、新たに開発された水素混焼燃焼器の概要を図4に示す。マルチノズルタイプの予混合燃焼器は、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。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。

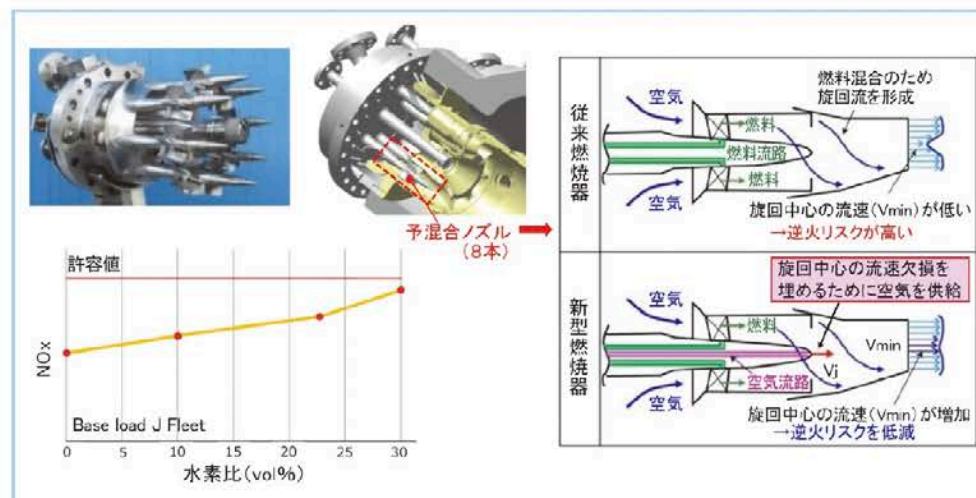


図4 水素混焼燃焼器と水素 30vol%混焼試験時の NOx

この燃焼器1本を使用して、タービン入口温度 1600℃級の大型ガスタービン相当の運転条件(圧力、温度)で、燃焼試験(以下、実圧試験)を実施した(図4左下)。定格負荷にて水素 30vol%まで天然ガスに混ぜて燃焼させても課題である逆火の発生はなかった。燃焼振動の著しい上昇も無く安定に燃焼し、また NOx 排出量も許容値以下であり、実機運用が可能である目途が得られた。

さらに、水素混焼率を増加させるための施策の一つとして図5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%を投入する方式の検討を進めている。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ことが可能になる。また、拡散燃焼部分での NOx 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。実圧試験では、この方式にて NOx が許容値以下で運用可能な範囲内であり、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が確認された。水素混焼率を増加させる施策は今後も引き続き検討が必要であり、実機検証に向けて開発を進める。

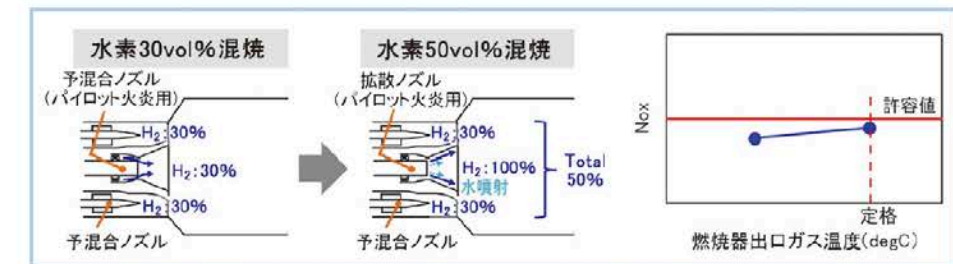


図5 水素混焼率を増加させるための施策と、水素 50vol%混焼時の NOx

(2) 水素専焼用マルチクラスター燃焼器

水素が更に高濃度になると、逆火発生リスクは更に高くなる。前項のマルチノズルにおける旋回流を用いた比較的低流速かつ大きな空間で空気と水素の混合させる方式と較べて、より高流速で小さなスケールで空気と水素を混合させる方が混合距離の短縮が可能であり、逆火への耐性が高いと考えられる。図6に、現在開発中の水素専焼用マルチクラスター燃焼器を示す。燃焼器に多数の孔(予混合管)が設けられており、そこで空気と燃料が急速混合される。また、火炎が多数に分散されることで NOx 低減が図られる。

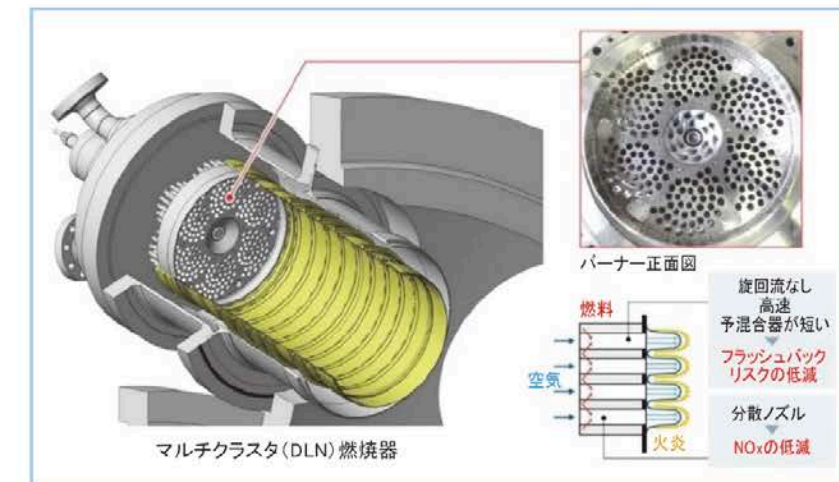


図6 水素専焼用マルチクラスター燃焼器

上述の燃焼コンセプト、ならびに燃焼性を確認する目的のため、マルチクラスターノズルの一部分を取り出した試験用モデルバーナにて実機相当圧力の燃焼試験を実施した。図7に燃焼試験装置と燃焼時の火炎の画像を示す。水素火炎は人間の目に見える可視領域の発光が殆ど無く、紫外領域に特有の発光が見られる。紫外光を映した画像では、バーナの単孔ノズル出口から少し離れた位置に火炎が均一に安定して存在する。試験では計画された条件にてフラッシュバックの発生が無く、安定燃焼することが確認された。

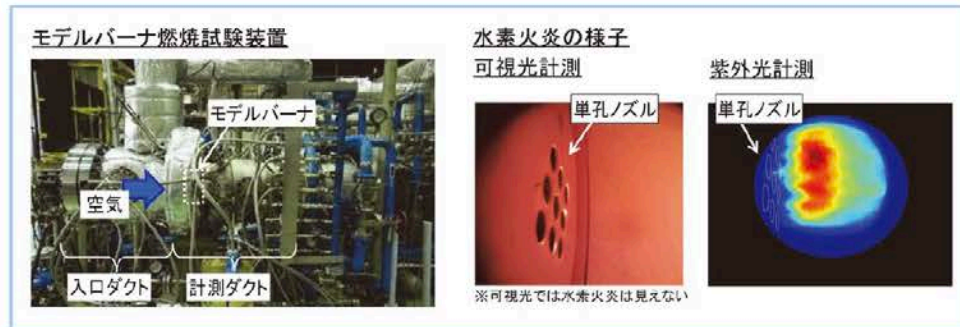


図7 マルチクラスター燃焼器のモデルバーナ燃焼試験装置と水素火炎の様子

さらに、中小型 H-25 ガスタービン向けに、開発中の水素専用マルチクラスター燃焼器1本を用いたフルスケールの実圧試験を実施し、水素専焼で実機運転を模擬した温度・流量条件のもと負荷を上昇させたところ、逆火の発生や、燃焼振動レベルの急激な上昇も無く、実機定格負荷相当の燃焼温度に到達した。図8に負荷上昇時の NOx 計測値を示す。引き続き、更なる NOx 低減を図りつつ実機検証に向けて開発を進める。

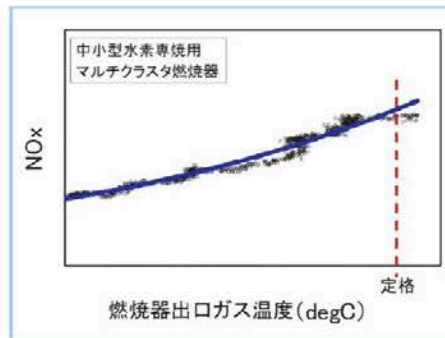


図8 水素専焼時の NOx

これら得られた知見は、大型ガスタービン向けマルチクラスター燃焼器にも展開中であり、現在、実機検証に向けてフルスケール燃焼器1本を用いた実圧燃焼試験を実施している。試験は、水素混焼の試験と同様に図9に示す当社高砂工場の実圧燃焼試験設備で実施する。水素専焼の試験では、大容量の水素燃料が必要であり、同工場内の高砂水素パーク(後述)に新たに設置された水素貯蔵設備から供給を受ける。また、実圧燃焼試験では、燃焼試験用空気を空気圧縮機から供給しており、その駆動源として中小型 H-25 ガスタービンを使用している。中小型ガスタービンの水素専焼実証時には、本機が試験機として使用される。

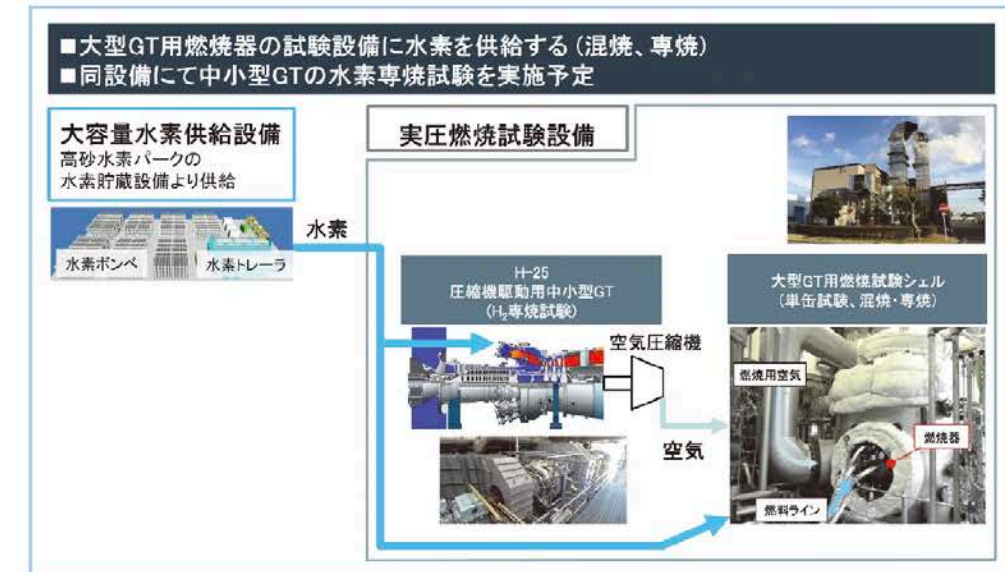


図9 水素専焼試験が実施される実圧燃焼試験設備

2.3 アンモニア焼き燃焼システムの開発状況

アンモニアをガスタービン燃料として燃焼させる際は、先述 2.1 節のとおり、燃焼器内で火炎を安定保炎させること、Fuel NOx(アンモニア燃料中の窒素が酸化して発生する NOx)の排出量をコントロールすることが課題となる。そこで当社では、アンモニアを利用する GTCC システムとして、図 10 に示す2つの方式を検討している。

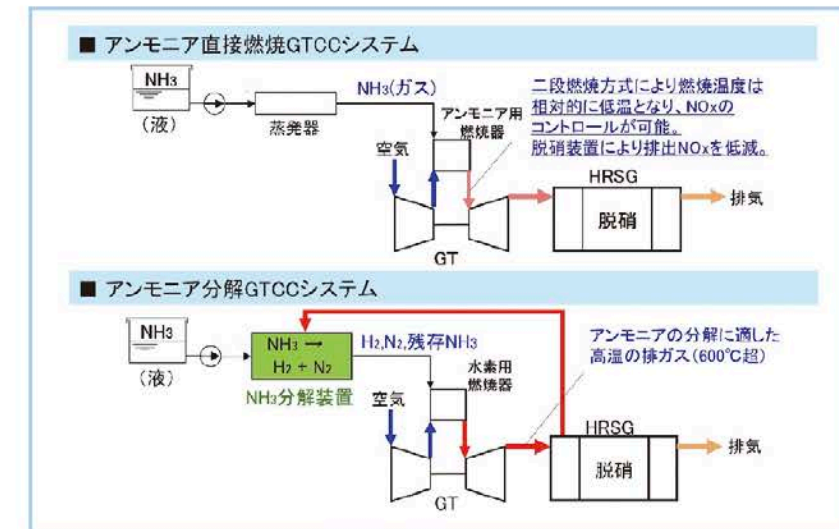


図 10 アンモニア焼き燃焼システム

(1) アンモニア直接燃焼 GTCC システム

NOx 排出量を低減するアンモニア用燃焼器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であり、燃焼器は、図 11 に示す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。図 12 にはアンモニア燃焼時の Fuel NOx の排出特性イメージを示す。当量比 $\phi = 1$ (化学量論: アンモニアと空気が過不足なく完全燃焼する) に近い領域で Fuel NOx 発生量のピークがあるが、リッチ・リーン二段燃焼方式では、燃焼器の上流域で燃料アンモニアと空気(一次燃焼空気)を当量比 $\phi = 1$ 以上の燃料過濃の状態(Rich Zone)で燃焼させた後、二次燃焼空気との混合により希薄燃焼の状態(Lean Zone)に移行させて NOx の発生を抑える。

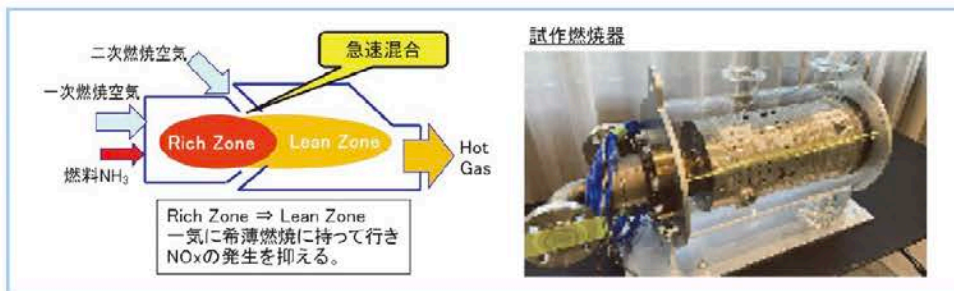


図 11 アンモニア二段燃焼方式の燃焼器

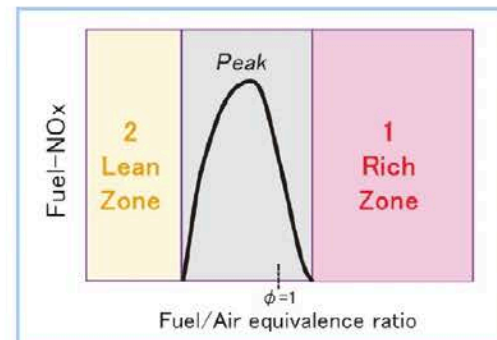


図 12 アンモニア燃焼時の Fuel NOx 排出特性

本システムの開発は、中小型H-25形ガスタービンを対象にしたものから進められる。当社総合研究所長崎地区に設置されたアンモニアの燃焼試験設備にて、フルスケールの試作燃焼器(1本)の大気圧燃焼試験を実施し、保安性、NOx 排出量、炭化水素燃料からアンモニア燃料切替え時の特性などが確認される。図 13 に炭化水素燃料とアンモニア燃料燃焼時の燃焼器内の可視化画像を示す。炭化水素燃焼時の青色炎に対して、アンモニア燃焼特有のオレンジ色の炎が観察される。今後は、高圧のアンモニア供給設備を有する当社日立工場(勝田)の実圧燃焼試験設備にて、実機圧力相当の燃焼試験を実施し、2025 年以降の実機運転、商用化を目指し、開発を進める。

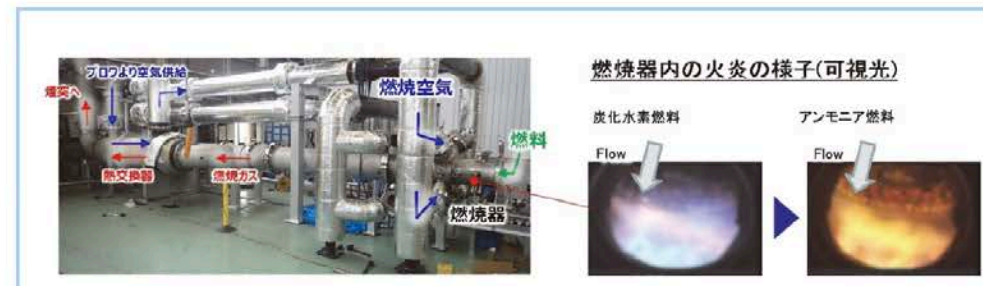


図 13 アンモニア大気圧燃焼試験装置と燃焼器内の火炎の様子

(2) アンモニア分解 GTCC システム

アンモニア分解 GTCC は、ガスタービンから排出される高温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水素混焼用燃焼器(2.2 節(1))、又は、開発中の水素専焼燃焼器(2.2 節(2))により燃焼させるシステムである。本システムの主要機器であるアンモニア分解装置は、水素キャリアとして輸送されたアンモニアから水素を取り出して他の水素利用設備や機器に供給するシステムとしての利用も考えられ、実用化に向けて、発電システムとの熱の授受やシステム全体の運用性と合わせて引き続き検討が進められる。

3. 実証スケジュール

水素・アンモニア焚きガスタービンの早期商用化に向けて、今後は実機ガスタービンを用いた実証が進められる。当社は自社設備での実証を通じて製品の信頼性を向上させるため、高砂工場に水素製造から発電までの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”(図 14)を整備し、2023 年から順次運用を開始している。



図 14 高砂水素パーク

図 15 に実機検証スケジュールをガスタービンから排出される CO₂ の削減スケジュールとともに示す。これまで大型ガスタービン向けに開発した水素混焼用マルチノズル燃焼器を用いた燃焼器一缶試験では水素混焼(～50vol%)運転を確認しており、欧州の CO₂ 排出規制(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’ という審査基準⁽²⁾)の達成目途を得ている。2023 年より高砂水素パーク内の水素供給設備を利用して水素混焼の実機検証を行い、製品化に向けて信頼性を確認する。また、マルチクラスター燃焼器を用いた中小型ガスタービン水素専焼の実機検証も行う。試験機として図9に記載した実圧試験設備の H-25 ガスタービンを使用する。2025 年には、後述の米国プロジェクトを含めた水素混焼(30vol%)の実用化を開始し、更に大型ガスタービンは 2030 年の水素専焼の実証を目指す。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。

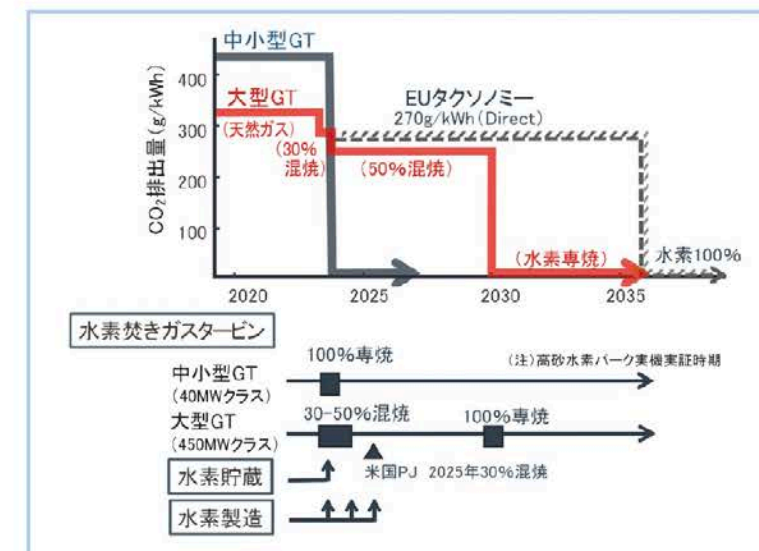


図 15 実機検証スケジュール

4. 海外での水素・アンモニア焼きガスタービンプロジェクト

前章の実機検証スケジュールと並行し、当社は国内外の水素・アンモニア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。以下にその一例を紹介する。

4.1 米国ユタ州の Advanced Clean Energy Storage プロジェクト

アメリカ西海岸の豊富な再生電力からグリーン水素を製造し、地下岩塩空洞にそのグリーン水素を貯蔵、電力必要時にグリーン水素を取り出してガスタービンで発電する。電力は、カリフォルニア州、及びユタ州に幅広く供給され、この地域における中長期間の電力需給安定化を図る。当社は84万kW級のM501JAC形ガスタービン2基を中核とするGTCC発電設備を受注し、2025年に30vol%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。30vol%水素混焼による発電で最大で年間460万トンのCO₂排出量削減に寄与できる見込みである。

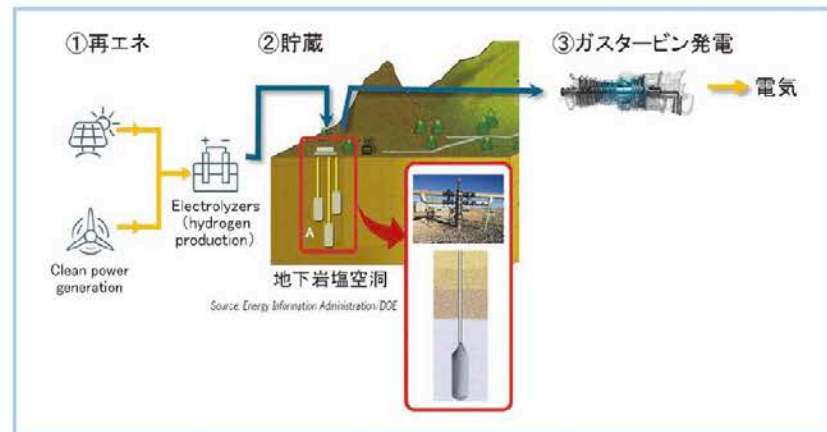


図16 米国ユタ州の Advanced Clean Energy Storage プロジェクト

4.2 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

既設ガスタービン発電プラントにおける水素混焼の実証プロジェクトとして、当社グループは、2022年に米国電力会社ジョージア・パワー（Georgia Power）及び電力研究所（The Electric Power Research Institute:EPRI）とともに、図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形天然ガス焼きガスタービン（燃焼器はDLNマルチノズル燃焼器）を使い、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⁽³⁾。高効率・大型GTCC発電設備では、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である。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。全負荷領域で水素混合比率20vol%の運転を達成し、天然ガスの運転と同じNO_xレベルを維持できること、また、水素混焼により部分負荷で発生する一酸化炭素（CO）の排出量が低減され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）下げる効果が確認された。

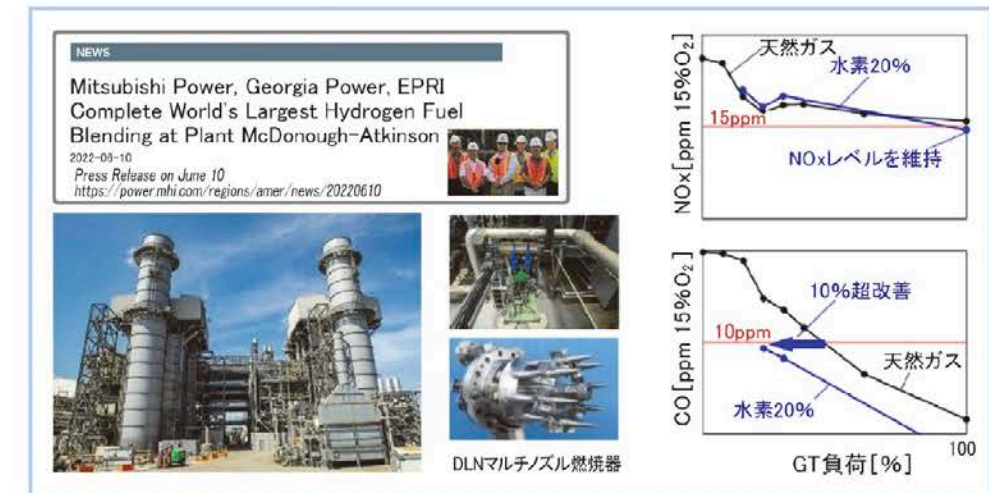


図17 米国マクドノフ・アトキンソン発電所と水素混合燃料による燃焼実証試験結果

4.3 アンモニア焼きガスタービンの実装計画

既設火力発電所にアンモニアを導入する計画が各国で進められている。石炭焼きボイラでの混焼利用計画が先行しているが、GTCCについても事業化調査（Feasibility Study:FS）が実施されるなどアンモニア焼きガスタービンのニーズは世界各国で高まっており、当社も参画している。

5. まとめ

本報では、当社がカーボンニュートラルの達成に向けて取り組み中の水素・アンモニア焼きガスタービンに焦点をあて、主な開発項目となるガスタービン燃焼器の開発状況と、今後の検証スケジュールについて紹介した。

水素・天然ガス混焼方式では一缶燃焼試験にて、水素30～50vol%の混焼条件において運転が可能な目途を得ており、今後の開発は実用化に向けた実機検証の段階に進む。水素専焼方式についても、まず中小型ガスタービンから実機検証を開始する。また、アンモニアを利用したガスタービンシステムについても引き続き実用化に向けた開発を進め、これらカーボンフリー発電システムのラインアップを拡充して2030年のエナジートランジションによる脱炭素化を目指す。

当社はCO₂削減に貢献できる水素・アンモニア焼きGTCCの開発・実用化を通して世界中のパートナーと協調し、カーボンニュートラルの早期達成に向けて今後も取り組みを続ける。

（謝辞）

本報の第2章2.2節に記載された水素混焼燃焼器、水素専焼燃焼器の内容は、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）の成果の一部です。また、2.3節に記載したアンモニア分解GTCCシステムの開発は、NEDOの助成事業（水素社会構築技術開発事業：JPNP14026）により進められました。ここに記して謝意を表します。

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
- (2) EU taxonomy: Complementary Climate Delegated Act to accelerate decarbonisation
https://finance.ec.europa.eu/publications/eu-taxonomy-complementary-climate-delegated-act-accelerate-decarbonisation_en
- (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>

脱炭素社会の達成を目指す“高砂水素パーク” “長崎カーボンニュートラルパーク”の取組み “Takasago Hydrogen Park” & “Nagasaki Carbon Neutral Park” Initiative to Create Decarbonized World



正田 淳一郎*¹ Junichiro Masada
寺内 方志*² Masashi Terauchi
石井 弘実*³ Hiromi Ishii
堂本 和宏*⁴ Kazuhiro Domoto
中馬 康晴*⁵ Yasuharu Chuman
小阪 健一郎*⁶ Kenichiro Kosaka

エナジートランジションがグローバルに加速する中で、三菱重工業株式会社(以下、当社)の主力製品であるガスタービンコンバインドサイクル(GTCC:Gas Turbine Combined Cycle)・汽力発電のカーボンニュートラルへの対応も急務とされている。これら火力発電における脱炭素化技術のキー技術開発は、当社の工場と研究所がある高砂地区と長崎地区で進めており、高砂地区の高砂水素パークでは、要素技術を統合的に実際の運転条件で長期実証していく環境を整備している。一方で、要素技術開発の要衝である長崎地区は長崎カーボンニュートラルパークと称しており、開発中の水素製造技術を含む技術開発の概要とともに本報にて紹介する。

1. はじめに

地球温暖化問題解決は現在人類の重要な課題であり、2020年10月、政府は2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、“カーボンニュートラル”を目指すことを宣言した。“排出を全体としてゼロ”とは、二酸化炭素(CO₂)をはじめとする温室効果ガスの“(人為的な)排出量”から、植林、森林管理などによる“(人為的な)吸収量”を差し引いて、合計を実質的にゼロにすることを意味する。このカーボンニュートラルの達成のためには、再生可能エネルギーの大幅な普及拡大が不可欠である。また、それと並行して、経済性やエネルギーの安定供給を維持することもまた重要である。当社は、既存の火力発電設備のエナジートランジションを進めることにより、社会コストを最小化しながら、現実的かつスピーディにカーボンニュートラル社会を達成することを目指している。

太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーはカーボンニュートラル社会の達成に大きく貢献するものであるが、天候に左右されやすいという特性から、出力の変動が大きく刻々と変化する需要への対応に難がある。このため再生可能エネルギーの変動を吸収し需要変動にも対応する手段として、火力発電の中でCO₂排出量が最も少ない天然ガス焼きGTCCは、柔軟性や信頼性も高く、今後も重要な電力供給源としての役割を果たすことが期待されている。さらに、天然ガス燃料にCO₂を排出しない水素を混合、更には水素やアンモニア燃料に代替えることにより、系統の安定化とともに、安定化のために運転される火力発電からのCO₂排出量も大幅に減少することができる。図1に水素・アンモニア利用の背景を示す。世界的には太陽光発電・風力発電に代表される再生エネルギーの普及が進んでいる。これらの電源は時間・天候・季節による変動が大きく、利用拡大には蓄エネルギー技術の導入が必要である。図1左は蓄エネルギー技術の年間の放電回数と放電時間で得失を示したものである。短時間ではリチウム電池が有利である

*1 エナジードメイン 副ドメイン長
*3 エナジードメイン SPMI 事業部 計画部 部長
*5 総合研究所 主幹研究員

*2 エナジードメイン GTCC 事業部 水素技術推進室 室長
*4 エナジードメイン SPMI 事業部 技術部 主幹技師
*6 エナジードメイン 技術戦略室 技監・主幹技師 工博

が、数日・数十回/年の蓄電に対しては水素など化学エネルギーへの変換が有利である。図1右は再生可能エネルギー賦存の地域性を示したものである。世界の多くの地域では再生可能エネルギーの普及が進み、再生可能エネルギーの余剰電力による水電解により製造される水素の普及が進むと予想される。一方で、日本・韓国等の再生可能エネルギー資源に恵まれない地域では、輸送効率が高いアンモニア利用の普及とともに、既存LNGインフラを活かしたメタンの水素と固体炭素への熱分解による水素製造であるターコイズ水素の期待が高い。また東南アジアなど安価な化石燃料資源に頼らざるを得ない地域でもCCUS(Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage)に必要なコスト等の課題からターコイズ水素への期待が大きくなっており、各ニーズに沿った脱炭素技術の実証・社会実装が急がれる。

本報では、高砂水素パークで進める水素焼きガスタービンの開発状況を概観するとともに、長崎カーボンニュートラルパークで進めている、これらの水素製造を含む、脱炭素技術の開発状況について述べる。

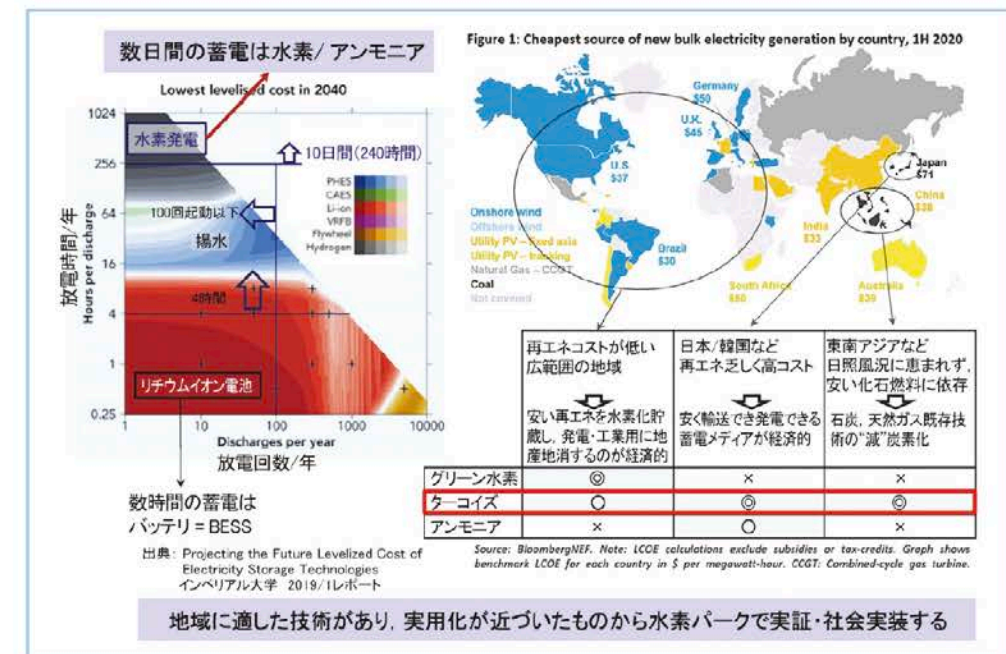


図1 水素・アンモニア利用の背景

2. 三菱重工のゼロエミッション発電 ロードマップ

三菱重工グループでは、“MISSION NET ZERO”を宣言し、当社が2040年までにカーボンニュートラルを達成することで、お客様が2050年までに目指すCarbon Neutrality化を実現可能な製品、技術を提供する。主な取組みとして、エナジートランジションによる事業・製品の低・脱炭素化を図り、加えてCO₂回収事業を含めたCCUS事業の拡大を進める目論みである。本報ではこれらのうち、発電事業者及び産業用向けの取組みについて述べる。

エナジードメインは、具体的には2040年のカーボンニュートラルに向けた“火力発電のエナジートランジション”“産業用エナジーの効率的な活用”“水素バリューチェーンの構築”に取り組んでいる。この中でも、非化石燃料への転換による火力発電におけるカーボンニュートラルの推進は極めて重要である。図2に発電技術開発のロードマップを示す。

火力発電は大きく分けて汽力発電とGTCCに分けることができる。汽力発電の主流であるボイラ・タービンからなる石炭焼き火力発電では、技術が確立済みのバイオマス高混焼化によるCO₂削減が進行中である。続いて現在急速に開発・実証が進展しているアンモニアの混焼化・混

燃率の引き上げにより更なる CO₂ 排出量の削減を目指す。また、石炭焚き火力発電所を高効率 GTCC に置き換えることで、約 65% の CO₂ 排出量の低減が可能である。これらの火力発電は更なる CO₂ 排出量の削減が求められており、水素やアンモニアの混焼によって CO₂ 排出量の低減を行ってゆく。また CO₂ の回収により 90% レベルの低減を、更には水素やアンモニアなど専焼により CO₂ ゼロを目指す。

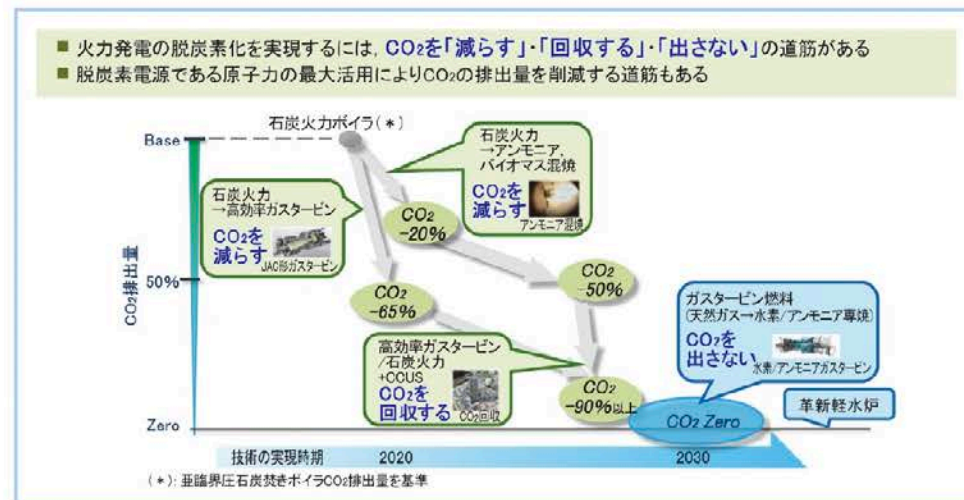


図2 発電技術開発ロードマップ

3. 水素燃焼ガスタービンの開発状況

当社の主力製品であるガスタービンは、世界で最も厳しい欧州の CO₂ 排出基準に適合するように、開発を進めている。図3に欧州の CO₂ 排出基準とガスタービン開発スケジュールを示す。図3左は水素焚きのガスタービンの開発状況である。大型ガスタービンでは、2025 年の混焼での商用化に向け、従来型の燃焼器を使った燃焼試験において、既に 50% の水素混焼条件で安定燃焼を確認している。これは、270g/kWh という EU タクソミーの CO₂ 排出量の基準クリアを達成するものであり、今後は、新型燃焼器の開発を進め 2030 年中の大型ガスタービンでの水素 100% 専焼を目指して開発を進める。

中小型ガスタービンにおいても、水素やアンモニアといった脱炭素燃料へ対応する技術開発を進めており、2022 年に燃焼器単体での水素専焼試験を成功させている。これらの燃焼技術の実証は、実際の発電設備である高砂水素パークにおいて、今年度から開始する予定である。

また、同じく高砂水素パーク内において、アルカリ水電解に加えて、自社開発である SOEC (Solid Oxide Electrolysis Cell, 固体酸化物形電解セル) やメタン熱分解によるターコイズ水素 といった、当社が開発する水素製造技術の実機検証も順次始める予定である。

図4はアンモニア発電技術のロードマップである。アンモニアも水素同様、燃焼時に CO₂ を出さないクリーンな燃料として期待されている燃料である。また、液化に -253℃ までの冷却が必要な液体水素に比べて、アンモニアは -33.4℃ で液体アンモニアとして輸送可能で、輸送・貯蔵に適した水素キャリア・エネルギー源としても期待されている。ガスタービンにおいては 100% 専焼にて、2025 年以降に実証を目指して燃焼器の開発を行っている状況である。ボイラに関しては、2020 年代後半に 50% 以上の混焼の実機実証試験を目指している。

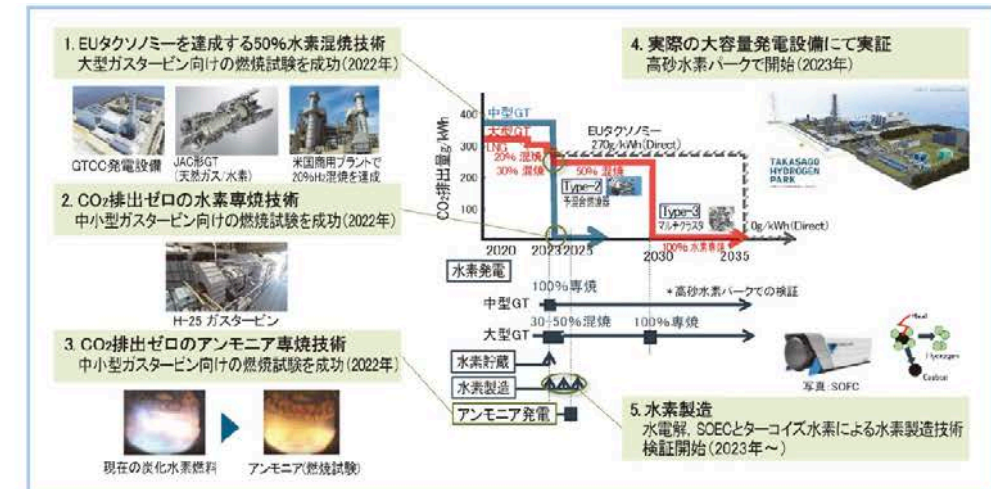


図3 欧州の CO₂ 排出規制とガスタービン開発スケジュール

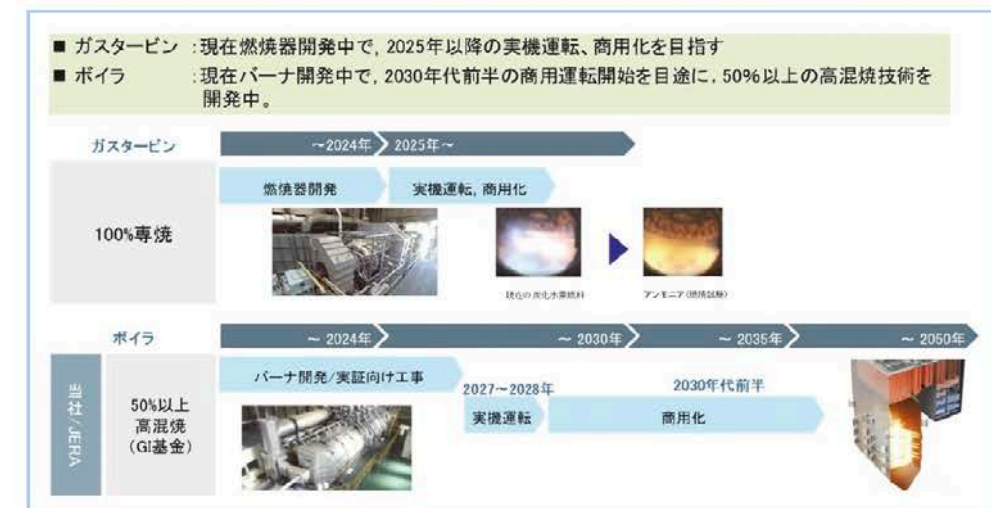


図4 アンモニア発電技術ロードマップ

4. 水素発電の実証“高砂水素パーク”

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”を整備している。2023 年5月現在、高砂水素パークの部分稼働を開始しており、本格稼働に向け準備を進めている。

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ある。図5に高砂水素パーク概要を示す。ガスタービン設備として中小型の H-25 及び大型の M501JAC が稼働済みである。アルカリ電解槽本体の設置が今春完了しており、今後は、SOEC 設備等の設置工事等が始まる。

図6は高砂水素パークの構成図である。再生可能エネルギー電力による水電解・水蒸気電解への適用を期待される電解装置及び、天然ガス(メタン)の熱分解を行うメタン熱分解装置にてそれぞれ製造した電解水素/ターコイズ水素を水素貯蔵設備に貯蓄し、各種実証試験設備で燃料として発電し、グリッドに供給する。水素製造から発電までの一貫実証のみならず、二次電池による電力貯蔵を組み合わせ、電解水素と二次電池による余剰電力貯蔵、高需要期に水素ガスタービンと二次電池からの電力供給を行うことができる、高度なエネルギーマネジメントを一貫実

る岩塩空洞に気体のまま貯蔵する。この水素はパイプラインで発電所に送られ当社が供給する 840MW の水素焚き GTCC 発電所に送気される。この GTCC 発電所は、30%のグリーン水素混焼で 2025 年に運転を開始し、段階的に水素の割合を拡大させ、2045 年までにグリーン水素 100%運転を達成する計画である。

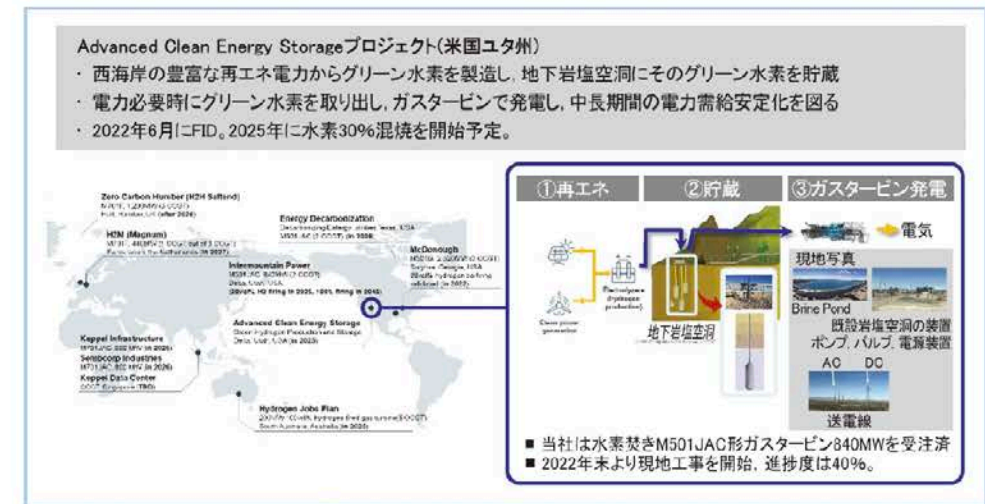


図8 米国における水素貯蔵・ガスタービンプロジェクトの例



図6 高砂水素パーク構成図

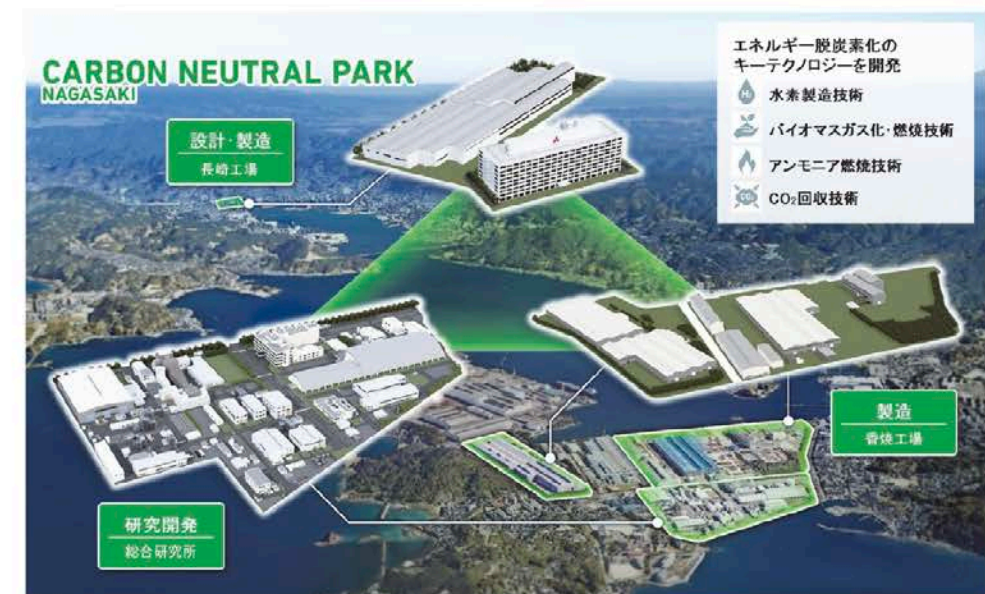


図9 長崎カーボンニュートラルパーク

まず、グリッドからの再エネ電力を使い、水電解でグリーン水素を製造し、その水素は地下にあ



図 10 長崎カーボンニュートラルパークの技術開発拠点(総合研究所長崎地区)

総合研究所長崎地区の研究施設ではターコイズ水素や SOEC, AEM (Anion Exchange Membrane, アニオン交換膜) 等の水素製造技術, ガスタービン・ボイラ・エンジンでのアンモニア燃焼技術, バイオマスからの航空機燃料(SAF: Sustainable Aviation Fuel) 製造等に取り組んでいる。また CO₂ 回収の要素技術開発もこの地区で行われている。

図 11 に水素製造関連評価設備の一例を示す。ここでは, 長期間 SOFC (Solid Oxide Fuel Cell, 固体酸化燃料電池) 等の開発によりメタンや水素を用いた試験環境が整っており, 社会ニーズの急速な高まりに応じて, カーボンニュートラル技術へ設備を展開している。同じく, 従来は天然ガスや石炭が燃焼試験の中心であったが, 安全への配慮を十分に行いつつアンモニア供給設備も追設し, カーボンニュートラルに対応した燃焼試験も可能となっている。



図 11 SOEC・ターコイズ水素評価設備

6. 長崎カーボンニュートラルパークでの要素技術開発

本章では, エナジードメイン関連のカーボンニュートラル技術開発の一部を紹介する。

(1) ターコイズ水素製造技術

ターコイズ水素製造技術はメタン熱分解反応を利用した水素製造技術であり, 天然ガスの主成分であるメタンを高温下で固体の炭素と水素に分解する技術で, 従来は工業用材料であるカーボンブラック等, 炭素素材の製造に使われてきた製法である。当社では同時に生成される水素に注目し, 効率よく水素を生産できる反応形態を見出した。

図 12 にターコイズ水素製造技術の概要を示す。天然ガスのインフラは既に確立されており, 天然ガス焚きの火力発電所が多数建設されている。この天然ガスインフラの供給ラインと火力

発電所等の間, または他の天然ガス発電事業者の発電設備の上流にターコイズ水素プラントを追設し, ガスタービンの燃焼器を水素用に換装するだけで既存火力の大幅な低炭素化, 更には脱炭素化(CO₂ 排出ゼロ発電)が達成可能である。このときの副生カーボン(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る。高砂水素パークでの開発検証に向けて要素試験を進めている。大まかなロードマップを図 12 に示す。

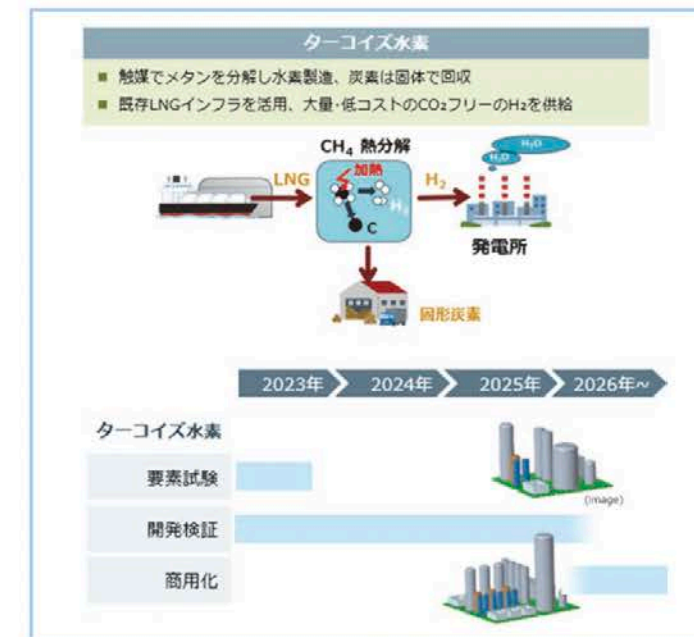


図 12 ターコイズ水素の開発状況

(2) SOEC 水素製造技術

SOEC は, 当社開発済の SOFC の技術の応用が可能であり, 高効率である利点, 当社高压 SOFC の経験を活かして大型プラントに適すると考えている。図 13 に SOEC の開発概要を示す。現在 SOEC に適した運転条件や仕様の適正化を実施している。図示するように 2024 年には数百 kW 級の SOEC モジュールで開発検証を開始する予定である。



図 13 SOEC の開発状況

図 14 に SOEC の開発目論みを示す。当社は逆反応である SOFC セルの開発・量産、更に多数のセルを纏め 200kW 級のモジュールを作り上げた実績がある。これと汽力発電における高温高压の蒸気・ガスのハンドリング技術を組み合わせて、大型 SOEC プラントを目指す。



図 14 SOEC の開発目論み

(3) AEM 水電解水素製造技術

固体高分子電解質膜を使った電解技術では、水素イオン透過膜を用いたプロトン交換膜 (PEM: Proton Exchange Membrane) 水電解技術が主流であるが、多く実装されているアルカリ電解に比べて高電流密度運転が可能で電解槽の小型化が可能。一方、水素イオンが多く含まれる PEM は強酸性であるため、その近傍に配置される触媒やその他接液部に貴金属や Ti 系部材を多用する必要があるほか、供給水の不純物による性能低下を抑制するため金属イオン除去の純度管理が必要である。AEM 水電解は、PEM 水電解と同様な高電流密度運転が可能でありながら、アルカリ水溶液中で電解可能でステンレス等が使用可能なため低コスト化が期待できる。

図 15 に AEM 水電解の開発状況を示す。現在、小型要素セルで特性を把握しながら、電極面積数百 cm² 級のスタック試作を実施、適切な製法の検討・運転条件の最適化などを行っている。小型要素セルの評価結果を示すが、一般的なアルカリ水電解に比べて大幅な電流密度増加が期待できることがわかる。今後は図 16 に示すように、開発を進め、数 MW クラスの高純水素パークでの実証を経て、商用機への展開を目論んでいる。

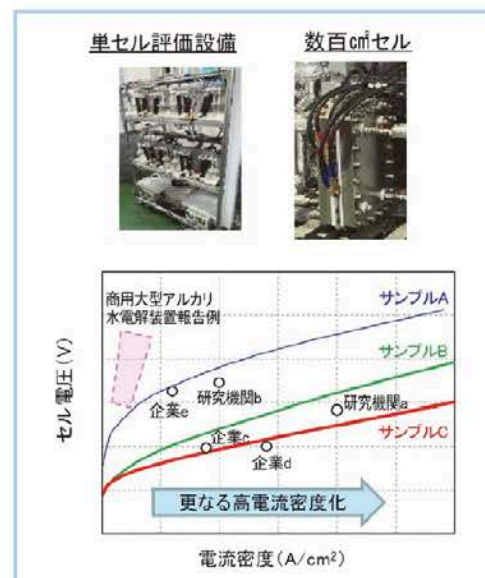


図 15 AEM 水電解開発状況

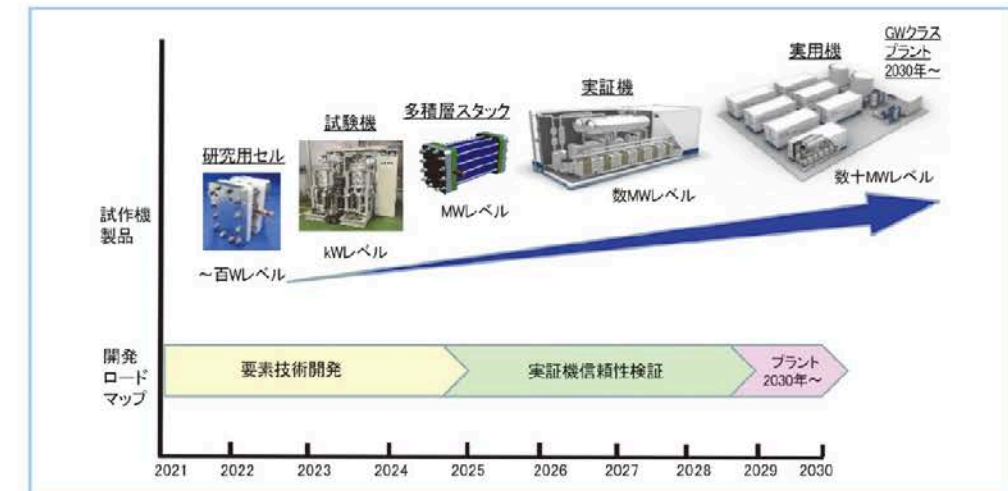


図 16 AEM 水電解ロードマップ

(4) バイオマスガス化 SAF 製造技術

SAF は、CO₂ 排出量削減に向けて導入が検討されているバイオマスなどから作る代替航空機用燃料である。当社は 2000 年頃からバイオマスからの液体燃料製造に取り組んでおり、バイオマスガス化の技術を用いた SAF 製造を 2012 年から開始、2016～2020 年にかけてパイロットプラント事業を、NEDO (国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構) 助成の下、株式会社 JERA、東洋エンジニアリング株式会社、JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency, 宇宙航空研究開発機構) と共に取組み、JERA 新名古屋発電所内に設置されたパイロットプラントで製造された SAF を 2021 年 6 月に日本航空の定期便にて使用した。これらの開発状況を図 17 に示す。今後は、商用化に向けたスケールアップとともに、更なる高付加価値の SAF 製造に向けて取り組んでいる。この成果は、NEDO の委託業務 (JPNP17005) の結果得られたものである。

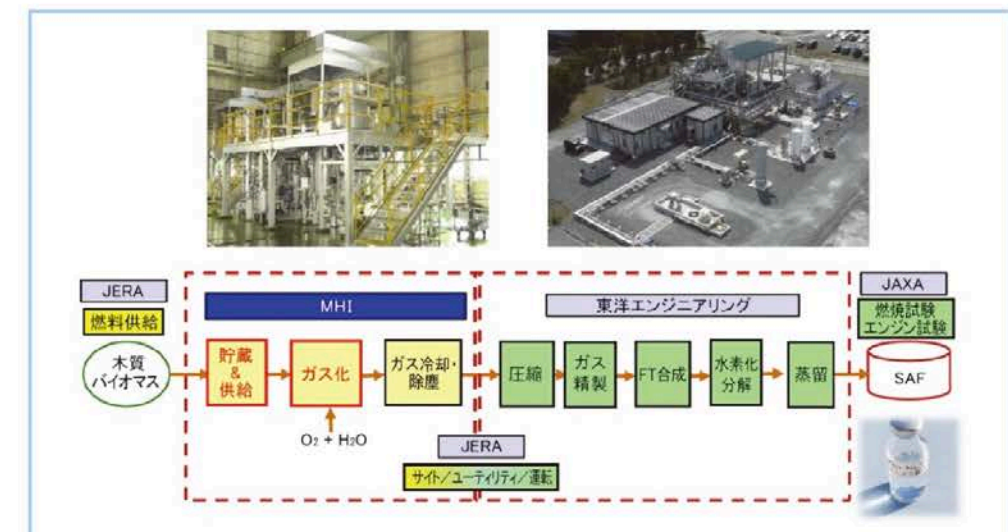


図 17 バイオマスガス化 SAF 製造技術

(5) 石炭焚ボイラにおけるアンモニア混焼技術

ボイラ・タービンプラントにおけるアンモニア利用については、微粉炭焚きボイラで高い混焼率を可能とするバーナの開発を進めている。アンモニアは、LPG 等の炭化水素燃料と比較して燃焼速度が遅いことからバーナにおける火炎の保持が難しいことに加え、N (窒素) 分量が多いため、適切な燃料濃度の燃焼でない場合は多量の NO_x が発生するという課題がある。当社

では、2021 年に小規模の燃焼試験炉を利用してアンモニア混焼・専焼の燃焼試験を実施した。本試験は、国内外の事業用及び産業用ボイラへの専焼バーナの提供を念頭に、当社がこれまで蓄積した多様な燃料のバーナ設計経験と基礎燃焼試験結果を踏まえ、複数のバーナ型式を対象に実施した。燃焼時において極めて安定した火炎であることを確認するとともに、NOx 排出量が事前に実施した基礎燃焼試験通りであること、残留アンモニアがゼロであることを確認した。現在、アンモニア高混焼化を目指し、NEDO のグリーンイノベーション基金事業/燃料アンモニアサプライチェーンの構築プロジェクトにおいて、石炭焚ボイラにおけるアンモニア高混焼技術の開発・実証に取り組んでいる。図 18 に示すとおり、2024 年度までに、実機同等スケールバーナでの燃焼試験により、アンモニア専焼バーナを開発する。図 18(b)に外観写真を示す当社保有の 0.5t/h 炉を用いて燃焼試験を開始した。図 18(c)は NEDO 委託事業にて導入したアンモニア供給設備である。併せて、株式会社 JERA と共同でアンモニア混焼ボイラとしての実機実証に向けた設備の基本計画、フイージビリティ・スタディにも取り組んでおり、実機での実証運転で巡回燃焼方式と対向燃焼方式の2つのユニットにおいて 50%以上のアンモニア混焼の検証を目指している。

なお、本項に示す開発は NEDO の“JPNP21020 グリーンイノベーション基金事業/燃料アンモニアサプライチェーンの構築/アンモニアの発電利用における高混焼化・専焼化/石炭ボイラにおけるアンモニア高混焼技術(専焼技術含む)の開発・実証/アンモニア専焼バーナを活用した火力発電所における高混焼実機実証”にて実施しているものである。

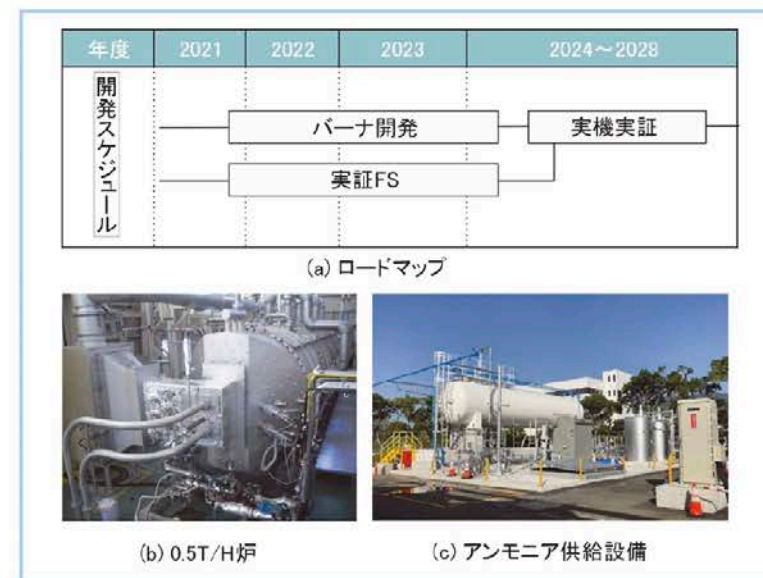


図 18 グリーンイノベーション基金によるアンモニア高混焼技術開発の概要

7. まとめ

本報では、2023 年より部分運用を開始した高砂水素パークで実証される技術を中心に、火力発電業界向けカーボンニュートラルへの取り組みについて紹介した。また、今後実証に移っていくこれらの技術の、長崎カーボンニュートラルパークにおける要素開発状況について概要を説明した。

本報で紹介した、エナジートランジション技術を用いて、当社の 2040 年に向けた三菱重工グループの宣言“MISSION NET ZERO”の達成を目指すとともに、カーボンニュートラル社会の実現に貢献する所存である。

カーボンニュートラル社会は、未来の話ではありません。
もうはじまっているのです。

脱炭素社会の達成を目指す水素製造技術の開発

Development of Hydrogen Production Technology
Initiative to Create Decarbonized World



小阪 健一郎*1
Kenichiro Kosaka

向井 大輔*2
Daisuke Mukai

石井 弘実*3
Hiromi Ishii

入江 弘毅*4
Hiroki Irie

鳥井 俊介*2
Shunsuke Torii

井上 康平*5
Kohei Inoue

エナジートランジションがグローバルに加速する中で、三菱重工業株式会社(以下、当社)の主力製品であるガスタービンコンバインドサイクル(GTCC:Gas Turbine Combined Cycle)・汽力発電のカーボンニュートラルへの対応も急務である。これら火力発電の脱炭素化には、発電設備の脱炭素化技術開発に加え、燃料の一つとなる水素を製造する技術開発が必要不可欠である。

当社では、発電設備のみならず、水素製造装置についても開発に取り組んでおり、本報では、既報^{(1),(2)}の高砂水素パークや長崎カーボンニュートラルパークの紹介時にふれた、水素の製造技術に焦点を当て、技術の特徴や開発状況を紹介する。

1. はじめに

地球温暖化問題の解決は人類の重要な課題であり、気候変動枠組条約締約国会議(COP)をはじめとする、国際的な気候変動対策への気運の高まりを受けて、日本政府は2020年10月、2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする“カーボンニュートラル”を目指すことを宣言した。“排出を全体としてゼロ”とは、二酸化炭素(CO₂)をはじめとする温室効果ガスの“(人為的な)排出量”から、植林や森林管理などによる“(人為的な)吸収量”を差し引いて、実質的なCO₂排出量をゼロにすることを意味する。このカーボンニュートラルの達成のためには、再生可能エネルギーの大幅な普及拡大が不可欠である。また、それと並行して、経済性やエネルギーの安定供給を維持することもまた重要である。当社は、既存の火力発電設備のエナジートランジションを進めることにより、社会的負担を最小化しながら、現実的かつ早期にカーボンニュートラル社会を実現することを目指している。

再生可能エネルギーは、カーボンニュートラル社会の達成に大きく貢献するものであるが、太陽光発電や風力発電などは、天候に左右されやすいという特性から出力の変動が大きく、時々刻々と変化する需要への対応に難があり、その利用拡大には蓄エネルギー技術の導入が必要である。一般的に短時間の蓄エネルギーにはリチウム電池が有利とされ、数日・数週間単位の比較的長期間には、貯蔵・輸送が可能な水素など化学エネルギーへの変換が必要とされている。

当社では、1980年代より、固体酸化物形燃料電池(SOFC:Solid Oxide Fuel Cell)、固体高分子形燃料電池(PEFC:Polymer Electrolyte Fuel Cell)、プロトン交換膜(PEM:Proton Exchange Membrane)水電解による水素製造、流動層反応器によるカーボンナノチューブ製造等といった化学エネルギー変換技術を用いた製品開発に取り組んできた。水素バリューチェーン(図1)については、WE-NET^{(3),(4)}にも参画し取り組んできており、それら技術の蓄積が、今日、再び注目を集め

*1 エナジードメイン 技術戦略室 技監・主幹技師 工博 *2 エナジードメイン GTCC 事業部 水素技術推進室 主席技師

*3 エナジードメイン SPMI 事業部 計画部 部長 *4 エナジードメイン GTCC 事業部 燃料電池事業室 グループ長

*5 エナジードメイン エナジートランジション推進部 主席技師

る状況となっている。世界に目を向けると、地域の特徴に応じて求められる技術も異なり、今後世界で望まれる水素製造技術を再整理、社内知見の棚卸を行って、開発を再開した。本報では、脱炭素社会の実現に必要な不可欠となる水素製造技術及び、合成燃料製造技術の開発状況について解説する。



図1 WE-NET の概念図(5)

2. 三菱重工の水素製造技術概要

三菱重工グループでは、“MISSION NET ZERO”を宣言し、当社グループの生産活動及びバリューチェーン全体からのCO₂排出量Net Zeroを2040年までに実現し、お客様が2050年までにカーボンニュートラルを実現可能な製品、技術を提供することを目指している。主な取組みとして、エナジートランジションによる事業・製品の低・脱炭素化を図り、加えてCO₂回収を含めたCCUS(Carbon Capture Utilization and Storage)の拡大を進め、カーボンニュートラル社会づくりに貢献する。

図2に水素・アンモニア利用の背景を示す。蓄エネルギー技術の導入の必要性及び各技術の得意な領域は前述の通りであり、短時間の蓄エネルギーには、リチウム電池が有利であるが、数日・週間単位の比較的長期間の蓄エネルギーには、水素など化学エネルギーへの変換が有利である。図2右は再生可能エネルギー賦存の地域性を示したものである。世界の多くの地域では再生可能エネルギーの普及が進み、再生可能エネルギーの余剰電力による水電解により製造される水素の普及が進むと予想される。一方で、日本・韓国等の再生可能エネルギー資源に恵まれない地域では、輸送効率が高いアンモニア利用の普及とともに、既存の天然ガスインフラを活かして水素を生成できるターコイズ水素への期待が高い。ターコイズ水素は、天然ガスを熱分解することで生成され、炭素を固体で取り出すことができる特徴をもつ。一口に脱炭素と言っても、各地域のニーズに沿った脱炭素技術の実証・社会実装が急がれる。

化石燃料からの脱却による社会的負担を軽減するためには、安価な水素が必要となる。電解による水素製造コストは、その大部分が電気代であるため、高効率なエネルギー転換技術が求められる。また、水素利用は数MPaの高圧になることが多く、水素の圧縮動力は、システム全体の効率を大きく低下させる。通常、気体を圧縮するよりも、液体を加圧した方が消費エネルギーを抑制できるため、高圧な水・水蒸気を電解可能な装置が望ましい。

当社エナジードメインでは、まず初めに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る。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る。図2右下に脱炭素発電へ向けた技術開発ロードマップを示す。これら要素技術の総合的長期実証は、当社高砂地区の高砂水素パークにて、要素技術開発は、同長崎地区にある長崎カーボンニュートラルパークにて実施している。

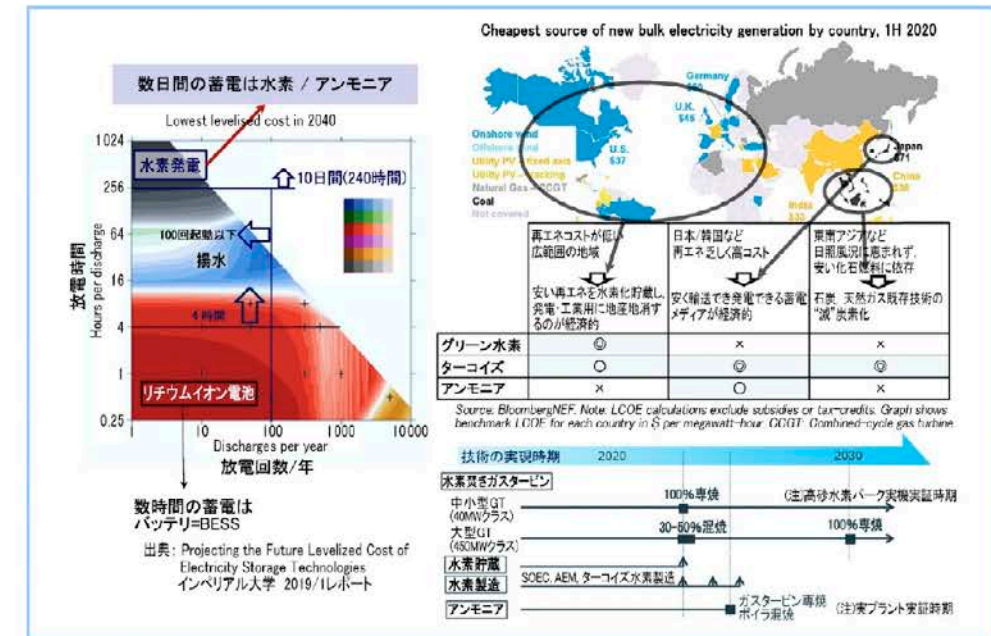


図2 水素利用の背景と脱炭素技術開発ロードマップ

3. SOEC の開発状況

SOEC の動作原理を図3に示す。水蒸気を電気分解し、水素を製造する。当社独自技術の円筒形 SOEC の構成要素であるセルスタックは、セラミクス製の構造部材である基体の外表面に、電解反応を行うセル（水素極/電解質/酸素極の積層体）を構成し、電子導電性セラミクスのインターコネクタでセル間を直列に接続している。このセルスタックを数百本束ねてカートリッジを構成し、カートリッジを圧力容器の中に格納したものをモジュールと呼んでいる。ボイラ、タービン・エキスパンダ、整流器などの補機と組み合わせて SOEC システムを構成する(図4)。

SOEC は、当社開発済の SOFC 技術の応用が可能であり、高効率である利点と、他社にはない高圧化が可能である特徴をもつため、大型水素製造プラントに適すると考えている。図5に SOEC の開発目論見を示す。当社はこれまでに、SOFC セルの開発・量産、更に多数のセルを束ねた 200kW 級の SOFC システムを製造・販売してきた実績がある。これと汽力発電にて培った高温・高圧蒸気及び、ガスのハンドリング技術を組み合わせて、大型 SOEC システムの開発を目指す。

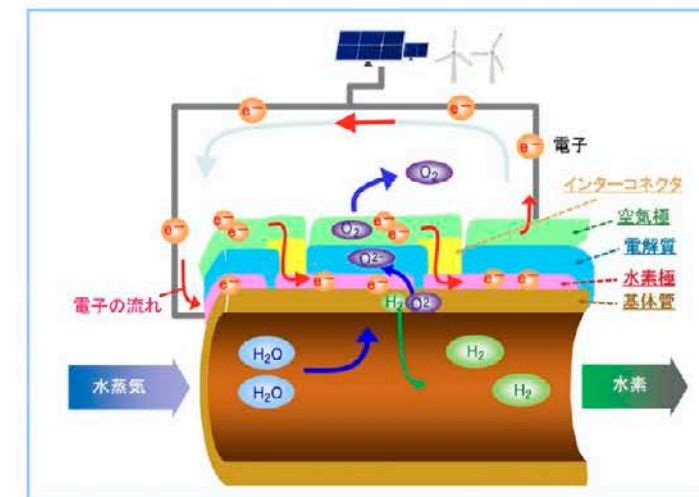


図3 SOEC の動作原理

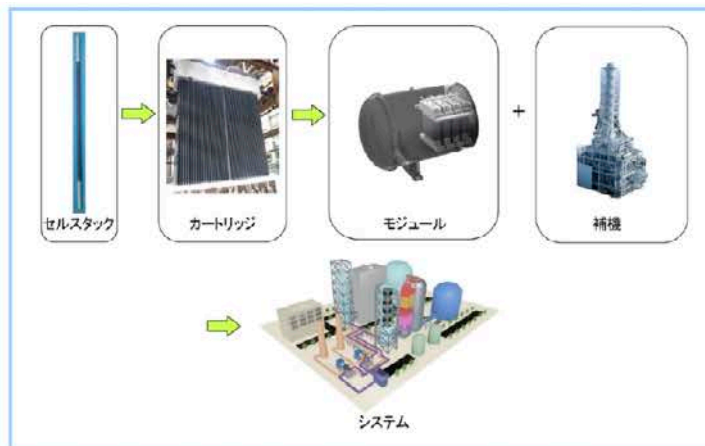


図4 SOEC システムの構成



図5 SOEC の開発目論見

大型SOECシステムの構成例を図6に示す。セルスタックに通電することで発生するジュール熱により水蒸気発生を自前でいき、水と電気を供給すれば水素が発生する“熱自立”を特徴としている。ボイラやコンプレッサ、エキスパンダ等の補機は汽力発電プラントに類似しており、大型・高圧化によるスケールメリットがあると考えている。また、水素利用は前述の通り高圧が望まれるため、SOEC の運転圧力が3～5MPa となる高圧システムを開発している。水素製造効率、数百MWクラス(水素10万Nm³/hクラス)にて、総合効率90%-HHV 以上の高効率を目標としている。

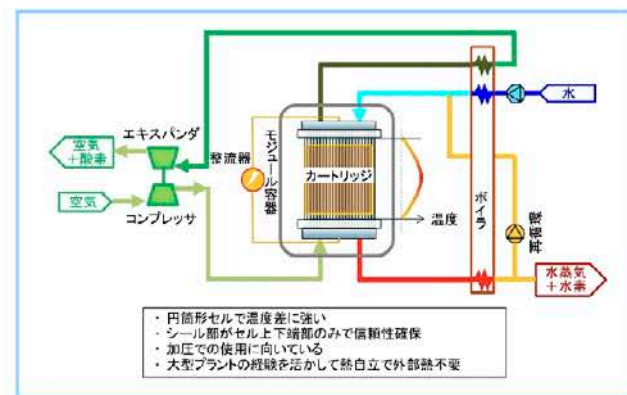


図6 大型SOECシステムの構成例

現行SOFCセルスタック1本を用いSOECとして電解水素製造試験を行った結果、図7(a)に示すように、SOFCとして作動させた場合の約5倍の高電流を流せることを確認した。そのときの水素出力(水素の高位発熱量基準)は1kW/本を超え、同セルスタックのSOFC常用発電出力(約100W/本レベル)の約10倍の発熱量の水素が得られることを確認した。また、同セルスタックを用いて耐久性試験を行っており、図7(b)に示すように、電流1倍(対SOFC比)では電解時間10000時間を経過し、大きな劣化がなく継続中で、数万時間の寿命を見込んでいる。また高電流条件でのセルスタック耐久試験も開始している。

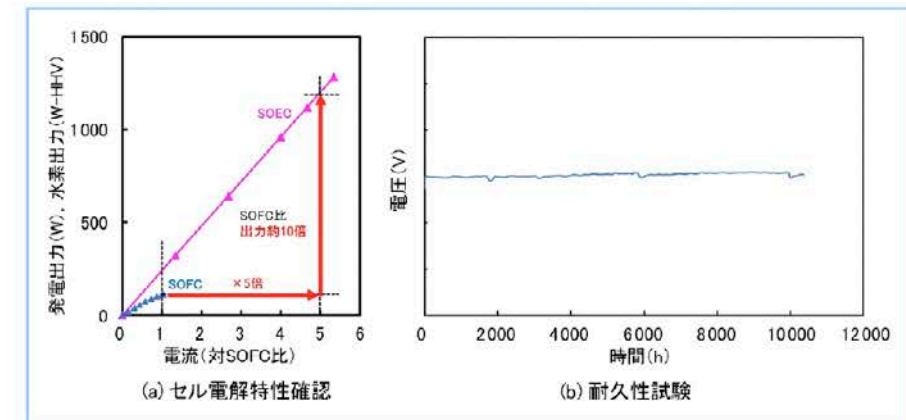


図7 セルスタック試験状況

セルスタックを数百本束ねたカートリッジの電解試験も行っており、その結果を図8に示す。電流1倍(対SOFC比)にて水素製造0.1MW-HHV、30Nm³/hを達成した。印加した電解電力に対する、生成水素の高位発熱量HHVの比である電解効率は、ジュール熱や投入蒸気・空気から吸熱しているため100%を超える値となっている。今後、カートリッジレベルでも高電流を実現すべく、構成部品の高電流・高電圧化、供給水蒸気・ガス量増加に適応する要素技術開発を実施中である。

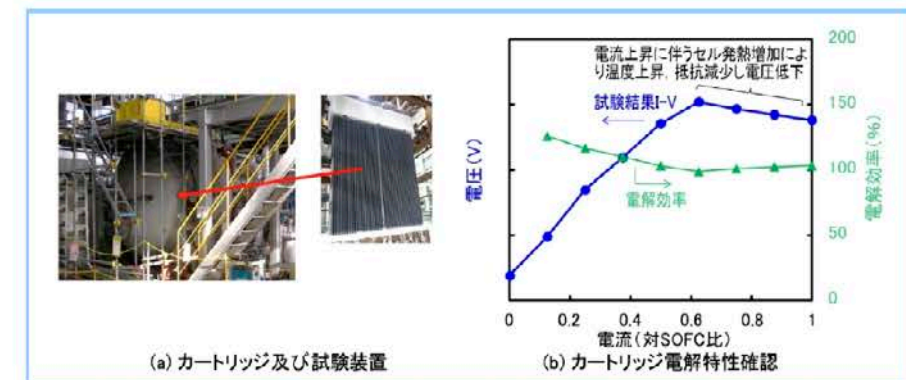


図8 カートリッジ試験結果

この0.1MWカートリッジを4台搭載した0.4MW級デモ機を高砂水素パークにて運転し、モジュールの運転実証を行う予定である。2023年12月時点で機器据付工事を行っており、2024年に水素製造開始予定である。

その後は、図9に示すように、高砂水素パークで数MWクラスのシステム実証を行い、大型化・高圧化の上、数百MWクラス商用機の開発へ進める計画である。

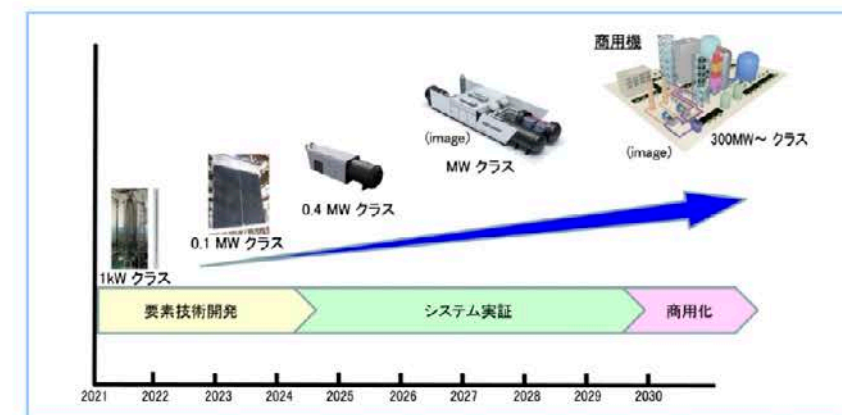


図9 SOEC 開発ロードマップ

4. AEM 水電解の開発状況

固体高分子電解質膜を使った電解技術の開発では、水素イオン透過膜を用いた PEM 水電解が主流であり、苛性ソーダ製造で多く社会実装されているアルカリ電解に比べて高電流密度運転が可能、かつ電解槽の小型化が可能である。その一方で、水素イオンが多く含まれる強酸性環境であるため、触媒や接液部に高価な貴金属やチタン系部材を多用する必要があるほか、供給水中に含まれる不純物による性能低下を抑制するため、金属イオン除去の純度管理が必要である。これに対し、次世代型水電解と言われる AEM 水電解は、PEM 水電解と同様な高電流密度運転による電解槽の小型化が可能で、水酸化物イオンが多く含まれるアルカリ環境であり、安価なステンレス系部材等の使用による低コスト化が期待される。

現在、当社では、電極面積が数十 cm^2 級の小型要素セルによる初期特性や耐久性の把握、数百 cm^2 の大型セルスタックの試作・評価、スタック部材・組立に対する適切な製法の検討、kW 級試験設備を用いたシステム構成・運転条件の最適化(図 10, 11)などに並行して取り組んでいる。

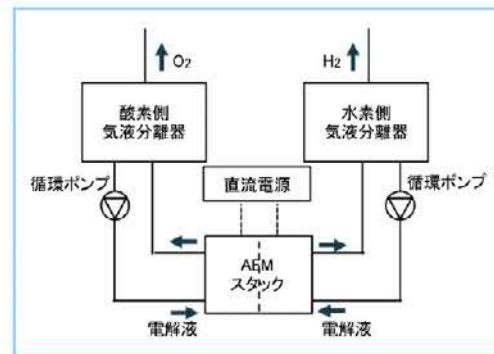


図 10 AEM 水電解システム系統図

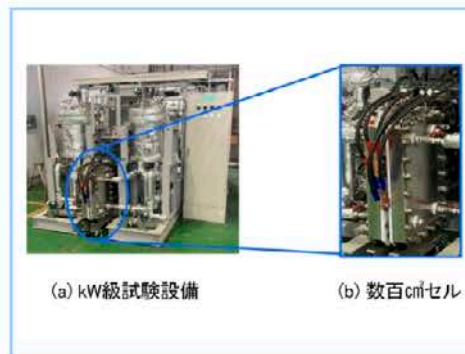


図 11 kW 級試験設備

図 12 に小型要素セル及び、大型セルスタックの試作・評価結果を示す。大型セルスタックでも小型要素セルと同等の電流-電圧特性が得られており、一般的なアルカリ水電解に比べて大幅な電流密度増加が期待できる。

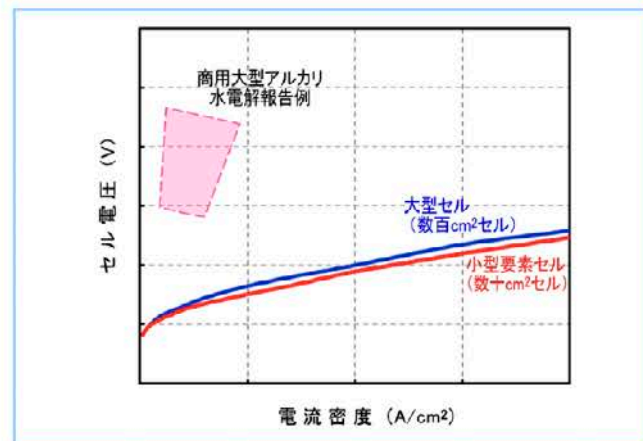


図 12 小型要素セル及び大型セルスタック試作評価結果

AEM 水電解装置の設計には、内部構成物の性能のみならず、内部流体のリーク防止、電解面の面圧及び流量制御、積層体の流量分配等、多岐にわたる技術開発が必要である。当社では、種々のエネルギー機器の開発で培った技術を活用し、数値解析と要素試験を組み合わせることで開発を進めている。例えば、スタックの締結構造の検討に対しては、FEM(有限要素法)解析と、面圧試験を行って適正化している。図 13, 14 に検討の一例を示す。

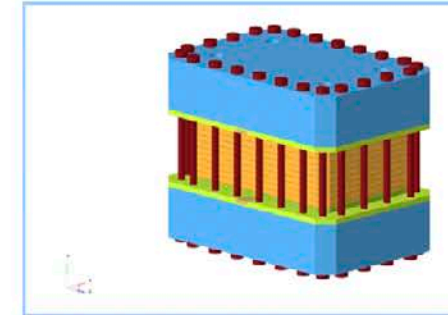


図 13 FEM 解析モデル



図 14 面圧試験状況

今後は図 15 に示すように、kW 級試験機の成果と上記取り組みで得た知見を元に実用規模の大型スタック開発を進め、数 MW クラス機による高砂水素パークでの実証を経て、商用機へ展開する計画である。

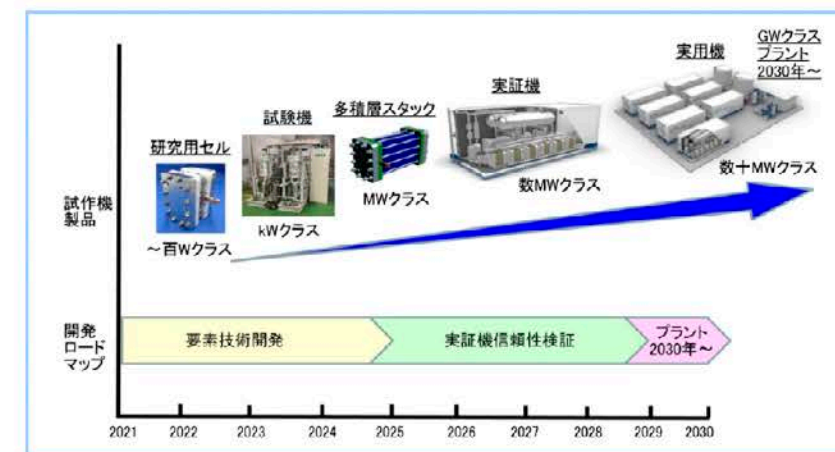


図 15 AEM 水電解ロードマップ

5. ターコイズ水素(メタン熱分解)の開発状況

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ある。当社では、同時に生成される水素に注目し、効率よく水素を製造できる反応形態を見出した。

図 16 にターコイズ水素製造技術の概要を示す。天然ガスのインフラは既に確立されておりこの天然ガスインフラの供給ラインと需要家の間、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する。天然ガス燃焼火力発電所(GTCC)を例にとると、燃焼器を水素用に換装するだけで、水素燃焼へ更新することができる。また、副生炭素は固体であるため、常温常圧で気体となる CO_2 よりも容易に固定化・貯蔵を行うことができる。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: CO_2 排出ゼロ発電が達成可能である。

メタン熱分解を行う反応器形態としては流動床を選定し、要素試験装置で反応状況や適正条件のスクリーニングを進めている。図 17 にバッチ式流動床試験装置と代表的な試験結果を示す。試験装置は、触媒を装荷した反応管内にメタンを通過させつつ反応管をヒータ加熱することでメタン熱分解反応を生じさせる装置である。

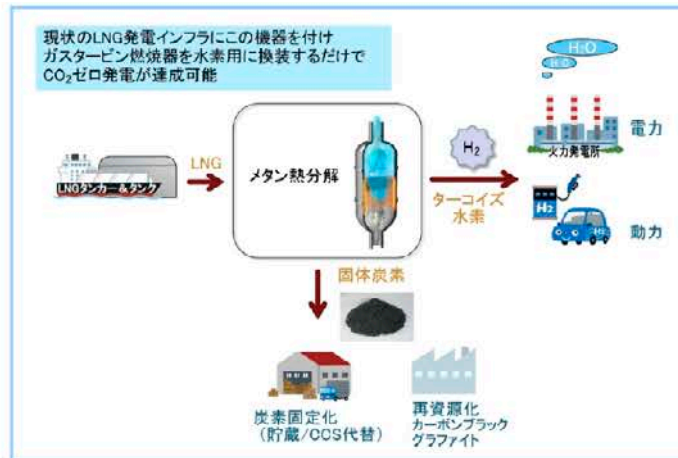


図 16 ターコイズ水素製造技術の概要

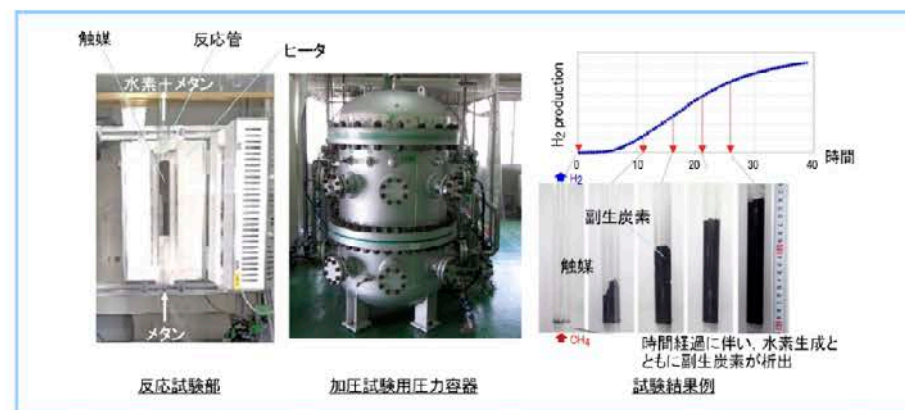


図 17 バッチ式流動床試験装置と試験結果

図 18 に連続式加圧流動床試験装置を示す。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できる。代表的な試験結果を図 19 に示す。高温加圧下で触媒供給と副生炭素払出を連続的にを行い、流動層高を一定に保った定常状態にて 40 時間以上の連続運転を実施している。メタンの転化率(水素生成量)は、バッチ式試験での反応特性を用いた予測値とほぼ同等であることを確認した。

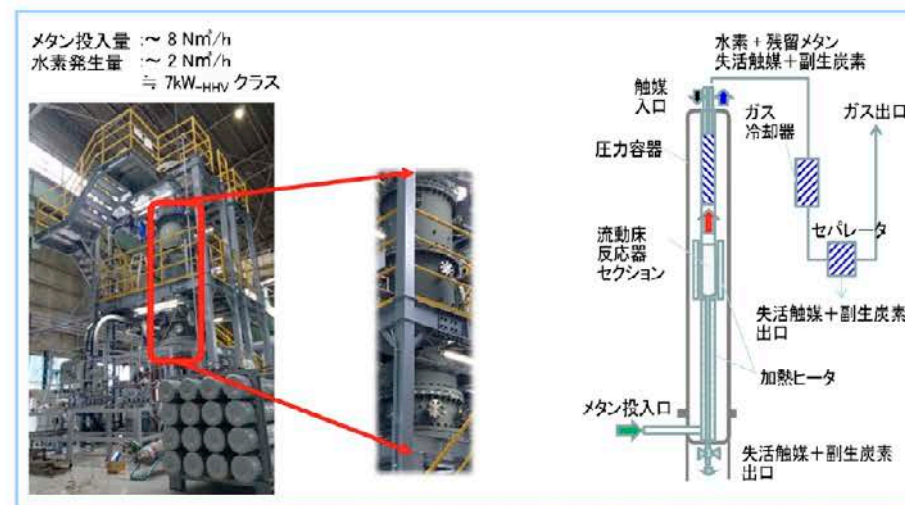


図 18 連続式加圧流動床試験装置

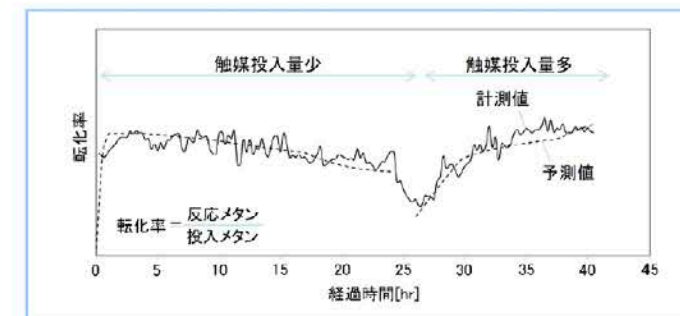


図 19 加圧流動床でのメタン熱分解試験結果

開発ロードマップを図 20 に示す。現在は前述のバッチ式、連続式反応器試験で特性確認を実施しつつ、水素製造装置全体としてのプロセス検証機設計を実施中で、2026 年に高砂水素パークにて検証運転を実施予定である。

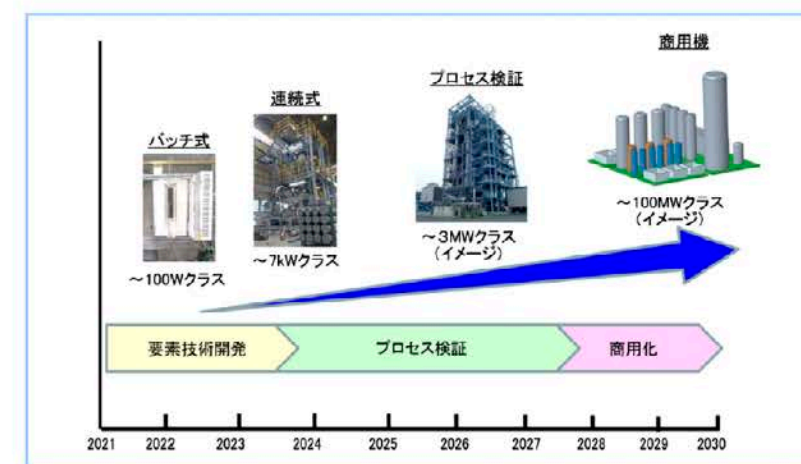


図 20 ターコイズ水素開発ロードマップ

6. 合成燃料製造技術の開発状況

前章までに当社における水素製造技術について概観したが、本章ではその水素の利用方法の例としてカーボンニュートラルな燃料(以下、CN 燃料)として液体合成燃料(以下、合成燃料)製造に関する開発状況を述べる。

(1) CN 燃料の位置付け

現在、世界におけるCO₂排出量を部門別にみると、発電部門が大きな比率を占めており、次に輸送部門、産業部門、民生部門の順となっている(図 21)。世界がカーボンニュートラルを達成するためには、各分野がそれぞれ実効的な取組みを進めていくことが重要である。例えば、発電分野において、当社では、水素やアンモニアを燃料とするガスタービンの開発⁽⁶⁾や、石炭燃焼発電ボイラにおけるアンモニア混焼技術の開発⁽⁷⁾を行っており、2040 年 CO₂ 排出量 50%削減の目標⁽⁸⁾に向けた着実な取組みを行っている。

一方、輸送部門に関しては EV(Electric Vehicle)化、FCV(Fuel Cell Vehicle)化がトレンドとなっているが、利用してもCO₂を増加させないCN燃料の利用も有力な選択肢である。特に中・大型の航空機においては、EV 化、FCV 化が難しいことから、今後、SAF(Sustainable Aviation Fuel:持続可能な航空機燃料)の需要が急激に拡大することが見込まれている。図 22 に SAF を含む CN 燃料について、その製造プロセスの体系を示す。

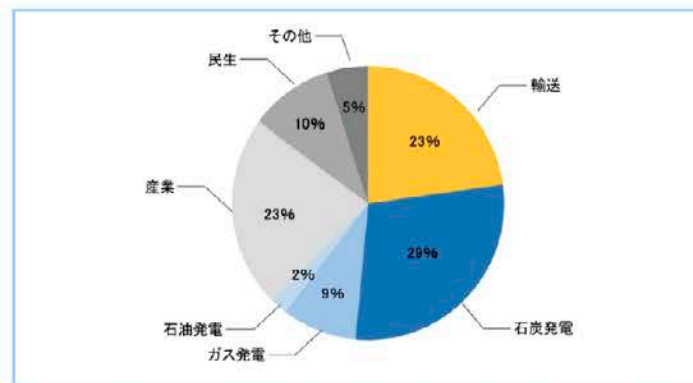
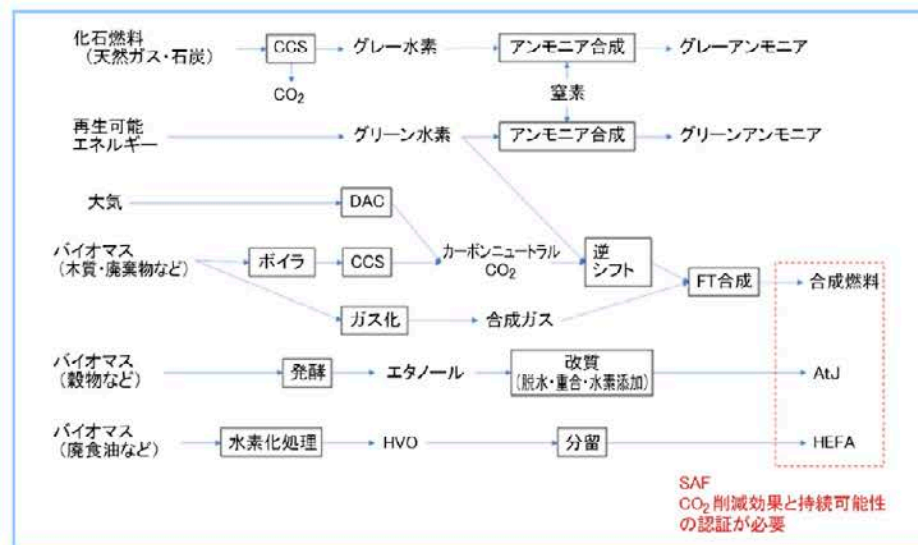
図 21 世界における部門別の CO₂ 排出量 (出典: IEA WEO2023)

図 22 CN 燃料製造プロセスの体系

① ブルー水素・グリーン水素起源 CN 燃料製造技術

CN 燃料として、まずは再生可能エネルギーから製造されるグリーン水素及び、化石燃料を改質して CCS (Carbon dioxide Capture and Storage: 二酸化炭素回収・貯留) により CO₂ を除去したブルー水素がある。しかし、水素の輸送性や安全性及び、エネルギー密度などの観点から、CN 燃料は液体の方が好ましく、ブルー水素・グリーン水素を原料として、LPG 同様に常温 (20℃) で 0.86MPa で液体となるアンモニアや、CO₂ との合成により製造する合成燃料に転換することが有望である。アンモニアの場合、原料の水素の種類によって、グリーンアンモニア、ブルーアンモニアに分類される。

合成燃料は、水素と CO₂ を原料に合成される燃料の総称であり、特に SAF は、ジェット燃料 (ケロシン) と代替可能な性状で、既存の航空機エンジンに規定の混合率で混合して使用可能な燃料である。ただし、合成燃料がカーボンニュートラルであるためには、水素と CO₂ の起源がそれぞれカーボンニュートラルであることが必要である。カーボンニュートラルな CO₂ には、大気中から DAC (Direct Air Capture) により回収する CO₂ と、バイオマスを燃焼させた排ガスから回収する CO₂ が考えられるが、回収効率 (CO₂ 回収量あたりに必要なエネルギー) の点で、現時点では CO₂ 濃度が高いバイオマス排ガスが有望である。

② バイオマス起源 CN 燃料製造技術

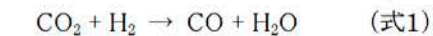
合成燃料を製造する別の方法として、木質バイオマスや廃棄物などをガス化して生成する原料ガスから FT 法 (Fischer-Tropsch 法) で燃料を合成するガス化-FT 法があり、当社でも開発を行っている⁽⁹⁾。

一方、穀物や廃食油などのバイオマスを起源とする CN 燃料には、エタノールや HVO (Hydrotreated Vegetable Oil: 水素化処理植物油) などのバイオ燃料があり、それらを改質・調整して SAF としたものがそれぞれ ATJ (Alcohol to Jet: アルコールを原料に燃料を製造する技術) や HEFA (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids: 廃食油や植物油などを原料に燃料を製造する技術) である。

(2) 電解水素による合成燃料製造

再生可能エネルギーによる電解水素と、バイオマス燃焼排ガスから回収した CO₂ を逆シフト反応により H₂/CO を主成分とする合成ガスに化学変換し、それを FT 合成することでカーボンニュートラルな SAF/合成燃料が製造可能である (図 23)。

逆シフト反応とは、次の (式 1) のとおり CO₂ と水素より CO と水蒸気を生成する反応であり、合成ガスを脱炭素するために CO を CO₂ に転換するいわゆるシフト反応の逆方向となる。



逆シフト反応を進めるためには、化学平衡上高温が有利 (逆にシフト反応は低温が有利) で、600℃ 以上の高温が求められる。これまで工業的に使用されてきた触媒は、主に低温のシフト反応用触媒であり、これを高温に流用するには耐久性などの課題があるため、新たに開発が進められている。

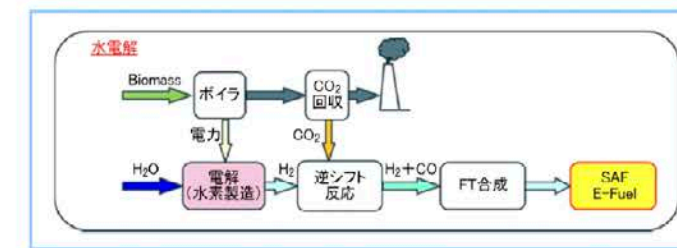


図 23 電解水素による SAF 製造の概略フロー

逆シフト反応に加えて、近年 CO₂ を電気分解 (電解) し、CO に還元する方法や、水電解と CO₂ 電解を同時に行う共電解など革新的なプロセスが開発されている。SOEC を用いて水蒸気と CO₂ を共電解する原理を図 24 に示す。水蒸気電解と同様に、CO₂ の電解でも酸素イオンが電解質膜を透過することで CO₂ が CO に還元される反応と同時に水蒸気が水素に還元される反応が起こり、SOEC 入口のガス性状などの運転条件を調整することで FT 合成に適した原料ガスを製造することが可能となる。当社現行 SOEC セルにおいても、共電解が可能なことはすでに試験において確認している。

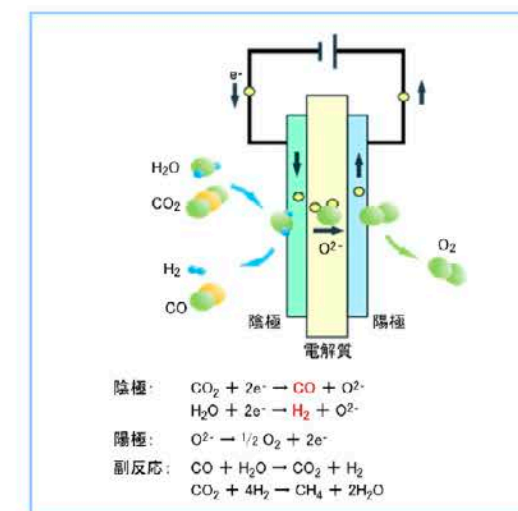
図 24 SOEC における水蒸気/CO₂ 共電解の原理

図 25 に水蒸気・CO₂ 共電解による SAF 製造の概略フローを示す。図 23 のフローに比べ、共電解装置が電解（水素製造）装置と逆シフト反応器の代替となり、設備構成が簡略化されるとともに、FT 合成収率の向上が期待される。

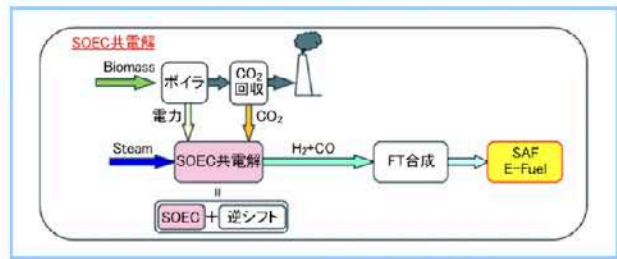


図 25 水蒸気・CO₂ 共電解による SAF 製造の概略フロー

7. まとめ

本報では、発電用途での水素利用に焦点をあてた、高圧・高効率・大容量な、SOEC、AEM水電解、メタン熱分解の三種類の水素製造技術開発及び、これにより派生的に生まれる合成燃料製造技術開発状況の概要を紹介した。

本報で紹介した、エナジートランジション技術を用いて、当社の 2040 年に向けた三菱重工グループの宣言“MISSION NET ZERO”の達成を目指すとともに、カーボンニュートラル社会の実現に貢献する所存である。

カーボンニュートラル社会は、未来の話ではありません。
もうはじまっているのです。

参考文献

(1) 正田淳一郎ほか、水素社会の実現に向けた“高砂水素パーク”の取組み、三菱重工技報, Vol.59 No.4 (2022)
(2) 正田淳一郎ほか、脱炭素社会の達成を目指す“高砂水素パーク”“長崎カーボンニュートラルパーク”の取組み、三菱重工技報, Vol.60 No.3 (2023)
(3) 小川紀一郎ほか、水素エネルギーの製造利用技術、三菱重工技報, Vol.29 No.6 (1992)
(4) 久留正敏ほか、水素利用国際クリーンエネルギーシステム(WE-NET)用主機の開発、三菱重工技報, Vol.35 No.1 (1998)
(5) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, WE-NET (2003)
https://www.ena.or.jp/WE-NET/contents_j.html
(6) 松本 照弘ほか、カーボンニュートラルに貢献する水素・アンモニア焼きガスタービンの開発状況、三菱重工技報, Vol.59 No.4 (2022)
(7) 山下 登敏ほか、カーボンニュートラル社会に向けた石炭焚きボイラにおけるアンモニア混焼技術の開発、三菱重工技報, Vol.59 No.4 (2022)
(8) 三菱重工業、2040 年のカーボンニュートラルを宣言、(2021)
<https://www.mhi.com/jp/news/21102902.html>
(9) 山内 康弘ほか、航空業界の脱炭素化に貢献するバイオマスガス化 FT 合成バイオジェット燃料の実証、三菱重工技報, Vol.59 No.4 (2022)

便覧

ここからは、水素の特性や工学的な情報を掲載しましたのでぜひご活用ください。
また、水素エネルギーキャリアとして期待されているアンモニアに関し、三菱重工技報を通してご紹介いたします。



CONTENTS

- 1. 基礎データ
- 2. 輸送時の特性
- 3. 燃焼時の特性
- 4. 水素1mol 生成に必要な熱量比較

- 5. 換算表
 - 5-1. 単位換算表
 - 5-2. 水素コスト 簡易換算表
 - 5-3. アンモニアコスト 簡易換算表
- 6. ガスタービンラインアップ

- 性能
- ・ガスタービン単体性能
 - ・機械駆動性能
 - ・航空転用ガスタービン性能
 - ・コンバインドサイクル性能

- 7. ガスタービン機種別の燃料消費量
- 8. 水素と天然ガスの混焼：体積割合と熱量割合の関係
- 9. 水素製造プロセス
- 10. 代表的なグリーン水素製造方法の特徴

- 11. 技術論文:CO₂を排出しないエネルギー(アンモニア)

1. 基礎データ

	水素 H ₂	メタン CH ₄	アンモニア NH ₃	空気	窒素 N ₂	二酸化炭素 CO ₂
分子量 ^{※1}	2.016	16.04	17.03	28.97	28.02	44.01
密度(ガス) ^{※2} kg/Nm ³	0.08987	0.717	0.771	1.2932	1.2506	1.977
密度(液体) ^{※3} kg/L	0.071 (-252.9℃, 0.1MPa)	0.427 (-165.0℃, 0.1MPa)	0.682 (-33.7℃, 0.1MPa)	0.898 (N ₂ :O ₂ =0.79:0.21) (-200.0℃, 0.1MPa)	0.807 (-196.0℃, 0.1MPa)	1.032 (-20.1℃, 2MPa)
比熱 ^{※4} Cp kJ/(kg・K) [25℃, 1atm]	14.306	2.2317	2.1645	1.0063	1.0413	0.85085
比熱比 ^{※4} K (-) [25℃, 1atm]	1.4054	1.3062	1.316	1.4018	1.4013	1.2941
ガス定数 R J/(kg・K)	4124.3	518.4	488.2	287.0	296.7	188.9
凝固点 ^{※5} ℃ [1気圧]	-259.14	-182.76	-77.7	-	-209.86	-56.6
沸点 ^{※5} ℃ [1気圧]	-252.87	-161.49	-33.4	-	-195.8	-78.5 (昇)

出典: ※1: 14102 の化学商品（化学工業日報社）p.1, p265, p275, p277, p288（除、空気）※2: 改訂 4 版 化学便覧 基礎編（丸善）I -28、II -3、気体の密度および比重（ヘイシンモーノボンブ）※3: NIST Chemistry WebBook, SRD 69 (https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/)、Refprop_ver9.0 で計算（NIST による標準参照データベースソフトウェア (NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database)）※4: Refprop_ver9.0 で計算 ※5: 改訂 4 版 化学便覧 基礎編（丸善）I -28、I -409、I -176、I -131（除、空気）



水素とアンモニアって何が違う？

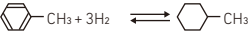
燃焼時にCO₂を排出しない特徴を持つ水素とアンモニアですが、水素が燃焼時に水しか出ないのに対して、アンモニアは高温での燃焼時に大気汚染物質である窒素酸化物(NOx)が生じます。輸送・貯蔵の面では、沸点の低い水素のほうがコスト高となります。

	水素(H ₂)	アンモニア(NH ₃)
化学反応式	2H ₂ + O ₂ → 2H ₂ O	4NH ₃ + 3O ₂ → 2N ₂ + 6H ₂ O
製造方法	・水蒸気改質(メタンガスなどを改質) ・水電解方式	・ハーバーボッシュ方式(窒素と水素を触媒を用いて工業的に合成)

2. 輸送時の特性

	液体水素 H ₂	圧縮水素 H ₂ (350気圧)	圧縮水素 H ₂ (700気圧)	メタン CH ₄ (液体)	アンモニア NH ₃ (液体)	天然ガス (LNG 13A)	プロパン C ₃ H ₈ (液体)	メチルシクロヘキサン C ₇ H ₁₄ (MCH [※])
分子量	2.016	2.016	2.016	16.04	17.03	18.36	44.1	98.18
水素含有率 (重量%)	100	100	100	25.13	17.76	23.77	18.29	6.16
水素密度 (kg-H ₂ /m ³)	70.8	23	39	108.1	120.0	103.0	107.0	47
沸点 (℃)	-252.87	-	-	-161.49	-33.4	-161.49 (メタン) 組成により異なる	-42.07	101.05
その他特性	水素密度高 リサイクル不要 高純度	強引火性 強可燃性 爆発性		-	水素密度高 リサイクル不要 直接利用も可	メタン CH ₄ : 89.60 エタン C ₂ H ₆ : 5.62 プロパン C ₃ H ₈ : 3.43 ブタン C ₄ H ₁₀ : 1.35	-	常温・常圧 石油インフラ 利用可

※：MCH トルエン(C₇H₈)とMCH(C₇H₁₄) (分子量98)の水素の差により水素を運ぶ



3. 燃焼時の特性

燃料名	水素 H ₂	メタン CH ₄	アンモニア NH ₃	プロパン C ₃ H ₈
密度 [kg/Nm ³] ^{※1}	0.08987	0.717	0.771	2.02
沸点(@大気圧) [℃] ^{※2}	-252.87	-161.49	-33.4	-42.1
低位発熱量(LHV)	[MJ/kg] ^{※2}	120.4	50.2	46.6
	[MJ/Nm ³]	10.82	35.99	93.67
	[MJ/mol]	0.243	0.805	2.055
高位発熱量(HHV)	[MJ/kg]	141.77	55.5	22.5 ^{※3}
	[MJ/Nm ³]	12.75	39.72	17.1
	[MJ/mol]	0.286 ^{※4}	0.89 ^{※4}	2.219 ^{※4}
可燃当量比 [-] ^{※2}	0.10～7.17	0.50～1.69	0.63～1.40	0.51～2.51
最大燃焼速度 [m/s] ^{※2}	2.91	0.37	0.07	0.43
最低自着火温度 [℃] ^{※2}	500	537	651	432
発生CO ₂ [g/MJ]	0	54.8	0	64.4
発生H ₂ O [g/MJ]	74.8	44.8	85.4	35.1

出典: ※1: 理科年表2021物31(397) ※2: 日本燃焼学会誌 第58巻,183号,(2016年), 41-48 ※3: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsssj/36/11/36_583/_pdf, https://www.jccme.or.jp/11/pdf/2021-06/josei01.pdf ※4: 日本機械学会編 燃焼工学ハンドブック 1995年 P285掲載数値より算出



水素可視化バーナーの秘密

三菱重工の総合研究所(高砂)では、見学者を対象に水素燃焼のデモを実施中です。実はその際使用しているバーナーは、水素100%専焼のマルチクラスター燃焼器を開発する際、金属3Dプリンターの製造限界を確認するために製作した数多くの試作品のうちの一つ。廃棄をまねがれて、第2の人生を送っています。



水素(H₂)、メタン(CH₄)、アンモニア(NH₃)の火炎の色は？

それぞれ、淡色半透明(不可視)、青、オレンジです。物質が燃える過程で、通常の状態では存在できないラジカルと呼ばれる中間生成物が発生します。ラジカルは発生・消滅の際に特定の波長の光を出しますが、燃焼物や燃焼方法によってラジカルの種類と割合が変わるため、色の違う火炎になるわけです。

4. 水素1mol生成に必要な熱量比較

	方法	熱化学方程式	水素1mol生成に必要な熱量
(1)	メタン熱分解	CH ₄ (g) + 74.4kJ = 2H ₂ (g) + C	37.2kJ/mol
(2)	メタン改質	① CH ₄ (g) + H ₂ O (g) + 205.7kJ = CO (g) + 3H ₂ (g) ② CO (g) + H ₂ O (g) = H ₂ (g) + CO ₂ (g) + 41.2kJ ⇒ CH ₄ (g) + 2H ₂ O (g) = CO ₂ (g) + 4H ₂ (g) - 164.5kJ (=①+②)	41.1kJ/mol
(3)	アンモニア分解	NH ₃ (g) + 46.1kJ = 3/2H ₂ (g) + 1/2N ₂ (g)	30.7kJ/mol
(4)	MCH脱水素	C ₆ H ₁₁ CH ₃ + 202.5kJ = C ₆ H ₆ CH ₃ + 3H ₂ (g)	67.5kJ/mol
	(液体の)水電解	H ₂ O (l) + 286kJ = H ₂ (g) + 1/2O ₂ (g)	0.079 [※] kWh/mol

※：水電解では、電気エネルギーを投入して水素を生成するので、水素1mol生成に必要なエネルギーは、kWh換算して(1kWh=3600kJ)0.079 kWh/molとここでは表記する。

5. 換算表

5-1. 単位換算表

	熱量・仕事 (Energy)					
	百万英国熱量単位 (MmBtu)	英国熱量単位 (Btu)	キロワット時 (kWh)	メガジュール (MJ)	キロカロリー (kcal)	石油換算トン (toe)
百万英国熱量単位 (MmBtu)	1	1.000 x 10 ⁶	2.931 x 10 ²	1.055 x 10 ³	2.519 x 10 ⁵	2.519 x 10 ⁻²
英国熱量単位 (Btu)	1.000 x 10 ⁻⁶	1	2.930 x 10 ⁻⁴	1.055 x 10 ⁻³	2.519 x 10 ⁻¹	2.519 x 10 ⁻⁸
キロワット時 (kWh)	3.412 x 10 ⁻³	3.412 x 10 ³	1	3.6	8.598 x 10 ²	8.598 x 10 ⁻⁵
メガジュール (MJ)	9.478 x 10 ⁻⁴	9.478 x 10 ²	2.777 x 10 ⁻¹	1	2.388 x 10 ²	2.388 x 10 ⁻⁵
キロカロリー (kcal)	3.968 x 10 ⁻⁶	3.968	1.163 x 10 ⁻³	4.186 x 10 ⁻³	1	1.000 x 10 ⁻⁷
石油換算トン (toe)	3.968 x 10 ¹	3.968 x 10 ⁷	1.163 x 10 ⁴	4.186 x 10 ⁴	1.000 x 10 ⁷	1

	体積 (Volume)				
	立方メートル (m³)	立方フィート (cf)	米ガロン (US gal)	米バレル (bbl)	リットル (litre)
立方メートル (m³)	1	3.531 x 10 ¹	2.641 x 10 ²	6.29	1 x 10 ³
立方フィート (cf)	2.831 x 10 ⁻²	1	7.480	1.781 x 10 ⁻¹	2.831 x 10 ¹
米ガロン (US gal)	3.785 x 10 ⁻³	1.336 x 10 ⁻¹	1	2.38 x 10 ⁻²	3.785
米バレル (bbl)	1.589 x 10 ⁻¹	5.614	42	1	1.589 x 10 ²
リットル (litre)	1 x 10 ⁻³	3.531 x 10 ⁻²	2.641 x 10 ⁻¹	6.289 x 10 ⁻³	1

	質量 (Mass)				
	キログラム (kg)	トン (t)	英トン (UK ton)	米トン (US ton)	ポンド (lb)
キログラム (kg)	1	1.000 x 10 ⁻³	9.842 x 10 ⁻⁴	1.102 x 10 ⁻³	2.204
トン (t)	1 x 10 ³	1	9.842 x 10 ⁻¹	1.102	2.20462 x 10 ³
英トン (UK ton)	1.016 x 10 ³	1.016	1	1.120	2.240 x 10 ³
米トン (US ton)	9.071 x 10 ²	9.071 x 10 ⁻¹	8.928 x 10 ⁻¹	1	2 x 10 ³
ポンド (lb)	4.535 x 10 ⁻¹	4.535 x 10 ⁻⁴	4.464 x 10 ⁻⁴	5 x 10 ⁻⁴	1

5-2. 水素コスト 簡易換算表

H ₂ コスト		\$/Nm³	€/Nm³	円/kg	\$/kg	€/kg	円/MmBtu	\$/MmBtu	€/MmBtu	円/MJ	\$/MJ	€/MJ	円/kWh-th	\$/kWh-th	€/kWh-th
30.00	円/Nm³	0.205	0.186	334	2.28	2.07	2480	16.9	15.4	2.35	0.0160	0.0146	8.46	0.0578	0.0524

・日本政府が2030年頃までの目標として掲げている30円/Nm³を基準に、以下の前提条件を適用して換算表を作成しています。
ガス密度: 0.08987 kg/Nm³ 高位発熱量: 12.77 MJ/Nm³ – HHV 単位換算: 1,055 MJ/MmBtu
為替レート: 146.44円/US \$, 161.35円/€ (2024.9月TTMレート)

5-3. アンモニアコスト 簡易換算表

NH ₃ コスト		円/ton	€/ton	円/MmBtu	\$/MmBtu	€/MmBtu	円/MJ	\$/MJ	€/MJ	円/kWh-th	\$/kWh-th	€/kWh-th	円/Nm³H ₂	\$/Nm³H ₂	€/Nm³H ₂
350.00	\$/ton	51300	386	2410	16.5	14.9	2.28	0.0156	0.0142	8.22	0.0561	0.0509	29.2	0.199	0.181

・CFAA(クリーン燃料アンモニア協会)が2030年頃までに実現可能としている350\$/ton*を基準に、以下の前提条件を適用して換算表を作成しています。
ガス密度: 0.771 kg/Nm³ 高位発熱量: 22.47 MJ/kg – HHV 単位換算: 1,055 MJ/MmBtu
為替レート: 146.44円/US \$, 161.35円/€ (2024.9月TTMレート)

・水素とアンモニアの間の換算はそれぞれの高位発熱量にて行ったもので、相互の変換ロス等は考慮していません。

※: 350\$/tonの出典例: <https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001418024.pdf>

6. ガスタービンラインアップ

最先端技術の粋が集結した
三菱重工のガスタービン

発電事業用・産業用中小型ガスタービン(4万～12万kWクラス)

- ・ H-25 シリーズ(50ヘルツ/60ヘルツ)
- ・ H-100 シリーズ(50ヘルツ/60ヘルツ)

発電事業用大型ガスタービン(12万～57万kWクラス)

- ・ Jシリーズ(50ヘルツ/60ヘルツ)
- ・ Gシリーズ(60ヘルツ)
- ・ Fシリーズ(50ヘルツ)
- ・ Dシリーズ(50ヘルツ/60ヘルツ)

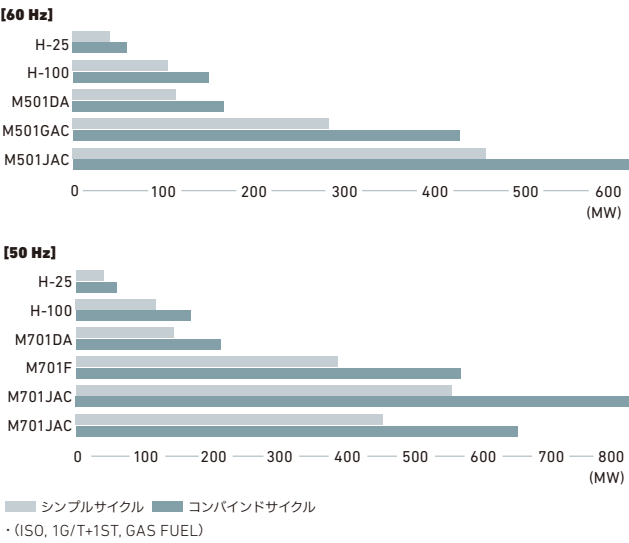
航空転用型ガスタービン(3万～14万kWクラス)

- ・ FT8® MOBILEPAC®
- ・ FT8® SWIFTPAC®
- ・ FT4000® SWIFTPAC®

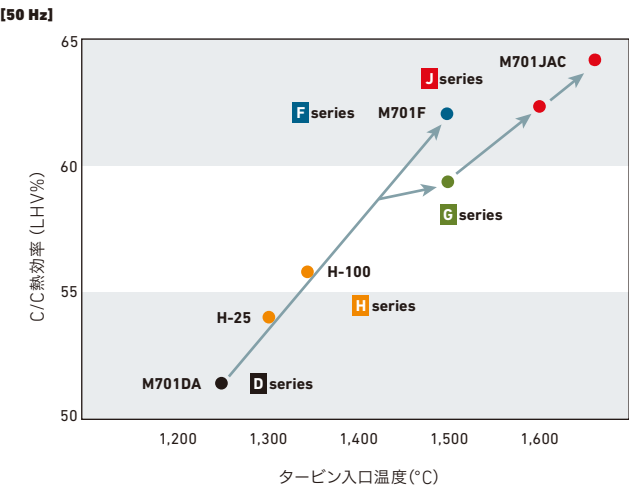
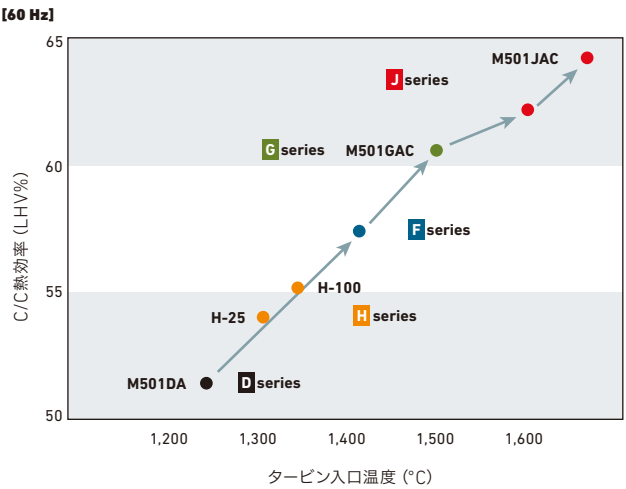
幅広いラインアップのガスタービンで
世界に電力を

三菱重工は、世界中の幅広いニーズに応えられるよう、発電事業用・産業用ガスタービンとして、3万kW級から57万kW級まで幅広い範囲のガスタービンを揃えています。これまで全世界で50か国以上、1,700台以上のガスタービンを納入しており、世界各地域で高効率かつクリーンなエネルギー供給に貢献しています。

GT&C/C出力



C/C熱効率



性能

ガスタービン単体性能

	ISO 定格出力 (kW)	熱消費率 (LHV 基準) (kJ/kWh) (Btu/kWh)		熱効率 (%-LHV)	圧力比	回転速度 (rpm)	排ガス流量 (kg/s)	排ガス温度 (°C)
50Hz / 60Hz								
H-25※	41,030	9,949	9,432	36.2	17.9	7,280	114	569
50Hz								
H-100※	116,450	9,400	8,909	38.3	18	3,000	296	586
M701DA	144,090	10,350	9,810	34.8	14	3,000	453	542
M701F	385,000	8,592	8,144	41.9	21	3,000	748	630
M701JAC	448,000	8,182	7,755	44.0	25	3,000	765	663
M701JAC	574,000	8,295	7,862	43.4	25	3,000	1,024	646
60Hz								
H-100※	105,780	9,421	8,930	38.2	18.4	3,600	293	534
M501DA	113,950	10,320	9,780	34.9	14	3,600	354	543
M501GAC	283,000	9,000	8,531	40.0	20	3,600	618	617
M501JAC	453,000	8,182	7,755	44.0	25	3,600	815	649

機械駆動性能

	ISO 定格出力 (hp) (kW)		熱消費率 (LHV 基準) (kJ/kWh) (Btu/hp-hr)		熱効率 (%-LHV)	圧力比	回転速度 (rpm)	排ガス流量 (kg/s)	排ガス温度 (°C)
H-100※	144,350	107,650	9,256	6,542	38.9	18.4	3,600	293	534
H-100※	160,780	119,900	9,266	6,549	38.9	20.1	3,000	315	552

航空転用ガスタービン性能

	ISO 定格出力 (kW)	熱消費率 (LHV 基準) (kJ/kWh) (Btu/kWh)		熱効率 (%-LHV)	回転速度 (rpm)	排ガス流量 (kg/s)	排ガス温度 (℃)
50Hz							
FT8*	28,528	10,376	9,834	34.7	3,000	92	496
FT4000*	70,154	8,908	8,443	40.4	3,000	183	431
FT4000*	140,500	8,896	8,431	40.5	3,000	367	431
60Hz							
FT8*	30,941	9,825	9,312	36.7	3,600	92	491
FT4000*	71,928	8,686	8,232	41.5	3,600	183	422
FT4000*	144,243	8,661	8,209	41.6	3,600	367	422

・性能は、ISO標準大気条件(101.3kPa、大気温度15℃、相対湿度60%)で燃料として天然ガスを使用した場合の発電端の値
※：吸排気口は含まない

コンバインドサイクル性能

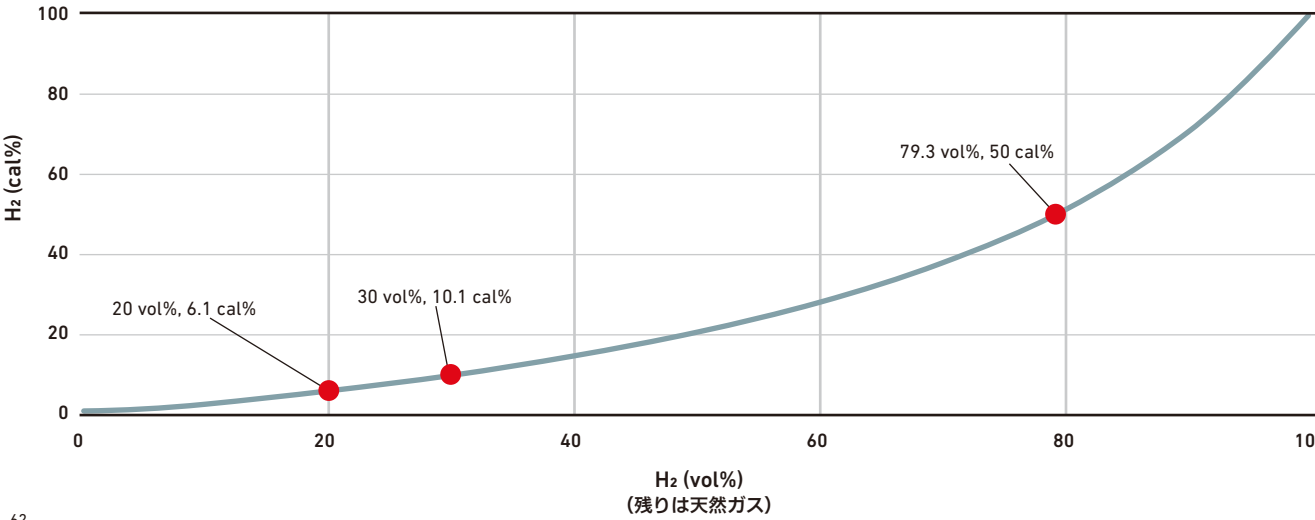
	プラント出力 (kW)	熱消費率 (LHV 基準) (kJ/kWh) (Btu/kWh)		プラント熱効率 (%)	ガスタービン出力 (kW)	蒸気タービン出力 (kW)	台数と ガスタービンの形式
50Hz / 60Hz							
MPCP1(H-25)	60,100	6,667	6,319	54.0	39,600	20,500	1×H-25
MPCP2(H-25)	121,400	6,606	6,261	54.5	79,200	42,200	2×H-25
50Hz							
MPCP1(H-100)	171,000	6,272	5,945	57.4	112,700	58,300	1×H-100
MPCP2(H-100)	346,000	6,207	5,884	58.0	225,400	120,600	2×H-100
MPCP1(M701DA)	212,500	7,000	6,635	51.4	142,100	70,400	1×M701DA
MPCP2(M701DA)	426,600	6,974	6,610	51.6	284,200	142,400	2×M701DA
MPCP3(M701DA)	645,000	6,947	6,585	51.8	426,300	218,700	3×M701DA
MPCP1(M701F)	566,000	5,807	5,504	62.0	379,300	186,700	1×M701F
MPCP2(M701F)	1,135,000	5,788	5,486	62.2	758,600	376,400	2×M701F
MPCP1(M701JAC)	650,000	<5,625	<5,332	>64.0	441,700	208,300	1×M701JAC
MPCP1(M701JAC)	840,000	<5,625	<5,332	>64.0	570,900	269,100	1×M701JAC
60Hz							
MPCP1(H-100)	150,000	6,534	6,193	55.1	102,500	47,500	1×H-100
MPCP2(H-100)	305,700	6,418	6,083	56.1	205,000	100,700	2×H-100
MPCP1(M501DA)	167,400	7,000	6,635	51.4	112,100	55,300	1×M501DA
MPCP2(M501DA)	336,200	6,974	6,610	51.6	224,200	112,000	2×M501DA
MPCP3(M501DA)	506,200	6,947	6,585	51.8	336,300	169,900	3×M501DA
MPCP1(M501GAC)	427,000	5,951	5,640	60.5	280,800	146,200	1×M501GAC
MPCP2(M501GAC)	856,000	5,931	5,622	60.7	561,600	294,400	2×M501GAC
MPCP3(M501GAC)	1,285,000	5,931	5,622	60.7	842,400	442,600	3×M501GAC
MPCP1(M501JAC)	664,000	<5,625	<5,332	>64.0	450,300	213,700	1×M501JAC
MPCP2(M501JAC)	1,332,000	<5,608	<5,315	>64.2	900,600	431,400	2×M501JAC

7. ガスタービン機種別の燃料消費量

GT 機種	カタログ性能		水素		天然ガス		CO ₂ 排出量
	ISO 定格出力 (kW)	熱効率 %-LHV	単位:ton/hour	単位:Nm³/hour	単位:ton/hour	単位:Nm³/hour	単位:g/kWh
50Hz / 60Hz							
H-25	41,030	36.2	4	45,000	9	12,000	550
50Hz							
H-100	116,450	38.3	10	112,000	24	30,000	520
M701F	385,000	41.9	28	312,000	72	90,000	470
M701JAC	448,000	44.0	31	345,000	79	99,000	460
M701JAC	574,000	43.4	40	445,000	103	128,000	450
60Hz							
H-100	105,780	38.2	9	101,000	22	28,000	520
M501GAC	283,000	40.0	22	245,000	55	69,000	500
M501JAC	453,000	44.0	31	345,000	80	100,000	450

・大気温度15度ベース(ISO標準)
・水素100%燃時の燃料消費量は天然ガス燃き時の性能をベースに試算しております。

8. 水素と天然ガスの混焼：体積割合と熱量割合の関係



9. 水素製造プロセス

	水素の俗称	起源・製造方法	三菱重工グループ関連製品・技術
カーボンフリー水素	グリーン	再生電力 → 電解 H ₂ O → H ₂ + ½O ₂	風車 水電解装置 (SOEC, AEM) [※]
	ピンク	核熱 → 熱分解・電解 CH ₄ → 2H ₂ + C	高温ガス炉
	ターコイズ	化石燃料 → 熱分解 CH ₄ → 2H ₂ + C	メタン熱分解技術
	ブルー	化石燃料 → 改質 & CO ₂ 回収 CH ₄ + 2H ₂ O → 4H ₂ + CO ₂	天然ガス改質装置 石炭ガス化炉 CO ₂ 回収装置
旧来型水素 (CO ₂ 排出)	グレー	化石燃料 → 改質 (CO ₂ 大気放出) CH ₄ + 2H ₂ O → 4H ₂ + CO ₂	天然ガス改質装置 石炭ガス化炉

※: SOEC = Solid Oxide Electrolysis Cell
AEM = Anion Exchange Membrane



なぜ無色透明の水素がターコイズ？

上記の表のとおりカーボンフリー水素は、その起源・製造方法によって色分けされて呼ばれています。ターコイズ水素は、化石燃料由来とはいえ製造過程で温暖化の原因となるCO₂を発生しないため、ブルーではあるけど、CO₂フリーのグリーンなので、間をとってターコイズと称しているわけです。今、注目のトレンドカラー！



どんな水素の輸送・貯蔵方法があるの？

主に、高圧圧縮(最も一般的)、金属を使用(輸送・貯蔵効率が高い)、他物質への変換(軽量・コンパクトに貯蔵可能)、パイプラインを利用(大量に安定輸送が可能)するという水素の輸送・貯蔵の方法があります。とは言え、それぞれ異なる課題を抱えているため、水素社会の早期実現に向けて鋭意研究中です。

10. 代表的なグリーン水素製造方法の特徴

方式	アルカリ水電解 (AEL)	プロトン交換膜水電解 (PEM)	アニオン交換膜水電解 (AEM)	高温水蒸気電解 (SOEC)	
模式図				(一般) 平板型 	(三菱重工) 円筒型
効率 ^{※1}	52-70%	55-75%	49-70% (~75%) ^{※4}	74-85%	(90%~) ^{※4}
金属材料	ニッケル、ステンレス等	貴金属、チタン等	ニッケル、ステンレス等	還元側: Ni系など 酸化側: 超耐熱銅・セラミック	
相対コスト ^{※2}	1	高 (サプライチェーン確保も必要)	1	1	
レスポンス(応答特性)	速	速	速	遅	
敷地面積	1	1/10(本体)	1/10(本体)	1	

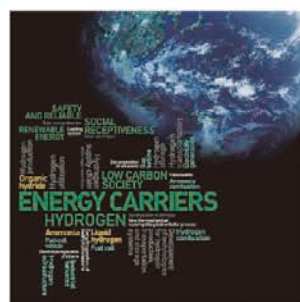
AEL: Alkaline water Electrolysis, PEM: Proton Exchange Membrane water electrolysis, AEM: Anion Exchange Membrane water electrolysis, SOEC: Solid Oxide Electrolysis Cell, YSZ: Yttria Stabilized Zirconia

※1: 文献値 “Carbonomics”

※2: AELのコストを1とした場合の相対比較

※3: 膜・電極接合体

※4: 当社目標効率

CO₂を排出しないエネルギー(アンモニア)CO₂ Free Energy (Ammonia)

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⁽¹⁾

飯嶋 正樹^{*1}
Masaki Iijima

洲崎 誠^{*2}
Makoto Susaki

古市 裕之^{*3}
Hiroyuki Furuichi

米川 隆仁^{*4}
Takahito Yonekawa

仙波 範明^{*4}
Noriaki Senba

長安 弘貢^{*5}
Hiromitsu Nagayasu

パリ協定を守るためには今世紀後半には CO₂ の排出をゼロ化することが求められており、言い換えると CO₂ を排出しない燃料(CO₂ フリー燃料)が必要になると考えられる。その中でアンモニアはポータブルな燃料として運びやすく天然ガスから容易に製造できるとともに製造の際排出する CO₂ を回収貯留することで CO₂ フリー化を達成できる。アンモニアの製造の歴史は長く、現在世界的に比較的安価で流通しており、その直接燃焼による利用も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の研究で可能となりつつある。CO₂ フリー燃料が使用されるような制度が整備され温暖化対策として利用されることを期待したい。

1. はじめに

1) パリ協定と CO₂ 排出ゼロ目標

2015 年 12 月にパリ協定が採択された。パリ協定全体の目的として、世界の平均気温上昇を産業革命前と比較して 2℃未満に抑えることが掲げられた。そして、特に気候変動に脆弱な国々への配慮から、1.5℃以内に抑えることを目指すとしている。

そのための長期目標として、今世紀後半に、世界全体の温室効果ガス排出量を、生態系が吸収できる範囲に納める目標が掲げられた。これは、人間活動による温室効果ガスの排出量を実質的にゼロにしていく目標である。

パリ協定を守るためにはいずれにしてもあらゆる分野における CO₂ 排出削減や今世紀後半には CO₂ 排出量ゼロ化、さらにはネガティブエミッションと呼ばれる大気中の CO₂ を削減する手法の導入も必要になるとされている。

2) CO₂ フリー燃料の必要性

近年太陽光や風力などの再生可能エネルギーの導入が進み、今後さらに電力の分野において再生可能エネルギーの比率は増加することになるが、将来的には再生可能エネルギーで賄えない時間帯での対応や電力の負荷調整機能、また再生可能エネルギーの利用が難しい一般産業の熱源や、輸送用途など CO₂ 回収貯留で対応できない分野において CO₂ を排出しない燃料のニーズは多岐にわたる。

我が国では WE-NET 計画以来水素エネルギーの利用の研究が推進されてきたが、最近ではエネルギーセキュリティの目的よりはむしろ温暖化対策の目的で水素利用が検討されている。

水素の運搬手段として、液化水素、有機ハイドライド、アンモニアが検討され CO₂ を排出せず

*1 三菱重工エンジニアリング(株) CO₂・環境事業推進室 技師長

*2 三菱重工エンジニアリング(株) CO₂・環境事業推進室 室長

*3 三菱重工エンジニアリング(株) 計画部 部長

*4 三菱重工エンジニアリング(株) 計画部 グループ長

*5 総合研究所 主席プロジェクト統括

水素製造ができればあとはいかに経済的に水素を運搬し利用するかである。

いずれにしても、今後あらゆる分野で CO₂ を排出しない安価な燃料を提供することが求められるだろう。

3) SIP エネルギーキャリア

戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)の中の“エネルギーキャリア”として研究開発に取り組んでいるのは、液化水素、有機ハイドライド、アンモニアの3方式である。その生産(石油・天然ガス・石炭からの生産と再生可能エネルギーからの生産)、輸送及び利用(水素としての利用とアンモニアの場合直接利用)について研究開発が 2014 年度から5年計画で進められて来た。化石燃料である石油、天然ガス、石炭から水素やアンモニアなどの CO₂ フリー燃料を生産する場合 CO₂ 回収貯留(CCS)が不可欠となる。一方再生可能エネルギーにより生産した電力や高温の熱を用い水の電気分解により水素の安価な製造についても試験研究が行われた。図1⁽¹⁾にエネルギーキャリアにおいて行われている試験研究の全体像を示す。

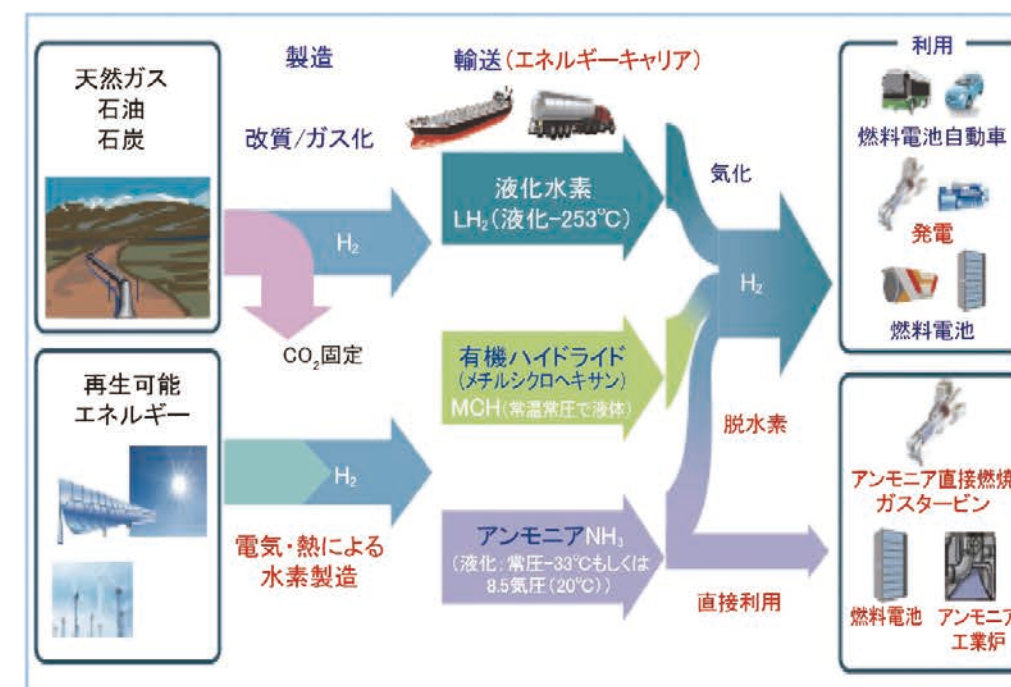


図1 エネルギーキャリアで行なわれている試験研究

2. SIP エネルギーキャリアの取り組み

1) 燃料としての試験研究

エネルギーキャリアの試験研究⁽¹⁾は 2014 年度から 2018 年度までの5年計画で下記の試験研究を行うとともに、水素を運ぶ3方式の評価を行っている。

- 高温太陽熱供給システム
- 熱利用水素製造
- CO₂フリー水素利用アンモニア合成システム開発
- アンモニア水素ステーション基盤技術
- アンモニア燃料電池
- アンモニア直接燃焼
- 有機ハイドライドを用いた水素供給技術開発
- 液体水素用ローディングアームシステム開発とルールの整備
- 水素エンジン技術開発
- エネルギーキャリアの安全性評価

これらの水素製造や水素、アンモニアの利用研究を行うことで、水素の輸送方式も含めどのような方式が好ましいかを評価すること、また我が国が世界に先駆け、利用技術開発を行うことを目指して行われた。これらの試験研究の中で5年間の研究の後半ではアンモニアの直接利用研究に力をいれ、アンモニア直接燃焼としてガスタービン、レシプロエンジン、ボイラ、工業用炉及びアンモニアの固体酸化燃料電池(SOFC)における直接利用などの試験研究が行われた。2017年7月には中国電力の石炭火力発電所においてアンモニアの混焼試験が行われた。これらの試験研究において、アンモニアの直接燃焼において実用化の見通しが得られたことはエネルギーキャリアの試験研究の大きな成果であった。

2) 3方式の評価

我が国の場合、従来燃料である石油・天然ガス・石炭資源に乏しく、再生可能エネルギーを最大限導入しても、我が国のエネルギー全てをまかなうことは不可能とされており、どうしても海外のエネルギー源からCO₂フリー燃料を生産し輸入する必要がある。燃料のような大量の物質を輸送する場合、液体又はガス体の場合ではパイプラインが最も経済的であるが、長距離や海洋をまたいで輸送する場合液化して船輸送することになる。

水素の場合その液化温度が-253℃と極低温となるため、水素の液化動力が非常に大きく、また-253℃を保つのも容易ではない。

アンモニアの場合-33℃常圧下で液体となる。一方8.5気圧に加圧すれば常温でも液体であり取扱いがしやすく、直接燃料として利用できる利点がある。有機ハイドライドはトルエンに水素を添加してメチルシクロヘキサンとし常温、常圧下で輸送できるがメチルシクロヘキサンから水素を取り出す際に多大なエネルギーを必要とする。

これら理・化学的性質と現在世界的に流通している事から SIP の“エネルギーキャリア”においては、アンモニアがCO₂フリー燃料として重要な役割を果たすことが可能との結論になった。

表1^②に圧縮水素、液体水素、有機ハイドライドとアンモニアの物理的性質を比較している。

表1 NH₃の物性と主なエネルギーキャリア

	水素含有率 (重量%)	水素密度 (kg・H ₂ /m ³)	沸点 (℃)	水素放出 エンタルピー 変化* (kJ/molH ₂)	その他の特性**
アンモニア	17.8	121	-33.4	30.6	急性毒性、腐食性
メチルシクロヘキサン (MCH)	6.16	47.3	101	67.5	引火性、刺激性
液化水素	100	70.8	-253	0.899	強引火性、強可燃性、爆発性
圧縮水素 (350 気圧)	100	23.2	—	—	
圧縮水素 (700 気圧)	100	39.6	—	—	

*:MCHトルエン(C₇H₈) (分子量92)とMCH(C₇H₁₄) (分子量98)の水素の差により水素を運ぶ



* 水素放出エンタルピー変化:水素を取り出す際に必要となるエネルギー。

** “その他の特性”の記載事項は、MSDSの“危険有害性情報”のサマリーから引用。各物質の正確な特性については、それぞれの物質のMSDSを参照のこと。

3) アンモニアの有効性

アンモニアはその物理的性質がLPGとほぼ同じことから、LPG船を用いても輸送することが可能である。現在世界のアンモニア生産量は1.8億トン/年で、その80%程度が尿素等の肥料として用いられているが、約10%の1,800万トン/年が国際的に流通している。

アンモニアの現時点(2018年10月)の米国メキシコ湾岸の価格はFOBベースで250US\$/Tとなっている。この価格は1ミリオンBTU(MMBTU)換算で14.3US\$となり、原油価格

70US\$/BBL(13.5 US\$/MMBTU)(WTI 価格)と比較しても発熱量当り同等かやや高い程度の価格となっている。

アンモニアは常温で加圧すればLPGと同じように液体となることから、ポータブルとなる燃料としてその最終利用の際に使いやすい。

特に輸送用燃料として使用する場合、常温での運搬が容易であることは非常に大きなメリットとなる。しかしながらアンモニアの毒性や漏れた場合の臭いの問題から一般家庭の近くでの使用には問題があると考えられ、発電所や工場及び貨物船等管理された場所での利用が中心となるのではないかとと思われる。

3. CO₂フリーアンモニアの製造方法

現在アンモニアの製造方法としては、ドイツ人のハーバーとボッシュが1913年に実用化した鉄触媒を用い水素と窒素からの合成方法が現在でも使用されており、三菱重工エンジニアリング(株)(以下、当社)は1958年以降数多くのアンモニアプラントを世界各国に納入している。このアンモニア合成は現在では天然ガスを原料に用いる方法が一般的である。

天然ガスをスチームとともにスチームリフォーマで加熱しながら触媒を通すことで水素とCOに変換しそのあと空気を注入し、さらに空気中の酸素で燃焼させながらメタン分の残りを水素とCOに変換し同時に窒素を供給する。COは触媒を用い水蒸気を添加してCO₂と水素に変換し、その後CO₂を分離することで水素と窒素を生成し、この水素と窒素とからアンモニアを合成する。

図2は標準的アンモニアプラントである2000T/D規模のプラントにおけるCO₂のバランスを示す。アンモニアプラントにおいて約2/3のCO₂がプロセス系から分離されており、スチームリフォーマや補助ボイラの排ガスから約1/3のCO₂が排出されているが、この燃焼排ガスからCO₂を回収しプロセス系からのCO₂と共に地中貯留またはEnhanced Oil Recovery (EOR)に利用すればこのアンモニアプラントはCO₂フリーとなり、CO₂を排出しないアンモニア燃料システムを構築することができる。

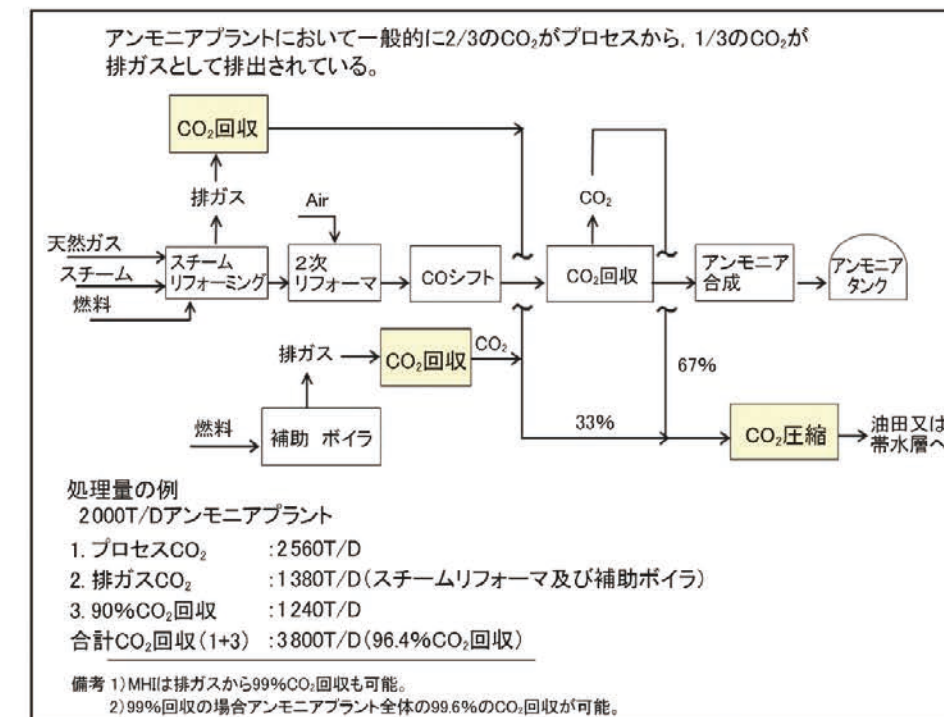


図2 アンモニアプラントのCO₂バランス

当社は米国テキサス州の石炭火力に世界最大のCO₂回収装置を2017年1月に納入し、回収したCO₂はウエストランチ油田においてEOR用に用いられ、原油の回収と共にCO₂は油層に貯

留されている。図3は石炭火力からのCO₂回収装置の全景を示す。



NRG Energy, Inc. 及び JX Nippon Oil & Gas Exploration Corporation 社
Petra Nova プロジェクトの写真

図3 石炭火力からのCO₂回収装置

また同じく米国アラバマ州において Southern Company と共同して実施している石炭火力からのCO₂回収と回収したCO₂の帯水層貯留実証試験(SECARB^{※1}による実施)を2011年から行っている。図4はCO₂回収貯留プロジェクトの全体構成図を示す。このようにCO₂の回収貯留は商用ベースで行われており、アンモニアプラント排ガスからのCO₂回収と合わせCO₂フリーアンモニアの製造に関する技術は既に確立されている。

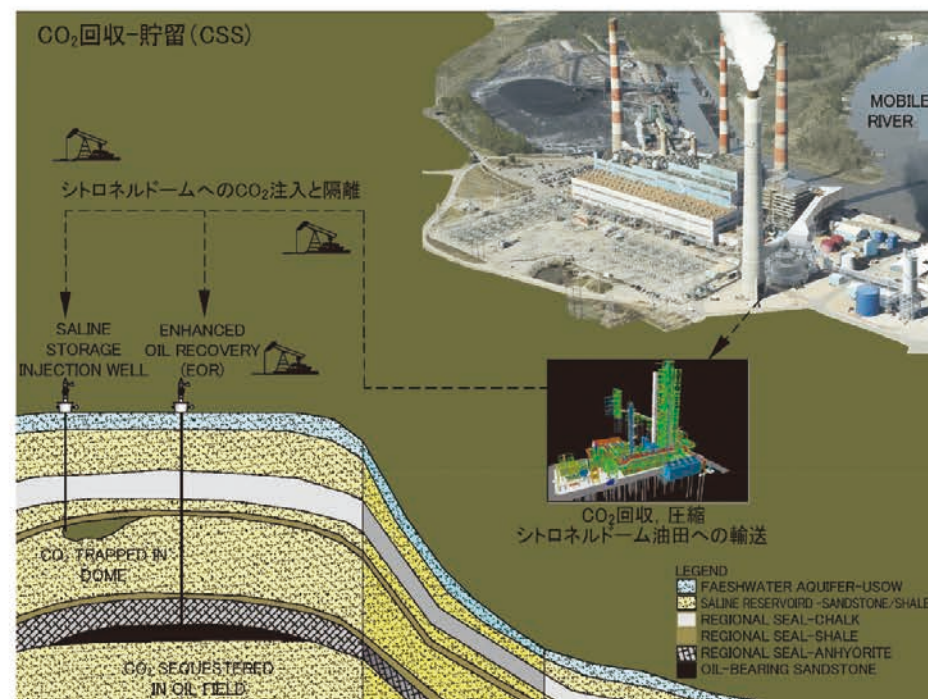


図4 CO₂回収・貯留プロジェクト全体像

プロセス系からのCO₂はそのまま貯留でき、また当社が実績の多い燃焼排ガスからのCO₂回収技術(関西電力(株)との共同開発によるKM CDR Process^{※2})を用い燃焼排ガスからのCO₂を90%回収し、プロセス系からのCO₂と合わせ貯留することでアンモニアを製造する際に発生する96%のCO₂を貯留することができる。もし排ガスから99%回収した場合99.6%のCO₂が貯留でき、ほぼ完全にCO₂を大気に排出せずアンモニアが製造できることになる。

この方法とは別に再生可能エネルギーから製造した電力を用い、水の電気分解と空気中の窒

素を分離してアンモニアを合成する方法もCO₂を排出しないアンモニア合成法である。現在世界各地で安価な天然ガスが多量に生産されているため天然ガスから合成されるアンモニアの方が再生可能エネルギーから生産する方式よりはるかに安価に生産できる。

※1 米国 Southeast Regional Carbon Sequestration Partnership

※2 KM CDR Process[®]は、三菱重工エンジニアリング(株)の日本、米国、欧州連合(EUTM)、ノルウェー、オーストラリア及び中国における登録商標です。

4. アンモニアの燃料としての利用の歴史

アンモニアを燃料として使用することに違和感を覚える方もおられると思うが、第2次世界大戦中にベルギーにおいて100台のアンモニアバスが使われていた。

ディーゼル燃料が手に入らないため、必要に迫られてアンモニアを燃料として使用していたのである。

また、1959年～1968年にかけて米国空軍のX-15有人ジェット戦闘機がアンモニアを燃料として高度107960m マッハ6.7を記録している。10万メートルの高度では気温が非常に低く低温でも固まらないアンモニアが燃料として選ばれたものと考えられる。

5. まとめ

CO₂フリー燃料の目的はあくまでも温暖化対策であり、パリ協定に基づく+2℃目標またはそれ以下を目指す場合、2050年時点で世界のCO₂排出量を1/2に、また先進国は80%削減しなければならず、そのためにはあらゆるところで使えるCO₂フリー燃料の重要性が増してくると思われる。当社はCO₂フリーアンモニアの製造技術を既に商用的に確立しており、いつでも供給できる状態にある。

しかしながらアンモニアは発熱量ベースで石炭やLNGより高く、原油と比較しても高いが、アンモニアをCO₂フリー燃料として広く用いられるためには、導入の初期には何がしかの政策的インセンティブが不可欠になると思われる。

本報の作成に当たって“エネルギーキャリア”の研究開発を推進されて来られた戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)の中の“エネルギーキャリア”の関係者の方々に感謝申し上げます。

参考文献

- (1) 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)パンフレット、エネルギーキャリア 内閣府、国立研究開発法人 科学技術振興機構
http://www.jst.go.jp/sip/pdf/SIP_energycarriers2016.pdf
- (2) アンモニア:エネルギーキャリアとしての可能性(その1)(その2) 塩沢文朗 国際環境経済研究所 主席研究員“水素エネルギーシステム”一般財団法人 水素エネルギー協会 2017年 Vol.42
<http://ieei.or.jp/2017/05/expl170523/>
<http://ieei.or.jp/2017/05/expl170525/>

活動紹介一覧

Nature

国際的な総合科学ジャーナル「Nature」に三菱重工の水素ガスタービンに関する記事が掲載されました。電子版も公開されていますので、ぜひご覧ください。



<https://www.nature.com/articles/d42473-020-00545-7>

学研 まんがでよくわかるシリーズ

三菱重工は、株式会社学研プラスが刊行する小学生向け学習まんが「学研 まんがでよくわかるシリーズ」の特別編「SDGsのひみつ⑦ エネルギーをみんなに そしてクリーンに」を同社と共同で制作しました。非売品のため電子版が無料公開されていますので、ぜひご覧ください。



学研まんがひみつ文庫
<https://bpub.jp/gakken-himitsu/item/510000003964>