

日本機械学会 技術ロードマップ委員会  
2024年度 第2回セミナー 「環境とエネルギーの未来共存の展望」

# 三菱重工業のエネルギー分野における 脱炭素化技術の最前線

2024年8月2日

三菱重工業株式会社  
エナジードメイン 技術戦略室  
技監・主幹技師 工学博士  
日本機械学会フェロー

小阪 健一郎

- 1. 三菱重工の概要**
- 2. 三菱重工のエナジートランジションと水素戦略**
- 3. 高砂水素パーク・長崎カーボンニュートラルパーク**
- 4. 三菱重工のアンモニア・水素発電技術**
- 5. 水素製造技術開発への取組み**

## 1. 三菱重工の概要

## 2. 三菱重工のエナジートランジションと水素戦略

## 3. 高砂水素パーク・長崎カーボンニュートラルパーク

## 4. 三菱重工のアンモニア・水素発電技術

## 5. 水素製造技術開発への取組み

|                 |  |
|-----------------|--|
| 社名              | 三菱重工業株式会社<br>Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. |
| 創立年月日           | 1884年（明治17年）7月7日                               |
| 設立年月日           | 1950年（昭和25年）1月11日                              |
| 取締役社長 CEO       | 泉澤 清次  |
| 資本金             | 2,656億円（2024年3月30日現在）                          |
| 社員数             | 連結：77,697人（2024年3月31日時点）                       |
|                 | 単独：22,538人（2024年3月31日現在）                       |
| 総合研究所           | 1  |
| 国内事業所・工場        | 12   |
| 国内支社            | 8  |
| 海外事務所           | 3  |
| 三菱重工グループ会社数（連結） | 国内 65社（2024年3月31日時点）                           |
|                 | 海外 192社（2024年3月31日時点）                          |
| 受注高（連結/IFRS）    | 66,840億円（2023年4月1日～2024年3月31日）                 |
| 売上収益（連結/IFRS）   | 46,571億円（2023年4月1日～2024年3月31日）                 |

グローバルなネットワーク展開を加速して世界とともに発展・成長を目指します。

## 82

### 欧州・中東・アフリカ

|           |    |
|-----------|----|
| 海外事務所     | 1  |
| 地域統括・拠点会社 | 4  |
| グループ会社    | 77 |

## 38

### 中国

|           |    |
|-----------|----|
| 海外事務所     | 1  |
| 地域統括・拠点会社 | 3  |
| グループ会社    | 34 |

## 173

### 日本

|        |     |
|--------|-----|
| 本社     | 1   |
| 支社     | 8   |
| 総合研究所  | 1   |
| 事業所・工場 | 12  |
| グループ会社 | 151 |

## 78

### 北中米

|           |    |
|-----------|----|
| 地域統括・拠点会社 | 2  |
| グループ会社    | 76 |

## 10

### インド

|        |   |
|--------|---|
| 地域統括会社 | 1 |
| グループ会社 | 9 |

## 48

### アジア

|           |    |
|-----------|----|
| 海外事務所     | 3  |
| 地域統括・拠点会社 | 4  |
| グループ会社    | 41 |

## 14

### 南米

|        |    |
|--------|----|
| 地域統括会社 | 1  |
| グループ会社 | 13 |

#### 国内支社

北海道支社  
東北支社  
北陸支社  
中部支社  
関西支社  
中国支社  
四国支社  
九州支社

#### 海外事務所

中東事務所  
台北事務所  
ハノイ事務所  
ホーチミン事務所  
クアラルンプール事務所

#### 地域統括会社

Mitsubishi Heavy Industries America, Inc.  
Mitsubishi Industrias Pesadas do Brasil Ltda.  
Mitsubishi Heavy Industries EMEA, Ltd.  
Mitsubishi Heavy Industries (China) Co., Ltd.  
Mitsubishi Heavy Industries India Private Ltd.  
Mitsubishi Heavy Industries Asia Pacific Pte. Ltd.

#### 地域拠点会社

Mitsubishi Heavy Industries Mexicana, S.A. de C.V.  
Mitsubishi Heavy Industries France S.A.S.  
MHI Russia LLC  
MHI Technologies S.A.E  
Mitsubishi Heavy Industries (Shanghai) Co., Ltd.  
Mitsubishi Heavy Industries, (Hong Kong) Ltd.  
Mitsubishi Heavy Industries (Thailand) Ltd.  
PT Mitsubishi Heavy Industries Indonesia  
Mitsubishi Heavy Industries Australia, Pty. Ltd.

グループ会社数は連結会社、非連結会社、関連会社の合計です（2023年3月31日現在）  
国内支社、海外事務所、国内事業所および工場は、三菱重工業(株)の拠点を掲載しています



広島製作所

- エナジードメイン
- プラント・インフラドメイン
- 機械システムセグメント
- 民間機セグメント



呉工場

- エナジードメイン



三原製作所

- エンジニアリングセグメント
- 機械システムセグメント



相模原製作所

- 物流・冷熱・ドライブシステムドメイン
- 防衛・宇宙セグメント



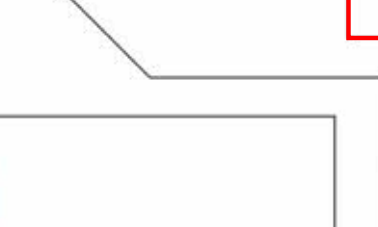
日立工場

- エナジードメイン



下関造船所

- プラント・インフラドメイン
- 機械システムセグメント
- 防衛・宇宙セグメント
- 民間機セグメント



横浜製作所

- エナジードメイン
- 防衛・宇宙セグメント



長崎造船所

- エナジードメイン
- プラント・インフラドメイン
- 防衛・宇宙セグメント



高砂製作所

- エナジードメイン
- 原子カセグメント



神戸造船所

- 原子カセグメント
- 物流・冷熱・ドライブシステムドメイン
- 機械システムセグメント
- 防衛・宇宙セグメント
- 民間機セグメント



名古屋航空宇宙システム製作所

- 防衛・宇宙セグメント
- 民間機セグメント



名古屋誘導推進システム製作所

- エナジードメイン
- 防衛・宇宙セグメント

三菱重工グループが持つさまざまな技術やソリューションとのシナジーを発揮し、お客様の価値を創出

## ソリューションのシナジー

技術のシナジー

### プラント・インフラ



アンモニア/メタノールプラント

CO<sub>2</sub>回収

LNG船

### エネルギー



パワー事業

ジェットエンジン

コンプレッサ

### 航空・防衛・宇宙



水素燃料ロケット

民間航空機

サイバーセキュリティシステム

## 三菱重工グループの研究開発 技術基盤



化学



製造



機械



伝熱



振動



燃焼



電気・応用物理



流体



強度・構造

## 発電システム



## 船用機械



## 航空機用エンジン



## コンプレッサ



## 発電システム

### ■三菱重工株式会社

1. ガスタービン・コンバインドサイクル発電プラント (GTCC) / 東北電力(株)上越火力発電所1号機
2. スチームパワープラント/ (株)JERA 常陸那珂火力発電所 1号機、2号機
3. 地熱発電プラント / レイキャビクエナジー社ヘッドリスヘイディ発電所 (アイスランド)
4. 排煙脱硫装置 / コジェニツェ火力発電所 (ポーランド)
5. 航空転用ガスタービン「FT8® MOBILEPAC®」
6. M501J形ガスタービン
7. 原子力発電用54インチ低圧蒸気タービンロータ
8. 1,028 MVA 火力用タービン発電機
9. 水素ガスタービン
10. 制御システム

### ■TURBODEN S.P.A.

11. 有機ランキンサイクル (ORC) 発電システム

## 船用機械

### ■三菱重工マリンマシナリ株式会社

12. MET 過給機
13. 補助ボイラ
14. フィンスタビライザ
15. 舵取機

## 航空機用エンジン

### ■三菱重工航空エンジン株式会社

16. V2500シリーズ (ターボファン)
17. Trent シリーズ (ターボファン)
18. PW1000Gシリーズ (ターボファン)
19. MRO事業
20. TS1 (ターボシャフト) 出力 : 884SHP 観測ヘリコプタ OH-1用

## コンプレッサ

### ■三菱重工コンプレッサ株式会社

21. エチレンプラント用分解ガスコンプレッサ・蒸気タービン
22. 洋上浮体設備用メインガスコンプレッサトレン
23. PDHプラント用プロセスガスコンプレッサ・蒸気タービン
24. 蒸気タービンロータ



1. 三菱重工の概要

**2. 三菱重工のエネルギートランジションと水素戦略**

3. 高砂水素パーク・長崎カーボンニュートラルパーク

4. 三菱重工のアンモニア・水素発電技術

5. 水素製造技術開発への取組み

## MISSION NET ZERO

三菱重工グループは、CO<sub>2</sub>削減に貢献できる当社グループの製品・技術・サービス、世界中のパートナーとの新しいソリューション、イノベーション等により、グローバル社会全体のNet Zero実現に貢献していきます。

そのために、私たちは、グループ員一人ひとりが、「Mission Net Zero」を胸に、NET ZEROの未来に向けて行動していきます。



| 目標年   | 当社グループのCO <sub>2</sub> 排出削減<br>Scope1,2 | バリューチェーン全体を通じた社会への貢献<br>Scope 3 + CCUS削減貢献 |
|-------|---|--|
| 2030年 | ▲50% (2014年比)                           | ▲50% (2019年比)                              |
| 2040年 | Net Zero                                | Net Zero                                   |

※ Scope1,2：算出基準は、GHGプロトコルに準じる。

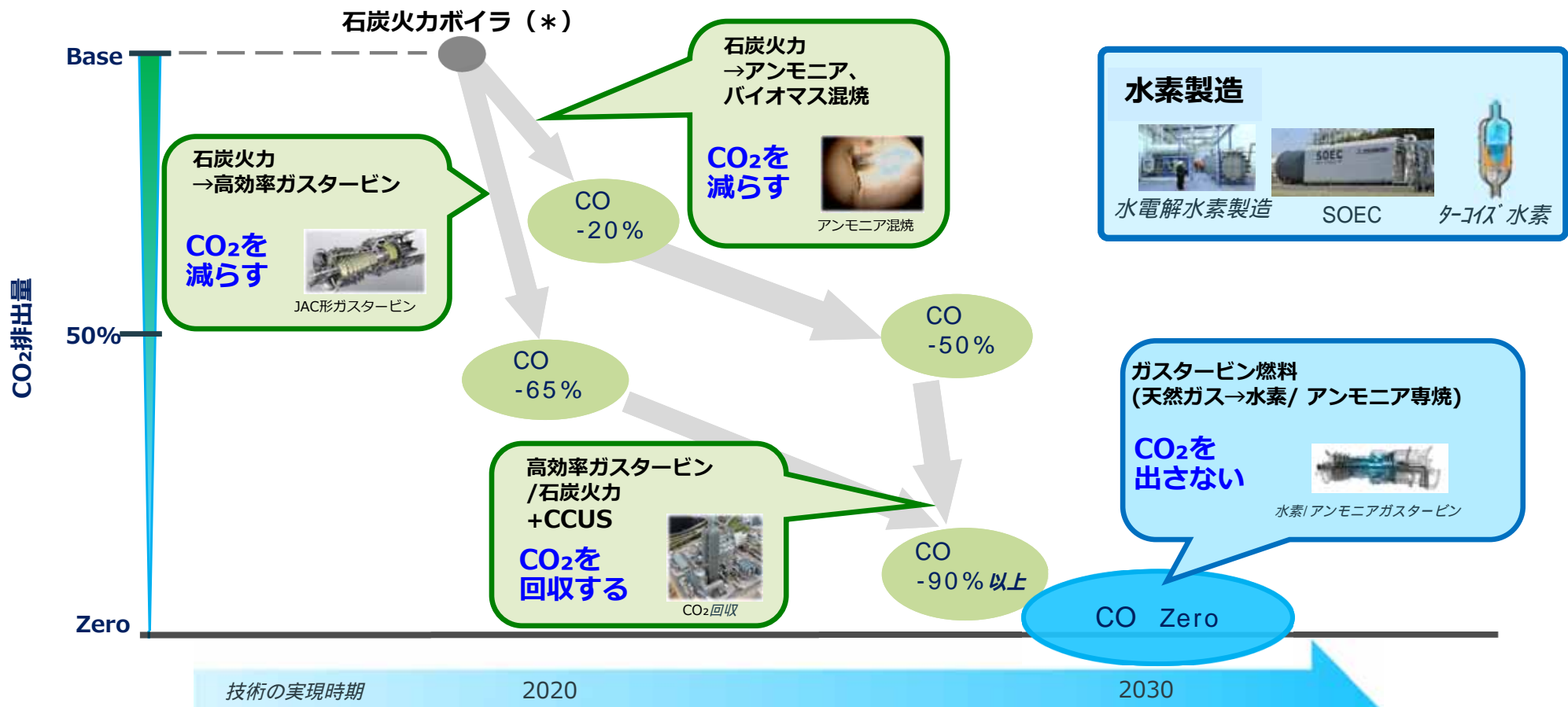
Scope3：算出基準は、GHGプロトコルに準じる。但しこれに独自指標のCCUSによる削減貢献分を加味。

GHG：温室効果ガス (Greenhouse Gas)

CCUS：Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage

※当社ホームページ、「2040年カーボンニュートラル宣言」、<https://www.mhi.com/jp/company/aboutmhi/carbon-neutral>

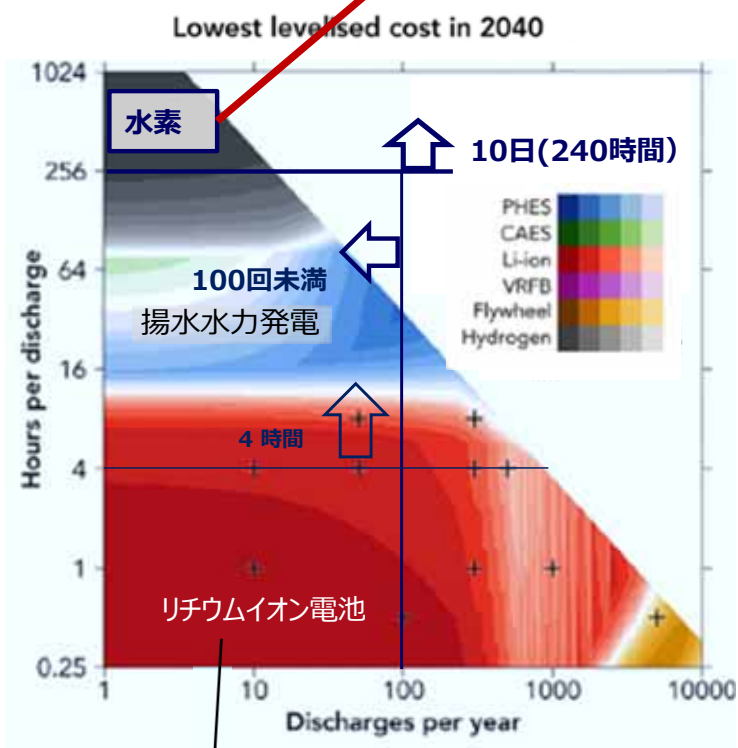
- 火力発電の脱炭素化を実現するには、CO<sub>2</sub>を「減らす」・「回収する」・「出さない」の道筋がある
- 脱炭素電源である原子力の最大活用によりCO<sub>2</sub>の排出量を削減する道筋もある
- 本プレゼンテーションでは、水素発電と水素製造については説明します。



(\*) : 亜臨界圧石炭焼きボイラCO<sub>2</sub>排出量を基準

## ■ 最適なカーボンニュートラル技術は国によって異なり、これらをカバーする技術を高砂と長崎で開発中

数日の貯蔵 → 水素・アンモニア



数時間の電力貯蔵  
= 二次電池電力貯蔵システム

Figure 1: 国ごとの最も安価な新エネルギー資源 (2020年)

Source: BloombergNEF.



| 上図エリア   | ①   | ②   | ③   |
|---------|---|---|---|
| 地域特性    | 再エネコストが低い広範囲の地域<br>↓<br>安い再エネを水素化貯蔵し、発電・工業用に地産地消するのが経済的 | 日本/韓国など再エネ乏しく高コスト<br>↓<br>安く輸送でき発電できる蓄電メディアが経済的 | 東南アジアなど日照風況に恵まれず、安い化石燃料に依存<br>↓<br>石炭、天然ガス既存技術の“減”炭素化 |
| グリーン水素  | ◎   | ×   | ×   |
| ターコイズ水素 | ○   | ◎   | ◎   |
| アンモニア   | ×   | ○   | ○   |

出典： Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies Imperial Univ 2019/1 Report

1. 三菱重工の概要

2. 三菱重工のエナジートランジションと水素戦略

**3. 高砂水素パーク・長崎カーボンニュートラルパーク**

4. 三菱重工のアンモニア・水素発電技術

5. 水素製造技術開発への取組み

## ■ 長崎/高砂(兵庫県)で要素開発を行い、高砂で実証後、商用化予定

### ① 要素を開発 (長崎/高砂)



長崎工場



高砂工場 / 長崎県



高砂製作所/兵庫県



<長崎地区>



<高砂地区>



### ② これらの要素を実発電設備で実証 (高砂)



Located in Takasago Machinery Works

TAKASAGO  
HYDROGEN  
PARK

<高砂水素パーク実証>



③ バイオマスガス化  
(SAF)

② 水素製造技術

ターコイズ水素

SOEC

AEM



④ CO<sub>2</sub>回収技術

① アンモニア燃烧技術

## Carbon Neutral Park NAGASAKI





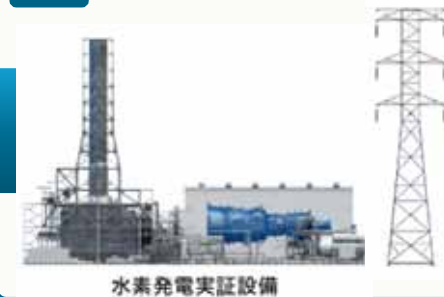
## 1 水素製造



## 2 水素貯蔵



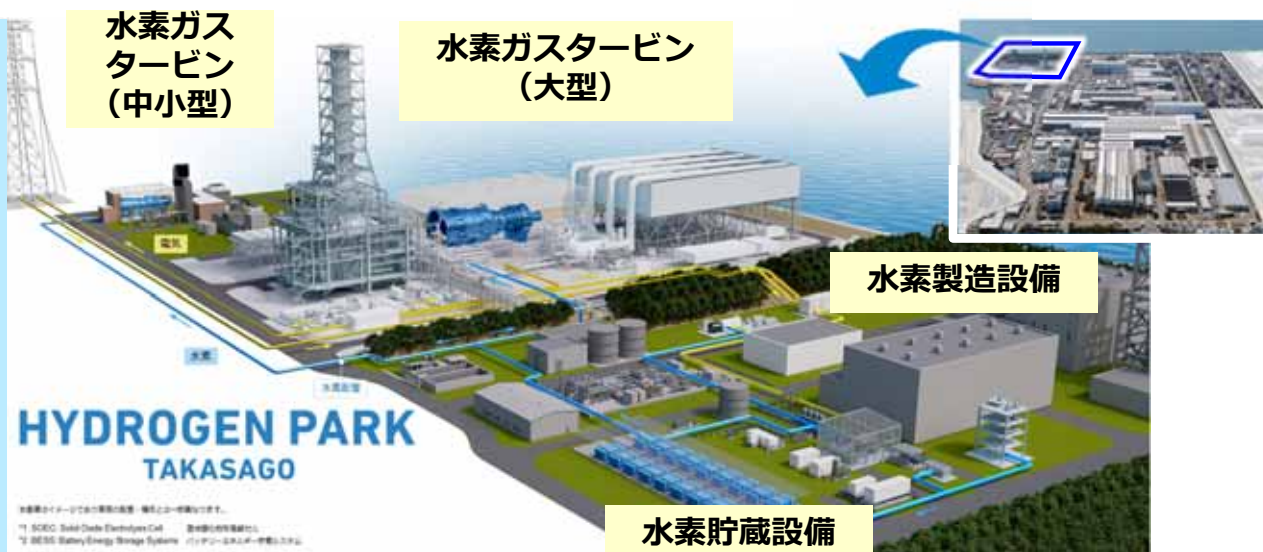
## 3 水素利用



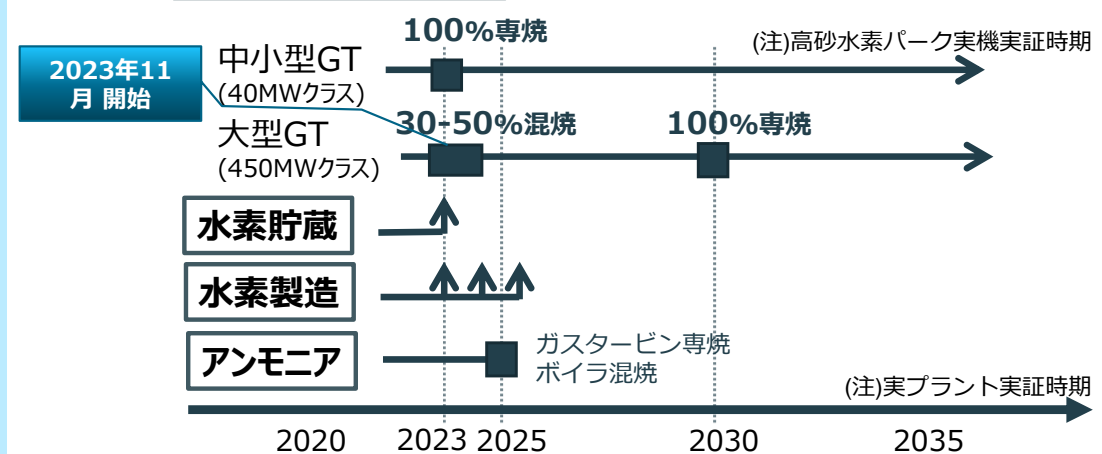
## 2023年度に稼働開始

水素製造から発電までの技術を一貫して検証

- **既存実証拠点に水素製造・貯蔵設備を追設**  
自社で確実な実証を通じ製品信頼性を向上、水電解、ターコイズ水素、SOEC等、次世代水素製造技術の試験・実証を順次実施
- **水素ガスタービン実機実証**  
大型ガスタービンで30%混焼、中小型では100%専焼の製品を2025年の商用化に向けて検証
- **エネルギー・インフラ技術と水素 関連技術のさらなる融合・進化**  
水素を軸にさまざまな産業を結びつけることで持続可能な社会を形成する「水素エコシステム」の確立に向けた一歩



### 水素焚きガスタービン



## 3 水素利用（発電）

中型GT 40MW



H-25ガスタービン



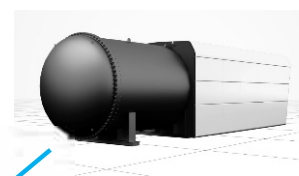
大型GTCC 566MW



M501JACガスタービン



## 1 多様な水素製造技術



高温水蒸気電解 (SOEC)



アルカリ水電解 【稼働開始】



メタン熱分解 (ターコイズ水素)



AEM水電解

## 2 水素貯蔵

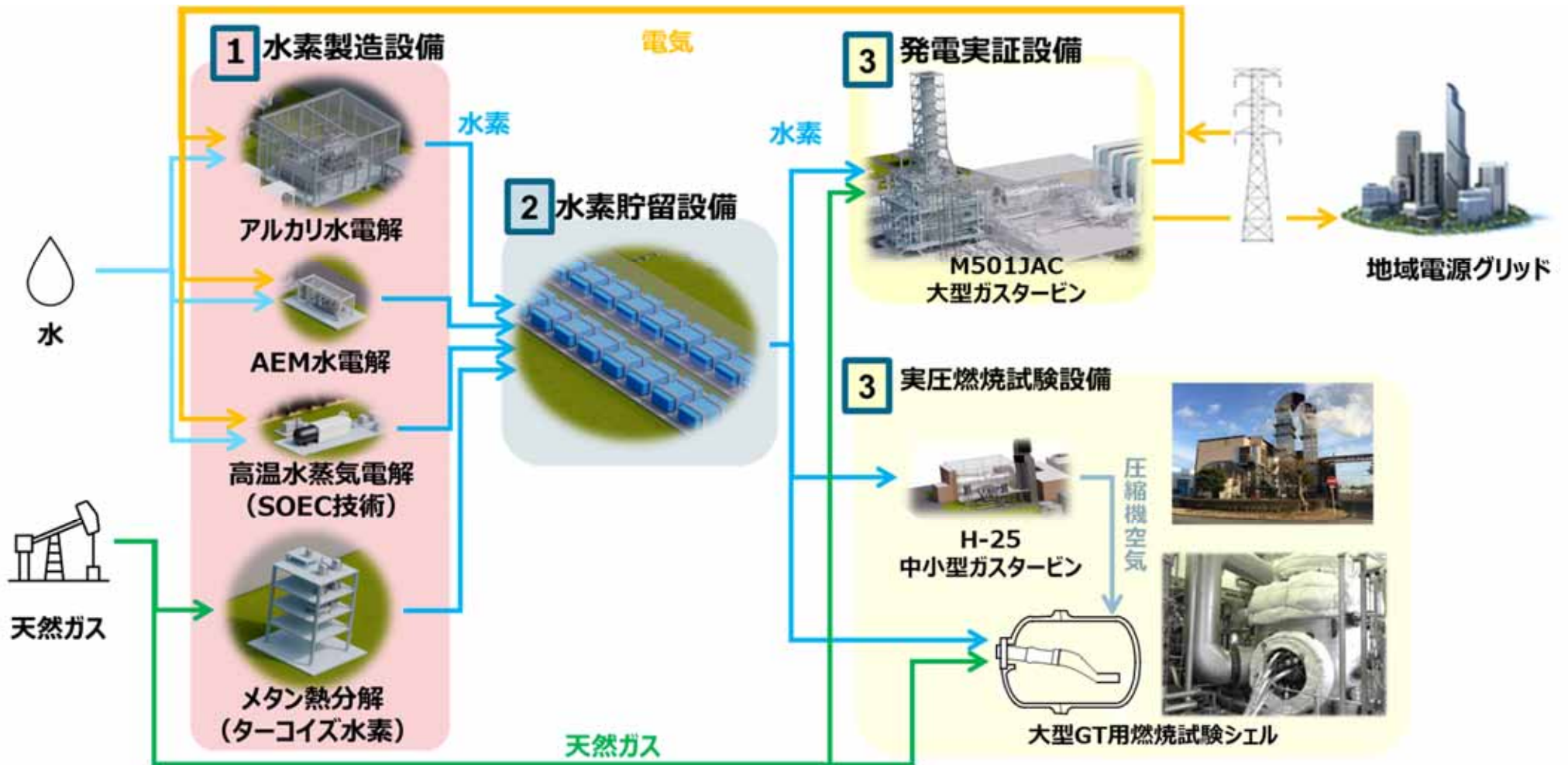


水素ポンプ



2023年8月

AEM : Anion Exchange Membrane アニオン交換膜  
SOEC: Solid Oxide Electrolysis Cell 固体酸化物形水電解

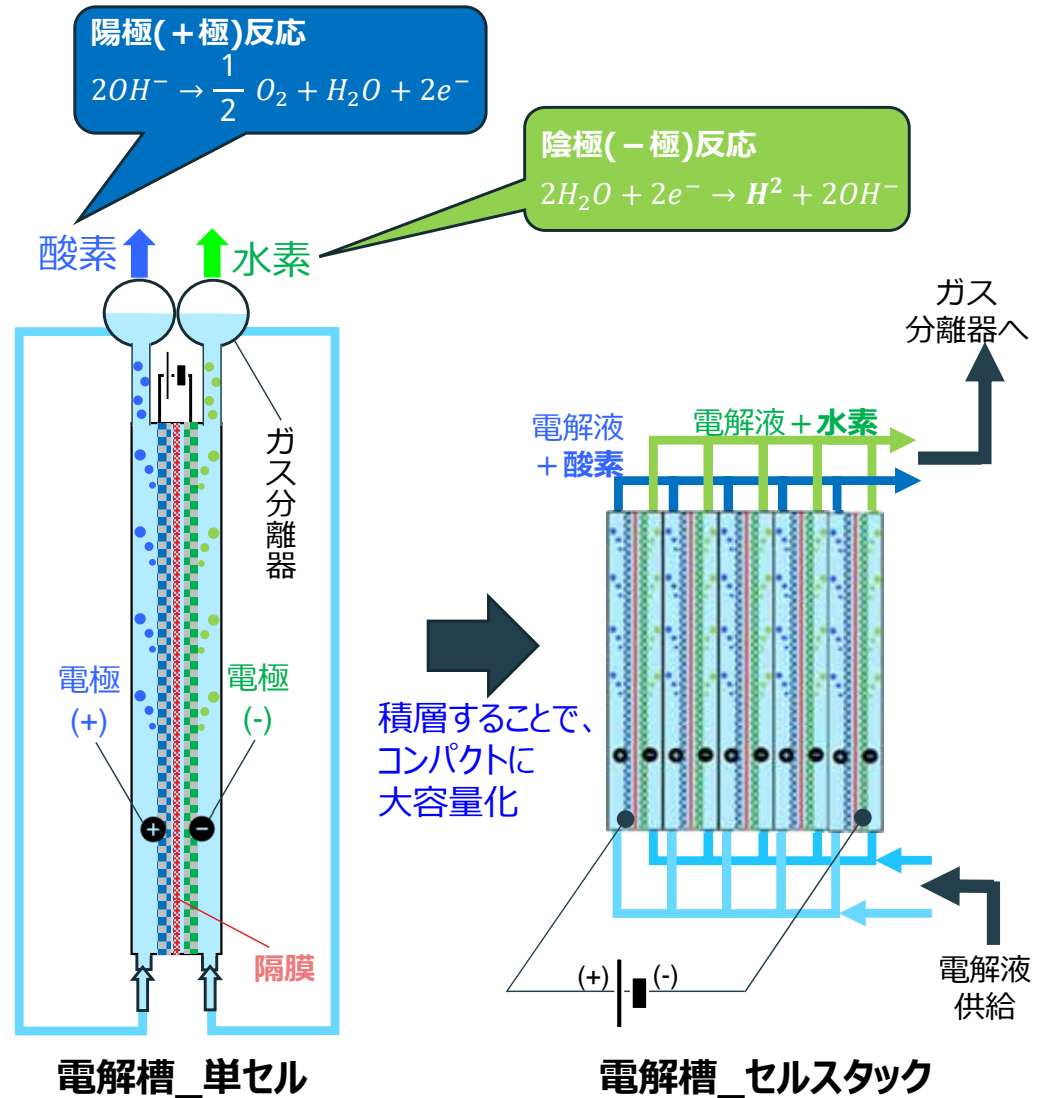
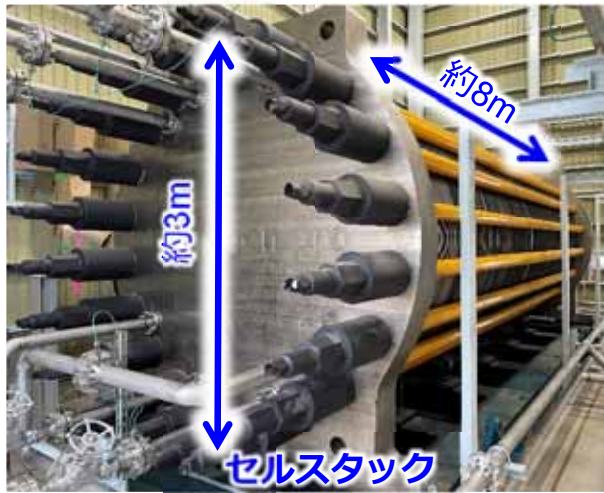


AEM : Anion Exchange Membrane アニオン交換膜  
 SOEC: Solid Oxide Electrolysis Cell 固体酸化物形水電解

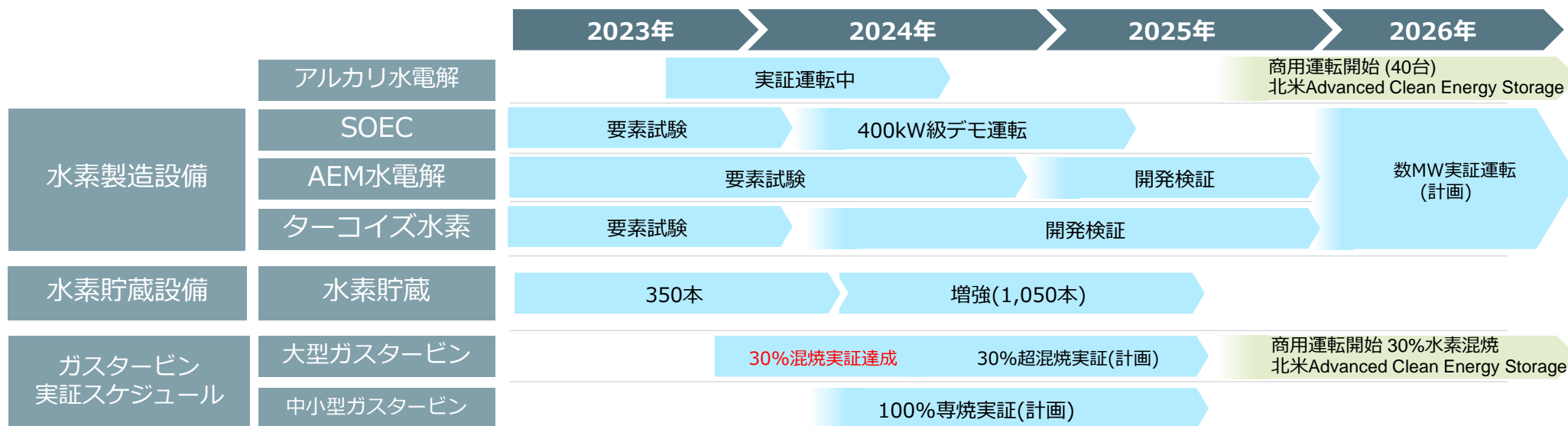
### 水素使用量※

|                     |                     |         |
|---------------------|---------------------|---------|
| 大型<br>GTCC(M501JAC) | GT453MW、<br>CC664MW | 31ton/h |
| 中小型GTCC(H-25)       | GT41MW、CC60MW       | 4ton/h  |

- 水素製造量 (1.5MPaG×50℃) : 1,100 Nm<sup>3</sup>/h
- 電源容量 (直流) : 5.1 MW (DC400V)
- 電解槽 (セルスタック) : 1 台 (424 cell stack)
- ガス分離器 : 1 台



- 2023,24年 : アルカリ水電解装置、SOECの稼働開始  
その後順次AEM,ターコイズ水素を実証予定
- 2023年11月 : 大型ガスタービン(45万kW)にて30%水素混焼実証を完了
- 2024年春 : 中小型ガスタービン(4万kW)にて100%水素専焼試験実施中
- 2024年 : 水素貯蔵設備を117,000Nm<sup>3</sup>(1050本)に増強予定



## アルカリ水電解

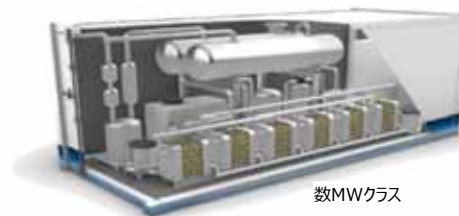


5.5MWクラス

## 高温水蒸気電解



## AEM水電解



数MWクラス

## ターコイズ水素



数MWクラス

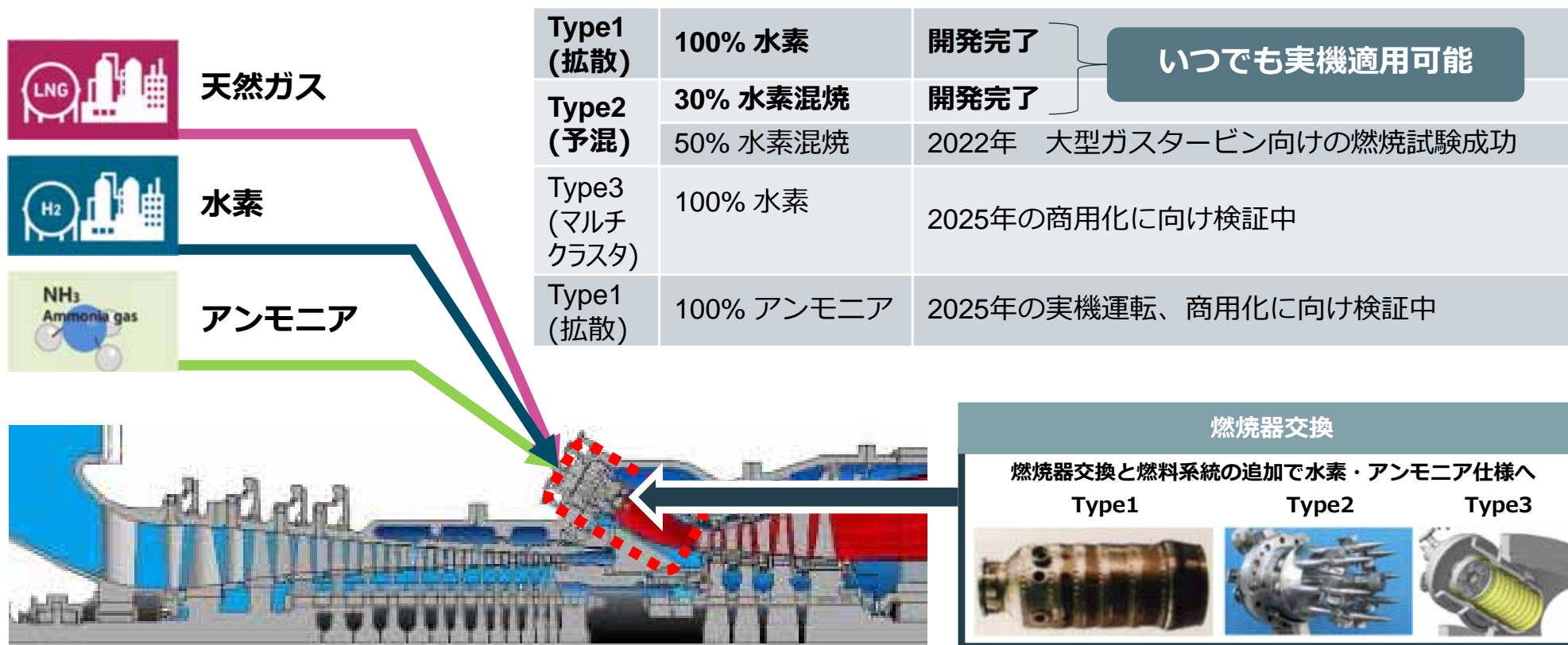
1. 三菱重工の概要
2. 三菱重工のエナジートランジションと水素戦略
3. 高砂水素パーク・長崎カーボンニュートラルパーク
- 4. 三菱重工のアンモニア・水素発電技術**
5. 水素製造技術開発への取組み

- **ガスタービン**：現在燃焼器開発中で、2025年以降の実機運転、商用化を目指す
- **ボイラ**：現在バーナー開発中で、2030年代前半の商用運転開始を目途に、50%以上の高混焼技術を開発中。





■ 天然ガス焼きガスタービンの燃焼器を交換、燃料系統の追加のみで、水素焼き/アンモニア焼きガスタービンが実現でき、脱炭素を達成できる



# 水素ガスタービン燃焼器 開発状況

|      | 燃焼方式  | 低NO <sub>x</sub> 技術          | 性能                                 | 水素含有量  | 開発・運用状況  |  |  |                   |
|------|---|------------------------------|------------------------------------|--|--|--|--|-------------------|
|      |   |                              |                                    |  | 1970   | 2020   | 2025                                       | 2030年             |
| 既存技術 | <b>Type1</b><br>拡散燃焼<br>     | N <sub>2</sub> 希釈<br>水/水蒸気添加 | 燃焼温度<br>1200℃～<br>1400℃級<br>熱効率50% |   | 1970<br>20MW小型機で製油所副生 水素焚きなどで<br>50年以上、350万時間以上の実績<br>水素82%(1989-) |  |  |                   |
|      | <b>Type2</b><br>予混合燃焼<br>    | ドライ式<br>低NO <sub>x</sub>     | 燃焼温度<br>1650℃級<br>熱効率64%           |   | 天然ガス予混合<br>水素30%混焼<br>燃焼試験<br>*NEDO PJ                             | 2018<br>水素50%混焼<br>燃焼試験<br>水素20%混焼<br>実証運転<br>(商用プラント) | 2022<br>2023<br>水素30%混焼<br>実証運転<br>(第二T地点) | 水素30～50%混焼<br>商用化 |
| 開発中  | <b>Type3</b><br>マルチクラスタ<br> | ドライ式<br>低NO <sub>x</sub>     | 燃焼温度<br>1650℃級<br>熱効率64%           |  |  | 水素80%まで<br>検証完了  | 水素100%<br>実証                               | 水素100%<br>商用化     |

|       |                      |                                 |   |            |
|-------|----------------------|---------------------------------|---|------------|
| Type1 | 100% 水素              | 開発完了                            | ➡ | いつでも実機適用可能 |
| Type2 | 30% 水素混焼<br>50% 水素混焼 | 開発完了                            |   |            |
| Type3 | 100% 水素              | 2022年 燃焼試験を成功<br>2025年以降 開発完了予定 |   |            |

## ■ 2022年6月2日に米国McDonough GT6B号機において、DLN\*燃焼器を装備したM501Gガスタービンの水素20%混合燃料による実機運転に成功しました。



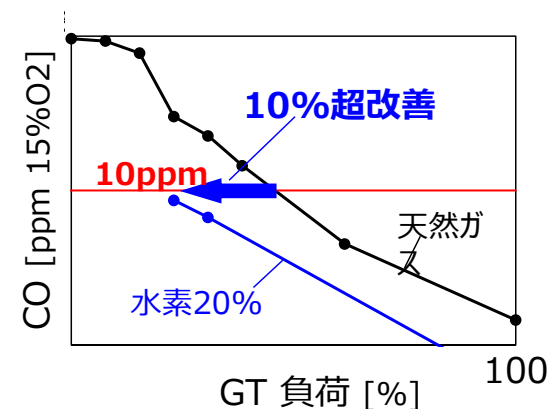
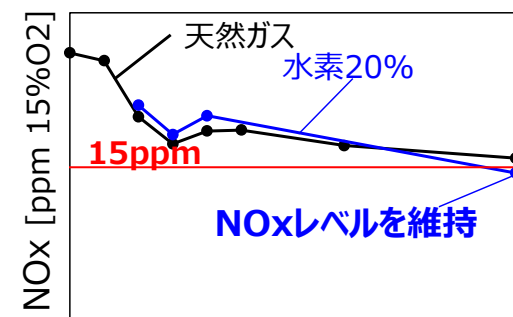
| Component Name | Normalized Mole % |
|----------------|-------------------|
| Hydrogen       | 20.9192           |



- 全負荷での水素混合比率20%超達成
- 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%超下げる効果を確認  
水素混焼により燃焼効率改善しCO低減
- NOxの増加なし  
燃焼振動低下により調整裕度拡大
- 水素遮断ロジックの検証成功  
タービン入口温度の上昇なく水素遮断



DLN\* 燃焼器  
\* Dry Low NOx



## ■ 2023年11月20日 Type2のDry Low NOx燃焼器を装着した大型最新M501JACガスタービンで水素30%混焼成功。大型ハイエンドガスタービンとしては世界初

- 水素製造 → 貯蔵 → 発電(制御・運転) を統合的に検証
- CO<sub>2</sub> 排出量を10%削減 \*1



水素燃料30%混焼運転実施中の中央制御室

### PRESS INFORMATION

## 最新鋭のJAC形ガスタービンによる水素燃料30%混焼運転に成功 高砂水素パーク内のGTCC実証発電設備（第二T地点）において

2023-11-30



- ◆ 最新鋭1,650℃級M501JAC形ガスタービンで、部分負荷から100%負荷まで水素混合燃料で実施
- ◆ 都市ガスに水素燃料を30%混合し、「ドライ式低NOx燃焼器」で低NOxかつ安定燃焼を確認
- ◆ 高砂水素パークの活用により、水素の製造から利用（発電）まで一貫しての実証が可能に



<三菱重工  
プレスリリース  
>



高砂水素パーク内の水素製造・貯蔵設備およびGTCC実証発電設備（第二T地点）

\*1 天然ガス燃焼時と比較

**Hydrogen related projects**

**Ammonia related projects**

**Zero Carbon Humber (H2H Saltend)**

M701F, 1,200MW (3 CCGT)  
Hull, Humber, UK (after 2026)

**Magnum**

M701F, 440MW (1 CCGT out of 3 CCGT)  
Eemshaven, the Netherlands (TBD)

**Linkou Steam Power Plant**

NH<sub>3</sub> co-firing, 800MW×3units,  
New Taipei, Taiwan (FS)

**BLCP Steam Power Plant**

NH<sub>3</sub> co-firing, 700MW×2units,  
Map Ta Phut, Thailand (FS)

**Intermountain Power**

M501JAC, 840MW (2 CCGT)  
Delta, Utah, USA  
(30vol% H<sub>2</sub> firing in 2025, 100% firing in 2045)

**McDonough**

M501G, 2,520MW (3 CCGT)  
Smyrna, Georgia, USA  
20vol% hydrogen co-firing  
validated (in 2022)

**Meranti Power**

M701F, 340 MW x 2 (in 2025)

**Keppel Infrastructure**

M701JAC, 600 MW (in 2026)

**Sembcorp Industries**

M701JAC, 600 MW (in 2026)

**Keppel Data Center**

CCGT Singapore (TBD)

**EMA/ MPA**

Ammonia bunkering & power generation

**ADNOC**

MOU for Blue Hydrogen,  
Ammonia and CCS

**Advanced Clean Energy Storage**

Green Hydrogen Production and Storage  
Delta, Utah, USA (in 2025)

**Energy Decarbonization**

Decarbonizing Entergy' utilities Texas, USA  
M501JAC (2 CCGT) (in 2026)

**Port of Newcastle**

Under discussion to establish H2  
HUB and clean energy economy

**Keramasan CCGT Project**

H-25, 80MW (2 CCGT),

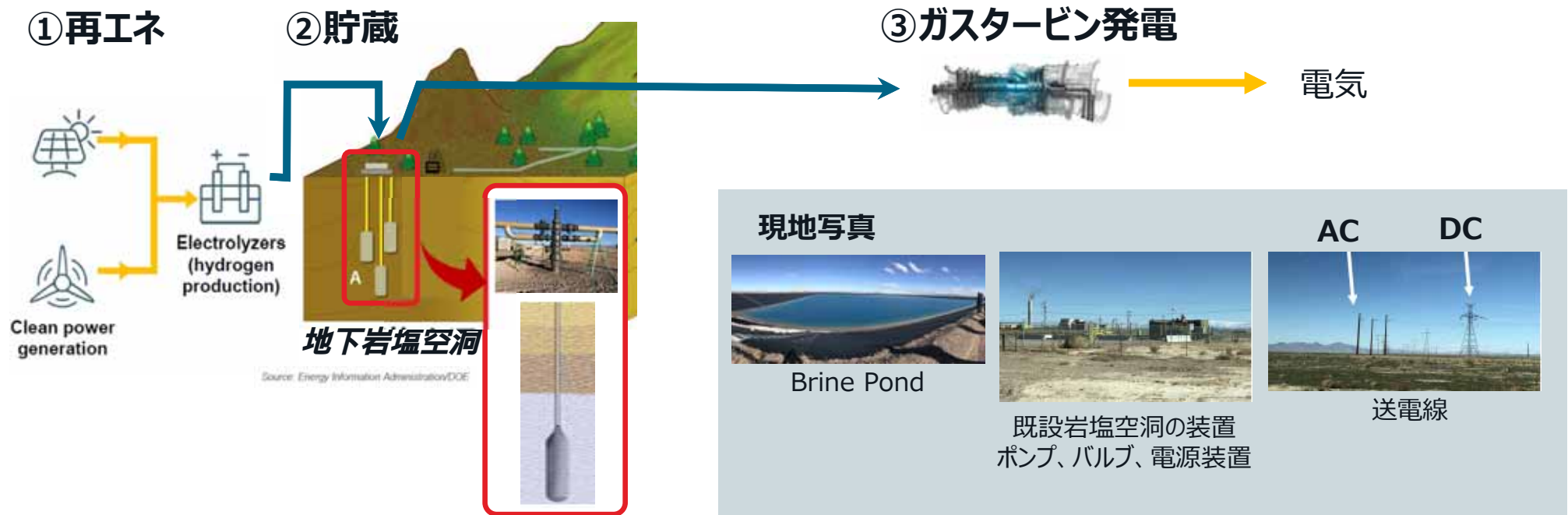
**Suralaya Steam Power Plant**

NH<sub>3</sub> co-firing, 600MW×3units,  
Cilegon, Indonesia (FS)

**Guacolda Steam Power Plant**

NH<sub>3</sub> co-firing, 150MW×5units,  
Atacama, Chile (FS)

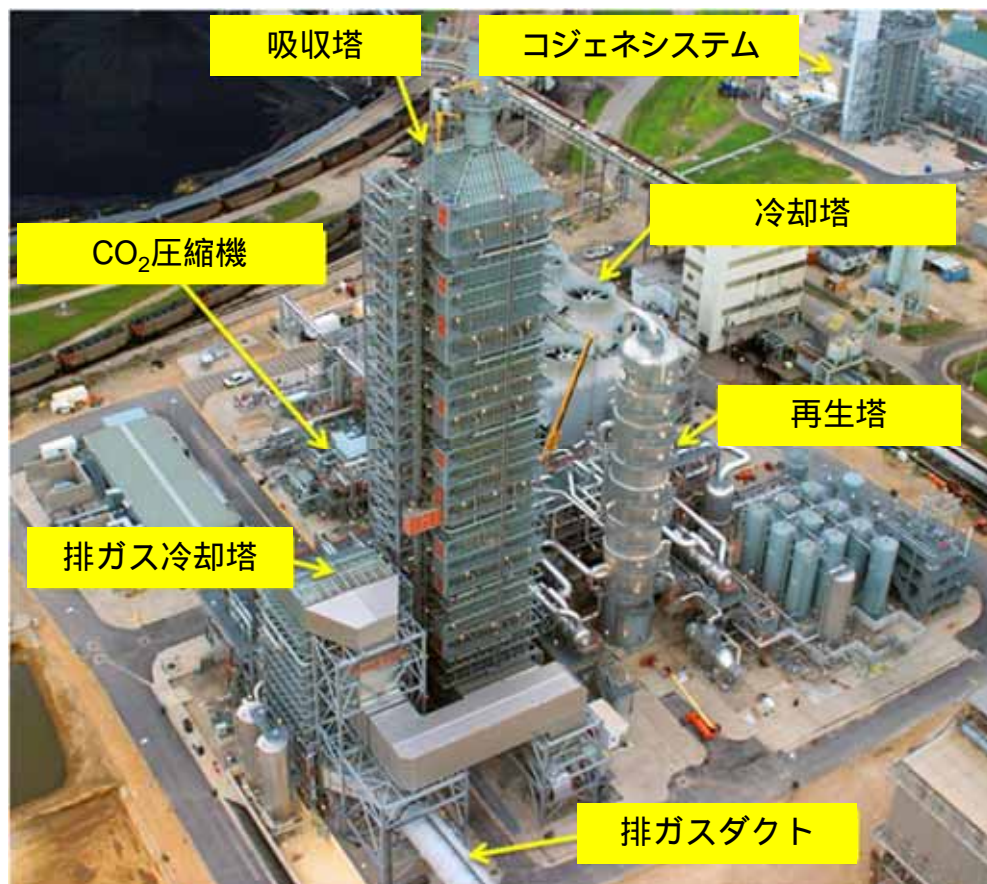
- ①西海岸の安価な再生電力で水電解によりグリーン水素製造
- ②北米に豊富に存在する地下岩塩空洞にそのグリーン水素を貯蔵
- ③電力必要時に岩塩空洞よりグリーン水素を取り出し、ガスタービンで発電



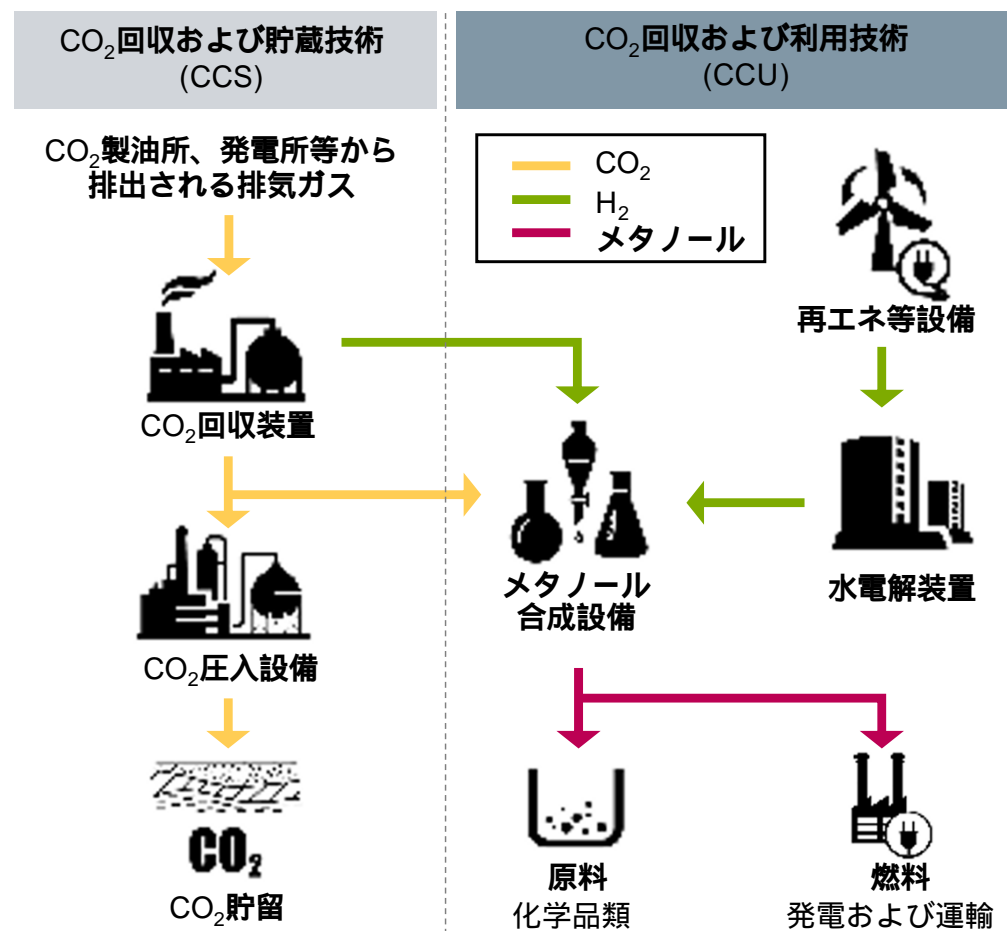
当社は水素焚きM501JAC形ガスタービン840MWを受注済。  
2025年に水素30%混焼 / 2045年までに100%専焼を計画

# CO<sub>2</sub>分離回収技術

- 三菱重工はCO<sub>2</sub>回収技術における世界のリーディングカンパニーとして、燃焼排ガスから高効率でCO<sub>2</sub>を回収する技術・設備を供給
- このCO<sub>2</sub>分離回収技術は、当社が関西電力殿と共に開発したアミンベースのCO<sub>2</sub>吸収液の化学反応を利用した「化学吸収法」でのプロセスAdvanced KM-CDR Process™を使用

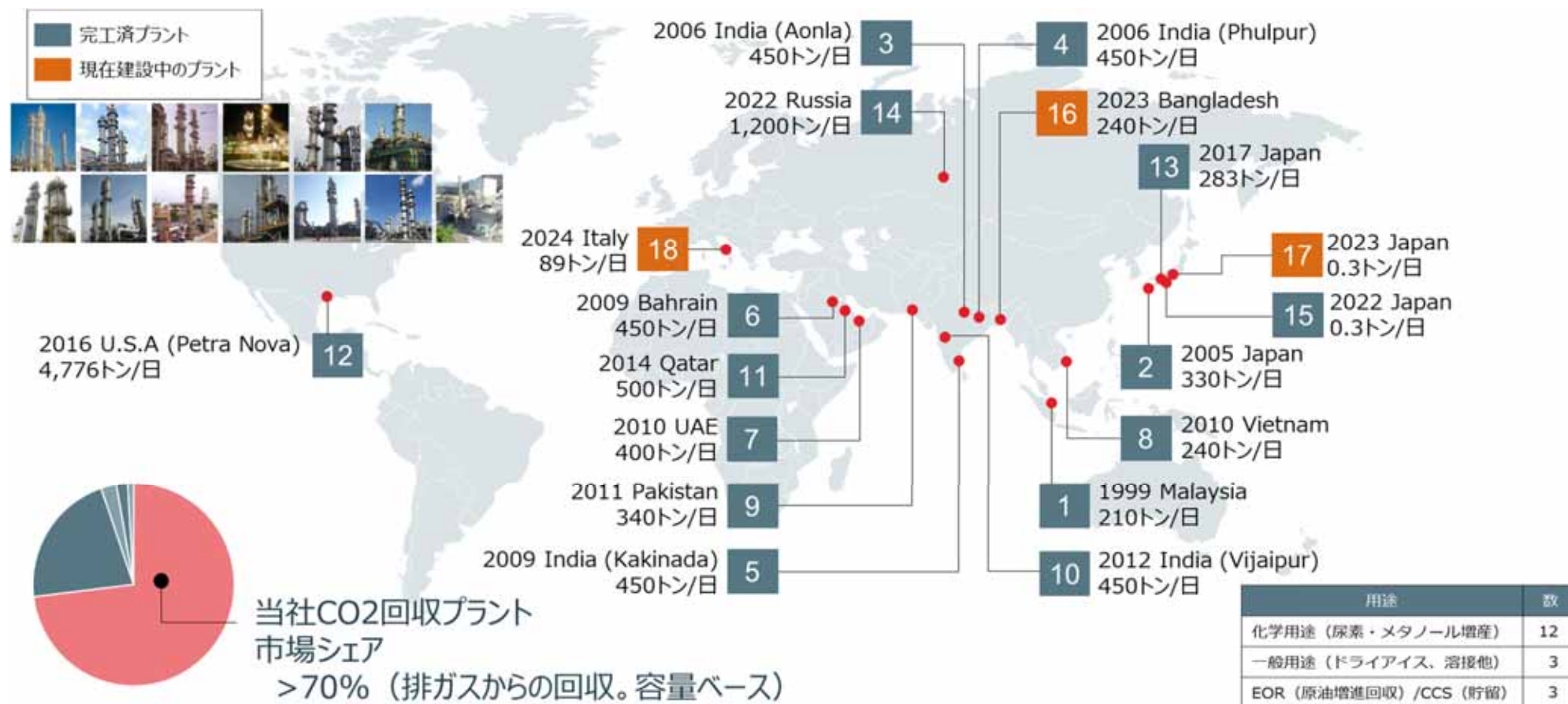


世界最大級CO<sub>2</sub>回収プラント  
商業運転：2016年～



# CO2分離回収技術 ～実績～

- 1999年のマレーシア向けプラントを初号機として世界で15プラントの納入し、現在3プラント建設中
- 世界最大のCO2回収プラント(米国 Petra Nova 向け) では、石炭焼きボイラーの排ガスから約4,776 ton/day (石炭焼き240MW相当) のCO2回収 (CO2回収率90%) を実現
- 2021年、新吸収液「KS-21™」を使用し、世界最高水準の99.8%の回収率を達成
- 世界最大のバイオマス発電所の英国/Drax社とBio Energy with Carbon Capture & Storage (BECCS) に向けた共同検証を推進





1. 三菱重工の概要

2. 三菱重工のエナジートランジションと水素戦略

3. 高砂水素パーク・長崎カーボンニュートラルパーク

4. 三菱重工のアンモニア・水素発電技術

**5. 水素製造技術開発への取組み**

- 2023,24年 : アルカリ水電解装置、SOECの稼働開始  
その後順次AEM,ターコイズ水素を実証予定
- 2023年11月 : 大型ガスタービン(45万kW)にて30%水素混焼実証を完了
- 2024年春 : 中小型ガスタービン(4万kW)にて100%水素専焼試験実施中
- 2024年 : 水素貯蔵設備を117,000Nm<sup>3</sup>(1050本)に増強予定



## アルカリ水電解

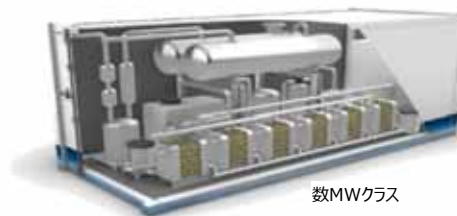


5.5MWクラス

## 高温水蒸気電解



## AEM水電解



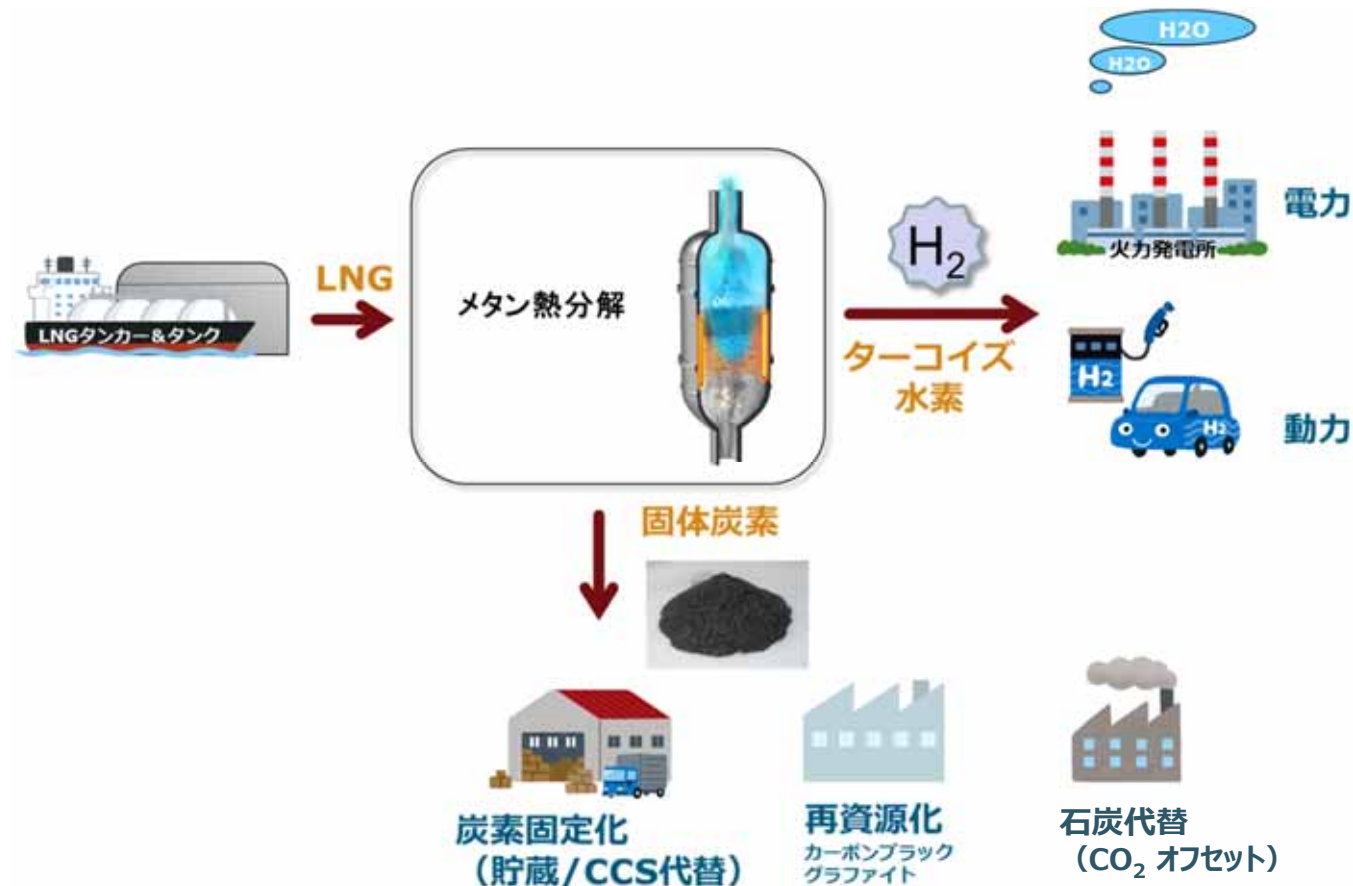
数MWクラス

## ターコイズ水素



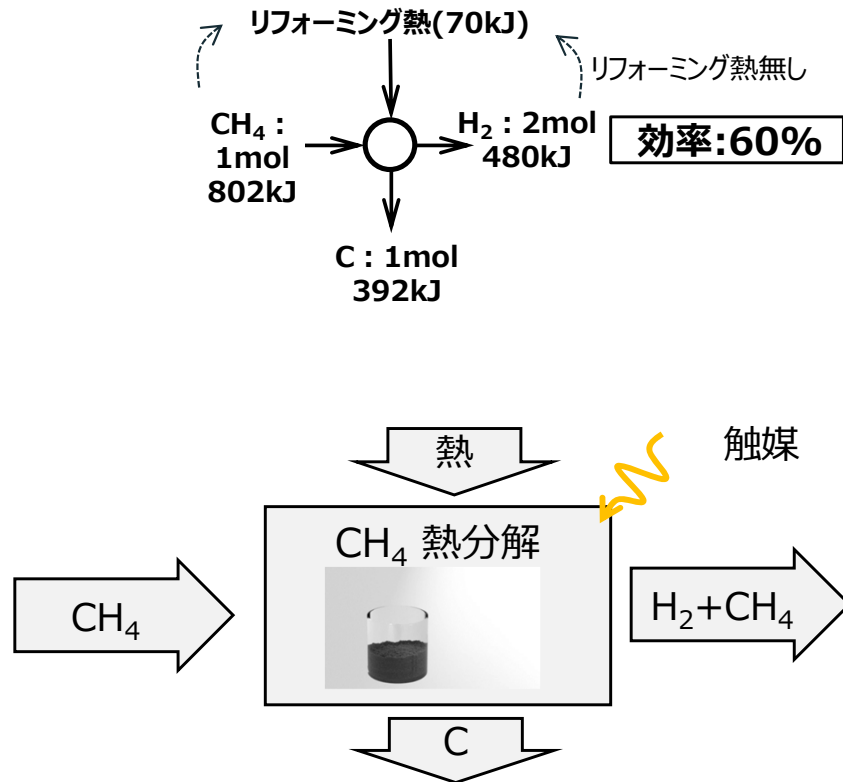
数MWクラス

- 既存の液体天然ガス (LNG) インフラを活用することで、大量かつ低コストのCO2フリーのH<sub>2</sub>を供給することができる。
- 副生成物となる固形炭素は処理が容易 (リサイクルも容易)。
- 再生可能エネルギー資源に恵まれず、回収したCO<sub>2</sub>を貯留する場所のない日本や東南アジアを中心に、世界中で適用可能。

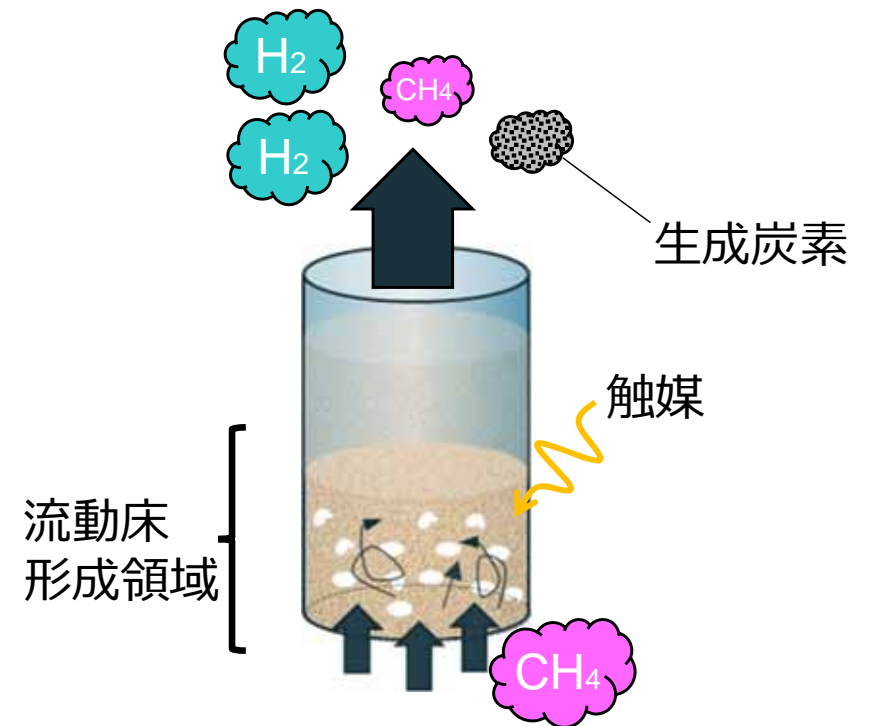


- 高温において特殊な触媒を用いてメタンを熱分解し、水素を生成、炭素は固体で回収できる。
- 熱量のある炭素を固体で回収するため、メタン燃焼と比較し、得られる熱量は理論値で60%となる。
- メタン熱分解反応を実現する大型の反応器型式として流動床タイプを選定し、検討中。

## 理論と反応



## 流動床反応器概要



- 触媒が流動化するように適切な流動条件を設定
- 加圧による反応器のコンパクト化が可能

ラボスケール機



流動床試験機



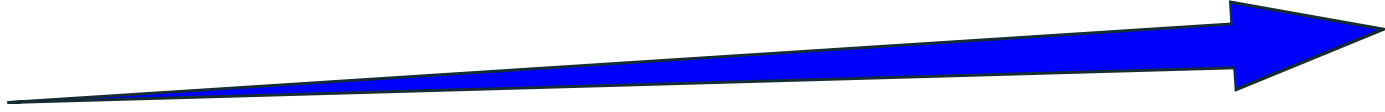
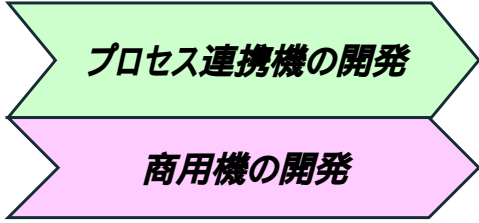
加圧流動床試験機



加圧流動床連続試験機



要素技術の開発



## ■ 要素試験装置および、連続式流動床試験装置で反応状況や適正条件のスクリーニング

要素試験装置と試験結果例

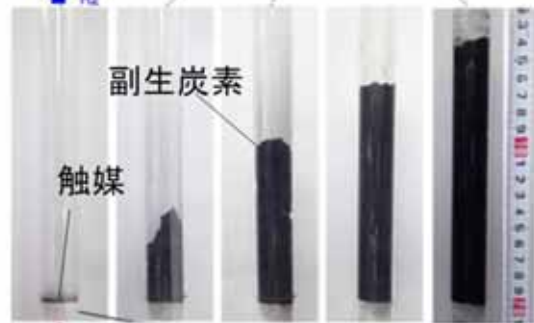
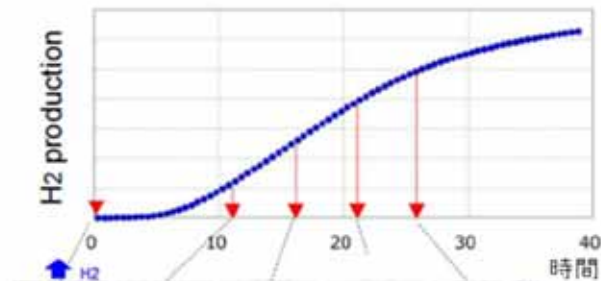
連続式試験装置と試験結果例



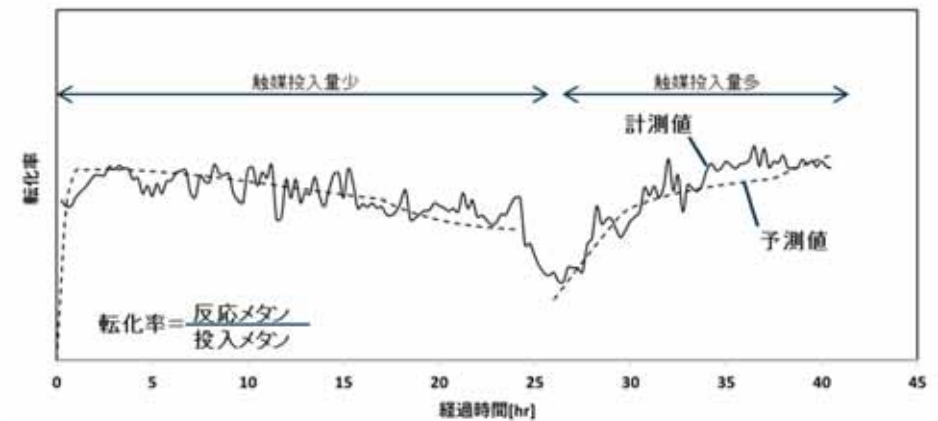
要素試験装置



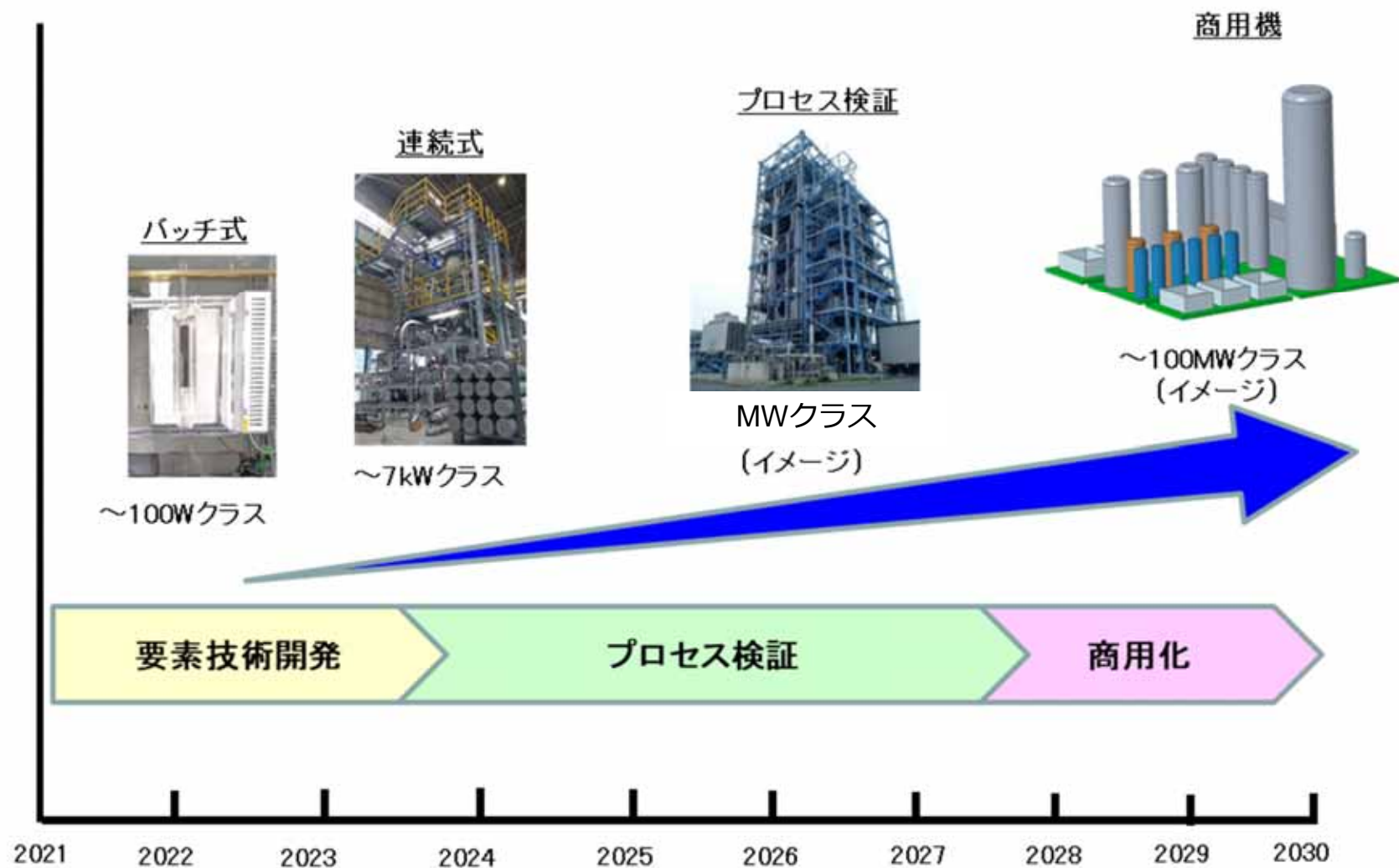
加圧試験装置



時間経過に伴い、水素生成とともに副生炭素が析出



- 2026年に高砂水素パークでの検証試験を実施し、その結果を踏まえて商用検討を実施していく



- 商用化段階と言われているのはアルカリ水電解で半世紀近い歴史がある
- PEM・SOECはその次世代。当社でも20年以上前から取り組んでいる
- AEMは第3世代。

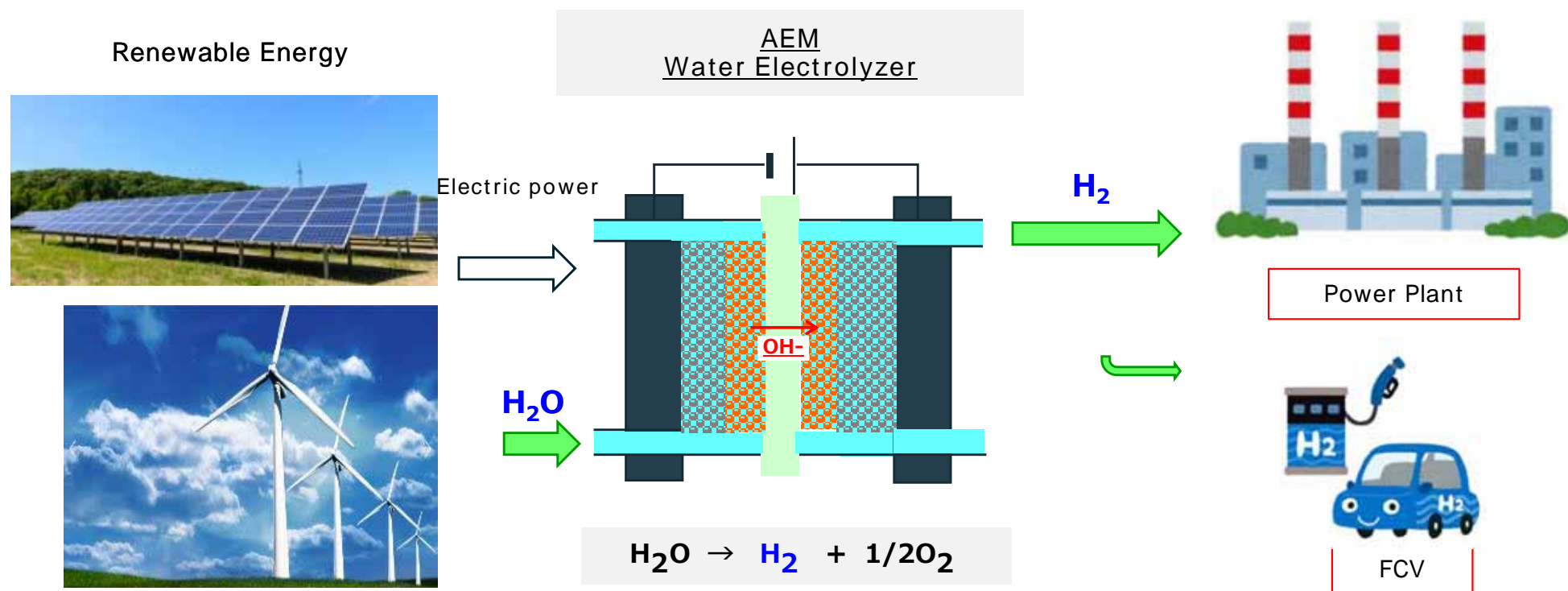
| 方式   | アルカリ水電解 (AEL)      | プロトン交換膜水電解 (PEM)                | アニオン交換膜水電解 (AEM) | 高温水蒸気電解 (SOEC)                |
|------|--------------------|---------------------------------|------------------|-------------------------------|
| 模式図  |                    |                                 |                  |                               |
| 温度   | ~90℃               | ~80℃                            | ~80℃             | 600~1000℃                     |
| 電解液  | 高濃度<br>アルカリ水溶液     | 純水                              | 低濃度<br>アルカリ水溶液   | 不要                            |
| 金属材料 | ニッケル,<br>ステンレス等    | 貴金属, チタン等                       | ニッケル,<br>ステンレス等  | 還元側: Ni系など<br>酸化側: 超耐熱鋼・セラミック |
| 隔膜   | 多孔膜<br>(セラミック・高分子) | プロトン交換膜<br>(F系)                 | アニオン交換膜<br>(高分子) | YSZ<br>(酸化物セラミック)             |
| 電流密度 | 低い<br>→電極面積: 大     | ~3A/cm <sup>2</sup><br>→電極面積: 小 | 高い<br>→電極面積: 小   | 高い                            |
| 成熟度  | 商用段階               | 実証・実用段階                         | 開発段階             | 実証段階                          |

AEL : Alkaline water ElectroLysis, PEM: Proton Exchange Membrane water electrolysis

AEM: Anion Exchange Membrane water electrolysis, SOEC : Solid Oxide Electrolyser Cell, YSZ : Ytria Stabilized Zirconia

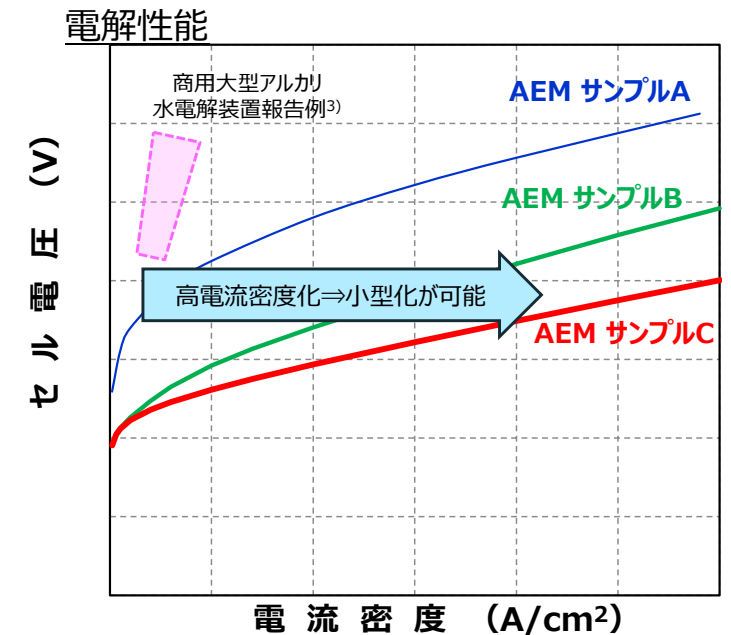


- 水の電気分解は、電力を利用して水からH<sub>2</sub>を生成する。再生可能エネルギーを電源に適用することで、低コストでグリーンH<sub>2</sub>を供給可能。
- 水電解は世界中あらゆる場所で適用可能。特に再生可能エネルギー資源に恵まれた南北アメリカ、EU、中東で有望な水素製造技術となり得る。
- 水電解技術の中でも、性能向上やコストダウンの可能性が高いアニオン交換膜（AEM：Anion Exchange Membrane）を使用した水電解装置を開発中。



- AEM水電解装置は、アルカリ水電解に比べて高い電流密度で運転ができ、スタックの小型化が可能。
- OH<sup>-</sup>イオン伝導性であることからアルカリ性環境で腐食性が低く、安価な非貴金属が使用可能。

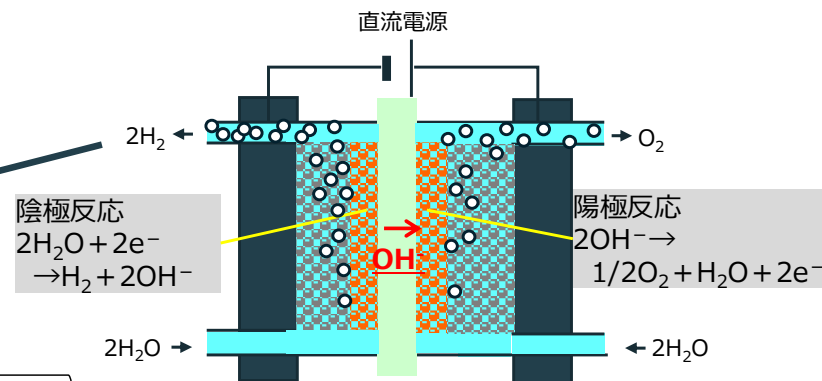
| 方式   | アルカリ水電解 (AEL)   | プロトン交換膜水電解(PEM)                 | アニオン交換膜水電解(AEM) |
|------|-----------------|---------------------------------|-----------------|
| 模式図  |                 |                                 |                 |
| 温度   | ~90℃            | ~80℃                            | ~80℃            |
| 電解液  | 高濃度アルカリ水溶液      | 純水                              | 低濃度アルカリ水溶液      |
| 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    |
| 隔膜   | 多孔膜 (セラミック・高分子) | プロトン交換膜 (F系)                    | アニオン交換膜 (高分子)   |
| 電流密度 | 低い<br>→電極面積: 大  | ~3A/cm <sup>2</sup><br>→電極面積: 小 | 高い<br>→電極面積: 小  |
| 成熟度  | 商用段階            | 実証・実用段階                         | 開発段階            |



- (1) Roby Soni, et al., ACS Appl. Energy Mater, 4 (2021), p.1053
- (2) 伊藤, NEDO水素・燃料電池成果報告会2022, 発表No.D-6 (2022)
- (3) 光島, 藤田, Electrochemistry, 85 (2017), p.28

AEL : Alkaline water ElectroLysis, PEM: Proton Exchange Membrane water electrolysis  
 AEM : Anion Exchange Membrane water electrolysis

- 単セルの構成はアニオン交換膜を電極触媒、給電体、セパレータで挟み込む構造



## ①膜電極接合体の設計

アニオン交換膜(AEM)

多孔質電極&触媒

多孔質電極&触媒

陰極セパレータ

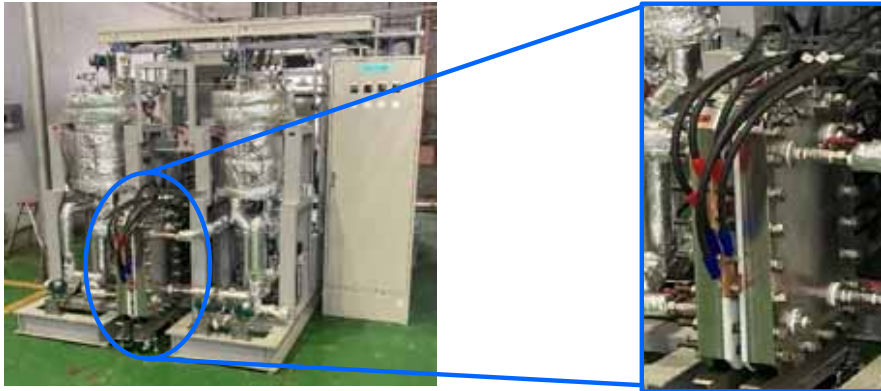
陽極セパレータ

## ②気液二相流の制御

## ③面圧制御

## 水電解システム検証

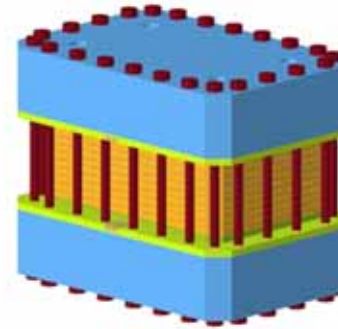
電解装置システムの構成、動作条件及び性能の評価



## 面圧制御技術構築

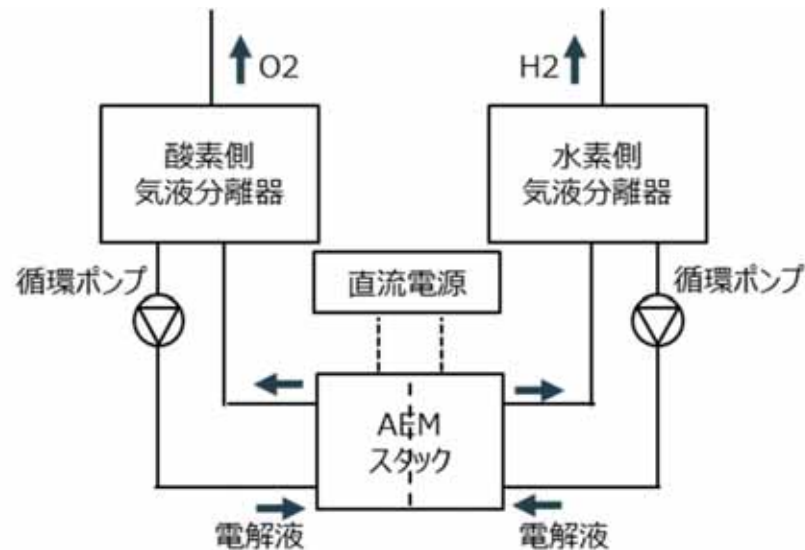
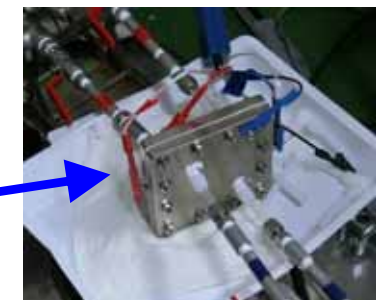
セルスタック締め付け構造の最適化

- ✓ 面圧均一化
- ✓ 内部流体のシール性

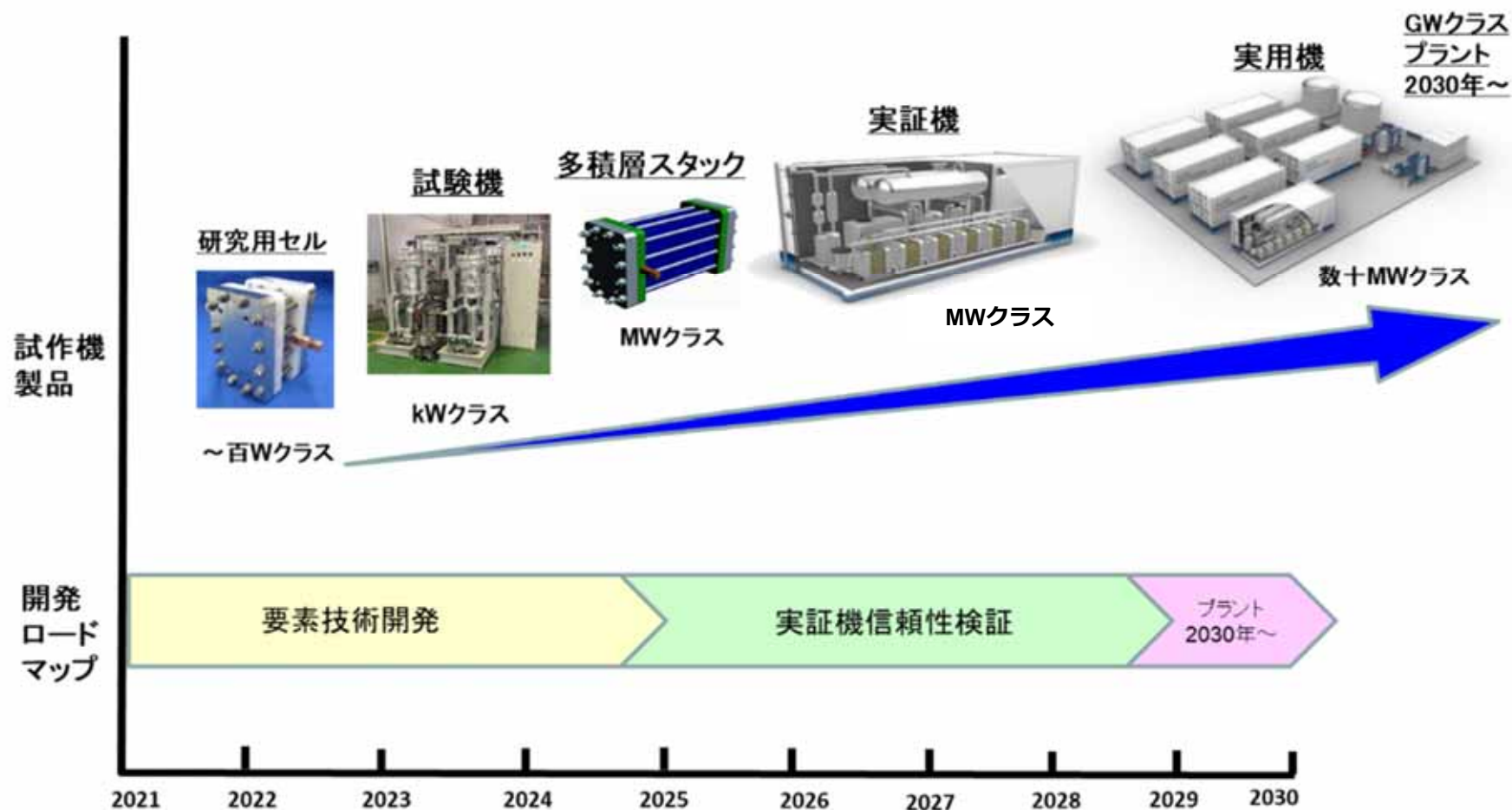


## 耐久性評価

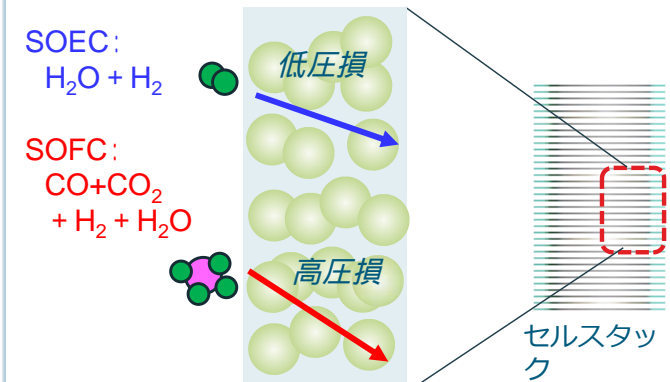
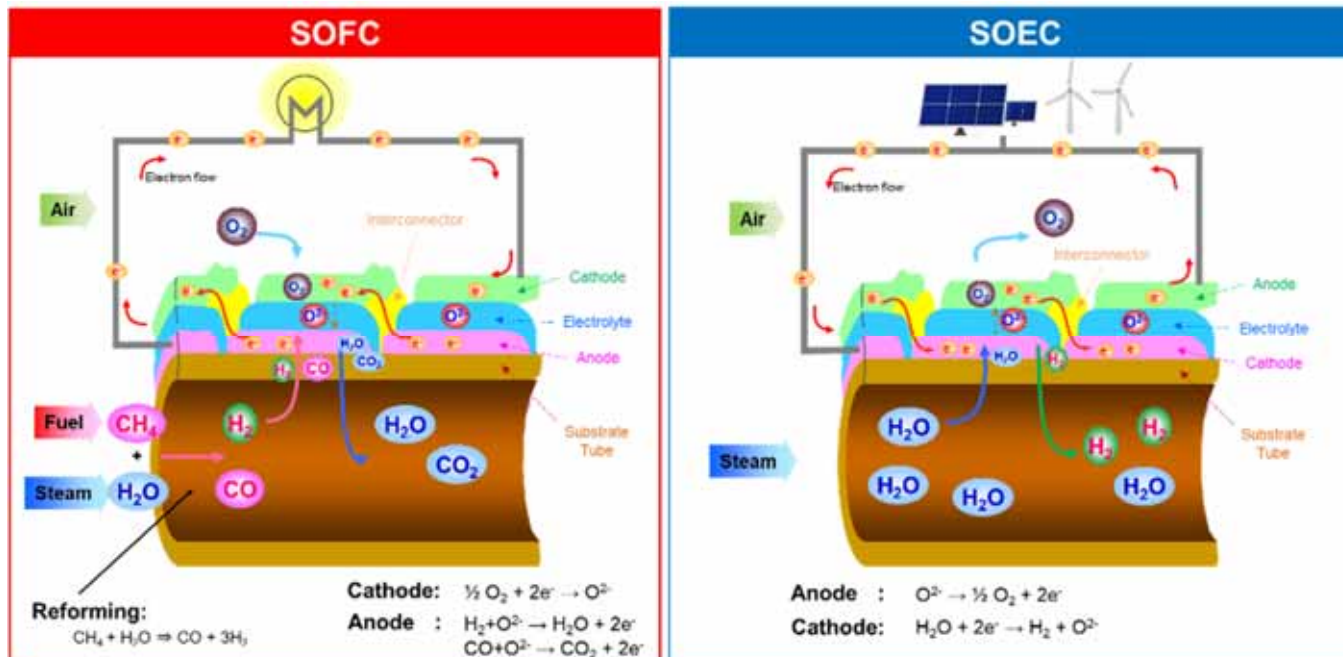
セルスタックの長期耐久性評価



- 2026年に高砂水素パークでMW級水電解装置の実証運転予定。
- 信頼性検証後に，2030年に市場投入を目指す。

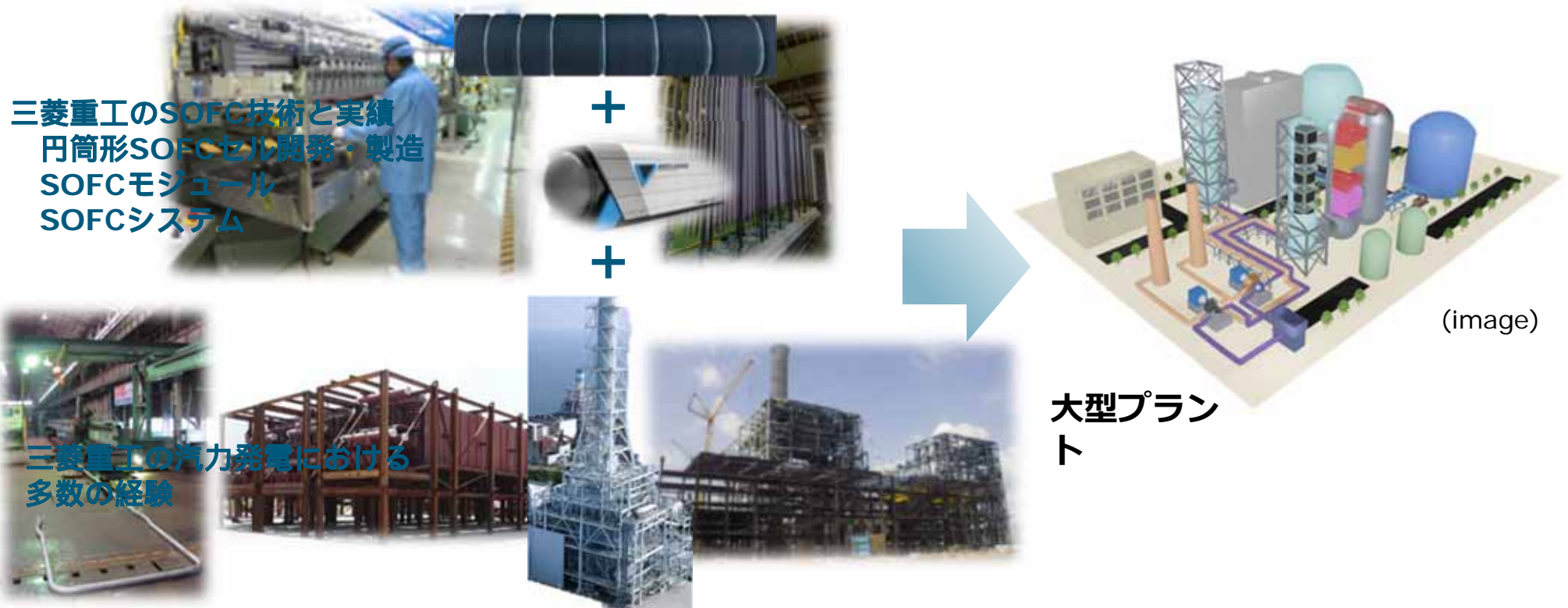


- **SOEC (Solid Oxide Electrolysis Cell) :**
  - ・ 水蒸気と電気から水素を製造する（電気分解）
  - ・ 現状のSOFCセルをSOECとして作動させ、課題を抽出中
- **SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) :**
  - ・ 燃料の化学エネルギーを直接電気エネルギーに変換する（発電）
  - ・ 燃料は主として天然ガス（内部で水素に改質）
  - ・ 三菱重工業にて開発・運転実績あり



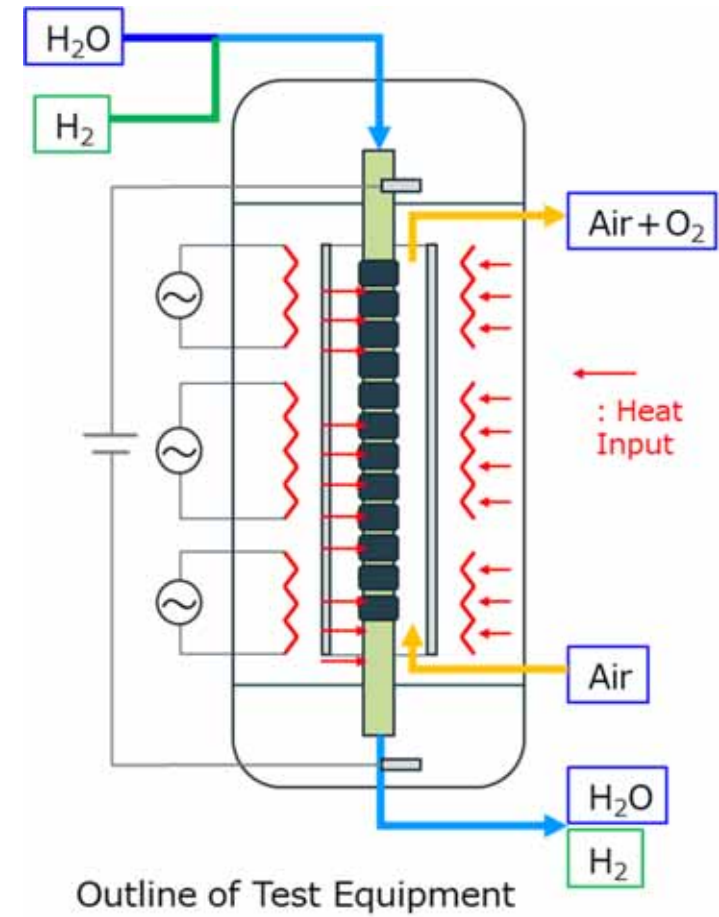
SOECは基体管・電極を通過する反応ガスの透過性が高く、大電流化が可能

- 大容量の加圧型SOECは、発電所などの事業用の用途に適する  
(小型分散用途には PEM or AEM などの低温型水電解技術が適する)
- 三菱重工業の持つSOFCの技術・実績と、汽力発電の高温・高圧の水蒸気のハンドリング技術および多数のプラント実績を融合させたSOECを開発中

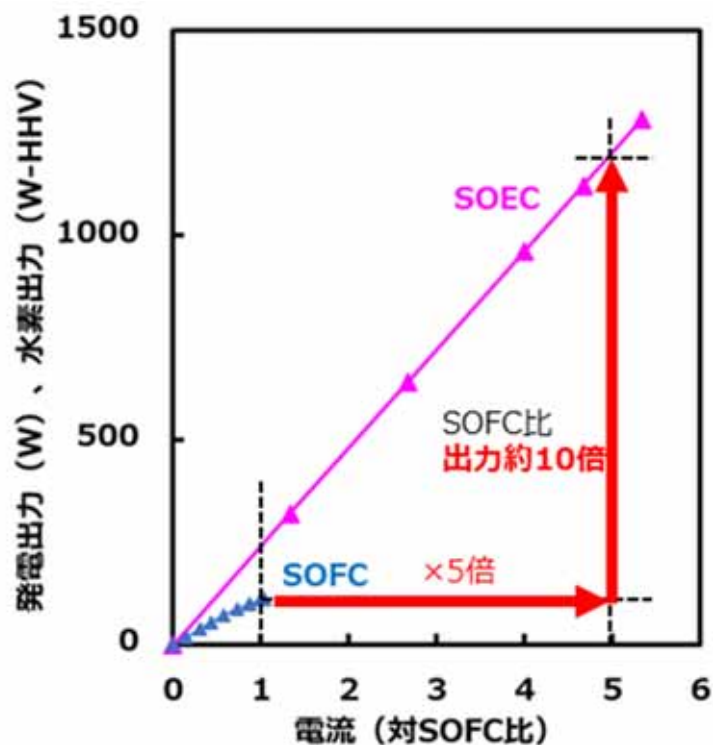




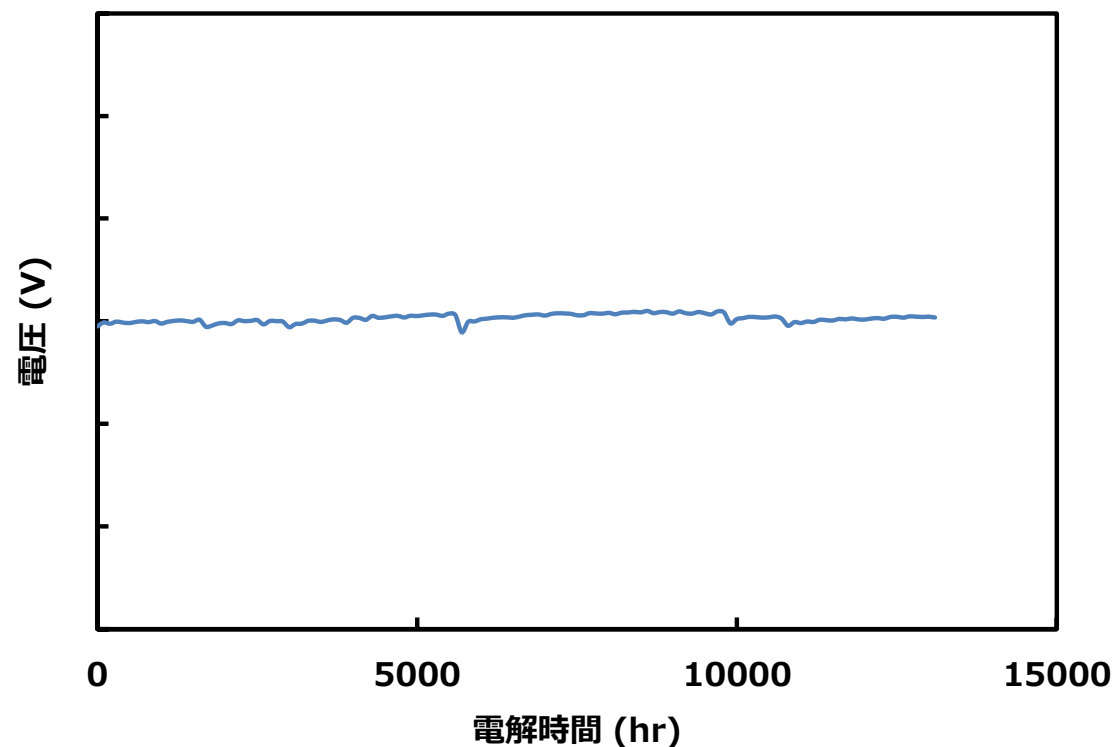




- SOFCとして作動させた場合の約5倍の高電流を流せることを確認。
- 水素出力(HHV)は1kW/本を超え、SOFCの約10倍の発熱量の水素を得られた。
- 対SOFC比1倍における耐久試験では1万時間を経過。大きな劣化はない。

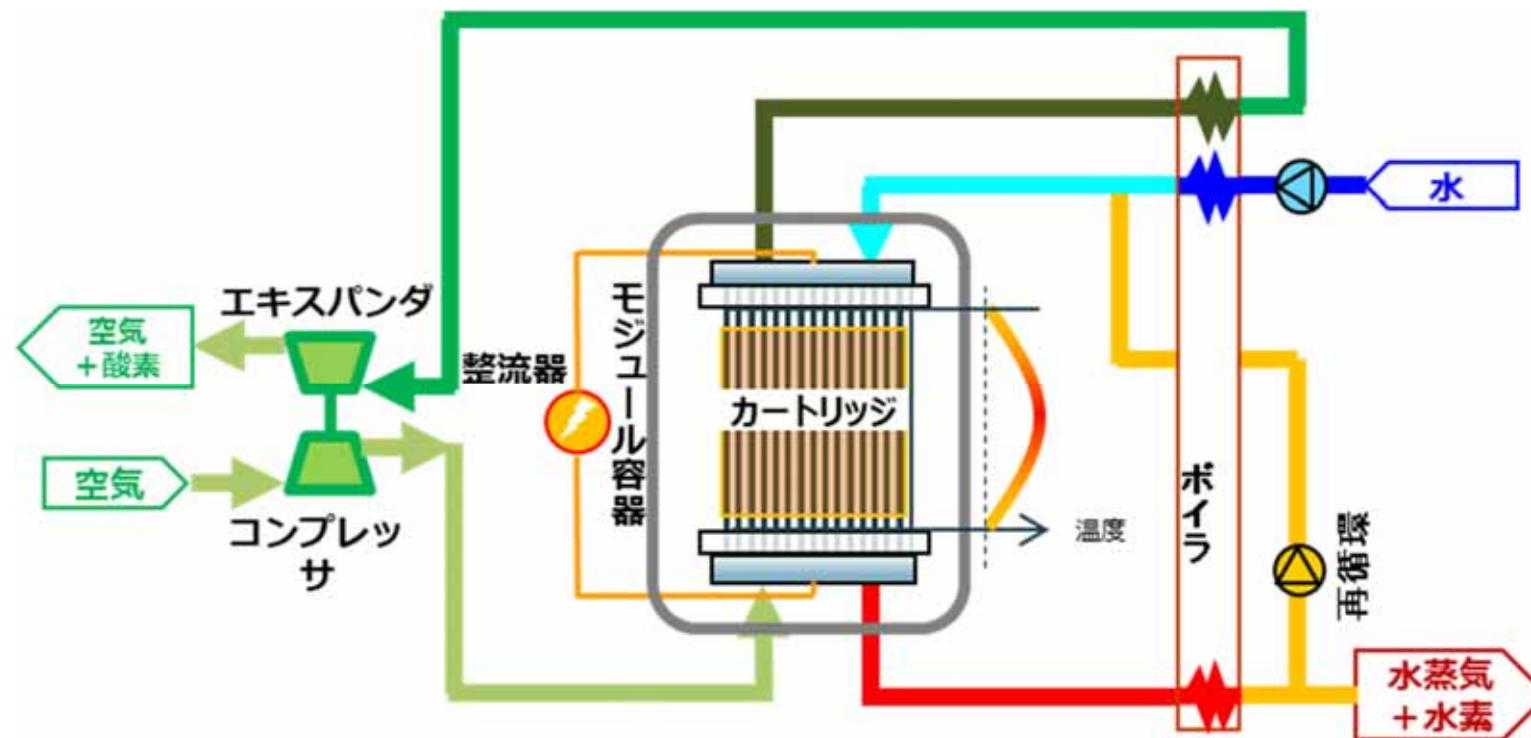


セル電解特性確認



耐久性試験

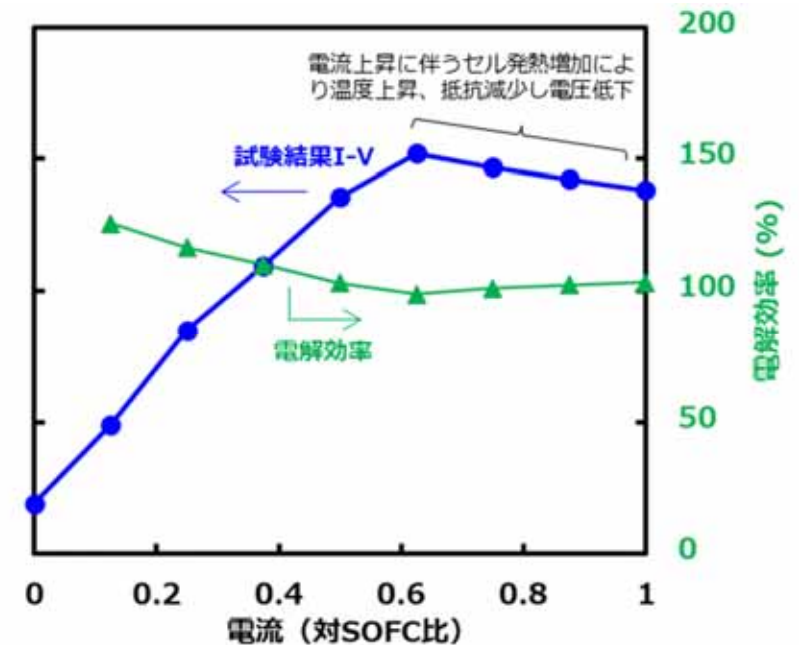
- 大型SOECプラントの構成例を示す。
- 電解で発生するジュール熱により水蒸気発生を自前で行い、水と電気を供給すれば水素が発生する「熱自立」を特徴
- ボイラやコンプレッサ、エキスパンダといった補機構成は汽力発電プラントに類似しているため、大型・高圧化によるスケールメリット
- 高圧システム・総合効率90%以上を目論む



- 電流1倍（対SOFC比）にて水素製造0.1MW-HHV, 30Nm<sup>3</sup>/hを達成
- 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



電圧 (V)



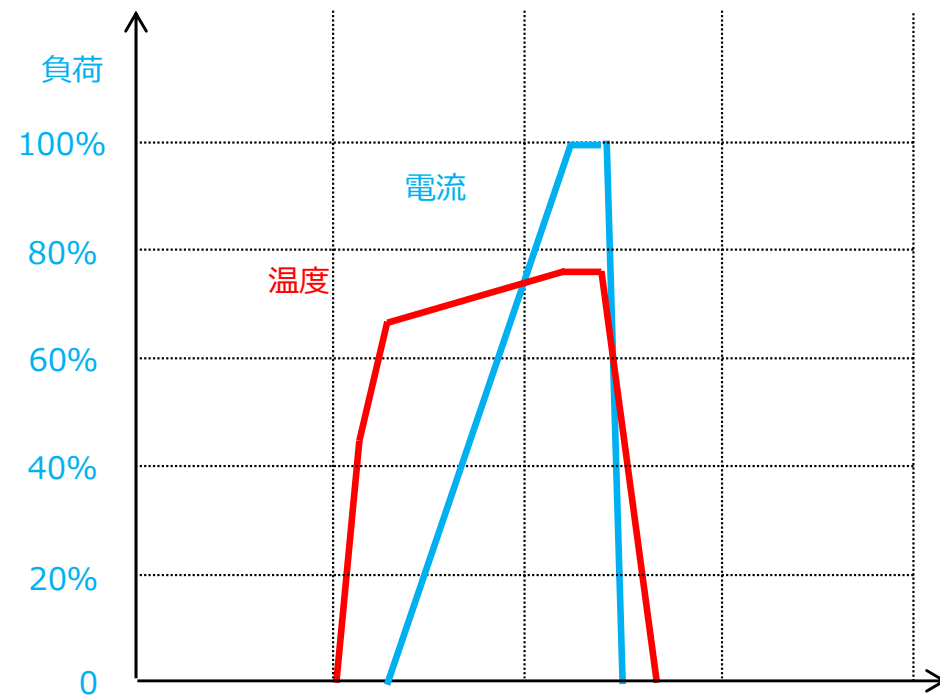
カートリッジ電解特性確認

カートリッジおよび試験装置

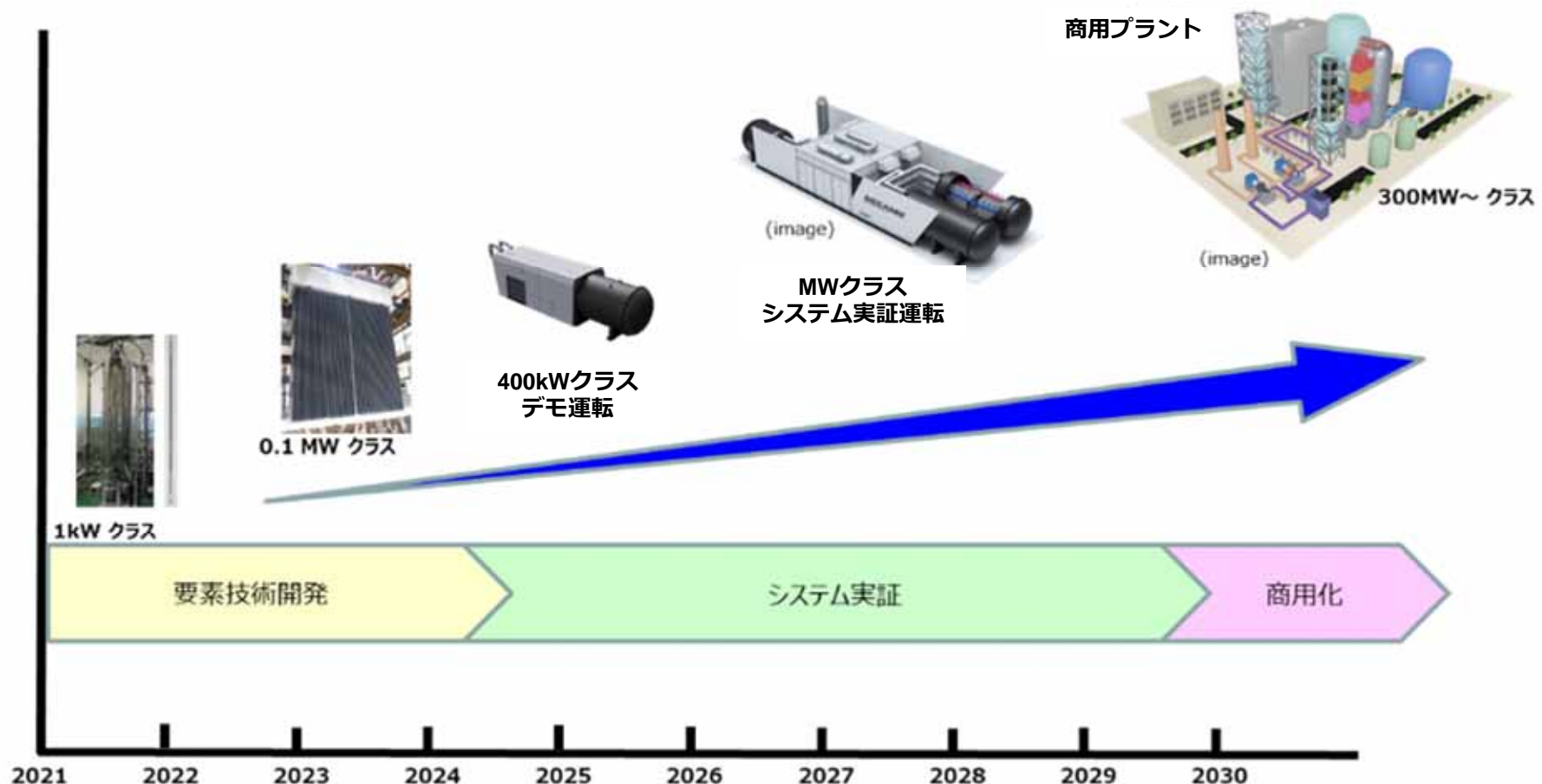
- 高砂水素パークでは、SOECの400kWデモ機を稼働しました。  
(カートリッジを複数組合わせたモジュール)
- 水素製造試験開始し100%負荷到達(440kW-H<sub>2</sub> HHV)し、モジュールの電解効率  
は3.5kWh/Nm<sup>3</sup> (101%-HHV : 高位発熱量換算) でした。
- 今後、総合効率90%-HHVのシステム構築に向けて開発を継続しております。



SOEC 400kW 運転状況



- 要素試験などを実施中
- 2024年度に、高砂水素パークにおいて～400kW級のデモ機運転がターゲット
- 以降、MW級実証運転を経て商用プラント開発に進む



水素社会は未来の話ではありません。  
もう始まっています。



