

2024年8月28日

# 効率的なメタン加熱による CO<sub>2</sub>フリー ターコイズ水素の製造技術



岐阜大学 工学部 機械工学科  
准教授 朝原 誠



## ビヨンド・ゼロ：2050年カーボンニュートラルの実現

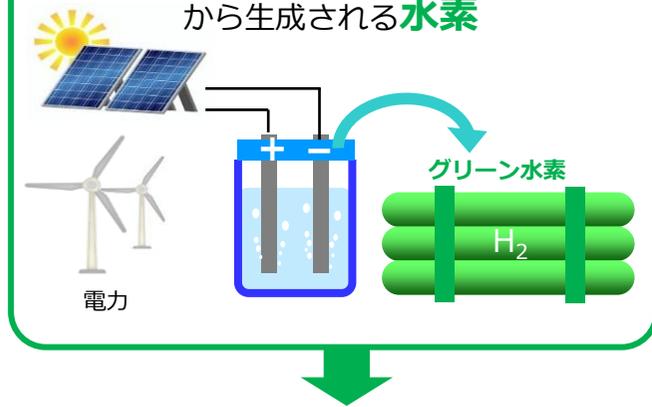
水素を核とするGX戦略 → **ターコイズ水素** が注目

### 再生可能エネルギー由来

#### ①グリーン水素



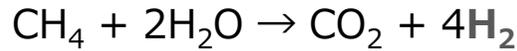
水の電気分解・人工光合成  
から生成される水素



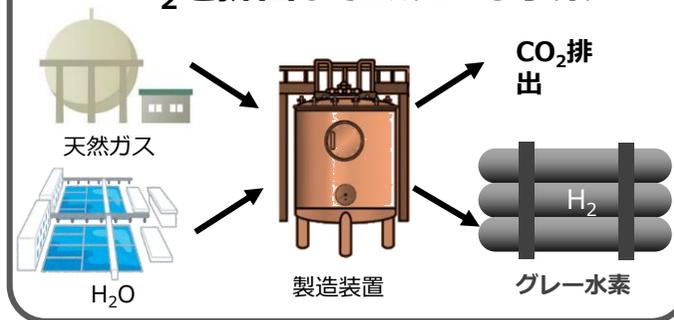
- CO<sub>2</sub>を排出せずに水素を生成
- **大量製造が困難**  
⇒ 大規模な施設が必要
- 全世界における水素生産量の**10%以下**

### 天然ガス（主成分はCH<sub>4</sub>）等の化石燃料から製造

#### ②グレー水素

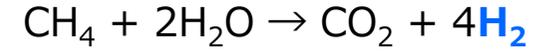


天然ガスの水蒸気改質等により  
CO<sub>2</sub>を排出して生成される水素

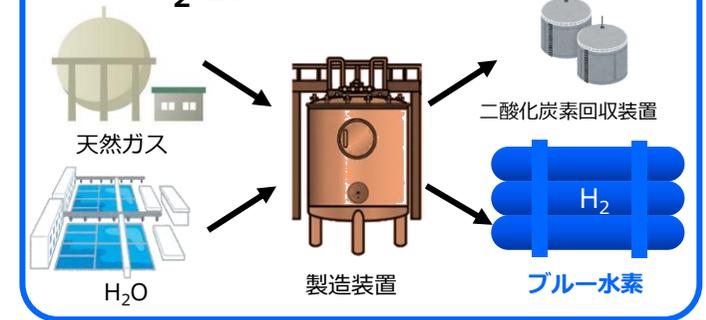


- 大量生産可能
- **CO<sub>2</sub>を排出する**

#### ③ブルー水素



天然ガスの水蒸気改質等により  
CO<sub>2</sub>を回収して生成される水素

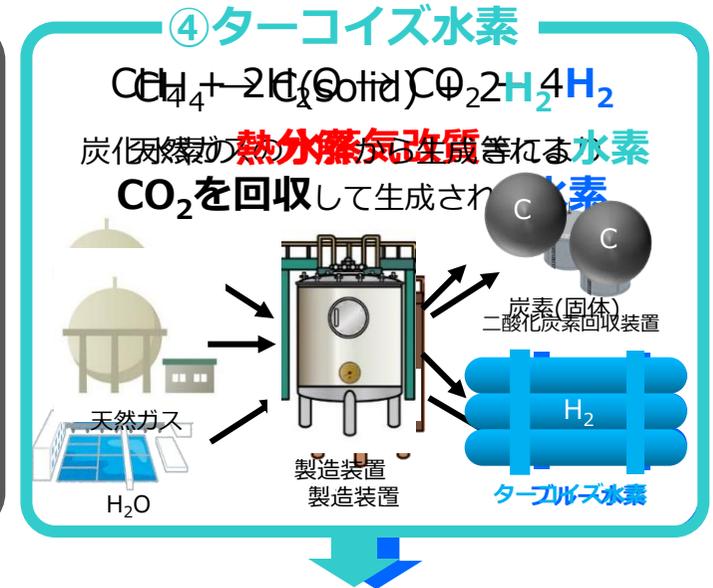
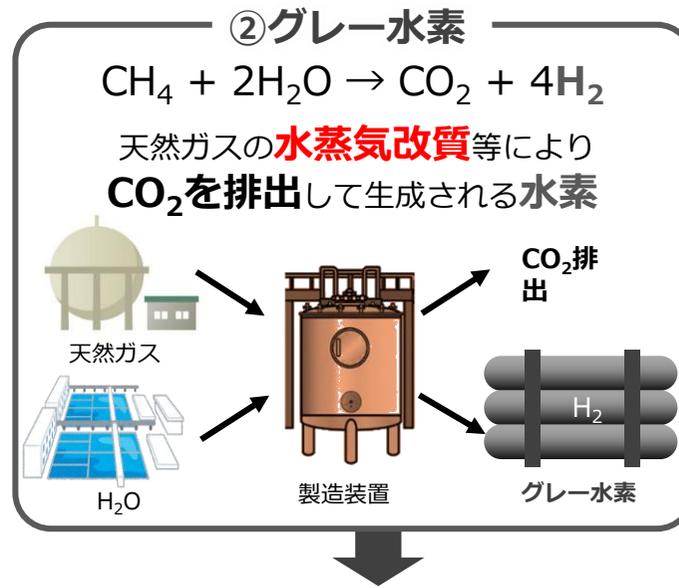


- 大量生産可能
- 排出されるCO<sub>2</sub>の回収に**余剰コストがかかる**

ビヨンド・ゼロ：2050年カーボンニュートラルの実現

水素を核とするGX戦略 → **ターコイズ水素** が注目

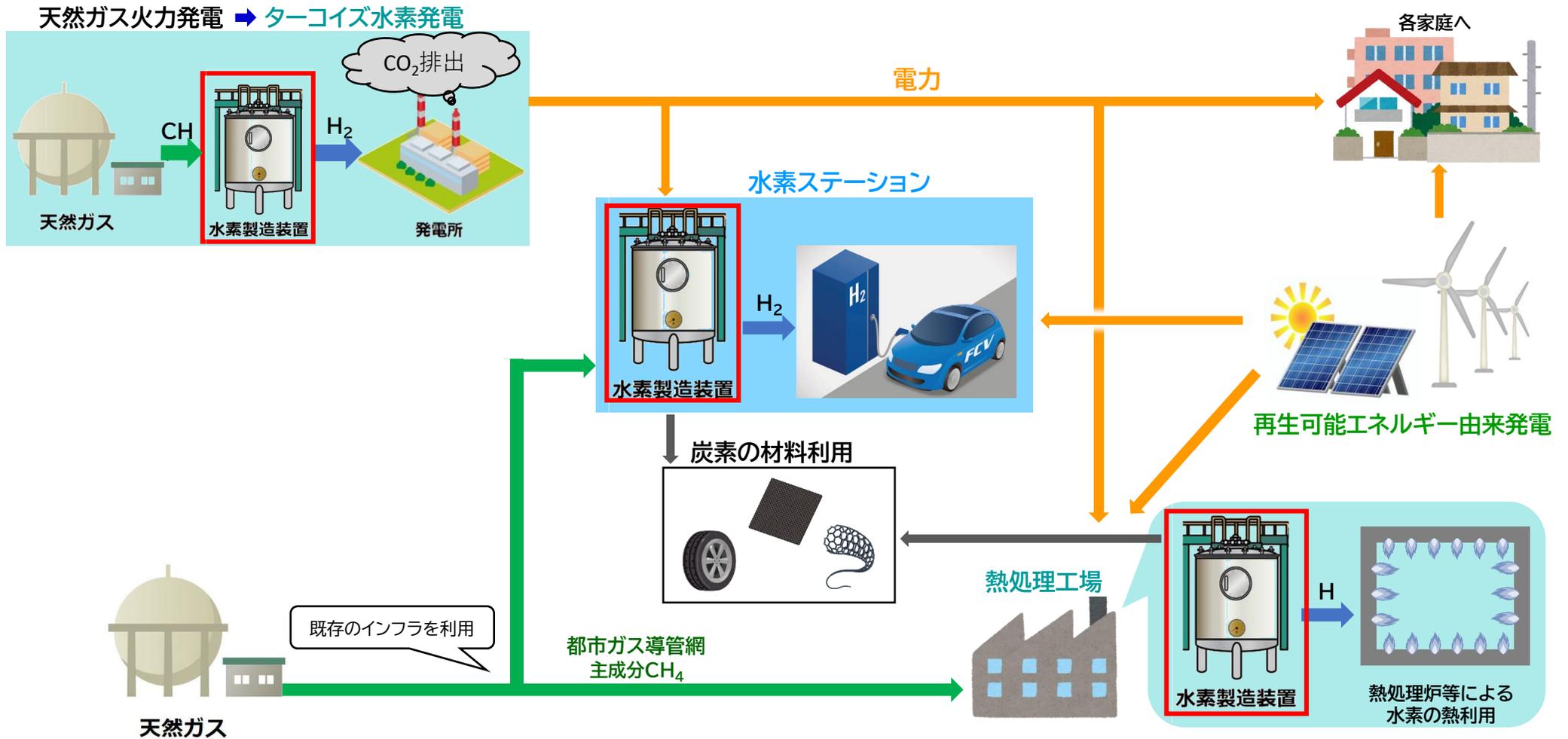
天然ガス（主成分はCH<sub>4</sub>）等の化石燃料から製造



- 大量生産可能
- **CO<sub>2</sub>を排出する**

- 大量生産可能
- **排出されるCO<sub>2</sub>の回収にコストが必要**
  - Cを排出する

# 将来への発展性:ターコイズ水素の社会実装イメージ



既存インフラ(天然ガス輸送、都市ガス・プロパンガス供給)  
を利用可能

GXにおける大規模な新規インフラ整備が不要

伝統的な強み研究である“太陽光発電”でCO<sub>2</sub>フリー水素を  
「つくる」「ためる」「はこぶ」「つかう」

第29回  
地球環境大賞  
Since 1992  
第29回地球環境大賞  
「文部科学大臣賞」を受賞

## 再生可能エネルギーマネジメントシステム



Power to Gas  
供給が不安定な太陽光由来電力を水素化

エネルギー供給の安定

- ☹️ 夜間に水素製造・貯蔵ができない
- ☹️ 悪天候による出力低下 **大**  
→貯蔵水素で電力供給をカバーできない

### ターコイズ水素製造システム

ターコイズ水素: メタン等の炭化水素の熱分解により生成するCO<sub>2</sub>フリー水素

メタン	: CH <sub>4</sub> → C + 2H <sub>2</sub>	37.4 kJ/mol-H <sub>2</sub>
プロパン	: C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> → 3C + 4H <sub>2</sub>	26.5 kJ/mol-H <sub>2</sub>

**利点**

- ☺️ 既存インフラを利用して水素を安定供給
- ☺️ 即応性あり → 貯蔵切れリスクを低減

グリーン水素

ターコイズ水素



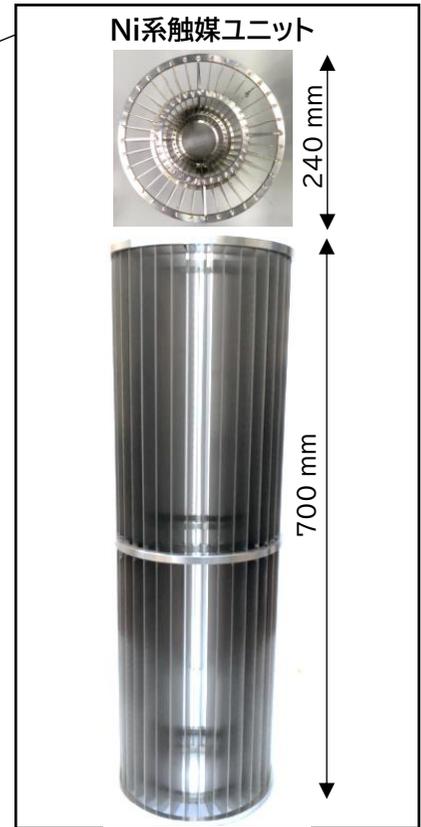
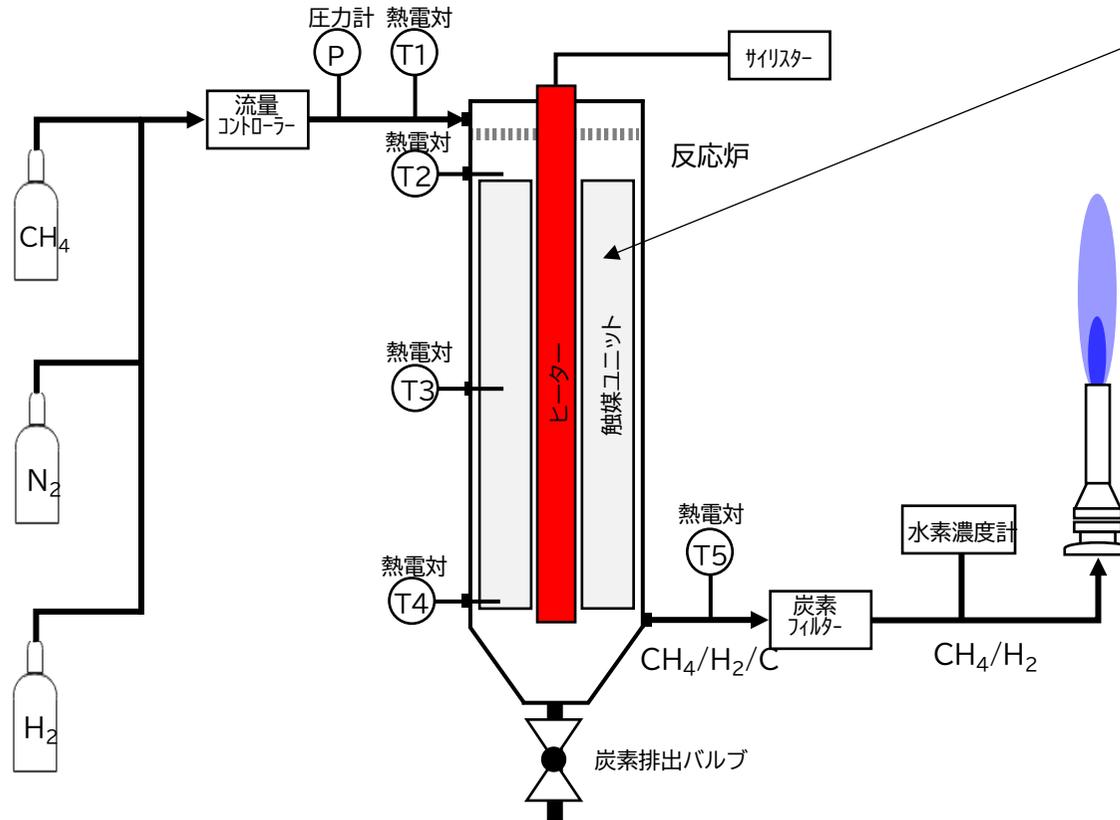
水素製造インフラの多重化



エネルギー供給における  
セキュリティとレジリエンスの強化

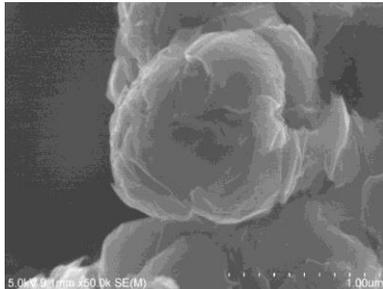


## 実用化に向けた40Lサイズ反応炉の製作・性能評価

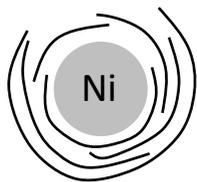
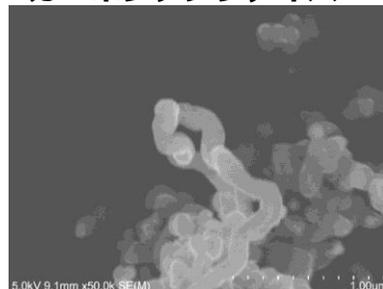


※反応炉に断熱材を巻き付けて実験実施

球状炭素 (オニオン型)



カーボンナノファイバー



CH<sub>4</sub>流量: 0.2 ~ 5 Nm<sup>3</sup>/h  
(3.3 ~ 83.3 L/min)

反応温度: 700 ~ 1000°C

## 生成水素に基づくエネルギー効率 (水素生成エネルギー効率)

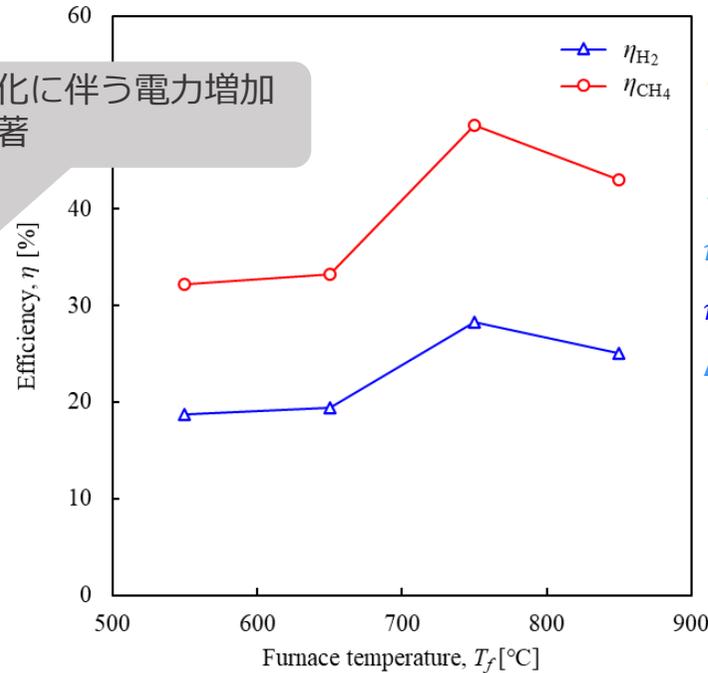
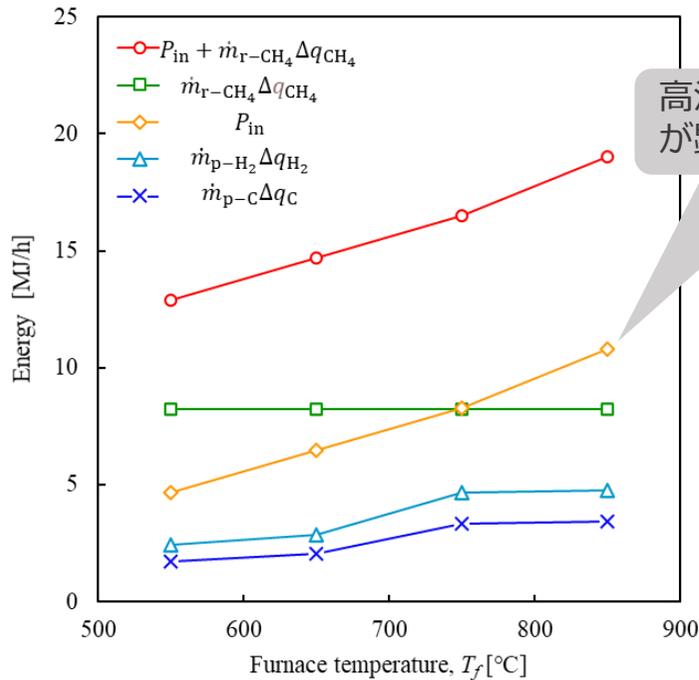
$$\eta_{H_2} = \frac{\dot{m}_{p-H_2} \Delta q_{H_2}}{P_{in} + \dot{m}_{r-CH_4} \Delta q_{CH_4}}$$

電力

## メタン分解に基づくエネルギー効率 (炭素の価値を考慮)

$$\eta_{CH_4} = \frac{\dot{m}_{p-H_2} \Delta q_{H_2} + \dot{m}_{p-C} \Delta q_C}{P_{in} + \dot{m}_{r-CH_4} \Delta q_{CH_4}}$$

電力



- $P_{in}$  : 加熱量 (電気ヒーターの消費電力) [W]
- $\dot{m}_{r-CH_4}$  : メタンの質量流量[kg/h]
- $\Delta q_{CH_4}$  : 流入メタンの高位発熱量 (HHV) [J/kg]
- $\dot{m}_{p-H_2}$  : 生成水素の質量流量[kg/h]
- $\dot{m}_{p-C}$  : 生成炭素の生成質量速度[kg/h]
- $\Delta q_{H_2}$  : 生成水素の高位発熱量(HHV) [J/kg]

高温化 ⇒ 電力増加 ⇒ エネルギー効率低下

電気加熱での高温化は不適切

# 本技術に関する知的財産権

## 1. 水素の製造装置および水素の製造方法

出願番号/出願日：特願2022-158516 / 2022年9月30日

発明者：朝原誠，宮坂武志，安里勝雄

## 2. 水素の製造装置および水素の製造方法

出願番号/出願日：特願2023-136570 / 2023年8月24日

発明者：朝原誠，宮坂武志，安里勝雄，富樫憲一

出願人：東海国立大学機構

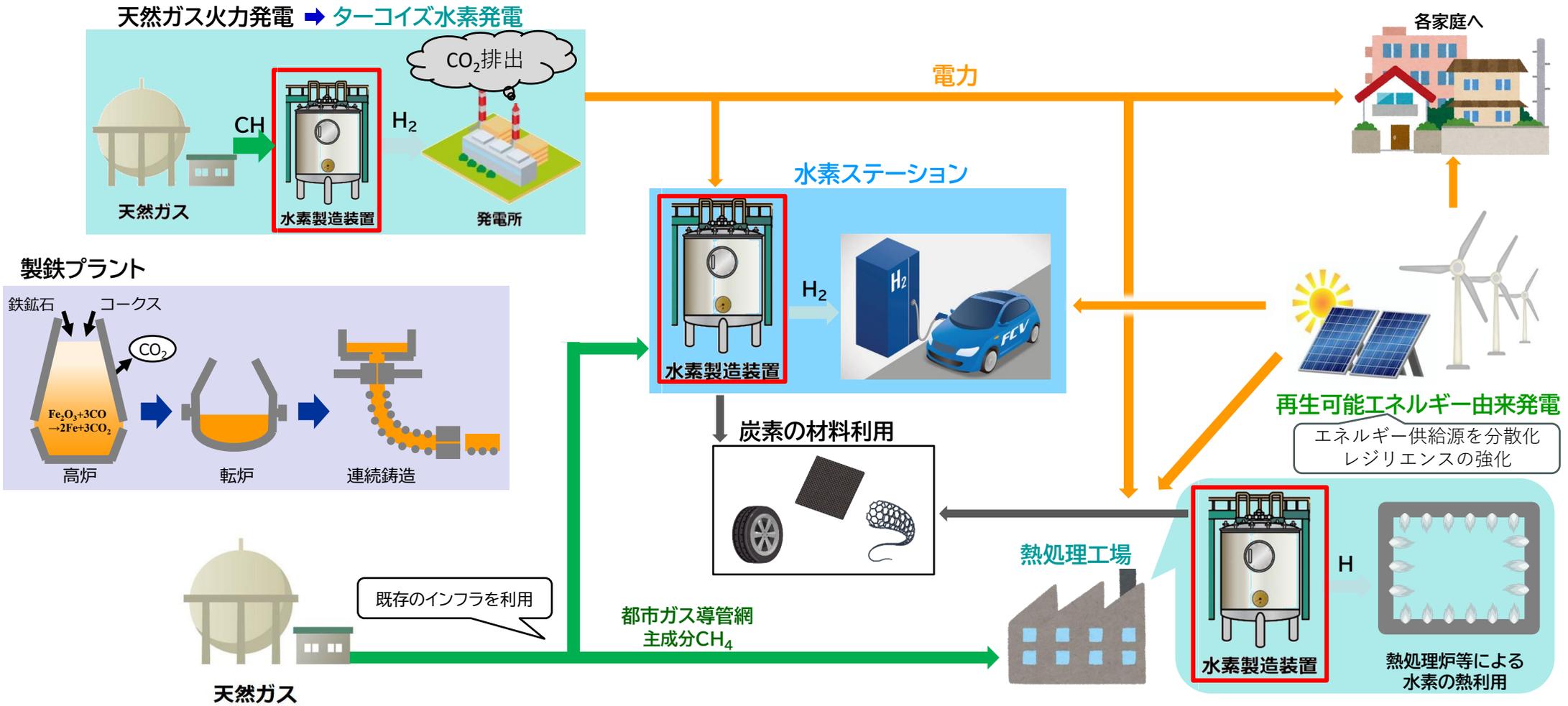
## その他の関連知的財産権

## 3. 水素の製造装置

出願番号/出願日：特願2023-186131 / 2023年10月26日

発明者：梅田良人，山下博史，朝原誠

# 将来への発展性:ターコイズ水素の社会実装イメージ



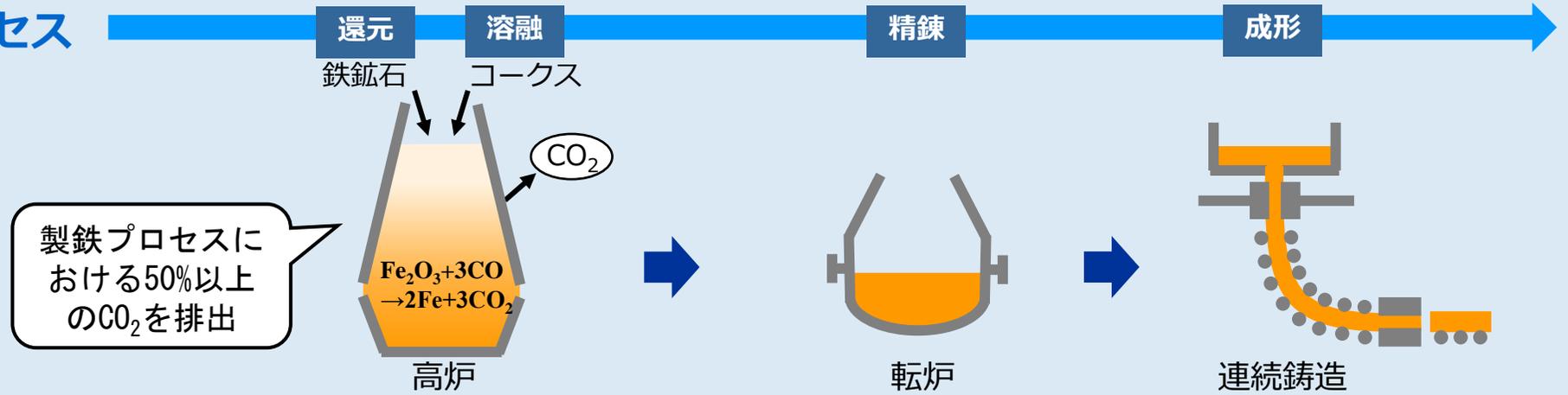
製鉄工程からの“高温排ガス”との熱交換によりメタンを加熱



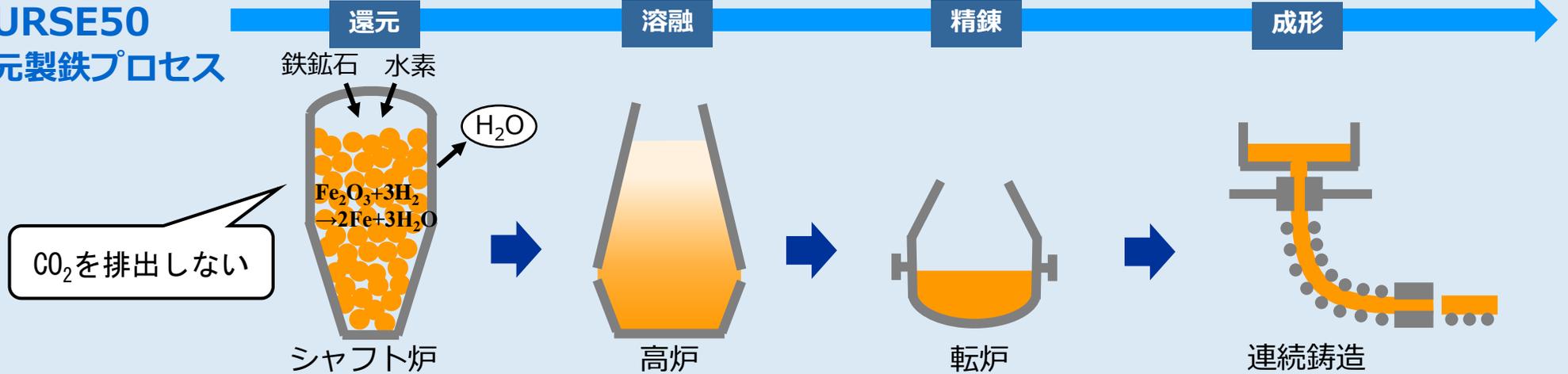
安定的に大量のターコイズ水素 と 高純度炭素 を製造

# ①製鉄工程におけるCO<sub>2</sub>排出量の削減

## 現行製鉄プロセス



## COURSE50 水素還元製鉄プロセス



700万 t/年 (750億Nm<sub>3</sub>/年) もの大量の水素が必要

現在の国内鉄鉄生産量7,500万t/年の生産に必要な水素量

コークス還元と等価になる水素価格：8円/Nm<sup>3</sup>

# ①製鉄工程からの排熱を利用した水素製造

製鉄工程からの高温排ガスとの熱交換によりメタンを加熱

→ 安定的に大量のターコイズ水素 と 高純度炭素 を製造

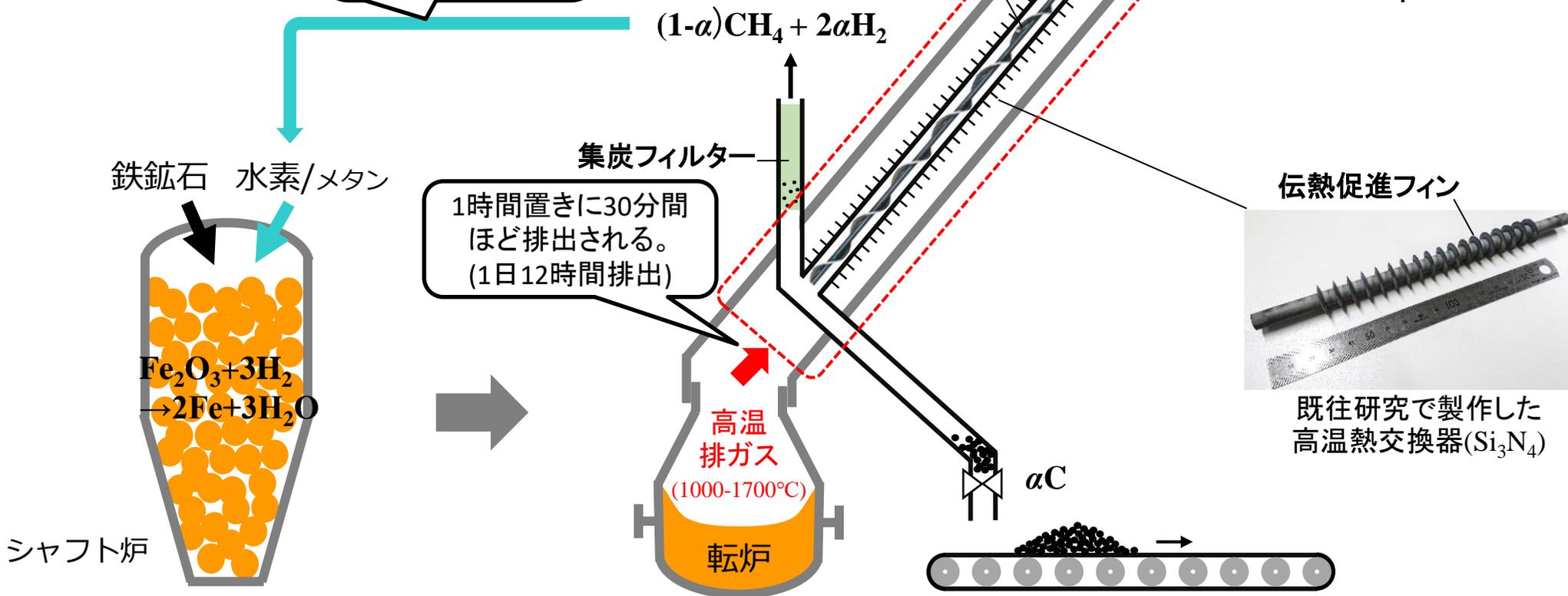
水素還元プロセス  
or  
直接還元プロセス

## 1. 水素の製造装置および水素の製造方法

出願番号/出願日: 特願2022-158516 / 2022年9月30日

発明者: 朝原誠, 宮坂武志, 安里勝雄

水素を分離し、  
100%水素とすると  
CO<sub>2</sub>を排出しない。  
水素/メタン混合ガス  
のままでも可。



# ①製鉄工程からの排熱を利用した水素製造

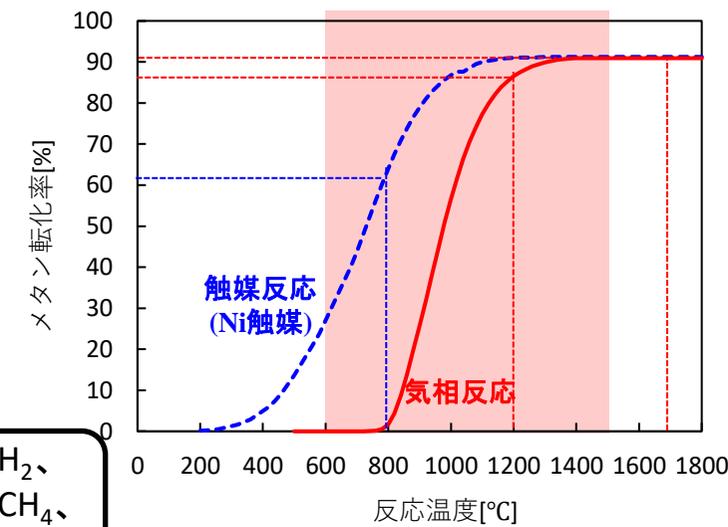
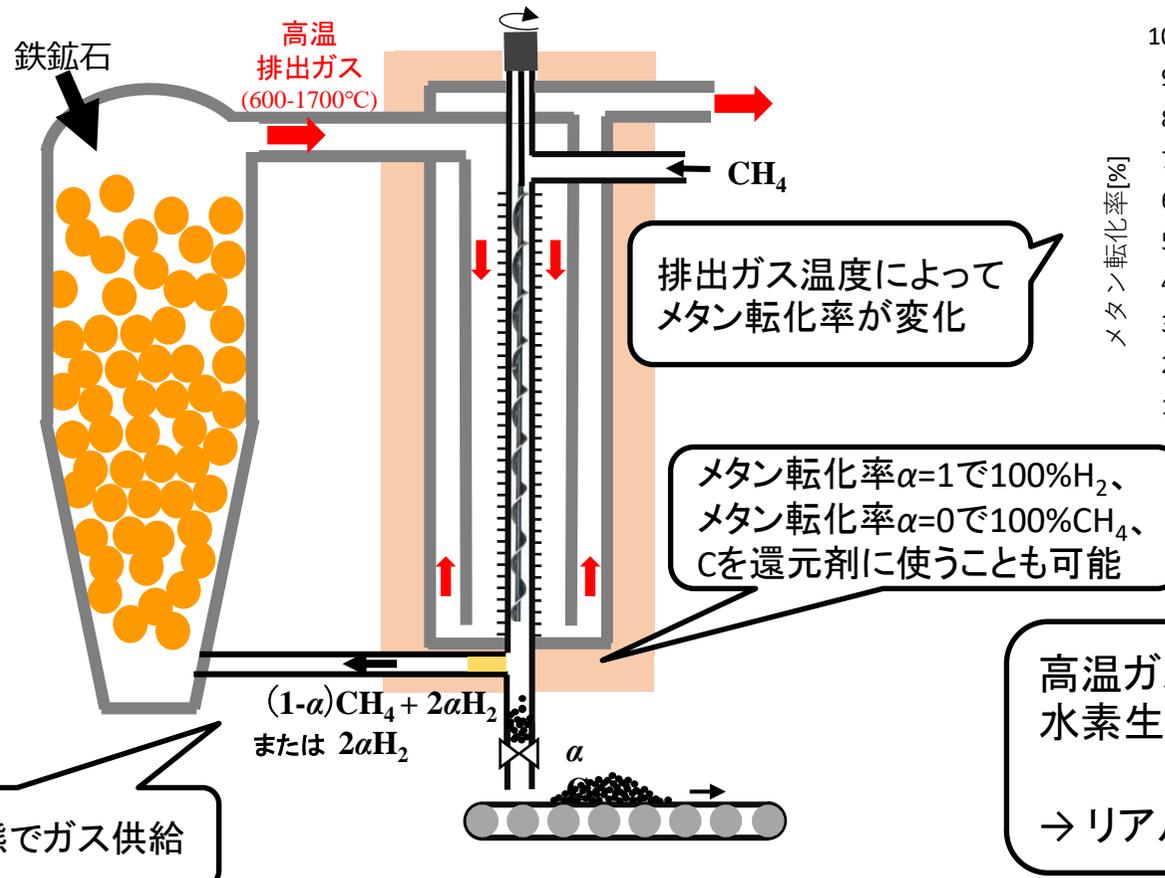
製鉄工程からの高温排ガスとの熱交換によりメタンを加熱

➔ 安定的に大量のターコイズ水素 と 高純度炭素 を製造

1. 製鉄工程での排熱を利用したメタン熱分解水素製造システムを提案

2. 物理空間と現実空間のデータ同化強連成DXによる製鉄プラントのデジタル運用ツールを開発

水素還元プロセス  
or  
直接還元プロセス



高温ガス温度、流入メタン流量に対する水素生成量の関係を明確化

➔ リアルタイムで内部状況を把握

# ①製鉄工程からの排熱を利用した水素製造

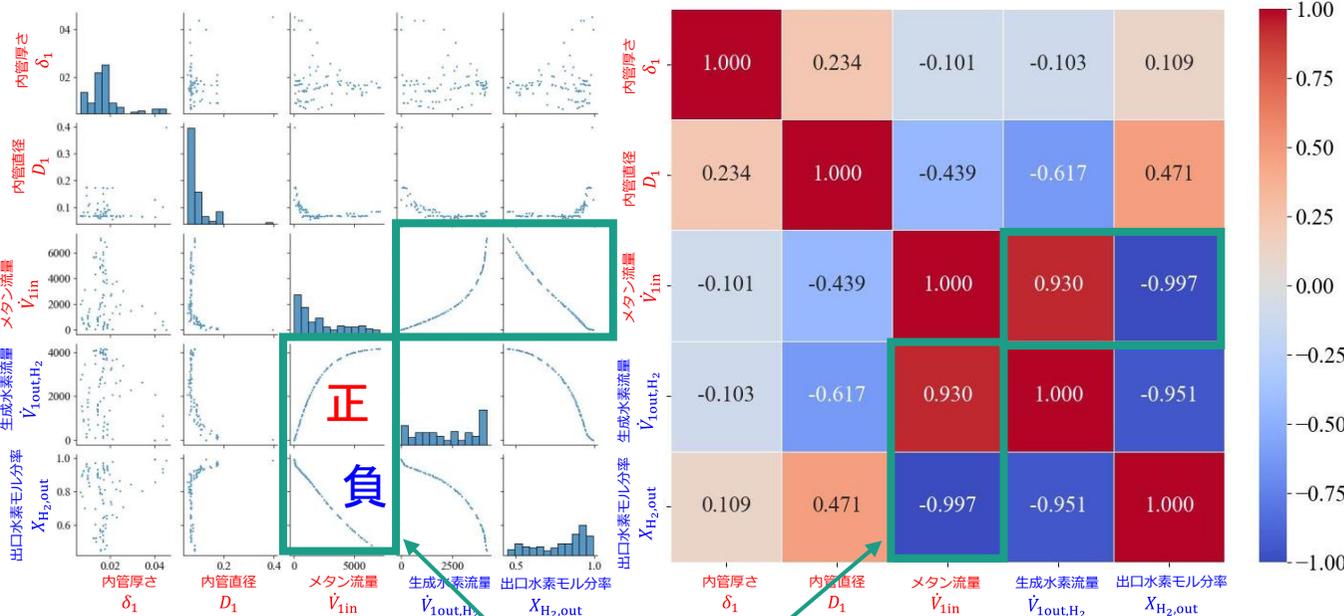
製鉄工程からの高温排ガスとの熱交換によりメタンを加熱

➔ 安定的に大量のターコイズ水素 と 高純度炭素 を製造

## 多目的最適化による実機性能予測

### 結果データと相関係数

パレート解における設計変数と目的関数の散布図と相関係数



メタン流量が**高感度**

メタン流量 **大**

熱交換されやすい

滞留時間 **短**

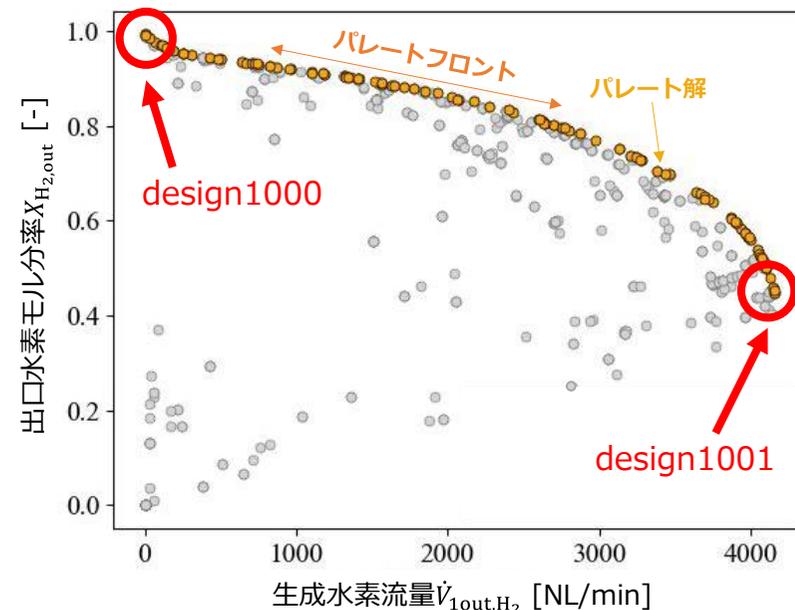
生成水素流量 **大**

**トレードオフ**

出口水素濃度（モル分率） **大**

### 目的関数のパレート解

目的関数のパレート解と劣解の散布図

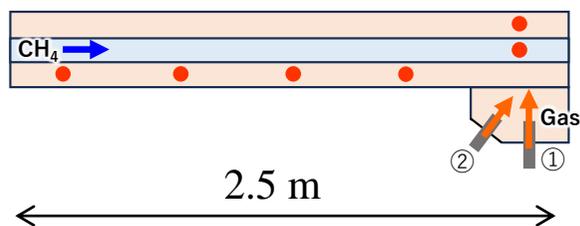


# ①製鉄工程からの排熱を利用した水素製造

製鉄工程からの高温排ガスとの熱交換によりメタンを加熱

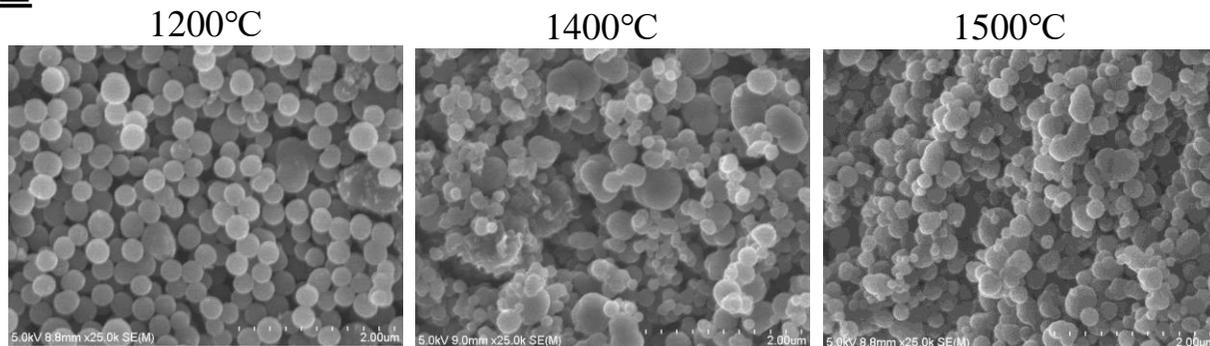
➔ 安定的に大量のターコイズ水素 と 高純度炭素 を製造

## ラボスケール熱交換型ターコイズ水素製造装置



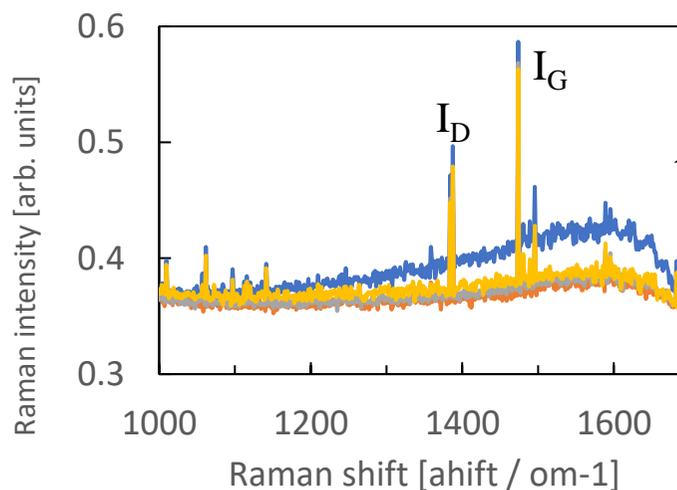
### SEM画像

滞留時間 : 100 s  
倍率 : 25 k



### ラマン分析

レーザー光 : Ar  
露光時間 : 180 s



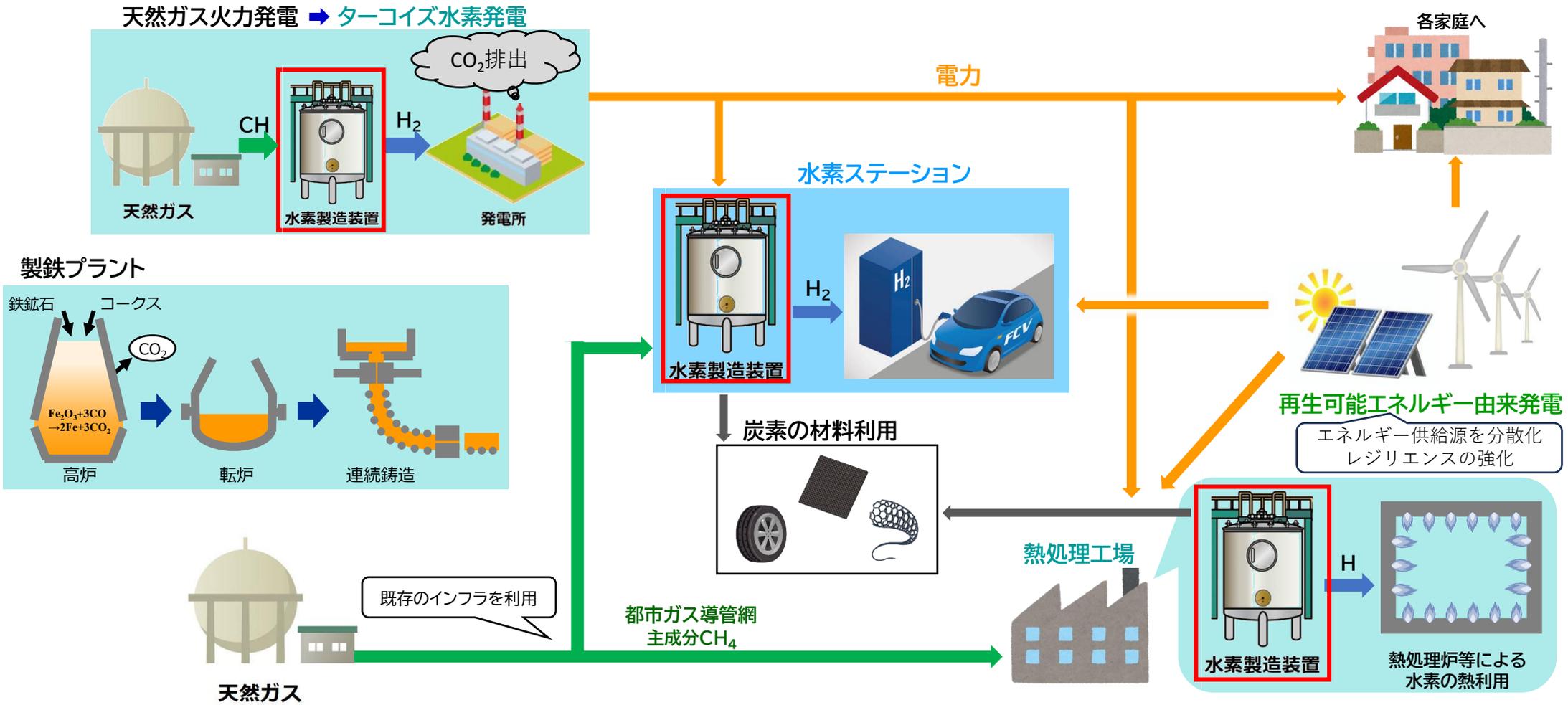
カーボンブラック  
(210円/kg) に  
似たスペクトル特性



高純度炭素  
(触媒金属などの不純物は混在していない)

メタン原価16円/Nm<sup>3</sup>  
メタン1 Nm<sup>3</sup> (16円) から炭素  
0.5kg (105円) が生成

# 将来への発展性:ターコイズ水素の社会実装イメージ

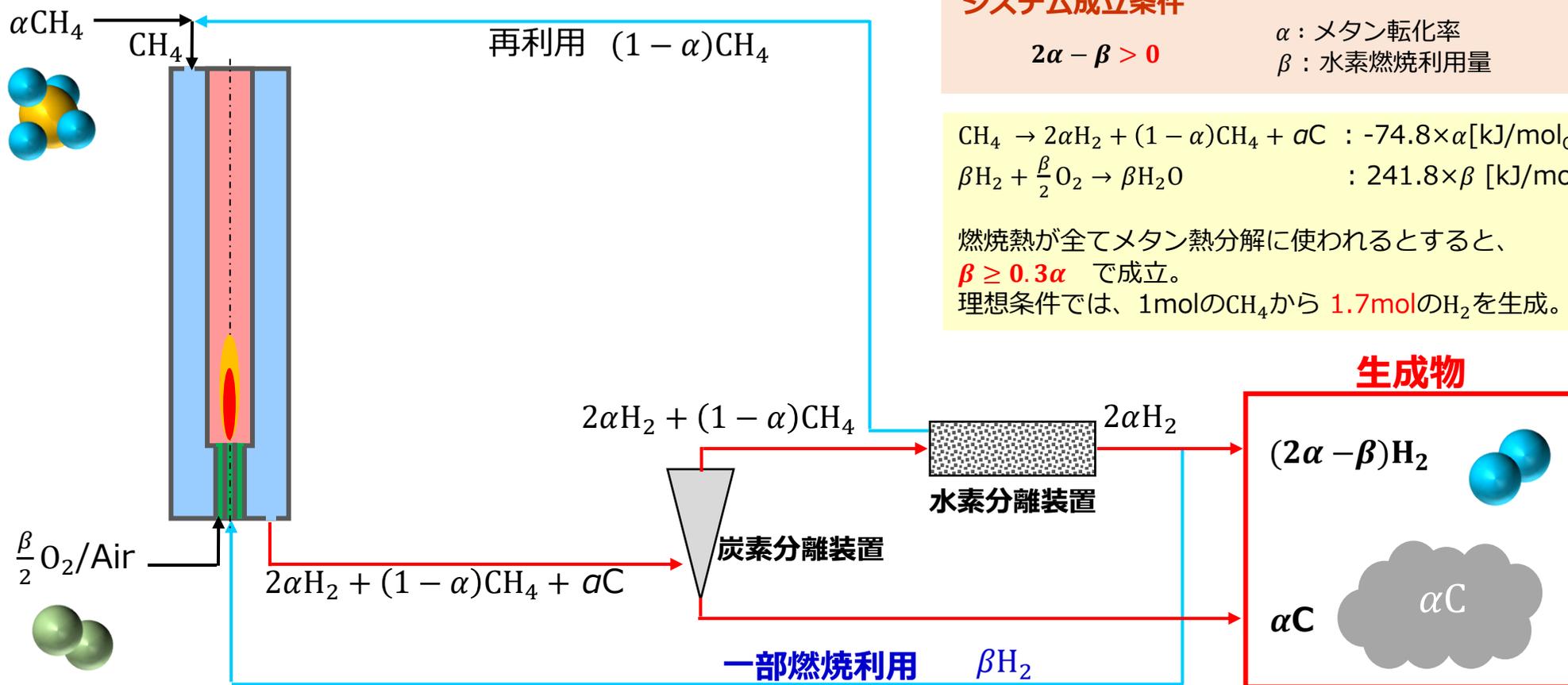


製鉄工程からの“高温排ガス”との熱交換のみではなく  
“様々な高温排熱”との熱交換に応用可能

## 自立燃焼加熱型ターコイズ水素製造装置

生成水素の一部を燃焼

➔ **完全熱自立**での完全CO<sub>2</sub>フリー作動



## 自立燃焼加熱型ターコイズ水素製造装置

生成水素の一部を燃焼

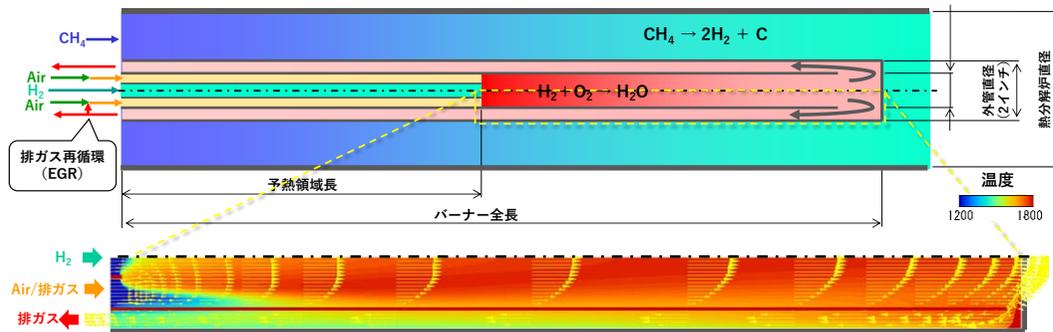
➔ **完全熱自立**での完全CO<sub>2</sub>フリー作動

2. 水素の製造装置および水素の製造方法

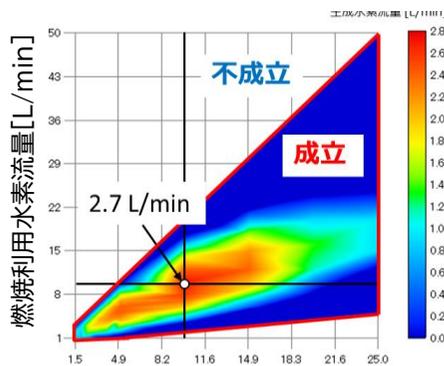
出願番号/出願日: 特願2023-136570 / 2023年8月24日

発明者: 朝原誠, 宮坂武志, 安里勝雄, 富樫憲一

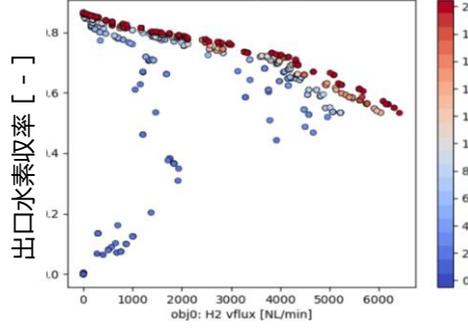
- ・排ガス再循環(EGR) ➔ 排熱回収
  - ➔ 過剰な高温化を抑制
  - ➔ NOx排出量削減



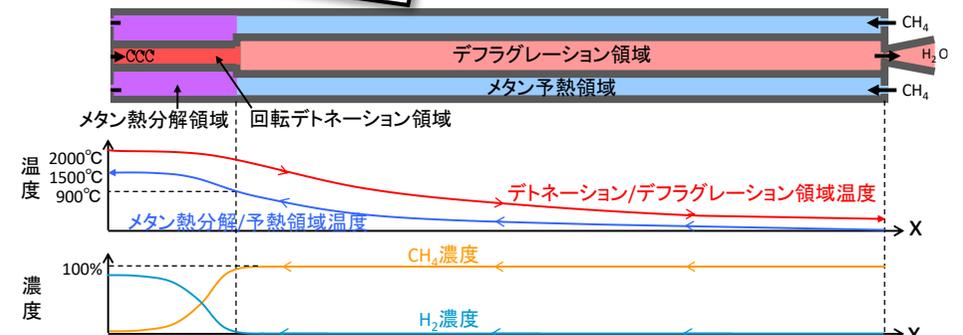
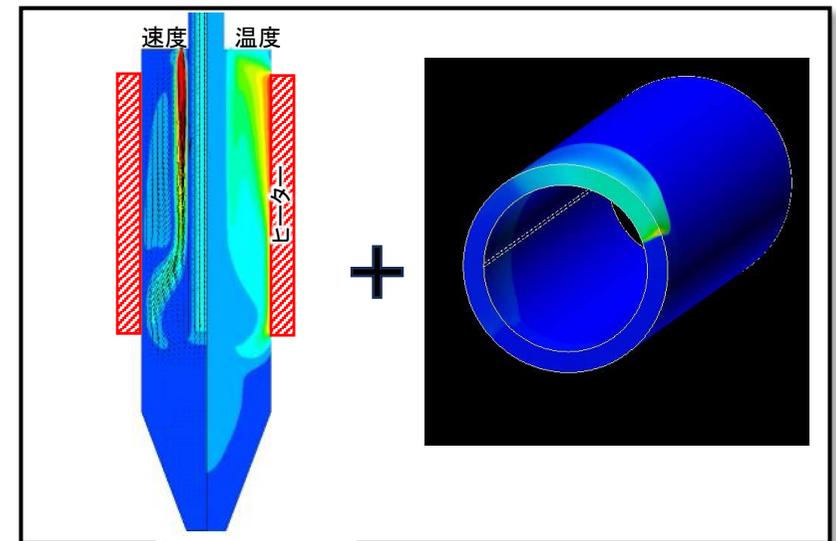
生成水素流量マップ



パレート解例



## デトネーション型の水素燃焼加熱

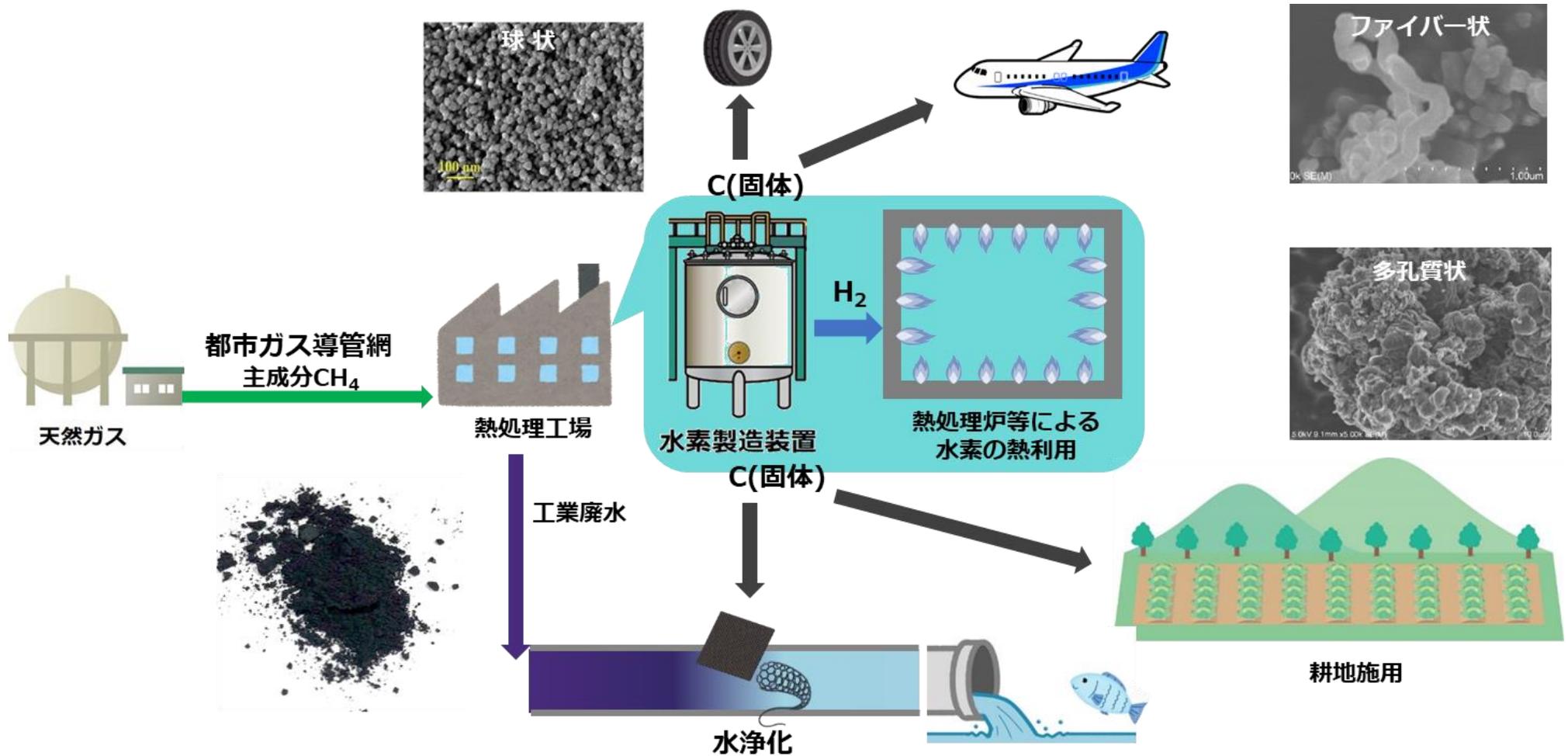


## ② 自立燃焼加熱型ターコイズ水素製造装置

### 自立燃焼加熱型ターコイズ水素製造装置

高価格で販売できる高付加価値炭素を生成

➡ 炭素の販売益により**水素製造コストをオフセット**

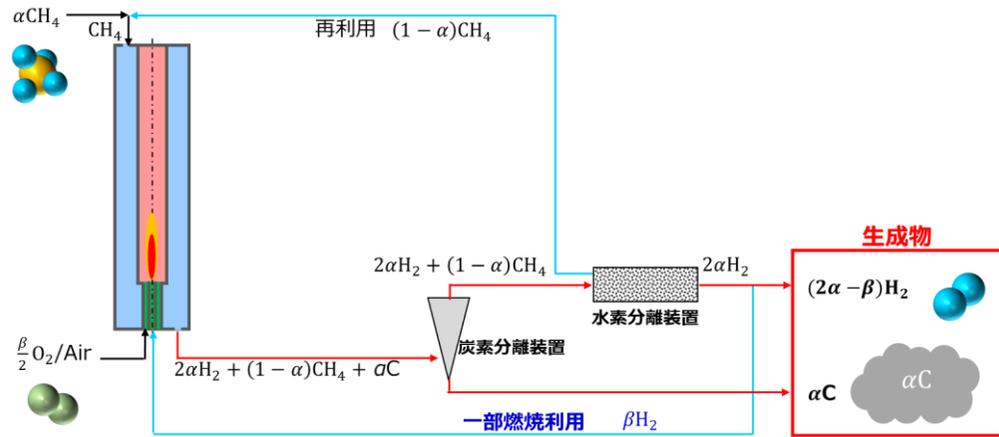


# ② 自立燃焼加熱型ターコイズ水素製造装置

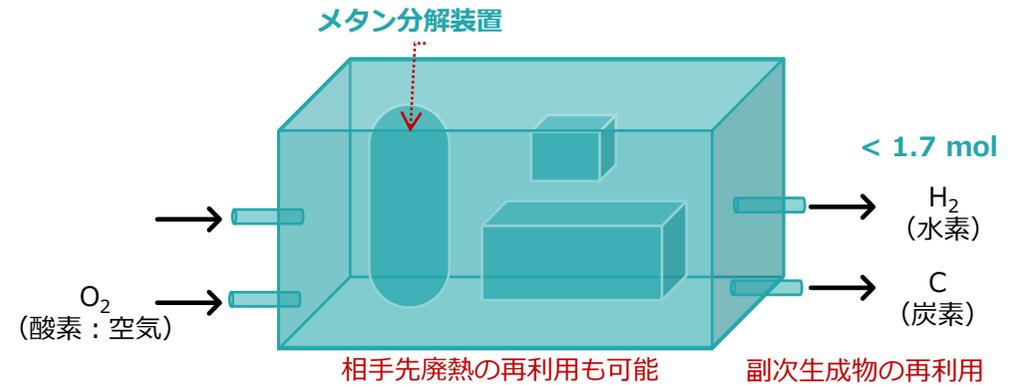
## 自立燃焼加熱型ターコイズ水素製造装置

20ftコンテナサイズでパッケージ化

➡ **トラック輸送 + タンキーシステム**



## 20ft コンテナサイズ小型水素製造機の開発

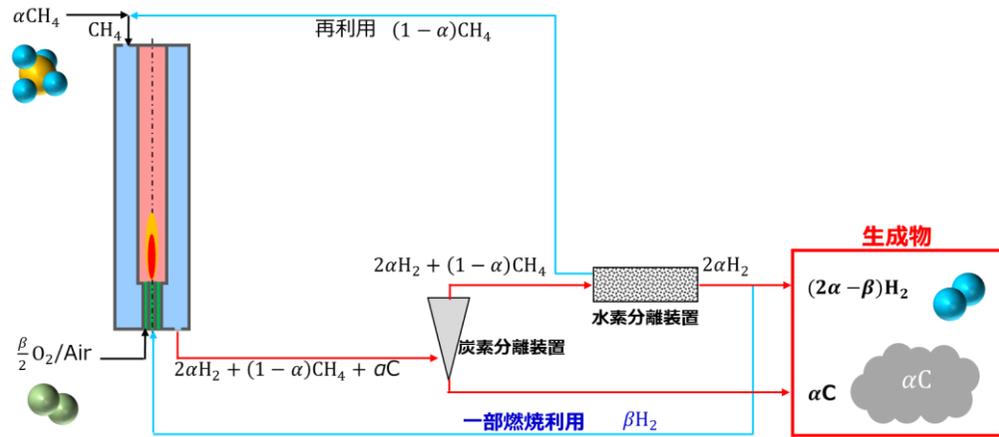


# ② 自立燃焼加熱型ターコイズ水素製造装置

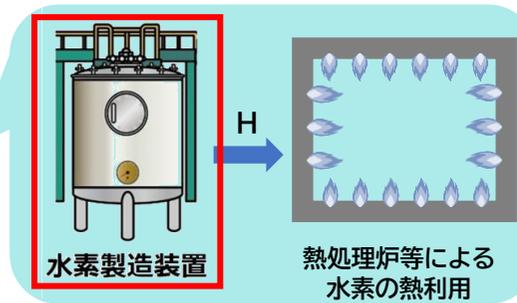
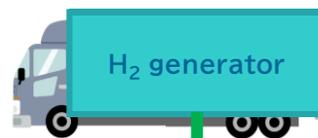
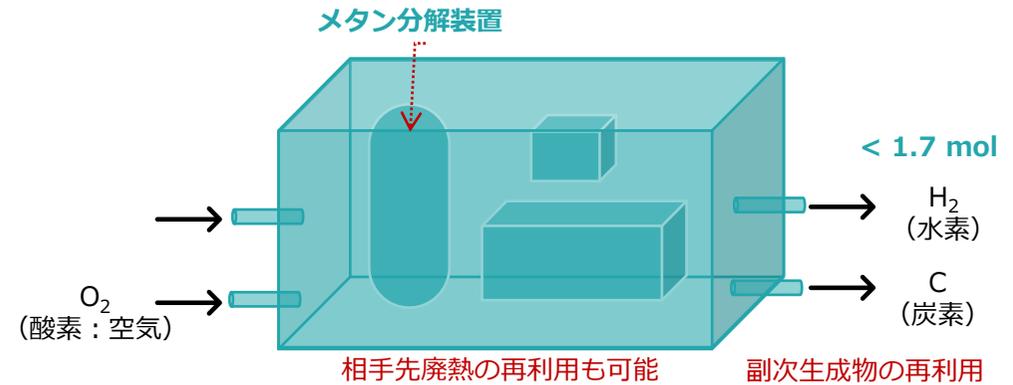
## 自立燃焼加熱型ターコイズ水素製造装置

20ftコンテナサイズでパッケージ化

➡ **トラック輸送 + タンキーシステム**

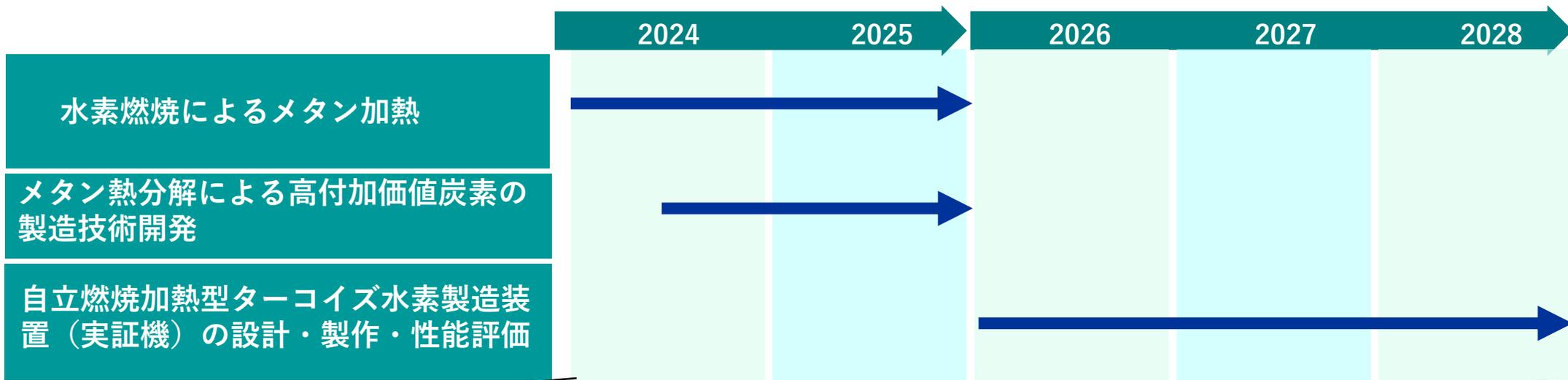


## 20ft コンテナサイズ小型水素製造機の開発

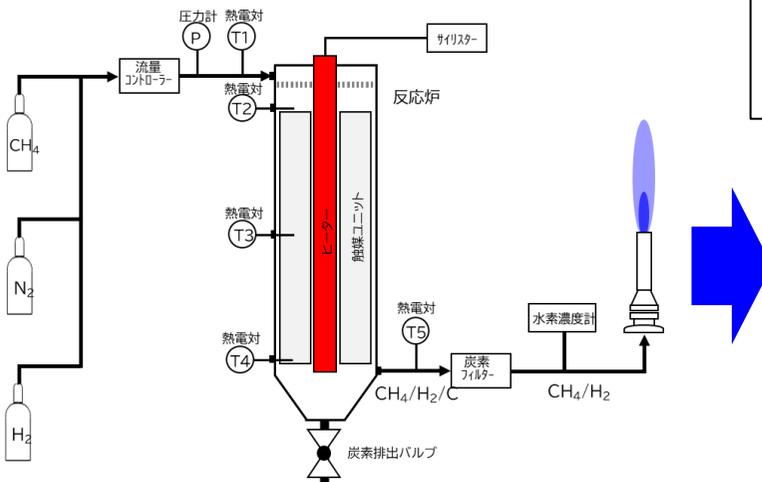


# 研究開発計画

短期・中期計画

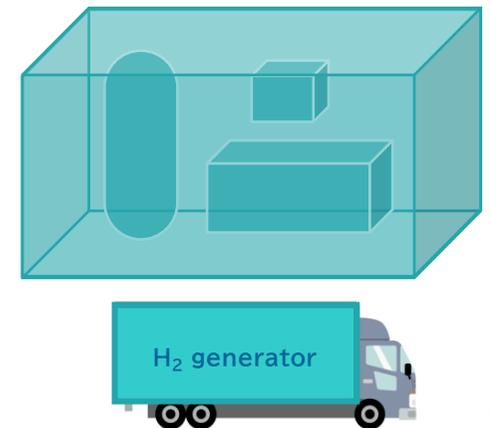
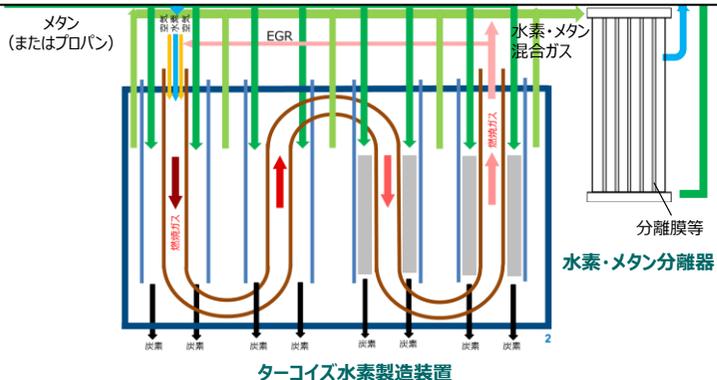


長期計画



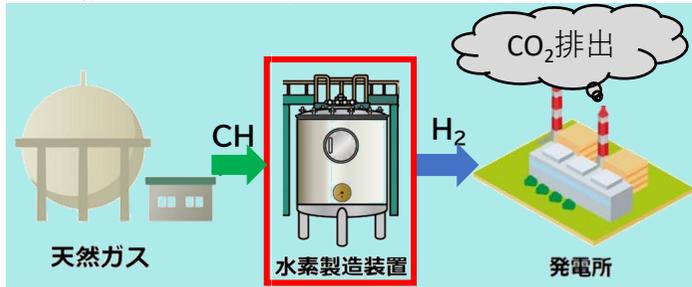
### 3. 水素の製造装置

出願番号/出願日: 特願2023-186131 / 2023年10月26日  
発明者: 梅田良人, 山下博史, 朝原誠

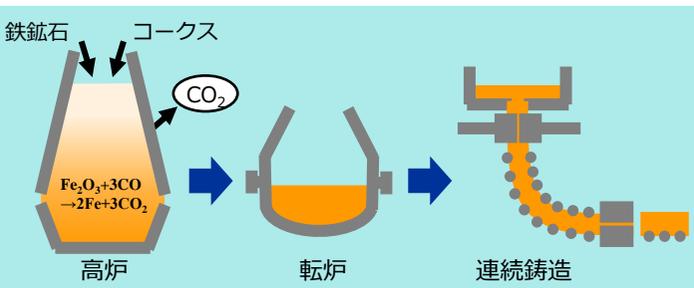


# 将来への発展性:ターコイズ水素の社会実装イメージ

天然ガス火力発電 → ターコイズ水素発電



製鉄プラント (Iron and Steel Plant)

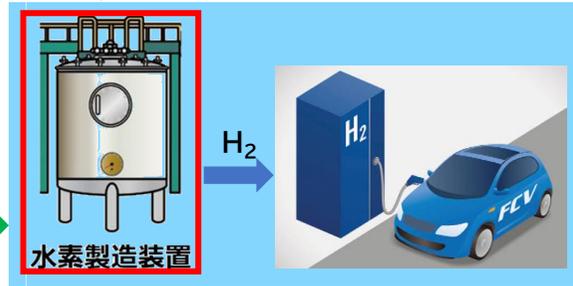


既存のインフラを利用 (Utilizing existing infrastructure)

都市ガス導管網  
主成分CH<sub>4</sub> (Urban Gas Pipeline Network, Main component CH<sub>4</sub>)

電力 (Electricity)

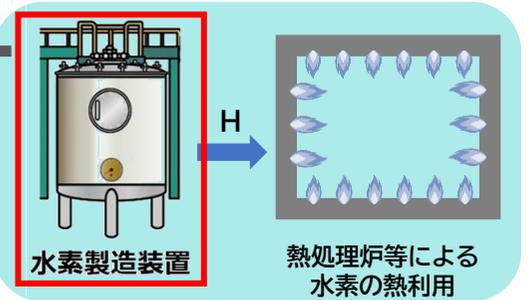
水素ステーション (Hydrogen Station)



炭素の材料利用 (Carbon Material Utilization)



熱処理工場 (Heat Treatment Plant)



再生可能エネルギー由来発電 (Renewable Energy Origin Power Generation)

エネルギー供給源を分散化  
レジリエンスの強化 (Diversify energy supply sources, strengthen resilience)

各家庭へ (To each household)



日本国内の工業炉市場規模：2,000億円／年程度 (日本工業炉協会参照)

世界の熱処理市場規模：4.5兆円／年

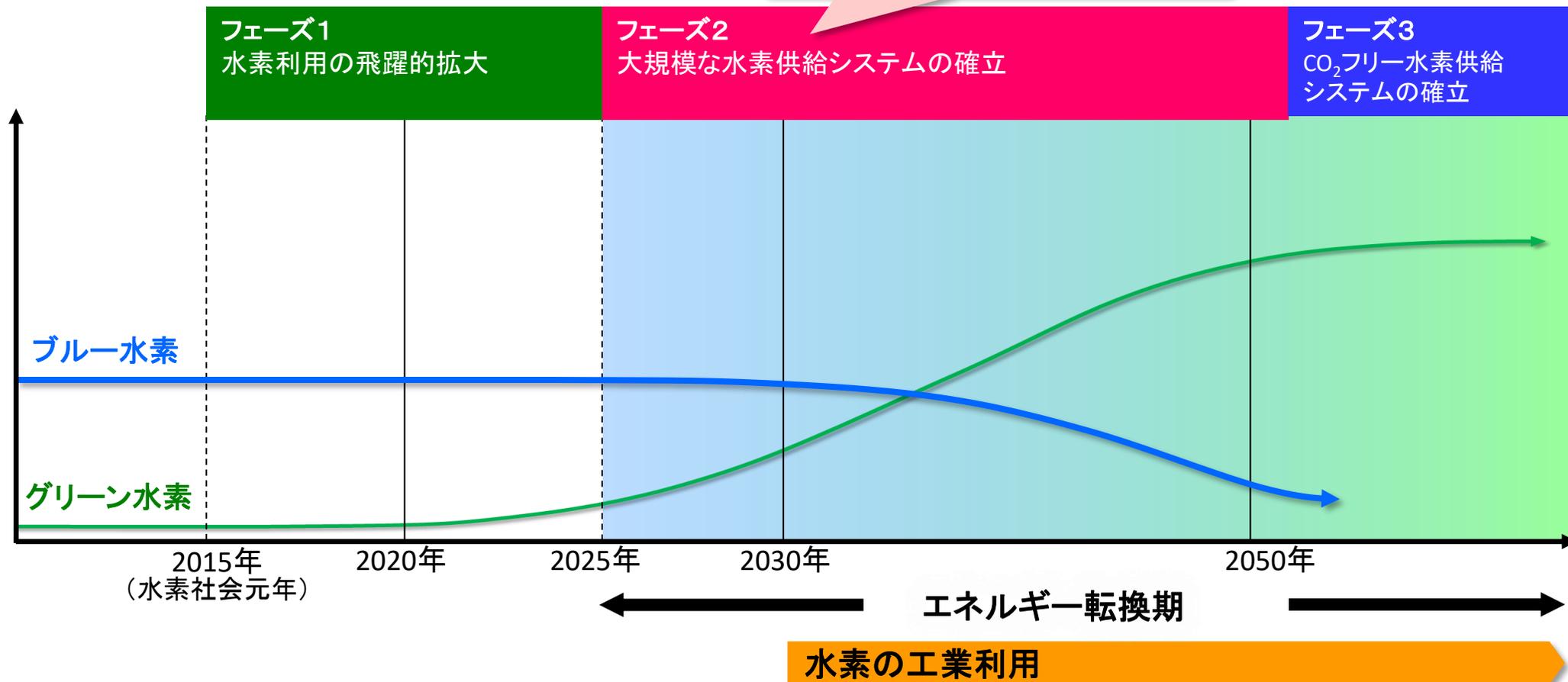
東海地区の工業炉用バーナの潜在市場：30億円／年程度  
(自動車用部品、窯業、鉄鋼、ガラス等の加工など)

工業炉用水素バーナーの開発による地場産業の活性化が期待

# 将来への発展性: 水素の普及イメージ

ブルー水素 から グリーン水素 への変換

普及に大規模なコストを要する



理想的には、再生可能エネルギー由来であるグリーン水素の利用が望ましいが・・・

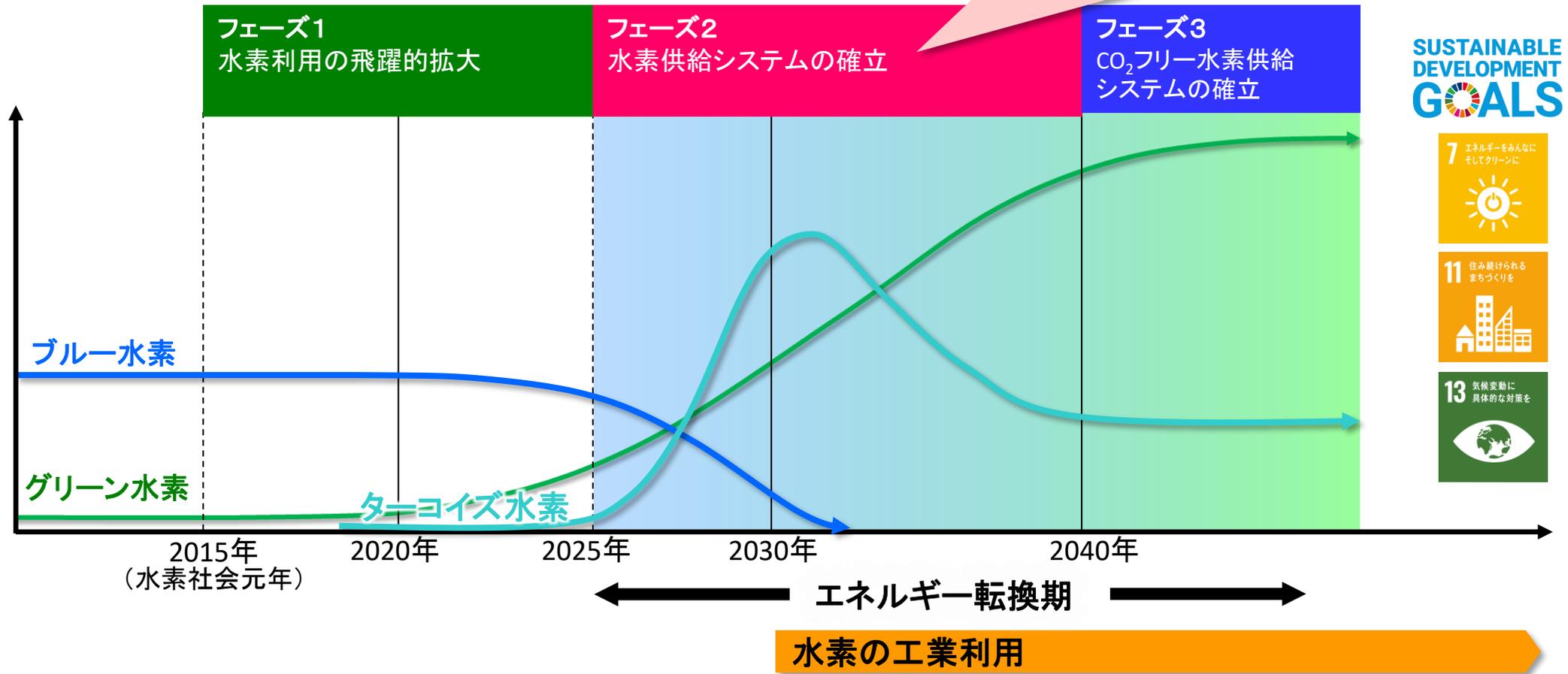
⇒ インフラ整備に時間と費用を要する

⇒ エネルギー需要を満たす水素供給は不可能

# 将来への発展性: 水素の普及イメージ

ブルー水素 から ターコイズ水素 へ  
そして グリーン水素 へ

水素エネルギー転換コストを低減できるため、  
水素エネルギー社会への転換を加速する



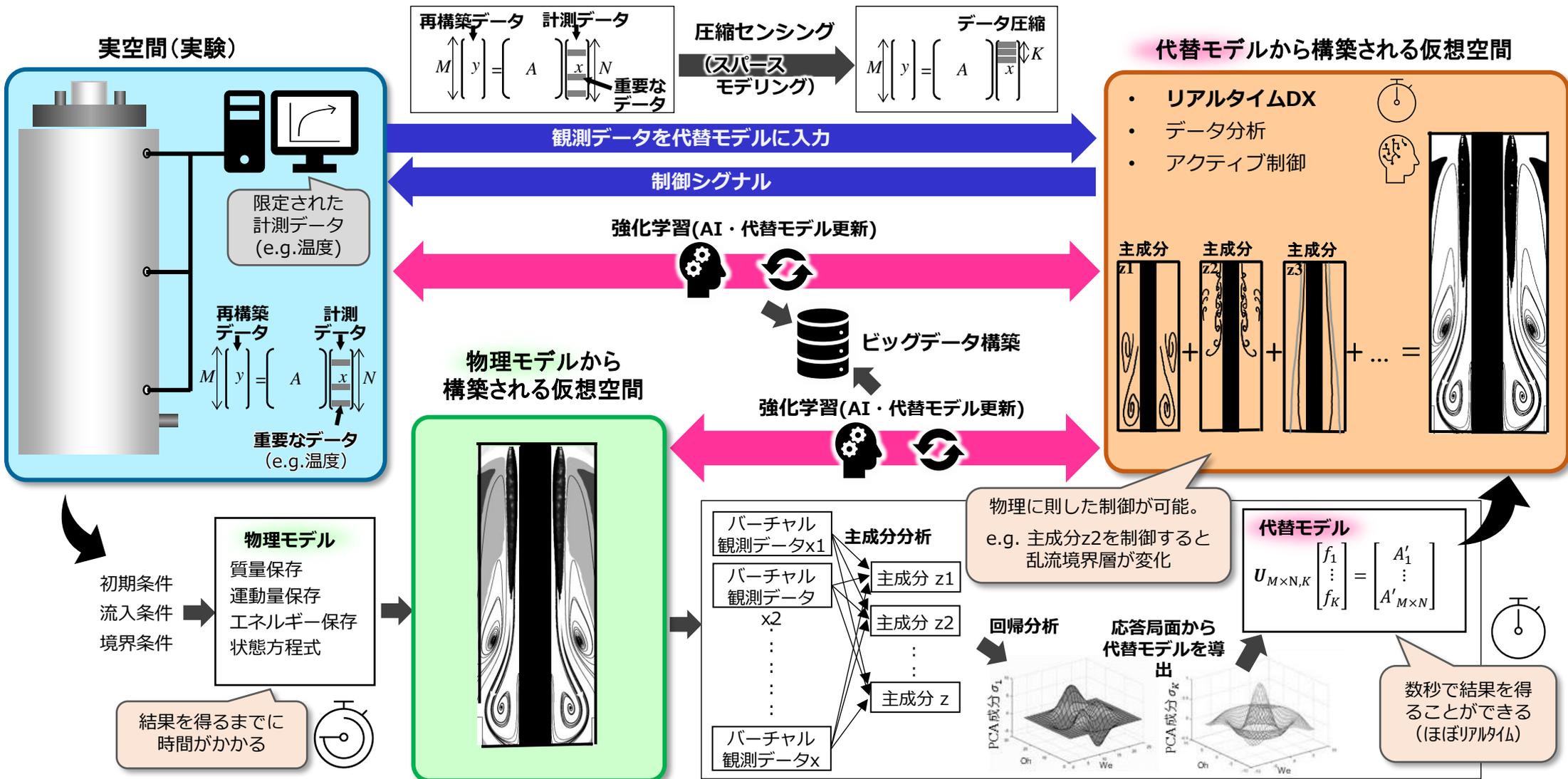
理想的には、再生可能エネルギー由来であるグリーン水素の利用が望ましいが・・・

- ⇒ インフラ整備に時間と費用を要する → 導入コストが低いターコイズ水素を利用
- ⇒ エネルギー需要を満たす水素供給は不可能 → グリーン水素 + ターコイズ水素

# ③水素製造装置のデータ同化強連成DX手法

Society 5.0(第5期科学技術基本計画)で日本が目指す未来社会

サイバー空間(仮想空間)とフィジカル空間(現実空間)の高度融合による“超スマート社会”の構築



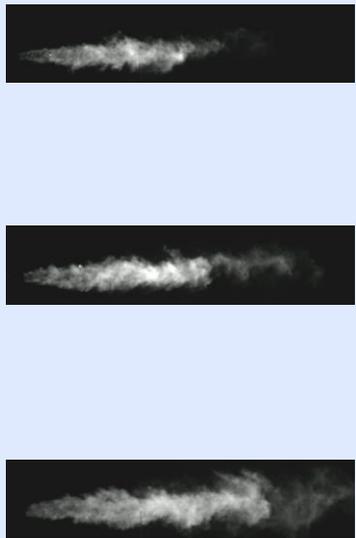
# ③DX手法のコア技術： 水素噴流火炎の例

## “水素噴流火炎”の動画を再構築

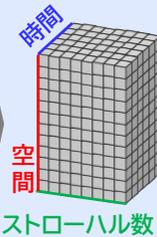
動画生成AIのように条件を入力するとその条件の水素噴流火炎の動画を生成

### 準備段階

#### 水素噴流火炎

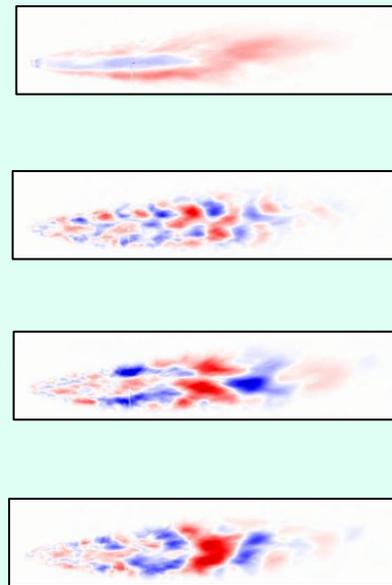


ビッグデータ構築



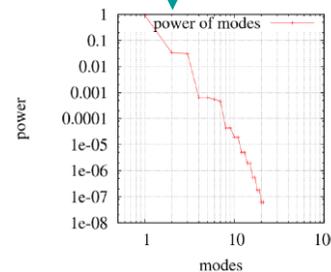
### データ科学による画像分析段階

FFT-iFFT



#### 縮約モデル

$$\hat{X} = \Phi \sqrt{\hat{\Lambda}} \Psi$$



$$\begin{aligned} &\sqrt{\lambda_1} \\ &+ \sqrt{\lambda_2} \\ &+ \sqrt{\lambda_3} \\ &+ \sqrt{\lambda_4} \\ &+ \dots \end{aligned}$$

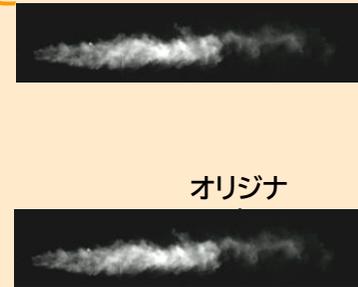
振幅の大きいモードの重ね合わせで流れ場を再構成する簡略式

### 画像生成段階

#### 画像再構築

1~7モードで再構築

条件設定



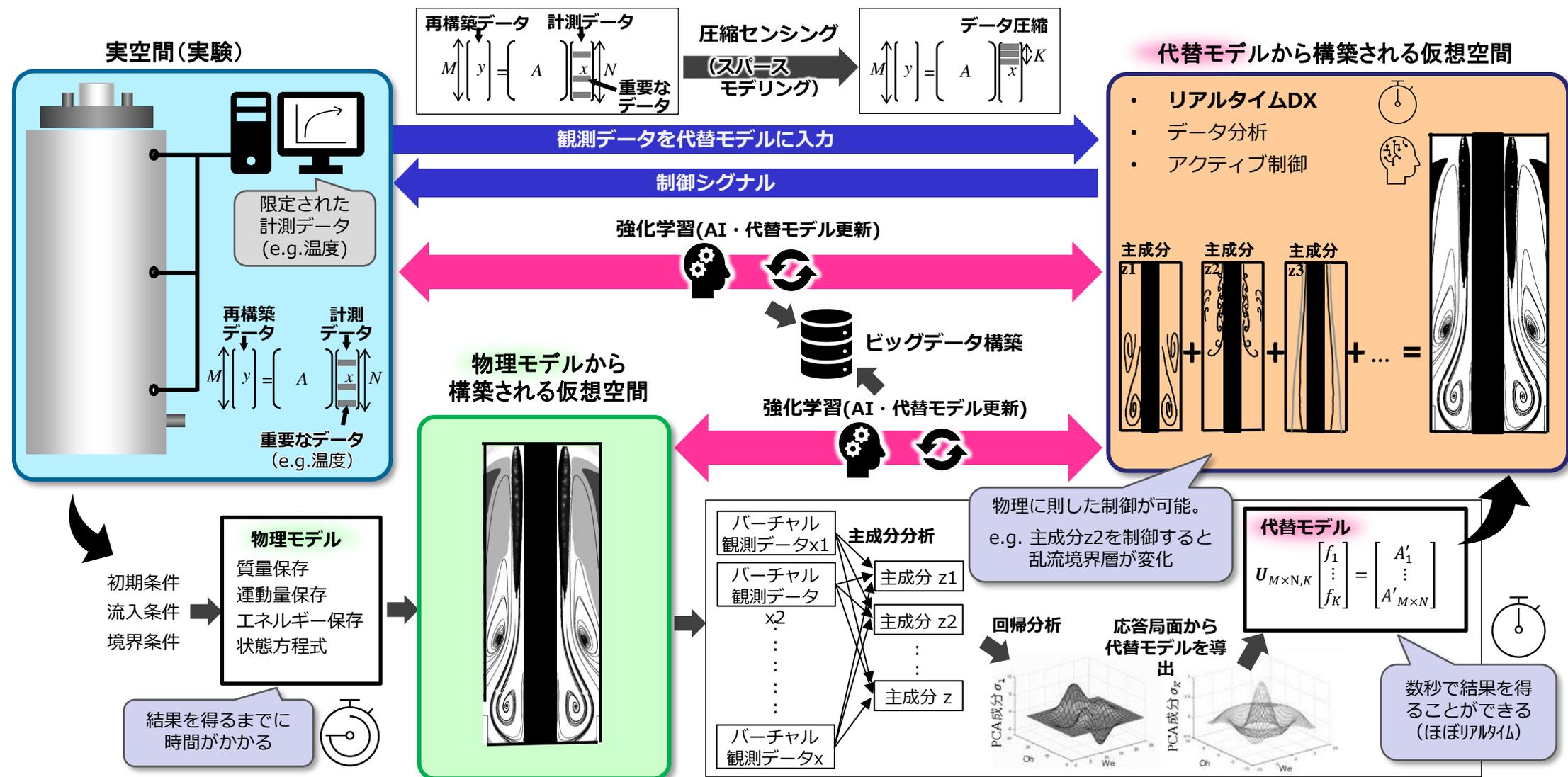
オリジナル

この技術で反応炉内の状態を仮想空間に再現

# ③水素製造装置のデータ同化強連成DX手法

物理空間と現実空間のデータ同化強連成DXによるデジタル運用ツールを開発

※ “水素製造”に限定されない



# お問い合わせ先

**岐阜大学 学術研究・産学官連携推進本部**  
**産学官連携推進部門 知的財産担当**

**TEL 058-293-2034**

**FAX 058-293-2032**

**e-mail [sangaku@t.gifu-u.ac.jp](mailto:sangaku@t.gifu-u.ac.jp)**