

「NEDOプロジェクトを核とした人材育成、産学連携等の総合的展開
/カーボンリサイクルに係る特別講座」

第3回講座
地域から発信するカーボンリサイクル【HIROSHIMAチャレンジ】

カーボンリサイクルに関する材料等の開発 触媒から装置まで基盤技術と適用事例の紹介

2026年6月11日

戸田工業株式会社 創造本部

環境貢献材料事業開発グループ 高橋真司 山根一真

未来を支える粒子になる。



- 戸田工業のご紹介
- カーボンニュートラルに向けた取組みについて
- DMR法による水素・カーボンナノチューブの製造技術

戸田工業のご紹介

戸田工業株式会社のご紹介

戸田工業とは

2023年に創業200周年を迎えた酸化鉄メーカー

創業以来200年培った技術を、ルーツである顔料だけではなく、

自動車、ICT、スマートフォンや家電などの幅広い用途で最先端分野へも展開



会社概要

業種	: 無機化学品製造
資本金	: 74.77億円
売上高	: 316億円(2025年3月期連結)
創業	: 1823年(文政6年)
会社設立	: 1933年(昭和8年)
上場市場名	: 東証スタンダード(1983年上場)
従業員数	: 368人(単体) 1,067人(連結) (2025年3月31日現在)

 創業 202年目 (創業1823年)	 従業員数 連結 1,067人 個別 368人
 開発従事者 個別 約3分の1	 特許保有数 792件

(注)2025年3月末時点

ベンガラ(Fe_2O_3)から始まる戸田工業の歴史

- 1823年** ●古くから顔料として利用されてきたベンガラを
岡山県井原市で工業的に製造開始
- 1933年** ●広島市にベンガラの製造販売を事業目的とする
「戸田工業株式会社」を設立
- 公害問題発生
- 1960年代** ●湿式合成法の開発&成功
公害問題の克服
- バリエーションに富む酸化鉄を自由自在に作り分ける
- 1970年代** ●オーディオ・ビデオテープ用磁気記録材料の開発
- 事業基盤の変化
- 2000年~** ●電池材料など非鉄事業への進出
- 湿式合成から始まるナノテクノロジーを
コアコンピタンスに、新しい事業領域へ拡大
- 2023年** ●11月30日 創業200周年



Founded in 1823
TODAKOGYO
200
& 90th
Established in 1933

最先端技術であなたとともに。

■ Device

電子部品用材料事業



- 自動車モータ用磁石材
- 家電モータ用磁石材
- 各種センサ用磁石材
- 電子部品(インダクタ・コンデンサ)

■ EMC

電磁対策材料事業

- スマートフォン製品用部品
- ウェアラブル製品用部品
- 電波吸収材



■ Imaging

電子印刷材料事業



- モノクロプリンター用トナー材
- カラー複写機用キャリア
- プリンター・複写機用磁石材

■ Ecology

環境機能材料事業



- 鉛フリー材料(塩ビ安定剤・道路標示材)
- 燃焼触媒
- 汚染土壌改良剤

■ Digital

デジタル記録材料事業

- コンピューター記録テープ用
デジタル磁気記録材
- 磁気カード用記録材



■ Color

顔料事業



- 自動車・事務機器用顔料
- 建築・建材用顔料
- 船底用防錆顔料

■ Battery

電池材料事業

- 電気自動車用電池材料



カーボンニュートラルに向けた取組みについて

環境ビジョン

- ・2019年、環境負荷低減の促進を目的に策定。
- ・「環境経営5本柱」を定め、循環型社会実現への取組みを推進。(2023年11月30日改定)

戸田工業WEBサイト
環境ビジョン



環境経営5本柱

01

生物多様性への取組み

事業活動・社会活動を通して生物多様性保全を目的とした活動を推進します。



02

温室効果ガスの削減

気候変動をマテリアリティと定め、温暖化を1.5℃に抑える世界を目指します。

03

水資源の保全

高純度・高機能な製品提供のための水資源の確保、事業継続のための排水品質の管理に取り組みます。



04

環境調和型製品・ 技術の提供

パーパスを実現するべく、微粒子合成技術でイノベーションの創出を支援します。

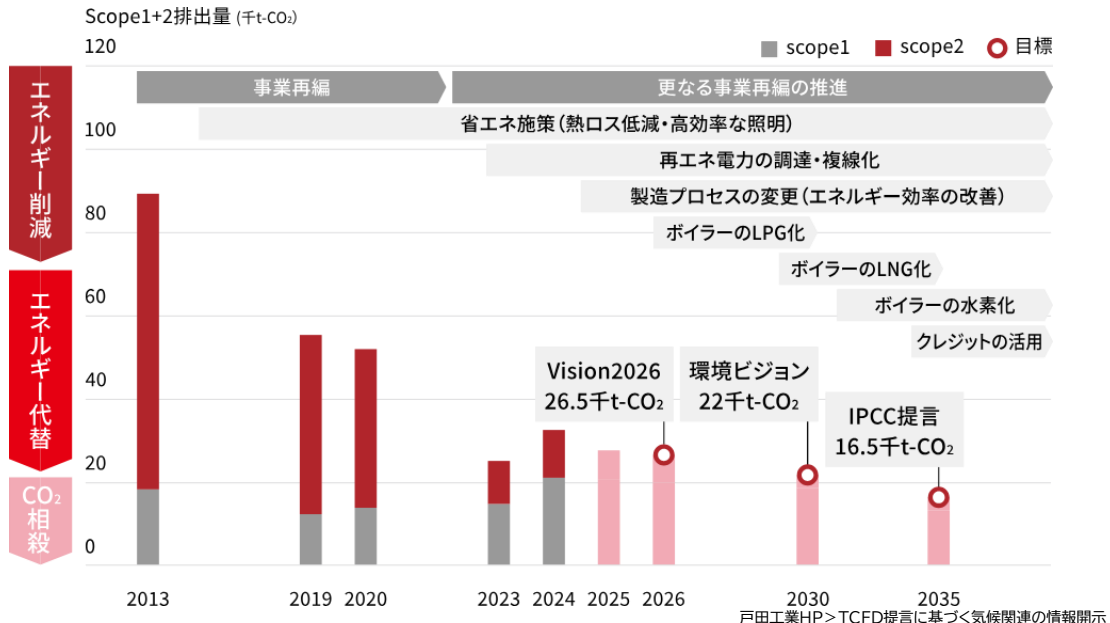
05

循環型社会形成への 取組み

3Rの取組みを推進し、環境貢献・環境負荷低減のための国または地方公共団体が実施する施策に協力します。

環境ビジョン 02 温室効果ガスの削減

・気候変動をマテリアリティとして特定し、カーボンニュートラルの推進に取り組む。



環境ビジョン 04 環境調和型製品、技術の提供

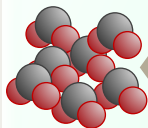
- ・温室効果ガスの低減に貢献する製品、技術の開発に取り組む。
- ・2027年以降、事業化し、2030年度 売上高10億円を目指す。

※メタンの温室効果は、CO₂の約28倍

CO₂低減へのアプローチ

CO₂の回収・貯留・有効活用

CO₂固体回収材の提供

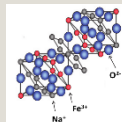


CO₂濃縮ガス



吸収

ナトリウムフェライト(CO₂固体回収材)



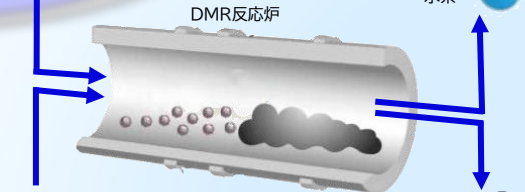
鉄、酸素、ナトリウムの層状化合物

温室効果ガス

大気・排ガス 天然ガス
二酸化炭素 CO₂ メタン※ CH₄



メタン直接改質法(DMR法)



鉄系触媒



カーボンナノチューブ

CH₄低減へのアプローチ

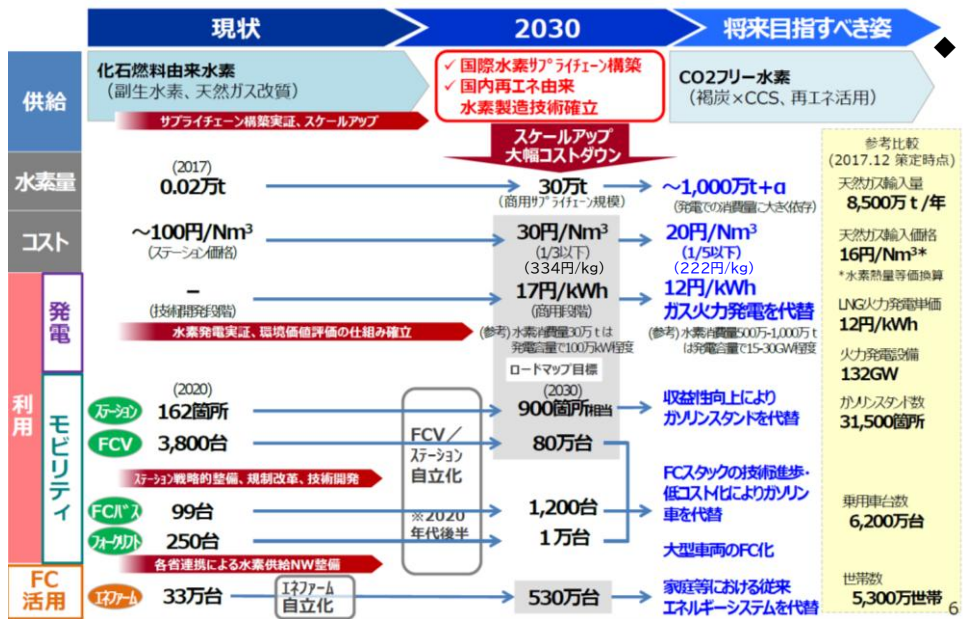
未利用天然ガスを用いた
クリーン水素の生成

DMR法による水素・カーボンナノチューブの製造技術

1. 日本の水素戦略と水素製造技術
2. DMR法による水素・カーボンナノチューブ製造技術
3. 豊富町未利用天然ガスを活用した地域CO₂フリー水素サプライチェーンの構築事業
4. 鉄系触媒によるDMR反応

1. 日本の水素戦略と水素製造技術

水素基本戦略における達成目標



◆ 日本は世界で初めての水素基本戦略を2017年12月に策定。
 ▶ 水素は燃焼時に二酸化炭素(CO₂)を排出しない環境特性と、エネルギーキャリアとして再生可能エネルギー等を貯め、運び、利用することができる特性を有する。



エネルギー資源の乏しい日本におけるエネルギー安全保障と温暖化対策の切り札となり得る。

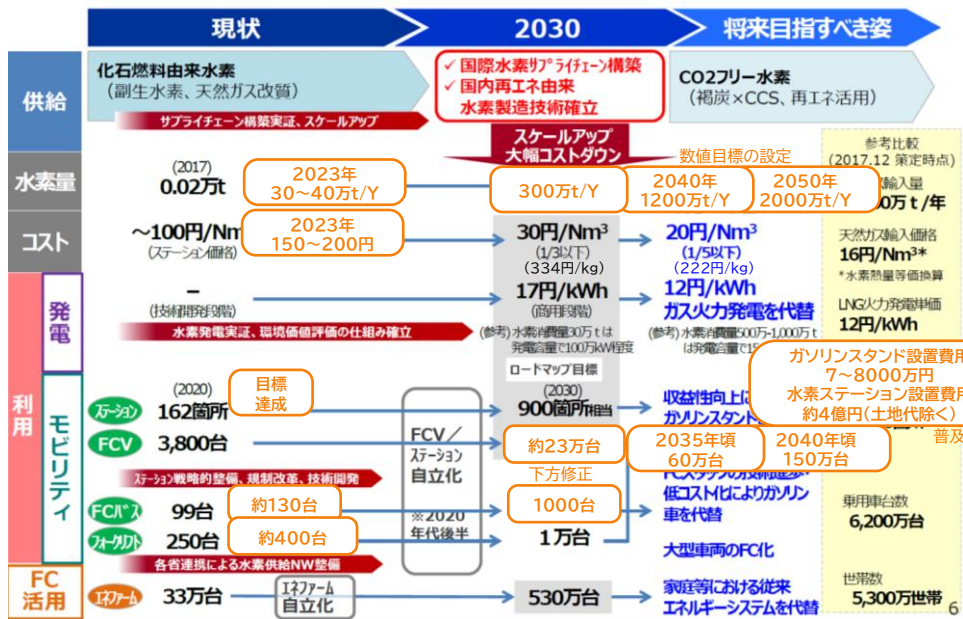
▶ 2030年頃に年間30万t程度の水素の調達と30円/Nm³程度の水素コストの実現し、将来的に20円/Nm³程度までコスト低減することを目標。

参考比較 (2017.12 策定時点)

天然ガス輸入量	8,500万 t/年
天然ガス輸入価額	16円/Nm ³ *
*水素熱量等価換算	
LNG火力発電単価	12円/kWh
火力発電設備	132GW
ガolinスタノ数	31,500箇所
乗用車台数	6,200万台
世帯数	5,300万世帯

再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議, 水素基本戦略(2017)より引用

水素基本戦略における達成目標 → 現状



日本LNG輸入価格: 91.35千円/トン (2026年3月)

- LNG熱量(HHV): 54.69MJ/kg
- 水素熱量(HHV): 141.77MJ/kg

⇒ 等価価格 21.3円/Nm³(H₂)

2024年4月ENEOS 価格改定
 1650円/kg → 2200円/kg
 (148円/Nm³ → 197円/Nm³)

※ENEOS公式サイト ENEOS水素の価格改定について

2024年6月岩谷瓦斯 価格改定
 1200円/kg → 1650円/kg
 (108円/Nm³ → 148円/Nm³)

※岩谷瓦斯公式サイトに掲載

目標価格に及ばない現状

豪州のCQ-H2プロジェクトの事実上中止等
 グリーン水素の低価格化も先行き不透明

低炭素水素の低価格化・安定供給に課題

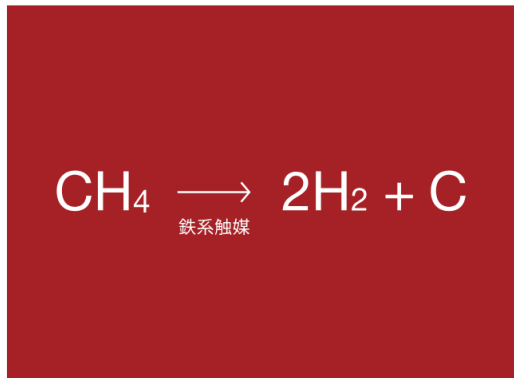
再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議, 水素基本戦略(令和5年6月6日改定)を参考に修正

2. DMR法による水素・カーボンナノチューブ製造技術

DMR反応による水素・CNT製造の特徴

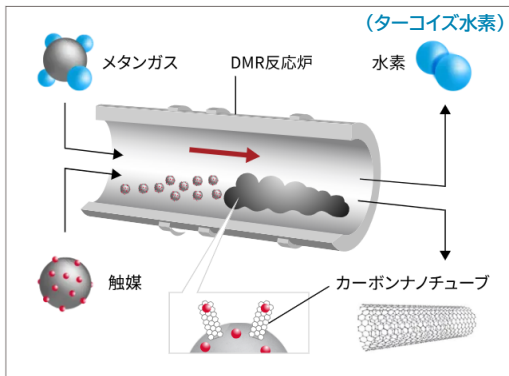
メタン直接改質法※による水素・カーボンナノチューブの合成 ※北見工業大学 多田旭男名誉教授が提唱され開発された技術

メタン直接改質法 (DMR: Direct Methane Reforming 法)



反応式

メタンからCNTと水素を生成するクリーンな反応

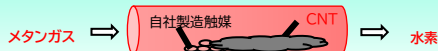
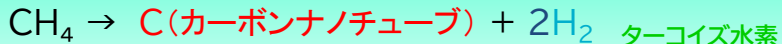


概略図

LCA(Life Cycle Assessment)

炭素材料の製造時CO ₂ 排出量	
カーボンブラック	2.06 CO ₂ -kg/kg
炭素繊維	20.0 CO ₂ -kg/kg

DMRとは: Direct Methane Reforming (メタン直接改質)



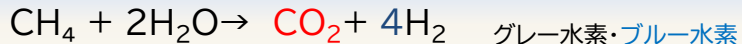
メタンを直接改質し、CNTと水素を生成するクリーンな反応

DMR-CNTを他炭素材料の代替として利用すれば、さらなるCO₂排出量の削減が可能

LCA: Life Cycle Assessment

炭素材料の製造時CO ₂ 排出量	
カーボンブラック	2.06 CO ₂ -kg/kg
炭素繊維	20 CO ₂ -kg/kg

メタン水蒸気改質: 一般的な水素製造法



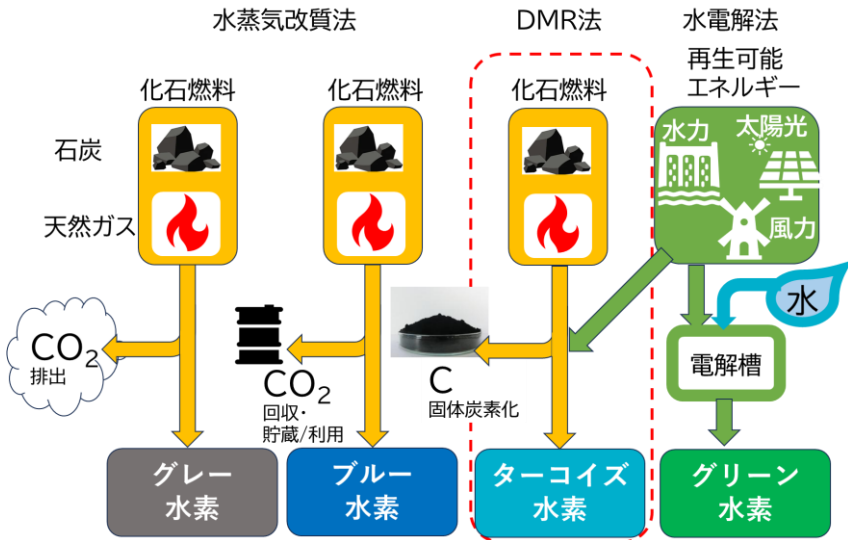
DMR法に比べ、水素生成量が多いが、多量のCO₂ガスを副生
→ 生成したCO₂を低エネルギーで回収貯留(CCS)する技術が求められる

DMRは低炭素社会に貢献可能な技術
カーボンニュートラルな水素製造とCNT製造の両立を実現可能

水素の色分類と定義

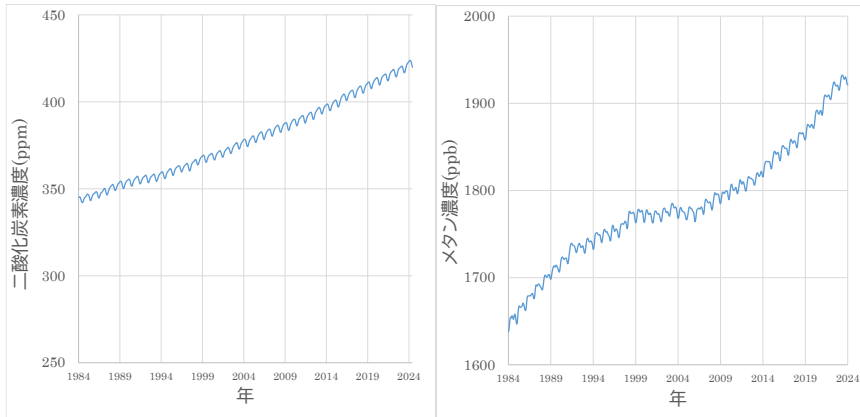
色	定義
グリーン水素	再生可能エネルギー由来の電力を利用し、水の電気分解で水素を生成する。
ターコイズ水素	メタンの熱分解により水素を生成し、二酸化炭素ではなく副産物として固体炭素を生成する。反応炉稼働は、再生可能エネルギーまたはカーボン・ニュートラルエネルギー由来であることが条件。
ブルー水素	石炭や天然ガスなどの化石燃料から水素を生成するが、発生する二酸化炭素を分離し、大気放出させずに地下や海中に貯蔵する。
グレー水素	石炭や天然ガスなどの化石燃料から水素を生成し、二酸化炭素と一酸化炭素を放出する。

出典:ドイツ政府「国家水素戦略」



二酸化炭素とメタンガスの世界平均濃度の推移

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)
Earth System Research Laboratories Global Monitoring Laboratory公開データより月平均濃度をプロット



	CO ₂	CH ₄
世界平均濃度 (2023年)	420.0±0.1 ppm	1934±2 ppb
1750年と 比較した存在比	151%	265%
2022年から 2023年までの 増加量	2.3 ppm	11 ppb
2022年からの 増加分の比率	0.55%	0.57%
世界平均濃度の 最近10年間の 平均年増加量	2.4 ppm/年	10.7 ppb/年

※WMO 温室効果ガス年報 第20号

メタンガスは温暖化効果が二酸化炭素の28倍高い

※IPCC(気候変動に関する政府間パネル)の第5次報告書

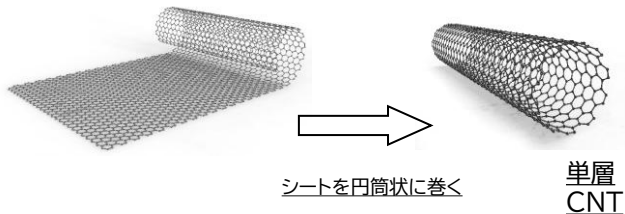
大気中で分解されるのに要する時間

二酸化炭素 : 数10年～
メタン : 約12年(分解時にCO₂になる)

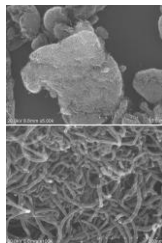
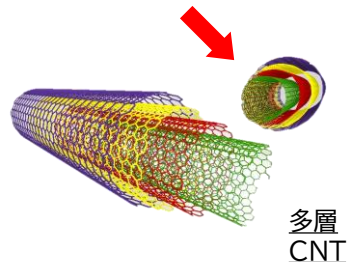
メタンの排出量削減は気候変動を抑制する
上でより即効性があると考えられる。

カーボンナノチューブ(CNT)の一般的特徴

CNTの構造



戸田工業製CNT(約15層構造)
Tangle(毛玉状)



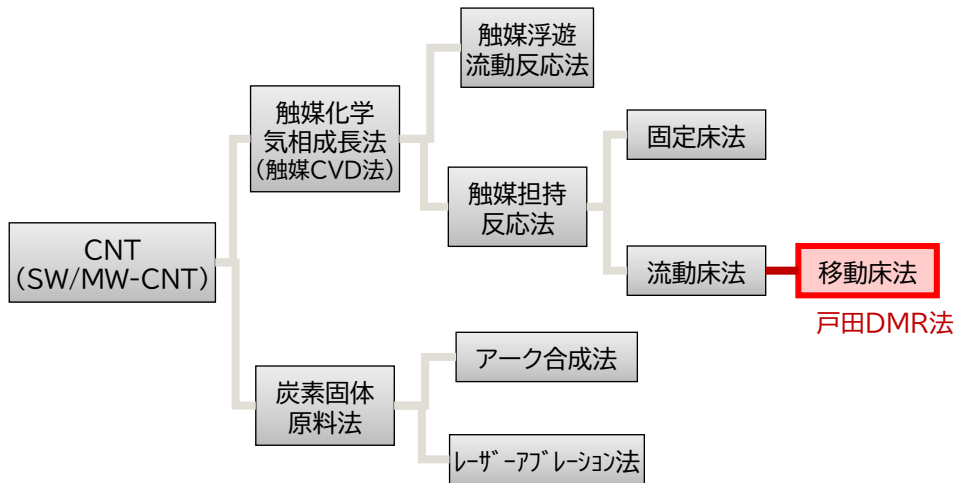
CNTの特徴

- ・導電性
銅の1000倍
- ・機械的特性
鋼鉄の100倍
- ・熱伝導性
銅の10倍
- ・その他
化学・温度安定性等・

CNTの課題

- ・難分散
- ・高価

CNT合成法におけるDMR法の位置付け



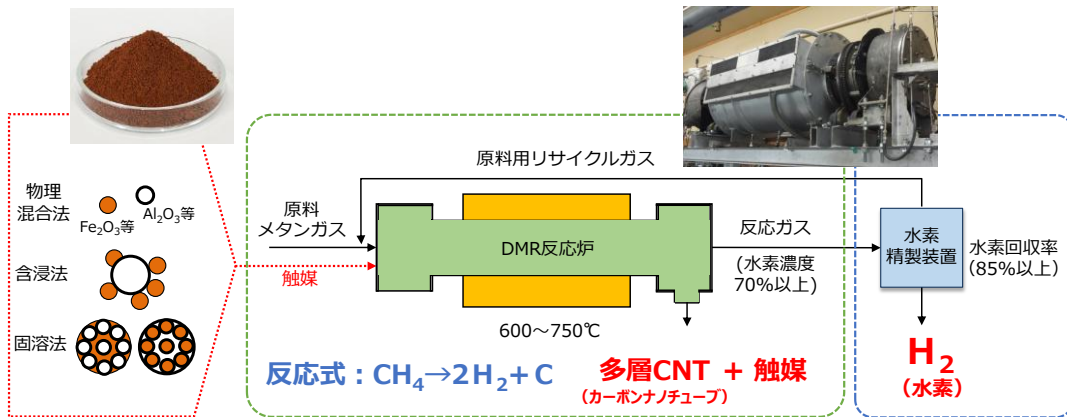
CNT合成法の観点から見ると、戸田工業のDMR法は、触媒CVD法のうち、工業的大量連続合成に適した流動床法に位置付けられる。

メタン直接改質法(低炭素水素製造技術)システム概要

既存の水素製造方法とは異なる、高活性鉄系触媒を用いたメタン直接改質(DMR)法により、CO₂フリーの水素(純度99.99%以上)を高効率に製造可能なシステム。

CO₂フリーの水素と同時に、高機能素材であるCNTをあわせて製造する。

DMR反応炉の加熱燃料として再生可能エネルギー等を用いることで「ターコイズ水素」としての提供ができる。

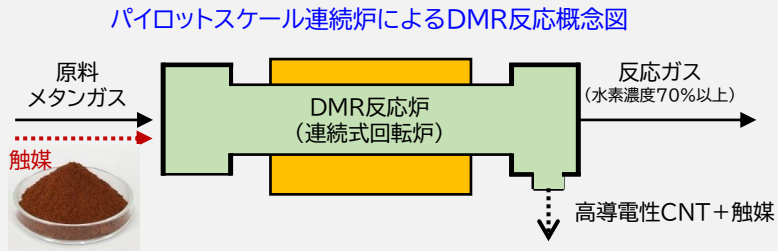


メタン直接改質法(低炭素水素製造技術)の特徴

- 独自のDMR反应用高活性鉄系触媒
触媒の調製法および調製仕様の最適化により、高い水素生成活性を持つ鉄系触媒を設計。



- 高濃度水素を安定生産可能なDMR反応仕様および制御技術
高活性鉄系触媒を用いた連続式回転炉の反応条件・炉内構造の最適化により、高濃度の水素生成反応(70%以上)と高品質(高導電性)のCNT生成反応の両立化を実現。



- CNTの性能評価および用途開発
競合品との差別化・優位性を明確化し、高付加価値用途を見出す。

4. 豊富町未利用天然ガスを活用した地域CO₂フリー水素サプライチェーンの構築事業

■ 豊富町未利用天然ガスを活用した地域CO₂フリー水素サプライチェーンの構築

事業テーマ：水素社会構築技術開発事業／地域水素利活用技術開発／地域モデル構築技術開発
 豊富町未利用天然ガスを活用した地域CO₂フリー水素サプライチェーンの構築
 実施予定先：エア・ウォーター株式会社、戸田工業株式会社

事業の目的

北海道天塩郡豊富町のメタンを主成分とする未利用温泉付随天然ガスを有効活用し、メタン直接改質（DMR）法により、化石由来の天然ガスから直接CO₂を排出させることなく安価で高純度なカーボンニュートラル水素（99.99%以上）を作り出し、近郊企業等へ提供することを主眼とした地域 CO₂フリー水素サプライチェーンを構築する。

事業期間

2023年度～2025年度

※期間中、ステージゲート審査にて25年度までの継続を判断

事業内容概略

- DMR法による水素製造の国内初となる商用スケール機を豊富町に設置し、地産地消型産業創出モデルを構築・実証する。
- 豊富町の温泉付随天然ガスから、CO₂フリー水素とカーボンナノチューブ（CNT）を併産。
 - CNTを高付加価値化することで、水素製造コストを大幅に低減する。（目標製造コスト：30円/Nm³）
 - 設備全体を非高压ガス機器で構成することにより、有資格者の確保が不要な設備とする。
 - 水素は、近隣の食品工場や、地域レジリエンス用途として自治体へ供給することで、地域脱炭素化を推進する。

事業イメージ



＜実施体制＞



本実証による成果をもとに、大型商用機での生産を開始し、事業化を目指す

背景・コンセプト

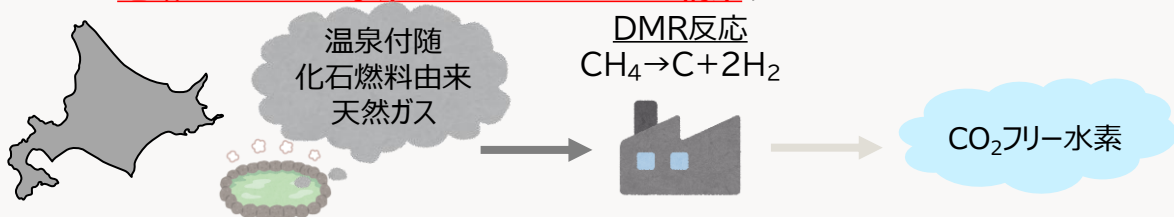
◆ 日本の2050年カーボンニュートラルの実現に必要なこと

①未利用資源の利活用 ②カーボンニュートラルエネルギーへの転換 ③省エネルギー化

①②を両立する
取り組み

◆ 本事業の目的

豊富町の未利用温泉付随天然ガスを有効活用し、メタン直接改質(DMR)法により化石由来の天然ガスから直接CO₂を排出させることなく安価で高純度なカーボンニュートラル水素(99.99%以上)を作り出し、近郊企業等へ提供することを主眼とした地域CO₂フリー水素サプライチェーンを構築すること



実施項目と目標

目標①: DMR法に適した原料天然ガス調製システムの確立

DMR反応炉出口ガス: **水素濃度70%以上**かつCNT粉体抵抗 $0.020\Omega\cdot\text{cm}$ (at 1g/cc)以下

目標②: DMR法を用いた商用スケールプラントによる水素・CNT製造技術の確立

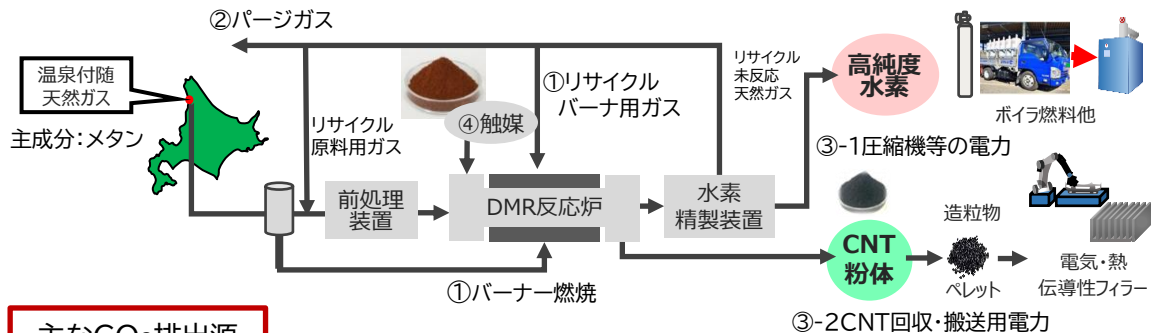
製造コスト: **水素30円/Nm³以下**かつ**CNT1,000円/kg以下**

目標③: 地域での水素サプライチェーンの構築(北海道内における水素貯蔵・輸送・供給システムの確立)

水素供給実証: **100Nm³/日**

目標④: 副生成物CNT粉体の高付加価値化技術の確立と用途開発

CNT用途・顧客: **年間100t以上**

DMR水素製造に伴う主なCO₂排出源と期待効果主なCO₂排出源

- ①バーナー燃焼
 - ・未反応天然ガスはバーナーにリサイクル
- ②パージガス燃焼
- ③-1 圧縮機等の電力使用
- ③-2 CNT回収・搬送用電力使用
- ④触媒製造によるCO₂排出

DMR導入前

・GHG係数28のメタンを放散

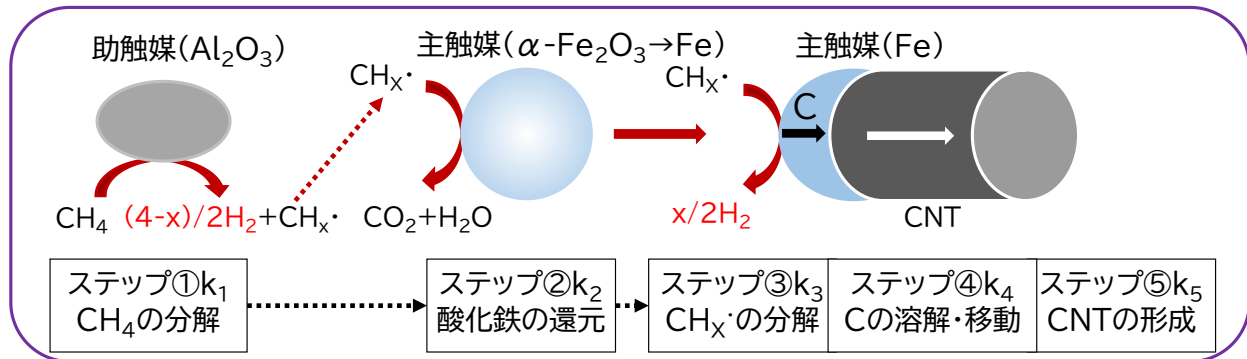
DMR導入効果

・メタンはCNTとして固定化

※本実証にて温室効果ガスの削減効果を確認する

5. 鉄系触媒によるDMR反応

鉄系触媒によるDMR反応メカニズム

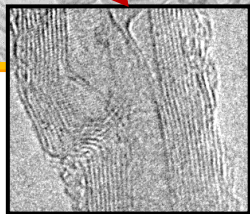
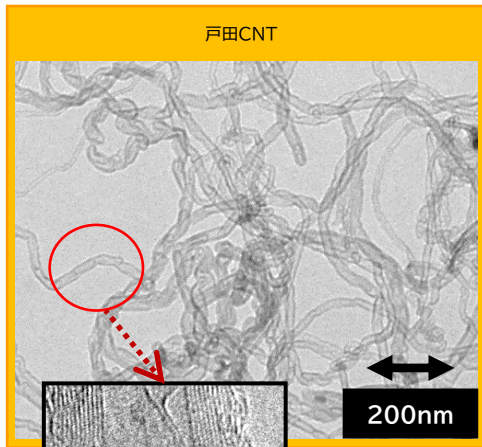


DMR触媒は、主触媒(Fe , Co , Ni)と助触媒(Al , Si , Mg 等)が必須。

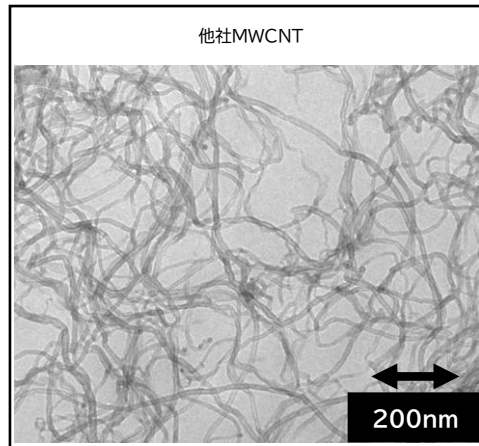
ヘマタイト/アルミナ触媒によるDMR反応は下記の多段反応からなる。

- ステップ①… 助触媒であるアルミナ粒子表面上の活性点にメタン分子が吸着し、ラジカル分子($\text{CH}_x\cdot$)と水素に分解。
- ステップ②… アルミナ粒子表面で生成したラジカル分子がヘマタイト粒子に移動。ヘマタイト粒子はラジカル分子との反応で金属 Fe 粒子に還元。
- ステップ③… 金属 Fe 粒子表面でラジカル分子が反応して炭素と水素を生成。
- ステップ④… 生成炭素が金属 Fe 粒子中へ固溶・拡散。
- ステップ⑤… 金属 Fe 粒子中の固溶炭素が過飽和状態になりCNTとして析出成長

戸田製CNTの特徴



易破断面
(くびれの拡大TEM)



CNTの課題→難分散

他社CNTと比較対比、**くびれ(易破断面)が多い**
⇒分散時に**くびれ**部分にて切断されるため**分散しやすい**

謝辞

本発表に含まれる研究成果の一部は、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)の委託事業(JPNP14021)により得られたもの、ならびに同助成事業(JPNP14026)において現在検討中の内容を含んでおります。
これらの取り組みにご協力いただいた関係各位に、心より感謝申し上げます。

また、DMR技術の発展に多大なるご尽力をいただきました北見工業大学の多田名誉教授、岡崎特任准教授、坂上准教授をはじめ、関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

本研究は、エア・ウォーター株式会社との共同研究による成果であり、関係各位のご支援とご協力を改めて感謝申し上げます。

ご清聴ありがとうございました
Thank you for your kind attention