

カーボンリサイクル技術ロードマップ^o

令和元年6月（令和3年7月改訂）

経済産業省
協力府省 内閣府 文部科学省 環境省

CCUS/カーボンリサイクル

- カーボンリサイクル：CO₂を資源として捉え、これを分離・回収し、鉱物化によりコンクリート等、人工光合成等により化学品、メタネーション等により燃料へ再利用し、大気中へのCO₂排出を抑制。
- カーボンリサイクルは、CO₂の利用（Utilization）について、世界の産学官連携の下で研究開発を進め、非連続的イノベーションを進める取り組み。
- 省エネルギー、再生可能エネルギー、CCSなどとともにカーボンリサイクルは鍵となる取り組みの一つ。

CCUS/ カーボンリサイクル

回収
Capture

利用
Utilization

貯留
Storage

EOR

CO₂の直接利用
(溶接・ドライアイス等)

カーボンリサイクル

1. 化学品

- ・ 含酸素化合物（ポリカーボネート、ウレタンなど）
- ・ バイオマス由来化学品
- ・ 汎用物質（オレフィン、BTXなど）

2. 燃料

- ・ 液体燃料①（合成燃料（e-fuel・SAF））
- ・ 液体燃料②（微細藻類バイオ燃料：SAF・ディーゼル）
- ・ 液体燃料③（バイオ燃料（微細藻類由来を除く）：MTG、エタノールなど）
- ・ ガス燃料（メタン、プロパン、ジメチルエーテル）

3. 鉱物

- ・ コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物 など

4. その他

- ・ ネガティブ・エミッション（BECCS、ブルーカーボン/マリンバイオマス、風化促進、植物利用など）

カーボンリサイクルを拡大していく絵姿

CO₂利用量

フェーズ1

- カーボンリサイクルに資する**研究・技術開発・実証**に着手。
- 特に2030年頃から普及が期待できる、**水素が不要な技術や高付加価値製品を製造する技術**に重点。

フェーズ2

- 2030年に普及する技術を**低コスト化**。
- 安価な水素供給を前提とした2040年以降に普及する技術のうち、**需要の多い汎用品**の製造技術に重点。

フェーズ3

- **更なる低コスト化**。

2030年頃からの消費が拡大

- 化学品；ポリカーボネート 等
- 燃料；バイオジェット燃料 等
- 鋳物・コンクリート；道路ブロック 等

2040年頃から普及開始

- 化学品
汎用品（オレフィン、BTX等）
- 燃料
ガス・液体（メタン、合成燃料等）
- 鋳物
コンクリート製品（汎用品）

2030年頃から普及

- 化学品
ポリカーボネート 等
- 燃料
バイオジェット燃料 等
- 鋳物
コンクリート製品（道路ブロック等）
セメント

※水素が不要な技術や高付加価値な製品から導入

※需要が多い汎用品に拡大

化学品（ポリカーボネート等）

CO₂排出量の更なる削減

燃料（バイオジェット燃料等）

現状価格から1/8～1/16程度に低コスト化

鋳物・コンクリート（道路ブロック等）

現状の価格から1/3～1/5程度に低コスト化

CO₂分離回収技術

低コスト化

現状の1/4 以下

水素

20円/Nm³（プラント引き渡しコスト）※

※ 2050年時の目標

現状

2030年

2040年以降

(参考) カーボンリサイクル技術・製品概要

※1 価格は事務局調べ
 ※2 基幹物質、化学品（一部の含酸素化合物を除く）、燃料の多くの技術は普及するために安価で、大量の、CO₂フリー水素が必要。バイオマス由来の場合にも水素化処理等に用いる水素が必要。

	CO ₂ 変換後の物質	カーボンリサイクル技術現状※1	課題	既存の同等製品の価格※1	2030年	2040年以降
基幹物質	合成ガス メタノール等	一部実用化、革新的プロセス（光、電気等利用）は研究開発段階	変換効率・反応速度の向上、触媒の耐久性向上 など	—	プロセスの低コスト化	プロセスの更なる低コスト化
化学品	含酸素化合物	一部実用化（ポリカーボネート等）、その他は研究開発段階 【価格例】 既存の同等製品程度（ポリカーボネート）	ポリカーボネートはCO ₂ 排出量の更なる削減 ポリカーボネート等以外の実用化（転換率・選択率の向上）	300-500円程度/kg （ポリカーボネート（国内販売価格））	既存のエネルギー・製品と同等のコスト	更なる低コスト化
	バイオマス由来化学品	技術開発段階（非可食性バイオマス）	低コスト・効率的な前処理技術、変換技術 など	—	既存のエネルギー・製品と同等のコスト	更なる低コスト化
	汎用品 （オレフィン、BTX等）	一部実用化（石炭等から製造した合成ガス等を利用）	転換率・選択率の向上 など	100円/kg （エチレン（国内販売価格））	—	既存のエネルギー・製品と同等のコスト
燃料	液体燃料 （微細藻類燃料）	実証段階 【価格例】 バイオジェット燃料 1600円/L	生産率向上、低コスト・効率的な前処理技術 など	100円台/L （バイオジェット燃料（国内販売価格））	既存のエネルギー・製品と同等のコスト（100-200円/L）	更なる低コスト化
	液体燃料 （CO ₂ 由来燃料またはバイオ燃料（微細藻類由来を除く））	技術開発段階（合成燃料（e-fuel・SAF））、バイオエタノールのうち、可食性バイオマス由来については一部実用化 【価格例】 合成燃料 約300~700円/L	現行プロセスの改善、システム最適化 など	50-80円 （原料用アルコール（輸入価格）） 約130円 （工業用アルコール（国内販売価格））	—	合成燃料：ガソリン価格以下のコスト 既存のエネルギー・製品と同等のコスト
	ガス燃料 （メタン、プロパン、シメタン等）	技術開発/実証段階	システム最適化、スケールアップ、高効率化 など	40-50円/Nm ³ （天然ガス（輸入価格））	CO ₂ 由来CH ₄ のコストダウン	既存のエネルギー・製品と同等のコスト
鉱物	コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物	一部実用化、低コスト化に向けた様々な技術の研究開発が実施中 【価格例】数百円/kg（道路ブロック）	CO ₂ と反応させる有効成分の分離、微粉化 など	30円/kg （道路ブロック（国内販売価格））	道路ブロック：既存のエネルギー・製品と同等のコスト	道路ブロック以外：既存のエネルギー・製品と同等のコスト
共通技術	CO ₂ 分離回収（DAC含む）	一部実用化（化学吸収法）、その他手法は研究・実証段階 【価格例】 4000円程度/t-CO ₂ （化学吸収法）	所要エネルギーの削減 など	—	1000-2000円台/t-CO ₂ （化学吸収、固体吸収、物理吸収、膜分離）	1000円以下/t-CO ₂ 2000円以下/t-CO ₂ （DAC）
基盤物質	水素	概ね技術確立済み（水電解等）、他の手法を含め低コスト化に向けた研究開発が実施中	低コスト化 など	—	30円/Nm ³	20円/Nm ³ （プラント引き渡しコスト）

カーボンリサイクル技術ロードマップの Scope

カーボンリサイクル技術は、CO₂を資源として捉え、少量でも、既存製品を置き換えた分だけCO₂が利用できる。このため、費用対効果を踏まえつつ、一つでも多くの分野での技術の確立、普及を目指す。その際、2030年を比較的短期のターゲットとして、2040年以降を中長期のターゲットとして定める。

2030年：早期の普及実現を目指すもの。

- ① CO₂を利用しやすい環境の確立（分離・回収・利用の低コスト化）
- ② 既に基礎技術が確立し、低コスト化を図ることで既存製品の代替が可能なもの（水素の低コストでの利用を前提としないもの、高付加価値で代替が進みやすいもの）

2040年以降：中長期に普及を目指すもの。

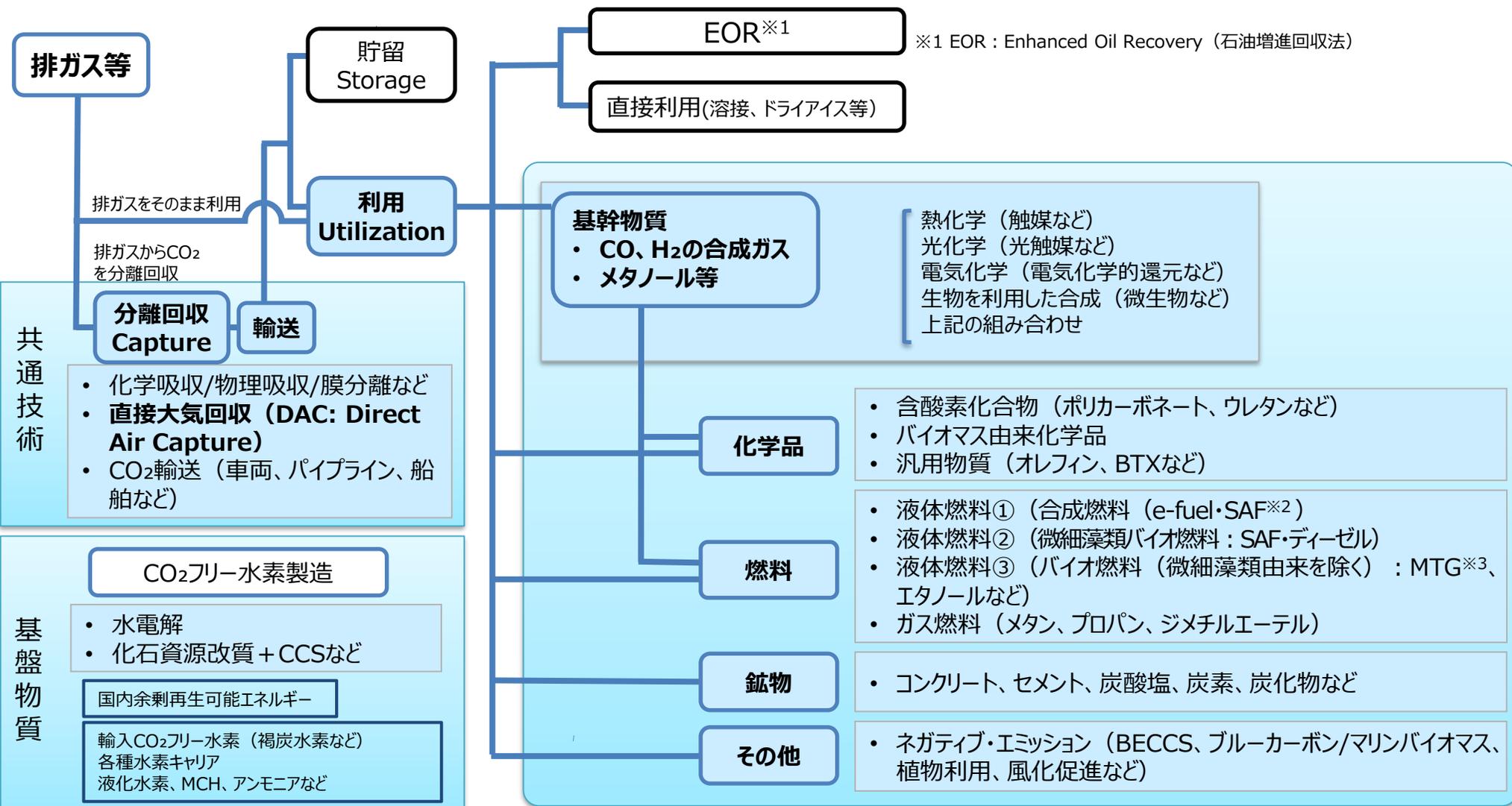
- いまだ未確立の技術である一方、実現した場合、CO₂利用量が多いもの（水素の低コストでの利用を前提とするもの）

	2030（短期）	2040以降（中長期）
分野	水素が不要なものや高付加価値なものから導入 <ul style="list-style-type: none">• 化学品（ポリカーボネート等）• 液体燃料（バイオジェット燃料等）• 鋳物（コンクリート製品：道路ブロック等）	需要が多い汎用品に拡大 <ul style="list-style-type: none">• 化学品（汎用品：オレフィン、BTX等）• 燃料（ガス、液体：メタン、合成燃料等）• 鋳物（コンクリート製品：汎用品）

個別技術

カーボンリサイクルとは

- **カーボンリサイクル** : CO₂を資源として捉え、これを分離・回収し、鉱物化によりコンクリート等、人工光合成等により化学品、メタネーション等により燃料へ再利用し、大気中へのCO₂排出を抑制。



共通技術

● CO₂分離回収技術

<技術課題>

- 設備・運転コスト及び所要エネルギーの削減
新しい材料（吸収材、吸着材、分離膜）の開発
（選択性、容量、耐久性の向上）
基材の製造コストの低減
プロセスの最適化（熱、物質、動力等）など
- CO₂排出原、用途に応じた分離回収法の選定
- CO₂発生源と需要・供給先を連携させたカーボンサイクルに適合するCO₂分離回収システムの構築（コプロダクション）
- エネルギー消費とコスト評価手法の明示化、評価基盤確立
- 輸送、貯蔵
輸送コストの低減（大量輸送、液化技術）
CO₂需給量の調整・運用機能

<個別技術>

- 化学吸収法（温度差（現行プロセス））
4,000円程度/t-CO₂、所要エネルギー2.5GJ程度/t-CO₂
- 物理吸収法（圧力差（実証段階））
- 固体吸収法（温度差）（研究開発段階）
- 物理吸着法（圧力差・温度差、小スケールでメリット、選択率、容量、耐久性の向上、新材料の開発）
- 膜分離法（圧力差）
- その他、深冷分離法、Direct Air Capture など

<CO₂回収を容易にするためのプロセス技術>

- 酸素富化燃焼・クローズドIGCC
低コスト酸素供給技術の開発
- ケミカルルーピング
低コスト、長寿命の酸素キャリアの開発

<具体的な取組例>

- 低コスト型分離回収技術の開発
- 液体CO₂の船舶輸送の技術の開発

2030年のターゲット

- 低圧ガス用（燃焼排ガス、高炉ガスなど、濃度数%～、常圧程度でのCO₂分離）
2,000円台/t-CO₂
所要エネルギー1.5GJ/t-CO₂
化学吸収法、固体吸収法、物理吸着法など
- 高圧ガス用（化学プロセス、燃料ガスなど、濃度数10%、数MPaでのCO₂分離）
1,000円台/t-CO₂
所要エネルギー0.5GJ/t-CO₂
物理吸収法、膜分離法、物理吸着法など
- その他プロセス全体の見直し（CO₂分離回収機能を備えた発電・化学合成システム）
クローズドIGCC・ケミカルルーピングなど
1,000円台/t-CO₂
所要エネルギー0.5GJ/t-CO₂

<CO₂分離回収システムの構築>

- CO₂排出原および用途に適合した省エネルギー、低コストとなるCO₂分離回収のシステム化
- 10,000時間連続運転の実現（耐久性、信頼性の実証）

<分離素材標準評価技術の確立>

- 評価プロトコル確立による素材開発加速の実現

<CO₂輸送・貯蔵システムの構築>

- CO₂排出原および用途に適合した省エネルギー、低コストとなるCO₂輸送・貯蔵手段の確立
液化（冷却、圧縮）、貯蔵（コンテナ、タンク）、輸送（車両、パイプライン、船舶など）

2040年以降のターゲット

<分離回収実用化>

- 1,000円～数百円 / t-CO₂の達成
- CO₂分離回収システムの耐久性、信頼性の向上、小型化
- CO₂発生源と用途先の運用に応じたCO₂分離回収システムの最適化
- CO₂分離回収および輸送システムの本格普及
- CO₂ネットワーク化（回収・輸送・利用インフラ、ハブ&クラスター など）

共通技術

● DAC (Direct Air Capture)

<技術課題・DAC>

- 吸収剤/吸着剤/膜と大気との接触技術 (Air contactor) の開発
- 分散型 (小型化) の開発
- 大規模型 (高効率化) の開発

<技術課題・CO₂分離回収と共通>

- 設備・運転コスト及び所要エネルギーの削減
- 新しい材料 (吸収材、吸着材、分離膜) の開発 (選択性、容量、耐久性の向上)
- 基材の製造コストの低減
- プロセスの最適化 (熱、物質、動力等) など

<その他課題>

- CO₂分離回収法の発展形として、回収効率、所要エネルギーの削減等の技術開発
- 3~6万円/t-CO₂
- ※ 大規模実証の例がなく、また、適用システム、適用技術、規模によりコストが大きく変化
- 再生可能エネルギー等の非化石電源の利用や回収したCO₂の貯留・利用手法と併せた開発
- 設置場所 (回収に最適な気候、エネルギー源や再利用先の近傍) の選定
- エネルギー消費とコスト評価手法の明示化、評価基盤確立

<具体的な取組例>

- ムーンショット型研究開発事業
- 化学吸収法、物理吸収法、固体吸収法、物理吸着法、膜分離法

2030年のターゲット

<CO₂分離回収システムの構築>

- 2030年代の市場で競争力を発揮するCO₂分離回収コストを達成
- 目標事例
1万円/t-CO₂, ICEFロードマップ
1万円/t-CO₂, 企業の2025年または2030年における価格として公表している値
- ライフサイクルアセスメント (LCA) の観点からも有効であることをパイロット規模で確認する。

2040年以降のターゲット

<DAC実用化>

- 2,000円台/t-CO₂の達成
- DACシステムの耐久性、信頼性の向上
- DACシステムの本格普及

共通技術

● CO₂分離回収及びDAC技術の説明

分離回収技術	技術概要	適用先
化学吸収法	・CO ₂ と液体との化学反応を利用して分離回収する方法。	火力・セメント・鉄鋼・石油精製・化学工業・天然ガス採取
物理吸収法	・CO ₂ を液体中に溶解させて分離回収する方法。 ・吸収能は液体に対するCO ₂ の溶解度に依存する。	火力（高圧）・石油精製・化学工業・天然ガス採取
固体吸収法	・固体吸収材によるCO ₂ 分離回収技術。 ・アミン等を含浸させた多孔質材（低温分離用）や、CO ₂ 吸収能のある固体剤（高温分離用）に吸収させる方法等がある。	火力・セメント・石油精製・化学工業
物理吸着法	・ゼオライトや金属錯体などの多孔質固体への昇圧・降圧（圧カスイング）や昇温・降温（温度スイング）などによる吸着・再生操作	火力・鉄鋼・セメント・石油精製・化学工業
膜分離法	・ゼオライト膜、炭素膜、有機膜など分離機能を持つ薄膜を利用し、その透過選択性を利用して混合ガスの中から対象ガス（CO ₂ ）を分離する方法。	火力（高圧）・石油精製・化学工業・天然ガス採取
DAC (Direct Air Capture)	・大気中から低濃度CO ₂ を上記分離回収技術等を用いて直接回収する技術。 ・CO ₂ 分離回収技術の発展形でもあり、実用化に向けて、更なる低コスト化、所要エネルギーの削減が必要。	大気中等の極低濃度（400ppm）CO ₂ 回収

基幹物質

- **メタンケミストリー等** (水素の低コスト化が達成されるまでの間、CO₂の代わりにメタン(CH₄)や廃プラ等を利用する。)

【CH₄→合成ガス①】

- ・ 商業プロセスとして確立
- ・ 部分酸化・ATR、ドライリフォーミング:反応の低温化、触媒探索・耐久性向上等の改善余地

【CH₄→その他】

- ・ 高温状態での分離 (水素とベンゼン等)
- ・ メタノールの直接合成②、エチレンの直接合成等③は研究開発段階
- ・ CO₂フリー水素が得られるメタン熱分解は研究開発段階 (触媒開発、炭素の除去・利用技術)

【廃プラ・廃ゴム解重合 - オレフィン】

- ・ 廃プラ前処理 (不純物除去等) 技術開発
- ・ 触媒開発 (転換率・選択率の向上)

<その他課題>

- ・ 熱マネジメント,設備コスト, 低コスト酸素供給技術開発 (電解時に併産される酸素利用等)

2030年のターゲット

<技術目標>

- ・ CH₄→合成ガス反応温度600℃以下 (触媒: 8000時間程度の寿命)
- ・ 600℃で使用可能な水素分離膜の開発

<コスト>

- ・ 既存のエネルギー・製品と同等のコスト

<CO₂排出原単位>

- ・ LCAで現行プロセス (原油由来) のCO₂排出原単位以下の実現

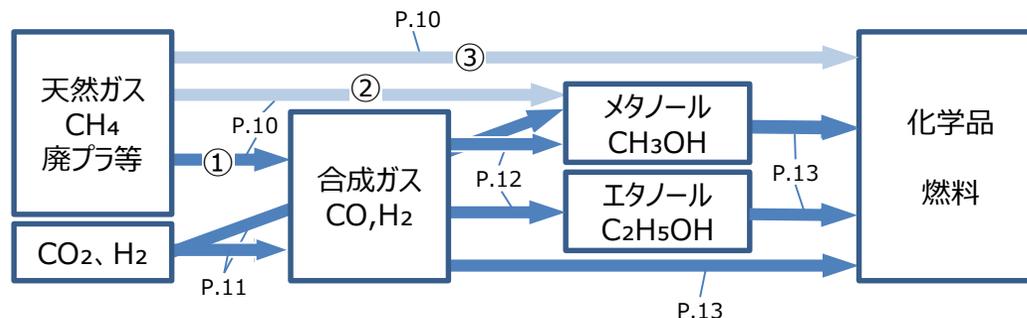
2040年以降のターゲット

<コスト>

- ・ 原料がCO₂に置き換わり (スライド 11,12)、既存のエネルギー・製品と同等のコスト

<CO₂排出原単位>

- ・ さらなる削減



基幹物質

● 一酸化炭素と水素の合成ガスの製造技術

熱化学（触媒など）

<技術課題>

- ・ 現行プロセスの更なる改善（逆シフト反応）

<その他課題>

- ・ 反応系から副生するCO₂の回収、再利用

<具体的な取組例>

- ・ 水蒸気改質プロセスの改良（プロセス、触媒、分離）、メタンの熱分解、太陽熱を活用したCO₂の熱分解

光化学（光触媒など）

人工光合成（光触媒）

<技術課題>

- ・ 触媒開発

水素合成（光触媒） → 逆シフト反応

COの直接合成

変換効率の向上と発生する気体の分離

<その他課題>

- ・ 実用化が可能なプラントのシステム設計
- ・ 現行CO製造プロセス（メタン由来）との比較検討

電気化学（電気化学的還元など）

電解還元（electrolytic reduction）

<技術課題>

- ・ 高電流密度対応の触媒電極の開発（反応速度の向上）
- ・ 触媒電極の高集積化技術の開発（単位容積あたりの電流密度向上）
- ・ 共電解による合成ガスの製造（負荷変動対応、装置規模）

<その他課題>

- ・ 実用化が可能なプラントのシステム設計
- ・ 現行CO製造プロセス（メタン由来）との比較検討
 - ・ 安価かつ大量の安定したCO₂フリー電力の確保

生物を利用した合成（微生物など）

- ・ 各種研究開発の実施

2030年のターゲット

<共通課題>

- ・ プロセスの低コスト化

<変換効率（光化学）>

- ・ 太陽光エネルギー変換効率：10%の達成

<反応速度（電流密度）>

- ・ CO₂処理速度6 t/年/m²
（電流密度500mA/cm²（@常温・常圧、変換効率50%）の達成（電気化学）^{注1}）

<触媒>

- ・ 更なる耐久性向上、低コスト化

（その他）

- ・ 再エネ融合システムの開発
- ・ ハイブリットシステムの開発（光＋電気等）
- ・ セクターカップリング：コンビナート等の産業間連携による基幹物質の融通やカーボンサイクル事業の導入

2040年以降のターゲット

<共通課題>

- ・ プロセスの更なる低コスト化

<変換効率（光化学）>

- ・ 更なる変換効率の向上

<反応速度（電流密度）>

- ・ CO₂処理速度11 t/年/m²
（電流密度1000mA/cm² @常温・常圧、電解効率50%）の達成（電気化学）^{注1}）

（その他）

- ・ 熱化学、光化学、電気化学、生物を利用した合成など、あらゆる反応・技術のベストミックス。

注1）100MWプラント、稼働率16.3%、2円/kWhでの試算 稼働率の出典：資源エネルギー庁資料より

注2）安価なCO₂フリー水素が重要

基幹物質

● メタノール等の製造技術

熱化学（触媒など）

【CO₂ → メタノール】

<技術課題>

- 反応低温化のための触媒開発（転換率・選択率の向上）
- 反応により発生した水の分離・除去
- 低質排ガスの直接利用（研究段階）
触媒劣化対策、耐久性向上

<その他課題>

- 現行実用プロセス（合成ガス経由の反応）との比較検討
- 既存メタノール製造設備でのCO₂の利用

【合成ガス → メタノール（またはDME）】

<技術課題>

- メタノール製造における収率の改善
- メタノールとDMEの生産制御技術

光化学（光触媒など）

電気化学（電気化学的還元など）

生物を利用した合成（微生物など）

各種研究開発の実施

<技術課題>

- ギ酸、メタノールの直接合成（水中のプロトン利用）
- 反応速度や効率の向上

<その他課題>

- 安価かつ大量の安定したCO₂フリー電力の確保（電気利用の場合）

<具体的な取組例>

- 微生物を利用した合成ガス（清掃工場由来）からのバイオエタノールへの一貫製造の実証（2023年までに技術確立：目標 500～1,000kL/y規模の実証を実施）
※追加的な水素が不要なプロセスも含む。

2030年のターゲット

<共通課題>

- プロセスの低コスト化

<その他>

- 再エネ融合システムの開発
- ハイブリッドシステムの開発（光 + 電気等）
- 大規模メタノールサプライチェーンの検討
- 既存製造システムへの適用、親和性確保

<燃料としてメタノール利用する場合の課題>

- 実環境でメタノールを利用する技術の実証
- 既存燃料との混合利用・混合割合の拡大

<技術目標>

- 大規模プロセスにおける反応制御技術の確立
- CO₂やH₂の需給変動に対応する製造技術の開発

2040年以降のターゲット

<共通課題>

- プロセスの更なる低コスト化

<コスト見込み>

- 天然ガス由来のメタノール合成製品並の価格程度

注) 安価なCO₂フリー水素が重要

化学品

● 基礎化学品（オレフィン、BTX等）の製造技術

2030年のターゲット

2040年以降のターゲット

<技術課題>

【MTO (Methanol to Olefins) – オレフィン】

【ETO (Ethanol to Olefins) – オレフィン】

- 触媒開発（転換率・選択率の向上）
例：プラスチック原料（C2エチレン、C3プロピレン、C4ブテン等）の生成割合の制御
ゴム原料（C4ブタジエン、C5イソプレン）等の生成割合の制御
- 触媒の被毒対策（カーボンの析出制御）

【MTA – BTX】（プロジェクトあり）

- 触媒開発（転換率・選択率の向上）
例：ベンゼン、トルエン、キシレンの生成割合の制御
- 触媒の量産化技術（原料の影響、形状、サイズ等）
- 触媒の長寿命化
- 触媒の被毒対策

【合成ガス→オレフィン、BTX】

- 触媒開発（転換率・選択率の向上）
例：プラスチック原料（C2エチレン、C3プロピレン、C4ブテン等）の生成割合の制御
BTX（C6ベンゼン、C7トルエン、C8キシレン）の生成割合の制御
- CO₂やメタン、重質油発生の抑制

【CO₂→オレフィン】

- 電気化学的な反応技術の開発
- 電極触媒、電解質、反応器の開発

【MTO、ETO、合成ガス→オレフィン】

- C2～C5の選択合成技術の確立
- さらなる収率の向上と選択性の制御
- 触媒の量産化・低コスト化技術の確立
- オレフィン蒸留・分離プロセス確立

【MTA – BTX】

- さらなる収率の向上と選択性の制御、耐久性向上
- 商用プラントを見据えたプロセス確立

【CO₂→オレフィン】

- エネルギー変換効率、生成速度のさらなる向上

<CO₂排出原単位>

- LCAで現行プロセス（原油由来）のCO₂排出原単位以下の実現

<コスト見込み>

- 既存のエネルギー・製品と同等のコスト

<CO₂排出原単位>

- LCAで現行プロセス（原油由来）のCO₂排出原単位の半減以下の実現

注）安価なCO₂フリー水素が重要

化学品

● 機能性化学品（含酸素化合物）の製造技術

<技術課題>

【ポリカーボネート、ポリウレタン】

- CO₂からの直接合成によるCO₂排出量の更なる削減
- ホスゲンや酸化エチレン等毒性が強い原料を使わない合成法の開発
- 量産化・低コスト化技術の確立

低TRLプロセスの要素研究（アクリル酸合成等）

- 触媒開発（転換率・選択率の向上）
- 反応相手の低LCA化（バイオマス、廃プラ利用等）

<その他課題>

- 化学品によるCO₂貯留の検討（シュウ酸等）
- 微生物を用いてCO₂を有機酸や油脂に固定化するプロセスの検討

2030年のターゲット

<コスト見込み>

- 既存のエネルギー・製品と同等のコスト

<CO₂排出原単位>

- LCAで現行プロセスのCO₂排出原単位以下の実現

<その他>

- 商用プラントを見据えたプロセス確立

2040年以降のターゲット

<コスト見込み>

- 更なる低コスト化

<CO₂排出原単位>

- LCAで現行プロセスのCO₂排出原単位の半減以下の実現

含酸素化合物に含まれる化合物は、アクリル酸、エタノール、エチレングリコール、サリチル酸、酢酸および酢酸エステル、シュウ酸、ポリアミド、ポリウレタン、ポリエステル、ポリカーボネート等（五十音順）

化学品

● バイオマス由来化学品の製造技術

<技術課題>

(セルロース系バイオマス)

- 低コスト・効率的な前処理技術（セルロース、リグニン等の分離）
- 脱水・乾燥、不純物除去等の手法確立
- 非可食性バイオマスから高付加価値化学品生産プロセス
- 新規微生物資源のスクリーニング技術と培養技術
- バイオテクノロジー利用(ゲノム編集・合成)、分離・精製、反応プロセス技術確立
- 不純物に強い発酵技術や触媒技術
- バイオマス原料の効率的な物質変換技術の開発
- バイオマス由来化学品の高機能化（海洋生分解性機能の付与等）

<その他課題>

- 一貫製造プロセス構築（生産規模、品質等の安定性の確保等）
- 誘導品含む対象製品の拡大（含酸素化合物→オレフィン等）
- バイオマス由来化学品の用途拡大と経済性の検証
- バイオマス原料の効率的な収集システムの確立
- バイオマス由来化学品・中間体の規格化

普及イメージ

- 可食性バイオマス利用（主にエタノール、アミノ酸）
- 油脂類等利用
- バイオ・廃棄物発電
- 高付加価値な化学品合成（機能性化学品）

2030年のターゲット

<コスト見込み>

- 既存のエネルギー・製品と同等のコスト

<CO₂排出原単位>

- 代替石油化学製品（含酸素化合物等）と比較して、LCAで現行プロセス（原油由来）のCO₂排出原単位の半減以下の実現

<その他>

- バイオマス由来化学品の多品種化・高機能化（海洋生分解性コントロール機能の付与等）
- 水素化処理で水素が必要

2040年以降のターゲット

<共通課題>

- 大規模生産（製紙インフラ・農林業・廃棄物等を活用した地域分散型の化学品生産）

<コスト見込み>

- 更なる低コスト化

<CO₂排出原単位>

- 代替石油化学製品（オレフィン等）と比較して、LCAで現行プロセス（原油由来）のCO₂排出原単位の半減以下の実現
- 市場導入（生分解性プラスチック：8500億円（世界の日本シェア率25%））



- 非可食性バイオマス利用・微細藻類利用
- バイオ発電（究極的にはBECCS、BECCU）
- バイオマス化学品・燃料の多品種化

※当該技術開発は燃料分野（バイオエタノール等）にも共通する技術
※バイオマス育成・回収は海洋利用も含まれる（燃料合成も同様）。

燃料

● 液体燃料の製造技術①※合成燃料（e-fuel・SAF）

2030年のターゲット

2040年以降のターゲット

<技術課題>

- 合成燃料の導入に向けた課題は、コスト低減と製造技術の確立である。（合成燃料の製造コストは、現在の技術で、約300～700円/Lと試算。）
- 合成燃料の製造コストのうち、特に水素コストのウエイトが高い。水素コストの低減を待つことなく、製造効率の向上に向けた技術開発・実証に取り組む必要。

<その他課題>

- 合成燃料が脱炭素燃料であるとの国際的評価を確立することや、合成燃料製造時に海外で使用するCO₂量で利用時に発生するCO₂をオフセットする枠組みを構築する必要。

<具体的な取組例>

- 発電所や工場等から排出されたCO₂と再エネ由来の水素から合成燃料を一貫製造する革新的製造技術の開発。

<製造技術の確立>

- 2030年までに高効率かつ大規模な製造技術を確立することを目指す。
- そのために2030年までに合成燃料に係る技術開発・実証に集中的に取り組む。具体的には以下のとおり。
 - ① 合成燃料の既存技術（逆シフト反応 + FT合成プロセス）を高効率化のための技術開発や、大規模製造を実現するための製造設備の設計開発や製造実証
 - ② 革新的な製造技術（CO₂電解、共電解、直接合成（Direct-FT））の開発

<技術目標>

- パイロットスケール（500BPD規模を想定）で液体燃料収率80%の達成
- 電解合成ガス製造技術の高度化及び次世代FT触媒に依る高性能化を行いながら、実証運転を通して最適化を図り、パイロット規模のスケールアップ（準プラント実証）を経て、実用ステージへと進む

<合成燃料の商用化>

- 2030年代に導入拡大・コスト低減を行い、2040年までの自立商用化（環境価値を踏まえたもの）を目指す。

<コスト見込み>

- 2050年にガソリン価格以下のコストを実現することを目指す。

燃料

● 液体燃料の製造技術② ※微細藻類バイオ燃料（SAF・ディーゼル）

2030年のターゲット

2040年以降のターゲット

<技術課題>

（微細藻類・その他→バイオジェット燃料・バイオディーゼル）

- ・ 生産率向上（培養システム・遺伝子組み換え）
- ・ 低コスト・効率的な前処理技術
- ・ 脱水・乾燥、搾油、不純物除去等の手法確立
- ・ 油脂類残渣の利用技術開発
- ・ スケールアップ（ベンチからパイロットへ、後実証レベルへ）
- ・ 大規模技術実証
- ・ コストダウン追求

<その他課題>

- ・ 用途拡大と経済性の検証
- ・ 原料の効率的な収集システムの確立

<コスト見込み>

- ・ バイオジェット燃料：既存のエネルギー・製品と同等のコスト（100~200円/L（現状1600円/L））

<生産率>

- ・ 75 L-oil/日・ha（現状35 L-oil/日・ha）

<CO₂排出原単位>

- ・ バイオジェット燃料については、既存のジェット燃料と比べ、LCAで現行プロセス（原油由来）のCO₂排出原単位の半減以下の実現

<その他>

- ・ 燃料規格適合
- ・ 実用化へスケールアップとサプライチェーンの構築
- ・ 既存燃料との混合利用・混合割合の拡大
- ・ 油の改質に水素を比較的少量使用するため、CO₂フリー水素があればGHG削減効果は高くなる。

<コスト見込み>

- ・ 更なる低コスト化

<CO₂削減量>

- ・ 航空部門のCO₂排出量の2005年比50%削減への貢献

※当該技術開発は化学品分野にも共通する技術
（微細藻類を使った化粧品・サプリメント等の高付加価値品の製造は一部実用化）

（参考）温室効果ガス排出削減率50%のバイオジェット燃料が10万kL/年導入された場合、CO₂が12.3万t/年削減できる。

燃料

- 液体燃料の製造技術③ ※バイオ燃料（微細藻類由来を除く）（MTG、エタノール、ディーゼル、ジェット、DMC、OMEなど）

2030年のターゲット

2040年以降のターゲット

<技術課題>

- FT合成（現行プロセス）の改善（転換率・選択率の向上）
- その他合成反応（現行プロセス）の改善

<その他課題>

- システム最適化（再エネ導入）

<具体的な取組例>

- 微生物を利用した合成ガス（清掃工場由来）からのバイオエタノールへの一貫製造の実証（2023年までに技術確立：目標 500～1,000kL/y規模の実証を実施）※追加的な水素が不要なプロセスも含む。

<CO₂排出原単位>

- LCAで現行プロセス（原油由来）のCO₂排出原単位以下の実現

<その他課題>

- ナフサ・原油由来の燃料では問題のない規制や装置、機器に対するCO₂由来の燃料の影響
- 実環境での実証
- 既存燃料との混合利用・混合割合の拡大

<コスト見込み>

- 既存のエネルギー・製品と同等のコスト

<CO₂排出原単位>

- LCAで現行プロセス（原油由来）のCO₂排出原単位の半減以下の実現

※バイオ燃料のコスト、CO₂排出のターゲットについては、バイオ由来化学品や微細藻類バイオ燃料同様、2030年に既存のエネルギー・製品と同等のコスト、LCAで現行プロセス（原油由来）のCO₂排出原単位の半減以下の実現を目指す。

燃料

● ガス燃料（メタン、プロパン、ジメチルエーテル）の製造技術

2030年のターゲット 2040年以降のターゲット

<技術課題>

既存技術（サバティエ反応）

- ・ 触媒長寿命化
- ・ 熱マネージメント（発熱の利用）
- ・ 活性マネージメント
- ・ スケールアップ検討

革新技术（共電解等）研究開発

【Power to Methane】

- ・ 共電解による電解メタン、プロパンの製造（都市ガス利用等）
- ・ CO₂を利用した電解メタン合成・発電の一体化
- ・ エネルギー効率向上

<その他課題>

- ・ システム最適化（再エネ導入）
- ・ 大型化／低コスト化
- ・ 設備コスト
- ・ CO₂由来メタン製造時に海外で使用するCO₂量で利用時に発生するCO₂をオフセットする枠組みを構築する必要。

<具体的な取組例>

- ・ 清掃工場の排ガスのCO₂を利用した商用規模（125Nm³/h）の実証
- ・ 石炭火力の排ガスのCO₂を利用した都市ガス導入の実用化規模（6万Nm³/h）の実証に向けた基盤技術開発
- ・ 共電解等を活用した高効率なメタン・プロパン合成の先導研究

<コスト見込み>

- ・ CO₂由来CH₄のコストダウン

<CO₂排出原単位>

- ・ LCAで現行プロセスのCO₂排出原単位以下の実現

<その他>

- ・ 実用化規模（数万Nm³/h）でのガス導入管への注入実証
- ・ 販路・用途開拓
- ・ 既存燃料との混合利用・混合割合の拡大
- ・ 更なるエネルギー変換効率の向上

<コスト見込み>

- ・ 既存のエネルギー・製品と同等のコスト

<CO₂排出原単位>

- ・ LCAで現行プロセスのCO₂排出原単位の半減以下の実現

注) 安価なCO₂フリー水素が重要

鉱物

● コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物などの製造技術

<技術課題>

- 鉄鋼スラグ、廃コンクリート、石炭灰等の産業副産物、廃鉱物、海水（かん水）等からの有効成分（CaやMgの化合物）の分離（分離後の副生物の処理を含む）
- CO₂との反応性を高めるための有効成分の微粉化および分離等の前処理の省エネ化（乾式プロセス）
- 湿式プロセスでの省エネ化（重金属類等の安価な排水処理等）
- 安価な骨材、混和材等の開発、配合の最適化及びこれら材料による複合製造技術
- 炭素・炭化物の生成エネルギー削減、分離、精製
- スケールアップ

<1トンのCO₂を固定化するために必要なエネルギー>

- 500 kWh/t-CO₂（高炉スラグ利用、乾式プロセス）

<その他課題>

- CO₂発生源から製造・供給までの連携したシステム構築・プロセスの最適化（CO₂固定化量や経済性の最適化）
- 用途拡大と経済性の検証（炭酸塩の利用技術の開発と実証 - コンクリート製品・コンクリート構造物への適用への検証、蛍光材料等の高付加価値品の開発等）
- 土木・建築資材としての長期間の性能評価、規格・ガイドラインの整備

<具体的な取組>

- 廃コンクリート等の産業副産物、廃かん水等に含まれるCa・Mgを活用した炭酸塩化技術開発
- コンクリート用骨材、土壌改良材、ガラス原料等への用途拡大のための技術開発
- CO₂還元、炭素化要素技術開発

※鉄鋼スラグや石炭灰等は、現在でも多くがコンクリート材料として利用されているが、炭酸塩の形では使われていない。

2030年のターゲット

<コスト見込み>

- 道路ブロック：既存のエネルギー・製品と同等のコスト

<1トンのCO₂を固定化するために必要なエネルギー>

- 200 kWh/t-CO₂（原材料と反応プロセス問わず）

<CO₂利用>

- 鉄鋼スラグや石炭灰の10%程度を炭酸塩化

<その他>

- 大規模実証
- コストダウン追求
- 国内外の適地調査
- なんらかのインセンティブを付けることによる需要の促進（公共事業等における調達など）

<具体的な取組>

- 原料の拡大（石炭灰、バイオマス混焼灰、廃コンクリート等）→鉄鋼スラグ、廃鉱物、海水（かん水）利用等

<技術目標>

- CO₂反応量、反応速度を高める効果的な炭酸化手法の開発
- CO₂有効利用コンクリート製品の適用範囲拡大
- 高付加価値化（炭素繊維、ナノカーボン等）
- カーボンサイクルセメントの開発

2040年以降のターゲット

<コスト見込み>

- 道路ブロック以外：既存のエネルギー・製品と同等のコスト
- 汎用品（電極、活性炭）と同等コスト

<CO₂利用>

- 鉄鋼スラグや石炭灰の50%程度

カーボンリサイクル技術開発に関する留意点

- 気候変動対策・資源確保の必要性に着目して、カーボンリサイクル技術開発を効果的に進めるための留意点は以下のとおり。

- ✓ 多くの技術開発において、安価なCO₂フリー水素が重要。
 - ✓ 水素基本戦略の水素・燃料電池戦略ロードマップにおいて、2050年で水素のプラント引き渡し価格20円/Nm³がターゲット
 - ✓ 水素供給に課題が残る状況においても、①バイオマス、その他水素が必要ない技術開発を進めるとともに、②水素供給の確立を待つことなく研究開発や天然ガスを利用した橋渡しの取り組みを進める。
- ✓ カーボンリサイクル技術には、ゼロエミッション電源の活用が重要。
 - ✓ 安定物質であるCO₂を有用物質に転換するには、多大なエネルギー投入が必要。
- ✓ カーボンリサイクル技術の評価には、LCAの視点が重要であり、分析・検証を行う。また、標準化・規格化についても取り組むことが必要。
- ✓ その他、CO₂の分離回収もコスト低減を図る。

(参考) カーボンリサイクル技術開発を促進する取組

- カーボンリサイクル技術の開発や実用化を、国際連携を通じて加速すべく、2019年のカーボンリサイクル産学官国際会議で「カーボンリサイクル3 Cイニシアティブ」を策定。

1. Caravan (相互交流)

国際会議※等でカーボンリサイクルの理念を広報し、海外との相互交流の機会を創出

※カーボンリサイクル産学官国際会議、ワールド・フューチャー・エナジー・サミット 等

2. Center of Research (実証研究拠点)

カーボンリサイクル実証研究拠点の整備 (広島県大崎上島)

カーボンリサイクル実証拠点の整備 (北海道苫小牧)

3. Collaboration (国際共同研究)

日豪 MOC (2019年9月25日締結)

定期協議の設置、研究成果の共有、共同プロジェクトの可能性の検討 等

日米 MOC (2020年10月13日締結)

技術情報の共有、専門家の相互派遣、テストサンプルの交換 等

日UAE MOC (2021年1月14日締結)

情報及び研究成果の共有、情報交換等のための会合開催、協力可能性の探究 等

日米気候パートナーシップ（2021年4月16日）

- **日米両国は、本年4月16日の首脳会談**において、気候野心、脱炭素化及びクリーンエネルギーに関する協力の強化にコミットし、国際社会の気候行動を主導していくことで合意。
- **カーボンリサイクル**を含む優先分野における**二国間協力を強化**。

日米気候パートナーシップ（抜粋）

<気候・クリーンエネルギーの技術及びイノベーション>

日米両国は、気候変動対策に取り組み、再生可能エネルギー、エネルギー貯蔵（蓄電池や長期エネルギー貯蔵技術等）、スマートグリッド、省エネルギー、水素、二酸化炭素回収・利用・貯留／カーボンリサイクル、産業における脱炭素化、革新原子力等の分野を含むイノベーションに関する協力の強化により、グリーン成長の実現に向けて協働することにコミットする。

また、この協力は、再生可能エネルギー、電力系統最適化、ダイヤモンドレスポンス及び省エネルギーを含む分野における連携を通じて、気候変動に配慮・適応したインフラの開発、普及及び活用を促進する。

参考

基幹物質（メタンケミストリー等）

メタンケミストリー…天然ガス由来のメタンを合成ガス（一酸化炭素と水素の混合ガス）やメタノールといった炭素数が1の化合物に改質し、これを原料に用いて、炭素数が1の化合物の相互変換や、炭素数が2以上の化合物を合成する技術法。

ATR…Auto Thermal Reaction

基幹物質（メタノール等）

DME…Dimethyl Ether

化学品（汎用物質：オレフィン、BTX等）

MTO…Methanol to Olefins

MTA…Methanol to Aromatics

BTX…Benzene, Toluene, Xylenes

燃料

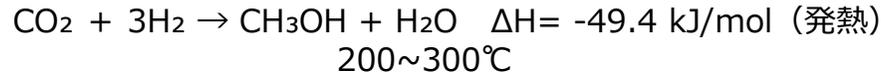
MTG…Methanol to Gasoline

反応式集

CO₂ → CO (逆シフト反応)



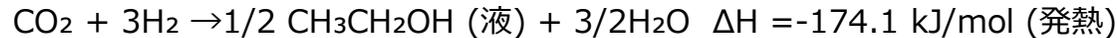
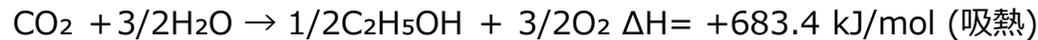
CO₂ → メタノール



合成ガス → メタノール



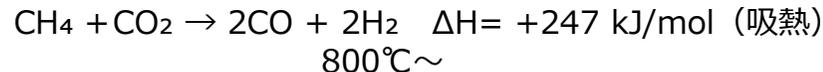
CO₂ → エタノール



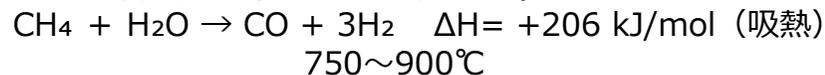
CO₂ → メタン (メタネーション; サバティエ反応)



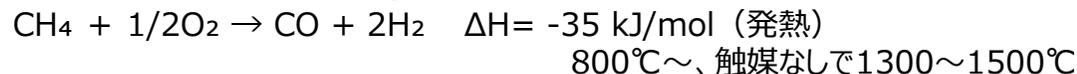
メタン + CO₂ → 合成ガス (ドライリフォーミング)



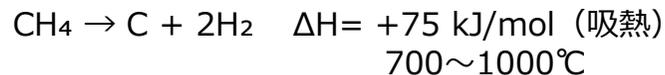
メタン → 合成ガス (スチームリフォーミング)



メタン → 合成ガス (部分酸化)



メタンの熱分解



FT合成



参考：CO₂利用のフロー図（化学品、燃料、炭酸塩）

