

CO₂ 利用に当たってのボトルネック課題及び研究開発の方向性

内閣府「ボトルネック課題研究会」

- u 地球温暖化問題対応として産業活動等から排出される CO₂ 利用 (CCU) を考える場合は、市場が大きく大量の CO₂ 原料化が見込める化成品・燃料、建築材等の製造への利用が期待される。
- u CO₂ から広く化成品・燃料合成へつなげる中間物質として、合成ガス (CO+H₂) やメタノール (CH₃OH) 等に着目 (これら中間物質からオレフィン、BTX、燃料等へ転換する技術はある程度確立済)。
- u 一方、もともとエネルギーレベルの低い CO₂ から上記中間物質を合成するためには水素源及びエネルギー源としての「水素」が必要。大量に利用可能で、安価、かつ製造・利用過程で CO₂ 排出増につながらない水素調達が最大のボトルネック。
- u 究極的には製造過程で CO₂ を排出しない再エネ由来水素が必要だが、短期間での技術革新・普及は大変困難で、長期的な視点も持って取組を進めていく必要がある。再エネ由来水素が安価で手に入るまでは、メタンを水素源として利用した C1 化学による化成品生産基盤を確立しつつ、将来の CO₂ の原料利用の化学プロセスにつないでいくことが一つの方策。
- u ただし、炭素分 (C) を包含する化石資源であるメタンを利用する場合、それ自体は人間活動等で排出される CO₂ 利用 (CCU) にはつながらないという認識を持ちつつ、現行プロセスよりも CO₂ 排出量をできる限り抑えることが可能で、将来再エネ由来水素が利用可能な時期を迎えた際に、比較的容易に CO₂ 利用 (CCU) プロセスに接続することが可能なシステム・プロセスを構築していくという観点が重要。
- u また、CO₂ またはメタン、水素というガスを対象としたプロセスでは、ガスの圧縮工程等で大量の電力消費 (= CO₂ 排出) を伴う点が課題。更に、水の電気分解や化学品の合成に電力を利用したプロセスを想定する場合においても、化学産業で大量に目的物を製造するような場合には、現在の電力状況からすれば国内の総発電量を考慮せざるを得ないほどの膨大な電力を要することから、どのように社会実装していくかも長期的に検討が必要な課題。将来的には、熱化学、電気化学、光化学等を状況に応じて使い分けていくことが重要になると思われる。
- u 今後の研究開発の方向性として、再エネ由来水素の低価格化に加え、メタン改質の低温化や熱分解など新たな水素製造手法の確立、発熱反応 (メタン部分酸化等の活用) と吸熱反応との熱バランスを考慮したプロセス改善、膜分離技術のレベルアップ等により、反応に必要な投入エネルギーを大幅低減し、LCA ベースで CO₂ 排出削減を図ることが重要。
- u なお、検討したボトルネック課題を解消し、その技術を早期に社会実装するに

は、既存技術の発展・深化が必要である。本課題に関連した研究開発を推進している既存基礎研究事業、例えば JST-ALCA や NEDO 人工光合成事業等の成果を必要に応じて取り込み・活用することが重要である。

- u 更に、2050 年以降の低炭素社会実現に向け、基礎研究段階からブレークスルーテクノロジーを創出し、実績を積み重ねることも重要であり、研究開発の難易度や現状を踏まえ、関係府省庁の連携を図ることも必要と考えられる。
- u 加えて、上記研究開発や巨額な設備投資を促す制度的な仕組み作りを検討することが必要。

< CCU の必要性 >

1. 地球温暖化問題（CO₂ 排出大幅削減の必要性）
2. 再エネの導入等も必要だが、抜本的な削減には発生する CO₂ に対する対策である CCUS が重要視されている
3. CCUS のうち、CCS はコストにしかないため、CO₂ 排出に炭素税等を課して経済的に CCS を有利な選択にするか、CO₂ に付加価値をつけることが可能な（CCU）との併用を考えていく必要がある

CCS には、CO₂ 漏洩のリスクもあり、社会受容性の観点から超えるべきハードルもある。ボトルネック課題研究会では、炭素税等、規制的手法は扱わず、CCU 技術についてのみ検討。一方、国際的な公平性等考慮すべき点は多々あるが、本研究会では、CCS や CCU を進めるためには、炭素税等カーボンプライスについても議論が必要との意見も多くあった。

< CCU 技術の絞込み >

4. 抜本的 CO₂ 削減のため、CO₂ をどのような物質に転換するのが良いか？

製品の市場の大きさを考えると、あらゆる化成品、燃料合成につながる合成ガス（CO + H₂）、メタノール（CH₃OH）、エタノール（C₂H₅OH）が有望（これら物質以降（オレフィン、BTX、燃料等）に転換する技術はある程度確立済）
ただし、これら物質は安定物質である CO₂ よりエネルギーレベルが高く、合成するためには多くのエネルギーを投入しなければならない

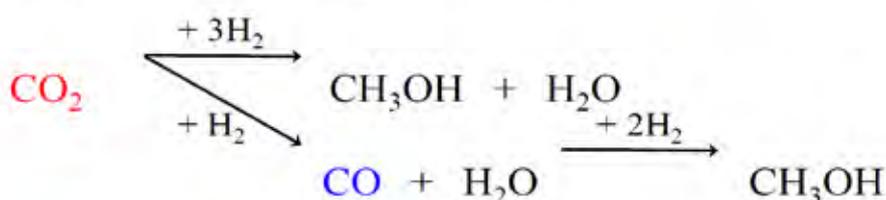
また、メタノールを合成する場合、CO₂ から一段で合成する場合と CO を経由してメタノールを合成する場合が考えられるが、下記表のように平衡転化率、反応速度、選択率などに違いがみられ、プラントコスト等も含め、与えられた条件の中で最適な手段を選択することになると考えられる

【参考1】メタノールの合成原料としてのCO及びCO₂の特徴

原料	平衡転化率 ^{a)}	反応速度 ^{b)}	反応段数	副生物	汎用性
CO	69%	1.0	2段	Methyl formate Higher alcohols(C ₂ -C ₄) Hydrocarbons(C ₆ -C ₁₀)	炭化水素 (FT合成)
CO ₂	24%	3.4	1段	Methyl formate	—

a) 500 K, 5 Mpa,

b) J. S. Lee, et al. *J. Catal.* **144**, 414 (1993)からの引用, Cu/ZnO/Al₂O₃, 523 K, 3 MPa,
COからのメタノール合成速度とCO₂からのメタノール合成速度を比として算出



(出所) ボトルネック課題研究会 ワークショップ 産業技術総合研究所 藤谷様資料より抜粋・一部改変

化成品や燃料合成につながる中間物質としてギ酸に着目する研究もある。

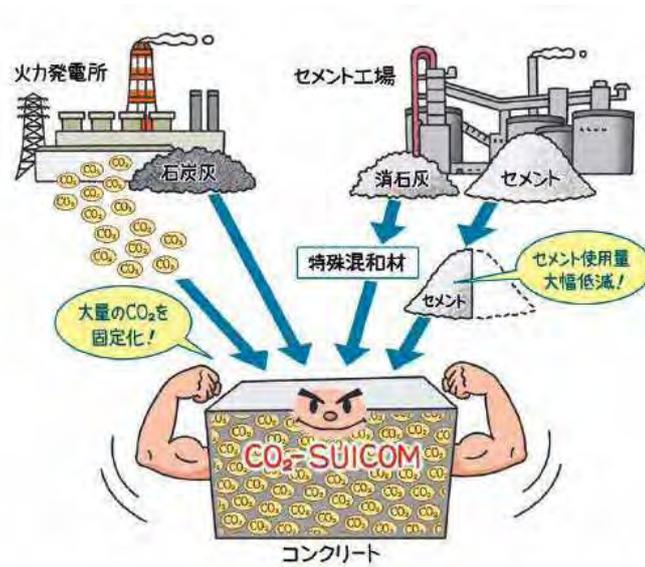
化成品や燃料合成以外に、市場が大きい生成物として、建築材などのコンクリートが挙げられる。コンクリートを構成するセメントや骨材にCO₂を原料とした炭酸塩(CaCO₃等)を用いることによりCO₂を固定化することが可能。CO₂から化成品や燃料を合成する場合と異なり、CO₂から炭酸塩を合成する反応は、主反応としてはエネルギー投入を必要しないため有望な技術。技術的には比較的ハードルが低く、既に一部企業が事業化を行っているため、本研究会では中心的な議論は行わなかったが、製品のコストダウンに加え、標準化、建築材料としての認証システム、原材料の流通システムなどが整備されればCO₂削減の有力な選択肢となる可能性がある(普及には技術課題以外の要素が大きいと思われる)。

【参考2】CO₂-SUICOM事業

事業概要： 火力発電所から排出される石炭灰と排気ガスのCO₂を利用した、CO₂排出量ゼロ以下の環境配慮型コンクリートの開発。

課題： コスト低減と適用先拡大

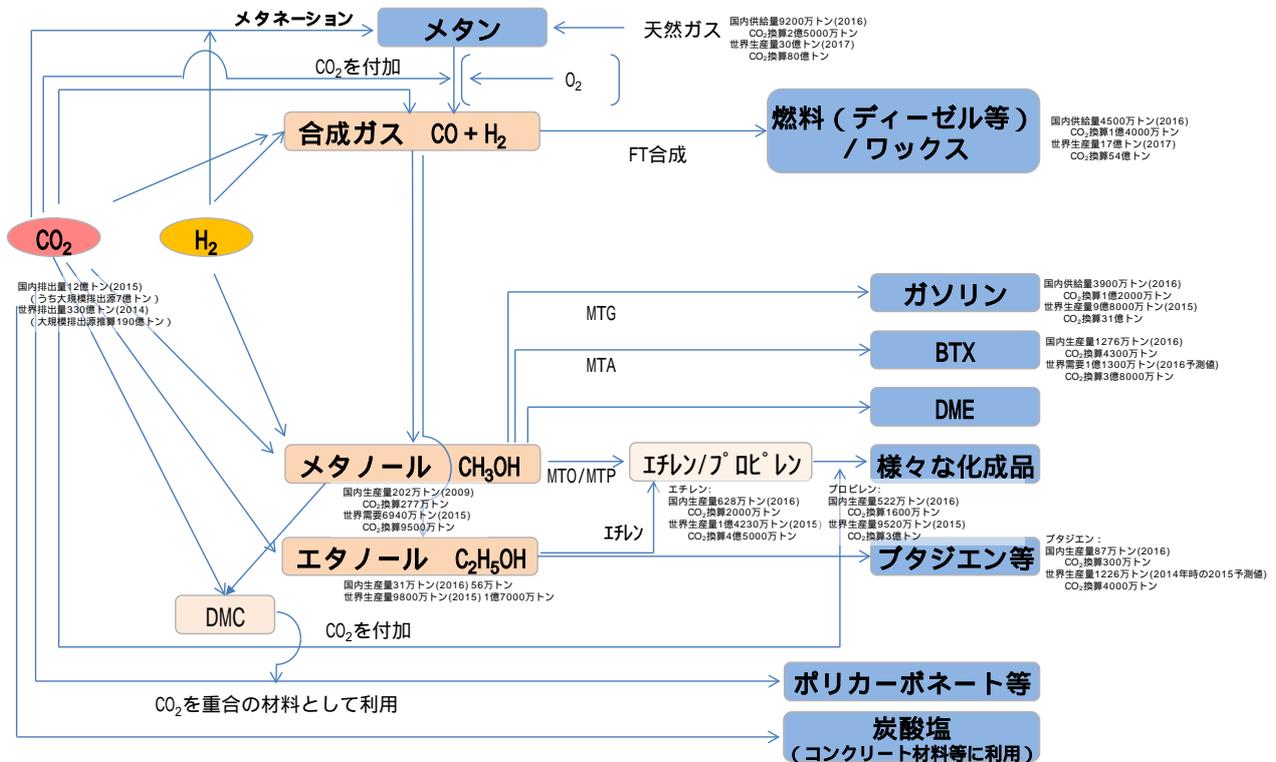
事業者： 中国電力(株)、鹿島建設(株)、デンカ(株)、ランデス(株)



(出所) 中部電力ホームページより引用

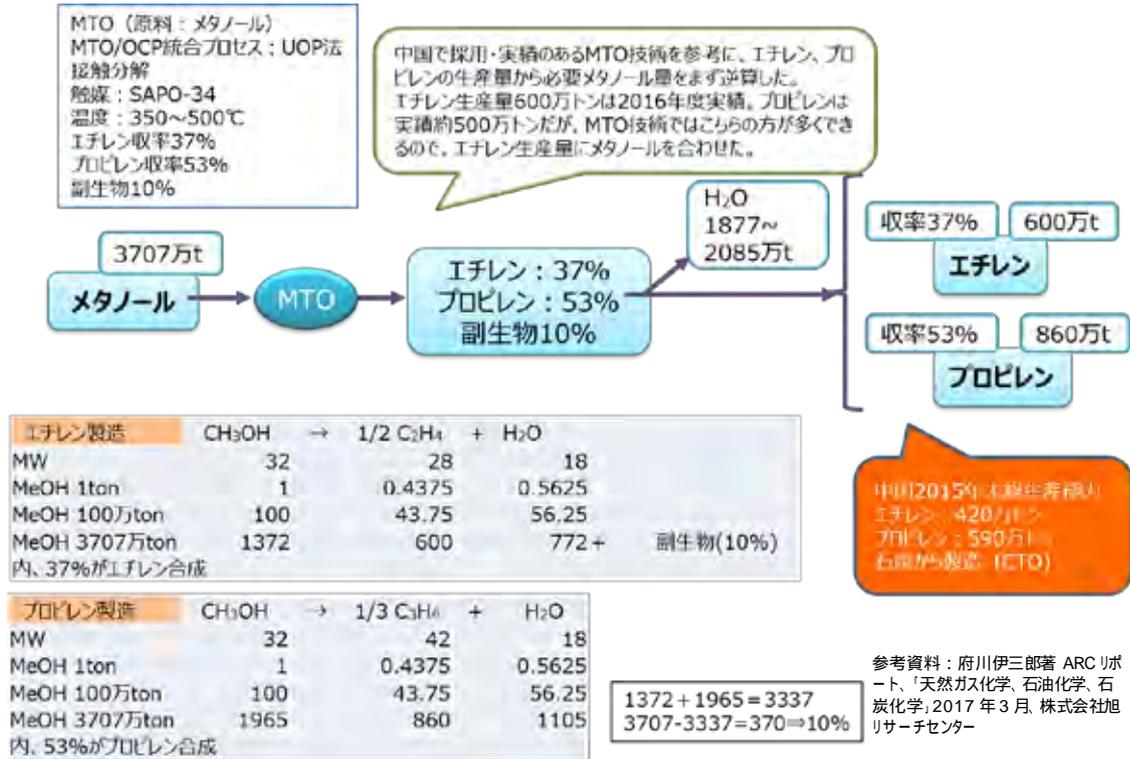
【参考3】主な化学品の市場規模

CO₂利用の可能性



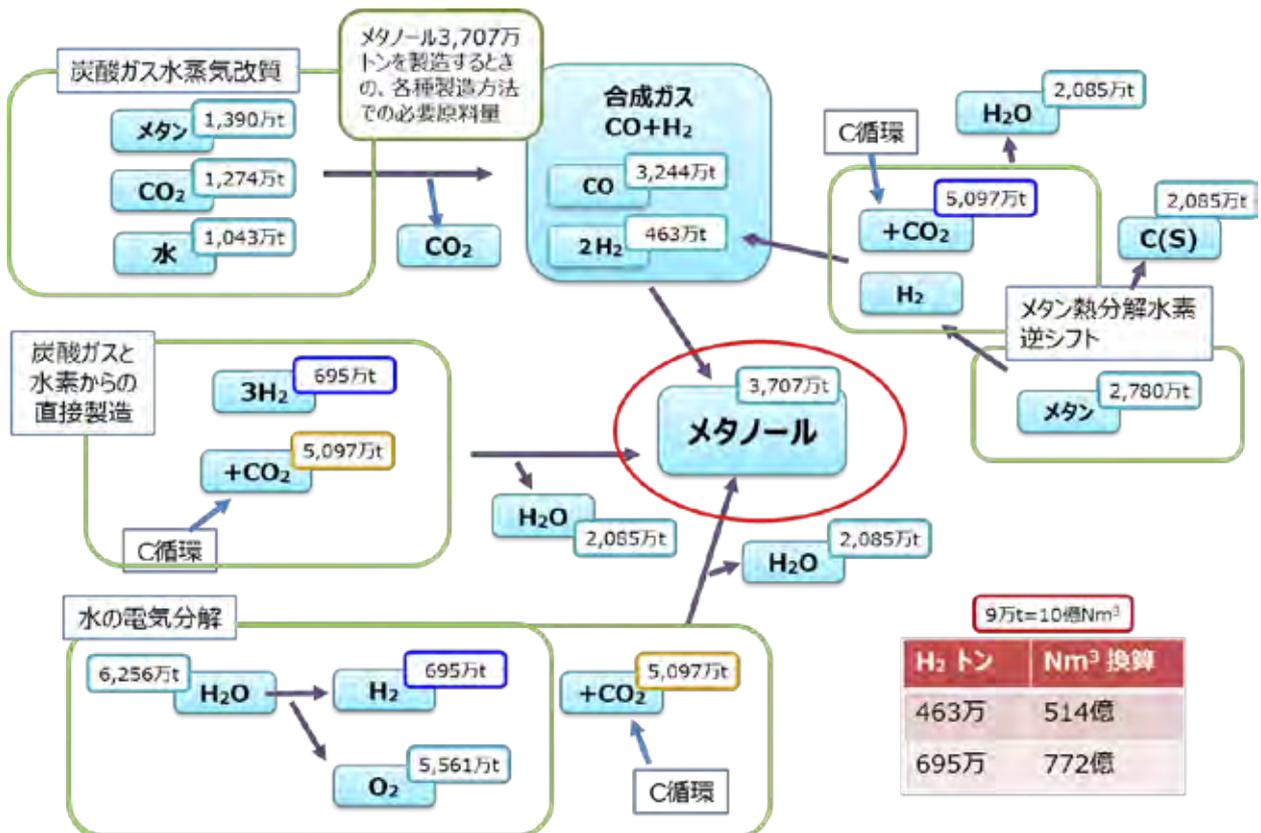
注：生産量等のデータ出典 平成28年資源・エネルギー統計年報（資源・エネルギー庁）、平成28年 経済産業省生産動態統計年報 化学工業統計編、化学品ハンドブック2017、IEA オンライン統計データ（2015）、↑ 2017年版世界化学工業白書、化学経済2017年3月号、三菱化学テクノロジーリサーチデータ、METI(世界の石油化学製品の今後の需給動向：平成25年)、OECD-FAO Agricultural Outlook 2017-2026

【参考4】MTOによるエチレン、プロピレン製造規模感



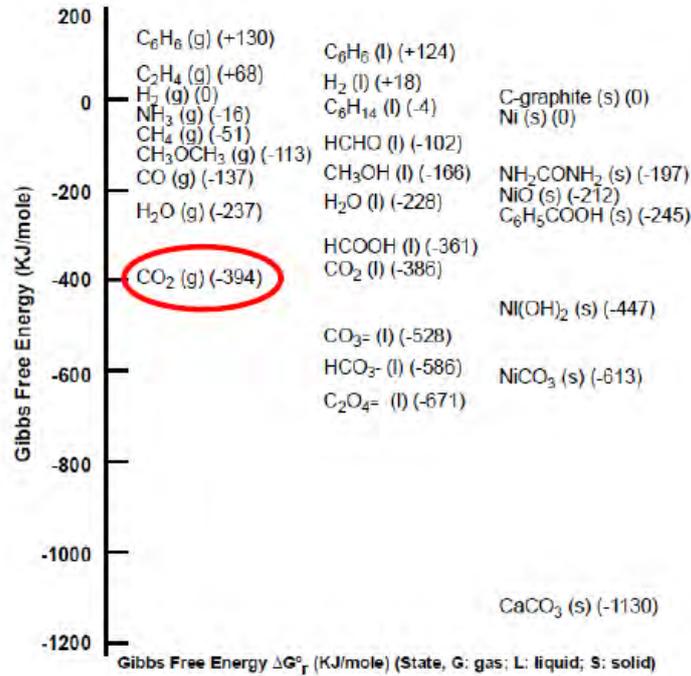
(出所) 一般社団法人 日本化学工業協会

【参考5】各種メタノール製造方法での原料規模感



(出所) 一般社団法人 日本化学工業協会

【参考6】ギブス自由エネルギー



(出所) ICEF CO₂利用ロードマップ資料にエネルギー総合工学研究所が加筆

5. CO₂ から上記有望物質を生成するために重要な要素はなにか？

ボトルネック課題1

製造・利用過程で CO₂ 排出増につながらず、安価かつ大量に調達可能な水素の調達が一番の課題（水素さえあれば、合成ガスメタノール、更にはその先の化学品等を生成する技術はある程度確立済）

しかし、再生可能エネルギー由来の水素製造（人工光合成、水電解）は、現状では高コストの電気代やエネルギー転換効率、発電の不安定さ等に起因する高コストが課題であり、これを克服できる仕組みや技術を国内に留まらず地球規模で検討するなど中長期的に着実に研究開発を進めていく必要がある

一方、太陽光発電や風力発電等の導入拡大による余剰電力を利用した水素製造の実証が盛んに行われており、制度設計次第では安価な水素が供給される可能性もあり注視していく必要がある

研究開発の方向性 【長期的取組】

- Ⅰ 人工光合成・・・高効率でかつ安価な水素製造を実現する触媒およびそのモジュール開発、水素・酸素分離技術等
- Ⅰ 水電解・・・水電解装置のコスト低減、新たな方式（固体酸化物型（SOEC））などによる大幅な高効率化、太陽光発電等再生エネルギーの一層の低コスト化、コ

ンプレッサーなしで後段の反応に必要な高圧水素が得られるシステムの開発等

【参考7】ホンダのスマート水素ステーション（SHS）

一般的な水素ステーションでは、水素充填圧力 35MPa・70MPa に対応するため、コンプレッサー（圧縮機）を使用する必要があるが、SHS は高圧水電解システム採用によりコンプレッサーが不要である（この分の電力も不要）。



（出所）本田技研工業（株）ホームページ

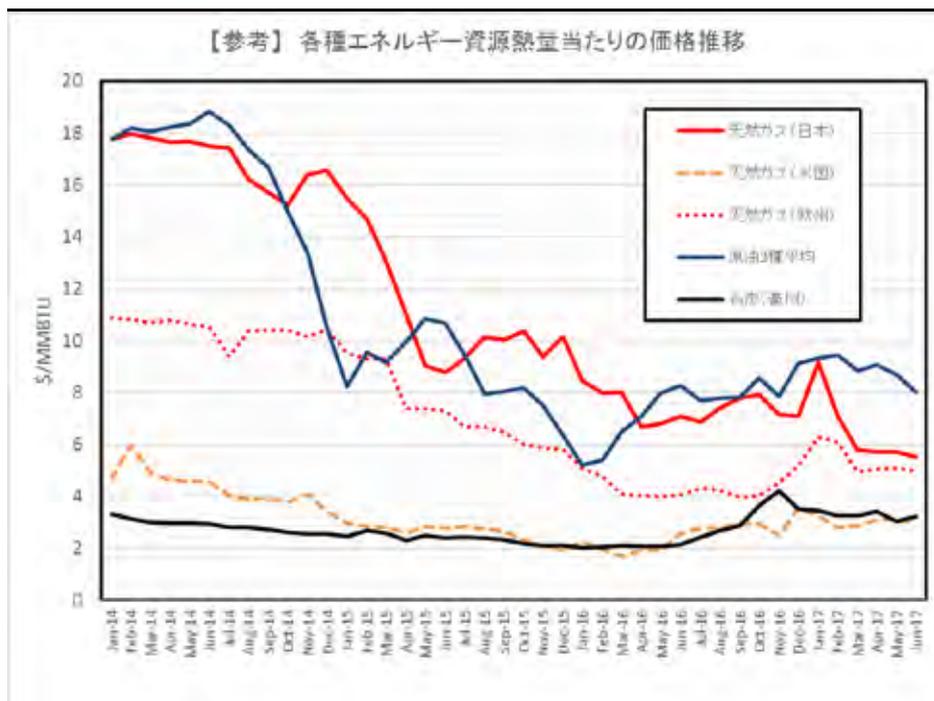
当面の取り組みとして、シェールガス革命の影響で安価となった天然ガス（特にその主成分であるメタン）由来の水素分（H）に着目

天然ガスは、現状石油の 5 割程度の価格で推移するとともに、2050 年時点でも資源量は豊富であり有望、メタンは分子あたりの水素量が多く含まれている点も注目に値する

熱量ベース価格では、天然ガス（米国）と石炭（豪州）が同程度で推移しているが、石炭ガス化による水素合成は、ガス化の際に要する温度が 1200 度と高温であること、固体（粉体）を扱うので、ガスを扱うよりコストがかかることなどから、現時点では設備建設費が高くなる傾向にある。一方、今後石炭価格は他の化石燃料と比較して上昇幅が緩やかである見通しもあり、設備建設費の低減、CCS コストの低減などが実現すれば、将来の水素源として活用される可能性もある。

産業界等から排出される CO₂ を原料として利用するためには、究極的には再エネ由来水素が必要だが、再エネ由来水素が安価で手に入るまでは、メタンを利用した C1 化学による化成品生産基盤を確立しつつ、徐々に CO₂ の原料利用の割合を高めていく努力を積み重ねていくことが重要と思われる（CO₂ を原料とする場合にも C1 化学が必要）

【参考 8】



(出所) IMF - Primary Commodity Prices

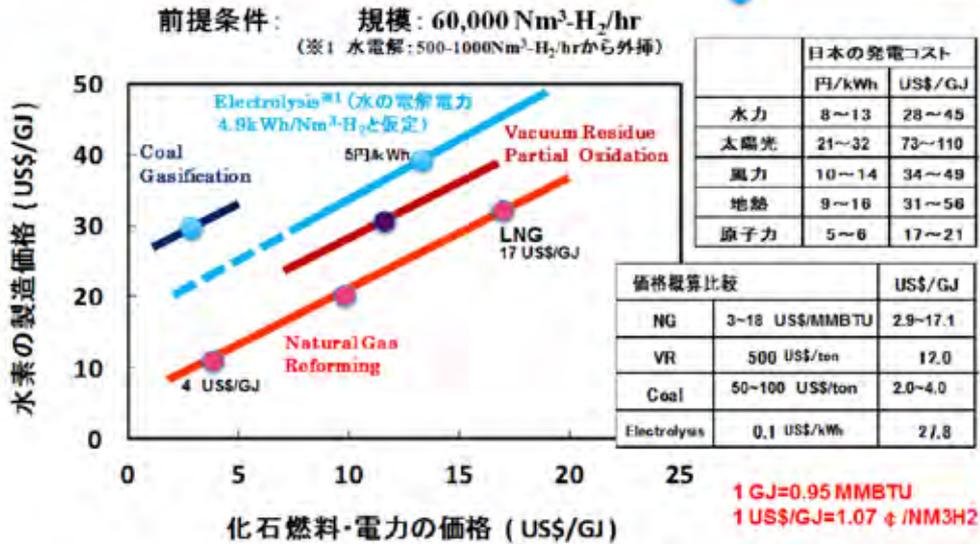
原油：38.2 GJ/kl、石炭：12,000 BTU/lbで換算

【参考 9】エタン利用のポテンシャル（試算）

- シェール革命以来、米国ではガス中に含まれるエタンを利用してエチレン生産を始めたところ。
 - 仮に世界の天然ガス生産量 3.5 兆 m³/年のうち、成分として 5%がエタンとすると、1,750m³=2.4 億トン (d=1.356 kg/m³ at 0 1 atm)。全量エチレンにすると 2.2 億トン。世界のエチレン誘導品需要 (2015 年) の 163%。
 - ただし、本研究会では、シェールガスを含め天然ガスの主成分はメタンであること、メタンの主要用途は燃料で今後も安価な価格が見込めること、エタンからはプロピレンが合成しにくいこと等を踏まえると、メタン改質の技術開発を極めることは重要との意見が出た。
- (出所) IEA 統計(HGL Consumption, Ethane/Ethylene 2016), Ethane, Chemical Economics Handbook, IHS Markit (2017)、世界の石油化学製品の今後の需給動向 (経済産業省)

【参考10】

化石燃料、自然エネルギーからの概略水素製造コスト



- ・ 安い天然ガス (4\$/MMBTU) であれば水素 10 円/N m³以下
- ・ 安い再生可能 (3 円/k Wh) であれば水素 30 円/N m³程度但し日本に運ぶ場合は+ 必要

(出所) 第4回研究会、千代田化工建設様資料より抜粋

本研究会では、化学産業として水素を使う場合、10 円/N m³を下回らないと難しいのではないかという意見も出た。

更に、本研究会では、水素製造をはじめ、化学メーカーのプラント設計は7~10年の償却期間で利益を上げられるものとする点に留意する必要があるとの意見が産業界から強く出された。

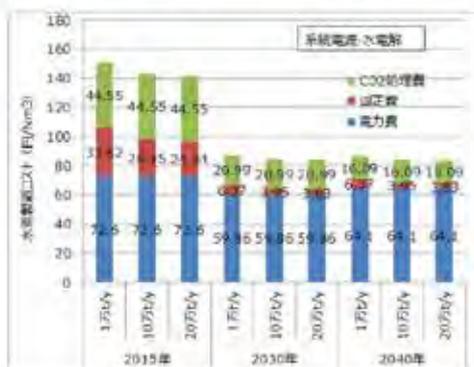
【参考11】水電解による水素製造コストのコスト構造分析（PEM、SOEC）

水素価格に占める電気代の割合が大半を占めるため、低価格の水素調達には極めて安価な電力が不可欠

< 日本 >

PEM水電解による水素製造コスト比較

- CO₂処理コストを顧慮しないと、現状では系統電源による水素製造が有利であるが、将来は再生可能エネルギーの方が安価となる。
- 電力コストにより水素コストは決まる。
- 稼働率による見直しが必要。



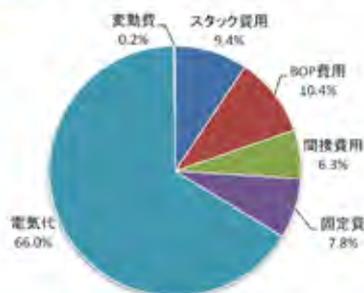
電力原単位 > kWh単価



(出所) ボトルネック課題研究会ワークショップ エネルギー総合工学研究所 堀 雅一様ご講演資料より抜粋

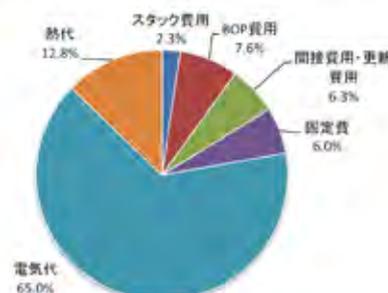
< 米国 >

PEM \$5.12/kg-H₂ (50,000kg/day, 2025年)



- 感度分析の結果、最もコストに影響を与える要因は電気料金であった。
- スタック装置とBOP費用(プラント付帯設備など)も全体のコスト構成に大きな割合を占めていた。
- 電気消費量を低減することがコスト低減に重要である。

SOEC \$3.83/kg-H₂ (50,000kg/day, 2025年)



- 感度分析の結果、最もコストに影響を与える要因は電気料金であった。(現状\$2.34/50L/日(総費用の47%)、将来(2025年)\$2.49/50L/日(総費用の65%))
- 水素製造コストに強く影響を与えているのは電気料金である。しかし、スタック装置の寿命を延ばす等により全体コストの低減が図られる。
- また、熱源に使用されるエネルギーコストがゼロになれば(外部との熱統合を想定?)製造コスト削減を図ることができる。

(出所) Brian D. James, Daniel ADeSanits, Genevieve Saur, Final Report: Hydrogen Production Pathways Cost Analysis

ボトルネック課題 2

メタンを使った水素製造は反応に 800~1000 の高温が必要(多くは吸熱反応)で、相当量のエネルギー投入を要し、そのため逆に CO₂ 排出してしまうといった課題があるため、抜本的な対策が必要
さらに、高温に耐えられる特殊鋼は高価で、プロセス全体のコストを引き上げる要因となる

代表的なメタン改質法

水蒸気改質 $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$ $\text{H} = +206 \text{ kJ/mol}$ (吸熱)

ドライリフォーミング $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO} + 2\text{H}_2$ $\text{H} = +247 \text{ kJ/mol}$ (吸熱)

ATR(自己熱改質) 供給されるメタンの一部を酸化させ、得られた熱で残りのメタンの水蒸気改質を行うことにより、外部からの熱供給なしで、改質する方式

(以下は研究開発段階)

部分酸化 $\text{CH}_4 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$ $\text{H} = -35 \text{ kJ/mol}$ (発熱)

メタンの熱分解 $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$ $\text{H} = +75 \text{ kJ/mol}$ (吸熱)

反応温度低下のインパクトについて(有識者ヒアリング結果)

600 : 鉄と合金の境目といえる(エンジニアリング会社 A)。

550 以下: 反応器の材質だけでなく、触媒の耐熱性がラクになる(触媒有識者)。

400 : カーボンスチールの強度の限界(エンジニアリング会社 B)。

上記のうち部分酸化反応は発熱反応であり、投入エネルギー等の観点から有望な技術であるが、反応制御(ホットスポットの回避等)が困難であることに加え、反応に必要な酸素の製造装置(空気分離装置)やその動力源として多量のエネルギーが必要となり、酸素供給が高価なシステムとなってしまう点が実用化にとっての大きなネックとなっている

また、メタンの熱分解は炭素分を固体(カーボン)の形で固定し、水素を取り出せる反応であることから、析出されるカーボンの除去、処理方法の確立等、克服すべき課題はあるが、産業界等から排出される CO₂ の原料化促進にとって注目に値する。

JST の「さきがけ」や「CREST」事業等において、メタンを直接メタノールに変換する技術の研究も行われている(反応しにくいメタンを途中段階の酸化で止める技術を確立することが課題)

【参考 1 2】メタン熱分解関連のプロジェクト

プロジェクト名	研究開発する団体	主な研究開発項目等	目標	予算額	事業期間
Nebraska Project	Monolith(米国)	天然ガスのプラズマ熱分解によるカーボンブラック製造	2020 年稼働計画	-	2016~

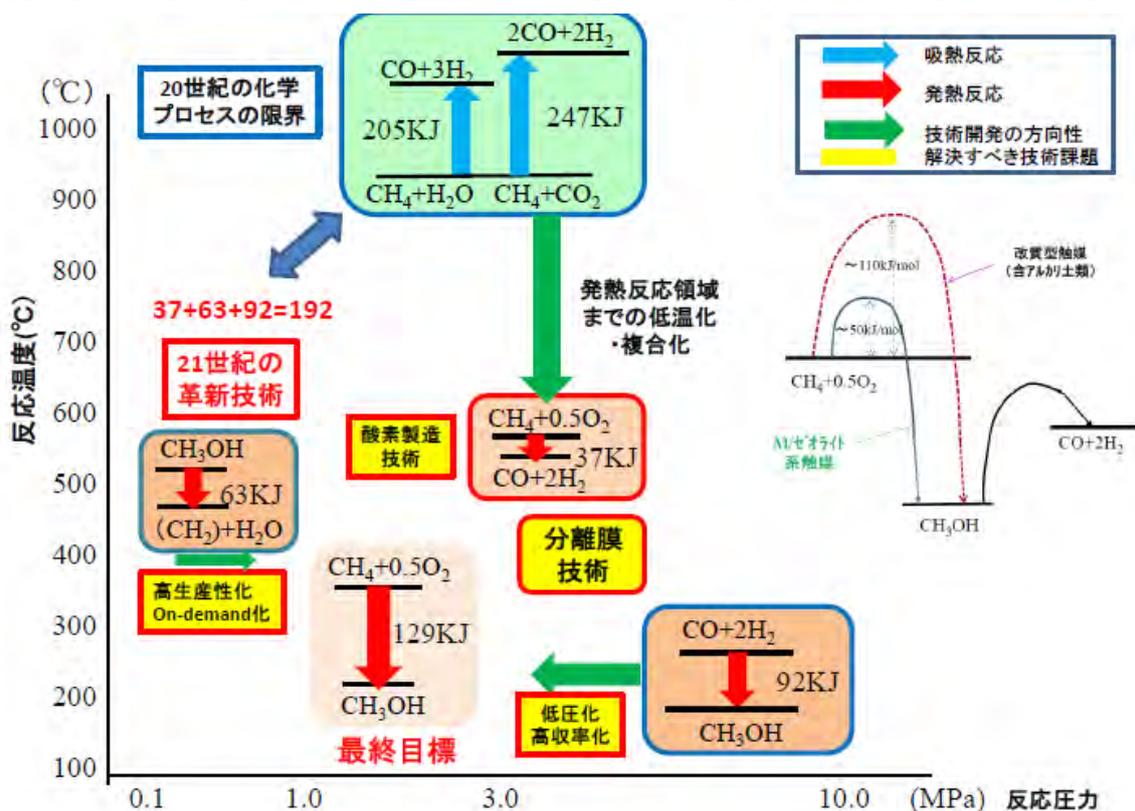
		z 副生成物である水素は、ネプ ラスカ電力会社の石炭焚ボイ ラを置き換えるために使用			
Methane Cracking	Hazer (豪州)	・触媒に安価な鉄鉱石を用いた プロセス。 ・生成炭素の品質は電池グ レードを想定。	2017年プレパ イロットプラ ント完成	-	2010~
GtF&S- Gas to Fluids and Solids	BASF、Linde、 ThyssenKrupp (ドイツ)	z 天然ガスの熱分解による水素 と炭素の製造 z carbon formulation for applications in coke and steel production z 水素と二酸化炭素からの合成 ガス製造	不明	€ 9.2M (BASFフ ァンド)	2013年7 月から3 年間
Combustion of Methane without CO ₂ Emissions	サスティナピ リティ研究所 (IASS)、カー ルスルーエ工 科大学(ドイ ツ)	z 溶融スズを用いた無触媒プロ セス。	-	不明	2012~ 2016
EU-Project SOLHYCARB - Solar Cracking of Methane 太陽光エネ ルギーを利用 した天然ガス の熱分解	ETH (スイス) CNRS, N-GHY, CREED (フラン ス), DLR (独 逸), Weizmann (イスラエル), Abengoa Solar (スペイン), Timcal (ベル ギー), CERTH (ギリシャ), PSI (スイス)	z ソーラーリアクタの設計、モ デル化、建設 z ソーラーリアクタの試験、評 価 z 生成ガスの分析、水素の精製 z カーボンブラックの特性評価 z スケールアップ	メタン分解 率：80% 水素濃度： 75% 水素生成：3 standard m ³ /h 炭素生成： 1kg/h 反応温度： 1500-2300K	€ 2,329 M	2006 ~ 2010

(出所) 東レリサーチセンター調べ

研究開発の方向性 【中期的取組】

- l メタンの C-H 結合の低温切断技術、部分酸化技術の確立・・・反応メカニズムの解明、触媒開発、分離膜技術開発等
- l 安価な酸素製造技術の確立・・・低エネルギー消費の酸素ガス濃縮技術(高速吸収・分離技術、膜分離技術)等の開発
- l 発熱反応・廃熱利用と吸熱反応の熱バランスを考慮した統合システム技術(例えば、部分酸化反応の発熱を吸熱反応であるドライリフォーミングや水蒸気改質に活用する技術等)・・・熱交換が難しい高温ガスの熱交換技術の開発、将来利用可能な未利用熱の特定等
- l メタン中のカーボン(C)を固体の形で固定できるメタン熱分解による水素製造技術・・・反応低温化(触媒) 廃熱利用、析出カーボン除去方法の確立、カーボンの安全処理・高付加価値化・利用技術等

【参考 1 3】炭素循環型化学品製造の為の人工光合成以前に開発すべき技術



(出所) ボトルネック課題研究会第4回 三菱ケミカル(株) 瀬戸山様資料

ボトルネック課題3

火力発電所や製鉄所、化学プラント等から排出される CO₂ は N₂ や CO など他成分も多く含まれており、化学吸収法などの現在実用化されている方法では、CO₂ の分離回収、濃縮に多量のエネルギー投入が必要

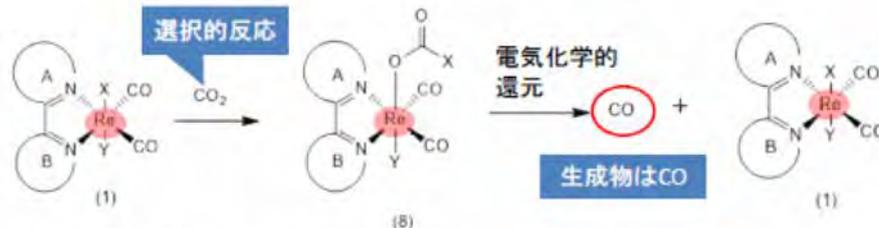
【参考 1 4】CO₂ の分離・回収に伴う CO₂ 排出量 (日本)

- 発電所の排ガスから化学吸収法によって CO₂ を分離・回収()する場合に必要なエネルギー = 2.0 GJ/トン-CO₂ (RITE 吸収液)
 - このエネルギーを産業用蒸気によって得る場合、1 トンの CO₂ を分離・回収するのに必要な CO₂ 排出量は約 0.12 トンとなる。
- CO₂ の分離・回収: 排ガスから CO₂ を選択的に除去し、大気圧で濃度 99% 以上の CO₂ を製造するプロセス
- (出所) CCS のあり方に向けた有識者懇談会 (第 1 回) 配布資料 5
温室効果ガス排出量 算定・報告・公表における算定方法・排出係数一覧 (環境省)

研究開発の方向性 【中長期的取組】

1 CO₂ 分離回収技術・・・投入エネルギーの低減が見込める膜分離技術や低濃度 CO₂ (他成分も含まれている燃焼排ガス) を直接還元できる技術の開発

【参考15】研究開発動向：低濃度二酸化炭素を捕捉し電気化学的に還元するシステム（国立大学法人東京工業大学 理学院化学系教授 石谷治 氏）



Re(レニウム)錯体による還元反応

1) 低濃度の二酸化炭素と反応

金属錯体とCO₂が選択的に反応 ⇒ 低濃度CO₂(0.03~100%)を濃縮過程なしで還元可能。加圧不要。

2) 電気化学的還元反応により一酸化炭素(CO)を生成。

COを選択的に生成。COは、極めて多様な炭化水素原料。炭化水素は、石油と同様にエネルギー源や化成品原料に。

(出所) JST CREST 「低濃度二酸化炭素を捕捉し電気化学的に還元するシステム」

< LCA ベースでの CO₂ 排出量 >

6. 原料 化成品までの LCA ベースでの投入エネルギー、CO₂ 排出量では、既存のナフサベースのプロセスに比べて有利か？

ボトルネック課題4

現行のナフサベースのプロセスでは蒸留工程にて多大なエネルギー消費をしており、これに代わる革新技术が不可欠。

一方、CO₂を原料とするプロセスでは、製造した水素の圧縮、合成ガス メタノール反応に必要なガスの圧縮など、コンプレッサーを使って多大な電力を消費(=多量のCO₂を排出)し、現時点ではLCAベースにおいてナフサベースのプロセス以上にCO₂を排出してしまう場合がある

再生可能エネルギーの活用も含め、あらゆる工程において、熱(蒸気)・電気・光・バイオ利用など、あらゆる手法を比較検討し、投入されるエネルギーを最大限下げて(またはクリーンなエネルギーを活用して)効率よく目的物を生成する必要がある

CO₂還元に関して、電気化学、光化学を活用する場合には、投入エネルギーの問題に加え、水へのCO₂の低溶解度の問題、水中での競合反応の存在(例: CO vs H₂)等の克服も必要

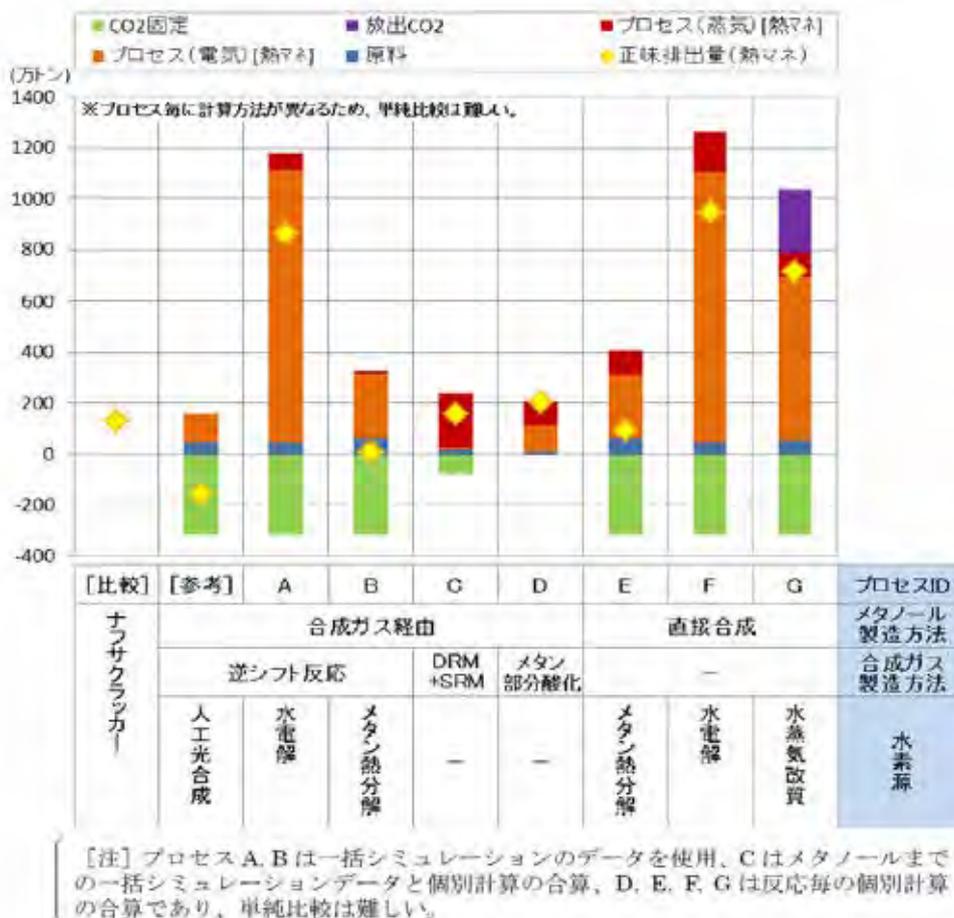
また、化学プロセスに電力を利用する場合には、膨大な電力が必要になることか

ら、可能な限り反応に必要な電圧（過電圧分）を下げることで、電極における表面反応であるためスケールメリットが出にくい課題があることなどに対応する必要がある

【参考16】オレフィンを合成する場合の水素源 / プロセス別のCO₂排出量概算

< 熱マネジメントを考慮 >

< メタンを液化せずに利用する場合 >

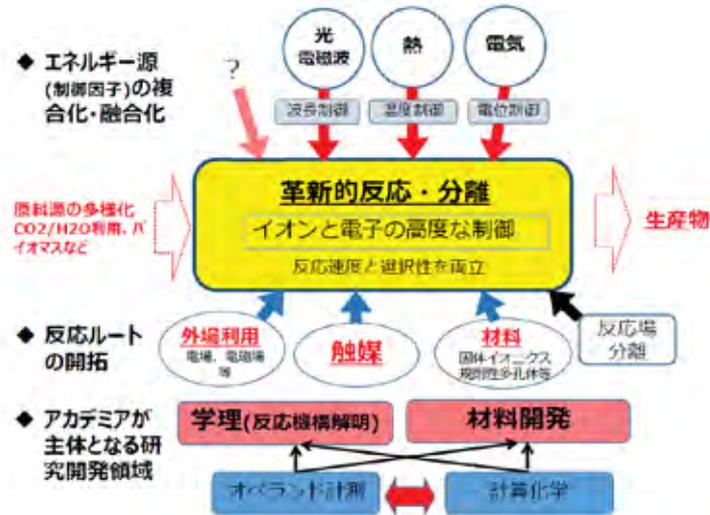


(出所) 各種文献データを基に東レリサーチセンターが試算

各種文献データを基に試算しているため、プロセスごとの前提や熱マネジメント効果の見積もりなどが異なるため、プロセスごとの正確な比較は現時点では不可。

ナフサクラッカー以外の技術はまだ実用化されておらず、将来の反応プロセスの改善（触媒等による反応温度低減、排熱の一層の利用、再エネ由来電気の活用等）によるCO₂排出量の更なる低減が期待される。

【参考 1 7】電気・光等を用いた革新的反応・分離技術（JST-CRDS 提案）



(出所) ボトルネック課題研究会ワークショップ JST-CRDS 資料より抜粋

【参考 1 8】CO₂をCOに転換する場合に必要な電力量（試算）

- 1 日本のCO₂排出量の1%(1,316万トン)を電解還元してCOとすると、409億kWh（年間電力需要の4.8%）の電力となる。
 - 1 太陽光発電では27GW、風力発電では18GWの設備容量に相当
 - 1 “水分解+CO₂還元”の電位差1.38V（25℃）より、（25℃での）究極的な必要電力の最小値としては221億kWh（年間電力需要の2.7%、太陽光発電約15GW、風力発電10GW）
- 条件：
- ・反応： $\text{CO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$
 - ・電解電圧：2.5V（理論的な電位差1.38V（水分解+0.82VとCO₂還元-0.53V））
 - ・1 eV = 4.4505 × 10⁻²⁶ kWh
 - ・ファラデー効率：0.98
- 2013年のCO₂排出量の1%（1316万トン）を電解還元するとき、必要電力量は409億kWh/年
（理論的な最小電力量では230億kWh/年）
- これは2013年の年間電力需要8,485億kWhの約4.8%にあたる
（理論的な最小電力量では2.6%）
- 太陽光発電で賄う場合、36GWの設備容量に相当。風力では18GWの設備容量に相当。
- 理論的な最小電力量では太陽光発電の19GWの設備容量に相当。風力では10GWの設備容量に相当。）
- ・太陽光発電の設備利用率を17.1%とした（平成30年度以降の調達価格等に関する意見（調達価格等算定委員会）より、2018年度の設備利用率想定値）
 - ・風力発電の設備利用率を25.6%とした（平成30年度以降の調達価格等に関する意見

(調達価格等算定委員会)より、2020年度の設備利用率想定値)

CO₂回収エネルギー(2.0 GJ/トン-CO₂)は考慮していない。

(出所) 第一回ボトルネック課題研究会 中部大学総合工学研究所 教授 成田様資料、2013年度分電力需要実績(確報)(電気事業連合会)、気象庁アメダス、日本メーカーホームページ、太陽光発電協会表示ガイドライン(平成28年度)

【参考19】日本のエチレン・プロピレン生産量を賄うために必要となる水素を全て水電解で作りに出す場合に必要な電力量(試算)

- l 日本のエチレン、プロピレン生産量は合計1,261万トン(2015年)
- l これをCO₂/H₂によるメタノール合成を経由し、MTO・MTPでエチレン・プロピレンを生産する場合、必要な水素の量は605億Nm³(544万トン) ただし加熱や圧縮などのエネルギー消費等での水素消費は含まない
- l この水素をSOEC水電解で製造するとき、現在の電解電圧1.3V、電解効率100%で1,879億kWh必要 年間電力需要の24%
- l 太陽光発電では163GW、風力発電では84GWの設備容量に相当
- l 現在の国内メーカー目標値1.3V、4.0 kWh/Nm³-H₂では電解効率78%に当たり、2,419億kWh必要となる 年間電力需要の30%
- l 太陽光発電では210GW、風力発電では108GWの設備容量に相当

○条件:

- ・エチレン・プロピレンを全量メタノールから合成する
- ・メタノールは全量CO₂/H₂から合成する
- ・CO₂/H₂からエチレンまでを1つの反応でみると $6\text{H}_2 + 2\text{CO}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_4 + 4\text{H}_2\text{O}$
- ・CO₂/H₂からプロピレンまでを1つの反応でみると $9\text{H}_2 + 3\text{CO}_2 \rightarrow \text{C}_3\text{H}_6 + 6\text{H}_2\text{O}$
- ・このとき、エチレンの重量:メタノール合成に必要な水素の重量 = 28.053 (エチレン分子量):(6 × 2.0159 (水素分子量))
- ・また、プロピレンの重量:メタノール合成に必要な水素の重量 = 42.080 (プロピレン分子量):(9 × 2.0159 (水素分子量))
- ・エチレン/プロピレン1,261万トン 内訳エチレン688.3万トン/プロピレン572.3万トンに対し、必要な水素はそれぞれ296.8万トン/246.8万トン(330.1億Nm³/274.5億Nm³)、合計543.5万トン(=604.7億Nm³)
- ・必要な水素は全量SOEC水電解等で製造する場合、
- ・反応:陰極 $\text{H}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$
陽極 $\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- + 1/2\text{O}_2$
全体 $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + 1/2\text{O}_2$
- ・電解電圧: 1.3V(国内メーカー-SOEC目標値)
- ・1eV = 4.4505 × 10⁻²⁶ kWh
- ・水素1分子製造に2e⁻必要 必要仕事量は2.6eV = 1.15713 × 10⁻²⁵ kWh
- ・1Nm³ = 1/0.022414 mol = 44.615 mol 1.15713 × 10⁻²⁵ × 44.615 × 6.0221 × 10²³ = 3.1089 kWh/Nm³-H₂
- ・電解効率100%のとき、604.7億の水素製造に必要な電力量は**1,879億kWh**(2015年

の電力需要 7,971 億 kWh の約 24%にあたる]

- ・ 電解効率 78%のとき (国内メーカー目標値 4.0 kWh/Nm³-H₂)、2,419 億 kWh (2015 年の電力需要 7,971 億 kWh の約 30%にあたる)
- ・ CO₂分離・回収のエネルギーは考慮していない。

○ 太陽光発電の規模に換算すると、電解効率 100%のとき設備容量 129 GW、電解効率 78%のとき設備容量 161 GW に相当 (太陽光発電の設備利用率を 17.1%とした (平成 30 年度以降の調達価格等に関する意見 (調達価格等算定委員会) より、2018 年度の設備利用率想定値))

○ 風力発電の規模に換算すると、電解効率 100%のとき設備容量 84 GW、電解効率 78%のとき設備容量 108 GW に相当 (風力発電の設備利用率を 25.6%とした (平成 30 年度以降の調達価格等に関する意見 (調達価格等算定委員会) より、2020 年度の設備利用率想定値))

(出所) 世界の石油化学製品の今後の需給動向 国別データシート (経済産業省) 2015 年度分 電力需要実績 (確報) (電気事業連合会)、気象庁アメダス、日本メーカーホームページ、太陽光発電協会 表示ガイドライン (平成 28 年度)、岩崎、太田; “持続可能社会に向けての水電解製造に関する研究”、圧力技術、44(5), 248-255 (2006)

研究開発の方向性 【中長期的取組】

- Ⅰ 革新的分離膜の開発・・・透過度・分離能力両面に優れる分離膜の開発
- Ⅰ 化学反応の低圧化、低温化、転化率の向上・・・触媒開発、革新的反応分離技術 (メンブレンリアクター等) の開発
- Ⅰ 革新的エネルギー投入手法の開発 (電気化学、光化学、電場、マイクロ波、細菌利用などによる選択的目的物の生成、反応選択性を上げる触媒開発等)

~ CO₂ を原料とする化学品製造の反応において副生する水の除去の重要性 ~

CO₂ を原料とする化学品製造の反応では多くのケースで、目的物とともに副生成物として水が発生する。副生する水は、1) 逆反応の進行による平衡転化率の低下、2) 触媒と水との反応による触媒の失活 (触媒被毒) を引き起こし、反応の効率的な進行を妨げる。本研究会で取り上げたメタノール合成、あるいはポリカーボネート原料の合成などは、水の副生が課題となる典型的な例である。従って、反応温度や圧力を穏和にできる触媒やプロセス開発とともに、反応系中から副生する水を効率的に除去する反応システム開発も CO₂ を原料とする有用化学品製造の基盤技術開発の一つと考えられる。

CO₂ を原料とするメタノール合成



CO₂ を原料とするジメチルカーボネート合成



副生する水による阻害

- 逆反応の進行による低平衡転化率
- 触媒への被毒作用

いるとは言え（CO₂ エタノール反応を除く）、低い平衡転化率、触媒の劣化といったコストに影響する課題が存在

研究開発の方向性 【短中長期的取組】

1 個別技術毎の課題（転化率、反応分離、触媒活性化）等の課題の解決

< CO₂ を原料としたその他有用技術 >

抜本的な CO₂ 排出削減ができるわけでないが、CO₂ を原料とした化成品の合成で、投入エネルギー、コスト的に有用な技術は何か？

ボトルネック課題 7

酢酸（CH₃COOH）、アクリル酸（C₃H₄O₂）や安息香酸（C₇H₆O₂）、ポリカーボネート（C₁₆H₁₄O₃）_n など含酸素化合物は比較的少ない投入エネルギーで合成が可能であり、既に一部実用化段階または実用化に近い段階にあるが、より一層の低コスト化が重要

本研究会では、多量の CO₂ 利用につながるオレフィン等の汎用化成品、燃料は競争が激しく、CO₂ 由来の化成品が競争力を持つことが非常に困難であることを踏まえると、それ自体 CO₂ の大量活用とはならないものの、CO₂ を機能性化学の原料として活用する道から始めるという観点も重要ではないかという意見もあった

研究開発の方向性 【短中期的取組】

1 含酸素化合物等、比較的少ない投入エネルギーで合成可能な化合物の低コスト合成手法の確立・・・多段階プロセス 一段プロセス、触媒開発等

< その他 >

8. その他共通基盤技術的な課題は何か？

ボトルネック課題 8

マテリアルズインフォマティクス（計算科学、データ科学）やロボティクスを活用した高効率な触媒開発や新たな計測・評価技術、エンジニアリング技術等において、CO₂ 利用を促進するために特有な技術開発要素があるか？

研究開発の方向性 【中長期的取組】

1 マテリアルズインフォマティクス（計算科学、データ科学）を活用した触媒開発、オペランド計測等を活用したプロトンや電子の動きの評価
マテリアルズインフォマティクス（計算科学、データ科学）の活用には利用するデータの質（前提条件、精度等）を揃えることが困難である点に留意が必要。異なる企業、研究者間であっても良質なデータを共有する仕組みを作っていくことが重要（特に国プロ）。

研究会では、触媒開発へのマテリアルズインフォマティクス(計算科学、データ科学)の適用は金属錯体であれば考えられるが、固体触媒では難しいのではないかとの意見もあった。

9. CCU を推進するための支援策は？

CO₂ の抜本的削減を図るための CCU の設備投資には巨額な費用が必要であるため、投資採算性を上げる設備投資支援策やコンビナートレベル等での CO₂ 回収から化学品製造までの一貫したモデル FS・実証の支援等の検討も重要。

内閣府・「ボトルネック課題研究会」 メンバーリスト 敬称略

<産総研>

- ・エネルギー・環境領域研究戦略部 イノベーションコーディネーター 西尾 匡弘
- ・創エネルギー研究部門 エネルギー触媒技術グループ長 高木 英行
- ・触媒化学融合研究センター触媒固定化設計チーム 主任研究員 深谷 訓久

<理研>

- ・環境資源科学研究センター 生体機能触媒研究チームリーダー 中村 龍平

<NEDO>

- ・技術戦略研究センター再生可能エネルギーユニット長 矢部 彰
- ・技術戦略研究センター 環境・化学ユニットユニット長 石田 勝昭

<JST>

- ・環境エネルギー研究開発推進部 部長 古賀 明嗣
- ・研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニットリーダー 中村 亮二

<日化協>

- ・三菱ケミカル(株) 執行役員 瀬戸山 亨
ご都合が悪い日は、研究開発戦略部 グループマネジャー 北川雅基様が代理参加
- ・住友化学(株) 執行役員(技術・研究企画部、先端材料開発研究所担当) 織田 佳明
ご都合が悪い日は、RC部、担当部長(気候変動担当) 河本 光明様が代理参加
- ・JXTGエネルギー(株) 取締役 常務執行役員
環境安全部・品質保証部・中央技術研究所 管掌 五十嵐 仁一
ご都合が悪い日は、中央技術研究所 技術戦略室 室長 田中 祐一様が代理参加

<JACI>

- ・部長研究員 坂下 幸雄

以下、オブザーバー参加

内閣府、文部科学省、経済産業省、環境省、農林水産省

○その他研究会・ワークショップでご講演いただいた方々(ご講演順、敬称略)

- ・中部大学総合工学研究所教授/エネルギー変換化学研究センター長 成田 吉徳
- ・三井化学(株) 特別研究室主任研究員 市川 真一郎
- ・トヨタ自動車(株) 東富士研究所 所長 杉山 雅則
- ・アイシーラボ代表 室井 高城
- ・千代田化工建設(株) 参与 プロジェクト開発事業本部長代行 細野 恭生
- ・産業技術総合研究所

- 化学プロセス研究部門化学システムグループ 主任研究員 片岡 祥
- ・ エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部 部長 黒沢 厚志
 - ・ 早稲田大学先進理工学研究科応用科学専攻 教授 松方 正彦
 - ・ 産業技術総合研究所 触媒化学融合研究センター 統括研究主幹 藤谷 忠博
 - ・ 科学技術振興機構 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット 尾山宏次
 - ・ エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部 参事 埴 雅一
 - ・ 京都大学 工学研究科材料工学専攻 教授 宇田 哲也
 - ・ 東京工業大学 理学院化学系 教授 石谷 治
 - ・ 東京大学 統合プロジェクト機構 「プラチナ社会」総括寄付講座
特任准教授 菊池 康紀

○調査・研究会運営

- ・ (株)東レリサーチセンター