

「カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発／
④次世代火力発電基盤技術開発／
7) CO2 有効利用技術開発」

事業原簿

公開版

担当部	国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 環境部
-----	--------------------------------------

概 要

プロジェクト用語集

- 1. 事業の位置付け・必要性について……………1-1**
 1. 事業の背景・目的・位置づけ
 2. NEDO の関与の必要性・制度への適合性
 - 2.1 NEDO が関与することの意義
 - 2.2 実施の効果（費用対効果）

- 2. 研究開発マネジメントについて……………2-1**
 1. 事業の目標
 2. 事業の計画内容
 - 2.1 研究開発の内容
 - 2.2 研究開発の実施体制
 - 2.3 研究開発の運営管理
 - 2.4 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性
 3. 情勢変化への対応
 4. 中間評価結果への対応
 5. 評価に関する事項

- 3. 研究開発成果について……………3-1**
 1. 事業全体の成果
 2. 研究開発項目毎の成果

- 4. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて……………4-1**
 1. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて

（添付資料）

- ・特許論文等リスト
- ・プロジェクト基本計画

概要

		最終更新日	2021年3月25日				
プロジェクト名	カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発／④次世代火力発電基盤技術開発／7) CO2 有効利用技術開発	プロジェクト番号	P16002				
担当推進部/ PMまたは担当者	環境部 PM 西海 直彦 (2021年3月現在) 環境部 PM 村上 武 (2017年10月～2019年6月)						
0. 事業の概要	我が国の優れた CCT 等に更なる産業競争力を賦与できる将来有望な CCU 技術の確立を目指し、CO2 有効利用品製造プロセスやシステムにおける CCU 技術の総合評価を実施する。CCU 技術の総合評価（経済性、環境性など）のため、CO2 の排出源、CO2 分離回収技術、変換技術や有効利用技術などがベストマッチングできる最適なシステムを、実験やシミュレーションを通じて詳細検討する。また、将来大量に導入が予想される再生可能エネルギーと、高効率な石炭火力発電技術である石炭ガス化複合発電（IGCC）との共生を念頭に入れたポリジェネレーションシステム（熱・電力・燃料供給システム）も CCU 技術の一つとして検討し、その運用性、環境性、経済性などを評価する。						
1. 事業の位置 付け・必要性について	供給安定性及び経済性に優れた天然資源である石炭を利用した火力発電は、将来的にも、国内の発電供給量の 26%を担う重要な電源である。 しかし、これら石炭火力発電では CO2 排出量が比較的多く、将来的に CO2 分離回収有効利用：Carbon Capture and Utilization (CCU) が検討されている。現時点では CO2 の大規模処理が困難であるものの、有価物の製造等により利益を創出する可能性がある。 2030 年度以降を見据え、将来の有望な CCU 技術の確立を目指して、我が国の優れた CCT (Clean Coal Technology) 等に、更なる産業競争力を賦与する事が可能な CCU 技術について、実用化に向けた開発を実施する。						
2. 研究開発マネジメントについて							
事業の目標	事業終了時に本事業として実施する CO2 有効利用技術の適用性を確認する。一例としては、将来的に天然ガス代替では 0.9 円～1.4 円/MJ* (LHV) を見通す経済性を評価する。 ※35 円～55 円/Nm ³ : 天然ガス 39MJ/Nm ³						
事業の計画内容	主な実施事項	2017fy	2018fy	2019fy	2020fy	2021fy	
	① CO2 有効利用 トータルシステムとしての 総合評価	[Blue bar spanning 2017fy to 2021fy]					
	② CO2 分離回収・ 有効利用システムの 検討・評価	[Blue bar spanning 2017fy to 2019fy]					
	③高濃度 CO2 利用 品製造プロセスの検 討・評価	[Blue bar spanning 2017fy to 2021fy]					
	④再生可能エネ ルギー併用 CO2 有効 利用システムの検討	[Blue bar spanning 2017fy to 2019fy]					

事業費推移 (単位:百万円) (委託)	会計・勘定	2017fy	2018fy	2019fy	2020fy	2021fy	総額
	一般会計	-	-	-	-	-	-
	特別会計(需給)	366	628	448	351	126	1919
	開発成果促進財源	-	-	-	-	-	-
	総 NEDO 負担額	366	628	448	351	126	1919
	(委託)	366	628	448	351	126	1919
開発体制	経産省担当原課	資源エネルギー庁 資源・燃料部 石炭課					
	プロジェクトリーダー	日本大学 坂西 欣也					
	プロジェクトマネージャー	環境部 西海 直彦					
	委託先	一般財団法人エネルギー総合工学研究所 公益財団法人地球環境産業技術研究機構 (再委託先: 山口大学、京都大学) 国際石油開発帝石(株) (再委託先: 国立研究開発法人産業技術総合研究所) JFE スチール(株) 日立造船(株) (再委託先: 名古屋大学)					
情勢変化への対応	<p>事業開始(2017年度)以降、下記のような情勢変化があり、本事業の早期実用化の重要性がますます高まった状況にある。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・2019年6月に経済産業省により「カーボンリサイクル技術ロードマップ」が策定された。CO₂を資源として捉え、これを分離・回収し、多様な炭素化合物として再利用するカーボンリサイクルに係る技術は、将来有望な選択肢の一つであり、そのイノベーションを加速化していくことが重要とされている。 ・2020年1月に内閣府により「革新的環境イノベーション戦略」が策定された。CO₂排出削減効果が大きな技術(39テーマ)の一つとして「低コストメタネーション技術の開発」が設定され、技術の確立を目指すことが示された。 ・2020年12月に経済産業省により「カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」が策定された。この中で、「カーボンリサイクル産業」も重要分野として指定され、技術開発・社会実装を進め、グローバル展開を目指すことが示された。 <p>本事業の事業内容を上記政策に反映しており、本事業の早期実用化の重要性がますます高まった。</p>						
評価に関する事項	事後評価	2021年度 前倒し事後評価実施					
3. 研究開発成果について	<p>最終目標(2021年度)の達成状況</p> <ul style="list-style-type: none"> ・メタメーションについては、基礎基盤研究段階の本プロジェクトでのベンチスケール試験を通じて、技術目標を達成した。実用化に向けての技術的知見や課題も得られ、段階的な設備スケールアップ試験・実証に向けた大きな成果を得られた。 						

	<p>・0.9円～1.4円/MJ（LHV）を見通す経済性の評価については、商用スケールでの事業性を電気料金（水電解コスト）、副生物（酸素、熱）販売、CAPEX/OPEX等の条件を加味して評価し、電気料金は1～3円/kWh程度が事業性には必要であることが明らかとなった。</p>	
	投稿論文	5件
	特許	「出願済」2件（うち国際出願1件）
	その他の外部発表 （プレス発表等）	50件

【メタネーション】

策定した実用化に向けた技術ロードマップに基づき、本プロジェクトで得た知見・技術的課題を踏まえ、段階的な技術開発・実証を進める。

2021年度カーボンリサイクル技術ロードマップの気体燃料分野の公募を実施予定。

市場ニーズ

・天然ガス（メタン）は生活・産業に不可欠なエネルギーである一方で、利用に際して発生するCO₂が問題となる。温暖化対策として、ガス自体の脱炭素化が求められており、それに対応できる技術として期待できる。

・変動する再生電力の余剰分を使った水電解水素を使ったメタネーションを行い、ガス導管注入を行うことで余剰電力の受け皿となりうると期待できる。

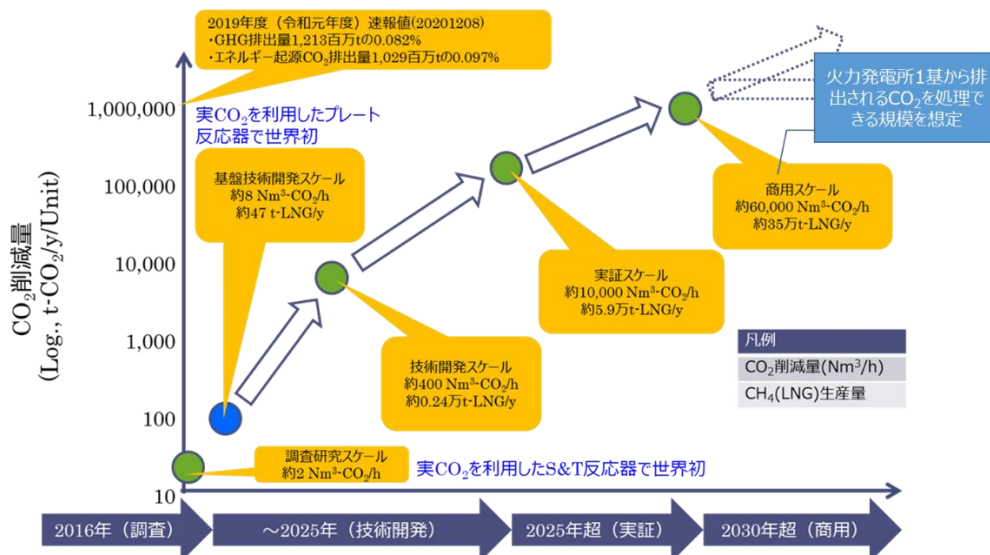
競合技術に対する優位性

・メタン合成技術の中では、基礎技術は既に確立されているという優位性があり、大型化研究開発の段階を経て実用化には近い。

技術確立の見通し

・段階的な大型化研究・実証を経ることで実用化のための技術確立は獲得できる。

4. 成果の実用化に向けた取組及び見直しについて



5. 基本計画に関する事項

作成時期	2016年1月 作成
変更履歴	2016年4月、9月、2017年2月、5月、6月、2018年2月、7月、9月、2019年1月、7月、2020年2月、3月、7月、9月、2021年1月 改訂 (目的、目標、内容、研究開発項目等の追加、修正)

プロジェクト用語集

名称	略号	意味
メタネーション Methanation		水素と二酸化炭素から天然ガスの主成分であるメタンを合成する技術
ポリジェネレーションシステム Polygeneration System		バイオマスや廃棄物、石炭等を燃料として発電すると共に、水素や化学品といった有価物を併産するシステム
二酸化炭素回収・貯留 Carbon Dioxide Capture and Storage	CCS	発電所など大規模な排出源で発生するCO ₂ を、他のガスから分離・回収し、安定した地層に貯留したり、海洋に隔離することにより、CO ₂ を大気から長期間隔離する技術
二酸化炭素回収・有効利用・貯留 Carbon Dioxide Capture, Utilization and Storage	CCUS	回収・貯留したCO ₂ を有効利用すること
サバティエ反応 Sabatier reaction		水素と二酸化炭素を高温高压状態に置き、ニッケルを触媒としてメタンと水を生成する化学反応
共電解 Co-electrolysis		二酸化炭素と水蒸気を同時に電気分解すること
メンブレンリアクター Membrane Reactor		触媒を固定した膜を利用したり、生成物を取り出す機能を備えた膜を利用して物質を合成する装置。
断熱型		反応系と外部との熱の出入りを断ち、孤立させた状態で反応させる方式。反応熱を高温蒸気として反応器下流で回収する。
シェルアンドチューブ型 Shell & Tube Type		反応熱を除熱流体を用いて反応器内で回収し、出口温度を低温とすることで高メタン濃度を一段の反応で達成可能。
プレート型 Plate Type		シェルアンドチューブ型と同じく熱交換型。単位体積当たりの伝熱面積をシェルアンドチューブ型より広く設定することが可能で、反応熱を効率よく除熱可能。
ホットスポット Hot Spot		メタン反応は発熱反応であり、局所的に高温となる場所のこと

1. 事業の位置付け・必要性について

1. 事業の背景・目的・位置づけ

供給安定性及び経済性に優れた天然資源である石炭を利用した火力発電は、将来的にも、国内の発電供給量の26%を担う重要な電源である。

しかし、これら石炭火力発電ではCO₂排出量が比較的多く、将来的にCO₂分離回収有効利用：Carbon Capture and Utilization (CCU) が検討されている。現時点ではCO₂の大規模処理が困難であるものの、有価物の製造等により利益を創出する可能性がある。

2016年4月「エネルギー・環境イノベーション戦略」において、CO₂排出削減ポテンシャルが期待出来る技術としてCO₂固定化・有効利用が示されている。(図1.1.1)

2016年6月に経済産業省により策定された「次世代火力発電に係るロードマップ」において、2030年以降を見据えた取組みとして、CCUS技術(有効利用技術 要素技術開発・実証事業)の開発を進めることとしている。(図1.1.2)

そこで本事業では、2030年度以降を見据え、将来の有望なCCU技術の確立を目指して、我が国の優れたCCT (Clean Coal Technology) 等に、更なる産業競争力を賦与する事が可能なCCU技術について、実用化に向けた開発を実施する。



図 1.1.1 エネルギー・環境イノベーション戦略

出典：内閣府 総合科学技術・イノベーション会議 2016年4月

7. 次世代火力発電技術の早期確立、実用化に向けた工程表

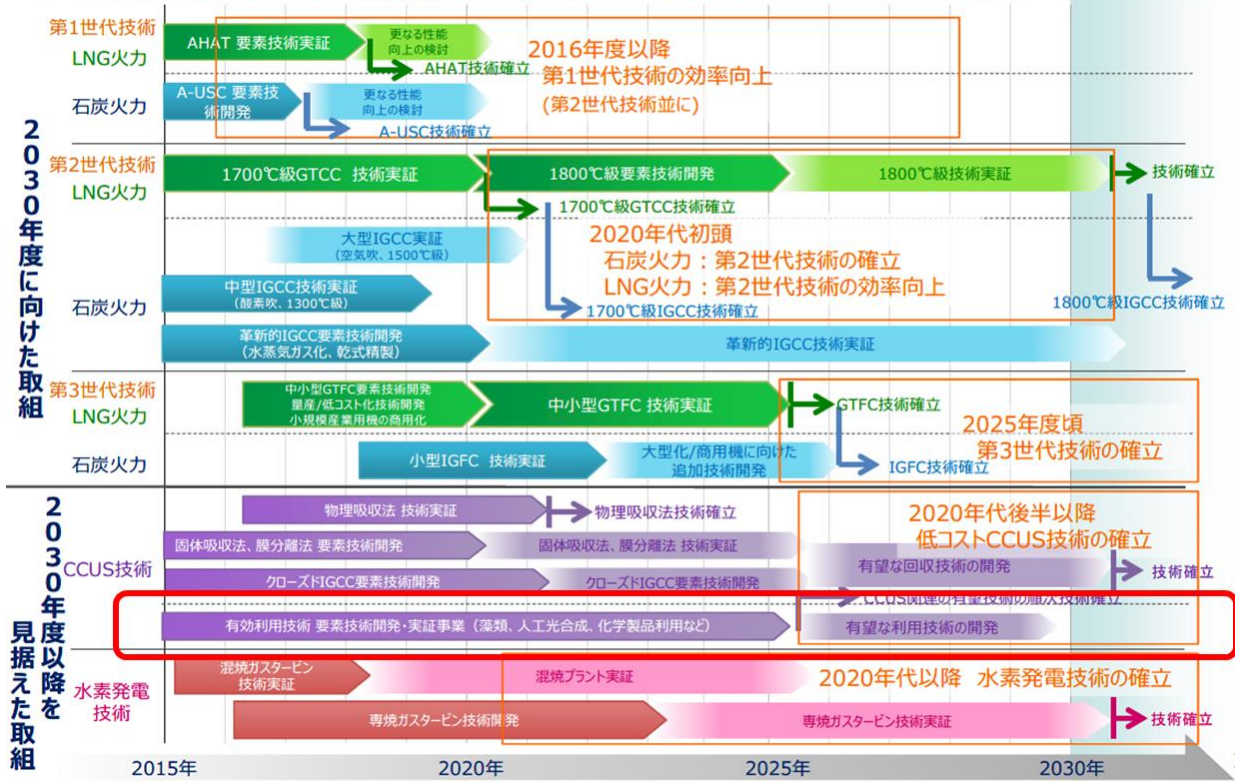


図 1.1.2 次世代火力発電技術の早期確立、実用化に向けた工程表

出典：経済産業省 次世代火力発電の早期実現に向けた協議会 2016年6月

2. NEDO の関与の必要性・制度への適合性

2.1 NEDO が関与することの意義

CO₂ 排出削減に寄与する CO₂ 有効利用技術の開発・実用は、

- 社会的必要性：大、国家的課題（温暖化対策）に貢献する技術
- 研究開発の難易度：実用化に向けて実証試験など長期かつ段階的な技術開発が必要で難易度高
- 投資規模：長期に渡る開発が必要で投資リスク大

エネルギー・地球環境問題の解決を担う組織である NEDO は、国家的課題である温暖化対策に対し、マネジメント力を生かした産学官の技術力・研究力を最適に組み合わせ研究を推進できる。また、NEDO 内部にある他分野の知見（水素）を本事業に生かし効果的な事業推進ができる。

以上のことから、NEDO がもつこれまでの知識、実績を活かして推進すべき事業である。

2.2 実施の効果（費用対効果）

①プロジェクト費用の総額（5年間）：約 19 億円

②CO₂ 排出削減効果

【メタネーション】

電力市場

CO₂ 由来のメタンを天然ガスパイプライン運用上の許容圧力範囲内において、再エネ由来電力として、少なくとも 3,000 万 kW 程度の余剰電力を吸収可能。

CO₂ 削減効果

国内の天然ガス年間消費量(約 1,000 億 m³) の 10%を CO₂と水素からの合成メタンで代替した場合、年間約 2,240 万 ton の CO₂ 削減効果となる。日本での年間 CO₂ 排出量の約 2%削減となる。

- ・天然ガス燃焼時の CO₂ 排出量 : 51g/MJ
- ・天然ガス発熱量 : 40MJ/m³
- ・2019 年度 日本の CO₂ 排出量 : 12 億 1300 万 ton

2. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

【最終目標（2021年度）】

事業終了時に本事業として実施するCO₂有効利用技術の適用性を確認する。一例としては、将来的に天然ガス代替では0.9円～1.4円/MJ※（LHV）を見通す経済性を評価する。

※35円～55円/Nm³：天然ガス39MJ/Nm³

【目標設定根拠】

- ・将来のCO₂有効利用技術の社会への普及には技術の確立だけでなく、経済性等の社会への適用性を評価する必要がある、その確認をすることを目標として定めた。
- ・0.9円～1.4円/MJ（LHV）は、現時点での天然ガス価格から算出した値で、商用スケールでの経済性を検討する目標値として定めた。

2. 事業の計画内容

2.1 研究開発の内容

(1) 本プロジェクトの概要と経緯

2016年度からCO₂排出削減のための有効利用技術の一つであり、既存インフラが使えるメタネーションについて、事業性等の調査・実験・検討を行った。また、NEDOとして、CO₂濃度の異なる排出源ごとのCO₂分離回収技術・有効利用技術の最適組み合わせの検討や再エネ導入増加に伴う電源系統安定化に関して寄与すると期待できるポリジェネレーションシステムの可能性検討が必要と判断し、本プロジェクトを開始した。

■CO₂有効利用可能性調査(2016～2017年度)

<概要>

CO₂排出量削減のための有効利用技術の一つであり、既存インフラが使えるメタネーションについて、技術・事業性等の調査・実験・検討を行った。

CO₂排出源ごとのCO₂分離回収技術・有効利用技術の最適組み合わせの検討やポリジェネレーションシステムの可能性の検討が必要とNEDOが判断。

■CO₂有効利用技術開発(2017～2021年度)

<2021年度目標(最終目標)>

事業終了時に本事業として実施するCO₂有効利用技術の適用性を確認する。一例としては、将来的に天然ガス代替では0.9円～1.4円/MJ（LHV）を見通す経済性を評価する。

図 2.1.1 プロジェクトの経緯

【事業内容】

2030 年度以降を見据え、将来有望な CCU 技術の確立を目指して、我が国の優れたグリーンコー
ルテクノロジー（CCT）等に更なる産業競争力を賦与することが可能な CO₂ 有効利用技術
（CCU）について、実用化に向けた開発を実施する。

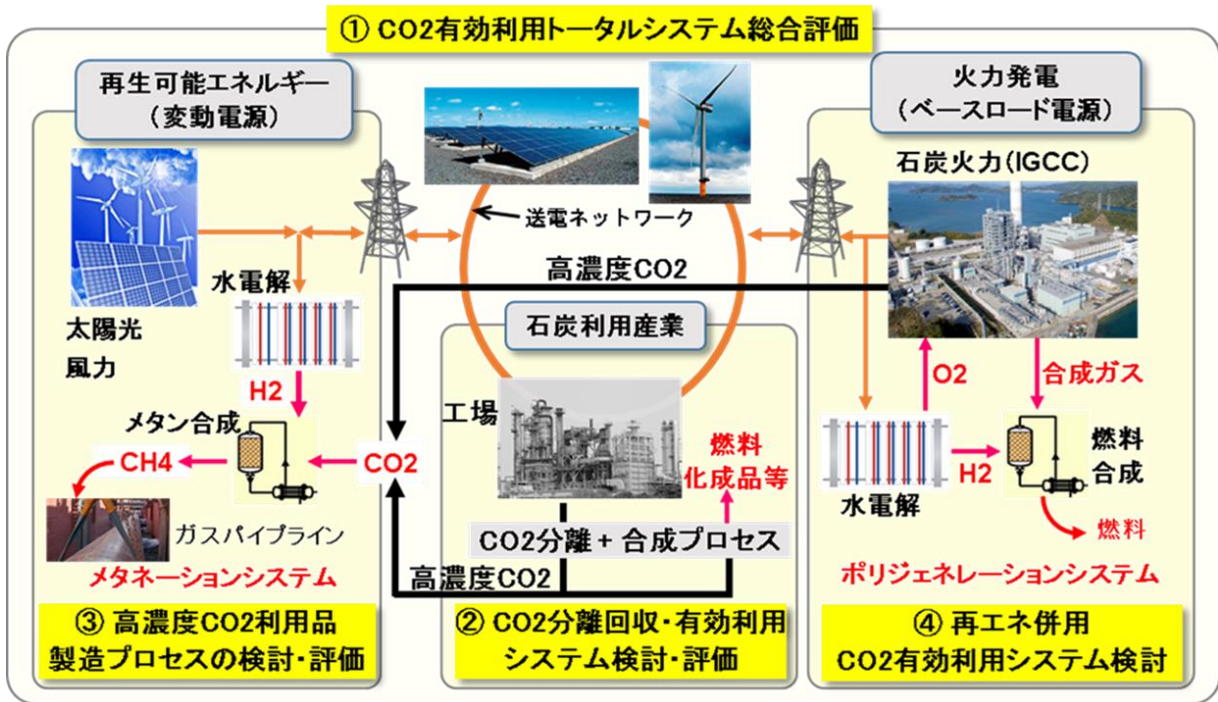


図 2.1.2 研究テーマ相互関係

【研究開発項目①】

CCU 技術による CO₂ 排出削減や有価物製造を総合的な観点からその効果と価値を明らかにする
ため、研究開発項目②～④を踏まえて上で CCU 技術や CCU 技術を用いたトータルシステムの総
合評価を行う。

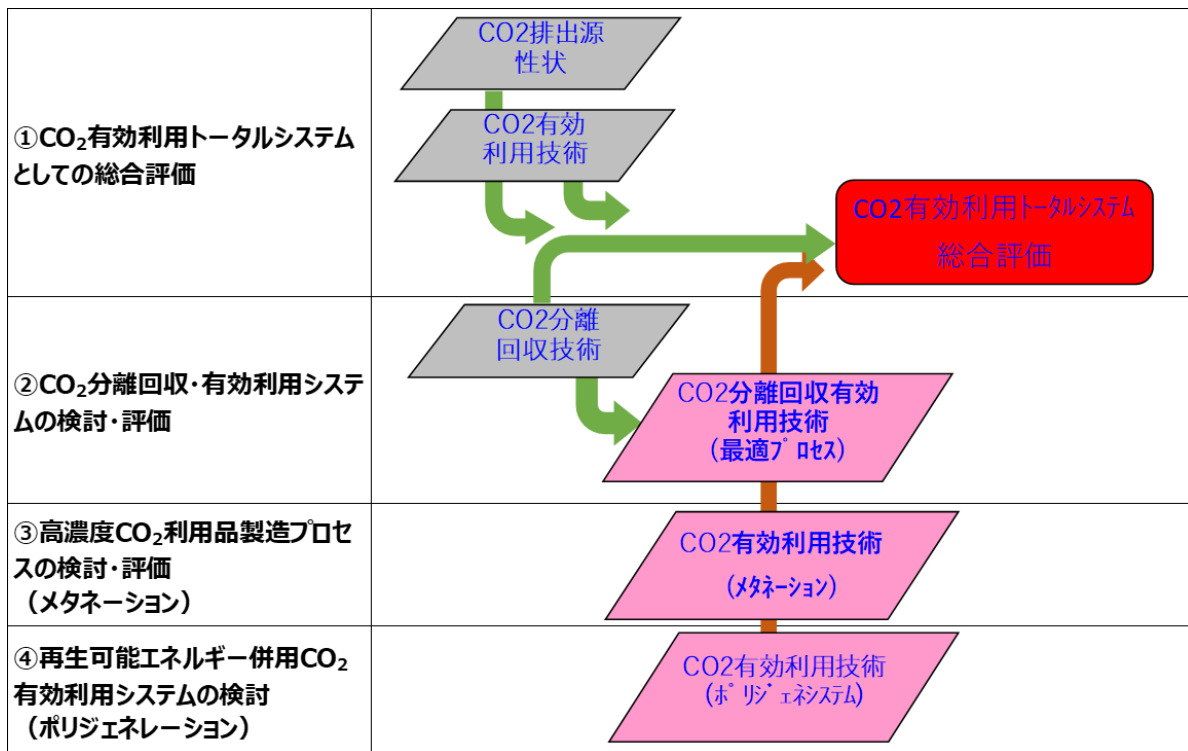


図 2.1.3 CO₂ 有効利用トータルシステム総合評価

【研究開発項目②】

最適な CCU プロセスを構築するための技術課題や経済性を明らかにするため、CO₂ 分離回収技術および変換技術の組み合わせの検討や評価を、実験やシミュレーションを通じて行う。

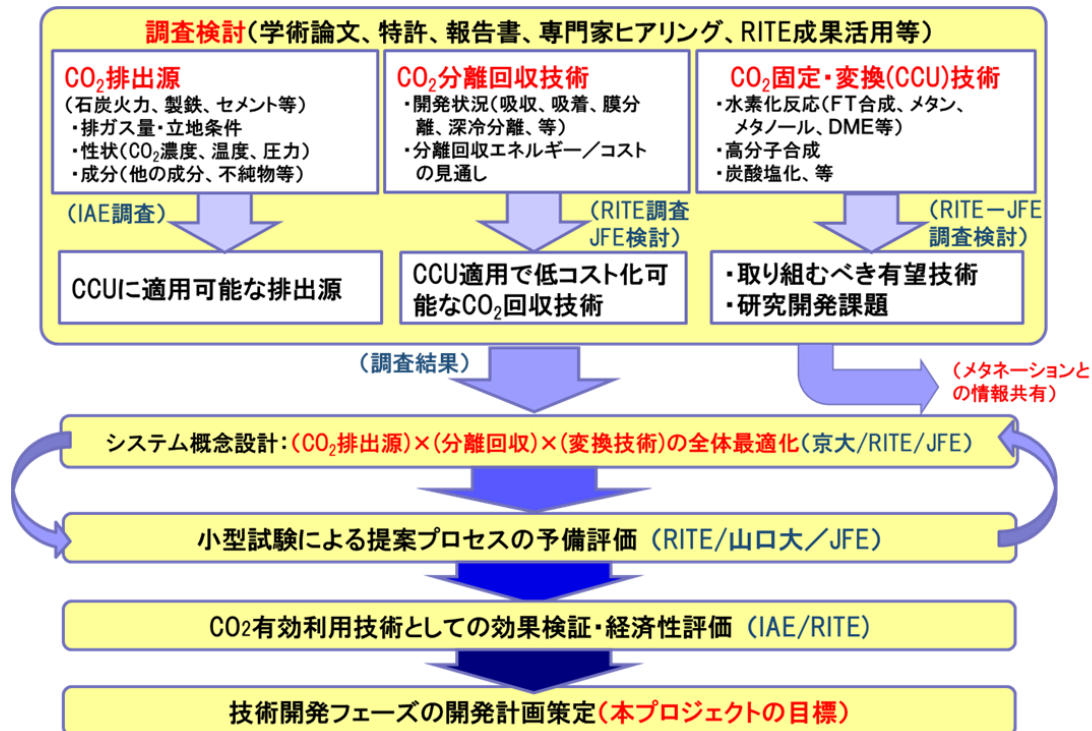


図 2.1.4 CO₂ 分離回収・有効利用システムの検討・評価

【研究開発項目③】

高濃度に分離回収された CO₂ を利用した有価物製造プロセス（メタネーション）の事業性を明らかにするために、同プロセスの試験装置を設計・製作し、その検証結果から CCU 技術としての適用性や経済性に関する検討や評価を行う。

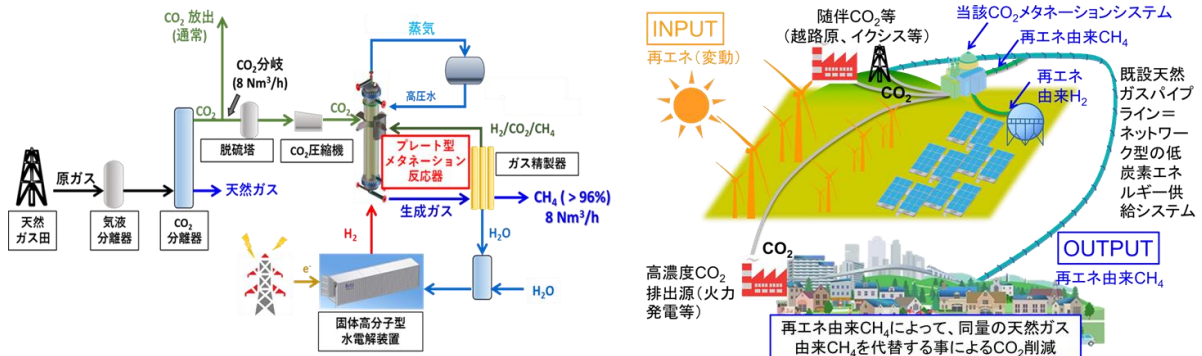


図 2.1.5 高濃度 CO₂ 利用品製造プロセスの検討・評価（メタネーション）

【研究開発項目④】

国内外における石炭ガス化ガスをベースとしたポリジェネレーションシステムの検討例を調査し、用いられている技術（石炭ガス化、水素/酸素製造、合成燃料製造など）について開発状況を整理する。また、再生可能エネルギーとの組み合わせシステムの可能性についても検討する。

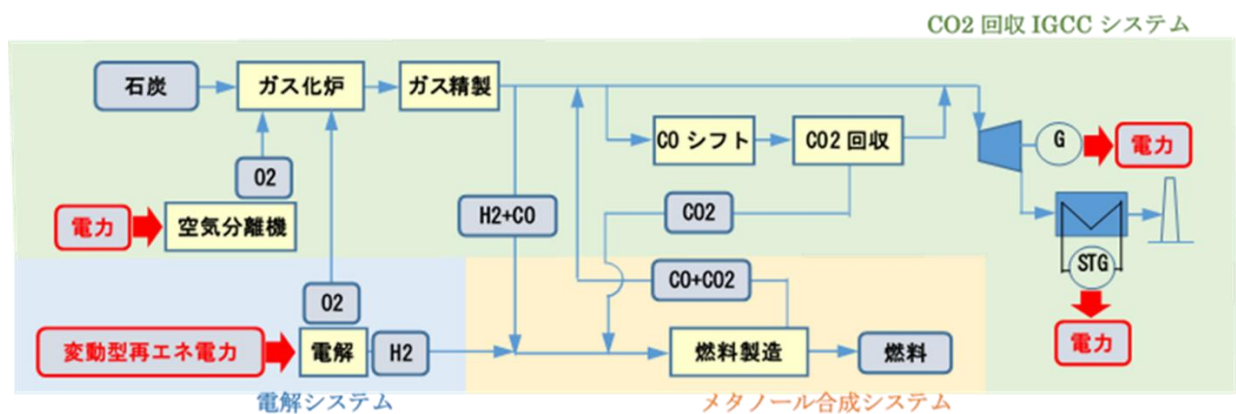


図 2.1.6 再生可能エネルギー併用 CO₂ 有効利用システムの検討（ポリジェネレーション）

2.2 研究開発の実施体制

(2017年度～2019年度)

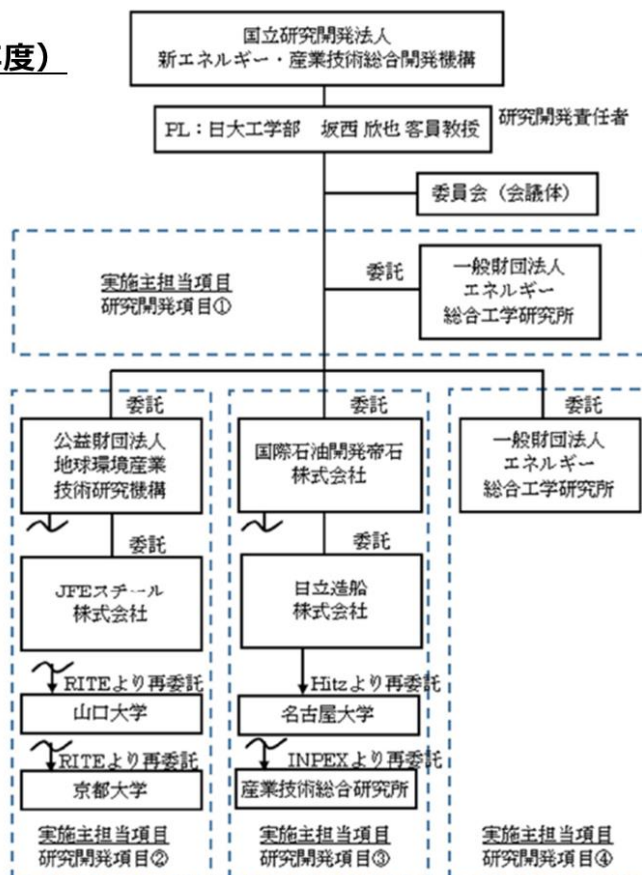


図 2.2.1 研究開発の実施体制 (2017 年度～2019 年度)

(2020年度～2021年度)

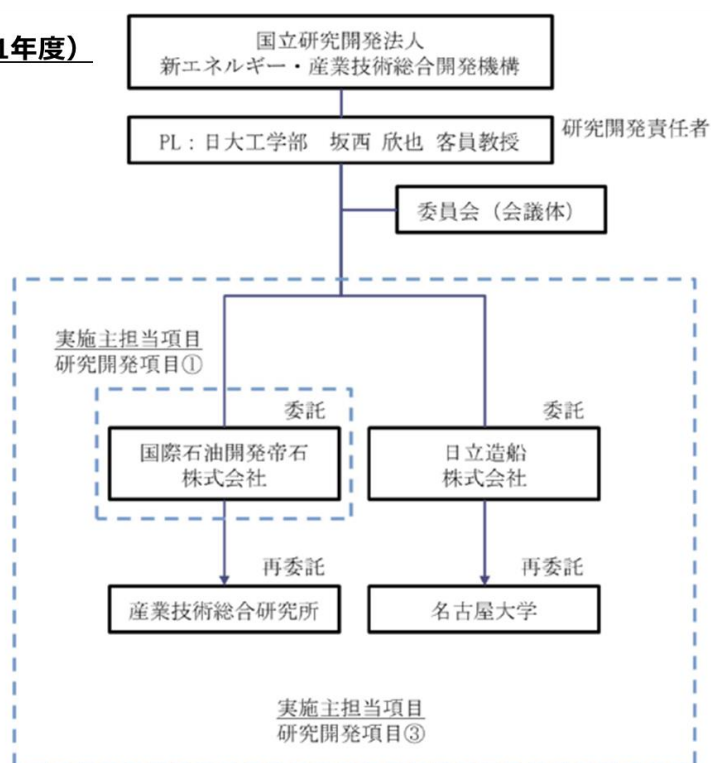


図 2.2.2 研究開発の実施体制 (2020 年度～2021 年度)

2.3 研究開発の運営管理

PM は、PL や実施者と密接に連携し、研究開発の進捗状況を把握した。また従事日誌、月間工程表、執行管理表および適宜ヒアリング等により実施状況を確認し、目標達成の見通しを常に把握することに努めた。

PL は、PM、実施者との打ち合わせを頻繁に行い、各研究開発項目の進捗状況、成果及び問題点を把握し、適宜指導を行った。

PM/PL による管理実績として外部委員による NEDO 主催の技術検討委員会、事業者主催の推進委員会、プロジェクト進捗会議等で進捗フォローを行った。

(技術検討委員会：2 回、推進委員会：4 回、進捗会議：6 回)

【外部委員リスト】

○技術検討委員会

関根 泰	早稲田大学 先進理工・応用化学 教授
杉村 英市	電気事業連合会 技術開発部長
鷹觜 利公	産業技術総合研究所 イノベーション推進本部 地域連携推進部 関東地域連携室 室長
中澤 治久	火力原子力発電技術協会 専務理事
山崎 晃	千葉工業大学 社会システム科学部 金融・経営リスク科学下 教授

2.4 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性

(1)知的財産等に関する戦略

- ・ノウハウとして保有する方が有利な技術は出願しない。
- ・知財として確保する方が有利な技術については積極的に特許として出願する。

(2)知的財産管理

本プロジェクトで得られた知財については、関係各機関の知財管理部門と連携し、特許管理、知財管理を進める。

「国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー・産業技術業務方法書」第 25 条（委託の成果に係る知的財産兼の帰属）の規程等に基づき、原則として、事業成果に関わる知的財産権は全て委託先に帰属させる。

3. 情勢変化への対応

事業開始以降、以下のような情勢変化があり、より加速しての本事業の早期実用化が引き続き重要な状況にある。

➤ 2019年6月に経済産業省により「カーボンリサイクル技術ロードマップ」が策定された。CO₂を資源として捉え、これを分離・回収し、多様な炭素化合物として再利用するカーボンリサイクルに係る技術は、将来有望な選択肢の一つであり、そのイノベーションを加速化していくことが重要とされている。

➤ 2020年1月に内閣府により「革新的環境イノベーション戦略」が策定された。CO₂排出削減効果が大きな技術（39テーマ）の一つとして「低コストメタネーション技術の開発」が設定され、技術の確立を目指すことが示された。

➤ 2020年12月に経済産業省により「カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」が策定された。この中で、「カーボンリサイクル産業」も重要分野として指定され、技術開発・社会実装を進め、グローバル展開を目指すことが示された。

本事業の事業内容を上記政策に反映しており、本事業の早期実用化の重要性がますます高まった。

3. 研究開発成果について

1. 事業全体の成果

メタメーションについては、基礎基盤研究段階の本プロジェクトでのベンチスケール試験を通じて、技術目標を達成した。実用化に向けての技術的知見や課題も得られ、段階的な設備スケールアップ試験・実証に向けた大きな成果を得られた。

0.9円～1.4円/MJ（LHV）を見通す経済性の評価については、商用スケールでの事業性を電気料金（水電解コスト）、副生物（酸素、熱）販売、CAPEX/OPEX等の条件を加味して評価し、電気料金は1～3円/kWh程度が事業性には必要であることが明らかとなった。

2. 研究開発項目毎の成果

本事業における研究開発項目ごとの目標と達成状況を表3.2.1に示す。

表 3.2.1 研究開発項目ごとの目標と達成状況

○達成、△達成見込み、×未達

（△については事業終了2021年6月末までには達成見込み）

研究開発項目	最終目標	成果	達成度
①-1 CO ₂ 排出源ごとの排ガス量・性状の調査・解析	CCU技術の有効性検討のため、 CO₂排出源ごとの排ガス量・性状の調査 を実施する。	産業別や化学プロセス別の調査を行い、結果を総合評価等に反映した。	○
①-2 CO ₂ 固定化・有効利用技術の最新開発動向調査	取り組むべき有効利用技術と研究課題の整理のため、 CO₂固定化・有効利用技術の最新開発動向 の調査を実施する。	各種CO ₂ 有効利用技術の動向を調査し、 市場規模・CO₂固定化可能量を考慮するとメタノール合成が有望と結論づけた。	○
①-3 CO ₂ 有効利用技術の効果検証	CO ₂ 有効利用技術による CO₂排出削減効果 を検証する。	CO ₂ 排出削減効果を試算した。	○
①-4 CO ₂ 有効利用トータルシステムの総合評価	メタメーション等についての経済性も含めた 総合評価 を行う。	総合評価を実施し、CO ₂ フリー燃料・資源としての可能性を評価した。	○

研究開発項目	最終目標	成果	達成度
②-1 CCUに適用可能な分離回収技術に関する調査	各種CO ₂ 分離回収技術を調査し、 CCUに適した分離回収技術の抽出 を行う。	CO ₂ 排出源ごとのCO ₂ 分離回収技術、CO ₂ 有効利用先との 最適組み合わせ を示した。	○
②-2 最適CCUプロセスの概念設計と試験による有効性検証	CO ₂ ガス組成や変換システムまでの 全体最適化したプロセスの検討を試験・シミュレーションにより行う 。抽出した プロセスの概念設計 を行う。	製鉄複製ガス、石炭火力排ガス、IGCC合成ガスを対象に、 プロセスシミュレーションを行い最適プロセスを導きだした 。抽出したプロセス（膜反応器）の 概念設計・要素研究 を実施した。	○
②-3 プロセスの技術課題整理・開発計画の策定	②-2の結果をもとに、 技術開発課題を抽出し、実用化に向けた開発計画 を策定する。	技術課題を整理し 開発計画 を策定した。	○

研究開発項目	最終目標	成果	達成度
③-1 反応熱エネルギーマネジメント技術	メタネーション反応をシミュレーションできる 数値モデルを構築 する。このモデルを用いて、反応速度・熱流体シミュレーションを行い、 反応器・プロセス設計 へのフィードバックを行う。	CFD(数値流体力学)モデルを構築 し、実験測定データをシミュレーションでの再現を確認。シミュレーション結果の 次期スケールアップ反応器設計 へのフィードバックを推進中。	△ (2021年6月達成見込み)
③-2 触媒活性マネジメント技術	メタネーション触媒の失活が生じない下記 条件を明確 にする。 微量不純物(H ₂ S、VOC)許容濃度上限	H ₂ S、VOCによる活性低下に帯するメカニズム解明を実施し、 許容濃度の確認 を実施中。	△ (2021年6月達成見込み)
③-3 プロセス運転マネジメント技術	メタン合成能力8Nm ³ /hの試験装置を設計・建設・試験を実施し、下記目標を達成する。 合成能力：8Nm³/h メタン濃度：96%以上 熱回収率：85%以上 定格運転時間：4500時間	合成能力、メタン濃度(実績99%)、熱回収率(実績87%)は達成済み。 定格運転時間は、 6月には達成見込み（1月末の段階で2500時間達成）	△ (2021年6月達成見込み)

研究開発項目	最終目標	成果	達成度
③-4 プロセス適用性・経済性評価	下記各スケールにおける メタネーション事業の適用性・経済性を評価 する。 ① 400 Nm ³ -CO ₂ /h ② 10,000 Nm ³ -CO ₂ /h ③ 60,000 Nm ³ -CO ₂ /h	400Nm³/hスケールの基本エンジニアリング を実施し、適用性の評価を実施。また、将来の 商用スケールでの経済性評価 を実施し、収益性の分析した。	△ (2021年6月達成見込み)
③-5 オーストラリアにおける商用スケール適用に係るPre-FS	オーストラリアでの 商用スケール60,000 Nm³-CO₂/hのPre-FS を実施する。	オーストラリア 研究機関CSIRO と共同で、電力網・ガスパイプライン網等々の情報を得て、 商用スケールのPre-FS を実施した。	△ (2021年6月達成見込み)

研究開発項目	最終目標	成果	達成度
④-1 CO ₂ 有効利用基礎技術 適用統合システムの検討	変動型再生電源と安定電源(IGCC)を 協調させる手法としての ポリジェネレーション システム をCO ₂ 排出量削減効果や技術課 題等について調査・検討を行い、 システムの 有効性を示す 。	再生利用ポリジェネレーションシステム化により、電 力と化学エネルギーのフレキシブルな造り分けが可能 (= 系統安定化に寄与)、またIGCCと再生余 剰電力でメタノールを製造貯蔵し、一次エネルギー 削減が可能 (= CO₂削減が可能)と結論づけ られた。	○
④-2 CO ₂ 有効利用統合システ ムの事業性検討	メタネーション、メタノール合成、ポリジェ ネレーションの事業性検討のため、 技術調 査・市場調査 を実施する。	各技術の動向調査、市場調査を実施し、調査内 容を 各個別技術開発へ情報提供 できた。	○

2.1 ①CO₂ 有効利用トータルシステムとしての総合評価

CCU 技術を適用したシステムやプロセスのトータルとしての総合評価を行うためには、CO₂の排出源ごとの特徴の調査や解析、CO₂の固定化や有効利用技術の開発動向の調査と課題整理、およびCO₂削減効果、再生可能エネルギーとの協調性など多角的に情報を収集・解析し、検証・評価する必要がある。本項目では、CO₂排出源ごとの排ガス量・性状の調査・解析、CO₂固定化・有効利用技術の開発動向の調査、CO₂有効利用技術の効果検証を行い、次々章の高濃度CO₂利用製造プロセスの検討・評価、いわゆるメタネーションプロセスの開発、事業性検討結果も踏まえ、CO₂有効利用技術に対する開発課題、実用化時の経済性、CO₂削減効果等を定量／定性的な指標としCO₂有効利用トータルシステムとしての総合評価を行った。

① -1 CO₂ 排出源ごとの排ガス量・性状の調査・解析

日本のCO₂排出量については国立環境研究所より分野別排出量の統計が毎年公開されている。ここでは、本データベースを元に日本のCO₂排出量について調査した。日本の総CO₂排出量は近年概ね12～13億トン/年程度であり、その分野別、工業事業別の排出量は図3.2.1-1、図3.2.1-2に示す通りエネルギー転換部門、いわゆる発電事業などから約4.8億トン、産業部門から約3.4億トン、および運輸部門から約2億トンが主たるCO₂排出源となっていることがわかる

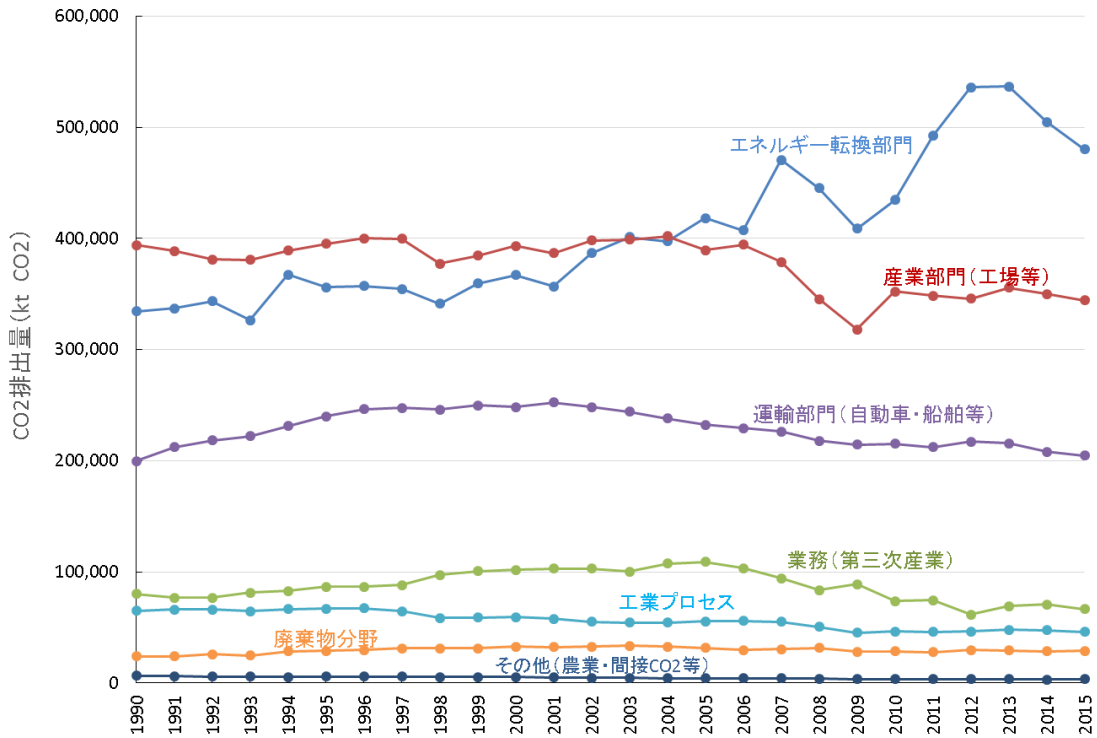


図 3.2.1-1 日本の分野別 CO₂ 排出量の推移

出典：国立環境研究所、“温室効果ガスインベントリオフィス-日本の温室効果ガス排出量”より引用して作成

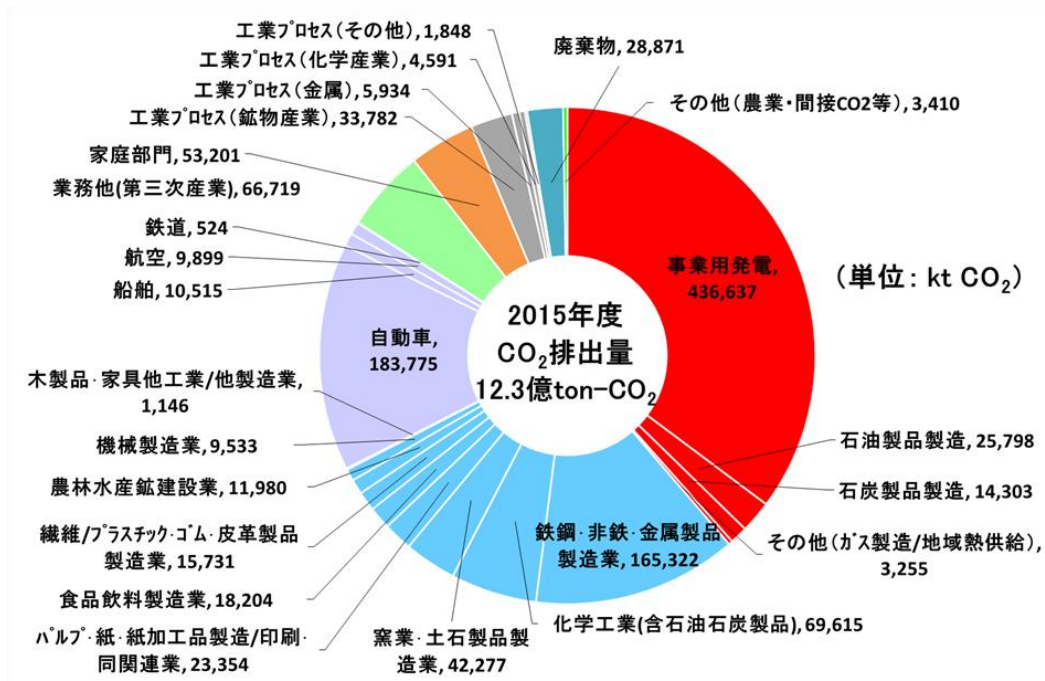


図 3.2.1-2 日本の CO₂ 排出量 (工業事業別)

出典：国立環境研究所、“温室効果ガスインベントリオフィス-日本の温室効果ガス排出量”より引用して作成

またエネルギー転換部門の代表例として、典型的な LNG (Liquefied Natural Gas) ガスタービンコンバインドサイクル発電 (GTCC : Gas Turbine Combined Cycle) と石炭火力発電での排ガス性状を調査した。産業部門として鉄鋼製造業、化学工業分野の排ガス性状も調査した。纏めたものを表 3.2.1-1 に示す。

CO2 源		CO2 濃度	CO2 排出機器	ガス温度 (°C)	排ガス成分
発電	石油火力	3~8%	ボイラ	40~65	CO2, NOx, SOx, O2, N2
	天然ガス火力	3~5%	ガスタービン	93~106 (排熱回収後)	CO2, NOx, SOx, CO, O2, N2
	石炭火力	10~15%	ボイラ	40~65	CO2, NOx, SOx, CO, O2, N2, Hg, As, Se
セメント製造	30%	予備焼成	150~350	CO2, H2O, N2, 炭化水素, 揮発分 (K2O, Na2O, S, Cl)	
	14~33wt%	High T Kiln (焼成)	150~350		
石油精製	8~10%	Process heaters	160~190	使用燃料に依存	
	3~5%	Utilities (steam, electricity)	160~190		
	10~20%	Fluid catalytic cracker (FCC) (regeneration of catalyst)	160~190	O2, CO2, H2O, N2, Ar, CO, NOx, SOx	
	30~45%, 98~100%	H2 purification	20~40 (PSA), 100~120 (化学吸着)	CO2, H2, CO, CH4	
鉄鋼業	20~27%	Blast furnace (high CO2 if BFG is burned)	100	H2, N2, CO, CO2, H2S	
	16~42%	Basic oxygen Furnace (high CO2 from burning BOF gas)	~100	H2, N2, CO, CO2, H2S	
石油化学工業	エチレン製造	7~12%	Steam cracking	160~215	H2O, CO, NOx, SOx, O2, N2, CO2
	酸化エチレン製造	~30%(空気酸化) 98~100%(酸素酸化)	Absorption unit to purify EO (lower end is air oxidation, higher end is oxygen oxidation)	16~32 (水吸着) 100~120 (化学吸着)	主に CO2, H2O, N2, (空気酸化) 微量CH4, C2H6, EO(酸化エチレン)
	アンモニア製造	98~100%	H2 purification	100~120 (化学吸着)	CO2, H2, O2, CH4
	水素製造	30~45%, 98~100% (15~20% in stream before purification)	H2 purification (lower end is PSA, higher end for CO2 specific separation)	20~40 (PSA), 100~120 (化学吸着)	CO2, H2, CO, CH4, 化学吸着後: ~100% CO2
	エタノール製造 (バイオマス)	98~99%	Fermentation	35	CO2, C2H5OH, CH3OH, H2S, CH3SCH3(ジメチルスルフィド), CH3CHO(アセトアルデヒド), CH3COOCH2CH3(酢酸エチル)

表 3.2.1-1 各種 CO₂ 排出源からの排出される排ガス特性

出典 : International Journal of Greenhouse Gas Control 63(2017)、総合資源エネルギー調査会 (2015 年 9 月 3 日)、日本鉄鋼連盟資料より作成

これら各種製造プロセスにおける排出 CO₂ の特性をよく抑えておくことが重要であり、これに適した CO₂ 分離回収技術を選出、適合させることが重要である。

① -2 CO₂ 固定化・有効利用技術の最新開発動向調査

有望な CO₂ 固定化有効利用技術について、最近の研究開発動向を調査した。最新の論文検索結果から、CCU 技術としてメタノール、蟻酸、一酸化炭素、メタン、精密化学が活発に議論されていることが明らかとなった。また、その他の報告書、研究会、HP 情報をもとに、最近の研究開発動向を整理した結果、市場規模、固定化可能量等を考慮すると現時点では炭酸塩固定とメタノール等の化学品が有望であると考えられる。特に、海外ではメタノール合成に関する検討が鉄鋼業を中心に活発に進んでおり、CO₂ 反応の平衡の制約による低反応率の克服、安価な水素の調達が可能になれば有望な技術と成り得る。

	LNG (メタン)	蟻酸	メタノール	DME	エチレン	FT合成 ガソリン、軽油等
化学式	CH ₄	HCOOH	CH ₃ OH	CH ₃ OCH ₃	C ₂ H ₄	C ₄ ~C ₁₀ C10~C20
ハンドリング (沸点)	常温で気体 -161.5°C	液体 100.75°C	液体 64.6°C	液体 -25°C	常温で気体 -104°C	液体 30~220°C 180~350°C
技術的実現可能性 (TRL)	実証レベル 本PJで検証中	ラボレベル (TRL:3~5)	実証レベル (TRL:6~7)	実証~商用レベル(推定)	ラボレベル (TRL:2)	ベンチレベル事例あり
現在の市場規模	3~4 兆m ³ (世界) 日本で 7,700万t (2011)	62万トン	7,700万t (2016) 1億トン(2020)	423万t(2015)* (* http://www.wenyc.com)	1.8億トン (2017)	800~1,000 B gallons
CO ₂ 利用による製造コスト	2,496~ 5,593€/t	1,524€/t (組成的には反応で水ができない)	1,317~ 2,312 €/t	不明 (メタノールから製造可能)	不明	不明
CO ₂ 削減ポテンシャル	2030年削減ポテンシャル 40~650 億m ³ /y *ICEF試算	>3億t/y? **GCCSI (100~300万tの試算もあり)	>3億t/y **GCCSI CO ₂ 固定ポテンシャル≒1億t/y(世界、化成品用途)	不明 (*中国で2020までに生産能力2000万トンまで増大計画)	2015市場規模1億7000万t相当では5.3億t	2030年削減ポテンシャル 燃料: 7 00 0 万 ~ 2 1 億トン *ICEF試算

図 3.2.1-3 最新開発動向調査

メタノール合成における課題についてまとめたものを表 3.2.1-2 に示す。メタノール合成は熱力学的平衡制約に支配される反応系であり、高圧で反応が行われる。そのため原料ガスの圧縮に必要な動力や未反応原料のリサイクルが必要であり、生成したメタノールは原理的に 50%の濃度であり、エネルギーを大量に消費する蒸留工程を必要とし、生成する水が反応の阻害、触媒の劣化を引き起こす原因となりえる。さらに、メタノール合成は大きな発熱反応であり、反応熱の除熱が必要であることが課題として挙げられる。これらの課題を解決する方法として、反応系外に水を引き抜くメンブリアクターの利用が考えられる。メタノール合成は平衡反応であるため、水を系外に除去することにより、メタノール生成側に反応が促進するとともに、リテンタート側のメタノール濃度が従来の触媒反応器と比較して高くなるために後段の蒸留工程の負荷が低減あるいは不要となると考えられ、プロセス全体の省エネルギー化につながると考えられる。メンブリアクターを用いたプロセスの概略図を図 3.2.1-4 に示す。

従来のCO ₂ 水素化メタノール合成法	解決策（検討課題）
<ul style="list-style-type: none"> CO₂の転化率が低い（熱力学的平衡制約） ⇒高圧反応（原料ガスの圧縮）、 原料リサイクル比大 	<ul style="list-style-type: none"> ①生成物の系内からの除去（メンブレンリアクター、水凝縮反応器など） ⇒平衡シフト効果によるCO₂転化率の向上、低圧反応（装置のコンパクト化・低コスト化が可能） ②高活性触媒の開発
<ul style="list-style-type: none"> 水の生成による反応阻害、触媒劣化 	<ul style="list-style-type: none"> 耐水性触媒の開発
<ul style="list-style-type: none"> 反応熱の除去（大きな発熱反応） CO₂原料ではCO原料の時の半分程度の発熱量 	<ul style="list-style-type: none"> 反応器形状の工夫（系内からの生成物の除去による徐熱など）
<ul style="list-style-type: none"> 生成物：水、メタノール、不純物の混合物 ⇒蒸留工程が必要 	<ul style="list-style-type: none"> 水とメタノールを分離可能な反応器など ⇒蒸留工程の省略・簡略化の可能性（省エネルギー化） 不純物（DME、ギ酸メチルなど）を許容する用途
<ul style="list-style-type: none"> 原料コストの低減（CO₂回収コスト、水素製造コスト） 	<ul style="list-style-type: none"> ①低コストCO₂回収技術との組み合わせ ②安価な副生水素の利用など

表 3.2.1-2 CO₂を原料としたメタノール合成の開発課題

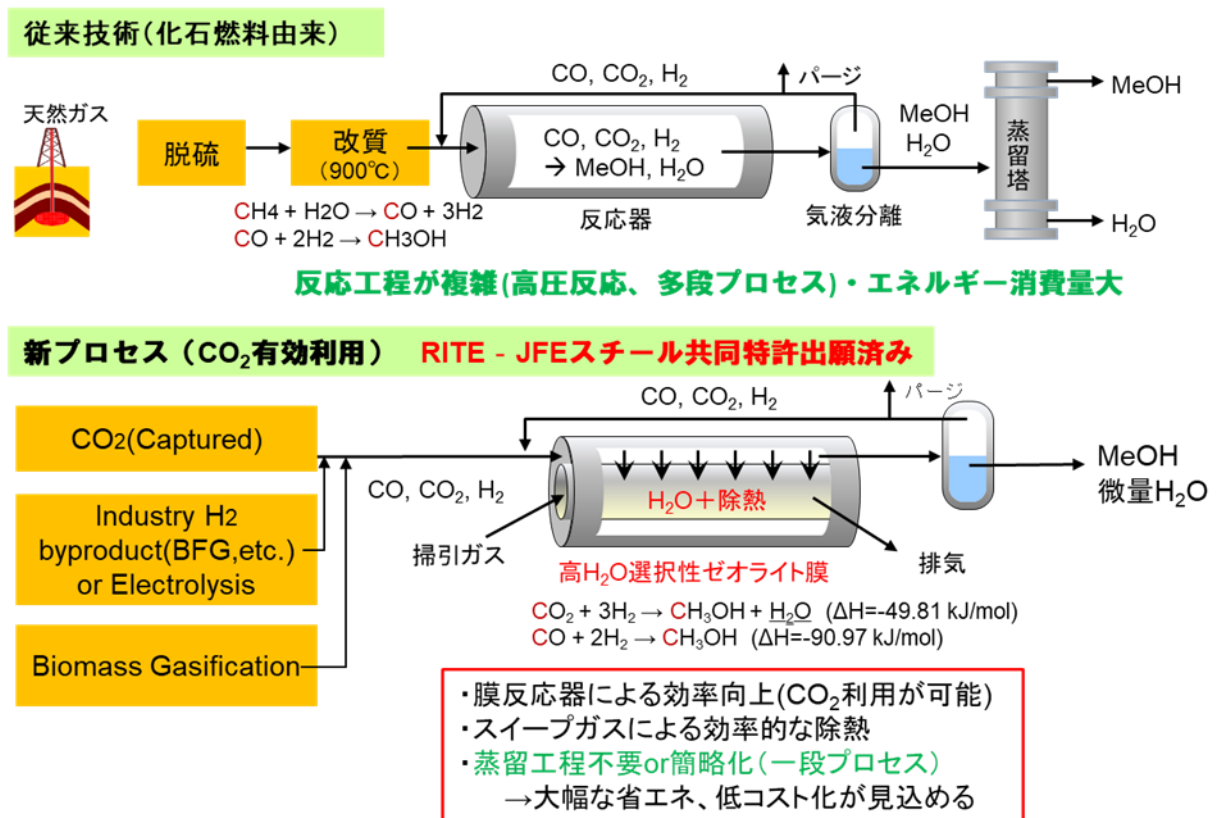


図 3.2.1-4 メンブリアクターを用いたメタノール合成プロセスの概念図

① -3 CO₂ 有効利用技術の効果検証

研究開発項目 2 の検討結果より、メタン合成以外の CO₂ 有効利用技術としてはメタノール合成が適していることが明らかとなった。メタノールは石油化学、化学工業において最も重要な出発原料の

ひとつであり、多種多様な化学製品と化学物質の製造に用いられることが主である。ここでは CO₂ を原料としてメタノール合成を行った場合の CO₂ 削減効果を試算した。2016 年のメタノールの世界需要は 7,700 万 t、そのうち化学品用途は 5,000 万 t 程度の需要（今後ますます増大）がある。5,000 万 t/year の需要のある化学品用途のメタノールを、CO₂ を原料として製造すると仮定した場合に必要な CO₂ 量は 7,300 万 t/year（CCU プラントへの原料 CO₂ 投入 = 1.46 t-CO₂/t-MeOH）であり、CCU プラントのメタノール合成における CO₂ 排出原単位は 0.226 t-CO₂/t-MeOH であるので、CO₂ 排出量は 1,130 万 t/year となる。一方で現行のメタノール合成プラントの CO₂ 排出原単位は 0.768 t-CO₂/t-MeOH であるので CO₂ 排出量は 3,840 万 t/year となる。その差分である 2,710 万 t/year がプロセス改善による CO₂ 削減効果となり、原料として必要な CO₂ 量（7,300 万 t/year）と合わせて 1 億 10 万 t/year の CO₂ 削減効果が見込まれ、大きな効果が見込まれる。

① -4 CO₂ 有効利用トータルシステムの総合評価

CO₂ 有効利用トータルシステムの総合評価の過程で、CO₂ 処理規模に応じて最適なメタネーションプロセスを評価検討するための追加調査を行う必要が出てきたため、断熱型、シェルアンドチューブ型、プレート型、それぞれのメタネーション反応器特性を定量比較し、CO₂ 有効利用技術に対する開発課題、実用化に向けた経済性を整理した。

また、2020 年度には、定量比較の結果を踏まえ、商用スケールにおける有望な反応器について、③-1 と共に 400 Nm³-CO₂/h（技術開発スケール）のプロセス設計を行い、触媒選定も含めた最適な反応プロセスの組み合わせを検討した。

開発項目②、③を踏まえてメタン、メタノールを CO₂ フリー化するカーボンリサイクルエネルギーシステムの CO₂ 削減効果を定量的に把握した。その可能性を見いだすことができたと共に、④による再生・火力発電の協調運用の優位性を見いだすことができた。

2.2 ②CO₂ 分離回収・有効利用システムの検討・評価

抽出した有望な CO₂ 固定化・有効利用技術に対して、適用可能な低コスト CO₂ 分離回収技術の検討を行い、これらの評価結果をもとに、火力発電所や石炭利用産業から排出される CO₂ の分離回収コストおよび回収エネルギーロス低減、最適化するプロセス、すなわち、CO₂ 排出源、CO₂ 回収技術、有効利用（変換）技術のベストマッチングとなる最適 CO₂ 変換技術のプロセスの概念設計を行った。

また、最適な CCU プロセスの概念設計に基づいて、実験的な評価を実施し、その有効性の検証も行う。さらには、これらの検討結果を通じて、今後確立すべき技術開発課題を抽出し、有望システムを実用化に結び付けるための研究開発計画を策定した

② -1 CCU に適用可能な分離回収技術に関する調査

液体吸収法、固体吸収・吸着法、膜分離法等、各種 CO₂ 分離回収技術の開発状況について、国内外の学術論文、特許、報告書等を検索し、現状の CO₂ 分離回収技術のこれまでの開発状況と回収する CO₂ の規模や純度、および分離回収に必要なエネルギー／コストの見通しについて精査を行った。特に貯留に供するための純度まで CO₂ を濃縮する場合と比較して CCU に適用した場合に省エネルギー化・低コスト化が見込まれる CO₂ の変換・有効利用技術について調査を行った。

調査結果から、原料ガス CO₂ 濃度と各種 CO₂ 分離プロセス効率（CCS 処理コストにて比較）の比較から、常圧ガスの場合には、原料ガス中 CO₂ 濃度が低い場合（石炭火力）には化学吸収法が有利であり、原料ガス CO₂ 濃度が高い場合（鉄鋼, oxycombustion）では吸着分離法が有利である。一方、原料ガス圧が高い場合には（IGCC）圧力差を駆動力とする膜分離法が有利である。また CO₂ 回収技術に求められる条件として、低コスト、低エネルギー（低 CO₂ 排出量）、系内に反応を邪魔する成分が入らないことが不可欠である。以上のことから IGCC 等の高压ガスからの回収には、高压で CO₂ を回収可能な膜分離法が有利であり、高压の CO₂ を用いた水素化反応（メタノール合成など）が有望である。また、常圧ガスからの CO₂ 回収の場合には、CO₂ 濃度が比較的高い高炉ガスからの PSA による回収、メタノール合成等への利用が有利である。また、炭酸塩や藻類としての利用の場合には CO₂ を回収せずそのまま直接利用することも可能である。また、これまでの検討結果より、CO₂ 排出源ごとの CO₂ 分離・回収、有効利用技術をまとめたものを図 3.2.2-1 に示す。



図 3.2.2-1 CO₂ 排出源ごとの CO₂ 分離・回収、有効利用技術のまとめ

② -2 最適 CCU プロセスの概念設計と試験による有効性検証

CO₂ 排出源のガス組成や後工程の変換プロセスを考慮した省エネルギー型の CO₂ の回収方法、さらに変換システムまでの全体最適化を考慮した CCU プロセスの検討を行った。

有望技術システムとして候補となるプロセスを抽出し、その概念設計を行い、これらの検討結果を通じて有望な技術を抽出し、シミュレーションによるプロセス性能予測と小型試験機による提案プロセスの有効性の確認し、必要に応じて提案プロセスに適用するための新規材料の開発等の要素技術開発を行った。

本研究では、CO₂ 回収工程には VPSA、膜分離、化学吸収を検討対象とすることとした。また、CO₂ 変換工程としては、通常の触媒反応器に加えメンブレンリアクターを候補とした。反応後の精製は連続蒸留塔で行うものとした。製鉄副生ガスを原料としたケースを対象としたスーパーストラクチャー（考慮する全ての構造を含むプロセス構造）を、図 3.2.2-2 に示す。

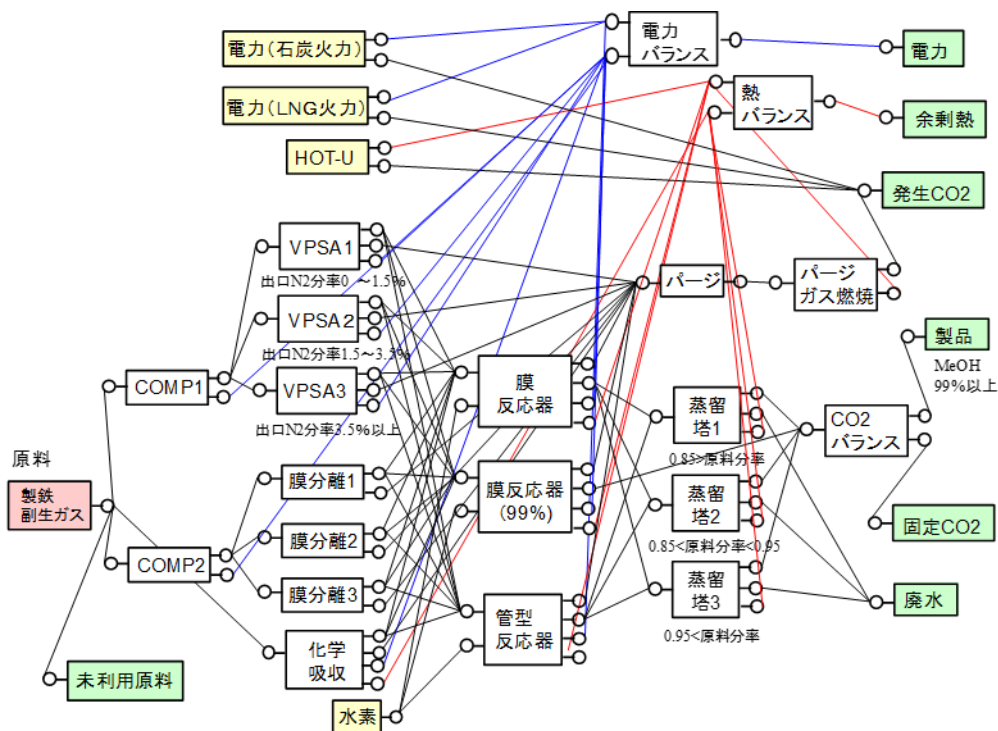


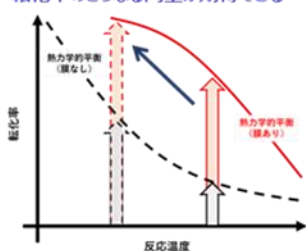
図 3.2.2-2 対象プロセスのスーパーストラクチャー

製鉄所副生ガス、メタノール合成のプロセスシミュレーションを実施し、最適プロセスを明らかにした。開発したメンブレンリアクターは試験では、従来の触媒充填層型の反応器と比較して約 3 倍の CO₂ 転化率が得られることを実証した。

② -3 プロセスの技術課題整理・開発計画の策定

開発したメンブレンリアクターの実用化に向けた開発としては、実環境下（あるいはそれを模擬した環境下）でのメンブレンリアクターとしての耐久性が必要不可欠な検討項目として挙げられる。さらに、メンブレンリアクターの実用化例はこれまでないため、熱供給などを考慮したリアクター構造を検討する必要がある。図 3.2.2-3 に開発計画を示す。

◆ 低温・高圧有利
⇒触媒の低温活性を向上させることで
転化率のさらなる向上が期待できる



<STEP 1>

- 分離膜の高性能化
反応条件下において高い透過分離性能
(特にH₂O/原料ガス)を發揮する分離膜の開発
- 膜の長尺・大面積化
実用的な膜反応器開発に向けた長尺・大面積化
- 触媒活性の低温化
膜反応器に適した触媒の開発

<STEP 2>

- 分離膜の耐久性
実環境（あるいはそれを模擬した環境）下
における膜の耐久性評価
- 膜反応器の最適操作条件
反応温度・圧力などをパラメータとして
最適操作条件を検討
- モジュール化検討
膜を複数本束ねた膜反応器の構造策定

<STEP 3>

- 膜反応器の耐久性
実環境（あるいはそれを模擬した環境）下
における膜の耐久性評価
- モジュール化
膜を複数本束ねた膜反応器の作製・性能

図 3.2.2-3 策定した開発計画

2.3 ③高濃度 CO₂ 利用品製造プロセスの検討・評価

本項目では、高濃度 CO₂ メタネーションプロセスの導入実現に向けた即効性、実装性を検討するため、硫黄化合物や VOC 等の触媒活性への影響などを検討した。また、INPEX が保有する南長岡ガス田の天然ガス生産設備（越路原プラント）において、将来のスケールアップを見据えた高濃度 CO₂ メタネーション試験装置の設計・製作及びその検証を実施し、CCU 技術としての、適用性、経済性及び事業性に関する検討、評価を行った。同時に、高濃度 CO₂ メタネーションプロセスの高効率化、長寿命化に必須である、高濃度 CO₂ メタネーション反応の反応熱シミュレーションによる回収熱エネルギーの評価や、高濃度 CO₂ に含まれる不純物による触媒被毒メカニズムの解析・寿命の評価を行った。

③ -1 反応熱エネルギーマネジメント技術

日立造船によって開発された高性能触媒を用いたメタネーション反応器内で想定される現象を予測可能な数値流体解析技術の開発（モデル化）に取り組んだ。これにより、メタネーション反応器内部のホットスポットの形成予測や反応器の熱マネジメント技術を確立することを目的とする。まず、数値流体解析に必要なメタネーション反応速度式の構築に向けた研究を実施した。加圧ガス流通式触媒固定床反応器を用いて、原料ガスである CO₂と水素が、メタンと水に完全に転換する過程で想定されるガス雰囲気下で、反応速度を網羅的に測定した。モデルでは実験で得られた 100 個程度の速度データを良好に再現でき、モデルで計算される反応速度との差が最小となるように速度パラメーターを決定することに成功した。数値計算は、単管式もしくは多管式シェルアンドチューブ型反応器を計算対象とした。その結果、単管式シェルアンドチューブ反応器内部の温度プロファイル、生成ガス濃度などを正確に再現できた。多管式シェルアンドチューブ型反応器の場合、内部温度プロファイル、流れ分布などを可視化でき、出口成分や総放熱量などは実験値と一致することも確認できた。さらに、日立造船が開発したプレート型反応器（メタン生成規模：8 Nm³/h）の形状情報に基づいて、計算メッシュを作成済みであり、シミュレーションの試行を完了した。

③ -2 触媒活性マネジメント技術

大きな発熱反応を伴うメタネーション反応において、高活性な日立造船製触媒を用いると特にリアクター入り口領域に局所的に超高温領域（ホットスポット）が発生し、触媒の熱的あるいはコンタミによる化学的劣化が生じる可能性がある。600℃におけるメタネーション試験を 500 時間行ったところ日立造船製触媒のメタン化活性は反応時間の経過に伴い低下した。600℃の水素気流に触媒を所定時間（0, 108, 252, 396, 540, 684 時間）曝露後メタネーション試験を実施した結果、曝露時間が長いほど反応開始直後のメタン生成量が低下した。触媒のメタン化活性が 600℃を越える温度になると顕著になることを明らかにした。

触媒への不純物による被毒の影響を明らかにするため、反応温度を変化させ硫化水素濃度の影響を検討した。硫化水素が存在しない場合、反応温度を 500℃まで上昇させても触媒の温度による失活は見られなかったが、反応温度を増加させると硫化水素による失活が更に加速した。

INPEX 長岡鉱場越路原プラントにおいて製品ガス精製の過程で回収された実 CO₂ ガスを用いたメタネーション反応を実施し、反応特性および触媒失活挙動を調査したところ、明らかな触媒の活性低下が認められた。触媒の構造変化及び活性の変化を調査したところ、Ni のシタリングが進行していることが分かった。失活要因物質の絞り込みを行った。

メタネーション反応器内のホットスポット形成回避のため、活性金属担持量が異なる触媒の傾斜配置の有効性検討を行い、反応器内に異なる活性の触媒を配置した際の温度上昇および CH₄ 収率への影響について、反応速度論、流体および伝熱解析を考慮した数値解析および実験両面からの評価を行った。シミュレーションによる系統的な検討の結果から、高活性触媒充填では不可避だった反応器でのホットスポットの形成が、触媒活性傾斜配置により抑制できるという結果が得られた。

③ -3 プロセス運転マネージメント技術

メタネーション試験装置の工事および、試験運転を開始した（図 3.2.3-1）。試験は運転圧力、運転温度ならびに、空塔速度を変動パラメーターとし、変動を含めて種々、実施した。試験装置は定格において、濃度 96%以上のメタンを、8 Nm³/h の製造速度で安定的に供給することに成功した。また、反応熱の回収効率向上ならびに、発熱反応による触媒層内のホットスポット領域および、内部温度の軽減を目的として導入したプレート型反応器を用いた結果、定格条件における触媒層内の最高温度が 550℃以下になることを示し、従 来の一般的構造による反応器よりも、100℃以上温度を降下させることが出来た。また、実験結果から、当該反応器を用いることにより、反応熱は 85%以上回収できることが示唆された。試験装置は短周期的な起動／停止操作の繰り返しに対し、主要プロセス機器の機械的な影響はなく、安定した高濃度メタンを製造することが示された。さらに 1 か月以上の 長時間運転においてもプロセスが安定して動作することを示され、装置のスケールアップへの知見を得ることが出来た。（図 3.2.3-2）

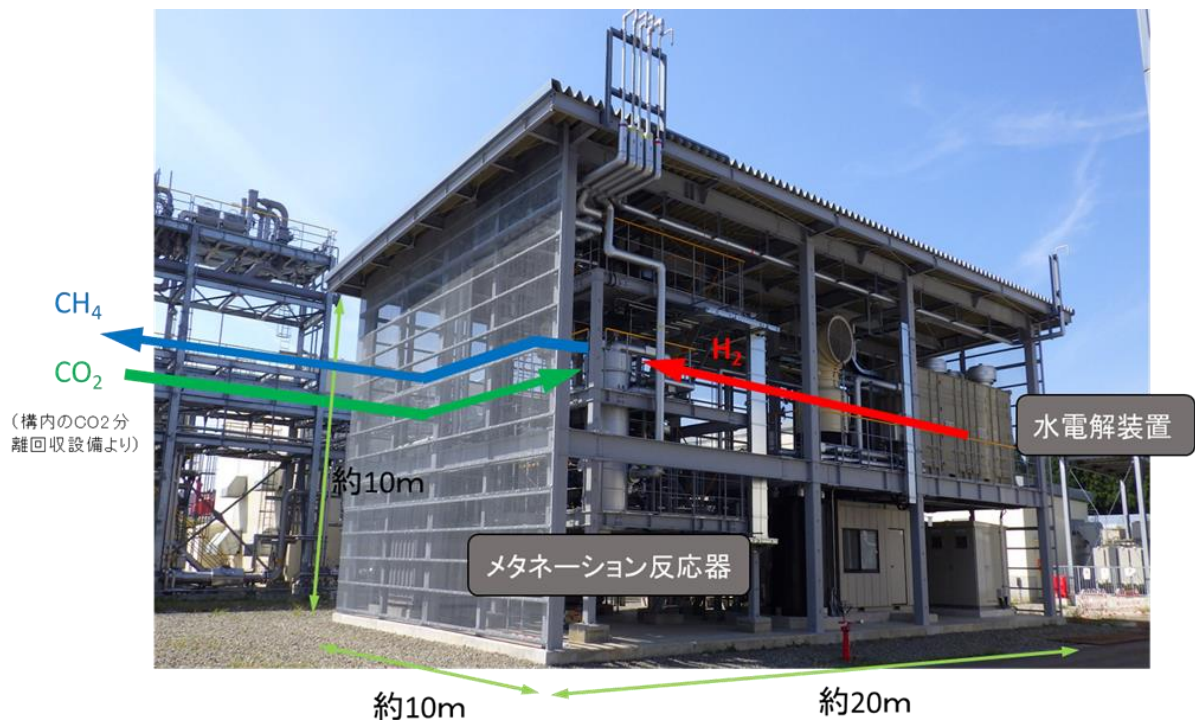


図 3.2.3-1 メタネーション試験設備

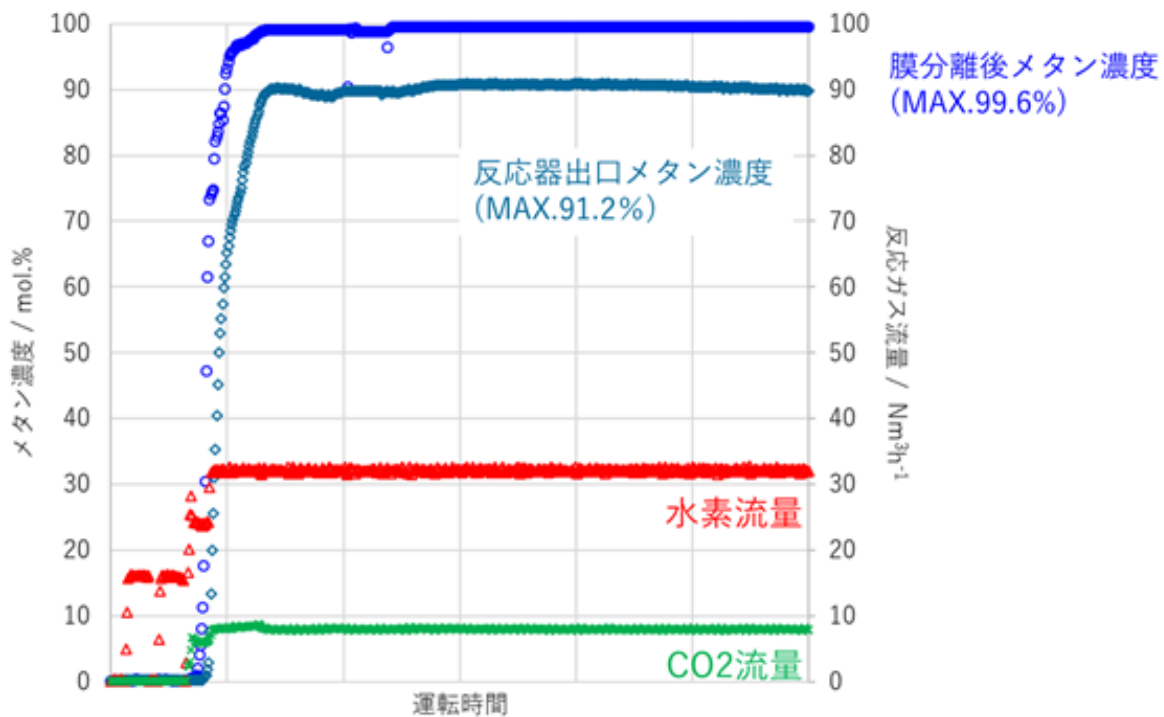


図 3.2.3-2 メタネーション試験 運転データ

③ -4 プロセス適用性・経済性評価

CO₂ 有効利用可能性調査事業における経済性評価の精度向上と共に、③-1～3 で得られた技術情報を基に、60,000 Nm³-CO₂/y (商用スケール、2019 年度) における適用性・経済性を評価した。経済性評価においては、IRR=9.5, 5.0%を満足させる事をクライテリアとした。メタネーションの主生産物であるメタン、副産物である排熱、電解槽による水素生産の副産物である酸素を外販する事により、商用スケールにおいても経済性が向上する事を明らかにした。尚、各生産物の価格は、実態等を勘案し、精査した。さらに、適用性・経済性評価の精度向上のため、最適メタネーションプロセスの評価検討に資する国内外の技術情報の収集と共に、400 Nm³-CO₂/h スケールの基本エンジニアリング (コンセプト選定) を実施した。

③ -5 オーストラリアにおける商用スケール適用に係る Pre-FS

60,000 Nm³-CO₂/h (商用スケール) の適用先の 1 つとして、オーストラリアのサンベルト地帯に位置する INPEX イクシス LNG プロジェクト (ダーウィン近郊) が挙げられる。そこで、Pre-FSとして、オーストラリア国内の既存エネルギーインフラ網 (電力網、ガス PL 網、LNG 出荷基地等)、各種再エネポテンシャル (Power to Gas 事業を含む等)、CO₂ 排出量 (濃度、発生量、CCS/CCU 事業を含む等) を調査すると共に、INPEX イクシス LNG プロジェクトにおける CO₂ ポテンシャル (発生量、組成、温度・圧力等)、イクシス設備との連系可能性等を調査する事で、CO₂-メタネーション技術の適用モデル案の構築、経済性試算等を実施した。

2.4 ④再生可能エネルギー併用 CO₂ 有効利用システムの検討

わが国のエネルギー供給安定の確保を考えれば、将来も引き続き、再生可能エネルギー、原子力、LNG 火力、石炭火力によるエネルギーミックスで対応せざるを得ないことは明らかである。

そこで、本章では、わが国の優れたこれまでの CCT などにも更なる産業競争力を賦与できる将来有望な CCU 技術の確立を目指し、将来大量に導入が予想される再生可能エネルギーと高効率な石炭火力発電技術である石炭ガス化複合発電（IGCC）との協調により両者の長短所を補完しあったポリジェネレーションシステム（熱・電力・燃料供給システム）を CCU 技術の一つとして、その運用性、環境性、経済性などの評価を行った。

④ -1 CO₂ 有効利用基礎技術適用統合システムの検討

今後、再生可能エネルギーによる発電電力量の増大を踏まえれば、変動し易く、また、余剰となってくる再生可能エネルギーを活用しながら、将来の重要なベースロード電源である石炭火力の一つの IGCC の CO₂ 排出量を低減させていくシステムが考案できれば、電源の安定性確保と CO₂ 削減を大きく前進させられることが期待される。その手法の一つとして、ポリジェネレーションシステムが考えられる。

ここでは IGCC と燃料用メタノール合成装置と水電解を組み合わせた全体システムがどのようなバランス関係になるか全体システムの検討を行った。今回検討ベースとしたポリジェネレーションの基本システム構成を図 3.2.4-1 に示す。

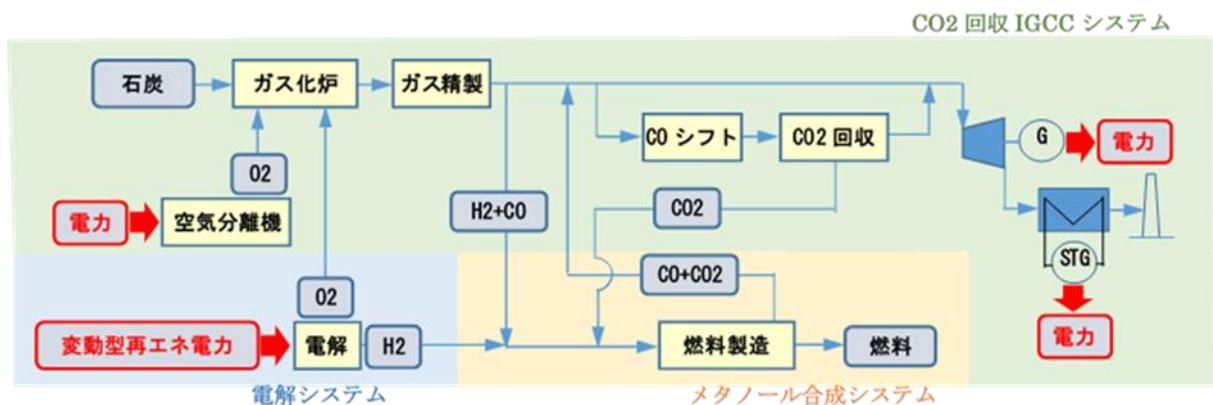


図 3.2.4-1 再生可能エネルギー利用 IGCC ポリジェネレーションシステム

図 3.2.4-2 は、水素投入量による送電端出力と製造メタノール熱量の合計量、およびメタノール製造時の IGCC からの CO₂ 排出量との関係を示したものである。水素投入、メタノール製造量の増大とともに、送電端出力が低下していくため、それに伴い、CO₂ 排出量が減少していくことがわかる。

このように、昼間の再生可能エネルギーと石炭ガス化ガスをうまく活用し、昼間の電力供給は再生可能エネルギーを主体とし、その余剰電力分などを石炭ガス化ガスを利用してエネルギー貯蔵する、

或いは、再生可能エネルギーの少なくなる夜間の電力は、IGCC による発電電力で賄うなど、わが国のエネルギー供給に対し、フレキシブルに対応可能なシステムの構築できる可能性がこのポリジェネレーションにはあると思われる

いずれにしても、再生可能エネルギーと石炭火力は、このように組み合わせることにより、再生可能エネルギーの変動抑制、余剰対策をしながら、その導入量増大を図ることが可能となり、また、石炭火力は基本的に CO₂ を再生可能エネルギーを用いて他燃料に転換を行い、一次燃料の輸入量の削減につながる。

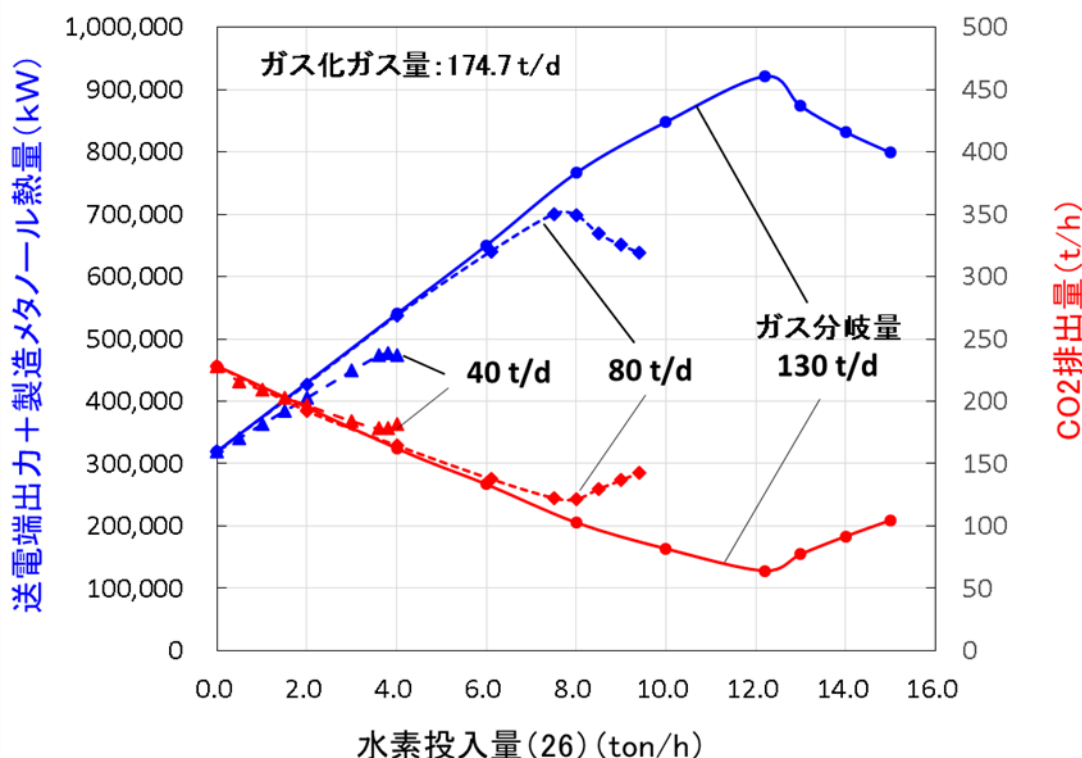


図 3.2.4-2 水素投入量と送電端出力 + 製造メタノール熱量と CO₂ 排出量の関係

④ -2 CO₂ 有効利用統合システムの事業性検討

ここでは、本プロジェクトの調査、研究開発主体となったメタネーション技術、メタノール製造技術、およびポリジェネレーションシステムの CO₂ 有効利用技術統合システムとしての市場導入イメージ、出口イメージ固め、その規模感を抑えるため技術調査、市場性調査を行った。

再生可能エネルギーと石炭ガス化複合発電（IGCC）との協調運転を考えたポリジェネレーションシステムを検討したが、このシステムでは、昼間、再生可能エネルギー由来の余剰電力を使って水を分解して水素を製造し、水素と IGCC ガス化ガスとにより、例えばメタノールを製造する。同時に、夜間には石炭等により IGCC 発電を主に運用させる。一方、IGCC の導入においては常に微粉炭火力発電方式との競合性が問われる。従って、ポリジェネレーションの実現に当たっても、微粉炭火力と

IGCC の比較論がまず必要と思われ、その結果として IGCC の優位性が論じられれば、それはポリジェネレーションシステムの実現を前進させる大きな要素になる。

IGCC 導入の対象として、今後とも石炭火力発電がその国の電力需要を一定量賄う国における IGCC の導入可能性を、CO₂ 排出量に焦点を絞り、検討した。

4. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて

(1) 実用化に向けた戦略

実用化に向け下記方針で取り組む。

【メタネーション】

策定した実用化に向けた技術ロードマップに基づき、本プロジェクトで得た知見・技術的課題を踏まえ、段階的な技術開発・実証を進める。

2021年度 カーボンリサイクル技術ロードマップの気体燃料分野の公募を実施予定。

(2) 実用化に向けた具体的取組

下記に示す開発ロードマップに従い段階的なスケールアップでの技術開発・実証を進める。

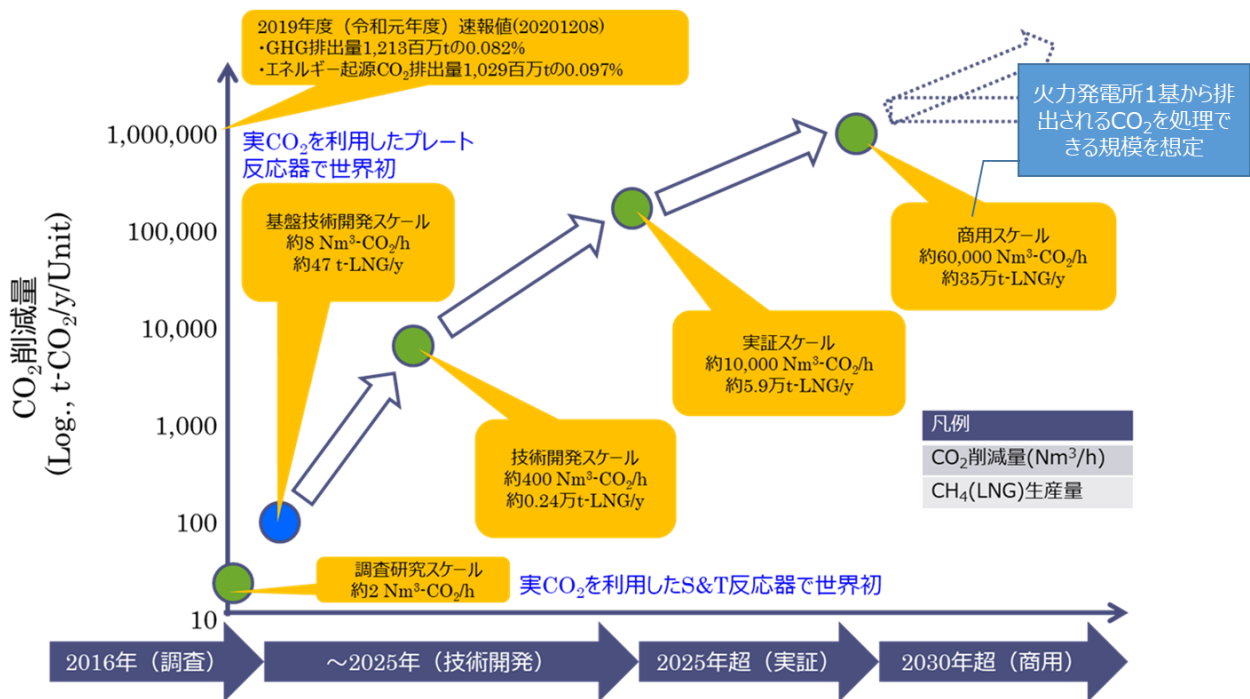


図 4.1 メタネーション技術開発ロードマップ

(3) 成果の実用化の見通し

市場ニーズ

- ・低炭素化・脱炭素化による温暖化対策のため、CO₂を回収して合成燃料等の有価物を製造し、社会に再循環させることにより、化石燃料起源のCO₂排出を抑制する技術として期待できる。
- ・変動する再エネ電力の余剰分を使った水電解水素を使ったメタネーションを行い、ガス導管注入を行うことで余剰電力の受け皿となりうると期待できる。

競合技術に対する優位性

・メタン合成技術の中では、基礎技術は既に確立されているという優位性があり、大型化研究開発の段階を経て実用化には近い。

技術確立の見通し

・段階的な大型化研究・実証を経ることで実用化のための技術確立は獲得できる。

(4) 波及効果

社会的効果

世界的に温暖化対策・CO₂ 排出削減が求められている中で、メタネーションは既存インフラ（都市ガスパイプライン）を使える利点があり、実用化されれば国内の CO₂ 排出量削減に大きな貢献ができる。また、海外で適用をすることで国際的な貢献にもなる。

国内科学技術の発展

本プロジェクトでは、一部の技術開発において、再委託による大学研究者からの支援・連携により開発を加速している。また、実用化には化学・プラント・ガス関連企業の連携のもとで進めていくこととなり、これら連携のより日本の技術・研究力向上に貢献できる。

資料

●特許論文等リスト

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外 国 PCT	出願日	状態	名 称	発明者
1	産業技術総合研究所	特願 2019-017829	国内	2019/2/4	出願	気相反応の触媒反応器および触媒反応方法	高坂文彦 山口十志明 倉本浩司 望月剛久 安藤祐司 高木英行 松岡浩一
2	地球環境産業技術研究機構	PCT/JP2020/19275	PCT	2020/4/22	出願	ゼオライト膜複合体およびその製造方法、並びに流体分離方法	流波 余語克則

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	発表年月
1	Zhang Wei、 Hiroshi Machida、 Hiroyuki Takano、 Koichi Izumiya、 Koyo Norinaga	名古屋大学、日立造船	Computational fluid dynamics for CO2 methanation in a shell and tube reactor with multi-region coupled heat transfer	Chemical Engineering Journal (Elsevier)	2020/1/16
2	Bo Liua、 Hidetoshi Kitaa,b、 Katsunori Yogo	地球環境産業技術研究機構	Preparation of Si-rich LTA zeolite membrane using organic template-free solution for methanol dehydration	Separation and Purification Technology、2020	2020/05/15
3	泉屋宏一 高野裕之 四宮博之 熊谷直和	日立造船株式会社	再生可能エネルギーによるCO2からのメタン製造技術	エネルギー・資源 通巻第244号(11月号)	2020/11/10

4	村田直宏 泉屋宏一 熊谷直和	日立造船株式会社	CO2 を利用した再生可能エネルギーの燃料化技術-炭素循環社会を目指して	日本マリンエンジニアリング学会誌 55 巻 6 号	2020/11
5	若山樹 赤塚紘己 稲井康文	国際石油開発帝石	再エネ由来水素を必要とする CO2-メタネーション技術 ～NEDO-CO2 有効利用技術開発事業を通じた INPEX の取組み～	太陽エネルギー・Vol, 4 6 , No.6 (通巻 No.260) 、26-30、 2020	2020/11/30

【外部発表】

(a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	中尾 真一	地球環境産業技術研究機構	無機膜研究センターの研究成果と今後の計画	未来を拓く無機膜環境・エネルギー技術シンポジウム	2018/11/6
2	倉本 浩司	産業技術総合研究所	低炭素社会実現のための新たなメタン転換プロセス研究	エネルギー技術シンポジウム	2018/12/4
3	熊谷 直和	日立造船ト	メタネーションによる CO2 循環利用を活かしたカーボンニュートラルへの実効的貢献	エネルギー技術シンポジウム	2018/12/4
4	則永 行庸	名古屋大学	反応器内流動・伝熱・反応数値解析、メタネーション反応試験、メタネーション素反応解析	化学工学会 84 年会	2019/3/13～15
5	倉本 浩司	産業技術総合研究所	産総研における低炭素社会実現のための CO2 およびメタン転換プロセス開発について	「材料中の水素機能解析技術第 190 委員会	2019/4/5
6	倉本 浩司	産業技術総合研究所	低炭素社会実現にむけた CO2 およびメタンの熱化学転換プロセス開発に関する取組み	公益社団法人RITE 無機膜研究センター産業化戦略協議会第 11 回セミナー	2019/4/25
7	高木 英行	産業技術総合研究所	「カーボンリサイクル関連技術についての産業技術総合研究所での取組」	日本学術振興会第 148 委員会「カーボンリサイクル関連技術についての産業技術総合研究所での取組」	2019/5/9
8	則永 行庸	名古屋大学	Multi-Region Coupled Heat Transfer in a Shell and Tube Reactor for an Exothermic Reaction with a Customized OpenFOAM	OpenFOAM Workshop 2019	2019/6/23～26

9	則永行庸ほか 4名	名古屋大学、日立造船	触媒固定床反応器による実験に基づくCO2メタン化反応速度モデルの構築	第28回日本エネルギー学会大会 主催：日本エネルギー学会	2019/8/7~8
10	李惠蓮	地球環境産業技術研究機構	CO2を有効利用したメタノール合成に関する技術開発	RITE 主催 温暖化対策技術シンポ in 関西	2019/9/26
11	高坂 文彦 倉本 浩司 山口 十志明	産業技術総合研究所	CO2メタン化プロセスの高効率化を目指して	テクノブリッジフェア 2019 つくば	2019/10/24~25
12	oZhang Wei 溝口 莉彩 町田 洋 則永 行庸	名古屋大学	CO2メタネーション反応器における伝熱と流動に関する数値解析	第56回石炭科学会議	2019/10/29~30
13	則永 行庸	名古屋大学	メタネーションの技術開発とCO2分離回収との統合	未来を拓く無機膜環境・エネルギー技術シンポジウム	2019/11/7
14	高坂 文彦	産総研創エネルギー研究部門	Thermal Management of CO2 Methanation Process Based on Experimental and Numerical Approach Using Ni-YSZ Tubular Catalysts	AIC h E annual Meeting 2019	2019/11/10~15
15	李惠蓮	地球環境産業技術研究機構	膜反応器を適用したメタノール合成のシミュレーションによる解析	日本膜学会主催 膜シンポジウム2019	2019/11/12~13
16	則永 行庸	名古屋大学	単管シェルアンドチューブ型メタネーション反応器の熱流体シミュレーション	第25回流動化・粒子プロセスシンポジウム	2019/11/28~29
17	若山 樹	国際石油開発帝石	CO2有効利用技術開発	The 8th NextPV International Workshop (東大先端研&CNRS シンポ for NEXT PV)	2019/11/19
18	茂木 康弘	JFE スチール	製鉄所から排出されるCO2の有効利用技術開発	日本鉄鋼協会会報 ふうらむ	2019/12
19	若山 樹	国際石油開発帝石	CO2有効利用技術開発	気候変動・災害対策 Biz	2019/12/6
20	中尾 真一	地球環境産業技術研究機構	無機膜の実用化開発と脱炭素社会に向けた取り組み	革新的環境技術シンポジウム 2019	2019/12/18

21	若山 樹	国際石油 開発帝石	NEDO CO2 メタネーション事業に ついて	長岡バイオエコノミー・ シンポジウム	2020/1/17
22	若山 樹	国際石油 開発帝石	NEDO CO2 メタネーション事業に ついて	水素エネルギー利活用 促進セミナー	2020/1/22
23	若山 樹	国際石油 開発帝石	CCU 技術の現状と課題～ NEDO-CO2 有効利用技術開 発事業を通して～	公益財団法人石油学 会・新エネルギー部会 講演会	2020/1/24
24	杉田 啓介	地球環境 産業技術 研究機構	CCU 技術の現状と課題～ NEDO-CO2 有効利用技術開 発事業を通して～	公益財団法人石油学 会・新エネルギー部会 講演会	2021/1/24
25	泉屋 宏一	日立造船	CO2 を利用した再生可能エネル ギーの燃料化技術	(株)技術情報センターセ ミナ「CO2 有効利用 技術と事業動向・展 望」	2020/2/14
26	若山 樹	国際石油 開発帝石	「NEDO CO2 メタネーション事業 について	コンビナート機能融合 研究会	2020/2/18
27	吉田	日立造船	日立造船の環境への取り組みノ エネルギー・カーボンサイクル	第 6 回カーボンサイク ルイノベーション研究会	2020/2/18
28	高木 英行	産業技術 総合研究 所	水素エネルギーに関する産総研で の取組	大阪科学技術センター 地球環境技術推進懇 談会 2019 年度第 3 回講演会	2020/2/19
29	中村	日立造船	NEDO CO2 メタネーション事業に ついて	水素・燃料電池展 FCEXPO 2020	2020/2/26～28
30	瀬下、李	地球環境 産業技術 研究機構	CO2 を有効利用したメタノール合 成に関する技術開発	水素・燃料電池展 FCEXPO 2020	2020/2/26～28
31	石井 義郎	国際石油 開発帝石	NEDO CO2 メタネーション事業に ついて	秋田県地下資源開発 促進協議会講演会	2020/3/9
32	若山 樹	国際石油 開発帝石	NEDO CO2 メタネーション事業に ついて	新潟県天然ガス協会 総会	2020/5/20
33	若山 樹	国際石油 開発帝石	NEDO CO2 メタネーション事業に ついて	石油学会第 69 回研 究発表会	2020/5/26
34	若山 樹 赤塚 紘己 稲井 康文	国際石油 開発帝石	Introduction of Nagaoka CCU Project for effective recycling of CO2 to produce methane	Asia Clean Energy Forum 2020	2020/6/19
35	若山 樹	国際石油 開発帝石	NEDO CO2 メタネーション事業に ついて」	日本ガス協会「 Gas Innova ～新たな事 業領域の『探索』とガス	2020/6/30

				事業の『進化／深化』』	
36	則永 行庸、張煒、チェ チョルヨン、柳瀬 慶一、チャンクウィン、町田 洋	名古屋大学	メタネーションおよび CO2 分離回収との統合プロセスに関する研究開発	Adsorption News 7月号 特集号「二酸化炭素・有効利用・貯留技術開発（CCUS）技術の最前線」	2020/7
37	則永行庸	名古屋大学	メタネーション研究開発と CO2 分離回収と利用の統合化に向けた取り組み	一般社団法人 日本ガス協会	2020/8
38	則永行庸	名古屋大学	メタネーションおよび CO2 分離回収との統合	地球環境技術推進懇談会（2020 年度第一回）	2020/9
39	安田 将也 ChoiCheolyong Zhang Wei 高野 裕之 泉屋 宏一 町田 洋 則永 行庸	名古屋大学 日立造船	CO2 メタネーションの総括反応速度モデルの構築と触媒有効係数に関する検討	第 51 回化学工学会 秋季大会	2020/9/24~26
40	溝口莉彩 ZhangWei ChoiCheolyong 町田 洋 則永 行庸	名古屋大学	反応・伝熱・流動を考慮した新規メタネーション反応装置解析ソルバーの開発	第 51 回化学工学会 秋季大会	2020/9/24~26
41	若山樹 赤塚紘己 稲井康文	国際石油開発帝石	CCU 技術の現状と課題～NEDO-CO2 有効利用技術開発事業を通して～	RITE-産業化戦略協議会	2020/9/28
42	若山樹 赤塚紘己 稲井康文	国際石油開発帝石	CCU 技術の現状と課題～NEDO-CO2 有効利用技術開発事業を通して～	技術情報センター	2020/9/28
43	高木英行	産業技術総合研究所	Research and development of CO2 Utilization technology in AIST	RD20（クリーンエネルギー技術に関するG20各国の国立研究所等のリーダーによる国際会議）	2019/10/2
44	熊谷直和	日立造船	CO2 + 再生水素でメタンを合成する	日本化学会 秋季事業 第 10 回 CSJ 化学フェスタ 2020	2020/10/21

45	李	地球環境 産業技術 研究機構	CO2 を有効利用したメタノール合成に関する技術開発	第1回 地球環境のための炭素の究極利用技術に関するシンポジウム)	2020/10/27~30
46	山口 祐一郎	地球環境 産業技術 研究機構	NEDO 事業紹介	燃料電池開発情報センター機関誌 秋号	2020/10
47	泉屋宏一	日立造船	二酸化炭素有効利用のためのメタネーション技術の開発	第5回 西部支部エネルギー技術講演会	2020/10/30
48	Toshiki Tsuboi, Shoya Yasuda, Hiroshi Machida, Koyo Norinaga, Tomoyuki Yajima, Yoshiaki Kawajiri	名古屋大 学	Modeling and estimating kinetic parameters for CO2 methanation in a fixed bed reactor (固定床反応器における CO2 メタン化の動態パラメータのモデリングと推定)	国際学会 第9回 PSE Asia 「プロセスシステム工学におけるアジアシンポジウム」	2020/11/4~6
49	高木英行	産業技術 総合研究 所	水素エネルギーに関する動向と産業技術総合研究所での取り組み	かがわエネルギー産業フォーラム勉強会	2020/11/25
50	山口 祐一郎	地球環境 産業技術 研究機構	NEDO 事業紹介	RITE30 執念記念誌	2020/11