

「二酸化炭素回収技術実用化研究事業（二酸化炭素
分離膜モジュール実用化研究開発事業）」
研究開発プロジェクト

評価用資料

平成 29 年 10 月 4 日

産業技術環境局環境政策課

地球環境連携室

研究開発実施機関名

次世代型膜モジュール技術研究組合

プロジェクト名	二酸化炭素回収技術実用化研究事業 (二酸化炭素分離膜モジュール実用化研究開発事業)
行政事業レビューとの関係	平成 26 年行政レビューシート 事業番号 新 27-0054 (研究開発事業に係る技術評価書 (事前評価)、 平成 27 年度行政事業レビューシート 事業番号 新 27-0040、 平成 28 年度 行政事業レビューシート 事業番号 0454
上位施策名	攻めの地球温暖化外交戦略 (平成 25 年 11 月)、エネルギー基本計画 (平成 26 年 4 月)、科学技術イノベーション総合戦略 2015 (平成 27 年 6 月 19 日)
担当課室	産業技術環境局 環境政策課 地球環境連携室

プロジェクトの目的・概要

二酸化炭素回収・貯留 (CCS: Carbon dioxide Capture and Storage) は、温室効果ガスの大気中への排出量削減効果が大いこと等から、地球温暖化対策の重要な選択肢の一つと期待されており、既に諸外国では、多くの実証試験に加え、商業規模での二酸化炭素回収・貯留も見られるようになっている。我が国では、平成 12 年度から国内において二酸化炭素 (CO₂) の地中帯水層への貯留に係る実証試験やモニタリング等が実施されている。また、平成 26 年 4 月に閣議決定された「エネルギー基本計画」においては、2020 年頃の CCS 技術の実用化を目指した研究開発や、CCS の商用化の目処等も考慮しつつできるだけ早期の CCS Ready 導入に向けた検討を行うとしている。以上のように、我が国においては、地球温暖化対策として CCS 技術の実用化に向けた対応を速やかに進めることが求められており、コストの大部分を占める分離・回収分野の技術開発の加速が必要とされているところである。

CO₂分離・回収技術の中で、膜分離法は、圧力差によって CO₂を透過・分離するため、特に圧力を有するガス源からの CO₂分離において、他の分離法に比べ低コストでの分離が可能となる。圧力を有する CO₂排出源を持つ火力発電としては、IGCC (石炭ガス化複合発電) が挙げられ、本膜分離法は主に IGCC への適用が期待される。IGCC では低品位炭の使用により発電のコストダウンがはかれるので、今後の新設火力発電所に採用される可能性が高く、これに CCS をつけることで、より環境にやさしく効率の良い発電所を実現できる。「二酸化炭素分離膜モジュール実用化研究開発事業」では、実用化に向けて、従来技術の約 3 分の 1 以下の 1,500 円/t-CO₂以下で、圧力を有するガス源である IGCC から CO₂を分離・回収する技術の実用化研究を行う。

予算額等 (委託)

(単位: 百万円)

開始年度	終了年度	中間評価時期	終了時評価時期	事業実施主体
平成 27 年度	平成 31 年度	平成 29 年度	平成 32 年度	次世代型膜モジュール技術研究組合
H27FY 執行額	H28FY 執行額	H29FY 執行額	総執行額	総予算額
240	209	(予算額) 169.7	618.7	1351.7

※総予算額は平成 27 年度及び平成 28 年執行額と平成 29 年度から平成 31 年度予算額の合計

I. 研究開発課題（プロジェクト）概要

1. 事業アウトカム

事業アウトカム指標		
①平成 31 年度までに石炭ガス化複合発電等で発生する比較的高い圧力を有するガスからの CO₂分離・回収コストについて、実用化段階（数百万 t-CO₂/年規模を想定）で回収エネルギー0.5GJ/t-CO₂以下を達成する分離膜技術を開発する。 ②平成 31 年度までに CO₂分離・回収コストについて、1,500 円/t-CO₂以下を達成する分離膜技術を開発する。		
指標目標値		
事業開始時（平成 27 年度）	計画： ・1,500 円/t-CO ₂ 膜システムを実現する単膜を開発する。	実績：目標達成度 100% CO ₂ 分離・回収コスト 1,500 円/t-CO ₂ 以下を達成するために設定した分離性能をラボレベルで実現した。
中間評価時（平成 29 年度）	計画： ①CO ₂ 分離・回収エネルギー： 0.9GJ/t-CO ₂ ②CO ₂ 分離・回収コスト： 2,100 円/t-CO ₂	実績：目標達成度 100% ①連続製膜レシピにより作製した単膜を用いて、CO ₂ 分離・回収エネルギー目標を達成した（0.53GJ/t-CO ₂ ）。 ②連続製膜レシピにより作製した単膜を用いて、CO ₂ 分離・回収コスト目標を達成した（1,790 円/t-CO ₂ ）。
終了時評価時（平成 32 年度）	計画： ①CO ₂ 分離・回収エネルギー： 0.5GJ/t-CO ₂ ②CO ₂ 分離・回収コスト： 1,500 円/t-CO ₂	実績：－
目標最終年度（2030 年度予定）	計画：CO ₂ 分離・回収コスト 1,500 円/t-CO ₂ 以下を達成	

※単膜： ラボスケールの平膜（膜面積：1.2～58cm²程度）

2. 研究開発内容及び事業アウトプット

(1) 研究開発内容

本事業「二酸化炭素分離膜モジュール実用化研究事業」では、「二酸化炭素分離膜モジュール研究開発事業」で開発した膜素材や実機型モジュール、膜分離システムを基礎として、実用化のために実ガス試験を実施し、膜モジュール性能、耐久性等に関する技術課題の抽出と解決を行う。併せて、プロセス適合性の付与についても検討を進め、分離・回収コスト 1,500 円/t-CO₂以下を実現する分離膜技術、実機膜モジュール、膜システムの技術確立を行う。

(2) 事業アウトプット事業アウトプット指標

分離・回収コスト 1,500 円/t-CO₂以下を実現する分離膜、実機膜モジュール、膜システムの技術確立するには、以下の 3 項目を検討する必要がある。

- (1) 実機膜モジュールの実用化研究： 実用化を想定した連続製膜、膜エレメント化技術を確立し、IGCC プロセス適用条件でのプロセス適合性を付与する。
- (2) 実ガス試験による実用化研究： IGCC プロセス用実ガス試験装置を製作・手配し、実ガス試験により膜モジュールの性能を評価し、技術課題を抽出し、解決する。
- (3) 経済性評価・取りまとめ： 模擬ガス、実ガス試験結果を用いた実機膜モジュールシステムを検討し、経済性評価を行う。

指標目標値（計画及び実績）

事業開始時（平成 27 年度）	計画： 模擬ガスを用いて、プロセス適合性を確認（単膜ベース）	実績：目標達成度 100% 模擬ガスを用いてプロセス適合性を確認した。
中間評価時（平成 29 年度）	計画： ①-1. 連続製膜とエレメント化技術の課題抽出と解決 ①-2. 実用化条件で製造した膜と膜モジュールを IGCC プロセス適用条件での耐圧性、耐久性等のプロセス適合性を確認 ①-3. 模擬ガス試験において、分離性能低下が 2 年間で 25% 以内である膜モジュールの開発を行う ②IGCC プロセスによる実ガス試験装置の製作、手配	実績：目標達成度 100%（全項目において、H28 年度末まで：計画通り、H29 年度末：達成見込み） ①-1. 量産化を念頭において、実用化を想定した連続製膜、膜エレメント化技術の開発を進め、連続製膜の目処をつけた。 ①-2. 単膜の耐圧性、耐久性等のプロセス適合性について確認した。 ①-3. 連続製膜の単膜で分離性能低下が 2 年間で 25%以内が期待できるデータを取得した。 ②種々の前処理設備を有する米国 NCCC における実ガス試験装置を使用するよう調整した。

	③模擬ガス試験結果に基づく経済性評価を行う	③経済性評価を行い、事業アウトカムの目標値を達成することを確認した。
終了時評価時(平成 32 年度)	計画： ・実ガス試験結果に基づき、プロセス適合性に関する要因を把握し、その課題について解決する。 ・実ガス試験において、分離性能低下が 2 年間で 25%以内である膜モジュールの開発を行う。 ・実ガス試験結果に基づく経済性評価を行う。	実績：－

※膜モジュール：大面積膜の構造体(膜エレメント)とそれを収納する容器(ハウジング)を組み合わせたもので、膜エレメントの製造技術の確立が鍵。

<共通指標実績>

論文数	論文の被引用度数	特許等件数 (出願を含む)	特許権の実施件数	ライセンス 供与数	国際標準への寄与	プロトタイプ の作成
1	－	12	0	0	0	0

3. 当省(国)が実施することの必要性

①科学技術的価値の観点から見た卓越性、先導性

我が国は石炭火力発電の効率において、世界トップの実力を有しており、さらに低品位炭の利用が可能な IGCC 用の高圧 CO₂の膜分離技術においても膜性能で世界トップの技術を開発してきている。今後も石炭をエネルギー源として活用していく観点でも CO₂回収技術の開発は重要である。このため、我が国が強みをもつ CO₂分離回収技術のコストをさらに低減し、我が国の高効率の石炭火力発電と組み合わせて海外に展開する際にも世界トップのポジションを維持し、国際競争力を保持しうるであろう。逆に、地球環境問題への対応が叫ばれる中、他国による CO₂回収技術開発の先行を許せば、これまで有してきた我が国の本分野における優位性が失墜する可能性が極めて高い。

②CO₂分離回収技術に対する国の関与の必要性

CCS は、生産性向上、省エネルギーなどに寄与せず、利益の向上に資さない地球温暖化対策に特化した技術である。地球温暖化自体はいわゆる外部不経済（ある経済主体の行動が、その費用の支払いや補償を行うことなく、他の経済主体に対して不利益や損失を及ぼすこと。例えば、公害。）であり、地球温暖化のための対策に特化した技術である CCS は、市場原理だけでは、その導入を図ることは不可能である。

CCS の導入を図るためには、財政支援、税制優遇、規制など、導入を促進するための制度的仕組みが必要である。しかしながら、CCS のコストが高い現状では、財政支援、税制優遇を実施した場合には、多額の政策的経費が必要となり、規制を実施した場合には、電力、鉄鋼、セメント業界等の民間企業に過度の負担を強いることになり、我が国産業競争力の低下、産業の海外移転による産業の空洞化などを惹起する恐れがある。

このため、CCS の導入を図るためには、まずは CCS のコストを低減することが不可欠であるが、制度的仕組みがなく CCS 導入のインセンティブがない中で、民間企業に、コスト低減のための研究開発の実施を期待することは不可能である。したがって、外部不経済である地球温暖化への対策に特化した CCS のコスト低減のための技術開発は、民間のみで行うことは期待できないことから、国が主導してこれらの技術開発を実施し、コスト低減の見通しを示すことが必要である。

また、制度的仕組みの導入によってある程度市場が想定できるようになったとしても、新規技術の実用化においては、各要素技術に対する信頼性、諸所の基礎的なエンジニアリングデータの確保が必要である。そのためには実ガスを用いた実用化試験データの取得が不可欠であり、このようなデータなしに企業が新技術を導入するか否かの判断をするにはリスクを伴うため、良い技術であっても採用されない可能性がある。したがって国が主導して実ガス試験レベルまでの技術開発を行う必要がある。

4. 事業アウトカム達成に至るまでのロードマップ

①アウトカムに至るまでの戦略

(a) アウトカムに至るまでのスケジュール



IGCC の本格的な稼働は既存の石炭火力発電所のリプレースの時期に行われると考えられている。したがって、本事業終了後には、設置面積が少なく、メンテナンスが容易という特徴を活かし、プラント実装にむけて発電所において補助事業による実機スケールでの実証試験が行われ、2020 年代

には環境規制や固定価格買取制度（FIT: Feed in Tariff）のような制度的な仕組みの導入により、本格的に CCS が進むことが期待される。

また、次世代火力発電の早期実現に向けた評議会（第 1 回：平成 27 年 6 月 16 日～第 6 回：平成 28 年 5 月 30 日）において策定された技術ロードマップで、「2030 年度に向けて火力発電の高効率化技術（石炭火力発電では IGCC）の実用化を促進していくことが重要」と示された。これを受けて、平成 27 年度からの 5 年間の計画で進めている二酸化炭素分離膜モジュール実用化研究事業の後、実証フェーズにおいて、膜モジュールシステムとしての検証試験を行い、CO₂分離膜モジュールシステムを組み込んだ IGCC プロセスとして完成させて、事業アウトカムを達成したい。

(b) 知財管理の取扱い

- ・特許権等の帰属特許法を踏まえ、原則として発明者（研究者）主義としつつ、発明者の所属企業・機関の「職務発明規定」に準拠して機関帰属とする。※
- ・共同発明に係る権利持分比率を決める場合は、原則として、発明に対する貢献度（寄与率）で特定するものとする。※
- ・シナジー効果を確保する観点から、当該プロジェクトにおいて発生した知財については、原則としてプロジェクト内は非独占実施とする。※

※ただし、製品化、実用化に向けて(a)特許の一括管理（共有化）、(b)クロスライセンス、(c)独占の実施等による方が有効と考えられる場合等、慎重に検討を行ったうえで、決定、採用するものとする。

(c) 実証や国際標準化

実証に関しては、本事業終了後補助事業により石炭火力発電所における大規模実証を経て、制度的仕組みの導入により、本格導入が進むものと想定される。

国際標準化に関しては、ISO/TC265 において、CCS に関する標準化が進められている。特に、回収に関する WG については、我が国が、WG コンビーナ（主査）と事務局を務めており、回収技術の国際標準を主導している。本事業を実施することにより得られたデータや記録等の成果については、技術パッケージ及びマニュアルとして整理する。それらをもとに、当該技術のプラクティスマニュアル化を図り、国際標準化の際には ISO/TC265 国際規格のシード文書としての活用や、これらを活かした国際規格の積極的な提案が図れるようにするとともに、日本の企業の産業競争力強化に資するよう努める。

(d) 性能や安全基準の策定

本事業を実施することにより得られたデータや操業記録等をもとに、技術の性能指標や操業における安全基準を抽出・整理する。これにより、関連業界における安全性基準の策定が進むことを見込んでいる。さらに、これらを国際規格にも反映するよう努める。

(e) 規制緩和等を含む実用化に向けた取組

本事業終了後、国の制度的仕組みの導入等により実用化が進むものと想定される。

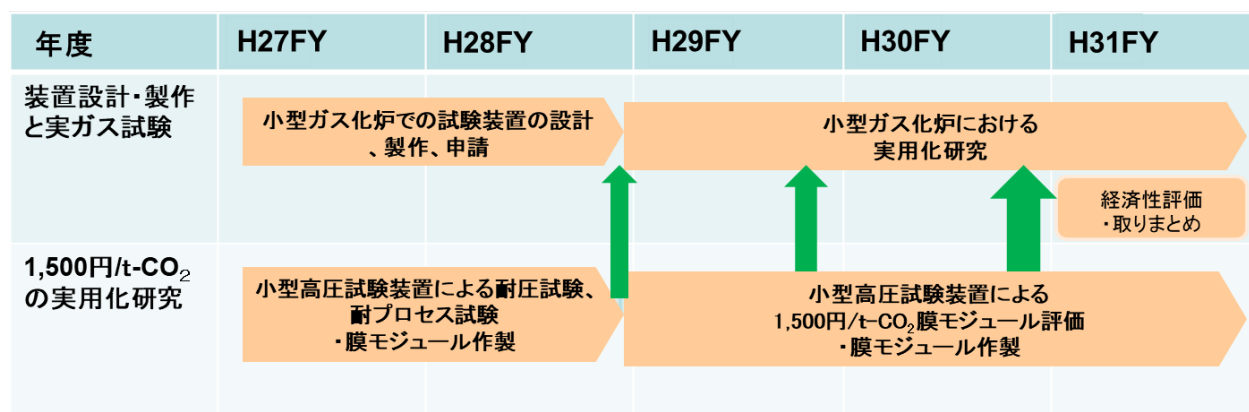
②成果とユーザーの段階的イメージ・仮説

実用化研究終了後の主な導入先はIGCC発電所であり、IGFC（石炭ガス化燃料電池複合発電）等の新規技術の開発にも利用できる。したがって、ユーザーとしては、電力事業者、設備製作に関してエンジニアリングメーカー等があげられる。

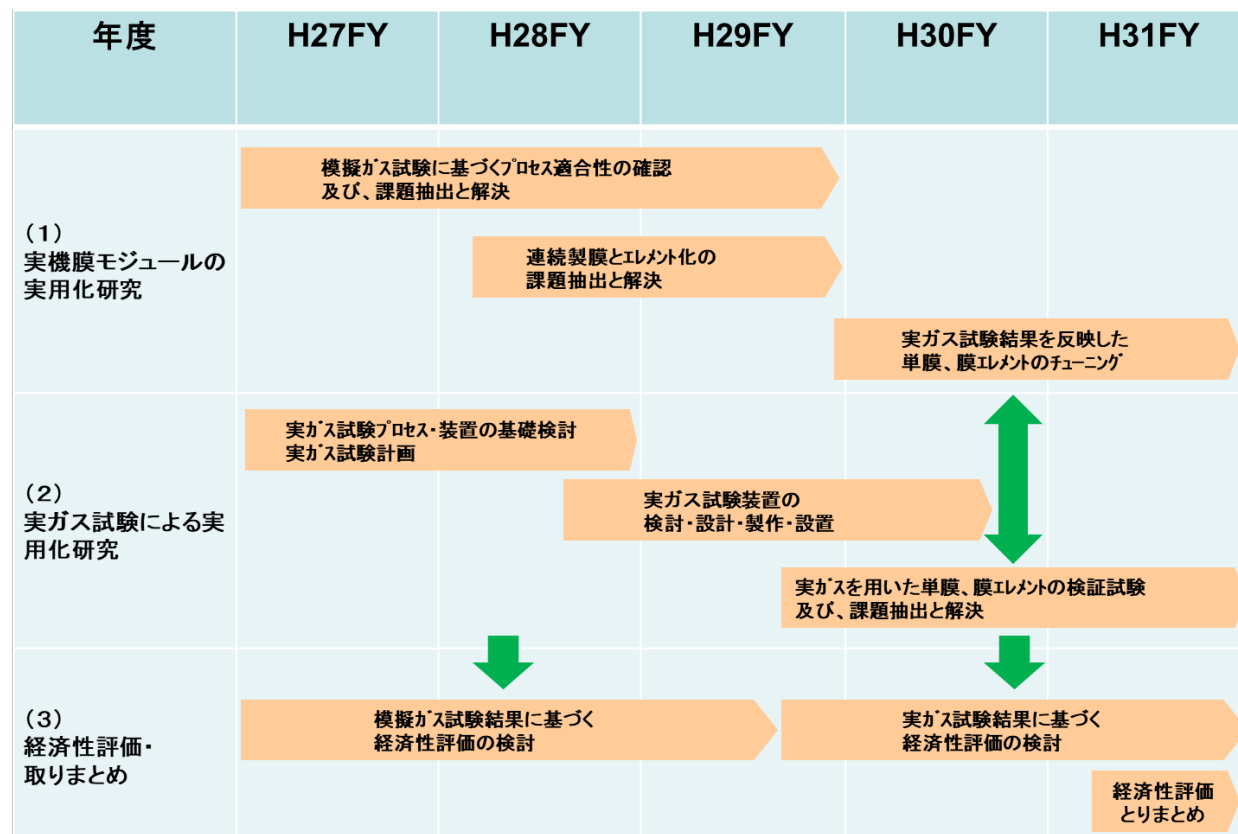
5. 研究開発の実施・マネジメント体制等

5-1 研究開発計画

本事業は、公募による選定審査手続きを経て、次世代型膜モジュール技術研究組合が経済産業省からの委託契約を基に実施している。



事前評価時点でのスケジュール（上図）において、装置設計・製作と実ガス試験では、既存の実ガス試験サイトで行うこと、1,500円/t-CO₂の実用化研究では、実用化を想定した連続製膜と膜エレメント化技術開発を先行して行う研究開発スケジュールへ変更した（下図）。



5-2 研究開発の実施体制・運営

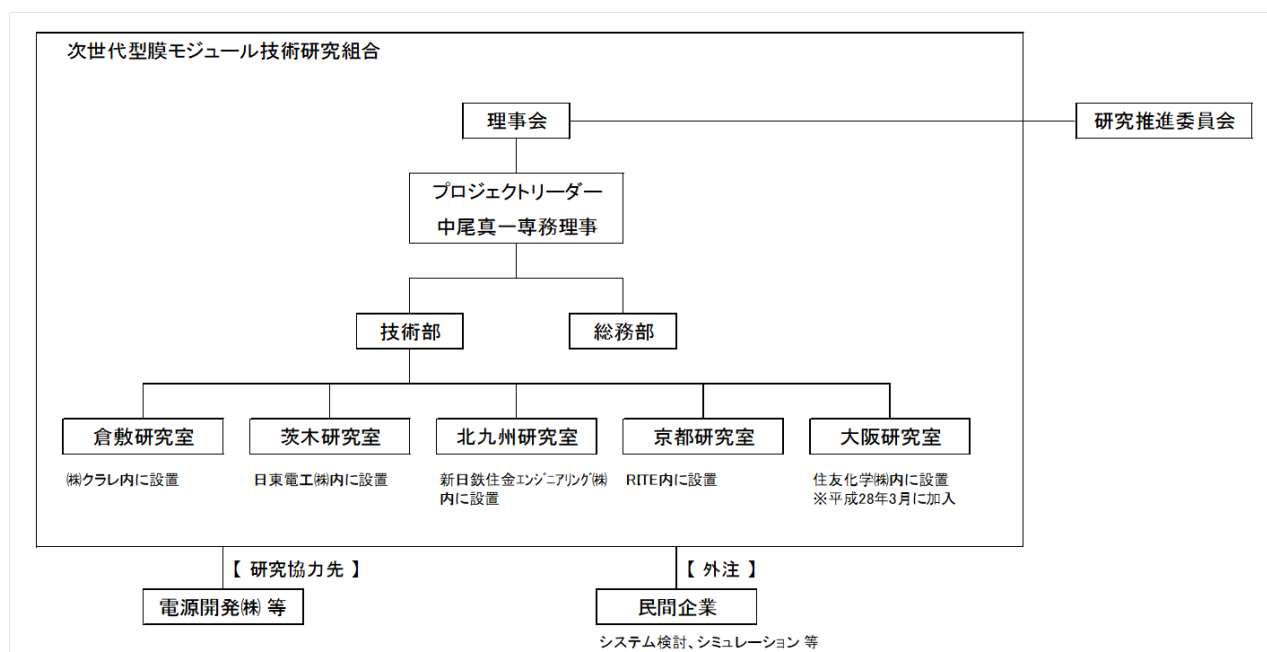
プロジェクトリーダーの指示に基づき、技術部が主催する定例技術会議にて、各研究室の進捗を管理するとともに、その成果を融合して、更なる開発を進めて行く上で、関係者が情報共有し、一体となって研究遂行する。なお、IGCC とのプロセス接合に関しては、電源開発(株)の協力を得た。

更に、2 回程度、外部の有識者の参加する研究推進委員会を開催することにより、研究開発の進捗、成果について、客観的な意見提言、必要な指導、支援を受けることで、プロジェクト進捗を管理してきた。

平成 23 年 2 月に、CO₂回収型石炭ガス化複合発電（IGCC-CCS）で用いる二酸化炭素分離膜モジュールの実用化を推進する目的で、分子ゲート機能 CO₂分離膜の基盤技術を有し、膜素材を担当する（公財）地球環境産業技術研究機構と(株)クラレ、分離膜モジュールを担当する日東電工(株)、エンジニアリングを担当する新日鉄住金エンジニアリング(株)からなる次世代型膜モジュール技術研究組合を設立し、素材から膜モジュール、システムまでの一貫した研究体制を構築した。平成 23 年度より平成 26 年度までの 4 年の期間、経済産業省から受託した「二酸化炭素分離膜モジュール研究開発事業」を実施した。

1) 平成 27 年度

平成 27 年度の実施体制図は以下の通りである。



（公財）地球環境産業技術研究機構（RITE）〔京都研究室〕、(株)クラレ〔倉敷研究室〕、日東電工(株)〔茨木研究室〕、新日鉄住金エンジニアリング(株)〔北九州研究室〕の 4 社で構成する「次世代型膜モジュール技術研究組合」にて実施した。

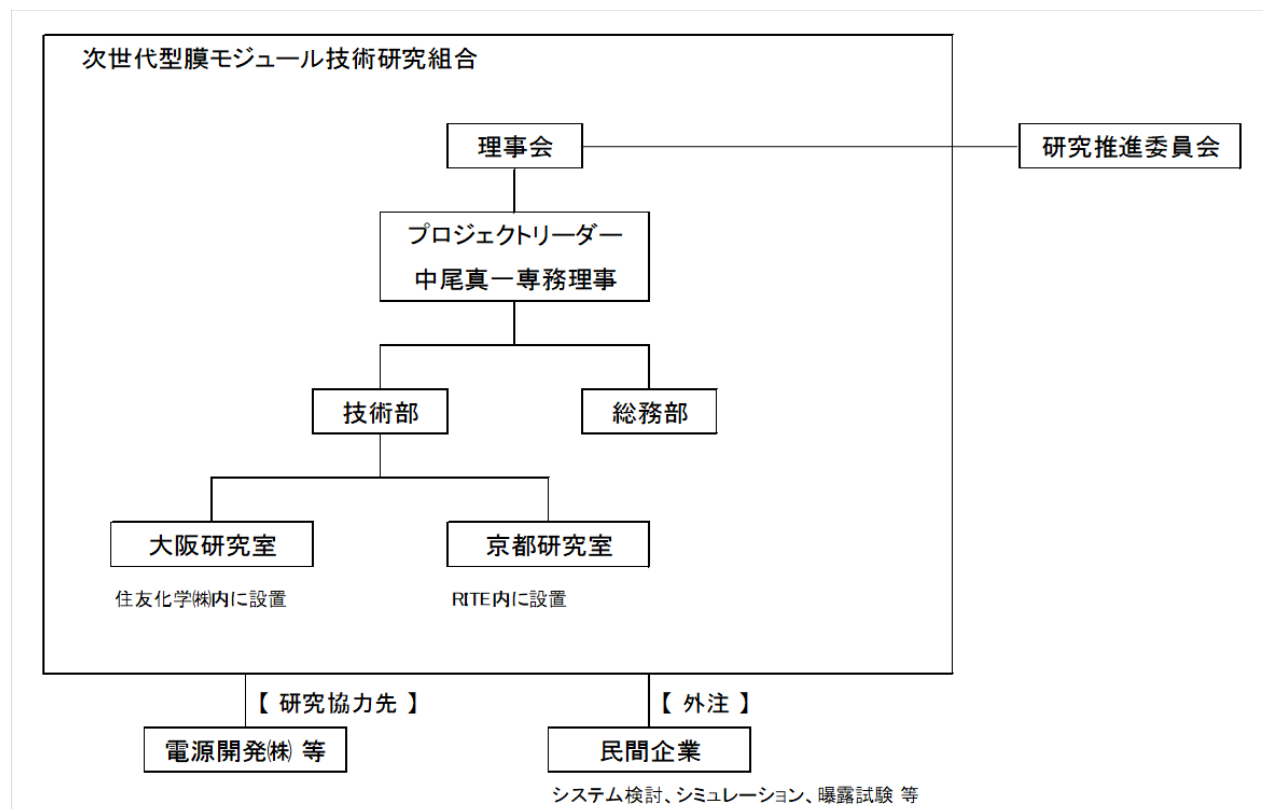
また、研究推進委員会を 2 回実施し、研究推進委員の先生に、第 1 回は計画の妥当性、第 2 回は研究開発の成果について確認していただき、今後の計画等につき指導を受けた。

平成 28 年 3 月には、CO₂分離膜モジュールの基盤技術を有する住友化学(株)が次世代型膜モジ

ジュール技術研究組合に参加し、実ガス試験に向けたモジュール開発を加速する体制を整え、より実ガス試験の実施に向けた体制へと変革させている。同年 3 月末には、(株)クラレ、日東電工(株)、新日鉄住金エンジニアリング(株)は、基礎開発段階の当初の役割を果たし、その成果を次世代型膜モジュール技術研究組合へ技術移転した上で、同技術研究組合を脱退した。

2) 平成 28 年度

平成 28 年度の実施体制図は以下の通りである。



RITE〔京都研究室〕、住友化学（株）〔大阪研究室〕の 2 社で構成する「次世代型膜モジュール技術研究組合」にて実施した。次世代型膜モジュール技術研究組合において、膜モジュールの量産化検討が重要な課題であるが、住友化学(株)は膜エレメント製作技術を保有しており、次世代型膜モジュール技術研究組合で開発してきた膜のエレメント化を担当することにより、開発を加速する役割を担っている。

また、研究推進委員会を、平成 27 年度と同様に年 2 回実施した。

5-3 「国民との科学・技術対話」の推進

CO₂分離膜技術の最近の研究開発動向や海外での開発状況全般について報告し、CO₂分離回収に関心を持つ方々に最新の情報を広く伝えることで、官民挙げた CO₂削減に関する研究開発活動の理解を得ることを目的として、「国民との科学・技術対話」に積極的に取り組み、「革新的 CO₂膜分離技術シンポジウム」を平成 27 年度と平成 28 年度に各 1 回行った。（本事業期間中、毎年 1 回実施予定）

【平成 27 年度】

1. 第 5 回革新的 CO₂膜分離技術シンポジウム

副題：温暖化防止に貢献する膜分離技術の最新動向

2. 開催内容

日 時：平成 27 年 10 月 2 日（金）13 時～17 時

会 場：東京大学伊藤謝恩ホール

参加人数：242 名

【平成 28 年度】

1. 第 6 回革新的 CO₂膜分離技術シンポジウム

副題：温暖化防止に貢献する膜分離技術の最新動向

2. 開催内容

日 時：平成 29 年 1 月 23 日（月）13 時～17 時

会 場：東京大学伊藤謝恩ホール

参加人数：201 名

5-4 資金配分

実機膜モジュールの実用化研究に軸足を置いて、膜本来の耐久性を模擬ガス試験により確認し、合わせて、大量生産を目指した連続製膜と膜エレメント化技術の開発を進めた。一方、実ガス試験による実用化研究では、試験装置の設計・製作から予算に見合った既存の実ガス試験サイトで実施する方向に転換し、コストミニマム化を図った。

単位：百万円

	H27FY	H28FY	合計
(1)実機膜モジュールの実用化研究	192	182	374
(2)実ガス試験による実用化研究	10	11	21
(3)経済性評価・取りまとめ	38	16	54
合計	240	209	449

5-5 社会経済情勢等周囲の状況変化への柔軟な対応

本事業計画当初と比較して、経済環境の変化や我が国のエネルギー構造の変化が考えられるが、今後とも、化石燃料消費による CO₂の排出は予想されるため、化石燃料の安定的な使用のためには CCS の早期実用化が不可欠である。

これに対応して、二酸化炭素分離膜モジュールの早期実用化を見据え、民間会社と（公財）地球環境産業技術研究機構が参加する次世代型膜モジュール技術研究組合、及び研究協力先として電力会社、米国 National Carbon Capture Center (NCCC)からなる研究開発体制を構築している。

CCS に係る技術開発は世界中で行われているが、分離・回収コスト削減は共通の課題となっており、この分野に膜分離技術を適用する研究は加速されてきている。

このため、国内外の技術動向を注視しており、国内外における学協会情報収集等を積極的に行っている。また、同時に、本事業で取り組んでいる革新的 CO₂ 膜分離技術シンポジウムでは、海外招聘者より二酸化炭素分離膜技術の研究動向や海外での開発状況について最新状況を紹介していただき、常に競合技術との比較を行い、競合技術に勝てる二酸化炭素分離膜モジュールの実用化研究を推進している。

6. 費用対効果

本事業は、二酸化炭素回収・貯留（CCS）の実用化を目的とし、そのために総コストの 6 割以上を占める分離・回収コストを低減する技術を開発するものである。本事業の二酸化炭素回収技術を実用化し、発電所等の大規模発生源からの CO₂ 分離に本技術を実用化することで、CO₂ の分離に要するコストを従来の約 3 分の 1 の 1,500 円/t-CO₂ に削減する。温暖化対策としての CO₂ 貯留は、それ単独では経済的価値を産み出しにくい技術であるが、これらの事業成果により、CO₂ 貯留の経済的障害を緩和することができるようになり、CO₂ 貯留の実用化に向けて着実に前進することができるものとする。

また、本事業のアウトカムにより、分離回収コストが現状よりも 2,500 円/t-CO₂ 低減出来る場合を仮定すると（現状で約 4,200 円/t-CO₂ の分離・回収技術が 1,000 円台/t-CO₂ になれば）、たとえば、50 万 kW の IGCC から回収の場合（CO₂ を年間 260 万 t 回収と想定）、IGCC 1 基当たり 64 億円/年のコスト削減となる。

本事業の効果により CO₂ 貯留の実現性が増すばかりでなく、CO₂ 処理費用を低減する効果は莫大なものであり、本事業は研究開発費を大きく上回る十分な費用対効果を有するものと判断される。

【参考資料】

<事業成果（詳細版）>

※次ページより

【参考資料】

<事業成果（詳細版）>

1. 事業目的

CO₂分離・回収技術の中で、膜分離法は、圧力差によってCO₂を透過・分離するため、特に圧力を有するガス源からのCO₂分離において、他の分離法に比べ省エネルギー、低コストでの分離が可能となる。圧力を有するCO₂排出源を持つ火力発電としては、石炭ガス化複合発電(IGCC: Integrated coal Gasification Combined Cycle)が挙げられ、本膜分離法の適用が期待される(図1)。IGCCは石炭をガス化して、ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせたコンバインドサイクル発電を行う技術であり、次世代火力発電技術として、石炭火力発電技術の中でも高い効率化が図れる。また、IGCCでは低品位炭の使用により発電のコストダウンがはかれるので、今後の新設火力発電技術として期待されており、これにCO₂回収装置を導入することにより、より環境にやさしく効率の良い発電所を実現できる。

本研究開発では、圧力を有するガス源であるIGCCからのCO₂分離・回収において、CO₂分離・回収コストを大幅に低減しうる革新的な技術として、H₂に対してCO₂を選択的に透過させる機能を発現する分子ゲート膜モジュールについて、実ガス試験による実用化研究開発を行おうとするものである。

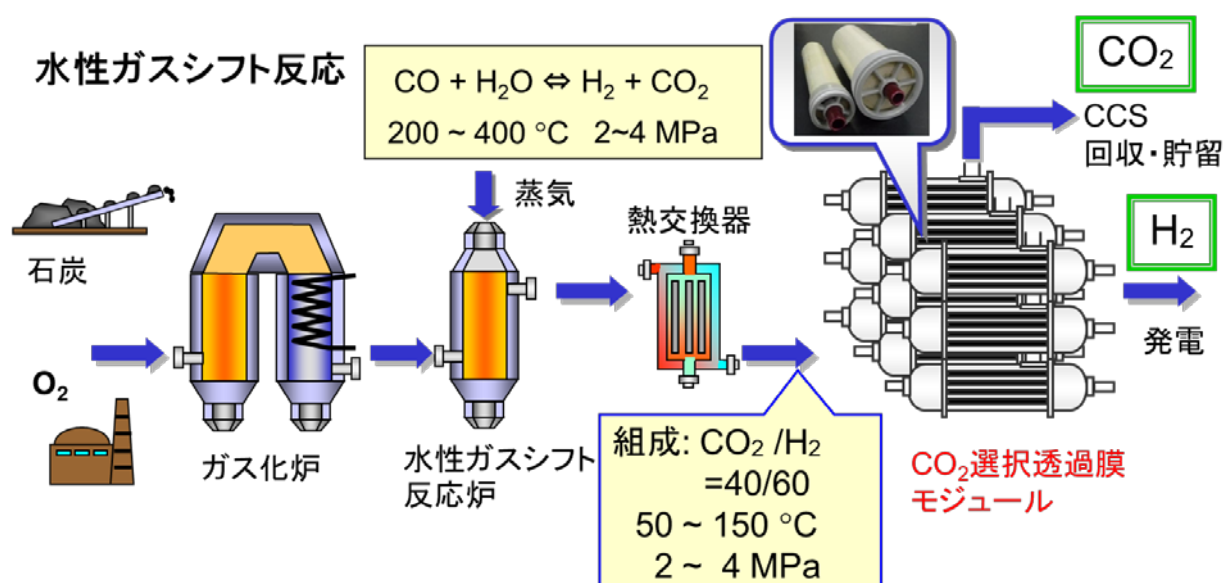


図1 CO₂回収型IGCCの概念図

2. 研究開発の内容

IGCC プロセスからのCO₂分離・回収を膜分離法で実施することを目的に、以下の3方針を軸として、膜分離法の実用化研究を進めた。

- (1) 実機膜モジュールの実用化研究
- (2) 実ガス試験による実用化研究

(3) 経済性評価・取りまとめ

- ※ (1) → 事前評価資料 「項目 (2) 1,500 円/ t- CO_2 の実用化研究」に対応
(2)、(3) → 事前評価資料 「項目 (1) 装置設計・製作と実ガス試験」に対応

(1) 「実機膜モジュールの実用化研究」では、実用化を想定した連続製膜、膜エレメント化技術確立すると共に、模擬ガスを用いたプロセス適合性付与に関する試験を行い、耐圧性、耐乾燥性、耐久性、耐不純物性等のプロセス適合性の付与について検討を進め、実機膜モジュールの実用化のための研究開発を行う。

(2) 「実ガス試験による実用化研究」では、これまでに開発した膜素材や実機膜モジュール、膜分離システムの実用化のために、実ガス試験により実用化研究を行い、膜モジュール性能、耐久性等に関する技術課題の抽出と解決を行う。

(3) 「経済性評価・取りまとめ」では、模擬ガス、実ガス試験結果を用いた実機操作条件ベースでの膜モジュールシミュレーション等により、膜モジュール及びその周辺技術（不純物の前処理、排気処理、水蒸気導入方法等）からなる実機膜モジュールシステムの検討を行う。また、これらの経済性評価を行う。

3. 成果

二酸化炭素分離膜モジュール実用化研究開発事業（平成 27-28 年度）の成果概要を以下に記す。

3-1 全体成果

(1) 実機膜モジュールの実用化研究、(2) 実ガス試験による実用化研究、(3) 経済性評価・取りまとめについて検討を行い、以下の成果を得た。

(1) 実機膜モジュールの実用化研究

平成 27 年度は、模擬ガスを用いたプロセス適合性付与に関する試験を行い、プロセス適合性の付与について検討を進めるなど、実機膜モジュールの実用化のための研究開発を実施した。耐圧性、耐久性向上のための膜材料の改良を行い、改良膜組成を決定した。

平成 28 年度は、スケールアップ検討を進めるために、連続製膜により作製した膜を用いて 2 インチサイズの膜エレメントを製作した。これまでは枚葉（シート状）のフィルム上にバッチ方式で製膜していたが、フィルム上へ連続的に製膜する製造工程を新たに取り入れた。それに伴い、連続製膜に適した製膜溶液の物性の制御、製膜手順等のチューニング等を行った。その結果に基づき、連続製膜により膜を作製し、これを用いて膜エレメントの製作を行った。作製した膜を用いて、2.4MPa における分離性能の操作条件依存性データを取得し、膜の分離特性を確認するとともに、膜の耐圧性、耐久性、耐乾燥性（湿度の許容範囲の把握）について検討した。

また、膜の硫化水素曝露試験を行い、硫化水素に対する耐性を確認した。

（２）実ガス試験による実用化研究

平成 27 年度は、本事業後年度に予定している実ガス試験実施のため、実ガス試験装置及び実ガス試験実施への基本計画の検討を行いその概要をまとめた。

平成 28 年度は、平成 27 年度の検討結果を踏まえながら、国内外における実ガス試験装置及びガス試験プロセスについて検討し、その概要をまとめ、実ガス試験装置の設計や試験計画に反映させた。

（３）経済性評価・取りまとめ

平成 27 年度は、ラボデータを基に、今後の実ガス試験実施への有益なデータ供給や技術提案、また実機レベルでの設備イメージを提示することを目的にシミュレーション検討を行い、水分供給方法やモジュール配置方法等に関する適正なシステムを提案した。

平成 28 年度は、実用化を想定して連続製膜した膜による性能評価結果から、シミュレーションを行い、エネルギー原単位と CO₂分離・回収コストを推算し、中間評価の事業アウトカム指標目標値を達成する見込みをつけた。

3-2 個別要素技術成果

（１）実機膜モジュールの実用化研究

（１）- 1 連続製膜機を用いた製膜検討と膜エレメント化検討

実用化に向け、工業的に膜エレメントを作成するためには、一定長さ以上の大面積塗布が可能で生産性も高い連続製膜での製膜技術の開発が必要である。そこで、開発した分離機能層の製膜レシピを、枚葉製膜から連続製膜でも対応できるレシピへと改良し、実際に連続製膜を実施した。また、連続製膜サンプルを用いた膜エレメントの試作を進めており、併行して工業的な課題の抽出を実施中である。

連続製膜装置

連続製膜装置の一般的な模式図を図 2 に示す。基材を Roll to Roll で搬送し、スロットダイを用いて溶液を連続塗布し、熱風乾燥機で溶媒を蒸発させることで連続製膜を実施した。

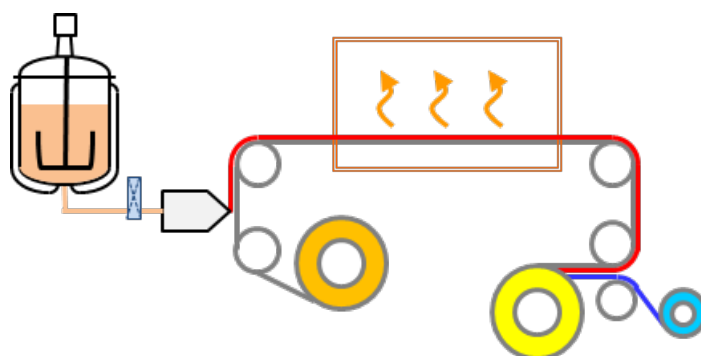


図2 連続製膜装置の一般的な模式図

連続製膜条件設定

連続製膜を実施する上で、基材であるUF膜を適切に搬送できるロール配置や搬送張力などを設定し、スロットダイでの塗布条件を設定した。図3に実験に用いた塗布装置（スロットダイ）の模式図を示す。

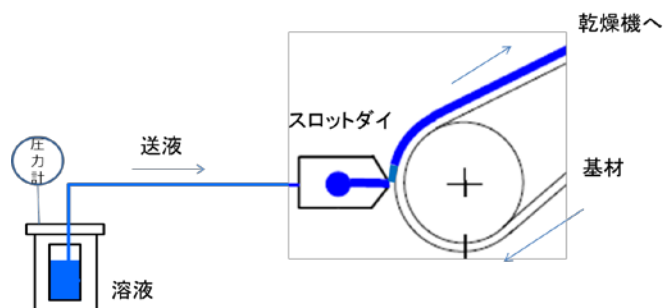


図3 実験に用いた塗布装置（スロットダイ）の模式図

連続製膜を実施するために以下の製膜レシピの改良を実施した。

① 溶液粘度の最適化

当初の溶液は粘度が低すぎて、液だれ等の不具合が発生し連続製膜に適さなかったが、高粘度化することで連続製膜が可能となった。また、溶液のポットライフも問題ない適切な溶液粘度に調整した。

② 乾燥温度の最適化

連続製膜では、枚葉製膜と異なり基材を装置に固定することはできない。乾燥温度が高い方が乾燥時間は短くなるが、搬送する基材への熱ダメージにより、膜に皺や歪が入る懸念も高くなる。良好な膜外観と生産性を両立する乾燥温度を設定した。

連続製膜結果

塗布幅 320 mm、塗布長さ約 20m の連続製膜を数回実施した。塗布長さについては条件を変えたサンプルを得るために便宜上 20m としているが、100m 以上の製膜も可能である。

連続製膜を実施した膜（単膜）の性能評価を実施し、以下を確認した。

- ・ 連続製膜品は同膜厚の枚葉製膜品と同等の透過性能を示した。
- ・ 現在実施している連続製膜品の塗布性は良好であり、欠陥も少ないため、各部より、切り出した単膜の評価結果はいずれもリーク無く一定の選択率を得た。
- ・ 薄膜品の連続製膜も検討し、CO₂の透過性能が大幅に向上することを確認した。

連続製膜品を用いた膜エレメントの作製

連続製膜で作製した膜を用いて、図4に示す直交流構造エレメントを試作している。

実機エレメントは8インチ径、1m長さを想定しているが、現在は、2インチ径、220mm長さのエレメントを試作している。

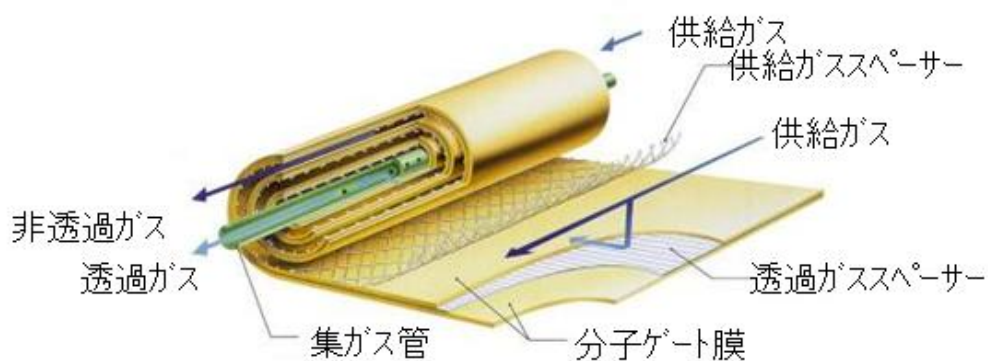


図4 直交流構造エレメントの展開図

連続製膜品を用いた膜エレメントの作製結果

エレメント用単膜（連続製膜品）およびエレメントの性能評価結果をそれぞれ表1に示す。エレメントの性能は、選択率に改善の余地があるも、単膜から想定されるほぼ妥当な分離性能が発現していると考えられた。

表1 エレメント性能評価結果

	Q_{CO_2}	Q_{He}	α
	$[m^3(STP)/m^2/s/Pa]$	$[m^3(STP)/m^2/s/Pa]$	
エレメント	1.83E-11	1.54E-12	11.9
単膜	1.94E-11	1.18E-12	16.5

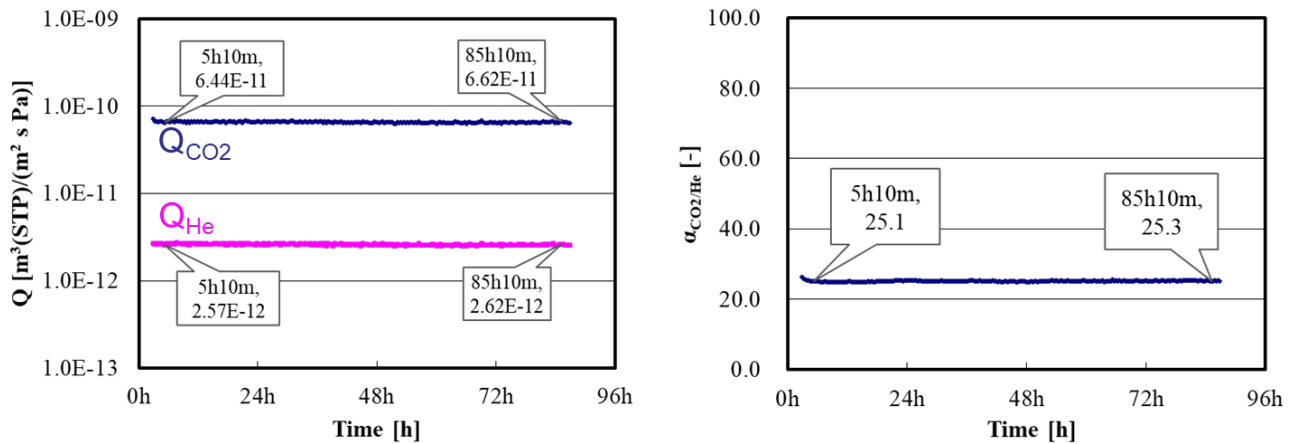
測定条件：

温度：85℃；供給側：全圧 2.4MPa，混合ガス組成 $CO_2/He=40/60$ vol./vol.，湿度 70%RH；透過側：大気圧

(1) - 2 プロセス適合性

プロセス適合性： 耐圧・耐久性

分離膜システムとして想定する 85℃、2.4MPa における分離性能の経時変化を評価し、単膜に関して、約 80 時間の耐久性を確認した（図 5）。

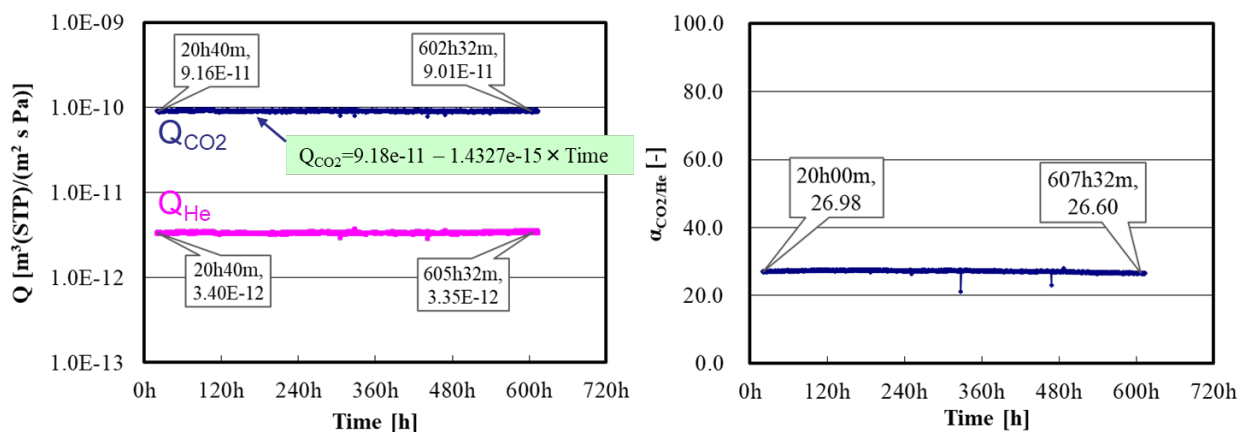


測定条件：

温度：85℃；供給側：全圧 2.4MPa，混合ガス組成 $\text{CO}_2/\text{He}=40/60 \text{ vol.}/\text{vol.}$ ，湿度 60%RH；透過側：大気圧

図 5 分離性能の経時変化

本年度（平成 29 年度）、耐圧・耐久性検討を進め、図 6 に示すように、2.4MPa の高圧条件での模擬ガス試験において、単膜に関して約 600 時間の耐久性を確認した。 Q_{CO_2} 低下率は 25%/2 年（16,000h）であり、単膜に関して目標値の達成が期待できるデータを取得した。



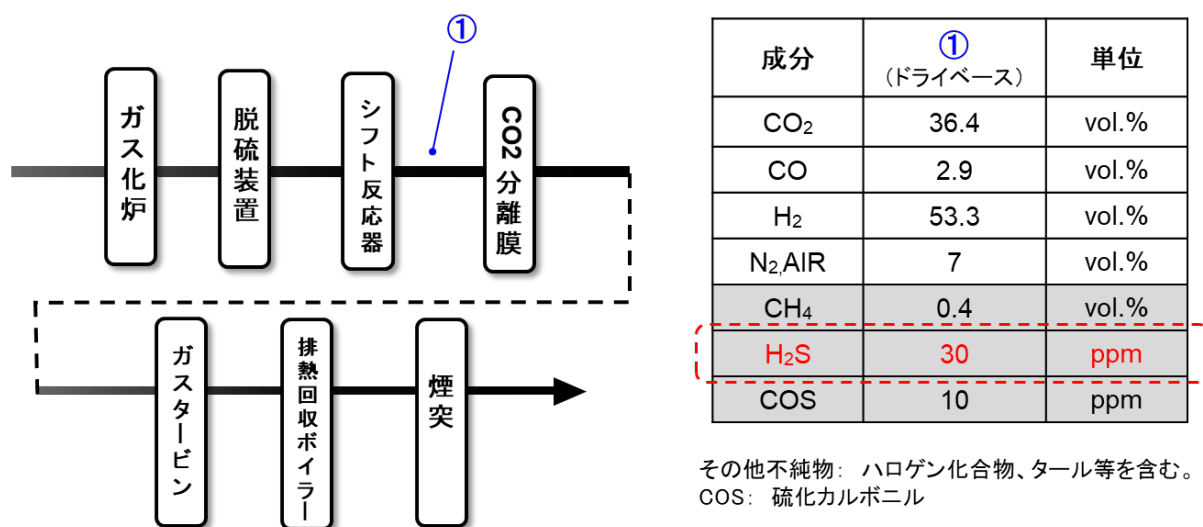
測定条件：

温度：85℃；供給側：全圧 2.4MPa，混合ガス組成 $\text{CO}_2/\text{He}=40/60 \text{ vol.}/\text{vol.}$ ，湿度 60%RH；透過側：大気圧

図 6 分離性能の経時変化（平成 29 年度成果）

プロセス適合性： 耐不純物性

IGCCガス化炉などの原ガスには、CO、CH₄、H₂S、COSなどの微量不純物が含まれている。このうちH₂Sは、特に膜劣化への影響が懸念される（図7）。



NEDO, 平成16年度クリーンコール・テクノロジー推進事業 石炭化を核とする
コプロダクションシステムに関する調査 調査報告書, 04002145-2 (2005-3).

図7 IGCCにおけるシフト反応後のガス組成（例）

そこで、単膜を用いて 2.4MPa の高圧条件における H₂S 曝露試験を実施した（2.4MPa, 85°C, 7 日間, CO₂ (33%) + H₂S (500ppm) + N₂ バランス（湿度 80%RH））。その結果、曝露試験前後の分離性能に大きな違いは見られなかったことから、H₂S に対する耐性があることを確認した（図 8）。

測定条件：

温度：85°C； 供給側：全圧 2.4MPa, 混合ガス組成 CO₂/He=40/60 vol. /vol., 湿度 60%RH； 透過側：大気圧

曝露試験前後の分離性能

（“前”：曝露試験前、“後”：曝露試験後）

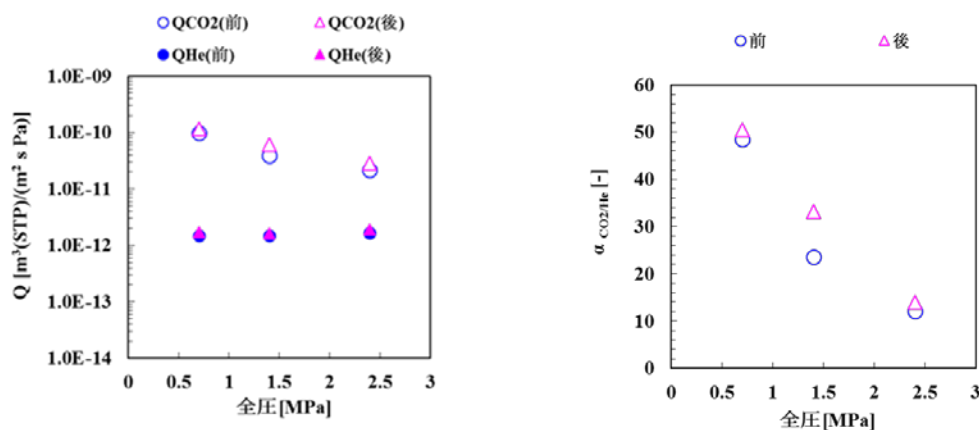
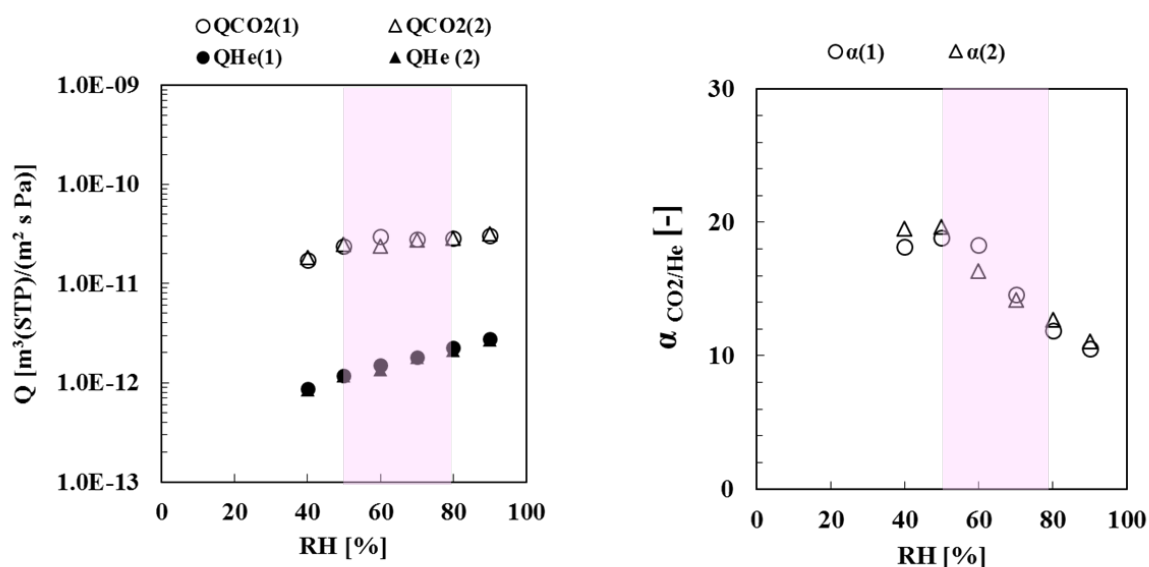


図 8 曝露試験前後の膜分離性能

プロセス適合性：湿度依存性の把握

実ガスを用いた試験では、湿度変動がより大きくなることが想定され、耐乾燥性の付与が必要である。即ち広い湿度範囲で CO_2 分離性能が低下しないことが望まれる。また、水蒸気の導入は全体のコストにも影響を及ぼす。そのため、経済性評価のシミュレーションに反映させるために、分離性能の湿度依存性を把握した（図 9）。



測定条件：

温度：85℃； 供給側：全圧 2.4MPa，混合ガス組成 $\text{CO}_2/\text{He}=40/60$ vol./vol.，湿度 40～90%RH；

透過側：大気圧

図 9 分離性能の湿度依存性

（２）実ガス試験による実用化研究

実機ガス試験機システムの概要（例）を図 10 に示す。IGCC プロセスを想定した小型高圧試験機を製作するにあたり、供給ガス圧力の低い試験プラントについては圧縮機の追加設置が必要で、水蒸気の同伴が必須であることから、供給ガス側で加湿器が、透過ガス側、非透過ガス側で凝縮器が必要としてプロセスを組み立てた。

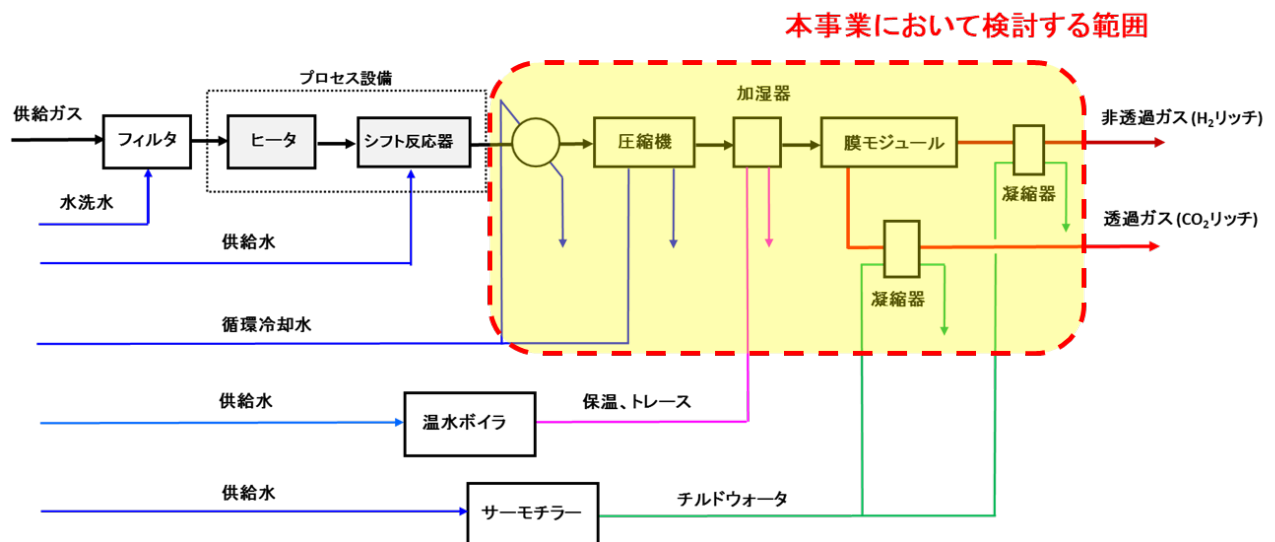


図 10 実機ガス試験機システムの概要（例）

国内外の実ガス試験サイトについて調査した。国内において実ガス試験を行う場合、膜スキッドに加え、水性ガスシフト反応器、各種前処理設備の製造、設置を含む費用と準備期間が必要であることが判明した。一方、米国の実ガス試験サイトである National Carbon Capture Center (NCCC) においては、分離膜等を評価するための水性ガスシフト反応器、各種前処理設備がすでに設置されており、有望な候補地と判明した。NCCC の概要を図 11 に示す。

所属： 米国エネルギー省 (DOE) (運営： Southern Company Services, Inc. (電力会社))
 設立： 2009年 (前身： Power Systems Development Facility (PSDF), 1996-2009)
 場所： アラバマ州ウィルソンヴィル
 研究分野： 実ガス試験による種々のCO₂回収技術の評価 (pre- and post-combustion)
 予算： \$ 187.8M (2014-2019の5年間)

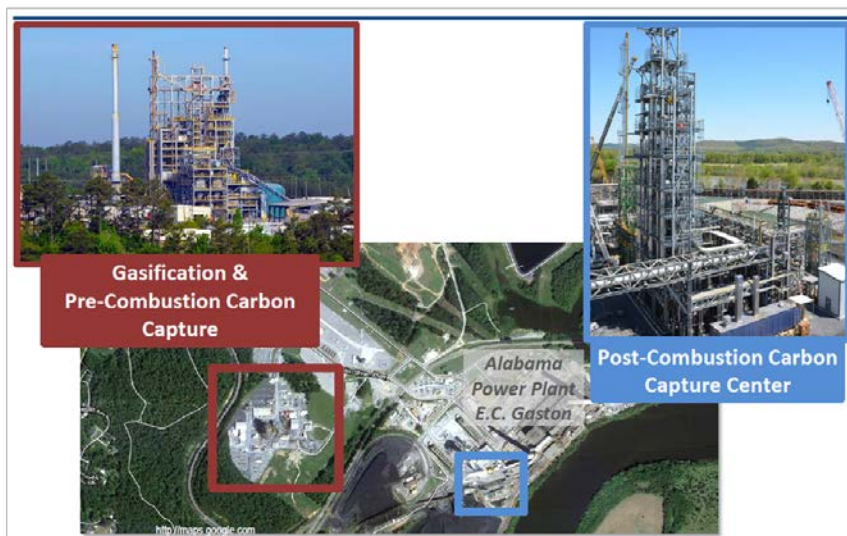


図 11 米国 National Carbon Capture Center (NCCC) の概要

また、NCCC の Pre-combustion 設備を図 12 に示す。

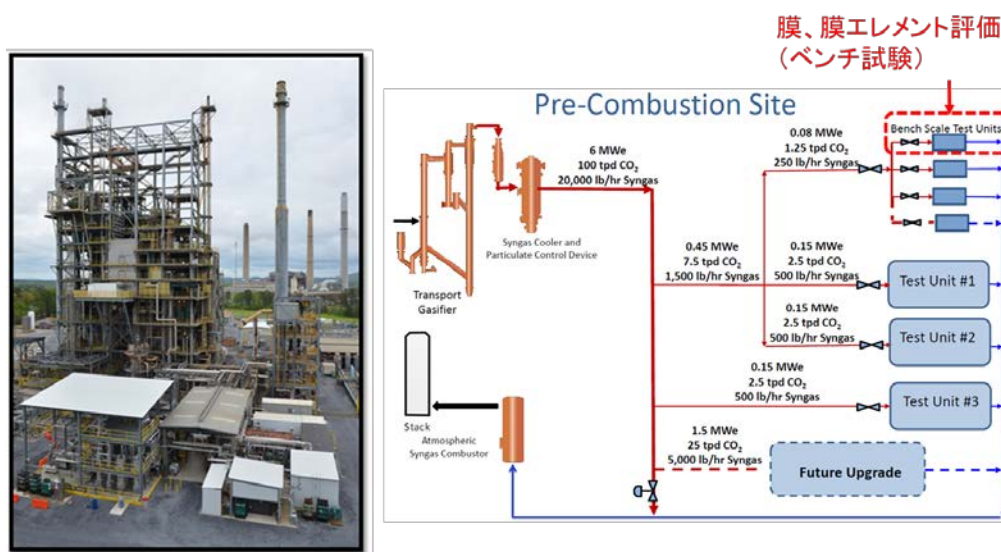


図 12 NCCC の Pre-combustion 設備

図 12 に示すように、石炭ガス化ガスを分岐し、本事業中で開発している膜及び膜エレメントのベンチ試験を実施するよう調整した。また、供給ガス流量の範囲などの仕様を決定した。

(3) 経済性評価・取りまとめ

前事業（二酸化炭素回収技術高度化事業（二酸化炭素分離膜モジュール研究開発事業））において提案した直列多段システム（図 13）において、膜エレメント内の湿度分布、全圧分布、CO₂分圧分布のシミュレーションを行い、エネルギー、コストを試算した。

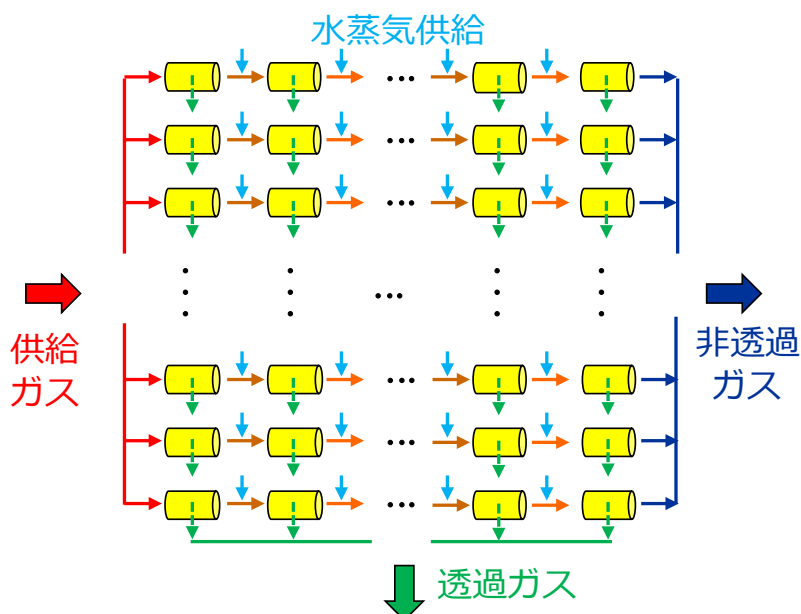


図 13 直列多段システムの概念図（前事業成果）

【前提条件】

仮想的に1本のスパイラル型エレメントを1枚の平膜に置き換え、以下の条件にてシミュレーションを行った。

- 1) CO₂回収量 1,000,000 t/年 (63,000 Nm³/h)
- 2) CO₂回収率 90 %
- 3) ガス組成(シフト反応後)
 - CO₂ 36.3 vol% (ドライベース)
 - H₂ 63.7 vol% (ドライベース)
 - H₂O 相対湿度(80%RH)によって設定
- 4) ガス条件
 - 供給側圧力 2.4MPaA
 - 透過側圧力 大気圧
- 5) 温度 85℃

開発したシミュレーションプログラムに前提条件を入力し、CO₂分離・回収エネルギー、およびCO₂分離・回収コストを試算したところ、連続製膜レシピにより作製した単膜で、CO₂分離・回収エネルギー原単位は0.9GJ/t-CO₂以下を達成し、CO₂分離・回収コストは2,100円/t-CO₂を達成することを確認できた(表2、3)。

表2 CO₂分離・回収エネルギー原単位の試算値

項目	計算値	単位
蒸気使用量	24.1	t/h
蒸気原単位	0.192	t/t-CO ₂
電力使用量	77	kW
電力原単位	0.616	kWh/t-CO ₂
合計エネルギー原単位	0.53	GJ/t-CO ₂

表 3 CO₂分離・回収コストの試算値（平成 29 年度成果）

項目	計算値	単位
CO ₂ 回収量	123.8	t/h
膜面積	210,000	m ²
蒸気使用量	24.1	t/h
設備費	670	円/t-CO ₂
膜費用 (膜エレメント及び容器費用)	560	円/t-CO ₂
変動費	560	円/t-CO ₂
処理費合計	1,790	円/t-CO ₂

以上