

二酸化炭素分離膜モジュール研究開発事業 中間評価報告書

平成25年3月
産業構造審議会産業技術分科会
評 価 小 委 員 会

はじめに

研究開発の評価は、研究開発活動の効率化・活性化、優れた成果の獲得や社会・経済への還元等を図るとともに、国民に対して説明責任を果たすために、極めて重要な活動であり、このため、経済産業省では、「国の研究開発評価に関する大綱的指針」（平成20年10月31日、内閣総理大臣決定）等に沿った適切な評価を実施すべく「経済産業省技術評価指針」（平成21年3月31日改正）を定め、これに基づいて研究開発の評価を実施している。

経済産業省において実施している二酸化炭素分離膜モジュール研究開発事業は、地球温暖化対策の重要な選択肢の一つとして期待されている二酸化炭素回収・貯留（CCS）の実用化を図るために、圧力を有するガス源であるIGCC等からのCO₂の分離回収エネルギーコストを大幅に削減する二酸化炭素分離膜モジュールの研究開発を平成18年度より実施しているものである。

今回の評価は、この二酸化炭素分離膜モジュール研究開発事業の中間評価であり、実際の評価に際しては、省外の有識者からなる平成24年度CO₂固定化・有効利用分野評価検討会（座長：持田 勲 九州大学 炭素資源国際教育研究センター 特命教授）を開催した。

今般、当該検討会における検討結果が評価報告書の原案として産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会（小委員長：平澤 冷 東京大学名誉教授）に付議され、内容を審議し、了承された。

本書は、これらの評価結果を取りまとめたものである。

平成25年3月

産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会

産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会

委員名簿

委員長	平澤 冷	東京大学名誉教授
	池村 淑道	長浜バイオ大学 バイオサイエンス研究科研究科長・学部学部長 コンピュータバイオサイエンス学科教授
	大島 まり	東京大学大学院情報学環教授 東京大学生産技術研究所教授
	太田 健一郎	横浜国立大学 特任教授
	菊池 純一	青山学院大学法学部長・大学院法学研究科長
	小林 直人	早稲田大学研究戦略センター教授
	鈴木 潤	政策研究大学院大学教授
	中小路 久美代	株式会社S R A先端技術研究所所長
	森 俊介	東京理科大学理工学研究科長 東京理科大学理工学部経営工学科教授
	吉本 陽子	三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社 経済・社会政策部主席研究員

(委員敬称略、五十音順)

事務局：経済産業省産業技術環境局技術評価室

平成24年度CO2固定化・有効利用分野評価検討会
委員名簿

座長	持田 勲	九州大学 炭素資源国際教育研究センター 特命教授
	伊藤 高敏	東北大学 流体科学研究所 教授
	金子 憲治	株式会社日経BP クリーンテック研究所 上席研究員
	釜谷 広志	電気事業連合会 立地環境部長
	川上 浩良	首都大学東京 都市環境学部 教授
	芝尾 芳昭	イノベーションマネジメント株式会社 代表取締役
	徳永 朋祥	東京大学大学院 新領域創成科学研究科 教授
	松方 正彦	早稲田大学 理工学術院 教授

(敬称略、五十音順)

事務局：経済産業省産業技術環境局地球環境連携・技術室
資源エネルギー庁資源・燃料部石炭課

二酸化炭素分離膜モジュール研究開発事業の評価に係る省内関係者

【中間評価時】

(平成24年度)

産業技術環境局 環境政策課 地球環境連携・技術室長 八山 幸司 (事業担当室長)

産業技術環境局 産業技術政策課 技術評価室長 岡本 繁樹

【事前評価時】

(平成22年度)

産業技術環境局 環境政策課 地球環境技術室長 小澤 典明 (事業担当室長)

【中間評価時】

(平成21年度)

(分子ゲート機能CO₂分離膜の技術研究開発事業として)

産業技術環境局 環境政策課 地球環境技術室長 三橋 敏宏 (事業担当室長)

産業技術環境局 産業技術政策課 技術評価室長 長濱 裕二

【事前評価時】 (事業初年度予算要求時)

産業技術環境局 環境政策課 地球環境技術室長 山形 浩史 (事業担当室長)

二酸化炭素分離膜モジュール研究開発事業中間評価

審議経過

○第1回中間評価検討会（平成24年11月13日）

- ・評価の方法等について
- ・プロジェクトの概要について
- ・評価の進め方について

○第2回中間評価検討会（平成25年1月16日）

- ・評価報告書(案)について

○産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会（平成25年3月15日）

- ・評価報告書(案)について

目 次

はじめに

産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会 委員名簿

平成24年度CO₂固定化・有効利用分野評価検討会 委員名簿

二酸化炭素分離膜モジュール研究開発事業の評価に係る省内関係者

二酸化炭素分離膜モジュール研究開発事業中間評価 審議経過

	ページ
中間評価報告書概要	i
第1章 評価の実施方法	1
1. 評価目的	2
2. 評価者	2
3. 評価対象	3
4. 評価方法	3
5. プロジェクト評価における標準的な評価項目・評価基準	3
第2章 プロジェクトの概要	6
1. 事業の目的・政策的位置付け	7
2. 研究開発目標	13
3. 成果、目標の達成度	20
4. 事業化、波及効果について	55
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等	57
第3章 評価	69
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	70
2. 研究開発等の目標の妥当性	73
3. 成果、目標の達成度の妥当性	75
4. 事業化、波及効果についての妥当性	77
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性	79
6. 総合評価	81
7. 今後の研究開発の方向等に関する提言	84
(参考) 今後の研究開発の方向等に関する提言及び対処方針	86
第4章 評点法による評点結果	87
第5章 評価小委員会のコメント及びコメントに対する対処方針	90
参考資料	
参考資料1 経済産業省技術評価指針	
参考資料2 経済産業省技術評価指針に基づく標準的評価項目・評価基準	
参考資料3 二酸化炭素分離膜モジュール研究開発に関する事前評価報告書（概要版）	

中間評価報告書概要

中間評価報告書概要

プロジェクト名	二酸化炭素分離膜モジュール研究開発事業																							
上位施策名	資源エネルギー・環境政策																							
事業担当課	産業技術環境局 環境政策課 地球環境連携・技術室																							
<p><u>プロジェクトの目的・概要</u></p> <p>大規模発生源から分離回収した二酸化炭素（以下「CO₂」という。）を地下深部の塩水性帯水層に貯留する技術開発が地球温暖化対策の重要な選択肢の一つとして期待され、先進国を中心に盛んに行われている。</p> <p>気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が2005年にまとめた「二酸化炭素回収・貯留（CCS）に関する特別報告書」では、世界全体におけるCO₂地中貯留のポテンシャルが約2兆トンと大きく、世界全体排出量の70年分にも相当すると見込まれている。また、国際エネルギー機関（IEA）の「エネルギー技術展望2012」では、CCSは、今後も長期的に極めて重要な役割を果たすとし、産業部門において大幅なCO₂排出量削減目標の達成を可能にする有望な技術であるとしている。</p> <p>このような背景のもと、我が国においても、地球温暖化対策としてCCS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、CCSの実用化に資するため、コストを低減する技術、特に全コストの6割以上を占めるCO₂の分離・回収技術の高度化・低コスト化が不可欠であり、技術開発の加速化が必要とされているところである。</p> <p>本事業では、圧力を有するガス源であるIGCC等からのCO₂の分離回収エネルギーコストを大幅に削減する二酸化炭素分離膜モジュールの研究開発を行う。</p> <p>具体的には、膜素材のCO₂の透過性や選択性などの高性能化を図るとともに、膜の連続製造技術の開発や膜モジュールの耐圧・耐久化、大型化を図るなど実用化に向けて、分離膜技術の確立、実機膜モジュールの開発、膜システムの開発を実施する。これにより、圧力を有するガス源であるIGCC等から従来技術の3分の1程度の1,500円/t-CO₂以下でCO₂を分離・回収する技術の確立を目指す。合わせて、1,000円/t-CO₂以下でCO₂を分離・回収する技術を確認する。</p>																								
<p>予算額等（委託） （単位：千円）</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th style="width: 20%;">開始年度</th> <th style="width: 20%;">終了年度</th> <th style="width: 20%;">中間評価時期</th> <th style="width: 20%;">事後評価時期</th> <th style="width: 20%;">事業実施主体</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>平成18年度</td> <td>平成26年度</td> <td>平成20, 24年度</td> <td>平成27年度</td> <td>次世代型膜モジュール技術研究組合</td> </tr> <tr> <td>H21FY 予算額</td> <td>H22FY 予算額</td> <td>H23FY 予算額</td> <td>総予算額</td> <td>総執行額</td> </tr> <tr> <td>929,764</td> <td>332,100</td> <td>349,272</td> <td>2,441,136</td> <td>2,289,510</td> </tr> </tbody> </table>					開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体	平成18年度	平成26年度	平成20, 24年度	平成27年度	次世代型膜モジュール技術研究組合	H21FY 予算額	H22FY 予算額	H23FY 予算額	総予算額	総執行額	929,764	332,100	349,272	2,441,136	2,289,510
開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体																				
平成18年度	平成26年度	平成20, 24年度	平成27年度	次世代型膜モジュール技術研究組合																				
H21FY 予算額	H22FY 予算額	H23FY 予算額	総予算額	総執行額																				
929,764	332,100	349,272	2,441,136	2,289,510																				

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

個別要素技術	目標・指標		成果	達成度
	最終時点	中間時点		
1. 分離膜技術の確立				
1) 分離性能の改良	CO ₂ 分離・回収コスト 1,500 円/t-CO ₂ を達成する CO ₂ /H ₂ 選択性、CO ₂ 透過速度を有する複合膜を作製する。	CO ₂ /H ₂ 選択性が 30 であり、CO ₂ 透過速度が 7.5×10 ⁻¹⁰ m ³ m ⁻² s ⁻¹ Pa ⁻¹ の複合膜を作製する。	膜材料の改良によって分離性能を向上させ、大気圧条件において目標分離性能 (CO ₂ /H ₂ 選択性が 30 であり、CO ₂ 透過速度が 7.5×10 ⁻¹⁰ m ³ m ⁻² s ⁻¹ Pa ⁻¹) を達成した。	達成
2) 耐不純物性	IGCC 等における代表的な不純物組成に対する不純物耐性を付与する。	膜モジュールとしての耐不純物性試験を平成 25 年度以降に実施するため、中間評価時点の設定無し。	公開情報を調査し、平成 25 年度以降からの膜モジュール試験の準備を整えた。	—
3) 耐乾燥性	湿度 40%~80%RH の間で著しい機能の低下 (CO ₂ 透過性 50%以下) の無い分離膜を開発する。	膜中への水分子の保持に関して、プロセス面、材料面からの解決法を検討する。	プロセス面から水蒸気スウィープ法、膜材料として高吸水性高分子マトリクスの可能性を見出した。	達成
4) 耐圧性	IGCC の高圧化 (4MPa) に対応した耐圧性を有する分離膜を開発する。	複合膜の耐圧性として 3MPa (現行の IGCC のガス圧 2.5MPa 以上として) を確認する。	複合膜が 3MPa 以上の耐圧性を有することを確認した。	達成
5) 耐久性	1,000 時間以上の連続運転で著しい機能の低下の無い分離膜を開発する。	膜モジュールとしての耐久性試験を平成 25 年度以降に実施するため、中間評価時点の設定無し。	—	—
6) その他のプロセス適合性	耐熱性の向上 (100℃以上) を目指す。	膜材料の耐熱性を評価する。また、耐熱性材料について検討する。	膜材料の耐熱性を確認し、複合膜が 120℃までの耐熱性を有することを確認した。	達成
7) 1,000 円/t-CO ₂ 以下を可能とする分離膜 (CO ₂ /H ₂ 選択性が 100) の開発	分離膜の CO ₂ /H ₂ 選択性が 100 以上である分離膜の膜素材、支持膜材料を開発する。	システム検討を行い、1,000 円/t-CO ₂ 以下の目標を達成するための要求膜性能を検討する。	システム検討を行い、1,000 円/t-CO ₂ 以下の目標を達成するための要求膜性能を見出した。	達成
2. 実機膜モジュールの開発				
1) 連続安定製膜	分離膜を連続安定製造するために必要となる要素技術の抽出とその要素技術を検	実機型膜モジュール (直径 10cm、長さ 20cm 程度) を試作し、膜の均一性を把握	連続安定製膜の概念設計を行い、各工程における技術課題を抽出した。同時に、	達成

	討する。	し、塗工技術を検討する。	実機型膜モジュール（直径 10cm、長さ 20cm 程度）を試作し、膜性能のバラツキの程度を確認した。	
2) 膜モジュールの大型化	膜長が 1m、直径が 10cm の膜モジュールを製造する。	実機型膜モジュール（直径 10cm、長さ 20cm 程度）を試作し、膜モジュールの大型化に伴う技術課題を抽出する。	実機型膜モジュール（直径 10cm、長さ 20cm 程度）を試作し、スパイラルモジュール製作における、リーフ数、リーフ長さ、スペーサー構造・配置等の技術課題を抽出した。	達成
3) 実機型膜モジュール	実機型膜モジュール（直径 10cm、長さ 20cm 程度）を製作して、実システムあるいは近似した状態での試験を行い、実機型膜モジュールの技術を確立する。	実機型膜モジュール（直径 10cm、長さ 20cm 程度）を試作し、モジュール性能試験を行う。	実機型膜モジュール（直径 10cm、長さ 20cm 程度）を試作し、モジュール性能試験を行い、分離性能を確認した。	達成
3. 膜分離システムの開発				
1) 膜分離システムの検討	実システムを調査し、開発した分離膜でのプロセス検討等から分離膜システムの最適化を行う。	シミュレーション技術等を用いて、膜モジュールの性能に対するガス流体条件等を検討する。	シミュレーションによる流れ解析を行い、膜モジュールのスウィープ構造に対するガス流体条件等を検討した。	達成
2) 膜分離プラントの概念設計	膜分離プラントの概念設計を行い、CO ₂ 分離・回収コスト、エネルギーの両面から、膜分離システムの有効性を確認する。	膜性能と CO ₂ 分離・回収コストとの関係を推算し、膜分離プラントの概念設計を行う。	システム検討を行い、膜性能と CO ₂ 分離・回収コストとの関係を推算し、要求膜性能を明らかにした。また、膜分離プラントの概念設計を行った。	達成

(2) 目標及び計画の変更の有無

圧力を有するガスから効率良く低コストで CO₂ を分離・回収する技術を開発する目的で、平成 18 年度より平成 22 年度までの 5 年間の期間「分子ゲート機能 CO₂ 分離膜の技術研究開発」を実施した。そこで開発した膜素材や試作モジュールを基礎として、二酸化炭素分離膜モジュールの早期実用化を見据え、1500 円/t-CO₂ 以下で CO₂ を分離・回収する技術の確立を目指して見直しを行っている。

具体的には、平成 23 年度からの委託研究「二酸化炭素分離膜モジュール研究開発事業」を実施するにあたり、膜素材メーカー（㈱クラレ）、膜モジュールメーカー（日東電工㈱）、エンジニアリング会社（新日鉄住金エンジニアリング㈱）、（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と大学からなる研究開発体制を構築している。膜素材の CO₂ の透過性や選択性などの高

性能化を図るとともに、膜の連続製造技術の開発や膜モジュールの耐圧・耐久化、大型化を図るなど実用化に向けて、分離膜技術の確立、実機膜モジュールの開発、膜システムの開発を実施するものである。

また、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ところであるが、社会的変化により、電気代の高騰化が見込まれ、2段プロセスでは1,500円/t-CO₂を実現出来ない可能性があるため、電気代を掛けない1段プロセスで1,500円/t-CO₂を実現する膜システムを検討し、新たに単膜の要求性能を見直したところである。今後、1段プロセスの単膜要求性能の膜を開発し、平成26年度末に間に合わせる予定である。

<共通指標>

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	取得ライ センス料	国際標準へ の寄与
5		9	0	0	0	0

評価概要

1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性

CCSは地球全体のCO₂排出量の大幅削減を可能とする革新的技術と位置付けられているが、実用化に向けては多くの課題も存在し、特に全コストの6割以上を占めるCO₂の分離・回収技術の高度化や低コスト化が不可欠である。本事業は日本の得意とする分離膜技術を生かしており、科学的・技術的な新規性、独創性は評価でき、目的・政策的位置付け妥当である。

また、CCSの実用化に当たっては、技術開発による安全性向上やコストダウンのほか、制度的、社会的課題を解決する必要がある。実用化時点でのビジネスモデルも明確になっていない現時点では、民間企業には技術開発のインセンティブが働きにくく、国の関与の必要性は極めて高い。

一方、民間で進められているアミンあるいは固体吸収材料等を用いるCO₂分離回収技術との明確な差別化が今後必要である。

また、将来的には我が国で進められているIGCCの開発への導入など、実用化を加速する事業の提案も期待したい。

2. 研究開発等の目標の妥当性

コストを明示した数値設定は大変理解しやすく、目標値も高いレベルに設定されており、研究開発等の目標は適切かつ妥当である。また、最終目標を達成するのに必要な技術要素を、全体目標から個別要素技術に分解し、それぞれに対して目標を落とし込み各要素技術の目標を設定していることは評価できる。

中間評価段階で、最終評価目標としている1500円/t-CO₂の分離回収技術に目途をつけようとしていることも具体的であり、適切な設定の仕方である。

一方、水を必要とする促進輸送でCO₂透過が行われるため、保水環境や湿度に対する評価などをさらに詳細に検討する必要がある。

排出権価格の低迷により、1500円でも事業性が無いのが実情であり、さらに挑戦的な低コスト化への目標設定を行うとともに、EOR等経済性のある事業での活用が望まれる。

また、耐久性・耐不純物性の向上の指標となる目標設定や早期の実用化を見込まれるシステム開発が必要ではないか。

3. 成果、目標の達成度の妥当性

薄膜化、膜安定性の評価など、分離膜の実用化で要求される項目の目標を達成するとともに、今後の電気代上昇リスクにも備え、2段プロセスから1段プロセスにターゲットを変更し、その実現にも目処を得ている。こうした状況変化への対応も含め、中間段階としては優れた成果が得られている。論文発表や知財の管理も適切であると判断できる。

一方、耐乾燥性実験は行われているが、ゲルなどの高分子膜での評価であり、保水環境に関する材料設計指針の再構築が必要である。

耐熱性については、硫酸の酸露点など燃焼プロセス側から決まるプロセス要件についてより明確にした検討が望まれる。

また、耐久性・耐不純物性の向上の指標となる目標設定や早期の実用化を見込まれるシステム開発が必要ではないか。

4. 事業化、波及効果についての妥当性

次世代型膜モジュール研究組合を創設し本研究開発に着手していることは、事業化の推進の観点及び波及効果の拡大の観点から評価できる。高選択性への見通しが立ったことから、1,000円/t-CO₂での実用化も視野に入ってきた。コスト面での強みを生かし、早期の事業化を期待したい。

また、天然ガス田からのCO₂分離や、化学プラントへの応用といったCCSとは異なる分野への応用が示されており、他分野への波及効果が期待できる。様々な業界からニーズを集め、コストを具体的に示して応用可能性を検討し、事業を加速させていくことも検討して貰いたい。

一方、事業化を考えると薄膜化と長期の膜安定性が今後のポイントと考えられ、重点的な取り組みが必要であるとともに、他の分離回収法と比較しての優位性をしっかりとしたエンジニアリングデータに基づいて示すことが必要と考える。

また、実用化には大規模実証試験を通じて技術的な課題を抽出することも必要であることから、今後、実用化にあたっては、大規模実証試験での実証が望まれる。

5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性

役割分担が良くできており、民間企業、研究機構、大学からなる研究開発体制が構築されている。これは、開発期間を短縮し、実用化を加速させるうえで、非常に良い開発体制であると評価できる。

研究開発計画は概ね妥当である。資金も進捗状況に応じた適切な配分が行われている。費用対効果においても、本技術の可能性は非常に高く、様々な応用性もありビジネス的にもポテンシャルの高い技術であることから、費用対効果の高い事業であると考えられる。

また、シンポジウムが主催されていることから、成果の公開と外部との意見交換が適切に行われていると認められる。

一方、費用対効果については、現状の分離回収コストから比較することも良いが、CCS以外の削減手段（例えば太陽光、風力などの再生可能エネルギーで抑制した場合）との比較もあれば、CCSの有益性をより分かり易く示せるのではないかと考える。

また、諸外国技術との差別化、ある時点での海外への展開のシナリオも検討すべきではないか。

6. 総合評価

CO₂削減効果の高いCCSを実用化するためには、今後、更なる低コスト化・高度化が必要であり、特に全コストの6割以上を占めるCO₂の分離・回収の技術開発は重要である。

分離膜モジュールの科学的・技術的な新規性、独創性は高く評価でき、事業の目的は妥当である。研究開発等の目標も適切かつ妥当である。

薄膜化、膜安定性の評価など、分離膜の実用化で要求される項目の目標を確実にクリアし、高選択性への見通しが立ったことから、1,000円/t-CO₂での実用化の可能性も示され、早期の事業化を期待するとともに、現時点の性能における実用化、販売も検討を始めて欲しい。

また、将来の電気代上昇リスクにも備え、2段プロセスから1段プロセスにターゲットを変更し、その実現にも目処を得ていることは優れた成果である。

一方、水を必要とする促進輸送でCO₂透過が行われるため、保水環境や湿度に対する評価などをさらに詳細に検討する必要がある。

耐乾燥性実験は行われているが、ゲルなどの高分子膜での評価であり、保水環境に関する材料設計指針の再構築が必要である。

事業化を考えると薄膜化と長期の膜安定性が今後のポイントと考えられ、重点的な取り組みが必要である。

耐プロセス適合性の検討を進める上で、燃焼プロセス側からの制約条件をより明確にした研究開発が必要である。

また、実用化には大規模実証試験を通じて技術的な課題を抽出することも必要であることから、今後、実用化にあたっては、大規模実証試験での実証が望まれる。

7. 今後の研究開発の方向等に関する提言

・耐プロセス適合性の検討を進める上で、燃焼プロセス側からの制約条件をより明確にした研究開発が必要である。

・今後は技術開発だけでなく、実用化に向けた事業展開についても検討することが望まれる。

・実用化は国内に限定するのではなく、EORなどで期待の大きい海外にも展開していくことが、地球全体のCO₂を削減するうえで重要である。今後、実用化にあたっては長い年月の研究が必要となるが、随時海外プロジェクトへの参加による売り上げ貢献を期待したい。

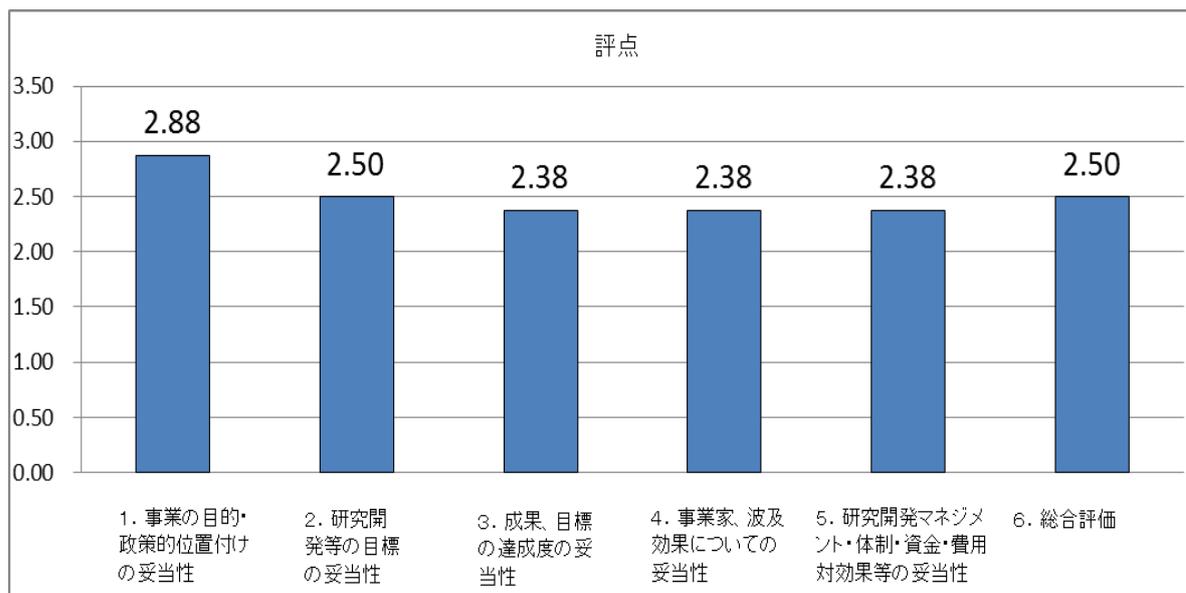
・優れた研究でありこの方向で進めて欲しいが、研究の途中で随時実用化を試みて貰いたい。

評点結果

評点法による評点結果

(二酸化炭素分離膜モジュール研究開発事業)

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員	F 委員	G 委員	H 委員
1. 事業の目的・政策的な位置付けの妥当性	2.88	3	3	3	3	3	3	3	2
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.50	2	2	3	3	3	3	2	2
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.38	2	2	3	2	3	3	2	2
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.38	2	1	3	3	3	3	2	2
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.38	2	3	3	2	3	2	2	2
6. 総合評価	2.50	2	2	3	3	3	3	2	2



第 1 章 評価の実施方法

第1章 評価の実施方法

本プロジェクト評価は、「経済産業省技術評価指針」(平成21年3月31日改定、以下「評価指針」という。)に基づき、以下のとおり行われた。

1. 評価目的

評価指針においては、評価の基本的考え方として、評価実施する目的として

- (1) より良い政策・施策への反映
- (2) より効率的・効果的な研究開発の実施
- (3) 国民への技術に関する施策・事業等の開示
- (4) 資源の重点的・効率的配分への反映

を定めるとともに、評価の実施にあたっては、

- (1) 透明性の確保
- (2) 中立性の確保
- (3) 継続性の確保
- (4) 実効性の確保

を基本理念としている。

プロジェクト評価とは、評価指針における評価類型の一つとして位置付けられ、プロジェクトそのものについて、同評価指針に基づき、事業の目的・政策的位置付けの妥当性、研究開発等の目標の妥当性、成果、目標の達成度の妥当性、事業化、波及効果についての妥当性、研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性の評価項目について、評価を実施するものである。

その評価結果は、本プロジェクトの実施、運営等の改善や技術開発の効果、効率性の改善、更には予算等の資源配分に反映させることになるものである。

2. 評価者

評価を実施するにあたり、評価指針に定められた「評価を行う場合には、被評価者に直接利害を有しない中立的な者である外部評価者の導入等により、中立性の確保に努めること」との規定に基づき、外部の有識者・専門家で構成する検討会を設置し、評価を行うこととした。

これに基づき、評価検討会を設置し、プロジェクトの目的や研究内容に即

した専門家や経済・社会ニーズについて指摘できる有識者等から評価検討会委員名簿にある8名が選任された。

なお、本評価検討会の事務局については、指針に基づき経済産業省産業技術環境局環境政策課地球環境連携・技術室及び資源エネルギー庁資源・燃料部石炭課が担当した。

3. 評価対象

二酸化炭素分離膜モジュール研究開発事業（実施期間：平成21年度から平成24年度中頃）を評価対象として、研究開発実施者（次世代型膜モジュール技術研究組合）から提出されたプロジェクトの内容・成果等に関する資料及び説明に基づき評価した。

4. 評価方法

第1回評価検討会においては、研究開発実施者からの資料提供、説明及び質疑応答、並びに委員による意見交換が行われた。

第2回評価検討会においては、それらを踏まえて「プロジェクト評価における標準的評価項目・評価基準」、今後の研究開発の方向等に関する提言等について評価を実施し、併せて4段階評点法による評価を行い、評価報告書(案)を審議、確定した。

また、評価の透明性の確保の観点から、知的財産保護、個人情報で支障が生じると認められる場合等を除き、評価検討会を公開として実施した。

5. プロジェクト評価における標準的な評価項目・評価基準

評価検討会においては、経済産業省産業技術環境局技術評価室において平成21年6月1日に策定した「経済産業省技術評価指針に基づく標準的評価項目・評価基準について」のプロジェクト評価（中間・事後評価）に沿った評価項目・評価基準とした。

1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性

(1) 事業目的は妥当で、政策的位置付けは明確か。

- ・事業の政策的意義（上位の施策との関連付け等）
- ・事業の科学的・技術的意義（新規性・先進性・独創性・革新性・先導性等）

- ・社会的・経済的意義（実用性等）
- (2) 国の事業として妥当であるか、国の関与が必要とされる事業か。
- ・国民や社会のニーズに合っているか。
 - ・官民の役割分担は適切か。

2. 研究開発等の目標の妥当性

- (1) 研究開発等の目標は適切かつ妥当か。
- ・目的達成のために具体的かつ明確な研究開発等の目標及び目標水準を設定しているか。特に、中間評価の場合、中間評価時点で、達成すべき水準（基準値）が設定されているか。
 - ・目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

3. 成果、目標の達成度の妥当性

- (1) 成果は妥当か。
- ・得られた成果は何か。
 - ・設定された目標以外に得られた成果はあるか。
 - ・共通指標である、論文の発表、特許の出願、国際標準の形成、プロトタイプの作製等があったか。
- (2) 目標の達成度は妥当か。
- ・設定された目標の達成度（指標により測定し、中間及び事後評価時点の達成すべき水準（基準値）との比較）はどうか。

4. 事業化、波及効果についての妥当性

- (1) 事業化については妥当か。
- ・事業化の見通し（事業化に向けてのシナリオ、事業化に関する問題点及び解決方策の明確化等）は立っているか。
- (2) 波及効果は妥当か。
- ・成果に基づいた波及効果を生じたか、期待できるか。
 - ・当初想定していなかった波及効果を生じたか、期待できるか。

5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性

- (1) 研究開発計画は適切かつ妥当か。
- ・事業の目標を達成するために本計画は適切であったか（想定された課題への対応の妥当性）。

- ・採択スケジュール等は妥当であったか。
 - ・選別過程は適切であったか。
 - ・採択された実施者は妥当であったか。
- (2) 研究開発実施者の実施体制・運営は適切かつ妥当か。
- ・適切な研究開発チーム構成での実施体制になっているか、いたか。
 - ・全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されているか、いたか。
 - ・目標達成及び効率的実施のために必要な、実施者間の連携／競争が十分に行われる体制となっているか、いたか。
 - ・成果の利用主体に対して、成果を普及し関与を求める取組を積極的に実施しているか、いたか。
- (3) 資金配分は妥当か。
- ・資金の過不足はなかったか。
 - ・資金の内部配分は妥当か。
- (4) 費用対効果等は妥当か。
- ・投入された資源量に見合った効果が生じたか、期待できるか。
 - ・必要な効果がより少ない資源量で得られるものが他にないか。
- (5) 変化への対応は妥当か。
- ・社会経済情勢等周辺の状況変化に柔軟に対応しているか（新たな課題への対応の妥当性）。
 - ・代替手段との比較を適切に行ったか。

6. 総合評価

第2章 プロジェクトの概要

第2章 プロジェクトの概要

1. 事業の目的・政策的位置付け

1-1 事業の目的

化石燃料は今後とも我が国の主要なエネルギーソースであり、持続的な経済成長と地球温暖化防止の観点から、化石燃料の利用に伴う温室効果ガス排出の削減技術の研究開発が求められている。大規模発生源から分離回収した二酸化炭素（以下「CO₂」という。）を地下深部の塩水性帯水層（以下「帯水層」という。）に貯留する技術開発が地球温暖化対策の重要な選択肢の一つとして期待され、先進国を中心に盛んに行なわれている。

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が2005年にまとめた「二酸化炭素回収・貯留（CCS）に関する特別報告書」では、世界全体におけるCO₂地中貯留のポテンシャルが約2兆トンと大きく、世界全体排出量の70年分にも相当すると見込まれている。

また、国際エネルギー機関（IEA）の「エネルギー技術展望2012」では、CCSは、今後も長期的に極めて重要な役割を果たすとし、産業部門において大幅なCO₂排出量削減目標の達成を可能にする有望な技術であるとしている。さらに長期的に気温上昇を2℃に抑えるシナリオにおいて、CCSは2050年までのCO₂累積削減量の最大20%を占めると試算され、もしCCSを放棄すれば、必要とされる電力分野の追加投資額は40%増加し、今後40年間で総額2兆ドルに達するとしている。

我が国においても、地球温暖化対策としてCCS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、CCSの実用化に資するため、コストを低減する技術、特に全コストの6割以上を占めるCO₂の分離・回収技術の高度化・低コスト化が不可欠であり、技術開発の加速化が必要とされているところである。

「二酸化炭素分離膜モジュール研究開発事業」では圧力を有するガス源であるIGCC等から従来技術の3分の1程度の1,500円/t-CO₂以下でCO₂を分離・回収する技術の確立を目指す。合わせて、1,000円/t-CO₂以下でCO₂を分離・回収する技術を確認する。

事業概要

圧力を有するガスから効率良く低コストでCO₂を分離・回収する技術を開発する目的で、平成18年度より平成22年度までの5年間の期間「分子ゲート機能

CO₂分離膜の技術研究開発」を実施した。そこで開発した膜素材や試作モジュールを基礎として、「二酸化炭素分離膜モジュール研究開発事業」を実施する。

ここでは、膜素材のCO₂の透過性や選択性などの高性能化を図るとともに、膜の連続製造技術の開発や膜モジュールの耐圧・耐久化、大型化を図るなど実用化に向けて、分離膜技術の確立、実機膜モジュールの開発、膜システムの開発を実施するものである。

(1) 分離膜技術の確立

分子ゲート機能CO₂分離膜の技術研究開発における「単膜の基本性能の確認」を受けて、膜モジュール性能が発揮できるように分離膜の改良を行いつつ、分子ゲート機能CO₂分離膜の実用化に向けて実システムで要求される耐不純物性、耐乾燥性、耐圧性、耐久性等のプロセス適合性を確立する。合わせて、1,000円/t-CO₂以下でCO₂を分離・回収する技術を確認する。

(2) 実機膜モジュールの開発

連続安定製膜に必要な要素技術を確認して、実機膜モジュールに供する分離膜の安定製造を可能とする。

(3) 膜分離システムの開発

膜分離システムの適用調査、プロセス検討データの取得により、開発した分離膜モジュールに最適なシステム設計を行う。

1-2 政策的位置付け

本プロジェクトは、CCSの実用化に向けて、分離回収したCO₂を帯水層に長期的に安定かつ安全に貯留する技術を開発するものであり、G8 北海道洞爺湖サミット首脳宣言、エネルギー基本計画、地球温暖化対策基本法案において、以下のように位置付けられている。

○G8 北海道洞爺湖サミット首脳宣言 (平成20年7月8日)

我々は、2020年までにCCSの広範な展開を始めるために、各国毎の様々な事情を考慮しつつ、2010年までに世界的に20の大規模なCCSの実証プロジェクトが開始されることを、強く支持する。

○エネルギー基本計画 (平成22年6月18日閣議決定)

(火力発電の高度化)

2020年頃のCCSの商用化を目指した技術開発の加速化を図るとともに、今後計画される石炭火力の新增設に当たっては、CCS Readyの導入を検討する。ま

た、商用化を前提に、2030年までに石炭火力にCCSを導入することを検討する。

○地球温暖化対策基本法案（平成22年10月8日閣議決定）
（革新的な技術開発の促進等）

第19条 国は、地球温暖化の防止及び地球温暖化への適応に資する技術の高度化及び有効活用を図るため、再生可能エネルギーの利用、安全の確保を基本とした原子力発電、エネルギーの使用の合理化、燃料電池、蓄電池並びに二酸化炭素の回収及び貯蔵に関連する革新的な技術その他の地球温暖化の防止及び地球温暖化への適応に資する技術の開発及び普及の促進のために必要な施策を講ずるものとする。

また、本事業は平成22年度までは経済産業省の定める施策名「30 温暖化対策」の中で「温室効果ガスを大きく削減する革新技術」の一部として位置付けられ（図1-1）、平成23年度以降は経済産業省の定める施策名「3 資源エネルギー・環境政策」の中の「環境政策」において「温暖化対策に係る革新技術」の一部として位置付けられている（表1-1）。

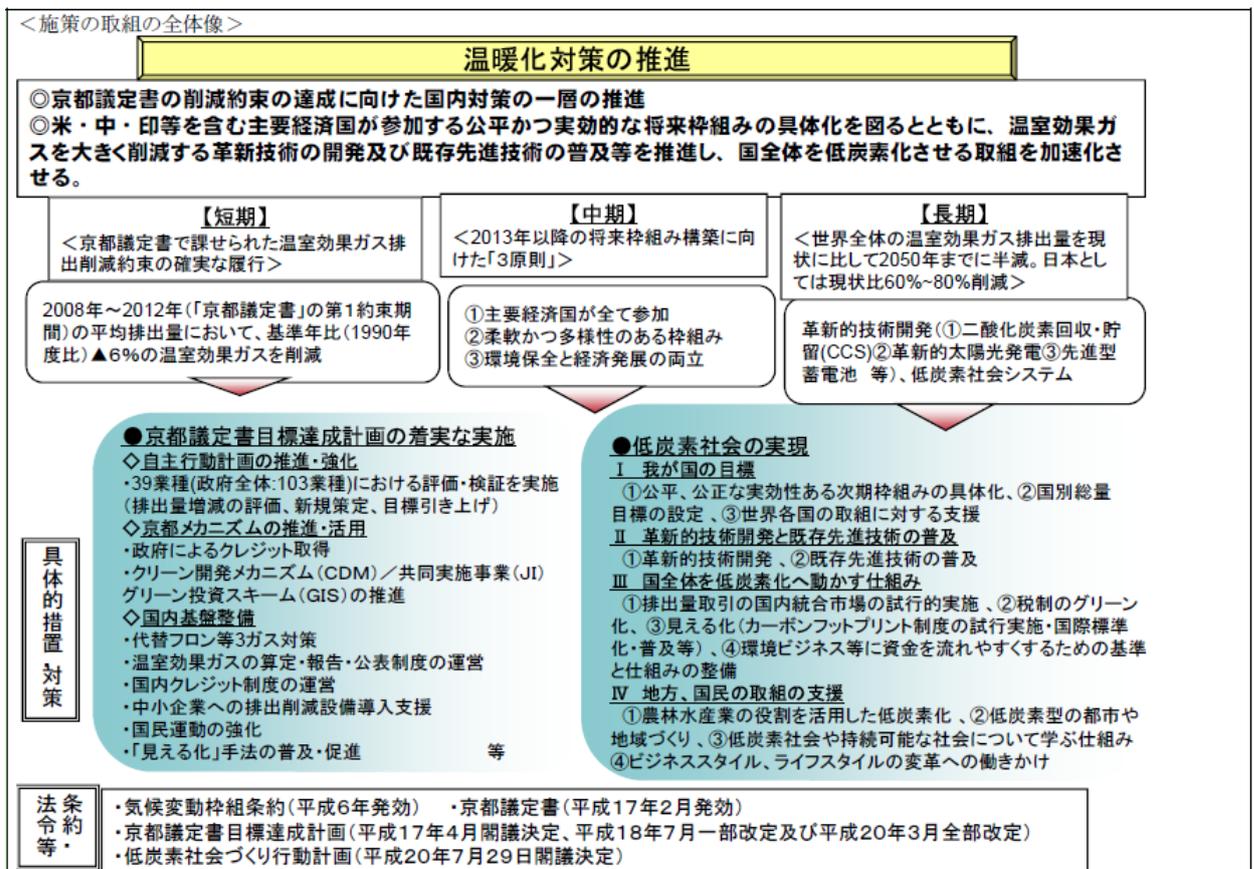


図1-1 平成22年度施策評価書（事後）に見られる温暖化対策の推進

表 1-1 事後評価書（平成 23 年度に実施した政策の評価書）

「資源エネルギー・環境政策」（抜粋）

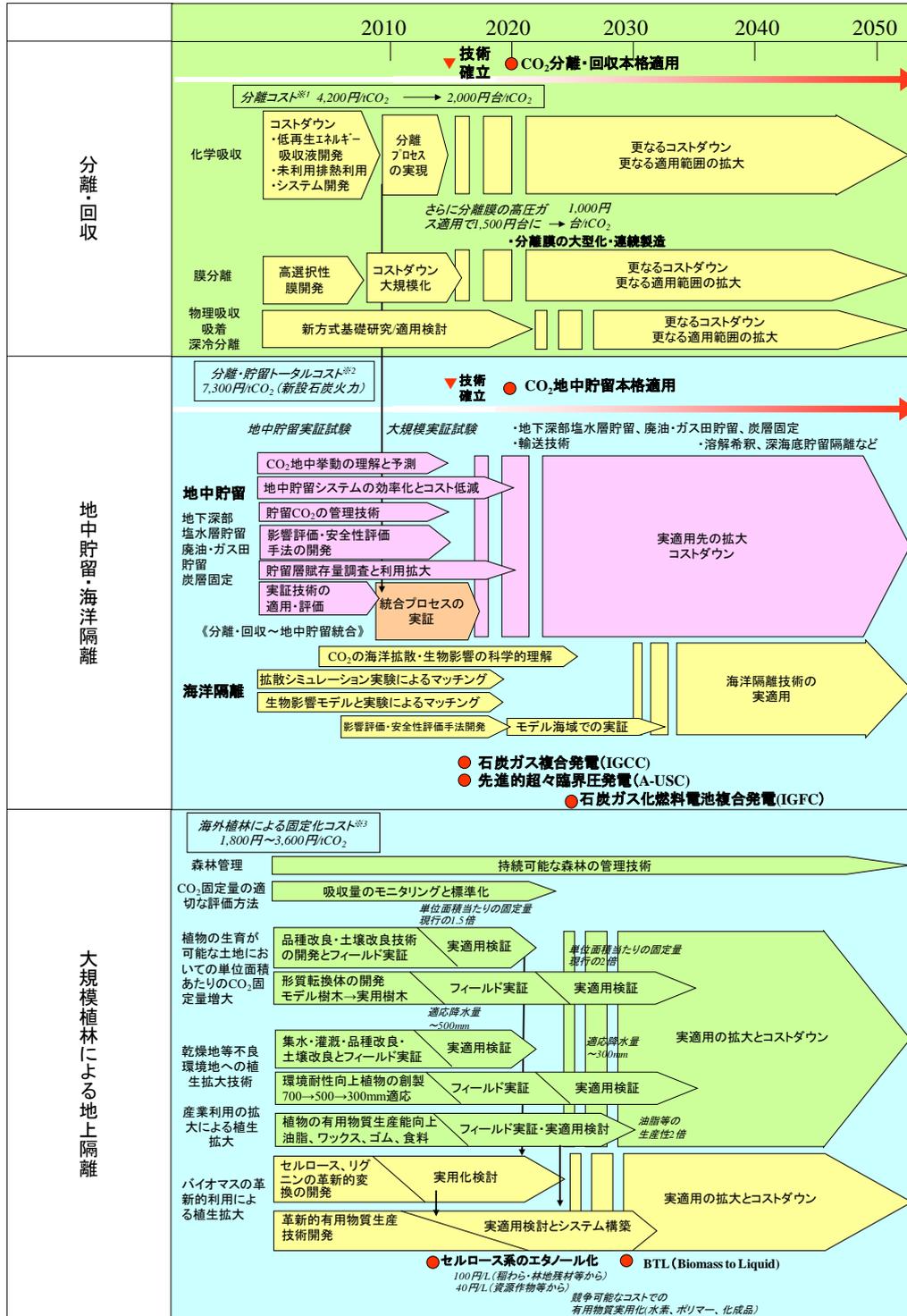
【環境政策】に係る政策軸の概要

○温暖化対策

温室効果ガスの排出削減に向けて、短期的には温室効果ガス排出削減に資する事業活動の促進、技術の開発・普及の推進、京都メカニズムの活用等によって「京都議定書」の 6%削減約束を達成するとともに、中期的には 2020 年から発効するすべての国が参加する将来枠組み構築に向けた国際交渉への対応と国内対策の検討、長期的には革新的な技術の開発と既存先進技術の普及を通じて地球全体での温室効果ガスの排出削減を実現し、将来にわたって我が国が地球温暖化問題に着実に対応しつつ、国際的に競争力ある経済活動を持続させることを目的とする

さらに、経済産業省では、技術開発を推進するにあたり「技術戦略マップ」を策定している。技術戦略マップは、新産業の創造やリーディングインダストリーの国際競争力を強化していくために必要な重要技術を絞り込むとともに、それらの技術目標を示し、かつ研究開発以外の関連施策等を一体として進めるプランを総合的な技術戦略としてとりまとめたもので、いわば、産学官の研究開発投資の戦略的実施のナビゲーターともいうべき俯瞰的ロードマップとなっている。平成 22 年 6 月に取りまとめた「技術戦略マップ 2010」の「環境」領域において設定された 4 つの政策目標のうちの「CO₂固定化・有効利用分野」の技術ロードマップにおいて、本プロジェクトは分離・回収技術として位置付けられている（図 1-2）。

CO₂固定化・有効利用分野の技術ロードマップ



※1 分離回収: 新設石炭火力(830MW)、回収量: 100万t-CO₂/年、7MPaまでの昇圧含む、蒸気は発電所の蒸気システムから抽出 [コストベース: 2001年]
 ※2 地中貯留: 上記分離回収コスト+パイプライン輸送20km+圧入(昇圧15MPa、10万t-CO₂/年・井戸) [コストベース: 2001年]
 ※3 植林: 植林周期7年伐採+萌芽再植林、バイオマス生産量20m³/ha・年、植林管理費17-31%、用地リース費: 50\$/ha・年)

<出典: 技術戦略マップ 2010>

図 1-2 CO₂固定化・有効利用分野の技術ロードマップ

1-3 国の関与の必要性

1-3-1 背景

地球温暖化問題は、その予想される影響の大きさや深刻さに鑑み、人類の生存基盤に関わる最も重要な問題の一つとなっている。我が国は、平成17年2月に発効した地球温暖化対策のための国際的な枠組である京都議定書を締結し、1990年比で6%削減を達成する国際的な約束を果たすべく取り組みを進めている。京都議定書第一約束期間以降の国際的な枠組については現在交渉中であるが、将来にわたっても我が国が地球温暖化問題に着実に対応し、温室効果ガスの削減努力を続ける必要がある。

こうした状況の下、二酸化炭素回収・貯留（CCS）技術は、大規模に地下深部の帯水層にCO₂を貯留する手法として、世界各国で注目され、実証試験や実用化検討が行われており、わが国でも1,461億トンの概算貯留可能量^{*}、世界全体では2兆トンの貯留可能量^{*}が算出されている有望なCO₂削減技術と位置づけられている。一方で、CCS実用化に当たっては、全コストの6割以上を占めるCO₂分離回収コストの大幅な低減が不可欠である。

※それぞれ平成17年度RITE試算及び2005年IPCCレポート

1-3-2 CO₂分離・回収技術に対する国の関与の必要性

CCSは、追加的エネルギーコストを掛けてCO₂を削減するといった点において省エネルギーや再生可能エネルギーとは異なる温暖化対策に特化した技術であり、CCSの導入には経済的インセンティブが働かない。また、CCSの実用化に当たっては、技術開発による安全性向上やコストダウンのほか、制度的、社会的課題を解決する必要がある。実用化時点でのビジネスモデルも明確になっていない現時点では、民間企業には技術開発のインセンティブが働きにくく、国が主導し、実用化に向け産学の力を結集し事業を進めていく必要がある。

2. 研究開発目標

2-1 研究開発目標

二酸化炭素回収・貯留（CCS）は地球温暖化対策の重要なオプションとして国際的・国内的に認識されているが、実用化に当たっては実施に要するコスト、特に全体の6割以上を占める分離・回収コストの低減が課題となっている。

「二酸化炭素分離膜モジュール研究開発事業」では、圧力を有するガス源であるIGCC等から、従来技術の3分の1程度の1,500円/t-CO₂以下でCO₂を分離・回収する技術の確立を目指す。合わせて、1,000円/t-CO₂以下でCO₂を分離・回収する技術を確認する（図2-1）。

CO₂回収型石炭ガス化炉の概念

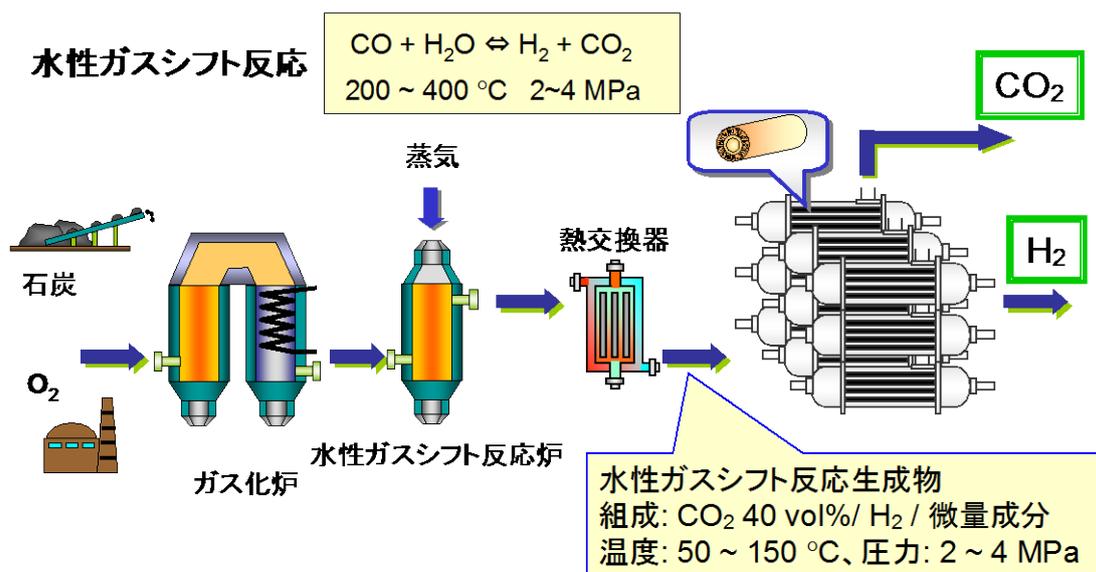


図2-1 CO₂回収型IGCCの概念図

「二酸化炭素分離膜モジュール研究開発事業」（平成23年度～平成26年度）においては、「分子ゲート機能CO₂分離膜の技術研究開発」（平成18年度～平成22年度）で開発した分子ゲート機能CO₂分離膜（図2-2）や試作モジュールを基礎として、膜素材のCO₂の透過性や選択性などの高性能化を図るとともに、膜の連続製造技術の開発や膜モジュール（図2-3）の耐圧・耐久化、大型化を図るなど実用化に向けた研究開発を行う。

CO₂分子ゲート機構によるCO₂分離

CO₂分子ゲート機能: 膜中のCO₂分子が \Rightarrow H₂の透過を阻止
CO₂は通過可能

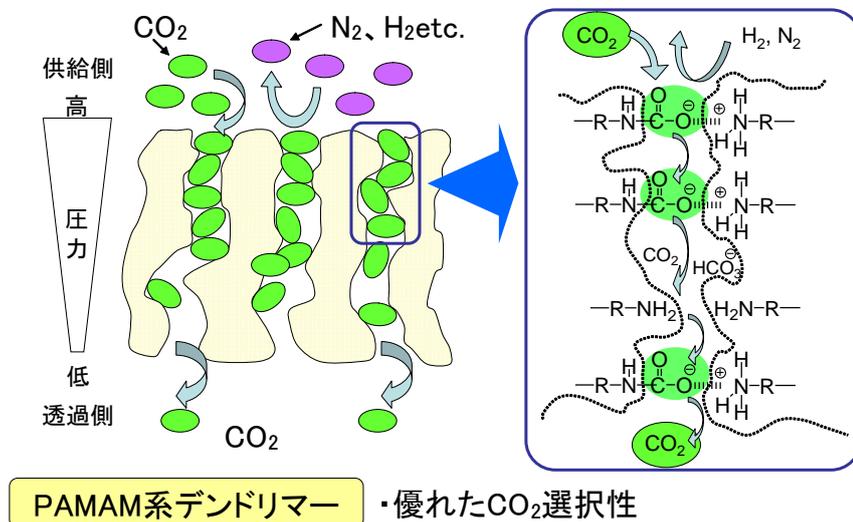


図2-2 CO₂分子ゲート機構によるCO₂分離

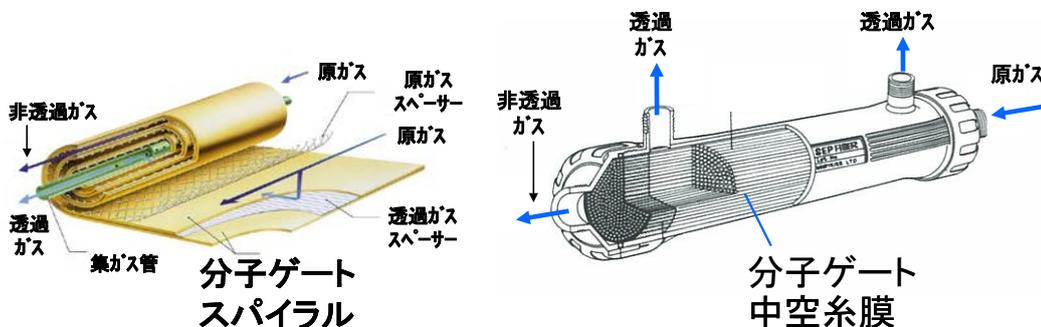


図2-3 膜モジュールの概念図

具体的には、分子ゲート機能CO₂分離膜の技術研究開発で得られた「単膜の基本性能の確認」、「膜モジュールの基本構造の完成」「膜モジュールの評価手法の開発」を受けて「二酸化炭素分離膜モジュール研究開発事業」（平成23年度～平成26年度）を実施する。その事業目標は以下の通りである。

(1) 分離膜技術の確立

分子ゲート機能 CO₂ 分離膜の技術研究開発における「単膜の基本性能の確認」を受けて、膜モジュール性能が発揮できるように分離膜の改良を行いつつ、分

子ゲート機能 CO₂ 分離膜の実用化に向けて実システムで要求される耐不純物性、耐乾燥性、耐圧性、耐久性等の「プロセス適合性」を確立する。合わせて、1,000 円/t-CO₂ 以下で CO₂ を分離・回収する技術を確認する。具体的には、(1) 構造解析、分離メカニズム等の検討、(2) CO₂ 分離性能の改良、(3) プロセス適合性の検討を行う。

(2) 実機膜モジュールの開発

連続安定製膜に必要な要素技術を確立して、実機膜モジュールに供する分離膜の安定製造を可能とする。具体的には、(1) 安定製膜のための要素技術検討、(2) 膜モジュール構造の検討、(3) 試験膜モジュールの試作と評価を行う。

(3) 膜分離システムの開発

膜分離システムの適用調査、プロセス検討データの取得により、開発した分離膜モジュールに最適なシステム設計を行う。具体的には、(1) 膜モジュールガスフローの検討、(2) 膜分離システムの検討を行う。

【 経 緯 】

「分子ゲート機能CO₂分離膜の技術研究開発」(平成18年度～平成22年度)では、従来技術の3分の1程度の1,500円/t-CO₂にCO₂回収コストを低減することを目的に、「革新的ゼロ・エミッション石炭火力発電」等の圧力ガスから効率良くCO₂を分離する分離膜モジュールの開発と膜分離システムの実用化の可能性を確認することを目標として実施した。

この事業は、平成18年度から平成20年度までは(財)地球環境産業技術研究機構において、補助事業として分子ゲート機能CO₂分離膜の先導的研究を行った。平成21年7月に中間評価を受けたところである。

引き続き、平成20年補正予算から平成22年度までは補助事業推進体制を整備し、新日鉄エンジニアリング(株)において開発促進の観点から研究開発を進めた。

そして、平成22年度に「二酸化炭素分離膜モジュール研究開発事業」の事前評価を行い、具体的な事業目標等を上記の如く定め委託事業として推進しているところである。この研究開発の経緯を図2-4、技術研究開発の変遷を図2-5に示す。

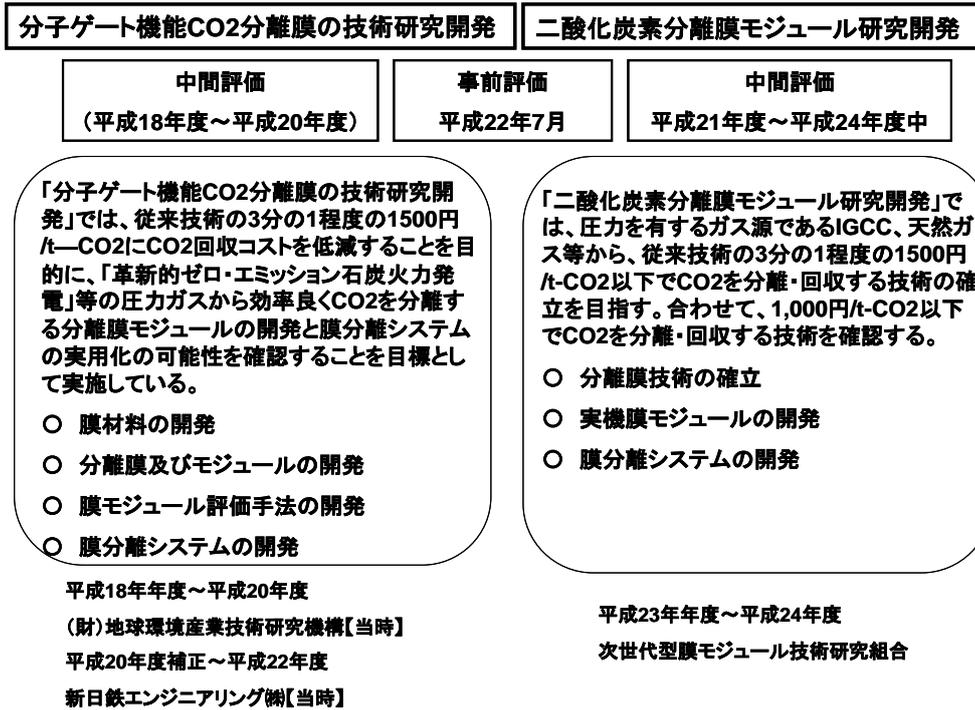


図2-4 研究開発の経緯

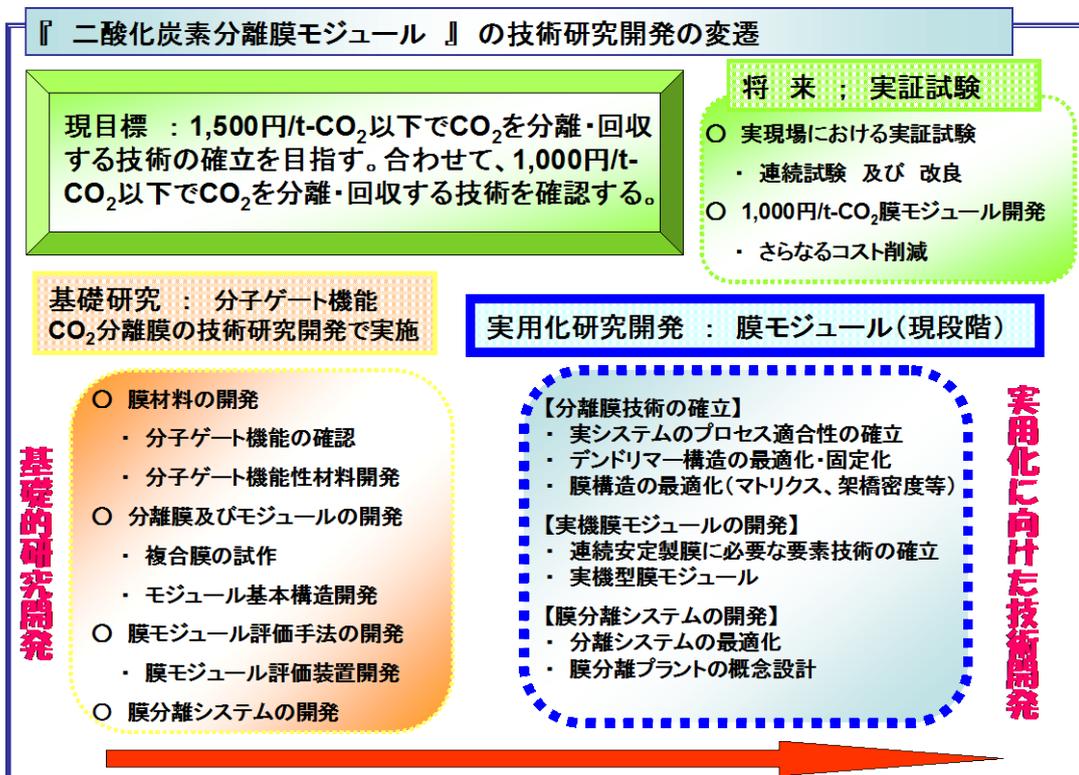


図2-5 技術研究開発の変遷

2-1-1 全体の目標設定

先に述べたプロジェクト全体の目標を表 2-1 にまとめて以下に示した。ここで、中間評価時点とは、平成 24 年度 10 月末とする。

表 2-1 全体の目標

項目	目標・指標 (事後評価時点)	目標・指標 (中間評価時点)	設定理由・根拠等
1. 分離膜技術の確立	分離・回収コスト 1,500 円/t-CO ₂ 以下を実現するための膜モジュール性能が発揮できるように分離膜の改良を行いつつ、分子ゲート機能 CO ₂ 分離膜の実用化に向けて実システムで要求される耐不純物性、耐乾燥性、耐圧性、耐久性等の「プロセス適合性」を確立する。合わせて、1,000 円/t-CO ₂ 以下で CO ₂ を分離・回収する技術を確認する。	システム検討を基に、分離・回収コスト 1,500 円/t-CO ₂ 以下を達成するための要求膜性能を見出し、デンドリマー化学構造、化学固定、マトリクス改良並びに架橋密度の検討を行い分離膜の改良を行う。合わせて、プロセス適合性に関する調査検討を行う。	「分子ゲート機能 CO ₂ 分離膜の技術研究開発」の成果を受けて、実システムに適用できる分離膜にするためには実システムで要求される耐不純物性、耐乾燥性、耐圧性、耐久性等のプロセス適合性を確立することが必要である。
2. 実機膜モジュールの開発	連続安定製膜に必要な要素技術を確立して、実機膜モジュール（直径 10cm、長さ 1m）に供する分離膜の安定製造を可能とする。	連続安定製膜に必要な要素技術課題を抽出するために、実機型膜モジュール（直径 10cm、長さ 20cm 程度）を試作する。同時に、その性能試験を行い均一膜製造に関する課題を抽出する。	膜性能にバラツキがあると、膜モジュール性能が著しく低下するため、連続安定製膜のための要素技術の確立が必要である。
3. 膜分離システムの開発	分離・回収コスト 1,500 円/t-CO ₂ 以下を達成するために、膜分離システムの適用調査、プロセス検討データの取得により、開発した分離膜モジュールに最適なシステム設計を行う。	分離・回収コスト 1,500 円/t-CO ₂ 以下を達成するための膜分離システムの最適化を行う。同時に、膜分離プラントの概念設計を行う。	分離膜モジュールの性能を最大限に引き出すには、膜分離システムの最適化が不可欠である。

2-1-2 個別要素技術の目標設定

個別要素技術の最終目標、中間目標および設定理由を表 2-2 に示した。

表 2-2 個別要素技術の目標

要素技術	目標・指標 (事後評価時点)	目標・指標 (中間評価時点)	設定理由・根拠等
1. 分離膜技術の確立			
1) 分離性能の改良	CO ₂ 分離・回収コスト 1,500 円/t-CO ₂ を達成する CO ₂ /H ₂ 選択性、CO ₂ 透過速度を有する複合膜を作製する。	CO ₂ /H ₂ 選択性が 30 であり、CO ₂ 透過速度が $7.5 \times 10^{-10} \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ の複合膜を作製する。	分離機能層の組成の最適配合、架橋方法等の検討とともに、製造ラインで使用が可能な方法の検討が必要。
2) 耐不純物性	IGCC 等における代表的な不純物組成に対する不純物耐性を付与する。	膜モジュールとしての耐不純物性試験を平成 25 年度以降に実施するため、中間評価時点の設定無し。	IGCC の場合は、イオウ成分、煤塵が分離膜性能に悪影響を与えることが懸念される。
3) 耐乾燥性	湿度 40%~80%RH の間で著しい機能の低下 (CO ₂ 透過性 50%以下) の無い分離膜を開発する。	膜中への水分子の保持に関して、プロセス面、材料面からの解決法を検討する。	分子ゲート機能は加湿条件で発現するが、分離膜で CO ₂ を回収する過程で H ₂ O 濃度が下がることから、低湿度で安定した性能を得る分離膜の開発が重要である。
4) 耐圧性	IGCC の高圧化 (4MPa) に対応した耐圧性を有する分離膜を開発する。	複合膜の耐圧性として 3MPa (現行の IGCC のガス圧 2.5MPa 以上として) を確認する。	ガス源の元圧をそのまま使用することが必要膜面積の低減となり、これは膜設備の小型化、CO ₂ 分離コストの低減にも繋がる。
5) 耐久性	1,000 時間以上の連続運転で著しい機能の低下の無い分離膜を開発する。	膜モジュールとしての耐久性試験を平成 25 年度以降に実施するため、中間評価時点の設定無し。	分離膜の耐用年限は、CO ₂ 分離コストに影響することから、耐用年数が長い分離膜の開発が必要となる。
6) その他のプロセス適合性	耐熱性の向上 (100°C 以上) を目指す。	膜材料の耐熱性を評価する。また、耐熱性材料について検討する。	高温での使用が分離膜の性能を生かすために有効である。
7) 1,000 円/t-CO ₂ 以下を可能とする分離膜 (CO ₂ /H ₂ 選択性が 100) の開発	分離膜の CO ₂ /H ₂ 選択性が 100 以上である分離膜の膜素材、支持膜材料を開発する。	システム検討を行い、1,000 円/t-CO ₂ 以下の目標を達成するための要求膜性能を検討する。	CO ₂ /H ₂ 選択性が 100 の分離膜を開発することで、CO ₂ 分離・回収コストが 1,000 円/t-CO ₂ 以下となる。

2. 実機膜モジュールの開発			
1) 連続安定製膜	分離膜を連続安定製造するために必要となる要素技術の抽出とその要素技術を検討する。	実機型膜モジュール（直径10cm、長さ20cm程度）を試作し、膜の均一性を把握し、塗工技術を検討する。	ラボレベルで開発した膜素材、製膜技術を用いて、実機膜モジュールに供する分離膜を連続に安定的に製造することが必要である。
2) 膜モジュールの大型化	膜長が1m、直径が10cmの膜モジュールを製造する。	実機型膜モジュール（直径10cm、長さ20cm程度）を試作し、膜モジュールの大型化に伴う技術課題を抽出する。	分離膜のコスト削減は、単位体積当りの膜面積を大きくすることで達成されるので、そのために、膜モジュールの大型化が重要となる。
3) 実機型膜モジュール	実機型膜モジュール（直径10cm、長さ20cm程度）を製作して、実システムあるいは近似した状態での試験を行い、実機型膜モジュールの技術を確認する。	実機型膜モジュール（直径10cm、長さ20cm程度）を試作し、モジュール性能試験を行う。	実機型膜モジュールの技術確立のために、実機型膜モジュールの製作が必要である。
3. 膜分離システムの開発			
1) 膜分離システムの検討	実システムを調査し、開発した分離膜でのプロセス検討等から分離膜システムの最適化を行う。	シミュレーション技術等を用いて、膜モジュールの性能に対するガス流体条件等を検討する。	分離膜モジュールの性能を最大限に引き出すには、分離膜システムの最適化が不可欠である。
2) 膜分離プラントの概念設計	膜分離プラントの概念設計を行い、CO ₂ 分離・回収コスト、エネルギーの両面から、膜分離システムの有効性を確認する。	膜性能とCO ₂ 分離・回収コストとの関係を推算し、膜分離プラントの概念設計を行う。	実用化のためには膜分離システムの有効性確認が必要である。

3. 成果、目標の達成度

3-1 成果

3-1-1 全体成果

「二酸化炭素分離膜モジュール研究開発事業」（平成 23 年度～平成 26 年度）では、分離膜技術の確立、実機膜モジュールの開発、膜分離システムの開発を行い、以下の成果を得た。

（1）平成 23 年度～平成 24 年 10 月までの成果

① 分離膜技術の確立

システム検討を基に、分離・回収コスト 1,500 円/t-CO₂ 以下を達成するための要求膜性能を見出した。デンドリマー化学構造、化学固定、マトリクス改良並びに架橋密度の検討等による分離膜の改良によって分離性能を向上させ、大気圧条件において目標分離性能（CO₂/H₂ 選択性が 30 であり、CO₂ 透過速度が $7.5 \times 10^{-10} \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ ）を達成した。合わせて、耐乾燥性の解決法の立案、3MPa 以上の耐圧性の確認、120℃までの耐熱性の確認など、プロセス適合性に関する調査、検討を行った。

② 実機膜モジュールの開発

連続安定製膜に必要な要素技術課題を抽出するために、実機型膜モジュール（直径 10cm、長さ 20cm 程度）を試作した。また、モジュール性能試験を行い、分離性能を確認すると共に、分離膜性能のバラツキなどの技術課題を抽出した。

③ 膜分離システムの開発

シミュレーションによる流れ解析を行い、膜モジュールのスウィープ構造に対するガス流体条件等を検討した。

分離・回収コスト 1,500 円/t-CO₂ 以下を達成するためのシステム検討を行い、膜性能と CO₂ 分離・回収コストとの関係を推算し、要求膜性能を明らかにした。また、膜分離プラントの基本設計を行った。

（2）「分子ゲート機能 CO₂ 分離膜の技術研究開発」中間評価（平成 18 年度～平成 20 年度）以降の成果

① 単膜レベルの段階で分離性能 CO₂/H₂ 選択性が 30 ($\alpha=30$) であり、CO₂ 透過速度が $7.5 \times 10^{-10} \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ の単膜の基本性能を確認することを目標に研究

開発を進め、単膜レベルで分離性能 CO_2/H_2 選択性が 15 であり、 CO_2 透過速度が $5 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ の耐圧型複合膜を作製した。そして、性能試験を元に、単膜の基本性能を確認し、目標性能達成のための指針を明らかにした。

- ② 膜モジュールを試作し、モジュール構造としての特性評価を実施して、膜モジュールの基本構造を完成した。
- ③ 膜モジュールの評価手法を確立するために、模擬ガス試験装置等を設計・製作した。そして、試作膜モジュールの性能評価を行った。システム検討の結果、 CO_2/H_2 選択性が 30、 CO_2 透過速度が $7.5 \times 10^{-10} \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ の膜モジュール性能を有すれば 2 段階プロセスで CO_2 回収コストを 1,500 円/t- CO_2 に低減できることを確認した。

3-1-2 個別要素技術成果

1) 分離膜技術の確立

膜モジュール性能が発揮できるように分離膜の改良を行った。耐不純物性、耐乾燥性、耐圧性、耐久性等の「プロセス適合性」に関して調査及び検討を行った。また、システム検討を行い、目標を達成するための要求膜性能を検討した。

(実施内容)

1. 1) 分離膜の改良
1. 2) プロセス適合性の検討

1. 1) 分離膜の改良

効率的な CO_2/H_2 分離が可能な分離膜の候補として、「分子ゲート機能 CO_2 分離膜」がある。図 2-2 に、分子ゲート機能 CO_2 分離膜の概念を示した。分子ゲート機能 CO_2 分離膜では、 CO_2 がガスの通路を占有して、 H_2 の透過を阻止するという機能を有している。膜分離の特性として、 CO_2 自体は圧力差で膜を透過することが可能であるが H_2 は透過を阻止されるため、膜の透過側で高濃度の CO_2 を得ることが可能となる。分子ゲート機能の発現が期待される材料として、ポリアミドアミン (PAMAM) デンドリマーに着目し、ポリエチレングリコール (PEG) 系とポリビニールアルコール (PVA) 系のデンドリマー内包型分離膜を研究してきており、 CO_2 透過速度と CO_2/H_2 選択性が共に世界トップレベルである。

分離性能を向上させるために、分離膜の改良を行った。平成 21 年度以前は、PEG 系材料を中心に使用して分子ゲート膜を作製していた (図 3-1)。

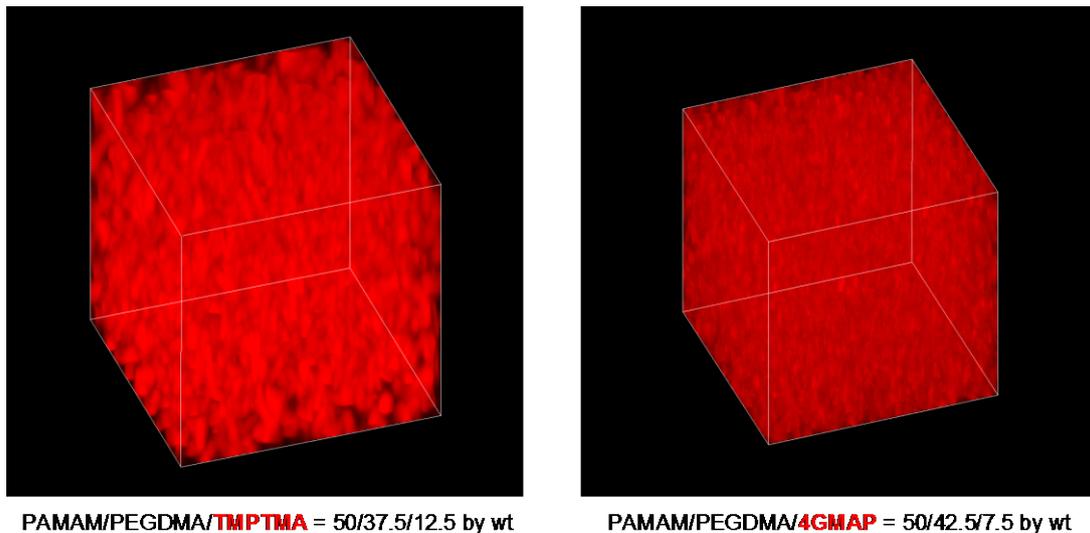


図 3-3 TMPTMA および 4GMAP 含有高分子膜の LSCM 像
 染色 : PEG 相、測定領域 : 22 x 22 x 22 μm

1. 1. 2) PEG 系分子ゲート膜の薄膜化検討

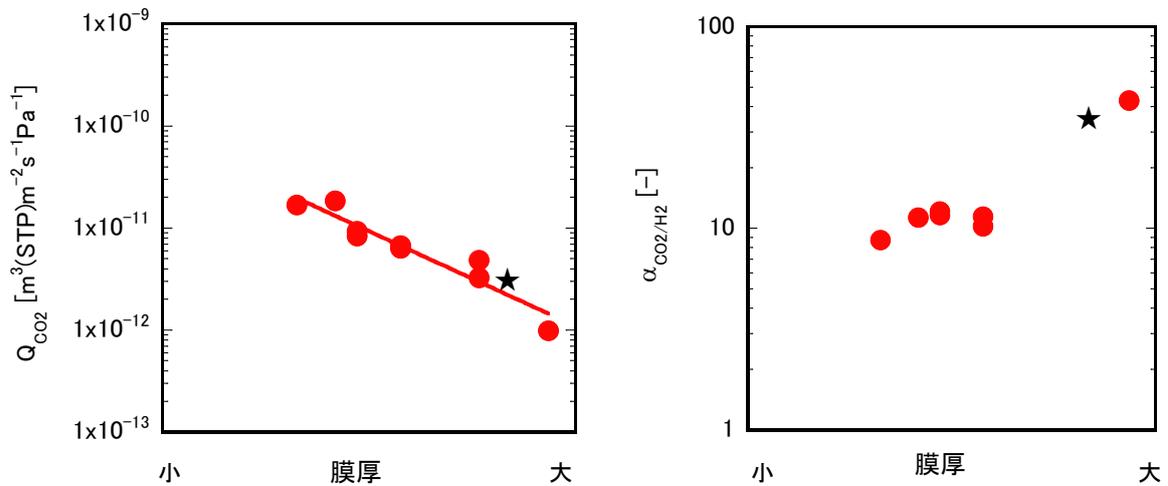
膜透過が拡散律速の場合において、 Q_{CO_2} は、

$$Q_{CO_2} = \frac{SD}{L} (p_{CO_2, feed} - p_{CO_2, perm})$$

(ここで、 Q_{CO_2} : CO_2 のパーミアンス、 S : CO_2 の溶解度係数、 D : CO_2 の拡散係数、 L : 膜厚、 $p_{CO_2, feed}$: 供給側における CO_2 分圧、 $p_{CO_2, perm}$: 透過側における CO_2 分圧)

と表され、 CO_2 の膜透過が拡散律速の場合には、 Q_{CO_2} は膜厚に反比例することになる。従って、薄膜化を行うことにより、膜性能評価において Q_{CO_2} と膜厚が反比例するか否かを調べた。

4GMAP を用いた PEG 系分子ゲート膜の膜厚と CO_2 のパーミアンス (Q_{CO_2})、分離係数 (α_{CO_2/H_2}) との関係を図 3-4 に示す。



★: 基準(TMPTMA系)

図 3-4 4GMAP を用いた PEG 系分子ゲート膜の膜厚と Q_{CO_2} 、 α_{CO_2/H_2} との関係

図 3-4 から、膜厚が減少すると Q_{CO_2} は増加することが確認出来る。膜厚と Q_{CO_2} は相関関係があるものの、拡散律速の式に基づき反比例するはずであるが、実際には反比例しない ($Q_{CO_2} \propto \text{膜厚}^{-0.62}$) ことが確認された。また、分離係数についても薄膜化に伴い 12 程度に低下した。これは、H₂ のパーミアンス (Q_{H_2}) が膜厚に反比例するため (拡散律速)、薄膜化に伴い、 Q_{H_2} の増加が Q_{CO_2} の増加よりも大きくなるためと考えられる。

このことから、薄膜化によって分離性能を向上させるためには、CO₂ の透過を拡散律速にすることが必要と考えられた。平成 23 年度は、このための種々の方策を検討した。その結果、分離性能を向上させるための膜素材として化合物 A の添加が有効であることを見出した。

なお、平成 23 年度以降の分離性能評価では、実験の安全上の観点から H₂ ではなくヘリウム (He) を使用している。H₂ と He の分子サイズには大きな違いがなく (H₂: 2.9 Å、He: 2.6 Å)、ガス透過性にも大きな違いがないため ($Q_{He} \approx 0.8 Q_{H_2}$)、He は H₂ の代替ガスとして妥当である。

化合物 A を添加した PEG 系分子ゲート膜における、膜厚と分離性能との関係を図 3-5 に示す。

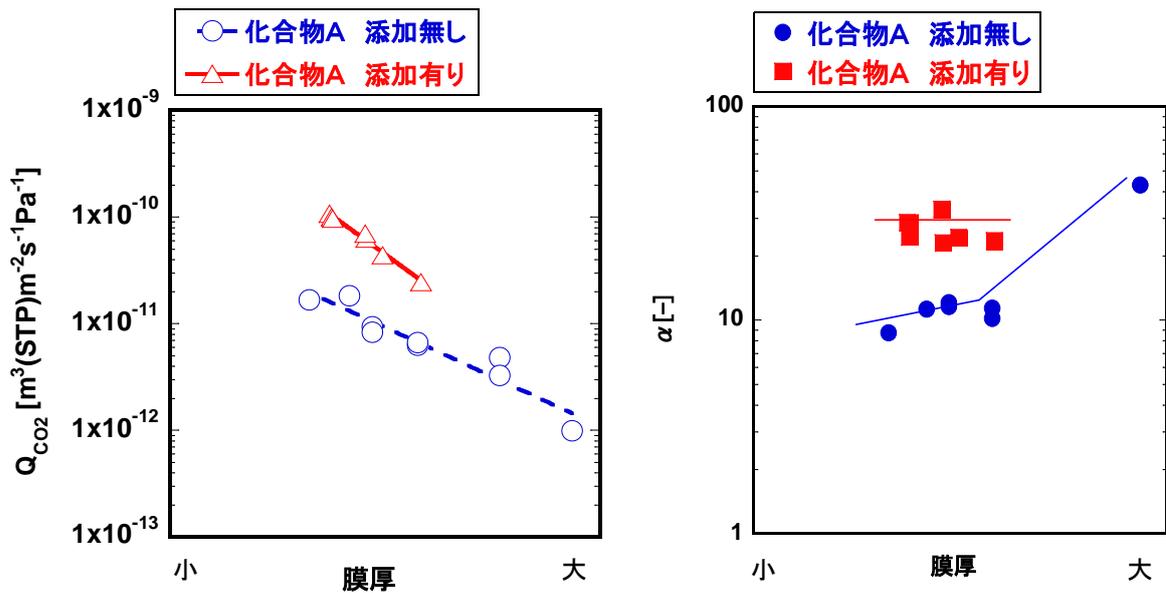


図 3-5 PEG 系分子ゲート膜の分離性能の膜厚依存性

化合物 A 添加膜の Q_{CO_2} は膜厚に反比例した。従って、化合物 A を添加した分子ゲート膜においては、CO₂ の膜透過が拡散律速になっていることが分かった。また、化合物 A 添加膜では、薄膜化によって高い分離係数（30 前後）を維持したまま Q_{CO_2} を増加出来ることが確認された。

化合物 A を添加することで、薄膜化によって分離係数を低下させずに CO₂ 透過速度を増加できることを見出した。

以上の結果を受け、更なる薄膜化を検討した（図 3-6）。

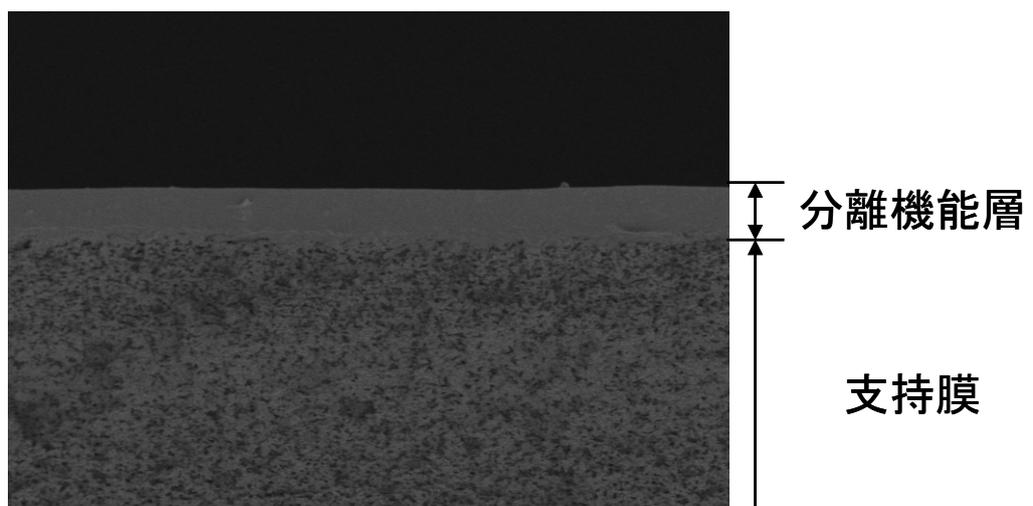


図 3-6 PEG 系分子ゲート膜断面の SEM 写真

断面観察結果より、作製した薄膜は全体的に均一な膜厚があることが確認できた。また、膜表面には膜欠陥は見られなかった。

ある膜厚以下では、 Q_{CO_2} 、 Q_{He} 共に頭打ちとなったが、分離係数は $\alpha > 20$ を維持することが出来た（図 3-7）

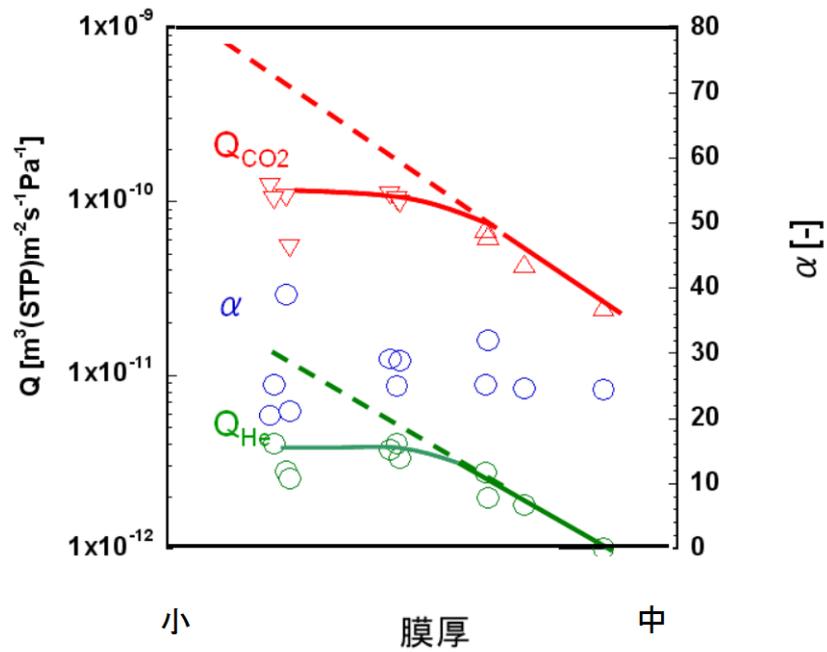


図 3-7 分離性能の膜厚依存性

PEG 系分子ゲート膜の膜材料の改良による分離性能向上を図 3-8 に示す。膜材料の改良と薄膜化によって、分離性能は、 Q_{CO_2} について 1.0×10^{-10} ($\alpha_{CO_2/He} = 40$)、分離係数については $\alpha_{CO_2/He} = 48$ ($Q_{CO_2} = 4.7 \times 10^{-11}$) まで向上させることができた。

以上を総括すると、平成 21 年度は相溶性が悪くマクロ相分離を生じたために分離性能が低かった。平成 22 年度は新規相溶性架橋剤 4GMAP を使用することでマクロ相分離を解消し、薄膜化によって分離性能がある程度向上した。さらに、平成 23 年度は、化合物 A を添加することで薄膜化によって分離性能が大幅に向上した。

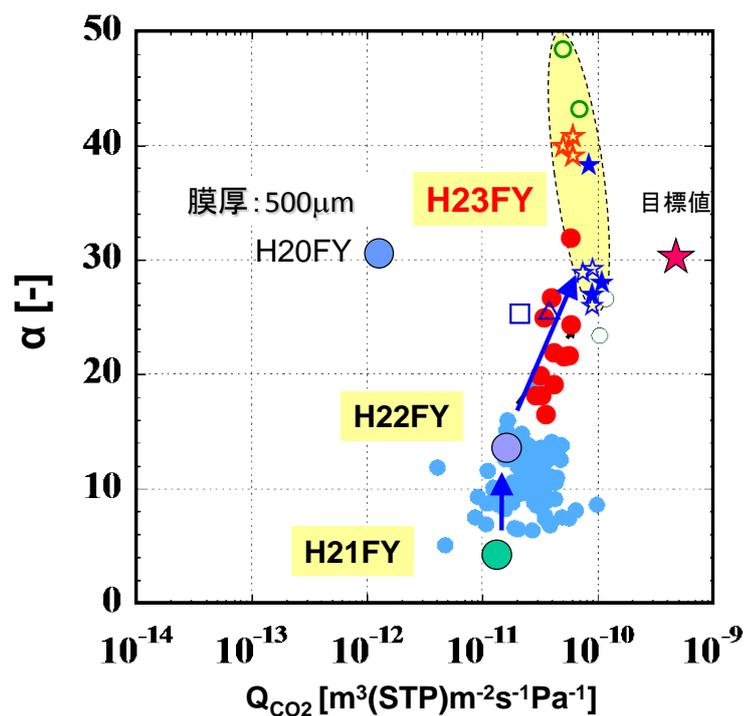


図 3-8 PEG 系分子ゲート膜の分離性能のまとめ

1. 1. 3) PVA 系分子ゲート膜の検討

これまで、PEG 系材料を中心に研究開発を行い分子ゲート機能などの基盤技術を確立できた。膜モジュールの大型化などの実用化のためには、PEG 系分子ゲート膜と並行して開発を進めてきた PVA 系分子ゲート膜の方が薄膜化が容易で実用化に適していることが分かり、これを中心に開発することにした。

PVA 系分子ゲート膜の膜素材と膜構造を図 3-9 に示す。

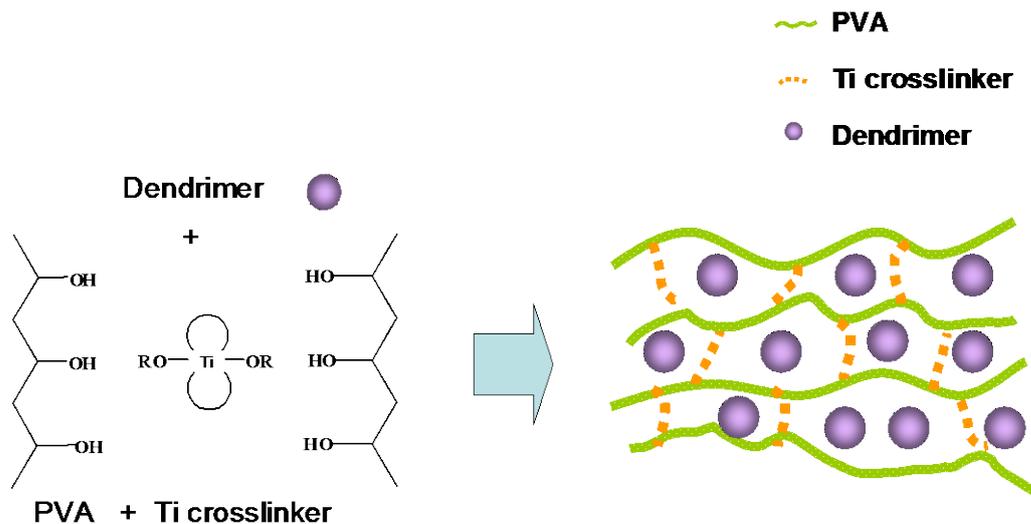


図 3-9 PVA 系分子ゲート膜の膜素材と膜構造

まず、Ti 系架橋剤を使用することによって PVA を架橋し、架橋 PVA ネットワーク中にデンドリマーを物理的に担持した。ただし、物理的に担持されたデンドリマーがブリードアウトする現象が観察された。

そこで、デンドリマーの保持安定性を向上させる目的で、デンドリマーを化学的に固定化できる膜材料を見出し、その配合条件で製膜手法を開発した。その結果、デンドリマーのブリードアウト量が大きく抑制できるようになった。

この改良された PVA 系分子ゲート膜に、PEG 系分子ゲート膜で得られた知見を組み合わせた PVA 系分子ゲート複合膜を開発した。同時に、PEG 系分子ゲート膜の開発で述べたごとく、薄膜化の検討も進めた。

特に、薄膜化の検討の過程で種々の塗工技術を検討した。これまでの製膜方法では石英硝子板に PEG 系素材をマトリクス材料とするデンドリマー液をはさみ、硬化させて膜を作り、これを支持膜に重ねて複合膜化するという手法（転写法）がとられていた。この方法は使用する液量も少なく、配合を種々検討する必要のある研究段階での検討として優れた方法である。しかし、実用化のための大面積化を考えた場合には対応が難しい。

また、膜厚を薄くすることで CO_2 透過係数の向上が期待できるが、転写法では $0.5\ \mu\text{m}$ といった膜厚を実現するのは困難なため、薄膜塗工を検討した。方法としてはマイクログラビア法、スロットダイ法、ディップコーティング法、アプリケーション法などが知られている。そこで、将来の連続製膜につながる方法としてディップコーティング法及びアプリケーション法を採用し、薄膜化の検討を進めた。

作製した PVA 系分子ゲート膜の分離性能の評価を行ったところ、大気圧条件において目標性能を達成した。

次に、分子ゲート膜中の架橋度の向上を検討した。架橋度を向上させた分離膜の分離性能評価を行った。結果を表 3-1 に示す。

表 3-1 架橋度を向上させた膜の分離性能

圧力 MPa	Q_{CO_2} $m^3 m^{-2} s^{-1} Pa^{-1}$	Q_{He} $m^3 m^{-2} s^{-1} Pa^{-1}$	$\alpha_{CO_2/He}$
0.1	3.7×10^{-10}	3.3×10^{-12}	110
0.4	1.7×10^{-10}	4.0×10^{-12}	42
0.7	1.5×10^{-10}	4.7×10^{-12}	31

この結果から、加圧下においても α は 30 以上を維持しているため、架橋度の向上による耐圧性付与ができたと考えられる。

架橋度の向上による構造変化を確認するために、顕微鏡赤外分光計を用いて膜組成分析を行った。

<顕微鏡赤外分光計>

装置：日本分光株式会社 製（光源 FT-IR-6100、赤外顕微鏡部 IRT-5000）

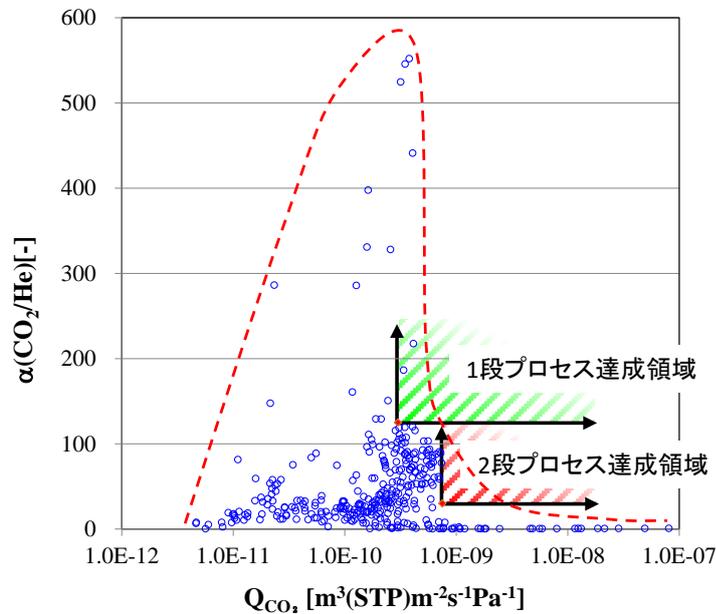
測定モード： ATR 法

IR 結晶： Ge

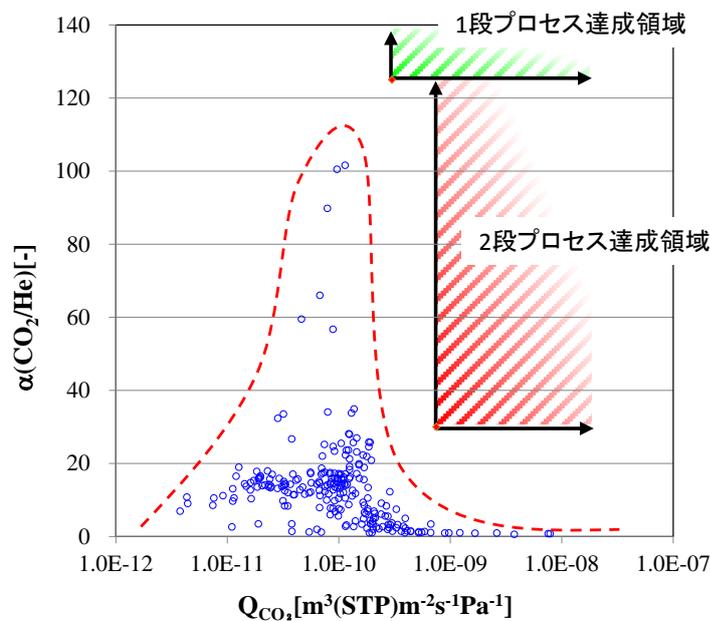
顕微アパーチャ： $125 \mu m \times 125 \mu m$

種々の架橋反応により架橋度が変化したことにより、架橋密度の制御など膜材料の改良を進め、耐圧性を向上させることにも成功した。

PVA 系分子ゲート膜の大気圧及び加圧下における分離性能を図 3-10 に示す。後述するシステム検討を元に、1 段プロセスと 2 段プロセスの 2 つのケースで分離・回収コスト 1,500 円/t-CO₂ 以下を達成出来る要求膜性能を図中に合わせて示す。



(a) 大気圧での評価結果



(b) 加圧下での評価結果

図 3-10 PVA 系分子ゲート膜の大気圧及び加圧下における分離性能

図 3-11 に示す通り、大気圧条件において 1 段プロセス、2 段プロセスの目標分離性能を共に達成した。加圧条件においても、2 段プロセスの分離係数については達成することが出来た。また、新たな方針に従い膜材料の改良によって高い分離係数 ($\alpha > 100$) を示す複合膜も得られており、1 段プロセスの目標値達成の方向性の目処をつけることが出来た。

1. 2) プロセス適合性の検討

プロセス適合性の検討では、1) 耐乾燥性、2) 耐圧性、3) その他のプロセス適合性に関して検討を行った。

1. 2. 1) 耐乾燥性

分子ゲート膜は湿度 90%前後の高湿度で高い分離性能を発現する。このため、耐乾燥性の付与が重要である。耐乾燥性について解決するため、プロセス面、膜材料の両面から検討した結果、プロセス面から水蒸気スイープ法、膜材料として高吸水性高分子マトリクスの可能性を見出した。

水蒸気スイープ法の検討

水蒸気スイープ法を検討するために、ガス透過試験を行った。分離性能評価試験に用いた装置の概略図を図 3-11 に示す。

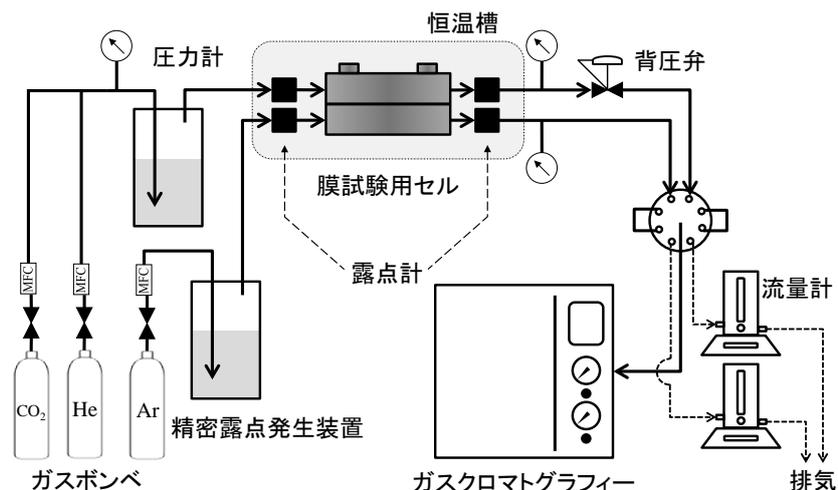


図 3-11 ガス透過試験装置

CO₂、He の混合ガスを供給ガスとして膜を装着した膜試験用セルの供給側にそれぞれ 80、20 mL/min の比で供給した。一方、膜の透過側にはスイープガス

として Ar ガスを 10 mL/min の流量で流した。膜試験用セル周辺の雰囲気は空気恒温槽で 40 °C に保温した。系内の圧力は背圧弁にて 0.1 または加圧下に設定した。また、供給ガスおよびスウィープガスは精密露点発生装置にて加湿し、セルの供給側入口および出口、スウィープ側の入口及び出口に設置した露点計で測定することで正確に相対湿度を制御した。セルの供給側出口およびスウィープ側の出口から得られたガスについてはそれぞれ GC-TCD にて分析を行った。また、供給ガス及びスウィープガスの流量を正確に測定するために石鹼膜流量計にて流量を測定した。

相対湿度の設定に関しては膜の供給側、透過側をそれぞれ 0、60、80、90 %RH に設定し、それぞれの相対湿度条件に対応するように A から P までの 16 種類を表 3-2 の通り割り当てた。

表 3-2 相対湿度対応表

透 \ 供	60	80	90	0
60	A	B	C	D
80	E	F	G	H
90	I	J	K	L
0	M	N	O	P

透：透過側入口（スウィープガス）、供：供給側入口（供給ガス）（数値は相対湿度[%RH]）

検討例として、分離性能に及ぼす透過側スウィープガスの湿度の影響を図 3-12 に示す。

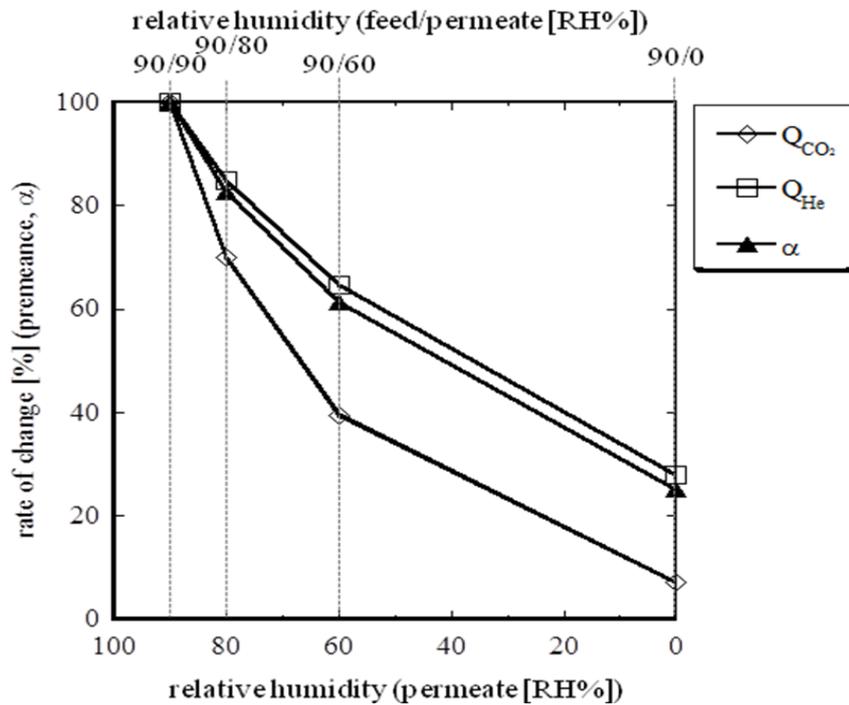


図 3-12 スウィープガスの相対湿度と分離性能の関係（相対値）

透過側の湿度を供給側と同じ 90%に制御することによって、分離性能の低下を防ぐことが出来ることが分かった。従って、水蒸気スウィープ法は耐乾燥性に対して有効な膜プロセス技術であることが分かった。後述するように、実機型膜モジュールの開発において、スウィープ構造を有する膜モジュールの試作を行っている（図 3-18）。

高吸水性高分子マトリクスを検討

材料面からは、高吸水性高分子マトリクスとしてヒドロゲルAを検討した。種々のヒドロゲルAの 40 °Cにおける水収着特性を検討した。結果を図 3-13 に示す。

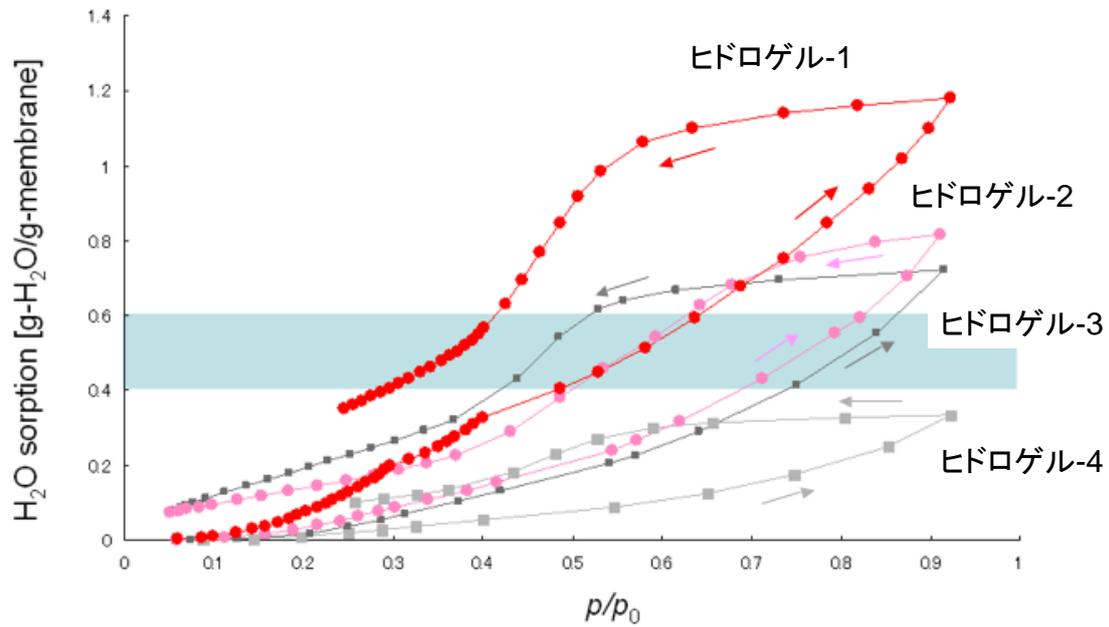
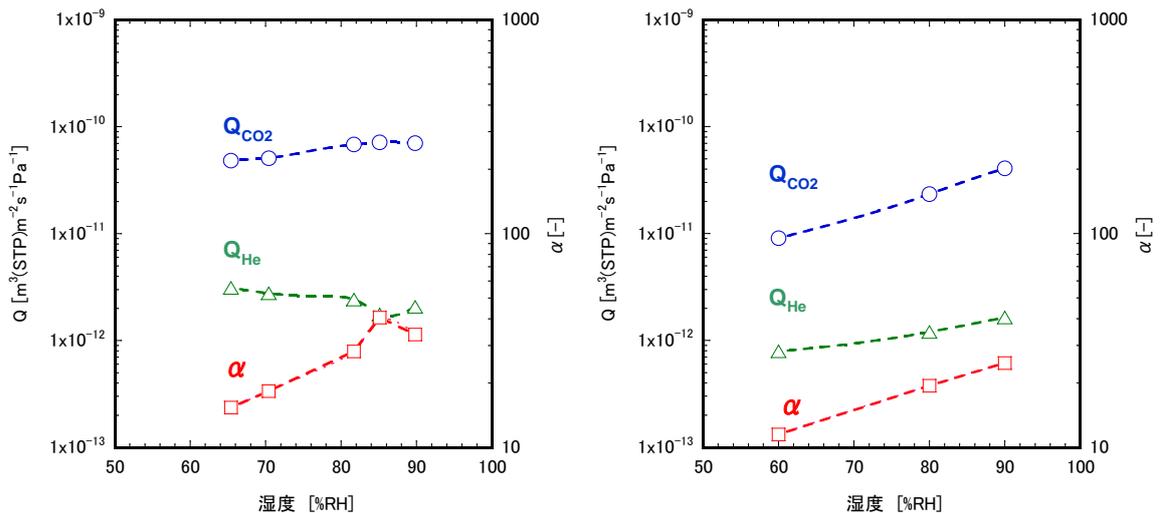


図 3-13 ヒドロゲルAの40°Cにおける水吸着等温線

上図より、ヒドロゲルAが高い吸水性を有することが確認された。

ヒドロゲルAを高分子マトリクスとする分子ゲート膜の分離性能の湿度依存性を図 3-14 に示す。



高分子マトリクス:
ヒドロゲルA (wt%)

高分子マトリクス:
PEGDMA/4GMAP = 42.5/7.5 (wt%)

図 3-14 ヒドロゲルAを高分子マトリクスとする膜の分離性能比較

図 3-15 に示すように、ヒドロゲルAのような高吸水性高分子マトリクスの使用により、より低い湿度においても著しい性能の低下の無い分子ゲート膜が得られた。

1. 2. 2) 耐圧性

複合膜の耐圧性については、京都研究室の保有する高圧試験装置を用いて確認した。

この結果、複合膜は 3MPa 以上でもバーストが無く安定しており、3MPa 以上の耐圧性を有することが確認できた。今後、膜モジュール試験にて耐圧性の検証を継続する。

1. 2. 3) その他のプロセス適合性

IGCC 用として、耐熱性に関して、以下の検討を行った。

デンドリマーや高分子マトリクス等の膜素材の耐熱性を確認するために、熱重量分析 (TGA) 等の分析を行い、各々 120°C まで分解せず、耐熱性を有することが判明した。

これを受けて、PEG 系分子ゲート膜 (厚膜) を作製し、分離性能の温度依存性を検討した。その結果を図 3-15 に示す。

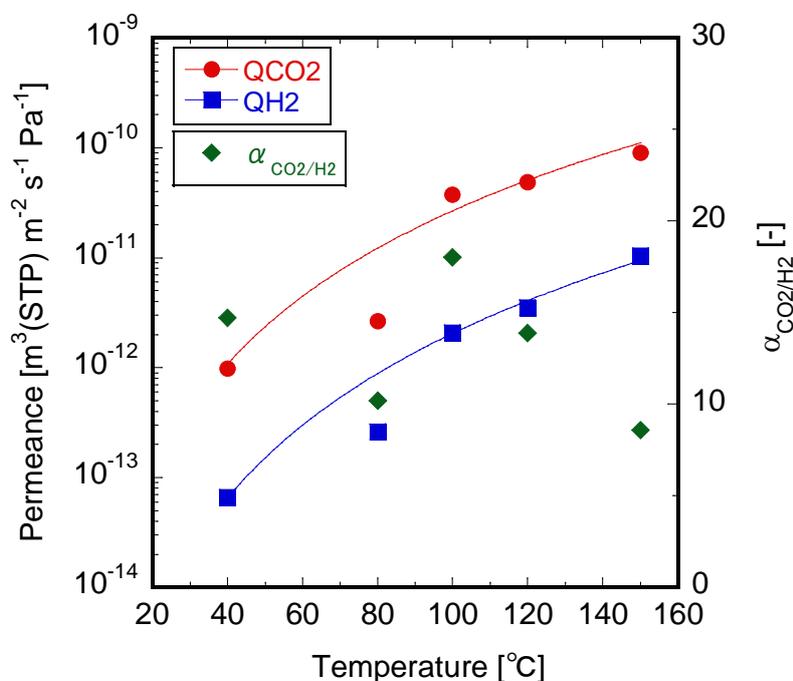


図3-15 PEG系分子ゲート膜 (厚膜、膜厚500μm) の分離性能の温度依存性

40℃から120℃までの間において、温度の上昇と共に、 Q_{CO_2} 、 Q_{H_2} 共に増加し、 α はほぼ一定であった。150℃付近から分離係数が低下するのは、上述したように、膜素材が120℃までしか安定性を保てず150℃では熱分解したためと考えられる。この結果、分離膜性能においても、耐熱性は120℃までであることが判明した。

耐不純物性については、平成25年度以降において、実機型膜モジュールで評価実施することになっているが、そのガス組成としてはNEDO等の公開情報を基に行うこととした。具体的には、CO 2.9 vol %、 N_2 , Air 7.0 vol %、 CH_4 0.4 vol %、 H_2O 0.7 vol %、 H_2S 30 vol ppm、COS 10 vol ppm等である。特に、膜性能低下原因として考えられるものは、 H_2S であると考えられる。このガス組成に関しては、膜モジュールのシステム検討に記載した。

尚、耐久性についても、平成25年度以降において、実機型膜モジュールで評価実施することになっている。

2) 実機膜モジュールの開発

実機膜モジュールの開発では、実機型膜モジュールを試作して、分離性能に影響の無い分離膜を連続安定製造するために必要となる要素技術の抽出を行った。また、膜モジュールの大型化を検討した。

(実施内容)

2. 1) 連続安定製膜
2. 2) 膜モジュールの大型化
2. 3) 実機型膜モジュール

2. 1) 連続安定製膜

PEG系分子ゲート膜、PVA系分子ゲート膜について、連続製膜プロセスを検討した。一例として、PEG系分子ゲート膜の連続製膜プロセスの概念図を図3-16に示す。各工程において、要素技術の抽出と開発検討を行った。具体的には、①支持膜（分画分子量）、②+④製膜溶液塗工（液の粘度、アプリケーション等）、③UV硬化（照射エネルギー等）、④製膜溶液、⑤加熱硬化（温度等）について検討した。

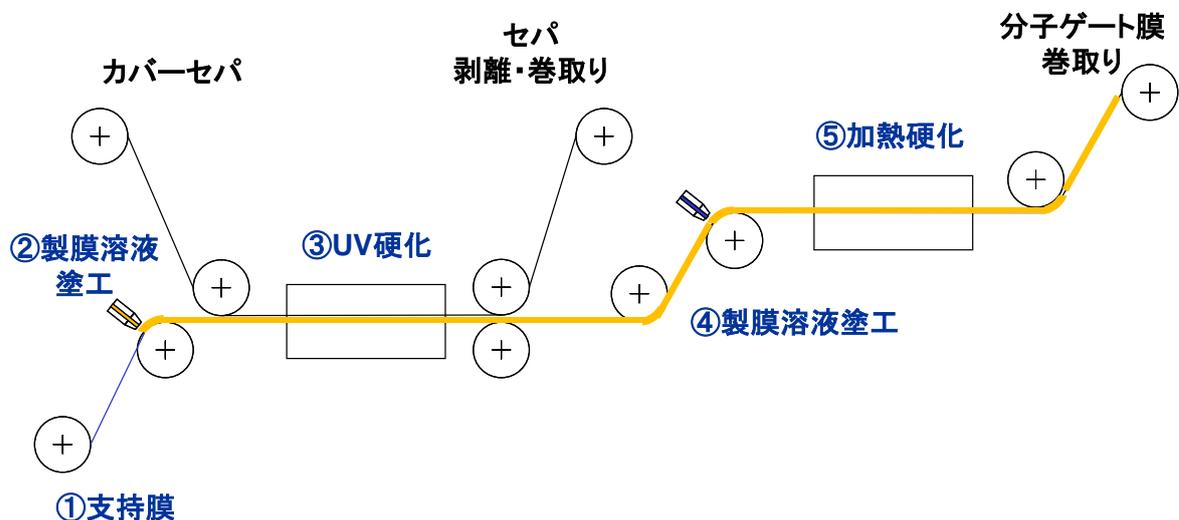


図 3-16 連続製膜プロセス（PEG系分子ゲート膜）概念図

本図は概念設計であり、膜モジュール大型化においても、既存技術の延長線上で対応できるプロセスである。

しかし、大型化に伴う、膜性能のバラツキ等の品質面での検討が必要なので、

実機型膜モジュールを製作する際にこれを検討することとした。

2. 2) 膜モジュールの大型化

実機型膜モジュール（直径 10cm、長さ 20cm 程度）を試作し、膜モジュールの大型化に伴う技術課題を抽出した。具体的には、スパイラルモジュール製作における、リーフ数、リーフ長さ、スペーサー構造・配置等を検討し、スパイラル膜モジュールとして組み上げ、膜モジュール構造としての評価を行った。

ここでは、特に、耐乾燥性に対するプロセス側からの解決法としてスウィープ対応型の膜モジュール構造の検討について述べる（図 3-17）。

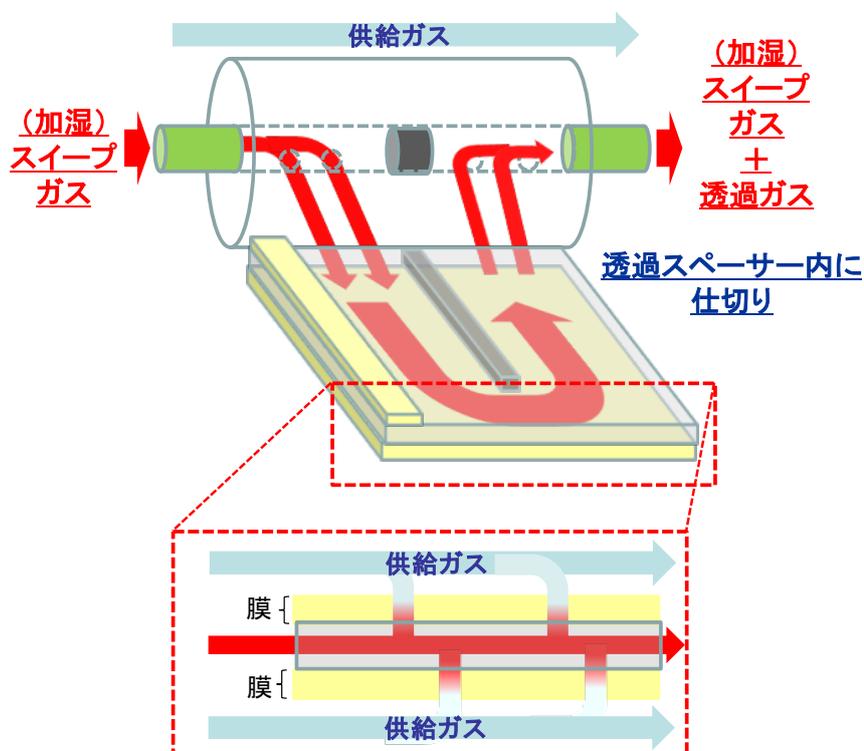


図 3-17 スウィープ対応型の膜モジュール構造（概念図）

膜モジュールの設計を行う上では平膜の性能を十分に発現しうる構造・機能を有していることが必要となる。現在開発を行っている分子ゲート膜では膜システムの湿度を制御できることやガス透過のドライビングフォースとなる膜間分圧差を維持出来るような構造を考慮することが重要である。湿度依存性の低い分離膜材料の開発が必要であるが、モジュール構造および膜分離システム全体においても相対湿度を保持できるようにする必要もある。

本項目では、1 リーフモジュールでスウィープ構造を検討し、モジュール性能が向上する結果を得たので、4 インチモジュールへのスケールアップを実施した。

スウィープ構造モジュールについて

分子ゲート膜の膜性能は供給ガスの相対湿度に依存する。具体的には相対湿度 80 %以上の高湿度の条件では分離性能が発現するが、低湿度では分離性能が発現しない。一方で、分子ゲート膜をモジュールにしたときに、膜の水蒸気透過速度が著しく高いためにモジュールの長さ方向で相対湿度が変化する現象が生じる。例えば、入口で相対湿度 80 %だった供給ガスが、出口で相対湿度 20 %に低下するというように、モジュールの出口側では分離性能が発現しない環境が生じる。

透過側への水蒸気の透過を防ぐために、透過側に加湿ガスを導入できるスウィープ構造のモジュールについて検討を行った。具体的には、図 3-18 に示すような集ガス管中心にキャップ、膜リーフの透過側スペーサー内に仕切りを入れることにより、透過側に加湿ガスを導入できる構造である。仕切りの位置、長さなどを調整することで透過ガスの流れ方を変えることができる。

スウィープ構造の利点としては、上述した湿度保持以外にも、透過ガスをスウィープすることで透過の駆動力である分圧差を大きく保つことが出来、モジュール性能の向上が期待される。

本項目では、従来構造のモジュールとスウィープ構造のモジュールの 2 種類を作製し、実際のモジュールとして透過側にスウィープガスを流すことにより、モジュール性能向上について検討を行い、4 インチモジュールへのスケールアップを行った。

モジュール性能評価および解体平膜性能評価

単膜性能はまだ目標値に達していないが、一定の値を再現する単膜の製造法（配合と膜作成方法）でモジュールを試作し、その評価を行った。供給には 40 °C、80 %R. H. の CO₂/He 混合ガスを導入した。透過側条件として、従来構造のモジュールに関しては透過側条件を、①大気開放および②真空ポンプで-90 kPaG まで減圧の 2 条件に設定した。スウィープ構造モジュールに関しては、③80 %R. H. の Ar ガスを透過側へ導入した。

モジュール評価結果を図 3-18～図 3-19 に示す。図中の①②③は上述の①②③にそれぞれ対応している。加圧のみでの評価結果に対し、真空ポンプおよび加湿スウィープでは分離係数およびパーミアンスが増加することが分かった。これは、真空ポンプおよび加湿スウィープをすることで透過側の CO₂ 濃度が下がり、透過のドライビングフォースである分圧差がつきやすくなったためであると考えられる。また、真空ポンプと加湿スウィープの差に関しては、モジュール内の湿度雰囲気による差であると考えられる。真空ポンプによる減圧では、透過側のガス濃度は下げられるが、同時に透過側の H₂O 濃度も下げてしまうため、供

給ガス中の水分が抜けて行ってしまう。加湿スウィープでは透過側のガス濃度を低くしつつ、H₂O を供給するため、供給ガス中の水分は透過せず、モジュール全体として高い分離性能を発現できていると考えられる。

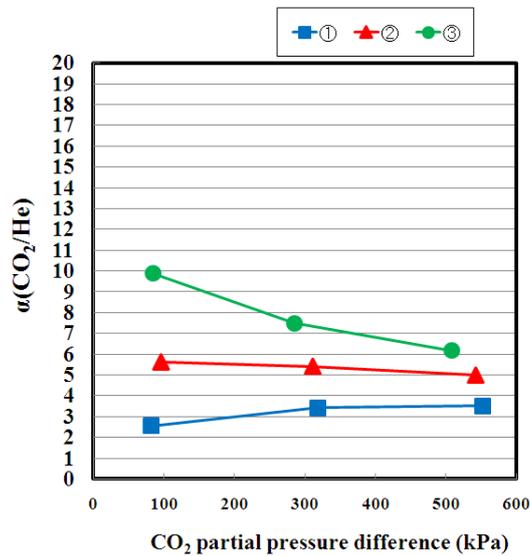


図 3-18 2 インチミニモジュール 分離係数の供給ガス圧力依存性

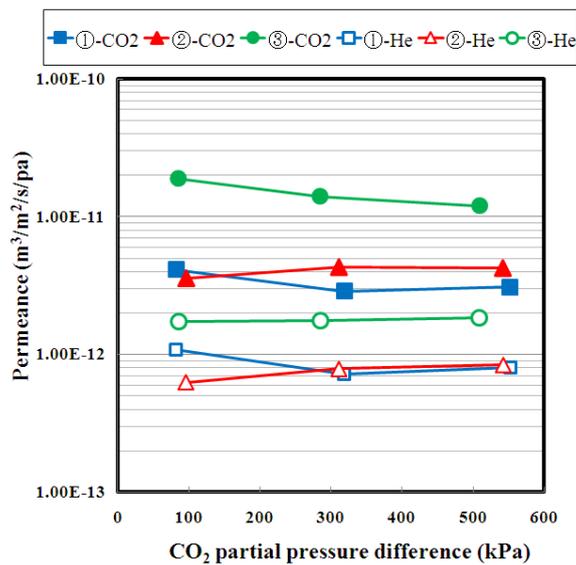


図 3-19 2 インチミニモジュール パーミアンスの供給ガス圧力依存性

4 インチモジュールへのスケールアップ

スウィープ構造 4 インチモジュールの試作を行った。従来構造およびスウィープ構造モジュールの作製・評価を行った。評価結果を表 3-3 に示す。従来構造

モジュール（SHINN-0019）では $\alpha=1.7$ であった。本モジュールに使用した平膜は大気圧条件にて $\alpha=30$ 前後を示すため、SHINN-0019 は封止部分もしくはリーフ内欠陥を有していることが考えられる。

スウィープ構造モジュール（SHINN-0020）はスウィープ流量増加に従い分離性能が向上した。透過側をスウィープすることで、分圧差が高くなり、分離性能向上したと考えられる。スウィープ流量 1000 ml/min.、大気圧の条件において $\alpha>5$ 発現したものの、差圧を少しかけると He のパーミアンスが大きく上昇し、 α が低下する結果が得られた。差圧を戻すと性能が元に戻ることから、モジュール内の微小な欠陥に由来すると考えている。

表 3-3 4 インチモジュール評価結果

モジュール Lot	供給圧 力	スウィープ 流量	CO ₂ パーミアン ス	He パーミアン ス	α
	[MPaG]	[ml/min.]	[m ³ /m ² /Pa/s]	[m ³ /m ² /Pa/s]	
SHINN-0019 (従来構造)	0.1	0	1.5E-11	6.7E-12	1.7
SHINN-0020 (スウィープ 構造)	0	200	3.3E-11	7.0E-12	3.8
	0	400	3.4E-11	6.4E-12	4.7
	0	1000	3.8E-11	6.6E-12	5.4
	0	1500	4.0E-11	6.7E-12	5.7
	0.05	1500	4.3E-11	9.9E-12	4.0
	0	200(再)	3.7E-11	6.6E-12	4.4

2. 3) 実機型膜モジュール

膜モジュールの大型化に伴う技術課題を抽出するため、実機型膜モジュール（直径 10cm、長さ 20cm 程度）を試作した（図 3-20）。

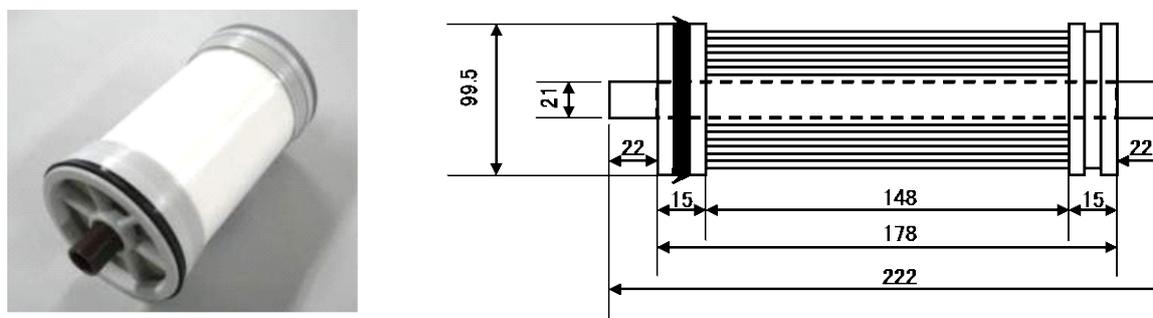


図 3-20 実機型膜モジュール

実機型膜モジュールのモジュール効率を調べるために、初歩的な検討として、単膜性能と膜モジュール性能の比較を行った。その結果、単膜性能に対して、実機型膜モジュール性能は40～70%と推定された。

これは、膜モジュール構造や膜製造段階での単膜性能のバラツキ等に起因することが考えられた。

そこで、膜製造段階でのバラツキを調べるために、解体し取り出した膜の分離性能を確認した結果、膜性能のバラツキは、40%程度あったので、製膜方法の改善を進めていく。

3.) 膜分離システムの開発

膜分離システムの開発では、実システムを調査し、開発した分離膜でのプロセス検討等から最適な膜分離システムの検討を行い、目標を達成するための要求膜性能を検討した。

(実施内容)

- 3. 1) 膜分離システムの検討
- 3. 2) 膜分離プラントの概念設計

3. 1) 膜分離システムの検討

汎用流動解析プログラム FLUENT による流れ解析を実施し、膜モジュール中のスイープ流れ及びスイープ構造、拡散係数影響、スパイラル膜曲面効果等を検討した（図 3-21）。

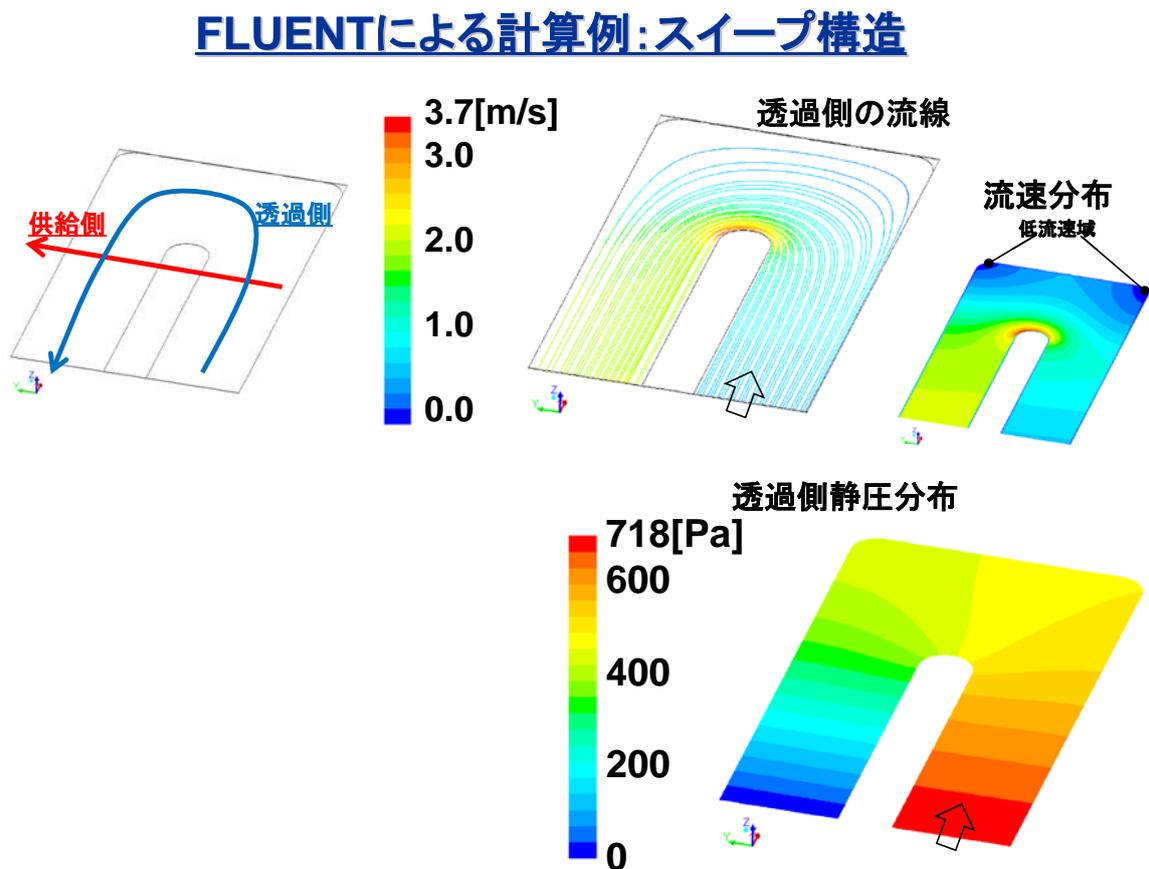


図 3-21 シミュレーションによる膜モジュールのスイープ構造の流れ解析

3. 2) 膜分離プラントの概念設計

3. 2. 1) 模擬ガス試験

(1) 試験装置

試作した実機型膜モジュールを用いて模擬ガス試験を実施し、エンジニアリングデータとして試験結果を取得した（図 3-22）。



モジュール収納部位

図 3-22 模擬ガス試験装置

(2) 試験条件

1) 使用するガス

今年度は、基本的な膜モジュール性能を確認することを目的としたため、可燃性ガスや毒性ガスを用いずに、以下の組成のガスを使用した。

組成：CO ₂	33 vol %
He	41 vol %
N ₂	26 vol % (balance)

(3) 操作条件

各試験のケースについて、以下の範囲で条件を変化させ試験を行った。

温度：	40℃（一定）
圧力：	供給ガス入口 0.6 MPaG から 3MPaG まで 透過ガス出口 0.01 MPaG（一定）
相対湿度：	80%及びドライ
流量：	0.3 Nm ₃ /h から 1.7 Nm ₃ /h まで

(4) 試験機概要

「模擬ガス試験機」は実ガスとほぼ同じ条件のガスを使って、ガス組成、操作条件が膜性能に及ぼす影響を長期間試験することが可能な装置である。

主な仕様は以下のとおりである。

設計ガス量：	2.4 Nm ³ /h
供給ガス入口の設計圧力：	4 MPaG（圧縮機の吐出圧力）
透過ガス出口の設計圧力：	-90 kPaG（真空ポンプの吸引能力）
操作温度：	60 °C：最高 80 °C
相対湿度：	80 %：最高 90 %

(5) 模擬ガス試験結果 ; 試作した実機型膜モジュールが 3MPa 以上の耐圧性を有することを確認した。

3. 2. 2) 膜プラントの概念設計

1) 膜性能目標設定値 (2 段階プロセスとして設定)

- ① Q_{CO_2} ; $7.5 \times 10^{-10} (m^3/m^2/s/Pa)$
- ② α ; 30

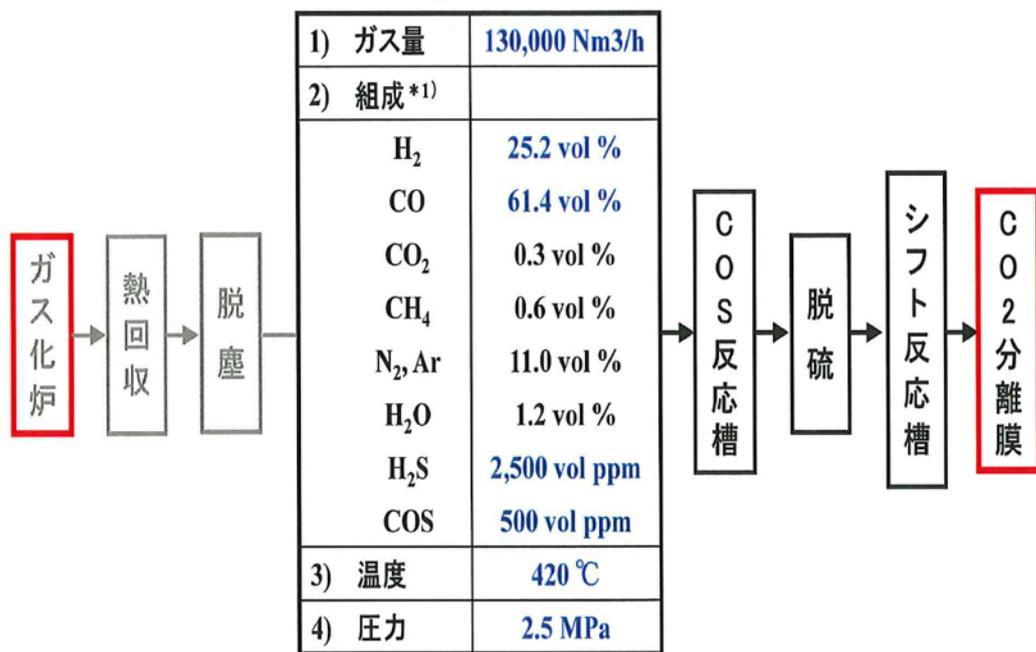
2) 回収 CO₂ 目標値

- ① CO₂ 回収量 ; 1,000,000t-CO₂/y
- ② CO₂ 回収率 ; 90%以上
- ② CO₂ 濃度 ; 95%以上

3) 原料ガス条件

- ① 原料ガス圧力 ; 2.4MPa (図 3-25~図 3-26)
- ② 透過ガス ; 大気圧

* ここで用いたガス組成の条件は、「平成 16 年度クリーン・コール・テクノロジー推進事業 石炭ガス化を核とするコプロダクションシステムに関する調査」によった。



*1) 「平成16年度クリーン・コール・テクノロジー推進事業 石炭ガス化を核とするCO₂分離システムに関する調査」より

図 3-23 原料ガス条件とフロー

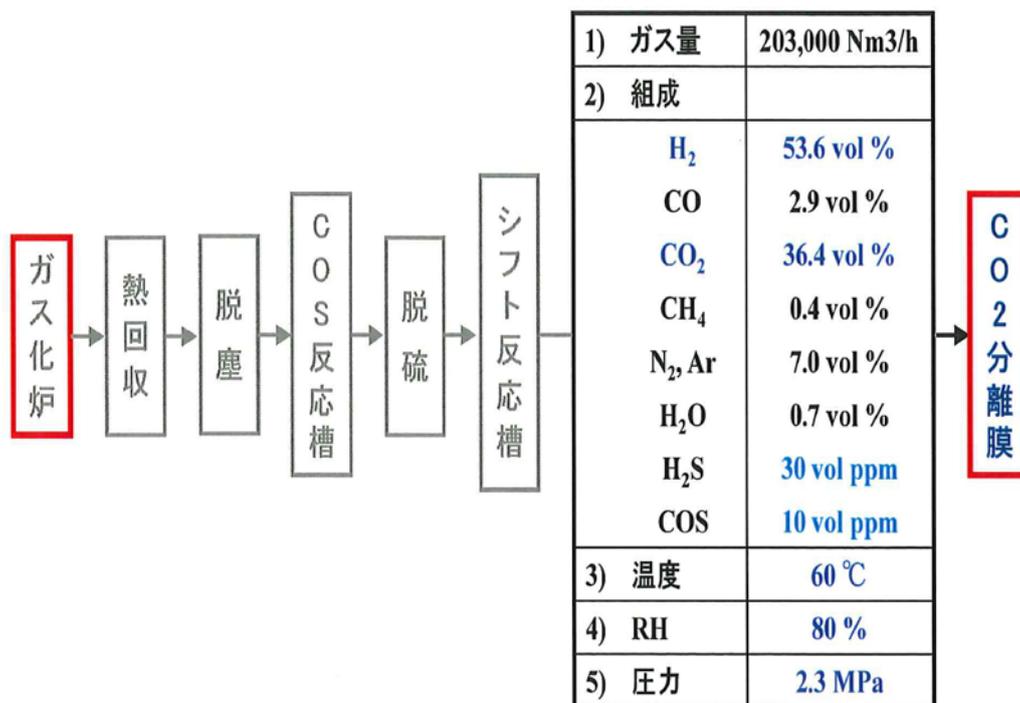


図 3-24 シフト反応から膜モジュールへの供給ガス条件

次に、膜分離システムフローを検討した。原料ガスをプロセスガスとして供給され、熱回収、脱塵、脱硫プロセス、COS 反応槽を経て、水性シフト反応を行う。そして、CO₂分離膜モジュールにガスが供給される。

このため、膜モジュールに影響を与えると考えられた H₂S は原料ガスでは 2,500ppm あるが、脱硫後 30ppm に低下している。この程度であれば、アミン系材料の膜に与える負荷は小さいものと考えられる。ただし、平成 25 年度以降に膜モジュールの性能評価試験において、耐不純物性を確認する予定である。

この、膜分離プロセスフロー、レイアウト、俯瞰図を図 3-25、図 3-26、図 3-27 に示す。

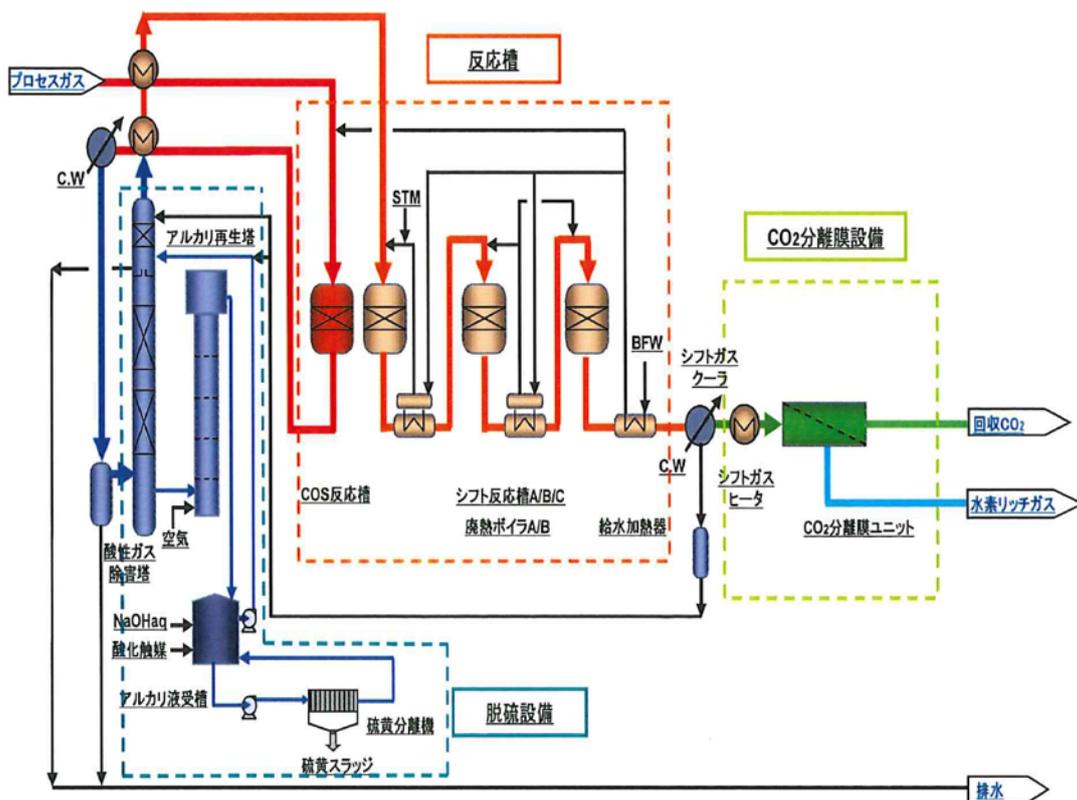


図 3-25 膜分離プロセスフロー

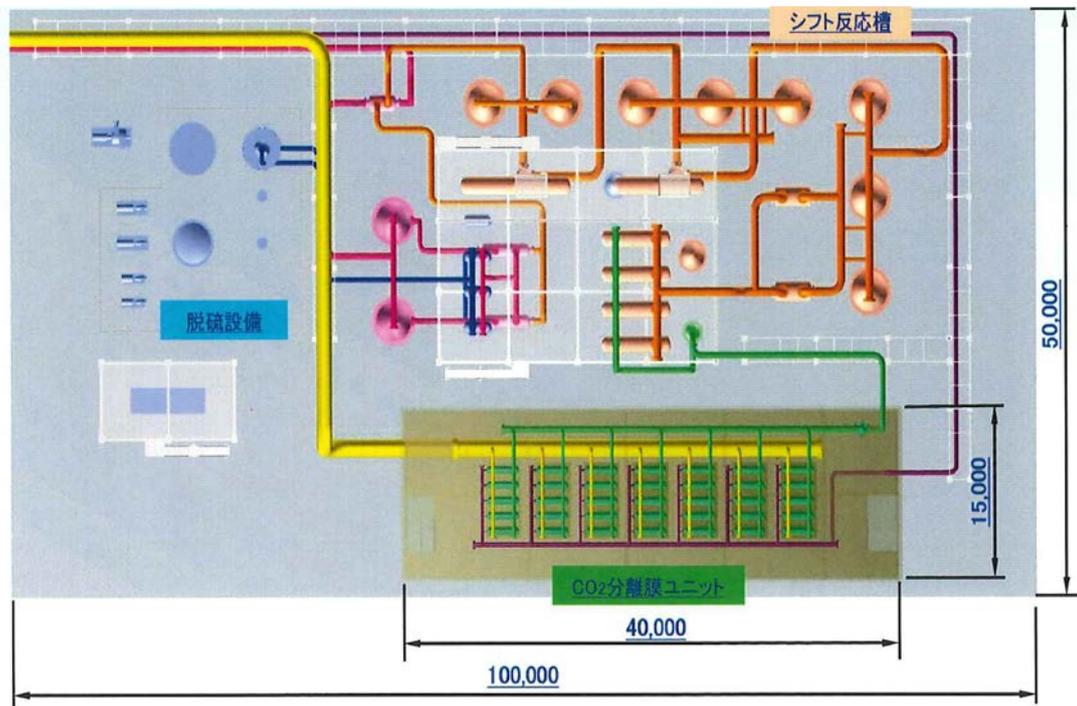


図 3-26 レイアウト

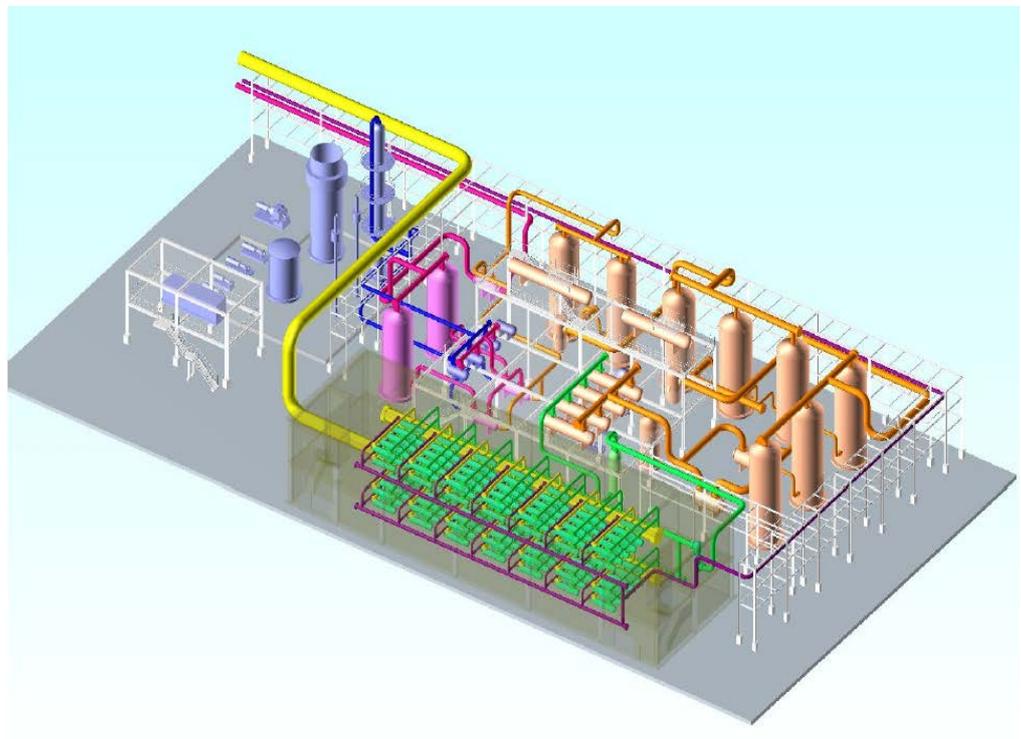


図 3-27 俯瞰図

1,500 円/t-CO₂ を実現する要求膜性能の検討

膜分離システム技術の検討には、当事業で改良した解析プログラム (RITE_MGSD2) を活用し、平成 21 年度の成果である 2 段膜システムに加え、新たに 1 段膜システムとして膜モジュールの計算を行い、膜システムの挙動に関する知見を得た。この結果を基に、1 段、2 段の膜システムを構築した。そして、一部ガスの循環プロセスを加え、システム検討及びコストの試算を行った。

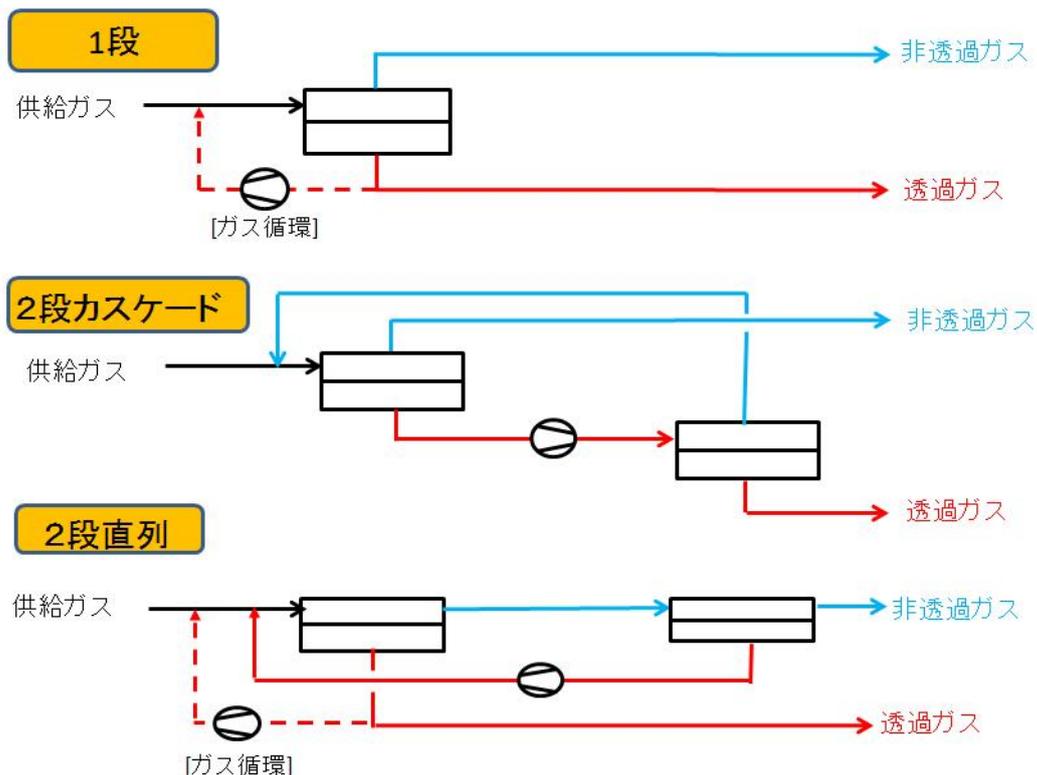


図 3-28 検討した膜システムフロー

その結果、所期の 2 段膜システムで要求される膜性能「 $Q_{CO_2}=7.5 \times 10^{-10} \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ 、 $\alpha=30$ 」に加え、新たに 1 段膜システムとして、「 $Q_{CO_2}=3 \times 10^{-10} \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ 、 $\alpha=125$ 」の要求性能を満たせば、開発目標 1,500 円/t-CO₂ の達成が可能であることを見出した (図 3-29)。

エネルギー構造等の変化により電気代等の変動が予想されるので、所期の 2 段プロセスでは 1,500 円/t-CO₂ を実現出来なくなる危険性を勘案し、今後、ここで得た電気代を掛けない 1 段膜システムの新規要求膜性能を基に研究開発を進めることとした。さらに、開発目標 1,000 円/t-CO₂ のための要求膜性能についての指標も見出すことが出来た。

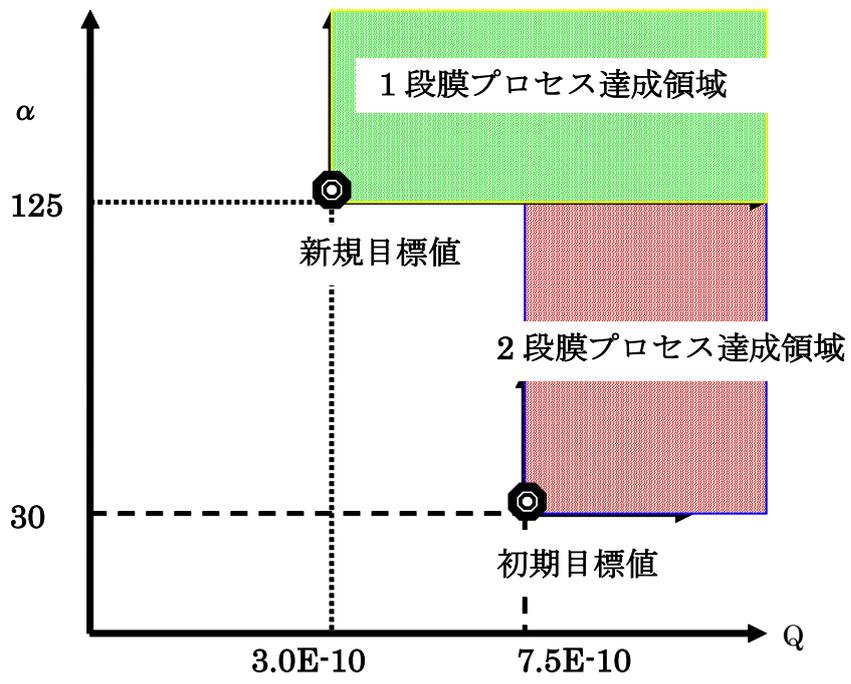


図 3-29 膜性能と膜分離コストの関係

3-1-3 特許出願状況等

表 3-4 特許・論文等件数

要素技術	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	取得ライセンス料	国際標準への寄与
製膜技術	5		9	0	0	0	0
計	5		9	0	0	0	0

表 3-5 論文、投稿、発表リスト

	掲載先	題目	
論文	Energy Procedia	Techno-economic evaluation of the coal-based gasification combined cycle with CO ₂ capture and storage technology	平成21
	Polymer Bulletin,	Polymeric Membranes Composed of Polystyrenes Tethering Amino Acids for Preferential CO ₂ Separation over H ₂	平成24
	J of Polymer Science PartB:Polymer Physics	Structural analysis of poly(amidoamine) dendrimer immobilized in cross-linked poly(ethylene glycol)	平成24
	J. Membr. Sci.	Poly(amidoamine) dendrimer/poly(vinyl alcohol) hybrid membranes for CO ₂ capture	平成24
	Desalination and Water Treatment journal	Development of Poly(amidoamine) Dendrimer/Poly(vinyl alcohol) Hybrid Membranes for CO ₂ Separation	平成24
投稿 その他5件	日本エネルギー学会誌	CO ₂ 分離・回収技術の最新動向	平成21.4
	未来材料7月号	二酸化炭素と水素を分離する高分子膜	平成22.7
	電気評論	膜によるCO ₂ 分離技術の進展	平成23.4
発表(国内学会) その他30件	膜シボ'2009	新規デンドリマー分離膜の開発とCO ₂ 分離特性	平成21.11
	化学工学会第75年会(鹿児島大学郡元キャンパス)	化学結合型デンドリマー複合膜の開発とCO ₂ 分離特性	平成22.3
	大気環境学会近畿支部セミナー(大阪大学中之島センター)	CO ₂ 分離・回収技術の紹介 膜分離技術を中心に	平成23.1
	日本膜学会第34年会(早稲田大学西早稲田キャンパス)	ポリアミドアミンデンドリマー/架橋ポリエチレングリコールハイブリッド膜の構造制御と分離特性	平成24.5
発表(国際学会) その他15件	237th ACS National Meeting&Exposition Soltlake City	Poly(amidoamine) dendrimer in Poly(ethylene glycol) Network for a CO ₂ Separation Membrane:Mechanism of Preferential CO ₂ Separation	平成21.3
	Carbon Capture Workshop (Stanford University)	Advanced CO ₂ Separation Using Molecular Gates	平成23.5
	I2CNER International Workshop (Kyushu Univ)	Poly(amidoamine) Dendrimer/Polymer Hybrid Membranes for CO ₂ Capture	平成24.2
その他発表	日本経済新聞	石炭ガス化炉排出のCO ₂ 膜使い分離試験	平成21.11
	『CCS技術の新展開』シーエムシー出版	CCS技術の新展開 【第二編 CO ₂ 回収技術】	平成23.11

3-2 目標の達成度

表 3-6 に中間目標に対する各要素技術の達成度を示す。各項目とも中間目標を達成しており、計画通り進行している。

表 3-6 目標に対する成果・達成度の一覧表

要素技術	目標・指標 (中間評価時の目標)	成果	達成度
1. 分離膜技術の確立			
1) 分離性能の改良	CO ₂ /H ₂ 選択性が 30 であり、CO ₂ 透過速度が 7.5×10 ⁻¹⁰ m ³ m ⁻² s ⁻¹ Pa ⁻¹ の複合膜を作製する。	膜材料の改良によって分離性能を向上させ、大気圧条件において目標分離性能 (CO ₂ /H ₂ 選択性が30であり、CO ₂ 透過速度が 7.5×10 ⁻¹⁰ m ³ m ⁻² s ⁻¹ Pa ⁻¹) を達成した。	達成
2) 耐不純物性	膜モジュールとしての耐不純物性試験を平成 25 年度以降に実施するため、中間評価時点の設定無し。	公開情報を調査し、平成 25 年度以降からの膜モジュール試験の準備を整えた。	—
3) 耐乾燥性	膜中への水分子の保持に関して、プロセス面からの解決法を立案する。併せて材料面からの解決法を検討する。	プロセス面から水蒸気スウィープ法、膜材料として高吸水性高分子マトリクスの可能性を見出した。	達成
4) 耐圧性	複合膜の耐圧性として 3MPa (2.5MPa 以上) を確認する。	複合膜が 3MPa 以上の耐圧性を有することを確認した。	達成
5) 耐久性	膜モジュールとしての耐久性試験を平成 25 年度以降に実施するため、中間評価時点の設定無し。	—	—
6) その他のプロセス適合性	膜材料の耐熱性を評価する。また、耐熱性材料について検討する。	膜材料の耐熱性を確認し、複合膜が 120℃までの耐熱性を有することを確認した。	達成
7) 1,000 円/t-CO ₂ 以下を可能とする分離膜 (CO ₂ /H ₂ 選択性が 100) の開発	システム検討を行い、1,000 円/t-CO ₂ 以下の目標を達成するための要求膜性能を検討する。	システム検討を行い、1,000 円/t-CO ₂ 以下の目標を達成するための要求膜性能を見出した。	達成
2. 実機膜モジュールの開発			
1) 連続安定製膜	実機型膜モジュール (直径 10cm、長さ 20cm 程度) を試作し、膜の均一性を把握し、	連続安定製膜の概念設計を行い、各工程における技術課題を抽出した。同時に、	達成

	塗工技術を検討する。	実機型膜モジュール（直径10cm、長さ20cm程度）を試作し、膜性能のバラツキの程度を確認した。	
2) 膜モジュールの大型化	実機型膜モジュール（直径10cm、長さ20cm程度）を試作し、膜モジュールの大型化に伴う技術課題を抽出する。	実機型膜モジュール（直径10cm、長さ20cm程度）を試作し、スパイラルモジュール製作における、リーフ数、リーフ長さ、スペーサー構造・配置等の技術課題を抽出した。	達成
3) 実機型膜モジュール	実機型膜モジュール（直径10cm、長さ20cm程度）を試作し、モジュール性能試験を行う。	実機型膜モジュール（直径10cm、長さ20cm程度）を試作し、モジュール性能試験を行い、分離性能を確認した。	達成
3. 膜分離システムの開発			
1) 膜分離システムの検討	シミュレーション技術等を用いて、膜モジュールの性能に対するガス流体条件等を検討する。	シミュレーションによる流れ解析を行い、膜モジュールのスイープ構造に対するガス流体条件等を検討した。	達成
2) 膜分離プラントの概念設計	膜性能とCO ₂ 分離・回収コストとの関係を推算し、最適膜分離プラントの概念設計を行う。	システム検討を行い、膜性能とCO ₂ 分離・回収コストとの関係を推算し、要求膜性能を明らかにした。また、膜分離プラントの概念設計を行った。	達成

4. 事業化、波及効果について

4-1 事業化の見通し

地球温暖化対策としてCCS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、CCSの実用化に資するため、コストを低減する技術、特に全コストの6割以上を占めるCO₂の分離・回収技術の高度化・低コスト化が不可欠であり、技術開発の加速化が必要とされているところである。

「二酸化炭素分離膜モジュール研究開発事業」では圧力を有するガス源である IGCC 等から従来技術の 3 分の 1 程度の 1,500 円/t-CO₂以下で CO₂を分離・回収する技術の確立を目指す。合わせて、1,000 円/t-CO₂以下で CO₂を分離・回収する技術を確認することを目的に、分離膜技術の確立、実機膜モジュールの開発、分離膜システムの開発に取り組んでいる。

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、膜素材会社（株）クラレ、膜モジュール会社（日東電工株）、エンジニアリング会社（新日鉄エンジニアリング株）、（公財）地球環境産業技術研究機構の一体となった技術研究組合と大学からなる研究体制を構築し、本研究開発事業に着手した。これにより、実システムで要求される耐不純物性、耐乾燥性、耐圧性、耐久性等のプロセス適合性を確立し、実機型膜モジュールと膜分離システムを開発することで、平成 26 年度に、IGCC 用実機膜モジュールの技術を確立する。

平成 27 年度からは、開発した IGCC 用実機膜モジュールを用いた実証試験を行いつつ、さらに CO₂分離・回収コスト 1,000 円/t-CO₂を実現する膜モジュール技術を確立し、実機膜モジュールの改良と量産化検討を行いながら平成 32 年度末の CCS 本格適用に間に合わせる。

同時に、開発した膜モジュールは天然ガス田からの CO₂分離・回収にも用途展開を図り、本成果を元に天然ガス田に対する適用化研究、実証試験を行い、早期の実用化につなげたい。

4-2 波及効果

本事業では、圧力を有するガス源から効率良く CO₂ を分離する CO₂ 選択透過型分離膜モジュールの開発に取り組んでいる。

CO₂ を含有するガス源としては、革新的ゼロ・エミッション石炭火力発電に加えて、天然ガス田が知られている。現在採掘が行われている天然ガス田は CO₂ を約 10% 含むが、今後、温暖化対策の一環として、CO₂ 排出原単位が小さい天然ガスに燃料転換することが予想されており、その場合に現在では採算性が合わない CO₂ 含有量が多い劣質な天然ガス田を開拓が必須となる。ここで、CO₂ 含有量が多い劣質な天然ガス田を開拓の成否は、低コストで CO₂ を分離・回収が可能な技術の開発に掛かっている。本事業で開発する高性能な CO₂ 分離膜は、低コストで効率良く天然ガスから CO₂ を除去する技術であり、劣質な天然ガス田の開拓に大いに貢献することが期待できる。産油国の国策石油会社からの問い合わせもきているところである。

一方、革新的ゼロ・エミッション石炭火力発電のガス源や天然ガスほどに高圧ではないが、自圧を有して CO₂ を含有するガス源は化学プラント等にも多く存在し、これらのガス源からの CO₂ 分離、或いは、濃度調整の方面で実用化されることも考えられる。

尚、当初想定していなかった波及効果として、閉鎖空間における二酸化炭素の除去等の期待が寄せられている。

5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

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、(財)地球環境産業技術研究機構が平成18年度から平成20年度まで、新日鉄エンジニアリング(株)が平成20年度補正から平成22年度まで経済産業省から補助金の交付を受け実施し、次世代型膜モジュール技術研究組合が平成23年度から経済産業省との委託契約を基に実施している。

圧力を有するガス源であるIGCC等から従来技術の3分の1程度の1,500円/t-CO₂以下でCO₂を分離・回収する技術の確立を目的として、研究開発を推進する研究開発計画を策定した。

「分子ゲート機能CO₂分離膜の技術研究開発」(平成18年度～平成22年度)においては、分子ゲート機能分離膜の高圧下におけるCO₂/H₂の選択性の付与、分離膜モジュールの大型化技術の検討、更に、膜分離システムの開発に取り組むもので、以下の4項目の研究開発テーマからなる。

- ① 膜素材の開発
- ② 複合膜と膜モジュールの開発
- ③ 膜モジュール評価手法の開発
- ④ 膜分離システムの開発

平成21年度のシステム検討の結果を受け、事業目標の見直しを行い、さらに平成22年度に事前評価を行い、「二酸化炭素分離膜モジュール研究開発事業」(平成23年度～平成26年度)として研究開発を実施中である。これは、以下の3項目の研究開発テーマからなる。

- ① 分離膜技術の確立
- ② 実機膜モジュールの開発
- ③ 膜分離システムの開発

本事業の研究開発スケジュールを表5-1に示す。

表 5-1 研究開発スケジュール

研究項目	年度	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26
1. 「分子ゲート機能 CO ₂ 分離膜の技術研究開発」										
①膜素材の開発										
②複合膜と膜モジュールの開発										
③膜モジュール評価手法の開発										
④膜分離システムの開発										
2. 「二酸化炭素分離膜モジュール研究開発事業」										
①分離膜技術の確立										
②実機膜モジュールの開発										
③膜分離システムの開発										

表 5-1 のうち、1. 「分子ゲート機能 CO₂ 分離膜の技術研究開発」は平成 18 年度から平成 22 年度まで実施された。

①膜素材の開発では、デンドリマー類を中心に、分離膜に供する CO₂ 分子ゲート機能を有する膜素材を開発することを目的として、検討を行った。

②複合膜と膜モジュールの開発では、開発した膜素材を分離機能層とする複合膜を開発するものであり、耐圧性に優れた支持膜の開発と、その支持膜の表面に膜素材の薄膜層をピンホールフリーで形成することを目的として、検討を行った。更に、得られた複合膜を束ねた耐圧性を有する膜モジュールを開発することを目的として、検討を行った。

③膜モジュール評価手法の開発では、模擬ガスと実ガスを用いる膜モジュールの評価方法を開発することを目的に、評価装置の設計、製作、試運転を行った。

④膜分離システムの開発では、分子ゲート膜モジュールの実ガス実験を行うと共に、プラントシミュレーションを用いる膜分離システムの評価を行い、膜分離システムの有効性を実証することを目的として検討を行った。

表 5-1 のうち、2. 「二酸化炭素分離膜モジュール研究開発事業」は平成 23 年度に開始した。

①分離膜技術の確立では、分離・回収コスト 1,500 円/t-CO₂ 以下を実現するための膜モジュール性能が発揮できるように分離膜の改良を行いつつ、分子ゲート機能 CO₂ 分離膜の実用化に向けて実システムで要求される耐不純物性、耐乾燥性、耐圧性、耐久性等の「プロセス適合性」を確立することを目的とする。合わせて、1,000 円/t-CO₂ 以下で CO₂ を分離・回収する技術を確認することを目的とする。

②実機膜モジュールの開発では、連続安定製膜に必要な要素技術を確立して、実機膜モジュール（直径 10cm、長さ 1m）に供する分離膜の安定製造を可能とすることを目的とする。

③膜分離システムの開発では、分離・回収コスト 1,500 円/t-CO₂ 以下を達成するために、膜分離システムの適用調査、プロセス検討データの取得により、開発した分離膜モジュールに最適なシステム設計を行うことを目的とする。

5. 2 研究開発実施者の実施体制・運営

5. 2. 1 研究開発実施者の実施体制・運営

「分子ゲート機能 CO₂ 分離膜の技術研究開発」（平成 18～平成 22 年度）の研究開発実施体制・運営は次の通り。

- ・ 平成 18 年度～平成 19 年度は、基礎基盤研究において（財）地球環境産業技術研究機構の単独事業であった。
- ・ 平成 20 年度は、分子ゲート膜モジュールの研究開発を促進する目的で、膜モジュールメーカー（東レ(株)、日東電工(株)、クラレ(株)、ダイセル化学工業(株)）と共同研究を実施して、メーカーの膜モジュール開発技術、生産技術を取り組み、本事業の実用化への基礎的研究の加速を図った。
- ・ 平成 21 年 1 月からは、（財）地球環境産業技術研究機構、膜モジュールメーカー（東レ(株)、日東電工(株)、クラレ(株)、ダイセル化学工業(株)）、エンジニアリング会社（新日鉄エンジニアリング(株)）での共同研究の下で、開発した膜モジュールの実ガス試験を実施して、膜モジュールの更なる開発課題を抽出すると共に、分離膜システムの検討に着手する体制を作り、研究開発を推進した。

「二酸化炭素分離膜モジュール研究開発事業」の実施体制は次の通り。

- ・ 平成 23 年度より、膜素材会社（(株)クラレ）、膜モジュール会社（日東電工(株)）、エンジニアリング会社（新日鉄エンジニアリング(株)）、（公財）地球環境

産業技術研究機構が一体となった技術研究組合と大学からなる研究体制を構築し、分離膜技術の確立、実機膜モジュールの開発、膜分離システムの開発に関する研究開発を推進している。

また、研究開発を推進するべく、大学等の有識者からなる研究推進委員会を設置した。再委託先として大学の研究者が参加している。

平成 20 年度補正～平成 22 年度の研究開発実施体制を図 5-1 に示す。

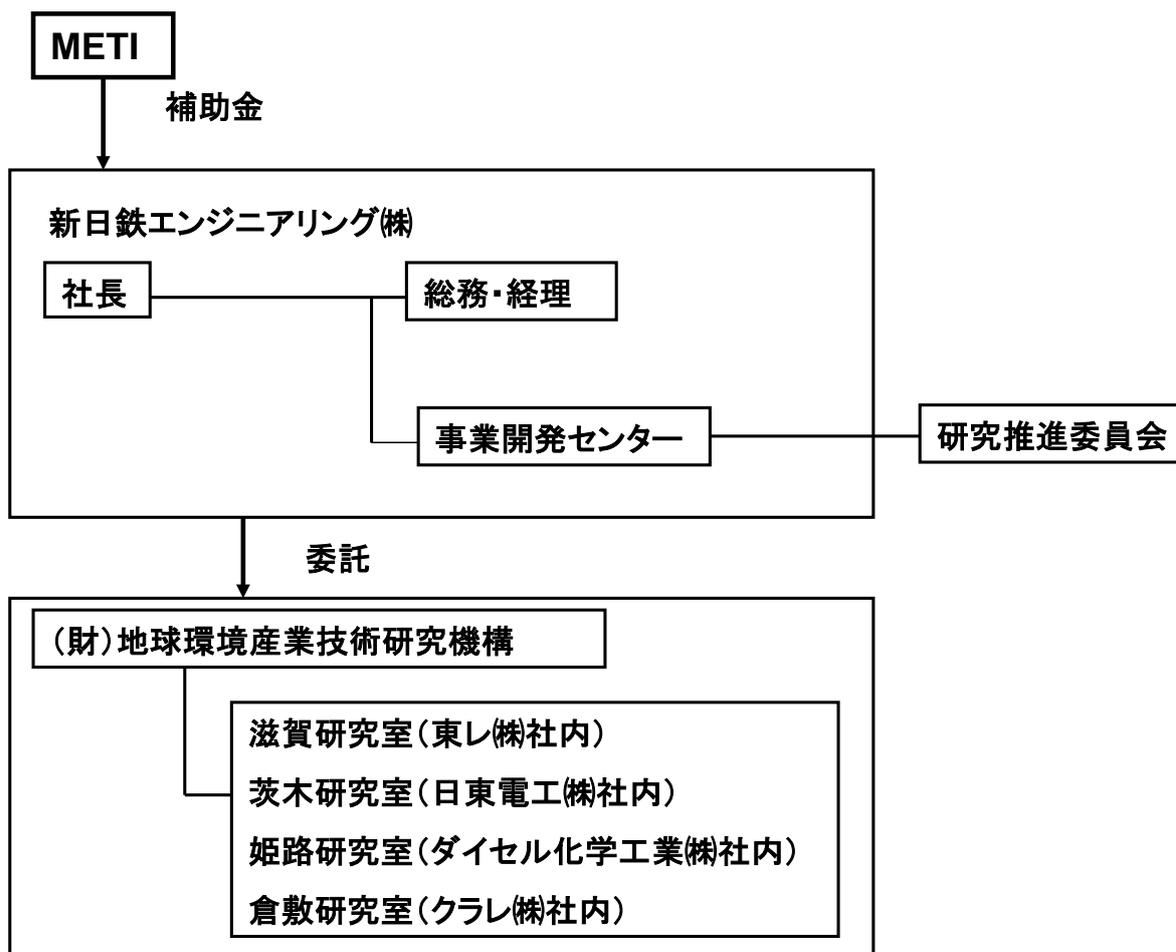


図 5-1 研究開発体制図（平成 20 年度補正～平成 22 年度）

現在の研究開発実施体制を図 5-2 に示す。本事業を遂行する上での最適な研究開発体制で、事業目標の完成を目指したい。

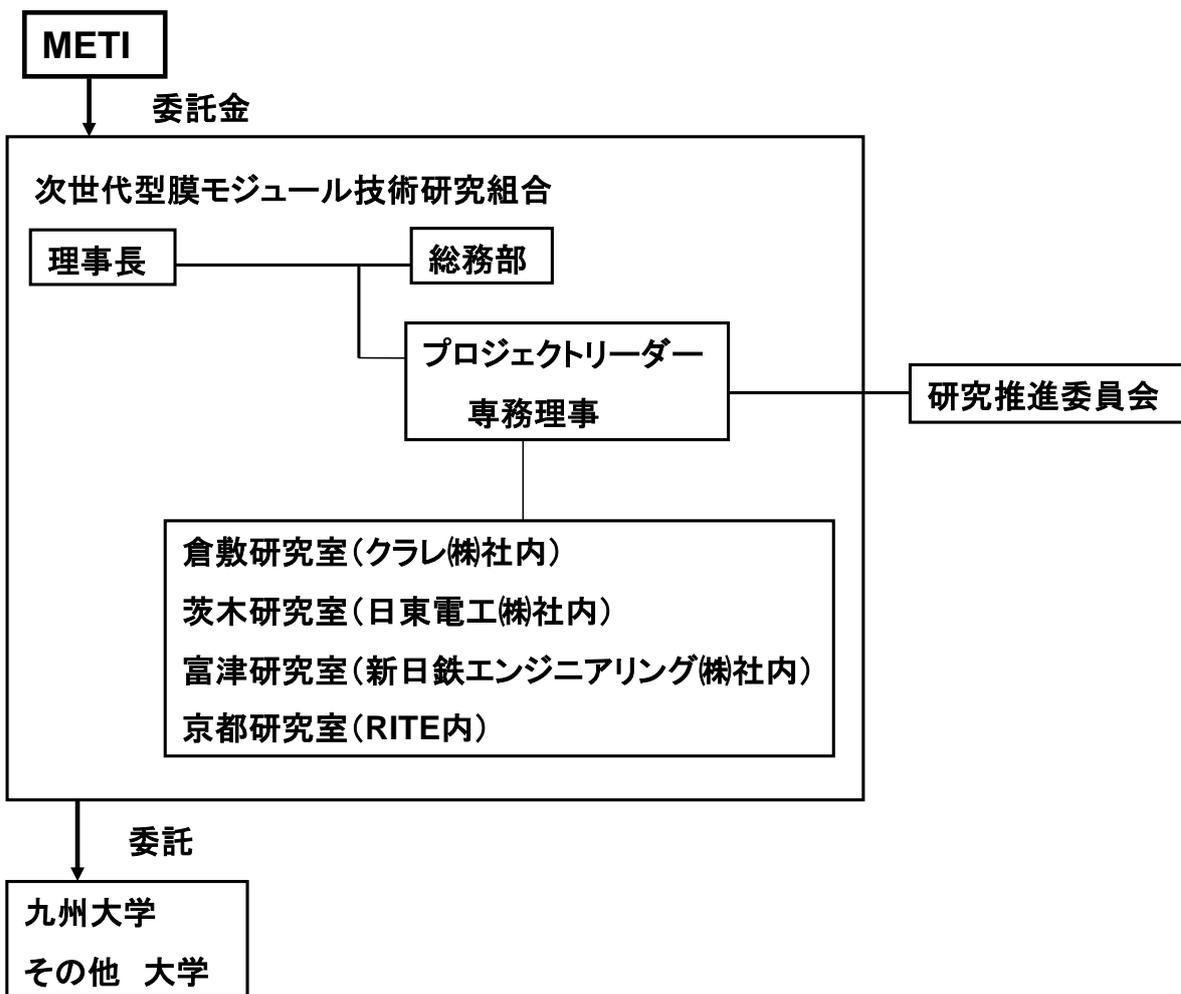


図 5-2 研究開発体制図（平成 23 年度～平成 24 年度）

5. 2. 2 「国民との科学・技術対話」の推進

本事業の研究活動の内容や成果を社会・国民に対して分かりやすく説明する活動として、「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 23 年度、平成 24 年度に行った。

【平成 23 年度】

1. 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. 目的

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削減効果が大きいこと等から、地球温暖化対策の重要な選択肢の一つと期待されている。そのなかで、次世代型膜モジュール技術研究組合は、今後効率的な石炭ガス化発電として期待されている IGCC 等で発生する圧力を有するガスから低コストで革新的な二酸化炭素分離膜の開発(二酸化炭素分離膜モジュール研究開発事業)を経済産業省からの委託事業として進めている。このシンポジウムでは当組合が開発している二酸化炭素分離膜技術の最近の研究動向や海外での開発状況全般について報告し、CO₂ 分離に関心を持つ方々に最新の情報を広く伝え、官民挙げての CO₂ 削減に関する研究開発活動に理解を得る一助とする。

3. 開催内容

日 時 : 平成 23 年 11 月 4 日 (金) 13 時半~17 時

会 場 : 第一ホテル東京 5F ラ・ローズ

参加人数 : 170 名

4. プログラム

主催者挨拶 技術研究組合 理事長 河野 治

共催者挨拶 経済産業省地球環境連携・技術室 室長 秦 茂則

講演 1 地球温暖化への対応

(財)地球環境産業技術研究機構 副理事長 茅 陽一

講演 2 膜技術基調講演「膜分離技術の現状と将来展望」化学工学会会長

技術研究組合研究開発推進委員会委員長、

工学院大学

教授 中尾 真一

講演 3 特別招聘講演「北米の最新膜技術動向」

前北米膜学会会長 米国テキサス大学 教授 Benny D. Freeman, PhD

講演 4 膜技術の海外調査報告

技術研究組合倉敷研究室 主管 伊勢 智一

講演 5 次世代型膜モジュール 技術研究組合 専務理事 風間 伸吾

講演 6 膜の世界市場展開 技術研究組合茨木研究室

5. シンポジウム報告

2011年11月4日、次世代型膜モジュール技術研究組合（クラレ（株）、日東電工（株）、新日鉄エンジニアリング（株）、RITE）主催で、第一ホテル東京にて、革新的 CO2 膜分離技術シンポジウムが開催されました（共催 経済産業省（METI）、後援 日本 CCS 調査株式会社（JCCS）、グローバル CCS 研究所、（社）新化学技術戦略推進協会（JACI）、協賛 日本膜学会、化学工学会（SCEJ））。政府関係者、企業、大学、研究機関から 170 名の参加をいただきました。次世代型膜モジュール技術研究組合は、RITE の化学研究グループが世界に先駆けて研究した分子ゲート膜を実用化するために、経済産業省の委託により設立されました。

このシンポジウムの目的は、技術研究組合で開発している二酸化炭素分離膜技術の最近の研究動向や海外での開発状況全般について報告し、CO2 分離に関心を持つ方々に最新の情報を広く伝え、官民挙げての CO2 削減に関する研究開発活動に理解を得ることを目的としました。

シンポジウムでは、地球温暖化への対応（RITE 茅理事長）、膜分離技術の現状と将来展望（工学院大学 中尾教授）、北米の最新膜技術動向（米国テキサス大学 Freeman 教授）、膜技術の海外調査報告（技術研究組合 伊勢主管）、次世代型膜モジュール（技術研究組合 風間専務理事）、膜の世界市場展開（技術研究組合 岩堀シニアコンサルタント）について講演がありました。

技術研究組合メンバーによるポスターセッションも行い、関係の皆様方と議論をすることができました。



【平成24年度】

1. 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. 目的

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削減効果が大きいこと等から、地球温暖化対策の重要な選択肢の一つと期待されている。そのなかで、次世代型膜モジュール技術研究組合は、今後効率的な石炭ガス化発電として期待されている IGCC 等で発生する圧力を有するガスから低コストで革新的な二酸化炭素分離膜の開発（二酸化炭素分離膜モジュール研究開発事業）を経済産業省からの委託事業として進めている。

このシンポジウムでは分離膜の専門の先生方を国内外より招聘し、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いた。技術研究組合からは次世代型膜モジュール技術の最新情報を伝え、官民挙げてのCO₂削減に関する研究開発活動に理解を得た。

3. 開催内容

日 時 : 平成24年9月29日（金）13時～17時

会 場 : 第一ホテル東京 5F ラ・ローズ

参加人数 : 147名

4. プログラム

主催者挨拶 技術研究組合 理事長 河野 治

講演1「エネルギー・環境問題とCCS」

(公財)地球環境産業技術研究機構 所長 山地 憲治

講演2 膜技術基調講演「膜分離技術の現状と将来展望」

技術研究組合研究開発推進委員会委員長 広島大学 教授 都留 稔了

講演3 特別招聘講演「北米における二酸化炭素分離膜の研究開発について」

Director of the Research and Development Group, MTR Dr. Tim Merkel

講演4 特別招聘講演「欧州における膜技術の研究開発について」

Group Leader and Technology Transfer Manager, ECN Dr. Jaap Vente

講演5「次世代型膜モジュール技術とは」

技術研究組合 専務理事 中尾 真一

閉会挨拶 技術研究組合 理事 時任 康雄

5. シンポジウム報告

CO₂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削減効果が大きいこと等から、地球温暖化対策の重要な選択肢の一つと期待されています。その中で、次世代型膜モジュール技術研究組合は、今後効率的な石炭ガス化発電として期待されている IGCC 等で発生する圧

力を有するガス用の低コストで革新的な二酸化炭素分離膜の開発（二酸化炭素分離膜モジュール研究開発事業）を経済産業省からの委託事業として進めています。

今回のシンポジウムでは、基調講演として、RITE 山地研究所長より「エネルギー・環境問題と CCS」と題して、昨今の情勢から CCS への期待の高まり、日本の CCS への取り組み状況、今後日本が取るべきエネルギー政策再構築について、講演頂きました。続けて当該技術研究組合研究推進委員長・広島大学 都留教授より、膜分離技術、特に各種 CO₂ 回収プロセスへの膜技術の最新動向について解説頂くと共に、将来展望として新規材料膜の開発と応用展開について紹介頂きました。

また、海外の開発状況について、昨年シンポジウムで要望の高かった、米国 MTR 社および欧州オランダ ECN 社から CO₂ 回収技術の最新動向について講演頂きました。MTR 社 Dr. Merkel 氏からは、燃焼前・燃焼後の CO₂ 回収プロセスのための、MTR 社における膜材料及びプロセス設計、発電所における実証試験について紹介頂くとともに、今後の新規分離膜への取り組みについても言及頂きました。ECN 社 Dr. Vente 氏からは、燃焼前 CO₂ 回収のオプションとして、ECN 社における CO₂ からの水素分離技術の開発状況、特にパラジウム薄層貴金属膜の実証試験状況について紹介頂きました。

最後に当該技術研究組合 中尾専務理事から、当組合が開発している CO₂ 分子ゲート膜ならびに膜モジュールの開発状況について報告致しました。

以上、これらの各講演を通じて、CO₂ 分離に関心を持たれる方々に最新の情報をお伝えすることにより、官民挙げての CO₂ 削減に資する研究開発活動に対しまして、ご理解を深めて頂けたことと存じます。シンポジウムは 147 名が参加され、活発に質疑応答がなされるなど盛況裡に終了しました。

5-3 資金配分

年度ごとの資金配分を以下の表 5-2 に示す。

平成 20 年度補正～平成 22 年度は、膜材料の開発促進のための評価機器の導入、及び模擬ガス試験装置等の設計・製作による膜モジュールの評価手法を開発に資金を集中的に投入し、研究開発を加速させた。

平成 23 年度、平成 24 年度は、分離膜の改良と実機型膜モジュールの開発における基礎研究に資金を集中した。

表 5-2 資金配分

単位：百万円

		H18FY	H19FY	H20FY	H20FY 補	H21FY	H22FY	H23FY	H24FY	合計
分子ゲート機能 CO ₂ 分離膜の技術研究開発	膜材料の開発	49	23	22	202	300	146			742
	分離膜及びモジュールの開発	10	31	98	66	276	67			548
	膜モジュール評価手法の開発	0	0	0	199	206	13			418
	分離膜システムの検討	40	24	30	4	61	88			247
二酸化炭素分離膜モジュール研究開発	分離膜技術の確立							146	158	304
	実機膜モジュールの開発							122	148	270
	膜分離システムの開発							66	38	104
合計		99	78	150	471	843	314	334	344	2,633

5-4 費用対効果

本事業の効率性を判断するに当たっては、事業を実施することによって得られるCO₂の削減量のみならず、事業による市場創出等の経済効果をも考慮することが必要である。他方で、これら効果については、今後の金融・税制優遇措置や京都メカニズムの適用によって大きく変わる可能性があり、現段階では定量的評価は困難である。なお、IEA「エネルギー技術展望 2012」等に示されているとおりにCO₂排出削減量をCCSの導入によって実現することとなれば、CCS市場は大規模なものとなることが想定される。

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。

我が国の帯水層へのCO₂貯留可能量は、カテゴリ-Aの基礎試錘データがあるもので約52億トン程度、全体では1,461億トンと見込まれている。また、カテゴリ-A帯水層へのCO₂貯留に関しては、他の温暖化対策オプションに比べて経済的に有利であるとのモデル評価結果がある。

現状で約4,200円/t-CO₂の分離・回収技術が1,500円/t-CO₂になれば、トンCO₂あたり2,700円の便益があり、カテゴリ-A帯水層可能量約52億トンのCO₂貯留に適用した場合に、14兆400億円の便益が得られることになる。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、カテゴリ-Aに相当するCO₂を処理した場合に限っても、CO₂処理費用を数十兆円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。

5-5 変化への対応

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、今後共、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、膜素

材メーカー（株クラレ）、膜モジュールメーカー（日東電工株）、エンジニアリング会社（新日鉄住金エンジニアリング株）、（公財）地球環境産業技術研究機構が参加する技術研究組合と大学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「国民との対話」の中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いているところである。

これらのことにより、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ところであるが、社会的変化により、電気代の高騰化が見込まれ、2段プロセスでは1,500円/t-CO₂を実現出来ない可能性があるため、電気代を掛けない1段プロセスで1,500円/t-CO₂を実現する膜システムを検討し、新たに単膜の要求性能を見直したところである。

今後、1段プロセスの単膜要求性能の膜を開発し、平成26年度末に間に合わせる予定である。

第 3 章 評価

第3章 評価

1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性

CCSは地球全体のCO₂排出量の大幅削減を可能とする革新的技術と位置付けられているが、実用化に向けては多くの課題も存在し、特に全コストの6割以上を占めるCO₂の分離・回収技術の高度化や低コスト化が不可欠である。本事業は日本の得意とする分離膜技術を生かしており、科学的・技術的な新規性、独創性は評価でき、目的・政策的位置付けは妥当である。

また、CCSの実用化に当たっては、技術開発による安全性向上やコストダウンのほか、制度的、社会的課題を解決する必要がある。実用化時点でのビジネスモデルも明確になっていない現時点では、民間企業には技術開発のインセンティブが働きにくく、国の関与の必要性は極めて高い。

一方、民間で進められているアミンあるいは固体吸収材料等を用いるCO₂分離回収技術との明確な差別化が今後必要である。

また、将来的には我が国で進められているIGCCの開発への導入など、実用化を加速する事業の提案も期待したい。

【肯定的意見】

- CCSは地球全体のCO₂排出量の大幅削減を可能とする革新的技術と位置付けられているが、今後のCCSの実用化に向けては多くの課題も存在する。特に全コストの6割以上を占めるCO₂の分離・回収技術の高度化や低コスト化が不可欠であり、これらの課題の克服さらには潜在する課題を明らかにするためには、国の関与の必要性は極めて高い。（B委員）
- 二酸化炭素分離膜モジュール研究開発は、平成18年度から平成22年度の5年間実施されたCO₂分離回収技術である分子ゲートCO₂分離膜研究開発の成果を実用化するものであり、日本の得意とする分離膜技術を最大限に生じたCO₂削減技術として注目されており、その成果はCO₂削減技術としての活用以外に日本の分離膜技術をさらに発展させ、膜メーカー国際競争力を向上させる可能性を持つものである。分子ゲート膜の成果は前回の評価においても非常に高い評価を得ており、CO₂削減における分離回収コストの大幅な低減を実現する新技術としての注目されているもので、実用化を目指した分離膜モジュールの開発研究の目的と位置づけは極めて妥当であると言える。（F委員）
- 政策的な必要性や国内外への普及を目指す社会的かつ経済的な重要性は理解できる。また、分離膜モジュールの科学的・技術的な新規性、独創性は高く

評価でき、事業の目的は妥当である。（H委員）

○CCSはCO₂の分離回収から始まる。それのための技術開発を行うのが本事業であり、その意味に於いてCCSの基幹をなすもので非常に重要である。

（D委員）

○CO₂分離・回収技術の高度化・低コスト化に資する技術開発は、CCSの実施に当たって不可欠であり、適切な課題設定である。（C委員）

○CO₂キャプチャーにおける膜利用の研究であり、わが国の強味を生かす優れた研究である。（E委員）

○CCSは、省エネや効率化技術と違い、それ自体が経済的価値を生み出さない。経済的なインセンティブが生まれるとすれば、炭素税や排出権取引制度のようなCO₂排出をコスト化する政策が前提になる。しかし、国連気候変動枠組み条約締約国会議の動向を見ると、ポスト京都議定書の国際枠組み形成にますます不透明感が増しており、政策的にCO₂排出をコスト化する動きは強まってははいない。

だが、気候変動問題は、異常気象の頻発など、何らかの世界的なイベントをきっかけに、再び国際的に取り組みが活発化し、CO₂排出のコスト化のリスクが顕在化する可能性もある。こうした事業性の予測が難しい問題に関しては、国が主導する意義は大きい。（G委員）

○二酸化炭素分離膜モジュール研究開発が後工程として想定するIGCC（石炭ガス化複合発電）は、投資コストが高く普及段階に至っていない。CCSと組み合わせたIGCCはさらに設備コスト上がることから、先進国の電力会社でも導入意欲は高くなく、いまだに事業性は見えない。ただ、先進国では原発の漸減、石炭火力の再評価という流れも出てきた。今後、気候変動問題との両立を強く求められた場合、「CCS付きIGCC」の需要が急速に顕在化する可能性もある。国が支援して、要素技術を高めておく意義は大きい。（G委員）

○膜分離プロセスは基本的に省エネルギープロセスである。したがって、二酸化炭素の分離回収プロセスに対して新規な膜モジュールを開発することは、二酸化炭素回収技術の省エネルギー化に対して資するものと評価できる。また、二酸化炭素回収技術は、そのままでは経済的にペイすること困難であるが、一方、その実用が必要とされた際の対応する手段をわが国として保有すること、および二酸化炭素回収技術が、エンジンメーカーなどが海外で事業展開する際に不可欠な現状を考えれば、わが国独自の当該技術の開発は、広く国民のニーズと合致すると言えるので、公的資金によってその開発を支援すべき案件と判断できる。（A委員）

【問題点・改善すべき点】

- 民間で進められているアミン吸収液をベースとした CO₂ 分離回収や、固体吸収材料等との明確な差別化が必要である。将来的には本モジュールを組み込んだ IGCC の開発など、より社会のニーズに合致した事業の提案も期待したい。
(H委員)
- 低炭素社会の実現に向けて、CCS の革新的技術には期待しているところであるが、国の事業としては実用化を見据えたシステム開発を強く意識すべきである。システム開発には大規模実証試験を通じた技術的な課題の抽出が不可欠であることから、国主導のもとで複数の大規模実証試験の実施が求められる。(B委員)

2. 研究開発等の目標の妥当性

コストを明示した数値設定は大変理解しやすく、目標値も高いレベルに設定されており、研究開発等の目標は適切かつ妥当である。また、最終目標を達成するのに必要な技術要素を、全体目標から個別要素技術に分解し、それぞれに対して目標を落とし込み各要素技術の目標を設定していることは評価できる。

中間評価段階で、最終評価目標としている 1500 円/t-CO₂ の分離回収技術に目途をつけようとしていることも具体的であり、適切な設定の仕方である。

一方、水を必要とする促進輸送で CO₂ 透過が行われるため、保水環境や湿度に対する評価などをさらに詳細に検討する必要がある。

排出権価格の低迷により、1500 円でも事業性がないのが実情であり、さらに挑戦的な低コスト化への目標設定を行うとともに、EOR 等経済性のある事業での活用が望まれる。

また、耐久性・耐不純物性の向上の指標となる目標設定や早期の実用化を見込まれるシステム開発が必要ではないか。

【肯定的意見】

○コストを明示した数値設定は大変理解しやすく、多くの要求性能が求められるモジュールの目標値も高いレベルに設定されている。研究開発等の目標は適切かつ妥当であると思われる。（H委員）

○分離・回収コスト1500円/t-CO₂という最終目標を達成するのに必要な技術要素を、性能面、製造面、システム面に分解し、それぞれに目標設定しており評価できる。（G委員）

○目標を全体目標から個別要素技術に分解し、それぞれに対して目標を落とし込み各要素の達成を目指していることは評価できる。各要素に落とし込むことで、それぞれの目標が明確となり、その達成に向けて業務が進んでいくので、より研究開発の成果を引き出すことにつながるやり方だと言える。

中間評価段階で、最終評価目標としている1500円/t-CO₂の分離回収技術に目途をつけようとしていることも具体的であり、その目途の付け方によって最終目標に向けてのアプローチも変わっていくことを考えると、非常に妥当で適切な設定の仕方であると言える。（F委員）

○コストの低減が実用化に当たっての大きな障害であるが、分離・回収コストとして具体的な数値目標が設定されていることは評価できる。（B委員）

○CO₂の分離回収は、CCSの大きなコストを占める。そのコストを目標の通りに1/3にすることができれば、CCSの実現に大きく貢献することは疑いない。このことから、明確で、大きな効果が期待できる目標が設定されているといえる。（D委員）

- 目標はおおむね妥当判断した。(A委員)
- 具体的かつ明確な研究開発目標、目標水準が設定されていると判断される。(C委員)
- Breakthrough を必要とする目標を達成している。実用化に向けて、さらに前進が期待できる。(E委員)

【問題点・改善すべき点】

- 学術的にも評価できる分離機構を提案しているが、水を必要とする促進輸送でCO₂透過が行われるため、保水環境や湿度に対す評価などをさらに詳細に検討する必要を感じる。湿度条件により膜性能が異なることを考えると、保水環境とコスト面の関係についての検討も必要であろう。(H委員)
- 特に、水処理等についてのモジュール技術については我が国に相当の蓄積があるので、実用化に踏み込んだコスト試算と目標設定があってもよかった。(A委員)
- ポスト京都議定書の国際枠組みの不透明感から、排出権価格が低迷しており、現状では分離・回収コスト1500円でも、事業性がないのが実情だ。いまの気候変動問題に対する消極的な国際社会の流れを踏まえると、さらに挑戦的な低コスト化への目標が必要になる。(G委員)
- 中間段階という点はあるが、定量的な目標は分離性能と耐圧性だけで、それ以外の目標には定量的なターゲットがない。(G委員)
- 本研究開発のIGCCにおける燃焼前燃料からのCO₂分離・回収は非常に難しい技術と思われる。難しい技術にチャレンジすることは否定しないが、早期実用化が見込まれるシステム開発も並行して実施すべきではないか。(B委員)
- 本事業を成功させるためには、どのような技術をどのようなレベルで達成させなくてはならないのかが示されていないのは残念である。目標は個別要素として示されているが、それらがそのような考えで、どのような関係性を持っているのかが見えてこない。当然、各要素技術に対しても検討は行われていると思われるが、全体成果目標と個別要素目標の関連性を構造的に示し誰でも理解、議論できる構造図があるとわかりやすかったと思える。(F委員)

3. 成果、目標の達成度の妥当性

薄膜化、膜安定性の評価など、分離膜の実用化で要求される項目の目標を達成するとともに、今後の電気代上昇リスクにも備え、2段プロセスから1段プロセスにターゲットを変更し、その実現にも目処を得ている。こうした状況変化への対応も含め、中間段階としては優れた成果が得られている。論文発表や知財の管理も適切であると判断できる。

一方、耐乾燥性実験は行われているが、ゲルなどの高分子膜での評価であり、保水環境に関する材料設計指針の再構築が必要である。

耐熱性については、硫酸の酸露点など燃焼プロセス側から決まるプロセス要件についてより明確にした検討が望まれる。

また、耐久性・耐不純物性の向上の指標となる目標設定や早期の実用化を見込まれるシステム開発が必要ではないか。

【肯定的意見】

- 薄膜化、膜安定性の評価など、分離膜の実用化で要求される項目の目標を確実にクリアしている。研究業績も着実に積み上げており、成果は妥当である。(H委員)
- CO₂分離膜ゲート機構という技術集約度の高い膜構造によって、水素を残してCO₂だけを透過するという一見、難しい性能を発揮させ、目標とする分離性能を達成した。今後の電気代上昇リスクにも備え、2段プロセスから1段プロセスにターゲットを変更し、その実現にも目処を得た。こうした状況変化への対応も含め、中間段階としては十分に評価できる。(G委員)
- 当初計画していた2段膜システムで要求される膜性能「 $Q_{CO_2} = 7.5 \times 10^{-10} m^3 m^{-2} S^{-1} Pa^{-1}$, $\alpha = 30$ 」に加え、新たに1段膜システムとして「 $Q_{CO_2} = 3 \times 10^{-10} m^3 m^{-2} S^{-1} Pa^{-1}$, $\alpha = 125$ 」を達成できれば、2段膜と同等の性能で電気料金を低く抑えることができる可能性を見出したことは評価に値する。今後の電気料金の値上げがCO₂コスト削減コストの増加要因となる現状の変化を早く察知し、電気料金が増加しても当初の目標である1,000円/t-CO₂の要求膜性能の達成の可能性を見出したことは素晴らしい成果であると言える。(F委員)
- 得られた研究成果に基づき、新しい処理システムの検討を始め、新たな目標値を設定しなおすなど、優れた成果が得られている。(C委員)
- 目標とした分離・回収コストを達成するための要求膜性能を見出すとともに、試作した小型の実機膜モジュールにて技術的課題を抽出できたことは、更なるコスト削減に期待が持てる。(B委員)
- 目標とされた膜性能については概ね良好に達成された。また、知財の確保についても順調に進捗していると判断した。(A委員)

- 高いバリアーを超えつつある点が明確に示されている。（E委員）
- 目標に対応した成果が得られている。
論文発表が適切になされていることから、各専門分野で承認される成果が得られていると判断される。
コンスタントに特許が出願されている状況から、確実に研究開発が進んで来たことがわかる。（D委員）

【問題点・改善すべき点】

- 耐乾燥性実験は行われているが、ゲルなどの高分子膜での評価であり、ゲルの膜厚や力学強度を考えると実用化にはかなり無理がある。保水環境に関する材料設計指針の再構築が必要であろう。（H委員）
- 他の分離回収技術と比較しての、経済性、省エネルギー性について、エンジニアリングの検討により、より明確な目標を据えるとよい。耐熱性については、硫酸の酸露点など燃焼プロセス側から決まるプロセス要件についてより明確にしての検討が望まれる。（A委員）
- 膜分離方法の大きな課題の1つが、耐久性、耐不純物性の向上である。これらに関しては、今後の研究ターゲットになるが、ここでも開発指標となる定量的な目標を設定していただきたい。（G委員）
- IGCCとのセットを前提とした膜分離システムの開発は今後の技術革新の動向にも左右されるため、やや楽観的に思える。吸収法などの他の分離法に比べて低コストであることを考えると、早期実用化が見込まれるシステム開発も必要ではないか。（B委員）

4. 事業化、波及効果についての妥当性

次世代型膜モジュール研究組合を創設し本研究開発に着手していることは、事業化の推進の観点及び波及効果の拡大の観点から評価できる。高選択性への見通しが立ったことから、1,000円/t-CO₂での実用化も視野に入ってきた。コスト面での強みを生かし、早期の事業化を期待したい。

また、天然ガス田からのCO₂分離や、化学プラントへの応用といったCCSとは異なる分野への応用が示されており、他分野への波及効果が期待できる。様々な業界からのニーズを集め、コストを具体的に示して応用可能性を検討し、事業を加速させていくことも検討して貰いたい。

一方、事業化を考えると薄膜化と長期の膜安定性が今後のポイントと考えられ、重点的な取り組みが必要であるとともに、他の分離回収法と比較しての優位性をしっかりとしたエンジニアリングデータに基づいて示すことが必要と考える。

また、実用化には大規模実証試験を通じて技術的な課題を抽出することも必要であることから、今後、実用化にあたっては、大規模実証試験での実証が望まれる。

【肯定的意見】

- 本事業推進において、産官学が協力するためのスキームとして次世代型膜モジュール研究組合を創設し取り組んでいることは、事業化の推進の観点及び波及効果の拡大の観点から適切であると言える。特に民間企業が加わることで本事業の実用化の早期実現の期待は高まり、さらには民間企業にとっても本事業を通しての新しい技術の習得と知見は、各企業の今後の国際競争力の向上にも貢献できると予想され、ひいては日本の国際競争力の向上にも貢献できると期待できる。（F委員）
- 実用化を進めるに当たっては民間企業との連携が必要不可欠であり、すでに民間企業と研究体制を構築し本研究開発に着手していることは早期の技術確立に期待が持てる。（B委員）
- 事業化を行うまでの具体的な計画が示されている。（D委員）
- 高選択性への見通しが立ったことから、1,000円/t-CO₂での実用化も視野に入ってきた。コスト面での強みを生かし、早期の事業化を期待したい。（H委員）
- 使用条件に対してロバストな膜の開発が進められている点では、その技術型分野に展開できる可能性は高いと期待できる。（A委員）
- 天然ガス田からのCO₂分離という、CCSとは異なる分野への応用が具体的に示されている。天然ガス田からのCO₂分離は大きな需要が期待される

分野であることから、当初想定していなかった波及効果を生じたと言える。

(D委員)

○CO₂含有率の高い劣質な天然ガス田の開拓にはCO₂分離回収技術を必要としており、天然ガスから効率よくCO₂を除去できれば多く劣質な天然ガス田を商業化することが可能となる。本事業は新たなエネルギー資源開発の可能性にも貢献できる技術であり、具体的に産油国や国策石油会社から問合せを受けていることも、その期待をうかがわせるに十分な証拠であると言える。本技術の波及効果は非常に大きなものがあると思われる。(F委員)

○今回の膜分離技術の事業性は、まずはIGCCの事業化に依存する。

ただ、IGCC向けとは別に、加圧下のCO₂分離技術は化学プラント等でも応用可能と思われる。化学プラントから出る混成ガスからCO₂を分離・回収し、ほかの化学プロセスに活用したり、温室栽培や、将来的は藻による炭化水素油の生産に使ったりするなど、いわゆるCCUが事業化されれば、CO₂排出のコスト化を待たずにCO₂膜分離技術が事業性を持つ可能性もある。こうした用途も踏まえ、分離・回収の一層の低コストに取り組むべきであろう。(G委員)

○実用化に向けてさらに確認する点があり、それらをクリアすることが肝心である。応用は既に色々考えられている。(E委員)

【問題点・改善すべき点】

- 高選択性に関しては方向性が見えてきたが、事業化を考えると薄膜化と長期の膜安定性が今後のポイントと考えられる。重点的な取り組みが必要であろう。(H委員)
- 計画に対して概ね順調とは思いますが、事業化に向けては、他の分離回収法と比較しての優位性をしっかりとしたエンジニアリングデータに基づいて行う必要があるのではないか。(A委員)
- 実用化には大規模実証試験を通じて技術的な課題を抽出し、その分離回収技術に適したシステム開発が必要であることから、大規模実証試験を積極的に推進していくべきである。また、システム開発は早期実用化を踏まえ、IGCCを含めた幅広い検討が必要である。(B委員)
- 本技術は日本の強みを生かした技術であり、様々な方法で活用のチャンスがあると想像される。どのような活用の仕方が可能なのか、関係者だけでなく、様々な業界からのニーズを集め本技術の応用的な可能性を議論し見出し、事業を加速させていくことも検討して欲しい。CO₂削減に貢献しながら、様々な産業における活用も考えられる可能性を秘めていると思われる。(F委員)

5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性

役割分担が良くできており、民間企業、研究機構、大学からなる研究開発体制が構築されている。これは、開発期間を短縮し、実用化を加速させるうえで、非常に良い開発体制であると評価できる。

研究開発計画は概ね妥当である。資金も進捗状況に応じた適切な配分が行われている。費用対効果においても、本技術の可能性は非常に高く、様々な応用性もありビジネス的にもポテンシャルの高い技術であることから、費用対効果の高い事業であると考えられる。

また、シンポジウムが主催されていることから、成果の公開と外部との意見交換が適切に行われていると認められる。

一方、費用対効果については、現状の分離回収コストから比較することも良いが、CCS以外の削減手段（例えば太陽光、風力などの再生可能エネルギーで抑制した場合）との比較もあれば、CCSの有益性をより分かり易く示せるのではないかと考える。

また、諸外国技術との差別化、ある時点での海外への展開のシナリオも検討すべきではないか。

【肯定的意見】

- 膜分離モジュールの開発は様々な知見が必要と思われ、民間企業を含めた多くの協力者の参加が望まれることから、民間企業や研究機構、大学などからなる研究開発体制を構築していることは実用化を加速させるうえで評価できる。（B委員）
- 材料メーカーと、膜関連に強いメーカー、そしてCO₂分離・回収プラントの経験のあるエンジニアリング会社などが組んだ、研究・開発は適切な体制であった。膜開発から、モジュール、エンジニアリングまでを1つのチームで手掛けることで開発速度のアップが期待できる。（G委員）
- 本事業は先行事業である「分子ゲート機能CO₂分離膜の技術研究開発」から膜技術に強い有力な民間企業も参加している事業であり、成果を達成し早く実現化するという視点では、非常に良い開発体制で進められていると評価できる。（F委員）
- 役割分担がよくできている点は評価が高い。残された課題を①現状での実用化、②さらに進んだ性能の膜を開発を同時に考えて欲しい。（E委員）
- バランスよく協力体制が築かれており、研究開発計画も概ね妥当である。資金は進捗状況に応じた配分がなされており、適切に運用されている。（H委員）
- 費用対効果においても、本技術の可能性は非常に高く、様々な応用性もあり

ビジネス的にもポテンシャルの高い技術であることから、費用対効果の高い事業であると考えられ、さらに国として実用化を加速させるためにも積極的に投資していくことも検討して良い技術であると思われる。（F委員）

- 目標を達成するために必要な計画が立てられて、それが具体的に実施されている。（D委員）
- シンポジウムが主催されていることから、成果の公開と外部との意見交換が適切に行われていると認められる。（D委員）
- 特に異論ありません。（A委員）

【問題点・改善すべき点】

- 費用対効果の考え方として、現状の分離回収コストから比較することも良いが、CCS以外の削減手段（例えば貯留可能量52億トン分のCO₂を太陽光、風力などの再生可能エネルギーで抑制した場合）との比較もあれば、CCSの有益性をより分かり易く示せるのではないか。（B委員）
- 日本の得意とする技術を活用した事業であるが、ある程度の成果が見えているのであれば、本技術の国際的な普及を推進していくためにも、知的所有権は担保しながら可能な限り海外の機関や企業にも協力を働き掛け、早く成果を出し普及できるような体制を自らリーダーシップをとって進めていくことも必要ではないだろうか。海外への展開のシナリオもそろそろ検討すべき段階にきていると思われるので、可能性を含めて検討して頂きたい。（F委員）
- 本モジュールを組み込んだIGCCの検討など、諸外国との差別化がなされる提案に期待したい。（H委員）

6. 総合評価

CO₂削減効果の高いCCSを実用化するためには、今後、更なる低コスト化・高度化が必要であり、特に全コストの6割以上を占めるCO₂の分離・回収の技術開発は重要である。

分離膜モジュールの科学的・技術的な新規性、独創性は高く評価でき、事業の目的は妥当である。研究開発等の目標も適切かつ妥当である。

薄膜化、膜安定性の評価など、分離膜の実用化で要求される項目の目標を確実にクリアし、高選択性への見通しが立ったことから、1,000円/t-CO₂での実用化の可能性も示され、早期の事業化を期待するとともに、現時点の性能における実用化、販売も検討を始めて欲しい。

また、将来の電気代上昇リスクにも備え、2段プロセスから1段プロセスにターゲットを変更し、その実現にも目処を得ていることは優れた成果である。

一方、水を必要とする促進輸送でCO₂透過が行われるため、保水環境や湿度に対する評価などをさらに詳細に検討する必要がある。

耐乾燥性実験は行われているが、ゲルなどの高分子膜での評価であり、保水環境に関する材料設計指針の再構築が必要である。

事業化を考えると薄膜化と長期の膜安定性が今後のポイントと考えられ、重点的な取り組みが必要である。

耐プロセス適合性の検討を進める上で、燃焼プロセス側からの制約条件をより明確にした研究開発が必要である。

また、実用化には大規模実証試験を通じて技術的な課題を抽出することも必要であることから、今後、実用化にあたっては、大規模実証試験での実証が望まれる。

【肯定的意見】

○CO₂削減効果の高いCCSを実用化するためには、今後、更なる低コスト化・高度化が必要であり、特に全コストの6割以上を占めるCO₂の分離・回収技術は重要であることから、実用化に向けた定量的な目標水準や明確な開発スケジュールを定めている本研究開発は、今後とも国主導のもとで積極的に推進していくべきである。（B委員）

○目標の設定、実行計画の策定が適切に行われ、目標通りの成果が得られており、優れた研究開発事業である。（D委員）

○二酸化炭素の膜分離による回収技術は省エネ性から大きく期待できるものである。また、膜性能としては最終評価に向けて十分に進捗が期待できると判断した。（A委員）

○政策的な必要性や国内外への普及を目指す社会的かつ経済的な重要性は理解

できる。また、分離膜モジュールの科学的・技術的な新規性、独創性は高く評価でき、事業の目的は妥当である。研究開発等の目標も適切かつ妥当であり、薄膜化、膜安定性の評価など、分離膜の実用化で要求される項目の目標を確実にクリアしている。高選択性への見通しが立ったことから、1,000円/t-CO₂での実用化の可能性も示され、コスト面での強みを生かし、早期の事業化を期待する。（H委員）

○優れた研究になっている。（E委員）

○高コストが課題になりがちな膜分離技術の低コスト化に挑み、まず高い分離性能を達成したことは、今後の実用化に繋がる成果であろう。今後の研究開発で、十分な耐久性が確保できれば、膜法がCO₂分離・回収の有望な手段になる期待も出てきた。技術的、知識的に集約度の高い膜技術は、高付加価値の期待できる戦略技術になる可能性もあり、産業政策的にも意義がある。

膜法は、スケラビリティに柔軟性があり、IGCCと組み合わせたCCSのみならず、化学工場との併設によるCCUにも展開が期待できる。（G委員）

○当初の目標を達成し、さらに新たな可能性を見出しているなど、重要な成果を見出した研究事業であると評価できる。今後の展開に期待がもたれる。

（C委員）

○本事業は、これまでの成果を見ても順調又はそれ以上に推進されていると思われる。さらには、東日本大震災によって引き起こされた電気エネルギー料金値上げによるCO₂削減コスト高騰という将来のポテンシャルリスクに対する構えとしても、1段膜システムによる対応の実現可能性を実証し打ち出せたことは非常に評価できる。国内・国外の環境変化を読み取りその変化に対しても柔軟に対応し、目的及び目標を達成しようとしているやり方は最終的な成果を達成するためには重要なポイントなので、是非今後も環境変化を見ながら事業の推進を行って頂きたい。（F委員）

【問題点・改善すべき点】

●民間で進められているアミン吸収液をベースとしたCO₂分離回収や、資料8-1での固体吸収材料等との明確な差別化に関する説明が必要である。将来的には本モジュールを組み込んだIGCCの開発など、諸外国との差別化や、より社会のニーズに合致した事業の提案も期待したい。

学術的にも評価できる分離機構を提案しているが、水を必要とする促進輸送でCO₂透過が行われるため、保水環境や湿度に対する評価やそのコストへの影響などをさらに詳細に検討する必要がある。耐乾燥性実験は行われているが、ゲルなどの高分子膜での評価であり、ゲルの膜厚や力学強度を考えると実用化に

はかなり無理がある。保水環境に関する材料設計指針の再構築が必要と感じる。高選択性を有する膜の開発に関しては方向性が見えてきたが、事業化を考えると薄膜化と長期の膜安定性が今後のポイントと考えられる。重点的な取り組みが必要であろう。（H委員）

- プロセス設計サイドからさらに制約条件を明確にし、コスト、省エネルギー性の目標を組み立てることがのぞましい。また、燃焼プロセス側からあの制約条件をいま一度詳しく明らかにした上で、目標設定をされることが実用化に近づく方法論となると思われる。（A委員）
- 現時点での性能における実用化、販売も考えた研究で適用ガス不純物と耐久性の条件とそれに対するコストの検討も始めて欲しい。（E委員）
- 実用化には大規模実証試験を通じて技術的な課題を抽出し、その分離回収技術に適したシステム開発が必要であることから、大規模実証試験の積極的な実施が不可欠である。また、システム開発には早期実用化を踏まえ、IGCCを含めた幅広い検討が必要である。（B委員）

7. 今後の研究開発の方向等に関する提言

- ・耐プロセス適合性の検討を進める上で、燃焼プロセス側からの制約条件をより明確にした研究開発が必要である。
- ・今後は技術開発だけでなく、実用化に向けた事業展開についても検討することが望まれる。
- ・実用化は国内に限定するのではなく、EORなどで期待の大きい海外にも展開していくことが、地球全体のCO₂を削減するうえで重要である。今後、実用化にあたっては長い年月の研究が必要となるが、随時海外プロジェクトへの参加による売り上げ貢献を期待したい。
- ・優れた研究でありこの方向で進めて欲しいが、研究の途中でも随時実用化を試みて貰いたい。

【各委員の提言】

- プロセス設計サイドからさらに制約条件を明確にし、コスト、省エネルギー性の目標を組み立てることがのぞましい。また、燃焼プロセス側からあの制約条件をいま一度詳しく明らかにした上で、目標設定をされることが実用化に近づく方法論となると思われる。（A委員）
- 実用化にむけていよいよ最終段階に入ってきたと思うが、今後は実用化にむけての技術開発は当然のことながら、そろそろマーケティング的な観点のアプローチも積極的に開始して頂きたい。本事業で蓄積された技術の民間企業での積極的な活用や展開、さらには海外への技術移転やライセンス供与、他の事業への応用展開など、CO₂分離膜の持つ様々なポテンシャルとどのように活用するか、利用の観点から検討してその実現に向けてのマーケティング活動にも力を入れて頂きたい。（F委員）
- CCSの技術開発は、温暖化防止対策として極めて重要なものであり、特に全コストの6割以上を占めるCO₂の分離・回収技術は早急な低コスト化・高度化が望まれるが、実用化にあたっては国内に限定するのではなく、寧ろEORなどで期待の大きい海外を中心に展開していくことが、地球全体のCO₂を削減するうえで重要である。国内での大規模実証試験可能なサイトが限られているなか、案件の多い海外でのプロジェクトに積極的に参加し、国主導のもと実用化に向けて本研究開発を推進して頂きたい。（B委員）
- 膜分離による海水淡水化や各種電解質膜など、膜技術は、日本企業のお家芸とも言える。日本企業に蓄積された膜関連技術をCO₂分離にも生かすことは、CCSのみならず、CCUなども含め、今後の波及効果を考えると大きな意義がある。回収したCO₂の有効な利用も含めた、広い視点でも研究・開発をお願いしたい。（G委員）

○優れた研究でありこの方向で進めて欲しいが、欲をいえば長い年月の研究があるので、途中でも随時実用化、売上、資金貢献も試みて欲しい。

（E委員）

○順調に研究開発が進んでおり、今後の予定も適切と認められる。（D委員）

(参考)

「二酸化炭素分離膜モジュール研究開発」プロジェクト評価(中間)

今後の研究開発の方向等に関する提言に対する対処方針

提 言	対 処 方 針
<ul style="list-style-type: none">○ 耐プロセス適合性の検討を進める上で、燃焼プロセス側からの制約条件をより明確にした研究開発が必要である。 ○ 今後は技術開発だけではなく、実用化に向けた事業展開についても検討することが望まれる。 ○ 実用化は国内に限定するのではなく、EORなどで期待の大きい海外にも展開していくことが、地球全体のCO2を削減するうえで重要である。今後、実用化にあたっては、長い年月の研究が必要となるが、随時海外プロジェクトへの参加による売り上げ貢献を期待したい。 ○ 優れた研究でありこの方向で進めて欲しいが、研究の途中でも随時実用化を試みて貰いたい	<ul style="list-style-type: none">○ ご指摘のとおり、燃焼プロセス側からの制約条件を調査することは重要であり、現在、制約条件をより明確にするための調査を行っているところ。今後その制約条件に基づいた実験により、耐プロセス適合性の検討を行うこととしている。 ○ 本事業は実用化を見据えて技術研究組合から成る研究開発体制を構築しており、今後実用化に向けた事業展開についても検討して参りたい。 ○ ご指摘を踏まえ、今後実用化に当たっては、当該プロジェクトの成果をもとに、海外プロジェクトへの参加についても検討して参りたい。 ○ 研究開発の進展と本技術を適用できる用途及びその適用先条件を検討し、研究の途中でも随時実用化を検討して参りたい。

第4章 評点法による評点結果

第4章 評点法による評点結果

「二酸化炭素分離膜モジュール研究開発事業」に係るプロジェクト評価の実施に併せて、以下に基づき、本評価検討会委員による「評点法による評価」を実施した。その結果は「3. 評点結果」のとおりである。

1. 趣 旨

評点法による評価については、産業技術審議会評価部会の下で平成 11 年度に評価を行った研究開発事業（39 プロジェクト）について「試行」を行い、本格的導入の是非について評価部会において検討を行ってきたところである。その結果、第 9 回評価部会（平成 12 年 5 月 12 日開催）において、評価手法としての評点法について、

(1) 数値での提示は評価結果の全体的傾向の把握に有効である、

(2) 個々のプロジェクト毎に評価者は異なっても相対評価はある程度可能である、との判断がなされ、これを受けて今後のプロジェクト評価において評点法による評価を行っていくことが確認されている。

また、平成 21 年 3 月 31 日に改定された「経済産業省技術評価指針」においても、プロジェクト評価の実施に当たって、評点法の活用による評価の定量化を行うことが規定されている。

これらを踏まえ、プロジェクトの中間・事後評価においては、

(1) 評価結果をできる限りわかりやすく提示すること、

(2) プロジェクト間の相対評価がある程度可能となるようにすること、

を目的として、評価委員全員による評点法による評価を実施することとする。

本評点法は、各評価委員の概括的な判断に基づき点数による評価を行うもので、評価報告書を取りまとめる際の議論の参考に供するとともに、それ自体評価報告書を補足する資料とする。また、評点法は研究開発制度評価にも活用する。

2. 評価方法

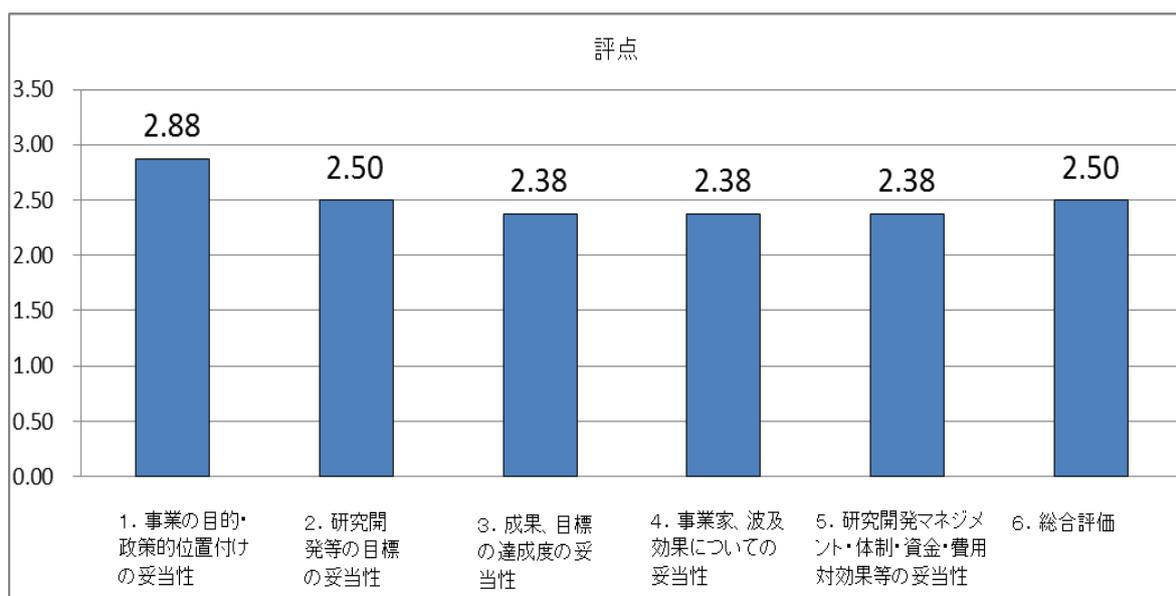
- ・各項目ごとに4段階（A（優）、B（良）、C（可）、D（不可）〈a, b, c, dも同様〉）で評価する。
- ・4段階はそれぞれ、A（a）= 3点、B（b）= 2点、C（c）= 1点、D（d）= 0点に該当する。
- ・評価シートの記入に際しては、評価シートの《判定基準》に示された基準を参照し、該当と思われる段階に○を付ける。
- ・大項目（A, B, C, D）及び小項目（a, b, c, d）は、それぞれ別に評点を付ける。
- ・総合評価は、各項目の評点とは別に、プロジェクト全体に総合点を付ける。

3. 評点結果

評点法による評点結果

(二酸化炭素分離膜モジュール研究開発事業)

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員	F 委員	G 委員	H 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.88	3	3	3	3	3	3	3	2
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.50	2	2	3	3	3	3	2	2
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.38	2	2	3	2	3	3	2	2
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.38	2	1	3	3	3	3	2	2
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.38	2	3	3	2	3	2	2	2
6. 総合評価	2.50	2	2	3	3	3	3	2	2



第5章 評点小委員会のコメント及び コメントに対する対処方針

評価小委員会のコメント及びコメントに対する対処方針

本研究開発事業の評価に係る評価小委員会のコメント及びコメントに対する推進課の対処方針は、以下のとおり。

(コメント)

これまでの研究開発により、従来よりも進んだ技術が実現されている点は評価できる。長年かけて開発された技術については、大気にCO₂を放出するのをとどめるという意味の使い方だけでなく、それ以外の使い方での実用化も検討して貰いたい。

(対処方針)

ご指摘を踏まえ、これまでに開発した技術についてはCO₂の大気への放出抑制以外の適用可能性も検討してまいりたい。

經濟產業省技術評価指針

平成 2 1 年 3 月 3 1 日

目次

経済産業省技術評価指針の位置付け	1
I. 評価の基本的考え方	4
1. 評価目的	4
2. 評価の基本理念	4
3. 指針の適用範囲	5
4. 評価の類型・階層構造及びリンケージ	5
5. 評価方法等	5
6. 評価結果の取扱い等	6
7. 評価システムの不断の見直し	7
8. 評価体制の充実	7
9. 評価データベース等の整備	7
10. 評価における留意事項	7
II. 評価の類型と実施方法	9
II. 1. 技術に関する施策評価	9
(1) 事前評価	9
(2) 中間・終了時評価	9
II. 2. 技術に関する事業評価	10
II. 2. 1. 研究開発制度評価	10
(1) 事前評価	10
(2) 中間・終了時評価	10
II. 2. 2. プロジェクト評価	11
(1) 事前評価	11
(2) 中間・終了時評価	11
II. 2. 3. 競争的資金制度による研究課題に関する評価	12
(1) 事前評価	12
(2) 中間・終了時評価	13
II. 3. 追跡評価	14

経済産業省技術評価指針の位置付け

経済産業省技術評価指針（以下、「本指針」という。）は、経済産業省が、経済産業省における技術に関する施策及び技術に関する事業（以下、「技術に関する施策・事業」という。）の評価を行うに当たって配慮しなければならない事項を取りまとめたガイドラインである。

本指針は、「産業技術力強化法」（平成12年法律第44号）第10条の規定、「科学技術基本計画」（平成18年3月閣議決定）、「研究開発システムの改革の推進等による研究開発能力の強化及び研究開発等の効率的推進等に関する法律」（平成20年法律第63号）第34条の規定及び「国の研究開発評価に関する大綱的指針」（平成20年10月内閣総理大臣決定）（以下、「大綱的指針」という。）に沿った適切な評価を遂行するための方法を示す。

同時に、「行政機関が行う政策の評価に関する法律」（平成13年法律第86号）（以下、「政策評価法」という。）に基づく「経済産業省政策評価基本計画」（以下、「政策評価基本計画」という。）に沿った、経済産業省政策評価のうち研究開発に関する部分の実施要領としての性格を持つ。したがって、技術に関する施策・事業についての評価の結果は、政策評価基本計画に基づき実施される事前評価及び事後評価に適切に反映・活用を図る。

技術評価は、政策評価法上要請される評価を含め政策評価の一環としての位置付けを有することから、本指針は、技術に関する施策・事業の成果や実績等を厳正に評価し、それを後の技術に関する施策・事業の企画立案等に反映させる政策サイクルの一角としての評価の在り方について定めるものである。

ただし、技術に関する施策・事業に係る評価は、競争的資金制度による研究課題、プロジェクトといった研究開発の内容や性格、実施体制等の態様に応じた評価方法に拠るべきであるとともに、評価の厳正さと効率性を両立するためには、評価をとりまく様々な状況に応じた臨機応変な評価手順を設定する必要がある。さらに、評価手法は日進月歩であり、今後よりよい評価手法が提案されることも十分考えられる。したがって、本指針では共通的なルール及び配慮事項を取り上げることとし、より詳細な実施のプロトコルは評価マニュアルの作成等により記述することで、機動的な実施を図ることとする。

研究開発機関が自ら実施する評価をその機関の自己改革の契機とするような自律的なシステムの構築に努め、研究開発を実施する独立行政法人が、大綱的指針及び本指針に沿って、研究開発評価の実施に関する事項について、明確なルールを定め、研究開発評価の実施及び評価結果の活用が適切かつ責任を持って行われるよう、所管官庁としての責務を果たすものとする。

◎本指針における用語については、次に定めるところによる。

- ・競争的資金制度：資金を配分する主体が、広く一般の研究者（研究開発に従事している者又はそれらの者から構成されるグループをいう。）、企業等又は特定の研究者、企業等を対象に、特定の研究開発領域を定め、又は特定の研究開発領域を定めずに研究課題を募り、研究者、企業等から提案された研究課題の中から、当該課題が属する分野の専門家（当該分野での研究開発に従事した経験を有する者をいう。）を含む複数の者による、研究開発の着想の独創性、研究開発成果の先導性、研究開発手法の斬新性その他の科学的・技術評価又は経済的・社会的評価に基づき、実施する課題を採択し、当該課題の研究開発を実施する研究者等又は研究者等が属する組織若しくは企業等に資金を配分する制度をいう。
- ・研究開発制度：資源配分主体が研究課題を募り、提案された課題の中から採択した課題に研究開発資金を配分する制度をいう。
- ・プロジェクト：具体的に研究開発を行う個別の実施単位であり、明確な目的や目標に沿って実施されるものをいう。研究開発制度（競争的資金制度を含む）による研究課題は、本指針上プロジェクトには該当しない。
- ・研究開発機関：国からの出資、補助等の交付を受けて研究開発を実施し、又は研究開発の運営管理を行う機関をいう。
- ・技術に関する事業：具体的に研究開発を行う個別の実施単位をいい、「研究開発制度（競争的資金制度を含む）」、「プロジェクト」及び「競争的資金制度による研究課題」により構成される。
- ・技術に関する施策：同一又は類似の目的を有する技術に関する事業のまとまりをいい、当該目的との関係で必要な研究開発以外の要素（調査等）を含む場合がある。
- ・政策評価書：本指針において用いる「政策評価書」とは経済産業省政策評価実施要領を踏まえた評価書をいう。
- ・政策サイクル：政策の企画立案・実施・評価・改善（plan-do-check-action）の循環過程をいう。
- ・評価システム：評価目的、評価時期、評価対象、評価方法等、評価に係るあらゆる概念、要素を包含した評価制度、体制の全体をいう。
- ・推進課：技術に関する事業を推進する課室（研究開発担当課室）をいう。推進課は、評価結果を反映させるよう努力する義務がある。
- ・主管課：技術に関する施策の企画立案を主管する課室及び予算等の要求事項を主管する課室をいう。
- ・査定課：予算等の査定を行う課室（大臣官房会計課、資源エネルギー庁総合政策課等）をいう。
- ・有識者等：評価対象となる技術に関する施策・事業について知見を有する者及び研究開発成果の経済的・社会的意義につき指摘できる人材（マスコミ、ユーザ、人文・社会学者、投資家等）をいう。
- ・外部評価者：経済産業省に属さない外部の有識者等であって、評価対象となる技術に関する施策・事業の推進に携わっていない者をいう。
- ・外部評価：外部評価者による評価をいい、評価コメントのとりまとめ方法としてパネルレビュー

（評価者からなる委員会を設置（インターネット等を利用した電子会議を含む。）して評価を行う形態）による場合とメールレビュー（評価者に対して郵便・FAX・電子メール等の手段を利用して情報を提供し、評価を行う形態）による場合とがある。

- 評価事務局：技術に関する施策・事業の評価の事務局となる部署をいい、評価者の行う評価の取りまとめ責任を負う。
- 評価者：評価の責任主体をいい、パネルレビューによる場合には外部評価者からなる委員会が責任主体となる。また、評価の結果を踏まえて、資源配分の停止や変更、技術に関する施策・事業の内容の変更に責任を有するのは企画立案部門である技術に関する施策・事業の推進課及び主管課である。
- 終了時評価：事業終了時に行う評価であり、事業が終了する前の適切な時期に行う終了前評価と事業の終了直後に行う事後評価がある。

I. 評価の基本的考え方

1. 評価目的

(1) より良い政策・施策への反映

評価を適切かつ公正に行うことにより、研究者の創造性が十分に発揮されるような、柔軟かつ競争的で開かれた研究開発環境の創出など、より良い政策・施策の形成等につなげること。

(2) より効率的・効果的な研究開発の実施

評価を支援的に行うことにより、研究開発の前進や質の向上、独創的で有望な優れた研究開発や研究者の発掘、研究者の意欲の向上など、研究開発を効果的・効率的に推進すること。

(3) 国民への技術に関する施策・事業の開示

高度かつ専門的な内容を含む技術に関する施策・事業の意義や内容について、一般国民にわかりやすく開示すること。

(4) 資源の重点的・効率的配分への反映

評価の結果を技術に関する施策・事業の継続、拡大・縮小・中止など資源の配分へ反映させることにより資源の重点化及び効率化を促進すること。また、研究開発をその評価の結果に基づく適切な資源配分等通じて次の段階に連続してつなげることなどにより、研究開発成果の国民・社会への還元効率化・迅速化に資すること。

2. 評価の基本理念

評価の実施に当たっては、以下の考え方を基本理念とする。

(1) 透明性の確保

推進課、主管課及び研究開発機関においては、積極的に成果を公開し、その内容について広く有識者等の意見を聴くこと。評価事務局においては、透明で公正な評価システムの形成、定着を図るため、評価手続、評価項目・評価基準を含めた評価システム全般についてあらかじめ明確に定め、これを公開することにより、評価システム自体を誰にも分かるものとするとともに、評価結果のみならず評価の過程についても可能な限り公開すること。

(2) 中立性の確保

評価を行う場合には、被評価者に直接利害を有しない中立的な者である外部評価の導入等により、中立性の確保に努めること。

(3) 継続性の確保

技術に関する施策・事業においては、個々の評価がそれ自体意義を持つだけでなく、評価とそれを反映した技術に関する施策・事業の推進というプロセスを繰り返していく時系列のつながりにも意義がある。したがって、推進課及び主管課にとって評価結果を後の技術に関する施策・事業の企画立案等に反映させる際に有用な知見を抽出し、継続性のある評価方法で評価を行うこと。

(4) 実効性の確保

政策目的に照らし、効果的な技術に関する施策・事業が行われているか判断するための効率的評価が行われるよう、明確で実効性のある評価システムを確立・維持するとともに、技術に関する施策・事業の運営に支障が生じたり、評価者及び被評価者双方に過重な負担をかけるこ

とのない費用対効果の高い評価を行うこと。

3. 指針の適用範囲

- (1) 本指針においては、多面的・階層的な評価を行う観点から、経済産業省における具体的に研究開発を行う個別の実施単位である研究開発制度、プロジェクト及び競争的資金制度による研究課題である技術に関する事業並びに同一又は類似の目的を有する技術に関する事業のまとめである技術に関する施策を評価対象とする。
- (2) 国費の支出を受けて技術に関する事業を実施する民間機関、公設試験研究機関等の評価については、当該事業の評価の際等に、これら機関における当該事業の研究開発体制に関わる運営面に関し、国費の効果的・効率的執行を確保する観点から、必要な範囲で評価を行う。
- (3) 上記(2)の規定にかかわらず、独立行政法人が運営費交付金により自ら実施し、又は運営管理する技術に関する事業については、独立行政法人通則法（平成11年法律第103号）及び大綱的指針に基づいて実施されるものであり、本指針の対象としない。なお、技術に関する施策には、これら事業は含まれるものとする。
- (4) 評価の種類としてはこの他に研究者等の業績の評価が存在するが、これは研究開発機関の長が評価のためのルールを整備した上で、責任を持って実施することが基本であり、本指針の対象としない。

4. 評価の類型・階層構造及びリンケージ

(1) 実施時期による類型

評価はその実施時期により、事前評価、中間・終了時評価及び追跡評価に類型化される。

(2) 評価の階層構造

経済産業省における技術評価では、技術に関する施策・事業での評価を基本的な評価単位とするが、政策効果をあげるために、特に必要があると認められるときには、関連する複数の技術に関する施策・事業が有機的に連携をとって

体系的に政策効果をあげているかを評価することとする（これは経済産業省政策評価実施要領における「政策体系評価」に対応するものと位置付ける。）。

(3) 実施時期による評価のリンケージ

中間・終了時評価は、技術に関する施策・事業の達成状況や社会経済情勢の変化を判断し、計画の見直しや後継事業への展開等の是非を判断するものである。また、事前評価での予想が実際にどのような結果となったか、予算措置は妥当であったか等を確認することにより、事前評価の方法を検証し得るものである。したがって、中間・終了時評価の結果をその後の産業技術政策・戦略の企画立案や、より効果的な事前評価の評価手法の確立に反映させるよう努めるものとする。

また、中間・終了時評価の結果は、追跡評価にて検証されるものである。

5. 評価方法等

厳正な評価を行うためには、評価方法、評価項目等に客観性を持たせることが必要であること

から、本指針をはじめ評価実施に係る諸規程等を整備の上、公開するものとする。

技術評価室は本指針を踏まえ、評価マニュアル等を策定するとともに、円滑な評価の実施のための指導及び評価システムの維持管理を行う。

(1) 施策原簿

技術に関する施策の基本実施計画書、政策評価書等をもって施策原簿とする。施策原簿を作成・改定した場合は、速やかにその写しを技術評価室へ提出する。

(2) 事業原簿

技術に関する事業の基本実施計画書、政策評価書等をもって事業原簿とする。研究開発制度及びプロジェクトの事業原簿を作成・改定した場合は、速やかにその写しを技術評価室へ提出する。

(3) 評価項目・評価基準

評価の類型及び技術に関する施策・事業の態様等に応じて標準的な評価項目・評価基準を技術評価室が別に定めることとする。

(4) 評価手続・評価手法

評価の類型に応じて適切な評価手法を用いるものとする。なお、複数の事業間の相対的評価を行う場合等においては、評点法の活用が有効と考えられ、評価の類型及び対象案件の態様に応じ適宜活用することが望ましい。

(5) 評価の簡略化

評価の実施に当たっては、評価コストや被評価者側の過重な負担を回避するため、評価対象となる事業に係る予算額が比較的少額である場合には、評価項目を限定する等の簡略化を行うことができるものとする。なお、簡略化の標準的な方法については技術評価室が別に定める。

6. 評価結果の取扱い等

(1) 評価結果の取扱い

評価事務局は、評価終了後速やかに評価書の写しを技術評価室に提出する。技術評価室は全ての評価結果について、これまでに実施された関連調査及び評価の結果、評価の実施状況等を踏まえつつ意見をまとめ、査定課、秘書課及び政策評価広報課に報告することができる。

(2) 予算査定との関係

査定課は、技術評価室から事前評価及び中間評価の評価書の提出を受けた場合は、技術評価室の意見を踏まえつつ技術に関する施策・事業の評価等を行う。事前評価に関しては査定課の評価を終えた事前評価書に記載された技術に関する施策・事業の内容をもって、推進課又は主管課と査定課との間の合意事項とみなし、査定課はこれを踏まえて予算査定を行う。中間評価に関しては、査定課は中間評価結果を踏まえて予算査定を行う。

(3) 評価結果等の公開の在り方

評価結果及びこれに基づいて講ずる又は講じた措置については、機密の保持が必要な場合を除き、個人情報や企業秘密の保護、知的財産権の取得等に配慮しつつ、一般に公開することとする。なお、事前評価については、政策立案過程の透明化を図る観点から、評価事務局は予算が経済産業省の案として確定した後に、公開するものとする。パネルレビューを行う場合にお

ける議事録の公開、委員会の公開等については、「審議会等の透明化、見直し等について」（平成7年9月閣議決定）に準じて行うものとする。

7. 評価システムの不断の見直し

いかなる評価システムにおいても、評価は評価者の主観的判断によってなされるものであり、その限りにおいては、完璧な客観性、公平性を求めることは困難である。したがって、評価作業が終了するたびごとにその評価方法を点検し、より精度の高いものとしていく努力が必要である。また、本指針については、こうした一連の作業を踏まえ、原則として毎年度見直しの要否を検討する。

8. 評価体制の充実

評価体制の充実を図るため、研究者の評価者としての活用などにより評価業務に携わる人材を育成・確保するとともに、研究開発費の一部を評価費用に充てるなど評価に必要な資源を確保する。

9. 評価データベース等の整備

技術評価室は、国内外の適切な評価者を選任できるようにするため、及び個々の評価において普遍性・信頼性の高い評価を実現するため、個々の技術に関する施策・事業についての研究者、資金、成果、評価者、評価結果等をまとめたデータベースを整備する。

また、競争的資金制度による研究課題に関する評価など、審査業務等を高度化・効率化するために必要な電子システムの導入も促進する。

10. 評価における留意事項

(1) 評価者と被評価者との対等性

① 評価者と被評価者との関係

評価作業を効果的に機能させるためには、評価者と被評価者の双方が積極的にその知見と情報を提供し合うという協調的関係と、評価者もその評価能力を評価されるという意味で評価者と被評価者とが相互に相手进行评估するという緊張関係とを構築し、この中で、討論を行い、評価を確定していく必要がある。

この際、評価者は、不十分な成果等被評価者が自ら進んで提示しない事実があるかどうかを見極める能力が要求される。一方、被評価者は、評価対象の技術に関する施策・事業の位置付けを明確に認識するとともに、評価結果を正確に理解し、確実にその後の技術に関する施策・事業の創設、運営等に反映させていくものとする。

② 評価者に係る留意事項

研究者が評価者となる場合、評価者は、評価作業を評価者自らの研究を妨げるものとして捉えるべきではなく、自らの研究の刺激になる行為として、積極的に取り組むことが必要である。

また、研究開発成果を、イノベーションを通じて国民・社会に迅速に還元していく観点から、産業界の専門家等を積極的に評価者に選任する。

③ 被評価者に係る留意事項

被評価者は、評価を事業の質をより高めるものとして積極的に捉え、評価は評価者と被評価者の双方の共同作業であるとの認識の下、真摯な対応を図ることが必要である。

(2) 評価の不確実性

評価時点では見通し得なかった技術、社会情勢の変化が将来的に発生し得るという点で評価作業は常に不確実性を伴うものである。したがって、評価者は評価の精度の向上には、必然的に限界があることを認識した上で、評価時点で最良と考えられる評価手法をとるよう努めることが必要である。かかる観点からは、厳正さを追求するあまりネガティブな面のみを過度に減点法で評価を行うこととなると、将来大きな発展をもたらす技術を阻害するおそれがある点にも留意する必要がある。

また、成果に係る評価において、目標の達成度合いを評価の判定基準にすることが原則であるが、併せて、副次的成果等、次につながる成果を幅広い視野からとらえる。

(3) その他の留意事項

① 海外の研究者、若手研究者の活用

研究者には、研究開発の発展を図る上で専門的見地からの評価が重要な役割を果たすものであることから、評価者としての評価への積極的参加が求められる。一方、特定の研究者に評価実施の依頼が集中する場合には、評価への参加が大きな負担となり、また、評価者となる幅広い人材の養成確保にもつながらないことから、海外の研究者や若手研究者も評価者として積極的に参加させることなどにより評価者確保の対象について裾野の拡大を図るよう努める。

② 所期の成果を上げられなかった研究開発

研究開発は必ずしも成功するとは限らず、また、失敗から貴重な教訓が得られることもある。したがって、失敗した場合には、まずその原因を究明し、今後の研究開発にこれを生かすことが重要であり、成果を上げられなかったことをもって短絡的に従事した研究者や組織、機関を否定的に評価すべきものではない。また、評価が野心的な研究開発の実施の阻害要因とならないよう留意しなければならない。

③ 数値的指標の活用

論文の被引用度数、特許の申請状況等による成果の定量的評価は一定の客観性を有するが、技術に関する施策・事業においては研究分野や内容により、その意味は大きく異なり得るものであり、必ずしも研究開発成果の価値を一義的に表すものではない。したがって、これらを参考資料として有効に活用しつつも、偏重しないよう留意すべきである。

④ 評価結果の制度間での相互活用

研究開発をその評価の結果に基づく適切な資源配分等を通じて次の段階の研究開発に連続してつなげるなどの観点から、関係府省、研究開発機関及び制度を越えて相互活用するよう努める。

⑤ 自己点検の活用

評価への被評価者等の主体的な取組を促進し、また、評価の効率的な実施を推進するため、推進課及び主管課は、自ら技術に関する施策・事業の計画段階において具体的かつ明確な目標とその達成状況の判定基準等を明示し、技術に関する施策・事業の開始後には目標の達成状況、

今後の発展見込み等の自己点検を行い、評価者はその内容の確認などを行うことにより評価を行う。

⑥ 評価の国際的な水準の向上

研究開発の国際化への対応に伴い、評価者として海外の専門家を参加させる、評価項目に国際的なベンチマーク等を積極的に取り入れるなど評価に関して、実施体制や実施方法などの全般にわたり、評価が国際的にも高い水準で実施されるよう取り組む。

II. 評価の種類と実施方法

II. 1. 技術に関する施策評価

技術に関する施策の評価は、当該技術分野全体の方向性等を勘案しつつ、当該施策の下に位置付けられる技術に関する事業のまとまりを俯瞰する形で、各事業の相互関係等に着目し、個々の事業に係る評価結果を踏まえて行う。

(1) 事前評価

新規の技術に関する施策の創設に当たって行う。

① 評価者

外部評価者

② 被評価者

推進課及び主管課

③ 評価事務局

推進課及び主管課。ただし、必要に応じて技術評価室が行うこともできる。

④ 評価手続・評価手法

外部評価を行う。

評価対象とする技術に関する施策は、技術評価室が推進課及び主管課と協議の上、定める。

⑤ 評価項目・評価基準

技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。

(2) 中間・終了時評価

技術に関する施策創設後、一定期間継続的に実施しているものについて、技術に関する施策ごとに中間・終了時評価を行う。

① 評価者

外部評価者

② 被評価者

推進課及び主管課

③ 評価事務局

推進課及び主管課。ただし、必要に応じて技術評価室が行うこともできる。

④ 評価手続・評価手法

施策原簿、成果報告、運営状況報告等を基に外部評価を行う。

評価対象とする技術に関する施策は、技術評価室が推進課及び主管課と協議の上、定める。

⑤ 評価項目・評価基準

技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。

⑥ 実施時期

中間評価については、実施が4年以上にわたる又は実施期間の定めのない技術に関する施策について3年程度ごとに定期的に行う。なお、モニタリング（進捗状況を把握する作業）については毎年行うこととする。

終了時評価については、当該技術に関する施策の成果を切れ目なく次の技術に関する施策につなげていく場合には、当該技術に関する施策が終了する前の適切な時期に終了前評価を行うこととし、その他の場合には、当該技術に関する施策の終了直後に事後評価を行うものとする。

なお、中間・終了時評価は、効果的・効率的な評価の実施の観点から、技術に関する施策を構成する技術に関する事業の評価を前提として実施する。

II. 2. 技術に関する事業評価

II. 2. 1. 研究開発制度評価

研究開発制度評価は、個々にその目的・政策的位置付け、目標、成果、目標の達成度、必要性、効率性、有効性等について、事前評価及び中間・終了時評価を行う。

(1) 事前評価

新規の研究開発制度の創設に当たって行う。

① 評価者

外部評価者

② 被評価者

推進課

③ 評価事務局

推進課

④ 評価手続・評価手法

外部評価を行う。

⑤ 評価項目・評価基準

技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。研究開発制度について制度実施予定期間及び中間評価の時期の妥当性に関して評価する。

(2) 中間・終了時評価

研究開発制度創設後、一定期間継続的に実施しているものについて、研究開発制度ごとに中間・終了時評価を行う。

① 評価者

外部評価者

② 被評価者

推進課及び研究開発機関

③ 評価事務局

推進課又は研究開発機関（独立行政法人であって、研究開発制度の推進部門から独立した評価部門が評価を行う場合に限る。）。ただし、必要に応じて技術評価室が行うこともできる。

④ 評価手続・評価手法

事業原簿、研究開発制度から得られた成果、研究開発制度の運営状況等を基に外部評価を行う。また、必要に応じ、評点法の活用による評価の定量化を行うこととする。

⑤ 評価項目・評価基準

技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。

⑥ 実施時期

中間評価については、実施期間が5年以上の研究開発制度又は実施期間の定めのない研究開発制度については、その目的、内容、性格、規模等を考慮し、3年程度ごとに定期的に行う。なお、モニタリング（進捗状況を把握する作業）については毎年行うこととする。

終了時評価については、当該研究開発制度の成果を切れ目なく次の研究開発制度につなげていく場合には、当該研究開発制度が終了する前の適切な時期に終了前評価を行うこととし、その他の場合には、当該研究開発制度終了直後に事後評価を行うものとする。

なお、中間・終了時評価は、効果的・効率的な評価の実施の観点から研究開発制度に関する評価結果の情報を集積し、関連する技術に関する施策の評価に際しその情報を提供する。

II. 2. 2. プロジェクト評価

プロジェクト評価は、個々にその目的・政策的位置付け、目標、成果、有効性、効率性等について評価を行う。事前評価及び中間・終了時評価を行う。

(1) 事前評価

新規のプロジェクトの創設に当たって行う。

① 評価者

外部評価者

② 被評価者

推進課

③ 評価事務局

推進課

④ 評価手続・評価手法

外部評価を行う。

⑤ 評価項目・評価基準

技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。プロジェクトについて実施予定期間及び中間評価の時期の妥当性に関して評価する。

(2) 中間・終了時評価

プロジェクト創設後、一定期間継続的に実施しているものについて、プロジェクトごとに中間・終了時評価を行う。

① 評価者

外部評価者

② 被評価者

推進課、研究開発機関及び実施者（研究開発機関から委託又は補助を受けてプロジェクトを実施する機関又は個人をいう。）

③ 評価事務局

推進課又は研究開発機関（独立行政法人であって、事業の推進部門から独立した評価部門が評価を行う場合に限る。）。ただし、必要に応じて技術評価室が行うこともできる。

④ 評価手続・評価手法

事業原簿、成果報告、運営状況報告等を基に外部評価を行う。また、必要に応じ、評点法の活用による評価の定量化を行うこととする。

⑤ 評価項目・評価基準

技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。

⑥ 実施時期

中間評価は、実施期間が5年以上のプロジェクト又は実施期間の定めのないプロジェクトについては、その目的、内容、性格、規模等を考慮し、3年程度ごとに定期的に行う。なお、モニタリング（進捗状況を把握する作業）については毎年行うこととする。

終了時評価は、当該プロジェクトの成果を切れ目なく次のプロジェクトにつなげていく場合には、当該プロジェクトが終了する前の適切な時期に終了前評価を行うこととし、その他の場合には、当該プロジェクト終了直後に事後評価を行うものとする。

なお、中間・終了時評価は、効果的・効率的な評価の実施の観点から個別プロジェクトに関する評価結果の情報を集積し、関連する技術に関する施策の評価に際しその情報を提供する。

II. 2. 3. 競争的資金制度による研究課題に関する評価

競争的資金制度に提案された個々の研究課題について、当該競争的資金制度の目的に照らして、目標・計画、科学的・技術的意義、実施体制、実用化の見通し等について評価を行う。複数の候補の中から優れた研究課題を採択するための事前評価及び目標の達成状況や成果の内容等を把握するための中間・終了時評価を行う。

(1) 事前評価

新規研究課題の採択時に行う。

① 評価者

外部評価者。

研究課題の採択の際、被評価者と同じ研究開発機関に所属する等の専門家は排除する必要があるため、例えば評価事務局はあらかじめ全評価者名を公表し、被評価者に対して申請時に利害関係者の存在を併せて書面にて宣誓することを求める等の措置を講ずる。また、評価者には秘密保持を義務付ける。

なお、評価者としてふさわしい者であることを示すため、評価者の業績又は実績について適切な時期にホームページ等で公開する。

② 被評価者

研究課題の提案者

③ 評価事務局

推進課又は研究開発機関

④ 評価手続・評価手法

研究課題の採択に当たっては、エフォート（一研究員の全研究活動時間のうち当該競争的資金制度による研究活動に充てる時間の割合をいう。）の明記を原則求める。また、被評価者と利害関係のない有識者等によるパネルレビュー又はメールレビューによる評価を行う。採択に当たっては、他の競争的資金制度による研究課題等との重複が生じないようにする。評価事務局は研究課題の提案者へ不採択の結果を通知する場合には、原則として評価項目別に詳細な評価内容を提示するとともに、不採択となった提案者からの問い合わせに応じるための環境を整備する。

なお、研究課題の評価に際しては、研究分野や当該競争的資金制度の趣旨を踏まえ、必要に応じて、主に業績が十分に定まらない若手研究者等について、マスキング評価の導入を図ることとする。主に中堅以上の研究者に関する研究者としての評価は、所属組織や機関のみに着目するのではなく、過去の実績を十分に考慮した評価とする。

また、研究者の研究遂行能力を示している過去の研究実績について、定量化を試みつつ、研究者としての評価を過去の実績を十分考慮して行った上で研究課題の採否を決定する。

⑤ 評価項目・評価基準

技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。研究課題について実施予定期間及び中間評価の時期の妥当性に関して評価する。

(2) 中間・終了時評価

研究課題の目標達成度の把握とともに研究課題の継続、拡大・縮小、中止等の資源配分の判断、および必要に応じ被評価者に対する支援的助言を行うための評価。

① 評価者

外部評価者

なお、評価者としてふさわしい者であることを示すため、評価者の業績又は実績について適切な時期にホームページ等で公開する。

② 被評価者

研究課題の実施者

③ 評価事務局

推進課又は研究開発機関。ただし、必要に応じて技術評価室が行うこともできる。

④ 評価手続・評価手法

事業原簿、成果報告、運営状況報告等を基に外部評価を行う。

競争的資金制度による継続的な研究の必要性及びプロジェクトへの発展の可能性（主として技術シーズの創造を目的とする研究の場合に限る。）の有無が判断できる手法により評価を行う。

また、研究課題の終了時評価の結果については、採択された研究課題ごとに定量化されたも

のについては結果を公表する。

⑤ 評価項目・評価基準

技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。

⑥ 実施時期

中間評価については、実施期間が5年以上の研究課題又は実施期間の定めのない研究課題については、その目的、内容、性格、規模等を考慮し、3年程度ごとに定期的に行う。

終了時評価については、当該研究課題の成果を切れ目なく次の研究課題又はプロジェクト等につなげていく場合には、原則、当該研究課題が終了する前の適切な時期に終了前評価を行うこととし、その他の場合には、当該研究課題終了直後に事後評価を行う。

II. 3. 追跡評価

終了して数年経った技術に関する施策・事業を対象に、その研究開発活動や研究開発成果が産業、社会に及ぼした効果について調査し、その調査結果を基に現在の視点から総合的に評価を行う。

(1) 評価者

外部評価者

(2) 被評価者

評価対象となる技術に関する施策・事業及びこれに関連する技術に関する施策・事業に携わった推進課及び研究開発機関

(3) 評価事務局

推進課又は技術評価室

(4) 評価手続・評価手法

過去の事業原簿等の文献データ、関連部署・機関及びその他関係者等からの聞き取り調査等による情報を基にパネルレビュー又は第三者機関への委託による外部評価を行う。また、可能な限り定量的な評価に努める。

(5) 評価項目・評価基準

技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。

(6) 実施時期

技術に関する施策・事業終了後、成果の産業社会への波及が見極められる時点とする。

経済産業省技術評価指針に基づく
標準的評価項目・評価基準

平成23年7月

経済産業省産業技術環境局

技術評価室

目 次

	ページ
はじめに	1
I. 技術に関する施策評価	3
II. 技術に関する事業	6
II-1 プロジェクト評価	6
II-2 研究開発制度評価	9
II-3 競争的資金による研究課題に関する評価	13
III. 追跡評価	16

はじめに

研究開発評価に当たっては、公正性、信頼性さらには実効性の観点から、その対象となる研究開発の特性や評価の目的等に応じて、適切な評価項目・評価基準を設定して実施することが必要である。

本標準的評価項目・評価基準は、経済産業省における技術に関する施策及び技術に関する事業の評価を行うに当たって配慮しなければならない事項を取りまとめたガイドラインである経済産業省技術評価指針に基づき、評価方法、評価項目等に一貫性を持たせるために、標準的なものとして、技術評価室が定めるものである。

なお、本標準的評価項目・評価基準は、あくまで原則的なものであり、必ずしも全てそのとおりとしなければならないものではなく、適切な評価の実施のために評価対象によって、適宜、変更することを妨げるものではない。

I. 施策評価

【事前評価】

1. 目的

- ・ 施策の目的は特定されていて、簡潔に明示されているか。
- ・ 当該施策の導入により、現状をどのように改善し、どのような状況を実現しようとしているのか。

2. 必要性

- ・ 国（行政）が関与する必要があるか。

（注1） 背景として、どのような問題が当該施策の対象領域等に存在するのか。

また、その問題の所在や程度を数値、データや文献により具体的に把握しているか。

（注2） 行政関与の必要性や妥当性について、その根拠を客観的に明らかにする。

具体的には、妥当性を有することを説明する場合、これらニーズや上位目的に照らした妥当性を可能な限り客観的に明らかにする。また、「市場の失敗」と関連付けて行政の関与の必要性を説明する場合には、「行政関与の基準」の「行政関与の可否に関する基準」により、必要性を明らかにする。

（注3） 行政目的が国民や社会のニーズ又はより上位の行政目的に照らして妥当性を有していること、民間活動のみでは改善できない問題であって、かつ、行政が関与することにより改善できるものが存在することを明らかにする。

3. 施策の概要

- ・ 施策全体としての概要を適切に記述しているか。
- ・ 当該施策を構成する事業を網羅し、個々の事業について記載しているか。

（注） 施策の概要の記載において、施策の中間・事後評価時期を記載する。

4. 目標、指標及び達成時期

（1）目標

- ・ 具体的にいつまでにいかなる事業をどの程度実施し、どの水準から事業を開始し、どの水準の成果を達成するのか。目的と照らして、明確かつ妥当な目標を設定しているか。
- ・ 政策の特性などから合理性がある場合には、定性的な目標であっても良いが、その場合、目的として示された方向の上で目指す水準（例えば、研究開発成果による新規市場の創設効果など）が把握できるものとなっているか。

（注） 目標は、資金提供やサービス提供の量といった施策の実施の直接的な結果（アウトプット）だけでなく、施策の目的を具現化した効果（アウトカム：実施の結果、当該施策を直接に利用した者以外にも生ずる効果等）についても設定する。

（2）指標及び目標達成時期

- ・ 適切な指標を設定しているか。毎年のモニタリングとして測定可能なものとなっているか。
- ・ 当該指標により当該目標の達成度が測定可能なものとなっているか。

- ・ 目標達成時期は明確かつ妥当であるか。

(注) <共通指標>

- ・ 論文数及びそれら論文の被引用度数
- ・ 特許等取得した知的所有権数、それらの実施状況
- ・ 特に、製品化に際しての実施権供与数、取得実施権料
- ・ 国際標準形成への寄与

5. 中間・事後評価の時期及び方法

- ・ 事前評価書に、中間・事後評価の時期を設定しているか。
- ・ 目標達成や運用の状況を、いつ、どのようにして計測し、また、検証するかを明らかにしているか。
- ・ 事前評価段階で、評価方法を定めているか。

(注1) 施策の中間評価は、技術評価指針に基づき、4年以上の事業期間である施策について、実施する。

なお、技術評価指針における「中間評価」は、政策評価法上においては「事後評価」の 카테고リーに整理される。

(注2) 事業の実施状況モニタリングは、過度のコストを伴う等非現実的な実施が前提とならないように配慮し、各指標値を得る情報源及び入手頻度等は明確にする。

6. 有識者、ユーザー等の各種意見

- ・ 当該施策の企画・立案過程において参照した外部の意見や要請等を施策全体及び個別事業毎に具体的に記述しているか。

7. 有効性、効率性等の評価

(1) 手段の適正性

- ・ 目的や目標を達成するために採り得る政策手段にはどのようなものがあるか。その中で、提案している施策が最も優れていると考える根拠は何か。
- ・ 採ろうとする政策手段が目的や目標の達成に役立つ根拠及び程度を明らかにしているか。

(2) 効果とコストとの関係に関する分析（効率性）

- ・ 要求予算規模、想定減税規模、機会費用その他の当該政策手段に伴い発生するコストを明確にしているか。
- ・ 各選択肢についての社会的便益と社会的費用の比較（費用便益分析、費用効果分析、（社会的便益が同等な場合は）コスト分析等）を行っているか。定量的な評価が困難な場合は、少なくとも、各々の想定される結果の長所・短所の定性的な比較に基づいて行っているか。

(3) 適切な受益者負担

- ・ 政策の目的に照らして、政策の効果の受益や費用の負担が公平に分配されるか。

【中間・事後評価】

1. 施策の目的・政策的位置付けの妥当性

(1) 施策の目的の妥当性

- ・ 施策の目的が波及効果、時期、主体等を含め、具体化されているか。
- ・ 技術的課題は整理され、目的に至る具体的目標は立てられているか。
- ・ 社会的ニーズに適合し、出口（事業化）を見据えた内容になっているか。

(2) 施策の政策的位置付けの妥当性

- ・ 施策の政策的位置意義（上位の政策との関連付け、類似施策との関係等）は高いか。
- ・ 国際的施策動向に適合しているか。

(3) 国の施策としての妥当性、国の関与が必要とされる施策か。

- ・ 国として取り組む必要のある施策であり、当省の関与が必要とされる施策か。
- ・ 必要に応じ、省庁間連携は組まれているか。

2. 施策の構造及び目的実現見通しの妥当性

(1) 現時点において得られた成果は妥当か。

(2) 施策の目的を実現するために技術に関する事業が適切に配置されているか。

- ・ 配置された技術に関する事業は、技術に関する施策の目的を実現させるために必要か。
- ・ 配置された技術に関する事業に過不足はないか。
- ・ 配置された技術に関する事業の予算配分は妥当か。
- ・ 配置された技術に関する事業のスケジュールは妥当か。

3. 総合評価

Ⅱ. 技術に関する事業評価

Ⅱ－１ プロジェクト評価

【事前評価】

1. 事業の目的・政策的位置付け

(1) 事業目的は妥当で、政策的位置付け（上位の施策における位置付け）は明確か。

(2) 官民の役割分担は適当か。

※ 事業目的の妥当性、政策的位置付けを技術戦略マップを用いて説明し、官民、国と地方公共団体、他省庁との役割分担についても記述すること。目標（目指す結果、効果）については、技術戦略マップのロードマップとの整合性を説明すること。

2. 研究開発目標の妥当性

①目標（目指す結果、効果）は、具体的かつ明確か。

②目標達成度を測定・判断することが容易な指標が設定されているか。

※ 事業の進捗を示す指標については、技術戦略マップのロードマップ、技術マップを参考に設定すること。

③最終目標に至るまでのマイルストーンとして戦略的に中間目標が立てられているか。

※ 事業の目指す結果、効果については、技術戦略マップのロードマップとの整合性をとったマイルストーンを設定すること。

④中間・事後評価時期が明確に設定されているか。

3. 有効性・効率性等

(1) 手段の適正性

①他の政策手段（事業を実施しない場合の影響を含む。）との比較検討において、提案する事業が最も優れている根拠が明確であるか。

②実施する事業が目的や目標の達成に役立つ根拠は明確か。

・ 目的達成のための妥当なスケジュール、予算となっているか。

・ 事業終了後の実用化や事業化のシナリオは明確になっているか。

※ 技術戦略マップの導入シナリオを用いて、研究開発事業と関連事業の関係を説明すること。

・ 研究開発実施者の事業体制・運営は適切かつ妥当であるか。

(2) 効果とコストに関する分析

・ 可能な限り、各選択肢についての社会的便益と社会的費用の比較（費用便益分析、費用効果分析、コスト分析等）が行われているか。定量的な評価が困難な場合

は、少なくとも、各々の想定される結果と長所・短所の定性的な比較に基づいて行う。

(3) 適切な受益者負担

- ・ 実用化、事業化のシナリオを踏まえて、事業者等が得る利益に応じて適切な負担を求める委託費や補助制度となっているか。

※知的基盤・標準整備等のための研究開発に特有の評価項目

- ・ 成果に公共性は見込まれているか。
- ・ 成果の公共性を担保するための措置が想定されているか、又は標準化した場合に得られる経済効果は十分にあるか。無差別に公開されるものであるか。
- ・ 公共財としての需要は見込まれているか。
- ・ 公共財整備のための技術を民間能力を活用して開発することの妥当性はあるか。
- ・ 成果を国際標準として提案する場合に、他国から賛同を得られる見通しはあるか。

【中間・事後評価】

1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性

- (1) 事業目的は妥当で、政策的位置付けは明確か。
 - ・ 事業の政策的意義（上位の施策との関連付け等）
 - ・ 事業の科学的・技術的意義（新規性・先進性・独創性・革新性・先導性等）
 - ・ 社会的・経済的意義（実用性等）
- (2) 国の事業として妥当であるか、国の関与が必要とされる事業か。
 - ・ 国民や社会のニーズに合っているか。
 - ・ 官民の役割分担は適切か。

2. 研究開発等の目標の妥当性

- (1) 研究開発等の目標は適切かつ妥当か。
 - ・ 目的達成のために具体的かつ明確な研究開発等の目標及び目標水準を設定しているか。特に、中間評価の場合、中間評価時点で、達成すべき水準（基準値）が設定されているか。
 - ・ 目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

3. 成果、目標の達成度の妥当性

- (1) 成果は妥当か。
 - ・ 得られた成果は何か。
 - ・ 設定された目標以外に得られた成果はあるか。
 - ・ 共通指標である、論文の発表、特許の出願、国際標準の形成、プロトタイプの作製等があったか。

(2) 目標の達成度は妥当か。

- ・ 設定された目標の達成度（指標により測定し、中間及び事後評価時点の達成すべき水準（基準値）との比較）はどうか。

4. 事業化、波及効果についての妥当性

(1) 事業化については妥当か。

- ・ 事業化の見通し（事業化に向けてのシナリオ、事業化に関する問題点及び解決方策の明確化等）は立っているか。

(2) 波及効果は妥当か。

- ・ 成果に基づいた波及効果を生じたか、期待できるか。
- ・ 当初想定していなかった波及効果を生じたか、期待できるか。

* 知的基盤・標準整備等の研究開発の場合、以下の評価項目・評価基準による。

4. 標準化等のシナリオ、波及効果の妥当性

(1) 標準化等のシナリオは妥当か。

- ・ J I S 化や我が国主導の国際規格化等に向けた対応は図られているか。

(2) 波及効果は妥当か。

- ・ 成果に基づいた波及効果を生じたか、期待できるか。
- ・ 当初想定していなかった波及効果を生じたか、期待できるか。

5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性

(1) 研究開発計画は適切かつ妥当か。

- ・ 事業の目標を達成するために本計画は適切であったか（想定された課題への対応の妥当性）。
- ・ 採択スケジュール等は妥当であったか。
- ・ 選別過程は適切であったか。
- ・ 採択された実施者は妥当であったか。

(2) 研究開発実施者の実施体制・運営は適切かつ妥当か。

- ・ 適切な研究開発チーム構成での実施体制になっているか、いたか。
- ・ 全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されているか、いたか。
- ・ 目標達成及び効率的実施のために必要な、実施者間の連携／競争が十分に行われる体制となっているか、いたか。
- ・ 成果の利用主体に対して、成果を普及し関与を求める取組を積極的に実施しているか、いたか。
- ・ 国民との科学・技術対話を効果的に実施したか、又は実施することとしているか。（ただし、公募要項に当該対話を実施することが明記されている研究開発で、3千万円以上の公的研究費の配分を受ける研究開発を実施する研究者等を対象とする。）ここで、国民との科学・技術対話とは、研究活動の内容や成果を社会・

国民に対して分かりやすく説明する、未来への希望を抱かせる心の通った双方向コミュニケーション活動をいう（「国民との科学・技術対話」の推進について（基本的取組方針）（平成 22 年 6 月 19 日））。

（3）資金配分は妥当か。

- ・資金の過不足はなかったか。
- ・資金の内部配分は妥当か。

（4）費用対効果等は妥当か。

- ・投入された資源量に見合った効果が生じたか、期待できるか。
- ・必要な効果がより少ない資源量で得られるものが他にないか。

（5）変化への対応は妥当か。

- ・社会経済情勢等周囲の状況変化に柔軟に対応しているか（新たな課題への対応の妥当性）。
- ・代替手段との比較を適切に行ったか。

6. 総合評価

Ⅱ－２ 研究開発制度評価

※複数の制度の制度構造評価を実施する場合、参考に示す評価項目・評価基準に留意する。

【事前評価】

1. 事業の目的・政策的位置付け

（1）事業目的は妥当で、政策的位置付け（上位の施策における位置付け）は明確か。

（2）官民の役割分担は適当か。

- ※ 事業目的の妥当性、政策的位置付けを技術戦略マップを用いて説明し、官民、国と地方公共団体、他省庁との役割分担についても記述すること。目標（目指す結果、効果）については、技術戦略マップのロードマップとの整合性を説明すること。

2. 目標の妥当性

①目標（目指す結果、効果）は、具体的かつ明確か。

②目標達成度を測定・判断することが容易な指標が設定されているか。

- ※ 事業の進捗を示す指標については、技術戦略マップのロードマップ、技術マップを参考に設定すること。

③最終目標に至るまでのマイルストーンとして戦略的に中間目標が立てられているか。

- ※ 事業の目指す結果、効果については、技術戦略マップのロードマップとの整

合性をとったマイルストーンを設定すること。

④目標達成時期及び中間・事後評価時期が明確に設定されているか。

(注) 指標及び目標達成時期は、事業全体及び採択テーマごとに設定する。

3. 有効性・効率性等

(1) 手段の適正性

①他の政策手段（事業を実施しない場合の影響を含む。）との比較検討において、提案する事業が最も優れている根拠が明確であるか。

②実施する事業が目的や目標の達成に役立つ根拠は明確か。

・目的達成のための妥当なスケジュール、予算となっているか。

・事業終了後の実用化や事業化のシナリオは明確になっているか。

※ 技術戦略マップの導入シナリオを用いて、当該事業と関連事業の関係を説明すること。

・事業の運営体制・組織は効率的となっているか。

・事業の目的に照らして、個々のテーマの採択プロセス（採択者、採択評価項目・基準、採択審査結果の通知等）は妥当か。

・他の事業との関連において、重複等はないか。

(2) 効果とコストに関する分析

・可能な限り、各選択肢についての社会的便益と社会的費用の比較（費用便益分析、費用効果分析、コスト分析等）が行われているか。定量的な評価が困難な場合は、少なくとも、各々の想定される結果と長所・短所の定性的な比較に基づいて行う。

(3) 適切な受益者負担

・実用化、事業化のシナリオを踏まえて、事業者等が得る利益に応じて適切な負担を求める委託費や補助制度となっているか。

4. 有識者、ユーザー等の各種意見

・有識者等の意見を活用しているか。

【中間・事後評価】

1. 制度の目的及び政策的位置付けの妥当性

(1) 国の制度として妥当であるか、国の関与が必要とされる制度か。

(2) 制度の目的は妥当で、政策的位置付けは明確か。

(3) 他の制度との関連において、重複等はないか。

2. 制度の目標の妥当性

(1) 目標は適切かつ妥当か。

- ・ 目的達成のために具体的かつ明確な目標及び目標水準を設定しているか。特に、中間評価の場合、中間評価時点で、達成すべき水準（基準値）が設定されているか。
- ・ 目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

3. 制度の成果、目標の達成度の妥当性

(1) 制度としての成果は妥当か。

- ・ 得られた成果は何か。
- ・ 設定された目標以外に得られた成果はあるか。
- ・ 共通指標である、論文の発表、特許の出願、国際標準の形成、プロトタイプ之作製等があったか。

(2) 制度としての目標の達成度は妥当か。

- ・ 設定された目標の達成度（指標により測定し、中間及び事後評価時点の達成すべき水準（基準値）との比較）はどうか。

4. 制度採択案件に係る事業化、波及効果等その他成果についての妥当性

(1) 成果については妥当か。

- ・ 当該制度の目的に合致する成果は得られているか。
- ・ 事業化が目標の場合、事業化の見通し（事業化に向けてのシナリオ、事業化に関する問題点及び解決方策の明確化等）は立っているか。

(2) 波及効果は妥当か。

- ・ 成果に基づいた波及効果を生じたか、期待できるか。
- ・ 当初想定していなかった波及効果を生じたか、期待できるか。

5. 制度のマネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性

(1) 制度のスキームは適切かつ妥当か。

- ・ 目標達成のための妥当なスキームとなっているか、いたか。

(2) 制度の体制・運営は適切かつ妥当か。

- ・ 制度の運営体制・組織は効率的となっているか、いたか。
- ・ 制度の目標に照らして、個々のテーマの採択プロセス（採択者、採択評価項目・基準、採択審査結果の通知等）及び事業の進捗管理（モニタリングの実施、制度関係者間の調整等）は妥当であるか、あったか。
- ・ 制度を利用する対象者はその目標に照らして妥当か。
- ・ 個々の制度運用の結果が制度全体の運営の改善にフィードバックされる仕組みとなっているか、いたか。
- ・ 成果の利用主体に対して、成果を普及し関与を求める取組を積極的に実施しているか、いたか。
- ・ 国民との科学・技術対話を効果的に実施したか、又は実施することとしている

か。(ただし、3千万円以上の公的研究費の配分を受ける研究開発で、公募要項に当該対話を実施することが明記されている研究開発を実施する研究者等を対象とする。)ここで、国民との科学・技術対話とは、研究活動の内容や成果を社会・国民に対して分かりやすく説明する、未来への希望を抱かせる心の通った双方向コミュニケーション活動をいう(「国民との科学・技術対話」の推進について(基本的取組方針)(平成22年6月19日))。

(3) 資金配分は妥当か。

- ・資金の過不足はなかったか。
- ・資金の内部配分は妥当か。

(4) 費用対効果等は妥当か。

- ・投入された資源量に見合った効果が生じたか、期待できるか。
- ・必要な効果がより少ない資源量で得られるものが他にないか。

(5) 変化への対応は妥当か。

- ・社会経済情勢等周囲の状況変化に柔軟に対応しているか。
- ・代替手段との比較を適切に行ったか。

6. 総合評価

(参考) 制度構造評価

<複数制度の俯瞰的評価>

1. 複数制度のバランス、相対的位置の妥当性

- ・他の制度との重複により効率が低くなっていないか。結果的に類似し重複や非効率が目立つ制度となっていないか。
- ・産業技術戦略や内外情勢変化に即した制度の配置、構成となっているか。
- ・目標のレベル、国が関与すべき程度、実用化時期の想定等に関して、複数制度の相対的位置、複数制度間の政策目的に照らした整合性は妥当か。
- ・利用者から見て、制度間の相違(趣旨、対象者、要件等)が分かりにくいものとなっていないか。一方、複数の制度間で申請書類の様式が必要以上に異なり、利用者側に不都合な負担をしいることとなっていないか。

<個別制度の方向性項目>

2. 俯瞰的にみた個別制度の方向性

- ・内外情勢変化、他の制度との相対関係、個別制度評価の結果等を踏まえ、個別制度の継続、統廃合、新設の必要性はどうか。国の関与の度合いはどうか。

- ・統廃合を行う必要はなくても、運用面における連携、協調の必要性はどうか。

Ⅱ－３ 競争的資金による研究課題に関する評価

＜ア. 主として技術シーズの創造を目的とする競争的資金制度の場合＞ 【事前評価】

1. 目標・計画

- ・制度の目的（公募の目的）に照らして、研究開発目標・計画が具体的かつ明確に設定されているか。その目標の実現性、計画の妥当性はどうか。

2. 科学的・技術的意義（新規性、先進性、独創性、革新性、先導性等）

- ・最新の研究開発動向・水準からみて新規性はあるか。
- ・研究開発内容について独創性はあるか。
- ・飛躍的に技術レベルを高めるような技術的ブレークスルーポイントがあるか。

3. 実施体制

- ・研究開発代表者に十分な研究開発管理能力があるか。既に、相当程度の研究開発実績を有しているか。
- ・研究開発内容に適した研究開発実施場所が選定されているか。
- ・研究開発を行う上で、十分な研究開発人員（研究開発分担者）及び設備等を有しているか、また、研究開発を推進するために効果的な実施体制となっているか。

4. 実用化の見通し

- ・研究開発の成果が実用化に結びつく可能性があるか。
- ・実用化された場合に、産業・社会への波及効果は認められるか。
- ・研究開発代表者又は研究開発チームに属する研究開発分担者が、当該研究開発の基礎となる特許を有しているか、又は出願中であるか。
- ・国内外で関連の特許が押さえられていないか。

5. 想定される選択肢内の比較

- ・事業の提案に当たり、選択肢の吟味を行っているのか。提案する手段が最も優れていると考える根拠は何か。

【中間・事後評価】

1. 目標・計画

- ・技術動向等の変化に対応して、事業の目的や計画は妥当であったか。
- ・成果は目標値をクリアしているか。

2. 要素技術から見た成果の意義

- ・ 科学的・技術的意義（新規性、先進性、独創性、革新性、先導性等）が認められるか。

3. 実施体制

- ・ 研究開発管理能力、研究開発実施場所、研究設備等実施体制は適切であったか。
- ・ 国民との科学・技術対話を効果的に実施したか、又は実施することとしているか。（ただし、3千万円以上の公的研究費の配分を受ける研究開発で、公募要項に当該対話を実施することが明記されている研究開発を実施する研究者等を対象とする。）ここで、国民との科学・技術対話とは、研究活動の内容や成果を社会・国民に対して分かりやすく説明する、未来への希望を抱かせる心の通った双方向コミュニケーション活動をいう（「国民との科学・技術対話」の推進について（基本的取組方針）（平成22年6月19日））。

4. 実用化の見通し

- ・ 成果に関する特許の出願予定はあるか。
- ・ 実用化に向けた具体的な計画があるか。

<イ. 主として研究開発成果を早期に実用化することを目的とする競争的資金の場合>

【事前評価】

1. 必要性

- ・ 制度の目的に照らして、国の支援が必要な事業であるか。
- ・ 当該事業に対する社会的なニーズが具体的かつ明確となっており、ニーズを満たすために相当程度有効な事業であるか。

2. 目標・計画

- ・ 制度の目的（公募の目的）に照らして、技術開発目標・計画が具体的かつ明確に設定されているか。その目標や計画は実現性が高い妥当なものとなっているか。
- ・ 実用化（事業化）に向けた具体的な計画を有し、実用化（事業化）の可能性が高いものとなっているか。

3. 新規性、先進性、技術レベル

- ・ 革新的な新製品の開発に取り組むものであるか。
- ・ 既存製品の延長ではあるが経済性の格段の向上や新機能の付加が認められるなど、新規性・先進性を有しているか。
- ・ 技術開発の難易度が既存の技術水準に比して高い事業であるか。

4. 実施体制

- ・事業を的確に遂行するために必要な開発体制及び能力を有しているか。既に、関連する研究開発等の事業経験があるか。

5. 実用化（事業化）の見通し

- ・当該研究開発の基礎となる研究開発成果が確実なものとなっているか。
- ・実用化による産業・社会への波及効果は認められるか。
- ・実用化による市場の創出効果が大きいか。または市場を占めるシェアが大きいか。
- ・実用化した製品が継続的に受け入れられる市場環境にあるか。
- ・事業化に結びつくための生産に必要な資源の確保や、販売ルートを保有しているか。
- ・事業化に結びつくための（競争相手に対する）優位性が存在するか。

【中間・事後評価】

1. 必要性

- ・社会的なニーズを満たすために相当程度有効な事業であったか。国の支援が必要な事業であったか。

2. 目標・計画

- ・技術動向等の変化に対応して、事業の目的や計画は妥当であったか。
- ・成果は目標値をクリアしているか

3. 要素技術から見た成果の意義

- ・新規性、先進性が認められるか。

4. 実施体制

- ・開発体制及び能力は適切であったか。
- ・国民との科学・技術対話を効果的に実施したか、又は実施することとしているか。
（ただし、3千万円以上の公的研究費の配分を受ける研究開発で、公募要項に当該対話を実施することが明記されている研究開発を実施する研究者等を対象とする。）ここで、国民との科学・技術対話とは、研究活動の内容や成果を社会・国民に対して分かりやすく説明する、未来への希望を抱かせる心の通った双方向コミュニケーション活動をいう（「国民との科学・技術対話」の推進について（基本的取組方針）（平成22年6月19日））。

5. 実用化（事業化）の見通し

- ・ 成果に関する特許出願、国際標準の提案の予定はあるか。
- ・ 実用化に向けたスケジュールや体制は明確になっているか。
- ・ 実用化による産業・社会への波及効果は認められるか。
- ・ 実用化による市場の創出効果が大きいか。または市場を占めるシェアが大きいか。
- ・ 実用化した製品が継続的に受け入れられる市場環境にあるか。
- ・ 事業化に結びつくための生産に必要な資源の確保や、販売ルートを保有しているか。
- ・ 事業化に結びつくための（競争相手に対する）優位性が存在するか。

VI. 追跡評価

I. 波及効果に関する評価

I-1. 技術波及効果

(1) 実用化への進展度合

- ・ プロジェクトの直接的および間接的な成果は、製品やサービスへの実用化にどのように寄与したか、あるいは寄与する可能性があるか。特許取得やその利用状況、市場環境の変化、競合技術の台頭等を踏まえて評価する。

- ①プロジェクト終了後に実用化した製品やサービスは数多くあったか。
- ②プロジェクトの成果から今後実用化が期待される製品やサービスはあるか。
- ③多額の実施料収入を生み出す等、インパクトのある技術が得られたか。
- ④外国での特許取得が行われたか。
- ⑤基本特許を生み出したか。

(2) プロジェクト成果からの技術的な広がり具合

- ・ プロジェクトの成果により直接的に生み出された技術は、関連技術分野に技術面でのインパクトを与えたか。派生技術には、プロジェクト実施当時に想定されていたもの、想定されていなかったものを含めてどのようなものがあり、それらはどのように利用されているかを踏まえて評価する。

- ①数多くの派生技術を生み出したか。
- ②派生技術は多くの種類の技術分野にわたっているか。（当該技術分野、他の各種技術分野）
- ③直接的に生み出された技術又は派生技術を利用した研究主体は数多くあるか。
- ④直接的に生み出された技術又は派生技術を利用する研究主体は産業界や学会に広がりを持っているか。（参加企業、大学等、不参加の同業種の企業、その他の産業等）
- ⑤参加企業等が自ら実施する研究開発の促進効果や期間短縮効果はあったか。

(3) 国際競争力への影響

- ・ 直接的に生み出された技術の成果技術や派生技術により、国際競争力はどのように強化されたか。

- ①我が国における当該分野の技術レベルは向上したか。
- ②外国と技術的な取引が行われ、それが利益を生み出しているか。
- ③プロジェクトの技術分野に関連した外国での特許取得は積極的になされているか。
- ④国際標準の決定に対し、プロジェクトはメリットをもたらしたか。
- ⑤国際標準等の協議において、我が国がリーダーシップをとれるようになったか。
- ⑥外国企業との主導的な技術提携は行われたか。
- ⑦プロジェクトが外国の技術政策に影響を与え、その結果技術交流が促進されたり、当該分野で我が国がイニシアチブをとれるようになったか。

I-2. 研究開発力向上効果

(1) 知的ストックの蓄積度合

- ・特許や、研究者のノウハウ・センス・知識等の研究成果を生み出す源となる知的ストックはどのような役割を果たしたか。それらはプロジェクト終了後も継承され、次の研究の芽になる等、今後も影響を持ち得ることができるか。

- ①当該分野における研究開発は続いているか。
- ②プロジェクト終了後にも、プロジェクトに参加した研究者が派生技術の研究を行っているか。
- ③プロジェクトの終了時から現在までの間に、知的ストックが将来的に注目すべき新たな成果（画期的な新製品・新サービス等）を生み出す可能性は高まっているか。

(2) 研究開発組織の改善・技術戦略への影響

- ・プロジェクトは、研究開発組織の強化・改善に対してどのように役立ったか。あるいは、実施企業の技術戦略に影響を与えたか。

- ①企業を超える研究開発のインフラとして、学会、フォーラム、研究者間交流等の公式・非公式の研究交流基盤は整備され、活用されているか。
- ②企業間の共同研究の推進等、協力関係、良好な競争的關係が構築されたか。
- ③顧客やビジネスパートナーとの關係の変化が、經濟性を向上させたか。
- ④技術の管理組織を再編成する契機となったか。
- ⑤研究開発部門の再構成等、社内の組織改編は積極的に行われたか。
- ⑥研究開発の予算規模が増減する契機となったか。
- ⑦プロパテント等の特許戦略に対する意識が高くなったか。
- ⑧知的ストックは、企業の技術戦略にどのような影響を与えたか。

(3) 人材への影響

- ・プロジェクトは研究者の効率的・効果的配置や能力の向上にどのように寄与したか。

- ①国内外において第一人者と評価される研究者が生まれたか。
- ②論文発表、博士号取得は活発に行われたか。

- ③プロジェクト従事者の企業内での評価は高まったか。
- ④研究者の能力向上に結び付くような研究者間の人的交流が行われたか。
- ⑤関連分野の研究者増員が行われたか。
- ⑥国内外から高く評価される研究機関となったか。

I-3. 経済効果

(1) 市場創出への寄与

- ・新しい市場を創造したか。また、その市場の拡大に寄与したか。

(2) 経済的インパクト

- ・生産波及、付加価値創出、雇用創出への影響は大きかったか。

- ①直接的に生み出された技術や派生技術の実用化により、製品の売り上げと利益は増加したか。
- ②直接的に生み出された技術や派生技術の実用化により、雇用促進は積極的に図られたか。

(3) 産業構造転換・活性化の促進

- ・プロジェクトが産業構造の転換や活性化（市場の拡大や雇用の増加等）にどのような役割を果たしたか。

- ①プロジェクトが、各関連産業における市場の拡大や雇用の増加等に寄与したか。
- ②プロジェクトが新たな産業の勃興や、既存市場への新規参入、あるいは既存市場からの撤退等をもたらしたか。また、それらが市場全体における雇用に影響したか。
- ③プロジェクトが生産業務の改善や更新に結びついたことにより生産性・経済性は向上したか。

I-4. 国民生活・社会レベルの向上効果

- ・プロジェクトによって新たな製品・サービスが実用化されたこと、プロジェクトの成果の応用による生産性の向上や顕著なコストダウン、デファクトを含めた規格化を促進したこと等の事例がある場合、それらは、例えば下記に挙げる項目にそれぞれどのような影響をもたらしたか。

(1) エネルギー問題への影響

- ・エネルギー問題の解決に寄与した効果としてどのようなものが考えられるか。

(2) 環境問題への影響

- ・環境問題の解決に寄与した効果としてどのようなものが考えられるか。

(3) 情報化社会の推進

- ・情報化社会の推進に寄与した効果としてどのようなものが考えられるか。

(4) 安全、安心、生活の質

- ・国民生活の安全、安心、生活の質の向上に寄与した効果としてどのようなもの

が考えられるか。

- ①国民生活の利便性を向上させた事例が存在するか。
- ②国民生活の安全性の向上に寄与したか。
- ③プロジェクトの成果は、身障者や高齢者の多様な生活を可能にしたか。また、個の自立を支援するものであるか。

I-5. 政策へのフィードバック効果

(1) その後の事業への影響

- ・プロジェクトの成果や波及効果、改善提案、反省点等がその後の研究開発プロジェクトのテーマ設定や体制構築へ反映されたか。

(2) 産業戦略等への影響

- ・プロジェクトの直接的・間接的な成果が実用化したり、関連の研究開発基盤ができたこと等による、その後の産業戦略等への影響があったか。

II. 現在の視点からのプロジェクトの評価

II-1. 国家プロジェクトとしての妥当性

- ・国のプロジェクトとしてどのような効果があったか。Iに示した各効果を総合的に評価する。
- ・現在（追跡評価時点）から見て、国が関与する必要性があったか。また、関与の方法や程度は妥当であったか
 - ①多額の研究開発費、長期にわたる研究開発期間、高い技術的難度等から、民間企業のみでは十分な研究開発が実施されない場合。
 - ②環境問題への先進的対応等、民間企業には市場原理に基づく研究開発実施インセンティブが期待できない場合。
 - ③標準の策定、データベース整備等のうち社会的性格が強いもの（知的基盤）の形成に資する研究開発の場合。
 - ④国の関与による異分野連携、産学官連携等の実現によって、研究開発活動に新たな付加価値をもたらすことが見込まれる場合。
 - ⑤その他国が主体的役割を果たすべき特段の理由がある場合。

II-2. 目標設定

- ・当時の技術動向、市場動向、社会環境、政策目的等から見て、目標設定の方向性とそのレベルは妥当であったか。

II-3. プロジェクト実施方法

- ・プロジェクトの計画策定、スキーム（予算制度）、実施体制、運営方法等の実施方法が現在の視点から見て妥当であったか。

Ⅱ－４．Ⅱ－１～Ⅱ－３の評価結果を踏まえ、プロジェクト終了時の事後評価の妥当性

- ・事後評価で行われた評価結果は、追跡評価の時点から見て妥当であるか。

(現在の事後評価項目の例示)

目的・意義の妥当性、目標の妥当性、計画内容の妥当性、国のプロジェクトであることの妥当性、研究開発体制・運営の妥当性、研究開発成果の計画と比較した達成度、実用化の見通し（成果普及、広報体制、波及効果）、総合評価、今後の提言

- ・今後の最終評価において改善すべき評価方法、考慮すべき要因等を提案。

Ⅱ－５．プロジェクト終了後のフォローアップ方法

- ・プロジェクトの成果の実用化や普及に対して、プロジェクト終了後のフォローアップ体制が適切であったか。後継の国のプロジェクトを立ち上げる必要は無かったか。
- ・不適切な場合の改善点、より効果を発揮するための方策の提案。

事前評価報告書概要（平成22年7月）

新規研究開発事業	二酸化炭素分離膜モジュール研究開発
技術に関する施策名	CO2 固定化・有効利用分野技術
事業推進課	産業技術環境局 環境政策課 地球環境技術室
<p>技術に関する施策及び新規研究開発事業の概要</p> <p>わが国は、温室効果ガス削減目標について、すべての主要国による公平かつ実効性のある枠組みの構築と意欲的な目標の合意を前提に「2020年までに1990年比25%の削減」を掲げている。</p> <p>経済成長を阻害することなく、この温室効果ガス削減目標を達成するためには、省エネルギー技術、化石燃料転換や原子力発電、あるいは太陽エネルギー等の新エネルギーの利用技術のみならず、二酸化炭素回収・貯留(CCS: Carbon Dioxide Capture and Storage)技術などのCO2固定化・有効利用分野の新技术の開発、進展が不可欠である。</p> <p>二酸化炭素回収・貯留(CCS)は、地球温暖化対策の重要なオプションとして国際的・国内的に認識されているが、実用化に当たっては実施に要するコスト、特に大部分を占める分離回収コスト(約6割)の低減が課題となっている。</p> <p>本事業では、CCS実用化にあたり、低コスト化に資する二酸化炭素分離膜モジュールの開発を実施する。</p> <p>具体的には、現在研究開発段階にある分子ゲート機能CO2分離膜素材のCO2の透過性や選択性などの高性能化を図るとともに、膜の連続製造技術の開発や膜モジュールの耐圧・耐久化、大型化を図るなど実用化に向けた各技術の確立を図る。これにより、実用に耐えうる分離膜が完成する時点(2015年頃)において従来の3分の1程度(1,500円/t-CO2)まで大幅に低減することを目標とする。</p>	
<p>評価概要</p> <p>1. 事業の目的・政策的位置付け(新規研究開発事業の創設)の妥当性</p> <p>地球温暖化の抑制は国際的な共通認識のもと取り組んでいる事項であり、温室効果ガス削減は我が国では総理自らがイニシアティブをとって行っていることから国を挙げて取り組む必要がある課題である。政府から出された温室効果ガス25%削減の実現には、CCSは欠くことのできない技術であり、そのためのCO2分離回収技術開発を国が率先して行うことは、極めて妥当である。</p> <p>本事業はリスクが高く、また直接的に利益を生み出す技術でもないため民間企業が長期に渡り取り組むにはかなり無理があり、国が先導して取り組むべき科学技術と考える。</p> <p>CCS実用化にあたり、CO2分離回収コストを従来技術に比べて3分の1程度の1500円/t-CO2に低減するなどの具体的な目標値を示して実施していることは高く評価できる。</p> <p>また、単に基本性能だけでなく、実用化に向けて克服すべき課題として耐不純物性、</p>	

耐乾燥性、耐圧性、耐久性等の具体的な問題点を把握して取り組むことは評価できる。

学会等で報告されている研究データもあわせてみると、本事業の分子ゲート膜の基本性能は世界トップレベルの成果が出されている。国際的に見ても日本の膜技術は世界のトップに位置しており、この科学技術を維持することは国益に叶うと考えられる。

膜モジュール形式としては、スパイラル型と中空糸型の2タイプを対象としているが、両者は基本的に開発コンセプトが異なるので、どちらかに絞ることなく、よい意味の競争関係でどちらも開発を進めるべきである。

一般に膜材料開発には時間がかかるものであるため、目標値への到達スケジュールを達成するためには、十分な予算と人を集中して配置できる研究開発環境を支援する必要があると考える。

CO₂分子ゲート機構という新しい考え方はよいが、まだ仮説の段階である。分離メカニズムが解明できれば、高分離のための精密な膜材料設計が可能になるため、大学等も活用したCO₂分子ゲート機構解明の研究も考えられる。

なお、コスト目標を掲げることは重要ではあるが、量産効果によりコストは変動するものでもあるため、コストはあくまで目安程度にとどめ、あまりコスト目標に縛られることのないようにすべきである。

国の予算によって行われる研究であるため研究成果の公開は必要であるが、科学技術の優位性を保ち国際競争を勝ち抜くには、公開時期を遅らせるような戦略も取る必要がある。研究期間内の特許だけでは実用化を考えた時必ずしも権利が十分に守られるか心配であり、技術の流出（特許侵害すれすれの模倣）を防ぐ取組も強化すべきである。

このような技術開発では民間企業の協力が不可欠であるが、研究開発費を負担させては参加企業を募ることは難しい。このような研究技術開発は、開発期間5年間くらいは最後まで100%国の補助で行うべきである。

2. 今後の新規研究開発事業の実施に向けての提言

他の分離法（吸着法、吸収法等）と比較してガスの圧力を利用した膜分離法は、将来性が高いと考えられるが、開発にあたっては、膜材料開発、膜加工、膜モジュール化、プロセス設計、プラント設計・製造等の専門分野の垣根を越えた人の連携が必要であり、長期に渡る安定した国の支援とともに、多くの協力者による地道で継続的な取り組みが必要であると考えられる。

特に気体の膜分離回収プロセスの最適化は難しいので、技術開発当初からプロセス開発を担当するエンジニアリング企業を加え、プロセス側からの膜性能への要求を出しつつ開発を進めるべきである。

開発目標がCO₂の膜透過速度になっているが、スパイラルモジュールと中空糸モジュールとではモジュールの膜面積密度（モジュール単位体積当たりの膜面積）が大きく異なり、中空糸モジュールの方が大きい。実際のプラントでは膜モジュール総体積が問題なので、目標はモジュール単位体積当たりのCO₂透過量とすべきである。

耐久性について、1,000時間以上著しい機能の低下がないことという目標では、1,000時間もてばよいということになるため、例えばトータルで5年の技術開発であれば、少なくとも10,000時間、望ましくは20,000時間程度の耐久性が求められる。実用化段階では5年程度の連続運転が求められると考えられるため、長期運用での膜性能の安定性等の確認のためには、加速試験方法も考える必要がある。

評価小委員会からのコメント

評価小委員会委員から本研究開発事業に対して頂いたコメントは以下の通り。

・ CCS は長期的に必要な技術であり、物理吸収法／化学的吸収法以上に分離膜は期待される要素技術である。本事業では、価格まで含めて具体的な数値目標が出されている点は評価できる。ただし石炭燃焼からは CO₂ だけでなく SO_x をはじめ様々な微量物質が排出されるため、どれだけの CO₂ の純度が要求されるかまでも視野に含めることが望ましい。

・ CCS の本質的な課題は、分離回収コスト削減にあるのではなく、技術レベルが求めるコストに見合った段階的収益モデルを想定し得ていないことである。したがって、従前の枠組みの中で研究開発を展開しても、利用関係を見いだせない技術を蓄積することになる。

・ CCS 技術などの CO₂ 固定化・有効利用分野の新技术の有用性は言うまでもなく、さらに実用化のためには本事業で狙っているような低コスト（1500 円/t-CO₂ 以下）な CO₂ 分離膜モジュールの開発は不可欠であり、目標は妥当であると考えられる。その一方、膜分離のための分子ゲート機構と言う考え方は魅力的ではあるが、実用化に向けて克服すべき課題が数多くあるように見受けられるので、基礎研究から実用化までを見通したシナリオの展開とそのために必要な産学官の適切なプレイヤーの参加が望まれる。