

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

平成29年10月4日

産業技術環境局 環境政策課 地球環境連携室  
次世代型膜モジュール技術研究組合

# 目次

1. 事業の概要
2. 事業アウトカム
3. 事業アウトプット
4. 当省(国)が実施することの必要性
5. 事業アウトカム達成に至るまでのロードマップ
6. 研究開発の実施・マネジメント体制等
7. 費用対効果
8. 事前評価結果

# 1. 事業の概要

| <p>概 要</p>        | <p>本事業では、CO<sub>2</sub>の分離回収コストを大幅に削減するため、「二酸化炭素分離膜モジュール研究開発事業」で開発した膜素材や実機型モジュール、膜分離システムに係る成果を活用、継承し、IGCCにおける二酸化炭素分離膜モジュールの実用化研究開発を行う。</p>   |      |       |     |     |     |     |         |           |  |  |  |  |         |     |      |       |  |  |
|-------------------|--|------|-------|-----|-----|-----|-----|---------|-----------|--|--|--|--|---------|-----|------|-------|--|--|
| <p>実施期間</p>       | <p>平成27年度～平成31年度（5年間）</p>  |      |       |     |     |     |     |         |           |  |  |  |  |         |     |      |       |  |  |
| <p>実施形態</p>       | <p>国からの直執行<br/>（次世代型膜モジュール技術研究組合への委託事業）</p>  |      |       |     |     |     |     |         |           |  |  |  |  |         |     |      |       |  |  |
| <p>予算総額 ※</p>     | <table border="1"> <thead> <tr> <th>年度</th> <th>H27</th> <th>H28</th> <th>H29</th> <th>H30</th> <th>H31</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>予算額(億円)</td> <td colspan="5">総額 13.517</td> </tr> <tr> <td>執行額(億円)</td> <td>2.4</td> <td>2.09</td> <td>1.697</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> | 年度   | H27   | H28 | H29 | H30 | H31 | 予算額(億円) | 総額 13.517 |  |  |  |  | 執行額(億円) | 2.4 | 2.09 | 1.697 |  |  |
| 年度                | H27  | H28  | H29   | H30 | H31 |     |     |         |           |  |  |  |  |         |     |      |       |  |  |
| 予算額(億円)           | 総額 13.517  |      |       |     |     |     |     |         |           |  |  |  |  |         |     |      |       |  |  |
| 執行額(億円)           | 2.4  | 2.09 | 1.697 |     |     |     |     |         |           |  |  |  |  |         |     |      |       |  |  |
| <p>実施者</p>        | <p>次世代型膜モジュール技術研究組合</p>  |      |       |     |     |     |     |         |           |  |  |  |  |         |     |      |       |  |  |
| <p>プロジェクトリーダー</p> | <p>次世代型膜モジュール技術研究組合<br/>中尾真一（専務理事）</p>   |      |       |     |     |     |     |         |           |  |  |  |  |         |     |      |       |  |  |

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

# 1. 1 事業のイメージ

## 本事業の開発目標・インパクト

「二酸化炭素分離膜モジュール研究開発事業」で開発した膜素材や実機型モジュール、膜分離システムに係る成果を活用、継承することで、二酸化炭素分離膜モジュールの実用化を行う。

そのため、実ガス試験を実施して、膜モジュール性能、耐久性等に関する技術課題の抽出と解決を行う。併せて、プロセス適合性の付与についても検討を進め、分離・回収コスト1,500円/t-CO<sub>2</sub>以下を実現する分離膜技術、実機膜モジュール、膜システムの技術確立を行う。

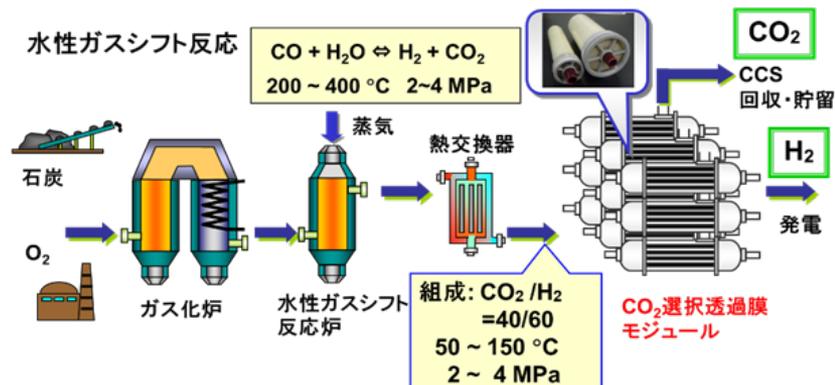
これにより、従来技術の約3分の1以下(1,500円/t-CO<sub>2</sub>以下)で、圧力を有するIGCCからCO<sub>2</sub>を分離・回収するための実用化技術が完成する。

## 膜分離方式の利点

我が国は石炭火力発電の効率において、世界トップの実力を有しており、さらに低品位炭の利用が可能なIGCC火力発電の実用化を推進している。膜分離方式は、圧力差を有するガス源からのCO<sub>2</sub>分離において、他の分離法(物理吸収法)などに比較して低コストであり、わが国は、その性能において世界トップの技術を開発してきている。

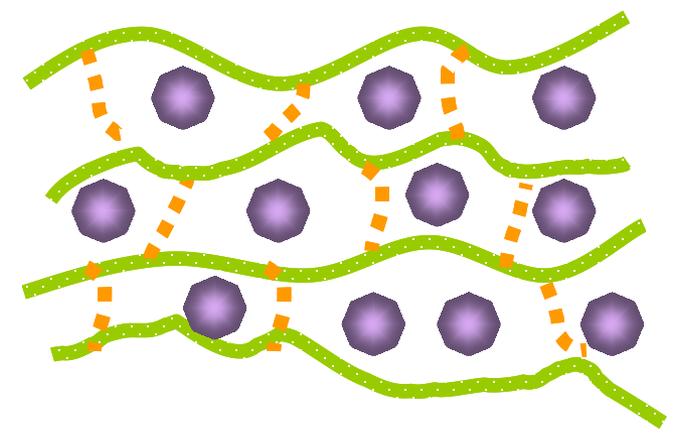
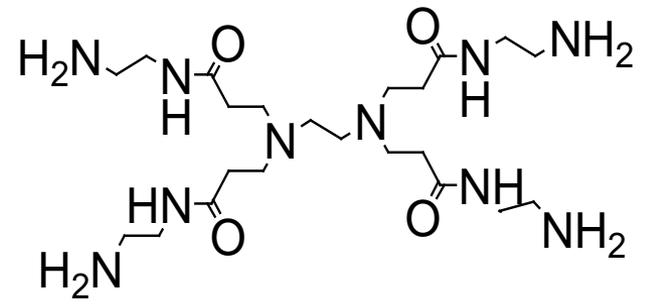
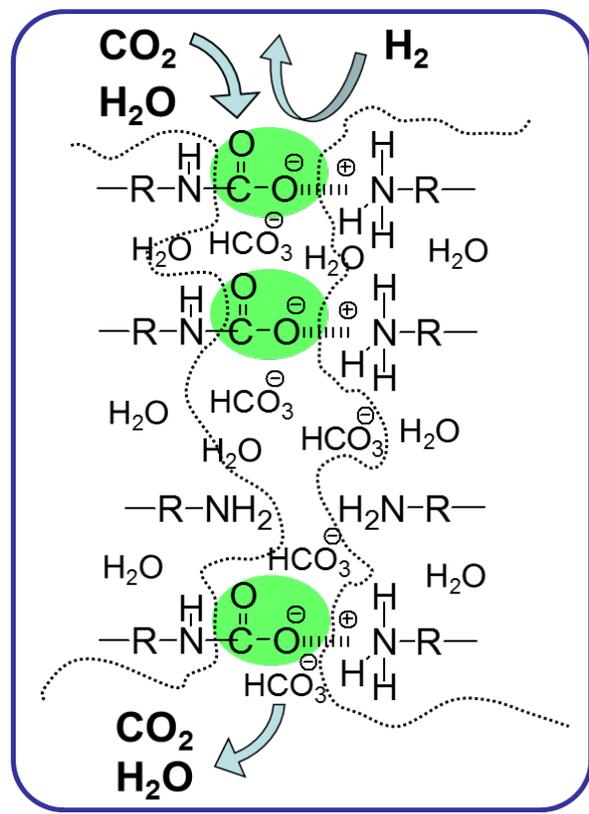
今後も石炭をエネルギー源として活用していく観点でもCO<sub>2</sub>回収技術の開発は重要である。このため、我が国が強みをもつCO<sub>2</sub>分離回収技術のコストをさらに低減し、我が国の高効率の石炭火力発電と組み合わせ海外に展開する際にも世界トップのポジションを維持し、国際競争力を保持することが可能となる。膜分離技術はその可能性を有する。

### CO<sub>2</sub>回収型石炭ガス化複合発電(IGCC-CCS)の概念図



# 1. 2 分離膜(CO<sub>2</sub>分子ゲート膜)について

## CO<sub>2</sub>分子ゲート機能を有する革新的なCO<sub>2</sub>分離膜



-  カルバメートによる擬似架橋
- $\text{HCO}_3^-$  重炭酸イオン

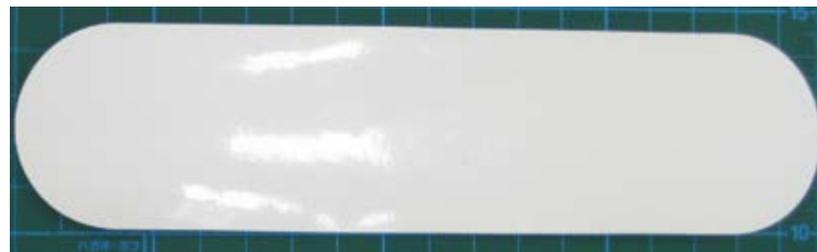
-  PVA
-  Crosslinker
-  Dendrimer

# 1.3 分離膜(CO<sub>2</sub>分子ゲート膜)と膜エレメント

## CO<sub>2</sub>分離膜



Membrane1  
(膜面積: 1.2 cm<sup>2</sup>)



Membrane2  
(膜面積: 58 cm<sup>2</sup>)

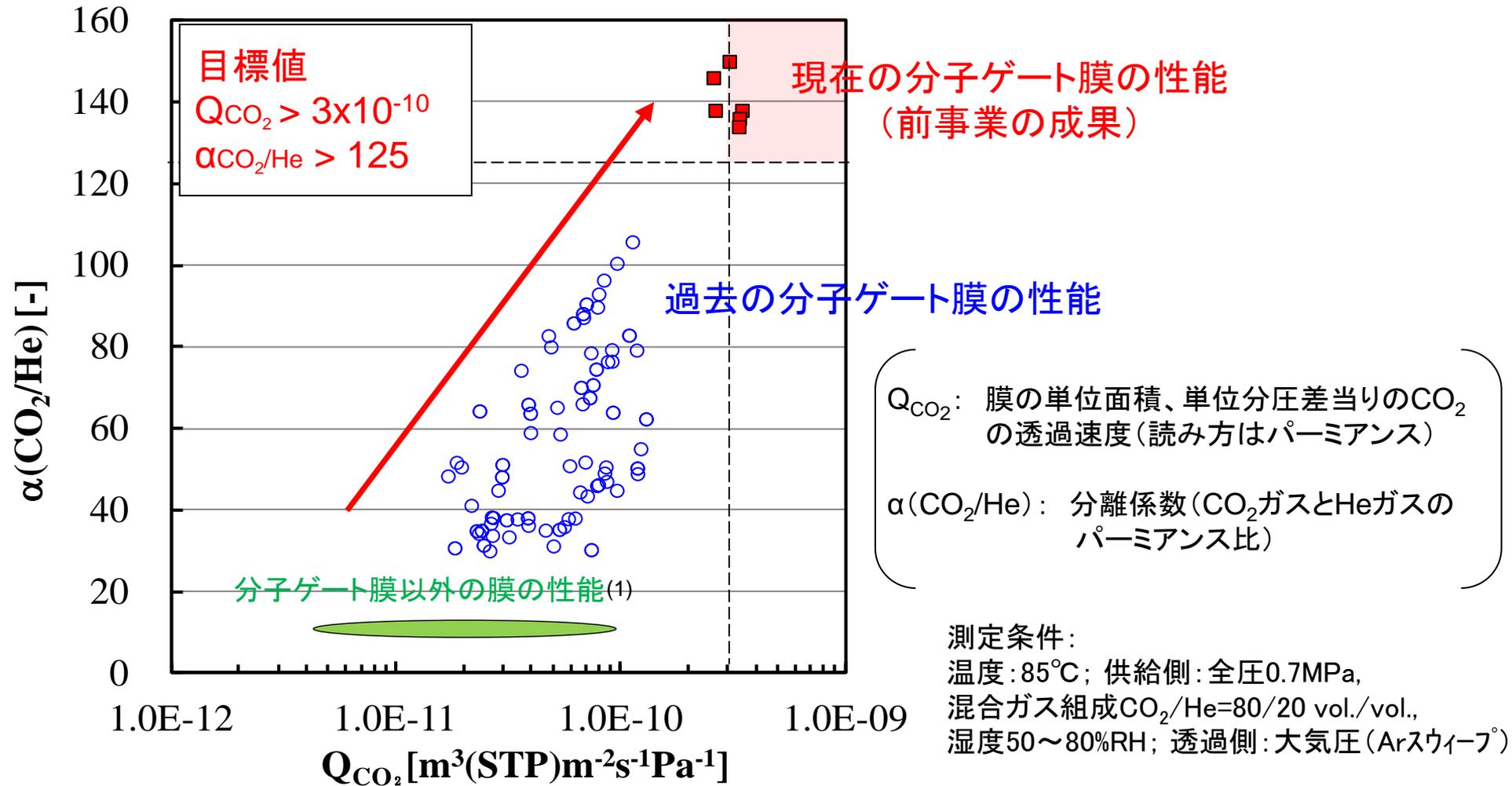


## 膜エレメント

**Spiral membrane elements**  
(Left: 2inch, Right: 4inch; L=200mm)

# 1.4 本技術の優位性

## 分子ゲート膜の分離性能(中圧条件(0.7MPaA))

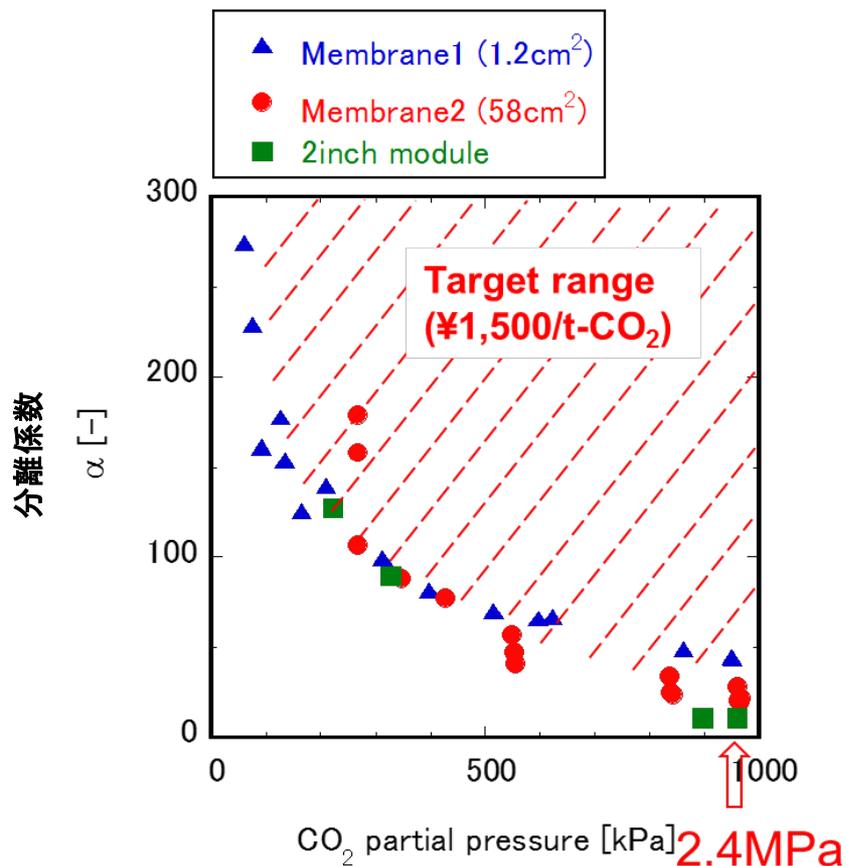
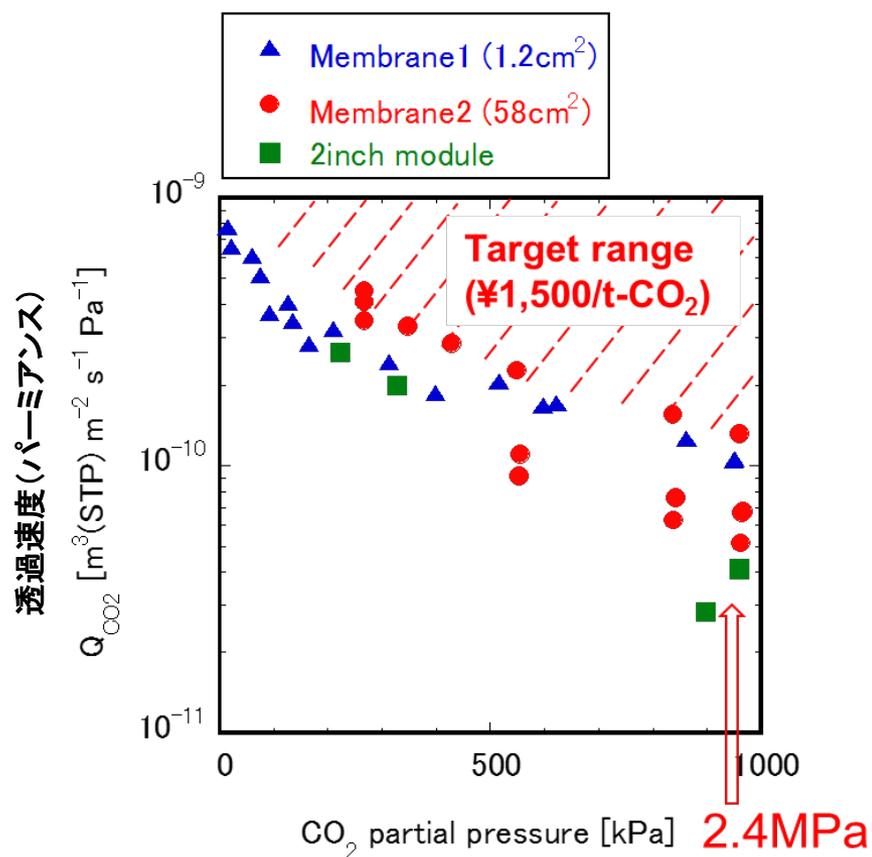


(1) H. Lin, B. Freeman *et al.*,  
*Science*, 311, 639-642 (2006)

ラボレベルで目標分離性能を達成  
 世界最高レベルの分離性能を更新

※模擬ガス試験においては、安全上の理由から、 $H_2$ の代替ガスとしてHe(ヘリウム)を使用

# 分子ゲート膜のCO<sub>2</sub>分離性能(CO<sub>2</sub>分圧依存性)



操作条件: 85°C, 供給ガス: 0.7~2.4MPaA; 透過側: 大気圧(Ar sweep gas)

## 2. 事業アウトカム

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

※単膜: ラボスケールの平膜(膜面積:1.2~58cm<sup>2</sup>程度)

## 2. 事業アウトカム

| 事業アウトカム指標<br>(妥当性・設定理由・根拠等)   | 目標値(計画)   | 達成状況<br>(実績値・達成度) | 原因分析<br>(未達成の場合) |
|---|---|-------------------|------------------|
| ①平成31年度までに石炭ガス化複合発電等で発生する比較的高い圧力を有するガスからのCO <sub>2</sub> 分離・回収コストについて、実用化段階(数百万t-CO <sub>2</sub> /年規模を想定)で回収エネルギー0.5GJ/t-CO <sub>2</sub> 以下を達成する分離膜技術を開発する。 | <b>(事業終了時)</b><br>①CO <sub>2</sub> 分離・回収エネルギー:<br>0.5GJ/t-CO <sub>2</sub><br>②CO <sub>2</sub> 分離・回収コスト:<br>1,500円/t-CO <sub>2</sub> | —                 | —                |
| ②平成31年度までにCO <sub>2</sub> 分離・回収コストについて、1,500円/t-CO <sub>2</sub> 以下を達成する分離膜技術を開発する。  | <b>(事業目的達成時)</b><br>・CO <sub>2</sub> 分離・回収コスト1,500円/t-CO <sub>2</sub> 以下を達成   | —                 | —                |

# 3. 事業アウトプット

| 事業アウトプット指標<br>(妥当性・設定理由・根拠等)   | 目標値(計画)  | 達成状況<br>(実績値・達成度)   | 原因分析<br>(未達成の場合) |
|--|--|---|------------------|
| <p>分離・回収コスト1,500円/t-CO<sub>2</sub>以下を実現する技術を確立するには、以下の3項目を検討する必要がある。</p> <p>①実機膜モジュールの実用化研究：実用化を想定した連続製膜、膜エレメント化技術を確立し、IGCCプロセス適用条件でのプロセス適合性を付与する。</p> <p>②実ガス試験による実用化研究：IGCCプロセス用実ガス試験装置を製作・手配し、実ガス試験により膜モジュールの性能を評価し、技術課題を抽出し、解決する。</p> <p>③経済性評価・取りまとめ：模擬ガス、実ガス試験結果を用いた実機膜モジュールシステムを検討し、経済性評価を行う。</p> | <p>(事業開始時)<br/>・模擬ガスを用いて、プロセス適合性を確認<br/>(単膜ベース)</p> <p>(中間評価時)<br/>①-1. 連続製膜とエレメント化技術の課題抽出と解決<br/>①-2. 実用化条件で製造した膜と膜モジュールをIGCCプロセス適用条件での耐圧性、耐久性等のプロセス適合性を確認。<br/>①-3. 模擬ガス試験において、分離性能低下が2年間で25%以内である膜モジュールの開発を行う。</p> <p>②IGCCプロセスによる実ガス試験装置の製作、手配</p> <p>③模擬ガス試験結果に基づく経済性評価を行う。</p> | <p>・模擬ガスを用いてプロセス適合性を確認した。</p> <p>(全項目において、H28年度末まで：計画通り、H29年度末：達成見込み)<br/>①-1. 量産化を念頭において、実用化を想定した連続製膜、膜エレメント化技術の開発を進め、連続製膜の目処をつけた。<br/>①-2. 単膜の耐圧性、耐久性等のプロセス適合性について確認した。<br/>①-3. 連続製膜の単膜で分離性能低下が2年間で25%以内が期待できるデータを取得した。</p> <p>②種々の前処理設備を有する米国NCCCにおける実ガス試験装置を使用するよう調整した。</p> <p>③経済性評価を行い、事業アウトカム目標値を達成することを確認した。</p> |                  |

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

### 3. 事業アウトプット

| 事業アウトプット指標<br>(妥当性・設定理由・根拠等)   | 目標値(計画)   | 達成状況<br>(実績値・達成度) | 原因分析<br>(未達成の場合) |
|--|---|-------------------|------------------|
| <p>分離・回収コスト1,500円/t-CO<sub>2</sub>以下を実現する技術を確立するには、以下の3項目を検討する必要がある。</p> <p>①実機膜モジュールの実用化研究：実用化を想定した連続製膜、膜エレメント化技術を確立し、IGCCプロセス適用条件でのプロセス適合性を付与する。</p> <p>②実ガス試験による実用化研究：IGCCプロセス用実ガス試験装置を製作・手配し、実ガス試験により膜モジュールの性能を評価し、技術課題を抽出し、解決する。</p> <p>③経済性評価・取りまとめ：模擬ガス、実ガス試験結果を用いた実機膜モジュールシステムを検討し、経済性評価を行う。</p> | <p>(事業終了時)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・実ガス試験結果に基づき、プロセス適合性に関する要因を把握し、その課題について解決する。</li> <li>・実ガス試験において、分離性能低下が2年間で25%以内である膜モジュールの開発を行う。</li> <li>・実ガス試験結果に基づく経済性評価を行う。</li> </ul> | —                 | —                |
|  | <p>(事業目的達成時)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・CO<sub>2</sub>分離・回収コスト1,500円/t-CO<sub>2</sub>以下を実現する分離膜技術、実機膜モジュール、膜システムの技術を確立する。</li> </ul>   | —                 | —                |

## 3.1 事業の年次展開予定

### スケジュール(事前評価時点)

| 年度                              | H27FY                            | H28FY | H29FY   | H30FY | H31FY       |
|---------------------------------|----------------------------------|-------|---|-------|-------------|
| 装置設計・製作と実ガス試験                   | 小型ガス化炉での試験装置の設計、製作、申請            |       | 小型ガス化炉における実用化研究                                       |       |             |
| 1,500円/t-CO <sub>2</sub> の実用化研究 | 小型高圧試験装置による耐圧試験、耐プロセス試験・膜モジュール作製 |       | 小型高圧試験装置による1,500円/t-CO <sub>2</sub> 膜モジュール評価・膜モジュール作製 |       |             |
|                                 |                                  |       |   |       | 経済性評価・取りまとめ |

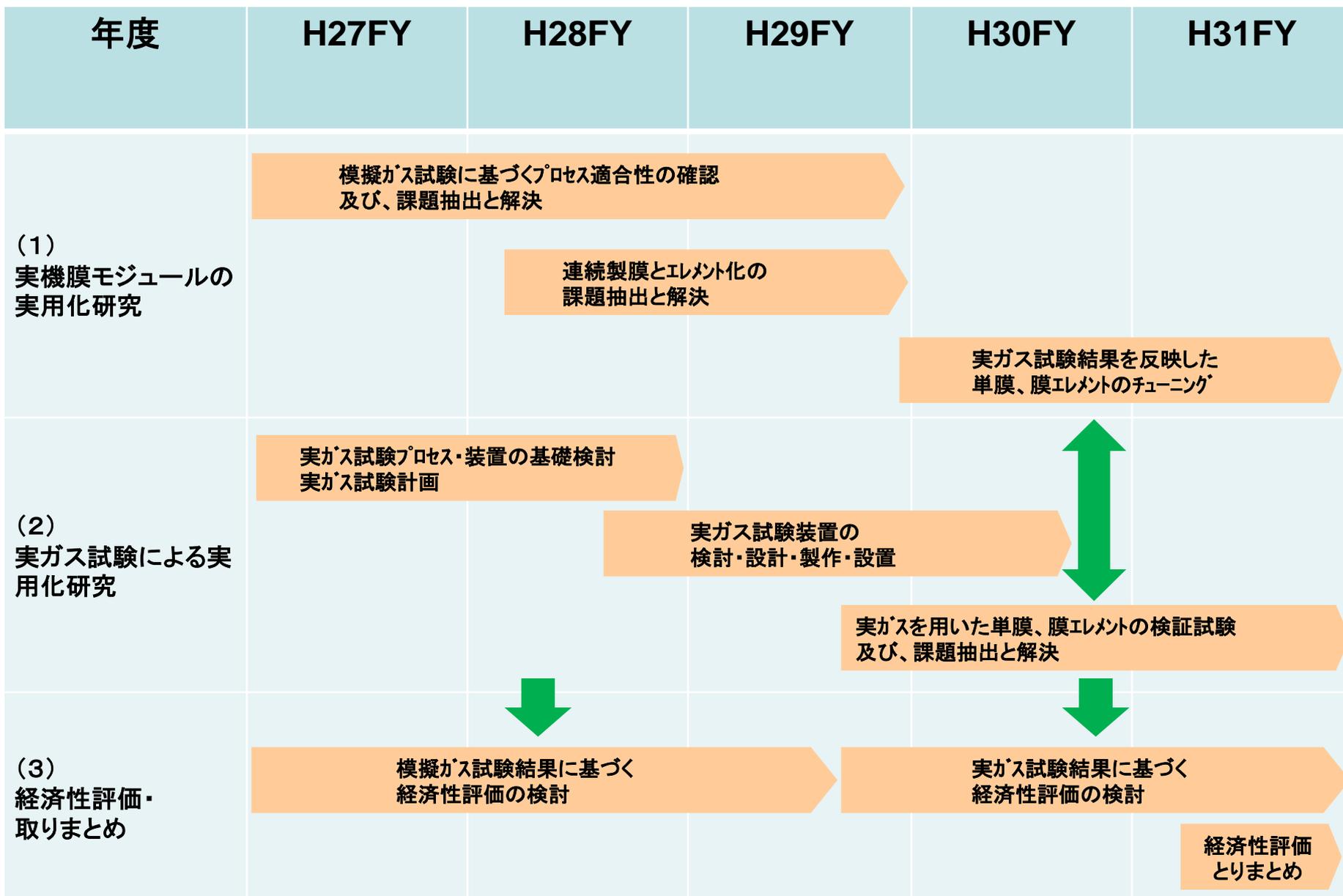


### スケジュールの変更

装置設計・製作と実ガス試験では、既存の実ガス試験サイトで行うこと、1,500円/t-CO<sub>2</sub>の実用化研究では、実用化を想定した連続製膜と膜エレメント化技術開発を先行して行う研究開発スケジュールへ変更

(※)膜モジュール＝大面積膜の構造体(膜エレメント)＋容器(ハウジング)

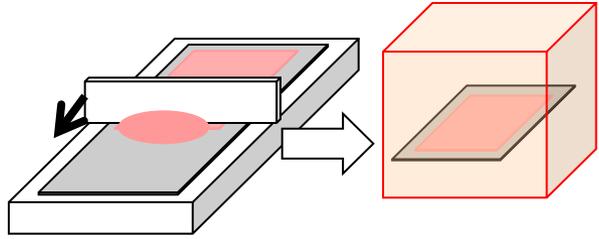
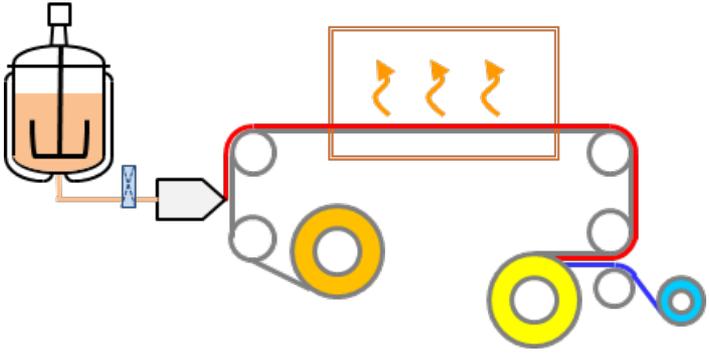
# 現在の研究開発項目とスケジュール(H27FY～)



## 3.2 (1) 実機膜モジュールの実用化研究

### ▶ 連続製膜機を用いた製膜検討

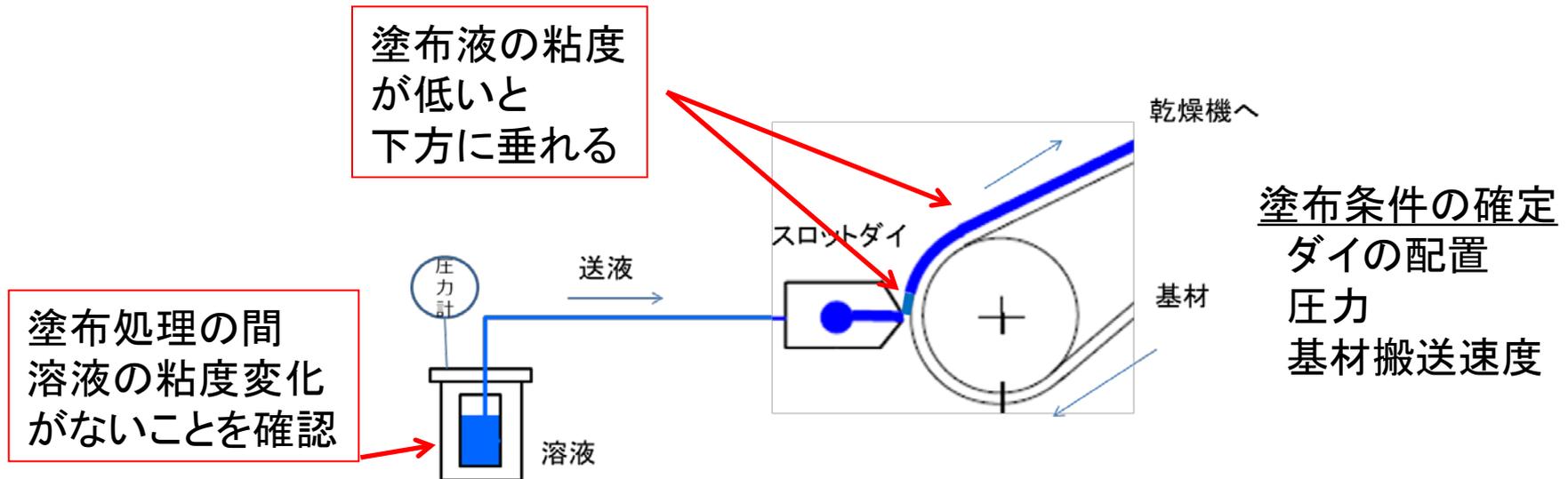
実用化に向け、一定長さ以上の大面積塗布が可能で  
生産性も高い連続製膜での分離膜の製膜技術を開発

|      | 枚葉製膜  | 連続製膜  |
|------|---|---|
|      |  <p>卓上コーター      卓上乾燥機</p> |  |
| 長尺生産 | 不可  | 可   |
| 生産性  | 低   | 高   |
| 溶液粘度 | 広範囲の塗布可能  | 枚葉製膜よりは範囲限定   |
| 基材固定 | 可   | 完全固定は難  |

## 3. 2 (1) 実機膜モジュールの実用化研究

### ➤ 連続製膜に適した製膜レシピへの改良

#### 1) スロットダイ塗布に適した粘度を設定し、塗布条件を確定



#### 2) 生産性と良好な膜外観を両立する乾燥温度の設定

|        | 乾燥温度<br>試作との差 | 連続製膜<br>乾燥後膜の観察 |
|--------|---------------|-----------------|
| 試作条件   | —             | 良好に乾燥           |
| 高温乾燥条件 | 試作時+10℃       | 基材に皺発生          |

## 3. 2 (1) 実機膜モジュールの実用化研究

### ➤ 連続製膜で作製した単膜の性能

- ・一定製膜条件にて、塗布幅320mm、塗布長さ約20mを取得(連続製膜サンプル)
- ・エレメント試作用別条件にて、薄膜サンプルを約1m取得(薄膜品)

### 切り出した単膜(58cm<sup>2</sup>)の分離性能

|          | 膜厚比  | $Q_{CO_2}$<br>[m <sup>3</sup> (STP)/m <sup>2</sup> /s/Pa] | $Q_{He}$<br>[m <sup>3</sup> (STP)/m <sup>2</sup> /s/Pa] | $\alpha$ |
|----------|------|---|---|----------|
| 連続製膜サンプル | 1とする | 1.94E-11  | 1.18E-12  | 16.5     |
| 薄膜品      | 0.1  | 7.73E-11  | 3.92E-12  | 19.7     |

測定条件:

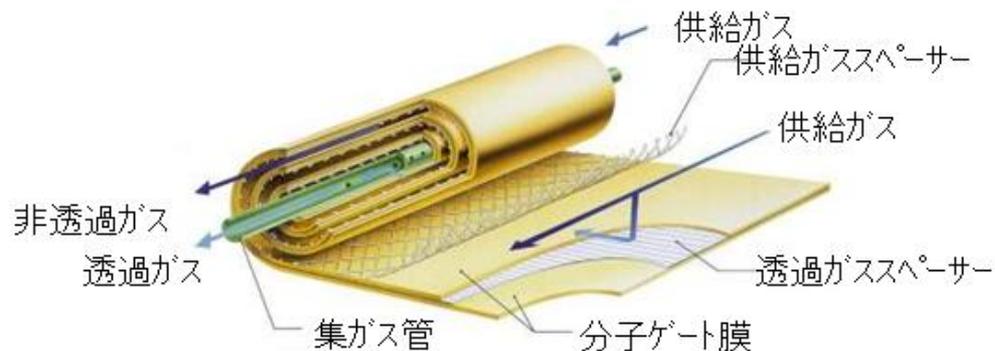
温度:85°C; 供給側:全圧2.4MPa, 混合ガス組成CO<sub>2</sub>/He=40/60 vol./vol., 湿度70%RH; 透過側:大気圧

## 3. 2 (1) 実機膜モジュールの実用化研究

### ➤ 連続製膜品で作成した膜エレメントの性能

#### 1) 試作エレメント

2inch径、長さ 220mm  
のエレメントを試作



#### 2) 2inch径エレメントの初期性能

CO<sub>2</sub>の透過性能は単膜での測定結果と同等

#### 膜エレメントと単膜(58cm<sup>2</sup>)の分離性能

|        | $Q_{CO_2}$                                  | $Q_{He}$                                    | $\alpha$ |
|--------|---|---|----------|
|        | [m <sup>3</sup> (STP)/m <sup>2</sup> /s/Pa] | [m <sup>3</sup> (STP)/m <sup>2</sup> /s/Pa] |          |
| 膜エレメント | 1.83E-11                                    | 1.54E-12                                    | 11.9     |
| 単膜     | 1.94E-11                                    | 1.18E-12                                    | 16.5     |

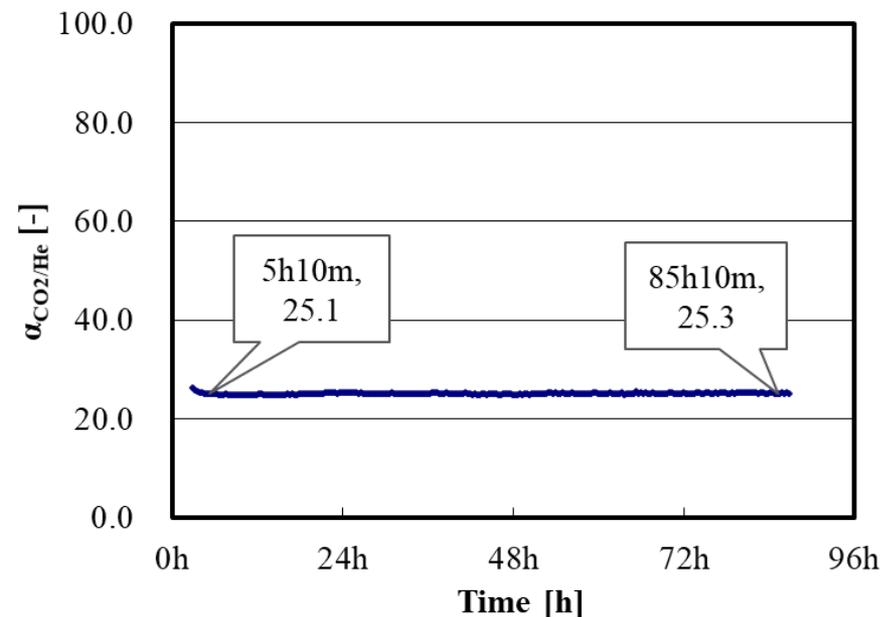
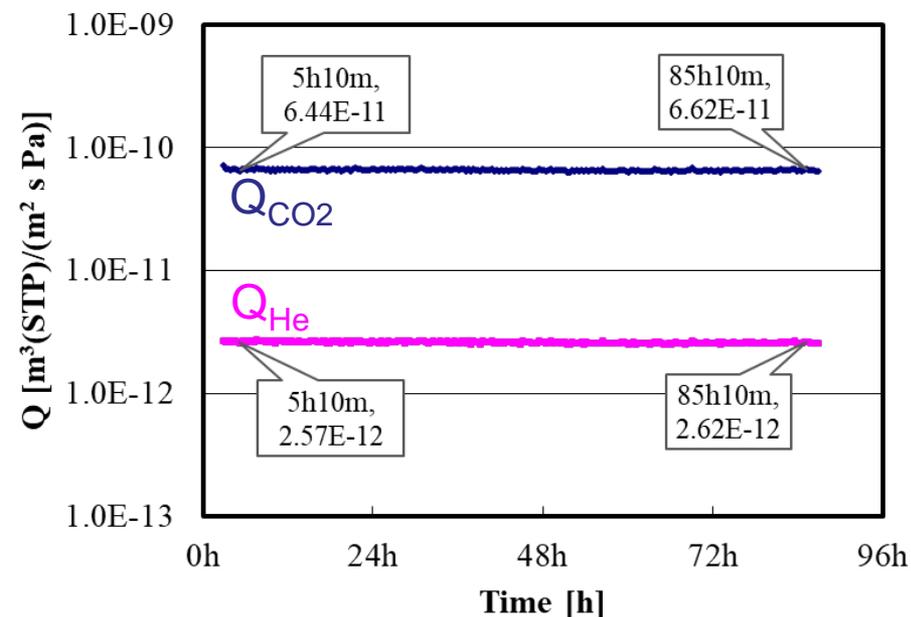
測定条件:

温度: 85°C; 供給側: 全圧2.4MPa, 混合ガス組成CO<sub>2</sub>/He=40/60 vol./vol., 湿度70%RH; 透過側: 大気圧

## 3. 2 (1) 実機膜モジュールの実用化研究

### ➤ プロセス適合性：耐圧・耐久性（単膜）

IGCC想定全圧(2.4MPa)における単膜の耐圧・耐久性を  
小型高圧試験装置にて確認



測定条件：

温度：85℃；供給側：全圧2.4MPa，混合ガス組成CO<sub>2</sub>/He=40/60 vol./vol.，湿度60%RH；透過側：大気圧

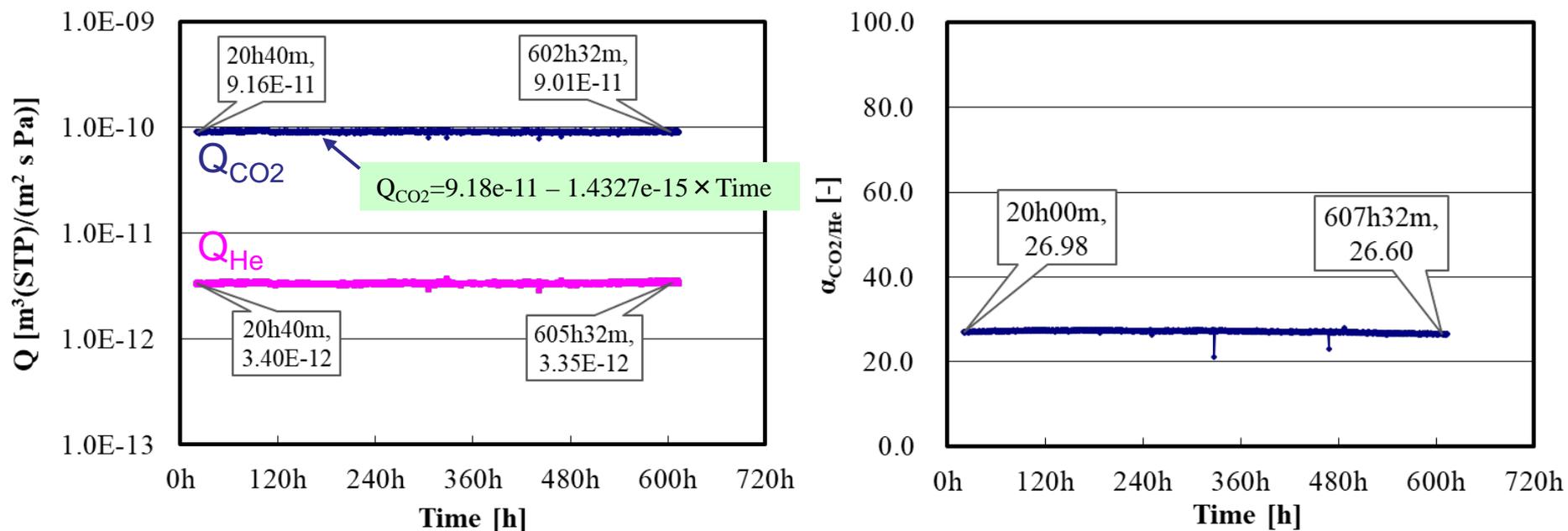
2.4MPaの高圧条件での模擬ガス試験において、  
単膜に関して、約80時間の耐久性を確認した。

## 3. 2 (1) 実機膜モジュールの実用化研究

【参考:H29FY成果】

### ➤ プロセス適合性: 耐圧・耐久性 (単膜)

IGCC想定全圧(2.4MPa)における単膜の耐圧・耐久性を  
小型高圧試験装置にて確認



測定条件:

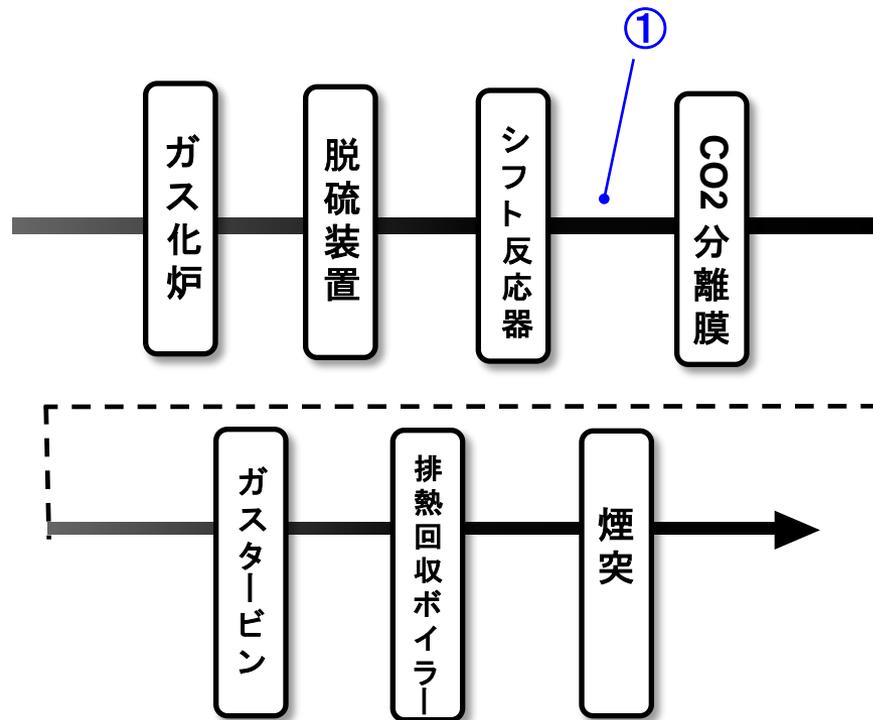
温度: 85°C; 供給側: 全圧2.4MPa, 混合ガス組成CO<sub>2</sub>/He=40/60 vol./vol., 湿度60%RH; 透過側: 大気圧

2.4MPaの高圧条件での模擬ガス試験において、  
単膜に関して、約600時間の耐久性を確認した。  
( $Q_{\text{CO}_2}$ 低下率: 25%/2年(16,000h))

## 3.2 (1) 実機膜モジュールの実用化研究

### ➤ プロセス適合性: IGCCにおける不純物

水性ガスシフト反応器 設置プラント



| 成分                  | ①<br>(ドライベース) | 単位    |
|---------------------|---------------|-------|
| CO <sub>2</sub>     | 36.4          | vol.% |
| CO                  | 2.9           | vol.% |
| H <sub>2</sub>      | 53.3          | vol.% |
| N <sub>2</sub> ,AIR | 7             | vol.% |
| CH <sub>4</sub>     | 0.4           | vol.% |
| H <sub>2</sub> S    | 30            | ppm   |
| COS                 | 10            | ppm   |

その他不純物: ハロゲン化合物、タール等を含む。  
COS: 硫化カルボニル

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

→膜劣化への影響が懸念されるH<sub>2</sub>Sについて、2.4MPaにおける曝露試験を実施

- ・ 脱硫装置: COS転化器(前段)によりガス中のCOSをH<sub>2</sub>Sに変換後、脱硫装置(後段、湿式)により、ガス中のH<sub>2</sub>Sは吸収される。
- ・ 排熱回収ボイラー: ガスタービンの排ガス中の熱を回収し、その熱で蒸気タービン用の蒸気を作り出す装置。

## 3. 2 (1) 実機膜モジュールの実用化研究

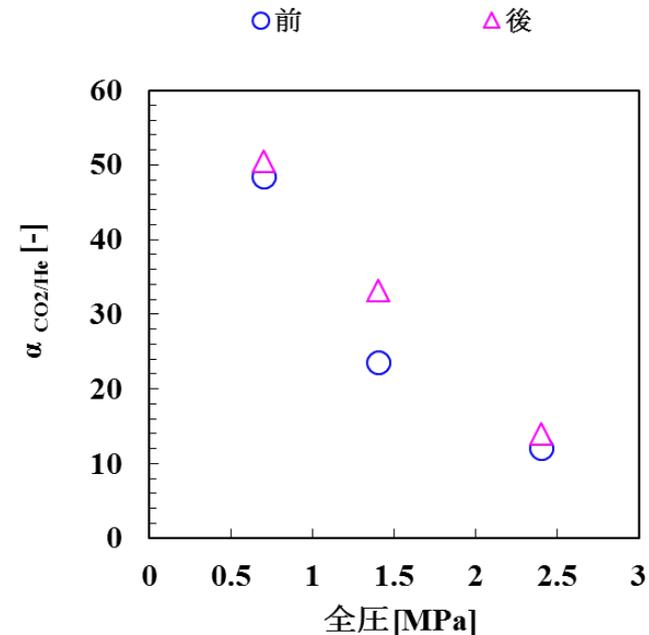
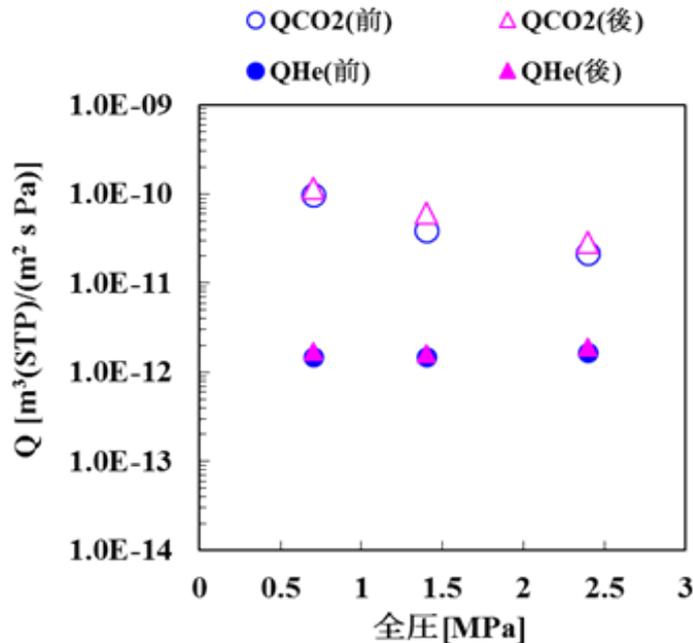
### ➤ プロセス適合性：耐不純物性 (H<sub>2</sub>S)

〈曝露試験条件〉

- ・圧力：2.4MPa以上；温度：85°C±3°C；ガス組成：CO<sub>2</sub>(33%)＋H<sub>2</sub>S(500ppm)＋N<sub>2</sub>/バランス(湿度：約80%RH)
- ・試験期間：7日間

〈曝露試験前後の分離性能〉

(“前”：曝露試験前、“後”：曝露試験後)



測定条件：

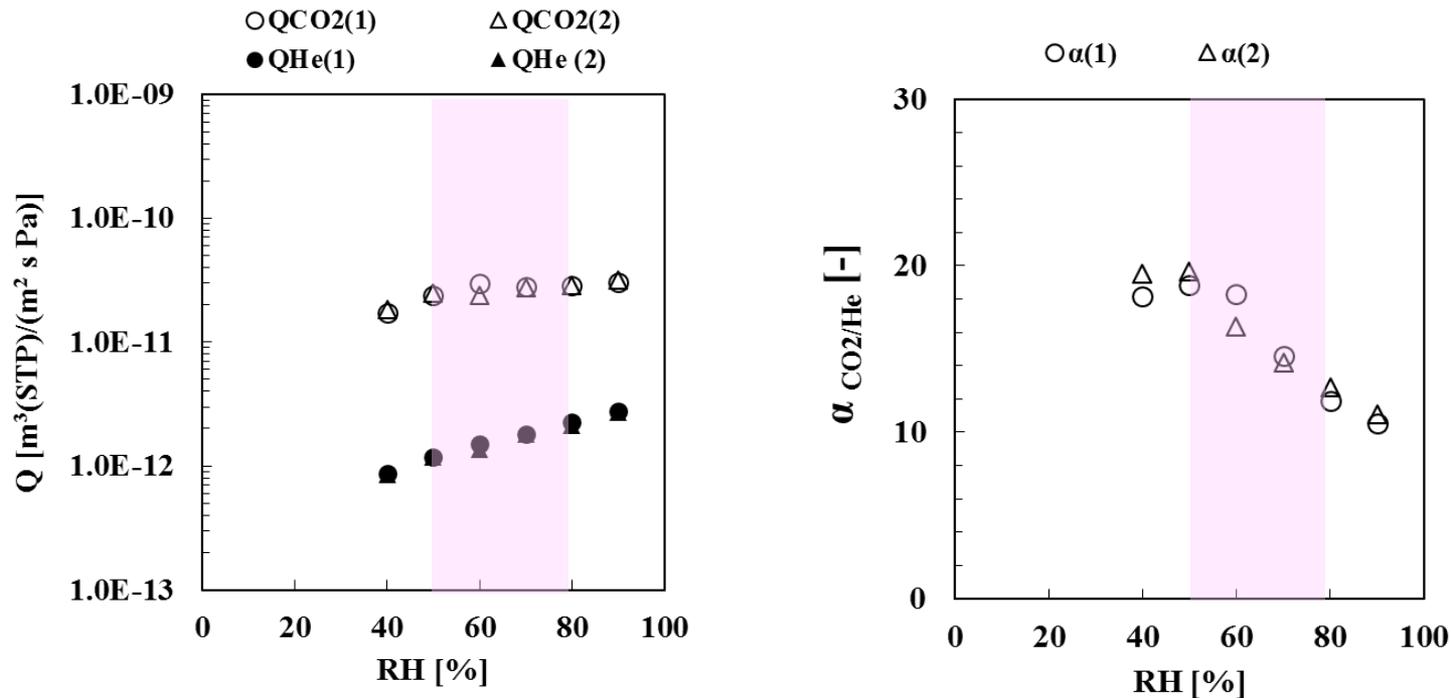
温度：85°C；供給側：全圧2.4MPa，混合ガス組成CO<sub>2</sub>/He=40/60 vol./vol.，湿度60%RH；透過側：大気圧

曝露試験前後で分離性能はほぼ同程度  
→H<sub>2</sub>Sに対する耐性を確認した。

## 3. 2 (1) 実機膜モジュールの実用化研究

### ➤ プロセス適合性: 湿度依存性

分離性能の湿度依存性を小型高圧試験装置で確認



測定条件:

温度: 85°C; 供給側: 全圧2.4MPa, 混合ガス組成CO<sub>2</sub>/He=40/60 vol./vol., 湿度40~90%RH; 透過側: 大気圧

シミュレーションに反映させるために、  
分離性能の湿度依存性を把握した。

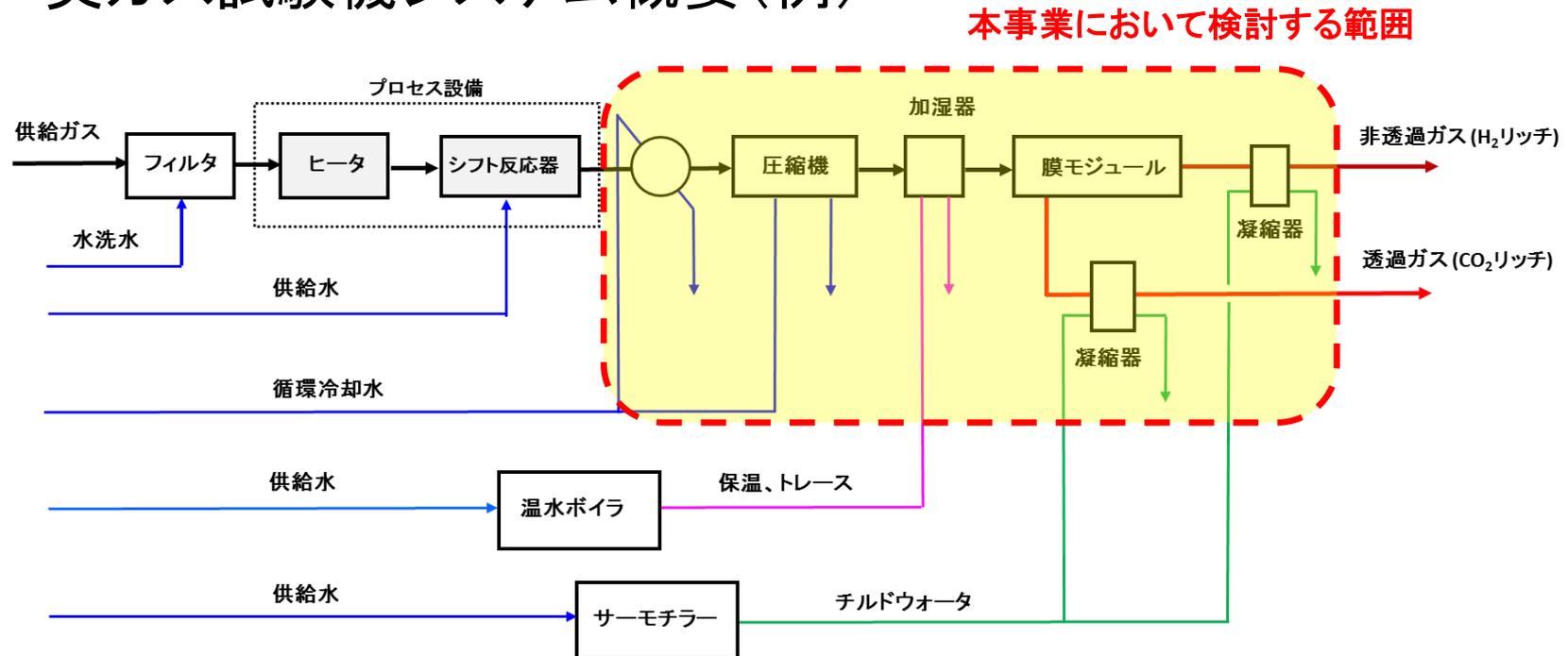
## 3.2 (1) 実機膜モジュールの実用化研究

### ➤ プロセス適合性に関するまとめ

| プロセス適合性 | 成果   |
|---------|--|
| 耐圧・耐久性  | <p>・2.4MPaの高圧条件での模擬ガス試験において、単膜に関して、約600時間の耐久性を確認した。</p> <p>(<math>Q_{CO_2}</math>低下率: 25%/2年(16,000h))</p> <p>(膜エレメントの耐久性は検討中)</p> |
| 耐不純物性   | <p>2.4MPaの高圧条件での<math>H_2S</math>の曝露試験を行い、<math>H_2S</math>に対する耐性を確認した。</p>  |
| 湿度依存性   | <p>シミュレーションに反映させるために、分離性能の湿度依存性を把握した。</p>  |

## 3. 2 (2) 実ガス試験による実用化研究

### ➤ 実ガス試験機システム概要(例)



実ガス試験プロセス・装置の基本計画を検討した。

- ・ 圧縮機： 供給ガス圧力の低い試験プラントについては、圧縮機を設置し、実機IGCC相当圧力(2.4MPa)まで昇圧する。
- ・ 加湿器： 膜モジュール入口の湿度条件(85℃において相対湿度80%RH)にするため、供給ガスを加湿する。
- ・ 凝縮器： 系統ガス組成を分析するに当たっては、ガス中のH<sub>2</sub>Oを分離除去する必要がある。このため凝縮器を通じ、チルドウォーター(サーモチラーによる冷却水)を系統ガスと熱交換させ、系統ガスを冷却する。

## 3. 2 (2) 実ガス試験による実用化研究

### ➤ 海外実ガス試験についての検討

国内での実ガス試験には、  
水性ガスシフト反応器、各種前処理設備の製造、設置を含む費用と  
準備期間が必要

→水性ガスシフト反応器、各種前処理設備を保有する試験サイトとして、  
**米国National Carbon Capture Center (NCCC)**※が有望な候補地と判明  
(H28年度)



Gasification &  
Pre-Combustion Carbon  
Capture



Post-Combustion Carbon  
Capture Center



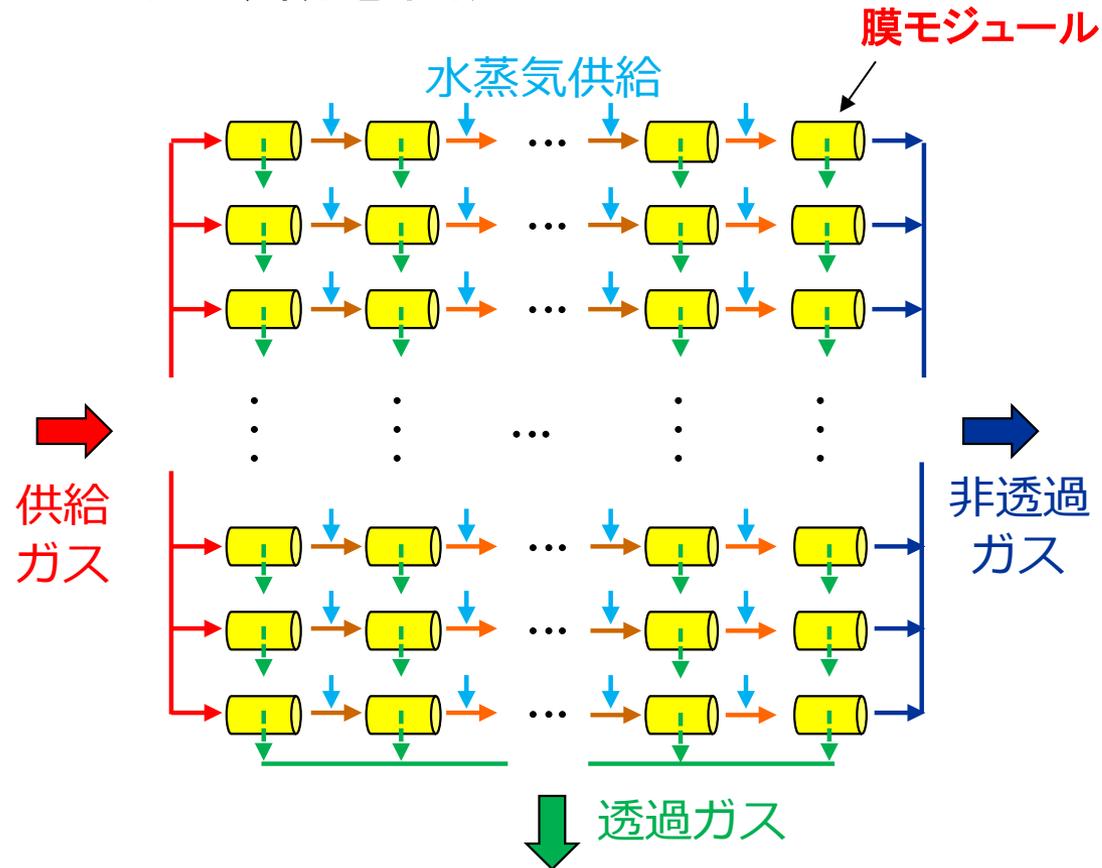
- ・ガス化炉：  
9 ton/h の石炭ガス化ガスを生産  
(年2回程度)
- ・水性ガスシフト反応器、  
種々の前処理設備を保有

※米国National Carbon Capture Center(NCCC)

所属： 米国エネルギー省(DOE) (運営: Southern Company Services, Inc. (電力会社))  
設立： 2009年(前身: Power Systems Development Facility (PSDF), 1996-2009)  
場所： アラバマ州ウィルソンヴィル  
研究分野： 実ガス試験による種々のCO<sub>2</sub>回収技術の評価(pre- and post-combustion)  
予算： \$ 187.8M(2014-2019の5年間)

### 3. 2 (3) 経済性評価

- 直列多段システムによる水蒸気導入  
(前プロジェクト、概念図)



実機プラントに膜モジュールを直列多段に構成した場合を想定し、シミュレーションソフトを用い、エネルギーとコストを試算

## 3. 2 (3) 経済性評価

### ➤ シミュレーションの前提条件

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

### 3. 2 (3) 経済性評価

#### ➤ エネルギー原単位の試算結果

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

連続製膜レシピにより作製した単膜を用いて、  
**CO<sub>2</sub>分離・回収エネルギー:0.9GJ/t-CO<sub>2</sub>以下を達成**

- ・必要エネルギーの大部分は、膜の性能発揮に必要な水分を確保する水蒸気
- ・膜分離に必要な圧力は供給ガスの圧力をそのまま使用するのでガスの圧縮などの動力は不要
- ・表中の電力は、照明、制御等の一般的な雑電力

### 3. 2 (3) 経済性評価

#### ➤ CO<sub>2</sub>分離コストの試算結果

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

連続製膜レシピにより作製した単膜を用いて、  
CO<sub>2</sub>分離・回収コスト:2,100円/t-CO<sub>2</sub>を達成

# 個別要素技術のアウトプット指標・目標値及び達成状況

## (1) 実機膜モジュールの実用化

| 個別要素技術              | アウトプット指標・目標値   | 達成状況(実績値・達成度)  |
|---------------------|--|--|
| 連続製膜・<br>エレメント化     | <p>【中間】連続製膜と膜エレメント化の技術課題を抽出し、解決を行う。</p> <p>【最終】実ガス試験により、連続製膜と膜エレメント化の技術を確認する。</p>  | <p>量産化を念頭において、実用化を想定した連続製膜、膜エレメント化技術の開発を進め、<b>連続製膜の目処をつけた。</b>(計画通り)</p>   |
| プロセス適合性:<br>①耐圧・耐久性 | <p>【中間】模擬ガス試験において耐圧・耐久性を確認する。<br/>(<math>Q_{CO_2}</math>低下率: 25%/2年(16,000h)以内)</p> <p>【最終】実ガス試験において耐圧・耐久性を確認する。<br/>(<math>Q_{CO_2}</math>低下率: 25%/2年(16,000h)以内)</p> | <p>・2.4MPaの高圧条件での模擬ガス試験において、単膜に関して、約600時間の耐久性を確認した。<br/>(<math>Q_{CO_2}</math>低下率: <b>25%/2年(16,000h)以内を確認した。</b>)<br/>(膜エレメントの耐久性は検討中)<br/>(計画通り)</p> |
| プロセス適合性:<br>②耐不純物性  | <p>【中間】代表的な不純物である<math>H_2S</math>に対する耐不純物性を確認する。</p> <p>【最終】実ガス試験において耐不純物性を確認する。</p>  | <p>2.4MPaの高圧条件での<math>H_2S</math>の曝露試験を行い、<b><math>H_2S</math>に対する耐性を確認した。</b>(計画通り)</p>   |
| プロセス適合性:<br>③湿度依存性  | <p>【中間】シミュレーションに反映させるために、分離性能の湿度依存性を把握する。</p> <p>【最終】実ガス試験において、分離性能の湿度依存性を把握する。</p>  | <p>シミュレーションに反映させるために、分離性能の<b>湿度依存性を把握した。</b>(計画通り)</p>   |

## 個別要素技術のアウトプット指標・目標値及び達成状況

### (2) 実ガス試験による実用化研究

| 個別要素技術        | アウトプット指標・目標値                             | 達成状況(実績値・達成度)  |
|---------------|--|--|
| 実ガス試験装置の製作、手配 | 【中間】実ガス試験に必要な装置の設計、製作を行う。<br>【最終】－       | 種々の前処理設備を有する米国NCCCにおける実ガス試験装置を使用するよう調整し、必要な装置について確認した。<br>(計画通り) |
| 実ガス試験計画       | 【中間】国内外の実ガス試験サイトにおける実ガス試験を立案する。<br>【最終】－ | 米国NCCCにおいて実ガス試験を実施するよう調整した。<br>(計画通り)                            |
| 実ガス試験         | 【中間】－<br>【最終】実ガス試験を実施し、必要な試験データを取得する。    | －  |

## 個別要素技術のアウトプット指標・目標値及び達成状況

### (3) 経済性評価・取りまとめ

| 個別要素技術 | アウトプット指標・目標値   | 達成状況(実績値・達成度)  |
|--------|--|--|
| 経済性評価  | <p>【中間】模擬ガス試験結果に基づき経済性評価を行う。</p> <p>【最終】実ガス試験結果に基づき経済性評価を行う。</p> | <p>模擬ガス試験結果に基づき経済性評価を行い、事業アウトカムの<b>目標値</b>(①CO<sub>2</sub>分離・回収エネルギー: <b>0.9GJ/t-CO<sub>2</sub></b>、②CO<sub>2</sub>分離・回収コスト: <b>2,100円/t-CO<sub>2</sub></b>)を達成することを確認した。<br/>(計画通り)</p> |
| 取りまとめ  | <p>【中間】 —</p> <p>【最終】実ガス試験結果に基づき、実機膜モジュールシステムを検討する。</p>          | —  |

## 4. 当省(国)が実施することの必要性(1)

・以下の①、②を満たし、当省(国)において、当該事業を実施することが必要である

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、民間企業で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

- 地球温暖化(=公害のような外部不経済)対策に特化した技術であるCCSは市場原理だけでは、その導入を図ることは不可能。制度的仕組みが必要。仕組みがなければ、民間で取り組むことは不可能。

- 現状CCSは高コスト

- ・ 財政支援、税制優遇→多額の政策的経費が必要

- ・ 規制→民間企業に過度の負担を強いる

我が国産業競争力の低下、海外移転による産業の空洞化などを惹起する恐れ

- CCSコスト低減が不可欠

- ・ CCS導入のインセンティブがない中で、民間企業に、コスト低減のための研究開発の実施を期待することは不可能

**国が主導して技術開発を実施、コスト低減の見通しを示す必要がある。**

(各要素技術に対する信頼性、諸所の基礎的なエンジニアリングデータなしに企業が新技術を導入するか否かの判断をするにはリスクを伴うため、良い技術であっても採用されない可能性がある。国が主導して実ガス試験レベルまでの技術開発を行い、次の段階での民間企業の補助事業へとつながる技術移転をスムーズに行う必要がある。)

## 4. 当省(国)が実施することの必要性(2)

### CO<sub>2</sub>分離技術開発を継続実施する必要性

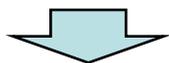
- ・CCSは分離回収、輸送、貯留により構成される一貫したシステムである。
  - 構成技術をそれぞれに民間企業が研究開発するのでは成り立たない。
  - 貯留まで含めたCCSのフルチェーンをつなげる必要がある。

長期にわたる研究開発期間、多額の研究開発費等から、民間企業では実施が難しく、また、最先端技術の開発力を維持できない可能性がある。

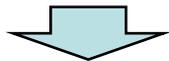
### 石炭火力+CCS: 我が国が強みを持ち、世界に勝てる技術分野

我が国は石炭火力発電の効率において、世界トップの実力

CO<sub>2</sub>分離回収技術においても、卓越性・先導性を有する技術を開発



- ・今後も石炭をエネルギー源として活用していく観点でもCO<sub>2</sub>回収技術開発は重要。
- ・最近米国環境保護庁(EPA)が新設発電所のCO<sub>2</sub>排出量規制も打ち出している。



### CO<sub>2</sub>分離回収技術のコストをさらに低減

- ・我が国の高効率の石炭火力発電を海外に展開する際にCCS技術を付加することにより、一層の国際競争力を獲得することが可能。
- ・逆に、他国によるCO<sub>2</sub>回収技術開発の先行を許せば、これまで有してきた我が国の本分野における優位性が失墜する可能性が極めて高い。

# 事業の必要性とアウトカム(プロジェクトの成果が及ぼす効果等)

## 二酸化炭素分離膜モジュール実用化研究開発事業

### プロジェクトの成果目標

実ガス試験による実用化研究

1,500円/t-CO<sub>2</sub>の実用化研究

CO<sub>2</sub>分離回収コストの大幅低減

### 目的達成までのシナリオ

#### 直接アウトカム (直接カスタマー)

CO<sub>2</sub>分離膜モジュール技術の実用化

技術完成・信頼性の確立



カスタマー  
IGCC火力発電所

#### 間接アウトカム・インパクト

CO<sub>2</sub>分離・回収における  
1,500円/t-CO<sub>2</sub>分離技術の達成

+ 制度的仕組みの導入



火力発電所等の大規模排出源における  
CCSの本格導入(2030年頃)



### 波及効果

- ・炭酸ガス有効利用分野での実用化促進
- ・高圧CO<sub>2</sub>分離技術の他産業分野への適用

### プロジェクトの目的

- ・地球温暖化対策への貢献
- ・エネルギー安定供給への貢献
- ・持続可能な社会、経済の開発
- ・我が国の国際競争力の強化

# 5. 事業アウトカム達成に至るまでのロードマップ

基盤技術研究      実用化研究フェーズ      実証フェーズ      商用化フェーズ  
 2011                      2015      2017      2020                      2025                      2030



## 研究・開発体制

次世代型膜モジュール  
技術研究組合

+ IGCC関係企業との連携  
(電力会社、エンジニアリング会社等)

1) 二酸化炭素分離膜モジュール実用化研究開発事業(H27FY~)  
(計画・課題)

- 実ガス等の実用化試験による技術課題の抽出、解決
- 実用化段階の分離・回収コスト1,500円/t- CO<sub>2</sub>以下の達成
- 実機膜モジュールシステムの開発

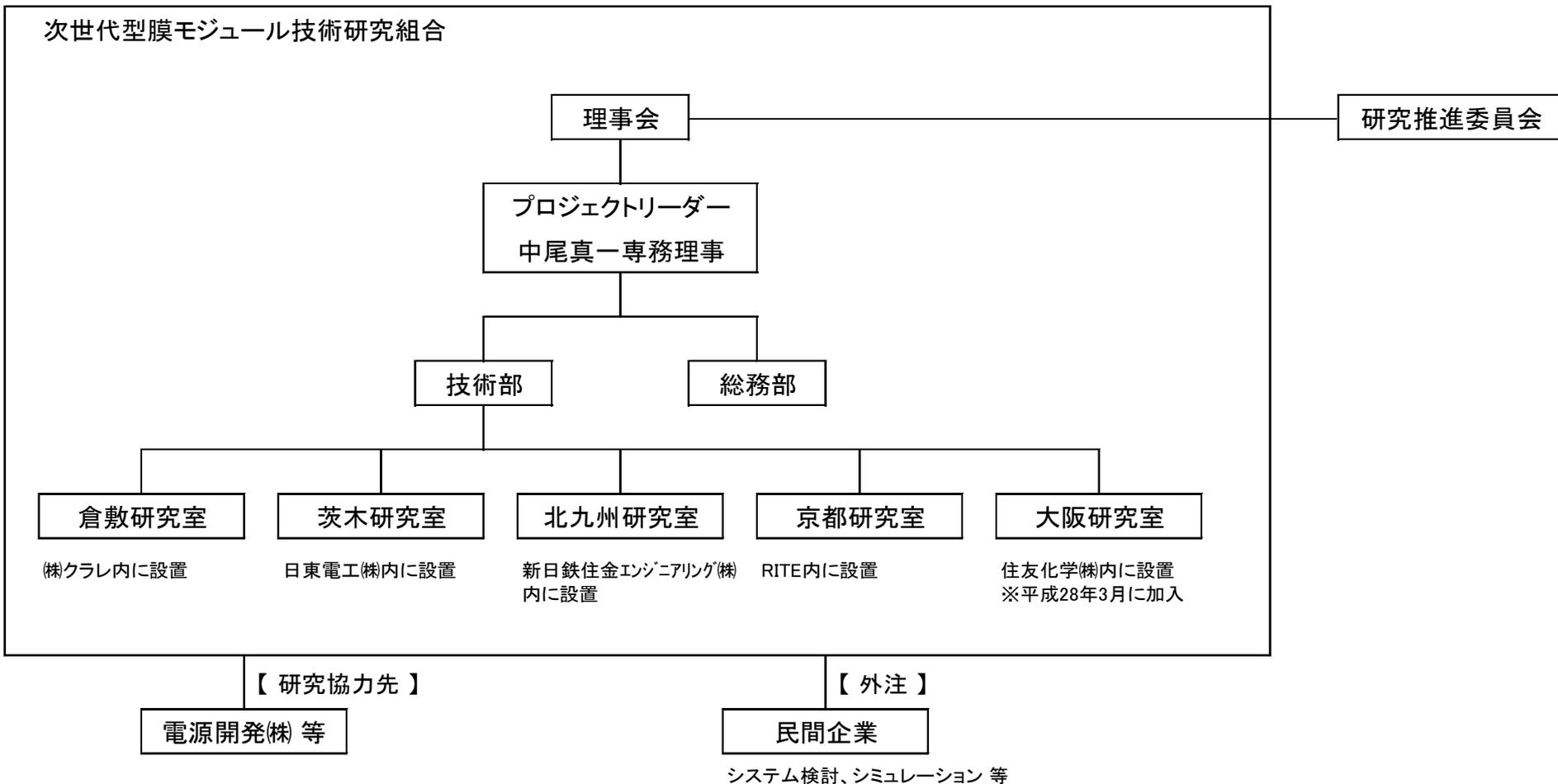
2) 実証フェーズ・商用化フェーズにおける課題

- IGCC実ガス、実機での長期試験、大規模な実証試験による実績の蓄積
- 膜、モジュールの商業生産プロセスの検討、膜大面積化、量産体制の構築
- CO<sub>2</sub>分離膜プロセス採用に向けた活動

# 6. 研究開発の実施・マネジメント体制等

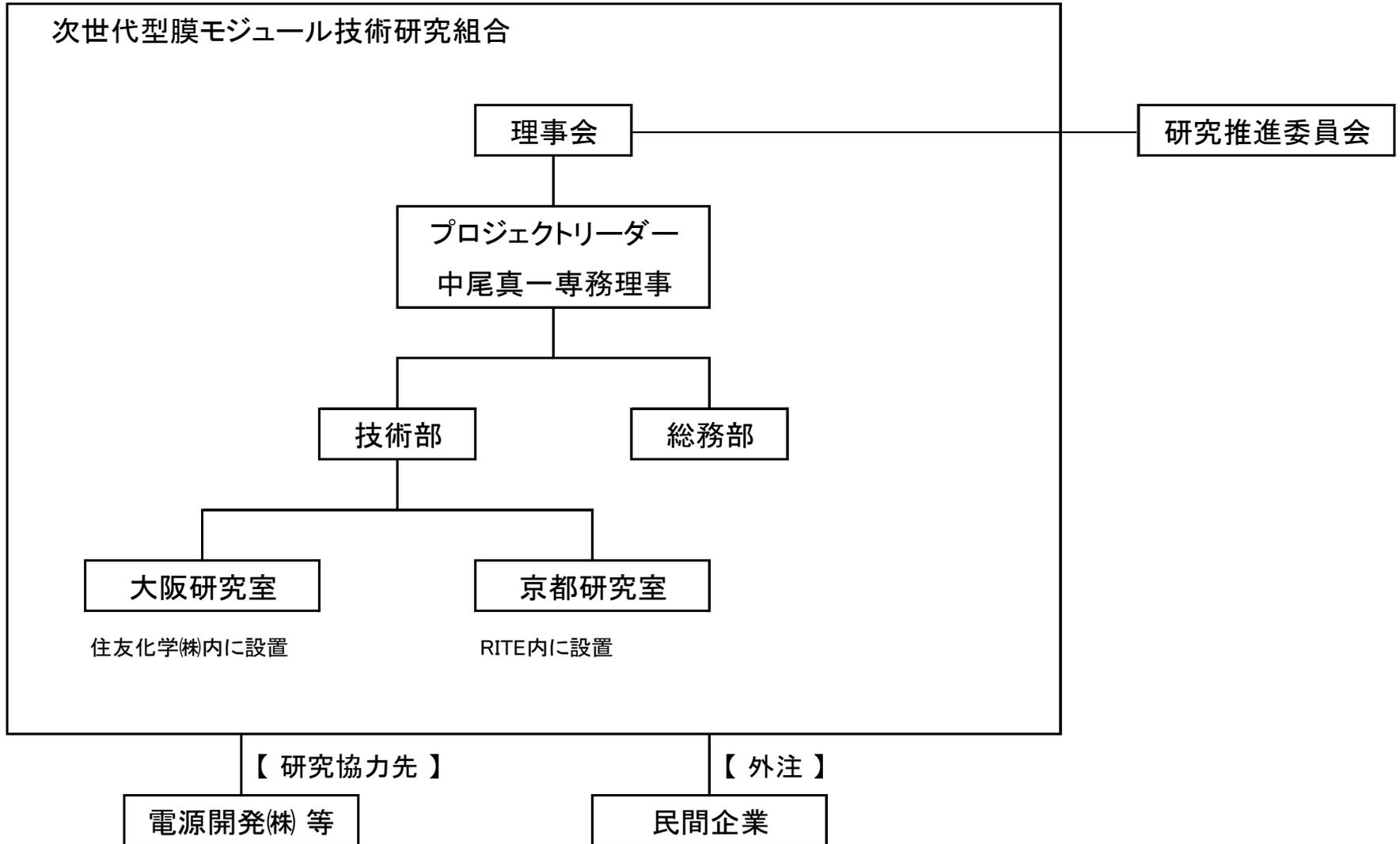
## (1) 平成27年度

- 素材から膜モジュール、システムまでの一貫した研究体制を構築
- 有識者で構成される研究推進委員会を設置(年2回実施)



## (2) 平成28年度

- CO<sub>2</sub>分離膜モジュールの基盤技術を有する住友化学とRITEの2社体制を構築
- 有識者で構成される研究推進委員会を設置(年2回実施)



## 6. 研究開発の実施・マネジメント体制等(2)

### (1) 研究開発の実施・マネジメント体制

- ・経済産業省から民間企業・研究機関等への委託研究。
- ・プロジェクトリーダーを選任して、プロジェクト全体のとりまとめを行うとともに、方針の提言、研究開発の進捗管理を行う。
- ・学識経験者等から構成される有識者委員会を設置し、研究実施内容について評価・助言を行う。
- ・CO<sub>2</sub>回収設備のユーザーとなる電力会社からの協力を得ながら研究を進める。
- ・プロセス適用性の付与、実機膜モジュール、膜システム開発及び実ガス試験については、技術的知見を有する研究開発機関、民間企業が研究開発を実施する。
- ・委託元である経済産業省においては、研究開発成果等を踏まえ、事業の変更、中止の判断を行う。
- ・以上の実施体制を戦略的に構築することにより、有効かつ効率的な研究開発を実施することとしている。

## 6. 研究開発の実施・マネジメント体制等(3)

### (2) 技術的成果の管理方法等

#### 知的財産に関する戦略

- ・特許権等の帰属特許法を踏まえ、原則として発明者(研究者)主義としつつ、発明者の所属企業・機関の「職務発明規定」に準拠して機関帰属とする。※
  - ・共同発明に係る権利持分比率を決める場合は、原則として、発明に対する貢献度(寄与率)で特定するものとする。※
  - ・シナジー効果を確保する観点から、当該プロジェクトにおいて発生した知財については、原則としてプロジェクト内は非独占実施とする。※
- ※ただし、製品化、実用化に向けて(a)特許の一括管理(共有化)、(b)クロスライセンス、(c)独占的实施等による方が有効と考えられる場合等、慎重に検討を行ったうえで、決定、採用するものとする。

#### 国際標準／認証に関する戦略

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

#### 性能や安全基準の策定に関する考え方

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

#### 規制緩和／導入支援を含む実用化に向けた取組

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

## 7. 費用対効果

### 膜分離方式のコスト目標

|       |                     | 膜モジュール<br>による分離方式 | 従来型<br>アミン吸収液方式<br>(技術戦略マップ参照*) |
|-------|---------------------|-------------------|---------------------------------|
| 回収コスト | 円/t-CO <sub>2</sub> | 1,500             | 4,200                           |

### 市場への導入目標・実現時期

本事業終了後、発電所における実機スケールでの実証試験(補助事業)を経て、2020年代には環境規制や固定価格買取制度(FIT: Feed in Tariff)のような制度的な仕組みの導入により、本格的にCCSが進むことが期待される。小規模スケールでのCO<sub>2</sub>回収(有効利用分野)においては、本事業終了後、大規模適用に先行して実用化することが想定される。

成果とユーザーの段階的イメージ:

実用化研究終了後の主な導入先は、石炭火力発電のうち、次世代高効率発電方式であるIGCC(石炭ガス化複合発電)発電所におけるCO<sub>2</sub>分離回収であり、IGFC(石炭ガス化燃料電池複合発電技術)等の新規技術の開発にも利用できる。したがって、ユーザーとしては、電力事業者、設備製作に関してエンジニアリングメーカー等があげられる。

## 7. 費用対効果

### ケース1: CCS技術の費用対効果

【 IEA Energy Technology Perspectives 2012(抜粋) 】

CCSは、産業部門(鉄鋼、セメント、天然ガス利用プロセスなど)による大幅なCO<sub>2</sub>排出量削減目標の達成を可能にする現時点で唯一の技術である。CO<sub>2</sub>削減オプションとしてのCCSを放棄すれば、2DSの実現コストは大幅に増加する。CCSなしでは、2DSを達成するために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。 CCSなしでは、他のCO<sub>2</sub>排出量削減オプションに対する圧力も増すことになる。

CCS技術がない場合、  
気温2度上昇シナリオを達成するためには、  
発電分野だけで240兆円/40年間の  
追加対策費が必要  
(ETP2012)

技術オプション価値(影響回避期待値)

6兆円/年・世界

### ケース2: 分離回収技術の費用対効果

分離回収コスト  
現状より▲2,500円/t-CO<sub>2</sub>と仮定  
(4,200円/t-CO<sub>2</sub> → 1,000円台/t-CO<sub>2</sub>)

例: 50万kWのIGCCから回収の場合  
(CO<sub>2</sub>を年間260万t回収と想定)

1基当たり64億円/年のコスト削減

## 8. 事前評価の結果

|   | 評価WGの評価コメント   | 対処方針   |
|---|---|--|
| ① | 分離膜の開発については開始時に検証可能な基準を設けステージゲート方式等で絞り込みを行うことを検討すること。           | ご指摘を踏まえ、中間評価時に係る指標を見直しました。評価時点において当該指標を達成できない場合には、研究計画等を見直すことといたします。   |
| ② | CCSの導入戦略について検討を継続すること。  | 今後、CCS実証事業の結果などを踏まえ、導入戦略の検討を継続してまいります。   |
| ③ | 国際協力の観点および国際標準の枠組みを含む本事業の海外戦略の検討を行うこと。                          | ご指摘を踏まえ、当該プロジェクトの実施に当たり、海外戦略についても検討して参ります。特に、国際標準化については、既にISOに専門委員会(TC265)が設置されており、本事業における成果も含めた我が国の技術が国際標準化に適切に反映されるよう取り組んでまいります。 |
| ④ | プロジェクト内を非独占実施とすることは参加企業のインセンティブを損なう恐れがあるため、知的財産管理戦略について再検討すること。 | ご指摘を踏まえ、知的財産権の管理・運用を適切に実施してまいります。  |

## 参考：外部調査機関による評価

### 「二酸化炭素の分離・回収技術に関する技術評価」（平成27年度）

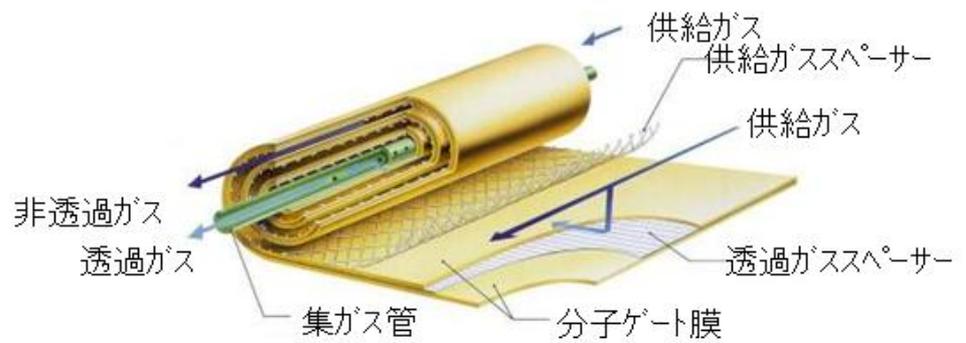
#### 欧米の有識者による技術評価

（コンサルティング会社（Washington CORE、Nexant）による調査）

#### <要点>

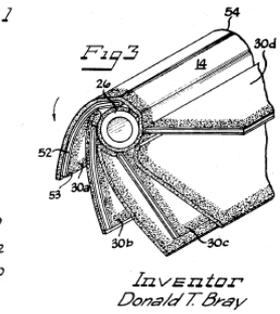
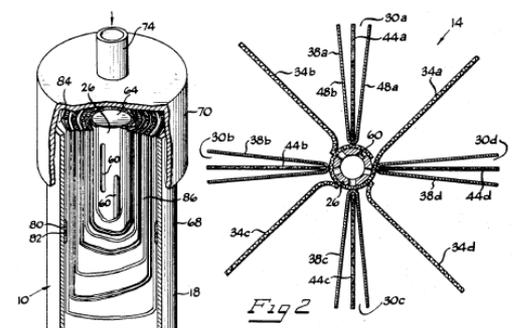
|                          |  |
|--------------------------|--|
| <p>【Washington CORE】</p> | <p>本CO<sub>2</sub>回収技術は、技術性能とコスト目標ともに、その他の技術先進国が目指す技術水準と比較しても優秀な技術であり、導入の阻害要因に解決をもたらすポテンシャルが高い。</p> <p>最大の課題は、商用規模の実証において目標値を達成できるか否かである。今後のスケールアップによる技術性能の証明と、そのための政府の力強い支援が不可欠である。</p>   |
| <p>【Nexant】</p>          | <p>次世代型膜モジュール技術研究組合のCO<sub>2</sub>膜分離技術はCO<sub>2</sub>選択性というユニークな膜システムである。<br/>（米国で研究開発が行われている他の膜はH<sub>2</sub>選択性）</p> <p>現プロジェクトでのラボスケール、ベンチスケールでの試験の継続に加えて、不純物の影響や、モジュールとしての評価、水蒸気の導入、膜寿命については、パイロットスケールの実ガス試験に進むことを推奨する。</p> |

# 参考:モジュールの内部構造

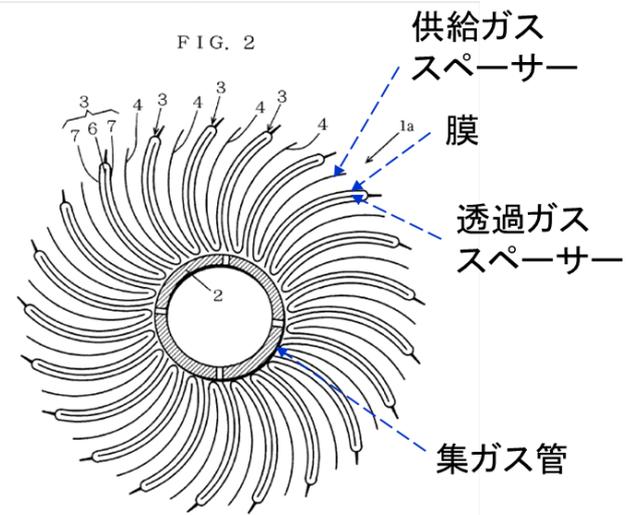


## 膜エレメントの概略図

平成27年度二酸化炭素回収技術実用化研究事業  
 (二酸化炭素分離膜モジュール実用化研究開発事業)  
 成果報告書



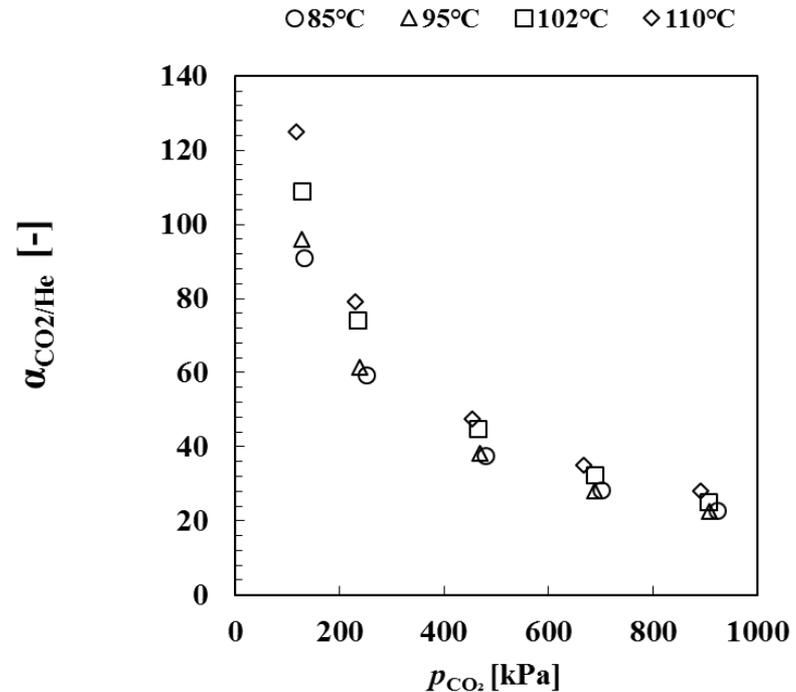
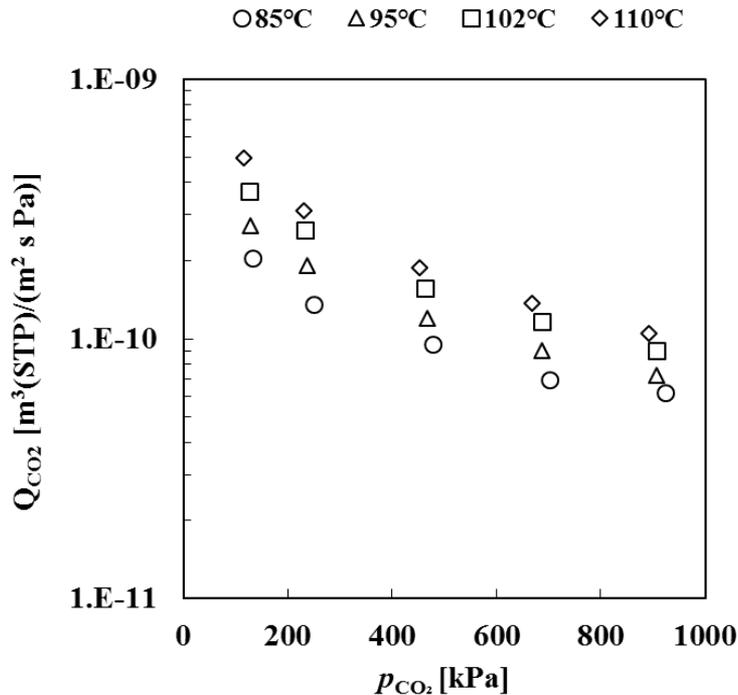
US3,417,870  
 Bray, Gulf General Atomic, 1968



## 膜エレメントの断面図(例)

US6,190,557  
 Hisada & Nishida, Nitto Denko, 2001

# 参考：操作条件依存性－CO<sub>2</sub>分圧、温度



測定条件:

温度 : 85°C, 95°C, 102°C, 110°C;

供給側: 全圧2.4 MPa, 混合ガス組成 CO<sub>2</sub>/He=5/95, 10/90, 20/80, 30/70, 40/60 vol./vol., 湿度60%RH;

透過側: 大気圧

分離性能のCO<sub>2</sub>分圧、温度依存性を確認

# 参考：平成30年度以降の事業計画（案）

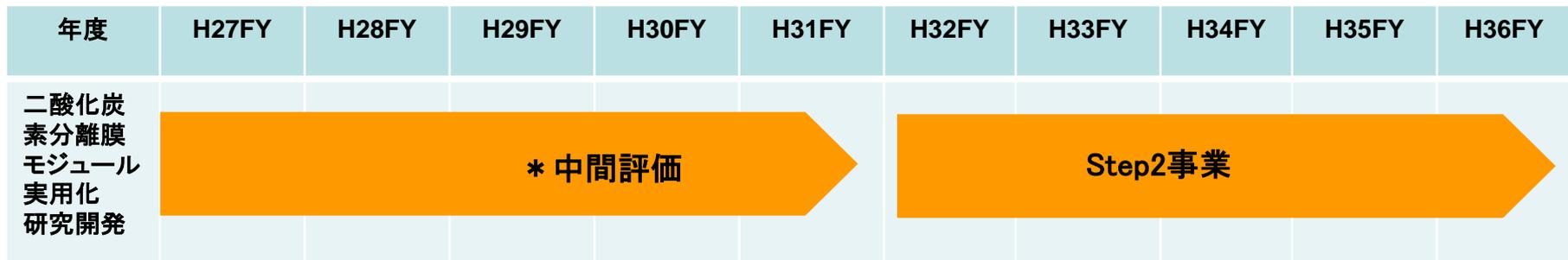
「現在の5年間でSTEP1、次の5年間でSTEP2として、STEP1では膜モジュールの開発、STEP2では膜モジュールシステムを組み込んだプロセス開発」へ。

## STEP1 (H27FY～H31FY) :

国内外の実ガス試験サイト(米国NCCC他)の石炭ガス化炉で、膜エレメント、モジュールの検証試験を行い、IGCCへの適用性の考察、及び、膜性能の確認と製膜技術の確立を目指す。実ガス試験サイトでの結果をもとに、エンジニアリング会社、電力会社とのSTEP2に向けた共同開発体制を築く。

## STEP2 (H32FY～H36FY) :

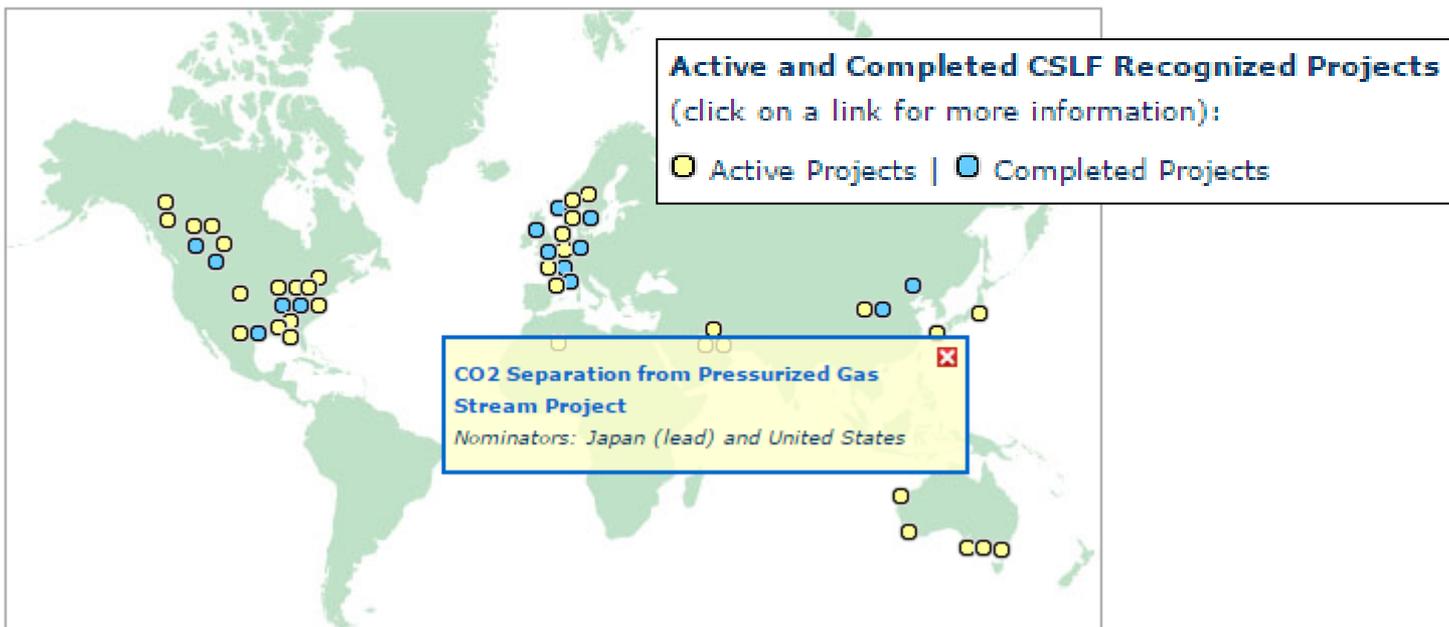
実ガス試験サイトの石炭ガス化炉での検証試験結果をもとに、膜モジュールシステムとしての検証試験を、IGCCプロセスの実ガスを用いて行い、各プロセスへの適合性等を確認する。これにより、CO<sub>2</sub>分離膜モジュールシステムを組み込んだプロセスとして完成させることを目指す。



## 参考: CSLF認定プロジェクト

### CO<sub>2</sub> Separation from Pressurized Gas Stream Project (2004- ) Nominators: Japan (lead) and United States

Recognized by the CSLF at its Melbourne meeting, September 2004



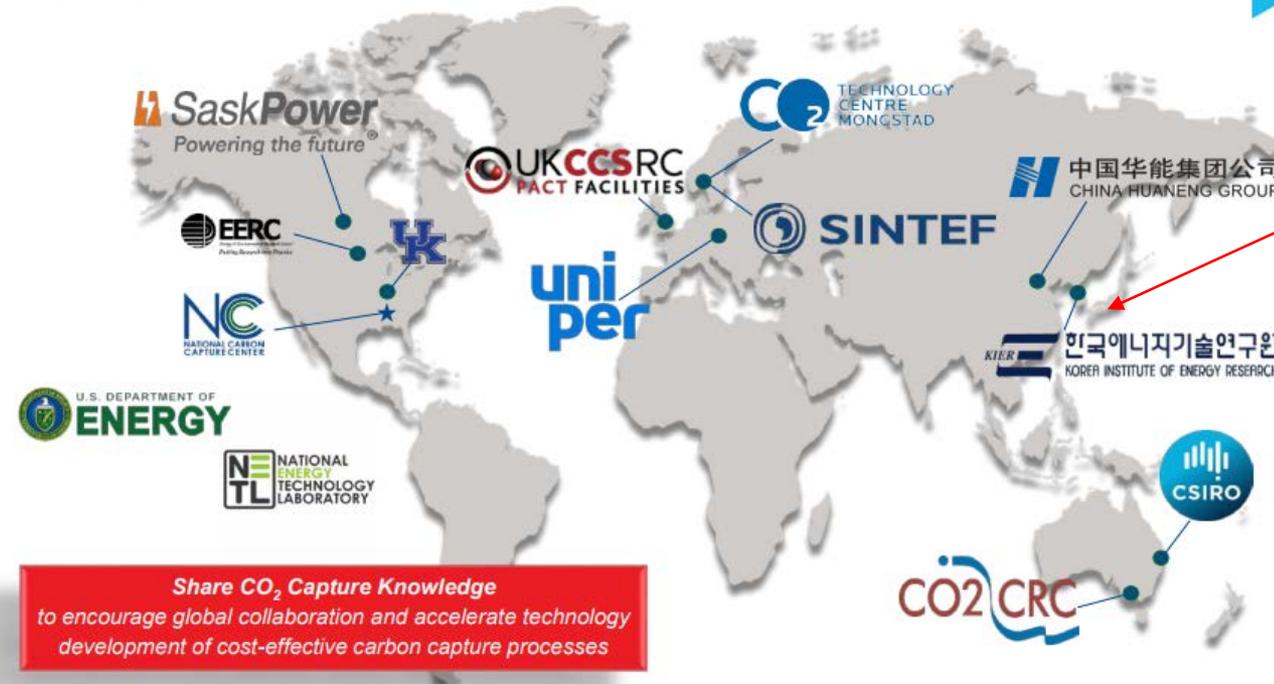
炭素隔離リーダーシップフォーラム (Carbon Sequestration Leadership Forum, CSLF):  
米国が、炭素隔離技術の開発と応用を促進するための国際協力を  
推進する場として提案した組織

本事業: CSLFの認定プロジェクト「圧力ガスからのCO<sub>2</sub>分離」として登録

<https://www.cslforum.org/sites/cslf/projects/index.html>

# 参考: International Test Center Network (ITCN)

## International Test Center Network Members



**RITE加入が  
正式に承認  
(2017.9)**

*Share CO<sub>2</sub> Capture Knowledge  
to encourage global collaboration and accelerate technology  
development of cost-effective carbon capture processes*

## International Test Center Network (ITCN)

設立: 2012年

概要: CO<sub>2</sub>分離回収技術の研究開発を推進する世界各地の施設のグローバル連合

現在のITCN議長: National Carbon Capture Center (NCCC)