

# CO<sub>2</sub>分離回収技術の現状

(公財)地球環境産業技術研究機構 (RITE)  
化学研究グループ

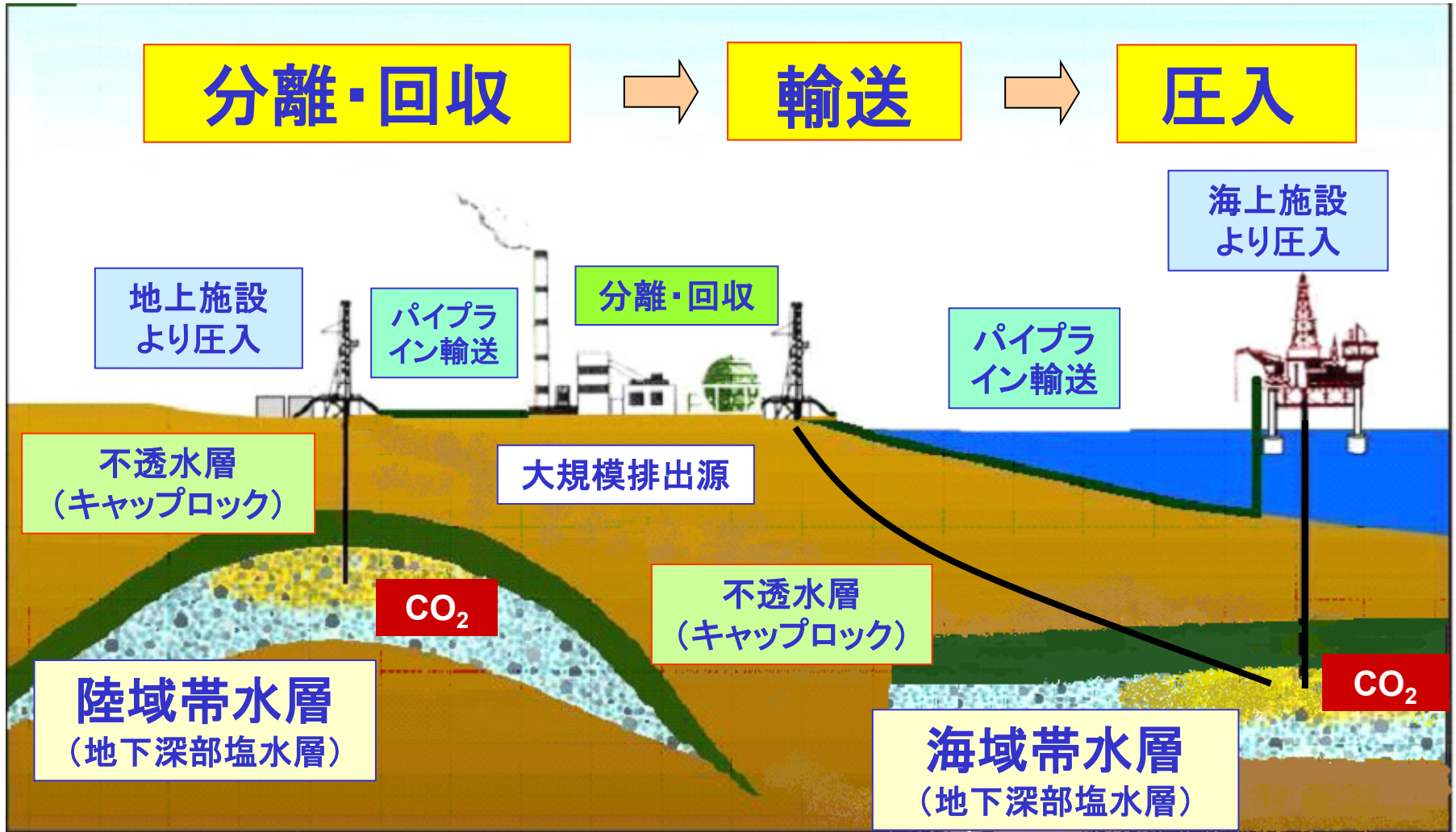
中尾 真一



1. はじめに
2. CO<sub>2</sub>分離回収技術の現状
3. まとめ

# 二酸化炭素回収・貯留

(Carbon Dioxide Capture and Storage, CCS)



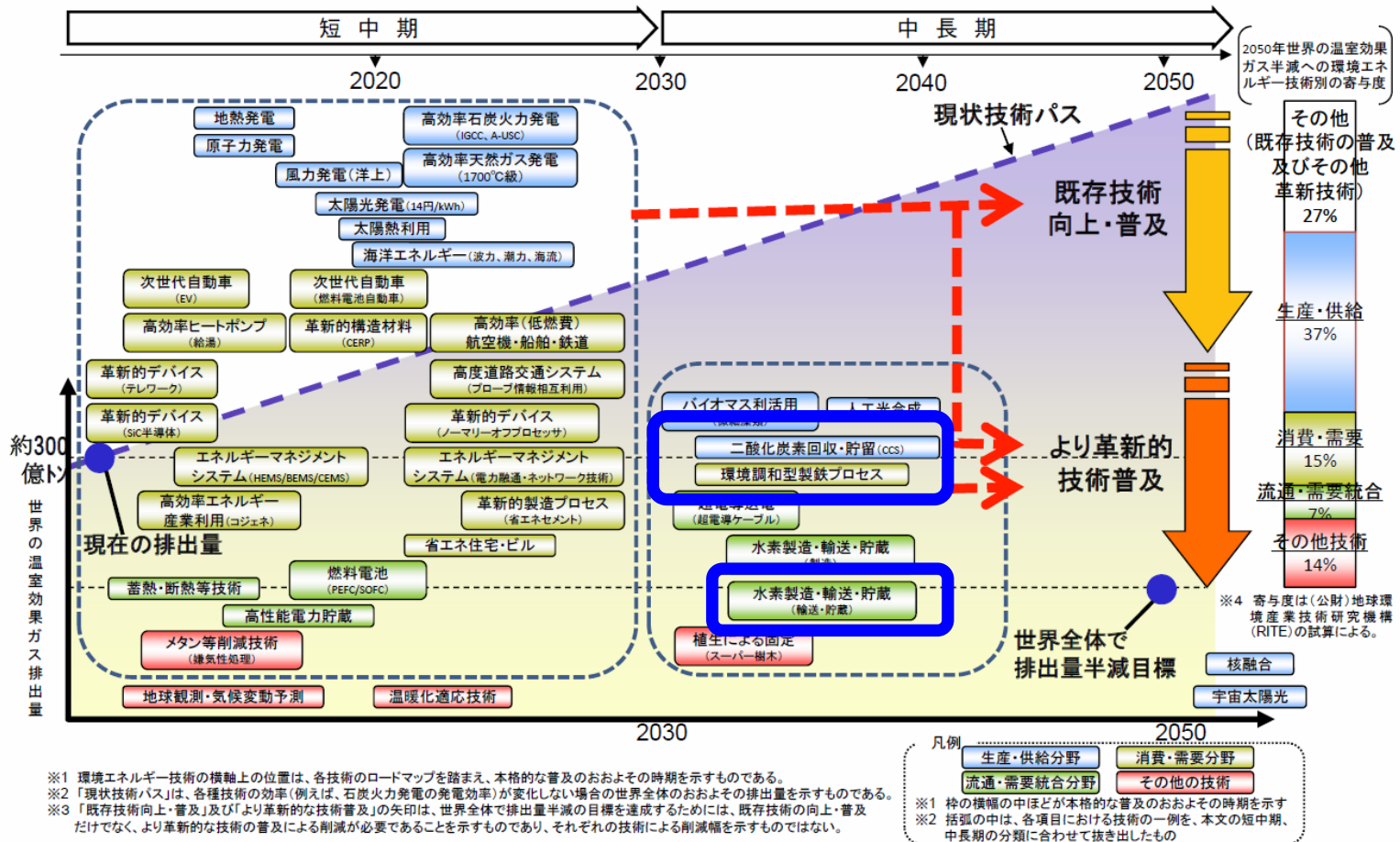
出典: 経済産業省「CCS2020」)

# CCSとCO2分離・回収技術

## 総合科学技術会議(第114回)「環境エネルギー技術革新計画の改訂について」

### 我が国の環境エネルギー技術の世界への貢献

我が国は、優れた環境エネルギー技術を、短中期、中長期と切れ目なく開発を進め、世界に普及することにより、2050年までに世界全体で温室効果ガスを半減する目標達成に貢献する。既存技術の向上・普及だけでは限界があることから、中長期的により革新的な技術開発を推進する必要がある。





# CCSとCO2分離・回収技術

## 環境エネルギー技術革新計画の改訂における技術ロードマップ(CCS)

### 10. 二酸化炭素回収・貯留(CCS)

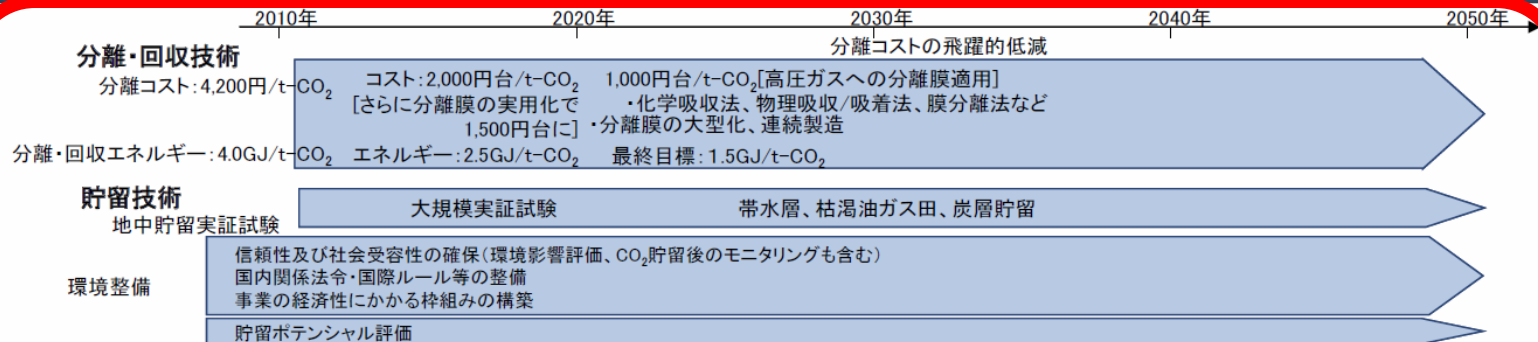
#### 技術の概要

- 二酸化炭素回収・貯留(CCS: Carbon Dioxide Capture and Storage)は、火力発電等の大規模排出源の排ガスからCO<sub>2</sub>を分離・回収し、それを地中または海底下に長期間にわたり貯留または隔離することにより、大気中へのCO<sub>2</sub>放出を抑制し、世界のCO<sub>2</sub>排出大幅削減に貢献する技術。
- CCSは、分離・回収、輸送、圧入及び貯留という4つの機能から構成され、技術開発の中核となるのは、分離・回収技術と貯留技術。
- 分離・回収には、化学吸収法、物理吸収法、膜分離法、物理吸着法及び深冷分離法がある。貯留には地中貯留と海洋隔離があり、地中貯留には、帯水層貯留、石油・ガス増進回収、枯渇油・ガス層貯留及び炭層固定がある。
- IEAのEnergy Technology Perspectives 2012では、CCS技術の開発・普及により、2050年に、世界全体で約71億トンのCO<sub>2</sub>排出削減ポテンシャルを試算。

#### 我が国の技術開発の動向・課題

- 我が国では、化学吸収液をベースにした新規固体吸収材の開発や化学吸収法のプロセスシミュレーション技術の高度化、地質実情に適した安全性評価技術の確立に関する研究開発等を行っている。
- 炭素隔離リーダーシップフォーラム(GSLF)における技術連携や、海外の大型プロジェクトへの参加等、国際連携も推進している。
- CCSの実施に係るコストは、回収、圧縮、輸送、圧入すべてに係るコストを計算すると、二酸化炭素1トンあたり3,000~7,000円。また、分離・回収エネルギーの現状は4.0GJ/t-CO<sub>2</sub>。今後、全コストの約6割を占めるCO<sub>2</sub>分離・回収技術の低コスト化、低エネルギー化が課題。また、火力発電システムとCO<sub>2</sub>分離・回収技術とのインターフェース確保や、高圧下でのCO<sub>2</sub>分離・回収に有利な膜分離材料の開発も重要。
- CCSの実用化にあたっては、貯留地点(候補地点を含む)と貯留可能量の適切な把握・評価方法や、輸送方法・ルートの確立、貯留層へ注入したCO<sub>2</sub>の地中での移動挙動の検討、国際標準化や関連条約への適切な対応等が課題。

#### 技術ロードマップ



(※関連技術ロードマップ: 26. 環境調和型製鉄プロセス)

#### 国際動向

##### 普及の現状

- 米国内では数ヶ所で商業プロジェクトや実証事業が継続中で、向こう数年間で10ヶ所程度の大規模実証、商業化事業が実施される予定となっている。
- 欧州内ではノルウェー、英国、オランダ、スペイン等がCCSIに積極的に取り組んでいるが、発電を対象とした大規模実証プロジェクトは、予想より停滞している。
- カナダや豪州、中国でも計画・実施されており、世界の大規模プロジェクトの開発状況は、計画中のものも含めて計72件となっている。
- 回収されたCO<sub>2</sub>はEORに使用されているものが多い。

##### 技術開発の動向

- 米国エネルギー省の炭素貯留プログラムでは、米国再生・再投資法(ARRA)を用いて過去数年間は平均約1.5億ドルの研究開発資金を拠出している。また、エネルギー先端研究局(ARPA-E)

の公募型研究でも、関連研究分野が数件採択されている。DOEプログラムでは、CO<sub>2</sub>の炭化水素への変換、ケミカル合成等の研究が進められている。民間企業で、大気中CO<sub>2</sub>回収(ジオエンジニアリング)の研究も行われている。

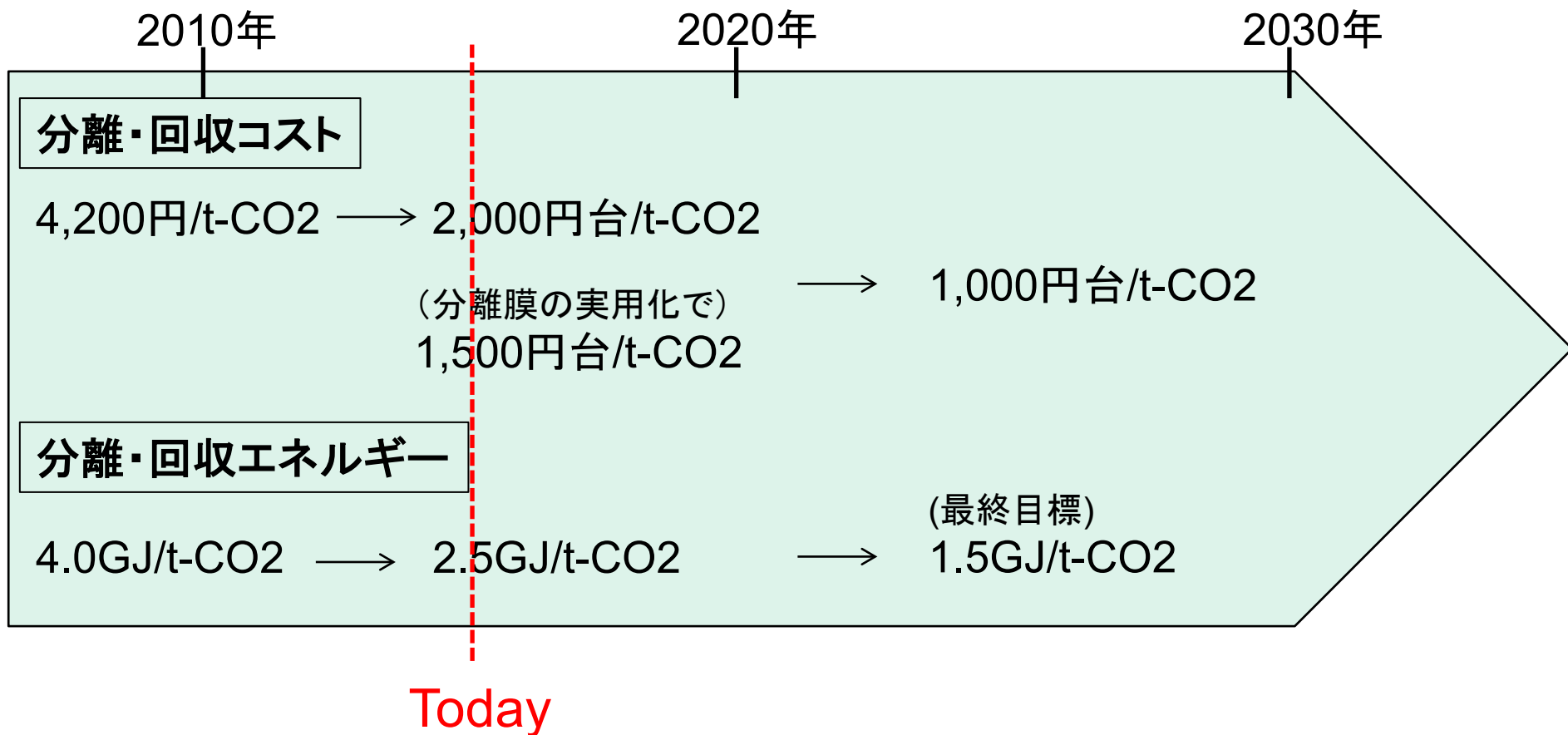
- EUでは、第7次研究枠組計画(FP7)の公募型研究の一環として、地中貯留CO<sub>2</sub>の長期変動の予測及びモニタリング等に対する研究開発補助が実施されている。

##### 我が国の国際競争力

- 我が国ではCCSの中核となる低コスト・低エネルギーのCO<sub>2</sub>回収技術について、エネルギー効率の高い吸収液が開発されるなど、優れた技術を有している。
- 地中貯留に関しては、一般に日本の地層は構造的に複雑であるため、地域特性に合わせた探査技術やノウハウを蓄積している。

# CCSとCO2分離・回収技術

## 技術ロードマップ(分離・回収技術)

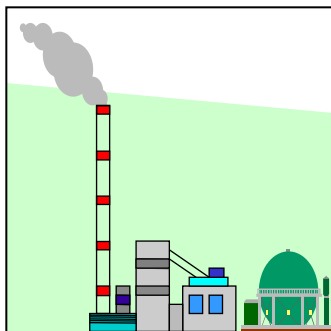


# RITEの取組：発生源に適したCO<sub>2</sub>回収技術

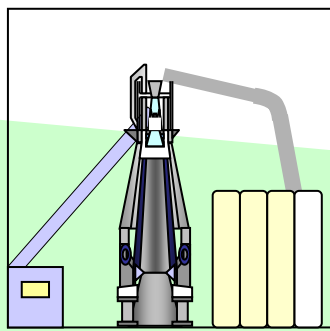
## 発生源の規模・CO<sub>2</sub>ガス圧により最適な回収技術の開発

主なCO<sub>2</sub>排出源

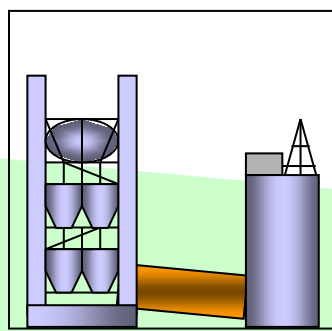
事業用発電



鉄鋼(高炉等)



窯業・土石等



化学



国内CO<sub>2</sub>発生量\*  
(億トン/年)

4.8

1.5

0.7

0.5

CO<sub>2</sub>ガス圧力

低圧～高圧(IGCC)

低圧

低圧

低圧～高圧

\*部門別CO<sub>2</sub>排出量(環境省、2012年)

適用

大規模  
低圧～高圧

小～中規模  
低圧～高圧

小～大規模  
中圧～高圧

方法

化学吸収法

吸着法

膜分離法

## 2. CO<sub>2</sub>分離回収技術の現状

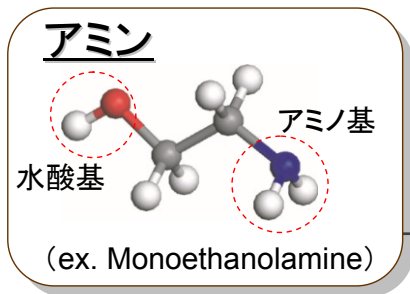
### (1) 高性能化学吸収液の開発

### (2) 高性能吸着剤(固体吸収材)の開発

### (3) 次世代型分離膜モジュールの開発

## 3. まとめ

# (1) 高性能化学吸収液の開発



新日鐵住金  
エンジニアリング



2005

2010

2015

2020

プロジェクト

COCS

CO<sub>2</sub>分離回収エネルギー 半減

対象ガス

高炉ガス  
(20%-CO<sub>2</sub>)

COURSE50 step1

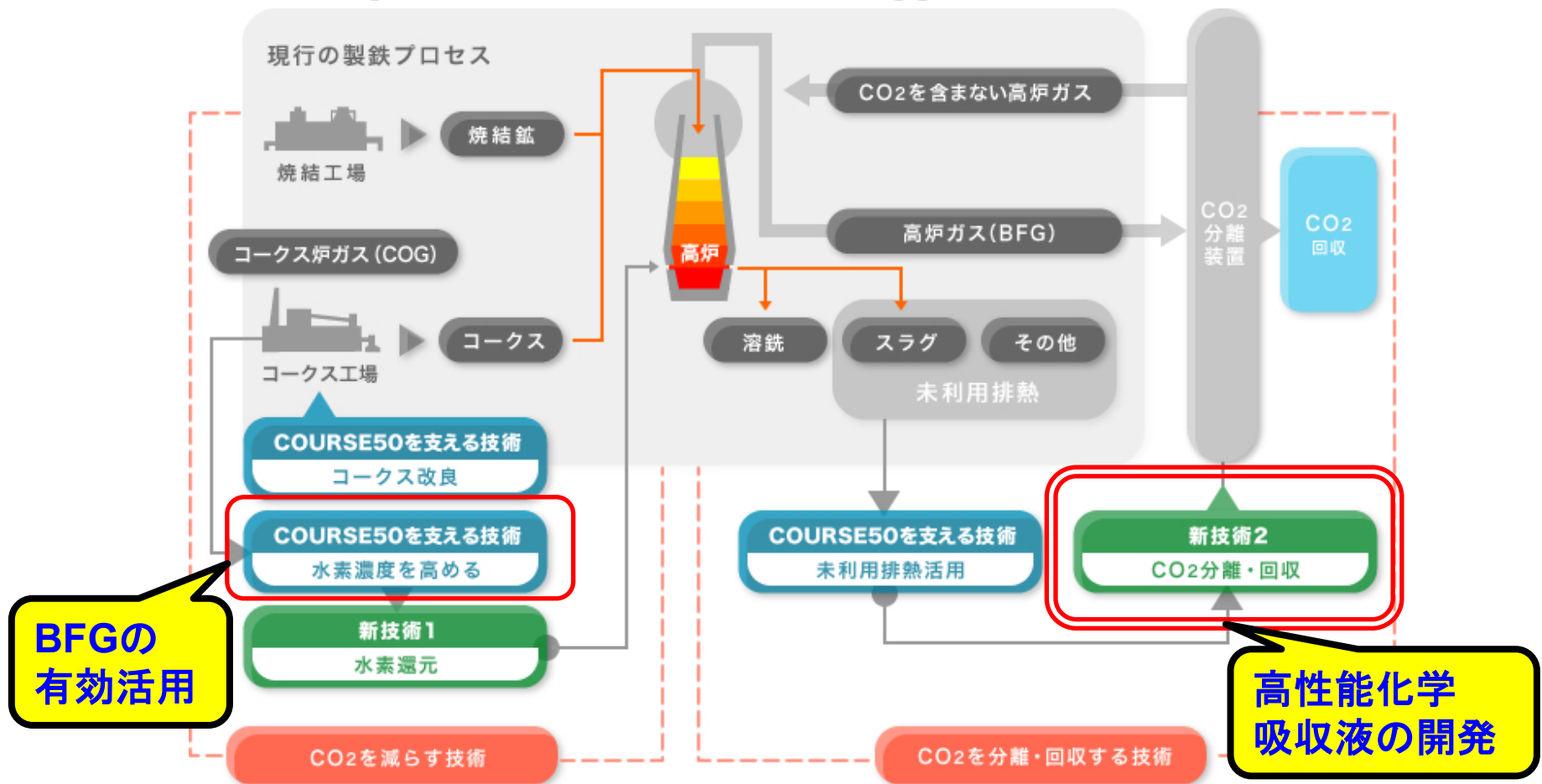
COURSE50 step2

“環境調和型製鉄プロセス”における回収技術



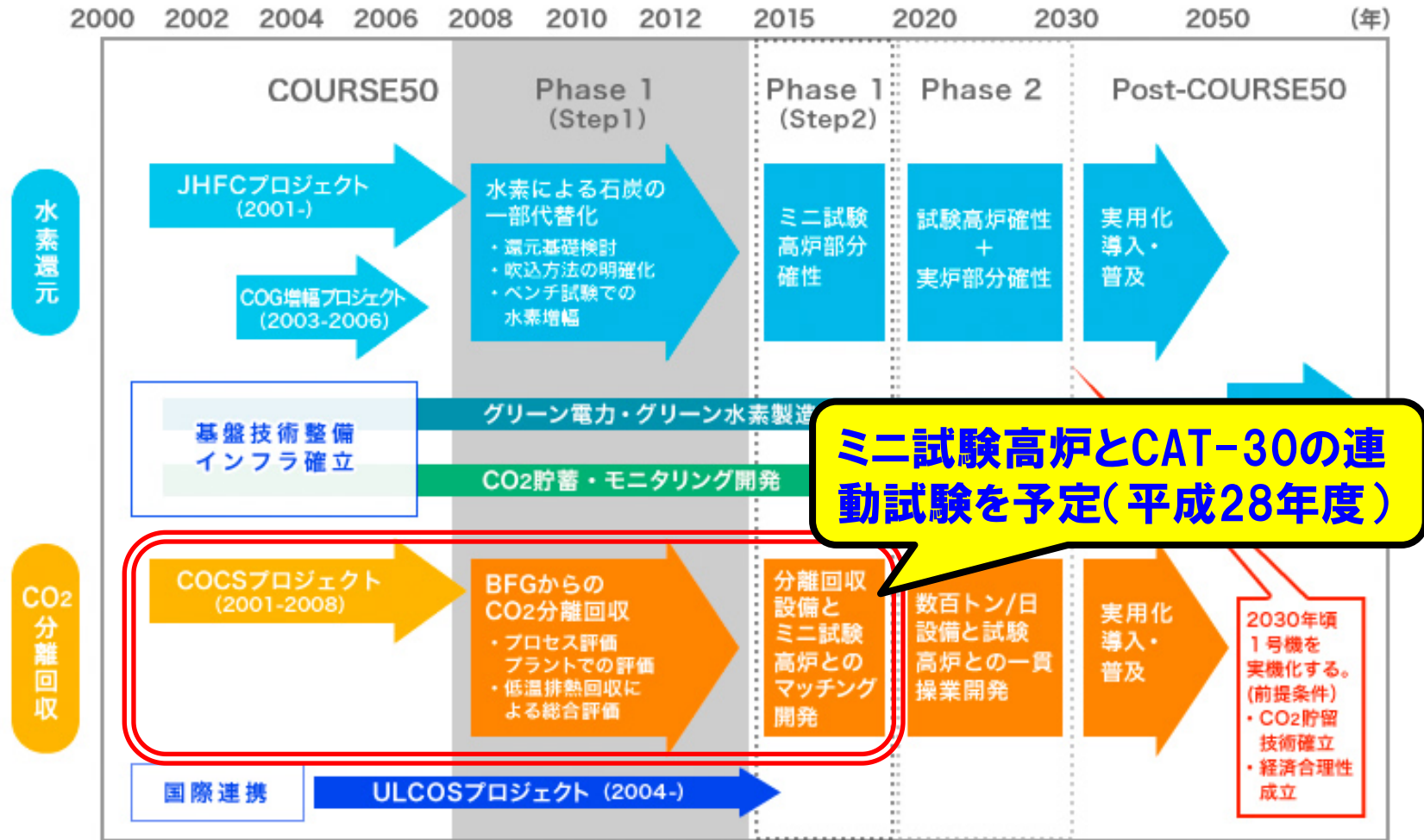
# 環境調和型製鉄プロセス技術開発

## COURSE50 : CO<sub>2</sub> Ultimate Reduction in Steelmaking process by Innovative technology for cool Earth 50

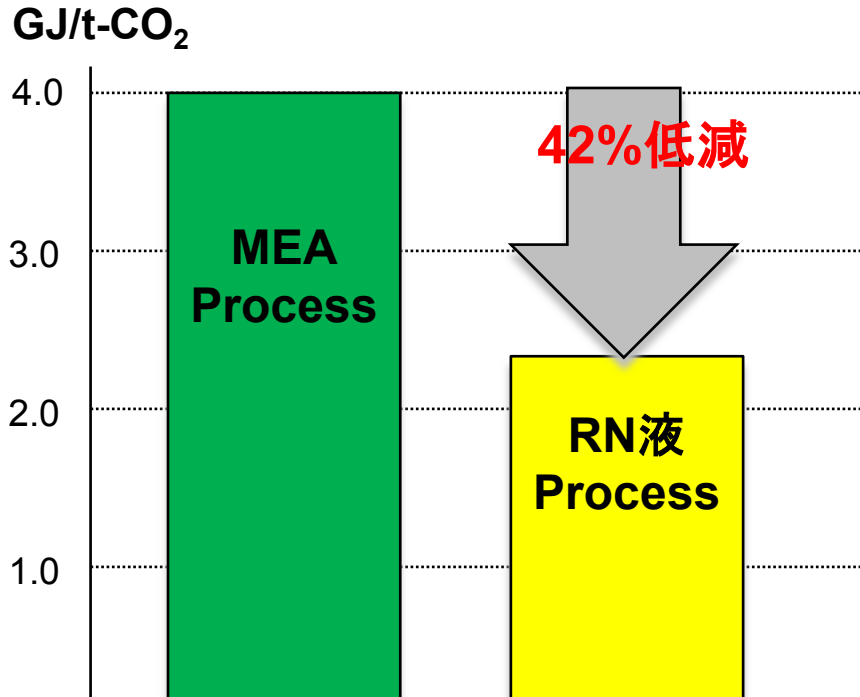


# 環境調和型製鉄プロセス技術開発

## 開発スケジュール



## 1. 分離回収エネルギーの低減



### 設備スケールと分離回収エネルギー

スケール 吸収液	<b>5kg-</b> CO <sub>2</sub> /day (CAT-LAB)	<b>1ton-</b> CO <sub>2</sub> /day (CAT-1)	<b>30ton-</b> CO <sub>2</sub> /day (CAT-30)
<b>RN-3</b> COURSE 50	2.5	2.5	2.3

(GJ/t-CO<sub>2</sub>)

更に高性能化したRN系吸収液での平衡モデル計算により  
**2.0GJ/t-CO<sub>2</sub>**の目標を達成。

## 2. 再生温度の低減

RN液は**95°C**での再生を可能に(低温廃熱の活用)

◎ NEDO委託事業として日本鉄鋼連盟が受託している  
「**環境調和型製鉄プロセス技術開発**」  
**第1段階第2ステップ**(COURSE50 Phase1 Step2)に着手

⇒ Step1に引き続き、新日鐵住金株式会社殿との共同実施  
(平成25年7月～平成29年度)

[目標] **高炉ガスからのCO<sub>2</sub>分離回収コスト 2,000円/t-CO<sub>2</sub>以下**  
を可能とする新規高性能吸収液の開発

[高性能吸収液の開発目標]


- ◎ **分離回収エネルギーの更なる低減**
- ◎ **再生温度の一層の低減**
- ◎ CAT-LABおよびCAT-1による性能評価

# これまでの成果と今後の予定

## 【成果】

- ・世界トップレベルの分離回収エネルギー $2.0\text{GJ/t-CO}_2$ を達成。  
また再生温度の低減( $95^\circ\text{C}$ )も達成。(RN液)
- ・RN液は、新日鉄住金エンジニアリング(株)殿の商用プロセス  
**ESCAP®**の吸収液として採用された。

## 【今後の予定】

- ・これまでの知見を活かし、新しい技術を取り入れ、分離回収コスト  
 $2000\text{円/t-CO}_2$ 以下を実現する高性能化学吸収液を開発する。
-  ◎分離回収エネルギーの更なる低減
- ◎より一層の低温再生化の実現



## CCS(CO<sub>2</sub>回収)実証プロジェクト

Southern Company社 Plant Barry発電所, Alabama(US)

テストサイズ: 15万トンCO<sub>2</sub>/年(発電量25MW相当)

テスト期間: 2011年~2014年(完了)

吸収液: 三菱重工業 KS-1

回収CO<sub>2</sub>: 帯水層貯留



Photo courtesy of Southern Company.

## **CCS商用実証 (Boundary Dam Carbon Capture Project)**

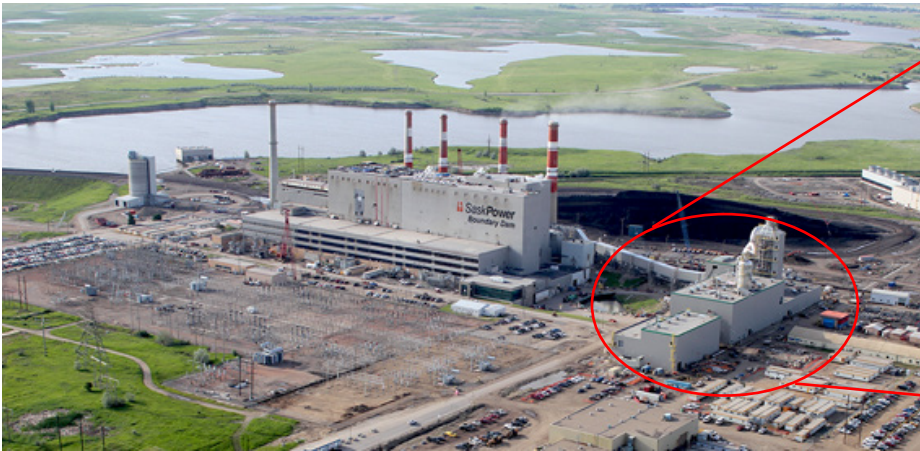
SaskPower社 Boundary Dam発電所 #3, Saskatchewan(Canada)  
(カナダCO2排出規制対応)

サイズ: 100万トンCO2/年(発電量110MW)

運転開始: 2014年10月(竣工)

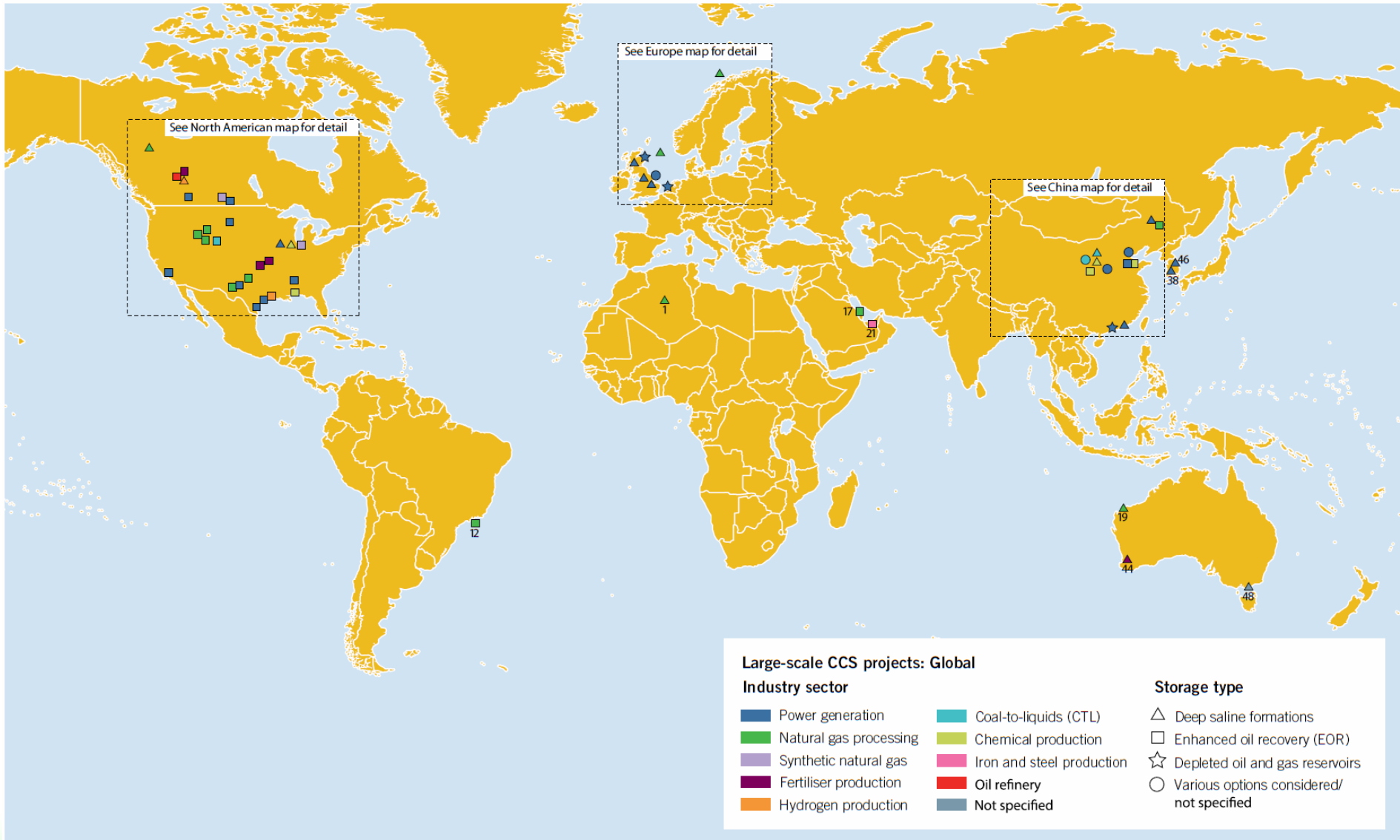
吸収液: Shell Cansolv社 DC103

回収CO2: 1)Aquistore貯留サイト(帯水層貯留実験)  
2)Cenovus社へ販売予定(EOR)



# その他世界の大規模統合プロジェクト(LSIP)

LSIP対象CO2量: 石炭火力発電所: 年間80万トン以上、その他産業: 年間40万トン以上



# 回収技術テスト機関(1)

## **National Carbon Capture Center, Birmingham, USA**

(US DOE, NETL, +資源、電力会社)



設備:

PSTU(Pilot Solvent Test Unit): 10トンCO<sub>2</sub>/日(0.5 MW)  
パイロットスケール設備(2系統): 20トンCO<sub>2</sub>/日(1 MW)  
ベンチスケール設備(現在5系統): <2トンCO<sub>2</sub>/日(<0.1 MW)

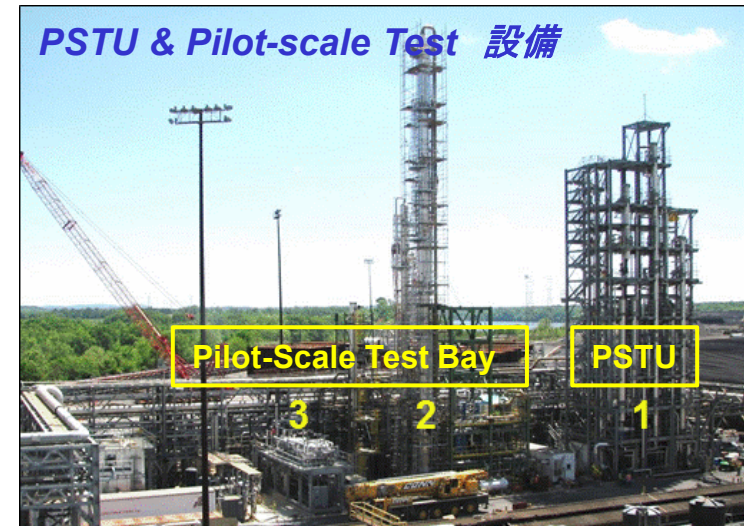
## 実施企業

PSTU: Babcock&Wilcox、日立、Cansolv、  
Clean Carbon Solutionなど

パイロット: Aker, BASF/Linde, MTR

ベンチ: Codexis(酵素モジュール)

MTR、Akermin(酵素+炭酸塩)など





# 回収技術テスト機関(2)

## **Technology Centre Mongstad, Norway**

(Gassnova(ノルウェー政府委託), Statoil, Shell, Sasolが出資)

テストサイズ: 10万トンCO<sub>2</sub>/年 (refinery cracker + power plant)

1号設備: Alstom(エンジニアリング) チルドアンモニア法

2号設備: Aker Clean Carbon(吸収液) アミン吸収法プラント

### 実施・関心企業

- Shell Cansolv(2014.11~)
- Siemens
- 三菱重工業、バブコック日立  
(現、三菱日立パワーシステムズ)





# 回収技術テスト機関(3)

## **Carbon Capture Test Facility (CCTF) at Shand, Canada** (SaskPower社と日立の共同開発、2015年初頭に完成)

設備:

テストサイズ: 最大約4万トンCO<sub>2</sub>/年(120トンCO<sub>2</sub>/日)  
アミン吸収法テストプラント

得られた知見は、  
Boundary Dam発電所  
実証プロジェクトに活用



## 2. CO<sub>2</sub>分離回収技術の現状

(1) 高性能化学吸収液の開発

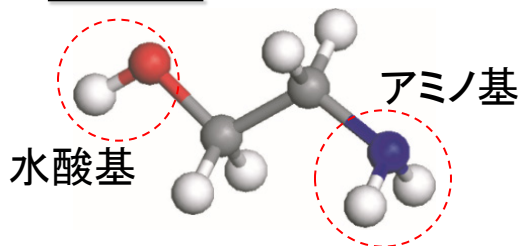
(2) 高性能吸着剤(固体吸収材)の開発

(3) 次世代型分離膜モジュールの開発

## 3. まとめ

# (2) 高性能固体吸収材の開発

## アミン

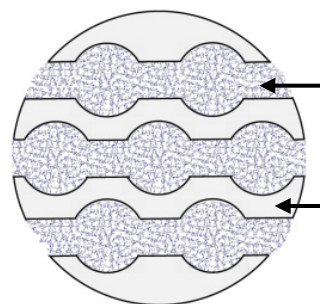


(ex. Monoethanolamine)

## 研究開発

### 新規材料開発

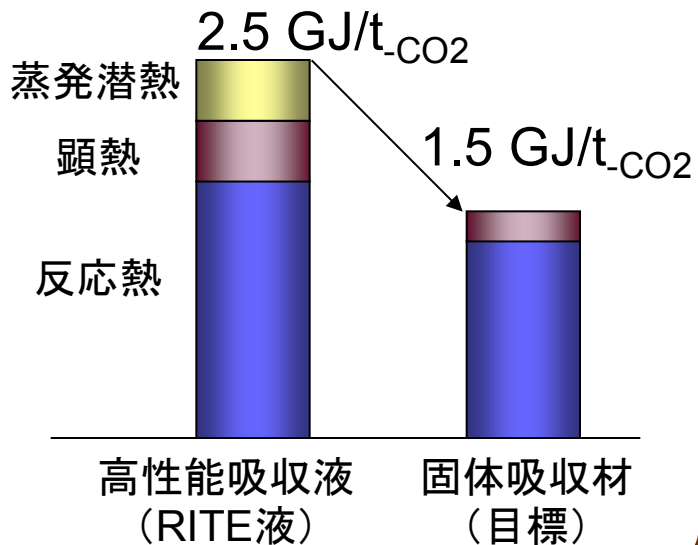
固体吸収材



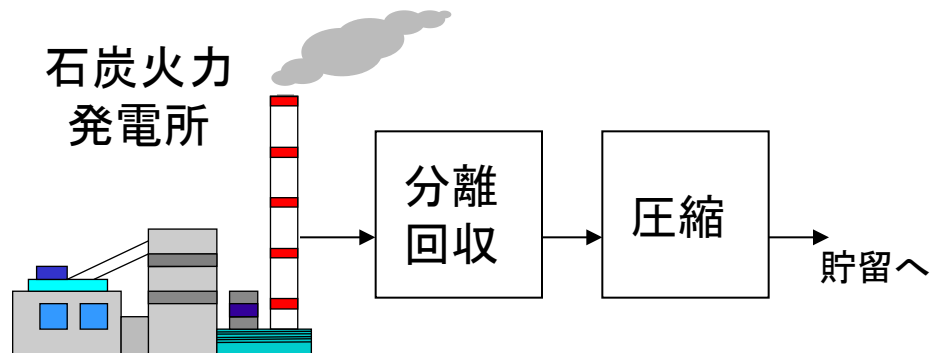
アミン吸収剤

多孔質担体

## 期待効果(目標)



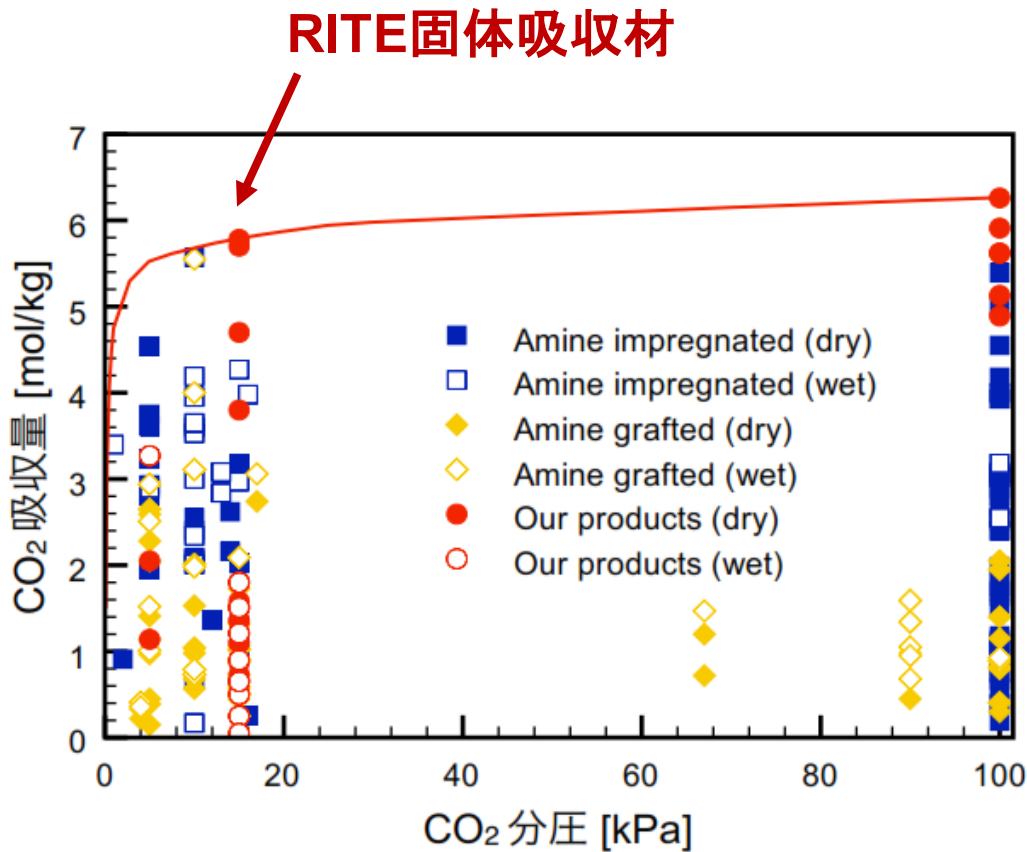
### システムレベルの性能評価手法開発



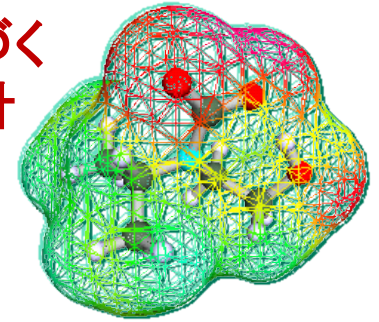
目標: 石炭火力発電所の燃焼排ガスに対して

CO<sub>2</sub>分離回収エネルギー: < 1.5 GJ/t-CO<sub>2</sub>

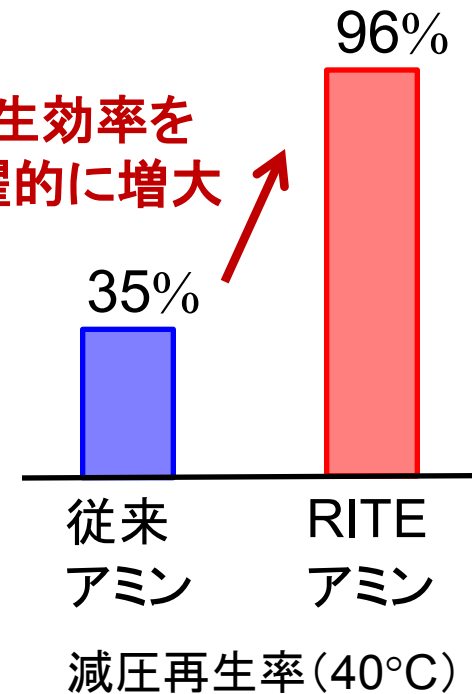
# 新規固体吸収材



計算化学に基づく  
新規アミン設計



再生効率を  
飛躍的に増大

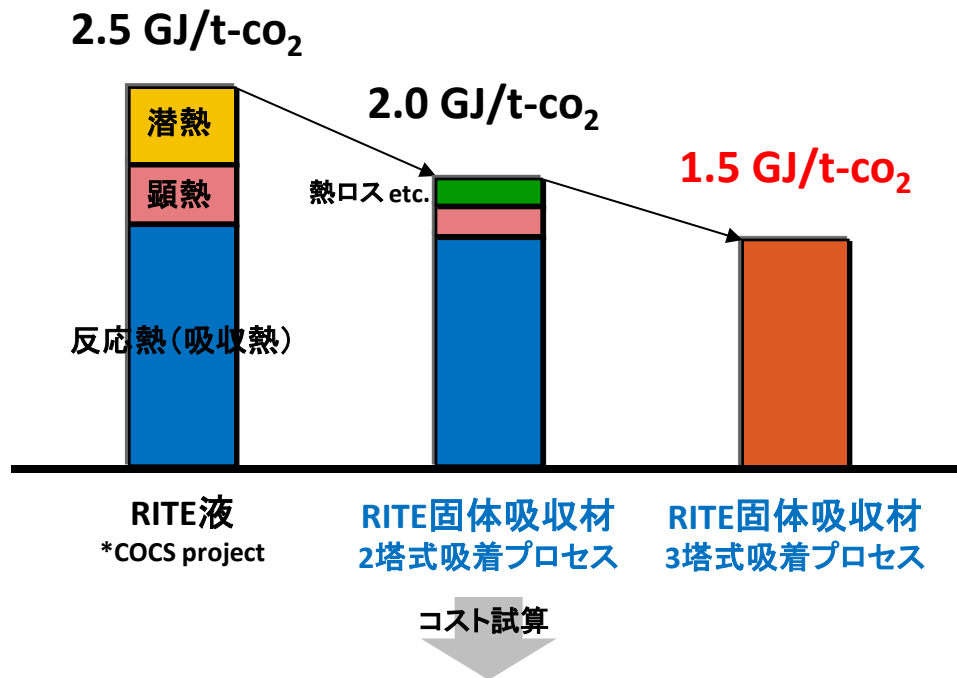


S. Choi, J. H. Dress, C. W. Jones, *ChemSusChem*  
2009, 2, 796-854.をもとに加筆作成

アミン系固体吸収材として**世界トップレベル**の吸収・脱離性能

# 新規固体吸収材の分離回収エネルギー

再生エネルギー (Aspen Adsorptionを用いた試算)



RITE固体吸収材では、  
再生エネルギー2.0 GJ/t-co<sub>2</sub>でも分離回収コスト¥2,000/台達成可能

RITE固体吸収材:分離回収エネルギー1.5 GJ/t-co<sub>2</sub>を達成見込み。  
低温再生が可能であるため、廃熱利用の可能性もある。

小型CO<sub>2</sub>連続回収試験装置

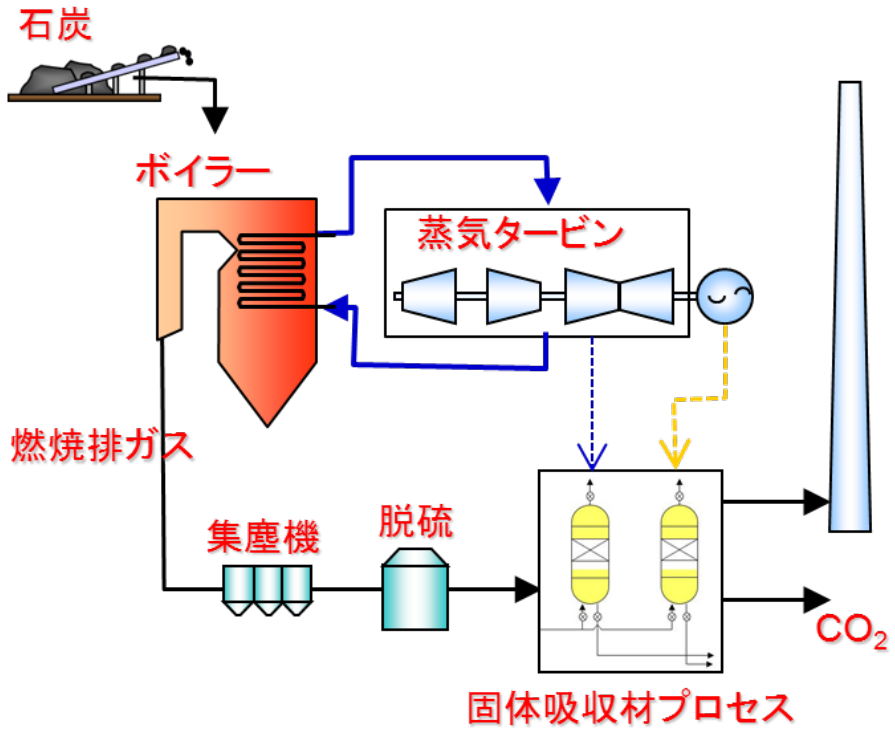


RITE固体吸収材の性能評価を実施中

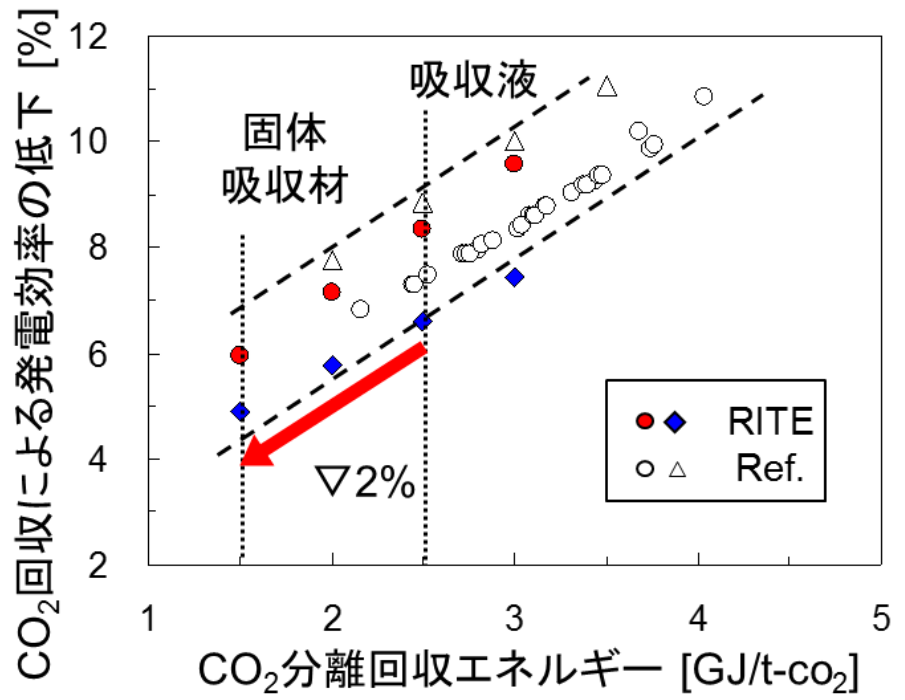


# CO<sub>2</sub>回収型発電システムへの新規固体吸収材適用

## 固体吸収材によるCO<sub>2</sub>分離回収



## 発電効率とCO<sub>2</sub>分離回収エネルギー



固体吸収材は、吸収液と比較して発電効率を**2%向上**させる。

# これまでの成果と今後の予定

## 【成果】

- ・計算化学による性能予測を活用した材料設計で、CO<sub>2</sub>吸収量(6mol/kg)ならびに低温(減圧)脱離性能(> 90%)に優れた世界トップレベルの材料を開発(特許出願)
- ・分離回収エネルギー <2GJ/t-co<sub>2</sub>を達成、 目標(1.5GJ/t )に見通し

## 【今後の予定】

- ・連続回収試験による性能評価
- ・材料改良、システム検討、要素技術完成



実用化検討フェーズへの移行

## 2. CO<sub>2</sub>分離回収技術の現状

(1) 高性能化学吸収液の開発

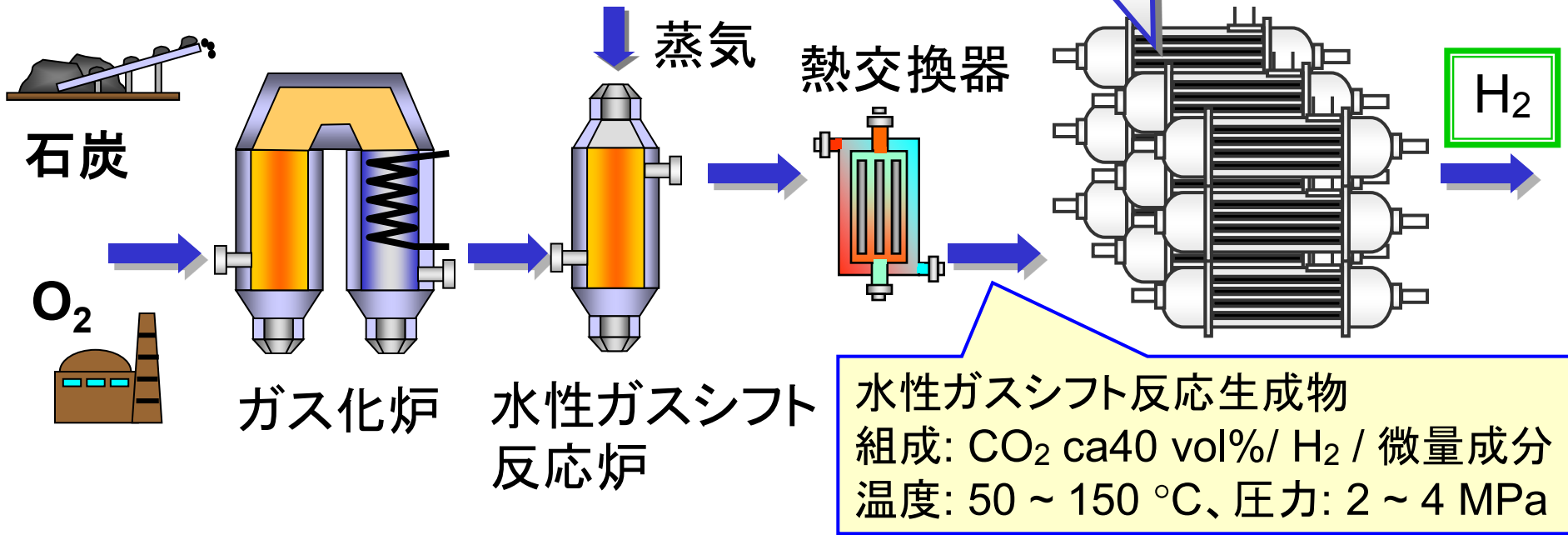
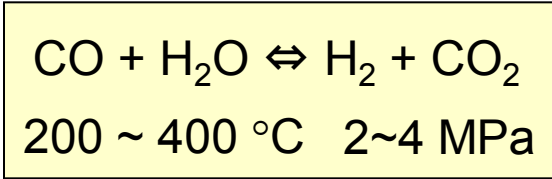
(2) 高性能吸着剤(固体吸収材)の開発

(3) 次世代型分離膜モジュールの開発

## 3. まとめ

# (3) 次世代型分離膜モジュールの開発

## 水性ガスシフト反応



**$\text{CO}_2$ 回収コスト: 1,500円/t- $\text{CO}_2$**

**組合員：** (株)クラレ、  
日東電工(株)、  
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

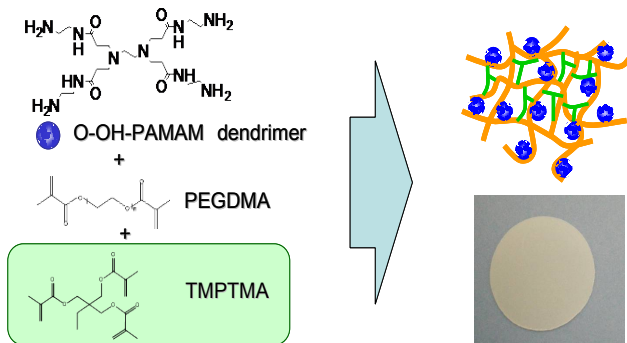
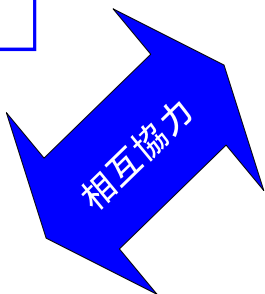
**設立：** 平成23年2月17日

**事業の概要：** 二酸化炭素回収コストが1,500円/t-CO<sub>2</sub>を実現する次世代型分子ゲート機能CO<sub>2</sub>分離膜モジュールに関する基盤・基礎・応用技術開発及びその事業化検討。

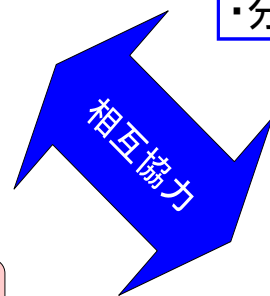


# 開発体制

- ・膜材料
- ・製膜方法
- ・膜構造



- ・プロセス適合性
- ・耐久性
- ・分離メカニズム

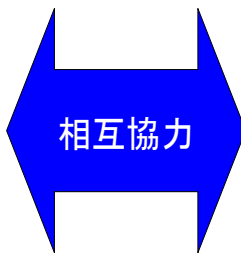
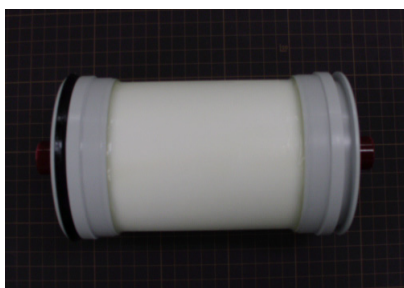
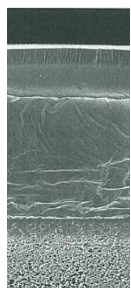


「 dendrimer 膜材料 (アクリレート/PVA) 」  
分離膜の開発: 京都研究室、倉敷研究室

次世代型膜モジュール技術研究組合

相互協力で  
効率的に  
研究開発を推進

分離機能層



「膜断面とプロト型モジュール」

膜モジュールの開発: 茨木研究室

- ・膜モジュール
- ・モジュール構造
- ・耐久性

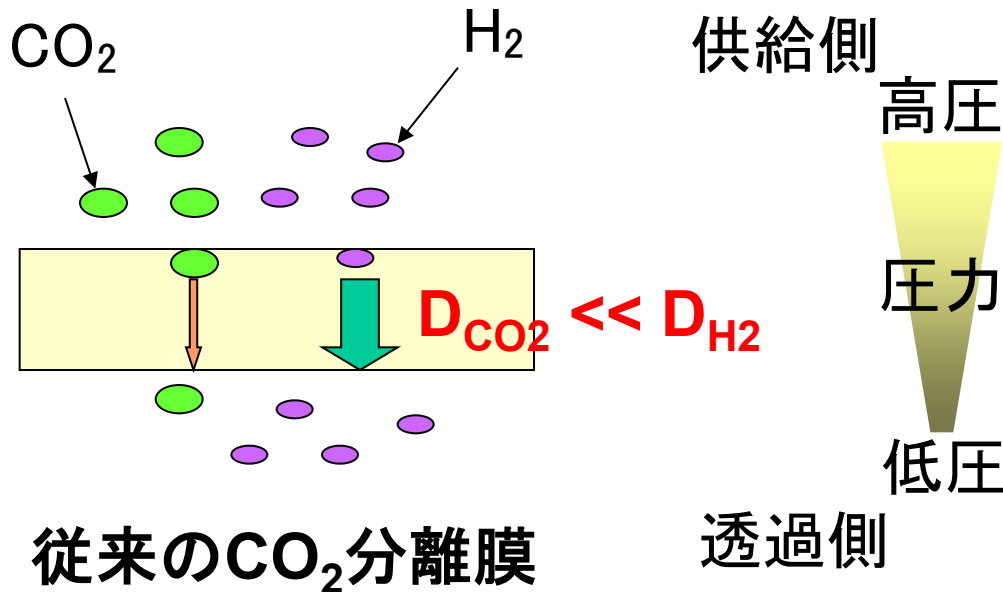


「高精度模擬ガス試験装置」

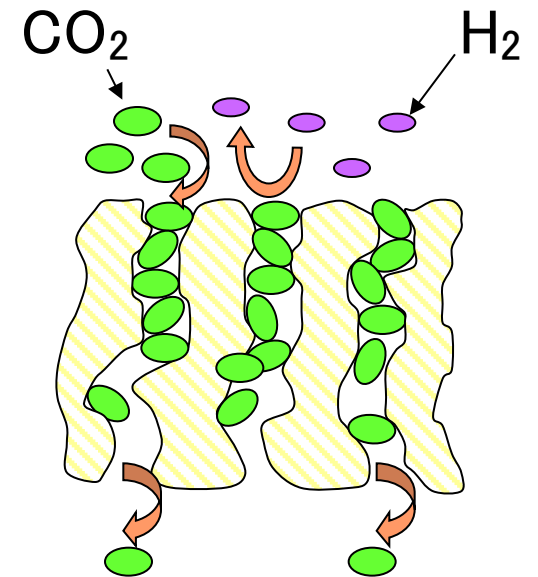
膜分離システムの開発: 富津研究室

# CO<sub>2</sub>分子ゲート膜とは

- 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



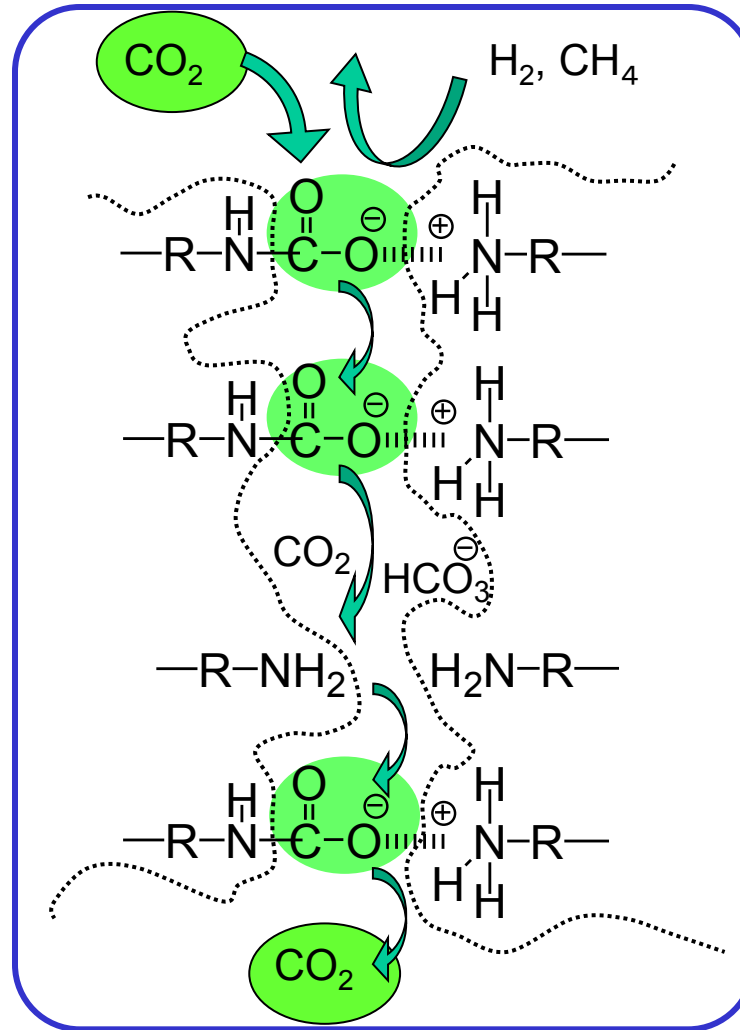
$\alpha_{CO_2/H_2} < 1$  (分子ふるい性膜)  
~10 (溶解選択性膜)



$\alpha_{CO_2/H_2} > 30$

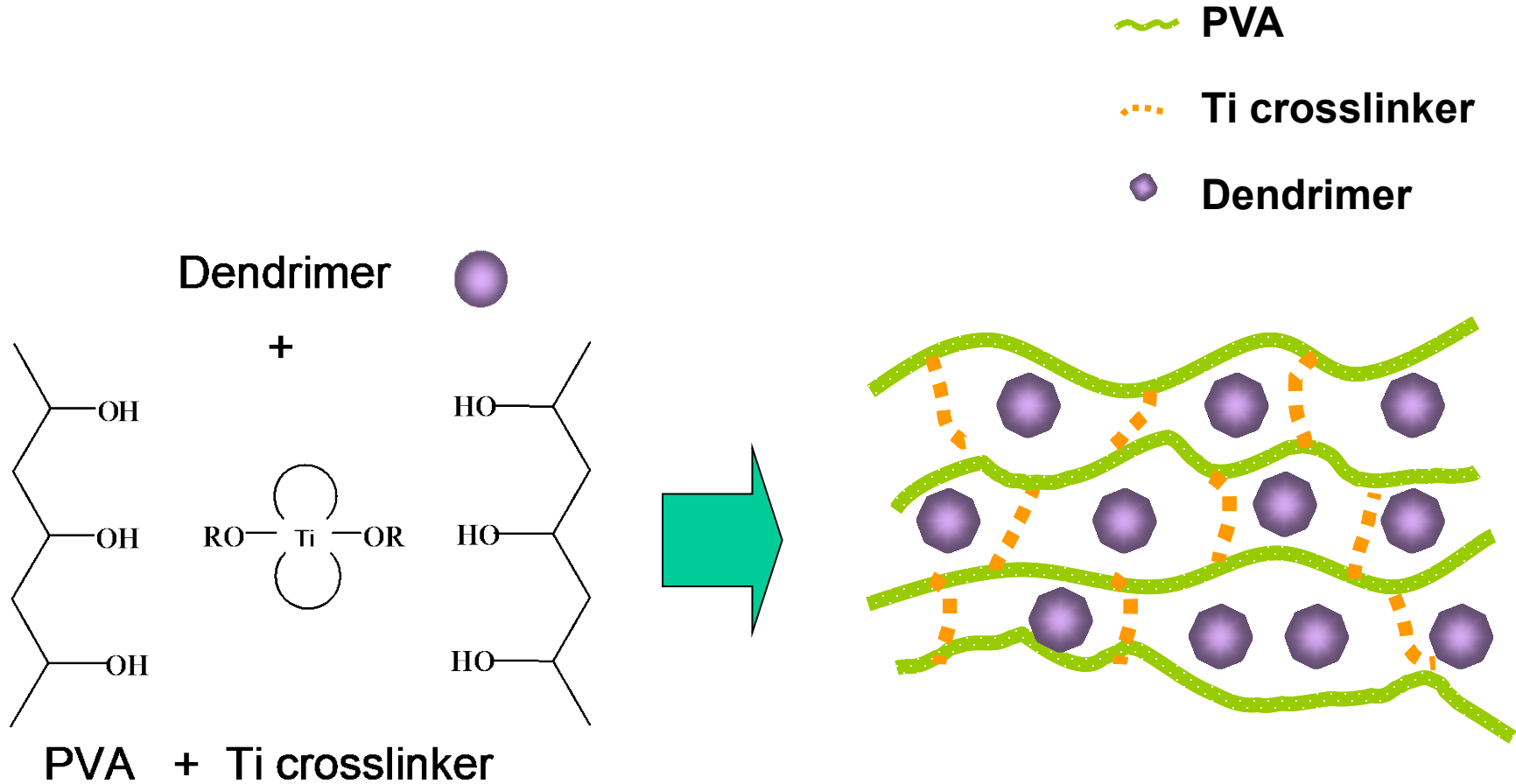
Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF) 認定プロジェクト:  
CO<sub>2</sub> Separation from Pressurized Gas Stream  
Nominators: Japan (lead) and United States

# CO<sub>2</sub>分子ゲート膜の分離機構(推定)

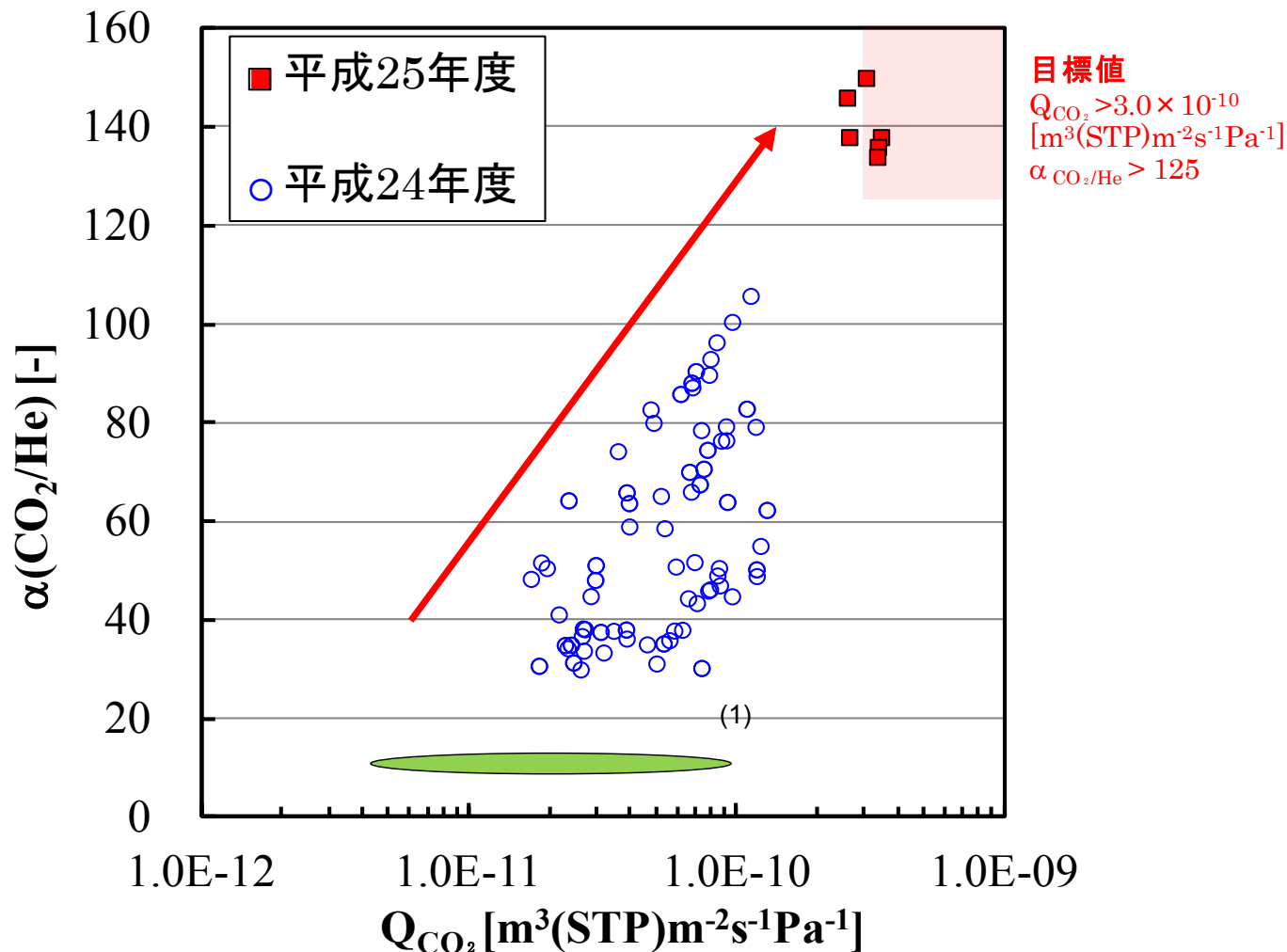


加湿条件下で高い分離性能

# PVA系分子ゲート膜



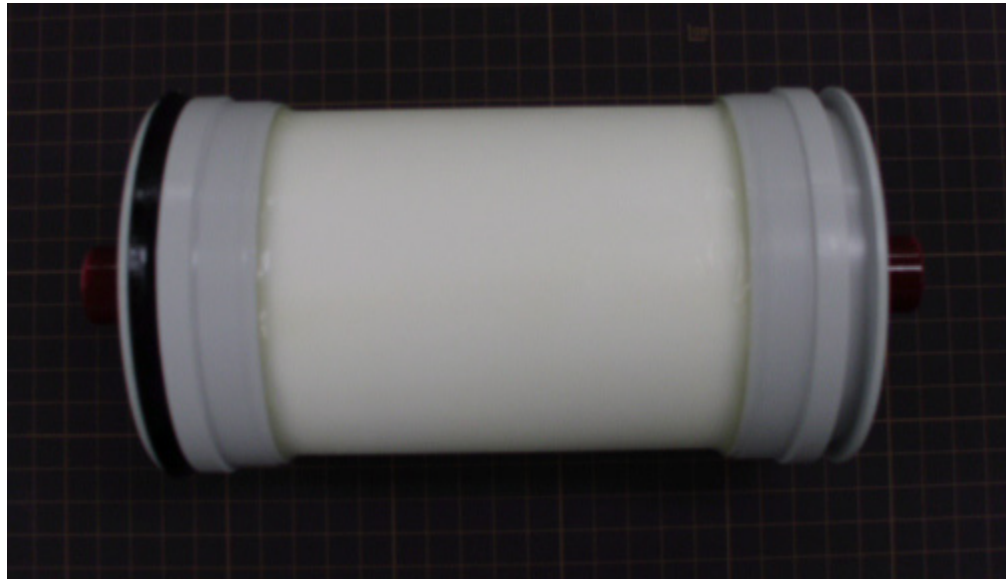
# PVA系複合膜の分離性能



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



# 分離膜モジュールの開発



スパイラル型分離膜モジュール  
(4インチ, 20cm プロトタイプ)

**>3MPaの耐圧性を確認**

# これまでの成果と今後の予定

## 【成果】

- ・分子ゲート機能 dendrimer 膜で世界最高レベル  $\text{CO}_2/\text{H}_2$  選択性を実現し、  
1,500円/t- $\text{CO}_2$  を可能とする分離膜(単膜)の目処を得た。
- ・実機膜モジュールの開発、膜分離システムの検討についても予定通り  
進捗している。

## 【今後の予定】

- ・実ガス試験等に基づき、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。
- ・分離・回収コスト1,500円/t- $\text{CO}_2$  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。

1. はじめに
2. CO<sub>2</sub>分離回収技術の現状
3. まとめ

### 3. まとめ

#### 1. 化学吸収法

- ・目標は、高炉ガスからのCO<sub>2</sub>分離回収コスト  
2,000円/t-CO<sub>2</sub>以下の技術確立
- ・CCS実用技術としてのさらなるブラッシュアップ

#### 2. 吸着法

- ・RITE固体吸収材は、アミン系固体吸収材としてトップレベルの吸収性能
- ・今後は、CO<sub>2</sub>分離回収エネルギー1.5 GJ/t-CO<sub>2</sub>以下を目指す。

## 3. 膜分離法

- 分子ゲート機能分離膜で、分離・回収コスト1,500円/t-CO<sub>2</sub>の目処を得た。
- 実機膜モジュール、膜分離システムも、鋭意、開発・検討中。
- 今後は、実ガス試験等に基づき、分離・回収コスト1,500円/t-CO<sub>2</sub>以下を目指す。

本研究開発は、METI委託事業、並びに  
NEDO委託事業の一環として実施した。



ご清聴ありがとうございました



Research Institute  
of  
Innovative Technology for the Earth