

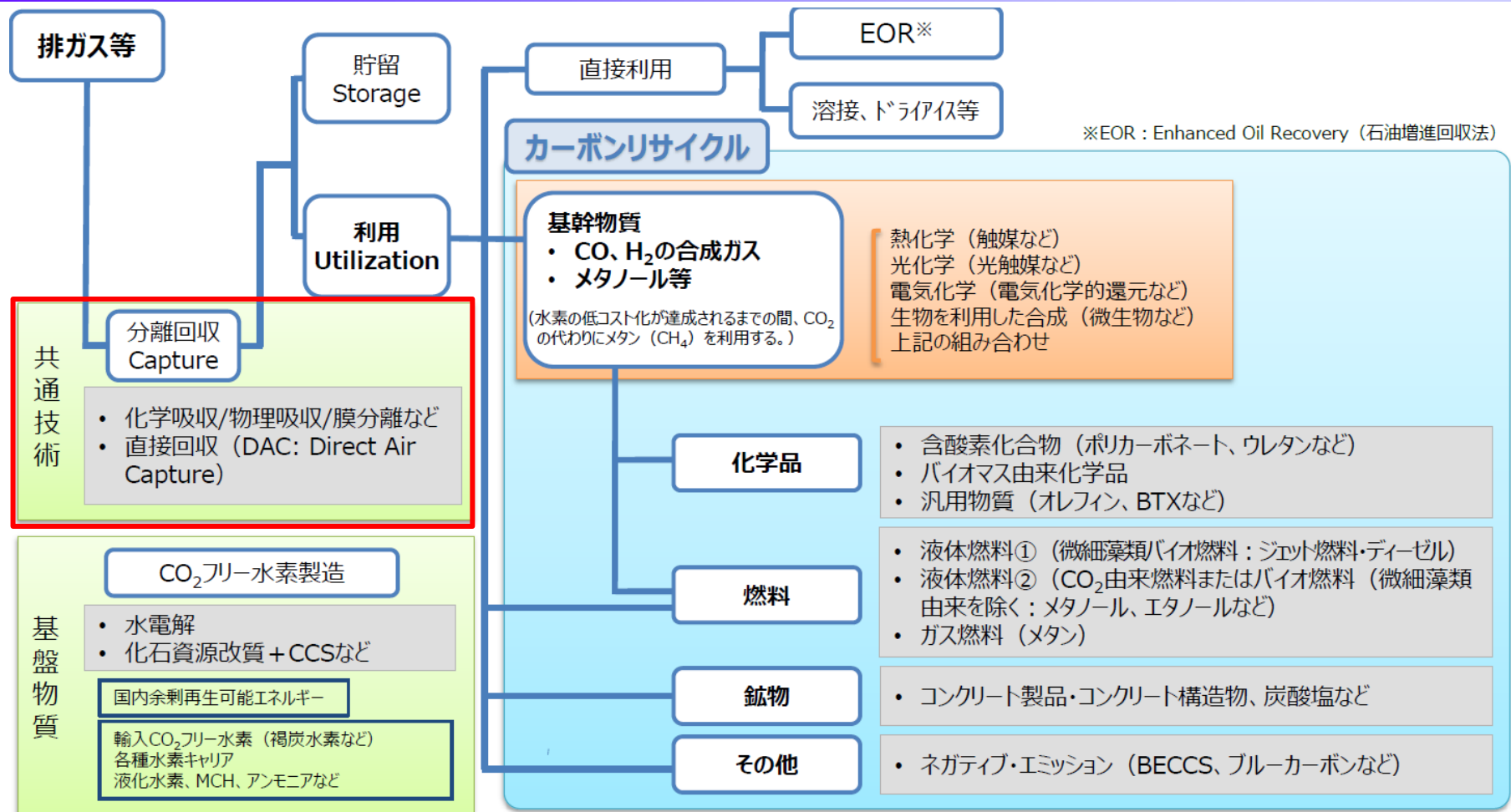
「CCUS/カーボンリサイクル推進に向けたCO₂分離回収技術開発の展開」

2020年9月24日(木) 15:50~16:30

(公財)地球環境産業技術研究機構(RITE)
化学研究グループ
余語 克則



CCUS/カーボンリサイクル



カテゴリー	CO ₂ 変換後の物質	現状 ^{※1}	課題	既存の同等製品の価格 ^{※1}	2030年	2050年以降
共通技術	CO ₂ 分離回収	一部実用化(化学吸収法)、その他手法は研究・実証段階 【価格例】 4000円程度/t-CO ₂ (化学吸収法)	所要エネルギーの削減 など	—	1000~2000円台/t-CO ₂ (化学吸収、固体吸収、物理吸収、膜分離)	1000円以下/t-CO ₂

イノベーション・アクションプラン

－ 革新的技術の2050年までの確立を目指す具体的な行動計画（5分野16課題） －

I. エネルギー転換

- － 再生可能エネルギーを主力電源に
- － デジタル技術を用いた強靱な電力ネットワークの構築
- － 低コストな水素サプライチェーンの構築
- － 革新的原子力技術／核融合の実現
- － CCUS／カーボンリサイクルを見据えた低コストでのCO₂分離回収

II. 運輸

- － 多様なアプローチによるグリーンモビリティの確立

III. 産業

- － 化石資源依存からの脱却（再生可能エネルギー由来の電力や水素の活用）
- － カーボンリサイクル技術によるCO₂の原燃料化など

IV. 業務・家庭・その他・横断領域

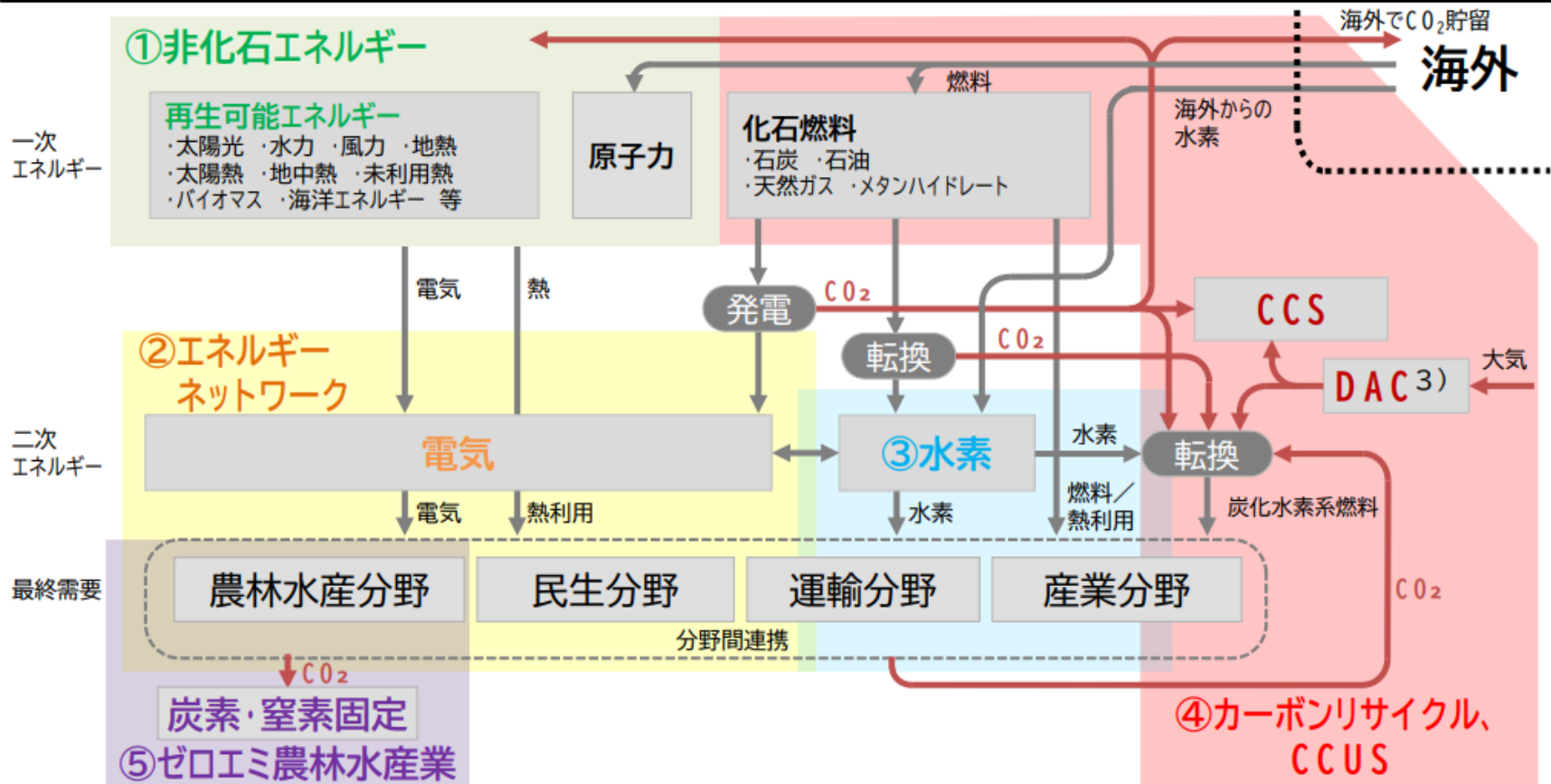
- － 最先端のGHG削減技術の活用
- － ビッグデータ、AI、分散管理技術等を用いた都市マネジメントの変革
- － シェアリングエコノミーによる省エネ／テレワーク、働き方改革、行動変容の促進
- － GHG削減効果の検証に貢献する科学的知見の充実

V. 農林水産業・吸収源

- － 最先端のバイオ技術等を活用した資源利用及び農地・森林・海洋へのCO₂吸収・固定
- － 農畜産業からのメタン・N₂O排出削減
- － 農林水産業における再生可能エネルギーの活用&スマート農林水産業
- － 大気中のCO₂の回収

イノベーション・アクションプランの重点領域

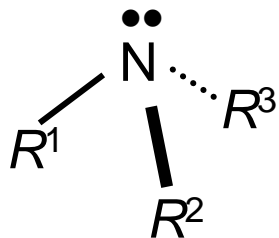
技術領域で整理すると、①電力供給に加え、水素・カーボンリサイクルを通じ全ての分野で貢献する非化石エネルギー、②再生可能エネルギー導入に不可欠な蓄電池を含むエネルギーネットワーク、③運輸、産業、発電など様々な分野で活用可能な水素、④CO₂の大幅削減に不可欠なカーボンリサイクル、CCUS¹⁾、⑤世界GHG排出量の1/4²⁾を占める農林水産分野の5つが重点領域となる。



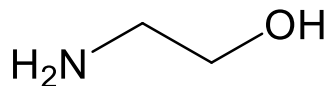
1) CCUS : Carbon Capture, Utilization and Storage (炭素の回収・利用・貯留)

2) 農業・林業・その他土地利用部門からのGHG排出量は世界の排出量の約1/4を占める (出典 : IPCC AR5 第3作業部会報告書)

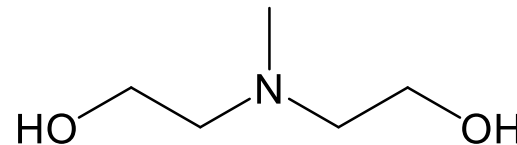
3) DAC : Direct Air Capture (大気からのCO₂分離)



アンモニアの誘導体

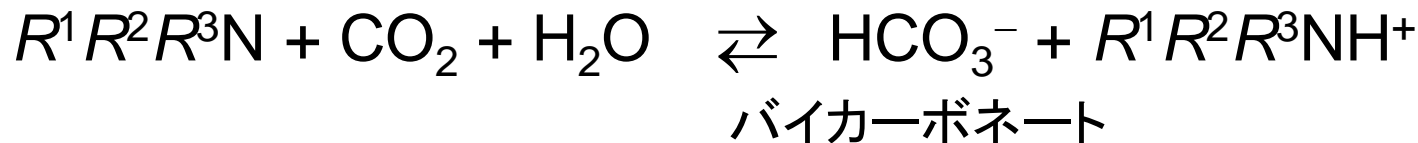


MEA



MDEA

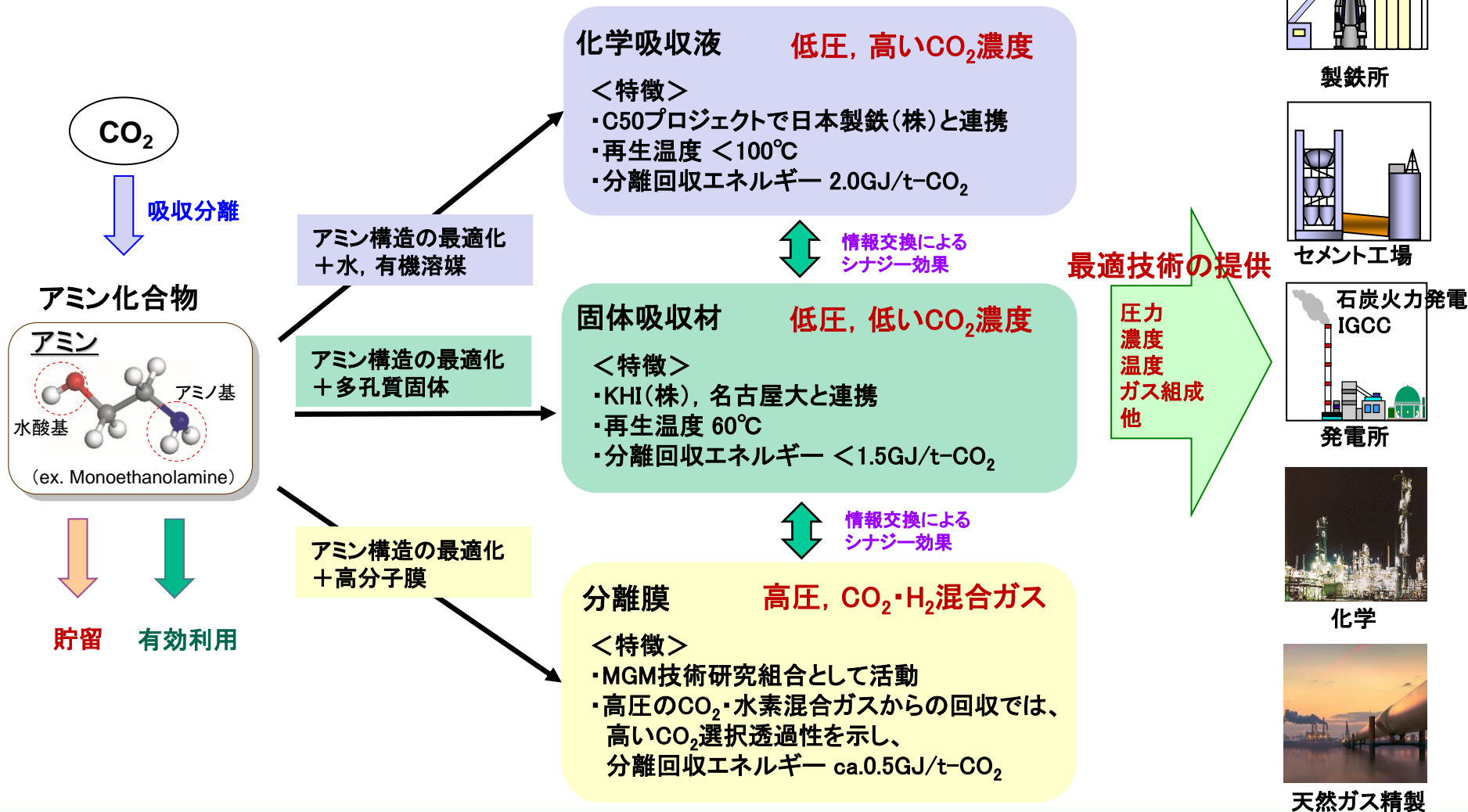
代表的なCO₂回収用アミン(従来)



- ・ アミン種(置換基 R^1 , R^2 , R^3)の違いでCO₂回収性能をチューニング可能
- ・ RITEは新規合成アミンを含め、膨大なアミンのデータを蓄積

アミン化合物を中心とした CO₂分離回収技術の研究開発

地球温暖化防止 → 発生源に適したCO₂分離・回収技術



RITEにおけるCO₂分離・回収技術

【化学吸収法】FY2008～(NEDO委託事業)

環境調和型プロセス技術の開発/水素還元等プロセス技術の開発
(フェーズⅡ-STEP1)/CO₂分離回収技術開発/高性能吸収液の開発
(高炉ガスからのCO₂分離・回収)

体制: 日本製鉄(株) → (共同実施) RITE (吸収液開発)

【固体吸収法】FY2015～2017(METI委託事業)、FY2018～(NEDO委託事業)

CCS研究開発・実証関連事業/CO₂分離回収技術の研究開発
/先進的二酸化炭素固体吸収材実用化研究開発
(石炭火力発電所からのCO₂分離・回収)

体制: RITE → (再委託) 川崎重工業(株) (移動層)、TUAT (シミュレーション)

FY2020～先進的二酸化炭素固体吸収材の石炭燃焼排ガス適用性研究
(石炭火力発電所でのパイロットスケール試験) KHI/RITE → 名古屋大学

【膜分離法】FY2015～2018(METI委託事業)、FY2018～(NEDO委託事業)

CCS研究開発・実証関連事業/CO₂分離回収技術の研究開発
/二酸化炭素分離膜モジュール実用化研究開発
(IGCCガスからのCO₂分離・回収)

体制: MGM技術研究組合

大規模CCSプロジェクトとCO₂分離回収技術*

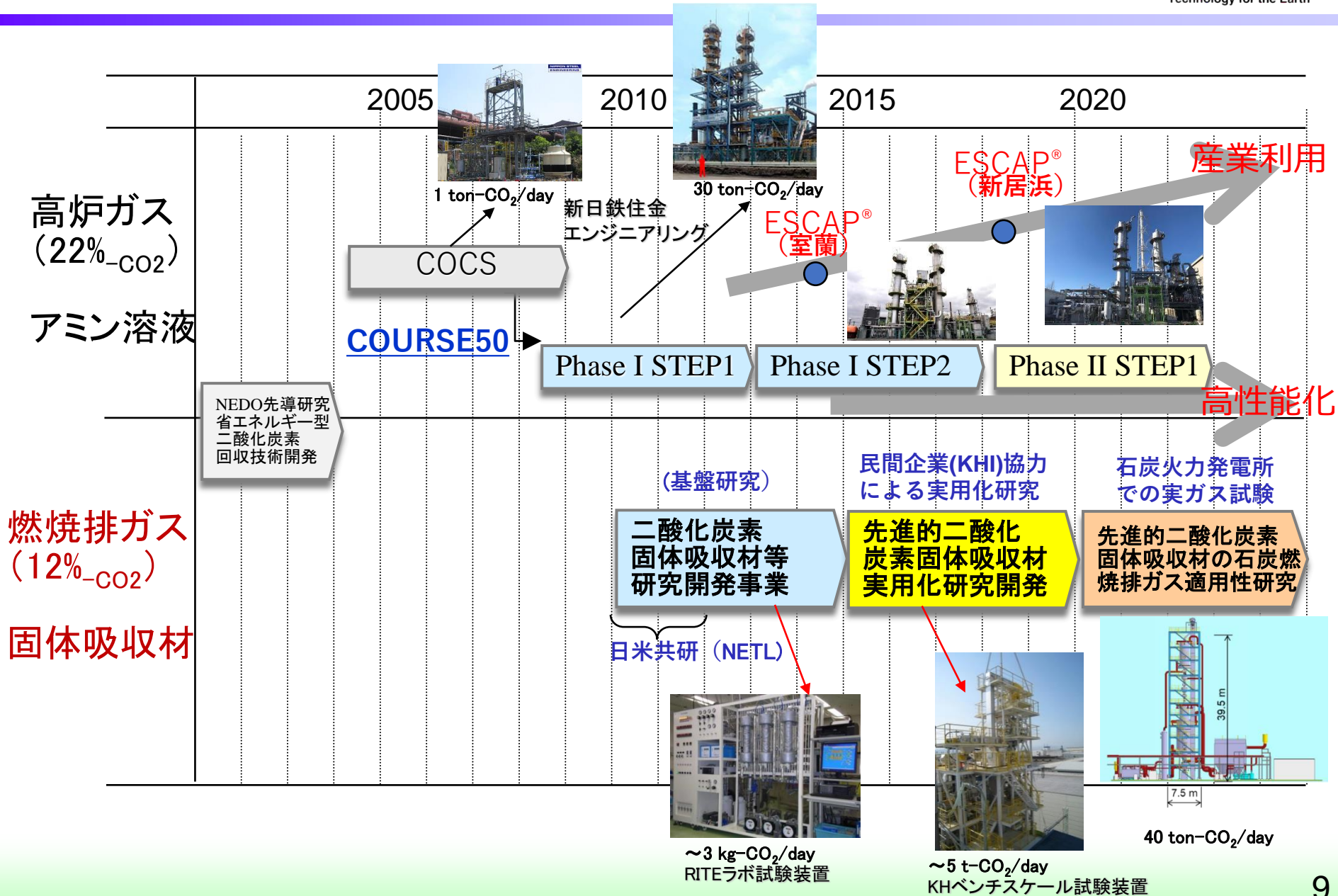
*GCCSI-DataBaseと佐々木 孝(化学工学) 79(2015)826をもとにRITE追記・作成

	プロジェクト名	国	操業開始年	Facility Industry	CO2回収量 (Mtpa)	貯留タイプ	CO2分圧	ガス性状	ガス中硫黄分	分離方法	分離素材	分離回収プロセス
1	Terrell Natural Gas Processing Plant (formerly Val Verde Natural Gas Plants)	米国	1972	天然ガス精製	0.4 - 0.5	EOR	高い (≧0.1MPa)	中性	H2S	物理吸収	DEPG	Selexol
2	Enid Fertilizer	米国	1982	肥料製造	0.7	EOR	高い (≧0.1MPa)	還元性	微量	化学吸収	炭酸カリウム	Benfield
3	Shute Creek Gas Processing Plant	米国	1986	天然ガス精製	7	EOR	高い (≧0.1MPa)	中性	H2S	物理吸収	DEPG	Selexol
4	Sleipner CO2 Storage	Norway	1996	天然ガス精製	1	帯水層(海域)	高い (≧0.1MPa)	中性	微量	化学吸収	アミン	MDEA
5	Great Plains Synfuels Plant and Weyburn-Midale	カナダ	2000	合成天然ガス	3	EOR	高い (≧0.1MPa)	還元性	H2S	物理吸収	メタノール	Rectisol
6	Snøhvit CO2 Storage	Norway	2008	天然ガス精製	0.7	帯水層(海域)	高い (≧0.1MPa)	中性	微量	化学吸収	アミン	aMDEA
7	Century Plant	米国	2010	天然ガス精製	8.4	EOR	高い (≧0.1MPa)	中性	H2S	物理吸収	DEPG	Selexol
8	Air Products Steam Methane Reformer	米国	2013	水素製造	1	EOR	高い (≧0.1MPa)	還元性	微量	吸着	吸着剤	Vaccum Sing Ads.
9	Coffeyville Gasification Plant	米国	2013	肥料製造	1	EOR	高い (≧0.1MPa)	還元性	H2S	物理吸収	DEPG	Selexol
10	Lost Cabin Gas Plant	米国	2013	天然ガス精製	0.9	EOR	高い (≧0.1MPa)	中性	H2S	物理吸収	DEPG	Selexol
11	Petrobras Santos Basin Pre-Salt Oil Field CCS	ブラジル	2013	天然ガス精製	3	EOR	高い (≧0.1MPa)	中性	微量	膜分離	高分子膜	Separex
12	Boundary Dam Carbon Capture and Storage	カナダ	2014	石炭火力発電(既設)	1	EOR	低い	酸化性	SO2	化学吸収	アミン	Cansolv
13	Quest	カナダ	2015	水素製造	1	帯水層(陸域)	高い (≧0.1MPa)	還元性	微量	化学吸収	アミン	Adip-X
14	Uthmaniyah CO2-EOR Demonstration	サウジアラビア	2015	天然ガス精製	0.8	EOR	高い (≧0.1MPa)	中性	微量	化学吸収	アミン	Amine
15	Abu Dhabi CCS (Phase 1 being Emirates Steel Industries)	UAE	2016	鉄鋼生産(水素還元)	0.8	EOR	高い (≧0.1MPa)	還元性	微量	化学吸収	アミン	Amine
16	Illinois Industrial Carbon Capture and Storage	米国	2017	エタノール合成	1	帯水層(陸域)	不明	不明	微量	その他	不明	Corn Fermentation
17	Petra Nova Carbon Capture	米国	2017	石炭火力発電(既設)	1.4	EOR	低い	酸化性	SO2	化学吸収	アミン	KM-CDR
18	CNPC Jilin Oil Field CO2 EOR	中国	2018	天然ガス精製	0.6	EOR	高い (≧0.1MPa)	不明	不明	化学吸収	アミン	MEA
19	Gorgon CO2 Injection Project	Norway	2019	天然ガス精製	4	帯水層(陸域)	高い (≧0.1MPa)	中性	微量	化学吸収	アミン	aMDEA

上記に加え、カナダのAlberta Carbon Trunk Line (ACTL) が2020に2件(肥料製造と石油精製)、稼働開始

大規模回収プロジェクトは吸収液が中心

RITEにおける化学吸収法の研究開発



海外動向：NCCCにおけるCO₂分離回収技術の実ガス試験

Future Developers at the NCCC

Developer	Technology Description		Technology	Scale
Huaneng CERI	Blended amine solvent (HNC series)	吸収液	Solvent	Pilot-PSTU
ION Engineering	Validation of Transformational CO ₂ Capture Solvent Technology		Solvent	Pilot-PSTU
GTI	Rotating Packed Bed Solvent (ROTA-CAP)		Solvent	Bench
GTI	Graphene Oxide (GO) Membrane	分離膜	Membrane	Bench
MTR	Self-assembly Isoporous Supports Polymeric Membrane		Membrane	Bench
OSU	Novel Transformational Membranes and Process		Membrane	Bench
SUNY Buffalo	Rational Development of Novel Metal-Organic Polyhedra-Based Membranes for CO ₂ Capture		Membrane	Bench
PCI	High Capacity MOF Nanosorbents	固体吸収材	Sorbent	Bench
LBNL/Inventys	Inventys Sorbents and LBNL amine-appended MOFs Sorbents		Sorbent	Bench
Rensselaer	Transformational Molecular Layer Deposition Tailor-Made		Sorbent	Bench
Polytechnic Institute	Size-Sieving Sorbents			
CO ₂ Utilization Developer	Technology Description		Product	Scale
Southern Research	Thermocatalytic Ethylene Production Process Using Ethane and Coal-Fired Flue Gas CO ₂		Ethylene	Bench
UCLA	Upcycled CO ₂ -Negative Concrete		Concrete	Bench
Helios-NRG	Novel Algae Technology to Utilize CO ₂ for Value-Added Products		Algae	Bench

吸収液、固体吸収材、分離膜について併行して実ガス試験を実施中

RITEにおけるCO₂分離・回収技術

【化学吸収法】FY2008～(NEDO委託事業)

環境調和型プロセス技術の開発/水素還元等プロセス技術の開発
(フェーズⅡ-STEP1)/CO₂分離回収技術開発/高性能吸収液の開発
(高炉ガスからのCO₂分離・回収)

体制: 日本製鉄(株) → (共同実施) RITE (吸収液開発)

【固体吸収法】FY2015～2017(METI委託事業)、FY2018～(NEDO委託事業)

CCS研究開発・実証関連事業/CO₂分離回収技術の研究開発
/先進的二酸化炭素固体吸収材実用化研究開発

(石炭火力発電所からのCO₂分離・回収)

体制: RITE → (再委託) 川崎重工業(株) (移動層)、TUAT (シミュレーション)

FY2020～先進的二酸化炭素固体吸収材の石炭燃焼排ガス適用性研究

(石炭火力発電所でのパイロットスケール試験) KHI/RITE → 名古屋大学

【膜分離法】FY2015～2018(METI委託事業)、FY2018～(NEDO委託事業)

CCS研究開発・実証関連事業/CO₂分離回収技術の研究開発
/二酸化炭素分離膜モジュール実用化研究開発

(IGCCガスからのCO₂分離・回収)

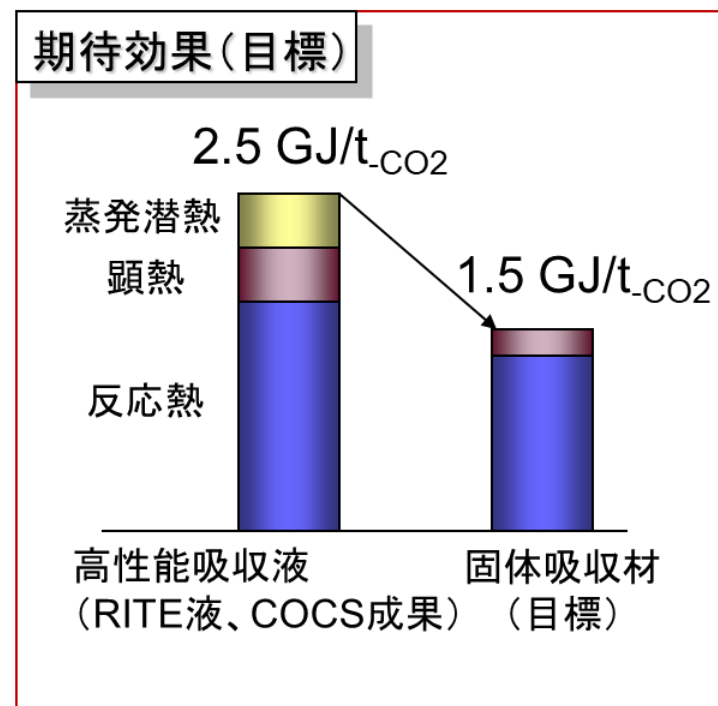
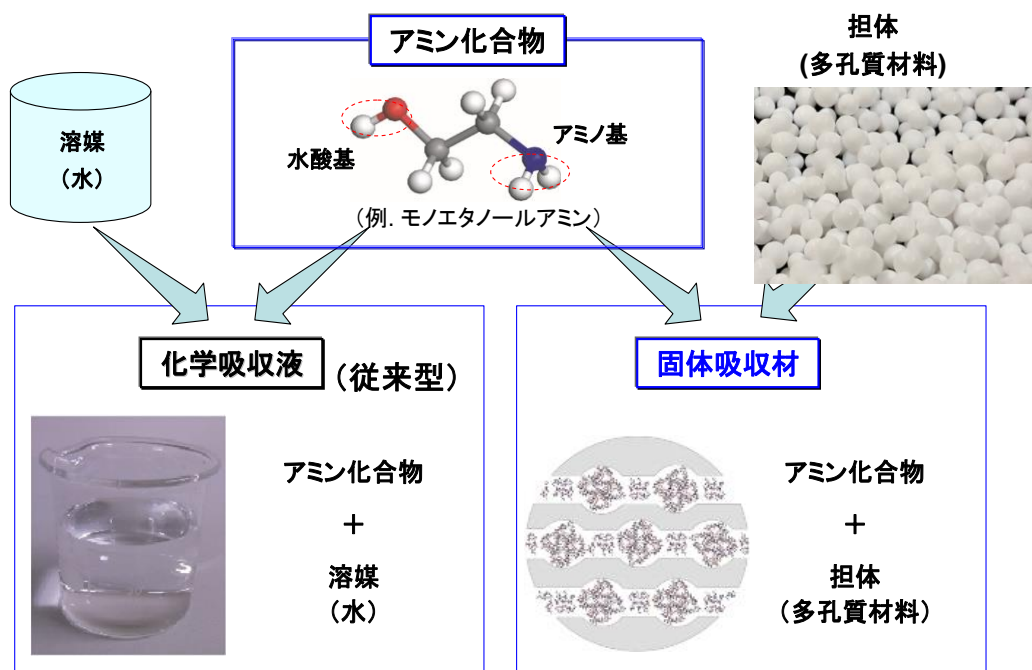
体制: MGM技術研究組合

先進的二酸化炭素固体吸収材実用化研究開発

<対象> 石炭火力発電所 (燃焼後回収)

<目標> 分離回収コスト2,000円台/t-CO₂、エネルギー < 1.5 GJ/t-CO₂

○固体吸収材とは



CO₂再生時に比熱の大きい水を加熱する必要が無いため、CO₂分離回収エネルギーの低減が可能

固体吸収材によるCO₂回収技術の開発動向

国	機関	方式	実績 (t/d)	特徴等	主適用先
韓国	KEPCO/ KIER	流動層(二塔) 140-200°C再生	< 200	炭酸カリウム担持吸収材 5 GJ/t 200 t/d装置完成(2013)	燃焼後 石炭
米国	RTI/ NETL	流動層(多段二塔) >110°C再生	< 0.15	市販アミン(PEI)担持シリカ 2.5 GJ/t ベンチ試験(~2015)	燃焼後 石炭
		TDA/ NETL	擬似移動層 (マルチ固定層) 140-150°C	< 10	アルカリ化アルミナ 低吸着熱(13-43 kJ/mol)
		圧カスイング	1.6	表面修飾メソポーラスカーボン 低吸着熱(20 kJ/mol)	燃焼前 IGCC
カナダ	Svante	高速回転ナノフィルタ (1 rpm) 温度スイング	< 0.5	4 GJ/t 30 t/d装置完成(2019)	燃焼後 石炭
欧州	Shell/ TU Wien	流動層(多段二塔) 100-120°C再生	0.7	アミン系吸収材 3.5 GJ/t 100 t/d装置建設計画中	燃焼後 バイオマス
日本	KHI/ RITE/ NEDO	移動層 60°C再生	7	新規合成アミン担持シリカ 1.5 GJ/t 40 t/d装置建設予定(2022)	燃焼後 石炭

Active projects

Carbon Capture Journal 46 (2015); Nelson et al. Energy Procedia (2017); IEA Clean Coal Technologies Conference (2017); GHTG-14 (2018); NETL Project Meeting (2019)

固体は燃焼後回収向けにパイロット規模中心

目標達成までのロードマップ

(基盤技術開発)

FY2010～FY2014

RITE固体吸収材



革新的な省エネ型
CO₂回収を可能に



(～1L)

(実用化研究)

FY2015～FY2019



アミン合成設備 ベンチ試験用材料搬入

(～15m³)

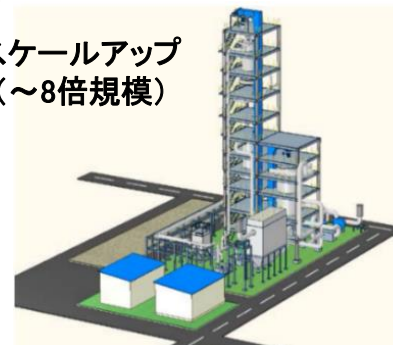
(スケールアップ・実ガス試験)

FY2020～FY2024

材料の大規模
製造技術確立

(100m³～)

スケールアップ
(～8倍規模)



(パイロットスケール: 40 t/day)

移動層実ガス試験
(石炭火力発電所)

2030頃

制度的仕組み
の導入
+

大規模
CCS

3,000
t/day

石炭火カプラント

項目

材料開発

システム開発

内容

固定層基礎試験
基本データ・特許取得

移動層適用検討
効率改善

用途展開 (閉鎖/宇宙空間、大気からの回収、その他発生源)

RITEにおけるCO₂分離・回収技術

【化学吸収法】FY2008～(NEDO委託事業)

環境調和型プロセス技術の開発/水素還元等プロセス技術の開発
(フェーズⅡ-STEP1)/CO₂分離回収技術開発/高性能吸収液の開発
(高炉ガスからのCO₂分離・回収)

体制: 日本製鉄(株) → (共同実施) RITE (吸収液開発)

【固体吸収法】FY2015～2017(METI委託事業)、FY2018～(NEDO委託事業)

CCS研究開発・実証関連事業/CO₂分離回収技術の研究開発
/先進的二酸化炭素固体吸収材実用化研究開発
(石炭火力発電所からのCO₂分離・回収)

体制: RITE → (再委託) 川崎重工業(株) (移動層)、TUAT (シミュレーション)

FY2020～先進的二酸化炭素固体吸収材の石炭燃焼排ガス適用性研究
(石炭火力発電所でのパイロットスケール試験) KHI/RITE → 名古屋大学

【膜分離法】FY2015～2018(METI委託事業)、FY2018～(NEDO委託事業)

CCS研究開発・実証関連事業/CO₂分離回収技術の研究開発
/二酸化炭素分離膜モジュール実用化研究開発
(IGCCガスからのCO₂分離・回収)

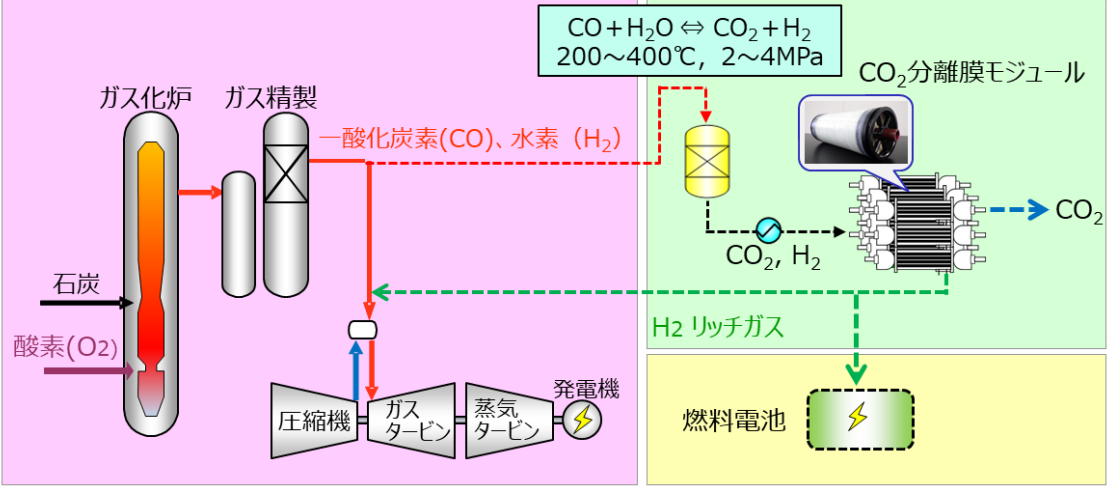
体制: MGM技術研究組合

二酸化炭素分離膜モジュール実用化研究開発

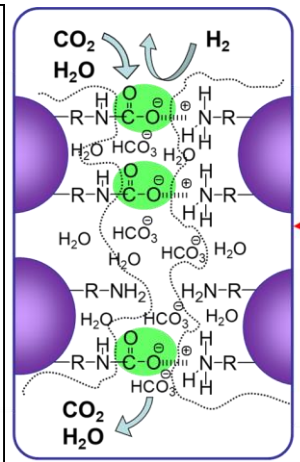
<対象> **高圧**の燃料ガスから省エネルギー、低コストでCO₂を分離回収しうる
高性能CO₂選択透過膜(分子ゲート膜)技術の実用化研究(**燃焼前回収**)

<目標> CO₂分離・回収コスト : ≤1,500円/t- CO₂
CO₂分離・回収エネルギー : ≤0.5 GJ/t- CO₂

CO₂分離回収型IGCC/IGFCシステム



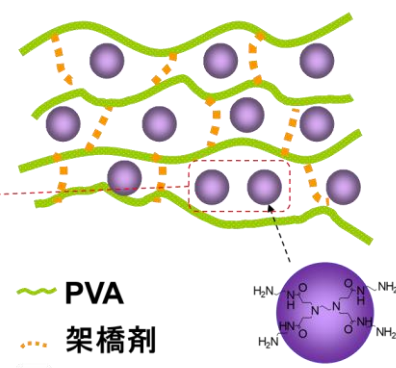
(大崎クールジェンプロジェクトガイドvol.13の資料をRITEで追記)



カルバメートによる擬似架橋

HCO₃⁻ 重炭酸イオン

※CO₂は重炭酸イオンとして膜中を移動



- ・膜構造の保持(補強)
- ・デンドリマーの固定化
- ・分離性能発現(分子ゲート)

高性能CO₂選択透過膜を用いた
石炭ガス化複合発電(IGCC)からのCO₂分離回収

分子ゲート膜のCO₂透過機構

分離膜によるCO₂回収技術の開発動向

国	研究機関	分離膜	規模 (実績)	特徴等	主適用先
米国※	MTR	高分子膜	ベンチ (1 t/d)	低圧の燃焼後回収に適用するため、プロセスの工夫(Airスイープ)、高透過性膜の開発(回収率~60%) 20 t/dパイロット試験装置完成(2019年)	燃焼後 石炭
	Air Liquide	高分子膜	ベンチ (2 t/d)	氷点下(-45°C)条件の高分子膜と液化の組合せ(回収純度~60%)	燃焼後 石炭
	GTI	酸化グラフェン系 複合膜	ラボ	カーボンナノチューブ等を組み合わせた高透過性膜材料	燃焼後 石炭
	MTR	高分子膜	ラボ	H ₂ 選択透過性耐熱性高分子膜の開発	燃焼前 IGCC
	OSU	高分子膜	ラボ	CO ₂ 選択性新規高分子膜材料の開発	燃焼前 IGCC
	UB	金属/ 高分子複合膜	ラボ	H ₂ 選択性新規金属/高分子複合量の開発	燃焼前 IGCC
日本	MGM	分子ゲート膜	ベンチ	・CO ₂ /H ₂ からのCO ₂ 選択透過膜モジュールの開発で世界をリード。 ・CO ₂ 選択透過膜のため、燃焼前回収においてH ₂ を高圧に保持可能。	燃焼前 IGCC


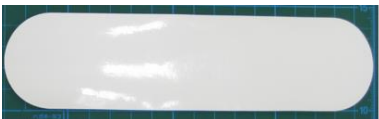

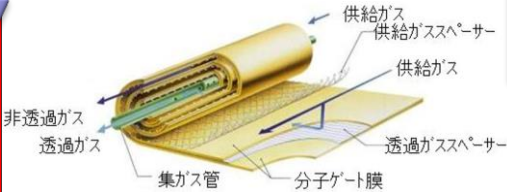

分離膜の研究開発はラボスケールの新規膜材料開発が多い

分離膜の開発段階のイメージ

(基盤技術開発)

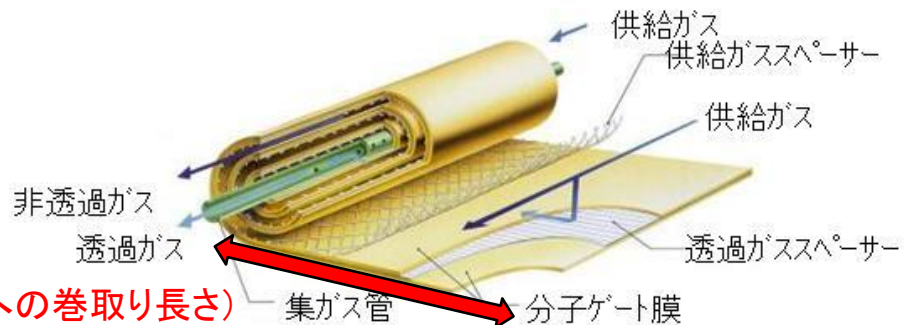
(実用化研究)

(実機)

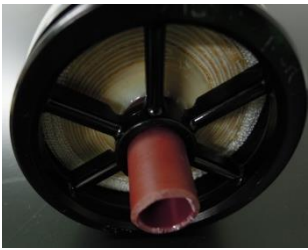
名称	単膜	膜エレメント	膜モジュール
概要	ラボスケールの平膜 (膜面積 : 1.2~58cm ²)	大面積の膜を用いた構造体 膜・支持体・流路材などを一体化したもの	膜エレメントとそれを収納する 容器 (ハウジング) を組み合わせたもの
サイズ、 外観	 (膜面積 : 1.2 cm ²)  (膜面積 : 58 cm ²)	 (2~4inch、長さ 20cm) 	 (8 inch、長さ1m程度)
課題等	膜素材開発 (分離性能向上、 耐圧性・耐久性等 向上)	製膜法、エレメント開発 (連続製膜、大面積化、 シール技術等)	実機モジュール開発 (ハウジング形状、 量産化、システム化)

膜エレメントのスケールアップ検討

4インチエレメントを試作し、リーフ長を長くして
良好に試作できることを確認し、
スケールアップ時の設計指針を得た。



リーフ長(集ガス管への巻取り長さ)

エレメント	2インチ	4インチ (A) (改良前)	4インチ (B) (改良後)	実機相当 8インチ
リーフ*1長	200~ 300mm	200~ 300mm ※2inchと同じ	700~ 900mm	700~ 900mm (想定)
試作結果		<p>✖リーフ長が短く ハンドリング難</p> 	<p>○ハンドリング 良好</p> 	(4インチの 知見に基づき 検討予定)

*1 リーフ: 膜と透過ガススパーサーから構成され、集ガス管に接着して使用する大面積シート。
リーフ長は集ガス管への巻取り長さに対応する。

石炭ガス化炉実ガス試験

米国ケンタッキー大学応用エネルギー研究センター（UK-CAER）で石炭ガス化炉からの実ガスを用い、単膜（膜素材）の実ガス耐性を確認中

ケンタッキー大学(UK-CAER)

次世代型膜モジュール技術研究組合

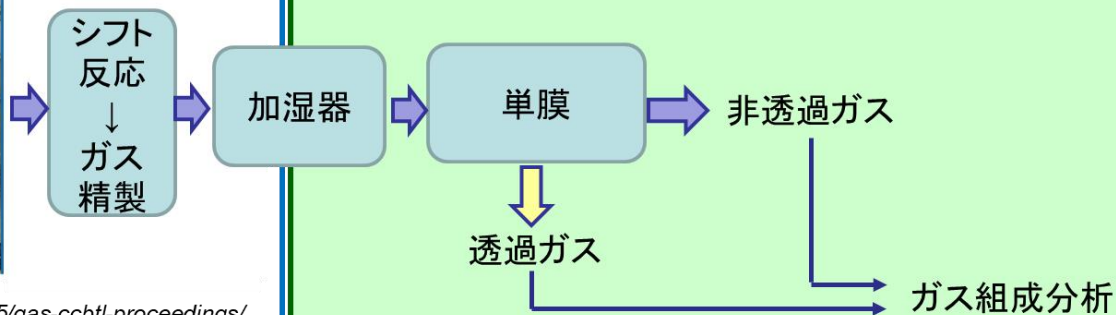
石炭ガス化炉(酸素吹き)+シフト反応器+ガス精製

石炭使用量
1Ton/Day

ガス流量
80Nm³/h

Feed Preparation

Gasification Unit

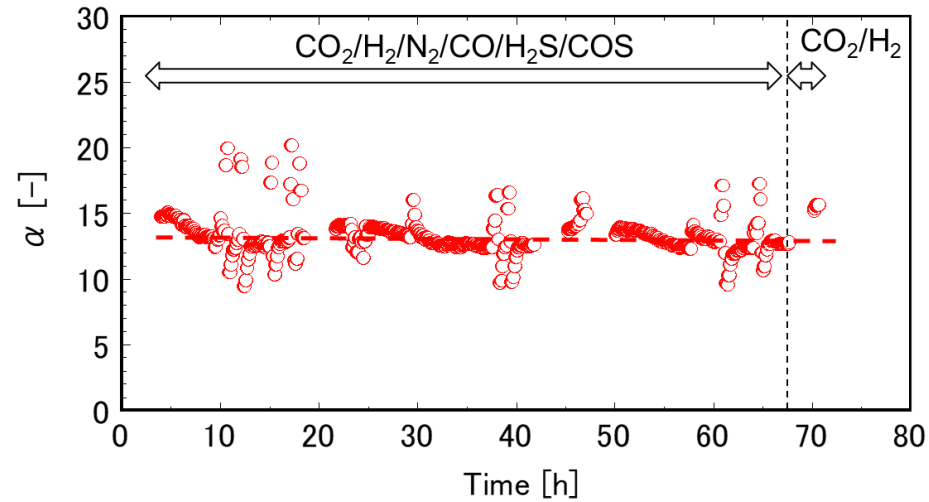
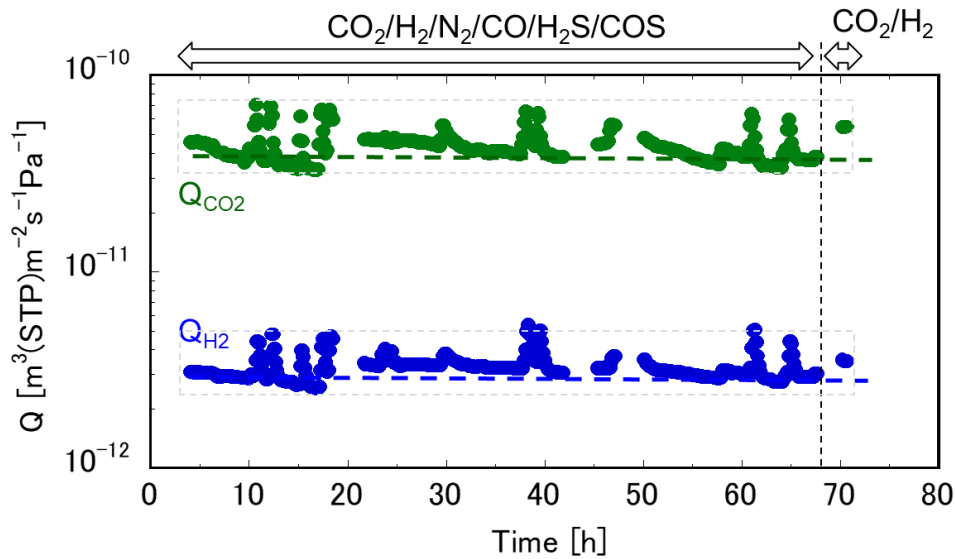


<https://www.netl.doe.gov/File%20Library/Events/2015/gas-ccbtl-proceedings/Gasification-and-CTL-Workshop-Presentation-2015-UKCAER.pdf>

・膜素材の**実ガス耐性**を確認中

・模擬ガス（H₂S濃度 ~1,000 ppm）を用いた加速試験により、**H₂S耐性**を確認

不純物添加試験(単膜)



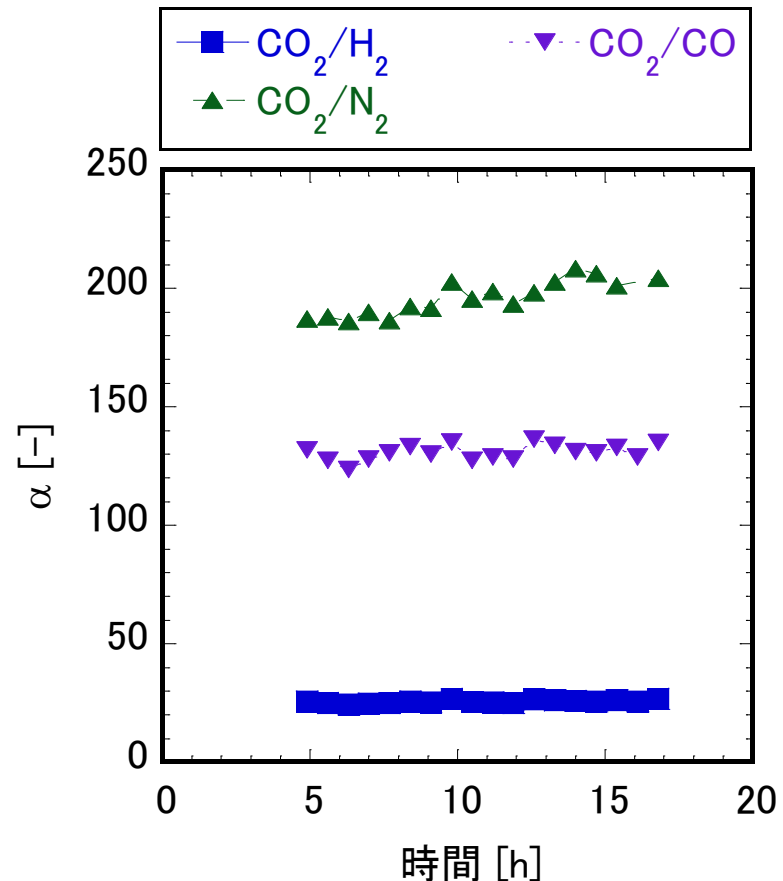
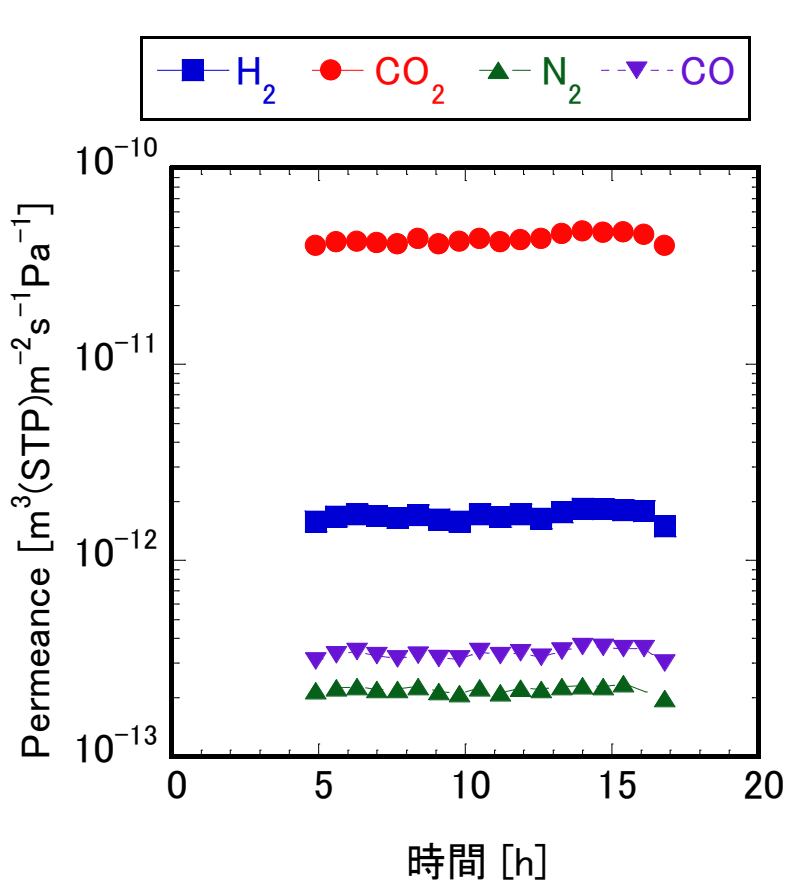
加速条件(硫化水素約1,000ppm)での膜素材の耐性を確認

<測定条件> 温度85°C、供給側全圧2.4 MPa、透過側大気圧

非透過ガス(≒供給ガス)組成: CO₂/H₂/N₂/CO/=36/63/0.3/0.7+H₂S, COS(模擬ガス)

CO₂/H₂=33/67(不純物無し)

膜エレメントの実ガス試験結果 (2020.3)



膜エレメント(2インチ)の初期耐久性を確認

<測定条件> 温度85°C、供給側全圧0.85 MPa、透過側大気圧

非透過側組成: $\text{H}_2/\text{CO}_2/\text{N}_2/\text{CH}_4/\text{CO}=8.7/17.6/48.6/0.054/25.0$ vol%、 H_2S : 約350ppm

透過側組成: $\text{H}_2/\text{CO}_2/\text{N}_2/\text{CH}_4/\text{CO}=3.3/92.4/2.4/\text{検出限界以下}/1.9$ vol%

実用化に向けたロードマップ

FY2011

2015

2020 2021

2025

2030

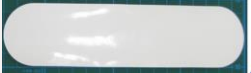
基盤技術研究
フェーズ

実用化研究
フェーズ

実証フェーズ
(スケールアップ、実ガス試験)

商用化
フェーズ

単膜



基本組成検討
特許取得

量産化
(連続製膜法の確立)

↓

小型膜エレメントの
製作法の確立
(部材の最適化)



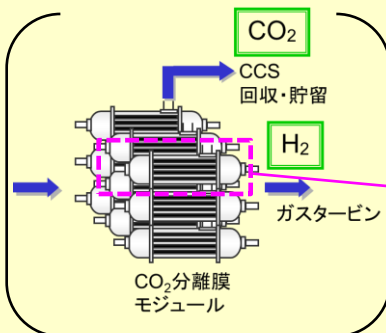
膜エレメント

耐不純物性評価
(実ガス試験)


膜エレメントのスケールアップ
(実機膜エレメント(製品サイズ)
製作法の確立)

+

膜分離システムの開発
(商用化に向けたシステム検討)



CO₂分離膜
モジュール



膜モジュール

膜モジュール製法とシステムの確立

2030頃

IGCC用
商用化

地球温暖化問題に対する新たな取り組み Negative Emission Technologies ①

CO₂の炭酸塩固定化技術(enhanced weathering)

- ✓ CO₂フリー水素を必要としない
- ✓ 固定化反応にエネルギー不要

JFEスチールと太平洋セメント、RITEで研究会を設置*

鉄鋼スラグ、廃コンクリート等から湿式処理でアルカリ土類金属を抽出し、これらを活用した二酸化炭素の炭酸塩固定技術および炭酸塩の有効利用技術開発に着手

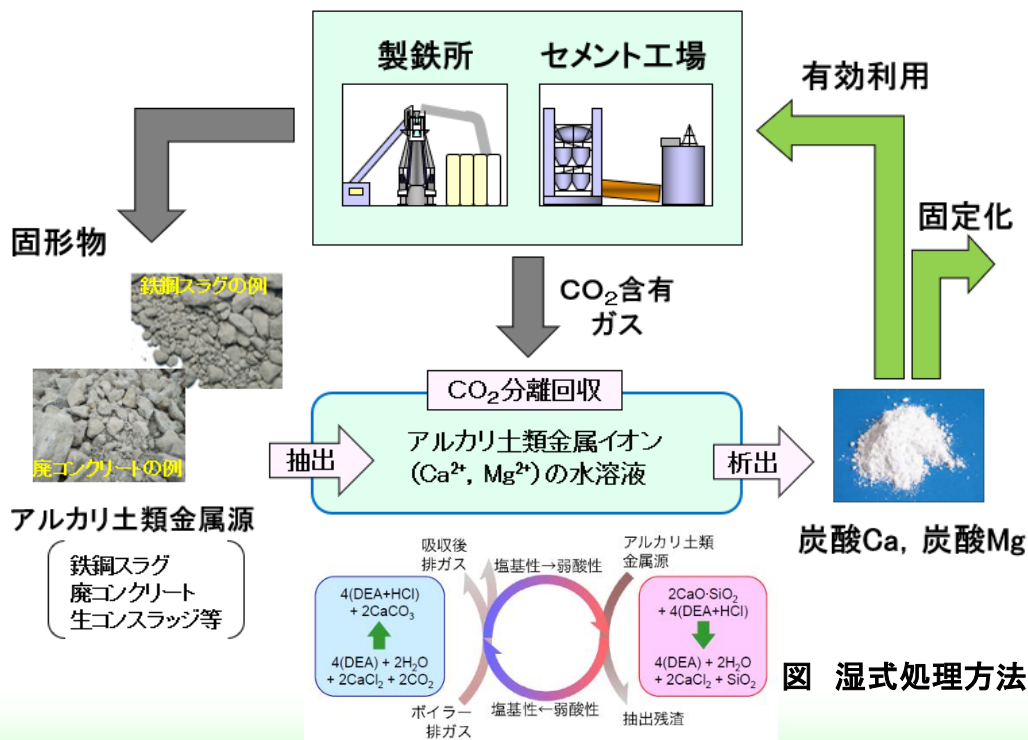


図 湿式処理方法(pHスイング法)

地球温暖化問題に対する新たな取り組み Negative Emission Technologies ②

大気中からのCO₂回収(Direct Air Capture)の可能性？

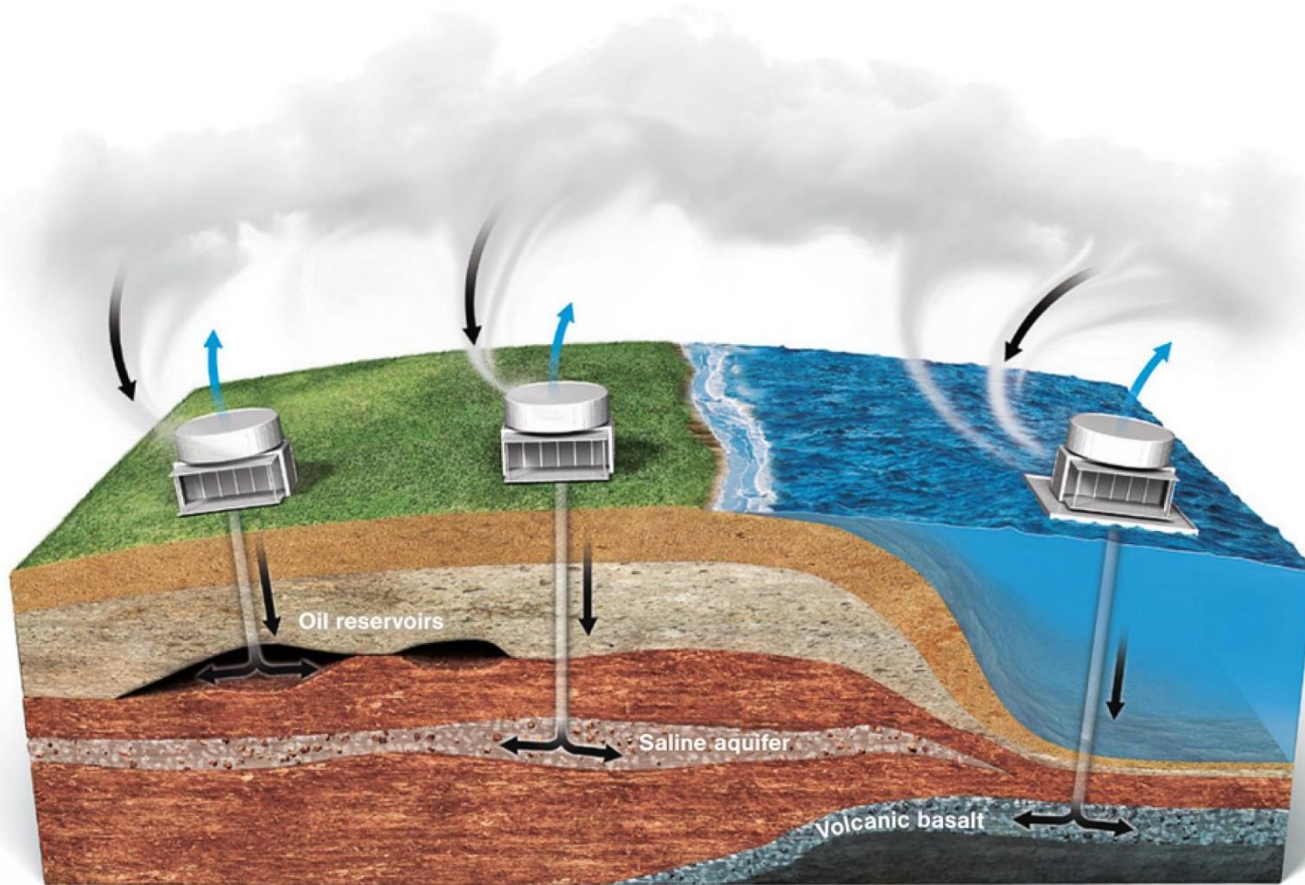
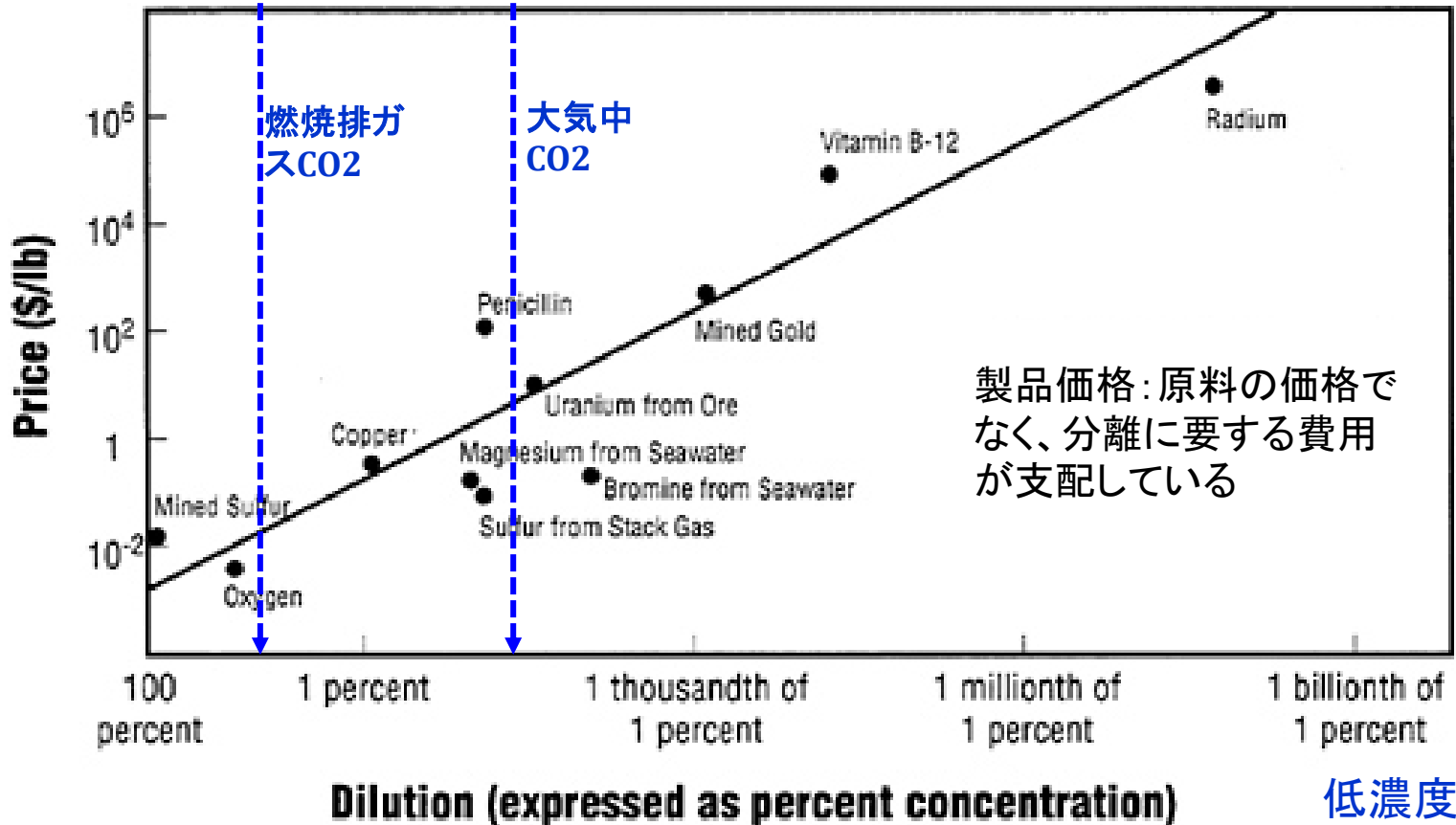


DIAGRAM BY JOE ZEFF, NATIONAL GEOGRAPHIC

Sherwood Plot (1959) :

いろいろな素材製品の価格をその原料中の存在比との関係でプロットしたもの

↑
高コスト



- The Sherwood plot: Selling prices of materials correlate with their degree of dilution in the initial matrix from which they are being separated. Note that the horizontal axis shows increasing dilution, or decreasing concentration, in the initial matrix. SOURCE: National Research Council (1987).

DAC技術に関する世界の動き

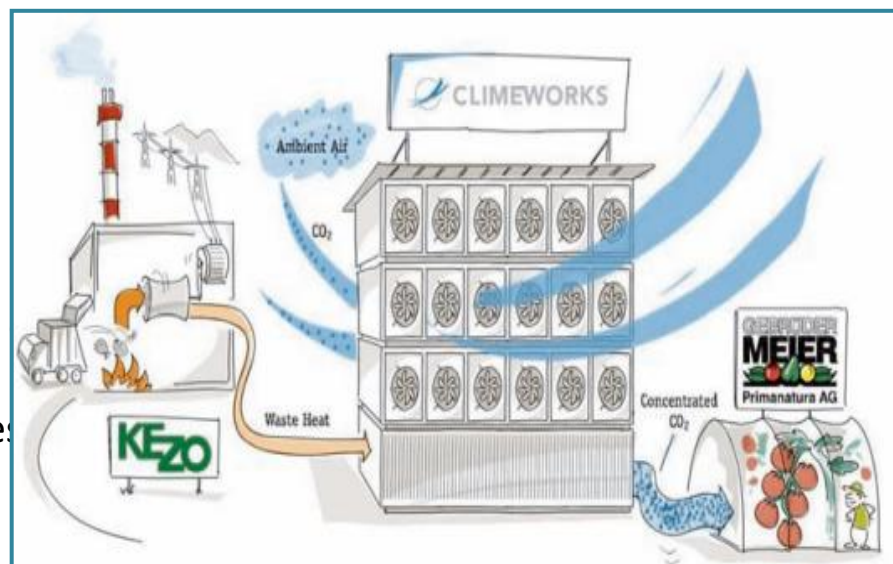
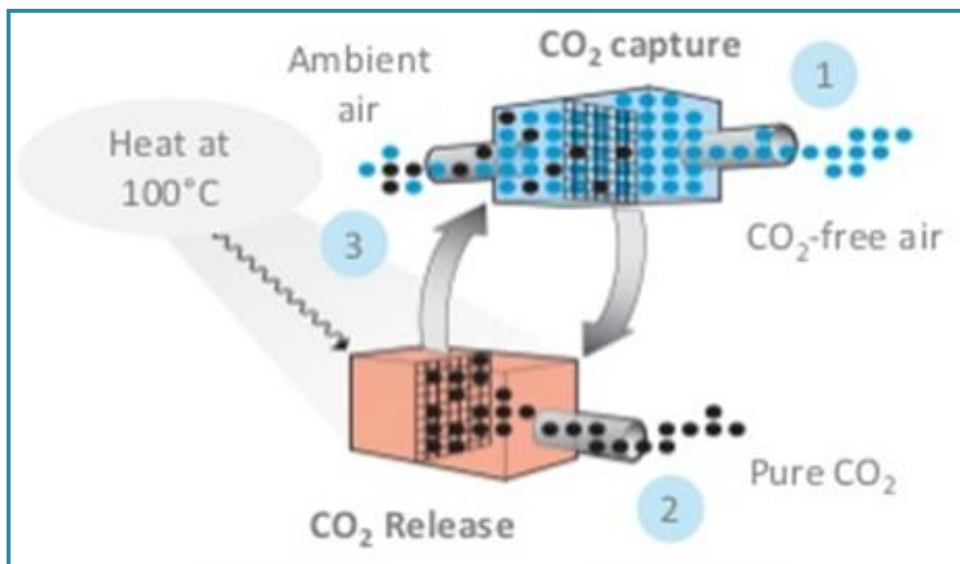
一部実用化されているもののエネルギー・コストに課題があり

会社名	材料	CO ₂ 分離回収エネルギー・コスト	備考
Climeworks (スイス)	アミン修飾フィルター (固体吸収材 で フィルターは樹脂)	9.0GJ/t-CO ₂ , 600\$/t-CO ₂ (2025年頃 目標コスト100\$/t-CO ₂)	世界初の商用プラント(900t-CO ₂ / year)を発売、これまでに8か所に導 入済み。エネルギーとコストが高い。
Carbon Engineering (USA)	KOH/Ca(OH) ₂ を含む 水溶液	5.3GJ/t-CO ₂ , 94-232\$/t-CO ₂	Occidental Petroleum社と50万t- CO ₂ /yのDACプラント2基を2022年 に稼働予定。 唯一アルカリ水溶液を使用し、エネ ルギー・コスト削減余地がない。
Global Thermostat (USA)	アミン含有セラミック ス (固体吸収材)	4.4GJ/t-CO ₂ , 150\$/t-CO ₂ (将来達成 可能なコスト: 50\$/t- CO ₂)	ジョージア工科大と協力、これまで に6基の導入実績。消費エネルギー の低減が課題、4,000t-CO ₂ /yearの パイロット設備を建設。
Center for Negative Carbon Emissions (USA)	イオン交換樹脂 (アミン系)	220\$/t-CO ₂ (将来達成 可能なコスト: 30\$/t- CO ₂)	除湿⇔加湿のスイングで吸脱着、 Artificial treeを高速道路沿いに設 置を提案
The VTT Technical Research Center (Finland)	イオン交換樹脂 (アミン系)	8.9GJ/t-CO ₂	Day/night capture cycle方式で、1 ~2kg-CO ₂ /day

Climeworks, Oct. 2015, the world's first commercial carbon-capture plant (900t-CO₂/year)



回収量：900 t-CO₂/year
Heat：1800-2,500kWh/t-CO₂ (100°C)
Electricity：350-450kWh/t-CO₂
ごみ処理施設の排熱を利用
固体吸収材（フィルター）式
回収したCO₂を農業利用



DACの利点

COMPARISON OF CO₂ REMOVAL APPROACHES

AFFORESTATION

Large-scale tree plantations to increase carbon storage in biomass and soil.



BECCS

Bioenergy in combination with carbon capture and storage.



ENHANCED WEATHERING

Distribution of crushed silicate rocks on soil surfaces to absorb and bind CO₂ chemically.



DIRECT AIR CAPTURE

Direct capture of CO₂ from ambient air through engineered chemical reactions.



AREA REQUIRED¹
to remove 8 Gt CO₂ per year

6'400'000 km²

2'500'000 km²

220'000 km²

15'800 km²**

Europe = 10'500'000 km²

WATER REQUIRED
to remove 8 Gt CO₂ per year

740 km³

480 km³

3 km³

none

Yearly global freshwater withdrawal 2010² = 4'000 km³

EXPECTED COST
at large scale

5 - 50 USD / t CO₂³

100 - 200 USD / t CO₂³

50 - 200 USD / t CO₂³

<100 USD / t CO₂⁴

DACの現状：

- ・エネルギー多消費・高コスト
- ・BECCS、植林・再植林（AR）より土地面積と水使用量が極めて小



食糧生産との土地競合の問題や生物多様性への悪影響を抑制できる可能性がある。

DACのコスト

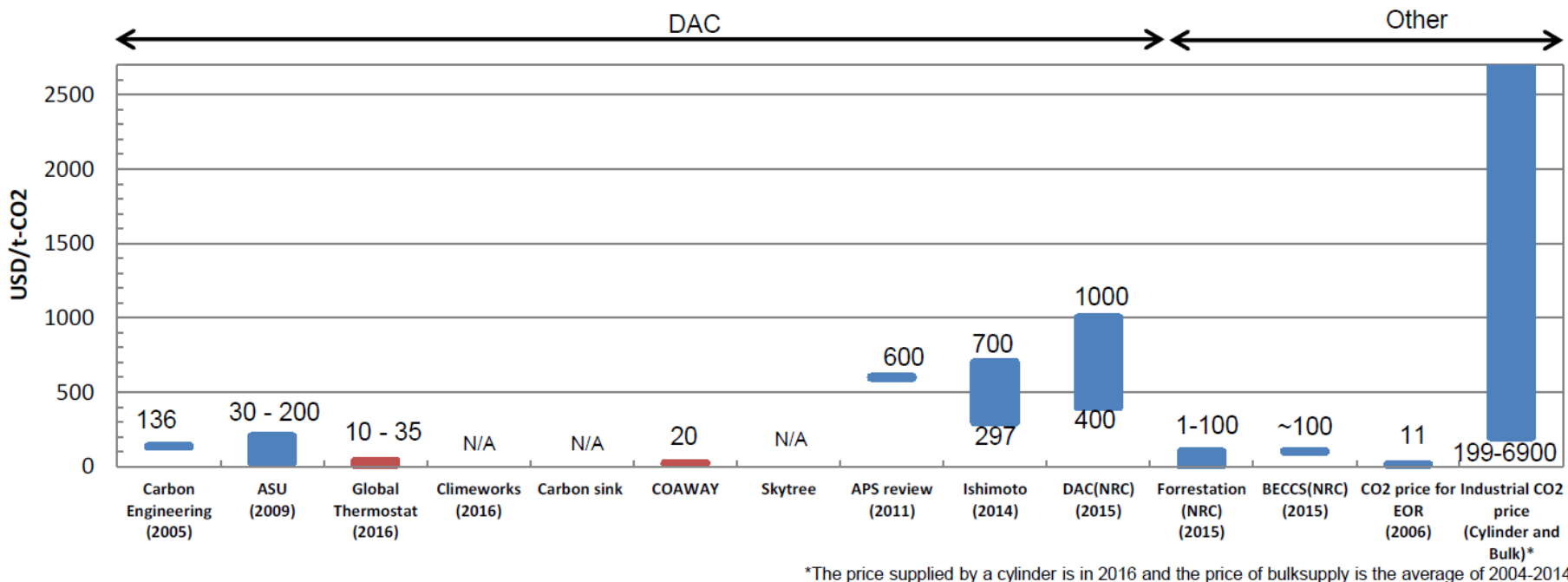


Fig. Capture cost of DAC, other technologies and industrial CO₂ gas prices.

(Yuki Ishimoto et al., PUTTING COSTS OF DIRECT AIR CAPTURE IN CONTEXT, 2017.)

DACはまだ発展途上で試算コストの幅が広いので、今後精査が必要
APS (American Physical Society) の試算によると \$600/ t-CO₂ 程度



2°C目標 > 50%確率 (2DS) でのCO₂限界削減費用 (2050年):
132~161 (\$/t-CO₂)* を目指すべき

「ムーンショット型研究開発事業／2050年までに、地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現」

(1) 温室効果ガスを回収、資源転換、無害化する技術の開発（採択予定先：8/26 N E D O HPより）

（表中敬称略、プロジェクトマネージャーの五十音順に掲載）

研究開発プロジェクト	プロジェクトマネージャー	委託予定先
電力利用CO2固定微生物の創出と気相反応システムの構築による大気CO2資源化技術の開発	国立研究開発法人産業技術総合研究所 加藤 創一郎	国立研究開発法人産業技術総合研究所 国立大学法人東京工業大学 国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学
大気中からの高効率CO2分離回収・炭素循環技術の開発	国立大学法人金沢大学 児玉 昭雄	国立大学法人金沢大学 公益財団法人地球環境産業技術研究機構
電気化学プロセスを主体とする革新的CO2大量資源化システムの開発	国立大学法人東京大学 杉山 正和	国立大学法人東京大学 国立大学法人大阪大学 国立研究開発法人理化学研究所 宇部興産株式会社 清水建設株式会社 千代田化工建設株式会社 古河電気工業株式会社
C4S*研究開発プロジェクト *C4S: Calcium Carbonate Circulation System for Construction :建設分野の炭酸カルシウム循環システム	国立大学法人東京大学 野口 貴文	国立大学法人東京大学 国立大学法人北海道大学
Cryo-DAC(冷熱利用大気CO2直接回収)の研究開発	国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学 則永 行庸	国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学 東邦瓦斯株式会社 学校法人東京理科大学
統合化固定・反応系(quad-C system)の低濃度化とモジュール化で実現する炭素完全循環社会	国立大学法人東北大学 福島 康裕	国立大学法人東北大学 公立大学法人大阪 株式会社ルネッサンス・エナジー・リサーチ
“ビヨンド・ゼロ”社会実現に向けたCO2循環システムの研究開発	国立大学法人九州大学 藤川 茂紀	国立大学法人九州大学 国立大学法人熊本大学 国立大学法人北海道大学
資源循環の最適化による農地由来の温室効果ガスの排出削減	国立大学法人東北大学 南澤 究	国立大学法人東北大学 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 国立大学法人東京大学

最重要課題：石炭火力、製鉄からのCO₂回収技術の早期実用化



CCUS/Carbon Recycleに向けて多様な排出源からのCO₂回収・固定化技術が必要：
これまでに開発した技術をもとに様々なCO₂排出源への適用を検討

PCO ₂ > 1 MPa	: 高圧ガス (ICGG、天然ガス、褐炭ガス化ガス)
PCO ₂ ~1 MPa	: 各種化学工業プロセス (アンモニア製造他)
PCO ₂ = 13~22 kPa	: 燃焼排ガス・製造工程 (石炭火力発電所、製鉄所、セメント工場)
PCO ₂ = 3~7 kPa	: 燃焼排ガス (天然ガス火力発電所、ガスエンジン (事業所) 等)
CO ₂ 濃度 = 0.1~1 %	: 室内/閉鎖空間 (オフィス、工場、宇宙空間、潜水艦)
CO ₂ 濃度 = 400 ppm	: 空気中からのCO ₂ 回収 (DAC: Direct Air Capture)

⇒ 「大気中からのCO₂回収 (約400ppm: Direct Air Capture)」技術の開発にも着手

1. 化学吸収法（高炉ガス）

- ・開発液を実用化、稼働中。商業化2号機が稼働開始（CCU用途）。
- ・さらに高性能化を目指しつつ、新規吸収液の開発を実施中。

2. 固体吸収法（石炭火力ガス）

- ・移動層ベンチスケール試験で回収量7.2 t/d、回収率90%を達成。
- ・今年度から、パイロット試験に向けた実ガス試験フェーズを開始、早期実用化を目指す。

3. 膜分離法（IGCCガス）

- ・実用化に向けた連続製膜技術開発と膜エレメントスケールアップ検討を実施。
- ・膜素材の硫化水素耐性および膜エレメントの実ガスに対する初期耐久性を確認。
- ・膜モジュールを早期に完成し、種々の高圧排出源への適用を図る。

4. 新たな取り組み

- ・CCUへの取り組み：炭酸塩固定化技術について太平洋セメント-JFEスチール-RITEで研究会を設立、検討開始
- ・DAC(Direct Air Capture)：NEDOムーンショット型研究開発事業において検討開始

謝辞：本研究開発は、METI委託事業
ならびにNEDO委託事業の一環として
実施しました。

ご清聴をありがとうございました。

Research Institute
of
Innovative Technology for the Earth