

第 1 編

総 論

第1章 CO₂分離回収技術開発の動向

余語克則*

1 はじめに

国際エネルギー機関による世界のCO₂削減量見通し（IEA, Energy Technology Perspectives 2017）では、パリ協定の長期目標を実現するために2060年に必要とされる削減量は約300億トンとされている。その16%に当たるおよそ50億トン／年をCCS（Carbon Capture and Storage）によって実現することが期待されており、既に世界的に大規模CO₂貯留事業が20件程度稼働中である。我が国においても2016年から日本CCS調査(株)が苫小牧においてCO₂圧入を開始し、2019年11月までに30万トンを圧入している。今後さらにCCSを進めるためにはCCSコストに占める割合の大きなCO₂分離回収コストの大幅低減が求められている。

また、我が国では2020年12月に「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」が制定され（2021年6月具体案策定）、2021年7月にはカーボンリサイクル技術ロードマップ（2019年6月策定）が改定され¹⁾、また2024年5月にはCCS事業法が交付されたことから、最近、CO₂を固定化、再利用するCCUS（Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage）の動きも盛んになっている。CO₂分離回収の市場規模は2030年時点で、世界で約6兆円／年、2050年には約10兆円／年まで拡大すると見込まれており、その3割のシェア（約25億CO₂トンに相当）を目指すとされている。本稿では以下に、CCUSに不可欠なCO₂の分離技術について述べる。

2 CO₂の発生量と排出源

環境省の速報値によると2020年度の我が国における温室効果ガスの総排出量は11億4,900万トン（CO₂換算）であり、前年度の総排出量12億1,100万トンから5.1%の減少となっており、2013年度以降は減少傾向にある（図1²⁾）。

2020年3月に2013年比26%削減の国別削減目標（NDC：Nationally Determined Contributions）を国連に提出していたが、2020年10月26日の菅内閣総理大臣の所信表明演説において、「2050年までに、温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、すなわち2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」と宣言された。これを受けて、2021年4月に

* Katsunori YOGO（公財）地球環境産業技術研究機構 化学研究グループ
グループリーダー、主席研究員

は2030年度において、温室効果ガス46%削減（2013年度比）を目指すこと、さらに50%の高みに向けて挑戦を続けるとしているが、これまでの目標を7割以上引き上げることになり、極めて厳しい目標であると言える。

図2³⁾に示すように、2019年度における我が国のCO₂排出は燃料の燃焼により生成したCO₂が94.7%を占めている。さらに燃料の燃焼に伴う排出の内訳をみると、エネルギー産業が40.5%（内88%、4億トン弱が発電および熱供給）、製造業及び建設業が23.5%（内52%およそ1.3億トン

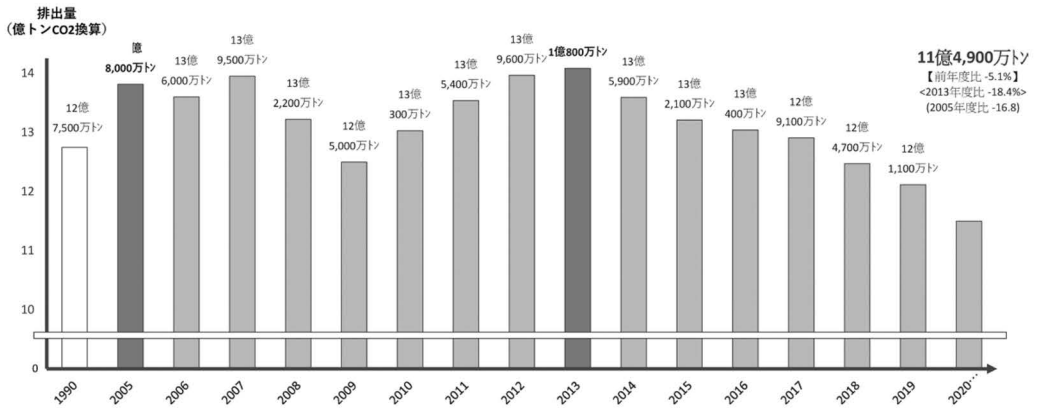
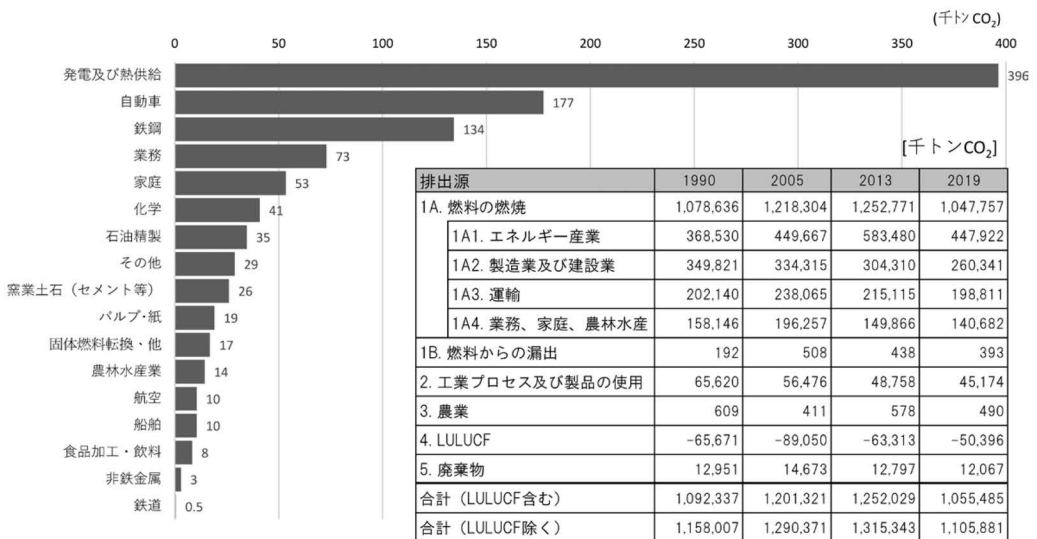


図1 我が国の温室効果ガス総排出量 (2020年度速報値)²⁾
出典) <https://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg-mrv/emissions/>



※1 間接CO₂を含まない
※2 LULUCF：土地利用、土地利用変化及び林業

図2 各部門のCO₂排出量の推移と燃料の燃焼に伴うCO₂排出の内訳³⁾
出典) 日本国温室効果ガスインベントリ報告書 (2021年), 国立研究開発法人国立環境研究所

第1章 CO₂分離回収技術開発の動向

表1 各種プロセス排ガス条件例

	石炭焚 火力発電所	LNG 焚 火力発電所 コンバインドサイクル	LNG 焚 火力発電所 コンベンショナル	製鉄所	製油所 (水素製造)	セメント工場
H ₂ O vol %	10.8	7.0	15.4	7.2	0.3	15.0
H ₂ vol %	-	-	-	2.8	75.1	-
N ₂ vol %	72.0	76.2	73.0	49.2	-	58.0
O ₂ vol %	4.8	13.0	3.2	0.0	-	9.0
CO ₂ vol %	12.4	3.8	8.4	20.4	20.9	18.0
CH ₄ vol %	-	-	-	-	2.5	-
SO _x ppm	45	0	0	0.0(SO _x)	-	1-30
CO vol %	-	-	-	20.4	1.3	-
NO _x ppm	45(O ₂ =6%,wet)	9.5(O ₂ =16%,dry)	19.0(O ₂ =16%,dry)	0.0	-	250
ばいじん g /Nm ³ (O ₂ =6%)	0.009	0	0	0.005	-	20.0
注	排煙脱硫装置設置。 排煙脱硫装置出口 (再加熱器前)より 引き込む	排熱回収ボイラ出口よ り引き込む	乾式EP出口より引き 込む			

RITE 二酸化炭素地中貯留技術研究開発 平成17年度報告書より抜粋

が鉄鋼，次いで化学産業（4,086 万トン），窯業土石（2,605 万トン），運輸が 18.0%（内 89%お
よそ 1.8 億トンが自動車），その他部門（業務，家庭等）が 12.7%を占めている。したがって，
発電，鉄鋼，化学，セメント等の大規模発生源からの CO₂ 回収に加えて，自動車からの CO₂ 排
出削減が極めて重要であることがわかる。これらで日本の CO₂ 排出量の約 7 割に相当する。

表 1 にこれら大規模発生源から排出される排ガスの組成を示す⁴⁾。石炭火力発電所からの排ガ
ス中の CO₂ 濃度は十数パーセントであるが，NO_x に加えて SO_x が多く含まれるため，アミン法
を用いる場合にはこれらを前段でできる限り除去する必要がある。LNG 焚き火力の場合には
SO_x はほとんど含まれないが，コンバインドサイクルになると CO₂ 濃度が 3~5%程度と薄く，
また酸素濃度が 10%を超えるため，CO₂ 分離回収においては低濃度で高性能を示し，高耐久性
の材料が求められる。一方，製鉄所の高炉ガスの場合には，NO_x，SO_x，酸素が含まれないため，
材料の劣化に関しては有利であるが，アミン法においては CO によるギ酸の生成が問題となる。
セメントキルンについては NO_x，ばいじんが多いことが特徴である。

3 CO₂ 回収技術と課題点

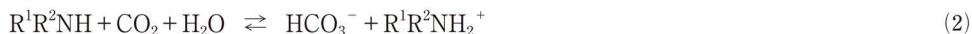
CO₂ の分離回収は既に天然ガス精製施設およびアンモニア工場等で行われており，CO₂ の分離
回収技術はその分離原理によって，①吸収法（化学吸収，物理吸収），②吸着分離法（物理吸着，
化学吸着），③膜分離法（有機膜，無機膜），④深冷分離法の 4 種類に分けられる（表 2⁵⁾）。

表2 CO₂分離回収技術の分類

分離法	吸収剤・分離剤	技術概要	プロセス(企業, 研究機関)
吸収法 (吸収液)	物理吸収液	ガス分子を液体中に溶解させて成分分離する方法 (CO ₂ 分圧が高い程有利)	Rectisol(Linde, Lurgi), Selexol (UOP)
	化学吸収液 (アミン系) (Na/K炭酸塩系)	ガス分子とアミン/アルカリとの化学反応を利用 (吸収材の種類によってCO ₂ 分圧が低い場合(燃焼後回収)にも適用可)	(アミン系) KS液(MHI), RN(RITE), aMDEA(BASF), (Na/K炭酸塩系) Benfield(UOP)
吸着(収) 分離法 (固体)	物理吸着 (活性炭、ゼオライト)	・温度差(TSA)、圧力差(PSA)を利用して吸着・脱離 ・水の影響を受けやすく、前処理(除湿)エネルギーが大 ・中小規模向け	Zeolite-PSA (JFEスチール(C50 Projectで実施(高炉)、熱風炉で過 去商用運転)
	化学吸着/吸収 (アミン担持無機多孔 体, 担持活性炭等)	化学吸収法と原理は同じ 多孔質担体にアミンを含浸またはアルカリ金属を担持させる ことで、再生エネルギーを低減	アミン担持固体吸収材 (RITE/KHI : パイロット試験を実施 予定) TDI Research, Svante, Climeworks (DAC用)
	化学吸収 炭酸塩系 (Caルーピング等)	Ca系では、酸化カルシウム(CaO)と炭酸カルシウム (CaCO ₃)を循環して再生サイクルを作ること、燃焼後ガス からCO ₂ を除去する(排ガスはCO ₂ と水蒸気のみ)	HECLOT(ITRI), EUを中心にパイロット試験が実施 されている(CEMCAP, CLEANKER Projectなど)
膜分離法 (薄膜)	有機膜	・圧力差を駆動力とする透過速度の違いによる分離(連続 処理プロセス) ・原理的に高圧、高濃度ガスの処理に適する ・装置が比較的小型で、構造がシンプル ・CO ₂ 回収純度を高めるのは困難	PRISM(Air products) UOP(Separex), 高Si-CHAゼオライト膜(三菱ケミカル (株)) DDR型ゼオライト膜(日本ガイシ(株)) など
	無機膜 (ゼオライト膜、シリカ 膜等)		
深冷分離法 (蒸留)	液化、蒸留、沸点の差 で分離	他の分離・回収法よりも設備費が高額、投入エネルギーが大 きい	PSAや酸素燃焼後段での使用例あり、CO ₂ を含む産業ガス精製では実 用化CCUS向けは未商用化

<https://www.env.go.jp/earth/ccs/attach/mat03.pdf> 等各種資料をもとに作成 (酸素燃焼は範囲外とした)

CO₂と親和力のある吸収材(液体または固体)とCO₂を含んだガスを接触させることでCO₂を分離することができる。CO₂の吸収材として用いられるアミンはCO₂との化学反応によりカルバメート(1)あるいはバイカーボネート(2)を生成し、混合ガス中からCO₂を回収することができる。



これまでに各種のアミン化合物がCO₂分離回収用材料の成分として、吸収液での実用化のみならず、固体吸収材や分離膜用の材料としても検討されている。

回収したCO₂と反応した吸収材を異なる容器に移し、その容器内で加熱または減圧等、条件を変化させることで、CO₂を放出・回収し、吸収材を再生する。吸収液の場合は液体が2つの容器の間を移動し、吸収・再生を繰り返すが、固体の場合は、容器を移動させるのが困難であるため加熱再生を行う場合には化学吸収液と比較して不利であるが、その一方、化学吸収液で問題となる蒸気損失を考慮する必要が無いため、エネルギー消費低減の可能性がある。吸収液も固体吸