

〈特集〉

固定排出源からのCO₂回収技術について

酒 井 奨

(一財)エネルギー総合工学研究所 カーボンニュートラル技術センター
 (〒105-0003 東京都港区西新橋1-14-2 新橋SYビル6F E-mail: s-sakai@iae.or.jp)

概 要

カーボンニュートラル社会の実現には、電力のCO₂フリー化のほか、発電以外に消費されている化石エネルギーへの対策も急務である。そして、こうした化石エネルギーに依存せざるを得ない分野に対しては、CO₂分離回収を利用したCCUS（CO₂有効利用・貯留技術）やカーボンリサイクルへの期待は大きい。様々な排ガスには適材適所なCO₂分離回収技術が求められるため、本報ではCO₂の排出源とCO₂分離回収技術の関係を整理するとともに、CO₂分離回収技術の開発動向について整理した。

キーワード：CO₂排出源、CO₂排出量、CO₂分離回収技術、カーボンリサイクル、カーボンニュートラル
 原稿受付 2025.2.10 EICA: 29(4) 42-46

1. はじめに

2020年10月に日本政府が2050年までのカーボンニュートラル社会の実現を目指すとして以来、CO₂排出量削減とカーボンリサイクルを目指した様々な取り組みが実施されている。

CO₂の排出は化石燃料などの炭素源の燃焼によるものであり、CO₂排出量を削減するには、化石燃料の消費量を減らすことが肝要である。それゆえ、CO₂フリーなエネルギー源である再生可能エネルギー（以下、再エネ）や原子力、水素やアンモニアが注目されるとともに、省エネルギー技術も見直されている。

しかし、これらを結集することの難しさは、環境性と経済性が常に相反関係にあることから明らかである。また、2050年のカーボンニュートラル社会の実現が着地点ではなく通過点であることを理解すると、全体を見渡す広い視野をもった技術開発が必要である。

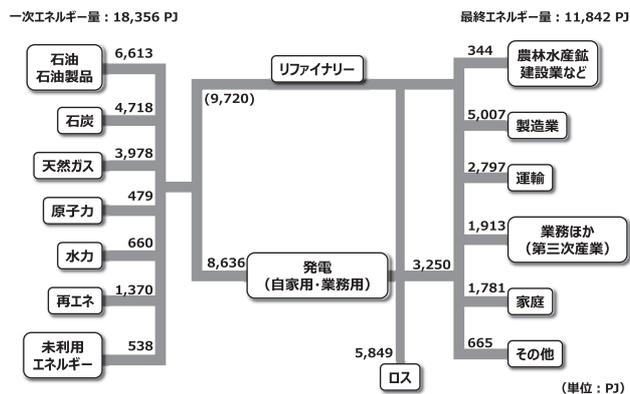
本報では、先ず日本のエネルギーフローを紐解きながら、CO₂排出量削減に向けた広い視野での検証と、将来のカーボンニュートラル社会の実現に必要なCO₂分離回収技術について、CO₂排出源との関係や、現状の開発動向について簡単に概説する。

2. CO₂排出源

2.1 日本のエネルギーフロー

Fig. 1に日本のエネルギーフロー図を示す。日本の一次エネルギー供給量は約18,356 PJであり、そのうち発電所に供給されるエネルギー量は約8,636 PJである。この約8,636 PJの燃料（そのほとんどが化石

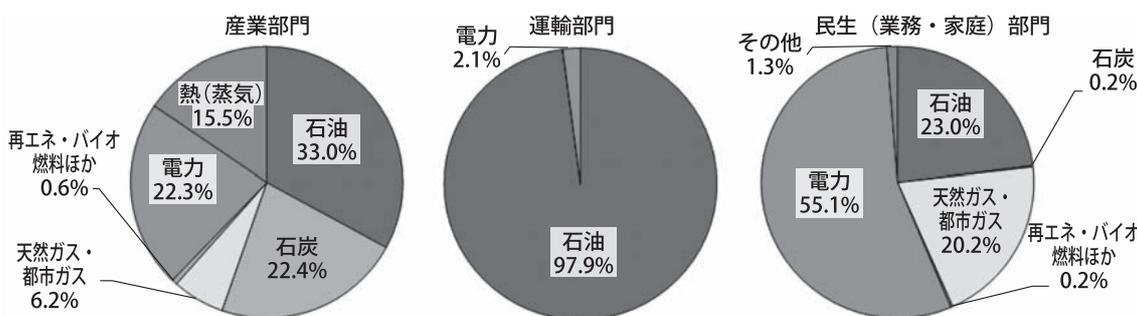
燃料）を利用して約3,250 PJの電力に変換され、産業、運輸、民生（家庭と業務）などに分配されている。つまり、現在の電力を全て再エネなどに置き換えて、CO₂フリー電源による電力供給が実現できても、その量は約3,250 PJ分にしかならず、一次エネルギーのうち発電以外に消費されている約9,720 PJからは、CO₂が排出される。言い換えると、発電以外の分野についても化石燃料（資源）をCO₂フリーな燃料（資源）に転換するか、もしくは化石燃料（資源）を使用したとしても、カーボンリサイクルのように、できるだけ大気にCO₂が排出されないような仕組みを創らなければならない。



(出典：エネルギー統計¹⁾を基にエネルギー総合工学研究所が作成)

Fig. 1 Energy flow in Japan (FY2022)

環境省²⁾によると、CO₂排出量（電気・熱分配前のCO₂排出量）は、エネルギー転換部門（主に発電部門、約4.20億トン）、産業部門（製造業、約2.53億トン）、運輸部門（約1.85億トン）の順に多く、Fig. 1の最



(出典：エネルギー統計¹⁾を基にエネルギー総合工学研究所が作成)

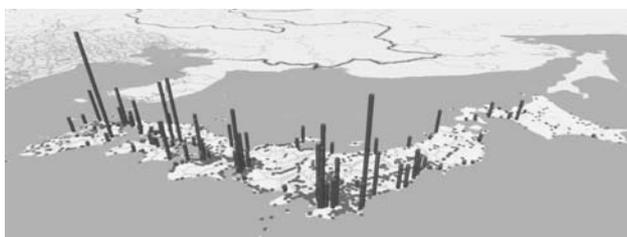
Fig. 2 Breakdown of energy consumption in the industrial, transportation, and consumer sectors (FY2022)

終エネルギー消費量に応じてCO₂排出量が多い。発電部門がCO₂フリーな再エネや原子力、水素やアンモニアに代替されたとしても、CO₂排出削減量は約半分程度になる。

Fig. 2に各部門(製造業など産業部門、運輸部門、民生部門)のエネルギー消費の内訳を示す。最も特徴的なのは運輸部門であり、ガソリンや軽油、ジェット燃料などの石油製品(燃料)のエネルギー消費がほとんどを占めており、この燃料のCO₂フリー化が急がれる。民生部門は他分野に比べて電化が進んでおり、CO₂フリーな電源が供給できれば、CO₂排出量は半分以下になる。ただし、暖房や調理などに使用する石油製品(燃料)や天然ガスの消費量も多く、燃料が少量分散して消費されるため、CO₂削減は難しく、課題が多い。産業部門は鉄鋼や化学、機械など様々な分野から構成されるため、消費するエネルギー源も多種多様である。

2.2 CO₂排出源と排出量の特徴

Fig. 3に日本のCO₂排出の様子を示す。国内のCO₂排出量は、主要な石油コンビナートなどが立地する沿岸部からの排出が大半を占める。その他、農林、窯業・土石、食品、印刷、機械製造などは、沿岸部に比べると排出量は少ないが内陸にも立地している。



(出典：環境省²⁾および資源エネルギー庁⁴⁾の統計データを基にエネルギー総合工学研究所が作成)

Fig. 3 CO₂ emissions in Japan (FY2021)

環境省²⁾によると、エネルギー起源のCO₂排出量は、電気・熱配分後に換算すると総量が約9.64億トンとなり、産業部門でのCO₂排出量は約3.52億トンである。そのうち鉄鋼業からのCO₂排出量(約1.34億ト

ン)は全体の約40%を占め、次いで化学工業(石炭・石油製品製造を含む、約0.56億トン)、機械製造業(約0.38億トン)が続く。この3業種で産業部門のCO₂排出量全体の約65%を占めている。

CO₂はその発生場所や燃焼方法によって、圧力やCO₂の濃度、不純物の種類などが違う。Table 1に代表的なプロセスからの排出CO₂の濃度と圧力を示す。燃料を単純に燃焼させた場合の排出CO₂は、ほぼ常圧で、10~15%の濃度となるが、コンバインドサイクルを採用した天然ガス火力発電からの排ガスや、製鉄所のCOG(コークス炉ガス)はCO₂濃度がとても低い。一方、セメント製造や水素製造、石炭ガス化複合発電(IGCC)などの排ガスはCO₂濃度が高い。そして、水素製造やIGCCは圧力も高くなる。こうした排ガスからCO₂を分離回収するには、適材適所な技術の選択が要求される。

Table 1 CO₂ emission sources and their properties of exhaust gas

CO ₂ 源	燃料	CO ₂ 濃度 [vol. %]	ガス圧力 [MPa]
火力発電所	天然ガス	7~10	0.1
	天然ガス(コンバインドサイクル)	3~4	0.1
	重油	11~13	0.1
	石炭	12~14	0.1
	IGCC	30~50	3~4
製鉄所	COG	2~3	0.2~0.3 (ヘッダー圧力)
	高炉ガス	14~16	0.2~0.3 (ヘッダー圧力)
セメント	石灰石や各種燃料	14~33	0.1
水素製造	天然ガス	20	2~4
天然ガス精製		2~65	0.9~8

(出典：環境省の資料⁵⁾を基にエネルギー総合工学研究所が作成)

3. CO₂分離回収技術

3.1 概要

CO₂分離回収技術は、一か所から多くのCO₂が集中して排出する火力発電所や製鉄所、製油所などをターゲットにすることが多い。一方で、中小規模な廃

Table 2 Typical CO₂ capture technologies⁶⁾

分離回収技術	技術概要	適用先
化学吸収法	●CO ₂ と液体との化学反応を利用して分離回収する方法。	火力・セメント・鉄鋼・石油精製・化学工業・天然ガス採取
物理吸収法	●CO ₂ を液体中に溶解させて分離回収する方法。 ●吸収能は液体に対するCO ₂ の溶解度に依存する。	火力（高圧）・石油精製・化学工業・天然ガス採取
固体吸収法	●固体吸収材によるCO ₂ 分離回収技術。 ●アミン等を含浸させた多孔質材（低温分離用）や、CO ₂ 吸収能のある固体剤（高温分離用）に吸収させる方法等がある。	火力・セメント・石油精製・化学工業
物理吸着法	●ゼオライトや金属錯体等の多孔質固体への昇圧・降圧（圧力スイング）や昇温・降温（温度スイング）等による吸着・再生操作。	火力・鉄鋼・セメント・石油精製・化学工業
膜分離法	●ゼオライト膜、炭素膜、有機膜等分離機能を持つ薄膜を利用し、その透過選択性を利用して混合ガスの中から対象ガス（CO ₂ ）を分離する方法。	火力（高圧）・石油精製・化学工業・天然ガス採取
DAC (Direct Air Capture)	●大気中から低濃度CO ₂ を上記分離回収技術等を用いて直接回収する技術。 ●CO ₂ 分離回収技術の発展形でもあり、実用化に向けて、更なる低コスト化、所要エネルギーの削減が必要。	大気中等の極低濃度（400 ppm）CO ₂ 回収

棄物処理施設やセメント工場、化学工場などへの適用は、CO₂処理コストが高くなるため、国内外でコスト削減に向けた様々な検討が実施されている。さらに近年では大気中のCO₂（約400 ppm）を直接回収するDAC (Direct Air Capture) 技術の開発も活発に行われているが、技術的にも経済的にも実用化の難易度はとても高い。

Table 2に代表的なCO₂分離回収技術を示す。CO₂分離回収技術には、排ガス中のCO₂を化学結合によって液体に吸収させる化学吸収法、吸収液に物理的にCO₂を溶解させる物理吸収法、CO₂を吸収する性質を持つ固体材料を利用する固体吸収法、多孔質の吸着材にCO₂を吸着させて分離する物理吸着法（吸着分離法、固体吸着法とも呼ぶ）、膜によるガスの透過速度などの違いからCO₂を分離する膜分離法などがある。Table 2に記載は無いが、ガスを液化させて沸点の違いを利用して分離する深冷分離法などもある。

化学吸収法や固体吸収法は常圧で広く利用できるが、物理吸収法や膜分離法は高圧排ガスを得意とする。物理吸着法は圧力差（PSA）以外にも温度差（TSA）などを利用するものもある。また、排ガス中のCO₂濃度が高いほど、分離回収するには有利となる。

3.2 開発動向

広く普及が進む化学吸収法は、一か所集中型の排ガスに多く適用され、商用化している。BASF社のOASE[®]は北海道苫小牧で実施された国内CCS事業に採用された⁷⁾。BASF社と日揮ホールディングス(株)が共同で開発した高圧再生型のHiPACT[®]は、新潟県柏崎市平井地区に設置し、水素製造時のCO₂を回収して(株)INPEX 所有の枯渇ガス田に2025年以降に圧入する計画である⁸⁾。三菱重工業(株)は、関西電力(株)と高性能なアミン吸収液「KS-21TM」とCO₂回収プロセ

ス「Advanced KM CDR ProcessTM」を共同開発し、旧式の「KS-1TM/KM CDR ProcessTM」とともに世界で合計18基の商用機を納入している⁹⁾。日鉄エンジニアリング(株)は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）プロジェクトで開発されたESCAP[®]法を既に商業化し、製鉄所や火力発電所に適用している¹⁰⁾。東芝エネルギーシステムズ(株)は環境省のプロジェクトで開発した独自の吸収液を用いて清掃工場やバイオマス発電所のCO₂を回収している¹¹⁾。

化学吸収法では吸収液を再生するためのエネルギーの低減が大きな課題であるが、再生に必要なエネルギーが小さな吸収液を用いるか、固体の吸収材を利用する方法（固体吸収法）などが提案されている。前者として比熱の小さい有機化合物の吸収液を用いる方法（RTI International社のRTI's Non-Aqueous Solvents¹²⁾など）や、相分離型吸収法¹³⁾がある。後者としては、公益財団法人地球環境産業技術研究機構（RITE）がアミン系化合物を多孔質支持体に担持させた固体吸収材を開発し¹⁴⁾、それを用いて川崎重工業(株)がプロセス化し、関西電力(株)の協力の下、石炭火力舞鶴発電所内にCO₂分離回収試験装置を設置した。2023年10月より40 t-CO₂/日の回収規模で運転を開始している¹⁵⁾。

物理吸収法は、吸収液に低温のメタノールを用いたRectisol法や、ポリエチレングリコールのジメチルエーテル溶液を用いたSelexol法などが普及している。後者は広島県大崎上島でNEDOプロジェクトのIGCCに採用されている¹⁶⁾。

物理吸着法はガス分離・精製の分野で幅広く利用されている技術である。石灰製造炉などの高濃度CO₂排ガス¹⁷⁾、石油化学コンビナートや製鉄所、工業炉やボイラーなどの低圧・低濃度のCO₂排ガス^{18,19)}、海上

工事の作業船²⁰⁾など、小型化も含めて開発と導入が検討されている。

膜分離法は、日本ガイシ(株)がメタンとCO₂の分離性能が高いDDR型ゼオライト膜を開発し、それを日揮ホールディングス(株)がCO₂-EOR用に用いて実証試験を進めている²¹⁾。またRITEは、膜中の細孔に取り込まれたCO₂が膜材料との間で架橋構造をとることで、分子径の小さい水素などの侵入を防ぐ分子ゲート膜を開発している²²⁾。

JFEエンジニアリング(株)は3種類のCO₂回収装置(コンテナ型3t-CO₂/日のGX-Marble, プラント型20~200t-CO₂/日のGX-Opal, LNG冷熱利用型のGX-Crystal)を開発した²³⁾。このうちGX-MarbleとGX-Opalは、膜分離法と物理吸着法を組み合わせたハイブリッド型である。

その他、金属元素と有機化合物を組み合わせる金属有機構造体(MOF: Metal-Organic Framework)や、生物の呼吸作用に必須の炭酸脱水酵素(Carbonic Anhydrase)を用いる方法なども研究されている。

なお、ネガティブ・エミッション技術(Negative Emissions Technologies)として注目されているDACについては、本誌特集でも取り上げられているため、本報では割愛する。

3.3 開発目標

CO₂分離回収法の開発目標は、内閣府が2020年に策定した「革新的環境イノベーション戦略」²⁴⁾でFig. 4のように掲げられている。現在、CO₂回収量1トン当たり4,000円/t-CO₂程度であるものを、固体吸着法で2030年頃に2,000円台/t-CO₂、膜分離法で1,000円台/t-CO₂、さらに2050年にはイノベーションにより1,000円/t-CO₂を目指すという非常に野心的な目標である。

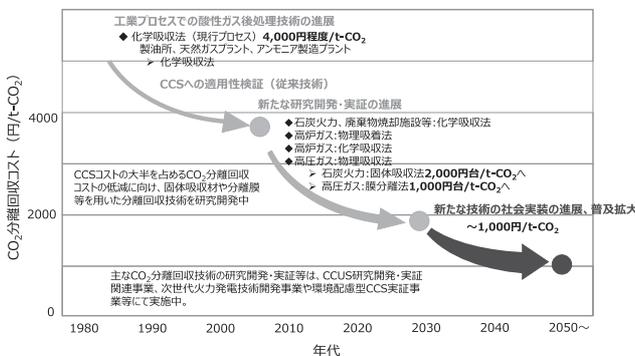


Fig. 4 CO₂ capture cost reduction targets²⁴⁾

一方、現状のCO₂回収コストはFig. 5のように、排ガス中のCO₂濃度が薄くなると回収コストは上昇する傾向にあり、Fig. 4の目標との乖離は大きい。

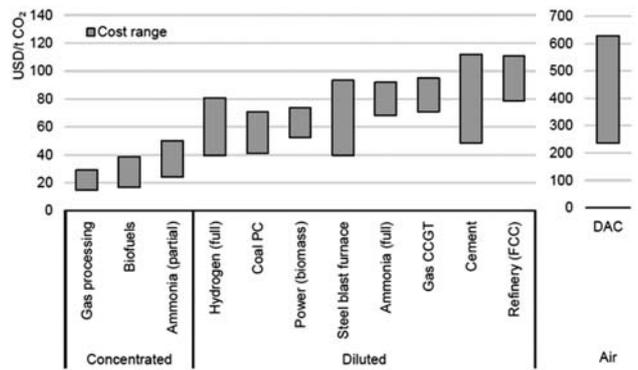


Fig. 5 Relationship between CO₂ emission sources and CO₂ capture costs²⁵⁾

4. おわりに

カーボンニュートラル社会の実現にはCO₂分離回収技術は欠かせないが、この技術単体の能力だけが発揮されても意味がない。本報では回収したCO₂の純度や回収率について言及しなかったが、何を目的に、どこからCO₂を回収して、何に使うのかを明確にする必要がある。それによって分離回収技術の種類や仕様を適切に選択する必要がある。将来、カーボンリサイクルによるCO₂の循環利用量は約2億~1億トン²⁶⁾とされ、その中核を担うのはCO₂分離回収技術だが、カーボンリサイクルを早く、広く普及させるには、産業間連携、技術連携の考えが欠かせず、広い視野が求められる。

参考文献

- 1) 資源エネルギー庁：総合エネルギー統計(エネルギーバランス表), 2022年度詳細表.
- 2) 環境省：2022年度(令和4年度)温室効果ガス排出・吸収量について, 2024.4.
- 3) 環境省：温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度 <https://eegs.env.go.jp/ghg-santeikohyo-result/>
- 4) 資源エネルギー庁：都道府県別エネルギー消費統計 https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/energy_consumption/ec002/
- 5) 環境省：平成25年度シャトルシップによるCCSを活用した二国間クレジット制度実現可能性調査委託業務報告書, 2014.3.
- 6) 経済産業省：カーボンリサイクルロードマップ, 2023.6.
- 7) 経済産業省・NEDO・日本CCS調査(株)：苫小牧におけるCCS大規模実証試験30万トン圧入時点報告書(総括報告書)概要, 2020.5.
- 8) 日揮ホールディングス(株)：高圧再生型CO₂回収(HiPACT[®])プロセス <https://www.jgc.com/jp/business/tech-innovation/environment/hipact.html>
- 9) 三菱重工業(株)：CO₂回収技術 実績紹介 https://www.mhi.com/jp/products/engineering/co2plants_projectrecords.html

- 10) 日鉄エンジニアリング(株)：省エネ型二酸化炭素回収設備 (ESCAP[®]),
https://www.eng.nipponsteel.com/business/environment_and_energy_solution/escap/escap/
- 11) 東芝エネルギーシステムズ(株)ニュースリリース：佐賀市の CO₂分離回収商用設備で、耐久性が高く環境にやさしい CO₂ 吸収液の実証運転を完了, 2024. 4.
- 12) Marty Lail et al.: Non-Aqueous Solvent (NAS) CO₂ Capture Process, Energy Procedia, 63, 580-594 (2014).
- 13) 則永行庸：化学吸収法による CO₂分離回収の新展開, 革新的 CO₂分離回収技術シンポジウム, 2021. 2.
- 14) 公益財団法人地球環境産業技術研究機構 (RITE)：固体吸収材
<https://www.rite.or.jp/chemical/theme/2014/04/solid1.html>
- 15) 川崎重工業(株)：CO₂分離回収技術
<https://www.khi.co.jp/energy/co2sr/>
- 16) 野口嘉一：石炭火力発電の現況と展望, 革新的 CO₂分離回収技術シンポジウム, 電源開発資料, 2020. 1.
- 17) 太陽日酸(株)ニュースリリース：4月から10トン/日規模の CO₂回収装置を販売開始 カarbonニュートラル社会の実現に貢献, 2023. 3. 31.
- 18) 日本製鉄(株)ニュースリリース：昭和電工と日本製鉄, 6つの国立大学と連携し, 工場排出ガスに含まれる低濃度 CO₂の分離回収技術開発を本格始動 低コストで省エネルギー型の CO₂分離回収技術の早期社会実装によりカーボンニュートラル社会への貢献を目指す, 2022. 12. 22.
- 19) 東邦ガス(株)プレスリリース：低コストな CO₂分離回収技術の確立に向けた実証試験の開始について～SyncMOF 株式会社と連携して製造した高性能な吸着材を使用～, 2024. 2. 19.
- 20) エア・ウォーター(株)ニュースリリース：小型 CO₂回収装置を用いた作業船から排出される CO₂の固定化技術共同実証実験について, 2023. 7. 18.
- 21) 日揮ホールディングス(株)：DDR 膜-天然ガスからの CO₂分離技術
<https://www.jgc.com/jp/business/tech-innovation/environment/ddr-membrane.html>
- 22) 公益財団法人地球環境産業技術研究機構 (RITE)：分離膜
<https://www.rite.or.jp/chemical/theme/2014/04/membrane1.html>
- 23) JFE エンジニアリング(株)：「低消費エネルギー CO₂分離回収技術の開発」が NEDO 事業に採択 ～プラント型設備“GX-Opal”商用化へ～
<https://www.jfe-eng.co.jp/news/2023/20231226.html>
- 24) 内閣府総合イノベーション戦略推進会議：革新的環境イノベーション戦略, 2020. 1.
- 25) IEA (International Energy Agency): CCUS Policies and Business Models -Building a commercial market-, 2023. 11.
- 26) 経済産業省：カーボンリサイクルロードマップ, 2023. 6.