



特集記事・6

地球環境を考慮した排出ガス削減への鉄鋼業の取り組み

CO₂ 排出削減への取り組み～排ガスからのCO₂回収技術とその用途～Approach to CO₂ Reduction～CO₂ Capture Technology and CO₂ Usages from Exhaust Gas～

三菱重工業(株) 総合研究所
化学研究部 化学第二研究室 横浜チーム
主席研究員

平田琢也
Takuya Hirata

三菱重工エンジニアリング(株)
CO₂・環境事業推進室
上席主任

反町美樹
Yoshiki Sorimachi

1 はじめに

2018年12月にポーランドで開催された国連気候変動枠組条約第24回締約国会議(COP24)では、気候変動問題に関する国際的な枠組みであるパリ協定の実施ルールが議論され、CO₂の排出削減の検証方法として先進国と途上国に統一の基準を設ける、途上国への支援について先進国が2年毎に資金拠出見通し額を報告する等、先進国と途上国の歩み寄りを見せる形で合意に至った。また、2018年10月には、COP24開催に先立ち、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)より、“1.5℃特別報告書”が公開され、産業革命前からの気温上昇が1.5℃と2℃の僅かな差異であっても、熱波・豪雨・海面上昇・食料や水の不足・生態系の破壊といった被害の規模に影響すると分析している。

このような温暖化ガス排出削減に向けて世界全体が動き出す中で、国内においても、2050年に向けて化石燃料の利用に伴うCO₂の排出を大幅に削減する有望な選択肢の一つとしてCO₂の分離・回収や利用に係る技術が挙げられている。そのイノベーションを推進する目的で、2019年2月に資源エネルギー庁長官官房にカーボンリサイクル室が設置され、CO₂排出を大幅削減しようとする姿勢を見せている。

本稿においては、経済産業省から2019年6月に示されたカーボンリサイクル技術ロードマップ¹⁾において共通技術としてカテゴライズされているCO₂回収技術の中で大型機商用化に至っている化学吸収法を概説するとともに、回収されたCO₂の有効利用例と、その実例として当社グループが携わった世界最大の石炭燃焼排ガスからのCO₂回収プロジェクトについて紹介する。

2 排ガスからのCO₂回収方法

2.1 CCS及びCCUSの現状

CCS (Carbon dioxide Capture and Storage、二酸化炭素回収・貯留) 及びCCUS (Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage、二酸化炭素回収・有効利用・貯留) という言葉には馴染みの薄い方も多いと思われるが、形態を問わねば実用段階に近い技術と言えよう。例えば、1972年には米国テキサス州で天然のCO₂を利用した石油増進回収(CO₂ EOR, Enhanced Oil Recovery)が、1996年にはノルウェーで天然ガスから分離したCO₂を北海ノルウェー沖約240kmの海底帯水層に貯留するSleipner Projectが開始されている。過去には天然ガス処理で分離されるCO₂を対象とするプロジェクトが中心であったが、近年では発電、鉄鋼、化学、セメント、焼却炉のように多様なCO₂排出源へのCCS/CCUSの適用検討が実行或いは計画されている²⁾。国内外問わず、CO₂の有効利用法については研究開発段階にあるものが多く、実施及び計画中の大規模CCUSプロジェクトではEOR用途に限定されている。

鉄鋼分野においては、2016年11月に最大80万トン/年のCO₂回収容量のアブダビCCSプロジェクトが開始され、Emirates Steel Industriesの直接還元炉排ガスからアミン吸収液を用いた化学吸収法によりCO₂を回収し、EOR或いは油層圧維持用の圧入流体として利用している³⁾。国内鉄鋼業界においては、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託事業として環境調和型製鉄プロセス技術開発が実施され、そこで開発された吸収液を用いたCO₂回収設備(ESCAP)が、2014年に高炉熱風炉排ガスから120トン/日のCO₂を回収する商用機として導入された。現在においても、革新的製鉄プロセス技術開発(COURSE50)において、

CO₂の排出を削減)とCO₂の分離・回収(高炉ガス中のCO₂を分離・回収)により、CO₂排出量を約30%削減する様々な技術開発を進めている。

2.2 CO₂回収技術

CO₂回収技術として、表1に示すように、化学吸収法、物理吸収法、固体吸収法、物理吸着法、膜分離法等がある¹⁾が、大規模なCO₂回収においてはアミン吸収液を用いた化学吸収法が実用化の面でリードしている。化学吸収法では、吸収塔にてガス中のCO₂をアルカリ性溶液へ効率的に吸収し、再生塔にて溶液を加熱して高純度なCO₂として放散・回収する。化学反応を利用するため、吸収の駆動力が小さくなる低CO₂濃度(低CO₂分圧)のガスからのCO₂回収にも適用できるが、CO₂放散時に多量の熱エネルギーを消費する。アルカリ性溶液としてはアミンの水溶液が用いられることが多く、CO₂の吸収及び放散の効率向上を目的に、多くの研究機関及び企業にて各種アミンの評価・選定が行われてきた。

三菱重工グループでは、関西電力(株)と共同でCO₂回収技術の開発に取り組み、1991年に関西電力(株)南港発電所内に建設した2トン/日のパイロット試験設備等を用いた研究開発を行い、エネルギー消費量の少ない独自のアミン吸収液KS-1™を用いたCO₂回収プロセスKM CDR Process™を商業化した。現在までに13基の商用機が稼動し、2基が設計・建設段階にある。このプロセスの特徴は、各種化石燃料の燃焼排ガスのような常圧かつ低CO₂濃度(概ね4～14%-dry)の対象ガスからもCO₂を90%以上回収することができ、更に独

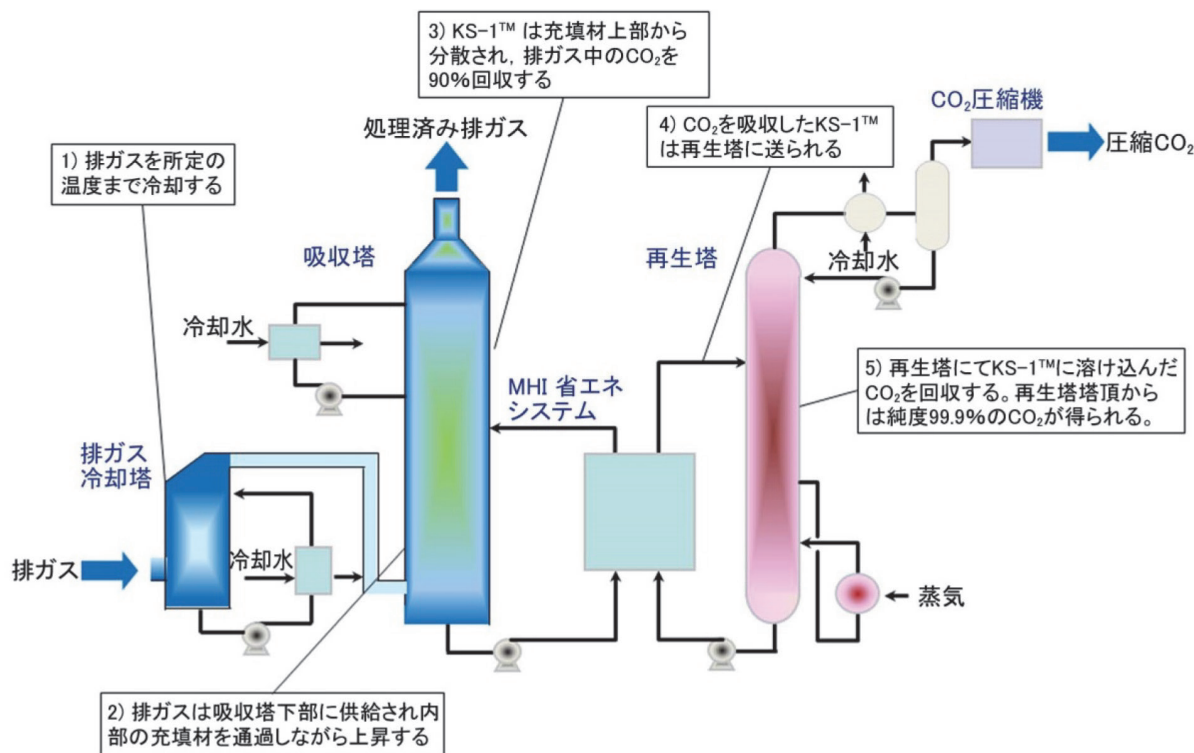
自の省エネ再生システムによりCO₂放散時の熱エネルギー(蒸気消費量)の低減を実現していることにある。現在においても、一層のCO₂回収コスト低減に向けた吸収液やプロセスの技術革新、運転信頼性向上を実現すべく、絶え間ない研究開発を進めている。

図1に当社グループのエンジニアリング事業会社である三菱重工エンジニアリング(株)のCO₂回収装置の概略フローを示す。CO₂を含む排ガスを導入する排ガス冷却塔では、CO₂の吸収に適する所定の温度まで排ガスを冷却し、加えて硫酸化物の高度除去等の前処理が必要に応じて行なわれる。吸収塔では、アミン吸収液(KS-1™)を供給し、排ガスと向流接触することにより、CO₂を吸収・除去する。吸収によりCO₂を除去された排ガスは、CO₂とアミンの反応熱により温度が上昇するため、排ガスを冷却した後に吸収塔から大気へ放出される。CO₂を吸収したアミン吸収液は、再生塔から抜き出した高温のアミン吸収液と熱交換することで昇温後、再生塔に送られる。再生塔では、低圧蒸気を熱源としてアミン吸収液を加熱し、吸収液からCO₂と水を放散させる。再生塔から放出される高温の放散ガスを冷却して発生した凝縮水を気液分離することでCO₂が回収される。化学吸収法では化学反応を利用するため物理吸収法に比較して高純度なCO₂を回収できる。

1999年にマレーシアに納入した210トン/日の初号機は、納入以降20年近く運転を継続している。CO₂源としては初号機含めて天然ガスの燃焼ガスが主であるが、不純物の多い石炭燃焼排ガスへの対応として、1トン/日のパイロット試験

表1 CO₂回収分離技術¹⁾

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	・ゼオライトなどの多孔質固体への昇圧・降圧(圧カスイング)や昇温・降温(温度スイング)などによる吸着・再生操作	火力・鉄鋼・セメント・石油精製・化学工業
膜分離法	・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

図1 CO₂回収装置 KM CDR Process™ の概略フロー^{4,5)}

装置（当社総合研究所内）及び10トン/日の実証試験装置（電源開発（株）松島発電所内）での試験を経て、2011年には500トン/日のCO₂回収装置を建設し、米国大手電力会社サザンカンパニー/米国電力研究所と共同で、世界初の石炭火力発電所排ガスからのCO₂回収・貯留一貫実証試験を実施した。この大規模実証試験を通じて得られた対象ガス中の不純物のCO₂回収プロセス内での挙動や装置スケールアップに関する知見を活用し、後述する信頼性の高い数千トン/日規模の大型装置の商用化に成功した。

また、製鉄所プロセスガスを対象としたCO₂回収時の評価（低品位廃熱を利用する二酸化炭素分離回収技術開発 COCS、経済産業省補助事業、2004～08年度）を始め、燃焼排ガス以外へのKM CDR Process™の適用範囲の拡大を目指して検討を進めている。

③ CO₂の用途

3.1 現状用途と期待される新規用途

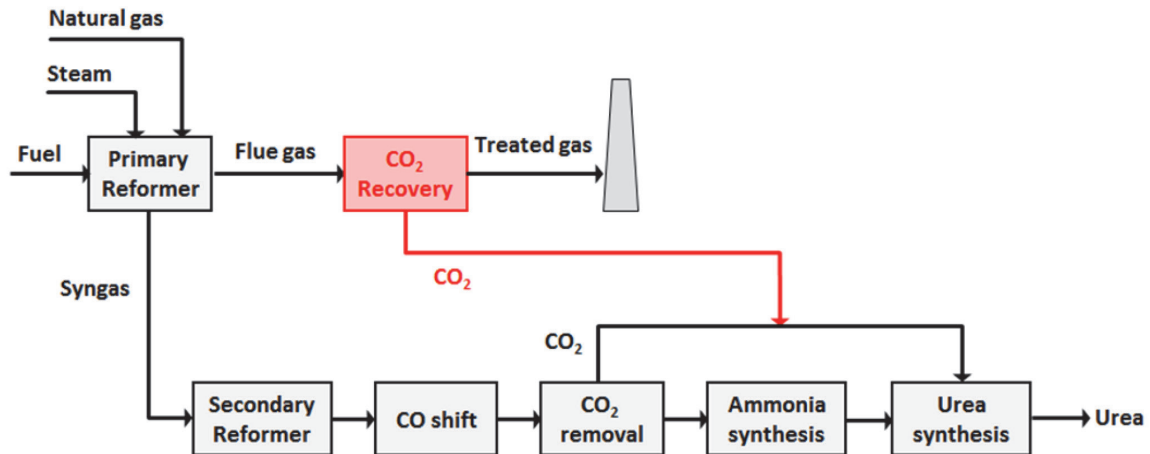
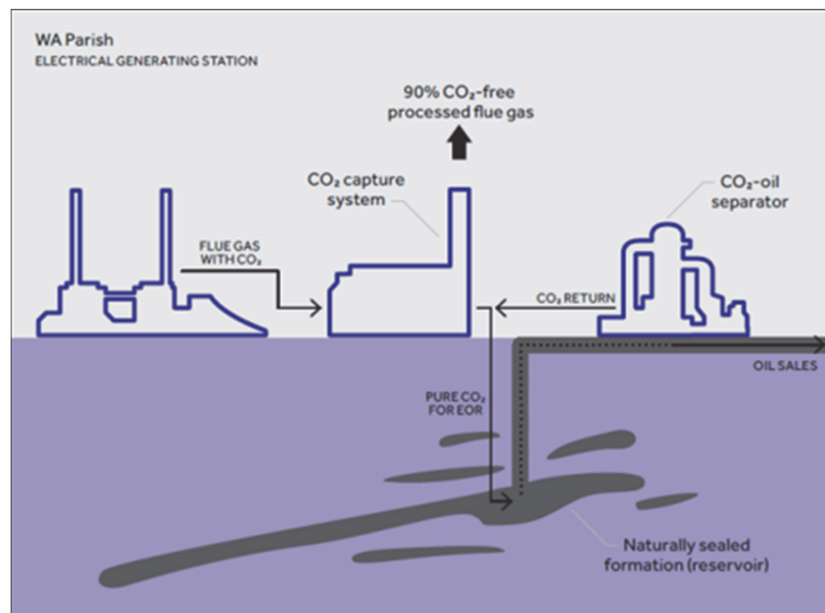
CO₂の現状用途は、工業利用（溶接、冷却、レーザー、ドライアイス、化成品原料、等）、農業用途（栽培促進）、炭酸飲料や美容・健康分野等の多岐にわたるが、CO₂排出の大幅な削減を実現するには、更に多様なCO₂用途の確保が必要となる。カーボンリサイクル技術ロードマップにおいては、2030

年を比較的短期のターゲットとして水素が不要なものや高付加価値のもの（ポリカーボネート等の化学品、バイオジェット燃料等の液体燃料、道路ブロック等のコンクリート製品）から導入し、2050年以降を中長期のターゲットとして需要の多い汎用品（オレフィン・BTX、Benzene、Toluene、Xylene等の汎用化学品、ガス・液体燃料、汎用コンクリート製品）への拡大を目指すとしている。

本章においては、当社グループにて納入したCO₂回収装置で回収されたCO₂の利用量の多い、尿素製造とCO₂ EORについて概説する。

3.2 尿素製造

現在、尿素は主に安価な天然ガスを原料にアンモニアを合成し、その際のオフガスのCO₂とアンモニアを反応させることで合成している。しかしながら、天然ガスを原料として尿素を合成する場合、アンモニアとオフガスのCO₂バランスからCO₂が不足する場合がある。このため、図2に示すように、天然ガスから水素とCOを製造する改質炉（スチームリフォーマ）の排ガスからCO₂を回収し、尿素合成用に供給することにより、アンモニアとCO₂のバランスを調整できるため、尿素的生産量最大化を可能とする。KM CDR Process™のこれまでににおける最多月用途であり、9基のCO₂回収装置が尿素増産用に稼働している。

図2 CO₂回収 尿素増産システム⁵⁾図3 大規模CO₂回収 CO₂ EORの概念図⁵⁾

3.3 CO₂ EOR

CO₂は油層中の原油を低圧でミッシブル状態（CO₂と原油が超臨界圧下において自由に混ざり合う状態）にし、原油の流動性を飛躍的に高める。このため、自噴生産を行なう1次回収、水等を圧入する2次回収を行った後に油層に残存する原油に対して、CO₂ EORは高い回収率と経済性を可能にする3次回収方法の一つとして知られている。米国ではCO₂は天然のCO₂ガス田からパイプラインで供給されているが、CO₂回収装置を利用すれば、図3に示すように、化石燃料を燃焼する発電所等の大規模発生源の排ガスからCO₂を回収し、比較的近隣の油田地帯に供給することでCO₂ EORが可能となる。圧入したCO₂は油層に貯留するため、現状で最も

CO₂利用量が多いCO₂ EORは、原油回収とともにCO₂排出削減を可能とする。

4 世界最大規模のKM CDR Process™ CO₂回収装置

JX石油開発（株）及び米国独立系発電事業者のNRGエナジー社が共同で推進している大型原油増進回収（EOR）プロジェクト向けに、世界最大規模となるCO₂回収装置（4,776トン/日）を納入し、2016年12月末に商業運転が開始された。図4にCO₂回収・圧縮設備の概観を示す。石炭火力発電所から240MWに相当する排ガスから回収したCO₂を、CO₂圧縮

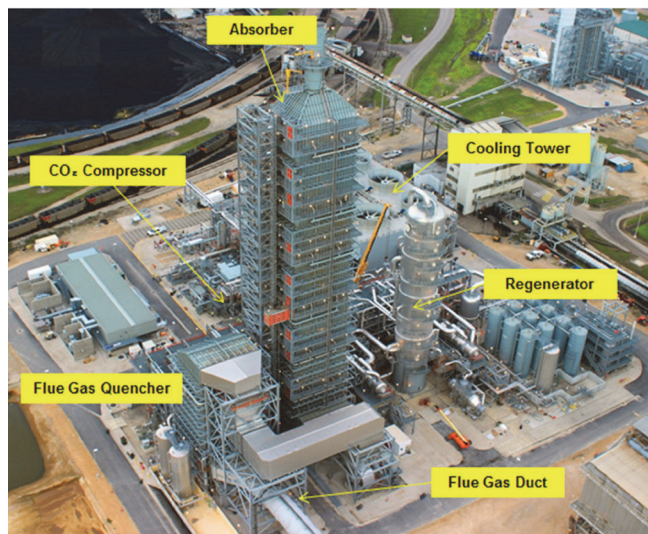


図4 米国テキサス州EORプロジェクト向けCO₂回収装置 (4,776 トン/日)^{4,5)}

機により130気圧以上に昇圧後、約130kmのパイプラインを通じて油田に輸送・圧入される。なお、CO₂圧縮機（三菱重工コンプレッサ（株）製）には、世界最大となる8段ギアドコンプレッサを採用している。

本CO₂回収装置においては、これまでの実証試験、商用機から得られた知見を活用するとともに、新しい省エネルギーシステムや環境負荷低減システム等を導入している。その結果、三菱重工エンジニアリング（株）が納入したCO₂回収装置の中でも最高の省エネルギー性能を達成している。また、大型タワーを有するCO₂回収設備を対象とした建設工事の効率化及び工期短縮も実現している。

5 まとめ

本稿では、CO₂排出削減技術の一つであるCO₂回収技術において化学吸収法について概説するとともに、一般的なCO₂の利用方法や、化学吸収法を用いた大型CO₂回収装置と回収したCO₂の活用事例を紹介した。

気候変動問題、温暖化対策に対しては、産業会への大幅なCO₂排出削減要求は今後も継続するであろうし、発電業界や鉄鋼業界への期待は大きい。

当社グループは火力発電事業を柱の一つとして高効率な発電プラント及び発生する排ガスの浄化装置（脱硝、除塵、脱硫、等）を開発・納入してきた経緯がある。本稿で紹介したCO₂回収装置の製品・技術の信頼性及び経済性の向上、ひいては普及を目指し、更なる環境・エネルギー問題の解決に貢献していきたい。

参考文献

- 1) 経済産業省：カーボンリサイクル技術ロードマップ，(2019)
- 2) Global CCS Institute：The Global Status of CCS：2017，(2017)
- 3) 地球環境産業技術研究機構：平成29年度地球温暖化対策における国際機関等連携事業（CCS 国際連携事業（CCS 関連国際機関等との連携事業））調査報告書，(2018)
- 4) 平田琢也，岸本真也，乾正幸，辻内達也，島田大輔，川崎晋平：三菱重工技報，55 (2018) 1，42.
- 5) 反町美樹：日本機械学会誌，122 (2019) 1203，18.

(2019年9月11日受付)