



特集記事・5

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

製鉄所から排出されるCO₂の有効利用技術開発

Carbon Capture and Utilization in Steelworks

茂木康弘
Yasuhiro Mogi

JFEスチール（株）
スチール研究所 環境プロセス研究部
主任研究員

1 緒言

日本は、2016年に閣議決定された「地球温暖化対策計画」において、温室効果ガスを80%削減することを掲げている。これも踏まえ、2019年6月には、「パリ協定に基づく長期成長戦略」を国連に提出した。この長期戦略においては、野心的なビジョンとして「脱炭素社会」を今世紀後半のできるだけ早い時期に実現すること、ビジネス主導の非連続的なイノベーションを通じた「環境と成長の好循環」の実現することが示されている。また長期戦略本文中の「産業部門における対策・施策の方向性」には、鉄鋼産業に関連するものとして、COURSE50、ゼロカーボンスチール、製鉄所内の未利用排熱の利用、フェロコークスなどが記されている。

ただし、地球温暖化対策計画における80%削減目標は条件付きであり、「パリ協定を踏まえ、すべての主要国が参加する公平かつ実効性ある国際的枠組みの下、主要排出国がその能力に応じた排出削減に取り組むよう国際社会を主導し、地球温暖化対策と経済成長を両立させながら、長期的目標として2050年までに80%の温室効果ガスの排出削減を目指す」と記載されている。そこで鉄鋼産業においては、国際的に公平であるという前提の元、経済成長と両立した地球温暖化対策を模索する必要がある。本稿では、その方策の一例として、「CO₂の有効利用技術開発」について述べる。

2 CO₂削減方法の一つとしてのCO₂有効利用

製造業において、温室効果ガスであるCO₂を削減する手法は、大きく分けて下記の二つとなる（図1）。

①排出するCO₂を減らす

②排出されるCO₂を分離回収し、処理する

排出するCO₂を削減するためには、製造プロセスに投入するエネルギーや原料の炭素を減らす、省エネを行い投入エネルギー量の低減を図ることが必要である。しかしながら、鉄鋼業のように原料として（鉄鋼業の場合は鉄鉱石の還元剤として）炭素を用いている場合には、排出CO₂量低減には限度がある。どうしても排出されてしまうCO₂については、分離回収の後に温暖化に影響を与えないように処理する必要がある。処理には二つの方法がある。一つはCO₂を地中に隔離し大気に放出されないようにする方法（CCS:CO₂ Capture & Storage）であり、もうひとつがCO₂有効利用、すなわちCCU（CO₂ Capture & Utilization）である。CCSでは、大量のCO₂を処理できるという利点があるものの、経済性の面で課題が残る。一方、CCUは、処理量はCCSに及ばないが、経済性の課題を解決できる可能性がある。

このCCU技術開発について、2019年6月に経済産業省から「カーボンリサイクル技術ロードマップ」が発表された。この中では、下記が掲げられている。

・カーボンリサイクル:CO₂を資源としてとらえ、これを分離・回収し、鉱物化や人工光合成、メタネーションによる素材や燃料への再利用とともに、大気中へのCO₂排出を抑制

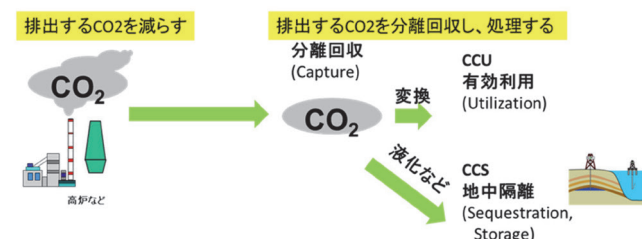


図1 CO₂削減方法

- ・カーボンリサイクルは、CO₂の利用 (Utilization) について、世界の産学官連携の下で研究開発を進め、非連続的イノベーションを進める取り組み
- ・省エネルギー、再生可能エネルギー、CCSなどとともカーボンリサイクルは鍵となる取り組みの一つ

このロードマップにおいては、CCUを分類し、EOR (Enhanced Oil Recovery : 石油増進回収法) やCO₂の直接利用 (ドライアイスとしての利用など) 以外の、CO₂を炭素資源としてほかの物質に変換して利用する技術を「カーボンリサイクル技術」として定義し、開発を進めるとしている (図2)。このロードマップでは、カーボンリサイクルを4つに分類している。すなわち、基幹物質およびそこから製造される化学品、燃料、鉱物、その他、である。このうち、化学品や燃料などは、CO₂を水素と反応させてメタンやメタノール、COなどの有価物を製造することが想定されている。

3 CO₂有効利用技術の一例

JFE スチールでは、CO₂削減技術開発の一環として、近年、CCU技術の開発に取り組んでいる。以下その概要について述べる。

3.1 CO₂の分離・回収

製鉄所におけるCO₂分離回収を考えた場合、そのCO₂源としては、排出量が多く、かつCO₂濃度が高い高炉ガスが最適である。環境調和型製鉄プロセス技術開発プロジェクト (COURSE50) においても、高炉ガスから、化学吸収法および物理吸着法により分離回収する技術について開発を行ってき

ている¹⁾。さて、CCU用、特に水素と反応させて有価物質を製造することを想定した場合、必ずしもCO₂を高純度で分離回収する必要は無い。CO₂は化学反応の原料となるため、その純度が低くなれば反応効率はそれに応じて下がるものの、それが許容される範囲であれば、低純度でCO₂を分離回収することにより、そのコストを低減できる可能性がある。

CO₂の分離回収方法には表1に示すようなものがある。この中で、化学吸収法、物理吸収法は、原理上、CO₂が高純度で回収できる手法であるが、それゆえ回収CO₂の目標純度を下げても、分離コストの低減にはつながりにくい。一方、物理吸着法では、現状の一般的な手法においては、高純度化のための工程により多くの動力が使用されているため、低純度化による分離コスト低減が見込める²⁾。そこで、高炉ガスからのCCU用CO₂分離回収技術として、物理吸着法 (その内の手法の一つであるPSA法 : Pressure Swing Adsorption法) を選定し、開発を進めている。

3.2 CCU技術 (CO₂変換技術)

CCUにより有価物を製造する検討は種々行われているが、製鉄所から排出される膨大なCO₂の処理の観点からは、その物質のマーケットの大きさが重要である。カーボンリサイクルロードマップに示された物質の中で、そのマーケットが大きいものは、メタンとメタノールとなる³⁾。メタノールは将来、世界での生産量が1億tになるとの予測もある。また、製鉄所での有価物製造を考えた場合、生産物が常圧・常温で液体であり、保管・輸送しやすいメタノールは有望であると考えられる⁴⁾。CCU技術開発においては、目的物質を一つに絞る必要性は必ずしもないものと考えられるが、ここでは一例

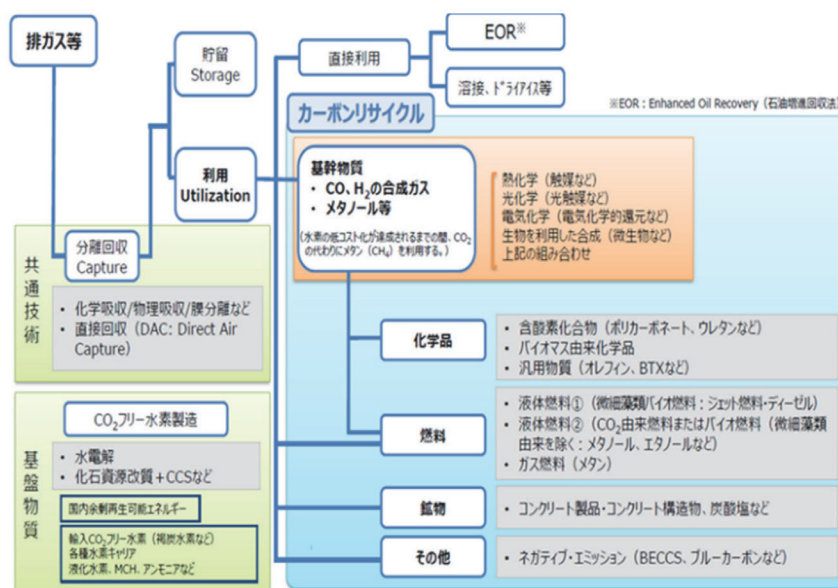


図2 カarbonリサイクルロードマップ(経済産業省「カーボンリサイクル技術ロードマップ」
<http://www.meti.go.jp/press/2019/06/20190607002/20190607002.html>より)

表1 分離回収技術分類

分離回収技術	技術概要	適した原料ガスの圧力とCO2濃度
物理吸着法 (PSA法)	多孔質固体に圧力差を利用してCO2を吸・脱着させる	常圧～中圧 高濃度
化学吸収法	CO2とアミン類との化学反応を利用	常圧 低濃度～高濃度
物理吸収法	CO2を液体中に溶解させる	高圧 高濃度
膜分離法	分子径や拡散現象を利用して選択的に透過させる	高圧 高濃度

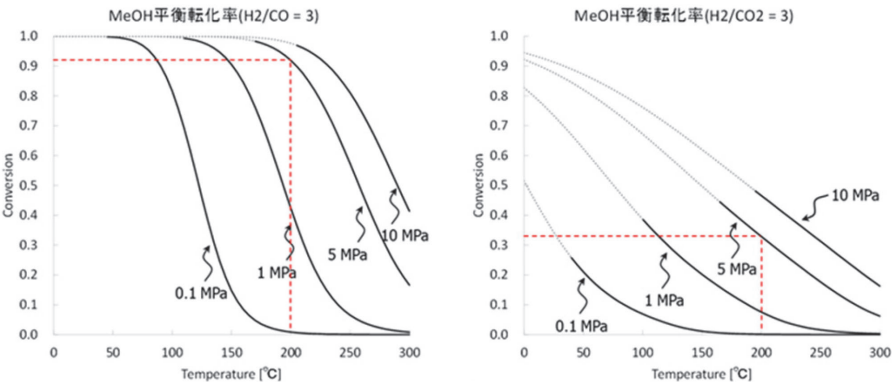


図3 メタノール合成反応の平衡

としてCO₂からのメタノール製造について以下に述べる。
メタノールは、通常、COと水素から製造されている。CO₂と水素からのメタノール合成反応と合わせ、下に反応式を記す。また、それぞれの反応の平衡転化率を図3に示す。



どちらの反応においても低温・高圧が有利である。そのため、低温で高活性な触媒が求められる⁵⁾。また、CO₂を原料として用いた場合は、平衡転化率の低さも課題となる。
CO₂からのメタノール製造技術そのものは、古くから検討されており、また欧州では近年、多くのプロジェクトが進行している⁶⁾。中でもCRI社は、アイスランドにおいて、年間4,000tのメタノールを生産するプラントを2012年から稼働させている⁷⁾。
JFEスチールでは2015年より（公財）地球環境産業技術研究機構（RITE）とともにCO₂からのメタノール製造に関して検討を開始し、上述の平衡転化率の低さを回避する新たなメタノール製造プロセスを考案した⁸⁾。図4にその概要を示す。新プロセスは水を高選択的に透過するゼオライト膜の中でメ

タノール合成反応を行うものであり、反応場から水が除去されることにより上記（式2）の平衡が生成物側にシフトするため、平衡制約を超えて、高い反応率を得ることが期待される。

3.3 全体最適化

CO₂の分離・回収とCCU技術について上述したが、個別技術の開発もしくは導入のみならず、原料ガスから最終製品（有価物）までに至る、全体プロセスの最適化を図ることも重要である。JFEスチールではRITEとともに2017年よりNEDOの「次世代火力発電等技術開発／次世代火力発電基盤技術開発／CO₂有効利用技術開発」プロジェクトに参画し、「CCU向け低コストCO₂分離回収技術の検討、および回収技術とCO₂排出源、有効利用（変換）技術の組み合わせにおいて最適なCO₂変換技術のプロセスの概念設計」、について検討を進めている。全体最適化の概念を図5に示す。
例えば分離コスト低減のため回収CO₂純度を下げた場合、メタノール合成反応の最適条件は純CO₂を原料とした場合とは異なってくる。また、CO₂源として高炉ガスを用いると、その中に含まれるCOがメタノール合成反応に供されることが想定されるが、その時の最適反応条件も変わってくる。逆にメタノール合成反応の観点から、CO₂分離・回収目標値が

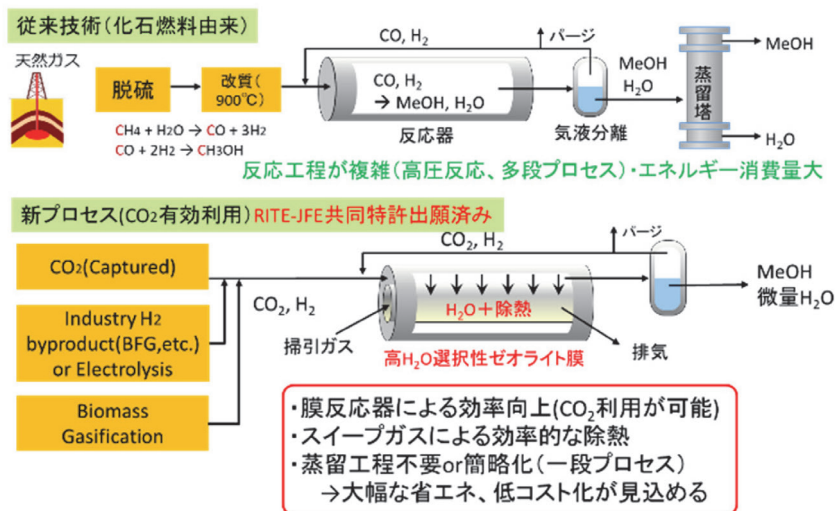
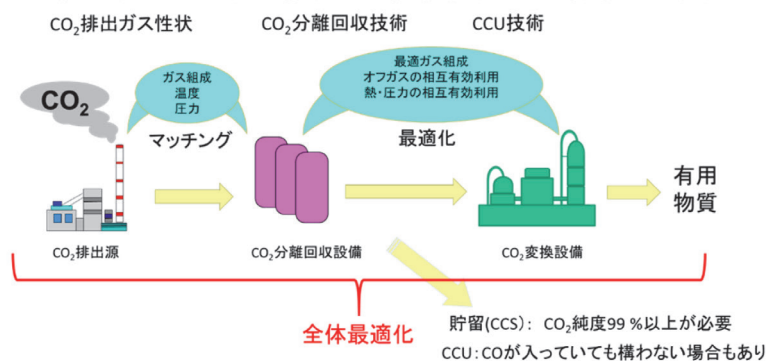


図4 新規メタノール製造プロセス

✓ (CO₂排出源) × (CO₂回収技術) × (変換技術)の全体最適化検討

CCU技術の全体最適化イメージ

図5 全体最適化イメージ

規定されるケースもある。メタノールに限らず、CO₂の有効利用においてはこのような全体最適化の観点が必要である。

4 結言

経済成長と両立した地球温暖化対策として、CO₂の有効利用技術開発について述べたが、ここで挙げたものはあくまで一例である。CO₂削減のためには、パリ協定長期戦略で述べられているように、国内外における技術シーズ発掘・創出し、官民リソースを最大限投入して、様々なイノベーションを推進することが必要である。

謝辞

本稿記載の技術開発の一部は、NEDO「次世代火力発電等技術開発／次世代火力発電基盤技術開発／CO₂有効利用技術開発」の援助を受けて行った。

参考文献

- 1) 齊間等, 茂木康弘, 原岡たかし: JFE技報, 32 (2013), 44.
- 2) L. Riboldia and O. Bollanda: Energy Procedia, 114 (2017), 2390.
- 3) https://www.icef-forum.org/platform/upload/CO2U_Roadmap_ICEF2016.pdf, (accessed 2019-08-30)
- 4) G.A. Olah, A. Goepfert and G.K.S. Prakash: Beyond Oil and Gas The Methanol Economy, Wiley-VCH, Weinheim Germany, (2006), 2636.
- 5) 亘理龍: 電力中央研究所研究報告書, V13006 (2014)
- 6) 大山聖一: 日本エネルギー学会誌, 74 (1995), 137.
- 7) 亘理龍: 電力中央研究所研究報告書, V17003 (2018)
- 8) 公開特許: 2018-8940

(2019年9月25日受付)