



特集記事・3

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

焼結、コークスでのCO₂削減およびNO_x等削減技術の動向

Trends of CO₂ Reduction and NO_x Reduction Technology in Sintering and Coking Process

齋藤公兎
Koji Saito

日本製鉄(株) 技術開発本部
顧問

1 はじめに

まず日本の鉄鋼業の置かれた位置を、特に製鉄分野を中心に再度確認したい。その特徴として、以下の8点で整理ができる。①資源をほとんど輸入依存、②完全な装置型産業構造(量で勝負)、③国内のみの消費に依存していた今までの各国での動きとは異なり勝負はグローバル、④国内では実は寡占、⑤国内では古い産業と見られているため、人材確保難や異分野技術が入りにくい環境、⑥実は鉄鋼産業は多要素技術集団である、⑦世界での製鉄分野では技術がリード(技術先進性)が必須、⑧製鉄のプロセスは特に大きく変化していないが、それを取り巻く環境が大きく変化している。また実際に製鉄へのインプット条件資源の高騰と劣質化の加速、アウトプットでの環境(CO₂やSO_xやNO_x等)や防災に関する厳しい視点の増加である。つまりサンドイッチのようにインプットとアウトプットの条件が製鉄を取り巻く環境では非常に厳しくなっているのである¹⁾。

そういった環境下での製鉄分野の技術進歩は、コークス、焼結、高炉という各プロセスの技術の発展だけでなく、それらを成し遂げるための異分野技術の進歩、資源環境に応じた新たな視点からの開発やCO₂に代表される環境負荷に関わる技術の進歩等の総合的な取り組みである。ここでは主に焼結やコークスプロセスを中心とした環境関係の技術進歩を受けて全体総括しながら、製鉄が置かれている環境(いわゆる環境問題だけでなく様々な因子、特にSDGs的な視点も含めて)の変化を日本での取り組みに関してまとめた。

2 コークスプロセスでのNO_x削減技術の動向

高炉法による鉄鋼の製造において、コークスは不可欠な存在であり、コークスを生産するコークス炉は鉄鋼生産にとって重要な設備である。高炉が20年程度で改修されるのに対し、コークス炉は高度成長期の1960~70年代に建設されたものが稼働を続けている場合も多く、50年以上も稼働しているコークス炉も存在する。これらのコークス炉は老朽化が著しく、更新や新設が必要な時期を迎えている。コークス炉の老朽化はすでに1990年代から重要な課題と認識され、炉体補修等の技術開発が進む一方で、コークス炉のリプレイスに向けて、次世代コークス製造プロセスの検討が行われてきた。コークス炉は建設費が高額な設備であり、新たに建設するコークス炉には高い生産性をもち初期設備費が相対的に抑制されることが求められる。また、高炉に求められる強固なコークスを製造するためには、加熱時の粘結性に富むいわゆる粘結炭が原料炭として必要とされるが、石炭資源の中では良質な粘結炭の割合は限られているため、粘結性の劣る非微粘結炭の多量使用技術を開発することが、足元のコークス製造コスト削減に寄与するとともに、石炭資源の有効利用の観点からも大いに求められる。さらに、高温プロセスであることからエネルギー消費を抑制することや環境への対応力が向上することも期待される。これらを背景に、1994年から2003年にかけて日本鉄鋼連盟に参加する企業が参画した国家プロジェクトとして、SCOPE21(Super Coke Oven for Productivity and Environmental enhancement toward the 21st century)と呼ばれる次世代コークス製造技術開発が行われた²⁵⁾。その成果をもとに、日本製鉄(株)では大分、名古屋

屋の新設コークス炉にてSCOPE21 プロセスを実機化した。ここではSCOPE21 プロセスの開発概要と実機化された新設コークス炉の設備状況について以下に説明する。

SCOPE21 プロセスは高生産性を目標としているため、石炭の乾留に必要な熱量も従来炉よりも多く供給する必要がある。すなわち、燃焼ガスの供給量が従来よりも増加することになる。一般に燃料ガス量を増加させると局部燃焼が顕著となり、高さ方向の均一加熱が達成できないだけでなく、燃焼排ガス中のNO_x濃度も上昇し、環境上好ましくない。そこで、既設炉より燃料ガス量が2倍とした条件下でも均一加熱、低NO_x燃焼が可能な燃焼構造を開発する必要があった。燃焼構造を最適化するために、実炉大のフリューで構成される燃焼試験炉を建設して、吉田らによって技術的検討が行われた。燃焼試験炉は石炭を乾留する代わりに、相当する熱量を水冷壁から抜熱する構造で、既存炉型と開発型のフリューを備え、比較評価した^{6,7)}。

シミュレーション計算結果等をもとに、図1に示すような多段燃焼構造(空気3段吹込み)を採用するとともに、炉底部のポート形状を変更した検討の結果、図2に示すような、燃料ガスポートと空気ポートが、隣り合せて配置された構造より、千鳥型に配置した構造のほうが、燃料ガスと空気との接

触が抑制され、炉下部の局所的な燃焼が抑制され、NO_x濃度の低減に大きく寄与することが明らかになった。さらに、隣りあう2つのフリュー(ツインフリュー)間の仕切り壁の底部にサーキュレーション孔を設けて、排ガスの一部を循環することも、低NO_x化に寄与することが確かめられた。

これらの構造を備えた開発型フリューは、図3に示すように、従来型フリューに比較してNO_xを大幅に低減でき、新設炉に適用される排出基準(170ppm)を十分満足する水準であることが確認された。また、パイロットプラント炉も同様の燃焼室構造で設計され、石炭の乾留による抜熱される条件でも、燃焼試験炉と同等の低NO_xが得られることが確かめられた。2007年の室蘭6コークス炉のパドアップ以降の日本製鉄でのコークス炉新設において、すべてこの燃焼構造によるNO_x削減技術を織込まれている。



図1 多段燃焼構造(空気3段吹込み)

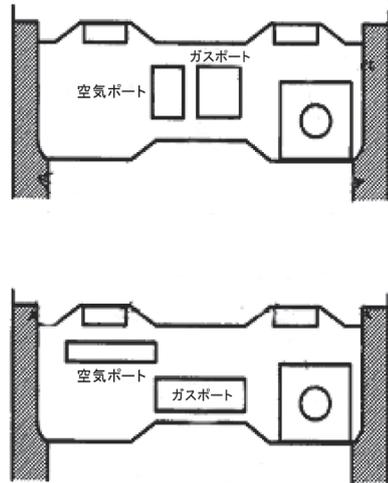


図2 燃焼室底部の構造(平面図)

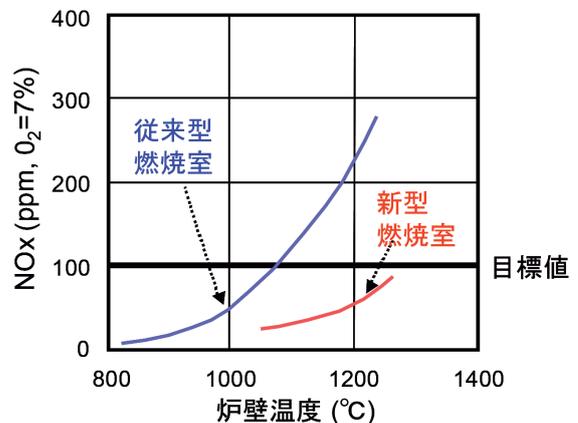


図3 炉壁温度と燃焼排ガスNO_xの関係

3 コークスプロセスでのCO₂削減技術の動向

SCOPE炉は、例えば大分では2008年2月のコークス炉稼働開始以降、順次稼働率を上昇させて2009年1月には、稼働率184.5%を達成した。これは石炭装入温度の上昇に伴って、伝熱計算による予測どおりに乾留時間が短縮され、装入温度250℃、炉温1270℃で乾留時間13hによるもので、これも非常に高い省エネルギー（CO₂削減）である。更に現在、日本鉄鋼協会ではSCOPE21以上に新たなCO₂削減に取り組んでいる研究会がある。それは、従来の良質な原料に頼らず、現在使用されていない劣質で安価な炭素資源を利用しつつ、将来の大幅な省エネ・省CO₂に資するコークス製造技術の基礎研究を推進することを目的とした「資源拡大・省CO₂対応コークス製造技術」研究会である⁸⁾。

この研究会の目的には①脱CO₂資源であるバイオマスを利用する技術を開発し、原料面からの省CO₂を図る②劣質炭素資源（バイオマス、褐炭、亜瀝青炭）を使用しつつ、現状並みの高強度コークスを製造するため、改質技術の原理原則を追究・理論化し、基盤技術の確立を目指す③劣質炭素資源（バイオマス、褐炭、亜瀝青炭）に対応しつつ、省エネ、省CO₂に資する新規の乾留技術の基礎研究を行うという3点があり、従来のコークスプロセス研究とは抜本的に異なる斬新的なアプローチの研究である。研究の概要を図4に示す。

具体的なアプローチとして先の日本鉄鋼協会での研究会の成果⁹⁾を取り込みながら更に4つの取り組みがなされており、一番に目石炭の改質技術の深化では、溶剤改質処理により得た改質炭は、原料炭を超えるコークス強度を発現したことという研究成果¹⁰⁾を受けて、改質技術の原理・原則追究、

理論化による最適条件探索並びにバイオマスへの適用拡大を狙う。次に2番目として劣質炭を微粉碎+熱間成型する技術を開発されたことを受けて^{11,12)}、成型化技術のバイオマスへの適用と成型物の大型化（亀裂抑制/収縮制御）とバイオマスのバインダー（融着）化技術の開発が進められている。また3番目としては、新規乾留技術による省CO₂技術への挑戦として、加圧乾留（数気圧程度）によるコークス歩留り向上、高品質化と低温乾留として800℃以下を目指して省エネ、省CO₂への貢献する取り組みが進められている。最後の4番目として改質炭・バイオマス資源の構造解析、加圧・低温乾留時の炭素化機構の解明をすることで、高圧低温乾留プロセスの基盤技術の確立を目指している。このような取り組みで、図5のようなCO₂削減に関して非常に大きな成果が期待されている。

また2000年4月に容器包装リサイクル法が完全施行され、容器包装品を対象とした一般廃プラスチックの再資源化が開始された。また、日本の鉄鋼業界の動きとしては、日本鉄鋼連盟が地球温暖化防止対策のための省エネルギー自主行動計画として2010年までに1990年に比較して10%のエネルギー削減に加え、100万t/年規模の廃プラスチックを製鉄原料化することによって1.5%のエネルギー使用量を削減する目標を掲げている。このような背景で、日本製鉄（株）はコークス炉を使用した廃プラスチックの化学原料化技術を開発し、2000年に世界で初めて実機化している。循環型社会の構築に向けた取り組みとして、コークス炉を活用した廃プラスチックの再資源化技術の開発は間接的なCO₂削減に貢献している¹³⁾。

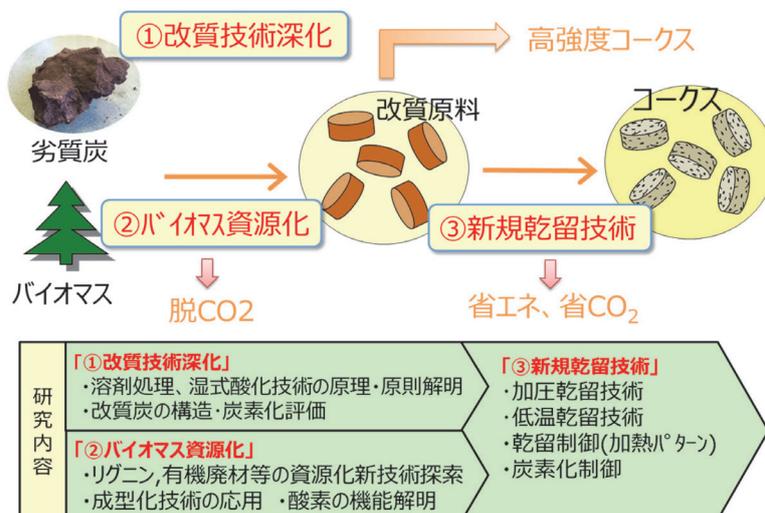


図4 「資源拡大・省CO₂対応コークス製造技術」研究会の概要

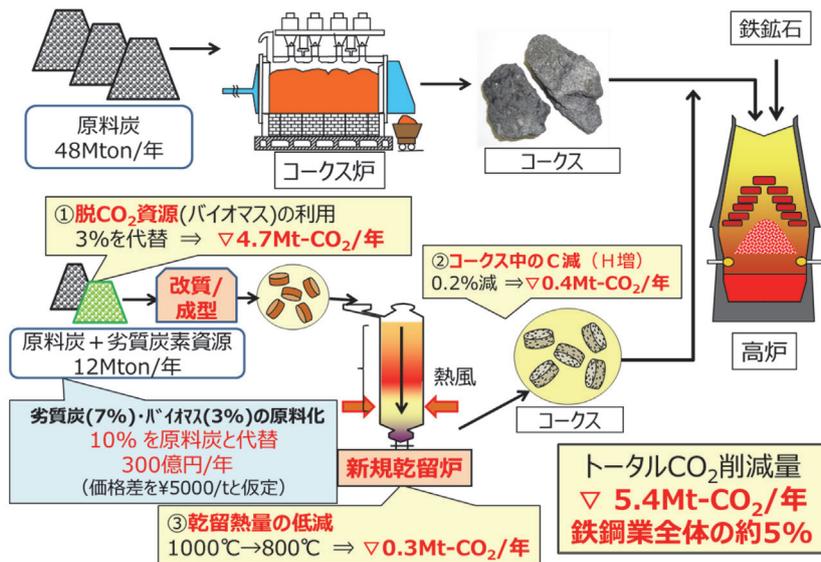


図5 CO₂排出量削減及びコスト削減への貢献

4 焼結プロセスでのNO_x削減技術の動向

焼結工程は製鉄所における最大のNO_x排出源であるため、1973年のNO_x排出規制を機に、鉄鋼各社では焼結機排ガスのNO_x低減研究を開始した。これまでに、多くの製鉄所で高炉の拡大改修に合わせて焼結機の機長延長などが実施され焼結鉄の生産量は増大したが、NO_x規制値は緩和されることなく厳しくなっていることから、焼結機におけるNO_xの低減対策が不可避となっている。

これまでの精力的な研究の結果、焼結排ガス中のNO_xは粉コークス等の燃料中窒素由来のFuel NOを主体とし¹⁴⁾、粉コークス表面に形成されるガス境膜内の酸素濃度を低下させる高温燃焼がNO_x低減に有効であることが明らかとなっている¹⁵⁾。実機の焼結操業では、鉄鉱石造粒用バインダーとして生石灰を配合する通気性改善技術がNO_x低減に有効であるが、燃焼速度向上に伴う高温燃焼の促進によって効果が発現すると考えられる¹⁶⁾。その他、粉コークス粒度制御の視点でも検討が行われており、低温で燃焼しやすい0.5 mm以下の微粉コークスを低減することで、NO_xを抑制できることが知られている¹⁷⁾。しかしながら、実プロセスにおいて微粉を篩分け除去することは困難であり、実用面での展開が図られていない。

1992年にKasaiらは、予熱した炭材の燃焼実験からカルシウムフェライト組成粉を粉コークス表面に被覆するNO_x低減法の有効性を提唱している¹⁸⁻²¹⁾。このカルシウムフェライト被覆法(CF被覆法)は、粉コークスの燃焼環境を被覆層の

触媒効果や熔融反応によって制御する新しい技術思想であり、確実なNO_x低減効果が確認されている。しかしながら、粉コークス表面に厚い被覆層を形成させることは燃焼不良を招き生産性を悪化させる恐れがある。また、大量処理を前提とした商用プラントにおいて、被覆層の厚みや成分を精密にコントロールできるプラントイメージを描くことが難しかったため、実用化には至っていない。日本製鉄ではKasaiらのCF被覆法の着想をさらに発展させ、より簡素な処理工程で高いNO_x低減効果を楽しむことができる新しいプロセスの開発検討を行った。粉コークス表面被覆層形成や微粉低減処理のNO_x生成と生産性に及ぼす影響を詳細に調査した結果、NO_x低減技術として粉コークス表面にCaOのみを被覆した改質技術(Lime coating coke : LCC)の有効性を確認することができた。ここでは、このLCC技術の開発について説明する²²⁾。

新しいNO_x低減技術の開発を目的として、粉コークスのCaO単独被覆処理による燃焼制御技術(LCC)の検討を行った。その結果、図6のように粉コークス表面にCaO10%の被覆層を形成することで燃焼性を悪化させることなくNO_xを低減できることがわかった。CaO被覆層は崩壊しやすいため、ドラムミキサーでの他原料との混合時間を極力短くすることが重要であり、混合時間を短縮した条件では約18%のNO_x低減効果を楽しむことができた。このLCCの効果は、CaO自体の反応ではなくカルシウムフェライト融液の生成を介して発現されることも明らかになった。本法と微粉コークス除去にはNO_x低減効果の加算性が成り立ち、粉コークス粒度調製によってさらに高い効果を得ることも可能である。これらの結果を受けて、図7のように大分製鉄所で実機化されて、図

8のようなNO_x削減の操業が実施されている。このようなCaO改質処理は、粉コークス燃焼性を直接制御する新しい視点のNO_x低減技術であり、今後他への実機展開に向けた検討が期待されている²³⁾。

焼結工程では、装置内に充填された原料層の内部で焼結反応が進行するため、NO_xの発生メカニズムは複雑で不明な点が多い。平は充填層内部での反応の理解により、さらなるプロセス改善を可能とすることを目指し、焼結反応中の焼結層内部の温度分布と、燃焼に伴うNO_x発生について、その場観察を行った²⁴⁾。図8に示すような開発された装置で、温度測定では、焼結層内部で熱電対を走査し、得られた温度データを解析することで、充填層内部の温度分布の時間変化を可視化した。燃焼時のNO_x発生に関しては、焼結層内部のガス分析を実施し、ガス組成の経時変化を解析することで、燃焼帯内の下層側においてNO_x発生量とNO_x転換率の双方が大きいことを確認した。このような新しい手法が適用されることで、既存技術の効果を検証するとともに、今後の技術開発に役立っていくことに大いに期待される²⁵⁾。

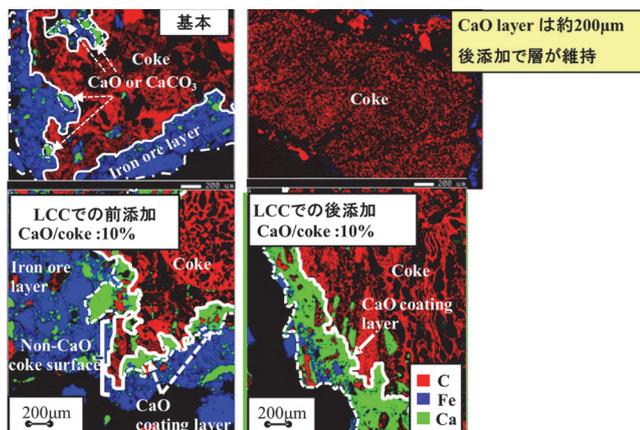


図6 LCCでのコークス表面での被覆層の様子

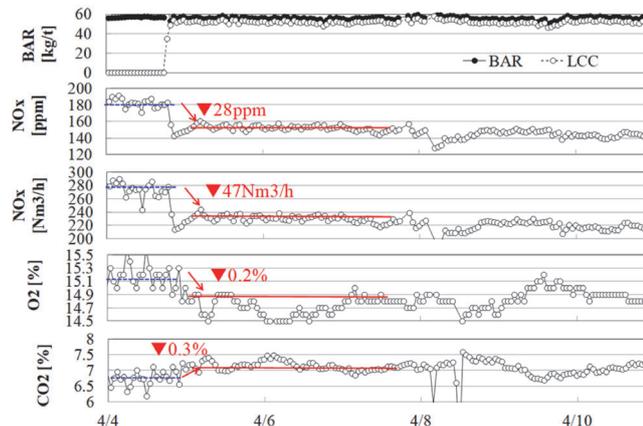


図7 LCCが導入された大分製鉄所での操業結果の例

日本製鉄(株)の和歌山製鉄所では上工程更新投資として新第1高炉(2009年7月稼動)、新第2高炉(2019年2月)を建設し、4、5高炉からのスイッチを行った。その結果粗鋼生産量は380万tから500万t/年となり、焼結機においては1、2高炉の所要量に対応するために2009年1月に既設の第5焼結機の能力増強および地域環境保全投資として排煙脱硫脱硝設備および新型冷却機を設置したので、その概要は、5焼結機の原料、成品、排ガスシステムを共用する形で焼結機本体、クーラー等を新設した。生産能力は上工程更新投資の最終形である粗鋼500万t/年体制を踏まえ、かつ従来からの焼結能力不足を補うために年間240万tの生産増を計画した。また、増強に際しては、環境保全として排ガス処理設備には発塵防止だけでなく、排熱回収を効率的に行う新型円形冷却機の導入等、地球環境に留意した焼結機を目指した設計がなされた²⁶⁾。

冷却機発塵防止対策では、冷却機を選定するにあたっては省スペースの観点から円形テーブル型を採用した。さらに高層厚・下層吸い込み上方吸出し方式とし、側板ルーバーからの冷却空気が全域で淀みの無い一様な対向流で赤熱焼結鉱と均一に熱交換する伝熱空間を作ることで、冷却風量の低減と加熱蒸気の生成が可能となった。また誘引ファンによる全量吸引のためクーラー周辺に放出されていた粉塵が皆無になり、またボイラーで排熱回収された排ガスは集塵機または焼結機へ戻す事によって、大気への粉塵飛散防止を図っている。また地域環境保全投資として図9のように、脱硫率80%、脱硝率70%を達成する活性炭充填方式の排ガス処理設備を導入した。脱硝効率をあげるために吸着塔を脱硫と脱硝の2段設置し、脱硫後の排ガスにアンモニアを添加する方式を採用することで、焼結排ガスでは例の無い高レベルの脱硝を目指した。また吸着した硫黄分については活性炭を約450℃に加熱する事で脱離し、濃度約20%のSRG(SO_x Rich Gas)とし

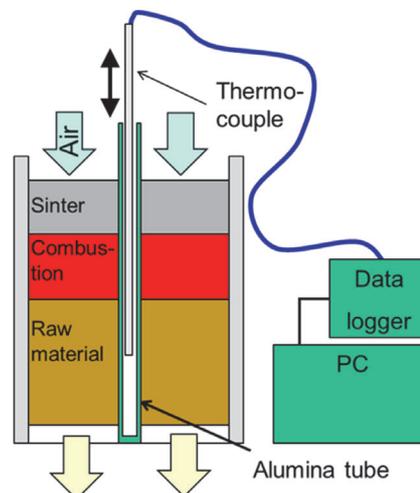


図8 温度測定のための鍋試験の概略図

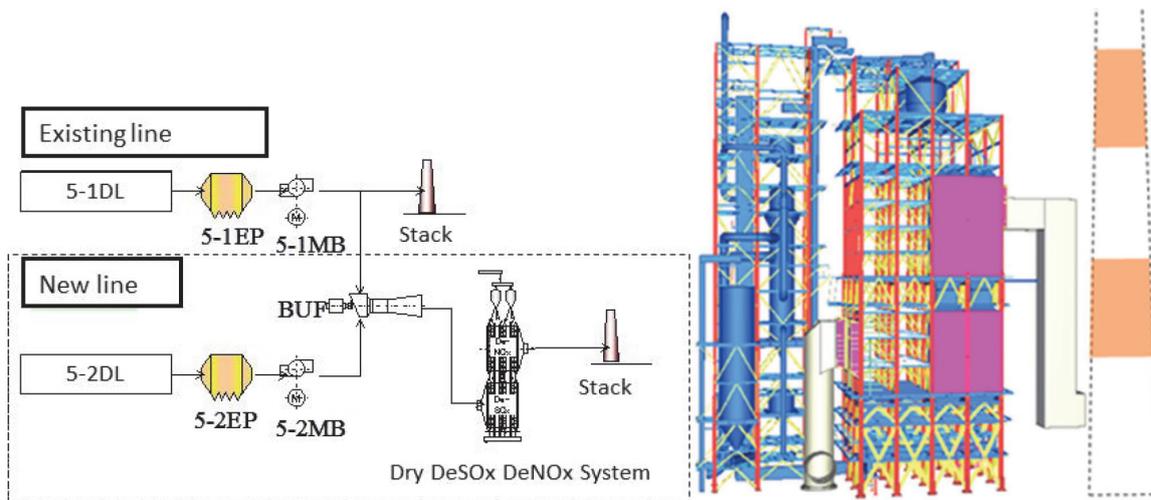


図9 5焼結排ガスフローと排ガス処理設備概略図

て石灰石膏法による湿式脱硫装置で石膏として回収する事とした。このように、実際の製鉄所での焼結プロセスにも環境対策が非常に進んでいる。環境に関する規制は益々厳しくなり、今後もこのような環境対策の進んだプロセス導入が進むと期待される。

5 焼結プロセスとCO₂削減技術の動向

焼結プロセスにおけるCO₂削減の取り組みの代表例は日本鉄鋼協会で平成21年度に立ち上げられた「低炭素焼結プロセス原理の創成」研究会²⁷⁾である。鉄鉱石焼結プロセスにおけるCO₂排出量削減可能性を定量評価し、新規焼結技術原理創成を目指すことを目的に、具体的には、①焼結層内炭材粒子の燃焼速度と熱移動を詳細解析し、限界凝結材比の概念を整理、定量化②コークス粉以外の凝結材 (Biomass、廃棄物由来炭材や金属鉄含有リサイクル原料) の使用メリット最大化とデメリット最小化に取り組み、図10に示すような数値目標を掲げて、非常に大きな成果を挙げている。

WG Iでは燃焼・酸化反応速度解析、WG IIでは層構造・通気性変化解析、WG IIIでは低炭素焼結プロセス検討という活動を通して、固体C系限界凝結材比の見極めやCa-フェライトによらないFeO系融液による強度確保 (革新塊成化技術) や固体C燃料によらない新焼結プロセス (新燃焼機構) の視点で研究が進められた結果、Kasaiらを含めた多くの研究者からISIJ International, Vol. 53 (2013), No. 9,²⁸⁾に多くの新知見が報告されている。今後の発展が更に期待される。

その他にも報告があり、焼結鉱の性能向上と高効率生産は、高炉の生産性や焼結鉱製造時のCO₂等の排出量削減に極

【実プロセスにおける具体的なCO₂発生量削減目標】

トータル削減率: 100 kg-CO₂/tHM; ton Hot Metal (27.3 kg-C/tHM)

- 1) 焼結層内燃焼反応の効率化:
20 kg-CO₂/tHM (5.5 kg-C/tHM)
- 2) 融液生成と層構造変化の適正化:
15 kg-CO₂/tHM (4.1 kg-C/tHM)
- 3) コークス以外の凝結材使用:
65 kg-CO₂/tHM (17.7 kg-C/tHM)

(参考) 粗鋼1トン当たりのCO₂排出量の現状:
一貫製鉄: 2000 kg
電気炉: 460 kg

図10 「低炭素焼結プロセス原理の創成」研究会で示された実プロセスにおける具体的なCO₂発生量削減目標

めて重要である。しかし、焼結反応の解析を行うことは、鉄鉱石と炭材を混合、造粒した疑似粒子の充填層内で起きる不均一な反応であり困難であった。藤部ら²⁹⁾は、そこで、焼結充填層内の局所的な反応条件について着目し、均一な環境下での焼結模擬実験が可能な手法の開発を行った。焼結プロセスの特徴である急速加熱と吸引による通気を実現しつつ、焼結模擬試料の充填層を燃焼させ、それに伴うガス発生をリアルタイムモニタリング可能な焼結ガス反応解析手法を開発した。本手法を用いた焼結模擬試料においては、炭材量、共存させる化学物質 (鉄鉱石、アルミナ) により、発生ガスの成分比と量が変化したことから、焼結プロセスでは、特に、COの二次燃焼が変化しやすいことが分かった。焼結プロセスに適した炭材を探索、評価するためには、不完全燃焼となる反応プロセスの明確化とともに、解析を進めることが有効であると示唆された。

6 まとめと今後の展開

今年G20が日本で開催されて、そこで非連続的なイノベーションは3E+S (エネルギー安全保障、経済効率性、環境+安全性) を向上させるためのエネルギー転換の主導を日本が主張し、その中で図11のようにCCUのロードマップが提案された³⁰⁾。現在は鉄鋼業はCO₂問題で色々と責められているが、CCUの現実化が可能になれば逆に有効な資源を生み出すという構図に大きく変化する可能性がある。当然CCUのような技術は鉄鋼業のみで成し遂げられる訳ではなく、まさに産業間連携が必須である。つまり異業種技術やプロセスの導入であり、異業種とのコラボレーションとなる。CO₂の大部分を生み出してしまっている製鉄分野が中心となって、新たなプロセス構築を考えていく必要がある。そのような柔軟な創造力を身に付けていくことが必須と思われる。

CCUの中にブルーカーボンがある。これはまさにスラッグの有効活用である、近年、製鋼スラッグの主要な適用先である沿岸域は、ブルーカーボンの貯留場所、二酸化炭素の固定場として期待されている。ブルーカーボンは、海洋生物の作用によって海中に取込まれた炭素のことであり、2009年に国連の環境計画部門 (United Nations Environment Program、UNEP)、食糧農業機関 Food and Agriculture Organization of the United Nations、FAO) および教育科学文化機関 United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization UNESCO) が共同で発表した報告書「Blue Carbon」(以下、UNEP レポート) において初めて定義された³¹⁾。UNEP レポートの中で、地球環境におけるブルーカーボンのインパク

トの大きさが提唱され、地球上の生物が吸収する二酸化炭素 (グリーンカーボンのうち、陸上では半分が、残り半分強 55% が海洋、特に沿岸部で吸収していると示された。その概念を図12に示す。今後の発展が期待される³²⁻³⁴⁾。

製鉄分野のこれからは、ベースとしてはコークス、焼結、高炉という各プロセスの技術の発展が益々期待される。同時にそれらを成し遂げるための異分野技術の進歩、資源環境に応じた新たな視点からの開発やCO₂に代表される環境負荷に関わる技術の進歩等の総合的な進化と深化が必須である。世界規模での製鉄が置かれている環境 (いわゆる環境問題だけでなく様々な因子、特にSDGs的な視点も含めて) の変化も含めた議論を深化させて、今後のあるべき製鉄プロセスの将来像を自ら常に追い求めていくことを忘れずに歩んでいただきたい。製鉄分野はいわゆるSDGsに向け、RE (資源効率) の向上のため、日本の鉄鋼業の製造部門と研究部門の一体化での強みと例え

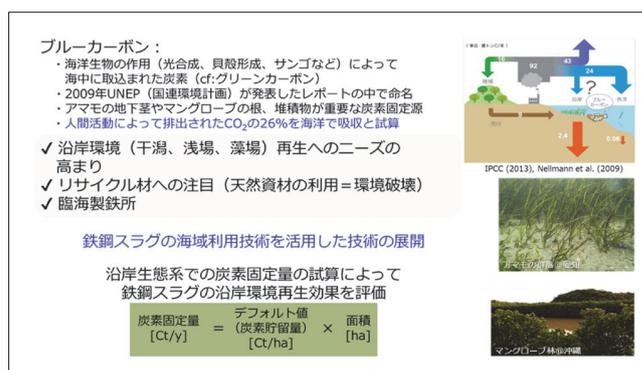


図12 ブルーカーボンの概要

CCUS/カーボンリサイクル

● カーボンリサイクル: CO₂を資源として捉え、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利用等を通じ、大気中へのCO₂排出を抑制していく。

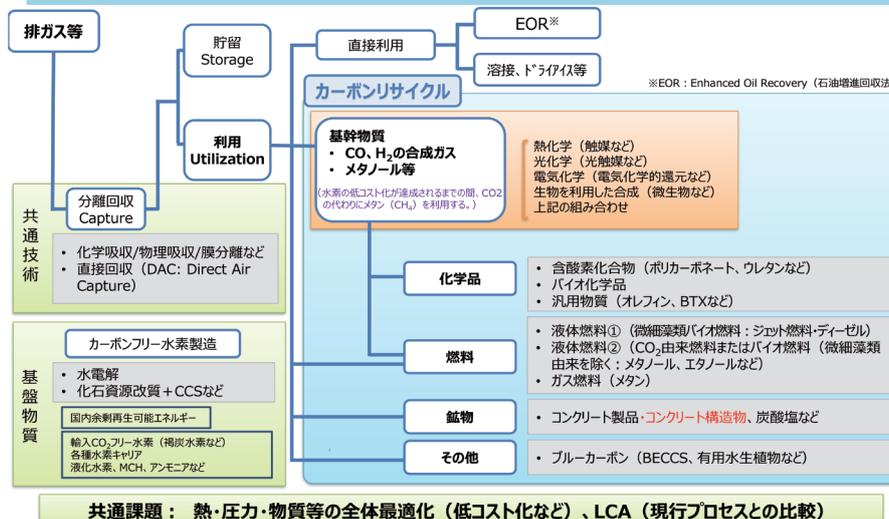


図11 経済産業省から発表されたCCUのロードマップ

ばITを組み合わせ、真のCE（循環経済）を実現するため、どう考え、どう行動するか？が今後10年に求められている。

製鉄分野のこれからの10年は、ベースとしてはコークス、焼結、高炉という各プロセスの技術の発展が益々期待される。同時にそれらを成し遂げるための異分野技術の進歩、資源環境に応じた新たな視点からの開発やCO₂に代表される環境負荷に関わる技術の進歩等の総合的な進化と深化が必須である。すべての製鉄に関わる研究者やエンジニアは自ら積極的に新しい異分野技術を探し製鉄分野に導入していくことが急務である。世界規模での製鉄が置かれている環境（いわゆる環境問題だけでなく様々な因子、特にSDGs的な視点も含めて）の変化も含めた議論を深化させて、今後のあるべき製鉄プロセスの将来像を自ら常に追い求めていくことを忘れずに歩んでいただきたい。製鉄分野はいわゆるSDGsに向け、RE（資源効率）の向上のため、日本の鉄鋼業の製造部門と研究部門の一体化での強みと例えばITを組み合わせ、真のCE（循環経済）を実現するため、どう考え、どう行動するか？が今後10年に求められている。

参考文献

- 1) 齋藤公児：金属, 87 (2017) 11.
- 2) K. Nishioka : Proc. 3rd Int. Cokemaking Cong., CRM, Liege, (1996), 285.
- 3) H. Taketomi, K. Nishioka, Y. Nakashima, S. Suyama and M. Matsuura : 4th Int. Cokemaking Cong. Proc., ATS, Paris, (2000), 278.
- 4) 中川朝之, 有馬孝, 古牧育男, 鈴木豊, 杉山勇夫, 福永正起：材料とプロセス, 9 (1996), 135.
- 5) 藤川秀樹：ふえらむ, 20 (2015) 11, 538.
- 6) 上坊和弥：日本製鉄技報, 413 (2019), 185.
- 7) 吉田周平, 高瀬省二, 内田誠, 佐地孝文, 小山博之, 山本雅章：鉄と鋼, 90 (2004) 9, 679.
- 8) 深田喜代志：第239・240回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, 東京, (2019)
- 9) 青木秀之, 松尾翔平, 井川大輔, 宮本幸典, 齋藤泰洋, 松下洋介：材料とプロセス, 28 (2015), CD-ROM.
- 10) 蘆田隆一, 岩瀬一洋, 三浦孝一：材料とプロセス, 28 (2015), 3, CD-ROM.
- 11) 鷹嘴利公, 崎元尚土, シャーマアトゥル：材料とプロセス, 28 (2015), 9, CD-ROM.
- 12) 林潤一郎, 工藤真二：材料とプロセス, 28 (2015), 11, CD-ROM.
- 13) 加藤健次, 野村誠治, 福田耕一, 植松宏志, 近藤博俊：新日鉄技報, 384 (2006) 69.
- 14) 吉永真弓, 西岡邦彦, 久保敏彦：鉄と鋼, 60 (1974), S22.
- 15) 肥田行博, 伊藤薫, 佐々木稔：鉄と鋼, 66 (1980), 1801.
- 16) 肥田行博, 佐々木稔, 榎戸恒夫, 梅津善徳, 飯田孝司, 宇野成紀：鉄と鋼, 68 (1982), 400.
- 17) 中野正則, 齊藤力, 佐藤勝彦, 斧勝也：鉄と鋼, 68 (1982), s719.
- 18) 葛西栄輝, 呉月成利, 杉山健, 稲葉晉一, 大森康男：鉄と鋼, 78 (1992), 1005.
- 19) 呉月成利, 杉山健, 森岡耕一, 葛西栄輝, 大森康男：鉄と鋼, 80 (1994), 276.
- 20) 葛西栄輝, 齋藤文良：化学工学論文集, 20 (1994), 857.
- 21) 大山伸幸, 井川勝利, 武田幹治, 有山達郎, 神野哲也：鉄と鋼, 90 (2004), 546.
- 22) 片山一昭, 笠間俊次：鉄と鋼, 101 (2015) 1, 11.
- 23) 片山一昭, 笠間俊次：日本製鉄技報, 413 (2019), 43.
- 24) 平健治：日本製鉄技報, 413 (2019), 56.
- 25) K. Taira and M. Matsumura : ISIJ Int., 58 (2018) 5, 808.
- 26) 吉川政秀, 森下茂, 上城親司, 松村勝：日本製鉄技報, 413 (2019), 64.
- 27) 松村勝：第239・240回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, 東京, (2019)
- 28) ISIJ Int., 53 (2013) 9, 1491.
- 29) 藤部康弘：新日鉄住金技報, 408 (2017), 56.
- 30) <http://www.meti.go.jp/press/2019/06/20190607002/20190607002.html>
- 31) C. Nellemann, E. Corcoran, C.M. Dua, L. Valdes, C. DeYoung, L. Fonseca and G. Grimsditch : Blue Carbon. A rapid response assessment. United Nation Environment Programme, GRIS Arendal, <http://www.grida.no>
- 32) 小杉知佳, 加藤敏朗, 三木理：海洋理工学会誌, 20 (2014), 1.
- 33) 小杉知佳, 加藤敏朗, 畑恭子：干潟・浅場一体型メソコム水槽を活用した製鋼スラグの浅場造成材としての安全性の検証実験, 日本海洋学会2015年 秋季大会要旨集, (2015)
- 34) 齋藤公児：日本学術会議 公開シンポジウムSDGsのための資源・材料の循環使用に関する シンポジウム資料, (2019年8月5日)

(2019年9月17日受付)