

製鉄分野におけるCO₂削減の取り組み

Innovative Technologies to Mitigating CO₂ Emissions during Ironmaking

樋口 謙一*
Kenichi HIGUCHI

松村 勝
Masaru MATSUMURA

上坊 和弥
Kazuya UEBO

抄 録

製鉄工程は、製鉄業からのCO₂排出の過半を占めており、省CO₂への期待が大きい。これまでの既存プロセスの高効率化によるCO₂削減事例として、高反応性焼結鉱による高炉反応効率向上、還元平衡制約回避、コークス生産性向上について論じた。焼結鉱の低SiO₂化により、高炉の通気抵抗が低下して還元材比低減に繋がった。さらに、新規塊成鉱RCAを開発し、熱保存帯温度低下を図り、還元材比が低下した。SCOPE21プロセスを開発・導入し、コークス製造時の省エネルギー化を達成した。これらの取り組みにより、年間相当量のCO₂削減効果を得ている。今後は、将来のゼロカーボン・スチールに向けた取り組みを加速していく。

Abstract

The predominant quantity of the CO₂ emissions from steel industry are generated by ironmaking. Three technologies successfully developed for lowering CO₂ emissions by achieving the high-efficiency blast furnace process, enhancing the reactivity of sintered ores, breaking-through the limitation due to the reduction equilibrium, and increasing the productivity of coke oven, were introduced. The reducing agent rate of blast furnace was lowered by decreasing SiO₂ content of sintered ores and by decreasing the temperature of the thermal reserve zone in blast furnace using newly developed agglomerate, RCA. The energy for coke-making was saved by the implementation of SCOPE21 process. These technologies could decrease annual CO₂ emissions significantly. We must go further for research and development, nevertheless, aiming the complete decarbonization of steel industry.

1. 緒 言

地球温暖化抑制のために、CO₂排出量の削減が求められている。我が国は、2016年に“地球温暖化対策計画”を閣議決定し、2050年までに温室効果ガス排出量を80%まで削減することを目指している。日本鉄鋼連盟も、2100年までに“ゼロカーボン・スチール”を目指す対策ビジョンを策定し、取り組みを強化している。これは、我が国が、世界の3.5%のCO₂を排出しており、その中で製鉄業が15%を占めていることに由来する²⁾。特に石炭を原料とする製鉄工程は、その過半を占めており、省CO₂への期待が大きい。日本鉄鋼業は、第一次石油危機以降に省エネルギー技術開発を進め、そのエネルギー効率は世界でトップクラスであるが、世界的なCO₂削減へ貢献するためには、さらに革新的な技術開発が必要である。

製鉄工程での、CO₂削減手段は、高炉の低炭素化(反応

効率向上、還元平衡制約回避、被還元酸素低減、H₂系ガス吹込み、炉頂ガス循環、酸素高炉)、CDA(Carbon Direct Avoidance)プロセスへの移行(シャフト炉、流動層還元などの水素還元)、CCU活用(バイオマス、廃プラスチック使用)、の3つに大別される³⁾。さらに、既存プロセスの高効率化も省エネルギーを通じてCO₂削減に貢献する。

本稿では、H₂系ガス吹込みに相当するCOURSE50プロジェクト、CCUに相当する廃プラスチック利用を別稿に譲り、日本製鉄(株)のこれまでの主要なCO₂削減事例として、高反応性焼結鉱による高炉反応効率向上、還元平衡制約回避、コークス生産性向上を中心に論ずる。

2. 高反応性焼結鉱による高炉反応効率向上(低スラグ焼結鉱の開発)

焼結工程における省エネルギー技術は、焼結工程における化石燃料使用削減および、焼結鉱の低スラグ化による高

* プロセス研究所 製鉄研究部長 博士(工学) 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

炉内通気抵抗低減を介した還元材比削減に大別される。ここでは、焼結鉱荷重軟化性状が高炉融着帯通気性に関与することに着目し、焼結鉱中の SiO₂ 量削減による焼結鉱荷重軟化性状改善を図った事例を紹介する。さらに、試験高炉による炉内通気抵抗低減の検証および実炉評価について述べる。

2.1 低スラグ焼結鉱の製造設計

2.1.1 供試料および評価方法

焼結鉱成分 (CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO, FeO) の高温性状に及ぼす影響を調査した。ここで焼結鉱は、直径 300mm、高さ 500mm の焼結鉱製造試験装置を用いて実験室的に作成した。焼結鉱成分は、CaO は石灰石で、SiO₂ と Al₂O₃ は鉄鉱石で、MgO はドロマイトで、FeO は粉コークスで、それらの配合量を調整した。焼結鉱の高温通気抵抗指数は、図 1 に示す荷重軟化試験 (荷重下での昇温還元試験) によって計測される圧損より算出される高温通気抵抗指数を KS 値で評価する⁴⁾。

2.1.2 検討結果と考察

図 2 および図 3 より、SiO₂ 低下 (CaO/SiO₂ 1.8 一定ゆえ CaO も低下) および MgO 上昇は KS 値低下に有効であった⁴⁾。また Al₂O₃ や FeO の影響は小さかった。KS 値低下には、焼結鉱の還元過程においてスラグの液相生成を抑制する必要がある。ここで、焼結鉱のスラグ組成は、平衡状態図における FeO 飽和領域である⁴⁾。よって、CaO および SiO₂ の低減はスラグ液相量低減に有効であり、図 2 の結果と矛盾しない。

一方、被還元性の向上は、未還元 FeO の減少に繋がり、焼結鉱組成をカルシウムシリケート飽和領域に移行させる。この領域は 1200℃ では液相が存在しないので液相生成が抑制できる。ここで、MgO 源として、SiO₂ を含有する蛇紋粉ではなく、ドロマイト (CaO-MgO) を使用することにより難還元性鉱物であるカルシウムシリケート形成を抑制できることも判明した。この難還元性鉱物の形成抑制に

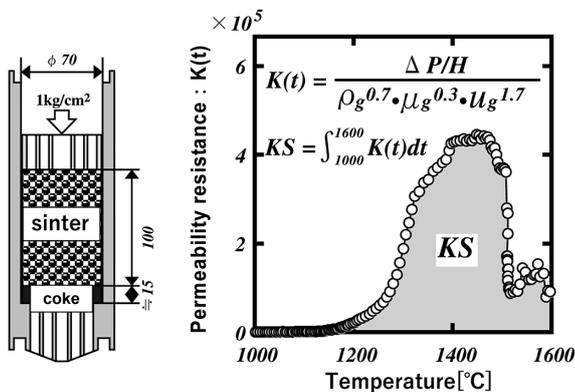


図 1 高温通気抵抗指数評価法

Schematic diagram of experimental device for sinter softening property test

より、還元が促進されて CaO-SiO₂-FeO 系液相生成が抑制されたと考える。

2.2 低スラグ焼結鉱の高炉評価

2.2.1 試験条件

焼結鉱の SiO₂ と CaO の低下、およびドロマイトによる MgO 上昇によって、KS 値が低下する。KS 値低下による高炉内通気性 (以降 KR) の改善を試験高炉で評価した。図 4 に試験高炉の主要仕様を示す⁵⁾。羽口レベルでの炉内径は 0.9m であり、3 本の羽口を有する。実焼結機で作成した 2 種類の焼結鉱 (SiO₂ 5.0%, KS×10⁵ 1500, および SiO₂ 3.9%, KS×10⁵ 648) と高炉副原料の添加量で高炉スラグ量を変更させた。

2.2.2 試験結果

図 5 に示すように、焼結鉱の KS 値の低下および高炉スラグ量低減が、高炉融着帯および滴下帯の KR の改善に有効であることが示された⁵⁾。特に前者の効果が大きかった。さらに、別種の低スラグ焼結鉱を用いた試験高炉操業の結

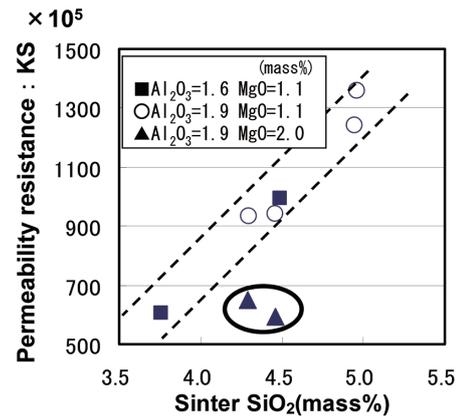


図 2 焼結鉱 SiO₂ (C/S 一定)、MgO および Al₂O₃ の高温通気抵抗指数に及ぼす影響

Effects of SiO₂, MgO and Al₂O₃ concentration in sinter on permeability resistance (KS)

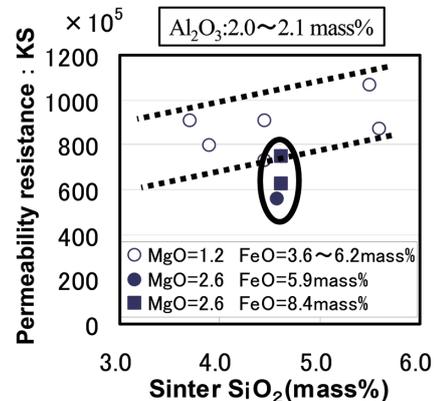


図 3 焼結鉱 SiO₂, MgO, FeO の高温通気抵抗指数に及ぼす影響

Effects of SiO₂, MgO and FeO concentration in sinter on permeability resistance (KS)

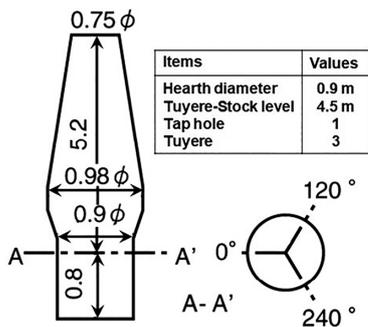


図4 試験高炉仕様
Configuration of experimental blast furnace

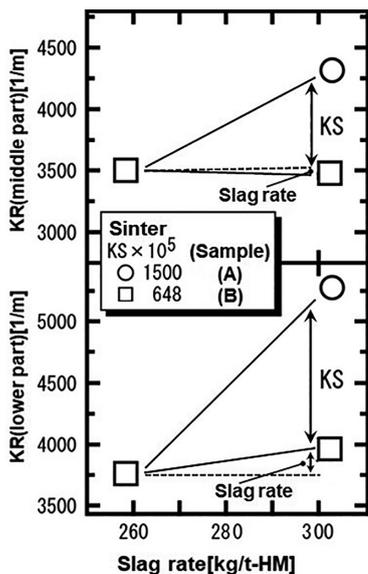


図5 焼結鉱 KS 値と高炉スラグ量の KR 影響比較
Comparison of effect of KS on KR with that of slag rate

果、低スラグ焼結鉱 (RI 72.3%, $KS \times 10^5$ 1104) 使用時には、ベース焼結鉱 (RI 65.3%, $KS \times 10^5$ 1508) 使用時と比較して、KR 低減効果のみならず、還元材比低減効果も有することが確認された⁶⁾。

2.2.3 実炉検証

焼結層およびコークス層の通気解析⁷⁾を行い、実炉の KR との整合を検証した。その結果、図 6 に示すように、KS 値の低下による KR の改善効果が実炉で確認され、実測値と計算値の整合が良好であった⁵⁾。KR 改善効果もあり、実炉の還元材比が 3kg/t-HM 低減された⁸⁾。これは、全製鉄所適用のケースでは、CO₂ 削減量で 20 万トン/年に相当する。本評価後に全所で焼結鉱のスラグ化を進め、焼結鉱 SiO₂ 5% 未満の実績を 10 年以上継続した。特にその間、東日本製鉄所 (鹿島) では、2005 年に SiO₂ 4.34% の極低スラグ焼結鉱を製造した。

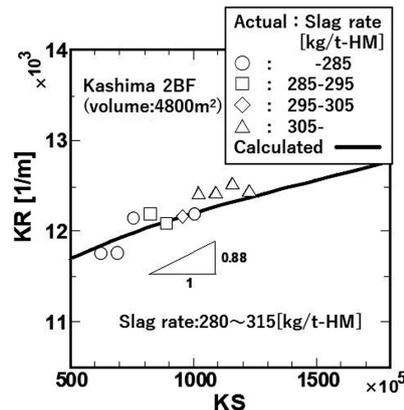


図6 実高炉の通気抵抗に及ぼす KS の影響
Effect of KS on gas flow resistance in commercial blast furnace

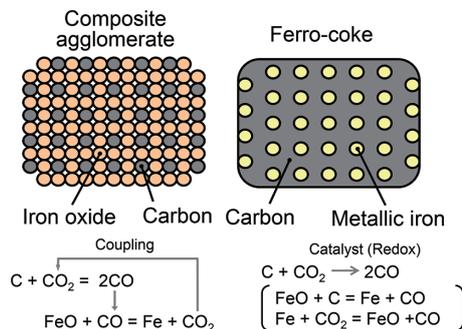


図7 高炉の還元平衡制約による操業限界を打破する革新的塊成鉱
Innovative agglomerates for breaking through operational limit due to reduction equilibrium of blast furnace

3. 還元平衡制約回避 (含炭塊成鉱による高炉還元材比削減)

3.1 還元材比低減原理と反応評価

製鉄工程での省 CO₂ 手段として、高炉の還元材比低減が有効である。近年、高炉の反応効率の制約条件のひとつである、還元平衡条件 (RIST 線図での W 点) の制御を目的とした反応性に富む塊成物が種々提案されている。高炉の還元平衡条件制御の手段のひとつに、カーボン反応性向上を介した熱保存帯温度の低下が挙げられ、これまでに様々な高炉用原料が提案されてきた (図 7)⁹⁾。そのひとつに、微粉炭材と微粉酸化鉄から構成される複合塊成鉱 CA (Composite Agglomerate) が挙げられる。CA の反応性の高さは従来から知られていたが、日本製鉄は、従来よりもカーボン含有量を高め、機能強化した RCA (Reactive Coke Agglomerate) と称する塊成鉱の優れた還元材比低減効果を見出し¹⁰⁾、本塊成鉱を実用化した¹¹⁾。RCA は、酸化鉄のガス還元反応 (式 (1)) と、カーボンのガス化反応 (式 (2)) のカップリング現象による、高いカーボン反応性と還元性を有する。



図 8 に、高炉シャフト部の向流反応を再現可能な、試験装置 BIS 炉 (Blast Furnace Inner-reaction Simulator) を用いた結果を示す⁹⁾。種々の塊成物 (CA, フェロコックス, 小塊コックス) を用いて熱保存帯温度を測定し、塊成物内の酸化鉄とカーボンの距離 L_{OC} との関係を見た。 L_{OC} の短縮によって、熱保存帯温度が低下しており、CA のように微粉炭材と微粉酸化鉄を混合・成型することによる両者の近接化が、上記カップリング現象を助長し、熱保存帯温度の大幅な低下に繋がること示された。

図 9 に、ガス条件 ($CO_2/(CO+CO_2)$) を変化させた各種塊成物の 1200℃ 加熱時の反応挙動の比較を示す⁹⁾。いずれの塊成物のカーボン消費率も、通常コックスよりも高く、 $CO_2/(CO+CO_2)$ の増加によって上昇したが、RCA が最もカーボン消費率の上昇が大きかった (図 9(a))。フェロコックスと RCA の還元率は、高い $CO_2/(CO+CO_2)$ 条件の時に若干低下したものの、還元率 90% 以上を維持しており、本加熱条

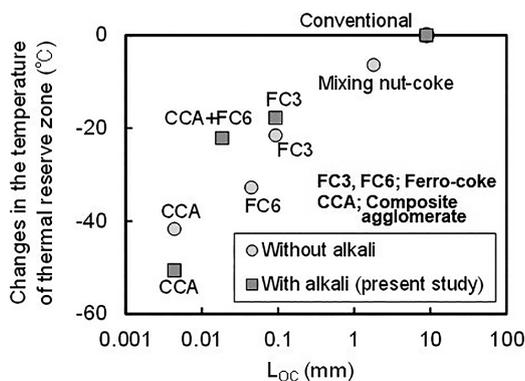


図 8 塊成物の L_{OC} (酸化鉄カーボンの距離) と BIS 炉試験での熱保存帯温度低下効果の関係

Relationship between changes in temperature of TRZ (results of BIS test) and L_{OC} (average distance between iron oxide and carbon)

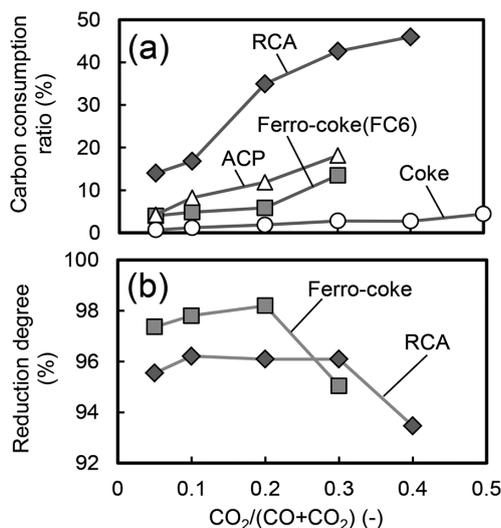


図 9 ガス組成による各種塊成物の 1200℃ までのカーボン消費率 (a) と還元率 (b) の変化

Changes in CCR (a) and reduction degree (b) of agglomerates after reaction until 1200℃ with respect to inlet-gas composition

件では、FeO 安定域での加熱条件にも関わらず、塊成物は酸化されていなかった (図 9 (b))。

図 10 に、RCA と焼結鉱の還元進行の比較を示す¹²⁾。RCA は焼結鉱よりも低温から還元が進行し、高い被還元性を示した。本実験で得られた還元速度パラメーターを用いた高炉数学モデルの計算結果から、RCA 実機試験で得られた、RCA 由来カーボン 1kg-C/tHM 使用当たり、0.36 kg-C/tHM の還元材比低減の関係性と、最大で 4kg-C/tHM の還元材比削減¹⁰⁾ の妥当性が確認された。

3.2 含炭塊成鉱 RCA の実用化

2011 年 11 月より九州製鉄所 (大分) に RCA を導入した。図 11 に RCA の製造フローを示す¹¹⁾。原料は粗破碎された後セメントと混合されペレタイザーで造粒される。生ペレットは蒸気を用いた一次養生に供された後にヤードに搬送され二次養生を行う。RCA 製造量は約 900t/d であり、大型高炉 (炉容積 5775m³, 2 基) において、最大 40kg/tHM の使用量で使用される。表 1 に RCA 使用前と使用後の主要諸元変化を示す¹¹⁾。RCA 使用により、従来得られた知見^{10,12)} とほぼ同等の還元材比低減効果が得られた。シャフト中部ゾンデデータから、RCA 使用で同一温度レベルに対してガス還元効率が上昇していることから、カップリング反応 (カーボン近接効果) によりシャフト部の還元効率が向上したと考えられる。さらに、蒸気養生による急速養生法も導入され、強度 100daN/p の発現が 4 日間の養生期間で得られており、RCA の物流および品質の安定化に寄与している。

還元平衡制約回避のための熱保存帯温度低下は、RIST 線図が発明されて以来、古くからあったアイデアではあった。しかし、反応速度を考慮した条件の最適化が困難であり、実用化には至っていなかった。日本製鉄は、シャフト部の還元状況を精緻に再現できるツールを駆使して、その条件の最適化に取り組み、新規塊成物の設計、および実機製造方法の適正化を図り、高炉還元材比を削減しうる新規塊成物の開発に成功した。本法は現在、3 製鉄所、大型高炉を含む高炉 6 基へ適用中であり、高炉還元材比削減を介

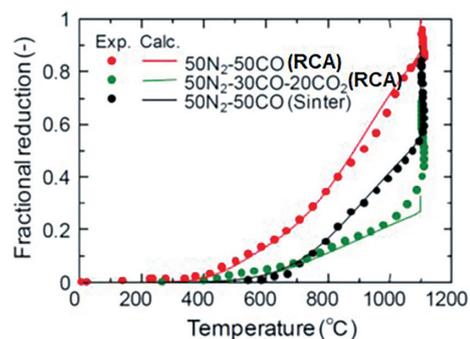


図 10 RCA と焼結鉱の還元性の比較
Comparison of fractional reduction curve of RCA with that of sinter

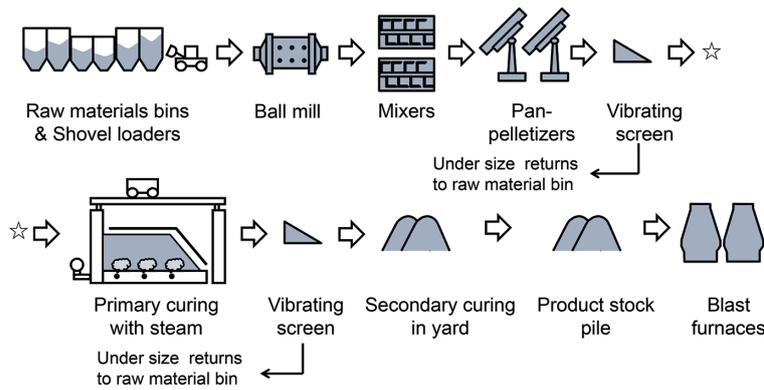


図 11 九州製鉄所（大分）に導入された RCA 製造フロー図
Production flow sheet of RCA implemented in Kyushu Works (Oita)

表 1 大分第 1 高炉の RCA 使用前後の操業変化（還元材比は RCA 中のカーボン分を含む）

Operational change of Oita No.1 blast furnace between before and after RCA use

	Without RCA	With RCA	Difference
Production t/d	13 554	13 815	+261
Reducing agent rate*	490.2	487.6	-2.6
Coke rate kg/tHM	338.7	324.7	-14.0
PCR kg/tHM	151.5	162.8	+11.3
Ore composition			
Sinter %	82.8	76.5	-6.3
Pellet %	1.7	4.9	+3.2
RCA %	0	2.1	+2.1
Hot metal temperature °C	1 530	1 537	+7
Horizontal shaft probe data			
Temperature °C	687	672	-15
CO ₂ /(CO+CO ₂)*100 %	37.1	38.8	1.7

*RAR includes carbon in RCA.

した計 10 万トン／年の CO₂ 削減に貢献している。

4. コークス生産性向上（革新的新コークス炉 SCOPE21 の開発）

4.1 SCOPE21 プロセスの概要

SCOPE21 プロセス (Super Coke Oven for Productivity and Environmental enhancement toward the 21st century) は、新しくコークス炉を建設する時期の到来を前に、室炉式コークス炉をベースとした次世代型の革新的プロセスとして、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技術開発が行われ¹³⁾、その成果をもとに、九州製鉄所（大分）および名古屋製鉄所に新規コークス炉として導入された。本プロセスの開発は、低品位炭（非微粘結炭）の使用比率の大幅増大（20→50%）による石炭資源の有効活用、コークス炉生産性の大幅な向上、および省エネルギーや環境対応力向上の 4 点を目標に進められた。

図 12 に日本製鉄に導入された SCOPE21 プロセスのフロー概要¹⁴⁾を、表 2 に主な設備の仕様を示す。従来の製造プロセスと比較して、石炭の事前処理を高度化した点に

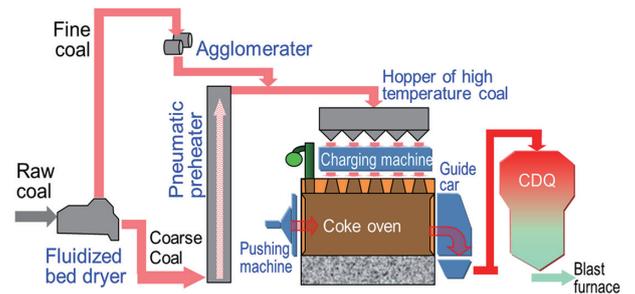


図 12 九州製鉄所（大分）、名古屋製鉄所の SCOPE21 プロセスの概要

Schematic diagram of SCOPE21 process flow in Kyushu Works (Oita) and Nagoya Works

表 2 九州製鉄所（大分）、名古屋製鉄所における SCOPE21 プロセスの主な設備仕様

Specifications of SCOPE21 process in Kyushu Works (Oita) and Nagoya Works

Fluidized bed dryer	161 t/h
Pneumatic preheater	106 t/h
Agglomerator	36 t/h×2
Number of ovens	64
Dimensions of ovens	W 0.45×H 6.7×L 16.6 m
CDQ	123 t/h

SCOPE21 プロセスの大きな特徴がある。コークス製造に使用される石炭は、まず事前処理工程で乾燥および急速加熱処理される。従来のコークス製造プロセスと同様、石炭の配合と粉碎処理が行われた後、流動床乾燥分級機にて乾燥、予熱されるとともに、原料の石炭は粗粒炭と微粉炭に分級される。分級された粗粒炭は、気流加熱塔にて約 330～380℃まで急速加熱処理される。分級された微粉炭は、熱間成形された後、急速加熱された粗粒炭と混合されて、高温でコークス炉に装入されて乾留される。コークス炉から排出されたコークスは、CDQ で熱回収・冷却されて高炉に送られる。

事前処理を施される間、特に急速加熱処理により、石炭が改質されてコークス化性が向上する。その結果、通常はコークス用原料としては適さない、非微粘結炭の使用比率を大幅に向上させても、十分な強度のコークスを製造する

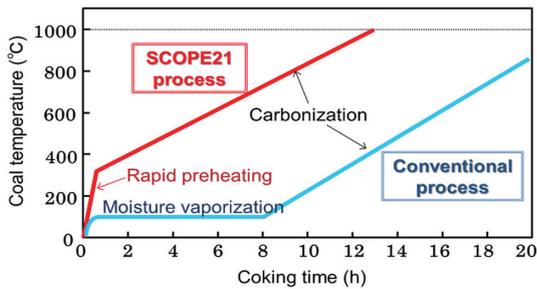


図 13 従来プロセスと SCOPE21 プロセスの乾留時間の概念図

Comparison of coking time between SCOPE21 and conventional process

ことが可能となる。

また、石炭を乾燥・予熱し、高温でコークス炉に装入することにより、従来プロセスでは長時間が必要であったコークス炉での処理時間、すなわち、乾留時間を大幅に短縮することができる。これにより、コークス炉の生産性を大幅に向上するとともに省エネルギーに繋がっている。

コークス炉はバッチ式の設備であり、炭化室に装入された石炭は、燃料ガスを燃焼させる隣接の燃焼室から間接加熱により加熱されて乾留される。石炭の熱伝導率が低いこともあり、加熱効率の悪いことが問題であった。図 13 に、従来のプロセスと SCOPE21 プロセスのコークス炉での加熱状況を模式的に示す。従来のコークス炉では、装入する石炭が水分を 10% 近く含み、乾留時間 18h のうち、石炭水分の乾燥だけで 8~10h 程度を要していた。SCOPE21 プロセスでは、コークス炉に石炭を装入する前の石炭事前処理工程で水分の乾燥・加熱を急速に行うため、コークス炉での乾留時間を短縮できる。

SCOPE21 プロセスでは、流動床分級設備や気流加熱塔で石炭粒子を加熱ガスにより直接加熱するために効率よく短時間で加熱することができる。流動床による石炭(水分を含む)の加熱速度は、操業条件にも依存するが、100~数 100s で 300°C まで加熱できることが示されている¹⁵⁾。この時の昇温速度は 200°C 超の領域で 30~100°C/min に及ぶ。

また、急速加熱塔では、多量の加熱ガスに随伴しながら、粗粒炭が加熱される。石炭の加熱速度は、5000°C/min 以上で急速に加熱されることが確認されている¹⁶⁾。

加熱に必要な時間は、コークス炉内での加熱に要する乾留時間が大半を占める。乾燥・予熱した高温炭では、水分の蒸発を要せず、加熱温度幅も小さくなるため、コークス炉での乾留時間が短縮される。

また、このように急速な乾留時間を達成するには、コークス炉内の石炭が均一に乾留される必要がある。SCOPE21 型のコークス炉では、3 段燃焼および燃焼室底部ガスポートの構造により、高さ方向の加熱均一性と低 NO_x 燃焼を達成している¹⁷⁾。

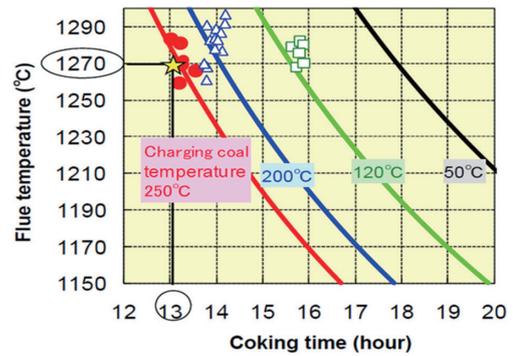


図 14 コークス炉のフリュー温度、石炭装入温度と乾留時間の関係

Correlations between carbonization flue temperature and coal charge temperature

4.2 SCOPE21 プロセスの実機操業状況

国家プロジェクトの技術開発成果を受けて、SCOPE21 型コークス炉の第 1 号機が、2008 年に九州製鉄所(大分)の第 5 コークス炉として建設された。その後、実機での操業実績を積み、2013 年には第 2 号機が名古屋製鉄所の第 5 コークス炉として稼働した。いずれも稼働以降、段階的に稼働率を上昇させ、最高稼働率 184.5% を達成し、実操業において大幅な生産性の向上が実現した。

図 14 に、大分 SCOPE21 プロセスでの乾留時間の実績を示す¹⁸⁾。コークス炉燃焼室の炉温を最大温度付近とした後、装入炭の温度を段階的に上昇させた。装入炭温度の上昇に伴って乾留時間が短縮され、装入炭温度 250°C において、炉温 1270°C で乾留時間 13h (=稼働率 184.5%) の目標値を達成した。この結果は伝熱モデル計算結果と一致する結果であった。

このように、生産性が向上した結果として、コークス製造プロセスの省エネルギー化も達成されている。大分第 5 コークス炉における 1 年間のエネルギー削減量を評価した結果、コークス生産量 100 万トン/年時の重油使用の削減により、CO₂ 排出削減量は 26 万トン/年に相当する¹⁹⁾。名古屋製鉄所でも、最大 20 万トン/年の CO₂ 削減が達成されている。

SCOPE21 プロセスは、現在まで 10 年前後の稼働を継続しており、日本製鉄コークス炉製造エネルギーの低減に寄与している。

5. 結 言

これまでの、高炉製鉄法の高効率化による CO₂ 排出量低減に向けた取り組みにおける、主要な 3 つの技術開発事例として、高反応性焼結鉱による高炉反応効率向上、還元平衡制約回避、コークス生産性向上について概説した。

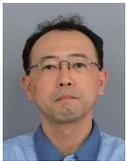
それ以外にも製鉄分野では、COURSE50 プロジェクト、廃プラスチック利用にも鋭意取り組んできており、詳細は他稿を参照されたい。

今後は、将来のゼロカーボン・スチールに向けた取り組み

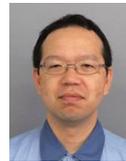
みを加速していかなければならない。日本製鉄は、製鉄工程の脱炭素化に向けた更なる革新的な研究開発を、引き続き使命感を持って進めていく。

参考文献

- 1) 一般社団法人日本鉄鋼連盟：「日本鉄鋼連盟長期温暖化対策ビジョン―「ゼロカーボン・スチールへの挑戦」, 2018年11月
- 2) 環境省：2018年度（平成30年度）の温室効果ガス排出量（2報値）について，2020年4月
- 3) 有山達郎：鉄と鋼. 105 (6), 567 (2019)
- 4) 松村勝 ほか：鉄と鋼. 92 (12), 865 (2006)
- 5) 松倉良徳 ほか：鉄と鋼. 87 (5), 350 (2001)
- 6) 夏井琢哉 ほか：鉄と鋼. 99 (4), 267 (2013)
- 7) Takatani, K. et al.: ISIJ Int. 39 (1), 15 (1999)
- 8) 松倉良徳 ほか：CAMP-ISIJ. 8 (1), 141 (1995)
- 9) Higuchi, K. et al.: ISIJ Int. 60 (11), 2366 (2020)
- 10) 横山浩一 ほか：鉄と鋼. 100 (5), 601 (2014)
- 11) 樋口謙一 ほか：鉄と鋼. 103 (7), 407 (2017)
- 12) 西岡浩樹 ほか：CAMP-ISIJ. 27 (1), 682 (2014)
- 13) 西岡邦彦 ほか：鉄と鋼. 90 (9), 614 (2004)
- 14) 谷澤賢司：第52回石炭科学会議発表論文集, 2015, p.ii
- 15) 永井和範 ほか：鉄と鋼. 90 (9), 627 (2004)
- 16) 松田雄市 ほか：鉄と鋼. 90 (9), 648 (2004)
- 17) 吉田周平 ほか：鉄と鋼. 90 (9), 679 (2004)
- 18) 尾方良晋 ほか：第46回石炭科学会議発表論文集, 2009, p.40
- 19) 加藤健次 ほか：日本エネルギー学会誌. 92 (10), 985 (2013)



樋口謙一 Kenichi HIGUCHI
プロセス研究所 製鉄研究部長 博士(工学)
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



上坊和弥 Kazuya UEBO
プロセス研究所 製鉄研究部
首席主幹研究員



松村 勝 Masaru MATSUMURA
プロセス研究所 製鉄研究部
主席研究員 博士(環境科学)