

含炭塊成鉱の製造と高炉使用による高炉還元材比低減技術

Development of Carbon Composite Iron Ore Production and Improvement in Blast Furnace Reduction Efficiency

横山 浩一*	樋口 謙一	伊藤 高志
Hirokazu YOKOYAMA	Kenichi HIGUCHI	Takashi ITO
大塩 昭義	千葉 道夫	佐藤 洋之
Akiyoshi OSHIO	Michio CHIBA	Hiroyuki SATO

抄 録

我が国の鉄鋼業は良質資源の枯渇化、原料価格高騰に加え、排出 CO₂ の削減等の多くの課題に直面している。これらの課題に対し、製鉄工程における高炉の高効率化は、銑鉄製造コストに直結する炭材の使用比率の低減、および省 CO₂ に寄与する重要な要素の1つである。そこで、高炉の高効率化のため、高炉への装入酸化鉄の効率的な還元促進を狙い、炭材と酸化鉄を近接配置させた含炭塊成鉱 RCA (Reactive Coke Agglomerate) の開発を行った。RCA の開発では、高炉に装入するために必要な強度を維持するために必要な製造条件をオフライン試験にて選定した。製造条件選定後、実機パンペレタイザーによって 21000t の RCA を製造し、大分第2高炉にて最大 54kg/tHM の使用試験を実施した結果、高炉の炭材使用比率の低減効果を見出すことができた。加えて、RCA の実機製造技術についても検討し、高い生産性と強度の維持を目的とした蒸気急速養生方法を検討した。オフラインから実機試験までの調査を行った結果、適正な一次養生時間、蒸気養生時間と温度を見出すことができた。この蒸気養生プロセスを含めた RCA 実機設備を大分に導入し、高炉の低還元材比操業に寄与している。

Abstract

The high efficiency of the blast furnace is an important element contributing to reduction of the production cost of iron ore and CO₂-saving. For this problem, the close arrangement of iron ore and carbonaceous materials is effective for high efficiency of reduction. Therefore, the carbon composite iron ore RCA, "Reactive Coke Agglomerate," has been developed. The off-line test of RCA strength was carried out before using RCA for a commercial blast furnace. And production condition of RCA was decided by this off-line test. Based on the above experimental results, the 21 000 t RCA was produced by the commercial plant and long-term plant trials have been conducted at the Oita Works No. 2 Blast Furnace with a maximum use of 54 kg/tHM. And it was found that the carbon consumption can be decreased. The method of RCA production on the commercial scale was also investigated. To achieve a high productivity of supplying RCA to large blast furnaces, a rapid curing process of RCA using steam was investigated. We obtained rapid curing method of RCA with primary curing, steam curing and drying. RCA involving the steam curing process has been implemented in Oita Works and it has been helping in a stable operation of two large blast furnaces under a low RAR.

1. 緒 言

我が国の鉄鋼業は、近年の鉄鉱石、石炭価格の高騰に加え、良質資源の枯渇化により、銑鉄製造コストの増大だけでなく、被還元性が乏しく、使用難易度が高い原料を有効に活用する必要に迫られている。このような背景のなか、

我が国の鉄鋼メーカーは現状の原料事情を踏まえた資源戦略強化に加え、製造コスト低減に資する原燃料使用技術を開発していく必要がある。銑鉄製造コスト低減には、高炉の還元効率を向上させ、銑鉄あたりの炭材使用比率を低減することが重要である。

高炉の炭材使用量を低減するため、これまで高反応性炭

* プロセス研究所 試験高炉プロジェクト推進部 主幹/製鉄研究部 主幹研究員(兼務) 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

材使用による“還元平衡温度の低下”が精力的に取り組まれてきた¹⁾。その手段としては、コークスの反応性向上²⁻⁵⁾の他、鉄石と炭材を近接配置させた含炭塊成鉄による還元とガス化反応の高速化について検討されてきた⁶⁻⁹⁾。特に含炭塊成鉄の高炉使用による還元反応の高効率化は、実高炉での使用効果についても報告されている¹⁰⁻¹²⁾。このような含炭塊成鉄の製造方法の1つとして、セメントをバインダーとして塊成化した非焼成塊成法が挙げられる^{13, 14)}。

過去に、非焼成含炭塊成鉄の高炉での多量配合試験¹⁵⁾も実施されたが、カーボン使用原単位などの高炉諸元変化や、最適な含炭塊成鉄の製造条件については不明確であった。そこで、高炉内の反応高速化・高効率化を狙い、高炉操業緒元を改善しうる非焼成含炭塊成鉄の開発に取り組み、大分製鉄所において製造試験、実高炉使用試験を実施し、高炉の効率向上、およびカーボン使用原単位の低減効果を見出すことができた。

非焼成含炭塊成鉄の実用高炉における効果検証の後、実用化に向けた実機製造技術開発を行った。非焼成含炭塊成鉄を実機規模で製造するうえで課題となるのはセメント硬化に必要な養生期間であり、要求される含炭塊成鉄の製造量が多いほどその課題は深刻になる。セメントを結合材として用いる塊成鉄は、セメント硬化による強度発現までに数週間を要することが特徴であり、その養生方法も多種多様である¹⁶⁻²²⁾。特に最も簡便な養生方法であるヤード養生法は広大なヤード敷地を必要とする。非焼成含炭塊成鉄を大型高炉にて使用する場合、限られた敷地内で高い製造量が求められることから、非焼成含炭塊成鉄をできるだけ短い期間で急速養生する技術が必要となる。そこで、蒸気による急速養生技術に着目し、小規模恒温槽試験による探索試験、固定層での連続蒸気養生試験、および実機における蒸気養生試験を実施した。

2. 実験方法

2.1 含炭塊成鉄のガス化、還元反応の調査

高炉の還元効率を向上させ、炭材使用比率を低減するためには、高炉の還元平衡点温度を低下させ、還元ガスによる酸化鉄の還元効率そのものを改善する必要がある。また、還元平衡点を低温化するためには高反応性炭材使用による炭材ガス化温度を低温化する必要がある。しかし、低温にてガス化し発生した還元ガスが酸化鉄の還元にも有効活用されなければ、かえって炭材使用量の増加の要因となる場合がある。よって、ガス化して生成した還元ガスにより酸化鉄が有効に還元されることも炭材使用比率低減には必要となる。

この点において、含炭塊成鉄は酸化鉄と炭材を近接配置させていることから、炭材ガス化によって生成した還元ガスは近接する酸化鉄を即座に還元することができる。さらに、含炭塊成鉄石を非焼成にて製造した場合、内在炭材の反応性が高く、より高い還元平衡点温度低減効果が期待できる。ただし、含炭塊成鉄中に含有する酸化鉄、カーボン量の比率が塊成鉄の還元挙動や強度に影響を及ぼすことが想定されるため、まずは配合面における製造条件選定のためのオフライン試験を実施した。

製造試験において、含炭塊成鉄の原材料は製鉄所内のダストを主体とした原料を使用した。なお、この含炭塊成鉄は高炉使用を前提としているため、配合原料ダストは高炉に悪影響を及ぼすと考えられるNa, K, Znといった不純物の含有量が少ないものを選定した。

含炭塊成鉄の製造はパンペレット造粒手法を採用し、非焼成ペレットの強度を維持するため、セメント配合量を全体重量に対して10%とした。

配合炭材比率については、含有量が異なる5種類の含炭ペレットを製造した。これらの条件を表1に示す。RCA1,

表1 焼結鉄、ペレット、および含炭塊成鉄の化学組成
Chemical compositions of sinter and pellet used in reduction tests

		Sinter	Fired pellet	Carbon composite iron ore			
				RCA1	RCA2	RCA3	RCA4
Manufactured in ^{*1}		P	P	P	P	L	L
T.Fe	mass%	58.0	67.1	47.0	48.4	32.8	33.0
M.Fe	mass%	—	—	1.67	20.73	0.20	0.32
FeO	mass%	8.88	0.69	8.70	7.30	1.40	1.68
CaO	mass%	8.65	2.57	10.24	11.59	12.86	12.28
SiO ₂	mass%	5.19	2.45	6.34	5.00	7.87	7.44
Al ₂ O ₃	mass%	1.83	0.66	2.63	1.55	3.13	2.91
MgO	mass%	1.55	0.04	1.70	1.40	1.19	1.27
T.C	mass%	Trace	Trace	5.6	12.1	20.6	23.1
Actual C/Fe ^{*2}	—			0.55	1.16	2.29	3.26
Stoichiometrical C/Fe ^{*3}	—			0.77	0.46	0.80	0.79

*1 P: Plant, L: Laboratory

*2 Actual C/Fe based on RCA component

*3 Required carbon content of iron per 1 mol to reduce the iron oxide in RCA

表2 RCAの化学組成および性状
Chemical compositions and basic properties of RCA

T.C	T.Fe	M.Fe	FeO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	P	S	Na ₂ O	K ₂ O	ZnO	Combined water	Moisture	Mean size	Crushing strength (average)	Crushing strength (minimum)
mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mass%	mm	N	N
21.3	36.6	0.3	2.6	11.4	7.6	2.6	0.9	0.08	0.38	0.05	0.12	0.03	2.1	9.7	13.6	1125	982

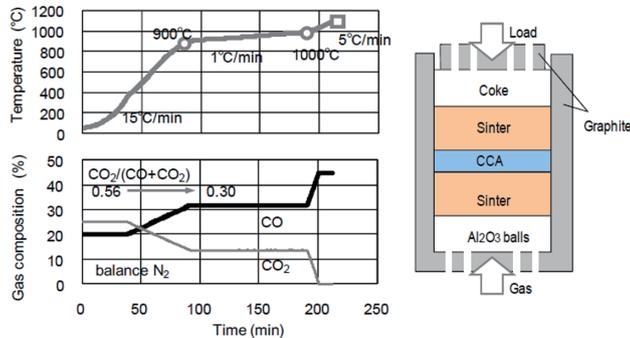


図1 荷重軟化試験条件
Tests procedure of reduction test under load

RCA2はダスト処理工場で製造された実機製造の非焼成含炭塊成鉄であり、RCA3、RCA4はオフラインにて製造したペレットである。含炭塊成鉄はセメントを硬化させるため、14日間養生したものを還元試験に供した。

還元試験は、坩堝内にサンプルを装入し荷重をかけながら反応試験を行うことができる荷重軟化試験装置を用いた。坩堝内には含炭塊成鉄100gを装入し、粒子径は10～15mmとした。この含炭塊成鉄を10～15mmの焼結鉄層200gで上下に挟み、荷重1kgf/cm²の条件下で1100℃まで昇温還元した。また、温度条件は実高炉に垂直に挿入して計測した炉内温度データを採用し、図1に示すパターンにて昇温した。

2.2 冷間強度の調査

高炉操業において、通気性確保の観点から、装入原料の粉化の抑制は重要な課題である。原料粉化の抑制は主に冷間強度と熱間強度を向上させることが効果的だが、ここでは非焼成含炭塊成鉄の冷間強度について検討した。

非焼成含炭塊成鉄の冷間強度への影響因子はセメント配合量、養生期間、炭材配合比率等が挙げられるが、本試験ではセメント添加率や養生条件を一定として、炭材配合比率（カーボン含有率）のみを変化させた種々の含炭塊成鉄を製造し、それぞれの冷間強度を調査した。なお、セメント添加率はすべて10mass%で統一し、含炭塊成鉄製造後14日間養生した後に強度試験に供した。含炭塊成鉄の強度試験は、平坦な台上に含炭塊成鉄ペレットを1粒置き、圧縮しながら荷重を測定し、ペレットが潰れるまでのピーク荷重を圧潰強度（JIS M8718）として評価した。

2.3 含炭塊成鉄の製造、実高炉使用試験

非焼成含炭塊成鉄RCAを実高炉にて試験的に使用した。高炉の還元効率変化を厳密に評価するため、炭材中に含まれる炭素（カーボン）使用比率をカーボン使用原単位として評価した。なお、本試験は製造から高炉使用までをすべて実機にて検証し、より具体的な製造技術と高炉のカーボン使用原単位低減効果について評価した。

まず、含炭塊成鉄製造は実機パンペレタイザーにて21000tの含炭塊成鉄（Reactive Coke Agglomerate：以降RCAと称す）を製造し、実高炉使用試験に供した。RCAは直径5mの実機パンペレタイザーによって製造し、製造後2週間以上養生したものを製品として使用した。また、冬季に製造したため、セメントの硬化が遅延する可能性が考えられた。そこで、高炉使用時のスラグボリュームがおよそ0.54kg/t Hot Metal (HM)増加（RCAを54kg/t HM使用時）することを許容し、セメント添加量をオフライン試験時よりも1mass%多い11mass%添加とした。製造したRCAの成分、物性を表2に示した。RCA中のカーボン含有率は高炉使用炭材比率に影響することから、RCA製造中は日々成分を測定し、目標成分に近付けるように各原料の配合比率を微調整した。

製造したRCAは大分第2高炉（炉容積5775m³）にて80日間使用し、炉頂ガス成分や溶銑温度等から高炉内還元効率（カーボン使用原単位）を算定した。また、RCAの最大使用可能量は炭材含有比率、セメント配合量、高炉の操業条件等によって変化すると考えられるが、本試験ではRCA中に含まれる水分、および最終的にスラグとなるセメント配合比率の影響を考慮し、高炉における最大使用量は54kg/t HMとした。また、段階的に使用量を増加させることで、使用量と還元効率の関係を定量的に調査した。

高炉の物質収支は、投入鉄の合計値と炭材由来の投入炭素（カーボン）の合計値がRCA使用前後でそれぞれ一定となるように、コークス、およびペレット装入量を調整した。さらに、還元効率変化により炉熱調整が必要な場合は、微粉炭吹込み、或いはコークス装入量を変化させることで対応した。RCAの装入位置は高炉内における鉄石層厚が厚く、還元が最も遅延しやすい高炉周辺部位に装入する条件を選定した。

2.4 非焼成含炭塊成鈹の急速養生試験

2.3 節記載の非焼成含炭塊成鈹の実高炉使用試験に加え、実機化を視野に入れた、より具体的な製造試験を実施した。先に述べたように、実機規模での製造にて特に課題となる養生日数の短縮に向けた急速養生方法として、蒸気養生に着目し、小規模恒温槽試験、固定層連続養生試験、実機製造試験を行った。

まずは、RCA の急速養生における保持時間と温度の影響を検討するため、同一造粒品を工程毎にバッチ処理する恒温槽試験を実施した。図2に試験方法を示す。養生前後のRCAの圧潰強度はJIS M8718に準じて測定し、12個のペレットの測定値の最小値と最大値を除く平均値とした。原料に早強ポルトランドセメント(HPC, JIS R5210)を10mass%配合し、小型造粒機にてRCAを製造した。RCAのTotal Carbon (T.C)は30.4mass%, T.Feは30.4mass%, 平均粒径は13.0mm(11~15mm)であり、一水準で50粒(約150g)を使用した。

養生条件は、一次養生、高温養生、乾燥から構成される養生パターンを基本とし、各段階の時間と温度を変化させた(図3)。予備試験により、造粒後から養生開始までの置き時間が養生後製品強度に大きく影響することが判明したのですべての試験で置き時間は1時間以内とした。

続いて、固定層による連続養生試験を実施した。装置の模式図を図4に示す。装置は、養生室とブローア(最大能力0.4Nm³/min)、熱風発生装置(最大能力250℃)、蒸気発生装置から構成される。養生室は内径13cm、容積3300cm³であり、最大1.5kgの養生が可能である。養生室および蒸気配管は保温ヒーターで80~100℃程度に加熱して結露を防止した。一次養生は小規模恒温槽試験と同様に恒

温槽を用いて、密封容器を50℃に加温した。その後、養生室に試料を移し、蒸気養生と乾燥を行った。高温でも養生室が十分な飽和水蒸気雰囲気となるようにボイラーからの蒸気供給量を調整した。乾燥時間は充填層であることを考慮して2hとし、冷風で冷却した。ガス流量は試験期間中0.08Nm³/min(空塔速度0.10Nm/s)一定とした。

表3に固定層連続養生試験に用いたRCAの化学成分を示す。小型造粒機で製造したRCA(平均粒径12.4mm(11.2~15.3mm)、湿重量1.2kg、水分12.4%、湿装入嵩密度1.48g/cm³)を試験に供した。

最後に実機にてRCAの急速養生試験を実施した。直径16mmの実機製造RCA 5tをパンチングメタル上に積み付け、シートで完全に被覆後、所定時間一次養生した。その後、パンチングメタル下面に設置したノズルから蒸気を所定時間供給し、一部を天日養生、一部を強制乾燥させた。

3. 結 果

3.1 含炭塊成鈹のガス化、還元反応の調査結果

含炭塊成鈹の還元試験結果を図5に示す。この結果から、

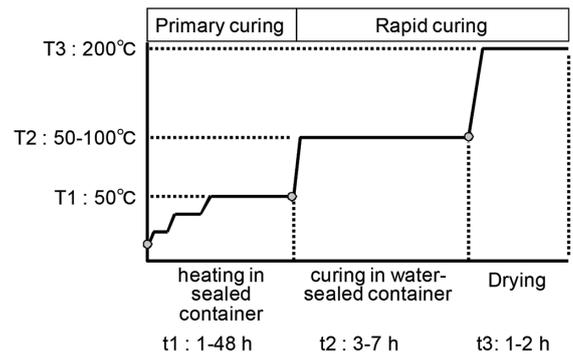


図3 バッチ式小規模急速養生試験条件
Conditions and parameters of rapid curing test in small-scale batch

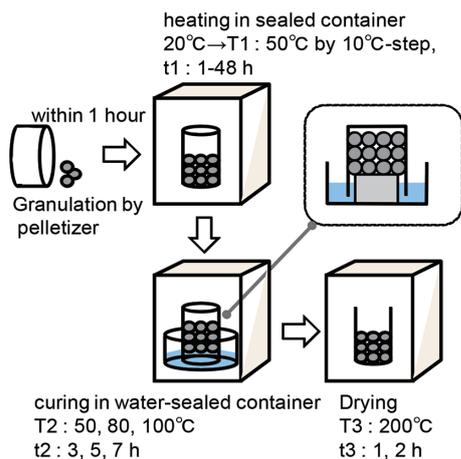


図2 RCAの急速養生方法
Batch test procedure of rapid curing of RCA

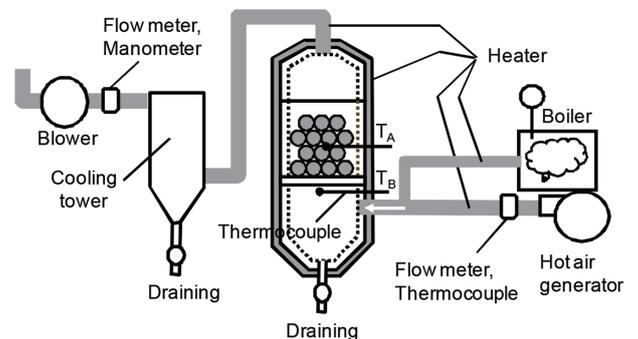


図4 連続養生試験装置概略図
Schematic diagram of continuous rapid curing test

表3 養生試験に用いたRCAの化学性状
Chemical compositions of RCA used in continuous rapid curing test

T.Fe	M.Fe	FeO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CW	T.C	Na ₂ O+K ₂ O	P	S	ZnO
33.99	0.35	1.80	12.22	7.37	2.81	0.83	2.59	20.70	0.108	0.067	0.338	0.021

含炭塊成鉱は焼成ペレットと比較して還元率が飛躍的に向上した。含炭塊成鉱中のカーボン含有比率が高いほど塊成鉱中酸化鉄の還元が促進され、10mass%以上の含有比率で90%以上の還元率に到達した。本試験では、温度、ガス条件はすべての水準で一定としており、これら結果は含炭塊成鉱中の酸化鉄と炭材の近接配置による還元促進効果であると考えられる。また、含炭塊成鉱中の炭材ガス化により還元ガスが再生され、上部焼結鉱の還元率が向上した。この効果もカーボン含有比率が高いほど向上した。

一方、含炭塊成鉱中のメタル生成と炭材反応率は主に高炉の下部におけるペレットの強度、すなわち炉下部粉化挙動と密接に関係しており、含炭塊成鉱製造の観点から重要な要素の1つである。したがって、(1)式にて含炭塊成鉱

中のカーボン消費率を算出し、カーボン残留率とあわせて評価した結果を図6に示す。含炭塊成鉱中のカーボンは20mass%まではほぼ100%消費されたが、それ以上ではカーボンが残留した。

$$\text{Carbon consumption} = \left(1 - \frac{C_A/T.Fe_A}{C_B/T.Fe_B}\right) \cdot 100 \quad (1)$$

また、還元試験は1100℃に到達後に還元を終了させ、ガスを常温窒素に切り替えてサンプルを冷却した後に還元後サンプルを取り出して組織観察を行った。その顕微鏡観察結果を図7に示す。カーボン含有量が高いRCA2～4については多くのメタルが観察されたが、カーボン含有率が最も高く、反応後にカーボンが残留したRCA4については、200μm程度の粗大残留カーボンが観察された。以上の結果から、含炭塊成鉱中カーボン含有率を20mass%以上とした場合、残留カーボンに起因して反応後強度が低下することが懸念された。

3.2 冷間強度評価結果

図8にカーボン含有率と冷間強度の関係を示す。含炭塊成鉱中のカーボン含有率を高めるほど、含炭塊成鉱強度は

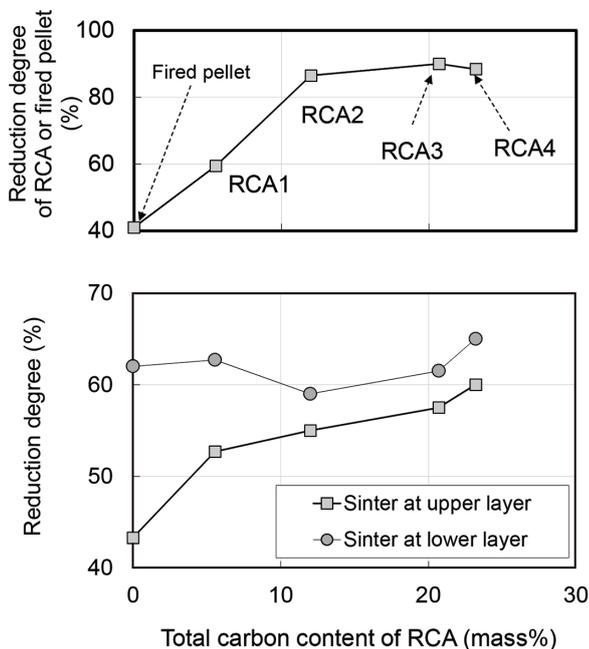


図5 含炭塊成鉱のカーボン含有率が還元率に及ぼす影響
Influence of carbon content of RCA on reduction degree of materials at 1100°C

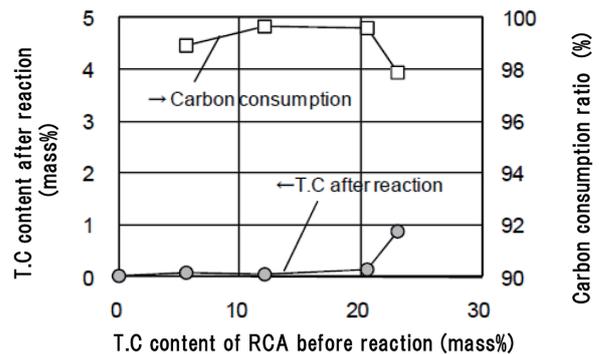


図6 含炭塊成鉱のカーボン含有率が反応後残留カーボンに及ぼす影響
Influence of carbon content of RCA on residual carbon after reaction at 1100°C

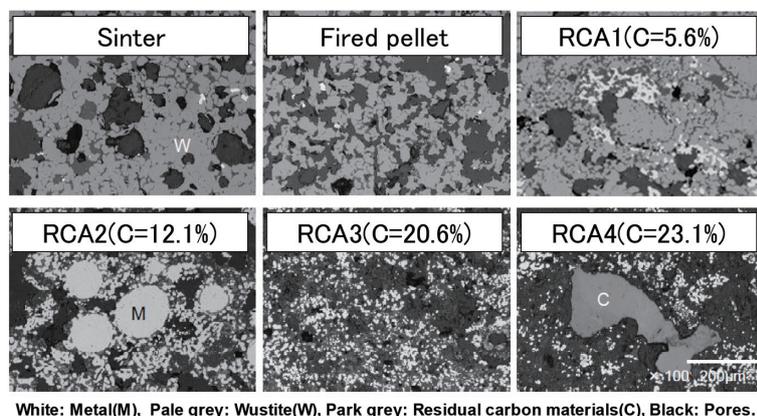


図7 焼結鉱、ペレットおよび含炭塊成鉱の還元後組織観察結果
Microstructure of carbon composite agglomerate after reduction at temperature up to 1100°C, together with sinter and fired pellet. White: metal (M), Pale grey: Wüstite (W), Dark grey: Residual carbon materials (C), Black: Pores.

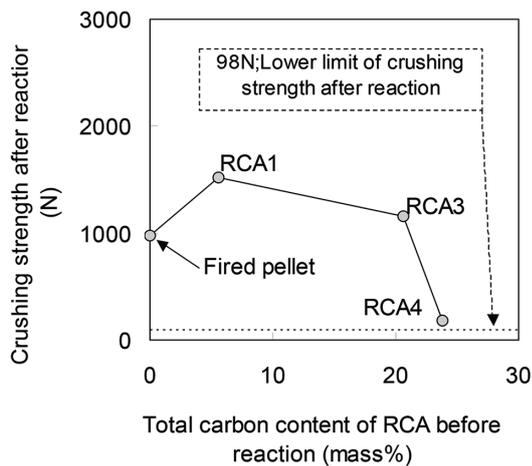


図8 含炭塊成鈹中カーボン含有率と反応前圧潰強度の関係
Relationship between total carbon in RCA before reaction and crushing strength after reaction

低下した。これは塊成鈹中のカーボン源として用いたコークス集塵粉は疎水性であるため、セメントとの結合性が弱く、添加率向上とともに塊成体の強度が低下したと考えられる。

これらの結果を踏まえると、高炉装入酸化鉄の還元促進効果の観点からは塊成鈹内のカーボン含有率は高いほど効果が大きい。冷間強度と反応後強度の観点からは、塊成鈹中のカーボンは20mass%未満にすることが望ましいと判断し、実機製造 RCA 中のカーボン含有率は20mass%になるように配合調整を行った。

3.3 実高炉使用試験結果

上記結果を踏まえて実機パンペレタイザーで製造した21000tのRCAを大分第2高炉にて使用した。RCA使用中の操業推移を図9に示す。試験期間中は、銑鉄生産速度を一定に維持するため、送風量、酸素富化量を調節した。また、高炉の炉熱や羽口先温度を一定に維持するため、送風温度や送風湿分を調節した。

本試験の結果、RCAの使用開始から、炉頂のガス利用率が向上し、ソリューションロスカーボンが低下した。その結果、高炉のカーボン使用原単位を低減することができた。なお、高炉のカーボン使用原単位はリストモデルに基づいた熱物質収支計算から、溶銑滓温度、炉体熱損失、送風温度、送風湿分、炉頂ダスト中のカーボンと酸化鉄量、および溶銑、微粉炭中のカーボン、水素量を補正し、補正カーボン原単位として算定した。

図10にRCA使用量と高炉補正カーボン原単位の関係を示した。非焼成含炭塊成鈹RCAを高炉にて使用することによるカーボン原単位の低減代はRCA由来のカーボン1kg/tHMあたり、0.36kgC/tHMと試算された。この結果から非焼成含炭塊成鈹は高炉使用炭材比率の低減、および銑鉄製造コスト低減に資する技術であると判断され、実機化

に向けた検討を開始した。そこで、実機を想定した非焼成含炭塊成鈹の製造条件として、まずは養生条件の選定のための検討を行い、その結果を次節にて述べる。

3.4 非焼成含炭塊成鈹の製造試験結果

非焼成含炭塊成鈹の養生条件選定のため、まずは小規模恒温槽試験にて養生時間、および温度の影響を検討した。一次養生温度T1は、18℃で52daN/p、50℃で144daN/pであり、温度の影響が大きかった。T1は急速養生において重要なパラメータであるが、実機RCAのヤード積み付け時には、水蒸気の潜熱やセメント水和反応熱、造粒時の摩擦熱などにより、積み付けたRCAの温度は加熱なしでも50℃程度までは上昇する。よって本実験ではT1を50℃一定とした。

ベース条件に相当する、一次養生時間(t1)=48h、T1=50℃の一次養生後、12日間天日養生をしたRCAの強度は144daN/pであった。実機の高炉使用では、経験的に100daN/pを強度下限値として管理されている。

図11に50℃でのt1のRCA圧潰強度への影響を示す。t1が大きいかほど圧潰強度が向上した。特に1~12hでその効果が大きく、t1が1hでは以降の高温養生を長時間しても十分な強度発現はしなかった。

図12に高温養生時間(t2)と養生温度(T2)の圧潰強度への影響を示す。t2が大きいかほど圧潰強度が向上した。しかし、一次養生時間t1が12h以上と十分に大きい場合は、その影響は相対的に小さかった。T2の影響は、一次養生時間t1によって異なった。20h以上の長時間養生では、50℃の低温養生が望ましかった。一方、24h以下の一次養生時間での強度発現には80℃程度の高温養生が必要であった。この結果は、セメントの蒸気養生においても見られ、セメント水和反応物の形態の変化によるものと推定される。乾燥時間(t3)の影響は小さく、1hあれば十分であった。

これらの結果から、圧潰強度が120daN/pに到達する最短養生時間は、乾燥1hを含めて18hであり、その条件は、t1=12h、T2=80℃、t2=5hであった。

上記知見に基づき、連続養生試験を実施した。図13に養生試験結果を示す。図中T_AとT_Bは図4中に示した熱電対の温度である。圧潰強度は、乾燥までに67daN/pまで到達し、乾燥によってさらに上昇して105daN/pまで到達した。同一の生ペレットを通常の日養生した圧潰強度は122daN/pであった。

最後に上記知見を踏まえ、パイロットプラントで製造したRCA(HPC10mass%配合)を用いた大規模養生試験を実施した。本試験に供したRCAの2週間天日養生後の成品圧潰強度は乾燥なしで108daN/pであった。

表4に試験条件および結果を示す。一次養生、蒸気養生、乾燥を基本工程として一次養生時間t1の影響(Run1~3)、蒸気養生温度T2の影響(Run4,5)、蒸気養生時間の影響

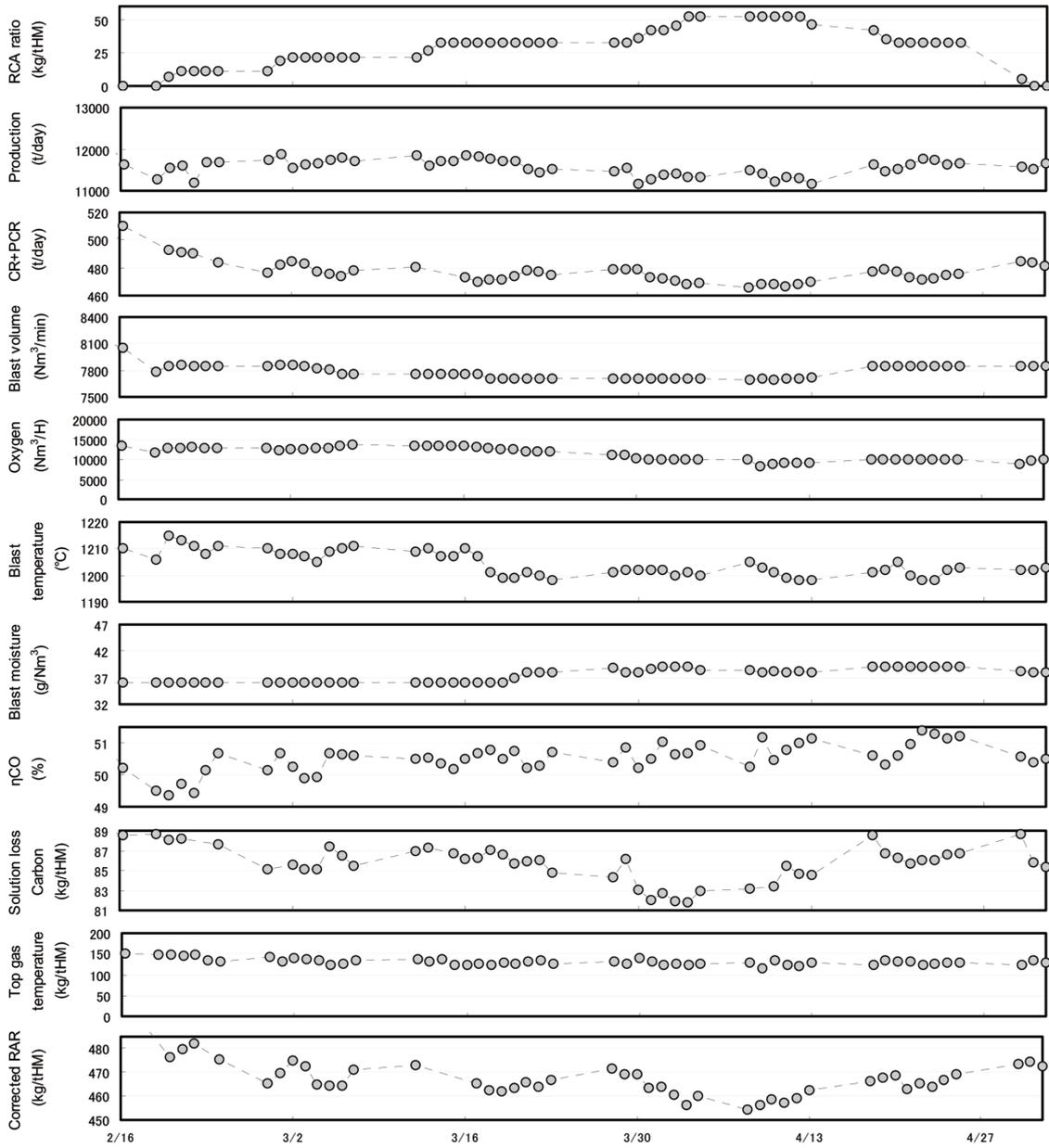


図9 大分第2高炉におけるRCA使用試験結果(操業推移)
Operational results of plant trial test of RCA at Oita No.2 BF

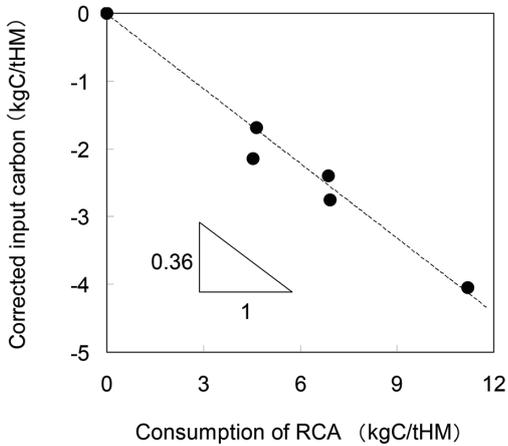


図10 RCA使用量と高炉カーボン比削減量の関係
Relationship between consumption of RCA and corrected input carbon

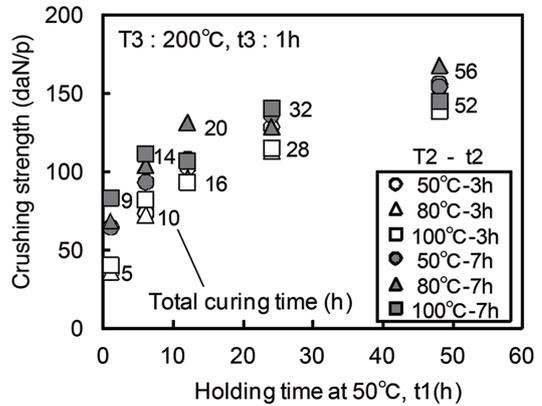


図11 一次養生時間(50°C)がRCAの圧潰強度に及ぼす影響
Influence of holding time at 50°C in the primary curing on crushing strength of RCA

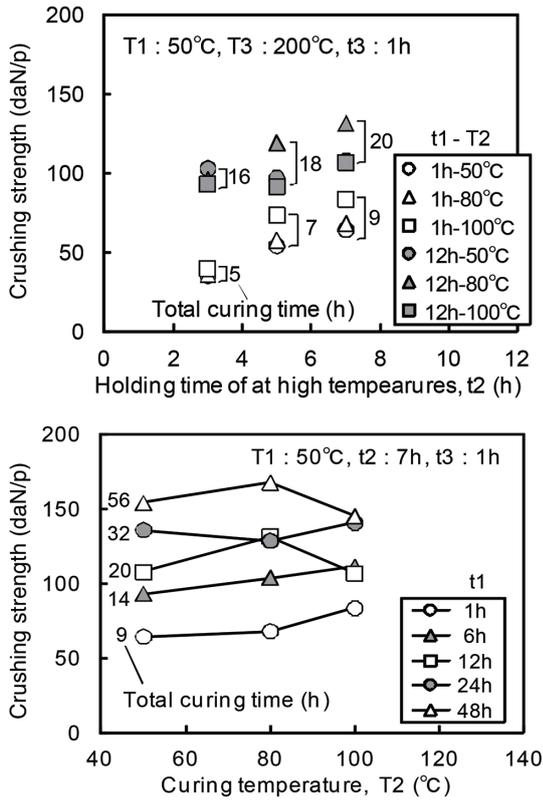


図 12 高温養生時間と温度が圧潰強度に及ぼす影響
Influences of holding time at high temperatures t_2 (A) and curing temperature T_2 (B) on crushing strength

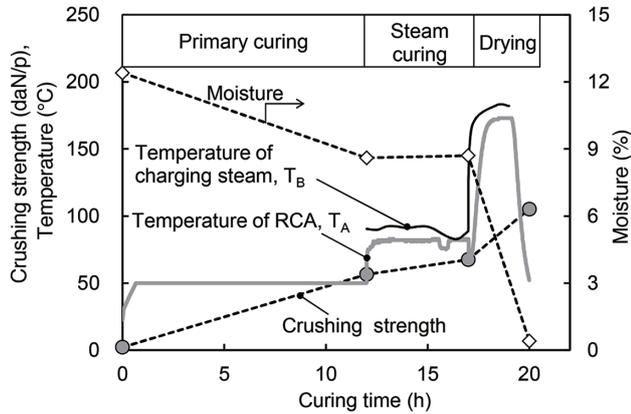


図 13 連続養生試験結果
Results of continuous curing test

t_2 (Run 6 ~ 8) を検討した。乾燥工程の影響を調べるために、蒸気養生後の RCA を少量採取し乾燥機にて乾燥させた。

一次養生時間 t_1 の影響は大きく、一次養生なしの場合は蒸気養生や乾燥によっても成品圧潰強度が十分に発現しなかった。一方で、一次養生時間が 24h のときに最も高強度となった。蒸気養生温度は、60°C と低温の方が高い強度が得られた。また、蒸気時間 t_2 の短縮に伴って強度は低下した。以上から、天日養生品と同等の強度が得られる最適な急速養生条件として、 $t_1=24h$ 、 $T_2=60^\circ C$ 、 $t_2=12h$ が得られた。なお、本試験では一次養生、蒸気養生中のシート内の温度と蒸気条件を均一にすることが困難で、同一の条件

表 4 大分製鉄所における RCA 急速養生試験結果
Results of plant rapid curing test of RCA in Oita Works

Run No.	T1 °C	t1 h	T2 °C	t2 h	Crushing strength after drying daN/p
1	38-58	0	80	12	19.9
2		12			133.6
3		24	60	12	165.0
4		24			110.7
5		24			158.0
6		24			133.8
7		24	60	8	90.6
8		24	60	4	79.4

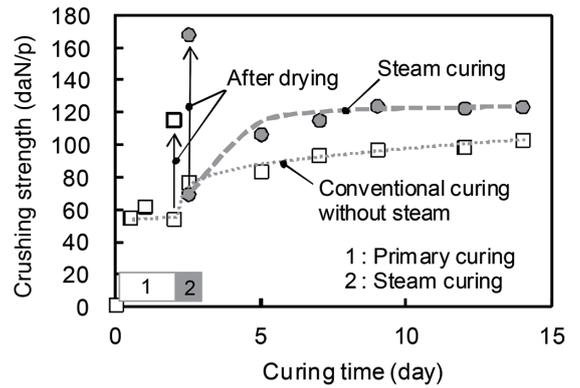


図 14 RCA 蒸気養生試験結果
Curing behavior of RCA after steam curing for 12 hours

(表 4 中 □, ◇) での結果の差異や、前述のオフライン連続養生試験結果との差異が生じたと考えられる。

また、工程省略化のため、乾燥処理なしで、蒸気養生のみでの必要養生期間の短縮の可能性を検討した。RCA を 48h 一次養生後、12 日間天日養生をする通常の養生方法と、一次養生後に蒸気養生を 12h 実施後、天日養生する方法での強度発現挙動を比較した。図 14 に、蒸気養生による RCA の強度発現挙動の変化を示す。蒸気養生により、通常の日養生では 14 日間必要とする RCA 強度 100 daN/p に 5 日間の養生で到達した。また、乾燥工程を組み合わせることで、169 daN/p まで到達した。

4. 含炭塊成鈹の実用化

これまでの含炭塊成鈹の実機製造、および養生試験、実高炉使用試験を踏まえ、2011 年 11 月より大分製鉄所に RCA 設備を導入した。図 15 に RCA の製造フローを示す。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。

図 16 に RCA 使用開始前後の大分第 1 高炉の操業変化を示す。RCA 製造量は約 900t/day であり大型高炉 (炉容積 5775m³, 2 基) において、最大 40kg/tHM の使用量となる。表 5 に RCA 使用前と使用後の主要諸元変化を示す。高炉

での RCA 使用評価の際は、鉄分入量は一定となるように、カーボン入量に関しては溶銑温度がほぼ一定となるように鉍石および還元材量を調整した。RCA 使用により、従来得られた知見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（羽口上 15.225m）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、100 daN/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。

5. 結 言

カーボンと酸化鉄の近接配置による高炉内反応の高速化、高効率化によって高炉使用カーボン原単位の削減効果が期待される非焼成含炭塊成鉍の開発に取り組み、オフライン試験による基礎試験から、パンペレタイザーによる実機製造と実高炉使用試験までを一貫して実施し、以下の知見を得た。

- (1) 含炭塊成鉍中の最適なカーボン含有比率は、酸化鉄急速還元と反応後残留カーボン、冷間強度、反応後強度の観点から、20mass%が望ましい。
- (2) 大分製鉄所にて 21000t の非焼成含炭塊成鉍 RCA を製造し、大分第 2 高炉にて最大使用量 54kg/tHM の長期使用試験を実施した結果、還元平衡点温度の低下、およびガス利用率の向上を確認し、RCA 由来の装入カーボン 1kgC/tHM あたり 0.36kgC/tHM のカーボン原単位削減効果を得た。
- (3) 一次養生、高温養生、乾燥から構成される養生工程において、14 日間の通常養生強度が得られる最短の RCA の養生条件は、一次養生時間 12h、蒸気養生温度 80℃、蒸気養生時間 5h であり、乾燥も含めて計 18 時間まで短縮できる結果を得た。実機試験では、乾燥ありで 12.5 日、乾燥なしでも 9 日までの養生期間短縮が可能

表 5 RCA 使用前後の操業諸元変化
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.

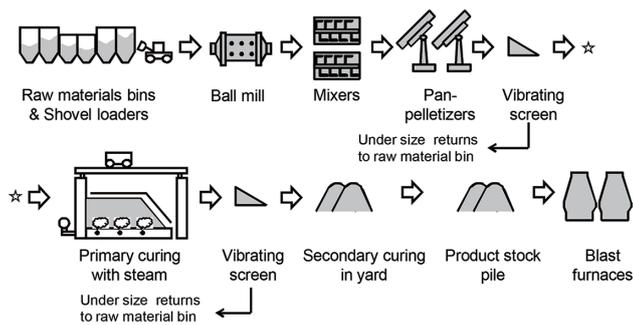


図 15 大分製鉄所における RCA 製造フロー
Production flow sheet of RCA implemented in Oita Works

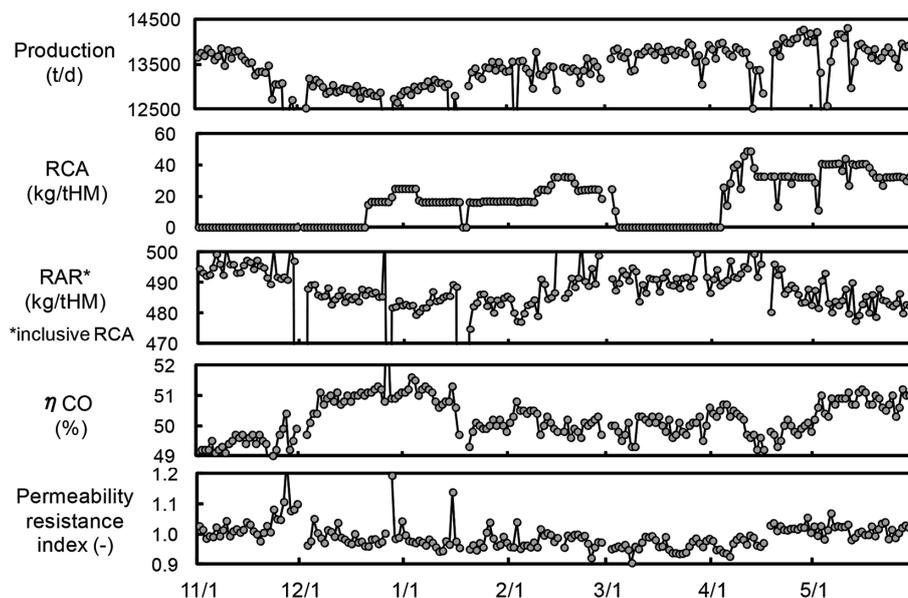


図 16 大分第 1 高炉における RCA 使用中の操業推移
Operational data of RCA use in Oita No.1 blast furnace

であった。

- (4) 蒸気養生工程を含む、RCA 製造設備を大分製鉄所に導入し、高炉での定常使用を開始した。以降、大型高炉 2 基の低 RAR 操業に寄与している。

参考文献

- 1) Naito, M., Okamoto, A., Yamaguchi, K., Yamaguchi, T., Inoue, Y.: Tetsu-to-Hagané. 87, 357 (2001)
- 2) Nomura, S., Ayukawa, H., Kitaguchi, H., Tahara, T., Matsuzaki, S., Naito, M., Koizumi, S., Ogata, Y., Nakayama, T., Abe, T.: ISIJ Int. 45, 316 (2005)
- 3) Yamamoto, T., Sato, T., Fujimoto, H., Anyashiki, T., Fukada, K., Sato, M., Takeda, K., Ariyama, T.: Tetsu-to-Hagané. 97, 501 (2011)
- 4) Higuchi, K., Nomura, S., Kunitomo, K., Yokoyama, H., Naito, M.: ISIJ Int. 51, 1308 (2011)
- 5) Sunahara, K., Natsui, T., Shizawa, K., Ujisawa, Y.: ISIJ Int. 51, 1322 (2011)
- 6) Nakano, M., Naito, M., Higuchi, K., Morimoto, K.: ISIJ Int. 44, 2079 (2004)
- 7) Kashiwaya, Y., Kanbe, M., Ishii, K.: ISIJ Int. 46, 1610 (2006)
- 8) Shimizu, M.: ISIJ Int. 51, 1203 (2011)
- 9) Kawanari, M., Matumoto, A., Ashida, R., Miura, K.: ISIJ Int. 51, 1227 (2011)
- 10) Bruin, T. de, Sundqvist, L.: Proc. ICSTI/Ironmaking Conf. ISS, Warrendale, PA, 1998, p. 1263
- 11) Kasai, A., Toyota, H., Nozawa, K., Kitayama, S.: ISIJ Int. 51, 1333 (2011)
- 12) Son, S. H., Kim, Y. J.: Proc. 6th ECIC. VDEh, Düsseldorf, 2011, Session17, DVD-ROM
- 13) Inazumi, T., Furutaku, H., Kuwabara, T., Esaki, K.: Conserv. Recycling. 6, 167 (1983)
- 14) Kabuto, S., Nishikawa, K., Yoshida, H., Matsunaga, S., Kobayashi, M., Oka, K.: CAMP-ISIJ. 10, 14 (1997)
- 15) Takagi, S., Maeda, H., Yumura, A., Takatani, K., Ohsawa, T., Fujiwara, Y., Mio, K.: Tetsu-to-Hagané. 72, S886 (1986)
- 16) Inazumi, T., Furutaku, H., Kuwabara, T., Esaki, K.: Conservation & Recycling. 6, 167 (1983)
- 17) Kabuto, S., Nishikawa, K., Yoshida, H., Matsunaga, S., Kobayashi, M., Oka, K.: CAMP-ISIJ. 10, 14 (1997)
- 18) Svensson, J.: Trans. Soc. Mining Engineers, AIME. 247, 26 (1970)
- 19) Goksel, M. A.: Agglomeration 77. Ed. by Sastry, K. V. S., American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc., New York, 1977, p. 877
- 20) Hassler, B., Kihlstedt, P. G.: Agglomeration 77. Ed. by Sastry, K. V. S., American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc., New York, 1977, p. 901
- 21) Jansson, B., Ökvist, L. S., Su, F., Wedholm, A.: Proc. The 7th Japan-Nordic Countries Joint Symposium Science and Technology of Ferrous Metallurgy. Jernkontoret, Stockholm, 2005, 14:1
- 22) Lemperle, M., Rachner, H.-J., Fechner, R., Kasun, D.: AISTech 2011, Iron & Steel Tech. Conf. Proc. Volume I, AIST, Warrendale 2011, p. 149



横山浩一 Hirokazu YOKOYAMA
プロセス研究所
試験高炉プロジェクト推進部 主幹
製鉄研究部 主幹研究員(兼務)
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



樋口謙一 Kenichi HIGUCHI
プロセス研究所 製鉄研究部
上席主幹研究員 博士(工学)



伊藤高志 Takashi ITO
経営企画部 主幹



大塩昭義 Akiyoshi OSHIO
濱田重工(株)
執行役員 大分支店長



千葉道夫 Michio CHIBA
(株)テツゲン
八幡支店 技術室長



佐藤洋之 Hiroyuki SATO
大分製鉄所 製鉄部 製鉄技術室