12m³試験高炉を用いた高炉からの排出CO₂量削減技術の開発

Development of Technology for Reduction of CO₂ Emission from Blast Furnace Using 12 m³ Experimental Blast Furnace

上城親司* 横 山浩 砂原公平 倉 良徳 Chikashi KAMIJO Yoshinori MATSUKURA Hirokazu YOKOYAMA Kohei SUNAHARA 元 野 柿内一 中 薫 酒 井 博 Kazumoto KAKIUCHI Kaoru NAKANO Hiroshi SAKAI

抄 録

製鉄所からの排出 CO₂ 量削減技術の開発は寸刻を争う事態である。日本製鉄(株)は COURSE50 において,水素還元の効果を最大限に享受する高炉プロセス操作を見極めることを目的に,12m³ 試験高炉を用いた鉄鉱石還元への水素の高効率利用技術を開発中である。2018 年度第3 四半期と 2019 年度第1 四半期にそれぞれ 32 日間の操業試験を実施し,水素を含む還元ガスの高炉への吹込みが,高炉からの排出 CO₂ 量に与える影響を調査した。また3次元高炉数学モデルで排出 CO₂ 量の予測計算を行い,試験高炉の操業設計に反映した。その結果,開発目標である排出 CO₂ 量 10%の削減のめどを得,合わせてモデルの予測精度が極めて高いことを確認した。

Abstract

The development of technology to reduce the amount of CO_2 emission from steelworks is a matter of urgency. In order to clarify the blast furnace process operation that maximizes the effect of hydrogen reduction, a technology for highly efficient use of hydrogen for iron ore reduction has been developing using a 12 m³ experimental blast furnace in COURSE50. Operation tests were conducted for 32 days each in the 3Q of 2018 and the 1Q of 2019 to investigate the effect of blowing reduced gas containing hydrogen into the blast furnace on the amount of CO_2 emitted from the blast furnace. In addition, a three-dimensional blast furnace mathematical model was used to predict and calculate the amount of CO_2 emission and reflected in the operational design of the test blast furnace. As results, the prospect of CO_2 emissions by 10% reduction is the development target, the prediction accuracy of the combined model was confirmed that extremely high.

1. 緒 言

2016年11月4日,2020年以降の温室効果ガス排出削減 等のための新たな国際枠組み"パリ協定"¹⁾が発効し,製 鉄所からの排出 CO₂量削減技術の開発は寸刻を争う事態 である。地球環境保全のための様々な技術開発が国内外で なされており²⁾,例えば ThyssenKrupp では,高炉への純水 素の1本羽口吹込テストを2019年から実施している³⁾。ま た宝武集団新彊八一鋼鉄有限公司では,2019年7月に実 炉を改造した430m³の試験高炉が稼働し,純酸素高炉操 業のテストを経て,純水素吹込みをテストする予定であ る⁴⁾。国内では,酸素高炉の開発が継続的に検討^{5,6)}されて いる。日本製鉄(株)は、国立研究開発法人新エネルギー・ 産業技術総合開発機構 (NEDO)の委託事業である"環境 調和型プロセス技術の開発"ⁿにおいて、フェロコークス利 用技術⁸⁾と、水素還元の効果を最大限に享受する高炉プロ セス操作を見極めることを目的とした、鉄鉱石還元への水 素の高効率利用技術を開発中である (COURSE50:CO₂ Ultimate Reduction System for Cool Earth 50)。

本 COURSE50 では、2018 年度より水素系還元ガスの羽 口からの多量吹込操業を念頭に、3 次元高炉数学モデル^{9,10)} で羽口から水素系還元ガスを最大 277 Nm³/t-HM 吹き込む 時の排出 CO₂量のシミュレーションを実施した。その結果 を試験高炉の操業設計に反映し、2018 年度第3 四半期と 2019年度第1四半期にそれぞれ32日間の操業試験を実施し、水素を含む還元ガスの高炉への吹込みが、高炉からの排出CO,量に与える影響を調査した。

2. COURSE50開発概要

COURSE50は、製鉄所の既存設備を最大限活用し、製 鉄所からの排出 CO₂量を30%削減することを目標とするプ ロジェクトである。CO₂削減率30%のうち、20%を高炉の 炉頂ガス中 CO₂の分離回収によって、10%を高炉での送風 操作と原料操作によって達成する。本プロジェクトは NEDOの100%助成事業として2008年度から新日本製鐵 (株),住友金属工業(株),日新製鋼(株)(以上,現日本製鉄), JFE スチール(株),(株)神戸製鋼所,新日鉄エンジニアリ ング(株)(現日鉄エンジニアリング(株))の6社で開発を開 始した。2012年度まで要素開発を行い(フェーズ I-STEP1), 2013年度から試験高炉を主体とした水素還元とCO₂分離 回収を統合した総合技術開発を2017年度まで実施した (フェーズ I-STEP2)¹¹⁻¹³。

既存高炉と COURSE50 高炉の比較を図 1 に示す。既存 高炉内で起こる還元反応の内訳は、CO ガスによる還元の 比率が 60%、H₂ ガスによる還元が 10%、見かけ上固体 C で FeO を還元する直接還元は 30%である。それぞれの反 応式と反応熱は (1) ~ (3) 式で表される。

 $FeO + CO = Fe + CO_2 + 17288 \text{ kJ/kmol}$ (1)

$$FeO + H_2 = Fe + H_2O - 23\,834 \text{ kJ/kmol}$$
 (2)

FeO + C = Fe + CO - 155011 kJ/kmol (3)

一方 COURSE50 高炉では水素系還元ガスの吹込みにより, 直接還元の10%をH₂ガスによる還元に置換することを指向する。直接還元もH₂還元も吸熱反応であるが, 直接還元の方が圧倒的に吸熱量は大きいので, 直接還元とH₂還元の置換により還元材比を低減でき, 排出 CO₂量の削減が可能となる。



図 1 既存高炉と COURSE50 高炉の比較 Comparison of conventional BF with COURSE50 BF



図 2 試験高炉の操業形態の比較 Comparison of schematic views of operation configurations

このコンセプトの検証のため、後述の高水素吹込操業に 対応した3次元高炉数学モデルを開発し¹⁰,シミュレーショ ンを行った。また試験高炉(内容積12m³)を2016年に建 設し、2回の熱間試運転と4回の操業試験によってシミュ レーションの実証試験を行った。その結果、(1)羽口からの コークス炉ガス(以下、COGと称す)吹込みと高酸素富化、 (2)高炉炉頂ガスからCO₂を分離した残りのガスのシャフ ト羽口吹込み、(3)高被還元性焼結鉱の使用の3つの手段 (図2a))により、開発目標である高炉からの排出CO₂量 10%削減を達成した。

2018 年度からは、排出 CO₂ 削減手段の自由度拡大を指向し、(1)³羽口からの水素系還元ガス吹込みと高酸素富化、(2) 高被還元性焼結鉱の使用の2つの手段で排出 CO₂量削減率の上限を探索するフェーズ II-STEP1 を開始した(図2b))。

3. 試験高炉設備概要

12m³ 試験高炉の概念図を図3に示す¹²)。1本の出鉄口 と3本の羽口を有するベルレス高炉で,熱風炉から送風温 度1000℃の熱風を吹き込んで銑鉄を製造する。羽口からは, 微粉炭と水素を含む還元ガスを2重管または3重管ランス で吹き込むことができる。実高炉同様,原料ホッパーから 焼結鉱と塊鉱石,スラグ成分調整用の副原料,塊コークス を切り出し,ベルトコンベアで炉頂まで搬送し,層状装入 を行う。1日の出銑量を34tで諸元を設計した場合,2hピッ チで出銑口を開孔機で開孔する。1回の出銑で溶銑とスラ グ併せて約4tを排出し,溶銑滓は鉄鍋で受銑する。計測 端としては,垂直ゾンデ,炉体温度計,静圧計など通常高 炉の付帯設備は全て揃っているが,実炉には無い計測端と して,操業中に炉水平断面の内容物や炉内ガスを採取可能 なゾンデを高さ方向に3段有する。



図3 12m³ 試験高炉の概念図¹²⁾ Schematic view of 12 m³ experimental blast furnace¹²⁾

4. 実 験

4.1 3次元高炉数学モデルの概要とシミュレーション 条件

4.1.1 概要

3次元高炉数学モデル^{9,10}の概要を図4に示す。炉底の 溶銑・スラグ溜まりを除く領域を計算対象とし,気体・固体・ 液体各相関する物質収支,エネルギー収支,運動量収支を 考慮している。本モデルで考慮している主な反応を表1に 示す。(4)~(9)式は酸化鉄の還元で,三界面未反応核モデ ルを用いて計算する。(10),(11)式はコークスのガス化反応 である。これらの反応速度は,過去の基礎試験から得られ たアレニウス型の化学反応速度定数を用いて計算されるが, 速度定数には補正係数を乗じることができる。シミュレー ションを行う場合,試験高炉の実績解析から補正係数の値 を決定し,その補正係数を用いて予測精度の向上を図る。

4.1.2 シミュレーション

水素系ガスの吹込量と排出 CO₂ 量削減効果の関係を調 査するため、COG 単味、COG+H₂ 混合、H₂ 単味の3種類 のガスの吹込操業のシミュレーションを行った。

4.2 試験高炉操業試験

4.2.1 操業試験条件

3次元高炉数学モデルで設計した第5回,第6回操業の 操業諸元とその時の炭素消費原単位削減率の予測値を表2 に示す。操業は,羽口温度,溶銑温度,出銑量が一定にな るように設計した。Aは通常の高炉操業であり,何らかの 外乱で各操業試験の基準がずれていないことを確認するた め必ず実施した。区別のため第6回操業のケース名に-2 を付与した。Cは高水素吹込操業の再現性確認のため,第



図 4 3 次元非定常高炉数学モデルの概要³⁾ Schematic diagrams of 3-dimentional mathematical model for blast furnace³⁾

表1 高炉数学モデルで考慮している主な反応⁹ Reactions considered in mathematical blast furnace model⁹

No.	Reactions								
(4)	$3Fe_2O_3(s)$	+	CO(g)	=	$2Fe_{3}O_{4}(s)$	+	$CO_2(g)$		
(5)	$Fe_{3}O_{4}(s)$	+	CO(g)	=	3FeO(s)	+	$CO_2(g)$		
(6)	FeO(s)	+	CO(g)	=	Fe(s)	+	$CO_2(g)$		
(7)	$3Fe_2O_3(s)$	+	$H_2(g)$	=	$2Fe_{3}O_{4}(s)$	+	$H_2O(g)$		
(8)	$Fe_3O_4(s)$	+	$H_2(g)$	=	FeO(s)	+	$H_2O(g)$		
(9)	FeO(s)	+	$H_2(g)$	=	Fe(s)	+	$H_2O(g)$		
(10)	C(s)	+	$CO_2(g)$	=	2CO(g)				
(11)	C(s)	+	$H_2O(g)$	=	CO(g)	+	$H_2(g)$		
(12)	FeO(l)	+	C(s)	=	Fe(l)	+	CO(g)		
(13)	C(s)	=	<u>C</u>						
(14)	$H_2O(g)$	+	CO(g)	=	$H_2(g)$	+	$CO_2(g)$		
(15)	$SiO_2(1)$	+	C(s)	=	SiO(g)	+	CO(g)		
(16)	$SiO_2(s)$	+	C(s)	=	SiO(g)	+	CO(g)		
(17)	$SiO_2(s)$	+	3C(s)	=	SiC(s)	+	2CO(g)		
(18)	SiO(g)	+	<u>C</u>	=	<u>Si</u>	+	CO(g)		
(19)	Fe(s)	=	Fe(1)						
(20)	FeO(s)	=	FeO(l)						

5回,第6回両方で実施した。ここで同じケースにもかか わらず第5回と第6回で若干数字が異なるのは,後述する 第5回操業後の再チューニングの結果である。またBとE, C及びC-2とFでは,それぞれ全水素投入量が同レベルで 羽口から吹き込むガス種を変更した。なお全水素投入量と は,羽口から吹き込まれるCOGや純H₂ガス由来の水素, 羽口前で燃焼するPC及びコークス由来の水素の合計であ る。そしてDは,Cと同じ諸元で高被還元性焼結鉱を使用 した。焼結鉱の被還元性は,日本製鉄の2基の焼結機で製 造される焼結鉱を使い分けることで変更した。ここで焼結

表 2 試	験操業条件と炭素消費原単位削減率予測
Operation conditions and predicted re	reduction ratio of carbon consumption in experimental blast furnace

	5th campaign					6th campaign			
Case	А	В	С	D	A-2	Е	C-2	F	
COG (Nm ³ /h)	0	119	119	119	0	0	119	0	
$H_2 (Nm^3/h)$	0	0	170	170	0	143	170	310	
Total H ₂ input (Nm ³ /t-HM)	53	154	276	277	61	159	276	277	
Blast volume (Nm ³ /h)	1 589	1 1 8 8	852	822	1 699	1408	904	975	
Blast temp. (°C)	1 0 0 0	1 0 0 0	1000	1 000	1 0 0 0	1 0 0 0	1 0 0 0	1 000	
$O_2 (Nm^3/h)$	94	182	252	252	104	154	259	229	
O ₂ enrichment (%)	4.4	10.5	18.0	18.5	4.4	9.0	20.0	16.8	
Flame temp. (°C)	2 0 9 8	2 101	2096	2091	2086	2 0 9 4	2091	2 0 9 1	
Reducibility index of sinter (JIS-RI) (%)	64	64	64	68	64	64	64	64	
Productivity (t/d)	34	34	34	34	34	34	34	34	
Reduction ratio of C emission (%)	0	3.0	8.0	9.0	0.0	5.7	10.7	12.0	

鉱の被還元性の指標として、本試験ではJIS-RIを採用した。 これは、社内外の製銑研究者と議論するときの共通指標が、 現在はJIS-RIしか存在しないからである。もちろん、高水 素濃度雰囲気下の焼結鉱の被還元性の評価指標が、900℃、 60%CO-40% N₂雰囲気下で測定するJIS-RIで良いのかに ついては議論中である。

4.2.2 試験操業方法

試験操業においては、炉底温度が一定になった時点で定 常状態に達したと判断した。すなわち、炉底温度の上昇速 度が低下してほぼ一定になるまで、ベース条件での操業を 継続した。10日間操業後、炉底温度がほぼ一定になったの で、定常に達したと判断した。定常に達した時点で、次項 で述べる炉内の温度及びガス成分測定を行った。測定終了 後、直ちに次試験の送風・装入諸元に移行した。2日間次 試験条件での操業を継続して操業を安定化させた。安定を 確認後、炉内の温度及びガス成分測定を行い、さらに次の 条件へ移行するという操業を繰り返した。全ての試験ケー スを終了後、炉内を直ちにN,に置換して約1か月冷却した。

4.2.3 測定項目

焼結鉱の被還元性は操作因子の一つであるので,操業中 は毎日測定した。また出鉄ごとに溶銑温度と溶銑及びスラ グ成分を測定し,送風・装入諸元の微修正を行った。上述 のように試験条件に諸元を合わせて安定したことを確認し た後,炉高さ方向に3段ある水平ゾンデ及び垂直ゾンデを 用いて炉内の温度及びガス成分を測定した。

4.2.4 評価方法

各ケースのゾンデによるデータ採取期間内で,24h連続 して送風量がほぼ一定で安定に操業できていたと判断され る期間を抽出し,その期間の諸元を平均して総括収支を計 算した。収支計算の結果得られた各ケースの炭素消費原単 位をベースと比較し,削減率を算出した。

5. 実験結果

5.1 操業概要

操業推移の例として,第6回操業の推移図を図5に示す。 世界に例の無い量の純H₂ガスを試験高炉に投入したが, ほぼ安定した操業を32日間継続することができた。水素 投入量の増加とともに,水素還元率の上昇と直接還元率の 低下を確認した。

5.2 半径方向ガス濃度分布

操業中に高さ方向で3段測定した,試験高炉断面方向の COとH₂濃度分布をシミュレーション結果とともに図6に 示す。いずれの高さでも,計算と実績はほぼ一致した。

5.3 炉高さ方向のガス濃度推移

垂直ゾンデで測定した試験高炉の高さ方向の CO と H₂ 濃度推移を図7に示す。図中には、3次元高炉数学モデル



図5 操業推移の例(第6回操業) Operation results of experimental blast furnace (6th campaign)



図 6 水平ゾンデで測定した CO と H₂ 濃度と計算結果の比 較例 (ケース C)

Example of comparison of observed CO and $\rm H_2$ concentration distributions by horizontal sondes with calculated ones (Case C)



図7 垂直ゾンデで測定した CO と H₂の推移と計算結果の 比較の例 (ケース C)

Example of comparison of observed transitions of CO and H_2 concentrations by vertical sonde with calculated ones (Case C)

で計算した高さ方向のCOとH₂濃度を,半径方向のメッシュ 別に示した。垂直ゾンデは荷下がりに追従して炉内を降下 するゾンデであり,必ずしも垂直には移動しない。また断 面の1点だけのデータである。しかし測定結果は,計算結 果の帯の中にほとんど収まっており,おおむね一致したと 判断できる。

5.4 間接還元率及び直接還元比率

総括収支を計算して得られた CO 還元率, H₂ 還元率と 直接還元率を比較した結果を図8に示す。

AとA-2の直接還元率,CO及びH₂還元率の差の平均 は0.8%だった。C同士の場合は,差の平均は0.7%だった。 よって再現性は非常に良好と判断される。一方,BとEの 差の平均1.7%,CとFの差の平均は0.9%と,やや大きかっ た。この原因はCO還元率がEはBに比べ2.5%低下,F はCに比べ1.3%低下したためである。これは,COG吹込 みから純水素吹込みに切り替えた結果,COG由来のCO が減少したためであると考えられる。

全水素投入量と水素還元率の関係を従来の試験結果とと もに図9に示す。図中には第2回~第4回の結果¹³⁾のプロッ トと,それらの最小自乗法で求まる直線を実線で示した。 第5回,第6回操業の結果は,第2回~第4回の結果の最 小二乗法で得られた実線の延長線上にプロットされた。

5.5 炭素消費原単位削減率

全水素投入量と炭素消費原単位削減率の関係を図10に 示す。図10には、3次元高炉数学モデルのシミュレーショ ン結果も示した。図10から分かるように、シミュレーショ ン結果は実績と良く一致した。また全水素投入量が同一の 場合、COG、COG+H₂、純H₂の順で炭素消費削減率が増 加した。一方、高被還元性焼結鉱を使用した場合の炭素消 費原単位削減率は0.5%の増加にとどまった。操業の外乱 が影響したと思われるので、今後も調査を継続する。





ところで、COG+H₂吹込操業にはシミュレーション結果 が2点ある。炭素消費原単位削減率8%付近のシミュレー ション結果は、第4回操業¹³までで使用していたパラメー タを使用して予測した結果である。第4回操業での最大全 水素投入量は210Nm³/t-HM だったが、その操業を再現で きるパラメータを用いて、全水素投入量が277Nm³/t-HM の操業を外挿で予測し、炭素消費原単位削減率が最大8% と見積もられた。その時の計算諸元を試験高炉で実施する と、予測通り8%の炭素消費原単位削減効果が得られた。 次に第5回操業における全水素投入量277Nm³/t-HMの操 業結果を使用してパラメータを再チューニングし、再度全



図9 全水素投入量と水素還元率の関係 Relationship between total input H_2 with H_2 indirect reductions



図 10 全水素投入量と炭素消費原単位削減率の関係 Relationship between total input H_2 with specific carbon consumption reduction ratio

水素投入量 277 Nm³/t-HM のシミュレーションを行った。そ の結果,炭素消費原単位削減率が 10%になる送風量と酸 素量の組み合わせが見つかった。そこでその諸元の操業を 第6回で実施したところ,10%の炭素消費原単位削減効果 が得られた。これが、シミュレーション結果が2点ある理 由であり、表2に示したAとA-2,CとC-2で若干数値に 差があった理由である。なお、純H₂ガス吹込みの予測は 再チューニング後のパラメータを用いて行った結果である。 計算と実績は大変良く一致しており、チューニング精度が 向上したと判断できる。そして全水素投入量が 277 Nm³/ t-HM のときの、炭素消費原単位削減率が 12%であること を、シミュレーションと試験高炉の操業で実証できた。

6.考察

同一全水素投入量でも、羽口から吹き込むガス種によっ て炭素消費原単位削減率に差があることが、シミュレーショ ンと試験高炉の操業で明らかになった。この理由を調べる ために、3次元高炉数学モデルで計算された熱収支を COG 単味吹込み、COG+H₂吹込み、H₂単味吹込みで比較した。 結果を図11に示す。

まず COG の吹込量の影響について考える。高炉の出熱 (図 11 a))を見ると、COG 吹込量が増加すると、還元に必 要な熱量が減少する。これは直接還元量が減少するからで ある。しかし COG 吹込量の増加は分解熱の増加も引き起



*Flame temperatures and productivities are constant.

図 11 羽口から吹き込むガス種が高炉の出入熱量と炭素消費 量に与える影響の比較

Comparison of effects of reductant gas types on heat input and output of blast furnace and specific carbon consumption こす。また上述のように、本試験は羽口前温度、出銑量、 溶銑温度一定の試験である。気体還元材は常温で吹き込む ので、吹込量が増加すれば羽口前温度を一定にするために 酸素量を増加する。同時に、出銑量が一定という条件を満 足するために、送風量を低下する。送風量低下は炉内に投 入する N₂ 量の低下、すなわち炉内への投入顕熱低下につ ながる (図 11b))。その結果、COG 吹込量の増加は炭素消 費原単位の増加を引き起こす (図 11 c))。

一方 H₂ 単味吹込みの場合は、分解熱が必要ない。従っ て同じ全水素投入量でも、H₂ 単味吹込みの方が酸素富化 率を下げることができる、すなわち送風量を下げなくて良 いので、送風顕熱を高めることができる。故に H₂ 単味吹 込みの方が、炭素消費原単位が低下できるということが明 らかとなった。

この結果から、今後の開発ではH₂単味吹込みによる排 出 CO₂ 量削減が必要と結論される。しかし製造時に CO₂ を排出しない、いわゆるグリーン H₂の入手には課題がある。 本研究は、グリーン H₂の入手が可能になった場合に即実 機適用可能なように確度の高い開発を継続するが、並行し てグリーン H,製造技術の早期実用化が望まれる。

7. 結 言

3次元高炉数学モデルを用いて,水素を含む還元ガスの 高炉への吹込みが排出 CO₂量に与える影響をシミュレー ションし,その結果に基づき 12m³ 試験高炉で実証試験を 行った結果,以下の知見を得た。

- シミュレーションの結果、高炉への全水素投入量が 277Nm³/t-HMのとき、排出CO₂量を12%削減できるこ とを確認し、試験高炉の32日間の連続操業試験で実証 した。
- (2) 水素投入量と水素還元率には正相関がみられた。
- (3) 高炉への全水素投入量が同一でも、吹き込むガス種によって CO₂ 削減効果に差があることを実証した。還元ガスの分解熱と吹込酸素量が、削減効果に影響を与えることをシミュレーションで明らかにした。

謝 辞

本研究成果は,国立研究開発法人新エネルギー・産業技 術総合開発機構 (NEDO)の委託事業である"環境調和型 プロセス技術開発 (COURSE50)"の結果として得られたものであり、ここに謝意を表します。

また,試験操業完遂にご尽力頂いた統括各位及び操業要 員各位,並びに COURSE50 にかかわる社内外の全ての関 係者各位に深く感謝申し上げます。そして,熱間試運転以 来第5回操業まで,試験高炉のデータ解析にご尽力頂いた, 濱田重工(株)杉谷領太氏に心より感謝申し上げます。

参照文献

- For example, United Nations: The Paris Agreement, https://unfccc. int/process-and-meetings/the-paris-agreement/what-is-the-parisagreement, (accessed 2020-10-7)
- 2) Ariyama, T.: Tetsu-to-Hagané. 105, 567 (2019)
- ThyssenKrupp: Press Release, https://www.thyssenkrupp.com/ en/newsroom/press-releases/world-first-in-duisburg-as-nrweconomics-minister-pinkwart-launches-tests-at-thyssenkrupp-intoblast-furnace-use-of-hydrogen-17280.html, (accessed 2020-10-8)
- BAOWU: Press Release, http://www.bygt.com.cn/nzcms_show_ news.asp?id=6558, (accessed 2020-10-7)
- Takahashi, K., Nouchi, T., Sato, M., Ariyama, T.: Tetsu-to-Hagané. 102, 365 (2016)
- Kawashiri, Y., Nouchi, T., Matsuno, H.: Tetsu-to-Hagané. 104, 467 (2018)
- For example, The Japan Iron and Steel Federation: https://www. jisf.or.jp/course50/outline/, (accessed 2020-10-7)
- NEDO: Press Release, https://www.nedo.go.jp/news/press/ AA5 100769.html, (accessed 2020-10-7)
- 9) Takatani, K., Inada, T., Ujisawa, U.: ISIJ Int. 39, 15 (1999)
- 10) Nishioka, K., Orimoto, T., Sakai, H.: CAMP-ISIJ. 28 (2), 613 (2015)
- Tonomura, S., Araki, K., Hase, K., Ujisawa, Y., Nishioka, K., Ishiwata, N.: 8th International Congress on Science and Technology of Ironmaking (ICSTI 2018), Vienna, 2018
- Kakiuchi, K., Ujisawa, Y., Sunahara, K., Tomisaki, S., Demi, H., Sasaki, M.: 8th International Congress on Science and Technology of Ironmaking (ICSTI 2018), Vienna, 2018
- Nakano, K., Ujisawa, Y., Kakiuchi, K., Nishioka, K., Sunahara, K., Matsukura, Y., Yokoyama, H., Sakai, H.: 8th International Congress on Science and Technology of Ironmaking (ICSTI 2018), Vienna, 2018



上城親司 Chikashi KAMIJO プロセス研究所 試験高炉プロジェクト推進部 上席主幹 博士(工学) 千葉県君津市君津1 〒299-1141



松倉良徳 Yoshinori MATSUKURA プロセス研究所 試験高炉プロジェクト推進部 上席主幹



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



砂原公平 Kohei SUNAHARA プロセス研究所 試験高炉プロジェクト推進部 試験室長 博士(環境科学)



柿内一元 Kazumoto KAKIUCHI
プロセス研究所 試験高炉プロジェクト推進部長
(現 日鉄エンジニアリング(株)
製鉄プラントセクター 脱炭素・DX推進室
ゼネラルマネジャー)



中野 薫 Kaoru NAKANO プロセス研究所 製銑研究部 高炉・脱炭素研究室長



酒井 博 Hiroshi SAKAI プロセス研究所 製銑研究部 主幹研究員