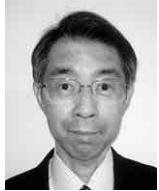


(技術資料)

## 石炭ベースの還元鉄および溶銑製造プロセス

Technology for Producing Direct Reduced Iron (DRI) and Hot Metal by Using Coal-based FASTMELT® Process



藤本英明\*  
Hideaki FUJIMOTO



原田孝夫\*\*  
Takao HARADA



宮原逸雄\*\*  
Itsuo MIYAHARA



立石雅孝\*\*  
Masataka TATEISHI



杉立宏志\*\*\*  
Hiroshi SUGITATSU



三村 毅\*\*\*\*  
Tsuyoshi MIMURA

In order to recover valuable metals from electric arc furnace (EAF) dust, Kobe Steel carried out at its Kakogawa Works a project called “the development of valuable metal recovery technology by using a rotary hearth furnace”, from 2005 to 2007. The project was subsidized by Japan’s Ministry of Economy, Trade and Industry. This process produced valuable DRI and crude zinc oxide. The DRI was found to be feasibly melted into hot metal using the coal-based FASTMELT process. This suggests that FASTMELT is one solution to produce hot metal from iron ore fines and non-coking coal.

まえばき = ここ数年，世界鉄鋼業を取巻く環境は，原料サプライヤの寡占化はもとより，世界規模の生産量の拡大により，原燃料の大幅な高騰を招いたことは記憶に新しい。現在は，世界的な経済危機の影響を受け大幅な減産基調にあるが，いずれ世界の景気が回復すれば，潜在成長力の高い新興国を中心として鉄鋼生産量の拡大が見込まれ，今後とも資源の安定確保やリサイクルの推進が重要であることに変わりはない。

また環境面では，地球温暖化問題に加えて，産業廃棄物処理場の不足や処理費用の増加により，電気炉ダストのリサイクルの促進が重要となっている。この電気炉ダスト中には鉄，亜鉛，鉛などの有用金属が含まれており，これらを効率よく回収することで循環型社会の発展に寄与できる。

当社は，回転炉床炉（Rotary Hearth Furnace，以下RHFという）を用いてFASTMET®法を開発し，製鉄所内で発生するダストの処理プロセスを実用化<sup>1)</sup>した。また2003年には，電気炉ダストを還元処理して製造した還元鉄を炭材燃焼熱で溶解するFASTMELT®法の開発を開始した。この開発は2003年から2007年に実施した経済産業省の補助事業である『回転炉床炉による有用金属回収技術の開発』を中心に推進した<sup>2)~4)</sup>。また本事業では，コークスによらない新製鉄プロセスの開発に向けて，様々なダストや鉄鉱石から製造した還元鉄を溶解して溶銑にする固定式連続溶解プロセス開発実験を世界で初めて推進し，その基本コンセプトを確認した。

以下に，本事業の実験結果に加え，当社が開発した石炭ベースの還元鉄および溶銑製造プロセスについて報告する。

### 1. 新鉄源プロセスの特徴と最新の稼働状況

#### 1.1 新鉄源プロセスのメニューと特徴

現在当社が保有する石炭ベース還元鉄製造プロセスは，FASTMET法，ITmk3®法に加えて，FASTMET法で製造した還元鉄を溶解するFASTMELT法の3種類がある。

図1に還元鉄製造プロセスの概要を示す。鉄鉱石やダストなどの酸化鉄含有原料と，石炭などの炭素質原料をペレットやブリケットに塊成化し，RHFに装入して還元処理を行う。RHF内での炭材内装塊成物の還元反応速度は非常に速く，炉内での反応時間は8～16分と短い。

FASTMET法では，RHFで製造した還元鉄（以下，DRIという）を固体の状態で炉外へ排出し，DRIのまま，またはHBI（Hot Briquetted Iron）に熱間成形して鉄源として利用することができる。ITmk3法では，RHF内で還元鉄をさらに高温状態で溶融して粒鉄とスラグに分離する。

FASTMELT法では，FASTMET法で製造した還元鉄を溶解し，溶銑を製造する。その溶解プロセスは，電気をエネルギー源とした電気メルター法と，炭材を燃焼させる石炭メルター法に分類される。今回，パイロットプラントで開発したFASTMELTプロセスは，立地場所や操業時間の制約を受けにくい炭材を使用する石炭メルター法とした。また，プロセスの効率を高めるため，連続操業を目指した。

#### 1.2 新鉄源プロセスの開発経緯と稼働状況

当社は，長年培ってきた石炭ベースの還元鉄製造プロセスであるFASTMET法を応用して製鉄ダスト処理設備

\*新鉄源プロジェクト本部 技術センター（現 神鋼鋼線工業株式会社） \*\*新鉄源プロジェクト本部 技術センター \*\*\* Midrex Technologies, Inc. \*\*\*\* 鉄鋼部門 加古川製鉄所 技術研究センター

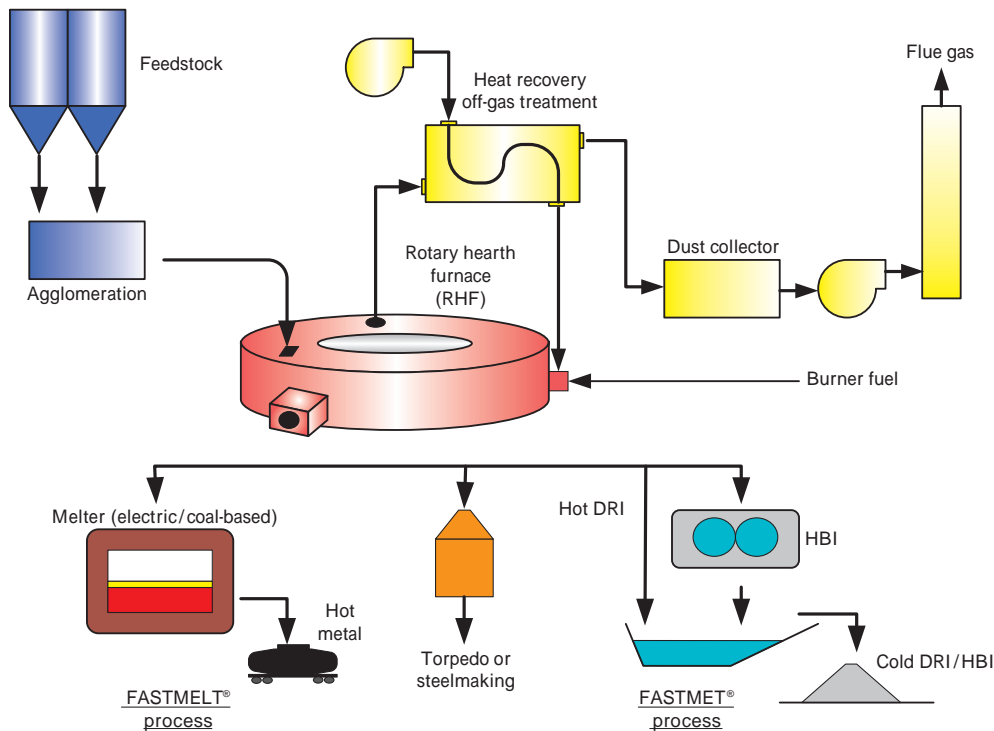


図1 石炭ベース還元鉄製造プロセスの概要

Fig. 1 Schematic flow of coal-based FASTMET/FASTMELT process

表1 新鉄源プロセスの開発経緯と最新の稼働状況

Table 1 Development schedule and recent operation condition for coal-based DRI production process

Process	Location	1995	2000	2005	2010
FASTMET	Kakogawa/KSL	Demonstration plant	Waste recycling commercial plant	METI-pilot plant (RHF)	
	Hirohata/NSC		Hirohata No.1	Hirohata No.2	
	Others			Commercial Plants x 3	
ITmk3	Kakogawa/KSL		Bench scale plant		
	Minnesota/USA		Pilot demonstration plant	ITmk3 commercial plant	
	Others			ITmk3 commercial plants	
FASTMELT	Kakogawa/KSL			METI-pilot plant (Melter)	

KSL : Kobe Steel, Ltd.  
NSC : Nippon Steel Corporation

を開発・実用化し、これまで3基の商業機<sup>※1)</sup>に加えて、国内ではさらに3基の商業機が稼働する予定である(表1)。

また、粒鉄(ナゲット)の生産プロセスであるITmk3法は、現在50万トン/年級の商業1号機が北米において建設中で、2009年後半から稼働する予定であり、将来の鉄源不足や老廃スクラップ使用時の不純物希釈用の清浄冷鉄源としてその利用が期待されている。なお当社は、北米以外にもインドや東欧圏などでも同プラントの普及に力を入れている。

## 2. パイロットプラント実験結果

### 2.1 プロセスの全体コンセプト

パイロットプラント実験では、RHFと溶解炉からなる

脚注1) 新日本製鐵株式会社 2基, 佛神戸製鐵所加古川製鐵所 1基

表2 開発推進スケジュール

Table 2 Development schedule

	2003	2004	2005	2006	2007
Fundamental experiment & basic design	→	→	→	→	→
Engineering & construction of pilot plant		→	→	→	→
Development of agglomeration technology		→	→	→	→
Development of reduction & De-Zn technology			→	→	→
Development of DRI melting technology				→	→
Total demonstration operation				→	→

プロセスを選定し、2003~2004年にラボ実験による電気炉ダストの特性、塊成化・還元条件の調査や、試験転炉による溶解基礎条件を確認するとともに、プラントの基本設計を行った。

その後、2004年下期から加古川製鉄所内にパイロットプラントの建設に着手し、RHF実験は2006年2月から、また溶解実験は2006年7月から開始し、いずれも2007年末に終了した<sup>5)~7)</sup>。

5カ年に渡るプロジェクトの推進により、エンジニアリング面では基本・詳細設計、調達、建設・試運転までフルターンキーで実施し、実際の操業運転を行った。そしてその間、エンジニアリング手法と多くの操業技術ノウハウを蓄積することができた。

表2に開発推進スケジュール、図2にRHFと溶解炉を組合せたFASTMELTプロセスのコンセプトを示す。

### 2.2 RHF実験の結果

#### 2.2.1 RHF実験設備の概要とプロセスフロー

RHF実験プラントは原料受入れ設備、塊成化設備、RHF本体、集塵設備から構成される(図3)。実験プラント・設備の主仕様および概観をそれぞれ表3、図4に示す。

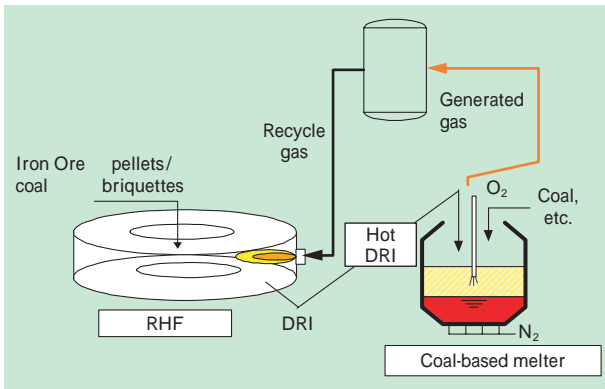


図2 FASTMELT プロセスのコンセプト

Fig. 2 Concept of FASTMELT process (Combination of RHF and coal-based DRI melter)

表3 RHF 実験設備の主仕様

Table 3 Description of RHF equipment

Item	Description
Feedstock	Iron ore, EAF dust Coal (bituminous, non-coking coal)
RHF	Dimension : 11.5m (O.D.) Capacity : 20kt-dust/year Off-gas : max.1,400

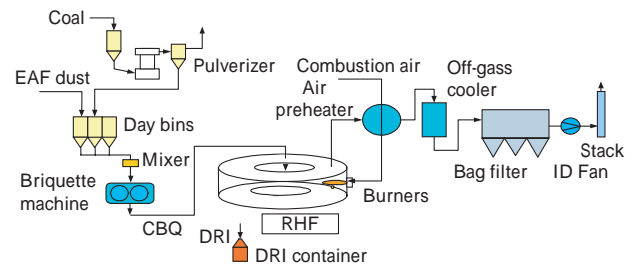


図3 RHF 実験プラントプロセスフロー

Fig. 3 Process flow of RHF pilot plant



図4 RHF プラント概観

Fig. 4 RHF pilot plant

表4 電気炉ダスト・粗酸化亜鉛・DRI の化学成分

Table 4 Chemical composition of EAF dust, crude zinc oxide and DRI

(wt%)

		T. Fe	M. Fe	Zn	Pb	C	CaO	SiO <sub>2</sub>	S	Cl
EAF dust	Group I	31~33	1	17~19	1	3	3~4	4~8	0.4	1~2
	Group	21~25	1~2	26~29	1~3	3~6	2~4	3~5	0.4~0.6	5~7
Crude zinc oxide	Group I	~0.2	-	64~70	3~4	~0.1	0.1~0.2	0.1~0.2	0.4	5~8
	Group	~0.7	-	57~62	4~6	~0.1	0.1~0.8	0.1~0.2	0.2~0.5	9~16
DRI	Group I	46~53	40~46	0.7~2.4	0.1	5~11	5~8	9~13	0.6	~1
	Group	42~50	35~41	1~4	0.1~0.6	3~15	6~12	8~14	0.6~1.0	~2

電気炉メーカーから入手したダストに、微粉炭およびバインダを添加して混練後、塊成化物 (Cold Briquette, 以下 CBQ という) を製造した。CBQ は RHF 内に装入され、一定時間加熱・還元処理して還元鉄が製造される。RHF 炉内温度の調整はバーナにより行った。

亜鉛、鉛、アルカリなどの成分は炉内で CBQ から揮発し、排ガス中に飛散して酸化亜鉛などの二次ダスト (以下、粗酸化亜鉛という) となる。排ガスは、その顕熱の一部を空気予熱器で回収後、冷却塔、集塵機を経て放出されるとともに、排ガス中の粗酸化亜鉛は集塵機で捕集される。

#### 2.2.2 RHF 実験条件

実験では 7 種類の電気炉ダスト (合計 263 トン) を使用したが、表 4 に示す二つのグループに分類される。内装炭材は、灰分 9.3%、揮発分 17.7% の石炭を使用した。得られた粗酸化亜鉛、還元鉄の成分を合せて示す。RHF 内の温度は 1,250~1,360 に変化させ、炉内での CBQ の滞留時間を変えて、高い脱亜鉛率を得るために必要な条件を調べた。ここで、脱亜鉛率と金属化率は以下のよう

に定義した。

$$\text{脱亜鉛率} = [1 - \{(DRI \text{ 中の } Zn\%)/(DRI \text{ 中の } T.Fe\%)\} / \{(CBQ \text{ 中の } Zn\%)/(CBQ \text{ 中の } T.Fe\%)\}] \times 100$$

$$\text{金属化率} = (DRI \text{ 中の } M.Fe\%) / (DRI \text{ 中の } T.Fe\%) \times 100$$

#### 2.2.3 RHF 実験結果

テストに使用した電気炉ダストのマスマランスを図 5<sup>注2)注3)</sup> に示す。高い脱亜鉛率を得るには、高強度の CBQ を製造することが重要で、操業条件の適正化により、目標の 95% 以上の脱亜鉛率を達成することができた。なお、DRI 中铁分の金属化率は約 70~90% であった。

さらに、RHF での脱亜鉛処理能力を調べるため、滞留時間が 14 分と 12 分の条件において、炉内温度と脱亜鉛率の関係性を求めた (図 6)。同図より、脱亜鉛率は炉内温

脚注 2) 電気炉ダスト量を 100 として DRI 生産量、粗酸化亜鉛回収量などを求めた。

脚注 3) 昼間だけの運転で、炉内が定常状態になっていない運転開始・終了時の運転データも含む。

度に影響され、適正な温度条件ではいずれの滞留時間でも95%以上の脱亜鉛率が得られることがわかった。

今回の実験結果より、RHFでの脱亜鉛率、脱鉛率が高かった一方、粗酸化亜鉛中の揮発しないFeやスラグ成分(CaO, MgO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)の濃度は1%以下と低く、静置状態で処理する本プロセスの優位性が確認された。また、煙突入口で測定した排ガスのダイオキシン類濃度は、総じて0.1ng-TEQ/Nm<sup>3</sup>を大きく下回った。

#### 2.2.4 電気炉ダスト以外の原料適用実験

つぎに、亜鉛含有率が電気炉ダストに比べて10分の1程度と少ない、高炉一貫製鉄所で発生するダストをRHFで処理する場合の特性を確認した。なお、製鉄所ダストは炭材を含む高炉系ダストと鉄含有量が多いダストを組合せてCBQを製造し、RHFで還元処理した。

還元前のCBQの化学分析値を表5に示す。ダスト中の亜鉛濃度が低い製鉄所ダストでもRHFでの脱亜鉛率は90%以上を確保しており、ダスト中の亜鉛含有率にかかわらず高い脱亜鉛率を得られるとともに、DRIとして鉄分の回収が可能であることを確認した。

#### 2.2.5 電気炉ダスト処理による設備への影響

ダスト処理設備で培ったこれまでのノウハウを生かし、RHFから発生した排ガス処理設備は、熱交換器や冷却塔に耐火物を内面施工した構造を採用し、さらに偏流の起りにくい流路設計を行った。実験キャンペーン終了

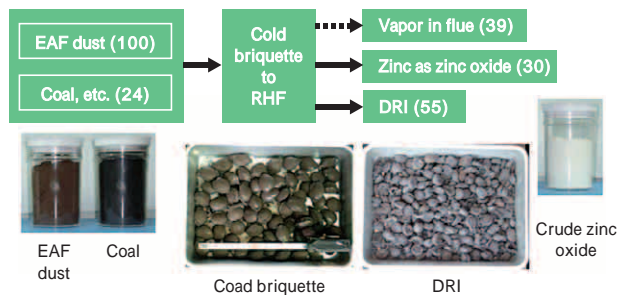


図5 電気炉ダストのマスバランス  
Fig. 5 Mass balance and sample photos

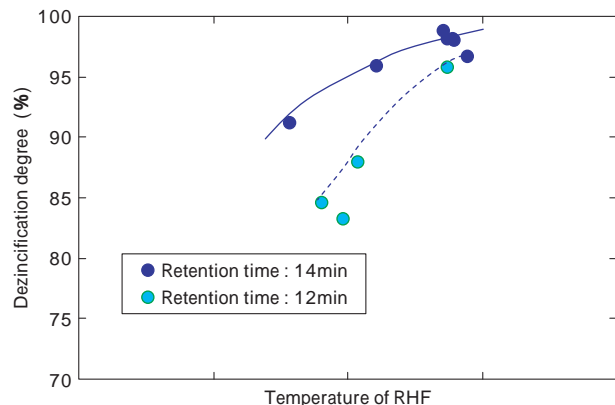


図6 炉内温度と脱亜鉛率の関係  
Fig. 6 Relation of RHF temperature and de-Zn ratio

表5 製鉄所ダストCBQの化学性状

Table 5 Chemical composition of CBQ produced by steel mill waste (wt%)					
T. Fe	Zn	C	CaO	SiO <sub>2</sub>	Cl
37 - 42	3 - 5	12 - 17	8 - 9	2 - 3	< 1

ごとにRHF内や排ガス処理設備を観察したが、排ガス設備への粗酸化亜鉛の付着・堆積は軽微で、RHF耐火物も表層部に薄い変質層が見られる程度であった。また、熱交換器の回収熱量の低下も見られなかった。

しかし、今回の実験は昼間だけの間欠操業であったため、最終的には商業機で長時間の連続運転を行い、その影響を確認する必要がある。

#### 2.3 溶解実験の結果<sup>8)~10)</sup>

##### 2.3.1 溶解実験設備の概要とプロセスフロー

溶解(メルタ)実験設備、および設備仕様の概要をそれぞれ図7、表6に示す。実験設備は、種湯製造用の低周波溶解炉、溶解炉本体、鋳銑機、および排ガス処理設備から構成される。

##### 2.3.2 固定式溶解炉の基本コンセプトと技術開発課題

本実験設備では固定式溶解炉を採用した。その基本コンセプトを以下に述べるとともに、その技術開発課題を図8に示す。

溶解炉の型式として傾動方式を採用した場合、出銑時には吹錬を中止して炉体を傾動し、溶銑を出湯後、反対側に炉体を傾動してスラグを排出する必要がある。その結果、非吹錬時間が発生して生産性が低下するとともに、炉内の温度が下がることになる。

一方、固定型炉で、出銑時にも炉体を傾動せずに酸素ブローおよび還元鉄の溶解を継続し、所定時間ごとに溶銑と溶融スラグを排出できれば、排出時の溶銑さいの顕熱の放出以外は炉内の温度が下がらない上に、生産性をほとんど低下させずに連続操業することが可能となる。さらに、RHFで製造された還元鉄を炉内に高温状態で装入すれば、より生産性が向上する。

##### 2.3.3 溶解実験条件と操業パターン

溶解実験は週に数回の間欠運転とし、低周波炉から約1,450で出湯した種湯(6トン)を溶解炉に装入後、1回目の吹錬を開始する。酸素ブローによる溶湯中カーボンの燃焼と、炉内での2次燃焼を活用して昇熱し、溶湯温度が所定値に到達後、中間出銑孔から約2トンの溶湯

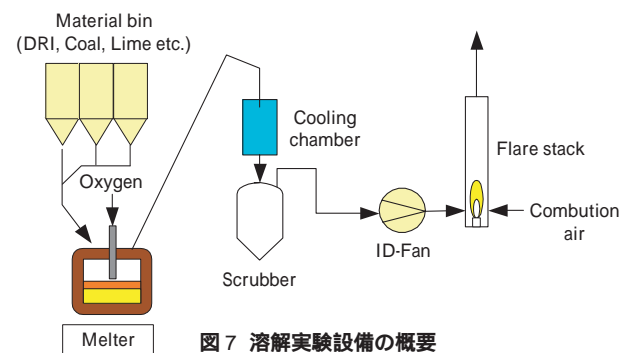


図7 溶解実験設備の概要  
Fig. 7 Process flow of melter pilot

表6 溶解実験設備の主仕様

Table 6 Description of melter equipment

Item	Description
Melter	Cylindrical stationary furnace Tapping : Drilling Dimension : 2m(I.D) × 2.6m(H) Capacity : 13kt hot metal/year

とスラグを排出する。

その後、溶湯（約4トン）と少量のスラグが残った状態で、還元鉄（DRI）の溶解と出銑滓を数回繰返し、テスト終了時は残銑抜き孔から出銑さい作業を行った。その連続操業パターン例を図9に示す。

また、本実験で用いた代表的な種湯成分、DRI成分をそれぞれ表7、および表8に示す。溶解炉に投入した炭材は、原料の手配上、製鉄所で発生する小粒コークスブリーズ（固定C]=85%）を使用した。

### 2.3.4 溶解実験結果

#### 1) 吹錬中の溶湯温度、[C]の推移

図10に、吹錬中の溶湯温度および溶湯[C]の推移の一例を示す。炉内に種湯を装入した時点で溶湯温度は約1,350まで低下するが、1回目吹錬で昇熱して約1,500で出銑する。その後、2回目吹錬以降は溶湯温度をほぼ一定に保ち、還元鉄の溶解と出銑さいを繰返す。なお、

吹錬中はスラグのフォーミングを制御し、[C]濃度は飽和近くに保持されている。

#### 2) 還元鉄、炭材投入速度の推移

図11に還元鉄および炭材の投入速度推移の一例を示す。本例では、金属化率が約85%の鉄鉱石ベースDRIを使用した。2回目吹錬の半ば以降にDRI投入速度を増加させ、3回目では約2トン/hまで上げて還元鉄を安定に溶解するとともに、2回目の出銑さい中には、吹錬を中断せずに酸素ブロー、還元鉄、炭材の投入を継続している。また、炭材は送酸速度見合いで増減させ、安定吹錬時はほぼ一定値を保っている。

#### 3) 連続吹錬と連続操業

図12に示すように、当初は中間出銑時に酸素ブロー、還元鉄、炭材の投入を中断して出銑さい作業を行っており、次の吹錬の準備や初期条件の設定に約20~30分の時間を要していた。

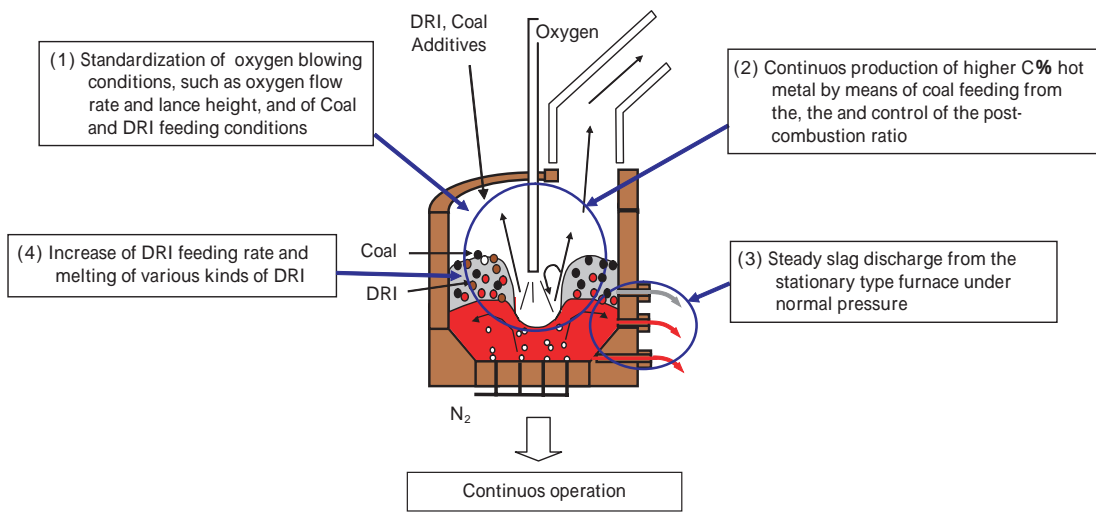


図8 固定型溶解炉の技術開発課題

Fig. 8 Development themes of coal-based DRI melter

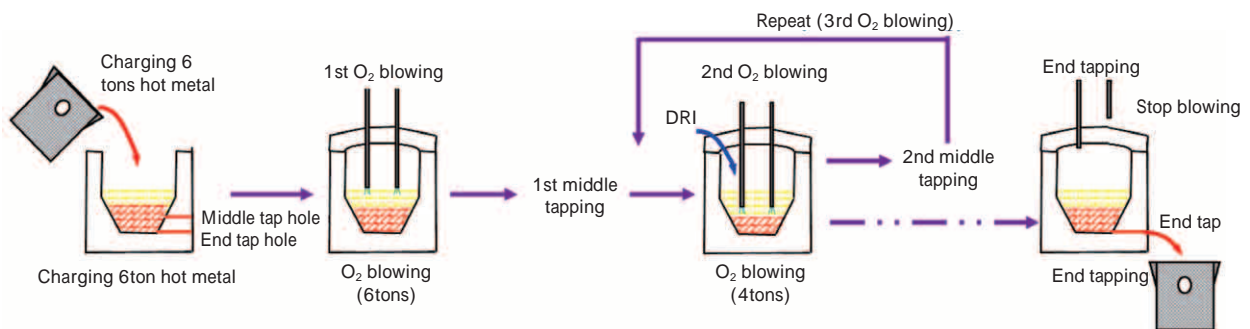


図9 連続操業パターン例

Fig. 9 Typical process of continuous melting operation

表7 代表的な種湯成分

Table 7 Typical chemical analysis of charging hot-metal

C%	Si%	S%	P%
4.3 - 4.7	0.15 - 0.30	0.030 - 0.060	0.090 - 0.120

表8 代表的な還元鉄（DRI）の化学成分

Table 8 Typical chemical composition of charging DRI

Raw Material	Metallization	T. Fe	M. Fe	C (wt%)
Iron Ore	86.0	77.3	66.5	7.9
EAF Dust carbon steel	82.4	58.1	47.0	7.2
EAF Dust stainless steel	73.2	35.4	25.3	3.1

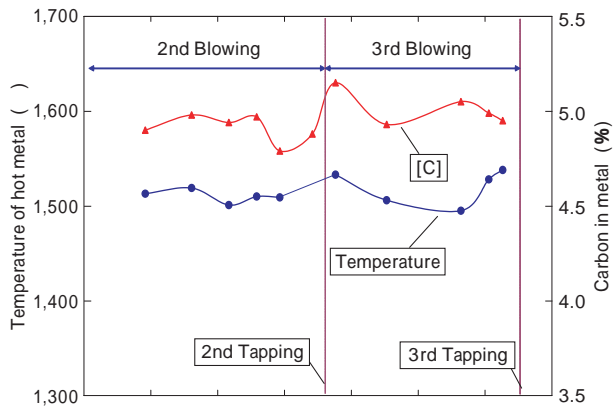


図10 吹錬中の溶湯温度 [C] の推移 (2 回目吹錬以降)

Fig.10 Trend of temperature and carbon content of hot metal (after 2nd.blowing)

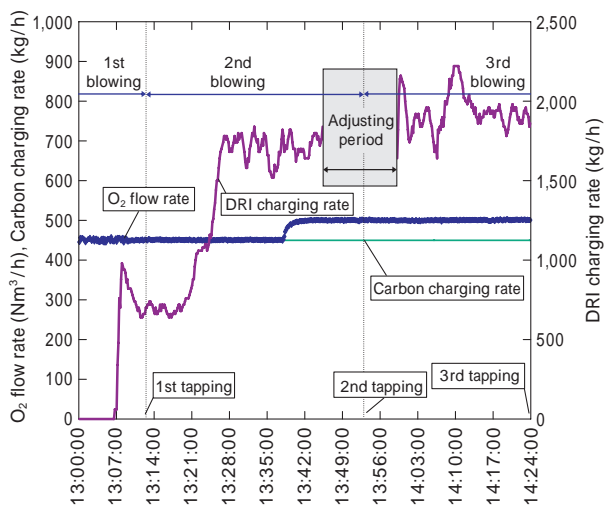


図11 還元鉄，炭材投入速度の推移例

Fig.11 Typical trend of charging condition of DRI and carbon during blowing

そこで、中間出鉄中も酸素ブローや炭材、DRI の投入を継続する連続吹錬テストを行って安定条件の確認を行った。また、還元鉄を溶解して溶湯およびスラグを一定量生成後、出鉄さい作業を行う操業パターンを繰返し、固定式炉での連続操業に関する有益な知見を得た。

この連続操業を行うには、吹錬の安定化に加えてスムーズなスラグ排出が必要である。また、出鉄中には、湯面高さの変化に合せたランス高さ、酸素流量、DRI 投入速度などの調整が必要となる。図13に、中間出鉄孔から安定に排出されている出鉄状況を示す。

### 2.3.5 溶解実験結果の考察

溶鉄の製造に必要な炭材は、RHF 内装炭材および溶解炉での投入炭材の合計である。

長時間吹錬して多量のコールド DRI 溶解量を記録したヒートの炭材原単位や吹錬諸元を整理した(表 9)。RHF 内装炭材の実績値に吹錬中に投入した炭材原単位を加えると、トータルでは 1,008kg/thm となる。

この結果をもとに商業化時の炭材原単位の予測を行った(図14)。DRI を高温のまま溶解炉に装入すると顕熱が利用できるため、炭材原単位は 798kg/thm になると推定される。また、50 万トン/年級の溶解炉にスケールアッ

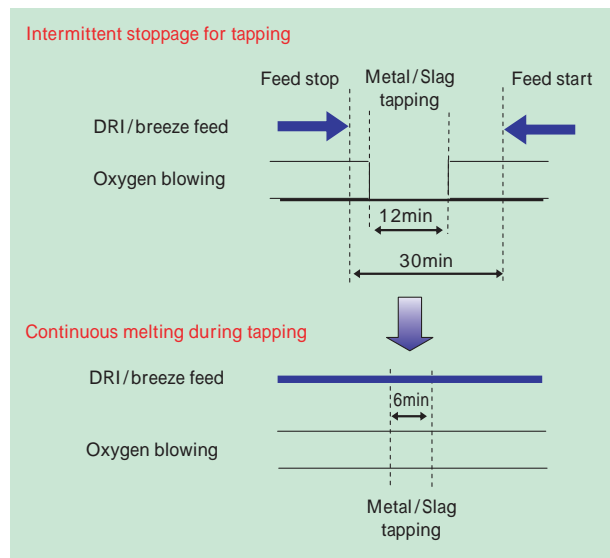


図12 中間出鉄中の連続吹錬

Fig.12 Concept of continuous blowing



図13 出鉄状況

Fig.13 Condition of tapping hot metal

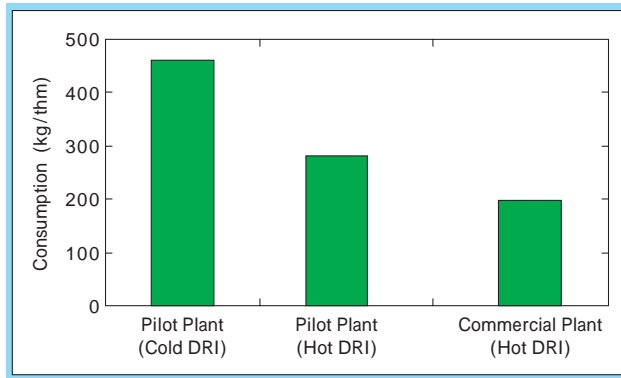
表 9 トータル炭材および吹錬酸素原単位  
Table 9 Total consumption of carbon for RHF and melter

		Itmes	unit consumption
Carbon consumption		DRI production for RHF	547kg/thm
		DRI melting for Melter	461kg/thm
		<b>Total</b>	<b>1,008kg/thm</b>
Others (O <sub>2</sub> gas)			451Nm <sup>3</sup> /thm

(thm : ton hot metal)

プすると、炭材原単位は 707kg/thm になると推定され、RHF と溶解炉を組合せた本プロセスで、溶鉄トンあたり目標約 700kg/thm のトータル炭材原単位が視野に入ったと考えられる。

なお、今回のパイロット実験では原料調達面から小粒コークスブリーズを使用したけど、実用化時には適正な銘柄の石炭を使用した確認が必要である。



Item	Pilot plant		Commercial plant (Hot DRI)
	Cold DRI	Hot DRI	
DRI temperature	25	800	800
Hot metal production rate (Capacity : kthm/year)	1.1t/h	1.7t/h (13kt/y)	67t/h (500kt/y)
Carbon consumption	DRI production for RHF	547kg/thm	509kg/thm
	DRI melting for Melter	461kg/thm	198kg/thm
	<b>Total</b>	<b>1,008g/thm</b>	<b>707kg/thm</b>
Others (O <sub>2</sub> gas)	451Nm <sup>3</sup> /thm	273Nm <sup>3</sup> /thm	206Nm <sup>3</sup> /thm

図14 ホット DRI , 50万 t/年級メルター炉のトータル炭材原単位予測  
Fig.14 Prediction of total carbon unit consumption for pilot plant and commercial plant

### 3. 石炭溶解プロセスの将来展開

#### 3.1 RHF および溶解実験の評価

FASTMELT プロセスは、RHF + 溶解炉の組合せが特徴である。今回のパイロットプラント実験では、RHF で鉄鉱石以外に様々なガスの造粒・還元処理技術を確認したほか、高 VM 炭および高結晶水鉱石の処理技術に関する知見を得た。

また、溶解炉では還元鉄溶解速度の拡大、連続吹錬など固定式溶解炉の基本コンセプトを確認した。FASTMELT 法では還元鉄の還元率が高く、また RHF で製造した還元鉄を高温のまま使用することにより、溶解炉では高い生産能力が期待できる。

#### 3.2 今後の展開に関する基本的な考え方

今回のパイロットプラント実験を通して、FASTMELT プロセスの基本コンセプトおよび炭材原単位の競争力を確認した。

しかし、パイロットプラントから一気に大型商業機へ進むには設備・操業面でまだ確認すべき事項が残っており、今後は商業機に至る開発ステップを検討することに加えて、例えば10万トン/年級のデモプラントを連続運転して開発を進めることが望ましい。

むすび=本事業では、RHF において、電気炉ダスト以外にも鉄鉱石や製鉄所ダスト、高 VM 炭などの原燃料の造粒・還元処理を行い、低品位原燃料の使用に関しても多くの重要な知見を得た。さらに、RHF と固定式溶解炉の組合せにおいて、様々な品位の還元鉄の溶解特性を把握し、固定式炉の連続操業に関する基本コンセプトを確認した。

その結果、将来は本技術を応用して適切な開発ステップを進めることにより、低品位原燃料の使用による溶銹製造プロセスの開発につながる事が期待される。

#### 参考文献

- 1) 神保 淳ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.46, No.1(1996) p.14.
- 2) 藤本英明ほか：CAMP-ISIJ, Vol.20 (2007) 815.
- 3) 原田孝夫ほか：CAMP-ISIJ, Vol.20 (2007) 816.
- 4) 杉立宏志ほか：CAMP-ISIJ, Vol.20 (2007) 817.
- 5) 藤本英明ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.158, No.1 (2008) p.72.
- 6) Tateishi et al. : SE AISI Conference, Bangkok (May, 2008) .
- 7) Harada et al. : AIST Conference, Baltimore (Nov, 2008) .
- 8) 立石雅孝ほか：CAMP-ISIJ, Vol.21 (2008) 53.
- 9) 多田俊哉ほか：CAMP-ISIJ, Vol.21 (2008) 54.
- 10) 立石雅孝ほか：CAMP-ISIJ, Vol.21 (2008) 984.