

(解説)

# 石炭ベース還元鉄製造法のエネルギー評価

## Study of Energy Consumption and Environmental Load by Coal-based Direct Reduction Iron-making Processes



田中英年\*  
Hidetoshi Tanaka



原田孝夫\*\*  
Takao Harada



吉田昌平\*\*  
Shohei Yoshida

Three coal-based direct reduction iron-making processes - FASTMET, FASTMELT and ITmk3 (Ironmaking Technology mark ) - have been developed by Kobe Steel and Midrex Technologies Inc. These processes can produce high quality iron units, such as DRI, hot metal and iron nuggets, from iron ore fines and coal that exist abundantly all over the world. Their energy consumption and environmental load are competitive compared with large-capacity blast furnace processes in common use today.

まえばき = 近年世界の粗鋼生産量はアジアの経済成長などに伴い増加を続けている。現在の製鉄法の主流は高炉法であるが、高炉法はその生産性向上のために大型化が必要であり、環境負荷の高い焼結プラントおよびコークス炉が必要となる。

高炉法にかわる製鉄法として MIDREX®法に代表されるガスベースの還元鉄製造法が挙げられるが、ガスベースの還元鉄製造法には多量の天然ガスが必要であることからその立地は限られる。

上記のような背景のもと、今後の製鉄法に対して次のような期待が高まっている。

- 1) エネルギー消費および環境負荷の低減
- 2) 投資コストおよび運転コストの低減
- 3) 幅広い原料やエネルギー源への対応

このような期待に応えるべく当社と Midrex 社との共同で開発した、石炭ベース還元鉄製造法 (FASTMET®, FASTMELT®, ITmk3®) を紹介する。

### 1. 石炭ベース還元鉄製造法

#### 1.1 石炭ベース還元鉄製造法の位置づけ

図1に使用する各種の原料と還元剤に対する各還元鉄製造法の位置づけを示す。石炭ベース還元鉄製造法である FASTMET, FASTMELT, ITmk3 は、世界中に比較的多く存在する粉鉱石と石炭を用いたプロセスで、図1の Zone 3 に位置する。

#### 1.2 プロセスフロー

図2に FASTMET, FASTMELT, ITmk3 のプロセスフローを示す。

鉄鉱石と還元剤である石炭は事前に混合され、ペレット又はブリケットのような塊成化物に成型される。この塊成化物は RHF (回転炉床) に供給され、RHF 内で還元される。

塊成化物は RHF の炉床上に1または2層に敷かれ加熱される。FASTMET, FASTMELT 法においては、炉内で 1,250 ~ 1,350 °C まで加熱され還元鉄として炉外へ排出される。ITmk3 法においては 1,450 °C まで加熱され、炉内で還元・溶融し粒鉄として炉外へ排出される。

FASTMET 法では、高温還元鉄や冷却して低温還元鉄とするか、または HBI (ホットブリケットアイアン) として製品還元鉄を利用することができる。

FASTMELT 法は、FASTMET 法に還元鉄溶解炉を組合わせたものである。RHF より排出された高温還元鉄を還元鉄溶解炉へ装入し、その顕熱を利用しながら溶解し銑鉄を製造する。

ITmk3 法では RHF 内でスラグと分離した粒鉄を製造し、スラグとともに排出された粒鉄は磁選機などの選別機で粒鉄のみが取出される。

#### 1.3 石炭ベース還元鉄製造法

まず、FASTMET 法における RHF 内部での還元反応挙動について説明する。図3は、FASTMET 法における RHF 内での還元反応挙動を示した概略図である。炭材を含むペレットやブリケットの塊成化物は、炉内の輻射熱により急激に加熱され、酸化鉄は炭材により還元され

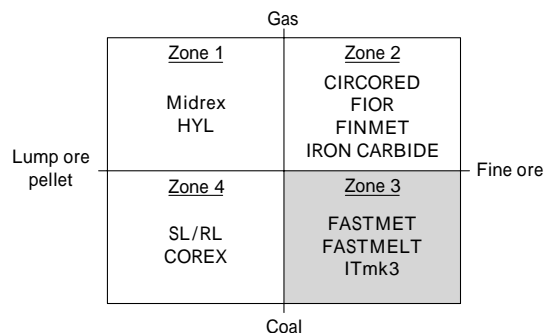


図1 原料と還元剤による各還元鉄製造法の位置づけ  
Fig. 1 Combinations by type of iron ore and reductant

\*新鉄源プロジェクト本部 \*\*新鉄源プロジェクト本部 技術センター 還元技術部

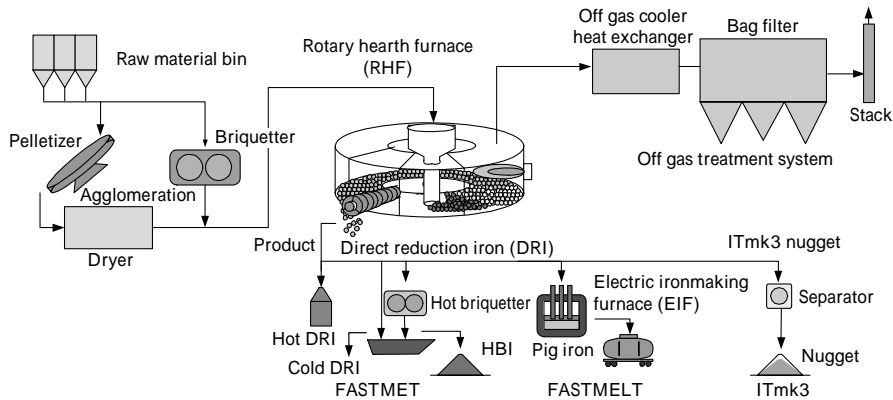


図2 FASTMET, FASTMELT, ITmk3のプロセスフロー  
Fig. 2 Process flow of FASTMET, FASTMELT and ITmk3

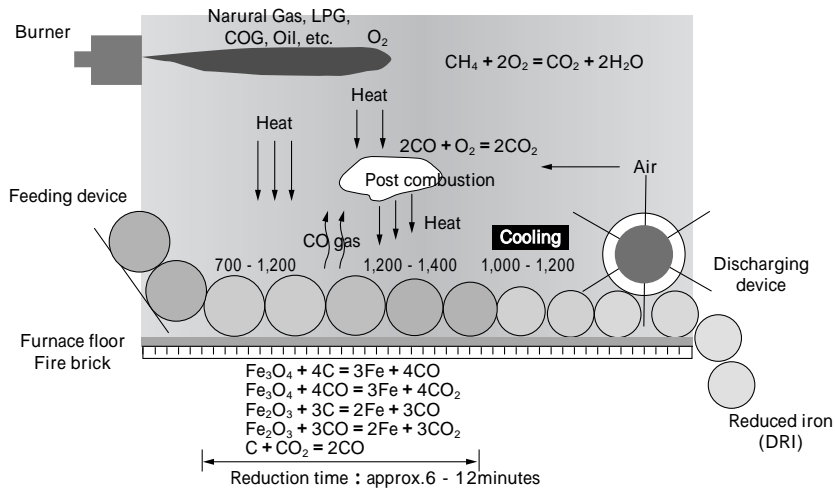


図3 FASTMET 法におけるRHF内での還元反応  
Fig. 3 Schematic chart of reduction in RHF

て金属鉄になる。

塊成化物より発生したCOはRHF内で燃焼し、主要な熱源として利用される。燃料も補助的に供給されるが、その量はRHF内での必要な熱量全体に対し15～20%程度である。燃料としてはLNG, LPG, COG, 重油など幅広い種類の燃料を用いることができる。

また、FASTMET法では塊成化物より発生したCOはRHF内でほぼ完全に燃焼することができることから、カーボン利用効率が高く、エネルギー消費量やCO<sub>2</sub>発生量の低減が可能である。

RHF内での還元過程は6～12分と非常に短いことから、プラントの立上げや停止、また生産量調整を比較的簡単に行うことができる。

FASTMELT法ではRHFで生産された還元鉄をそのまま溶解炉に装入するものである。溶融還元製鉄法とは異なり、固体還元を最大限に行った還元鉄を溶解炉に装入することで、溶融状態での工程の負荷を最小限に抑えることができる<sup>1)</sup>。

ITmk3法においては、塊成化物はRHF内で1,450℃まで加熱される。FASTMET法と同様に還元された塊成化物は、RHF内でさらに溶融・凝集し鉄とスラグが分離される。

図4は実験炉でのペレットの還元、溶融、凝集過程の外観および断面図である。ペレットを炉に装入して3分後では、ペレットは還元過程にあり中心部にまだ未還元の部分が残っている。5分後には一部で溶融を開始して

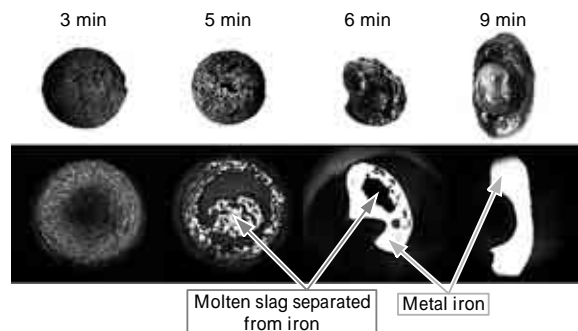


図4 ITmk3法におけるペレットの外観および断面図  
Fig. 4 Outer and sectional view of agglomerate in ITmk3 process

おり、6分後にはほとんどの部分が溶融している。9分後、溶融した鉄が完全にスラグ分より分離している<sup>2)</sup>。

## 2. 原料および製品

表1および表2に、FASTMET, FASTMELT, ITmk3において使用できることが確認された鉱石および石炭の品質を示す。このように幅広い種類の鉱石および石炭が使用できることが確認されており、これら石炭ベース還元鉄製造法には次の特徴がある。

- 1) 一般炭を還元剤として使用できる。
- 2) 焼結やペレットプラントを必要とせず、粉鉱石を直接使用できる。
- 3) 製鉄ダストや製鋼ダストを原料として、またコークス粉などを還元剤として使用できる。

表 1 FASTMET 法および FASTMELT 法で使用可能な鉄鉱石、石炭の品質

Table 1 Iron ore grades and coal grades that can be used in FASTMET and FASTMELT processes

Iron ore	Total Fe	Over 60 (%)
Coal	Volatile matter	Under 42 (%)
	Fixed C	Over 50 (%)
	Ash	Under 16 (%)

表 2 ITmk3 法で使用可能な鉄鉱石および石炭の品質

Table 2 Iron ore grades and coal grades that can be used in ITmk3 process

Iron ore	Total Fe	Over 65 (%)
Coal	Volatile matter	Under 30 (%)
	Fixed C	Over 55 (%)
	Ash	Under 15 (%)

表 3 FASTMELT 法で製造される溶鉄の代表的な品質

Table 3 Characteristics of molten iron made by FASTMELT (%)

Fe	C	Si	S
96.0	4.0	0.1 - 0.6	< 0.05

表 4 ITmk3 法で製造される粒鉄の代表的な品質

Table 4 Characteristics of iron nuggets made by ITmk3 (%)

Fe	C	Si	S
97.0	3.0	0.03	0.05 - 0.07

表 5 FASTMET 法での石炭およびユーティリティ消費量 (500kt/年 DRI 製造)

Table 5 Consumption in FASTMET process (for 500 kt/y DRI production)

Consumption (for 1 ton of DRI)	
Coal	377 (kg)
Fuel gas	2.43 (GJ)
Electricity	110 (kWh)
By-product (for 1 ton of DRI)	
Recovery electricity by steam power	221 (kWh)

表 6 FASTMELT 法の石炭およびユーティリティ消費量 (500kt/年鉄製造)

Table 6 Consumption in FASTMELT process (for 500 kt/y hot metal production)

Consumption (for 1 ton of hot metal)	
Coal	456 (kg)
Fuel gas	2.47 (GJ)
Dolomite, Burnt lime	15 (kg)
Electricity	750 (kWh)
By-product (for 1 ton of hot metal)	
Recovery electricity by steam power	210 (kWh)

表 7 ITmk3 法の石炭およびユーティリティ消費量 (500kt/年粒鉄製造)

Table 7 Consumption in ITmk3 process (for 500 kt/y iron nugget production)

Consumption (for 1 ton of iron nugget)	
Coal	450 (kg)
Fuel gas	4.10 (GJ)
Electricity	150 (kWh)
By-product (for 1 ton of iron nugget)	
Recovery electricity by steam power	234 (kWh)

表 3 および表 4 に、FASTMELT 鉄と ITmk3 粒鉄の品質を示す。ITmk3 で製造される粒鉄は、スラグ分がほとんどなく適当な C を含んでいるため、鉄源として十分な品質を持っている。

### 3. 石炭およびユーティリティ消費量

FASTMET 法における石炭およびユーティリティ消費量の一例を表 5 に示す。石炭は還元剤として使用され、RHF からの排ガス顕熱を発電用蒸気として回収することも可能である。

表 6 に示す FASTMELT 法における消費量の一例は、FASTMET と EIF (Electric Ironmaking Furnace) の組み合わせのケースである。EIF は電気エネルギーと高温 DRI の顕熱を利用し、DRI を溶解して鉄を製造するための溶解炉である。

表 7 には ITmk3 の消費量の一例を示す。

### 4. エネルギー消費量および環境負荷

石炭ベース還元鉄製造法のエネルギー消費量と CO<sub>2</sub> 発生量について、従来の高炉法によるものと比較するため下記の 2 ケースのスタディを行った。

#### スタディ A

500kt/年の鉄を製造するケースにおいて、高炉法、FASTMELT 法、ITmk3 法を比較した。

#### スタディ B

3,500kt/年の鉄を製造する高炉製鉄所を 4,000kt/年に能力増強するケースを想定し、下記の 2 ケースについて比較した。

- 1) 高炉の容積増加により 4,000kt/年の鉄製造に能力増強する。
- 2) 500kt/年鉄製造の FASTMELT プラントを既設高炉に隣接して設置する。

#### 4.1 スタディ A

図 5 は、500kt/年鉄製造の小規模高炉におけるエネルギーバランスである。コークス炉や高炉から発生する可燃性ガスについては、システム外へ供給されて外部で有効利用されるものの、このような小規模高炉においてはエネルギー利用効率が悪くなっている。

図 6 は FASTMELT 法のエネルギーバランスである。EIF で発生する可燃性ガスは RHF で燃料として利用される。また、図 7 は ITmk3 法のエネルギーバランスである。副産物である可燃性ガスはこのシステムからは発生しない。

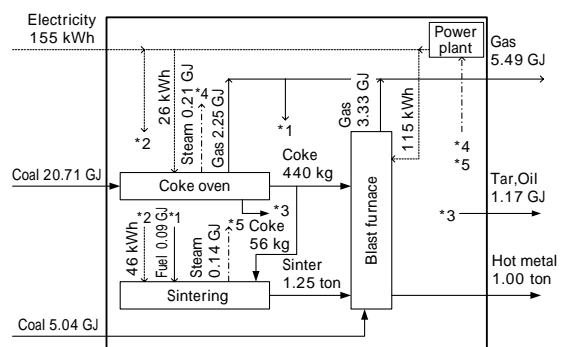


図 5 高炉法のエネルギーバランス (500kt/年鉄製造)  
Fig. 5 Energy balance of blast furnace system (500 kt/y hot metal)

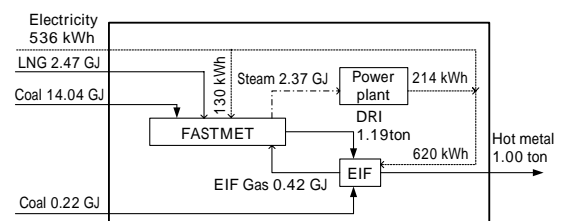


図 6 FASTMELT 法のエネルギーバランス (500kt/年鉄製造)  
Fig. 6 Energy balance of FASTMELT (500 kt/y hot metal)

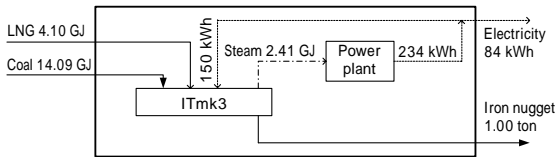


図7 ITmk3 法のエネルギーバランス (500kt/ 年粒鉄製造)  
Fig. 7 Energy balance of ITmk3 (500 kt/y iron nuggets)

表8 スタディ A のまとめ  
Table 8 Summary of study A

	Blast furnace (500 kt/y hot metal)	FASTMELT (500 kt/y hot metal)	ITmk3 (500 kt/y iron nugget)
<b>Consumption</b>			
Coal	25.75 (GJ) 2,403 (kg-CO <sub>2</sub> )	14.26 (GJ) 1,330 (kg-CO <sub>2</sub> )	14.09 (GJ) 1,314 (kg-CO <sub>2</sub> )
Fuel gas	0.00 (GJ) 0 (kg-CO <sub>2</sub> )	2.47 (GJ) 141 (kg-CO <sub>2</sub> )	4.10 (GJ) 0 (kg-CO <sub>2</sub> )
Electricity	1.72 (GJ) 154 (kg-CO <sub>2</sub> )	5.94 (GJ) 531 (kg-CO <sub>2</sub> )	0.00 (GJ) 0 (kg-CO <sub>2</sub> )
Others	0.00 (GJ) 74 (kg-CO <sub>2</sub> )	0.00 (GJ) 12 (kg-CO <sub>2</sub> )	0.00 (GJ) 0 (kg-CO <sub>2</sub> )
<b>Total</b>	<b>27.47 (GJ)</b> <b>2,630 (kg-CO<sub>2</sub>)</b>	<b>22.74 (GJ)</b> <b>2,015 (kg-CO<sub>2</sub>)</b>	<b>18.19 (GJ)</b> <b>1,548 (kg-CO<sub>2</sub>)</b>
<b>Excess energy</b>			
Gas	5.49 (GJ) 313 (kg-CO <sub>2</sub> )	0.00 (GJ) 0 (kg-CO <sub>2</sub> )	0.00 (GJ) 0 (kg-CO <sub>2</sub> )
Electricity	0.00 (GJ) 0 (kg-CO <sub>2</sub> )	0.00 (GJ) 0 (kg-CO <sub>2</sub> )	0.30 (GJ) 83 (kg-CO <sub>2</sub> )
Others	1.17 (GJ) 109 (kg-CO <sub>2</sub> )	0.00 (GJ) 0 (kg-CO <sub>2</sub> )	0.00 (GJ) 0 (kg-CO <sub>2</sub> )
<b>Total</b>	<b>6.66 (GJ)</b> <b>422 (kg-CO<sub>2</sub>)</b>	<b>0.00 (GJ)</b> <b>0 (kg-CO<sub>2</sub>)</b>	<b>0.30 (GJ)</b> <b>83 (kg-CO<sub>2</sub>)</b>
<b>Total consumption</b>			
Energy consumption	20.81 (GJ)	22.74 (GJ)	17.89 (GJ)
CO <sub>2</sub> emission	2,208 (kg-CO <sub>2</sub> )	2,015 (kg-CO <sub>2</sub> )	1,465 (kg-CO <sub>2</sub> )

表8にスタディ A の結果を示す。500kt/年鉄製造におけるFASTMELTとITmk3の必要なエネルギー量は、同規模の高炉より低い。高炉においては燃焼性ガスなどの余剰エネルギーが発生するが、これは本システム外に供給され利用される。この余剰エネルギーを差引いた実質のエネルギー消費量を比較すれば、FASTMELT法のエネルギー消費は高炉法より若干高くなるが概してほぼ同等と評価できる。また、実質CO<sub>2</sub>発生量については、FASTMELT法やITmk3法を導入することにより削減することができる<sup>3)</sup>。

これは、FASTMELT法やITmk3法においては、コークス炉や焼結プラントといった事前処理設備が必要ではないうえ、システム外へCOなどの可燃性ガスを出すことなく、石炭中の炭素が還元剤および熱源として有効に利用されているからである。

またここで特筆すべきは、ITmk3で製造される粒鉄は高温の溶鉄ではなく固体の粒状の鉄であることである。この粒鉄は輸送に適しているため、ITmk3プラントを消費地ではなく鉱山近くに導入することが、より効率のよい利用法と考えられる。鉱山近くで粒鉄を製造し消費地まで輸送することは、鉱石および石炭を輸送することと比較して、輸送すべき重量は約1/2となりその輸送にかかるエネルギーおよびコストを低減することができる。

#### 4.2 スタディ B

図8は4,000kt/年鉄製造高炉のエネルギーバランスである。大規模高炉においては、そのスケールメリットを活かして小規模高炉と比べて効率よくエネルギーを消費することができる。システム内で発生した可燃性ガスは外部へ供給され有効利用される。

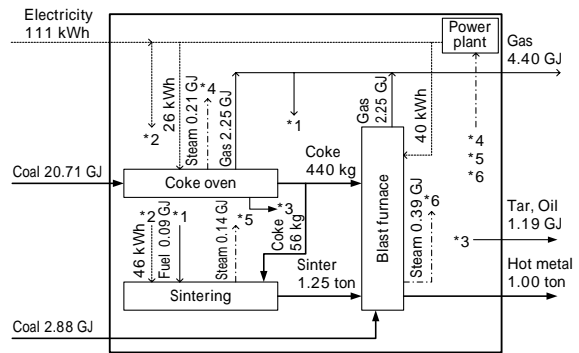


図8 高炉法のエネルギーバランス (4,000kt/年鉄製造)  
Fig. 8 Energy balance of blast furnace system (4,000 kt/y hot metal)

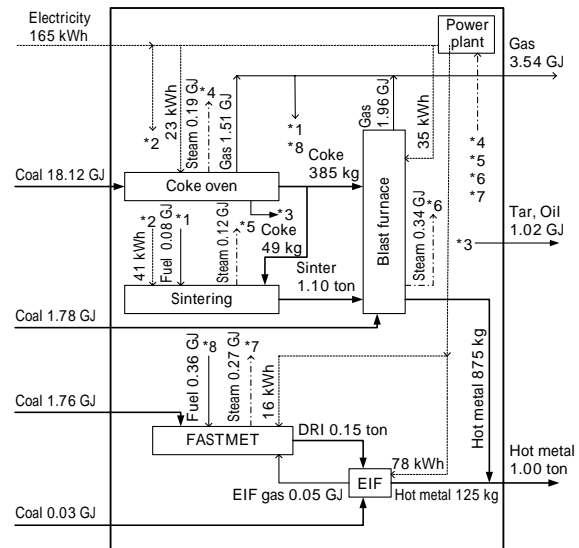


図9 高炉法とFASTMELT法の組み合わせによるエネルギーバランス (4,000kt/年鉄製造)  
Fig. 9 Energy balance of combined blast furnace system and FASTMELT system (4,000 kt/y hot metal)

表9 スタディ B のまとめ  
Table 9 Summary of study B

	Blast furnace (4,000 kt/y hot metal)	Blast furnace + FASTMELT (4,000 kt/y hot metal)
<b>Consumption</b>		
Coal	22.75 (GJ) 2,122 (kg-CO <sub>2</sub> )	21.69 (GJ) 2,023 (kg-CO <sub>2</sub> )
Fuel gas	0.00 (GJ) 0 (kg-CO <sub>2</sub> )	0.00 (GJ) 0 (kg-CO <sub>2</sub> )
Electricity	1.23 (GJ) 110 (kg-CO <sub>2</sub> )	1.82 (GJ) 163 (kg-CO <sub>2</sub> )
Others	0.00 (GJ) 74 (kg-CO <sub>2</sub> )	0.00 (GJ) 66 (kg-CO <sub>2</sub> )
<b>Total</b>	<b>23.98 (GJ)</b> <b>2,307 (kg-CO<sub>2</sub>)</b>	<b>23.52 (GJ)</b> <b>2,253 (kg-CO<sub>2</sub>)</b>
<b>Excess energy</b>		
Gas	4.40 (GJ) 251 (kg-CO <sub>2</sub> )	3.54 (GJ) 202 (kg-CO <sub>2</sub> )
Electricity	0.00 (GJ) 0 (kg-CO <sub>2</sub> )	0.00 (GJ) 0 (kg-CO <sub>2</sub> )
Others	1.17 (GJ) 109 (kg-CO <sub>2</sub> )	1.02 (GJ) 96 (kg-CO <sub>2</sub> )
<b>Total</b>	<b>5.57 (GJ)</b> <b>360 (kg-CO<sub>2</sub>)</b>	<b>4.57 (GJ)</b> <b>298 (kg-CO<sub>2</sub>)</b>
<b>Total consumption</b>		
Energy consumption	18.42 (GJ)	18.95 (GJ)
CO <sub>2</sub> emission	1,946 (kg-CO <sub>2</sub> )	1,955 (kg-CO <sub>2</sub> )

図9は、3,500kt/年鉄製造高炉に500kt/年鉄製造FASTMELTプラントを組合わせた場合のエネルギーバランスである。高炉システム内で発生した余剰可燃性ガスを、FASTMELTプラントにおいては効率よく利用することができる。

スタディ B の結果を表9に示す。FASTMELT法を既

設の高炉に組込むことにより、大規模高炉と比較して、余剰エネルギーを差引いたエネルギー消費量およびCO<sub>2</sub>発生量は若干増加するものの、システム内での比較では削減することができる。これは、FASTMELTにおいて高炉システムで発生した余剰ガスを有効利用できること、また石炭中の炭素を還元剤および熱源として効率よく利用できることにある。

## 5. プラント実績

表10にこれまで建設された実証プラントおよび商業プラントの実績を示す。

3機のFASTMET商業機がすでに稼動している。これらは製鉄ダストを還元しリサイクルするものである。ダストに含まれる亜鉛や鉛といった重金属は、RHF内で揮発し、排ガスシステムにおいて還元鉄とは別に回収される。FASTMELT法は、EAFでの溶解実験やMidrex社のシミュレータで実証されている。

ITmk3法は、米国のMesabi Nugget Pilot Demonstration Plantでのプラント連続稼動試験を通して、2004年7月に開発を終えている。

むすび=石炭ベース還元鉄製造法(FASTMET, FASTMELT, ITmk3)は下記のような特徴を有し、将来の鉄源需要に適した製鉄法として期待されている。

- 1) コークス炉や焼結プラントを必要としないシンプルなプロセスフローであるため、初期投資を抑えることができる。
- 2) 12分以内の短い還元時間であるため、プラントの立上げ、停止、生産量調整などの運転が容易である。
- 3) 幅広い種類の原料や石炭を利用することができ、立地制約が少ない。

表10 プラント実績  
Table 10 Plant supply record

Process	Plant	Use	Capacity	Start-up
FASTMET	Kakogawa, Kobe Steel	Demonstration	18,000 (t-DRI/y)	1995
FASTMET	Hirohata, Nippon Steel Corp.	Commercial plant BOF dust recycle	190,000 (t-dust/y)	April 2000
FASTMET	Kakogawa, Kobe Steel	Commercial plant BF dust recycle	14,000 (t-dust/y)	April 2001
FASTMET	Hirohata, Nippon Steel Corp.	Commercial plant BOF dust recycle	190,000 (t-dust/y)	February 2005
ITmk3	Kakogawa, Kobe Steel	Pilot plant	400 (kg-iron nugget/h)	October 1999
ITmk3	Mesabi Nugget	Demonstration	25,000 (t-iron nugget/y)	May 2003

- 4) FASTMELT や ITmk3 で製造される銑鉄や粒鉄は、高炉で製造される銑鉄と同等の品質を有している。
- 5) エネルギー消費量は同規模の高炉と比較すればほぼ同等であり、CO<sub>2</sub>排出量については削減することができる。

また、高炉法と石炭ベース還元鉄製造法を組み合わせることにより、高炉法より発生する余剰エネルギーを有効に利用することができる。

当社とMidrex社は今後も優れた特徴を持つ石炭ベース還元鉄製造プロセスの開発に取組み、製鉄分野の発展に貢献していきたい。

## 参考文献

- 1) H. Tanaka et al.: ISES 2003 Beijing Seminar, "FASTMELT Process, Environmental-Friendly Coal-Based Direct Reduction Technology."
- 2) H. Tanaka: 2004 São Paulo-SP - Brazil, "Development of ITmk3 Process." 59th ABM Annual Congress - International.
- 3) H. Tanaka et al.: SEAFI 2003 seminar, "FASTMELT Process for a Sustainable Steel Industry in Asia."