

新製鉄法の開発

Development of New Iron-Making Process

徳 田 耕 司^{*1}
Koji TOKUDA

小 林 勲^{*2}
Isao KOBAYASHI

Abstract

New iron-making process, ITmk3, can produce pure iron nuggets directly from fine ore and fine coal. ITmk3 is a simple and environment friendly process including less CO₂ emission. The features of the iron nugget are high density, high purity, etc. and it is an excellent iron source for steelmaking. Because of the successful operation at a pilot plant in US, several projects of commercial-scale plants are being planned in the world.

1. はじめに

現在の製鉄法の主流は高炉－転炉法であり、これを第1世代、天然ガスをベースとするミドレックスプロセスに代表される直接還元製鉄法を第2世代とすれば、これに続く次世代の製鉄法はいわば第3世代の製鉄法と位置づけられる。粉鉱石と炭材から短時間に高純度の粒鉄を製造する新しい製鉄プロセスITmk3「アイティーマークスリー」（以下、新製鉄法）はIronmaking Technology Mark 3を意味し、1996年にこの新製鉄法の開発に着手し、これまで国内外で開発を進めてきた。

1999年に(株)神戸製鋼所加古川製鉄所に年産3,000t規模のパイロットプラントを建設し、プロセスコンセプトを検証した後、2002年米国に年産25,000tの実証プラントを建設して粒鉄の連続製造操業を実施し、2004年に実証試験を終えて、現在、商業機の建設計画が進められている。本稿では新製鉄法の開発の背景、反応機構、プロセスの工業化への展開について紹介する。

2. 新製鉄法開発の背景

高炉－転炉法は粘結炭から製造されるコークスを使用し、鉄鉱石は焼結鉱に加工するといった事前処理が必要で、高炉－転炉を有する一貫製鉄所では日産1万t規模

1. Introduction

The main current of the iron-making process is the BF-BOF system. If this system can be called first generation and the natural gas based direct reduction (DR) process such as MIDREX process can be called second generation, the new process can be called third generation. The new iron-making process, ITmk3, is an abbreviation for Ironmaking Technology Mark Three. ITmk3 can produce pure iron nuggets directly from fine ore and fine coal. Research and development work on ITmk3 was started in 1996 and has been carried out intensively both in and outside of Japan.

In 1999 a pilot plant for 3,000 tons/year was built at Kakogawa Works of Kobe Steel, Ltd., and the basic process concept was verified. In 2002 a pilot demonstration plant (PDP) for 25,000 tons/year capacity was constructed in the United States and iron nuggets were continuously produced. The testing at PDP ended successfully in 2004 and now commercial ITmk3 projects are being planned. This paper reviews the background of development, fundamental research, developmental steps, and

^{*1} (株)神戸製鋼所 新鉄源プロジェクト本部 担当次長 Manager, Iron Unit Division, Kobe Steel, Ltd.

^{*2} (株)神戸製鋼所 新鉄源プロジェクト本部 主任部員 工学博士 Dr.Eng., Manager, Iron Unit Division, Kobe Steel, Ltd.

に大型化することによって効率を高めてきた。そのために資源に対する柔軟性や生産に対する弾力性を欠くことになった。直接還元製鉄法はクリーンな天然ガスを使用するが、その立地は産油地域に制限されている。

これに対して資源として豊富な粉鉱石と石炭を利用するプロセスが着目され、1980年代に熔融還元製鉄法などの新しいプロセス開発への挑戦が始まった¹⁾。この中で、粉鉱石と石炭を混ぜてペレットやブリケットにし、加熱することで還元鉄を製造するファストメットプロセスが(株)神戸製鋼所とその米国子会社のミドレックス社によって実用化された^{2),3)}。この技術開発の過程で金属鉄と不要成分からなるスラグが一気に分離する現象が見出された⁴⁾。この反応原理をプロセスとして構築したのが今回ここで解説する新製鉄法である。

3. 反応機構

粉鉱石と石炭を混合して製造した炭材内装ペレットの歴史は古く、日本では1953年に研究論文⁵⁾が見られ、米国では1965年にプロセスの特許⁶⁾が出願されている。

炭材内装ペレットを1450℃、窒素雰囲気下の反応炉に装入した時の発生ガス組成とペレット温度をFig. 1に示す。ペレットは装入直後に急速に加熱・還元され多量のCO、CO₂ガスが発生する。5分後にはガス発生は減少し反応が終了に向かっていることを示す。その後、ペレット温度に一旦低下が見られ、この時点が熔融に相当する。7分後には還元から熔融に至る反応は完了する。

サンプルを一定時間間隔で試験炉から取り出して急冷し、その断面を観察することにより、還元・熔融反応に伴う形態変化を調査した結果をFig. 2に示した。Fig. 2の上部が外観、下部が断面である。3分経過後ではまだ

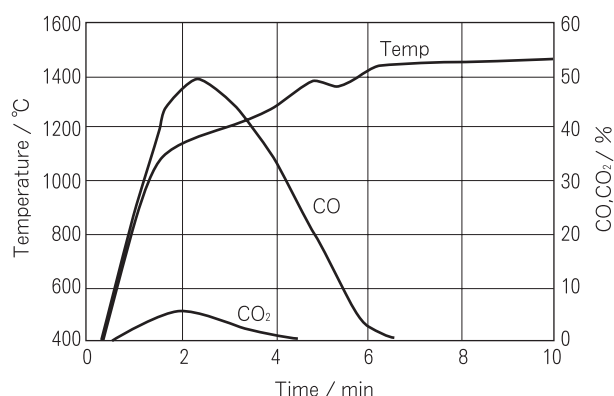


Fig. 1 Change of pellet temperature and CO, CO₂.

commercialization of the process.

2. Background of Development

The BF-BOF system needs a pre-treatment plant for raw materials such as coke oven and sintering plant, and capacity has been expanded to more than 10,000 tons/day. On the other hand, the system has lost flexibility in raw materials and production. The DR process uses the clean energy of natural gas, but location is limited to oil-producing countries.

In the 1980s new processes were developed, such as smelting reduction, to utilize fine ore and coal which are abundant as natural resources¹⁾. After that time, the FASTMET process featuring the rotary hearth furnace (RHF) was developed which can produce directly reduced iron (DRI) using carbon composite iron ore. FASTMET has been commercialized by Kobe Steel, Ltd. and MIDREX^{2),3)}. On the development of the FASTMET, a new phenomenon has been observed that can separate metal quickly from gangue minerals by raising temperature⁴⁾. This is the ITmk3 process which is reviewed in this paper, applying this reaction principle.

3. Reaction Mechanism

Research on the self-reduction of carbon composite pellets has a long history. In 1953, a technical paper was published in Japan⁵⁾, and a process patent was filed for in the US in 1965⁶⁾.

Fig.1 shows the reduction behavior of the pellet temperature and CO, CO₂ contents when the pellet was reduced at 1450℃ in Nitrogen atmosphere. Soon after charging the pellet, it was heated quickly

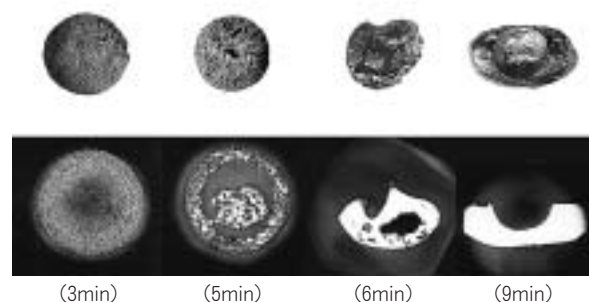
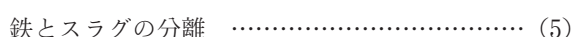
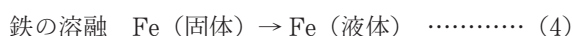
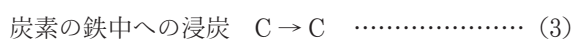
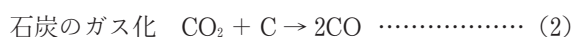


Fig. 2 Overall & cross sectional view of time sampled pellets.

還元途中の固体状態で中心部に未還元領域が残っている。5分経過後では初期の球形を維持しているが溶け落ち直前であり、表面に高密度の金属殻が形成され、内部に金属から分離した溶融スラグが見られる。6分後に金属とスラグが分離し、9分後には完全に分離している。

炭材内装ペレットの還元から溶融に至る反応は次の過程で進行する。



これらの反応は炉内の強力な輻射伝熱によって加速され、一連の反応は約10分という短時間で完結する。高炉内の原料の滞留時間が6～8時間、ガスベースの直接還元製鉄法であるミドレックス法のシャフト炉内の滞留時間が約6時間というのに対比するとその反応の速さが分かる。

一連の基礎研究から炭材内装ペレットは比較的低い温度でメタルとスラグに分離することが判明した。Fig. 3のFe-C系状態図上に新製鉄法の操作範囲を他の製鉄プロセスと比較した。第1世代の高炉法は1500℃近い温度で炭素飽和の銑鉄を製造する。第2世代のガスベースや石炭ベースの直接還元製鉄法は液体の生じない温度で操業される。これに対して第3世代の新製鉄法は状態図上の固-液共存相と呼ばれる領域に位置し、炭素濃度も2.5～4.0%の範囲で制御できることが明らかになった。これまでの炭材内装ペレットを用いた石炭ベースの直接還元鉄の製造は反応(1)～(2)によるものであり、新製鉄法は(3)～(5)の反応を加えて発展させたものと言える。

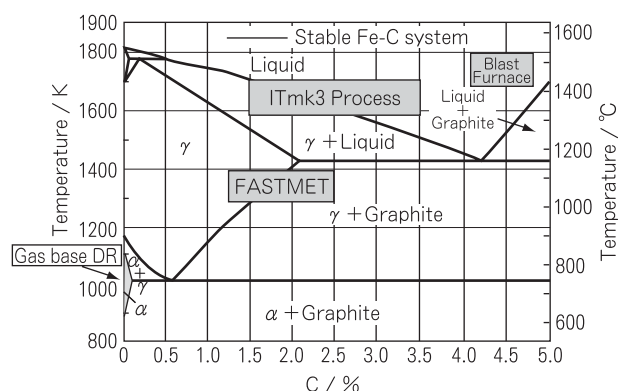
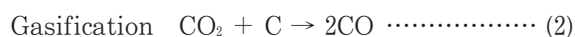


Fig. 3 Operation ranges of Ironmaking process on Fe-C system.

and a large amount of CO and CO₂ were evolved. After 5 minutes, gas generation decreased and reduction ended. After that, the pellet temperature dropped once. This point corresponded to melting. 7 minutes later, the reaction from reduction to melting was completed.

The behavior from reduction to melting was investigated by observing the cross section after removing from furnace and quenching to interrupt the reaction. Fig.2 shows the outward appearance and the cross sectional views of the samples. The 3 minutes sample shows a typical cross section of DRI in the middle of reduction with an un-reacted core in the center. The 5 minutes sample, which was the sample just before melt down, kept the original round shape. However, a dense metallic iron shell was formed on the surface and the inside contained the molten slag separated from metal and a large void space. At 6 minutes, the metallic iron phase melted, and slag was separated from molten metal. At 9 minutes, the metal and slag were separated completely.

From a series of experiments, the following reaction steps were considered.



These reactions are accelerated by strong radiation heat, and the series of reactions is completed in about 10 minutes. Comparing with the residence time of 6-8 hours in a blast furnace and 6 hours in the DR shaft furnace, the rapid reaction rate is notable.

The results of the fundamental study, show that for the carbon composite pellets the metal can be separated from the slag at a relatively low temperature. In Fig.3, the operation range of ITmk3 is shown for the Fe-C system to compare it with other iron-making processes. The blast furnace process (the first generation) produces carbon-saturated hot metal at around 1500℃. The gas based DR process (the second generation) and FASTMET process

(3)～(5)の反応は、

- 1) 固体－気体－液体の3相が関与する「不均一系」
- 2) 加熱昇温することによって直ちに反応が生じる「非定常状態」
- 3) 反応物質が存在する限り反応が進行する「非平衡」という複雑な形態をとるために、この制御が技術の鍵となる。

4. プロセス開発

新製鉄法の開発はTable 1 に示す実験設備を用いて段階的に進められて来た。まずチューブ炉を用いて還元と溶融の基本的な挙動が調査され、前項で説明した反応機構が明らかとなった。次に原料ペレットが集合することによる影響は箱型炉で調査された。箱型炉を用いた検討の一例として、Table 2 に組成を示す4種類の鉄鉱石と4種類の石炭を用い、それらを交互に組み合わせた実験を行って鉄鉱石と石炭のプロセス適応性調査が実施された。鉄鉱石はヘマタイト、マグネタイト、並びに $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比の異なるものが選ばれた。石炭は揮発分の含有量と流動性指数の違いを元を選択された。一連の実験を通じて、この新製鉄法は主原料に対して柔軟性のあるプロセスであることが確認された。

プロセスコンセプトの確認と商業化を目的として、(株)神戸製鋼所加古川製鉄所内にパイロットプラントが建設された⁷⁾。粒鉄を製造する反応器としては次の3つの観点から回転炉床炉 (Rotary Hearth Furnace) が選ばれた。

Table 1 Test furnaces to develop ITmk3 Process

Facilities	Capacity	Remarks
Tube Furnace	3 pellets	Horizontal type
Box Furnace	40 pellets	One chamber
Box Furnace 2	200 pellets	Two chamber
Kakogawa Pilot Plant	350 kg/h	Rotary Hearth Furnace

Table 2 Chemical compositions of tested raw materials (Unit: mass%)

Type	Ore					Coal			
	T.Fe	FeO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Type	Ash	VM	F.C.
O1	68.10	0.01	0.92	0.47	0.05	C1	9.75	15.88	75.37
O2	69.51	30.22	1.42	0.41	0.46	C2	8.90	19.60	71.60
O3	66.42	0.28	2.52	1.18	0.28	C3	9.95	36.41	53.63
O4	62.67	0.35	3.92	2.22	0.02	C4	13.52	2.00	84.48

operate at temperatures where no liquid is generated. On the other hand, operational range of ITmk3 (the third generation) is located in the coexistence phase of solid and liquid, and carbon content can be controlled between 2.5% and 4.0%. The reaction mechanism of coal based DR processes such as FASTMET is based on step (1) and (2) above. ITmk3 is the evolved process adding other steps of (3) to (5) to the traditional processes. Conditions of step (3) to (5) can be explained as follows.

- 1) “Non-uniform system” of three phases of solid, liquid, and gas
- 2) “Non-steady state conditions” due to rapid reaction under strong radiation atmosphere
- 3) “Non-equilibrium conditions” under which the reaction occurs as long as reactive materials exists.

Control of the above conditions is the key of ITmk3 process.

4. Process Development

The ITmk3 process has been developed using the test facilities in Table 1. Using the tube furnace, the reduction and melting behavior was investigated and the reaction mechanism was analyzed just mentioned in the previous chapter. The box furnace tests were carried out to examine the mass behavior of the feed pellets. In these tests, the availability of iron ore and reductant coal was examined under the combination of 4 ores x 4 coals in Table 2. The ores were selected from hematite, magnetite and different $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios. Coals were selected based on the content of volatile matter and the fluidity index. Through the series of tests, it was confirmed that ITmk3 was a very flexible process for raw materials.

In order to confirm the process concept and to industrialize technology, a pilot plant was built in the Kakogawa Works of Kobe Steel, Ltd⁷⁾. A rotary hearth furnace (RHF) was selected from the following points of view.

- 1) Production of iron nuggets in one unit
- 2) Heat supply by burner combustion
- 3) Continuous operation

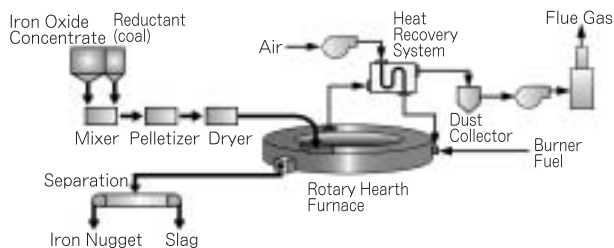


Fig. 4 ITmk3 Process Flow.



Fig. 5 Kakogawa Pilot Plant.

- 1) 1 段の反応器による粒鉄製造
- 2) 燃料燃焼による加熱
- 3) 連続運転

回転炉床炉は、チューブ炉や箱型炉で確認された還元溶融挙動を元に設計され、さらに熱流動解析 (CFD: Computational Fluid Dynamics) の手法を用いて炉内のガス流れ等を模擬して最適化を行った。

新製鉄法のプロセスフローをFig. 4 に示すが、概略下記の工程を経て粒鉄は製造される。

- 1) 原料粉鉱石と粉石炭を混合して炭材内装ペレット (もしくはブリケット) に塊成化する。
- 2) 塊成化後、乾燥されたペレットを回転炉床炉に装入して加熱・還元・溶融する。
- 3) 炉内で溶融鉄を粒状に凝集させ、冷却後に排出して粒鉄とスラグに分離する。
- 4) 炉排ガスは熱交換器で燃焼用空気を予熱し、その後集塵して排気する。
- 5) 炉内はガス燃料をバーナーで燃焼して加熱する。

パイロットプラントの全景をFig. 5 に、また炉内と製品粒鉄の写真をFig. 6 に示す。ペレットが装入された直後のゾーンでは、石炭中揮発成分の揮発に伴うすすの発生により視界がクリアでない。還元ゾーンにおいてペレ

The furnace was designed based on the reduction and melting behavior of the laboratory tests, and optimized by simulating the atmospheric gas flow using a CFD (Computational Fluid Dynamics) model.

The process flow of ITmk3 is shown in Fig.4. Iron nuggets are produced through the following steps.

- 1) Fine ore and coal are mixed and agglomerated to become carbon composite pellets (or briquettes)
- 2) The pellets are dried, then fed to the RHF for heating, reduction and melting.
- 3) Melted pellets are coalesced to be nuggets and discharged from the RHF after cooling, then slag is separated from the nuggets.
- 4) The heat of the RHF waste gas is recovered by a heat exchanger and the combustion air is pre-heated.
- 5) In the RHF, the pellets are heated by gas-fired burners.

The overview of the pilot plant is shown in Fig.5, and the inside view of the furnace and the products are shown in Fig.6. In the feed zone, the view is not clear because of soot generation by devolatilization of volatile matter in reductant coal. In the reduction zone, the pellets are heated and the reduction progresses under the controlled atmosphere not to melt the pellets. In the melting zone, the pellets are rapidly melted down and separated the iron from the slag. The final products are cooled in the cooling zone and discharged from the RHF in the form of solid iron nuggets and slag particles. Chemistry and amount of slag produced are determined based on raw materials, and the slag is equivalent to blast furnace slag.

The operation was started in October, 1999 and continued for 6 months. Through the operation the process concept of iron nuggets being continuously produced using a combustion furnace was verified.

5. Mesabi Nugget Project

In the state of Minnesota, USA, there are old iron ore mines called Mesabi Range. Silver Bay by Lake Superior is one of them. In 2001 the plan came up to construct the pilot demonstration plant (PDP) here

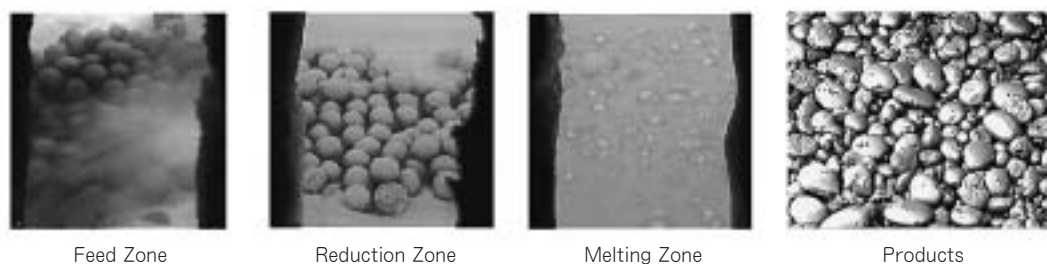


Fig. 6 Inside views of the furnace and the products.

トは加熱され、溶融しないようコントロールされた温度条件下で還元反応が進行する。溶融ゾーンにおいてペレットは急速に溶け落ち、鉄はスラグから分離する。これらは冷却ゾーンにて冷却固化され、固体の粒状鉄とスラグとして炉から排出される。発生するスラグの組成や量は使用する石炭や鉄鉱石の種類によって決まるが、基本的には高炉スラグと同等である。

1999年10月に運転をスタートしてから6ヶ月間にわたって実験操作が行われ、燃焼炉を用いて連続的に粒鉄を製造するというプロセスコンセプトが検証された。

5. メサビナゲットプロジェクト

米国ミネソタ州にはメサビ鉱山という古くから採掘されている鉄鉱床があり、スペリオール湖畔のシルバーベイもその中の一つである。ここに年産25,000t規模の実証プラントを建設する計画が持ち上がり、

- 1) ミネソタ州の産業の振興と雇用を創出しようとする州政府
- 2) 鉄鉱石に付加価値をつけて市場に供給しようとする鉱山会社
- 3) 良質の鉄源を安定して確保しようとする電気炉製鋼メーカー
- 4) 本新製鉄法を商品化しようとする神戸製鋼所

の意向が合致して、ミネソタ州政府、北米最大の鉱山会社「クリーブランドクリフス社」、大手電炉製鋼メーカー「スティールダイナミクス社」等が出資して2001年9月「メサビナゲット社」を設立した。ここで製品粒鉄を金塊になぞらえて「ナゲット」と呼んでいる。

2002年に実証プラントの建設に着手し、2003年5月に最初の粒鉄製造に成功した。実証テストは4つの運転キャンペーンから成り、それぞれの主な目的は下記の通りである。

- 1) 第1キャンペーン：操業技術の習得と連続運転

which can produce 25,000 tons of iron nuggets per year. This plan was supported by the following four major groups.

- 1) The state of Minnesota who would like to promote local industries and create employment
- 2) A mining company who is interested in producing value-added material for the iron unit market
- 3) An Electric Arc Furnace (EAF) based steel producer who would like to secure a high quality iron source
- 4) Kobe Steel who developed this process and would like to industrialize it

In September 2001, Mesabi Nugget, LLC was established to construct and operate PDP by the state of Minnesota, “Cleaveland-Cliffs, Inc.”, the largest mining company in north America, and “Steel Dynamics, Inc.” the major EAF based steel producer, etc.

Construction of PDP started in 2002, and the first iron nuggets were successfully produced in May 2003. The operation consisted of four campaigns and the main purposes were as follows.

- #1 campaign: mastery of operational skills and continuous operation
- #2 campaign: optimization of process parameters (1)
- #3 campaign: optimization of process parameters (2)
- #4 campaign: overall plant performance test

In August 2004, the #4 campaign was successfully completed. Through the campaigns a lot of data were obtained and analyzed. The results are to be utilized for designing commercial plants. Photos of PDP and product iron nuggets are shown in Fig.7 and Fig.8.

At PDP, the magnetite ore was supplied from Mesabi range, and US bituminous coal was used as



Fig. 7 Demonstration Plant in Minnesota.



Fig. 8 Iron Nugget Pile.

- 2) 第2キャンペーン：操業条件の最適化(1)
- 3) 第3キャンペーン：操業条件の最適化(2)
- 4) 第4キャンペーン：総合プラント性能テスト

2004年8月に第4キャンペーンを終了するまでに種々の運転データが採取され、これらを解析・評価した結果が商業プラントの計画・設計に利用される。実証プラント建屋と製品粒鉄の写真をそれぞれFig. 7とFig. 8に示す。

実証テストでは、鉄鉱石はメサビ鉱山のマグネタイト鉱石が、また還元用の石炭は米国産の瀝青炭が使用された。第4キャンペーンの性能テスト時には時間当たり2.65トンの粒鉄が安定して製造された。

実証プラントで製造された粒鉄は、スティールダイナミクス社等の電気炉に実際に供され、優れた溶解性が確認されている。粒鉄の特徴としては、1) 高密度、2) 搬送・投入に適したサイズ、3) 適度なカーボン濃度、4) 重金属・スラグ成分等の不純物を含まない、5) 発火性がない、6) 安定した品質、等が挙げられる。すなわち製品粒鉄は、従来電気炉の主原料として使用されてき

a reductant. 2.65 tons/hr of iron nuggets were stably produced at the performance test of #4 campaign.

The iron nuggets produced at PDP were melted at EAF shops of Steel Dynamics Inc., etc. and superior melting characteristics were confirmed. The major features of the iron nuggets are, 1) high density, 2) ideal size for transportation and charging to EAF, 3) moderate carbon content, 4) without heavy metal slag component, 5) non-pyrophoric (100% metallized), 6) stable quality (uniform chemical compositions), etc. It was demonstrated and verified that the iron nuggets can be superior iron sources for steel-making to traditional iron units such as scraps, DRI, and pig iron.

6. Refractory of RHF

Through the development of ITmk3, refractory design of RHF was one of the most important technical constituents. Because the RHF handles heating, reduction, melting, then cooling of pellets, the following items have to be considered for selection of refractories.

- 1) Heat resistance against pellet melting temperature (high temp atmosphere)
- 2) Anti-corrosion resistance against dusts coming from input raw materials
- 3) Anti-spalling resistance of hearth refractory which suffers from cyclic temperature change due to hearth rotation

For the selection of a hearth refractory for the Kakogawa pilot plant, a “panel spalling test” was conducted. The refractory candidates were lined up to form a panel in the test furnace, then cyclic heating was carried out simulating actual operating conditions. After the test, performance of the tested refractories was evaluated by visual observation of surface cracks, etc. Based on the results, a high alumina brick was selected, then installed at Kakogawa pilot RHF. This refractory worked fine during the operation.

After the completion of pilot operation at Kakogawa, the refractory samples were taken out from various parts of the furnace, and detailed

たスクラップ、還元鉄、銑鉄より優れた製鋼用原料となることが実証された。

6. 回転炉床炉の耐火物

本プロセスの開発を通じて、反応炉である回転炉床炉の耐火物設計は最も重要な技術要素の一つであった。炭材内装ペレットを加熱・還元・熔融し、その後冷却して製品の排出までを行うため、耐火物の選定に際しては次の事項に対する考慮が特に重要となった。

- 1) ペレット熔融温度（高温雰囲気）に対する耐熱性
- 2) 装入原料に由来する炉内ダスト成分に対する耐食性
- 3) 回転に伴い温度履歴を受ける炉床耐火物の耐スポーリング性

まず加古川パイロットプラントの炉床耐火物の選定に当たり「パネルスポーリングテスト」を実施した。これは試験炉内に候補の耐火物をパネル状に並べ、実際の操業を模擬した加熱・放冷を繰り返すもので、表面の亀裂等の発生状況から性能を評価した。テスト結果に基づき、高温焼成された高アルミナ質煉瓦が選定され、これを用いて施工された耐火物炉床は、実操業においても問題なく機能した。

加古川パイロットでの実験操業終了後、代表的な部位ごとに炉内耐火物を切り出し、EPMAを含む詳細な調査を行った。また炉内耐火物表面から付着物サンプルを採取し、ミネソタ実証プラントの設計用に同サンプルを用いて坩堝耐食試験を実施して候補となる耐火物の耐食性を比較評価した。同じ種類の耐火物サンプルに対して、曝露温度が1500℃と1550℃では侵食の状況に大きな差が現れるなど、種々の有用な知見が得られた。

さらに実証プラントでは、同じ種類・等級の耐火物を施工方法（流し込み、吹き付け等）を変えて張り分け、その違いによる影響も調査した。同プラントでの粒鉄製造の総運転期間は230日に及び、炉内耐火物の総合評価に際して十分に長く、信頼性が高いと考えられる。選定された耐火物群は良好な結果を示し、これらの結果に基づき商業機の耐火物選定・設計が最適化された。

7. プロセスの特徴

ここで新製鉄法の特徴を改めて整理すると以下のようなになる。

- 1) 製品粒鉄は優れた製鋼用原料となる。
- 2) 従来法に比して低温、短時間で反応が進行するため

analysis was conducted including EPMA. Also the adhered dust samples on the refractory surface were taken and used for slag cup testing, which was carried out to evaluate the corrosion resistance of the refractory candidates for designing the Minnesota PDP. From the testing, a lot of useful findings were obtained including the fact that there was an obvious difference in corrosion between 1500 and 1550 °C atmosphere for some refractories.

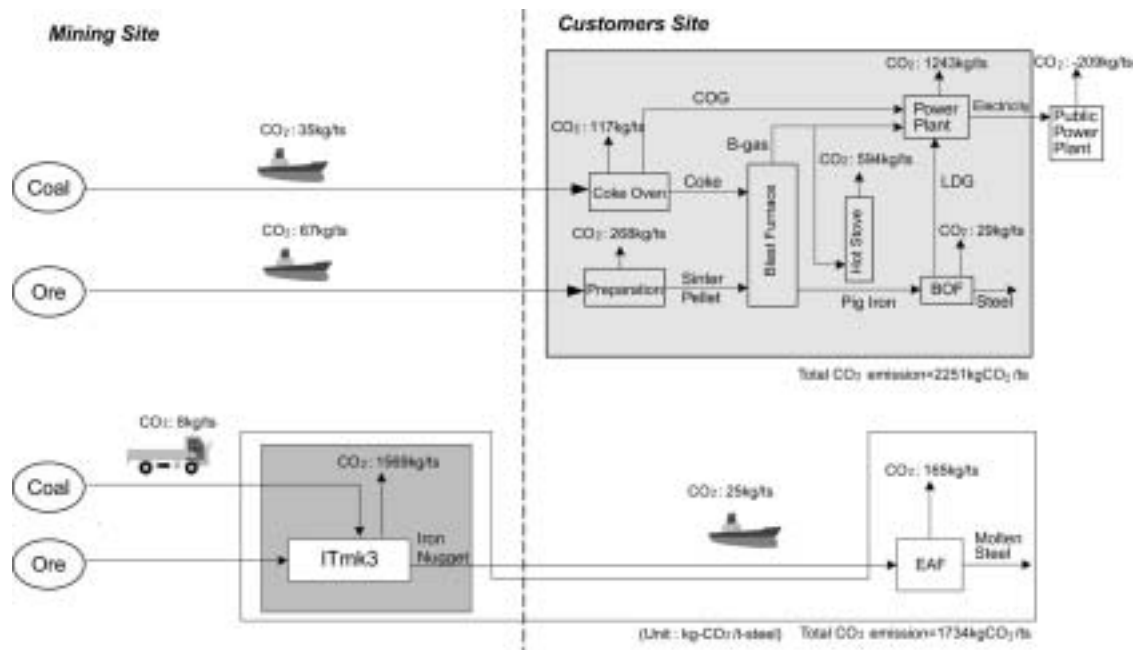
At Minnesota PDP, the influence of installation methods was investigated. For example, the same kind/grade of refractories were installed differently, they were both gunned and poured. At PDP, total operation period was 230 days, which was long enough for refractory evaluation, therefore, the results of the evaluation should be very reliable. After PDP operation, the selected and installed refractories showed good performance, based on that the selection and design of refractories for a commercial furnace was optimized.

7. Features of Process

The features of the ITmk3 process can be summarized as follows.

- 1) The produced iron nugget in an excellent iron source for steelmaking.
- 2) Low energy consumption due to shorter reaction time and lower process temperature than conventional methods
- 3) Environment friendly process including less CO₂ emission
- 4) High flexibility raw material selection including low grade iron ores and non coking coal
- 5) Low capital investment due to simple process
- 6) Flexible operation including easy start-up and shut-down of plant featuring RHF

For item 3) above, greenhouse gas emission was compared between ITmk3 and BF-BOF systems⁸⁾ and shown in Fig.9⁹⁾. For the BF-BOF steelmaking system, the boundary of this study is up to crude steel production. For ITmk3, iron nuggets are produced at a mining site and shipped to the EAF melting shop. ITmk3 does not require a coke oven or sintering plant, and utilizes 100% of the chemical

Fig. 9 Estimation of CO₂ emission.

エネルギー消費が少ない。

- 3) CO₂の発生量が少なく環境にやさしい。
- 4) 低品位鉱石や一般炭が使用できるなど主原料に対するフレキシビリティが高い。
- 5) シンプルな製鉄プロセスで設備コストが低い。
- 6) 回転炉床炉の特徴としてプラントの起動・停止が容易であるなど操業に柔軟性がある。

上記の第3項について、既報告⁸⁾に基づいて試算したCO₂の発生量をFig. 9⁹⁾に比較した。高炉－転炉法では粗鋼製造まで、新製鉄法では粒鉄を電気炉で溶解・製鋼するまでを対象とした。新製鉄法は原料の予備処理工程がなく、石炭の持つ化学エネルギーを自己完結で100%利用するため、CO₂の発生量は高炉－転炉法に比して23%削減できるとの試算が得られた。さらに、新製鉄法は鉱山元に立地した場合に優位性が発揮される。鉱山は従来、高炉向けに鉱石を供給してきたが、このプロセスの導入により鉄鉱石から粒鉄へ付加価値を高めることができ、転炉や電気炉などの製鋼工程へとマーケットを拡大することができる。しかも、ユーザー側では溶解性に富む粒鉄を製鋼工程に直接使用することにより、生産性向上、製造コスト低減、品質向上に寄与することができる。鉱石中の酸素を除去し、脈石を分離した鉄源を製鉄所へ直接供給できるので、輸送体積、質量が減ることとなり、鉄源の物流そのものを変革しうる潜在力を秘めている。

energy of coal by itself, which results in reduction of CO₂ emissions by 23% compared to BF-BOF system. ITmk3 process is advantaged if it is located at a mining site. The mining companies have been supplying iron ore for BF, however, they can increase profits of their product if they introduce this new process. Their market will grow toward steelmaking such as BOF and EAF. For the user side, usage of the iron nuggets will contribute to higher productivity, lower production cost, and higher quality, etc. ITmk3 removes oxygen from iron ore, and can produce and supply iron units without slag directly to steelmaking shops. Due to this reduction of transportation volume and weight, ITmk3 has the potential to change the overall logistic system in the steel industries.

8. Future Outlook

Because of the successful operation of the Mesabi Nugget project at PDP, construction of a 500,000-tons/year commercial-scale plant will start soon in US. Also, several projects are being planned in Australia, Brazil, Ukraine, India, etc.

The ITmk3 process can produce high quality iron units using fine iron ore and coal which are

8. 今後の展開

メサピナゲットプロジェクトの成功により、年産50万トン規模の商業プラントの建設が米国で近々開始される予定である。また、オーストラリア、ブラジル、ウクライナ、インド等でも商業機の計画が進められている。

新製鉄法（ITmk3）は世界に豊富に存在する粉鉱石と石炭から高品位の鉄源を製造するプロセスである。鉱山では鉄鉱石の付加価値を上げて市場に提供でき、マーケットを広げることができる。さらに、脈石分離という観点から資源の有効利用、輸送コストの低減という利点を備え、CO₂削減に貢献できるという試算も得られている。この技術の商業化により、地球に優しい次世代製鉄法として展開されていくことが期待される。

abundantly available in the world. Mining companies would be able to add value to their iron ores in the form of iron nuggets and expand their market. From the viewpoint of slag removal, ITmk3 has the advantages of saving transportation costs and also contributing to reduction of CO₂ emissions. It is expected that ITmk3 will be developed and industrialized as an environmental friendly new iron-making process.

References

- 1) Takao Hamada, Tetsu to Hagane, 72(1986), p.1991
- 2) J.A.Lepinski : Ironmaking Conf. Proc., ISS, Warrendale, PA, 52 (1993), p.349.
- 3) Jun Jimbo, Yoshiyuki Miyagawa, Masashi Fujitomi, Isao Kobayashi, Toshihide Matsumura, Makoto Nishimura, Kobelco Technology Review, 20 (1997) Apr., p.6
- 4) T.Matsumura, Y.Takenaka, M.Shimizu, T.Negami, I.Kobayashi, A.Uragami, La Review de Metallurgie-CIT, Mars (1998), P.341
- 5) T.Morimune, M.Ikeda, Tetsu to Hagane, 40(1953), p.178
- 6) D.Beggs : US patent No.3443931, Sept.10, 1965
- 7) O.Tsuge, S.Kikuchi, K.Tokuda, S.Ito, I.Kobayashi, A.Uragami : ISS 61st Ironmaking Conf. Proc., ISS, Warrendale, PA, (2002) p.511.
- 8) ISIJ, (1993), p.13.
- 9) Hidetoshi Tanaka, Isao Kobayashi, Kobelco Technology Review, 113 (2002), p.52