

(解説)

ITmk3[®] プロセス

ITmk3[®] Process



菊池晶一*
Shoichi KIKUCHI



伊東修三*
Shuzo ITO



小林 勲*(工博)
Dr. Isao KOBAYASHI



津下 修**
Osamu TSUGE



徳田耕治**
Koji TOKUDA

The ITmk3 Process which produces high-quality pig iron product (ITmk3 Iron Nuggets) from iron ore fine and coal fine was developed based on a unique concept of iron ore/carbon composite technology. The development started in 1996, followed by test operations at a pilot plant and large-scale pilot plant. The first commercial plant was constructed in the U.S. and has started producing ITmk3 Iron Nuggets. This article outlines the history of the development, the features of the process, the product, and the future outlook.

まえがき = ITmk3 (アイティーマークスリー) は比較的低温で、急速に還元・浸炭・溶融・スラグ分離を行う製鉄プロセスの総称である。

現在の製鉄の主流である高炉法を第1世代、MIDREX[®]法に代表される直接還元製鉄法を第2世代とすると、ITmk3は従来とは全く異なるコンセプトのもとに開発された第3世代の製鉄法：Iron making Technology Mark 3と位置づけられる。ITmk3は一連の反応を約10分で完結し、高炉内の原料の滞留時間が8時間、MIDREX法のシャフト炉内の滞留時間が6時間に比べるとその反応の速さが分かる。

1. 新製鉄法開発の背景

高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、高炉を有する一貫製鉄所では日産1万トン規模に大形化することによって効率を高めてきた。そのため、原料をはじめとする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。また、直接還元製鉄法は天然ガスを使用するプロセスであることから、その立地は安価な天然ガスが産出する地域に限られることになる。

これに対し、資源として豊富な粉鉱石と一般炭を原料として利用するプロセスが着目され、1980年代に溶融還元製鉄法をはじめとする新しいプロセス開発への挑戦が始まった。このなかで当社および当社の米国子会社であるミドレックス社は、粉鉱石と石炭を混ぜて塊成化し、加熱することによって還元鉄を製造する FASTMET[®] プロセスを実用化した。

1995年、このプロセスを開発する過程において、10分程度の短時間の加熱であっても金属鉄とスラグが分離する現象を見いだした。この反応原理をプロセスとして構築したものが本稿で解説する新製鉄法 ITmk3 である。

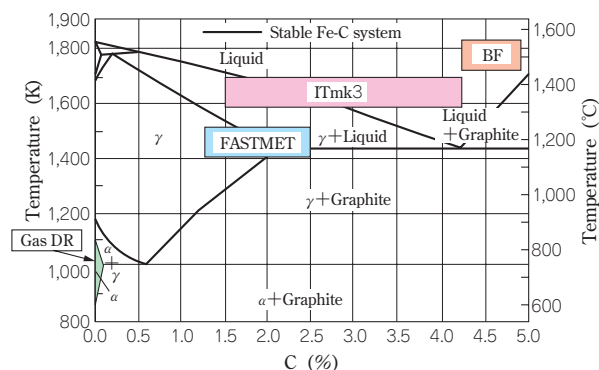


図1 各種製鉄法の操作範囲
Fig. 1 Operation region of iron making processes

Fe-C系状態図を用い、ITmk3の操作範囲を他の製鉄プロセスと比較した(図1)。高炉法(図中のBF部)では1,500℃近い温度で炭素飽和の銑鉄を製造するのにに対し、ITmk3は、高炉より低温で高純度の金属鉄を製造する。

2. 基礎研究

当社は1996年より新製鉄法の研究を開始し、当時の鉄鋼技術研究所(現加古川製鉄所・技術研究センター)のチューブ炉において、低温で急速に金属鉄が生成し、スラグが分離する現象が確認された。図2にチューブ炉内の状況を示す。国内外の研究者も交えて検討を続けた結果、これは新しい製鉄現象の発見であるとの結論に達し、ITmk3と名付けられた。

海外も含めた大学との産学共同研究が始められ、より大規模での実験を行うためのボックス式加熱炉を鉄鋼技術研究所に設置した。図3にボックス炉から取出した高温サンプルを示す。金属鉄は橙色を、スラグは暗橙色を呈しており、金属鉄とスラグが分離している様子が分かる。東北大学および東京工業大学では、この新しい製鉄

*資源・エンジニアリング事業部門 新鉄源本部 開発部 **Midrex Technology Inc.

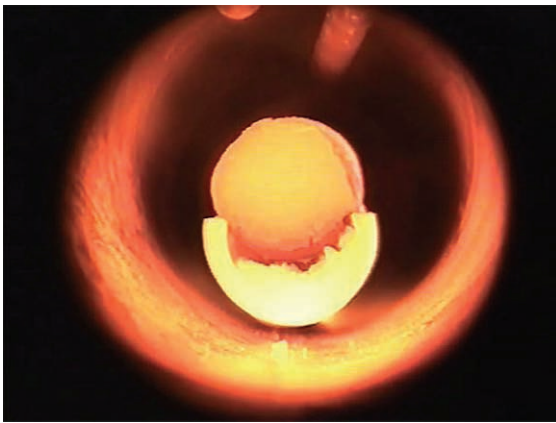


図2 チューブ炉内
Fig. 2 Inside view of tube furnace

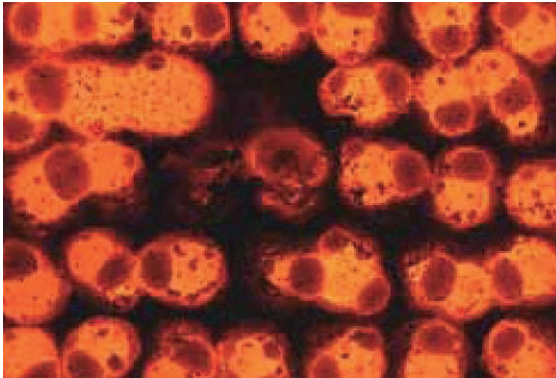


図3 ボックス炉から取出した高温サンプル
Fig. 3 Hot samples of a box type furnace test



図4 サリー大学実験炉
Fig. 4 Test furnace at Surrey University

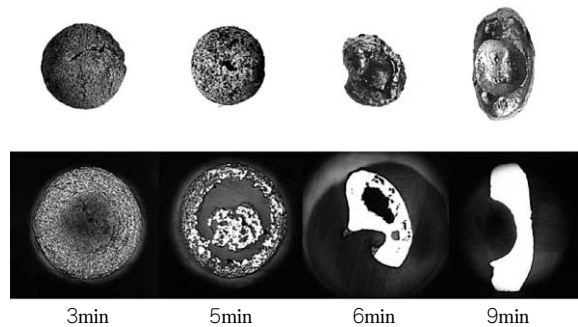
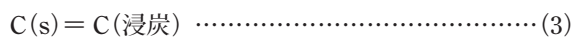
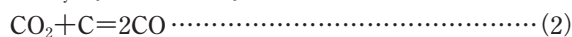
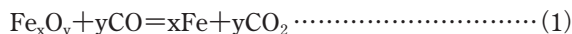


図5 ITmk3 プロセスの反応機構
Fig. 5 ITmk3 reaction mechanism

現象における反応機構を解明する研究が進められた^{1), 2)}。英国サリー大学では、多段加熱式の大型ボックス炉が設置され、加熱方式に関する研究が進められた(図4)。ドイツのマックスプランク研究所では、反応の数式モデル化が検討された³⁾。

鉄鉱石と石炭の反応式そのものは、以下に示したように一般的な製鉄法と変わらない。



FASTMET では反応 (1), (2) が進行するのに対し、ITmk3 は、これらに (3), (4) を加えて発展させ、金属鉄とスラグを分離させるものである。

鉄鉱石やコークスなどサイズの大きな原料を利用した高炉法あるいは直接還元製鉄法と比較すると、新製鉄法では鉄鉱石と石炭が微粉で混合・近接しているため反応が比較的速く進むことは考えられる。しかしながら、ここまで急速な反応を説明することはできない。

鉄鋼技術研究所のボックス炉においては、代表的な鉄鉱石・石炭各4種類を選定し、それらの組合せにおいても同様の現象が起こることを確認した。さらに、原料、温度、炉内雰囲気などによる反応への影響を調べる研究が進められた。また、還元・溶融・スラグ分離の各段階における還元鉄の断面調査を行うことにより、反応機構の解明を進めていった。図5に断面調査の例を示す。加熱開始3分後では、粉鉱石と石炭を混ぜた塊成物の内部

で還元が進むものの外観に大きな変化は見られなかった。5分後では、一部の金属鉄とスラグが溶融・分離し始め、6分を経過する頃には塊成物全体が急速に溶融して金属鉄とスラグが大きく分離し始めた。9分後には両者は完全に分離した。サリー大学においては、多段式ボックス炉の利点を生かして還元・溶融それぞれの反応を個別に制御し、反応の最適化を進めていった。

反応機構のなかでもとくに、急速な浸炭現象は従来のガス浸炭、固体浸炭のみでは説明できず、その新しい浸炭現象の解明には多くの時間が費やされた。還元鉄プラントのシャフト炉と異なり、ガス浸炭の寄与は少ないと考えられている。最近の東北大学の研究では、液相スラグを介した浸炭現象が発見され²⁾、固体浸炭とともに急速な浸炭現象に寄与しているものと考えられる。

鉄鋼技術研究所のボックス炉では、現在までに100種類を超える多様な原料のテストが行われ、ITmk3の原料に対する柔軟性が確認された。また、結晶水を多量に含んだ鉄鉱石、オイルコークス、改質褐炭などもテストされ、低品位原料に対する適応性も確認された。

3. 新製鉄法の実用化

3.1 パイロットプラント

基礎研究と並行して、新しい浸炭現象を利用した新製鉄プロセスの実用化が開始された。様々なプロセスが検討されたなか、1998年、最も早く実用化できる可能性のある粒鉄製造プロセスの採用を決定し、パイロットプラントの設計に着手した。理想的な条件下で反応が行われるボックス炉と異なり、パイロットプラントでは解決す

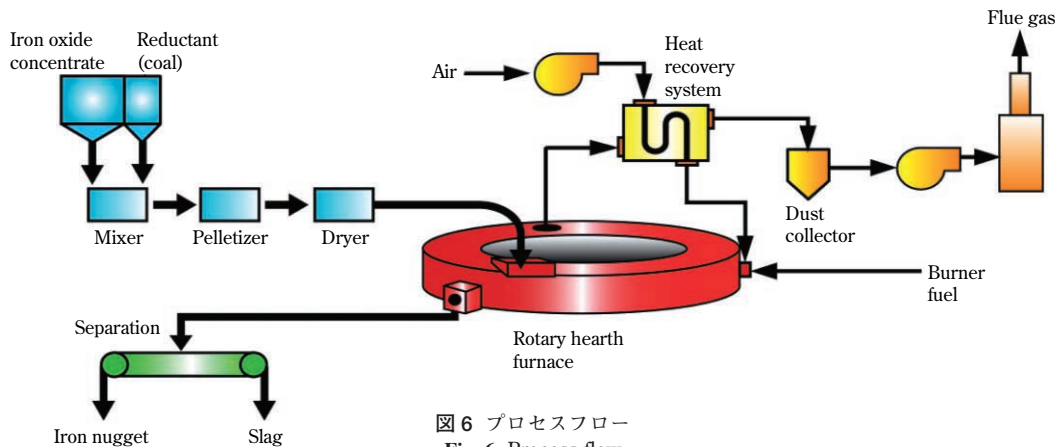


図6 プロセスフロー
Fig. 6 Process flow

べき多くの検討課題が挙げられ、プロセス開発が開始された。

粒鉄製造プロセスのフローを図6に示す。大きく分けてつぎの4つの単位操作で構成される。

- 1) 鉄鉱石・石炭を主原料とする塊成化 (青色部)
- 2) 還元溶融 (赤色部)
- 3) 金属鉄とスラグの分離 (緑色部)
- 4) 排ガス処理・熱回収 (黄色部)

パイロットプラントでは、ITmk3の特徴である急速な反応を利用するため、反応炉には輻射加熱の容易な回転炉床炉が選定された。また、溶融還元製鉄法においては、溶融した後に還元反応が進むことによってFeOが耐火物を浸食することが懸念される。これを避けるため、還元反応を完了させたのちに溶融を起こす還元溶融法が採用された。

回転炉床炉においては、バーナを用いた加熱・燃焼ガスの炉内還元雰囲気への影響が懸念された。このため設計段階では、機械研究所において数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics, 以下CFDという) によるシミュレーションを実施し、炉内の温度、ガス流れ、ガス性状分布などを検討することによって回転炉床炉設計の最適化を図った (図7)。

炉床の上で連続的に原料を溶かして金属鉄を作ることには技術的な課題が多い。いったん溶けてスラグと分離された金属鉄は、冷却固化して炉外へ排出される。これによって炉床耐火物は昇温・冷却を短時間で繰返し受け、厳しい熱応力にさらされる。また、炉床上で反応が行われるため、スラグの浸食にも耐えられなければならない。そこで数十種類の耐火物が候補に挙げられ、選定のための実験が繰返された。まず、繰返し熱応力は、耐火物メーカーの実験炉を用い、急速加熱・冷却の繰返し実験によって確認した。また、スラグ浸食に対しては、ボックス炉を用いて実験を繰返した。これらの実験に基づき、炉床耐火物が決定された。

炉床耐火物の選定は非常に重要ではあるが、これだけでは粒鉄連続製造は成立しない。炉内への原料の投入・排出を含め、炉床を健全に維持する技術がこのプロセスのキーとなる。この技術もボックス炉を用いて研究され、パイロットプラントの操業に備えた。

冷却固化されたとはいえ、非常に高温の粒鉄を炉内か

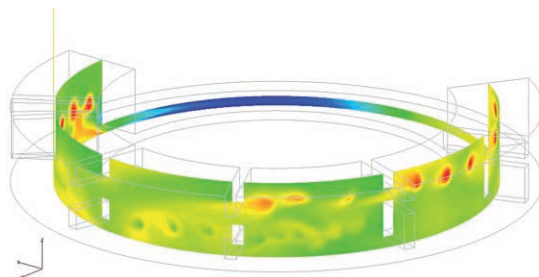


図7 回転炉床炉CFD解析例
Fig. 7 CFD analysis result of rotary hearth furnace



図8 加古川パイロットプラント
Fig. 8 Small pilot plant in Kakogawa Works

ら取出す装置の設計も困難を極めた。複数の方式が検討され、高温の鉄を扱う装置を多く手がけてきた当社機械エンジニアリングカンパニー・圧延機設計グループによって排出装置の設計が行われた。また、装置の材質選定には当社材料研究所の協力を得た。

当プロセスの開発・設計に着手してから1年足らずの1999年6月、加古川製鉄所内に年産3,000トン規模の小形パイロットプラントの建設を開始した。8月末に実験運転を始め (図8)、9月より操業を開始したが、まずは還元鉄の製造を行い、所定の還元度90%以上の還元鉄が得られることを確認した。つづいて、還元鉄製造条件よりさらに炉の温度を上げて、初めての粒鉄製造に成功した。当初は1日6時間程度の連続操業を繰返して、原料配合、ヒートパターン、炉内雰囲気、炉内滞留時間などの調整を行い、最適な操業条件を探った。生産性向上、粒鉄品質向上などの模索も続いた。幸い、6時間程度の連続操業では懸念された炉床の問題は起こらず、また、

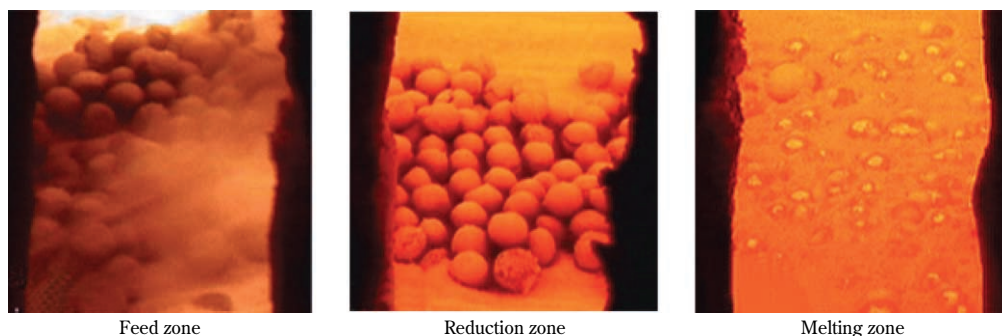


図9 加古川パイロットプラントの炉内反応状況
Fig. 9 Inside views of RHF at small pilot plant in Kakogawa Works

大きな機械的不具合もなく実験は順調に続けられた (図9)。

11月後半、さらなる長時間連続操業に入った頃、炉床上に溶鉄の溜まりができて始め、徐々に大きくなっていった。大きくなった溶鉄は冷却固化できる状態ではなく、新たな技術の開発が必要となった。

炉内を観察し、炉床の変化を調査した結果、2000年4月に新炉床維持技術を開発し、パイロットプラント第1キャンペーンは終了した。

2000年後半には第二キャンペーン操業を実施し、共同開発パートナーの見学に供するとともに、さらなる長期間連続操業にも挑戦することとした。

このキャンペーンでは改良した炉床維持技術を採用し、安定して連続操業の目標を達成することができた。粒鉄製造を続けながら定期的な炉床補修を行うことにより、連続操業を可能にした。この方法を採用すれば連続操業に理論的な限界はなくなり、実用化へのさらなる前進となった。この間、つぎの大形パイロットプラントの設計、操業につながるデータ採取も行われた。

実験操業と並行して、共同開発パートナー候補の見学を受入れた。そのなかでもとりわけ強い興味を示したのが、米国ミネソタ州鉱山局・北米最大の鉱山会社であるクリーブランドクリフ社・米国電炉第2位のスティールダイナミックス社連合であった。鉱山分野の活性化を目指すミネソタ州鉱山局およびクリーブランドクリフ社、そして安定した鉄源の確保を望むスティールダイナミックス社、これら三者のねらいが一致し、共同で開発パートナーとなることを望んできた。

2002年3月、クリーブランドクリフ社がミネソタ州に保有するノースショアマイニング選鉱ペレット工場の一角に大形パイロットプラントを建設することが決まった。共同開発の役割分担は、当社が技術の提供・パイロットプラントの設計、クリーブランドクリフ社が鉄鉱石の供給・操業要員の提供、スティールダイナミックス社が、製鋼原料としての製品粒鉄の使用・評価、ミネソタ州鉱山局が開発資金の提供というものであった。その後、エネルギー効率に優れた製鉄法の開発ということから、米国エネルギー省の資金提供も受けられることになった。

3.2 大形パイロットプラント

2002年より大形パイロットの設計が始まり、詳細設計にはミドレックス社の協力を得た。心臓部となる回転炉

床炉は加熱炉として多くの実績があり、大形炉では直径50m×炉床幅7m程度の実績があった。商業1号機のサイズがこの実績に近いものになるように考慮し、パイロットプラントで得られた生産性を元に、商業1号機の目標を年産50万トンクラスとした。

パイロットプラントを大形化すればするほど、その後の商業機へのスケールアップ時のリスクは低減されるが、その開発コストは膨大になるため、大形パイロットプラントの設計においてはサイズの最適化が求められる。

この大形パイロットプラントの回転炉床炉サイズ決定にあたっては、以下の2点を重要視した。

- 1) 当プロセスでは、内装炭材から生成されるCOの2次燃焼がエネルギー効率および炉内還元雰囲気大きく影響するため、粒鉄トン単位あたりの炉内投入エネルギー量(炉内ガスボリューム)と生産量の相関をとり、その屈曲点となる年産25,000トンを採用した(図10)。
- 2) 当プロセスのキーは炉床維持技術であり、炉床幅は重要なファクタとなる。大形回転炉床炉で実績のある炉床幅7mに対し、商業機への無理のないスケールアップとして3-4倍に抑えることを目標とした。また、加古川パイロットプラントの炉床幅からも同様のスケールアップレベルとなるよう、炉床幅を2mと設定した。

また、炉のプロファイル決定にあたっては、加古川パイロットプラントの操業結果をフィードバックすることにより、さらに適正化したCFDモデルを駆使した。

この開発はプロセス開発であることから、設備リスク

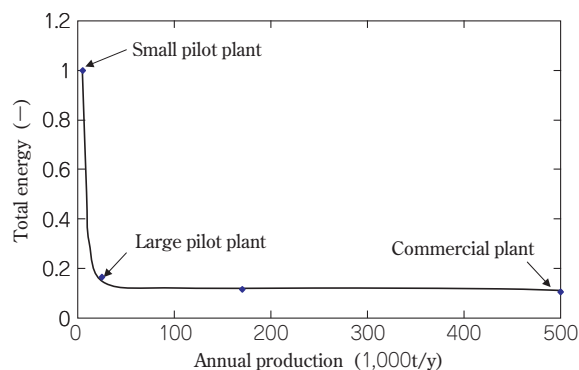


図10 生産規模と消費エネルギー
Fig.10 Production size vs. energy consumption

は最小限に抑えたかった。このため、大形パイロットプラントに採用する設備には、工業的実績があることに加え、商業機のサイズになっても同様の設備が入手できるものをできる限り採用する方針とした。その結果、還元溶融炉への原料投入・排出設備のみが当プロセス専用設計とされたが、そのほかの設備は工業的実績が十分にあるものを採用した。

プロセスフローは加古川パイロットプラントと基本的に同じであるが、炉から製品として排出された粒鉄とスラグの分離処理においては、加古川ではバッチ的に行っていたものを、大形パイロットプラントでは連続処理とした。

2002年6月より建設が始まり、2003年5月に完成、火入れを行った。加古川パイロットプラント同様、まず高金属化率の還元鉄を製造し、2日目には粒鉄の製造に成功した。その後2004年8月まで、15カ月の大形実証運転を実施した(図11)。

実証運転は以下の4つのキャンペーンで構成された。

- 1) 炉床維持技術の最適化
- 2) 生産性向上、粒鉄品質の向上
- 3) 燃料原単位向上(二次燃焼の最適化)
- 4) 性能テスト

各キャンペーンの間ではさらなる性能向上を図る改造を行った。メーカ製造工程における炉天井耐火物サポートアンカータイルの焼成不足のため、耐火物が脱落するトラブルに見舞われたが、それを除けば実証運転は順調に推移し、プロトタイププラントにもかかわらず、プラントの稼働率91-94%の長期操業を達成した。

キャンペーン中に2回の公式環境測定が実施されたが、従来の製鉄法と比較して環境に優しい製鉄法であ

り、エネルギー効率が高いことも実証された。これらの優れた点はミネソタ環境局⁴⁾およびエネルギー省によっても確認された。

ここで、当プロセスの主な特徴を以下に示す。

- ・プロセスがシンプル
 - ・低品位原料(粉鉱石・一般炭)が直接使用できる(焼結設備、コークス設備が不要)
 - ・エネルギー効率が高い
 - ・環境負荷が小さい
 - ・生産調整、発停が容易である
 - ・設備費が安い
 - ・構成設備のほとんどが実績のある工業設備であり、信頼性が高い
 - ・製鉄プロセスであるにもかかわらず、溶鉄のハンドリングがなく、鉱山会社のオペレータでもペレットプラントと同等のレベルで容易に操業できる
- 大形パイロットプラントで製造された粒鉄(図12)は、



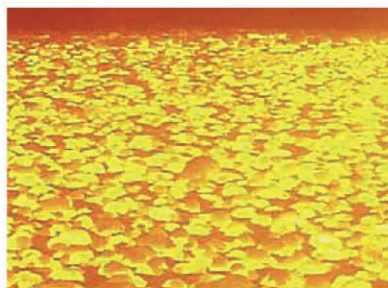
図12 アイアンナゲット
Fig.12 Iron nugget product



(a) 回転炉床炉外観
(a) Outside view of RHF



(b) 回転炉床炉内(還元ゾーン)の様子
(b) Inside views of RHF (reduction zone)



(c) 回転炉床炉内(冷却ゾーン)の様子
(c) Inside views of RHF (cooling zone)

図11 実証プラントの回転炉床炉

Fig.11 Rotary hearth furnace (RHF) at large pilot plant

米国大手電炉において薄板，厚板，特殊棒鋼の製鋼原料として使用され，好評を得た。電炉での粒鉄の溶けやすさが功を奏し，従来使用されていた清浄鉄源である銑鉄よりも5－8%の生産性アップを実現し，製鉄法としてのみならず，製品粒鉄の優位性を実証することにもなった。将来的には粒鉄の電炉への連続挿入が計画されており，製鋼工程におけるさらなる生産性アップ，およびエネルギー原単位の低減に寄与するものと期待されている。

ここで，粒鉄の特徴を以下に示す。

- ・ 2－4%カーボン含有鉄
- ・ 製鋼に不適な銅，ニッケルなどの不純物を含まない清浄鉄源
- ・ 比重が大きい
- ・ 低融点で伝熱も良く溶けやすい
- ・ 製鋼炉への連続装入に適したサイズ
- ・ ハンドリングが容易なサイズ
- ・ 還元鉄・HBI (Hot Briquette Iron) のように還元が未完でない
- ・ 還元鉄・HBIのように再酸化・発火することがない
- ・ 還元鉄・HBIのように脈石成分を含まない

なお米国では，粒鉄は金塊になぞらえてアイアンナゲットと呼ばれている。

3.3 商業機建設

大形パイロットプラントの成功を受け，直ちに商業1号機建設計画が進められた。スペリオル湖の北100kmには北米最大のメサビ鉱山群が東西に広がっており，数多くの選鉱ペレット工場が立地している。そのなかの一つであり，鉄鋼不況で2002年に閉山したLTV社選鉱ペレット工場跡を候補地とし，商業機建設のための環境許可を進めることとした(図13)。

2007年，好況になってきた鉄鋼需要を背景に，スティールダイナミックス社が自社製鋼用清浄鉄源の安定確保のため，粒鉄年産50万トンの商業1号機建設を決断し，当社と共同出資での建設を決定した。当社はプロセスライセンスの供与やエンジニアリング，主要機器の供給および指導員の派遣などを行っている。一方，スティールダイナミックス社は生産される粒鉄の全量を引取り，自社の電炉工場で鉄源として使用する計画である。商業機は2007年6月に建設を開始し，2010年より生産運転を開始した(図14)。



図13 商業機建設場所
Fig.13 Location of commercial plant



図14 ホイットレイクスの商業機
Fig.14 Commercial plant at Hoyt Lakes

また，米国ミシガン州において，共同開発パートナーの一つであったクリーブランドクリフ社(現クリフスナチュラルリソース社)と共同で商業機の建設を計画しており，現在，環境許可申請を行っているところである。その他，カザフスタン，インド，ウクライナなど，多くの国で商業機の計画が進められている。

4. ビジネスモデル

粒鉄製造プロセスは，鉱山に隣接した地域での立地に適している。主原料である鉄鉱石を，従来のペレット工場のような操業方法で非常に付加価値の高い粒鉄に変えることができる。さらに，鉄鉱石やペレットに含まれる不要な酸素や脈石成分が取除かれ，製鋼に必要な鉄分のみが製品として鉱山から出荷できることになる。不要な酸素や不純物(重量で40%)を輸送することもなく，輸送時に排出するCO₂を大幅に削減することができる。また，粒鉄を受入れる製鋼工場においては，不要なスラグの発生やその処理コストが削減できる。

米国では，電炉製鋼の比率が63%と高炉・転炉製鋼を大きく上回っており，高級鋼への進出も進んでいる。一方，電炉の主原料となるスクラップの品質は年々劣化してきており，清浄鉄源の確保は電炉製鋼にとっての重要な課題となってきている。一方，銑鉄やHBIに代表される清浄鉄源は，ベネズエラ，ブラジル，ウクライナ，ロシアなどの国々からの輸入に頼っており，米国電炉は供給の不安定と大きな価格変動に悩まされている。米国におけるこれらの問題は，粒鉄製造プラントの普及によって解決するものと期待されている。

米国では，鉱山のほとんどが北端の五大湖北メサビ鉱山群に位置しており，鉄鋼メーカーも多くが五大湖周辺に立地している。一方，現在輸入されている鉄源は，南端のニューオーリンズから荷揚げされ，高い輸送コストをかけてミシシッピ川を上り，五大湖周辺の鉄鋼メーカーに届けられている。現在，年間1千万トン程度の清浄鉄源が輸入されているが，メサビ鉱山群を中心として五大湖周辺に粒鉄製造プラントが普及すれば，スクラップも含めた輸入鉄源の多くが粒鉄に置換えられるものと期待されている。

粒鉄および粒鉄製造プラントが鉱山・製鉄業界にもたらすメリットを以下に示す。

1) 鉱山業界

- ・従来製品の鉄鉱石・ペレットに対し、非常に付加価値の高い製品粒鉄を作ることができる
- ・従来の顧客であった高炉一貫製鉄所に加え、電炉に顧客を広げることができる
- ・低品位鉱石が利用でき、鉱山の延命につながる
- ・小規模鉱山でも採算が取れる。

2) 電炉業界

- ・製鋼過程における生産性、エネルギー効率がアップできる
- ・清浄鉄源を安定して確保できる
- ・さらなる高級鋼製造への転換を図ることができる
- ・製鋼工場内に粒鉄製造プラントを設置することによって高温粒鉄を利用することができ、さらにエネルギー効率を高めることができる

3) 高炉業界

- ・コークス炉、焼結炉など環境負荷の高い設備が不要
- ・低品位原料が利用できる
- ・小規模投資で製鉄ができる

- ・生産調整に容易に対応できる
- ・海外で粒鉄を製造することにより、CO₂オフセットができる
- ・鉄鉱石・ペレットに比し、輸送コストや輸送にかかわるCO₂排出が低減できる
- ・鉄鉱石・ペレットに比し、不要なスラグの発生がない

むすび＝ITmk3の実用化はまだ始まったばかりである。高炉が100年以上の歴史のなかで発展を遂げてきたように、ITmk3も、粒鉄製造プロセスへの適用のみならず、溶銑製造プロセスや極低温製鉄プロセスなどへの幅広い発展が期待される。当社では今後ともその研究開発に取り組んでいく考えである。

参 考 文 献

- 1) Ko-ichiro Ohno et al. : "steel research", 74 (2003), pp.5-8.
- 2) 村上太一ほか : CAMP-ISIJ Vol.12 (1999), p.247.
- 3) S. Meissner et al. : The 11th Japan-Germany Seminar on Fundamentals of Iron and Steelmaking, Reduction and meltdown of pellets in the ITmk3 process, (2002), p.6.
- 4) Larry Lehtinen : Mesabi Nugget Research Project, United States Department of Energy (2005).