

(解説)

# 資源動向と還元鉄を利用した鉄鋼製造プロセス

## Resources Trend and Use of Directly Reduced Iron in Steelmaking Process



田中英年\*1 (工博)  
Dr. Hidetoshi TANAKA

Expectations are rising for new iron-making processes that can not only utilize a wide variety of materials and fuels, but are also environmentally friendly. Direct reduction (DR) is one such iron-making process that can substitute for blast-furnace (BF) iron-making. This new process can utilize inexpensive shale gas, which enables its plants to be built at various locations. The DR process may be adapted for coal-based processing, which will contribute to the stable supply of directly-reduced iron. This paper outlines the direct reduction technologies developed by Kobe Steel. It also includes a survey on the contribution of directly-reduced iron, used in place of the scrap for electric arc furnaces (EAFs), or used as a burden material in BF.

ま え が き = 高炉製鉄法の優位性は今後しばらく揺るぎないと思われてきたが、中国の急激な粗鋼生産の伸びによる鉄鉱石や原料炭価格の高騰、コークス炉の寿命問題、およびCO<sub>2</sub>削減に代表される環境問題等により転換期に差し掛かりつつある。

一方、シェールガスは注目を浴び、米国においてはエネルギーセキュリティのみならず、鉄鋼などの産業にも影響を与えつつある。

そこで、環境・資源枯渇の観点から還元鉄 (DRI: Direct Reduced Iron, 以下DRIという) を利用した鉄鋼製造プロセスに着目し、当社の還元鉄製造技術の現状と、鉄鋼業のパラダイムシフトを実現するための還元鉄の今後の役割について展望する。

### 1. 鉄鋼業を取り巻く資源動向

図1のように、中国での粗鋼生産量の増大により2011年度の世界粗鋼生産量は15億トンを超え、その値は増加の一途をたどっている<sup>1)</sup>。そのうちの7割近くが高炉・転炉法により製造されている。

一方、これまでの粗鋼生産によって、図2のように世界の鉄鋼蓄積量が230億トンを超え、それに伴ってスクラップ発生量は年々増加の一途をたどっている<sup>2)</sup>。いわゆる都市鉱山の出現であり、これを鉄源とする電気炉法の進展が促されつつある。

このような粗鋼生産の急激な増加を受け、鉄鋼の主原料である鉄鉱石や原料炭の価格が、図3のように大幅に上昇している<sup>3)</sup>。その背景には、今日の高炉法がブラジルや豪州の高品位鉄鉱石や埋蔵量の少ない特殊な原料炭に

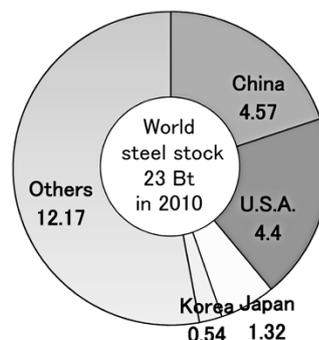


図2 2010年における世界鉄鋼蓄積量<sup>2)</sup>  
Fig. 2 World steel stock in 2010<sup>2)</sup>

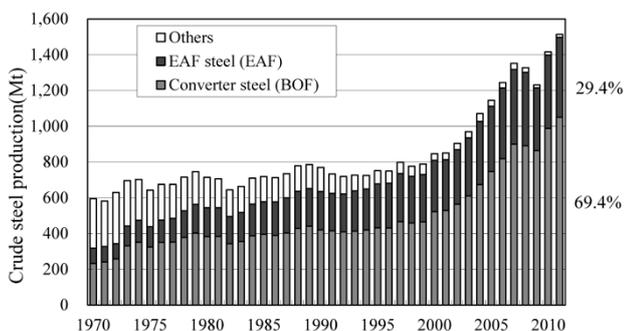


図1 世界粗鋼生産量推移と電炉比率<sup>1)</sup>  
Fig. 1 Transition of world crude steel production<sup>1)</sup>

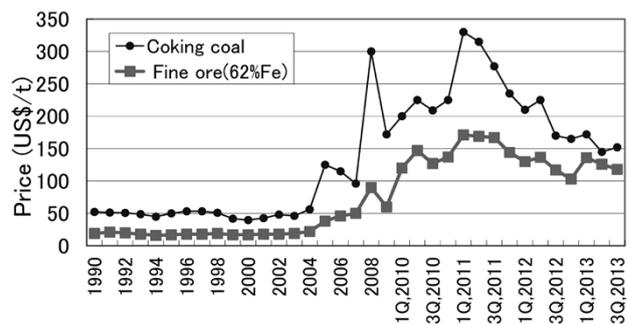


図3 鉄鉱石と原料炭の輸入価格推移<sup>3)</sup>  
Fig. 3 Price transition of iron ore and coking coal<sup>3)</sup>

\*1 エンジニアリング事業部門 新鉄源本部 技術部

大きく依存していること、原料サプライヤの統合・寡占が進んだことなどが挙げられる。

また、北米においてはシェールガスの商業生産により、天然ガス価格は2008年の11.5\$/mmbtuから2012年の3.7\$/mmbtuまで低下しており<sup>4)</sup>、産業用の電力価格も2011年の7¢/kwhからさらに低下すると予測されている。

## 2. 世界の還元鉄の製造状況

固体状態のまま鉄を還元する直接製鉄法 (Direct Reduction, 以下DRという) は高炉のように大規模な設備投資が不要で、コークスも必要としないため、天然ガスを産出する産油国を中心に、電気炉法の鉄源プラントとして建設されてきた。とくに中近東ではスクラップの発生量が少ないため、還元鉄を主原料に電気炉で鋼材を製造している。

図4に世界の還元鉄生産量の推移を示す。還元鉄生産量は1970年代の約80万トンから2012年の約7,400万トンと100倍近くに増加し、電気炉投入原料の16%を占めるまでに至っている。近年、先進国においても還元鉄への需要が高まっており、海上輸送される還元鉄量も2012年には1,470万トンに達している<sup>5)</sup>。

代表的な還元鉄の性状を表1に示す<sup>6)</sup>。還元鉄は還元反応によって酸素が除去された後に空隙が残るため、再酸化性が非常に強い。したがって、発熱・発火する危険があるため海上輸送することが難しく、専ら製鉄所内で消費されてきた。そこで、還元鉄を熱間圧縮成型して見掛密度を向上させて再酸化を防止できるHBI (Hot Briquetted Iron) の製造技術が開発された。この技術によって海上輸送が容易になり、世界をマーケットとする鉄源供給が可能となった。

このHBIの生産量の推移をプロセスごとに図5に示

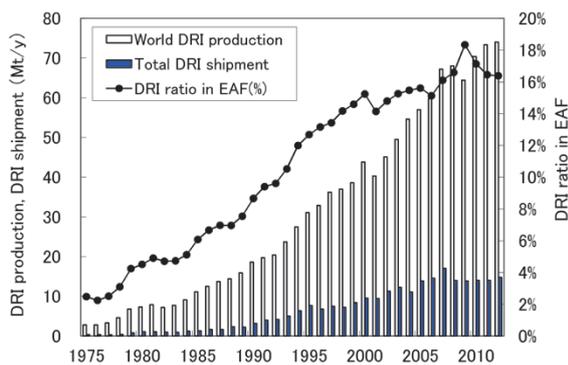


図4 還元鉄生産量と海上輸送量の推移<sup>5)</sup>

表1 還元鉄 (DRI, HBI) 性状<sup>6)</sup>  
Table 1 Characteristics of DRI and HBI<sup>6)</sup>

	DRI	HBI
T.Fe(%)	90~94	←
M.Fe(%)	83~89	←
Metallization(%)	92~95	←
Carbon(%)	1.0~3.5	←
Gangue (%)	2.8~6.0	←
Bulk Density(t/m <sup>3</sup> )	1.6~1.9	←
Apparent Density(t/m <sup>3</sup> )	3.4~3.6	5.0~5.6

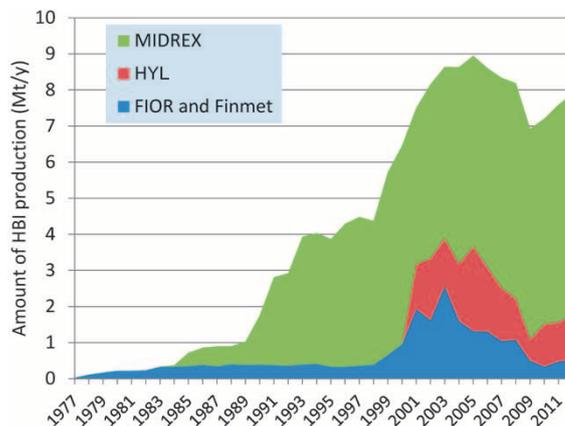


図5 プロセス毎のHBI生産量推移<sup>7)</sup>  
Fig. 5 Yearly HBI production by process<sup>7)</sup>

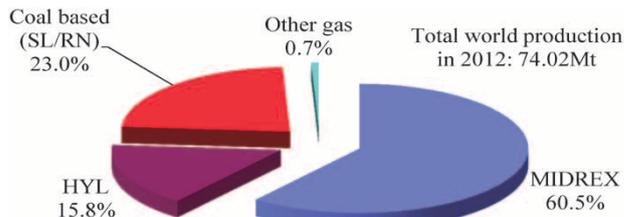


図6 2012年のプロセス別還元鉄生産比率<sup>5)</sup>  
Fig. 6 World DRI production processes in 2012<sup>5)</sup>

す<sup>7)</sup>。現状製造されるHBIの約80%をMIDREX<sup>®</sup>注1) プロセスが占めている。後述するがMIDREXプロセスでは還元ガス組成の違いから、水素還元が主流のHYLプロセスより還元鉄の排出温度を高めることが可能であり、HBI製造に適している。

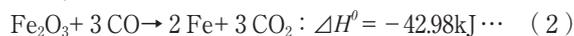
還元鉄製造プロセスは、天然ガスと石炭を還元材として用いるプロセスに大別される。図6に2012年の世界におけるプロセス別還元鉄生産量の比率を示す<sup>5)</sup>。還元材として天然ガスを用いるMIDREXプロセスとHYLプロセスが全生産量の約75%を占めている。残りが石炭を利用するプロセスで製造されている。この還元鉄製造プロセスのリーディングカンパニーであるMidrex社は当社の100%米国子会社である。

## 3. 還元鉄製造技術

### 3.1 当社の天然ガスベース還元鉄製造法

図7にMIDREXプロセスのフローを示す<sup>8)</sup>。ペレットあるいは塊鉱石をシャフト炉の炉頂から装入し、炉内で還元された後に最下部から還元鉄として排出される。これまで還元鉄は冷却後に排出されてきたが、最近では熱間のまま下流の製鋼プロセスに送られ、電気炉でのエネルギー原単位と生産性の改善が図られている。

シャフト炉内での鉄の還元反応は式(1)、(2)で表わされる。



式(1)の水素による還元は大きな吸熱反応であるのに対して、式(2)のCOガスによる還元は逆に発熱反応である。したがって、炉内で起こる式(1)、(2)の還

脚注1) MIDREXは当社の登録商標である。

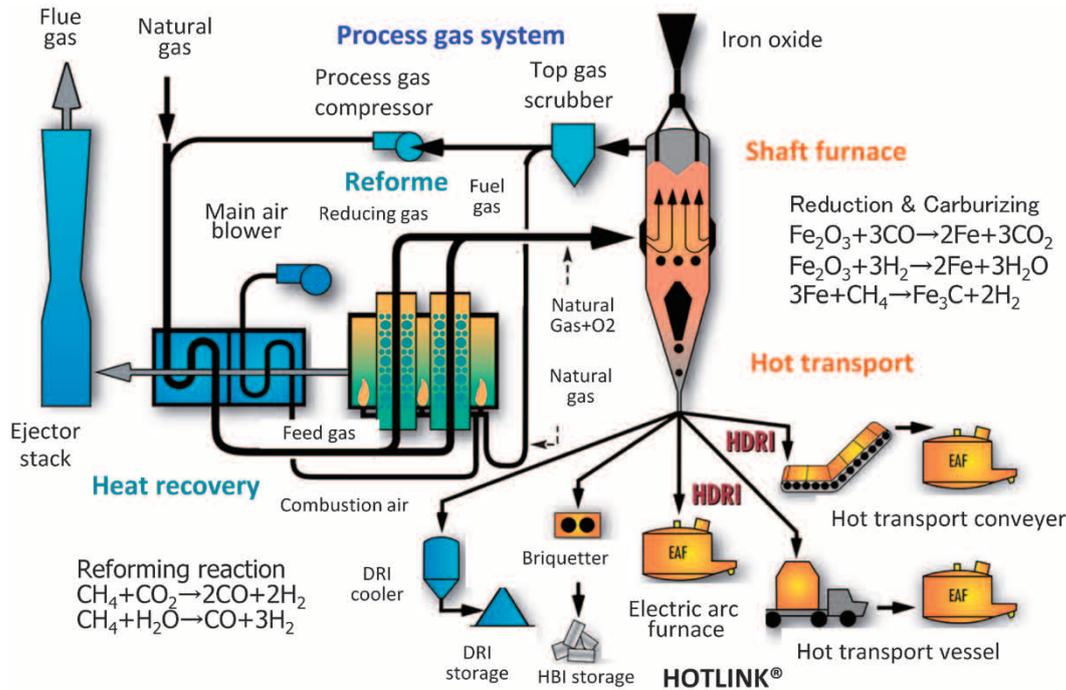
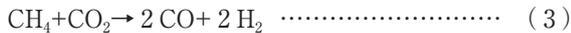


図7 MIDREXプロセスのフローシート<sup>8)</sup>  
 Fig. 7 MIDREX process flow sheet<sup>8)</sup>

元反応の割合によって炉内での温度分布が変化する。また天然ガスを還元剤として用いる直接製鉄プロセスでは式(1)のように水素が還元に寄与するため、石炭を還元剤に用いる高炉法に比べてCO<sub>2</sub>の発生量が大幅に低下できることが報告されている<sup>8)</sup>。

MIDREXプロセスの大きな特徴は、その還元ガス組成にある。本プロセスでは還元を終えた炉頂排ガス中にあるCO<sub>2</sub>を式(3)のように天然ガスの改質材として有効に利用している。



その結果として、還元ガスのH<sub>2</sub>/CO濃度比が1.5とHYLプロセスのH<sub>2</sub>/CO = 3 ~ 5に比べてCOガスリッチになっており、炉内温度を高く保ちやすいといった特徴がある。

MIDREXプラントの稼働実績は、天然ガスが豊富な産油地域を中心に2012年現在63基が稼働している<sup>5)</sup>。図8にこれまでに建設されたMIDREXプラントの公称生産能力の推移を示した。現在シャフト炉をさらに大型化させた年産200万トンクラスのSUPER MEGAMODの開発が進められており、また2016年には米国テキサス州に200万トンの還元鉄プラントが立ち上がる予定であり、年々大型化が進んでいる<sup>9)</sup>。

図9に2011年のプロセスごとの生産能力合計と生産実績を対比して示した<sup>10)</sup>。この図から分かるように、MIDREXプロセスは生産能力に近い生産実績を上げ、他のプロセスに比べて極めて安定した生産を実現しており、このことが世界シェア60%を占める一因となっている。

MIDREXプロセスでは、その立地制約を緩和するため、表2のように還元ガスとしてCOREXプロセスの排ガスや石炭ガス化ガスを使用する燃料多様化の試みが行われている<sup>11)</sup>。とくに、2009年末にインドの鉄鋼メーカ、ジンダル・スチール&パワー社から受注した年産能力180

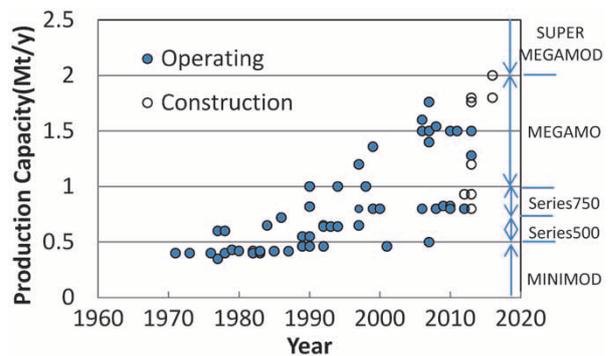


図8 MIDREXプラントの公称生産能力の推移  
 Fig. 8 Rated capacities of MIDREX plant by year

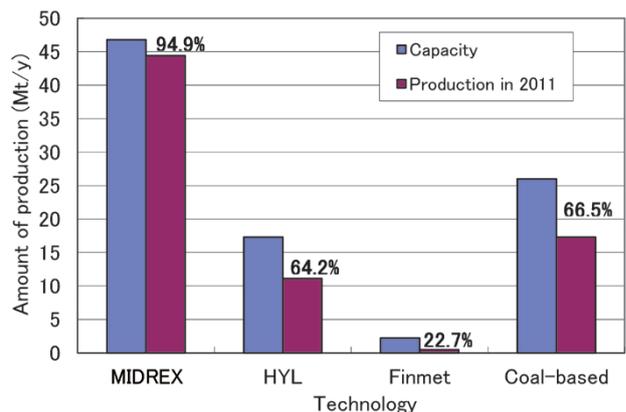


図9 2011年におけるプロセス毎の生産能力と生産実績の対比<sup>10)</sup>  
 Fig. 9 World DRI capacity and production per technology in 2011<sup>10)</sup>

表2 MIDREXプロセスにおける燃料多様化<sup>11)</sup>  
 Table 2 MIDREX process energy source flexibility<sup>11)</sup>

	Energy source	Reducing gas H <sub>2</sub> /CO	MIDREX plant reference	Start-up
COREX/MIDREX plant	COREX offgas	0.3-0.4	Arcelor Mittal South	1999
MIDREX NG Plant	Natural gas	1.5-1.7	JSW Projects Limited	Construction
			Numerous (60 modules operation)	Since 1969
MXCOL Plant	Coal gasifier	2.0	JSPL Angul	Construction

万トンの還元鉄プラントでは、石炭ガス化設備で製造した合成ガスを還元材として利用することから、インドの高灰分石炭を活用して還元鉄を製造できる点で注目される。

また製鉄所のコークス炉ガス（以下、COGという）中には高濃度の $H_2$ や $CH_4$ といった化学エネルギーを含んでおり、還元鉄製造に利用できる。図10のような新しい部分酸化システムの導入により、COGはMIDREXプロセスに適した合成ガスに変換され、シャフト炉で還元鉄が製造される。この還元鉄を高炉あるいは転炉で使用することで、 $CO_2$ 削減とともに30%の生産性アップに寄与できるとの報告もある<sup>12)</sup>。

### 3.2 当社の石炭ベース還元鉄製造法

石炭を用いた直接製鉄法としてはロータリーキルン法が古くから用いられているが、その規模が比較的小さいことやキルニング発生による停止時間が長いこと、石

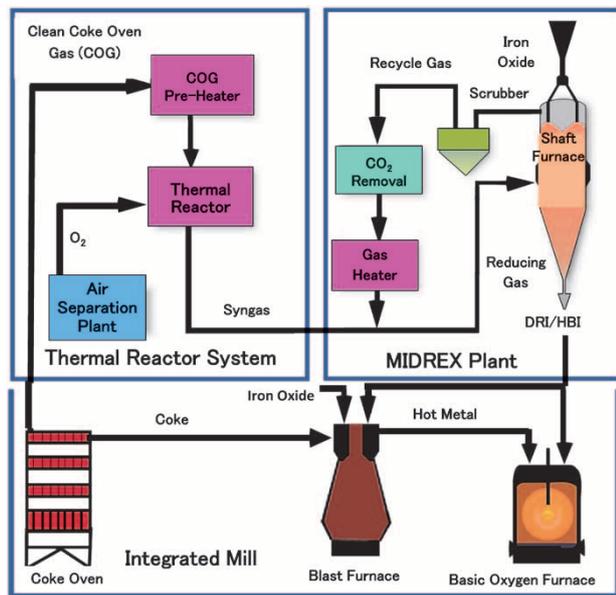


図10 COGを利用したMIDREXプロセス<sup>12)</sup>  
Fig.10 Using COG for MIDREX process<sup>12)</sup>

表3 FASTMET商業機<sup>15)</sup>  
Table 3 FASTMET commercial plants<sup>15)</sup>

Company	Location	Dust (t/y)	Start up
NSSMC	Hirohata No.1	190,000	April. 2000
	Hirohata No.2	190,000	Feb. 2005
	Hirohata No.3	190,000	Dec. 2008
	Hirohata No.4	220,000	Oct. 2011
JFE	Nishinohon	190,000	Apr. 2009
KSL	Kakogawa	14,000	April 2001

炭消費量が多いことから、立地条件がインド等に限定されてきた<sup>13)</sup>。

同じく石炭を用いた直接製鉄法は、1990年代に入って炭材内装塊成物の還元注目が集まるようになった。これは、酸化鉄と炭素の近接配置により還元反応の低温高速化を実現できることが分かってきたからである<sup>14)</sup>。そこで、炭材内装塊成物の脆弱な物理強度を補うため、静置式で還元可能な回転炉床炉（以下、RHFという）を用いたFASTMET<sup>®</sup>注2) プロセスを開発した。このプロセスは、安価な石炭を利用できる直接製鉄プロセスとして注目されるが、現状では製鉄所でのダスト処理プロセスとして表3のように実用化されている<sup>15)</sup>。

また、この技術から派生した次世代製鉄法であるITmk3<sup>®</sup>注3)（アイティーマークスリー）法は銑鉄と同等のアイアンナゲットを一段の回転炉床炉で製造できる点で注目されている。2010年1月には米国ミネソタ州で年産50万トン規模の商業1号機が運転を開始した<sup>16)</sup>。図11にRHFを用いた当社の石炭ベース直接製鉄法のプロセスフローを示す。

## 4. 今後の展望

### 4.1 鉄スクラップを利用した製鉄法の伸長

将来の世界鉄源需要予測<sup>17)</sup>とスクラップ発生予測<sup>18)</sup>を組み合わせたものを図12に示す。ここでの予測量は全体の7割をカバーする建設・土木・運輸に関するもの

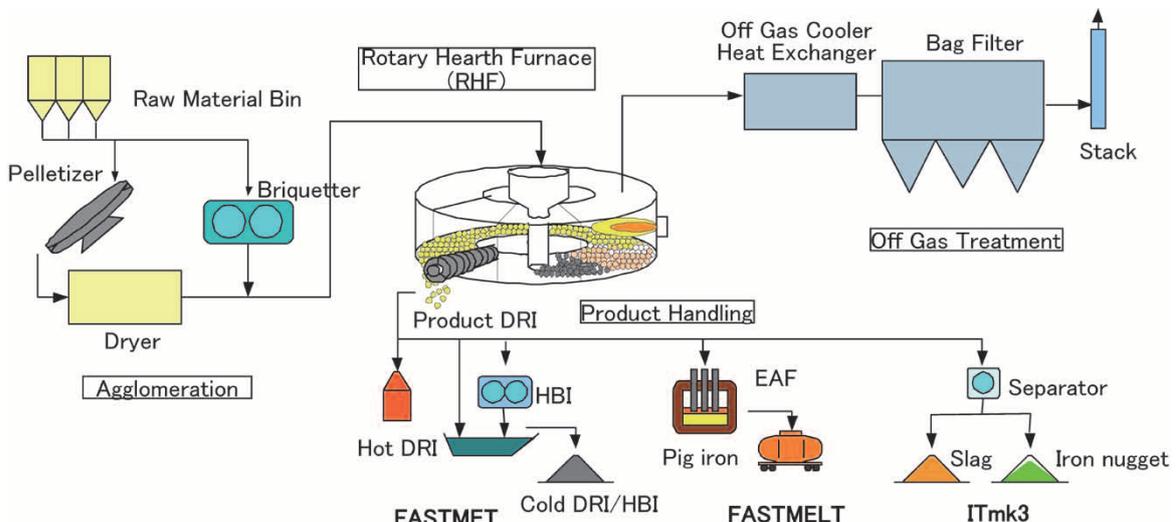


図11 当社の石炭ベース直接製鉄法のフロー  
Fig.11 Kobe's coal-based direct reduction process flow sheet

脚注2) FASTMETは当社の登録商標である。  
脚注3) ITmk3は当社の登録商標である。

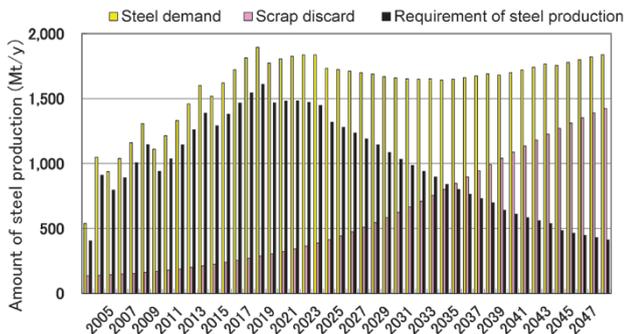


図12 鉄鋼需要とスクラップ発生量から予測した必要鉄鋼生産量<sup>18)</sup>  
 Fig.12 Necessary steel amount of production estimated from steel demand and scrap discard<sup>18)</sup>

である。これら両者の差（黒の実線）はスクラップだけでは賅えない鉄の不足量を表わしている。この不足を補うために、鉄鉱石から新たに鉄を製造していることになる。この鉄の不足量の将来を眺めてみると、2020年頃までは増加を続け16億トンに達するが、そこを境に減少し始める<sup>19)</sup>。これは一つの予測であり、時期の前後はあるにしてもいずれはこのような時期がくるものと思われる。すなわち、スクラップ発生量の増加により、今後は鉄スクラップを主原料にする製鉄法が重要な役割を演ずる可能性を示唆している。

通常のスクラップ中にはトランプエレメント（Cu, Sn等）が含まれており、その含有量の増加が下流の連鑄・圧延工程での加工品質に悪影響を与える。そのため、スクラップを主原料とする電気炉では品質要求の緩い建設用鋼材が主に製造されてきた。このトランプエレメントは溶銑や溶鋼を処理しても除去することができないため、その含有量をコントロールするには清浄なスクラップを原料に選ぶか、還元鉄や銑鉄等の清浄鉄源で希釈する必要がある。米国では電気炉でスクラップを溶解する際の希釈材として還元鉄を65～70%用いており、転炉鋼と肩を並べる高級鋼材も生産されている<sup>20)</sup>。還元鉄中のカーボンの存在によって電気炉特有の窒素問題を解決することも利点である<sup>21)</sup>。

スクラップや還元鉄を用いた電気炉法によるエネルギー消費量とCO<sub>2</sub>排出量を高炉・転炉法に比べて図13に示した<sup>8)</sup>。エネルギー消費量とCO<sub>2</sub>排出量が最も少ないのは100%スクラップ使用の場合であり、CO<sub>2</sub>排出量は1/4まで低下する。また、米国で一般に行われているスクラップと還元鉄の組み合わせでも、使用する還元鉄が天然ガスから作られているため、高炉・転炉法に比べて大幅なCO<sub>2</sub>削減が期待できる。

米国においては、2002年以降、電気炉鋼の生産量が高炉・転炉鋼を上回っており、スクラップと還元鉄を鉄源として薄板まで製造する電炉一貫のミニミルが勢いを増している。2011年には粗鋼生産の約60%が電気炉法で賅われている<sup>1)</sup>。したがって、今後とも持続的な電気炉法の発展を実現するためには、スクラップの劣質化への希釈材としての還元鉄の安定供給が重要である。

#### 4.2 北米での還元鉄製造の伸長

近年のガスベース還元鉄製造法の大型化（1基200万トン以上）により、シェールガスの出現によって電力や

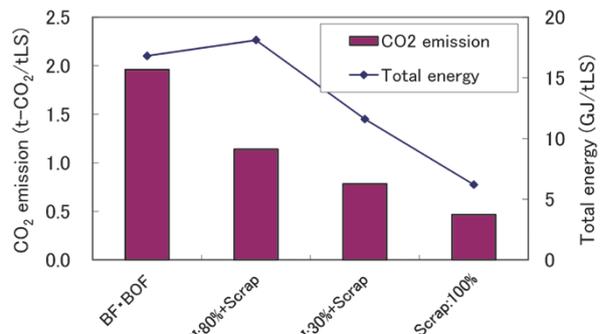


図13 エネルギー消費量とCO<sub>2</sub>排出量の比較<sup>8)</sup>  
 Fig.13 Energy consumption and carbon emissions for steelmaking routes<sup>8)</sup>

表4 北米のガスベース還元鉄プロジェクトの状況<sup>22)</sup>  
 Table 4 Status of gas-based DRI projects in North America<sup>22)</sup>

Company	Location	Capacity (kt)	Status	Start-up
Nucor	Louisiana	2,500	Confirmed	2013
Nucor	Louisiana	2,500	Permitted·not approved	2015+
Voestalpine	Texas	2,000	Confirmed·needs permitting	2016
Bluescope	Ohio	1,000	Under consideration	2016+
Essar Steel	Minnesota	2,500	Permitted·not approved	2016+
Severstal NA	Mississippi & Trinidad	n/a	1.5 tpy project rejected	
US Steel	Minnesota	n/a	Under consideration	2016+
<b>Total</b>		<b>10,500</b>		

天然ガスが安価に入手できるようになった北米地域において本法を用いた製鉄上工程の建設が活発化している<sup>22)</sup>（表4）。同規模の生産設備と比較すると、高炉法に比べて炭素排出量が1/3であることに加えて、投資額が半分未満であることがその導入理由といわれている<sup>23)</sup>。

このように、スクラップ発生量の増加と米国での天然ガス価格の低下により、環境負荷の少ない製鉄法として見直しが進んでおり、将来的には北米での還元鉄製造量が大幅に増加しそうな勢いである。

#### 4.3 還元鉄のエネルギーコンテナ利用

還元鉄を高炉に装入した場合、増産、還元材比低減、焼成鉄低減、CO<sub>2</sub>削減等の効果が期待できることが過去の実績から報告されている<sup>24)</sup>。還元鉄の高炉使用量の上限については、実験室的には100%使用も可能であることが確認されている<sup>25)</sup>。実操業ではAK steelで月平均227kg/tの実績もあり<sup>26)</sup>、20%程度までは問題なく使用できると考えられる。

図14に現在の製鉄法と将来の小規模分散製鉄法の比較図を示す。小規模分散製鉄法とは、製鉄工程で使用するエネルギーの3/4を占める還元エネルギーを海外にシフトし、還元鉄をエネルギーコンテナとして活用するとともに、製鉄に必要な原料の輸送量を半減できるビジネスモデルである。一例として、ヨーロッパのフェスト・アルピーネ社が米国のテキサス州に年産200万トンのMIDREXプラントを建設すると発表した<sup>9)</sup>。これは、ブラジル産の鉄鉱石ペレットを活用し、安価なシェールガスを用いて還元した後、HBIとして欧州オーストリアの製鉄所で活用することでCO<sub>2</sub>削減に対応するプロジェクトである。還元鉄をエネルギーコンテナとして活用するためには、HBI化しやすい当社のMIDREXプロセスが有利である。

将来、CO<sub>2</sub>削減、コークス炉寿命、焼結炉の環境問題、

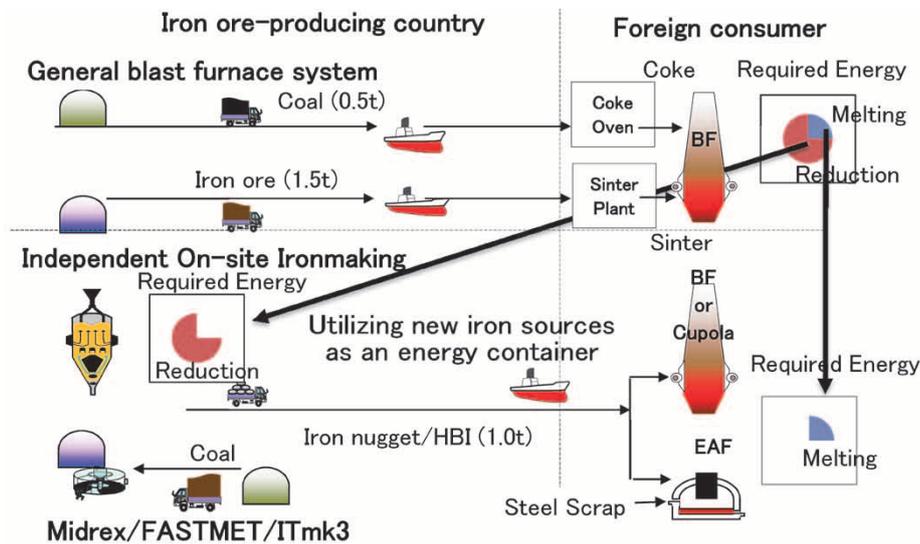


図14 現在の製鉄法と将来の小規模分散製鉄  
Fig.14 General blast furnace system and future independent on-site ironmaking model

高炉の生産弾力性等の問題が心配される中、高炉での溶銑原価を支配する鉄鉱石や原料炭価格の動向によっては、安価に製造された還元鉄の一貫製鉄所での利用が促進される可能性がある。

むすび=日本鉄鋼業の先達であった米国は1950年代に成熟期を迎え、2000年代には高炉は衰退した。代わりに台頭してきたのがスクラップを利用したNucor型のミニミルであり、薄スラブ連铸などの最新技術を応用した小規模高効率生産を進めている。このような米国での鉄鋼生産の歴史が物語るように、今後多量に発生するスクラップにその鉄源を依存する時期に近づきつつある。

一方、北米でのシェールガスの商業生産による天然ガス価格の低下は、ガスベース還元鉄製造法の広がりをもたらしつつある。また、ユビキタスエネルギーである石炭を利用した石炭ベース還元鉄製造法の開発によって、天然ガス産出国に限られていた直接製鉄プラントの立地の制約が緩和され、安定した清浄鉄源の供給が容易になることが期待される。

この結果、スクラップとの組み合わせによる電気炉法での高級鋼板製造の広がりや、還元鉄をエネルギーコンテナとして高炉等で利用することはCO<sub>2</sub>排出抑制の有効な方策であり、当社の保有する直接製鉄プロセスを通じて鉄鋼業の課題解決に貢献できるものと考えている。

#### 参考文献

- 1) World Steel Association. Steel Statistical Yearbook 2012.
- 2) 鉄リサイクル・リサーチ 調査レポートNo.16. 2012年6月21日, p.2.
- 3) テックスレポート No.10995. 2012年12月4日, p.8.
- 4) R. L. Hunter. Scrap Supplements and Alternative ironmaking VI. Oct.28-30, 2012.
- 5) MIDREX Technology Inc. 2012 WORLD DIRECT REDUCTION STATISTICS.
- 6) 厚 雅章ほか. R&D神戸製鋼技報. 2010, Vol.60, No.1, p.5.
- 7) H. P. Gaines et al. Direct form Midrex 2013. 2nd. Quarter, p.7.
- 8) J. Kopfle et al. Millenium Steel 2007, p.19.
- 9) 鉄鋼新聞. 2013年3月19日.
- 10) MIDREX Technology Inc. 2011 WORLD DIRECT REDUCTION STATISTICS.
- 11) H. P. Gaines. Direct Form Midrex 2012, 2nd. Quarter, p.10.
- 12) S. C. Montague. Steel Success Strategies XXVII. New York. June 18, 2012.
- 13) 田中英年. 第196・197回西山記念技術講座. 2008年9月, p.163.
- 14) Y. Kashiwaya et al. ISIJ Inter. 2006. Vol.46, No.11, p.1610.
- 15) 田中英年. 第205・206回西山記念技術講座. 2011年6月, p.111.
- 16) 菊池晶一ほか. R&D神戸製鋼技報. 2010, Vol.60, No.1, p.29.
- 17) H. Hatayama et al. Environ. Sci. Technol. 2010, Vol.44, No.16, p.6457.
- 18) 畑山博樹ほか. CAMP-ISIJ 2010, Vol.23, p.615.
- 19) T. Harada et al. METEC InSteelCon ECIC 2011, Session10.
- 20) Metal Bulletin Monday 6 Feb. 2012, p.20.
- 21) R. Lule et al. Direct form Midrex 2009, 3rd/4th. Quarter, p.3.
- 22) B. Levich. World DRI and Pellet Congress 2013. p.101.
- 23) テックスレポート No.10545. 2011年2月1日, p.8.
- 24) 田中英年ほか. 鉄と鋼. 2006, Vol.92, No.12, p.330.
- 25) Y. Ujisawa et al. CAMP-ISIJ. 2009, Vol.22, p.282.
- 26) Iron and Steel Maker. Aug. 2001.