

(解説)

# 鉄鋼業のCO<sub>2</sub>削減に貢献するMIDREX™プロセス

生田翔士\*1・畠山泰二\*1・出浦哲史\*2(博士(工学))

## MIDREX™ Process Contributing to CO<sub>2</sub> Reduction in the Steel Industry

Shoji IKUTA・Tajji HATAKEYAMA・Dr. Tetsushi DEURA

### 要旨

MIDREX™プロセスは、低炭素で直接還元鉄(DRI)を製造できる製鉄方法として、世界中から関心を集めている。MIDREX™プロセスには、天然ガスを還元剤とする「MIDREX NG™」、天然ガスを最大100%まで柔軟に水素に置き換えることが可能な「MIDREX Flex™」、水素を100%還元剤として用いる「MIDREX H<sub>2</sub>™」の三つのメニューを有している。本プロセスは段階的な水素導入や既設設備の活用が容易であるため、地域ごとに異なるグリーン水素の供給状況やエネルギー政策に応じて柔軟な対応が可能であり、最適なソリューションを提案することができる。本稿では、MIDREX™プロセスの特徴や水素移行におけるCO<sub>2</sub>削減への貢献、また還元条件を変化させたラボ試験による製品DRIの評価結果について解説する。

### Abstract

The MIDREX™ process is gaining global attention as a low-carbon ironmaking technology for producing direct reduced iron (DRI). It offers three configurations: MIDREX NG™, which uses natural gas as the reductant; MIDREX Flex™, which enables progressive replacement of natural gas with hydrogen up to 100%; and MIDREX H<sub>2</sub>™, which uses hydrogen as the sole reductant. This flexibility supports gradual hydrogen introduction while leveraging existing assets, enabling adaptation to regional green-hydrogen availability and energy policies, while making it possible to provide tailored, optimal solutions. This article outlines the MIDREX™ process features, its role in CO<sub>2</sub> reduction through hydrogen transition, and the laboratory evaluation results of DRI products under varying reduction conditions.

### 検索用キーワード

直接還元製鉄, シャフト炉, 天然ガス改質, 還元鉄, ホットブリケットアイアン, 水素製鉄, CO<sub>2</sub>フリー製鉄

まえがき=カーボンニュートラルに向けた世界的な動きは着実に進展しているが、CO<sub>2</sub>排出量の多い鉄鋼業においては、水素還元で代表される革新的技術の開発に加えて、電気炉、再生可能エネルギーなどの多様な技術を組み合わせた総合的アプローチが求められる。このような背景の下、代表的な直接還元プロセスであるMIDREX™<sup>注1)</sup>プロセスも転換期を迎えている。MIDREX™プロセスは天然ガスを改質した還元ガスを利用し、石炭ベースの高炉法に比べて製鉄1tあたりのCO<sub>2</sub>排出量が少ない点が特長であり、2024年には世界全体で年間4,490万tのCO<sub>2</sub>を削減したという実績がある<sup>1)</sup>。しかしながら、カーボンニュートラル実現に向けては、天然ガスから100%水素への置換やCCUS(Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage:炭素回収・利用・貯留)などさらなるCO<sub>2</sub>削減オプションが不可欠で、それに伴うプロセス最適化が必要である。本稿では、MIDREX™プロセスの概要と100%水素への移行に向けた技術革新の展望を示し、さらに100%水素還元で得られる直接還元鉄の特性についても解説する。

## 1. シャフト炉プロセスの概要

### 1.1 DRIの用途

図1に示すように、2023年における世界の粗鋼生産量は約19.0億tであり、そのうち約70%が高炉-転炉法(BF-BOF)、残りの約30%が電気炉法(EAF)によって生産されている<sup>2)</sup>。電気炉の主原料である鉄スクラップには、銅などの精錬困難な不純物元素が含まれている

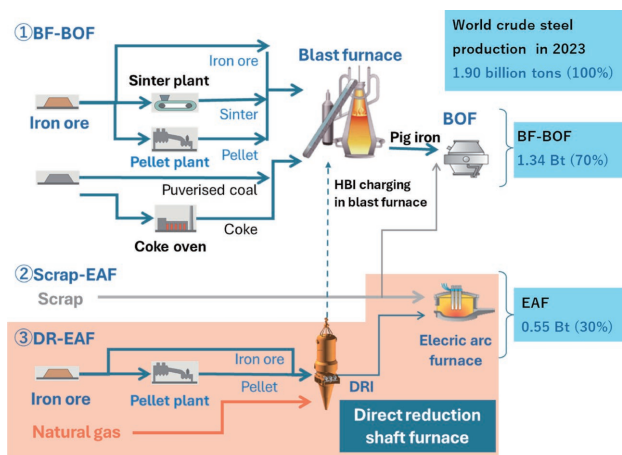


図1 製鉄フローと世界粗鋼生産量(2023年)

Fig.1 Iron making process and world crude steel production in 2023

脚注1) MIDREXは当社の登録商標である。

\*1 エンジニアリング事業部門 新鉄源センター

\*2 エンジニアリング事業部門 新鉄源センター(現(株)神鋼環境ソリューション 技術開発センター)

ため、希釈用の「清浄鉄源」として直接還元鉄（Direct Reduced Iron, 以下、DRIという。）が利用される。また、スクラップ発生量の少ない中東などでは、DRIが電気炉の主原料として利用されている。

DRIには常温還元鉄（Cold DRI, 以下、CDRIという。）に加え、常温まで冷却せずに隣接電気炉で利用する熱間還元鉄（Hot DRI, 以下、HDRIという。）、および耐酸化特性に優れており長期貯蔵や海上輸送に適したホットブリケットアイアン（Hot Briquetted Iron, 以下、HBIという。）があるが、本稿ではこれら3種類の還元鉄を統一的にDRIと呼称する。図2に示すように2024年の世界DRI生産量は1億4,080万tとなり、過去最高を更新した<sup>3)</sup>。今後、CO<sub>2</sub>排出削減のための電気炉導入拡大、およびそれに伴う還元鉄生産量のさらなる増加が想定される。

## 1.2 MIDREX™ プロセスの概要

図3に示すように、MIDREX™ プロセスは、天然ガスを用いたシャフト炉型の直接還元製鉄法として、世界全体の生産量の約80%を占めている代表的なプロセスである。図4にMIDREX NG<sup>TM</sup>注2)のプロセスフローを示す。本プロセスは、天然ガスを改質して還元ガスを製造するリフォーマ、還元ガスを用いて鉄鉱石を固体のまま金属鉄に還元するシャフト炉、シャフト炉からの排ガスを冷却・除じんするトップガススクラバ、排ガスからの熱回収システムなどで構成されている。

図5にシャフト炉の概略図と炉内の主な化学反応を示す。シャフト炉法は固気交流型のプロセスであり、炉頂から鉄鉱石ペレットもしくは塊鉄石を充填し、炉中段

のバスルポートから還元ガスを吹き込むことで、鉄鉱石が効率的に昇温、還元される。鉄鉱石中に含まれる約30%（重量比）の酸素は、シャフト炉内でCO、H<sub>2</sub>と反応し、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>Oとして鉄鉱石から除去される。製品DRIの炭素濃度は、バスルポート下部から天然ガス（Transition Zone Natural Gas）を吹き込むことで調整できる。また、比熱の大きい天然ガスは高い冷却能力を有することから、CDRIプラントではDRIの冷却媒体としても利用されている。

炉頂から排出される350~450℃の還元後ガスはトップガススクラバで水冷、除じんされる。この炉頂ガスには、還元反応により生成したCO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>O、および未反応のCOとH<sub>2</sub>が含まれる。炉頂ガスの約2/3は還元ガスとして再利用されており（以下、プロセスガスという。）、天然ガスが加えられた後に、MIDREX™ リフォーマで改質されて還元ガスとなる。また、炉頂ガスの残り1/3は、つぎに述べるリフォーマ加熱用の燃料として利用される。

MIDREX™ リフォーマの内側は耐火物で覆われ、ニッケル系の触媒が充填されている複数の耐熱鋼管が配置されている。鋼管周囲では天然ガスを混合した炉頂ガスを燃焼させ、改質反応に必要な熱エネルギーを供給している。プロセスガスは鋼管中を通りながら、触媒表面で

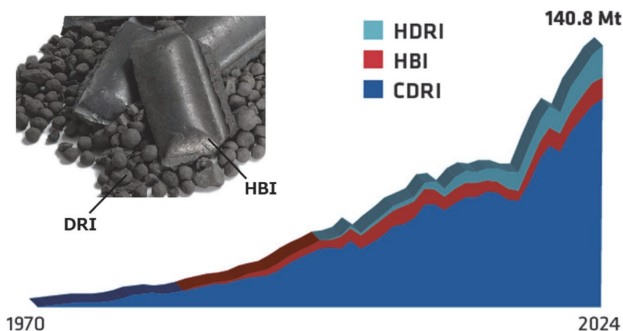


図2 世界のDRI年間生産量の推移<sup>3)</sup>  
Fig.2 Trends in world's annual DRI production<sup>3)</sup>

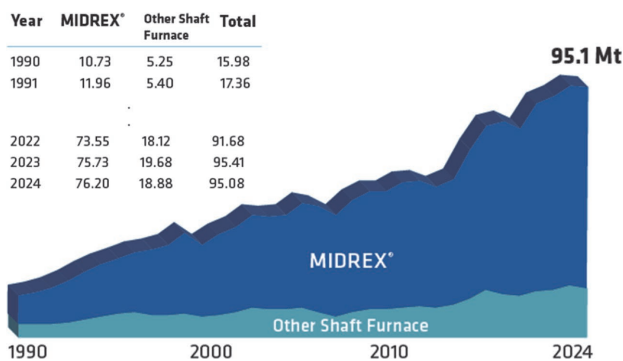


図3 プロセス別のシャフト炉DRIの生産量<sup>3)</sup>  
Fig.3 Shaft furnace DRI production by process<sup>3)</sup>

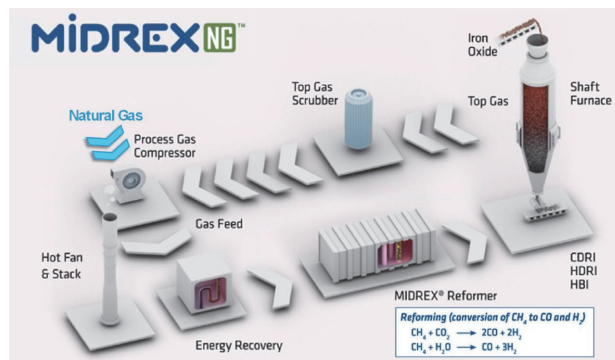


図4 MIDREX NG™ フロー  
Fig.4 MIDREX NG™ flowsheet

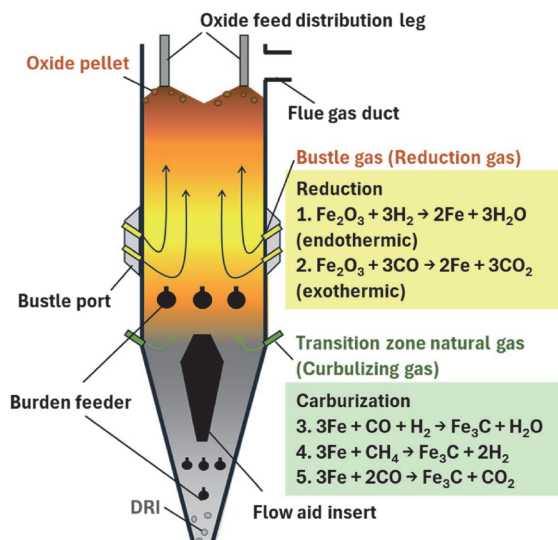


図5 シャフト炉の概略図と炉内の主な化学反応  
Fig.5 Schematic figure of shaft furnace and chemical reactions in the furnace

脚注2) MIDREX NGは当社の登録商標である。

炉頂ガス中の酸化化合物 (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) と天然ガス主成分のメタン (CH<sub>4</sub>) が反応し、還元ガス成分であるCOとH<sub>2</sub>に改質される。水蒸気リフォーマを採用している他のDRI製造プロセス<sup>4)</sup>とは異なり、MIDREX<sup>TM</sup>プロセスでは天然ガス改質剤として、H<sub>2</sub>Oに加えてCO<sub>2</sub>を使用することから、H<sub>2</sub>/CO比の低いガスを製造できる。また、シャフト炉内の発熱と吸熱のバランスに大きく影響する還元ガス組成を、あらかじめリフォーマで制御することで、シャフト炉内の温度分布を適正化することが可能である。さらに、MIDREX<sup>TM</sup>リフォーマに併設された熱回収システムにより、リフォーマ供給ガス、燃焼空気、天然ガスなどを予熱することで高い熱効率を実現している。

以上の長を有したMIDREX<sup>TM</sup>プロセスは運転時のトラブルが少なく、多くの商業プラントにおいて年間8,000時間を超える稼働時間を達成している。

## 2. シャフト炉プロセスにおける水素還元への移行

シャフト炉の還元剤および燃料として利用される天然ガスを、再生可能エネルギー由来の水素（以下、グリーン水素という。）に置換することで、さらなるCO<sub>2</sub>排出削減が可能である（図6）。Midrex社でも、水素還元に対応した次世代プロセスとしてMIDREX Flex<sup>TM</sup><sup>注3)</sup>およびMIDREX H<sub>2</sub><sup>TM</sup><sup>注4)</sup>をメニュー化している<sup>4), 5)</sup>。

MIDREX Flex<sup>TM</sup>は、天然ガス100%から水素100%まで任意の割合で水素置換が可能であり、足元から将来に至る水素の調達環境に応じた段階的な水素還元への移行に対応しうるプロセスである。また大量のグリーン水素が安定的に確保可能な場合は、100%水素還元の特化したMIDREX H<sub>2</sub><sup>TM</sup>が適用できる。MIDREX H<sub>2</sub><sup>TM</sup>と電気炉の組み合わせでは、高炉-転炉法に比べてCO<sub>2</sub>排出量を90%以上削減し<sup>注5)</sup>、CO<sub>2</sub>フリー製鉄に近づくことができる。

本章では、これらMIDREX Flex<sup>TM</sup>およびMIDREX H<sub>2</sub><sup>TM</sup>の特徴について解説する。

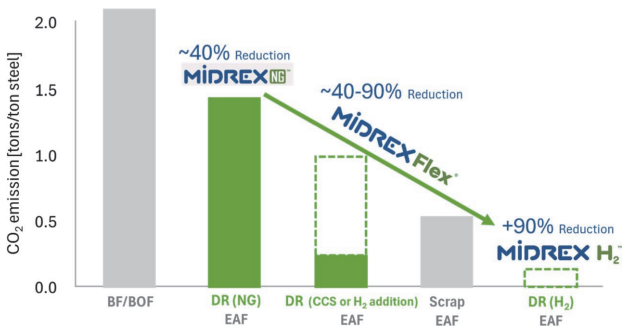


図6 トランジション期間におけるシャフト炉 (MIDREXプロセス) のCO<sub>2</sub>削減<sup>5)</sup>

Fig.6 CO<sub>2</sub> emission reduction in shaft furnace using the MIDREX process during the transition period<sup>5)</sup>

脚注3) MIDREX Flexは当社の登録商標である。

脚注4) MIDREX H<sub>2</sub>は当社の登録商標である。

脚注5) 100%削減との差は、シャフト炉以降の溶解・精錬工程で使用する石灰石や炭材からのCO<sub>2</sub>発生によるもの。

## 2.1 MIDREX Flex<sup>TM</sup>プロセス (水素置換)

### 2.1.1 MIDREX Flex<sup>TM</sup>の特徴

#### A) 水素対応 (Hydrogen Ready)

MIDREX Flex<sup>TM</sup>は、既存の天然ガスベースのDRI製造設備 (MIDREX NG<sup>TM</sup>) に対して、最小限の設備改造で使用する天然ガスを水素に置換することができる。標準的なMIDREX NG<sup>TM</sup>プロセスでは、天然ガスをリフォーマで改質して、水素約55%、一酸化炭素約36%を含む還元ガスを生成する (H<sub>2</sub>/CO比は1.5前後)。MIDREX Flex<sup>TM</sup>ではこの水素を段階的に高め、最終的には100%水素を還元剤として利用することが可能である。なお、ベネズエラのFMO (CVG Ferrominera Orinoco社) プラントではH<sub>2</sub>/CO比3.8という水素比率が高い条件においても安定した運転が行われた。このような実績を鑑みても、MIDREX Flex<sup>TM</sup>は従来プロセスの延長線上に位置する発展的な技術であり、新設・既存を問わず多様なガス組成に対応できる。

水素置換率向上に伴い、CO還元に対する水素還元の比率が高くなるが、水素還元反応は吸熱量が大きいため、シャフト炉内のエネルギーバランスの変化が想定される。そのため、MIDREX Flex<sup>TM</sup>では水素置換率に応じて適切な位置での水素導入と、還元ガスの温度や流量、組成の制御が重要である。図7にMIDREX Flex<sup>TM</sup>のプロセスフローを示す。

水素の置換率が低い場合は、リフォーマ下流のみに水素を加える (図7中①)。これは、リフォーマでの改質前に反応生成物である水素を添加すると、改質効率が低下するためである。ただし、水素を下流に添加すると還元ガス温度が低下するため、水素と同時に酸素を添加し、還元ガスの一部を燃焼させ、還元ガス温度を維持する。天然ガスと水素の置換率が30%を超えると、プロセスガスのガス密度が小さくなるため、コンプレッサが追加される。置換率が75%を超える場合は、水素をリフォーマバーナに添加して混焼させる (図7中②)。さらに、置換率が85%以上の場合には、リフォーマ上流にも水素を添加する (図7中③)。水素置換率が高い条件では、必要な改質量が減少しているため、リフォーマ上流への水素添加による改質効率低下の影響は小さい。このようにMIDREX Flex<sup>TM</sup>では、水素置換率に合わせたプロセス最適化と効率向上が図られている。なお、水



図7 MIDREX Flex<sup>TM</sup> フロー  
Fig.7 MIDREX Flex<sup>TM</sup> flowsheet

素置換率の増加に伴い、DRI中の炭素濃度は低下するが、電気炉での溶解性や熱源確保の観点からはDRI中の炭素量は高い方が望ましい。MIDREX Flex™では、浸炭に寄与するTransition Zone Natural Gasを併用することで、高水素置換率においても、DRI中の炭素含有量を一定量確保することが可能である。

### B) シャフト炉

MIDREX Flex™では、シャフト炉本体を改造することなく、0%~100%までの水素置換率に対応できるが、水素置換率上昇に伴い還元による吸熱量が増加するため、還元反応の不安定化や製品品質の低下が懸念される。この問題に対応するためには、バースルポート高さに位置するBed温度を水素置換率に関わらず一定になるよう制御する必要がある。Bed温度の制御には、シャフト炉に供給する還元ガスの温度を高める、あるいは流量を増やす、という2つの手段が考えられる。ただし、ガス温度を高めた場合、鉍石表面が局所的に高温となり、鉍石同士の溶着によってクラスター（融着、固結したDRI）が生成し、原料流動性や操業安定性が低下する恐れがある。そこで、本プロセスでは、クラスターを抑制しながらBed温度を一定値に制御する手段として、還元ガスの流量をMIDREX NG™よりも増加させている。

### C) リフォーマ

MIDREX Flex™のリフォーマは100%天然ガスでの運転を前提に設計されているが、高水素置換率での運転においても、リフォーマ本体の改造は不要である。また、水素置換率増加に伴ってCH<sub>4</sub>の改質量は減少するため、吸熱量が減少し、リフォーマに供給する熱エネルギーは減少する。なお、100%水素での運転時には、リフォーマは実質的にガス加熱炉として機能し、ガス改質が不要となるため、触媒を不活性材に交換することが可能である。

### D) CCUS (炭素回収・利用・貯留)

還元反応で生成したCO<sub>2</sub>を天然ガス改質剤として再利用するMIDREX NG™プロセスでは、通常、CO<sub>2</sub>分離回収は実施していないが、必要に応じて既設プラントへの追加が可能であり、これはMIDREX Flex™でも同様である。すなわち、水素置換率を段階的に増やしながらかarbonフリー化を目指す過程で、100%水素還元よりもCCUSとの併用が望ましい事業環境に変化した場合には、シャフト炉やリフォーマなどの主要機器を更新することなくCO<sub>2</sub>分離回収装置を追加導入して、部分的な水素置換とCO<sub>2</sub>分離回収を組み合わせたプロセスとして運転するなど柔軟な対応が可能である。

#### 2.1.2 MIDREX Flex™の商業プラント

ティッセンクルップ社は2023年3月、同社デュイスブルグ製鉄所にMIDREX Flex™プロセスを用いた世界初の水素還元製鉄プラントを建設することを発表した。初期の段階では還元剤として天然ガスを使用するが、十分な水素を調達できるようになる見込みの2027年以降、最大で水素100%への移行を計画している。本プラントの年産能力は250万tで、ドイツ最大の直接還元鉄プラントとして現在建設が進められている。

## 2.2 MIDREX H<sub>2</sub>™プロセス (100%水素使用)

### 2.2.1 MIDREX H<sub>2</sub>™の特徴

還元ガスとして100%水素のみを使用するMIDREX H<sub>2</sub>™プロセスのプロセスフローを図8に示す。MIDREX H<sub>2</sub>™ではガス改質は完全に不要となり、リフォーマの代わりに水素を昇温する還元ガスヒータが導入される。一般的にガスヒータには、燃焼加熱式と電気加熱式がある。水素を燃料とした燃焼加熱式ヒータの場合、CO<sub>2</sub>を発生させずに還元用の水素を加熱することができる。しかし、グリーン電力から燃料水素を製造する際の変換ロスおよび燃焼排ガスとして系外に排出される熱ロスが発生する。そこで、MIDREX H<sub>2</sub>™ではガスヒータとして電気加熱式を採用している。電力を燃料用水素に変換せず、排熱ロスの少ない電気ヒータで還元用水素を加熱することで、DRI製造に必要な電力量を抑制し、よりエネルギー効率の高いプロセスを実現している。

### 2.2.2 MIDREX H<sub>2</sub>™の商業プラント

スウェーデンのStegra社(旧H2グリーンスチール社)は2022年10月、MIDREX H<sub>2</sub>™プロセスを用いた世界初の商業規模での水素還元製鉄プラントをスウェーデン北部ボーデン市に建設することを発表した(図9)。DRI年産能力は210万t、鋼材年産能力250万tで、2026年の稼働開始を目指している。同プロジェクトでは、再生可能エネルギーを用いた水電解により製造したグリーン水素のみを還元剤としてHDRIおよびHBIを製造し、HDRIは隣接する電気炉工程を経て自動車用鋼板などの製造に使用される。水電解装置も自社で建設し、その規模は700 MW以上である。同プロジェクトが供給するグリーン鋼材は、従来の高炉-転炉法による鋼材と比較して、約90%以上のCO<sub>2</sub>排出量削減を実現する計画である。

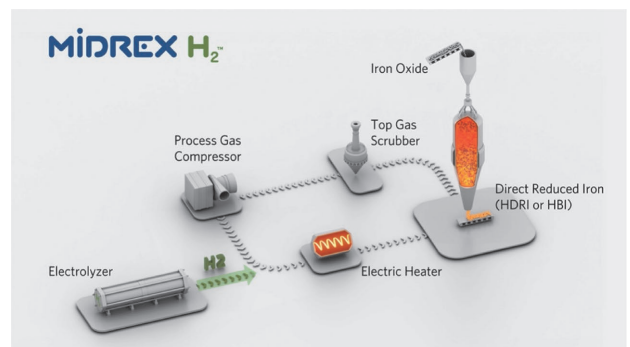


図8 MIDREX H<sub>2</sub>™ フロー  
Fig.8 MIDREX H<sub>2</sub>™ flowsheet



図9 MIDREX H<sub>2</sub>™プラント (建設中: スウェーデン・ボーデン市)の完成予想図

Fig.9 Projected view of MIDREX H<sub>2</sub>™ (Under construction; Borden, Sweden)

### 3. 水素還元におけるDRIの物性評価

シャフト炉プロセスにおける天然ガスから水素への移行は、CO<sub>2</sub>排出量や熱バランスだけでなく、反応速度や製品DRIの微細構造、物理特性に影響を及ぼすことが知られている<sup>6)</sup>。これらの性状はシャフト炉の温度分布や熱収支、製品歩留、品質に変化を生じさせる可能性がある。そのため、100%水素による還元（以下、水素条件という。）、および天然ガス改質ガスによる還元（以下、天然ガス条件という。）で得られるDRIの物性を比較評価することは、水素還元に移行する際の製品品質を担保するうえで重要である。

Midrex社では、RME（Raw Material Evaluation）と呼ばれる国際基準に沿った試験方法で原料種別の還元挙動や製品物性を評価している。K. Fujiwaraらの研究<sup>7)</sup>では、異なる5種類の原料（塊鉱石2種と品位の異なる鉄鉱石ペレット3種）を用いてLinder試験を実施し、天然ガス条件（ISO11257に準拠）と水素条件（ISO11257と同等条件）で得られるDRIの物性を比較した。実験条件を表1に示す。

評価項目の一つである金属化率について、図10(a)に結果を示す。すべての原料で、天然ガス条件よりも水素条件の方が金属化率は高い。これは等温条件の場合、水素の還元速度が大きく、金属化を優位に進めたためと

表1 試験条件  
Table 1 Linder test condition

	Gas condition					Flow rate L/min	Temp. ℃	Time h	Rotation rpm	Sample weight g
	H <sub>2</sub> %	CO %	CO <sub>2</sub> %	CH <sub>4</sub> %						
Reformed NG	55	36	5	4	13	760	5	10	500	
H <sub>2</sub>	100	-	-	-						

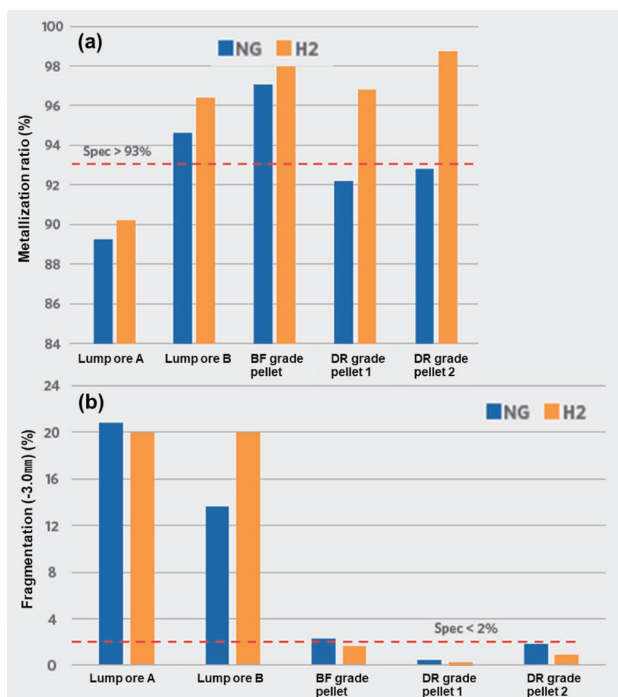


図10 水素条件と天然ガス条件による(a)金属化率と(b)粉率（-3.0 mm）の比較<sup>5)</sup>

Fig.10 Comparison of (a) metallization ratio and (b) fragmentation (-3.0 mm) by hydrogen reduction or natural gas reduction<sup>5)</sup>

考えられる。図10(b)に、還元後強度の評価指標である粉率(3.0 mm以下)を示す。水素条件における粉率は、原料によって多少変動はあるものの、概して天然ガス条件と同等、あるいはそれ以下である。原料種の違いに着目すると、ペレットに比べて塊鉱石の方が粉率は高い。これは塊鉱石の不均一な組織や形状が割れやすさを助長したものと考えられる。

### 4. SFSC (Shaft Furnace Simulated Condition) を用いた原料評価手法

3章で示した従来の物性評価手法はISO準拠の等温・一定ガス条件下で行われており、ペレット種別の相対比較には有効である。しかし実機においては、シャフト炉内に上部から投入された原料が炉内を降下していく過程で、温度やガス組成が刻々と変化する。実機を想定した還元挙動や製品物性の検証には、シャフト炉内環境を模擬した新たな評価手法の確立が必要である。そこで、Midrex社と当社では、COREM社のR180試験(非等温)<sup>8)</sup>を参考に、実炉条件を再現するための試験手法であるShaft Furnace Simulated Condition（シャフト炉実機模擬条件、以下、SFSCという。）を用いた原料評価手法を確立した<sup>7)</sup>。

SFSCの特徴は、還元ガスの組成（H<sub>2</sub>、CO、CO<sub>2</sub>の比率）と温度を、時間経過に合わせて段階的かつ細かく変化させている点である。試験開始時にはシャフト炉の排ガスに相当するガス酸化度（Gas Oxide Degree、以下、GODという。）となるようにガス組成を設定し、試験が進むにつれてGODを徐々に低下させていく。なお、GODは(1)式で定義される。

$$GOD = \frac{CO_2 \text{ vol}\%}{CO_2 \text{ vol}\% + CO \text{ vol}\% + H_2 \text{ vol}\%} \dots (1)$$

最終的にはバースルポートから吹き込まれる還元ガスと同じGODと温度になるように調整している。GODおよび温度の変化は、CFD（数値流体力学）シミュレーションで実機シャフト炉内の状態を解析した結果を反映させている<sup>9)</sup>。

このSFSCの妥当性を検証するために、実機バスケットテストとの比較を行い、参考として等温還元試験（以下、等温試験という。）とも比較を行った。バスケットテストとは、酸化鉄ペレットをメッシュ状のバスケットに入れて実機シャフト炉上部から投入し、還元後に下部から回収することで、実機内で実際に還元されたDRIサンプルを得る試験である。等温試験は、ISO11258に準拠しているが、SFSCの試験および実機条件との比較を容易にするため、還元時間を180分とした。SFSC試験および等温試験における還元時間は、実機シャフト炉におけるペレットの代表的な滞留時間と同程度となるように設定している。

設定した試験条件のもと、成分の異なる10種類の酸化鉄ペレットを対象に、バスケットテストおよびラボSFSCで還元試験を行った<sup>7)</sup>。等温試験に関しては3種類のみ試験を行い、それぞれの金属化率を比較した。試験結果を図11に示す。SFSCで得られたDRIの金属化

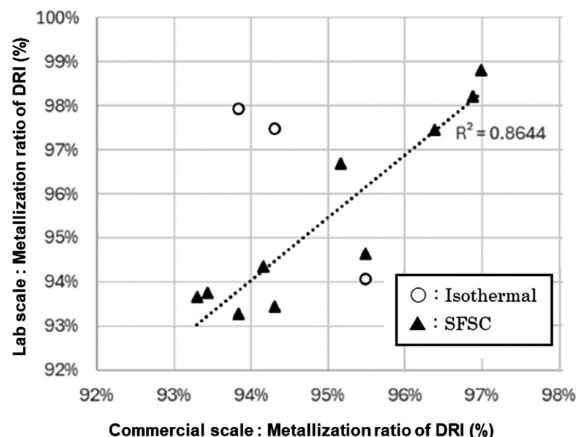


図11 実機とラボテストにおける金属化率の関係<sup>7)</sup>

Fig.11 Relationship between metallization in each laboratory test and an industrial test<sup>7)</sup>

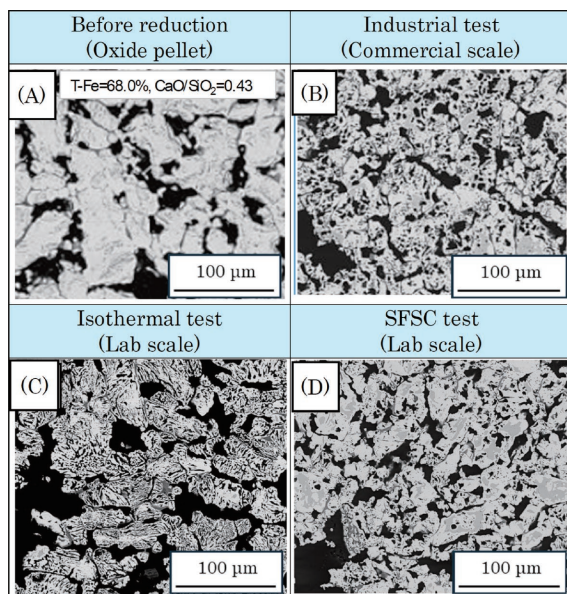


図12 還元前のペレットおよび還元後のDRIの顕微鏡観察結果

Fig.12 Microscopic observation image of the oxide pellet and the DRI after reduction test

率は、バスケットテスト（実機）で得られたものとよく一致した。さらにDRIの断面組織観察結果を図12に示す。等温還元で得られたDRI（図12（C））は膨張して結晶粒内に筋状のクラックがあり、実機DRI（図12（B））と大きく形態が異なっていた。これに対して、SFSCで得られたDRI（図12（D））は粒内クラックがほとんど認められず、比較的、実機DRI（図12（B））の形態を良く再現できていた。

図13は実機、ラボテストの冷間強度を比較したもののだが、実機よりもSFSCの方がDRIの冷間強度が高かった<sup>7)</sup>。還元後の冷却速度などが影響を与えた可能性も考えられ、模擬精度向上に向けて、さらなる試験条件の最適化を進める予定である。

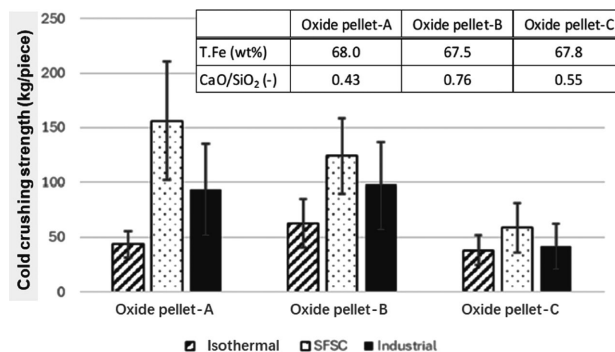


図13 実機テストとラボテストにおける冷間強度の比較<sup>7)</sup>

Fig.13 Comparison of cold crushing strength among two laboratory tests and an industrial test<sup>7)</sup>

SFSCは等温試験では困難だった実機条件（バスケットテスト）に近い還元挙動・物性評価・マイクロ組織を、ラボスケールで再現する試験手法である。今後、本手法の改良と活用により、実機の操業条件や原料を変更する際の品質変化を事前評価することが可能となり、プロセス設計の柔軟性が高まることが期待される。

むすび＝水素還元による脱炭素化が進み、CO<sub>2</sub>ゼロエミッションの製鉄業が強く期待されている。ただし、それは最終的な将来像であり、短期的にはグリーン水素が経済的かつ安定的に得られるかは不透明である。そのため、水素導入の方法に応じて最適なプロセス選択を行うことが重要である。即時に100%水素運転へ移行可能なケースには「MIDREX H<sub>2</sub><sup>TM</sup>」、段階的かつシームレスな移行を目指す企業には「MIDREX Flex<sup>TM</sup>」が適している。MIDREX<sup>TM</sup>プロセスは、50年以上にわたり革新的な製鉄技術を提供してきた実績を有しており、将来の水素社会に向けても、持続可能な鉄鋼生産プロセスをけん引するソリューションになりうるものと考えている。

参考文献

- 1) Kobelco Group Integrated Report 2025.
- 2) World Steel Association. World Crude Steel Production 2023. <https://worldsteel.org/statistics/>. (参照2025-08-25).
- 3) Midrex Technologies, Inc. World Direct Reduction Statistics. 2024. <https://www.midrex.com/wp-content/uploads/MidrexStatsBook2024.pdf>. (参照2025-08-25).
- 4) 畠山泰二ほか. 第251回西山記念講座. 2024, p.101-125.
- 5) G. Wallwork. DIRECT FROM MIDREX. First Quarter 2024, p.4-12.
- 6) 高橋礼二郎ほか. 鉄と鋼. 1980, Vol.66, No.13, p.1985-1994.
- 7) K. Fujiwara et al. DIRECT FROM MIDREX. Third Quarter 2025, p.9-16.
- 8) Laforest, G et al. 7th Brazilian Ore Agglomeration Conference Proceedings, 2019.
- 9) 王昌麟. R&D神戸製鋼技報. 2024, Vol. 72, No.2, p.105-109.