

2021年7月27日

産業構造審議会 グリーンイノベーションプロジェクト部会  
エネルギー構造転換分野ワーキンググループ御中

東北大学多元物質科学研究所  
植田滋

## 製鉄プロセスにおける水素活用プロジェクトに対する意見

### 全般

現状の国内製鉄業では、鉄鉱石を鉄原料に用いる場合、コークスを還元材とする高炉製鉄法が用いられている。高炉製鉄法では石炭由来のコークスが還元材および充填層内の構造材として用いられることから、現状からの炭素利用の大幅削減は困難を伴う。水素による石炭代替を行うためには従来の高炉製鉄法にとらわれない製鉄法の検討も要する。大幅な高炉の操業方式の変更、直接還元法を含むプロセスの構築など大規模な操業転換に向けては、個々企業の開発規模を超える開発・実証を進めることが必要となる。今回の事業により水素製鉄の技術開発と社会実装を進展することが望ましい。

### 今後の高炉製鉄法について

年々鉄スクラップの社会蓄積量は増加し、今後鉄の主原料中の鉄スクラップの比率が増加する。スクラップの製錬には電気炉を用いた製鉄法が主として用いられる。この方法では、鉄鉱石を原料とした場合に比べ、炭素の消費量の少ない製鉄が可能であるが、鉄のリサイクルを繰り返すと、スクラップに混在する銅などの除去が困難な不純物元素（トランプエレメント）の濃縮が問題となる。トランプエレメントを一定濃度以下に制御するためには、完全なスクラップ—電炉法による製鉄への移行は困難であり、鉄鉱石由来の鉄の供給も続ける必要がある。

鉄鉱石を原料とした製鉄法ではエネルギー効率の面で高炉製鉄法が優位であるが、還元材としてコークスを用いることが課題とされている。これまでに、高炉下部からの微粉炭の吹込みによるコークスの使用量削減が試みられているが、銑鉄1トンの製造当たり300kg以上のコークスが用いられている。さらにコークス使用の削減を進めると、還元性および熱収支の問題の他に、通気性確保のための構造体としての機能低下により操業制約が生じることが予想される。現在、高炉内通気性改善に対する開発がすすめられコークスの最大削減率が調査されているが、大幅な削減は見込まれていない。また、炉内構造材としては強度のある固体が求められるため、コークスに代わる還元材が存在しないのが現状である。

二酸化炭素排出削減ために高炉から排出されるガスの炭素循環利用が考案されている。しかし、コークスに含まれる炭素固体をから発生した一酸化炭素、二酸化炭素を固体炭素に還元することは困難であり、水素をどのように活用しても、一定量の固体還元材が必要な高炉操業で根本的な炭素の循環利用は不可能である。炭素から水素への大幅転換を行う場合、消費する固体炭素を高炉外部でバランスする必要がある。CCS等も提案されている。CCSありきの高炉操業では付加エネルギーが必要なため、エネルギー効率を損ねる。高炉ガスは発電や下流工程での必要熱力確保に用いることが望ましい。

高炉操業においてはエネルギー効率を損なわない範囲での水素/炭素の利用率向上は検討を進めるべ

きであるが、過度に二酸化炭素削減と水素移行を指向すると操業上の不安定化に加え、エネルギー効率、ひいては国際競争力の面から不利となるため、多角的な最適値の検討が必要と考える。

#### 高炉ガスの CCUS について

高炉ガスは熱量を持つ H<sub>2</sub>、CO に加え H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub> などが混合した気体である。高炉ガスに含まれる二酸化炭素に対して、水素によるメタネーションを行うことが提案されている。CCUS から得られる物質を還元材として評価すれば、メタネーションにより消費される水素の取り出し可能なエネルギーよりも、反応により得られるメタンからの取り出し可能なエネルギーは小さく、利用可能なエネルギー低減することになる。製品およびエネルギーキャリアとしてメタン生成を行う場合を除き、メタネーションは有効な操作ではない。製鉄でのガス利用では、高炉ガスは高炉ガスのまま、水素は水素のまま使い尽くすことがエネルギー効率の最大化に寄与する。

#### 鉄鉱石からの高炉によらない水素利用製鉄について

水素により鉄鉱石を鉄に直接還元することは原理的に可能であるが、水素還元は吸熱反応であるため反応の進行には外熱が必要となり、反応高速化、大規模化に課題がある。反応容器としてはシャフト炉や流動層炉が候補に挙げられる。シャフト炉は効率の面で優れるが、原料の還元粉化や固着の防止、流動層炉は反応効率改善について開発の余地が大きい。水素還元鉄には、脈石や不純物が共存する一方で、炭素が含まれないため、下工程である電炉プロセスでの還元鉄の精錬も検討課題となる。

シャフト炉等による鉄鉱石の水素還元では、高炉操業では不可避である高強度な固体炭素の利用を伴わないため、高度な水素化への技術開発も進めやすく、時々々のエネルギー需給状況にも対応可能な点で有利である。社会実装を見据えて、水素による直接還元製鉄法の開発を進める必要がある。

#### 直接還元における不純物除去技術について

鉱石由来の還元鉄は、トランプエレメントを含まない鉄源である、その一方でりんや脈石成分が共存するため、電炉法での還元鉄の精錬方法についても検討を進めておくことが望ましい。

現状の精錬プロセス（転炉工程等）では、純鉄の融点は 1530°C を超えるが鉄に少量の炭素が含まれるとその融点は 1200°C 以下となることを利用し、溶鉄と溶融酸化物の物理的分離性を利用し精錬を行っている。そこで、融点の高い還元鉄を電炉に導入する場合、溶解が困難になることが課題となる。さらに、スラップと還元鉄では不純物組成が異なるため、還元鉄に対する精錬技術が課題となる。水素による還元法の検討に加え、直接還元鉄を効率的に精錬するための技術開発も同時に進める必要がある。