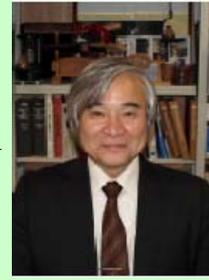


炭素ガス排出抑制型低温高酸素ポテンシャル高速新製鉄法の開発

Development of new process for rapid pig iron making in high oxygen potential at low temperature in order to reduce carbon dioxide gas emission

永田 和宏 (Nagata Kazuhiro)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授



研究の概要

銑鉄製造で原料の加熱と反応に消費されるエネルギーを、高炉の石炭燃焼による高温ガスからマイクロ波に転換させた。マイクロ波は粉状の鉄鉱石と炭材に効率良く吸収されることを示した。約5分で1360℃の銑鉄が出来、不純物濃度は高炉銑の10分の1程度であった。マイクロ波吸収の少ない断熱材を用い連続製銑炉で1時間に約500gの生産に成功した。

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・金属生産工学

キーワード：鉄鉱石、還元、銑鉄、マイクロ波加熱、低温製鉄、炭材内装ペレット

1. 研究開始当初の背景・動機

炭酸ガス排出抑制は地球温暖化防止の上で重要な課題である。銑鉄を製造する高炉では原料の加熱と反応に消費されるエネルギーを石炭燃焼による高温ガスで得ている。このため、通気性を保つために強度のある塊鉄鉱石やコークスを使う必要があり、反応に時間がかかる。加えて、還元力が強いので不純物の多い銑鉄ができる。原料価格の高騰、品質低下など現在の鉄鋼製造の抱えている問題を早急に解決する必要がある。

2. 研究の目的

これらの問題を一気に解決するために、エネルギーをマイクロ波に代え、粉状の原料を使い、弱い還元力で純度の高い銑鉄を製造する方法を確立する。粉は体積に対し表面積が大きいので還元反応が速く進行する。マイクロ波は電磁波なので通気性を必要とせず粉原料を使える。

3. 研究の方法

粉鉄鉱石を原料にして銑鉄を製造する方法は、我国古来の製鉄法で砂鉄を使用するたたら製鉄で、世界で唯一の方法である。まず、この点に視点を置きたたら製鉄の技術を研究した。

鉄鉱石とグラファイトの混合粉を抵抗炉で加熱しその反応速度を高温X線回折装置でその場測定した。

卓上型単結晶育成装置（購入）で単結晶FeOを作製し、その表面の初期還元過程を

走査型トンネル顕微鏡 (STM) で観察した。マグネタイトなど原料や各種耐火物の誘電率と透磁率を室温で測定した。

小型マイクロ波加熱装置(購入)を用いて窒素ガス中で炭材内装ペレットを反応させ、銑鉄生成速度に及ぼすマイクロ波出力、原料の粒径、原料の重量の影響を研究した。

反応途中の炭材内装ペレットを急冷し、内部の反応状況を電子線マイクロプローブアナライザ（購入）で測定した。

12.5kW マイクロ波加熱装置で、連続製銑実験を行ない、シーケンシャル形蛍光X線分析装置(購入)で原料や生成物の分析を行った。

4. 研究の主な成果

4.1 たたら製鉄の技術論

たたら製鉄は6世紀の後半に朝鮮半島を経て我国に伝来した製鉄法である。高さ1.2mの箱型の炉で砂鉄を原料に木炭を燃料にして主に銑鉄を製造し、3日3晩（一代）で炉を作りなおした。江戸中期に技術的に完成したが、明治期に入って輸入鉄に押され、大正12年に商業生産を終えた。しかし、優秀な性質のため、昭和52年に復元され日本刀の材料として少量生産されている。たたら製鉄法は粉鉄鉱石を用いて銑鉄を生産する世界で唯一の製鉄法である。この改良として明治中頃に炉高を3mにし、耐火煉瓦で炉を築く「角炉」が発明された。木炭銑を製造し、工具鋼や特殊鋼用として昭和40年まで操業が続けられた。しかし、

炉高を高くした角炉は木炭燃焼で得られた高温ガスをエネルギーとするため、粉の砂鉄が飛散易く、砂鉄を使う炉として矛盾するようになった。

4.2 酸化鉄とグラファイト混合粉末の反応速度とミリングの影響

酸化鉄とグラファイトの混合粉末をボールミルで粉碎し混合した。それを He ガス中で加熱し、X 線回折ピークの強度から反応物の消滅速度と生成物の生成速度を測定した。ミリング時間が長くなると還元開始温度は 30~100°C 低くなり、反応の活性化エネルギーは下がった。ただし、FeO から鉄への還元反応は上昇した。

4.3 Fe_{1-x}O の表面構造と初期還元反応

単結晶育成装置により、Fe_{1-x}O の大きな単結晶を作製し、高真空の STM 装置内で表面を観察した。劈開面は乱れた表面であったが、800°C で 15 分加熱すると <110> 方向のステップが成長し、岩塩型の (001) 表面に (1x1) と c(4x2) の表面構造と、また 3 nm 角の規則的なメッシュ構造が観察された。1000°C 15 分加熱では全面メッシュ構造で覆われた。メッシュは窪んでおり、結晶中の Fe 原子欠陥クラスターが表面に析出したと考えられる。

この表面に H⁺ イオンを照射し、還元反応を起させたところ、ステップ表面に 2~3 nm 大の鉄粒が分散しているのが観察された。これはメッシュ状に見えるものが酸素イオンであり、これが還元反応で除去されて鉄粒が生成したと考えられる。

4.4 マグネタイトの誘電率・透磁率

マグネタイトの誘電率・透磁率は 1~2GHz 近傍に最大値があり、商用のマイクロ波発生装置で効率的な吸収が起ることが分った。

4.4 銑鉄生成速度に及ぼすマイクロ波出力、原料の粒径、原料の重量の影響

約 10g の炭材内装ペレットは 3kW 出力では 5 分で 1370°C に達し銑鉄となって溶解した。この速度は出力と重量に比例し、原料の粒径には依存しなかった。不純物濃度は高炉銑の 10 分の 1 程度であった。写真は 330g の銑鉄塊。

4.5 連続製銑

マグネタイト鉄鉱石とコークスの混合粉を連続装入し熔融銑鉄を得た。長時間操業では断熱用耐火物がマイクロ波を吸収し始めること、マルチモード型マイクロ波炉では炉内空間に対し原料の体積が小さすぎてエネルギー変換効率が低い。マイクロ波を吸収しない耐火物および、マイクロ波集中型加熱炉や原料分散型加熱炉など、反応炉の規模拡大の指針を示した。



5. 得られた成果の世界・日本における位置とインパクト

2050 年に炭酸ガス排出を半減させるという地球規模での制約により、高炉に代わる新製鉄法として注目を集めている。近年、製鉄用石炭価格が高騰し、原子力発電への依存度の高まりや夜間電力利用など電気エネルギーを製鉄に使うの可能性が増した。2007 年に特定非営利活動法人 日本電磁波エネルギー応用学会が設立され、マイクロ波加熱高温非平衡場の科学が重要な部門として取り上げられている。本プロジェクトもこれに参加し、物理、化学、電気、冶金の各分野の融合領域として新しい分野を造りつつある。

6. 主な発表論文

- (研究代表者は太字、研究分担者には下線)
- ・Localized heating and reduction of magnetite ore with coal in composite pellets using microwave irradiation, **Kotaro Ishizaki** and **Kazuhiro Nagata**, ISIJ International, 47, 817-822, 2007.
 - ・Selectivity of microwave energy consumption in the reduction of Fe₃O₄ with carbon black in mixed powder, **Kotaro Ishizaki** and **Kazuhiro Nagata**, ISIJ International, 47, 811-816, 2007
 - ・Production of Pig Iron from Magnetite Ore-Coal Composite Pellets by Microwave Heating, **Kotaro ISHIZAKI**, **Kazuhiro NAGATA**, **Tetsuro HAYASHI**, ISIJ International, 46, 1403-1409, 2006
 - ・たたら製鉄の技術論 (10) 鋤と銑の生成機構(その 1)、永田和宏、金属、76、460-467、2006
 - ・たたら製鉄の技術論 (12) たたら製鉄の発展形態としての鉄精錬炉「角炉」の構造、永田和宏、金属、無、76、711-719、2006
 - ・Reduction Kinetics of Hematite Powder Mechanically Milled with Graphite, **Ichiro Seki** and **Kazuhiro Nagata**, ISIJ International, 46, 1-7, 2006
- ホームページ等
http://www.cms.titech.ac.jp/seminar/function/func_02.html