SHIMADZU
Excellence in Science

Application News

電子線マイクロアナライザ　EPMA-8050G

水素還元後の製鉄用焼結鉱の分析

吉見 聡、林 広司

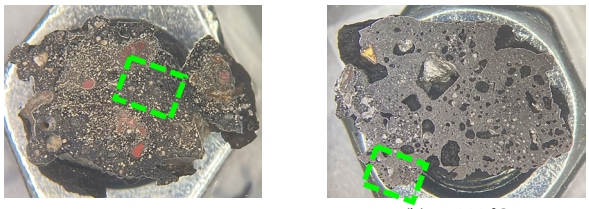
ユーザーベネフィット

- ◆ Al、Mg、Si、Ca、Feの定量マッピングで、焼結鉱の鉱物組織を調べることができます。
- ◆ 炉内温度による還元反応の違いにおいて、カルシウムフェライト相の組成の研究に役立ちます。
- ◆ O、Feの定量マッピングによる相解析で、酸化鉄の種類に関する研究に役立ちます。

■はじめに

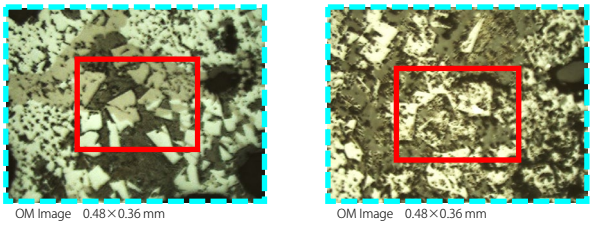
2050年カーボンニュートラルの実現に向けて、二酸化炭素（CO_2）排出量の削減が進められています。水素還元製鉄は、コークス（C）の代わりに水素（H_2）を用いて鉄鉱石を還元し、水（H_2O）を発生させて、CO_2を削減する方法です。また、高炉における水素を用いた水素還元技術（COURSE50）では、10%以上のCO_2削減を目指して、コークスによる直接還元より吸熱反応の小さい水素還元を促進することで、熱量を低減すると共に原料の反応性条件を最適化し、還元能力を再生したガスを循環利用する研究が進められています。また、更に大量の水素を高炉に投入する、Super COURSE50の開発も始まっています。

今回、電子線マイクロアナライザEPMA™（EPMA-8050G）を使用した水素還元後の焼結鉱の分析例をご紹介します。



(a)　600 ℃　　(b)　1000 ℃

図 1　還元後焼結鉱の外観



(a)　600 ℃　　(b)　1000 ℃

図 2　還元後焼結鉱の光学顕微鏡像

■水素還元後の焼結鉱組織

高炉法による水素還元の拡大を行う場合、炉内の高温維持が課題になります。水素による還元反応は熱を吸収する吸熱反応であるため、炉内の温度分布が変化し、低温領域が拡大するため、原料が粉になる低温還元粉化が顕著になります。この粉化を抑制するには、加熱する必要があり、コークスの使用量を増やすことになってしまいます。

図1は高炉条件を模した実験装置を使用して、600 ℃および1000 ℃まで加熱した焼結鉱の外観写真です。

図2は600 ℃および1000 ℃まで加熱した焼結鉱をEPMAで撮影した光学顕微鏡像（OM Image）です。

図3、図4の元素分布像は、OM Imageの赤色領域をマッピング分析し、各元素を単純酸化物（鉄はFe_2O_3）の質量パーセント濃度（wt%）に換算した結果です。（関連アプリケーション 1.）

図3は高水素高炉条件で、低温の600 ℃まで還元した焼結鉱です。還元反応が不十分なため、COMPO像の明コントラスト領域は、酸化鉄であることが分かります。カルシウムフェライト（Calcium ferrite）の塩基性成分の酸化カルシウム（CaO）は、シリカ（SiO_2）と相関があり、塩基性成分の酸化マグネシウム（MgO）はシリカ（SiO_2）と逆関係にあることが分かります。また、カルシウムフェライト中のアルミナ（Al_2O_3）の増加に従い、酸化鉄が減少しています。

図4は高水素高炉条件で、高温の1000 ℃まで還元した焼結鉱です。溶融型組織の菱形化した2次ヘマタイト周囲のカルシウムフェライトが分解し、鉄（Fe）濃度の高いカルシオウスタイト（FeO-CaO）とスラグ（もしくはオリビン）が生成している様子が分かります。これはカルシウムフェライトが還元されたことを示します。また酸化鉄の粒内に金属鉄（Fe）の生成が確認できます。これにより酸化鉄の還元が進んでいることが分かります。

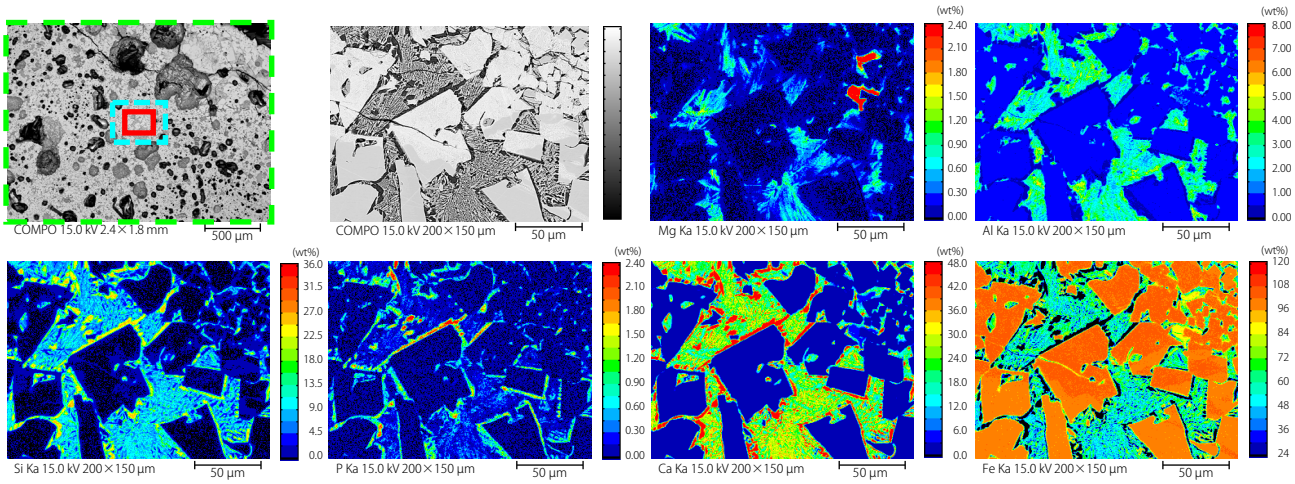


図 3　600 ℃還元後焼結鉱のマッピング

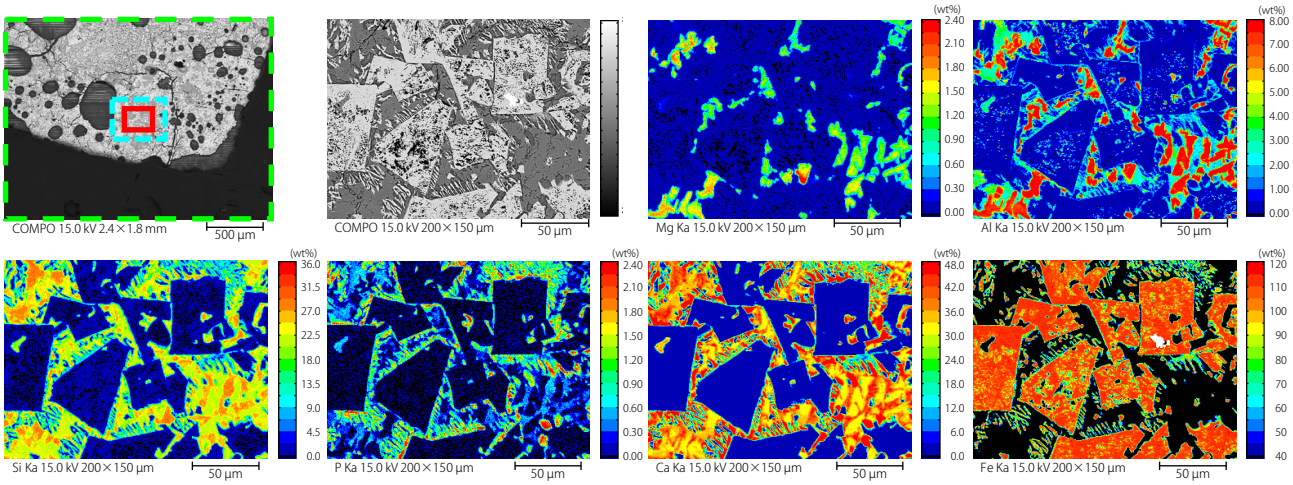
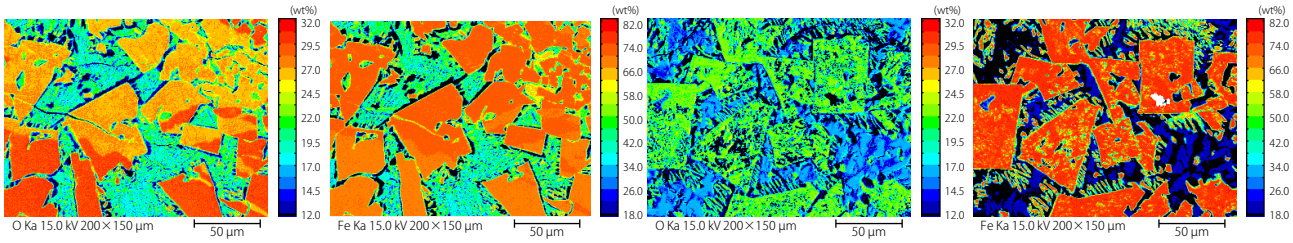
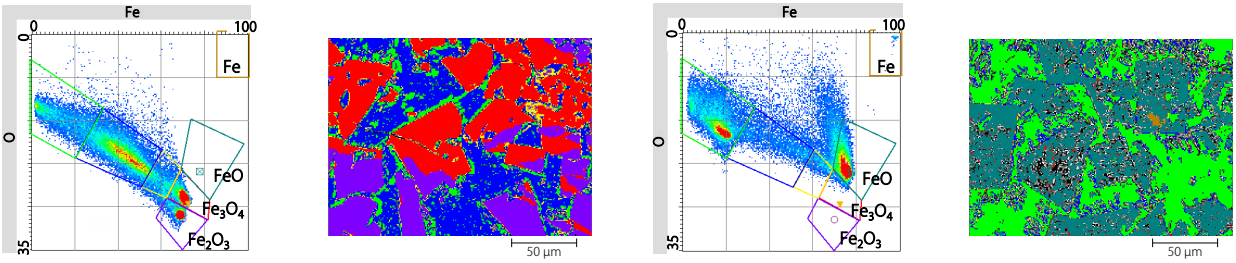


図４　1000 ℃還元後焼結鉱のマッピング



(a)　600 ℃　　(b)　1000 ℃

図５　還元後焼結鉱のO、Feマッピング



(a)　600 ℃：Fe-O散布図　　(b)　600 ℃：相図　　(c)　1000 ℃：Fe-O散布図　　(d)　1000 ℃：相図

図６　還元後焼結鉱の相解析

■水素還元後焼結鉱の相解析

図5の元素分布像は、酸化価数の違いを識別するため酸素（O）と鉄（Fe）を単元素の質量パーセント濃度（wt%）で表示しています。

図6(a)、(c)は、理論的な酸化鉄の濃度による化合物位置を表示したFe-O散布図で、図6(a)には○ヘマタイト（Fe_2O_3）と▼マグネタイト（Fe_3O_4）、図6(c)には⊠ウスタイト（FeO）と鉄（Fe）の化合物表示領域にクラスター（点集合）が確認できます。図6(b)、(d)は、Fe-O散布図をフィルター設定した相図です（関連アプリケーション１.）。相図の紫色領域がヘマタイト、赤色領域がマグネタイト、緑色がウスタイト、茶色が鉄、黄色と青色領域がカルシウムフェライト、黄緑色領域がスラグになります。還元前の焼結鉱はヘマタイトとマグネタイトを含有していますが、炉内温度の違いによる還元反応で、それぞれ酸化鉄の種類が異なり、高温の1000 ℃で水素還元した焼結鉱には金属鉄（Fe）が生成していることが分かります。

■まとめ

水素還元後の焼結鉱の定量マッピング分析と相解析により、酸化鉄の種類やカルシウムフェライトを識別することができるため、組織の解析や還元などの研究開発に利用されています。また、低品位鉄鉱石の使用を前提とした研究開発の活用に期待されています。

＜謝辞＞

本アプリケーションの作成にあたり、東北大学大学院環境科学研究科の村上太一先生には、試料のご提供ならびに、データ解析のご教示など多大なるご協力をいただきました。心より感謝申し上げます。

＜関連アプリケーション＞

1.　製鉄用焼結鉱の分析　Application News No.01-00584-jp

EPMAは、株式会社島津製作所またはその関係会社の日本およびその他の国における商標です。

株式会社 島津製作所　分析計測事業部
https://www.an.shimadzu.co.jp/

初版発行：2025年1月
01-00843A-JP　A改訂版発行：2025年3月

島津コールセンター　0120-131691

本資料は発行時の情報に基づいて作成されており、予告なく改訂することがあります。
本文中に記載されている会社名、製品名、サービスマークおよびロゴは、各社の商標および登録商標です。
本文中では「TM」、「®」を明記していない場合があります。

© Shimadzu Corporation, 2025

アンケート

関連製品 一部の製品は新しいモデルにアップデートされている場合があります。

EPMA-8050G
電子線マイクロアナライザ(Electron Probe Microanalyzer)

関連分野

- クリーンエネルギー
- 環境
- 温室効果ガス ＆ CCUS
- 工業材料・マテリアル
- 鉱物・鉱物学

- 価格お問い合わせ
- 製品お問い合わせ
- 技術お問い合わせ
- その他お問い合わせ