

マイクロ波金属プラズマによる希土類酸化物の還元

藤井 知 (ふじい さとし) 沖縄工業高等専門学校 情報通信システム工学科 教授

要約 持続可能な社会の実現に向け、素材産業におけるエネルギー消費およびCO₂排出量の削減は喫緊の課題である。特に、レアアース・レアメタルの安定確保は国際的な関心事となっている。本研究では、マイクロ波照射により生成される金属プラズマ、特にマグネシウム (Mg) プラズマを利用した希土類酸化物の低温還元プロセスに着目した。酸化スカンジウム (Sc₂O₃) および酸化ジスプロシウム (Dy₂O₃) を対象とした実験の結果、マイクロ波プラズマ中の金属イオンが熱平衡を超える高い還元能を示し、従来法に比べ大幅な低温化とプロセス簡略化が可能であることを明らかにした。さらに、プラズマ生成部と反応部を分離した新規装置により、スケールアップへの技術的可能性も示唆された。本手法は、有害物質を使用しない省エネルギー型の次世代製錬技術として高い潜在性を有している。

1. はじめに

持続可能な社会の実現に向けて、CO₂排出削減は国際的な最重要課題となっている。日本のエネルギー消費において産業部門が大きな割合を占め、特に化学・鉄鋼を中心とする素材産業は膨大なエネルギーを必要とすることが報告されている¹⁾。これらの産業は社会基盤を支える一方で、高温プロセスに起因する多量のエネルギー消費とCO₂排出が不可避であり、省エネルギー化の実現が急務である。

近年、レアアースやレアメタルなどの戦略物資は、電気自動車、風力発電、通信機器などの先端技術を支える不可欠な材料として重要性が高まっている。鉱山自体は世界各地に存在するものの、製錬・分離精製の工程は特定国に大きく依存しており、供給網の脆弱性が国際的な懸念となっている。地政学的緊張の高まりに伴い、安定供給の確保は産業界にとって喫緊の課題である。

こうした背景のもと、反応の高速化、選択加熱、低温化を特徴とするマイクロ波化学は、省エネルギー型プロセスとして注目されている²⁾。著者はこれまでに、マルチモードアプリケーションを用いたマイクロ波照射により、ドロマイトとフェロシリコンからなるペレットを約1000℃で還元し、従来法よりも低温でマグネシウムを製錬できることを示した³⁾。この成果は、マイクロ波照射が金属製錬プロセスの大幅な省エネルギー化に寄与し得ることを示すものであり、再生可能エネルギーとの併用によってCO₂排出量を実質的にゼロ

にできる可能性も示唆している。

一方で、マイクロ波照射下で還元温度が低下する要因は十分に解明されておらず、学術的な信頼性向上が求められてきた。特に金属酸化物の還元反応においては、従来の熱平衡論では説明できない反応促進が報告されており、その要因の一つとしてマイクロ波励起プラズマの関与が指摘されている。マイクロ波プラズマは、金属イオンや活性種を生成することで、熱的手法では到達し得ない反応場を形成し、低温での還元を可能にする点で極めて有意義である。

本研究では、マイクロ波プラズマを積極的に還元反応へ利用するという観点から、希土類元素の中でも熱力学的に極めて安定なSc₂O₃およびDy₂O₃を対象とし、その還元挙動を詳細に検討する。これにより、マイクロ波照射による低温還元機構の解明と、レアアース・レアメタル製錬への応用可能性を学術的に論じる。

2. マイクロ波磁場モードによるプラズマ

プラズマは溶接をはじめ多様な産業分野で利用されており、直流放電、容量性放電、誘導性放電、マイクロ波放電、ECRプラズマなど、さまざまな方式により気体または液体から生成・維持される。その中でも、マイクロ波励起プラズマは、化学反応に必要なラジカル生成効率の高さや、元素発光スペクトルの利用可能性から特に注目されている。レーザー光源、ECRを用いた半導体製造装置、ダイヤモンドCVD装置など