

早稲田大学大学院理工学研究科

# 博 士 論 文 概 要

## 論 文 題 目

Process Modelling Study of Imperial Smelting Furnace Operation  
I S F プロセスのモデリングに関する研究

申 請 者

丹 野 文 夫

F u m i o T A N N O

2003 年 5 月

Imperial Smelting Process (以下 I S P と記述する) は溶鋳炉を用いて亜鉛と鉛を同時に製錬するプロセスで、1960 年代にイギリスの Imperial Smelting 社によって、鉛溶鋳炉の発展形として開発された。Avonmouth 製錬所 (イギリス) でのパイロットプラント試験を経て、Swansea 製錬所 (イギリス) で最初の商業炉が稼働した。現在は 11ヶ国で 13 製錬所が操業しており、年間約百万トンの亜鉛と五十万トンの鉛 (各々、世界の新地金生産の 15% に相当) を生産している。I S P は従来不可能と言われてきた溶鋳炉 (以下 I S F と記述する) での亜鉛製錬を可能にした画期的な技術であり、生成亜鉛蒸気の効率的凝縮法や鉄還元との競合反応の制御等、学問的にも興味深いプロセス・技術である。しかしながら、従来の I S F に関する研究成果は、化学平衡論と操業経験から得られた知見がほとんどであり、今まで報告されている解析モデルは平衡論をベースとした部分収支モデルである。このモデルでは熱・化学保存帯の存在が必要であり、操業条件の変更に対応した解析が困難であり、I S F の体系的解析が十分に行うことはできない。鉄鋼溶鋳炉と同様に、I S P が更に改良・発展するためには、I S F の体系的解析と予測評価が可能となるプロセスシミュレーションモデルの開発が必要不可欠である。

本研究では、このような背景から、I S F の体系的解析を可能とするモデルの作成と活用を目的に、熱移動速度ならびに反応速度の微分収支解析シミュレーションモデルを構築し、その妥当性を検証した。更に、本モデルを用いて、羽口吹込等新しい操業態様や操業条件の変更が I S F に与える影響・効果について予測評価を実施し、I S F の今後の技術課題について解析・検討を加えた。

本論文は、全 7 章で構成されている。第 1 章では、過去の研究例の概略を示しながら、I S P の現在の技術レベルを明らかにすると共に問題点を抽出し、本研究の意義及び目的を示した。

第 2 章では熱移動速度、反応速度を組み込んだ I S F 解析シミュレーションモデルを構築し、その詳細について記述してある。本モデルは、反応形態の違いから炉頂部、シャフト部、炉床部の 3 部位に分割されている。炉頂部はチャージレベル上方の空間であり、トップエア、焼結鋳、コークスの装入、シャフト部からの炉頂部ガスの流入、

コンデンサーへのガスの排出があり、トップエアーと CO の燃焼反応による炉頂部ガスの加熱操作が行われる。定常状態での物質および熱収支計算を行い、炉頂部の放散熱とシャフト部との境界条件を求める。シャフト部はチャージレベルから羽口レベルまでの反応部分であり、CO による ZnO の揮発還元、Zn 蒸気の再酸化、PbO・酸化鉄の還元、コークスのソルーションロス反応等が起こる ISF の中心部である。これらの反応を気固向流接触反応として微分収支モデルを用いた 1 次元数学的解析モデルにより各種炉内状況の計算を行う。すなわち、ISF の高さ方向に分割した微小部分内で化学反応による物質移動および熱移動の速度を考慮して、物質および熱の収支式と圧力損失式を導出する。シャフト部上端の境界条件を与えて、これらの収支式を下に向かって連続的に解き、温度、反応率等の炉内プロセス変数の高さ方向分布を求める。シャフト部下端の計算結果を炉床部との境界条件とする。最後に炉床部では羽口からの熱風によるコークスの燃焼と ZnO の還元揮発が起こり、スラグの生成とスラグおよび粗 Pb の排出が行われる。シャフト部下端計算結果と導入熱風、排出粗 Pb、スラグの諸データを境界条件として定常状態での物質および熱収支計算を行い、炉床部の放散熱を算出する。炉床部における反応量は、炉頂部とシャフト部での反応を考慮し、ISF 全体の総括物質収支から求める。更に、実際の焼結鉱を使った還元実験を行い解析モデルに使用した各反応の反応速度式を検証した。

第 3 章では、第 2 章で構築した解析モデルに実操業データを代入し、シミュレーション計算を実施し、その妥当性を評価した。すなわち、解析モデルに八戸製錬(株)八戸製錬所の代表的な操業データを適用して、シャフト部での温度、流量、組成、反応率等の高さ方向分布を求めた。そのシミュレーション解析結果は、シャフト部での ZnO 反応率が 30%程度であること、放散熱の数値等、八戸製錬所における実操業解析結果ならびに操業実感と一致することが確認され、本モデルの妥当性が検証された。

第 4 章では、操業態様や操業条件を変更した場合、予測評価が可能となるような改良解析モデルを構築した。この改良モデルにて、コークス使用量の削減や Zn 生産量の増大等、操業成績改善の可能性を探

求した。この解析モデルの改良により、操業改善につながる予測評価が可能となった。例えばコークス反応性、装入原料粒子径、装入物高さ、送風量、酸素富化等の操業条件の変化を伴う解析を行った。その結果、コークス反応性は低いほどコークス使用量や Zn 生産量の改善がみられ、また、装入原料粒子径や装入物高さには最適値が存在する等の知見が得られた。更にこれら解析結果からシャフト部でのカーボンソリューションロス反応の進行が操業成績に悪影響を及ぼすことが判明した。

第 5 章では、第 4 章で得られた知見を基に、今後 I S P が取り組むべき課題達成の手段として、羽口からの粉コークスと粉コークス鉱石の吹込が有力であると考察し、その場合の解析結果を記述してある。その結果、酸素富化による炉床部温度補償対策を施した上で、羽口から粉コークスと粉鉱石を最適比率（粉鉱石/粉コークス = 1:2）で吹込ることにより、コークス使用量や Zn 生産量の向上に効果があるとともに、スラグ中 Zn 品位低減対策にも活用できることが判明し、課題達成の有力な手段であることを示した。

第 6 章では、第 5 章で得られた結果を基に、羽口吹込法を採用した I S P に代わる新しい製錬法を考案し、本解析モデルを用いた新製錬法の検討結果を記述してある。この新製錬法は従来の I S P に比較し、操業成績向上、原料の多様性、環境対応等、多くの改善の可能性があることが判明した。

第 7 章では、本研究で得られた結果を総括した。本研究の成果は、I S F の操業状況を正確にシミュレートできる解析モデルの構築、本解析モデルによる操業成績向上に繋がる操業改善案についての予測解析、等であり、このモデルの予測解析結果から羽口吹込が I S P の将来性の観点から今後取り組むべき課題達成の有力な手段であり、更に羽口吹込法による新製錬法が多くの可能性を持つことを示したことである。