

電磁流体解析による貯鉄設備の性能評価

Performance Estimation of Molten-iron Storage Equipment
with a Magnetohydrodynamics Calculation Scheme梅津 健司*
Kenji UMETSU富澤 安次
Yasuji TOMIZAWA明神 和久
Kazuhisa MYOJIN

抄 録

計算機は製鉄プロセス開発を通じて今や標準的にプロセスに適用されているが、我々は早い段階からこの適用に着手し、プロセス設備の改善を推し進めてきた。ここでは、その過程で用いた電磁流体解析手法を1998年に八幡製鉄所に導入された世界最大規模のインダクターを擁する貯鉄炉(IRB)に適用した例を詳述する。インダクターには2つの主機能があるが、内部を直接観測する手段はなく、性能評価が困難である。この困難を取り除き、性能評価に有効であることを計算例によって示す。計算の結果、インダクターの湯溝の状態によって、電力と溶鉄全体への熱交換との相関が変化するという新たな事実が判明した。

Abstract

Computation application to steelmaking processes now comes to be a conventional means through their developments. We started the application at the early stages and have been advancing it for improving equipment of the processes. Many an art of the computation also has been required and invented for the improvements. One of them, a magnetohydrodynamics calculation scheme, is described in this report, which is applied to a world-top-scale inductor on "Iron Reserve Barrel" (IRB), introduced in 1998 at Yawata. The inductor has two staple functions, but there is no means to observe directly the phenomena within it, thus estimation of the functions is difficult. The scheme is effective to diminish the difficulty, and its effectiveness is shown by example calculations. The results disclose a new fact that the correlation between the power and the heat transfer depends on the conditions of the inductor's channels.

1. 緒 言

製鉄業におけるコンピュータ化は主に3つの形で進められた。操業での設備の制御と保全上の監視、製品品質分析、そして設備設計と性能評価、である。前者2つについては本号の他の報告を参照して頂くこととし、本報告では3つめについて取り扱う。

新日鉄住金(株)の前身、新日本製鐵(株)は1980年代初頭から計算機による設備設計に取り組んできた。当時、計算機性能は現代と比べ格段に劣っていたため、現実の状況を模してモデルを解くことは不可能であった。モデルを玩具のような程度まで最小化して、辛うじて僅かに設備機能のエッセンスを抽出する程度で終始していた。今世紀に入ってから著しい計算機能力の進歩は設備設計や性能評価を

現実的に解くことを可能にした。本報告では上工程での大型設備、貯鉄炉、に付随するインダクターの性能を対象として評価を行う。

上工程の生産スケジュールにおいては常に機能的な溶鉄の貯蔵設備が求められてきた。世界的歴史的に導入されてきたものとしてはトービードカー、転炉、混鉄炉などがある。これらの中には保持時間帯の中でさらに溶鉄の成分調整を行うものもある。新日鉄住金の前身の1つ、新日本製鐵では八幡製鉄所に世界最大規模の溶鉄保持設備、貯鉄炉(以下IRBと略称)を1998年に導入した。これは溶鉄を蓄えるという機能にとどまらず、内部に装入されたスクラップ材を溶解させ、溶鉄増量の機能も備えている。溶解はIRBに付いている6基のインダクターがローレンツ力を生成して、加熱した溶鉄の流動を起こすことで実現される。

* 設備・保全技術センター システム制御技術部 主幹 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

本報告ではこれらの現象—電磁流体力学—のための1つの計算手法をIRBのインダクターに適用し、その結果とともに詳述する。本報告は著者論文¹⁾に基づき、再検討と分析によって得た新たな事実を含んでいる。

2. 貯鉄炉 (IRB) とインダクター

IRBの概略構造図を図1に示す。IRBは溶鉄受け口で取鍋から受鉄し、3つのスクラップ装入口から入れたスクラップをインダクターによる昇温で溶解して増量した後、4つのガイド付き台座 (pedestals) に載った状態で傾転させて、出鉄口 (spout) から取鍋に注湯する。有効貯鉄量は2000トンで、これにより、トービードカーの稼働台数を半分に削減している²⁾。

IRBにはインダクター6基が甲虫の脚部のように本体下部にあるスロートと呼ばれる部分に装着される。インダクターは個々に着脱および交換が可能で、図2に示すように複雑な構造を有する。図では対称性からインダクターが半分に分割された状態で表示されている。全体は鉄製ケースの中に耐火物が敷き詰められ、耐火物内部に中央部は太く両端が細い湯溝が設けられている。2つのコイルが巻き付

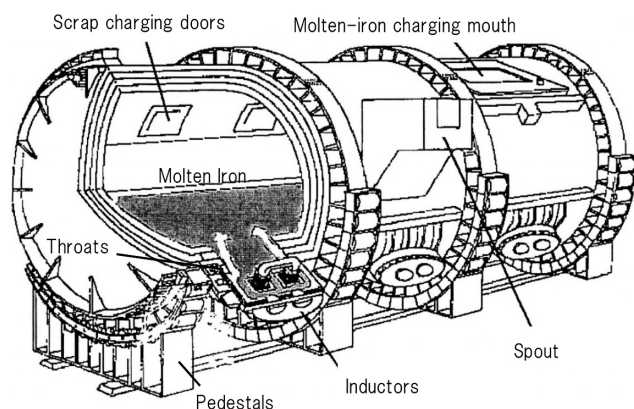


図1 貯鉄炉の構造
Construction of Iron Reserve Barrel (IRB)

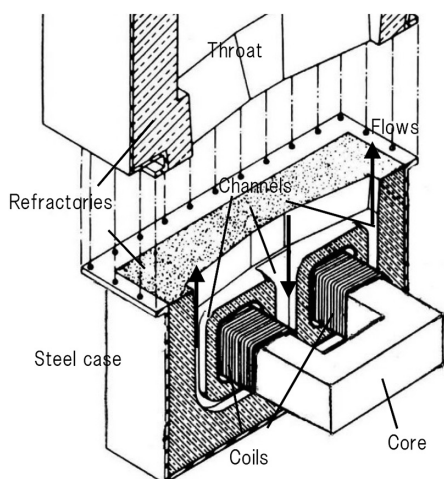


図2 インダクターの構造
Structure of an inductor

いた矩形鉄心がケースおよびこの湯溝と交鎖するようになっており、この交鎖によって湯溝に電流が誘起され、溶鉄を加熱する。インダクターの電気仕様は周波数60Hzで1基4.5MWの出力を有する。IRB全体では27MWと世界有数規模の加熱能力を誇る。

インダクターがどのような電磁力を生成し、IRB内の溶鉄との熱交換を行うかは解析結果の説明で詳細に行うが、ローレンツ力の分布の工夫によって、中央湯溝に溶鉄が入り、両端の細い湯溝から射出される溶鉄流が形成されてインダクターの電力が溶鉄全体の加熱に変換される仕組みになっている。よって、インダクターは加熱と流動生成を同時に行い、この2つが主要機能になる。

3. 電磁流体解析手法

IRBの性能の中心はインダクターであり、インダクター内部の現象は、電磁場、熱、流動がそれぞれ複雑に絡んでいる。それらをただ単純に組み合わせるだけでは正しい解は得られないので、各場の特性を考慮してモデル化を行う。

電磁場は電流が流れるところだけでなく、周囲の空間にも広がる。一方、熱や流動は物体のあるところだけが対象で、3つの場の時間的・空間的な変化の刻みも異なる。これらの時間的・空間的な差異が単一的なモデル化を阻む。そこで、時間的な差異と空間的な差異を見極めて場毎にモデル化を分けて検討したのち、統合させる。

まず、空間的な変化を見た場合、本例で分割の多さは流体場、電磁場、温度場の順になる。電磁気的には強磁性体である鉄製ケースも無視できず、湯溝以上の分割が要求される。一方、流体は乱流状態の部位が一般に多く、特に強い流動が見込まれる湯溝とその近傍で細くなる。熱はほぼ流体移動に付随する形で運ばれ、流体とは別に考慮が必要な対象はない。なお、鉄製ケースも誘導加熱されるが、もともと冷却水構造が採られており、実物も温度的に安定で熱解析対象にはしていない。

次に、時間的な変化を見た場合、変化の激しい順に、電磁場、流体、熱となる。インダクターの周波数は60Hzであり、高密度の溶鉄はこの変動に反応できない。熱移動も流動への付随が主体になるので、流動と同程度の変動となる。逆に流動が生じて電磁場の変動が遥かに速く、流体の領域も変化しないので、電磁場への影響は無視できる。したがって、電磁場の変動についてはその定常成分あるいは実効値成分だけを流動や熱移動に加えるだけで十分に現象を再現できる。さらに、温度上昇による物性変化については、もともと溶鉄が非常に高温で、インダクターによる温度上昇分の影響は微小である。

以上から、今回のインダクターの性能評価においては、図3に示すように、電磁場解析を行って得られたデータを、有限要素モデルのメッシュから流体解析の差分メッシュに空間補間して受け渡すことで解を得ている。

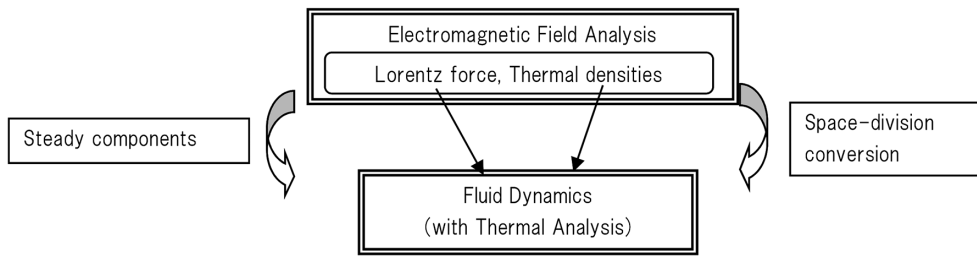


図3 電流体解析スキーム
Magnetohydrodynamics scheme

4. インダクターと溶銑の解析モデル

図2に示した全体の構造から、最初にインダクターの電磁場解析用のモデルを図4のように作成した。耐火物は表示していない。モデルは実物の図面に基づいて作成されている。図5は図4から鉄製ケースを除いたもので、コイルの配置が明確に見てとれる。誘導電流は湯溝(channels)を含むループ部にしか誘起されないので、スロート部全体まで扱う必要はない。

なお、鉄心とは別に鉄製ケースには普通鋼の非線形磁気特性を考慮している。湯溝は左右の断面積は同じで、中央

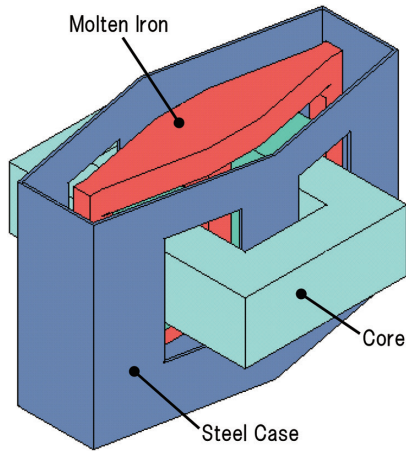


図4 インダクターの電磁場解析モデル
Electromagnetic field analysis model of an inductor

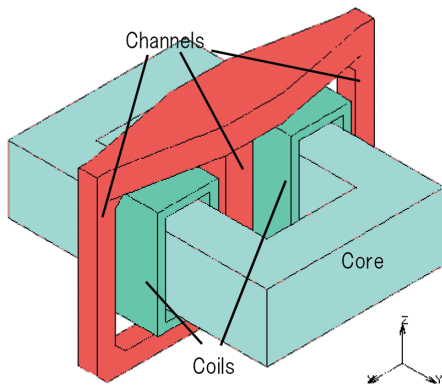


図5 湯溝と電磁石
Channels and an electromagnet

湯溝の断面積はその2倍になっている。流体解析のモデルは図6である。スロート部も作り込み、さらに溶銑量は少ないながら炉内を模擬した領域を設けている。

解析全体のスキームの物理的考察は前節で述べたが、具体的に計算するには各場の解析ソフトウェアの機能選択が解の妥当性を左右する。電磁場解析は新日鐵住金独自で開発したソフトウェアで有限要素法と時間発展にjω法を用いている³⁾。流体解析は市販ソフトウェアを流用しており、時間・空間ともに差分法で流体には自由表面を設定している。解析に用いた溶銑の物性値を論文¹⁾より表1に再掲する。

5. 解析結果

図7は電磁場解析の結果から、湯溝上部のローレンツ力分布を俯瞰したものである。中央部のベクトルが小さく、

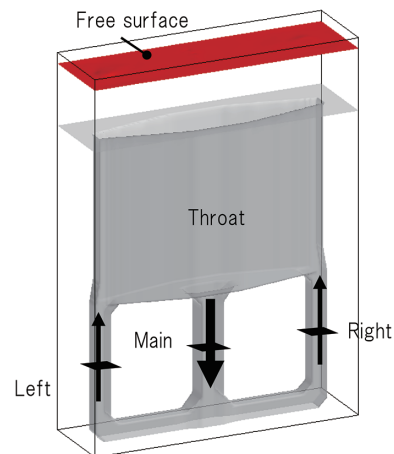


図6 流体解析モデル
Fluid dynamics model

表1 溶銑の物質定数
Material constants of molten iron

Electric conductivity	7.22×10^5 [S/m]
Thermal conductivity	25.1 [W/m/K]
Specific heat	837 [J/kg/K]
Density	6957 [kg/m ³]
Viscosity	4.73×10^{-3} [Pa·s]
Surface tension	1.58 [N/m]
Expansion coefficient	1.25×10^{-4} [1/K]

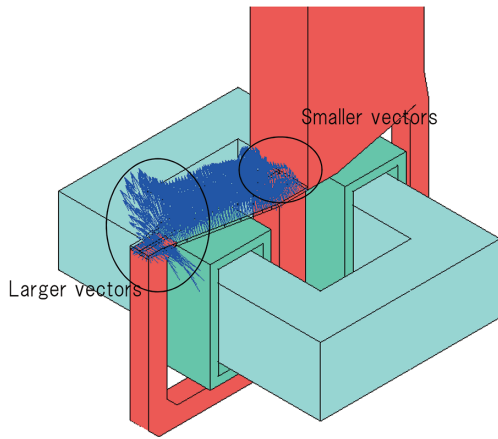


図7 湯溝入口部のローレンツ力分布
Lorentz force distribution at gateways of channels

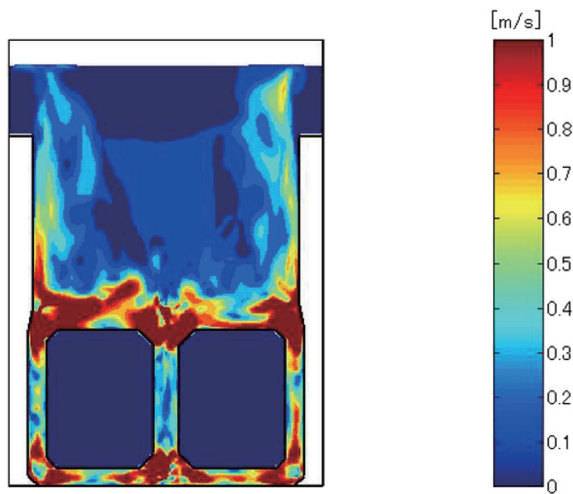


図8 中央断面での流速分布 (at 11.5 sec)
Flow speed distribution on the central cross section

端部のベクトルが大きいのがわかる。このベクトルの勾配ができる原因は、図5で中央の湯溝が太く端部が細いことと、湯溝入口が中央部で大きい菱形になっていることで電流密度に変化を与えていることによる。このベクトルの勾配があることで、端部には圧倒的に強い流動ができて、中央に周り込む回転ベクトルを生成し、溶銑を駆動する。

実際に流動がどうなるか、次の流体解析では大きく2つの視点で行った。1つは熱交換に十分な速い流動が生成されるか、もう1つは大きな旋回流が生成されて湯溝からスロート上部までの流体を駆動できるかである。図8は中央断面での流速分布を示している。印加して11.5秒で、すでに両端から上がった流動が自由表面に達し、湯面変形が起きている。流速も1m/sを優に越えている領域もいくつも見受けられ、重い溶銑の流動としては速い。

こうして高速流動が生成されることは確認できたが、流動が局所的に閉じると結果的に熱移動が進まない。溶銑が湯溝を通過してインダクターで加熱され、スロートに抜けていくかを確認するため、スロート部全体に1000個の粒子を均質に配置して挙動を調べた(図9)。粒子は単にマー

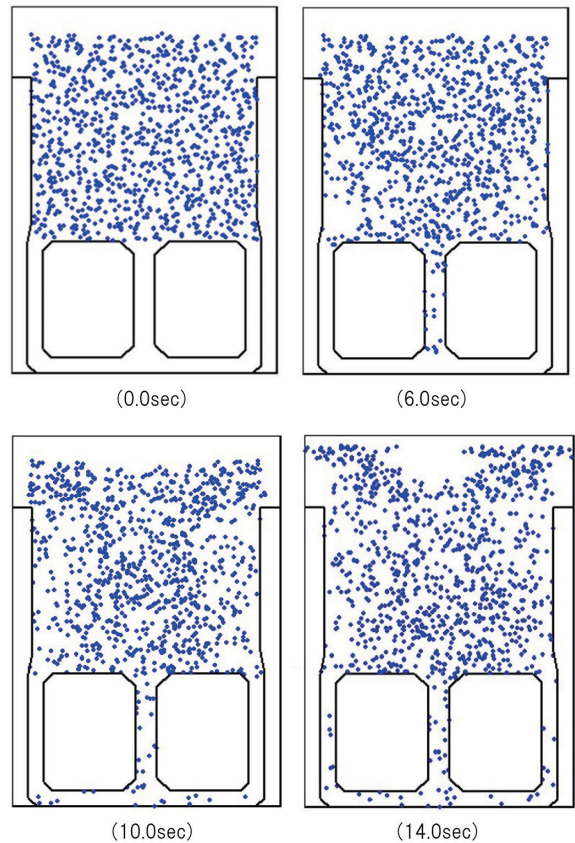


図9 溶銑全体の粒子分布
Particle distribution in the molten iron

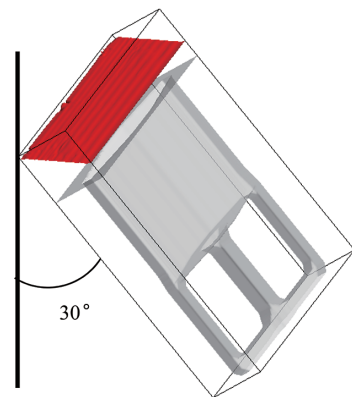


図10 熱・重力効果用モデル
Model for thermal and gravitational effects

カーで、浮上や沈下が起きないように、物性を持たせていない(いわゆる Lagrange 描像)。図から、中央湯溝から粒子群が入り、両端から上部へ抜けていくのがわかる。ローレンツ力を印加して14秒で湯溝を通過し、スロート内全体での回転流が2つ生成できているのが見てとれる。以上の解析ではローレンツ力のみを取り込んでの実行である。

さらに現実性を上げるため、IRB本体にインダクターが装着されている状態に近づけるべく、図10のように鉛直方向から30°傾け、さらに誘導電流による発熱をも加えて実施した。

図11が得られた流速分布で、より短時間に自由表面に

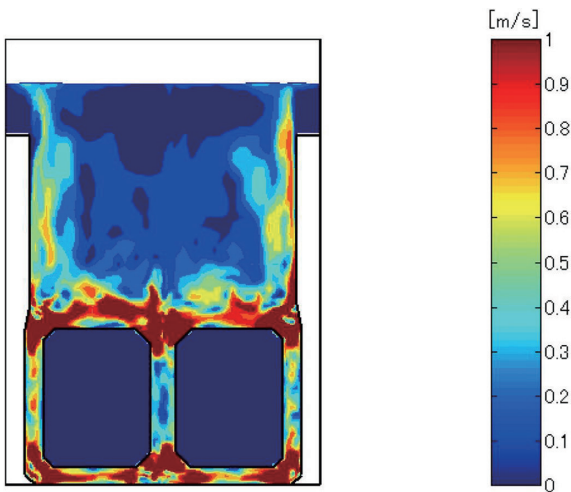


図 11 中央断面での流速分布 (at 9.5sec)
Flow speed distribution on the central cross section

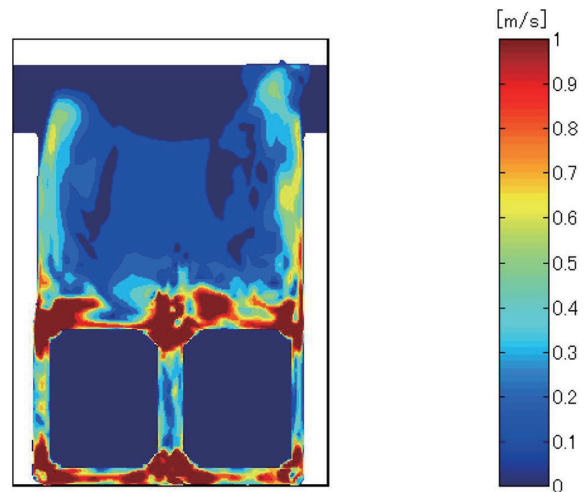


図 13 中央断面での流速分布 (at 11.0sec)
Flow speed distribution on the central cross section

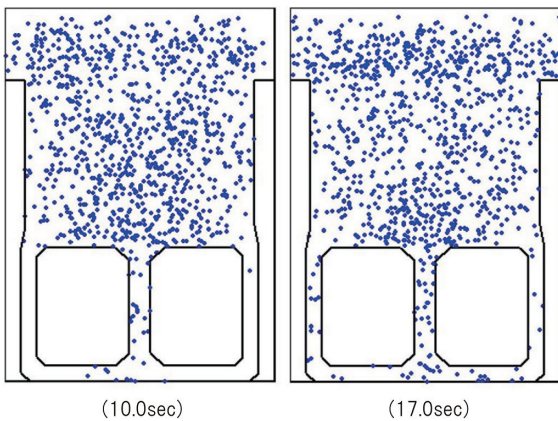


図 12 溶銑全体の粒子分布
Particle distribution in the molten iron

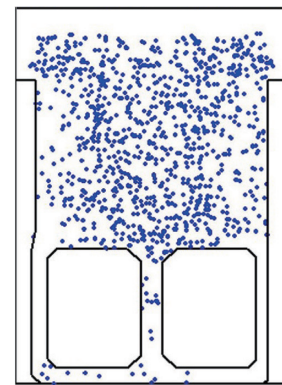


図 14 溶銑全体の粒子分布 (at 9.0sec)
Particle distribution in the molten iron

達している。傾転された状態のため、重力による圧力が弱まり、熱膨張による浮上効果が付加された結果である。先と同じく、粒子の動きも調べた(図12)。粒子の挙動は、流動とは逆に湯溝を通過する時間が伸びている。スロート内での流動生成は容易なもの、湯溝内部への流入は逆に難しくなっている。水平に近づけたことで熱膨張による浮上効果が強くなり、全体的な熱交換が弱くなっている。

さらに、湯溝の一部が地金成長などで細く閉塞的になった場合の解析も行っている。図6のモデルで右側を細くしたのがそれである。この場合の流速分布および粒子分布をそれぞれ図13、図14に示す。流速については細くした湯溝側が速くなっており、それにより、細い湯溝を通過する流量は依然保持されているかのように思えるが、実際には粒子の動きは遅い。

3本の湯溝の太さの組合せを変えて、それらを通る溶銑量を調べたところ、湯溝間の通過量は3本の間で保存されていることは既に我々の論文にて報告済みで、それを本報告用にまとめ直したのが表2である。この表からは湯溝が閉塞的になると、溶銑通過量が減ることもわかる。し

表 2 湯溝断面の単位時間あたりの溶銑通過量
Iron-volume transferring speed through each channel

Conditions	[m ³ /s]		
	Left	Main	Right
Normal	4.28×10^{-3}	8.65×10^{-3}	4.38×10^{-3}
Thermal & gravitational	4.12	8.88	4.78
Thinner channel (right)	5.57	9.23	3.65

たがって、スロート部の流速増大とは連動しておらず、この場合も、スロート部での流動と湯溝を通る溶銑量との相関は弱まり、むしろ分離傾向で、インダクターの電力が熱交換される割合は低下することになる。即ち“出力を十分出しているも、湯溝の健全性が損なわれていると溶銑への熱交換率が下がる”ということになる。湯溝が細い場合、電流密度が上がり、湯溝内溶銑の発熱量は急激に増すので、それを排出してくれる溶銑の量が減ることは耐火物の損傷を招く可能性が高まり、望ましくない。

以上より、インダクターのローレンツ力による流動生成能力は常に安定して得られることがわかったと同時に、一見、当然のように思われていた“スロート部流動 \propto 湯溝内の溶銑通過量”という関係は強く維持されているわけでは

ないこともわかった。これらにより、インダクターの流動生成能力は高安定だが、湯溝の状態に依存して、スロート部流動すなわち炉内熱交換とインダクターの湯溝内流動生成は分離的となり、インダクターの耐火物保全上は望ましくないという、重要で新たな事実が明らかになった。

6. 結 言

本報告は以前に出版した著者論文⁷⁾に基づき、論文で省いたものについても再検討、分析した結果、新たに判明した内容について述べたものである。

電磁流体解析の1スキームを説明し、それを世界規模の貯銑炉 IRB のインダクター性能評価に用いた例を紹介した。インダクターとしては単に安定して出力を出してさえいれば操業としては問題ないとの認識は通常は正しいといえる。しかし、インダクター内部の状況が変わっていると、さらには炉の傾転による重力の変化によっても、電力安定の陰に隠れてしまった熱変換効率の低下、ひいては耐火物寿命への影響への懸念があることが新たに判明したことは、数値解析による性能評価や状態監視が有用であることの証左である。

なお、ここで紹介した電磁流体解析のスキームをほぼそのまま適用した他の例として、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) との国家プロジェクトの電磁铸造モールド (EMC)⁴⁾がある。また、数 Hz 以下の低周波の電磁攪

拌装置の開発では、溶鋼の流動への電磁場の時間変化の影響が無視できないため、流体解析にローレンツ力の時間変化を考慮している^{5,6)}。さらに、粒子の挙動解析を行った結果を示したが、タンディッシュ溶湯内の非金属介在物類の物理的実在としての挙動を、より高度に求めた例⁷⁾もある。

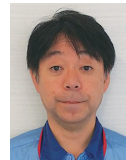
計算機能力の向上により、現在では現実的な数値解析が種々可能で、性能評価に限らず、装置設計でも標準的に活用されるようになっており、場合によっては装置がトラブルを起こした場合の原因究明にも援用される。本報告の例に限っても、試験のみでその性能を見極めようとしても限界があると思われる、本報告の内容の有用性が認識されるものと信ずる。

参考文献

- 1) Umetsu, K. et al.: The 5th International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials (EPM2006). ISIJ. 2006, p. 485
および会議での口頭発表内容
- 2) 楠伸太郎 ほか: 新日鉄技報. (394), 111 (2012)
- 3) 梅津健司 ほか: 新日鉄技報. (357), 11 (1995)
- 4) 谷雅弘 ほか: 新日鉄技報. (394), 62 (2012)
- 5) 横田健 ほか: 新日鉄技報. (379), 59 (2003)
- 6) 三村義人 ほか: 新日鉄技報. (394), 75 (2012)
- 7) Wang, Q. et al.: ISIJ International. 54 (12), 2796 (2014)



梅津健司 Kenji UMETSU
設備・保全技術センター
システム制御技術部 主幹
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



明神和久 Kazuhisa MYOJIN
日鉄住金テックスエンジ(株)
電計事業本部 電計エンジ1部 マネジャー



富澤安次 Yasuji TOMIZAWA
日鉄住金テックスエンジ(株)
機械事業本部 技術部 マネジャー