

強磁場を利用した高効率磁気加熱システムの開発

超電導マグネットによる産業機器の高効率化

Development of a highly efficient magnetic heating system by applying a strong magnetic field

Enhancement of the efficiency in industrial equipment by superconducting magnets

(電力技術研究所 流通G 超電導T)

複雑な形状のアルミ部品は、金型鑄造（ダイキャスト）によって製作され、その工程では高効率な材料溶解技術が求められている。直流磁界内でアルミ材を回転させると発熱するという電磁誘導を用いて加熱する直流磁気加熱方式は、超電導マグネットによる強磁界を採用することでその加熱効率をさらに上昇させ、装置の電力損失の低減が期待できる。本稿では超電導マグネットを用いたアルミ溶解装置の実現性について報告する。

(Superconductivity Team, Power System Group, Electric Power Research and Development Center)

The complicated shaped aluminum components are produced with die-casting and highly efficient material melting method is required. The characteristic electromagnetic induction heating using the direct current magnetic field — when an aluminum material is rotated in a direct current magnetic field, heat is generated in the material — is expected to enhance the heating efficiency more and reduce the electricity loss of the equipment by adopting strong magnetic field generated by superconductive magnets. This paper reports the feasibility of an aluminum melting equipment using superconductive magnets.

1 開発の背景

アルミダイキャストは、複雑な三次元構造を高い寸法精度で短時間に大量に生産することができるため、自動車のエンジン、トランスミッション等多くの部品製作に使用されており、部品の軽量化のため、鉄に代わってさらに広範囲な適用が行われつつある。アルミダイキャストは大型工場の場合、中央集中大型アルミ溶解炉（大量溶解と保持）→個別アルミ溶湯保持炉（溶湯の分配と保持）→金型鑄造設備、という流れで加工される。この工程では、アルミ溶湯の運搬・保持炉での放熱によるエネルギーロスや、運搬する際の温度低下に備えた過剰加熱時のドロス（過剰加熱によるアルミ酸化物）の増大による強度低下が問題になっている。もし、アルミ材料を「必要な時に」、「必要な量だけ」、「必要な時間内で」溶解しダイキャストマシンへ供給する「ジャストインタイム方式」の装置が実現すれば、溶湯装置とダイキャストマシンを直結することができ、運搬工程・温度保持炉を廃止してエネルギー効率を大幅に向上できる。また、運搬工程の廃止による安全性の向上や過剰な加熱を排除することによるドロスの発生防止も期待できる。そのためには、アルミの高速溶解技術が必要不可欠であるが、現在、アルミ材料の溶解方法としてはガス加熱が主流であり、主にアルミビレット（材料塊）表面からの加熱となるため材料内部の温度上昇が遅く高速溶解は不可能である。

本研究では、磁場中で導電性材料を回転させることにより材料を加熱する磁気過熱システムに、超電導マグネットを用いた高磁場を適用することで、銅損を減じ溶解時間を短縮してジャストインタイム方式への変更が可能となるか検討を行った。

2 技術的原理

一般的な誘導加熱は、コイル中央に被加熱物を置き、コイルに交流電流を流すことで渦電流を発生させ加熱する。この渦電流による抵抗熱で金属を加熱する方法が誘導加熱（IH）と呼ばれるもので、その加熱電力 W は

$$W \propto f^2 B^2 / \sigma \quad (f: \text{周波数}, B: \text{磁束密度}, \sigma: \text{導電率})$$

となる。被加熱物を効率的に加熱するには f 、 B を上げる必要があるが、周波数を上げると表皮効果により電流はコイル導体の表面を流れるようになりコイルの銅損が増えてしまう。また、 B を増やすには電流を増やす必要があり、さらに銅損が増えてしまうという欠点がある。

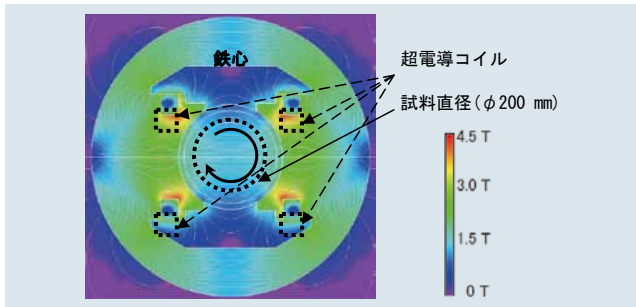
本研究は、直流磁界内でアルミ材を回転させることによって、一般的な誘導加熱と同様に渦電流による抵抗熱で金属を加熱する方法であり、回転数が周波数 f に相当する。超電導マグネットの使用は、

- ① 電気抵抗零のため直流では自己発熱や銅損がない。
- ② 高磁界を発生することができる。

という特長がある。これらを利用することで、誘導加熱装置における課題である「高磁界を得つつ、コイルの損失を少なくする」を満たすことができると考えられる。また従来の誘導加熱では機器の効率は50～60%であるのに対し、この方式では損失のほとんどが材料を回転させるモータによるもののみであるため、90%以上の効率が期待される。

3 温度解析

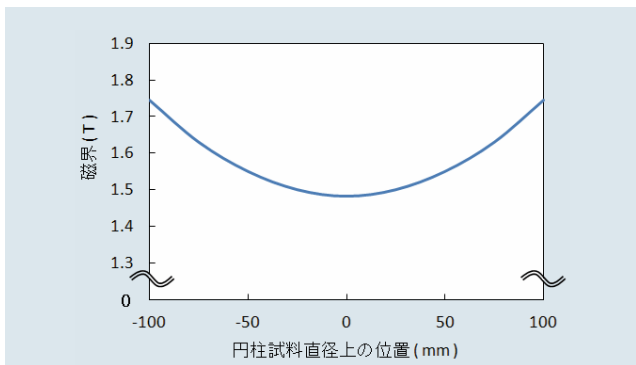
超電導マグネットの磁場分布を解析し、それに基づいてアルミ円柱試料の温度解析を行った。第1図は超電導コイルを含む周辺の磁場強度分布の解析図である。この磁場分布に基づき、円柱試料の直径を200mmとして温度解析を行った。第2図に $x=0$ を円柱の中心、 $x=\pm 100$ を円



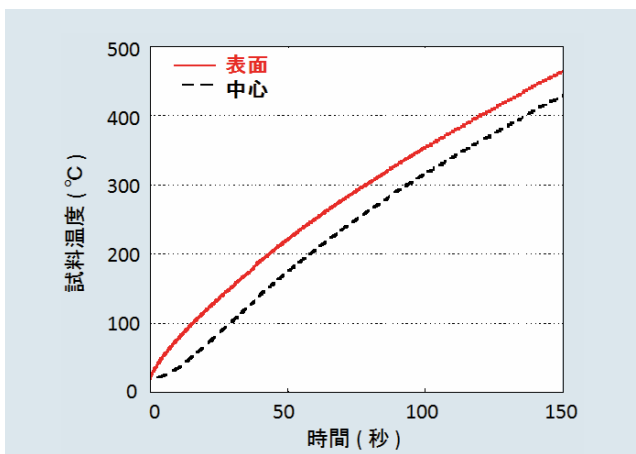
第1図 超電導コイル周辺の磁場強度分布解析図

柱表面として試料に印加される磁場分布の解析結果を示す。円柱表面で1.7T (T:テスラ) 強、中心で1.5T程度の磁場となった。円柱試料の回転数を100rpmとしたときの試料の温度上昇の解析結果を第3図に示す。試料表面と中心に温度差が生じるが、順調な温度上昇が得られるという結果であった。先述のように加熱電力は回転数の2乗に比例するので、回転数を増加させることによって短時間でアルミの溶融温度まで加熱することが可能となる。

次に、超電導線材の通電特性は磁界によって低下するので、解析に適用した磁界が超電導コイルで達成できるかを検証した。第1図に示したようにコイル巻線には最大で1.7T強の磁界が作用する。超電導特性はコイル温度が低いほど、臨界電流値が大きくなり磁場特性も向上するため、高温超電導線材であれば -240℃程度で、解析に用いた磁界を発生するためのコイル電流を流すことが十分可能である。



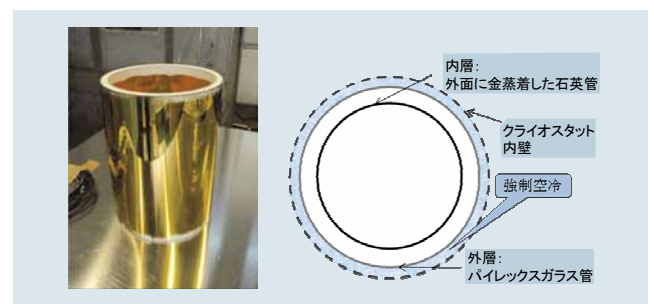
第2図 円柱試料に印加される磁場分布の解析結果



第3図 アルミ円柱試料の温度上昇解析結果

4 試料保持部の断熱

超電導コイルは断熱冷却容器 (クライオスタット) 内に格納されており、-240℃程度に冷却されている。一方、アルミの融点は660℃、溶湯では750～800℃程度になり、超電導コイルとの間に1,000℃程度の温度差が生じる。クライオスタットの外壁温度が上昇すると、コイルへの入熱が大きくなり、超電導特性の低下や冷却設備への負荷が増大するため、アルミ試料保持部の熱がクライオスタットに影響を及ぼさないような断熱が必要である。しかし、断熱層が厚くなると試料に印加される磁界が減衰するため、断熱層を極力薄くする必要がある。そこで、研究用の電気炉等で使用されている赤外線反射機構のゴールドイメージ管を強制冷却する構造を採用した。第4図に示すように、ゴールドイメージ管は内層が石英管、外層がパイレックスガラス管の2重構造で、内層である石英管の外面に金 (Au) が1μm以下の厚さでコーティングされ、金薄膜により赤外域の光を95%以上反射して輻射による放熱を防止できる。この断熱構造を評価するため、ヒータで管内を800℃に加熱したところ、外層は200℃という結果を得た。さらに、外層の放熱対策としてゴールドイメージ管外層表面を強制空冷することで、クライオスタットとゴールドイメージ管の間の空隙が10mmでもクライオスタット外壁を室温に維持できることを確認した。この断熱構造の厚さであれば、温度解析に用いた磁界を試料に印加することが可能である。



第4図 ゴールドイメージ管および構造

5 今後の展開

超電導コイルを利用した高効率磁気加熱技術が、アルミの溶解に適用可能かどうかを確認するため、解析や要素技術の検討を行い、高温超電導コイルと鉄心を組み合わせた磁気回路で発生する磁界によって、アルミの短時間溶解が可能という結果が得られた。また、超電導コイルを適用するために必要な断熱技術は、輻射による放熱を抑制するゴールドイメージ管の採用で解決できるという結果を得た。今後は、解析に基づき磁気回路の詳細設計を行い、アルミ溶解試験を行う予定である。



執筆者 / 渡部智則