

論文名：高温超電導マグネットを用いた直流誘導加熱式アルミビレット加熱装置の実用化の研究（要約）

新潟大学大学院自然科学研究科

氏名 伊東 徹也

本論文では、カーボンニュートラルの実現に向け、非鉄金属の加熱効率向上に大きく貢献できる可能性をもつ、高温超電導（HTS）マグネットを用いた直流誘導加熱式アルミビレット加熱装置の実用化に向けた研究開発の成果を体系的にまとめた。本論文は以下の 7 章から構成され、その概要は以下の通りである。

第 1 章では、直流誘導加熱式アルミビレット加熱装置の研究開発背景について、産業界の省エネルギー化の流れや、アルミの電気加熱に対する課題、先行研究の内容などを含めてまとめるとともに、本研究の課題について述べた。

第 2 章では、本研究開発で製作する直流誘導加熱式アルミビレット加熱実証装置の全体構想、及び各構成要素の研究開発目標設定についてまとめた。本研究開発では、アルミ押出事業者の助言を基に、装置全体の目標を検討し、呼び径 6 インチ（直径 155 mm）、長さ 500 mm のアルミビレットを 90 秒サイクルで 20℃から平均 500℃まで加熱することを装置の目標とした。その後、この目標を実現するための検討過程について述べた。検討の結果、実証装置の所要加熱出力を 400 kW、回転速度を 900 min⁻¹、アルミビレット把持部の押付力を 500 kN、アルミビレット加熱領域中心磁場を 1 T 以上と定めた。

第 3 章では、HTS マグネットの全体構想から製作・評価について述べた。全体構想では、HTS 線材の使用量を節約しつつ所望の強磁場を生成し、漏れ磁場も抑制するという要求に対し、HTS コイルを巻き付けた磁極鉄心部分を継鉄から分離してクライオスタット内で極低温に冷却し、継鉄は常温に設置するという新規構造のマグネットを考案した。このマグネットでは、磁極鉄心部分が継鉄から分離してクライオスタット内に収容されるため、この部分に作用する電磁力の制御が重要な課題であったが、磁極鉄心を凸型に成形し、段差部に HTS コイルを配置することで磁極鉄心と HTS コイルに作用する力が逆向きとなり、各部寸法の調整によりこの大きさを同程度にできることを見出し、HTS マグネットを完成させた。製作した HTS マグネットについて通電評価を実施し、設計通りの磁場を発生することを確認した。また、過電流試験により定格電流の 1.5 倍である 300 A までの通電を問題なく実施し、更なる HTS 線材の削減の可能性を得た。この HTS マグネットの特徴である HTS コイル鉄心部の電磁力バランスについては、クライオスタットに作用する力の向きを共通台板に作用する力を測定することで確認した。その結果、設計通り HTS コイル鉄心部に作用する力がバランスできていることを確認し、本研究で考案した新規 HTS マグネットの構造が成立することを示した。

第 4 章では、アルミビレット把持部及びアルミビレット駆動部の設計・開発について述

べた。アルミビレット把持部は、設計通り約 500 kN の押付力で目的の伝達トルクを得ることができたが、過大な機械損が生じること、及び加熱によるアルミビレット強度低下に対し所定加熱時間内に必要なパワーを投入できないという検討結果となった。そのため、最終的にチャック面にセレーション加工を施す対策を講じ、約 100 kN の押付力で十分な伝達トルクを得られるチャックを実現した。駆動部については、当初独立して設ける予定としていたスラスト軸受を電動機に組み込むこと、及び電動機の主軸に直接チャックを組み付ける構造としたことで、全長短縮を実現した。加熱制御部については、本装置成立のために必要不可欠なアルミビレット材料強度の温度特性を実測し、その結果を加熱制御に反映させた。製作したアルミビレット把持部を HTS マグネットと組合せて低出力での加熱試験を実施し、加熱に伴うアルミビレットの伸びに対し、開発した把持機構が適切に作動することを確認した。

第 5 章では、400 kW 級アルミビレット実証装置の概要及び実証装置により実施した実用化に向けた各種検証結果について述べた。実証装置での評価では、まず、呼び径 6 インチ、長さ 500 mm のアルミビレットに対し 400 kW 以上の加熱パワーを投入可能なことを示し、次に、アルミビレット加熱運転中のトルク特性を電動機入力から推定し、FEM 解析結果と合わせてその特性を明らかにした。装置開発において重要な情報である加熱中のアルミビレット内部温度推移について、アルミビレット内部に熱電対取り付け、回転軸上に計測器を取り付けて測定することを考案し、これを実現した。加熱中の投入電力及び温度測定結果を基に、加熱処理 1 サイクルでの加熱効率を 73.1%と算定した。高周波誘導加熱式の加熱効率が約 50%であることから、これと比較して 30%以上のエネルギー削減を実現できることを示した。装置の健全性については、連続 90 本の繰り返し加熱試験を実施し、HTS コイル部の温度、ひずみ、加熱パワーの測定結果から、連続加熱運転により装置の健全性が損なわれないことを示した。以上の結果より、新たに考案した HTS マグネットを搭載した直流誘導加熱式アルミビレット加熱装置は、実用に十分耐えうる基本性能を有することを示した。

第 6 章では、本装置で取り扱う強磁場が人体や作業員が携行する可能性がある物品、製品に組み込まれる制御機器類に及ぼす影響について検討した。まず、文献から影響の内容及び基準値を調査した。その結果、作業員が近接する範囲及び制御機器組み込み部位において、磁場が 0.5 mT 以下であれば影響がないことが分かった。また、FEM 解析及び実証装置による磁場測定により、本装置の作業員接近範囲における漏れ磁場は 0.5 mT 以下であることを確認し、本装置が安全であることを示した。

第 7 章では、全体の総括を行うとともに、今後の展望をまとめた。

以上の通り、本研究では新しい構造の HTS マグネットを開発し、それを搭載した 400 kW 級直流誘導加熱式アルミビレット加熱実証装置の研究開発を通じ、直流誘導加熱装置実用化に向けた基盤技術を構築した。本研究で得られた成果は、直流誘導加熱式アルミビレット加熱装置の実用化を大きく加速させるものであると考える。