

別記様式第 10 号（第 8 関係）

博士論文の要旨及び審査結果の要旨	
氏名	伊東 徹也
学位	博士（工学）
学位記番号	新大院博（工）第 542 号
学位授与の日付	令和 5 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
博士論文名	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
論文審査委員	主査 教授・福井 聡 副査 教授・加藤 景三 副査 教授・小椋 一夫 副査 准教授・菅原 晃 副査 准教授・小川 純
<p>博士論文の要旨</p> <p>カーボンニュートラルに向け、各産業分野においてエネルギー消費量の削減や化石燃料から再生可能エネルギーへのエネルギー源の転換が図られている。アルミ材料の熱間加工の一つであるアルミ押出加工においても、アルミ加熱工程において多くのエネルギーを消費している。アルミ押出加工とは、アルミビレットと呼ばれる円柱状のアルミ塊を約 450℃前後に加熱し、プレス機でダイスと呼ばれる金型を通して押し出すことで同一断面形状の長尺製品を製造する加工であり、建材や電気部材、自動車部品の製造などに幅広く使用されている。現在アルミビレットの加熱には誘導加熱が多く用いられているが、アルミは非磁性で低抵抗であるため、誘導加熱により効率よく加熱することができず、加熱効率は 50 %程度に留まり、加熱速度も遅い。誘導加熱の加熱パワーは周波数と磁場強度のそれぞれ 2 乗に比例する。周波数を高くすると表皮効果により効率が低下する。磁場強度を強めるためにコイルの電流を大きくした場合、コイルの銅損が大きくなってしまふ。このため、現状の誘導加熱では加熱パワーの投入に制約があり、加熱スピードを高めることが困難である。よって、アルミビレットを高効率化かつ高速で加熱できる加熱法の開発が期待されている。本研究では、高温超電導 (HTS) マグネットを利用した直流誘導加熱装置の実用化に向けた技術開発を行うことを目的とし、各要素 (磁場発生用 HTS マグネット、アルミビレットを回転させるための回転駆動機構、アルミビレットに適切な回転トルクを伝達するための把持機構、加熱制御を行う制御部) の技術開発を行った。装置の性能目標を、呼称径 6 インチ・長さ 500 mm のアルミビレットを室温から 500 °C まで 90 秒サイクルで加熱できる出力 400 kW 級と定めた。そして、この性能目標を実現するための全体設計を行い、各構成要素に対する数値目標に展開し、要素技術開発を進めた。</p> <p>磁場発生用 HTS マグネットの開発では、アルミビレットの加熱に必要な磁場を確保しつつも、HTS 線材の使用量を低減するために、鉄心の磁極部に直接 HTS 線材を巻き付け、その部分を継鉄から分離して低温容器内に収容するという新規構造のマグネットを考案した。これにより、起磁力の有効利用、コイルの小型化、冷却の簡便性という種々のメリットを並立させることが可能になった。また、磁極鉄心を凸型形状とし、段差部にコイルを配置して各部の寸法を調整することにより、コイルに作用する電磁力と磁極鉄心に作用する電磁力を相殺できることを見出し、電磁力を支える構造部材を大幅に削減可能にした。HTS マグネット部は、アルミビレットの全長に合わせた角丸長方形コイルを対向配置し、アルミビレット中心部磁場が 1 T 以上となる</p>	

ように設計した。低温容器は、このマグネット構造実現のために L 形とした。実用条件における評価により、所望の磁場を得られること、設計通り磁極鉄心部に作用する電磁力が相殺できていることを確認した。回転駆動部は、本装置に合わせて新たに 400 kW の電動機を設計、製作した。把持機構部及び加熱制御部は、加熱に伴い熱膨張及び強度が低下するアルミビレットを適切に把持し、必要なパワー(トルク)を伝達するために必要な押付力やチャック面形状の検討を行うとともに、高温アルミの機械的物性を実測し、そのデータを加熱制御に反映させた。

これらの要素技術を統合して 400 kW 級の実証装置を製作し、各種実験により呼称径 6 インチ・長さ 500 mm のアルミビレットに 400 kW の加熱パワーが投入できること、把持機構が計画通り機能することなどの基本性能が発揮できることを確認した。加熱中の投入電力及びビレット温度測定により、加熱に伴う消費電力が従来の誘導加熱に比べ 30 %以上削減できていることを示した。更に、加熱運転に伴い HTS コイルの健全性が損なわれないことを連続 90 本の繰り返し加熱試験により確認した。また、実用化に向けた重要な検討事項として、本装置が強磁場を取り扱うことに対する安全面の評価を行い、安全面において問題ないことを示した。

#### 審査結果の要旨

アルミ材料の押出し加工におけるアルミビレットの加熱技術において、アルミビレットの高効率化・高速加熱が可能なブレークスルーとなる技術の開発が切望されている。本論文は、金属熱間塑性加工プロセスの省 CO2 化、省エネルギー化及び生産性向上を目的として、アルミ押出し加工プロセス向けの 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証装置開発を行い、当該装置の実用化に向けた基盤技術の研究開発の成果を纏めたものである。線材量を削減しつつ、所望の磁場を生成する新規構造のマグネットの開発、強磁場中でアルミビレットを確実に把持し回転させる把持・回転機構、アルミビレットの温度上昇による強度変化に対応した制御機構などの要素技術の開発を着実に進め、出力 400 kW 級の実証装置の開発を行い、実用条件を想定した各種評価を通じて、アルミビレット押出しプロセスへの実装に耐えうる十分な性能を発揮できることを示した。本論文に示された研究成果は、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のための技術基盤の確立に対して、大きな工学的寄与を与えるものであるとともに、本装置の社会実装を大きく加速させることができる。

以上のように、本研究は独創性と新規性が認められるとともに、その工学的な発展にも大いに寄与するものである。よって、本論文は博士(工学)の論文として十分であることを認定した。