

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04347

研究課題名（和文）高温超伝導アルミ高速溶解装置のための高安定・高信頼HTSコイル技術の基礎研究

研究課題名（英文）Study on HTS Coil with High Stability and Robustness for High Speed Aluminum Metal Melting Devices

研究代表者

福井 聡 (Satoshi, Fukui)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：70293199

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、申請者が提案するHTSコイルを用いた回転型アルミ誘導加熱装置の実用化に向けて、その最重要要素であるHTSコイルシステムに要求される高安定性・高運転信頼性を得るために、提案する集合導体を用いた無絶縁コイル方式の有用性を検証するとともに、HTSコイルを用いた誘導加熱装置可能な実用コイルシステムを例証することを目的とする。小型コイルによる局所的常伝導転移時の通電特性を実験・解析の両面から検証した。その結果、本手法の非円形コイルへの適用が可能であることを示した。また、市販ベースの線材を利用するという条件下で、実用装置に適用可能なHTSコイルシステムの開発及び性能評価を行うことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、市販ベースの線材と一般的な冷却システムの利用という条件下で、HTSコイルを用いた誘導加熱装置に適用可能な実用コイルシステムの開発及び性能評価を行うことができた。本成果は、一般の産業応用HTS機器に広く適用可能なものであり、HTS応用機器の実用化・普及に大きく貢献できると期待される。

研究成果の概要（英文）：The first purpose of this study is to verify the usefulness of the proposed no-insulation coil system using a parallel HTS tape conductor to obtain the high stability and high operational reliability required for the HTS coil system, which is the most important element for the practical application of the aluminum induction heating system using HTS coils. The second purpose of this study is to demonstrate a coil system that can be used in a practical induction heating system using HTS coils. The local normal transition characteristics were investigated experimentally by using small test coils and the experimental results were analytically verified. The practical scale HTS coil system for the aluminum induction heating device was also developed and its performance was evaluated.

研究分野：超伝導工学，超伝導応用機器

キーワード：誘導加熱 高温超伝導コイル

### 1. 研究開始当初の背景

アルミダイカストは、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、自動車部品等に大量に使用されている。アルミ材料を「必要な時に」、「必要な量だけ」、「必要な時間内で」溶解しダイカストマシンへ供給する「ジャストインタイム方式」の溶解装置が実現すれば、溶解装置とダイカストマシンを直結することにより、横持工程・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のみならず、横持工程の廃止による安全性の向上や不要な過熱の抑制によるドロスの発生を防止も期待できる。そのためには、アルミニウムの高速溶解技術が必要不可欠である。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るが、インゴット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。我々は、HTS コイルによる静止強磁場中でアルミ材料を回転させた時に発生する誘導電流による自己加熱によって高速溶解する装置を考案している (図 1)。本科研費での研究を開始するま

で、我々は提案装置の実現を目指し、数値電磁界解析モデルによるアルミ材料への入熱量評価とモデル検証、アルミインゴットからの誘導磁界の評価と抑制方法、HTS 線材の超伝導特性を考慮したコイル基本設計と運転温度評価、目標とする誘導加熱性能を有する装置構造の概念設計等の基礎的研究を行ってきた。しかしながら、提案装置の最重要要素である HTS コイル技術については、重要な学術的研究課題が未解決である。

・安定な非円形大面積 HTS コイルの構成技術：現状で入手容易な長尺 HTS 線材は、長さ方向に特性が不均一で、臨界電流が大きく劣化する部分が不可避に存在する。本装置のようなコスト制約が厳しい産業機器では、不規則かつ局所的に劣化のある線材を用いても安定に運転できる HTS コイル技術の確立が必要である。

・突発的常伝導転移に対するロバストなコイル技術：本装置のような一般産業用機器は、超伝導機器の運用を前提とした特別な環境で運用されることはない。従って、HTS コイルシステムには、外部環境に依存せず安定で容易な運転性を有し、突発的かつ不測の外乱や温度上昇によるクエンチに対して、特別な保護を必要としなくても、安全に蓄積エネルギーが回収できるコイルシステムを構成する必要がある。

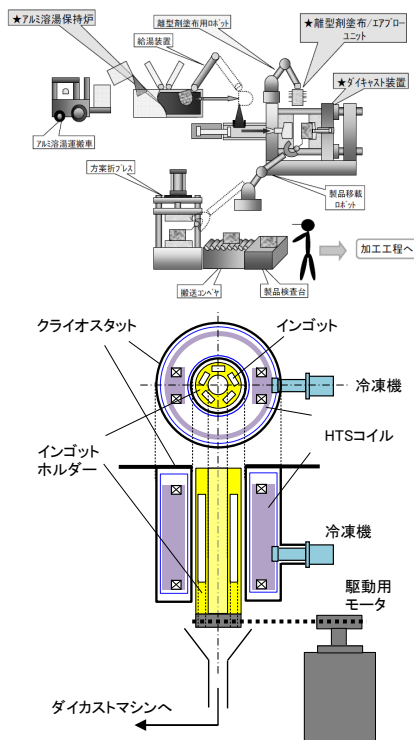


図 1 提案装置の実用化イメージ

### 2. 研究の目的

本研究では、申請者が提案する高温超伝導 (HTS) コイルを用いた回転型アルミ誘導加熱装置の実用化に向けて、そのキーコンポーネントである HTS コイルシステムに要求される高安定性・高運転信頼性を得るために、我々の提案する集合導体を用いた無絶縁コイル方式の有用性を検証するとともに、HTS コイルを用いた誘導加熱装置可能な実用コイルシステムを例証することを目的とする。

### 3. 研究の方法

(1) 集合導体 NI コイル方式を適用した小型コイルによる局所的常伝導転移時の隣接線材間の電流転流現象や超伝導復帰特性を実験・解析の両面から検証する。並列導体を用いた小型 NI コイルを作製し、一部分にヒータを設置し、人為的に微小な常伝導部 (常伝導の芽) を発生させ、線材間の電流転流による復帰特性を実測する。また、既に提案されている NI コイルの等価回路モデルを、我々の提案する集合導体を用いたコイルに適用できるように修正し、取得した通電特性を計算により再現し、測定データの検証を行う。また、円形小型コイルでの検証を行った後、集合導体 NI コイル方式を適用した小型レーストラックコイルを作製し、局所的常伝導転移時の隣接線材間の電流転流現象や超伝導復帰特性を実験・解析の両面から検証する。直線部分と円周部分における特性の相違を検証する。

(2) 市販ベースの線材を利用するという条件下で、実用装置に適用可能な HTS コイルシステム詳細設計を明確にし、その開発及び性能評価を行う。

### 4. 研究成果

(1) 集合導体 NI コイルの局所的常伝導転移時の通電特性の測定及び理論解析

まず基礎的な検証を行うために、無絶縁の YBCO 線材を 4 本集合させた導体と SUS テープを共巻にした小型円形試験コイルを作製した。コイルの諸元及び断面図を表 1 及び図 2 に示す。コイル最内層部分にハステロイヒータを設置し、これにパルス電流を通電することで線材に局所的な熱擾乱を発生させることができるようになっており、ヒータ隣接部の線材温度は熱電対により測定できる。また、コイル中心にはホール素子を設置し、中心磁界の発生様態を観測できるようにした。まず、中心磁界の励磁遅れを評価するために、一定掃引率で励磁した場合のコイルの電流と中心磁界の関係を測定した。測定波形の一例を図 3 に示す。図 3 に示すように、中心磁界の顕著な遅れは確認できなかった。次に、ヒータにパルス電流を通電し、コイルの一部をクエンチさせた場合の測定を行った。測定波形の一例を図 4 に示す。熱擾乱が発生している場合でも、中心磁界に変化は見られず、ヒータに隣接する線材の温度上昇は測定できたが、線材の電圧上昇は確認できなかった。これは、無絶縁コイルであることから当然の結果であるが、熱擾乱による温度

使用線材	YBCO
ターン数	29×2
並列数	4
インダクタンス	0.722mH (計算値)
中心磁界係数	0.53mT/A (計算値)

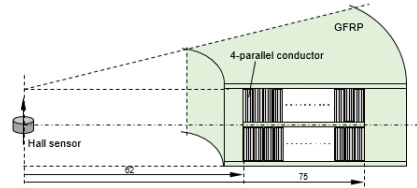


図 2 円形試験コイルの断面模式図

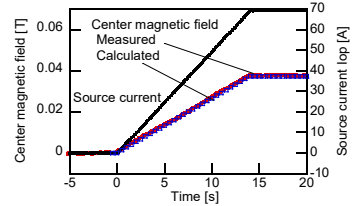


図 3 電流掃引時の中心磁界波形

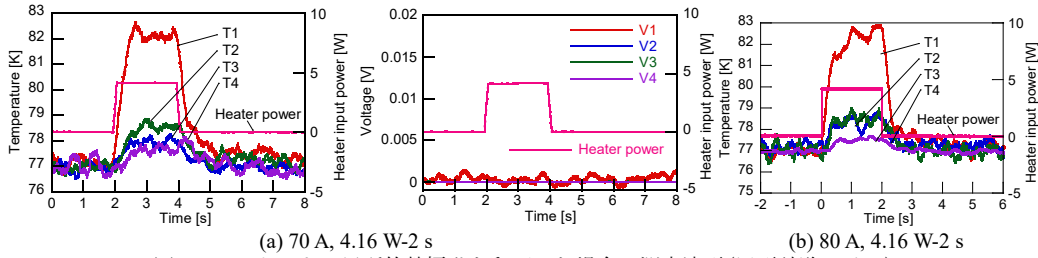


図 4 ヒータによる局所的熱擾乱を印可した場合の測定波形(円形試験コイル)

上昇に伴う電流転流を観測することはできない結果となった。

そこで、並列集合導体を用いた NI コイルの電流分布を解析するために、図 5 に示す等価回路に基づく解析を行った。ターン数、周方向の分割数及び並列導体数をそれぞれ  $n_t$ 、 $n_\theta$  及び  $n_p$  とし、コイルの最内部から反時計回りに節点番号を付す。図 5 に示す拡大図に基づき、節点  $i \rightarrow i+1 \rightarrow i+1+n_\theta n_t \rightarrow i+n_\theta n_t \rightarrow i$  のループの電圧則は、

$$\sum_{j=1}^{n_t n_\theta n_p} (M_{i,j} - M_{i+n_\theta n_t, j}) \frac{dI_j^\theta}{dt} \quad (1)$$

$$+ R_{sc,i} I_i^\theta - R_{sc,i+n_\theta} I_{i+n_\theta}^\theta + R_c (I_{i+1}^\theta - I_i^\theta) = 0$$

$$R_{sc,i} = r_{i\Delta} \theta \cdot E_0 \cdot (I_i^\theta)^{n-1} / (I_c(T_i))^n \quad (2)$$

ここで、 $M_{i,j}$  は回路要素間の相互インダクタンス ( $i = j$  の場合は自己インダクタンス) であり、ノイマンの公式から求められる。 $I_i^\theta$  は周方向電流、 $I_i^r$  は流出する径方向電流である。 $R_{sc,j}$  は超伝導線材の非線形抵抗、 $R_c$  は接触抵抗である。節点  $i$  における電流則は、

$$I_{i-1}^\theta + I_{i-n_\theta}^r = I_i^\theta + I_i^r \quad (3)$$

電流の流入点 (最内部) 及び流出点 (最外部) では、径方向電流は流れないとし、周方向電流の和が全通電電流に等しいとする。 $R_{sc,j}$  は温度  $T$  に依存し、次の熱平衡方程式を解くことにより求める。図 5 に、節点  $i \rightarrow i+1$  の回路要素の熱解析のモデルを示す。

$$\gamma C \frac{dT_i}{dt} = \lambda_\theta A_w \frac{q_i^\theta - q_{i+1}^\theta}{r_{i\Delta} \theta} + \lambda_r A_r \frac{q_{i-n_\theta n_t}^\theta - q_i^\theta}{\Delta r} + Q_i^j - Q_i^c \quad (4)$$

ここで、 $\gamma$  及び  $C$  は密度及び比熱、 $\lambda_\theta$  及び  $\lambda_r$  は熱伝導率、 $A_w$  及び  $A_r$  は線材断面積及び隣接する

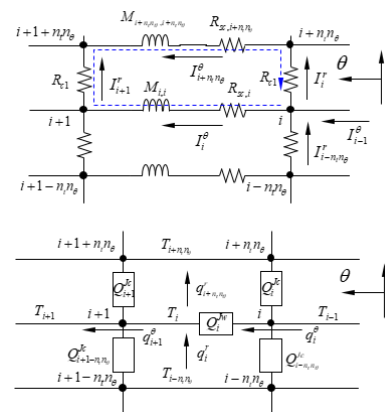
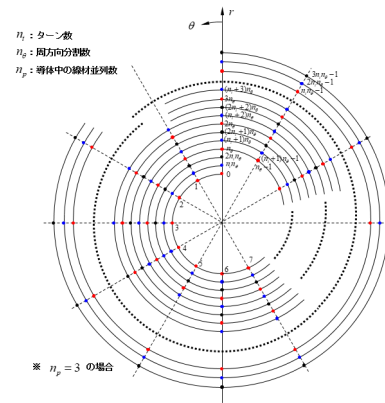


図 5 等価回路モデル

回路要素間の半径方向の接触面積,  $q_i^o$  及び  $q_i^r$  は周方向及び径方向に流入する熱,  $Q_i^j$  及び  $Q_i^c$  はジュール発熱及び冷却による抜熱である。本モデルを用いて, 図4に示す測定結果に対応する解析を行った結果を図6に示す。ヒータ入熱後の線材温度は概ね一致しており, 電流転流の様子を解析により再現できたと考えられる。

次に, 無絶縁のYBCO線材を2本集合させた導体を用いたレーストラック型の小型試験コイルを作製した。コイルの概略図を図7に示す。コイル最内層部分(円周部分と直線部分の2箇所)にハステロイヒータを設置し, ヒータ隣接部の線材温度は熱電対により測定する。ヒータにパルス電流を通電し, コイルの一部をクエンチさせた場合の測定を行った。測定波形の一例を図8に示す。前述の等価回路モデルを用いて, この測定結果に対応する解析を行った結果を図9に示す。局所的常伝導転移時の隣接線材間の電流転流や復帰特性は, 直線部分と円周部分において大きな相違はないと考えられる。

(2) 実用装置に適用可能な HTS コイルシステムの開発と性能評価

開発した HTS マグネットは, 発生磁場が 1 T 程度を目標とし, 磁気回路に鉄心を用いることで巻線の最適化を図った。更に, 磁気回路の鉄心を2か所のコイル部(低温)とヨーク部(常温)の3つに分割し, コイル部鉄心に直接レーストラック型 HTS コイルを巻回したものをクライオスタットに収めた(図10)。この設計により, HTS コイルの常温ポアに鉄心を貫通させた構造に比べて, 鉄心にコイルを直接巻付けクライオスタット内に配置することで, コイル周回長を最小限にでき, また漏れ磁束も少なくなるため, 線材の使用量を少なくできる。また, クライオスタット内でのコイル部支持を鉄心部で行うことができるため, 外部からの熱侵入が直接コイルに作用することが無く, クライオスタット壁面からコイルまでの距離も短くでき, さらに鉄心の熱容量でコイル温度変化を緩やかにできるという利点もある。一方この設計では, 鉄心が分割され, その一部のみがクライオスタット内に配置されるため, この部分に作用する電磁力への対応が重要となる。そこで, 図10に示すように, 鉄心を凸形状にし, この段差部にコイルを配置することを基本とし, 各部の寸法を調整した結果, コイル部に作用するローレンツ力と鉄心部に作用する電磁力が互いに逆向きで, 概ねキャンセルできる配置を考案した。コイルの諸元を表2に示す。この

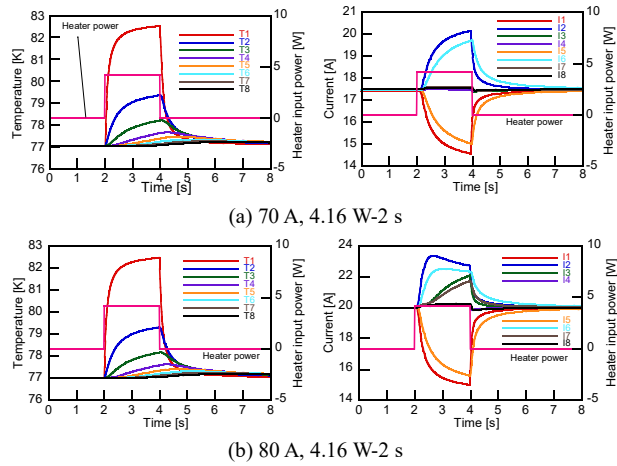


図6 円形試験コイルに対する解析結果

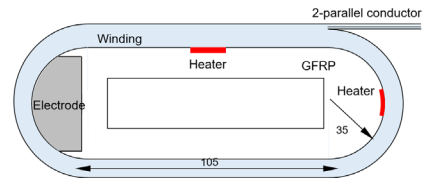


図7 レーストラック型試験コイルの概略図

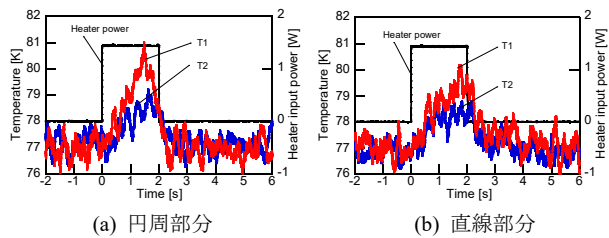


図8 ヒータ試験の測定波形(レーストラック型試験コイル)

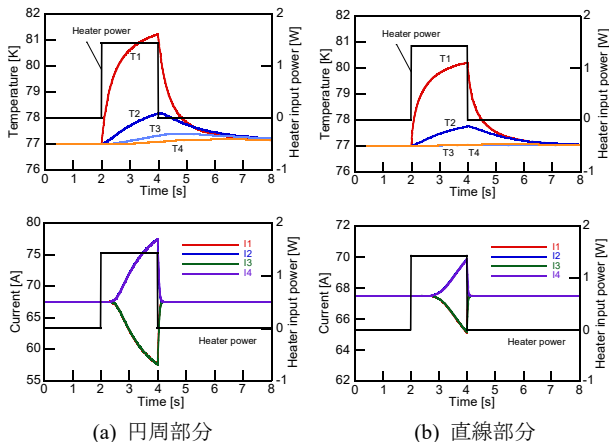


図9 レーストラック型試験コイルに対する解析結果

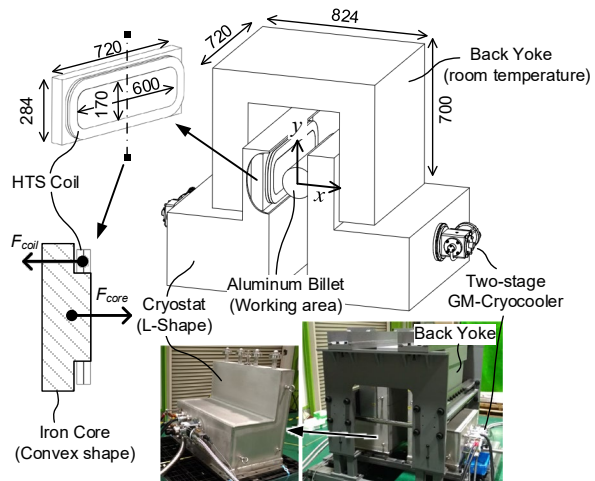


図10 実用装置に適用可能な HTS コイルシステム

形状で FEM 解析を実施した結果、図 11 に示した通り設計電流付近でコイル巻付鉄心部に作用する電磁力は 10 kN 以下にコントロールできる結果を得た。冷凍機冷却における、コイルの最終到達温度と室温からの必要冷却時間を確認するために冷却試験を行った。HTS コイル、鉄心、コールドヘッド、クライオスタット内の電流リードの温度を測定した。図 12 に室温からの冷却曲線を示す。図 12 に示すように、室温から最終到達温度までの冷却に必要な時間は約 67 時間で、最終的に HTS コイルの温度は約 15 K に到達している。磁場発生性能と連続通電に対する安定性を確認するため、励磁試験を実施した。コイル電流、コイル電圧、クライオスタット内各点の温度も測定した。また、ホール素子を用いて空隙中心部の磁場を測定したところ、1.06 T であり設計通りの結果を得た(図 13)。図 14 は、200A 連続印加時のコイル電流、コイル電圧、中心磁場、クライオスタット内の各部位の温度の測定曲線をそれぞれ示している。図 14 に示すように、コイル温度はコイル電流の増加とともに徐々に上昇し、200A 連続印加により最終的に 17.5K で飽和していることがわかる。発生磁場の安定性はアルミ加熱装置として十分であると考えられる。また、定格電流以上の通電に対する安定性を評価するために、300A までの励磁試験を行った。結果を図 15 に示す。図 15 に示すように、HTS マグネットはクエンチを起こすことなく安定に運転でき、コイル温度も 18 K 以内に抑えられていることが確認された。

表 2 開発した HTS コイルの諸元

HTS tape	REBCO tape (*12 mm, *110 μm)
Rated current	200 A
Number of turns	700 turns / DP coil
Number of coils	2 DP coils
Total tape length	around 2.3 km
Structure	non-insulation, SUS-tape co-wound
Coil cooling method	Conduction-cooling by GM cryocooler
Coil temperature	below 20 K

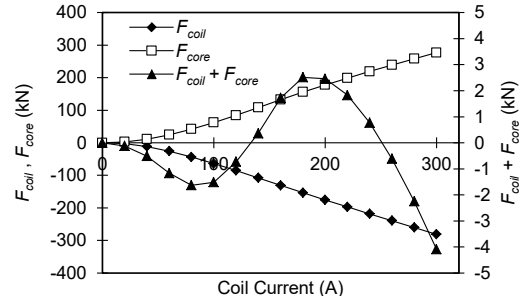


図 11 電磁力の FEM 解析結果

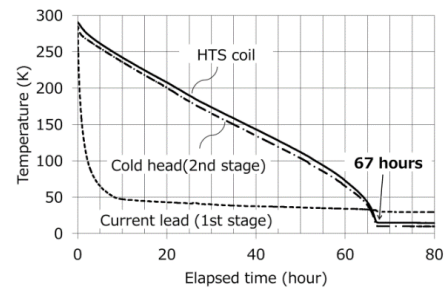


図 12 コイルの冷却曲線

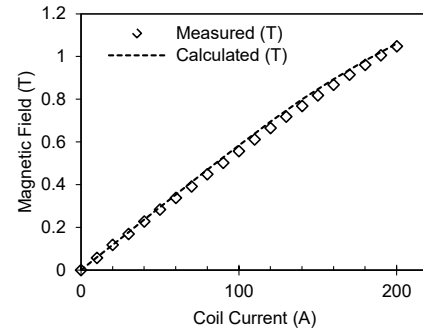


図 13 中心発生磁場の測定結果

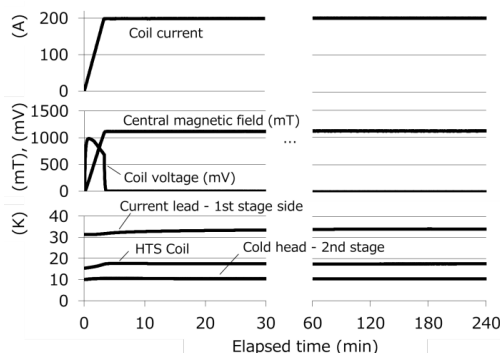


図 14 200 A 通電試験の測定結果

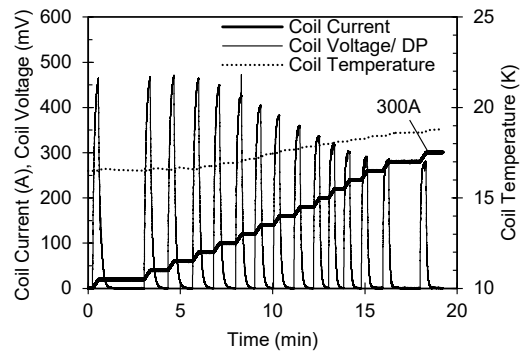


図 15 300 A 通電試験の測定結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 T. Ito, S. Fukui, H. Kawashima, Y. Ogata, M. Furuse, T. Watanabe, S. Nagaya, J. Ogawa	4. 巻 32
2. 論文標題 Fabrication and Test of HTS Magnet for Induction Heating Device in Aluminum Extrusion Processing	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 4600205
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2021.3136801	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 2件／うち国際学会 6件）

1. 発表者名 S. Fukui, T. Ito, H. Kawashima, Y. Ogata, M. Furuse, T. Watanabe, S. Nagaya
2. 発表標題 Development of DC Induction Heater of Aluminum Billets for Heat Extrusion Processes Using HTS magnet
3. 学会等名 12th International Forum on Magnetic Force Control（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Ito, S. Fukui, H. Kawashima, Y. Ogata, T. Sho, M. Furuse, T. Watanabe, S. Nagaya, J. Ogawa
2. 発表標題 Development of Induction Heating Device Using HTS Magnet in Aluminum Extrusion Processing
3. 学会等名 27th International Conference on Magnet Technology（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Ito, S. Fukui, H. Kawashima, Y. Ogata, M. Furuse, T. Watanabe, S. Nagaya, J. Ogawa
2. 発表標題 Fabrication and Test of HTS Magnet for Induction Heating Device in Aluminum Extrusion Processing
3. 学会等名 15th European Conference on Applied Superconductivity（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Ito, S. Fukui, H. Kawashima, Y. Ogata, T. Sho, M. Furuse, T. Watanabe, S. Nagaya, J. Ogawa, Y. Morishita, T. Nagaoka, N. Fuyama, N. Nawachi
2. 発表標題 Development of Induction Heating Device of Aluminum Billets Using HTS magnet
3. 学会等名 34th International Symposium on Superconductivity (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊東徹也, 河島裕, 緒方康博, 福井聡, 古瀬充穂, 渡辺智則, 長屋重夫
2. 発表標題 アルミ押出成形用磁気加熱装置の開発(2) - HTS マグネットの製作と試験
3. 学会等名 2021年度春季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊東徹也, 河島裕, 緒方康博, 正孝幸, 杉本志郎, 福井聡, 小川純, 古瀬充穂, 渡部智則, 長屋重夫, 森下勇樹, 長岡孝, 府山伸行, 縄稚典生
2. 発表標題 アルミ押出成形用磁気加熱装置の開発(3) - 加熱試験の概要
3. 学会等名 2021年度秋季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊東徹也, 福井聡, 小川純, 河島裕, 緒方康博, 杉本志郎, 正孝幸, 古瀬充穂, 渡部智則, 長屋重夫
2. 発表標題 HTSマグネットを用いたアルミビレット加熱装置の開発
3. 学会等名 2022年電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大関宥也, 田澤一輝, 福井聡, 小川純
2. 発表標題 無絶縁の並列集合導体を用いた高温超伝導コイルの局所的常伝導転移 / 復帰特性
3. 学会等名 令和2年 (第30回) 電気学会東京支部新潟支所研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小野寺巧, 山本拓朗, 福井 聡, 小川 純, 長屋重夫, 渡部智則
2. 発表標題 無絶縁の並列集合導体を用いた高温超伝導コイルの通電特性
3. 学会等名 令和2年 (第30回) 電気学会東京支部新潟支所研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊東 徹也, 河島 裕, 緒方 康博, 福井 聡, 古瀬 充穂, 渡部 智則, 長屋 重夫
2. 発表標題 アルミ押出成形用磁気加熱装置の開発(1)
3. 学会等名 2020年度春季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Fukui, J. Ogawa, T. Watanabe, S. Nagaya, M. Furuse
2. 発表標題 Development of Test Device for Aluminum Metal Melting by Induction Heating Using DC HTS Coils
3. 学会等名 32nd International Symposium on Superconductivity (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 T. Watanabe, S. Nagaya, S. Fukui, A. Ishiyama
2. 発表標題 HTS Coils Wound by Bundle Conductor Composed of No-insulated REBCO Tapes
3. 学会等名 14th European Conference on Applied Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 磁場発生装置	発明者 福井聡, 川島裕, 伊藤徹也	権利者 国立大学法人新潟大学, テラル株式会社
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-071385	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関