

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05088

研究課題名(和文) 高速気流噴射急冷法によるニオブアルミ超伝導線の創製

研究課題名(英文) Fabrication of Nb3Al superconducting wire through gas jet quenching method

研究代表者

菊池 章弘 (KIKUCHI, Akihiro)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・グループリーダー

研究者番号：50343877

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)：高特性のNb3Alの生成には約2,000℃の高温熱処理が必要である。一方で高温熱処理は結晶粒を粗大化させ、臨界電流密度は低くなる。従来の通電加熱と液体金属急冷プロセスの簡素化のためにガス噴射急冷を検討した。高い冷却効率を得るために線径の極細化を図り、外径50マイクロンで長さが1,000メートル以上の長尺超極細Nb/Al前駆体線の試作に成功した。超極細線の連続通電加熱には高度な張力制御の追加検討が必要であることが判明したが、超極細線ではNbとAlの拡散距離が大幅短縮され、熱処理温度の低下や熱処理時間の短縮が期待でき、本研究により特殊熱処理が不要な新たな量産プロセスの可能性が見出された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

脱炭素社会の実現に向けて将来のベース電源として期待される核融合炉や、素粒子物理のみならず重粒子線照射や核変換技術などの産業応用も期待される加速器などでは、高磁場下でも高い臨界電流密度が得られる高性能超伝導線材が必要とされている。特に電磁力に対して強いNb3Al線材はその実用化が長年待望されているが、線材化プロセスが複雑で実用化が難航している。本研究で得られた成果は、Nb3Al線材の製造法を簡素化させるだけでなく、極細径であることから可とう性の向上も図ることができる。線材のハンドリングを大幅に改善して巻き線加工が容易になり、高性能超伝導マグネットの製造コストの低減に貢献することも期待できる。

研究成果の概要(英文)：High-temperature heat treatment at about 2,000℃ is required to produce high-performance Nb3Al. On the other hand, the high-temperature heat treatment supports the crystal grain growth and reduces the critical current density. In order to simplify the process of energization heating and liquid metal quenching so far, we considered the use of gas injection quenching. In order to obtain high cooling efficiency, we have made ultra-fine processed wires and succeeded in prototyping a long ultra-fine Nb/Al precursor wire with 50 microns in OD and over 1,000 meters in length. It was found that additional study of advanced tension control is required to energize and heat this ultra-fine wire. But since the diffusion distance between Nb and Al is significantly shortened in the ultra-fine wire, a reduction of both heat treatment temperature and time could be expected. It could be found the possibility of the new mass-production process for Nb3Al wires without special heat treatment.

研究分野：超伝導線材

キーワード：超伝導線材 Nb3Al 通電加熱 ガス噴射急冷 冷却速度 極細線

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高エネルギー粒子加速器、高分解 NMR、核融合炉など、各種の大型超伝導応用機器の高性能化には超伝導磁石に使用する線材特性の改善が必須である。Nb₃Al 線材は他の線材と比較して耐ひずみ特性に優れており、電磁力の影響を大きく受ける高磁場・大口径磁石への応用が期待されている。しかし現在の Nb₃Al 線材の製法は複雑且つ高コストで、プロセスの抜本的な見直しが求められている。

2. 研究の目的

優れた性能を得るための Nb₃Al 線材の製法として、通電加熱と金属 Ga 浴による急冷を組み合わせた急熱急冷法がある。多芯構造の前駆体線材に均質な Nb-Al 過飽和固溶体フィラメントを容易に生成させることができ、キロメートル級の長尺処理も可能なことから、実用化に最も近い Nb₃Al 線材として期待が寄せられてきた。しかし、同製法では急熱急冷処理後に線材表面に付着した Ga 及び Ga 化合物を除去する付帯作業が必要となり、さらに安定化のための純銅を密着性よく線材のまわりに付与する工程も必要となる。工業製品として成立するには、プロセスの柱となる化学反応や組織制御を維持しつつ、プロセス全体の大幅な簡素化と低コスト化が求められている。本研究では従来の金属 Ga 急冷から高速気流噴射急冷への大転換の可能性について検討する。高速気流噴射急冷は、鋼板冷却やアトマイズ粉末などに採用される量産に適合しやすい手法である。本研究では、Nb₃Al 線材に対して連続的に通電加熱とガスジェット急冷を適用できるプロトタイプ装置の試作を試みて、量産化技術の基盤となる知見を獲得することを目的とする。

3. 研究の方法

1970 年代末頃、米国ローレンスバークレー研究所の Pickus 等は、外径 0.5mm の Nb/Al 単芯線あるいは厚さ 0.37mm の単芯テープを高温からヘリウムガスを噴射して急冷し、NbAl 固溶体を合成したと報告した。しかしその後の報告はなく、詳細は依然不明のままである。本研究では、まず、ガス噴射による冷却効率の目安を得るべく、短尺線によるパルス通電を利用した調査実験を行った。図 1 は実験のために作製したセットアップの原理図である。長さ 60mm で直径 1mm の Nb/Al 前駆体線を銅電極間に固定し、線材に対して垂直方向から種々のガスを噴射した。酸化のないアルゴンガス、窒素ガス、ヘリウムガスの 3 種の不活性ガスを選択し、様々な流量/流速で噴射しながら、0.1~0.3 秒間のパルス通電加熱を行った。この時、線材の中央部を放射温度計で計測した。さらに本研究では、前述のパルス通電加熱実験を踏まえて、Nb/Al 前駆体線材を巻き替えながら連続的に加熱・急冷処理を行う新しいガスジェット急冷装置のプロトタイプを自作した。図 2 は、(a)従来の Ga 急冷装置と(b)新型ガスジェット急冷装置の原理図の比較である。この独創的なプロトタイプの試作が本研究における主たる取り組みとなる。さらに動作試験として、このプロトタイプを用いた Nb/Al 前駆体線材の連続熱処理条件について調査した。

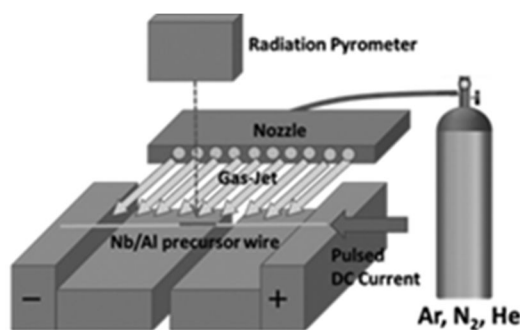
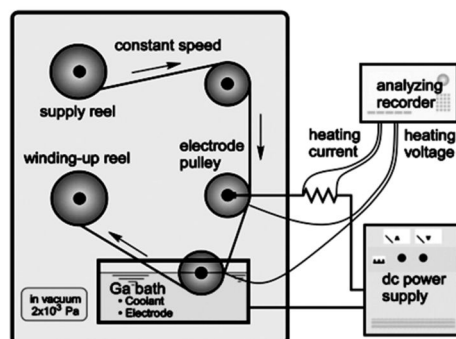


図 1. パルス通電ガス噴射急冷実験の原理図。

(a) 従来型 Ga 急冷装置



(b) 新型ガスジェット急冷装置

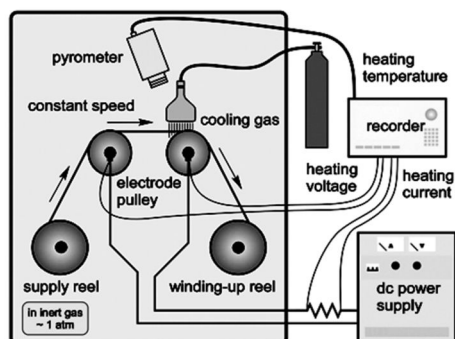


図 2. (a)従来の Ga 急冷装置と(b)新型ガスジェット急冷装置の原理図の比較。

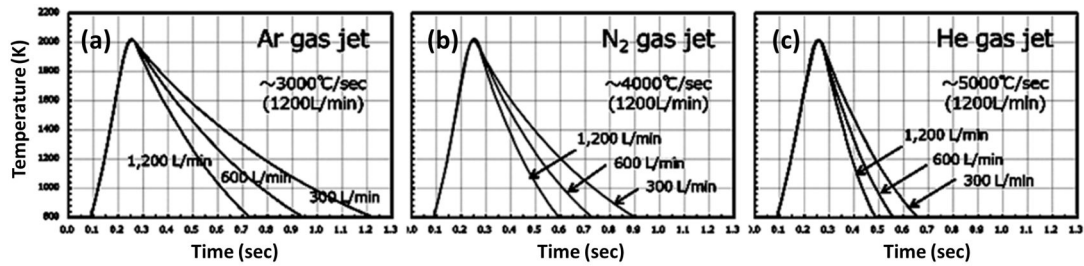


図 3. パルス通電加熱実験における異なる不活性ガスジェット噴射による線材中央部の温度変化。

4. 研究成果

図 3 はパルス通電実験における線材中央部の温度のプロフィールである。(a)はアルゴンガス、(b)は窒素ガス、(c)はヘリウムガスでの実験結果で、ガス流量は同条件の 300L/min、600L/min、1,200L/min の 3 種類とした。パルス通電加熱による最高到達温度はいずれの場合も約 2,000K になるように制御した。ガス流量が増加すると冷却速度は高まることを確認した。さらにガス種は、ヘリウム、窒素、アルゴンの順で高い冷却速度が得られることがわかった。これらパラメータを変化させることで冷却速度が制御され、きちんと熱交換が行えていることを確認できた。なお、この事前実験での最高の冷却速度はヘリウムガスを 1,200L/min で噴射した場合に得られ、およそ 5,000K/sec と見積もられた。先の Pickus 等の基礎実験で報告された値 (500K/sec) より 10 倍も速い速度が比較的簡便に得られることがわかった。このように、このパルス通電加熱実験で不活性気流噴射でも十分な冷却効果が得られることがわかった。次に本研究では、Nb/Al 前駆体線材を巻き替えながら連続的に加熱・急冷処理を行う新しいガスジェット急冷装置のプロトタイプを試作に取り組んだ。図 4 は試作したガスジェット急冷装置のプロトタイプの外観(左)と通電加熱及びガス急冷部の拡大写真(右)である。2つの純銅製プーリーの間で通電加熱し、右側プーリーの上部にガスジェットノズルを配置している、加熱部小型カメラで様子をモニター・録画するとともに非接触の放射温度計で温度を計測する。このプロトタイプを用いて直径 1.0mm 程度の Nb/Al 前駆体線の連続通電急冷実験を行ったところ、Ga 浴急冷の場合のような過飽和固溶体の生成は認められなかった。比較的表面は急冷されているものの、線材内部までの冷却が追いついていないと推察される。そのため、ガスジェット噴射でも線材の表面及び内部の両方を均質に急冷するために、処理線材の極細化に取り組んだ。当初は数～数十メートル程度の長さの外径 50 ミクロンのジェリーロール法 Nb/Al 前駆体線しか試作が困難であったが、長尺化を図るための前駆体線材の断面デザインの最適化に取り組んで、最終的には 1,000 メートル級の長尺極細線の試作に成功した。さらに一層の極細化を進めて、図 5 に示す外径 30 ミクロンの前駆体線の試作にも成功したが、まだ数十メートルと短尺であり今後に更なる長尺化の研究が必要である。従って、50 ミクロン径の長尺極細線を利用して連続通電加熱及びガス冷却処理の実施を試みた。リールからリールへの巻き替えは問題なかったが、通電加熱中の断線が頻繁に発生した。本研究で試作したプロトタイプでは、加熱処理中のテンション制御がうまく行えていないことが断線原因として考えられる。処理線材が極細化したことにより、線材強度は著しく小さくなり、微妙な張力変化でも破断に至る。特に通電加熱時には線材は軟化するためにさらにテンション

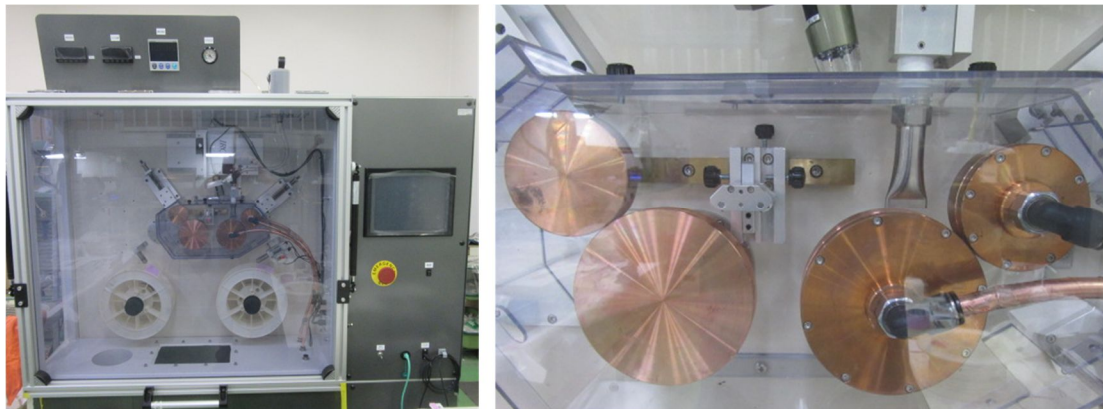


図 4. 試作したガスジェット急冷装置のプロトタイプの外観(左)と通電加熱及びガス急冷部の拡大写真(右)。2つの純銅製プーリーの間で通電加熱し、右側プーリーの上部にガスジェットノズルを配置している。加熱部は小型カメラで様子をモニター・録画するとともに非接触の放射温度計で温度を計測する。

制御は複雑化して難しくなる。処理線材の極細化を達成することはできたが、連続通電熱処理を実施するには高精度にテンション制御が行える装置開発が必要であることが判明した。これらの結果を踏まえて、今後、改良型の連続熱処理装置の開発に取り組むことが求められる。一方で、従来報告例のない超極細の Nb/Al 前駆体線では、Nb と Al の拡散距離が短くなるために熱処理温度の低下や熱処理時間の短縮が図れる可能性がある。従って、本研究で開発した超極細線の最適熱処理条件について改めて検討する余地があり、実用化に向けて大変興味深い。

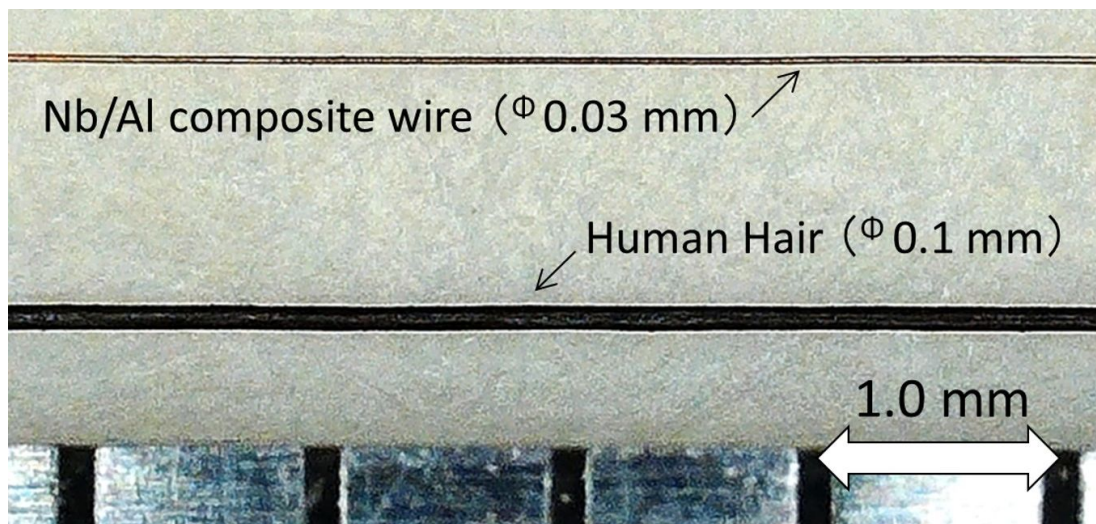


図 5. 外径 30 ミクロンのジェリーロール法 Nb/Al 前駆体線材と頭髪を比較した写真。

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 1件）

1. 著者名 Kikuchi Akihiro, Iijima Yasuo, Ichinose Ataru, Kawano Masatoshi, Yamamoto Masaru, Kimura Motoyoshi, Nagamatsu Jun, Otsubo Masato, Hirata Kazuto, Nimori Shigeki, Tsuchiya Kiyosumi	4. 巻 756
2. 論文標題 Trial Manufacturing of Jelly-Rolled Nb/Al Monofilamentary Wire with Very Small Diameter below 50 microns	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 012016 ~ 012016
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1757-899X/756/1/012016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 菊池 章弘、飯嶋 安男、山本 優、河野 雅俊、木村 基良、永松 純、大坪 正人、西島 元、一瀬 中、大内 徳人、土屋 清澄、金 錫範、中村 武恒、二森 茂樹、北口 仁、瀧川 博幸、土谷 悦子
2. 発表標題 超極細Nb3Al単芯線及び撚線
3. 学会等名 2020年度秋季第100回 低温工学・超電導学会研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木村 諒、福田 響、井上 良太、植田 浩史、金 錫範、菊池 章弘、飯嶋 安男
2. 発表標題 伝導冷却超電導応用機器に向けた柔軟性極細Nb3Al超電導線材の臨界特性測定
3. 学会等名 2020年度秋季第100回 低温工学・超電導学会研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菊池 章弘、飯嶋 安男、山田喬平、河野 雅俊、山本 優、木村 基良、永松 純、大坪 正人、一瀬 中、土屋 清澄
2. 発表標題 Fine Nb3Al Monofilamentary Wires and Round Cables
3. 学会等名 ASC 2020 Virtual Conference（国際学会）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
---------	---------