

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02130

研究課題名(和文)液体水素強制対流冷却CICC超電導マグネットの開発

研究課題名(英文)Development of liquid hydrogen forced flow cooled CICC superconducting magnet

研究代表者

白井 康之(Shirai, Yasuyuki)

京都大学・エネルギー科学研究科・教授

研究者番号：60179033

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：高磁場でエネルギー密度の高い大型のマグネットを必要とする機器では、高温超伝導材料(REBCOやBSCCOなど)を用いた開発がすすめられ、特にCICC(Cable In Conduit Conductor)として強制対流で冷却することが適していると考えられ、粘性の小さい液体水素の特性を活かすことが提案される。本研究では、CICC導体としてMgB₂/CuNi/CuNi 撚り線およびMgB₂/Cu/CuNi 撚り線を用いて強制対流流路に設置し液体水素強制対流冷却試験を行い、液体水素の強制対流冷却による導体の冷却安定性の向上が確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

液体水素の強制対流冷却を想定した超電導コンジット導体に関する研究は世界的にも例が少なく、実際に撚線導体を液体水素流路内に設置して超電導線材の臨界電流を超える通電を行った状態で、熱暴走を起こさず冷却安定性を保つことを示し、その大型超電導マグネットへの適用可能性を示した意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：High magnetic field and energy density superconducting magnet has been developed using high temperature superconducting wires such as ReBCO and BSCCO of high critical properties. These superconducting materials are desirable to be used in temperature range of 15~40 K for cooling stability with good electrical properties. Liquid hydrogen (LH₂) is preferable coolant especially in forced flow cooling for superconducting cable in conduit conductor of with small viscosity.

However, there is less data for the cooling design of superconducting CICC due to its explosive feature.

In this research, in order to show the cooling stability of the LH₂ forced flow cooling superconducting CICC, the model conduit conductor of MgB₂/CuNi/CuNi and MgB₂/Cu/CuNi twisted conductor were designed and made. The over current (larger than critical current of the superconducting wire) test was conducted and confirmed that the cooling stability was improved in the forced flow cooling of LH₂.

研究分野：電気工学

キーワード：超電導マグネット 液体水素 強制対流冷却 超電導導体

1. 研究開始当初の背景

(1) 核融合用超伝導マグネットや超伝導エネルギー貯蔵装置など、高磁場でエネルギー密度の高い大型のマグネットを必要とする機器では、高い臨界磁場と臨界温度を持つ高温超伝導材料 (REBCO や BSCCO など) を用いた開発がすすめられている。

(2) 高温超伝導マグネットでは、その超伝導特性を活かしつつ冷却安定性を確保するため、15~40K の温度域が望ましく、直接冷媒冷却、特に CICC (Cable In Conduit Conductor) として強制対流で冷却することが適していると考えられ、この温度域では粘性の小さい液体水素の特性を活かすことが提案される。

(3) 超伝導マグネットの液体水素冷却については、その性状から十分な研究がなされておらず、CICC 導体を想定した冷却安定性を検討した安全な冷却設計基準が必要である。

2. 研究の目的

(1) 大型超伝導マグネット用 CICC 導体を想定した強制対流冷却安定性を検証する。

(2) 液体水素強制対流流路に直列に CICC 導体を想定した模擬試験体を設置し、圧力、液温、質量流速の条件を変えて、強制対流熱伝達特性を測定する。

(3) これらの成果をもとに、CICC 導体として MgB₂/CuNi/CuNi 撚り線および MgB₂/Cu/CuNi 撚り線を用いて、冷却安定性の評価を行う。

3. 研究の方法

(1) MgB₂ 超伝導撚り線試験では JAXA 能代ロケット実験場に設置した「差圧駆動式強制対流試験装置」を用いて実験を行った。本実験装置はメインクライオスタット、サブクライオスタット、2つのクライオスタットを繋ぐ開度調整バルブ付きのライン、クライオスタット内加圧用の水素ガスラインと排気ガスラインから構成される。メインクライオスタットとサブクライオスタットの容量はそれぞれ 50 L と 60 L である。メインクライオスタットには試験体が設置され、また下部にあるシースヒータにより液温を調整することができる。試験時には、メインクライオスタットはメインクライオスタット加圧用の水素ガスラインを用いて加圧する一方で、サブクライオスタットは大気圧に保つことにより、2つのクライオスタット間に差圧を発生させる。この状態で開度調整バルブを開け、メインクライオスタットからサブクライオスタットへ液体水素を強制対流させる。

(2) 液体水素強制対流冷却試験装置を用いて、強制対流流路に直列に模擬試験体を設置し、圧力、液温、質量流速の条件を変えて、強制対流熱伝達特性を測定する。

(3) CICC 導体として MgB₂/CuNi/CuNi 撚り線および MgB₂/Cu/CuNi 撚り線を製作し、強制対流流路に設置し液体水素強制対流冷却下において過電流通電試験を行い、撚り線構造の違いによる液体水素の強制対流冷却による導体の冷却安定性について検討する。

4. 研究成果

(1) 補強 MgB₂ 多芯線 MgB₂ 撚り線試験体に使用した MgB₂ 多芯線は日立製作所より提供を受けた。図 1 に線材断面写真を示す。線材の直径は 1.16 mm であり、18 芯の MgB₂ フィラメントが同心円状に 2 列で配置されている。また CICC 試験体で発生してい

た線材の劣化は応力によるものであると考えられたため、SUS を加えて機械的強度の向上がはかられている線材を使用した。なお断面積比率は (Monel : Cu : SUS : MgB₂ : Fe)=(21 : 20 : 19 : 17 : 23) である。

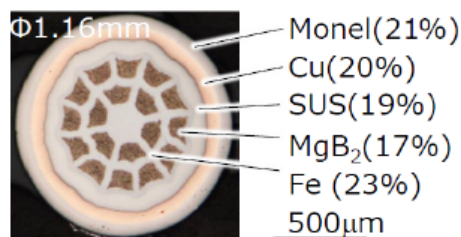


図1 撚線導体用線材断面写真

(2) MgB₂ 撚り線試験体の製作 製作した MgB₂ 撚り線試験体の断面写真を図2に示す。撚り線は、CICC 試験体と同様に3本の線を撚り合わせて1次撚り線を作成し、その1次撚り線を4本撚り合わせることで作成した。1次撚り線の撚りピッチは約40 mm、2次撚り線の撚りピッチは約149 mm である。撚り線は2種類作成し、その構成は次の通りである。MgB₂ は前述の補強 MgB₂ 多芯線を使用し、その他の線は直径 1.2 mm のものを使用した。撚り合わせは電動ドリルを使用し撚り合わせを行った。その後、円形流路に入れるために、撚り合わせた線材を円筒ボビンへ巻き付けた状態で固定し、熱処理を行った。熱処理後に銅電極へとはんだづけを行い、GFRP 製の流路へ取り付けた。この際、MgB₂ 線以外の一部は銅電極へつけずに切断した。流路は直径 150 mm の円形流路が上下に2つあり、流路内径は 8 mm である。下側流路には MgB₂ / Cu / CuNi の撚り線が、上側流路には MgB₂ / CuNi / CuNi の撚り線が設置されている。液体水素は下側流路から上側流路へ流した。また電圧タップは約 75° ずつ5か所、MgB₂ 線に取り付け、流路入口から順に V1, V2, V3, V4 とし、電流と液体水素の流れが同じ向きになるようにした。

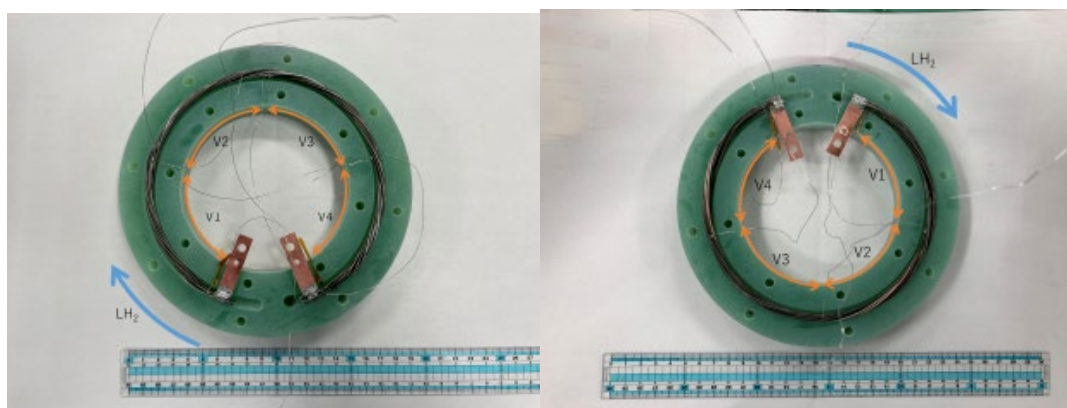


図2 MgB₂ 撚り線試験体の断面写真

- ・(SUS 3本撚り線)×3 + (MgB₂ / CuNi / CuNi の3本撚り線)×1 の4本撚り線
- ・(SUS 3本撚り線)×3 + (MgB₂ / Cu / CuNi の3本撚り線)×1 の4本撚り線

(3) 過電流通電試験 メインクライオスタット内のシースヒータを用いて液体水素を加熱し、液温を 31 K、無磁場の条件下において、熱暴走電流値付近までは 20 A/s で電流掃引を行い、その後は 10 A/s で電流掃引を行った。

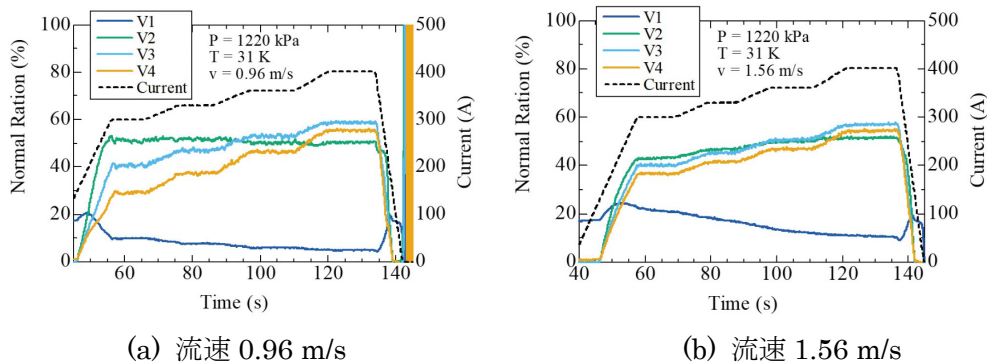


図4 過電流通電試験の常電導転移割合の時間変化(MgB2/Cu/CuNi 撚り線)

a) MgB2/Cu/CuNi 撚り線

図3に、400 A まで通電した際の電流、電圧の時間変化を示す。V2, V3, V4 は電流値を上げると電圧が上がっていた一方で、V1 は 50 s 付近から電圧が下がっていく様子が確認された。超電導部分は抵抗値が 0、常電導部分は撚り線すべての合成抵抗値になっていると仮定し、常電導転移している割合を計算すると、図4のようになった。V1 について通電電流増加中に常電導部分の割合が減り始めており、常電導転移していた部分が徐々に超電導状態へ復帰したことで抵抗値が小さくなり電圧が下がったと考えられる。また電圧が下がり始めたタイミングでの熱流束を概算すると、流速 0.96 m/s の条件では 5.67 kW/m² であり、流速 1.56 m/s の条件では 7.21 kW/m² であった。非沸騰領域から核沸騰領域へ遷移する熱流束を Dittus-Boelter 式より求めると、流速 0.96 m/s の条件では 5.44 kW/m² であり、流速 1.56 m/s の条件では 8.02 kW/m² である。このことから、沸騰状態が非沸騰から核沸騰へと遷移したことで、冷却がよくなり線材の温度が下がったため、超電導状態への復帰が始まったと考えられる。そして、後流側のタップ電圧 V2, V3, V4 の電流増加にともなう常電導部の増加量は、流路出口へ行くほど大きくなっている。これは、流路後端は流路入口に比べて冷却効果が小さくなり、線材の温度が入口に近いタップと比べて高くなり、線材の特性が悪化したことでより多くの区間で常電導転移したためではないかと考えられる。この傾向は、流速が遅い 0.96 m/s の結果の方がより顕著にみられる。

b) MgB2/CuNi/CuNi 撚り線

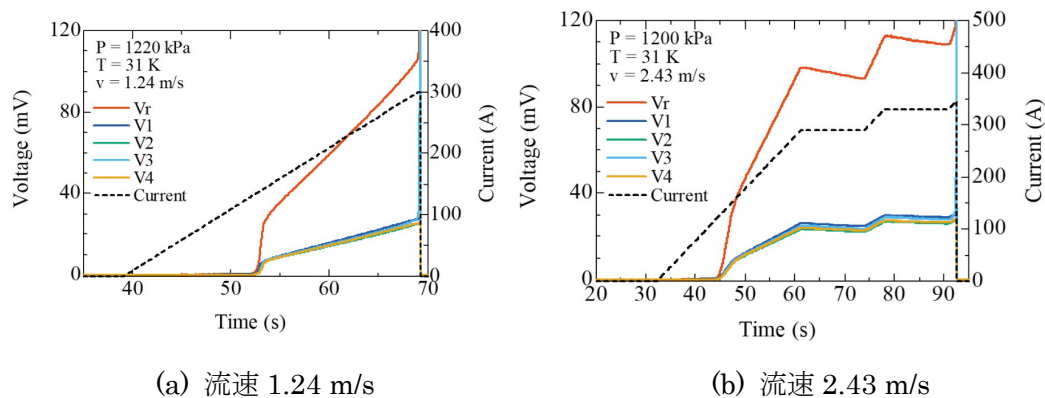


図5 過電流通電試験の電流・電圧の時間変化(MgB2/CuNi/CuNi 撚り線)

図5(a)に流速 1.24 m/s で 300 A まで、図5(b)に流速 2.43 m/s で 360 A まで通電した際の電流、電圧の時間変化を、図6(a),(b) にそれぞれの熱流束の時間変化を示す。流速 1.24 m/s の条件では 53 s 付近で、流速 2.43 m/s の条件では 47 s 付近で電圧の傾きが小さくなる様子が確認された。このときの熱流束は流速 1.24 m/s の条件で 4.51 kW/m²、流速 2.43 m/s の条件で 8.14 kW/m² であった。非沸騰領域から核沸騰領域へ遷移する熱流束は、Dittus-Boelter 式よりそれぞれ 6.15 kW/m²、9.66 kW/m² である。沸騰状態が非沸騰から核沸騰へ遷移したことで冷却がよくなったため、発熱と冷却がバランスする温度が低下して抵抗値が小さくなり、電圧の傾きが変化したと考えられる。

また、いずれの流速においても V2, V3 において電圧が急上昇する熱暴走が確認され、熱暴走開始時の熱流束は、流速 1.24 m/s のとき 45.3 kW/m² で、流速 2.43 m/s のとき 60.9 kW/m² であった。本実験グループで過去に行った流路径 8.0 mm の直線流路に設置した直径 1.2 mm の PtCo 線の熱伝達特性試験によると、DNB 熱流束は流速 1.3 m/s のとき 40 kW/m² で、流速 2.4 m/s のとき 60 kW/m² であったと報告されている。このことから沸騰状態が核沸騰から膜沸騰へ遷移したことにより、同じ熱量を運ぶためにより高い ΔTL が必要となり、発熱が冷却を上回ったことで線材の温度が上昇し始め、熱暴走が始まったと考えられる。

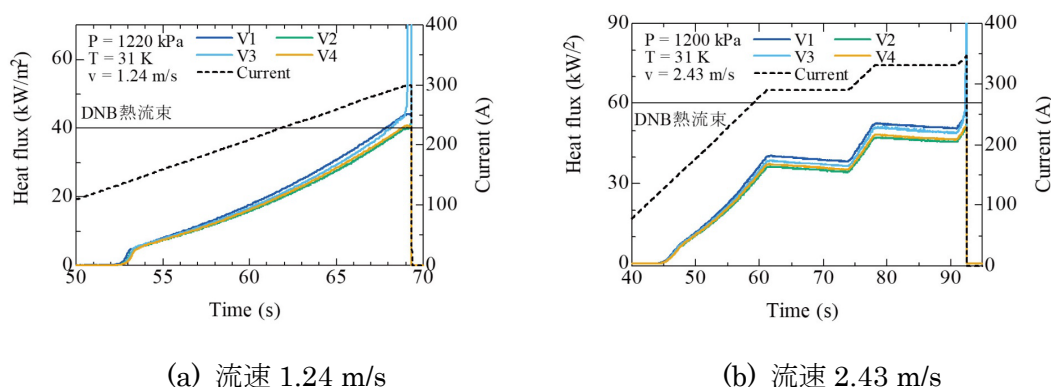


図6 過電流通電試験の熱流束の時間変化(MgB2/CuNi/CuNi 撚り線)

(4) MgB2/Cu/CuNi 撚り線と MgB2/CuNi/CuNi 撚り線の比較 MgB2/CuNi/CuNi 撚り線では熱暴走が確認されたのに対して、MgB2/Cu/CuNi 撚り線ではMgB2/CuNi/CuNi よりも大きな電流を流しても熱暴走は確認されなかった。MgB2/Cu/CuNi 撚り線について MgB2 線が常電導転移すると、電流は MgB2 内の Cu もしくは Cu 線に流れると考えられるが、この2つの分流比を抵抗値から計算すると 31 K のとき 15.7 : 84.3 である。分流比より MgB2/Cu/CuNi 撚り線では MgB2 が常電導転移すると、電流の多くは Cu 線へ流れ、発熱の多くが Cu 線で発生する。Cu 線は直接液体水素と触れているため、モネルや SUS の層によって直接液体水素と触れていない MgB2 内の Cu 層と比べて冷却状態がよいと推察され、このため Cu 線へ多くの電流が流れる MgB2/Cu/CuNi 撚り線では熱暴走が発生しなかったのではないかと考えられる。一方で、MgB2/CuNi/CuNi 撚り線では、Cu 線がないことで電流は MgB2 内の Cu 層に流れるため、線材の温度が高くなりやすく、熱暴走が発生した可能性がある。以上のことから、Cu 線を一緒に撚り合わせることで熱暴走の発生が起りにくくなり、MgB2 の保護につながることを期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 Matsumoto Taito, Fujita Katsuyuki, Iwami Yoshiki, Shirai Yasuyuki, Shiotsu Masahiro, Kobayashi Hiroaki, Naruo Yoshihiro, Nonaka Satoshi, Inatani Yoshihiro, Tanaka Hideki, Kodama Motomune, Suzuki Takaaki	4. 巻 29
2. 論文標題 Excitation Test of Solenoid MgB2 Coil Under External Magnetic Field Immersed in Liquid Hydrogen	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2019.2894898	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 -

1. 著者名 Matsumoto Taito, Shirai Yasuyuki, Shiotsu Masahiro, Kobayashi Hiroaki, Naruo Yoshihiro, Nonaka Satoshi, Inatani Yoshihiro, Tanaka Hideki, Kodama Motomune, Suzuki Takaaki	4. 巻 29
2. 論文標題 Experiment and Simulation for Normal Zone Propagation of Multifilament MgB2 Superconducting Wire Cooled by Liquid Hydrogen	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2019.2896450	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 -

1. 著者名 Shiotsu M, Shirai Y, Matsumoto T, Fujita K, Iwami Y, Kobayashi H, Nonaka S, Naruo Y, Inatani Y	4. 巻 502
2. 論文標題 Film Boiling Heat Transfer from a Wire to Upward Flow of Liquid Hydrogen: Effect of Wire Diameter	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 012089 ~ 012089
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1757-899X/502/1/012089	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 -

1. 著者名 Matsumoto T, Shirai Y, Shiotsu M, Fujita K, Iwami Y, Naruo Y, Kobayashi H, Nonaka S, Inatani Y	4. 巻 502
2. 論文標題 Film boiling heat transfer properties of liquid hydrogen flowing inside of heated pipe	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 012090 ~ 012090
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1757-899X/502/1/012090	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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yasuyuki Shirai, Masahiro Shiotsu
2. 発表標題 Development of Hydrogen Supply and Exhaust System for Liquid Hydrogen Cooled Superconducting Rotating Machine
3. 学会等名 ISS2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石見 佳紀, 白井 康之, 塩津 正博, 松本 太斗, 原 慎太郎 ; 小林 弘明, 野中 聡, 成尾 芳博, 稲谷 芳文
2. 発表標題 円筒発熱体内を流れる液体水素のDNB以降における熱伝達特性(1); 実験結果と考察
3. 学会等名 2019年度春季低温工学・超電導学会, 1C-a03
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塩津 正博, 白井 康之, 松本 大斗, 石見 佳紀, 原 慎太郎 ; 小林 弘明, 野中 聡, 成尾 芳博, 稲谷 芳文
2. 発表標題 円筒発熱体内を流れる液体水素のDNB以降における熱伝達特性() - 熱伝達特性の計算
3. 学会等名 2019年度春季低温工学・超電導学会, 1C-a04
4. 発表年 2019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
研究分担者	岩本 晃史 (Iwamoto Akifumi) (00260050)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授 (63902)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	今川 信作 (Imagawa Shinsaku) (10232604)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授 (63902)	
研究分担者	小林 弘明 (Kobayashi Hiroaki) (50353420)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・特任准教授 (82645)	

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