

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 7 日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21760240

研究課題名（和文）液体水素冷却超伝導導体を指向したニホウ化マグネシウム多芯素線の開発

研究課題名（英文）Development of MgB₂ multifilamentary wires applied for large conductor under liquid hydrogen temperature operation

研究代表者

菱沼 良光（HISHINUMA YOSHIMITSU）

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：00322529

研究成果の概要（和文）：MgB₂超伝導線材は臨界温度が39Kと高くそして2元系の物質のという特徴を有し、更に原料コストにおいて他の超伝導体よりも格段に低いことから、送電ケーブルやコイル等の大量供給されることによる実用化される点で他の超伝導体よりも有利である。そして、高い臨界温度特性に由来して、新エネルギー源として有力な液体水素温度(20K)での応用に興味深い物質である。本研究では、MgB₂超伝導線材による20K運転可能な送電ケーブル応用を念頭に、多芯化等の大容量化や撚線加工に向けた最適断面構成や機械的特性の把握に努め、20kA級導体の設計に繋げる。

研究成果の概要（英文）：MgB₂ is suitable superconducting material to the mass production applications such as power cables and large coils compared with the other superconducting materials because it has many features which are a higher critical temperature (T_c) of 39 K, simple binary chemical composition, lower specific gravity and relatively low cost material. And MgB₂ is the material which is interested in the application in influential liquid hydrogen temperature (20K) as a new energy source due to the higher T_c property. In this study, we investigated about the optimum wire configuration and mechanical property of MgB₂ wire for the higher capacity strand cables based on the power cable application under the 20 K operation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子電気材料工学

キーワード：超伝導導体、液体水素、ニホウ化マグネシウム

1. 研究開始当初の背景

核融合炉発電では電力エネルギーだけでなく、使用する燃料から“水素”の大量生産がスキームが検討されている。将来の液体水素の大量供給に伴って、液体水素(20K)を冷媒と

した大容量超伝導導体を念頭に置いたMgB₂素線の更なる高度化へという着想に至った。

2. 研究の目的

大型超伝導導体の冷媒として、液体水素は

大変魅力的な冷媒である。液体水素の比重は液体窒素に比べて 1/10 であるために導体管路内の圧力損失が低減できる。例えば、日本のような山間部の多い地形では、簡易的な揚程ポンプで済み、システム全体のコストが下げられる。本研究では燃料資源と超伝導線材の冷媒とした液体水素の管路内に電力ケーブルを敷設して、水素と電力を同時に輸送する「ハイブリッドトランスファー;HETL」を考案し、超伝導ケーブルによる大容量送電を目標に、液体水素を冷媒とする MgB_2 超伝導線材の多芯化による大容量化及び長尺加工を行い、20 K で作動する 10 kA 級直流大容量超伝導導体の設計に繋げることを目的とする。

3. 研究の方法

過去の研究で、「Cu 添加による低温・長時間」熱処理を施すことで、通常の PIT 線材よりも高い T_c 特性と低中磁場領域での高性能化を明らかにしている。本研究では、Ta バリアを持つ微量 Cu 添加 MgB_2 /Ta/Cu 長尺 19 芯多芯線材を試作した。図 1 に試作した MgB_2 /Ta/Cu 19 芯長尺線材の加工部材と最終線径 1.0mm ϕ 線材の断面写真を示す。本線材の Mg_2Cu 化合物による Cu 添加量は 3 at% とした。外径 10 mm ϕ -内径 7 mm ϕ の Ta 金属管に、所定組成の MgB_2 前駆体粉末を充填し、1.9 mm 六角単芯線材を作製した。外径 15 mm-内径 10 mm の Cu 金属管に断面設計上、最密充填となる 19 本の六角単芯線材を詰め込んだ。この複合体を 1.0 mm ϕ まで伸線加工行っ

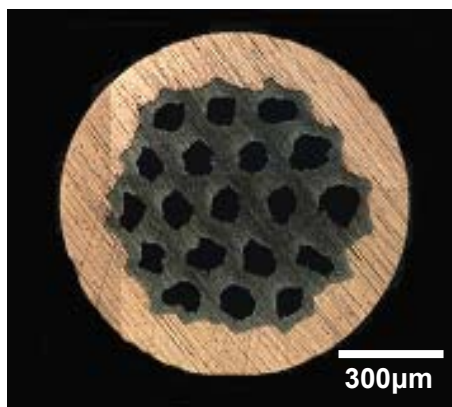
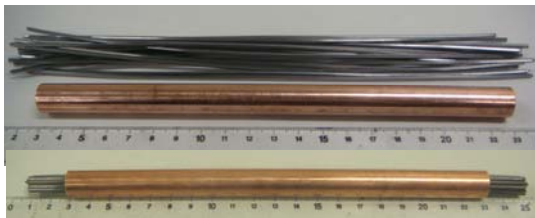


図 1 Cu 添加 MgB_2 /Ta/Cu 19 芯長尺線材加工部材と最終線径 1.0mm ϕ の断面写真 (3at%Cu 添加)



図 2 種々の曲げ歪印加治具

た結果、全線長は 100 m を越え、更に途中断線等がない良好な加工性が示唆された。そして、線材の最適条件である Ar ガス雰囲気中 475°C で 200 時間の低温・長時間熱処理を施した。

得られた線材について、20K 以上の高温領域での超伝導特性評価を物質・材料研究機構強磁場センターに設置している温度可変インサート VTI (Variable Temperature Insert) を挿入した 18T 超伝導マグネットを用いて行った。本システムにおける冷媒温度の変換は、マグネットを冷却している液体ヘリウムを VTI 内に供給して、VTI 内のヒーターとセルノックス温度計によって制御された He ガスを用いる。更に、その He ガス温度は試料通電プローブの試料部付近に付けたセルノックス温度計でも制御され、ほぼ誤差のない制御が可能である。本研究における測定環境温度は試料プローブに配置したセルノックス温度計の値とした。線材の臨界電流 (I_c) 特性の磁場依存性の評価は直流 4 端子法(電圧端子間距離: 10 mm)によって行い、 I_c criterion を 1 $\mu V/cm$ の電界が発生した電流値とした。

大型導体設計に大切な設計因子である歪効果について、曲げ歪を印加した時の I_c 特性変化を検討した。図 2 に示す種々の曲率平面を持つ治具を作製した。曲率平面を持つ治具に線材を沿わせて、曲げ歪を印加した。曲げ歪印加前後の I_c 特性を VTI 制御による 20 K 冷却環境下で測定し、 I_c 特性の劣化度を比較した。

4. 研究成果

図2に、種々の温度における MgB₂/Ta/Cu 19 芯多芯線材の I_c-B 特性を示す。これまでの超伝導線材と同様に、冷媒温度を上げると I_c 特性が低下する傾向が見られた。しかしながら、今回の目的である 20 K 運転大型導体では、多くても 1 T 程度の弱磁場応用であり、20 K@弱磁場という条件での特性が重要である。この線材における 20 K@1 T の条件での I_c 特

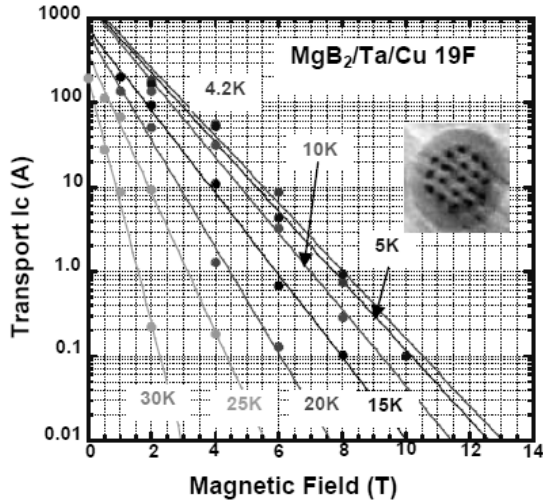


図2 Cu 添加 MgB₂/Ta/Cu 19 芯多芯線材の臨界電流(I_c)-温度(T)-磁場(B)特性

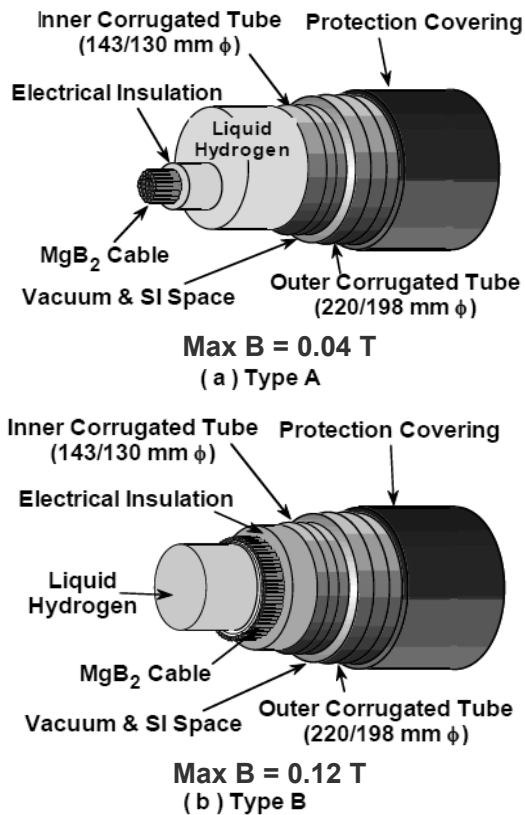


図3 Cu 添加 MgB₂/Ta 線材による大型導体の設計例

表 1 10 kA ハイブリッドトランスファー導体の諸元

	TYPE A	TYPE B
超伝導線材直径 (mm)	34.5	103/105
絶縁層厚さ (mm)	13	12
超伝導素線数	507	500
素線 1 本の通電量 (A)	19.7	20
最大磁場 (T)	0.12	0.04
冷却方法	浸漬	流動
LH ₂ 管路断面積 (cm ²)	103	79
LH ₂ 流速 (m/sec)	1.1	1.4
目標距離 (m)	100,000	
冷凍機間隔 (m)	10,000	
ケーブル長 (m)	500	
接地電圧 (kV)	+50, -50	
系統電圧 (kV)	100	
運転電流 (kA)	DC 10	
LH ₂ 輸送容量 (ton/day)	50	(1.6kg/sec)
運転温度 (K)	17-24	
LH ₂ 圧力 (MPa)	0.4-0.6	

性は、100 A を越える特性を示し、十分に 20 K 運転による導体設計は可能であることが示唆された。

図2の I_c-B-T 特性をもとにして、10 kA 大型超伝導導体の設計を試みた。表1と図3に 20 K 運転大型導体の諸元と設計例案をそれぞれ示す。このケーブル設計例では液体水素を冷媒とする 20 K 冷却と想定し、自己磁界と外部磁界を足しても最大磁場は 0.2 T 以下である。また、素線 1 本あたりの通電電流は 20 A (安全率 50 %と設定) と設計されている。つまり、図2で示された Cu 添加 MgB₂/Ta/Cu 19 芯線材の I_c-T-B 特性から考慮すると、表1の設計諸元を十分に満たしており、MgB₂ 線材の液体水素冷却による送電ケーブル応用への展望が期待されると考えている。

次に、導体化を検討する上で、歪効果が重要になる。本研究での曲げ歪は以下の式のとおり定義する。

$$\text{Bending Strain } (\epsilon) = (D/2R) \times 100$$

D は線材の線径、R は曲げ治具曲面の曲率

図4に 20 K における I_c 特性の曲げ歪依存性を示す。曲率平面に線材を沿わせる簡易的な曲げ歪を印加した後に VTI に挿入して、20 K 環境下で臨界電流を測定している。0.5 % 曲げ歪量において、I_c 特性の劣化は 80 % までであり、図3で検討した設計安全率で十分に条件を満たすことが分かった。印加磁場を 1 T から 2 T にすると、若干劣化が大きくなる傾向が見られた。これは、線材に印加される電磁力も歪として印加されたためであると考えられる。さらに、2.0 % の大きな曲げ歪を印加しても、50 % の I_c 特性を有しているのは、

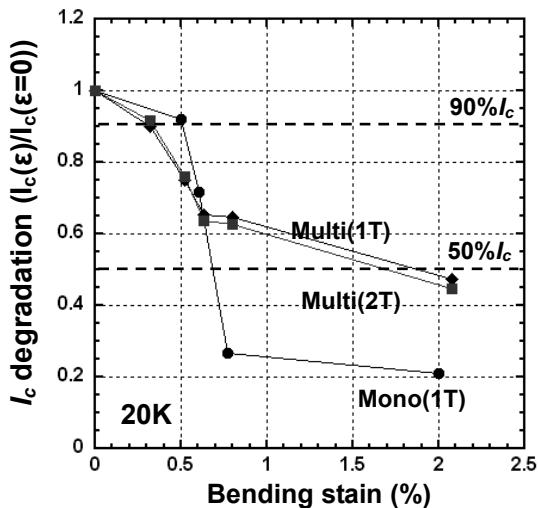


図4 Cu 添加 MgB₂/Ta/Cu 19 芯多芯線材における I_c 特性の曲げ歪量依存性(20K)

多芯化と Ta 金属母材を使用した効果であると考えている。しかしながら、本研究では、室温で曲げ歪を印加していることから、1回の測定で、「室温-20K-室温」という温度履歴による熱歪も同時に印加されているので、曲げによる真歪量に校正する必要がある。

今後の課題としては、更なる設計尤度を持たすことが重要であり、それには、更なる超伝導線材の特性改善が要求される。本研究では組成には一切言及していないので、線材の仕込み組成の最適化を検討する必要がある。さらに、導体には様々な歪が印加される。本研究で検討した曲げ歪だけでなく、引張・熱等の歪について検討する必要がある。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 菱沼良光, 「Superconducting properties and microstructure of V₃Ga wires using high Ga content TiGa₃ and V₂Ga₅ compounds」, IEEE Trans. Appl. Supercond., 査読有, vol.20, (2011), p.2525-2528.
- ② 菱沼良光, 「Development of low activation superconducting material for the feedback coil operated around D-T plasma」, Proc. of IAEA Fusion Energy Conf., 査読有, FTP-18, (2010), 1-8.
- ③ 菱沼良光, 「Ambient temperature dependence on superconducting properties of MgB₂ wires synthesized with low temperature diffusion process」, Journal of Physics, Conf. Ser., 査読有, vol.234, (2010), 014-021.

[学会発表] (計 5 件)

- ① 菱沼良光, 「Microstructure and

superconducting properties of Cu addition MgB₂ multifilamentary wires using boron isotope powder as the boron source material」, Superconductivity Centennial Conf., Den Haag, 18, Sep. 2011

- ② 菱沼良光, 「Development of low activation superconducting material for the feedback coil operated around D-T plasma」 FT/P-18, 23rd IAEA Fusion Energy Conf., Daejeon, 12, Oct. 2010.
- ③ 菱沼良光, 「 J_c enhancement of the Cu addition MgB₂ multifilamentary wires synthesized with low temperature diffusion process for fusion applications」, ASC'2010, Washington, 4, Aug. 2010.
- ④ 菱沼良光, 「Ambient temperature dependence on superconducting properties of MgB₂ wires synthesized with low temperature diffusion process」, EUCAS'2009, Dresden, 15, Sep, 2009.
- ⑤ 菱沼良光, 「低温拡散法にて作製した Cu 添加 MgB₂ 多芯線材の高温特性」, 低温工学・超電導学会・早稲田大学, 2009 年 5 月 13 日

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菱沼 良光 (HISHINUMA YOSHIMITSU)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：00322529