

戦略的創造研究推進事業(ALCA)  
技術領域(プロジェクト名)「超伝導システム」及び  
「液体水素冷却による超伝導電気機器の開発」  
課題名「高性能  $\text{MgB}_2$  長尺線材の開発」

## 終了報告書

研究開発期間 平成23年3月～令和2年3月

研究開発代表者:熊倉浩明  
((国)物質・材料研究機構機能材料研究拠点高温超伝導線材グループ、特別研究員)

## ○報告書要約（和文）

研究開発代表研究者：物質・材料研究機構 特別研究員 熊倉浩明

研究開発課題名：高性能  $\text{MgB}_2$  長尺線材の開発

### 1. 研究開発の目的

地球環境にやさしい液体水素冷却や冷凍機冷却による高効率な超伝導システムは持続性社会の実現する一つ的手段と考えられる。 $\text{MgB}_2$ 線材は液体水素温度（20K）での上部臨界磁界（ $H_{c2}$ ）が約 10T と、Nb-Ti 実用線材の 4.2K での  $H_{c2}$  と同レベルであり、かつ原料粉末を利用した簡便な線材化法が適用できるので、液体水素冷却や冷凍機冷却による高効率の超伝導機器のための線材として有望であり、低炭素化に大きく貢献すると期待される。そこで本プロジェクトでは、液体水素冷却や冷凍機冷却で運転可能な超伝導機器に使用できる 100m-1km 級の高安定度単芯ならびに多芯高性能  $\text{MgB}_2$  線材の製造技術確立することを目的とした。

### 2. 研究開発の概要

#### (1)内容：

物材機構(NIMS)は  $\text{MgB}_2$  に炭素をドーピングする方法として出発原料にコロネン( $\text{C}_{24}\text{H}_{12}$ )を添加する新しい方法を開発し、これによって強磁界での臨界電流特性を大幅に改善することに成功した。また、物材機構では内部 Mg 拡散(IMD)法を開発し、九大で開発した X 線マイクロ CT ならびに磁気顕微鏡による線材解析手法も適用して 100m 級の Cu 安定化  $\text{MgB}_2$  単芯ならびに多芯線材を作製した。

日立では、通常の PIT(Powder in Tube)法線材の課題である  $\text{MgB}_2$  フィラメントの高密度化による高臨界電流密度化を、NIMS で得られた線材加工方法および添加剤などの知見と、九大で開発した上記の解析手法とを活用して解決し、長さ 100m～1km の高密度  $\text{MgB}_2$  線材を開発した。並行して、応用機器開発グループへ超伝導機器開発用  $\text{MgB}_2$  線材・コイルを提供した。

九大では磁性シース材を有する  $\text{MgB}_2$  線材の電磁現象に関する考察を基に局所特性の評価手法を開発すると共に、NIMS ならびに日立において開発が進められた IMD 法線材、PIT 法線材について評価を行い、プロセス開発を支援した。

#### (2)成果：

物材機構ではコロネン添加した IMD 法  $\text{MgB}_2$  線材において、当時としては世界最高の  $1.1 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$  at 4.2K, 10T の  $J_c$  を達成した。また IMD 法により銅安定化単芯(100m 長)ならびに 7 芯(60m 長)線材を作製し、ソレノイドコイルを試作した。7 芯ソレノイドコイルの  $I_c$  は線材(短尺)の  $I_c$  の 60-70% であった。日立製作所では 1km 級単芯線材および 100m 級多芯線材を作製し、目標である臨界電流密度特性(工業的臨界電流密度  $J_c \geq 5,000 \text{ A/mm}^2$  at 20K, 5T または臨界電流密度  $J_c \geq 17,000 \text{ A/cm}^2$  at 20K, 5T) および  $I_c$  低下率 < 15% を達成した(多芯線の  $J_c$  は達成見込み)。応用機器開発グループへ提供したコイルは、液体水素冷却  $\text{MgB}_2$  コイル試験に使用された。九大では、磁性シース材を有する  $\text{MgB}_2$  線材の電磁現象に関する考察を基に局所特性の評価手法を開発し、多芯丸線内の各フィラメントの局所的臨界電流分布を取得する事に成功した。

#### (3)今後の展開：

物材機構グループでは、 $\text{MgB}_2$  線材の超伝導接続の研究を進める。

日立グループでは、日立製作所または日立グループ会社にて  $\text{MgB}_2$  線材の開発を継続し、線材・コイル・磁石の事業化をめざす。主な課題は線材の低コスト化である。

九大グループでは、磁気顕微法の  $\text{MgB}_2$  長尺線材の連続非破壊検査技術への適用、交流磁界下の電磁現象解明について検討を進める。

## ○ Report summary (English)

Principal investigator: Hiroaki Kumakura, Special researcher, National Institute for Materials Science

R & D title: Study of high performance long length MgB<sub>2</sub> conductors○

### 1. Purpose of R & D

Construction of new energy infrastructure collaborated with globally friendly hydrogen or liquid helium-free cryocooler and superconducting electric power system is attractive and important for sustainable development. MgB<sub>2</sub> superconductor, whose  $T_c$  is about 39K, shows high critical field of around 10T at the liquid hydrogen temperature. A wire of MgB<sub>2</sub> is easily fabricated by applying a powder technique. Thus, MgB<sub>2</sub> is one of the promising candidates as an economical and high performance conductor of superconducting devices cooled with liquid hydrogen or cryocooler. It is expected that the hybrid system composed of liquid hydrogen or cryocooler cooling system and MgB<sub>2</sub> superconducting device can reduce large amount of carbon dioxide emission. The purpose of this project is to establish the fabrication method of high performance 100m-1km long mono- and multi-filamentary MgB<sub>2</sub> wires that can be used for the liquid hydrogen or cryocooler cooled superconducting magnet system.

### 2. Outline of R & D

#### (1) Contents:

NIMS group has invented colonene(C<sub>24</sub>H<sub>12</sub>) doping method to the starting powder of MgB<sub>2</sub>, and has much improved critical current density  $J_c$  values of MgB<sub>2</sub> wires at high magnetic fields. NIMS has developed internal Mg diffusion(IMD) method, and fabricated 100m class mono- and multi-filamentary MgB<sub>2</sub> wires with the aid of analytical methods(X-ray CT and magnetic imaging method) developed by Kyushu University. Hitachi group has developed a high-density MgB<sub>2</sub> wire that is 100 m to 1 km in length by utilizing the knowledge of the processing methods and additives obtained in NIMS and the analytical methods developed at Kyushu Univ. Hitachi attained highly  $J_c$  values by densification of MgB<sub>2</sub> filaments, which was the problem of conventional PIT (Powder in Tube) processed wire. In parallel, Hitachi provided MgB<sub>2</sub> wire and coils to the application development Group for the development of superconducting equipment. Kyushu Univ. group developed an evaluation technique of local characteristics based on the consideration on electromagnetic phenomena of MgB<sub>2</sub> wire with magnetic sheath material, and carried out the evaluation on IMD-method wire and PIT-method wire developed in NIMS and Hitachi, and supported their process development.

#### (2) Achievements:

Colonene doped MgB<sub>2</sub> wire showed  $J_c$  values of  $1.1 \times 10^5$  A/cm<sup>2</sup> at 4.2K, 10T. This was the highest  $J_c$  values of MgB<sub>2</sub> wires in the world. NIMS has succeeded in the fabrication of Cu stabilized 100m long mono-filamentary wire and 60m long 7-filamentary wire. A solenoid coil wound with 60m long Cu stabilized 7-filamentary MgB<sub>2</sub> wire showed 60-70%  $I_c$  values of short samples. A 1km-class mono-filament wire and a 100m-class multifilament wire were manufactured by Hitachi, and the target values on  $J_c$  and lowering rate of  $I_c$  were achieved. (Engineering critical current density,  $J_e \geq 5,000$  A/mm<sup>2</sup> at 20 K, 5 T or  $J_e \geq 17,000$  A/cm<sup>2</sup> at 20 K, 5 T, lowering rate of  $I_c < 15\%$ .  $J_c$  of multifilament wire is expected to achieve.) MgB<sub>2</sub> coils provided to application device development Gr were used for liquid hydrogen cooling tests. Kyushu Univ. has developed a method for evaluating the local properties of MgB<sub>2</sub> wires with magnetic sheath, and succeeded in obtaining the local critical current profiles of the respective filaments in the multi-core round wire.

#### (3) Future developments:

NIMS will develop superconducting joints of MgB<sub>2</sub> wires. Hitachi, Ltd. or Hitachi Group companies will continue to develop MgB<sub>2</sub> wires, aiming to commercialize wires, coils and magnets. The main task is the cost reduction of the wires. Kyushu Univ. will continue to develop the magnetic microscopic method to the continuous non-destructive inspection technique, and also study on the electromagnetic phenomena under AC magnetic fields.