

令和 2 年 6 月 18 日現在

機関番号：82118

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18788

研究課題名（和文）新しい耐放射線性絶縁樹脂を用いた電磁石の開発

研究課題名（英文）Development of magnets using new radiation-hard insulating resin

研究代表者

高橋 仁（Takahashi, Hitoshi）

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号：60353372

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：加速器用電磁石コイルの絶縁材として一般的なエポキシ樹脂よりも耐放射線性が高い樹脂として、シアネート樹脂が最近注目され始めている。本研究では、コイル導体の絶縁に使用されるプリプレグテープ（ガラス繊維布に樹脂を含浸させて半硬化させたテープ）やパテ材について、シアネート樹脂製のものの開発に成功した。また、コイルの端末部で水と電気とを分離するのに必要な絶縁チューブについて、従来品の腐食に弱い問題を克服する開発研究を行った。以上の開発により、シアネート樹脂を用いた新しい耐放射線性電磁石コイルの製造技術が確立できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

シアネート樹脂を用いた電磁石コイルは、世界の大型加速器計画や核融合炉分野で注目を集めている。本研究によって実用化の目途が立った新しい耐放射線性絶縁樹脂は、電磁石コイルに限らず、厳しい放射線環境に晒されるあらゆる機器において有用なものであり、我が国あるいは世界の科学、産業に対する貢献は極めて大きい。

研究成果の概要（英文）：In these days, cyanate ester resins have been paid attention as an insulator for electromagnetic coils in accelerators having a higher radiation resistance than usual epoxy resins. In this study, we have succeeded in developing a cyanate-resin-made prepreg tape (glass fiber cloth impregnated with resin) and putty materials used for insulation of coil conductors. In addition, we have conducted a R&D to overcome the corrosion problem in conventional products of insulation tubes, which are required to separate water from an electric circuit at the end of the coil. By these developments, we have established the manufacturing technology for new radiation-resistant magnet coils made of cyanate ester resins.

研究分野：実験核物理

キーワード：耐放射線性絶縁樹脂 電磁石

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

加速器用電磁石のコイル絶縁には一般にエポキシ樹脂が広く使われているが、ビーム強度の高い加速器施設では、エポキシの代わりにより耐放射線性の高いビスマレイミド・トリアジン樹脂 (BT) が使われている。この BT 絶縁コイルは、1980 年代末に研究代表者らのグループが日本でいち早く実用化を達成したもので、その後 J-PARC 加速器にも全面的に採用されるなど、大きな成功をおさめた。しかしながら、一般に、BT 樹脂はエポキシに比べ取り扱いが難しいことで知られ、特に重合反応での発熱が大きく、いわゆる「熱暴走」を起こしやすいため、コイルの絶縁性能を決定する硬化処理において、温度や時間など非常に慎重なプロセス管理が求められる。研究代表者らのグループが最初に BT 絶縁コイルを作り始めた際にも、熱暴走を抑えつつ品質を安定させるのに苦労したが、最終的には「真空含浸」と呼ばれる処理を施すことで、様々なコイル形状、大きさでも、安定した絶縁性能が得られるようになった。真空含浸とは、コイル全体を気密の型枠の中に入れて真空中に引くことで気泡を残さずにコイル内部まで絶縁樹脂を浸透させるもので、一般的なコイルの絶縁処理方法に比べて多くの装置と手間と時間がかかるので、当然コストも高価になっていた。

このような中で近年、エポキシよりも耐熱性と耐放射線性に優れた新しいコイル絶縁樹脂として、シアネート樹脂が注目されている。シアネート樹脂の利点は、

超電導電磁石のような低温領域から、250 程度までの広い温度範囲で、高い機械強度と絶縁性能を持つこと

エポキシの 10 倍以上と、BT 樹脂に匹敵する耐放射線性を持つこと

多様な加工処理に対して従順で取り扱いが容易であること

である。シアネート樹脂を用いた電磁石コイルは、欧州原子核研究機構 CERN の将来加速器計画 FCC でも技術検討課題の 1 つとして挙げられている他、国際熱核融合実験炉 ITER のトロイダルコイルとして有望視されるなど、世界中で関心を集めつつある。しかしながら、実際に電磁石コイルの絶縁材として適用された例はほとんどなかった。

### 2. 研究の目的

以上のような状況のもとで、シアネート樹脂を用いた、新しい耐放射線性電磁石コイルの製造技術を確立することが本研究課題の目的である。

### 3. 研究の方法

加速器用電磁石コイルを絶縁するには、プリプレグテープと呼ばれる、ガラス繊維布に樹脂を浸させ半硬化させたテープが必要である。プリプレグテープは、導体に巻き付けて素線絶縁を形成する他、導体をコイル状に巻いた後の最外層にも巻き付けて対地絶縁を施すのにも使われるもので、コイル絶縁の根本となる材料である。本研究では、まずシアネート樹脂製のプリプレグテープを開発する。

さらに、最終的にコイル全体を成型する際に導体間の隙間を埋めるためのパテ材や、コイルの端末部で水と電気とを分離するのに必要な絶縁チューブについても開発を行うことで、新しい耐放射線性電磁石コイルの製造技術を確立する。

### 4. 研究成果

#### (1) シアネート樹脂製プリプレグテープの開発

まず最初に、コイル絶縁の基本となるシアネート樹脂製プリプレグテープを試作した。しかし、ガラステープに手塗りで樹脂を含浸させる少量生産の場合には問題はなかったが、量産設備で使用するような量ではシアネート樹脂が熱暴走を起こすことが判明し、その対策が必要となった。プリプレグテープ製造業者の工場では材料を混合させる場合、安全対策に追加の設備投資が必要となるが、元の樹脂製造業者であらかじめ混合させた製品を使用することで熱暴走を起こさずにプリプレグテープが製造できるようになった。

開発したシアネート樹脂製プリプレグテープを用いて、実際に電磁石コイル用の導体に巻き付けて硬化処理を行った。硬化させたサンプルに対して絶縁破壊試験を行った結果、表 1 に示すような、優れた絶縁性能を確認した。図 1 が、導体にシアネート樹脂製プリプレグテープを巻いて硬化させたサンプルの写真である。一番上のサンプルに見える小さな黒点は、絶縁破壊試験を行った際の放電の痕である。

表 1. プリプレグテープサンプルの破壊電圧

サンプル	破壊電圧
#1	4.8 kV
#2	4.4 kV
#3	3.4 kV

シアネート樹脂製のプリプレグテープの製造に成功したのは非常に大きな成果であり、この成果を電磁石技術国際会議 (MT26) で報告したところ、ITER や CERN の関係者を始め、世界中の核融合、加速器分野の研究者、技術者から大きな注目を集めた。



図1．シアネート製プリプレグテープを導体に巻き付け硬化させたサンプルの写真

### (2) シアネート樹脂製パテ材の開発

次に、最終的なコイル成型の際に導体間の隙間を埋めるのに使用するパテ材についても、シアネート樹脂製のものを開発した。シアネート樹脂にシリカを添付することで粘度を調節し、コイルに盛り付けるパテ材として扱いやすいものを製造することができた。

実際にそのシアネート製パテ材を用いてコイル模擬体を成型する試験を行った。素線絶縁としてシアネート製プリプレグテープを巻いた導体 11 本を積み重ね、3 層×4 列からわざと 1 本分隙間を開けたところにパテ材を盛った上で、全体を同じくプリプレグテープで対地絶縁を施した。このコイル模擬体を乾燥炉に入れ、熱暴走することなく硬化させることに成功した。図 2 が、硬化させた後のコイル模擬体を切断したところの写真である。

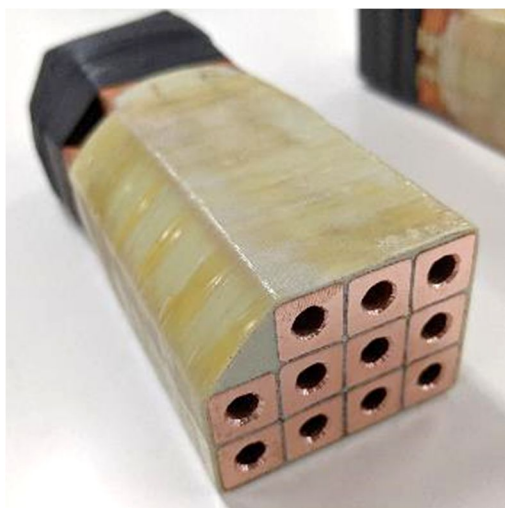


図2．シアネート樹脂製のプリプレグテープとパテ材を用いたコイル模擬体の写真

### (3) 絶縁チューブの開発

最後に、コイルの端末部で水と電気とを分離するのに必要な絶縁チューブの開発を行った。絶縁チューブは、ステンレス鋼製水配管と接続する必要があるためシアネート樹脂製は難しく、代わりにセラミックとステンレス鋼を接合したものを使用することにしたが、既成のセラミック絶縁チューブではセラミックとステンレス鋼との接合部に用いるコバル製キャップが腐食に弱い問題があった。既製品のコバル部にはセラミックやステンレス鋼とのロウ付けのために薄くニッケルメッキが施してあるが、耐食性を高めるために、そのメッキ厚を約 2 倍と 3 倍まで厚くしたものを試作した。試作した絶縁チューブに対して引張試験と曲げ試験を行い、メッキ厚を変えても従来品と同程度の機械強度を持つことを確認し、また、断面観察により、ロウ付け後もメッキ層の厚みが想定通りになっていることを確かめた。

以上の開発により、シアネート樹脂を用いた新しい耐放射線性電磁石コイルの製造技術が確立できた。

加速器のビーム強度増強が世界的な競争になっている中、機器の耐放射線性能の重要性は近年さらに増している。本研究によって実用化の目途が立った新しい耐放射線性絶縁樹脂は、電磁石コイルに限らずあらゆる機器において有用なものであり、我が国あるいは世界の科学、産業に対する貢献は極めて大きいと言える。

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 K. H. Tanaka, H. Takahashi, E. Hirose, Y. Komatsu, F. Muto, and K. Yahata	4. 巻 30
2. 論文標題 New Types of Organic Resins for Insulation of Warm Magnets	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 7700105
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2020.2970334	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0件

〔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
連携研究者	田中 万博  (Tanaka Kazuhiro)  (90171743)	高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・シニアフェロー   (82118)	
連携研究者	広瀬 恵理奈  (Hirose Erina)  (90391763)	高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・技師   (82118)	