

JAERI - M  
85-189

15Tスプリット・コイル(Splitar-15)の  
実証実験

1985年11月

高橋 良和・西 正孝・安藤 俊就・島本 進

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）  
あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城  
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department  
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,  
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1985

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 山田軽印刷所

15T スプリット・コイル (Splitar-15) の実証試験

日本原子力研究所那珂研究所核融合研究部

高橋良和・西 正孝・安藤俊就・島本 進

(1985年10月23日受理)

高磁界トロイダル・コイル用に開発した12T-10kA級超電導導体を試験するためのバックアップ磁界用スプリット・コイル (Splitar-15) の製作を進めている。このコイルは、最大発生磁界が15Tと高く、また幾何学的制約により巻線部における平均電流密度が70A/mm<sup>2</sup>以上と大きく、非常に高い性能を有している。このSplitar-15を完成させるために行ったR&D作業で得られた知見は以下の通りである。

- (1) R&Dコイルの励磁実験により、最大発生磁界15.25T、巻線部平均電流密度140A/mm<sup>2</sup>を実証した。
- (2) 導体の熱処理時間を最適化することにより、導体内安定化銅の残留抵抗値を小さくし、かつ、充分大きな臨界電流密度をもつ、安定性の高い導体を製作することができた。
- (3) 導体内の超電導フィラメント径を小さくすることによりフラックス・ジャンプの少ない磁氣的に安定な導体を製作することができた。

The Verification Experiment of 15T-split Coil(Splitar-15)

Yoshikazu TAKAHASHI, Masataka NISHI, Toshinari ANDO  
and Susumu SHIMAMOTO

Department of Thermonuclear Fusion Research  
Naka Fusion Research Establishment, JAERI

( Received October 23,1985 )

In order to test the 12 T-10 kA superconducting cables, which were developed for the high field toroidal coils, the split backup field coil is under construction. This split coil generate very high field of 15 T with backup field, and is operated with large winding current density of  $70 \text{ A/mm}^2$  due to the geometrical limit. This split coil is named "Splitar-15". The following results are obtained through the R & D works for the Splitar-15.

- (1) To generate the maximum field of 15.25 T with the average winding current density of  $140 \text{ A/mm}^2$  is verified by the charging test of the R & D coil.
- (2) By the optimization of the heat treatment condition, the high stabilized conductor, which has small residual resistance and large critical current density, is developed.
- (3) By the reduction of the superconducting filament diameter, the high magnetically stable conductor, in which flux jump is not almost occurred, is developed.

Keywords: Superconductor,  $(\text{Nb-Ti})_3\text{Sn}$ , Split Coil, Critical Current, Flux Jump, Residual Resistance, Toroidal Coil, Magnetization, Current Density, Magnetic field strength, Superconducting Filament Diameter

目 次

1. はじめに .....	1
2. R&Dコイルの製作と励磁実験 .....	1
3. 残留抵抗比 (RRR) と臨界電流密度 ( $J_c$ ) .....	2
4. 超電導フィラメント径とフラックス・ジャンプ .....	2
5. ま と め .....	3
謝 辞 .....	4

Contents

1. Introduction .....	1
2. Fabrication and Charging Test of R & D Coil .....	1
3. Residual Resistance Ratio (RRR) and Critical Current Density ( $J_c$ ) .....	2
4. Relation between Superconducting Filament Diameter and Flux Jump .....	2
5. Conclusion .....	3
Acknowledgement .....	4

## 1. はじめに

高磁界トロイダル・コイル開発の一環として、開発された 12 T - 10 kA 級超電導導体の性能を試験するために、図 1 に示すような、バック・アップ磁界用スプリット・コイル (Splitar-15) の製作が進められている。その主要諸元を表 1 に示す。この Splitar-15 は最大発生磁界が 15 T と非常に高く、また、幾何学的制約により巻線部の平均電流密度が 70 A/mm<sup>2</sup> 以上と大きく、これまで経験のない高性能な超電導コイルなので多くの R & D 作業が、要求される。その一つとして、Splitar-15 に用いられる予定の導体と同様な方法で製作された導体を用いて、R & D コイルを Splitar-15 と同様な絶縁および巻線方法で製作し、それを 13 コイルの中に取り付けバック・アップ磁界 13 T の中で、15 T の発生を実証する実験を行った。この結果について報告する。また、この実験で明らかになった、導体の残留抵抗値が大きいという問題と、励磁中低磁界側でフラックス・ジャンプが発生する問題を解決するための R & D 作業で得られた成果について報告する。

## 2. R & D コイルの製作と励磁実験

R & D コイルに用いられた導体の断面写真を図 2 に、その主要諸元を表 2 に示す。本導体は、パイプ法と称される方法で製作された。まず、Sn ロッドを Cu パイプの中に入れ、これをさらに Ti 入り Nb パイプの中に入れる。この時の Cu に対する Sn の濃度は 30 % であり、原研でこれまで作ったコイル (テストモジュール・コイル) に用いたブロンズ法 (Sn 濃度 13 %) と比較すると Sn 濃度が高いので、高い臨界電流密度 ( $J_c$ ) が期待できる。さらに、これを安定化のための Cu の中に入れる。なお、写真は、(Nb・Ti)<sub>2</sub>Sn 生成のための熱処理を行った後のものである。

本導体は、上記の熱処理を行う前に、袋編された S ガラスをかぶせて、ソレノイド状に密巻きされる。そして、S ガラスのバインド剤を蒸発させ、また、Sn と Cu が均質に混合されるように熱処理 (300°C × 24 hr) した後、(Nb・Ti)<sub>2</sub>Sn 生成の熱処理 (725°C × 200 hr) を行った。その後、導体の動きによる不安定性を生じさせないために、エポキシ樹脂を巻線部の導体間に真空含浸法にて、浸み込ませた。

R & D コイルの写真を図 3 に、その主要諸元を表 3 に示す。この R & D コイルは、13 T コイルの中に取り付けられ、バックアップ磁界 13 T の中で、励磁された。本コイルの中心に磁界測定のためのホール素子、コイル発生電圧測定および常電導転移検出のための電圧タップがコイル両端に取り付けられている。

図 4 に、R & D コイルの励磁実験結果を示す。横軸は、コイルの最大発生磁界、縦軸は、コイルの通電電流値である。図中の●印は、正常に励磁できた点を、▲印は常電導転移した点を示す。本コイルの最大発生磁界はバック・アップ磁界 13 T の下で、15.25 T であり、この時の通電電流値は 232 A であった。従って、15.25 T における、本コイルに用いられた導体の安定化銅以外の

## 1. はじめに

高磁界トロイダル・コイル開発の一環として、開発された 12 T - 10 kA 級超電導導体の性能を試験するために、図 1 に示すような、バック・アップ磁界用スプリット・コイル (Splitar-15) の製作が進められている。その主要諸元を表 1 に示す。この Splitar-15 は最大発生磁界が 15 T と非常に高く、また、幾何学的制約により巻線部の平均電流密度が  $70 \text{ A/mm}^2$  以上と大きく、これまでに経験のない高性能な超電導コイルなので多くの R & D 作業が、要求される。その一つとして、Splitar-15 に用いられる予定の導体と同様な方法で製作された導体を用いて、R & D コイルを Splitar-15 と同様な絶縁および巻線方法で製作し、それを 13 コイルの中に取り付けバック・アップ磁界 13 T の中で、15 T の発生を実証する実験を行った。この結果について報告する。また、この実験で明らかになった、導体の残留抵抗値が大きいという問題と、励磁中低磁界側でフラックス・ジャンプが発生する問題を解決するための R & D 作業で得られた成果について報告する。

## 2. R & D コイルの製作と励磁実験

R & D コイルに用いられた導体の断面写真を図 2 に、その主要諸元を表 2 に示す。本導体は、パイプ法と称される方法で製作された。まず、Sn ロッドを Cu パイプの中に入れ、これをさらに Ti 入り Nb パイプの中に入れる。この時の Cu に対する Sn の濃度は 30 % であり、原研でこれまで作ったコイル (テストモジュール・コイル) に用いたブロンズ法 (Sn 濃度 13 %) と比較すると Sn 濃度が高いので、高い臨界電流密度 ( $J_c$ ) が期待できる。さらに、これを安定化のための Cu の中に入れる。なお、写真は、 $(\text{Nb} \cdot \text{Ti})_3\text{Sn}$  生成のための熱処理を行った後のものである。

本導体は、上記の熱処理を行う前に、袋編された S ガラスをかぶせて、ソレノイド状に密巻きされる。そして、S ガラスのバインド剤を蒸発させ、また、Sn と Cu が均質に混合されるように熱処理 ( $300^\circ\text{C} \times 24 \text{ hr}$ ) した後、 $(\text{Nb} \cdot \text{Ti})_3\text{Sn}$  生成の熱処理 ( $725^\circ\text{C} \times 200 \text{ hr}$ ) を行った。その後、導体の動きによる不安定性を生じさせないために、エポキシ樹脂を巻線部の導体間に真空含浸法にて、浸み込ませた。

R & D コイルの写真を図 3 に、その主要諸元を表 3 に示す。この R & D コイルは、13 T コイルの中に取り付けられ、バックアップ磁界 13 T の中で、励磁された。本コイルの中心に磁界測定のためのホール素子、コイル発生電圧測定および常電導転移検出のための電圧タップがコイル両端に取り付けられている。

図 4 に、R & D コイルの励磁実験結果を示す。横軸は、コイルの最大発生磁界、縦軸は、コイルの通電電流値である。図中の●印は、正常に励磁できた点を、▲印は常電導転移した点を示す。本コイルの最大発生磁界はバック・アップ磁界 13 T の下で、15.25 T であり、この時の通電電流値は 232 A であった。従って、15.25 T における、本コイルに用いられた導体の安定化銅以外の

部分での臨界電流密度 ( $J_c$ ) は、 $400 \text{ A/mm}^2$  であり、巻線部における平均電流密度は  $140 \text{ A/mm}^2$  である。一方、Splitar-15 の巻線部の平均電流密度は、磁界が  $15 \text{ T}$  から  $13 \text{ T}$  の部分で  $75 \text{ A/mm}^2$  であるので、上記の実験結果は、コイル製作上十分な値である。

図5に示すように、バック・アップ磁界  $0 \text{ T}$ 、電流掃引速度  $100 \text{ A/min}$  の時の R&D コイルの電流-電圧特性において、スパイク状の電圧が観測された。これはフラックス・ジャンプによるものと考えられる。このフラックス・ジャンプは、コイルの常電導転移の原因となるので、フラックス・ジャンプの発生がない導体を製作する必要がある。この問題に対する改善策については、第4章に記述する。

### 3. 残留抵抗比 (RRR) と臨界電流密度 ( $J_c$ )

本コイルの室温と  $20 \text{ K}$  付近の抵抗の比すなわち残留抵抗比 (RRR) は、 $2.7$  と非常に小さい。本導体の超電導のための熱処理前の RRR は約  $110$  である。導体の断面写真を見ると、Ti入りNbパイプの外層まで  $(\text{Nb-Ti})_3\text{Sn}$  の層が生成されていることがわかる。そこで、反応温度を  $725^\circ\text{C}$  と固定して、反応時間をパラメーターとして、RRRを測定した。その結果を図6に示す。図中に、この導体の主要諸元を示す。20時間以上になると、RRRは急速に低下する。従って、20時間以上反応させると、SnがNbパルプを通過して、安定化銅の中に拡散したために、低温における銅の抵抗が高くなって、RRRが小さくなったと考えられる。コイルにした場合、安定化銅の抵抗が高いと、なにかの原因で導体の一部が常伝導に転移した時、その部分における発熱が大きくなり、常伝導部が他の部分へ拡がる可能性が大きくなる。さらに、コイルを焼傷する可能性が大きくなるので、銅の抵抗が小さい導体でコイルを製作する必要がある。

一方、同じ製作方法でつくられた導体の臨界電流密度と反応時間の関係を図7に示す。導体は RRRを測定したものと同じである。反応時間20時間の場合は、最適値の80%、30時間の場合は、最適値の90%である。ただし、最適値とは、もっとも良い熱処理を行って得られる最大の  $J_c$  値であり、図中の破線である。この結果 Splitar-15 の設計上、以下に示すように  $J_c$  は20時間の値で充分であるので、熱処理条件は  $725^\circ\text{C} \cdot 20$  時間と決めた。この条件での  $J_c$  から計算した臨界電流値  $I_c$  と Splitar-15 のロードラインを図8に示す。Splitar-15 は  $13 \text{ T}$  を境にして、高磁界側と低磁界側にグレーディングされている。両グレーディグ共、ロードラインと  $I_c$  の交点における電流値は、通電電流値より約15%大きい。すなわち、15%マージンがあるといえる。

### 4. 超電導フィラメント径とフラックス・ジャンプ

フラックス・ジャンプは、超電導体の中の磁束 (フラックス) の動きと、それにより発生する



部分での臨界電流密度 ( $J_c$ ) は、 $400 \text{ A/mm}^2$  であり、巻線部における平均電流密度は  $140 \text{ A/mm}^2$  である。一方、Splitar-15 の巻線部の平均電流密度は、磁界が  $15 \text{ T}$  から  $13 \text{ T}$  の部分で  $75 \text{ A/mm}^2$  であるので、上記の実験結果は、コイル製作上十分な値である。

図5に示すように、バック・アップ磁界  $0 \text{ T}$ 、電流掃引速度  $100 \text{ A/min}$  の時の R&D コイルの電流-電圧特性において、スパイク状の電圧が観測された。これはフラックス・ジャンプによるものと考えられる。このフラックス・ジャンプは、コイルの常電導転移の原因となるので、フラックス・ジャンプの発生がない導体を製作する必要がある。この問題に対する改善策については、第4章に記述する。

### 3. 残留抵抗比 (RRR) と臨界電流密度 ( $J_c$ )

本コイルの室温と  $20 \text{ K}$  付近の抵抗の比すなわち残留抵抗比 (RRR) は、 $2.7$  と非常に小さい。本導体の超電導のための熱処理前の RRR は約  $110$  である。導体の断面写真を見ると、Ti入りNbパイプの外層まで  $(\text{Nb-Ti})_3\text{Sn}$  の層が生成されていることがわかる。そこで、反応温度を  $725^\circ\text{C}$  と固定して、反応時間をパラメータとして、RRRを測定した。その結果を図6に示す。図中に、この導体の主要諸元を示す。20時間以上になると、RRRは急速に低下する。従って、20時間以上反応させると、SnがNbパルプを通過して、安定化銅の中に拡散したために、低温における銅の抵抗が高くなって、RRRが小さくなったと考えられる。コイルにした場合、安定化銅の抵抗が高いと、なにかの原因で導体の一部が常伝導に転移した時、その部分における発熱が大きくなり、常伝導部が他の部分へ拡がる可能性が大きくなる。さらに、コイルを焼傷する可能性が大きくなるので、銅の抵抗が小さい導体でコイルを製作する必要がある。

一方、同じ製作方法でつくられた導体の臨界電流密度と反応時間の関係を図7に示す。導体は RRRを測定したものと同じである。反応時間20時間の場合、最適値の80%、30時間の場合は、最適値の90%である。ただし、最適値とは、もっとも良い熱処理を行って得られる最大の  $J_c$  値であり、図中の破線である。この結果 Splitar-15 の設計上、以下に示すように  $J_c$  は20時間の値で充分であるので、熱処理条件は  $725^\circ\text{C} \cdot 20$  時間と決めた。この条件での  $J_c$  から計算した臨界電流値  $I_c$  と Splitar-15 のロードラインを図8に示す。Splitar-15 は  $13 \text{ T}$  を境にして、高磁界側と低磁界側にグレーディングされている。両グレーディング共、ロードラインと  $I_c$  の交点における電流値は、通電電流値より約15%大きい。すなわち、15%マージンがあるといえる。

### 4. 超電導フィラメント径とフラックス・ジャンプ

フラックス・ジャンプは、超電導体の中の磁束 (フラックス) の動きと、それにより発生する

部分での臨界電流密度 ( $J_c$ ) は、 $400 \text{ A/mm}^2$  であり、巻線部における平均電流密度は  $140 \text{ A/mm}^2$  である。一方、Splitar-15 の巻線部の平均電流密度は、磁界が 15 T から 13 T の部分で  $75 \text{ A/mm}^2$  であるので、上記の実験結果は、コイル製作上十分な値である。

図 5 に示すように、バック・アップ磁界 0 T、電流掃引速度  $100 \text{ A/min}$  の時の R&D コイルの電流-電圧特性において、スパイク状の電圧が観測された。これはフラックス・ジャンプによるものと考えられる。このフラックス・ジャンプは、コイルの常電導転移の原因となるので、フラックス・ジャンプの発生がない導体を製作する必要がある。この問題に対する改善策については、第 4 章に記述する。

### 3. 残留抵抗比 (RRR) と臨界電流密度 ( $J_c$ )

本コイルの室温と 20 K 付近の抵抗の比すなわち残留抵抗比 (RRR) は、2.7 と非常に小さい。本導体の超電導のための熱処理前の RRR は約 110 である。導体の断面写真を見ると、Ti 入り Nb パイプの外層まで (Nb-Ti)<sub>3</sub>Sn の層が生成されていることがわかる。そこで、反応温度を  $725^\circ\text{C}$  と固定して、反応時間をパラメーターとして、RRR を測定した。その結果を図 6 に示す。図中に、この導体の主要諸元を示す。20 時間以上になると、RRR は急速に低下する。従って、20 時間以上反応させると、Sn が Nb パルプを通過して、安定化銅の中に拡散したために、低温における銅の抵抗が高くなって、RRR が小さくなったと考えられる。コイルにした場合、安定化銅の抵抗が高いと、なにかの原因で導体の一部が常伝導に転移した時、その部分における発熱が大きくなり、常伝導部が他の部分へ広がる可能性が大きくなる。さらに、コイルを焼傷する可能性が大きくなるので、銅の抵抗が小さい導体でコイルを製作する必要がある。

一方、同じ製作方法でつくられた導体の臨界電流密度と反応時間の関係を図 7 に示す。導体は RRR を測定したものと同一である。反応時間 20 時間の場合、最適値の 80%、30 時間の場合、最適値の 90% である。ただし、最適値とは、もっとも良い熱処理を行って得られる最大の  $J_c$  値であり、図中の破線である。この結果 Splitar-15 の設計上、以下に示すように  $J_c$  は 20 時間の値で充分であるので、熱処理条件は  $725^\circ\text{C} \cdot 20$  時間と決めた。この条件での  $J_c$  から計算した臨界電流値  $I_c$  と Splitar-15 のロードラインを図 8 に示す。Splitar-15 は 13 T を境にして、高磁界側と低磁界側にグレーディングされている。両グレーディング共、ロードラインと  $I_c$  の交点における電流値は、通電電流値より約 15% 大きい。すなわち、15% マージンがあるといえる。

### 4. 超電導フィラメント径とフラックス・ジャンプ

フラックス・ジャンプは、超電導体の中の磁束 (フラックス) の動きと、それにより発生する

熱の“いたちごっこ”により、超電導体の一部が常電導状態になり大量の磁束が瞬時に超電導体のその部分に侵入することにより発生する。この現象がトリガーとなって、コイルが常電導転移することもある。従って、安定なコイルを製作するためには、フラックス・ジャンプが発生しない導体を用いなければならない。

超電導体の中に侵入する磁束は、超電導フィラメント径が大きいほど多い。そこで、フィラメント径の異なる導体を製作し、その磁化曲線を測定した。その代表的な例として、フィラメント径が  $140\mu\text{m}$  と  $80\mu\text{m}$  と  $40\mu\text{m}$  の導体の磁化曲線を、図9に示す。横軸は、導体の軸に対して垂直方向に印加された外部磁界、縦軸は、導体の磁化を示す。磁化がのこぎり状に急速に減少している所で、フラックス・ジャンプが発生している。すなわち、この所で、超電導体の中に大量の磁束が侵入して磁化が減少している。また、この現象は、図5に示されているコイルの電流-電圧特性において、スパイク状の電圧の飛びに対応している。図9より、フラックス・ジャンプは、外部磁界が  $0.5\text{ T}$  以下の領域で発生し、フィラメント径  $140\mu\text{m}$  の導体に顕著にあらわれている。一方、 $80\mu\text{m}$  の導体にも、発生しているが、フラックス・ジャンプによる磁化の変化は  $140\mu\text{m}$  の導体と比較して非常に小さい。また  $40\mu\text{m}$  の導体と  $80\mu\text{m}$  の導体のフラックス・ジャンプによる磁化の変化の差は小さい。

以上より、Splitar-15の導体のフィラメント径は、 $80\mu\text{m}$  以下が適当であるが、あまり細かいフィラメント径の導体は、製作が困難になるので、 $80\mu\text{m}$  と決定した。

## 5. ま と め

最大発生磁界  $15\text{ T}$  のスプリット・コイル (Splitar-15) の製作に先立ち、 $15\text{ T}$  の発生を実証するための R & D コイルを製作し、励磁実験を行った。その結果、最大発生磁界  $15.25\text{ T}$  で、この時の導体非銅部での電流密度は  $400\text{ A/mm}^2$ 、巻線部における平均電流密度は  $140\text{ A/mm}^2$  であった。この値は、Splitar-15 を製作するのに充分高い値である。

図10は、R & D コイルおよび Splitar-15 とこれまでに製作された高磁界超電導コイルの最大発生磁界と巻線部の平均電流密度を比較したものである。R & D コイルが、いかに高磁界かつ高電流密度の高性能コイルであるかが分かる。

残留抵抗比 (RRR) と臨界電流密度 ( $J_c$ ) の測定結果より、Splitar-15 の  $(\text{Nb-Ti})_3\text{Sn}$  生成のための熱処理条件を  $725^\circ\text{C}$  20 hr とすると、低温において低抵抗でかつ、臨界電流密度の高い導体を製作することができることが分かった。また、 $(\text{Nb-Ti})_3\text{Sn}$  のフィラメント外径の異なる数種類の導体の磁化曲線を測定することにより、フィラメント外径が  $80\mu\text{m}$  以下の導体では、常電導転移を誘発するような大きなフラックス・ジャンプは、発生しないことが分かった。

以上より、高磁界かつ安定な高性能コイル用導体が製作できることが実証された。

熱の“いたちごっこ”により、超電導体の一部が常電導状態になり大量の磁束が瞬時に超電導体のその部分に侵入することにより発生する。この現象がトリガーとなって、コイルが常電導転移することもある。従って、安定なコイルを製作するためには、フラックス・ジャンプが発生しない導体を用いなければならない。

超電導体の中に侵入する磁束は、超電導フィラメント径が大きいほど多い。そこで、フィラメント径の異なる導体を製作し、その磁化曲線を測定した。その代表的な例として、フィラメント径が  $140\mu\text{m}$  と  $80\mu\text{m}$  と  $40\mu\text{m}$  の導体の磁化曲線を、図9に示す。横軸は、導体の軸に対して垂直方向に印加された外部磁界、縦軸は、導体の磁化を示す。磁化がのこぎり状に急速に減少している所で、フラックス・ジャンプが発生している。すなわち、この所で、超電導体の中に大量の磁束が侵入して磁化が減少している。また、この現象は、図5に示されているコイルの電流-電圧特性において、スパイク状の電圧の飛びに対応している。図9より、フラックス・ジャンプは、外部磁界が  $0.5\text{ T}$  以下の領域で発生し、フィラメント径  $140\mu\text{m}$  の導体に顕著にあらわれている。一方、 $80\mu\text{m}$  の導体にも、発生しているが、フラックス・ジャンプによる磁化の変化は  $140\mu\text{m}$  の導体と比較して非常に小さい。また  $40\mu\text{m}$  の導体と  $80\mu\text{m}$  の導体のフラックス・ジャンプによる磁化の変化の差は小さい。

以上より、Splitar-15の導体のフィラメント径は、 $80\mu\text{m}$  以下が適当であるが、あまり細かいフィラメント径の導体は、製作が困難になるので、 $80\mu\text{m}$  と決定した。

## 5. ま と め

最大発生磁界  $15\text{ T}$  のスプリット・コイル (Splitar-15) の製作に先立ち、 $15\text{ T}$  の発生を実証するためのR&Dコイルを製作し、励磁実験を行った。その結果、最大発生磁界  $15.25\text{ T}$  で、この時の導体非銅部での電流密度は  $400\text{ A/mm}^2$ 、巻線部における平均電流密度は  $140\text{ A/mm}^2$  であった。この値は、Splitar-15を製作するのに充分高い値である。

図10は、R&DコイルおよびSplitar-15とこれまでに製作された高磁界超電導コイルの最大発生磁界と巻線部の平均電流密度を比較したものである。R&Dコイルが、いかに高磁界かつ高電流密度の高性能コイルであるかが分かる。

残留抵抗比 (RRR) と臨界電流密度 ( $J_c$ ) の測定結果より、Splitar-15の  $(\text{Nb-Ti})_3\text{Sn}$  生成のための熱処理条件を  $725^\circ\text{C}$  20 hr とすると、低温において低抵抗でかつ、臨界電流密度の高い導体を製作することができることが分かった。また、 $(\text{Nb-Ti})_3\text{Sn}$  のフィラメント外径の異なる数種類の導体の磁化曲線を測定することにより、フィラメント外径が  $80\mu\text{m}$  以下の導体では、常電導転移を誘発するような大きなフラックス・ジャンプは、発生しないことが分かった。

以上より、高磁界かつ安定な高性能コイル用導体が製作できることが実証された。

## 謝 辞

本研究を達成するに当り御鞭撻，激励をいただいた森理事，苫米地所長，田中部長に深く感謝致します。

また，R & D コイルおよびサンプルの製作および実験の一部を担当された昭和電線電纜㈱の鈴木，内山両氏に，感謝の意を表す。

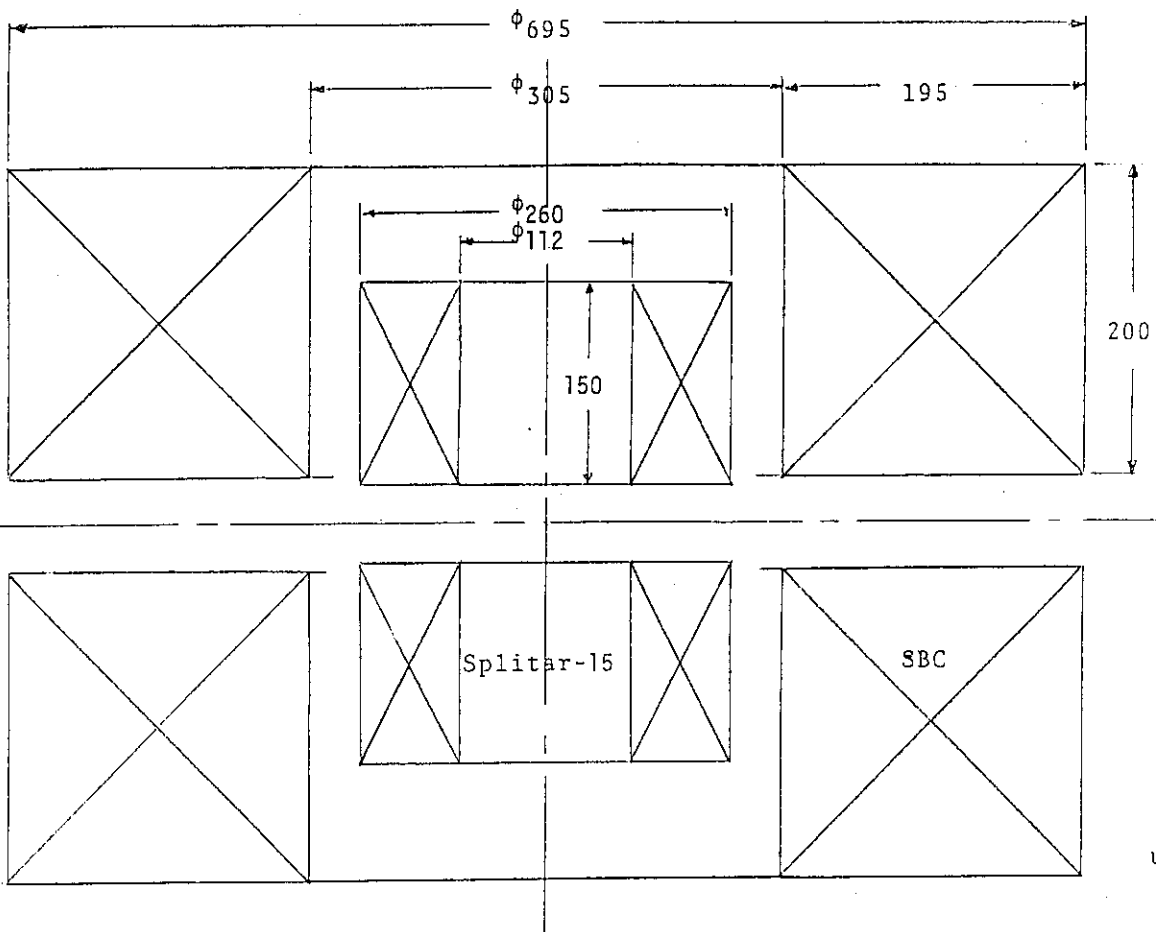


図1 Splitar-15 と SBC の幾何学的配置

表1 Splitar-15 主要諸元

MAJOR PARAMETERS of Splitar-15

	Grade 1	Grade 2
• Operating Current (A)	786	786
• Current Density (A/mm <sup>2</sup> )	75	151
• Number of Turns	430	1220
• Winding I.D. (mm)	112	175
• Winding O.D. (mm)	173	260
• Winding Height (mm)	150	151
• Max. Field (T)	15	13.1

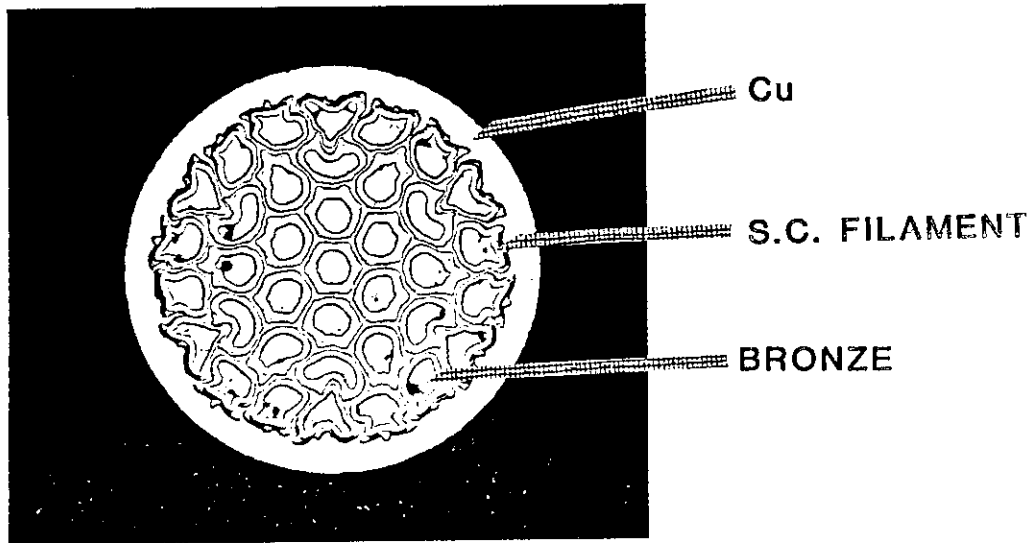


図2 R & Dコイル導体の断面写真

表2 R & Dコイル導体の主要諸元

S.C. Material	$(\text{Nb-Ti})_3\text{Sn}$
Diameter	1.1 mm
Filament Diameter	141 $\mu\text{m}$
Number of Filaments	37
Cu : non Cu	0.67 : 1

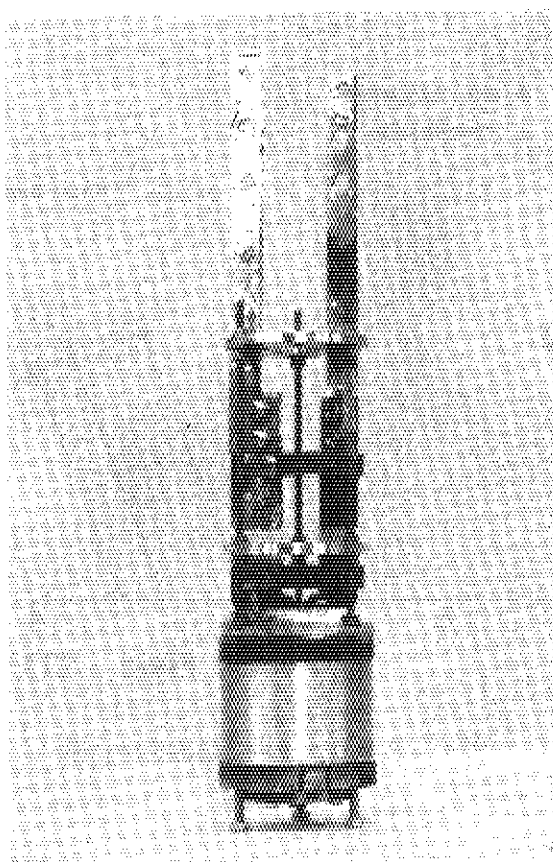
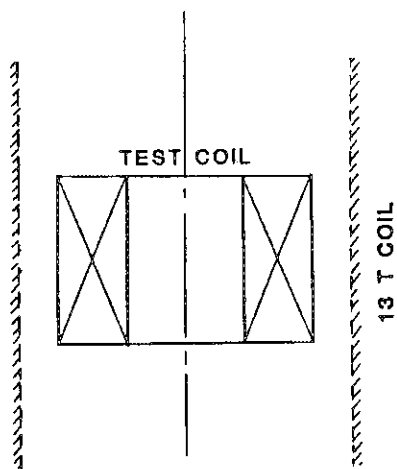


図3 R & Dコイルの写真

表3 R & Dコイルの主要諸元



- \* Winding I.D.            28 mm
- \* Winding O.D.            61.3 mm
- \* Winding Height        41.5 mm
- \* Number of Turns        420
- \* Conductor Length      59 m



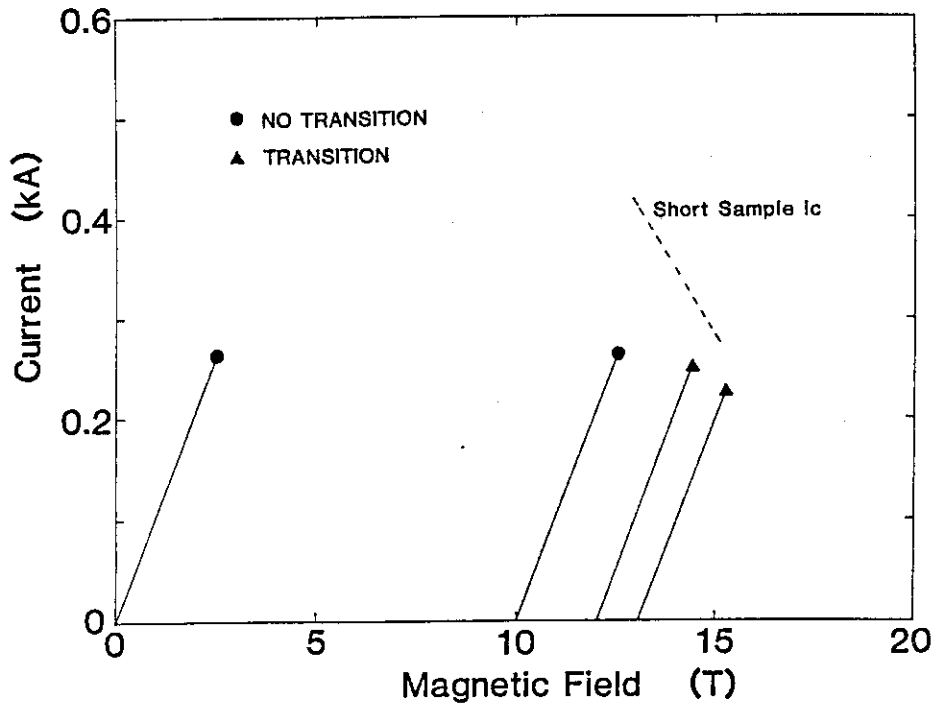


図4 R & Dコイルの励磁実験結果

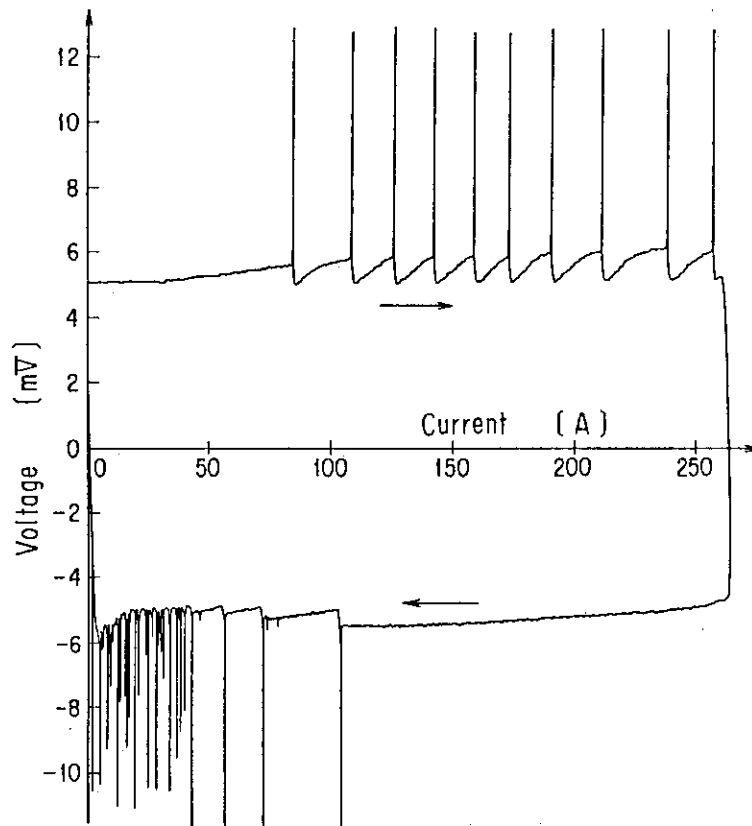


図5 R & Dコイルの電流-電圧特性

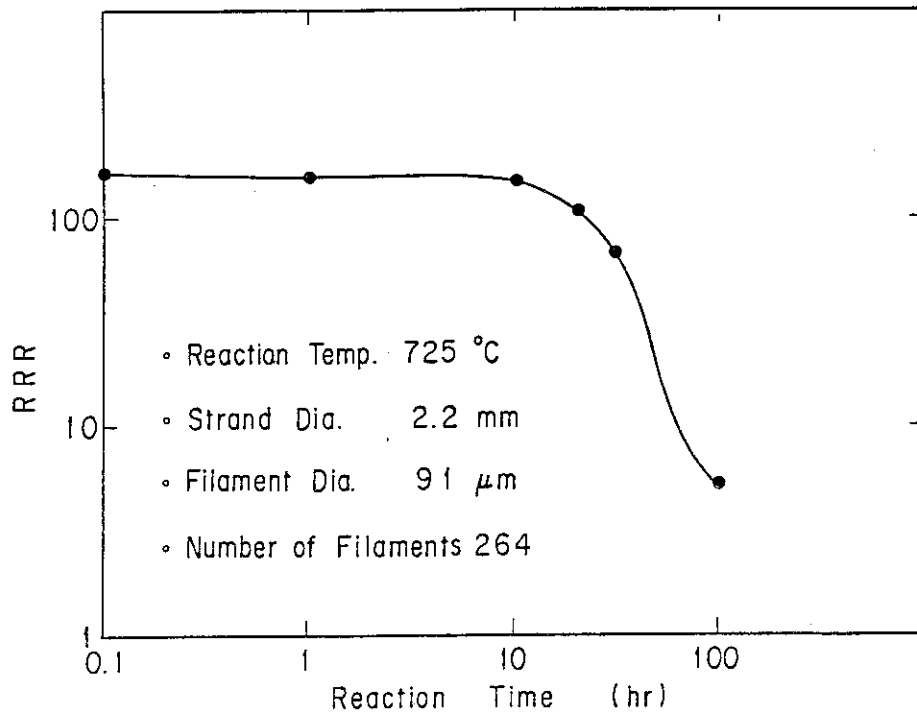


図6 残留抵抗比 (RRR) と (Nb-Ti)<sub>3</sub>Sn 生成時間

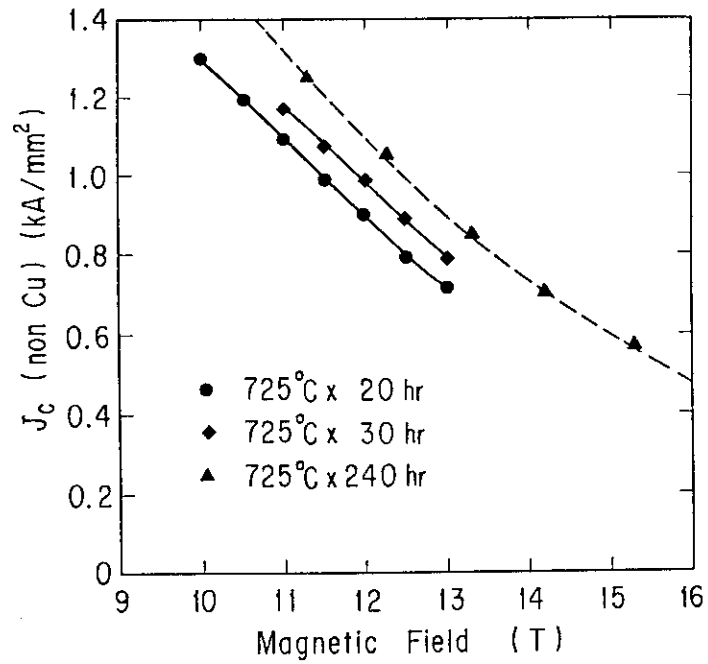


図7 臨界電流密度 (T<sub>c</sub>)

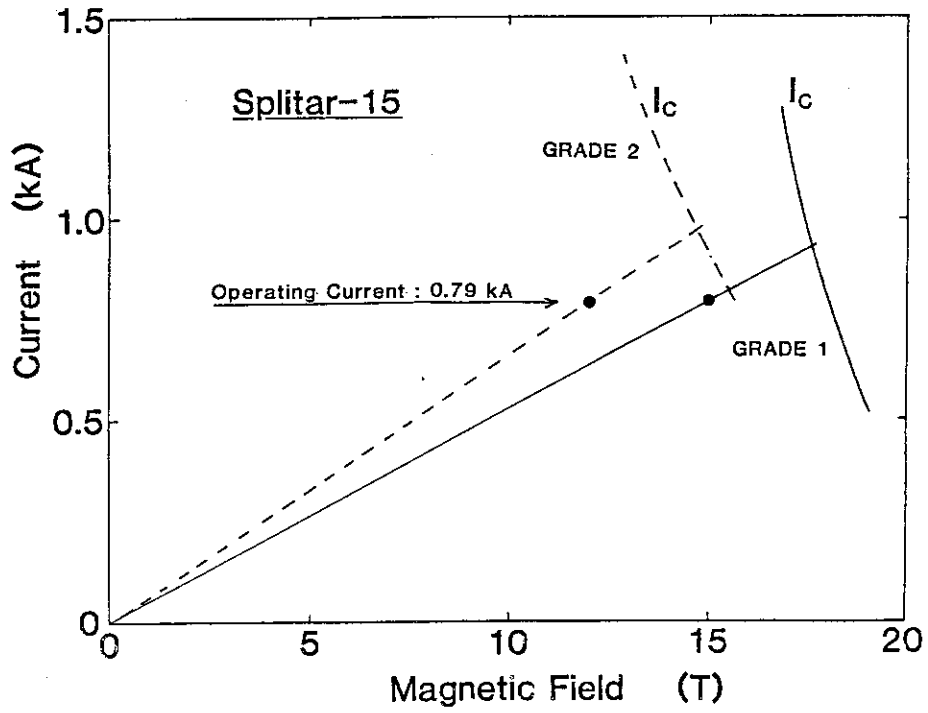


図8 Splitar-15の臨界電流値 ( $I_c$ )とロードライン

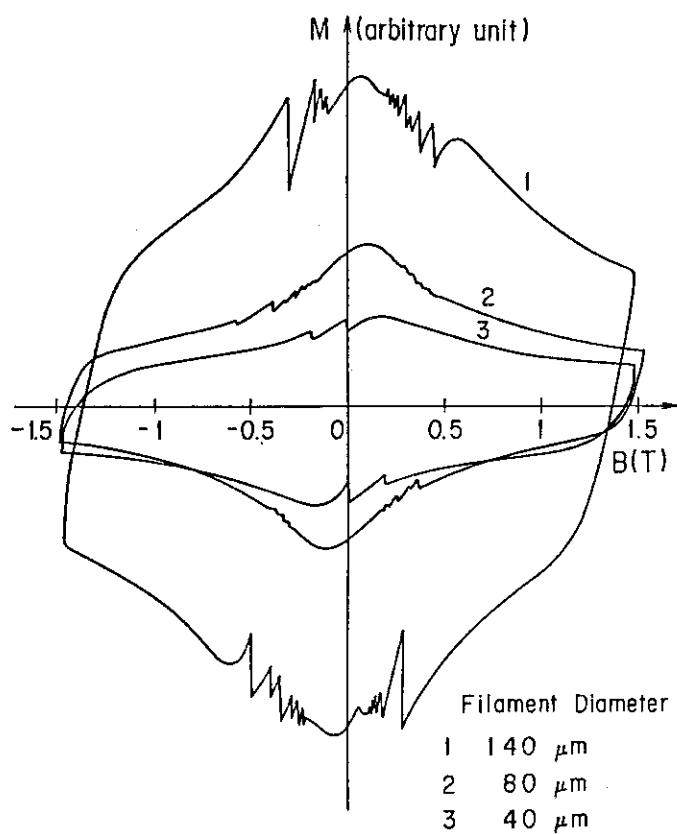


図9 (Nb-Ti)<sub>3</sub>Sn 導体の磁化曲線

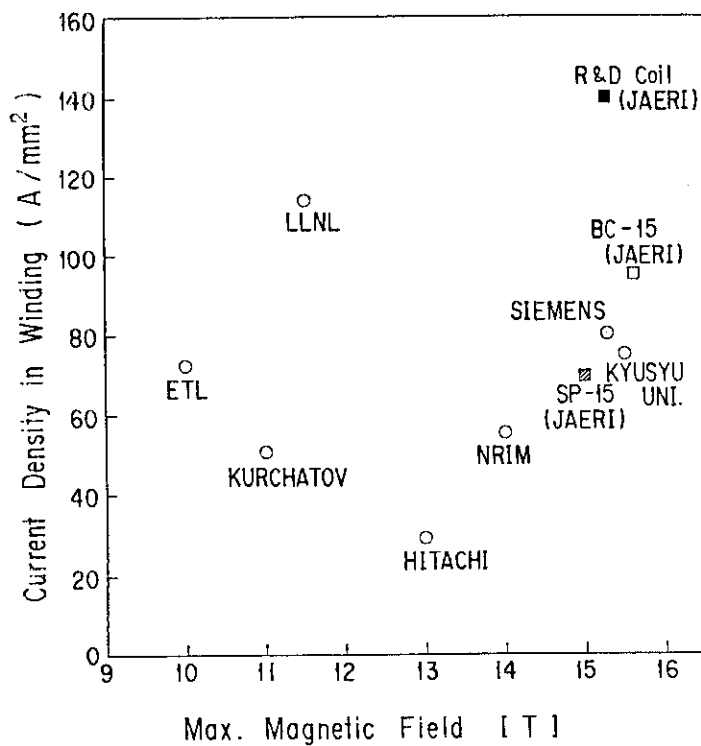


図10 高磁界コイルの最大発生磁界と巻線部平均電流密度