

安定化複合超電導材料とマグネット

Stabilized Composite Superconductors and Magnets

土井俊雄* 工藤実弘** 木村浩**
 Toshio Doi Mitsuhiro Kudô Hiroshi Kimura
 黒田邦茂** 笠原達雄*** 飯塚富雄****
 Kunishige Kuroda Tatsuo Kasahara Tomio Iizuka

要 旨

MHD 発電機やあわ箱に適用される大形超電導マグネットとこれに使用する超電導材料の開発を目的として、直径 0.25 mm の Nb-40 Zr-10Ti 3元合金線の 4 本および 10 本並列に高純度の銅基材に埋め込んだ安定化複合超電導材 HISUPER-4X, -10X ストリップを開発し、4X ストリップは 3 個の超電導鞍(くら)形コイルに、10X ストリップは超電導ソレノイドに巻線し、液体ヘリウム中でそれぞれコイル試験を行ない実用の見通しを得た。

1. 緒 言

現在までにソレノイド形超電導マグネットは世界各国ですでに開発され、実用に供されている。たとえば内径 15 cm の 150 kG マグネット⁽¹⁾や内径 45 cm の 17 kG マグネット⁽²⁾などがある。鞍形超電導マグネットについては内径 30 cm, 40 kG の AVCO 社の実例⁽³⁾しかなかった*。

MHD 発電機を開発するため、昭和 42 年度大形プロジェクトにおいて政府は内径 38 cm, 45 kG 鞍形マグネットの開発研究を民間会社に委託することを決定した。そのうちマグネットとクライオスタットが日立製作所に委託された。

日立製作所では、MHD 発電機用マグネットの最適設計データを確立するために、三つの鞍形超電導マグネットを試作し、液体ヘリウム中で実験を行なった。また超電導ストリップの 45 kG 以上の磁場におけるコイル性能を調べるためにソレノイド形超電導コイルを試作し、実験を行なった。本報告では 2 種類の超電導ストリップの性能、三つの鞍形コイルおよびソレノイド形コイルの実験結果を報告する。

2. 超電導ストリップ

物性物理学実験用の小形超電導マグネットの場合には銅めっきした超電導合金線が一般に使われているが、MHD 発電機やあわ箱用の大形超電導マグネットの巻線材料としては複数本の超電導合金線を熱伝導度や電気伝導度の高い常電導金属(たとえば銅など)で、大量におおう必要がある。

この方法によって複合超電導体を作ると、たとえ超電導体の一部分がフラックス・ジャンプなどによって常電導状態に移った場合でも、その局所的な常電導領域が超電導体の全体に伝ばせずに輸送電流は銅のバイパス回路に流れる。これによって発生したジュール熱は周囲の液体ヘリウムに伝達されヘリウムは核沸騰状態になるが温度上昇はきわめてわずかである。その間に局所的な常電導領域の部分は再び超電導状態に回復するので安定な巻線材料となる。この方法はまた安全対策のうえからも大形超電導マグネットの巻線材料として適している。

図 1 には HISUPER-4X, -10X ストリップの断面を示した。また

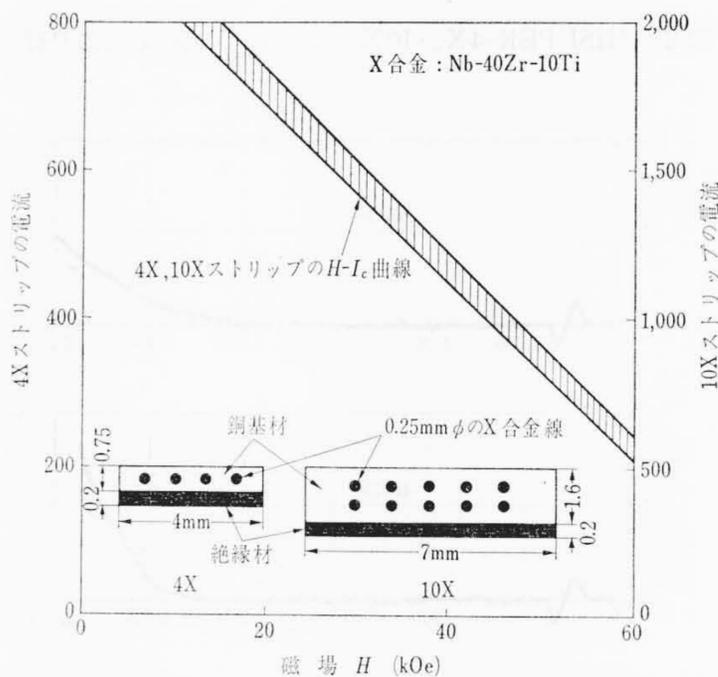


図 1 HISUPER-4 X, -10 X ストリップの断面図と $H-I_c$ 特性

図 1 に示されている斜線の部分は 0.25 mmφ の HISUPER-X 合金線⁽⁴⁾ (Nb-40% Zr-10% Ti) のそれぞれ 4 本, 10 本が銅基材に埋め込まれている HISUPER-4 X, -10 X ストリップの磁場 (H) 対臨界電流 (I_c) 特性である。

Stekly-Zar の銅安定化の式⁽⁵⁾において、単位長さ当たりの冷却側面 P (cm) の有効露出係数として β を導入すると、安定化パラメータ α は次式で与えられる。

$$\alpha = \rho(H) \cdot I^2 / q \cdot \beta \cdot P \cdot A$$

ここで q , $\rho(H)$, A および I はそれぞれ液体ヘリウムからの熱流束 (W/cm^2)、磁気抵抗効果を考慮した銅の比抵抗 ($\Omega \cdot cm$)、ストリップの断面積 (cm^2) および全電流 (A) である。 $\alpha=1$ かつ有効熱流束 $q \cdot \beta = 0.6 W/cm^2$ のとき、4X-, 10X- ストリップの銅安定化曲線を図 2 の点線で示した。使用された銅の比抵抗比 $\rho_{300K} / \rho_{4.2K}$ は約 210 であった。図 3 は 20, 40 および 60 kOe の直角磁場における 10X ストリップの短尺試料の場合の典型的な端子電圧 (V) 対電流 (I) 特性を示している。いずれの場合もヒステリシス・ループは認められなかった。

また図 4 のように、70 kOe の直角磁場における 10X ストリップの $V-I$ 特性において、全電流が 10X ストリップの I_c に達するまでは端子電圧はゼロであった。電流が I_c よりさらに増加すると、端子電圧が徐々に増加しはじめた。1,780 A の電流では 10X ストリップの周囲の液体ヘリウムの沸騰状態が核沸騰から膜沸騰状態に移り、超電導線に流れていた全電流は銅基材に移ったことを示す。2,000 A のとき再び電流を減少させていくと、電流の一部が 1,740

* 日立製作所中央研究所 工学博士
 ** 日立製作所中央研究所
 *** 日立製作所日立工場
 **** 日立製作所日立研究所
 x わが国では通産省工業技術院電気試験所において内径 29 cm, 20 kG 鞍形コイルの試作実験がすすめられている。

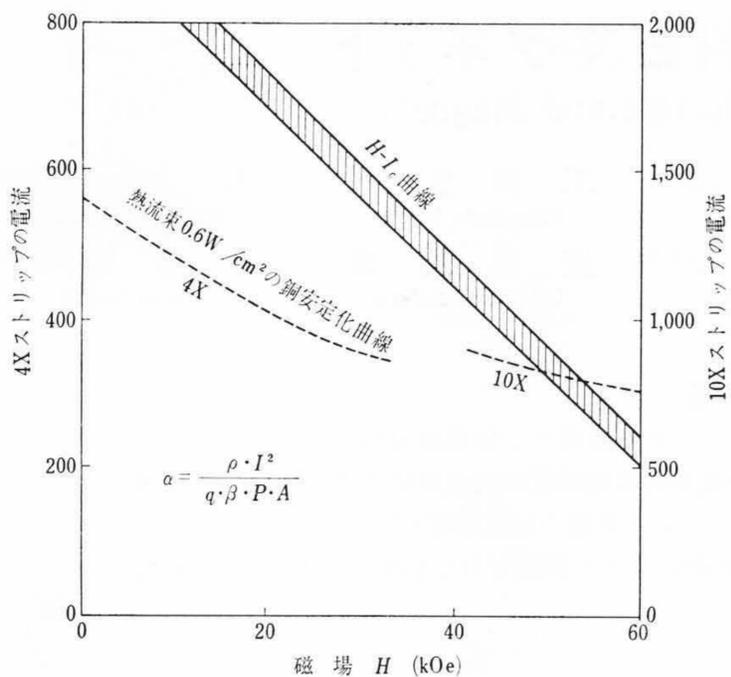


図2 HISUPER-4X, -10X ストリップの銅安定化曲線

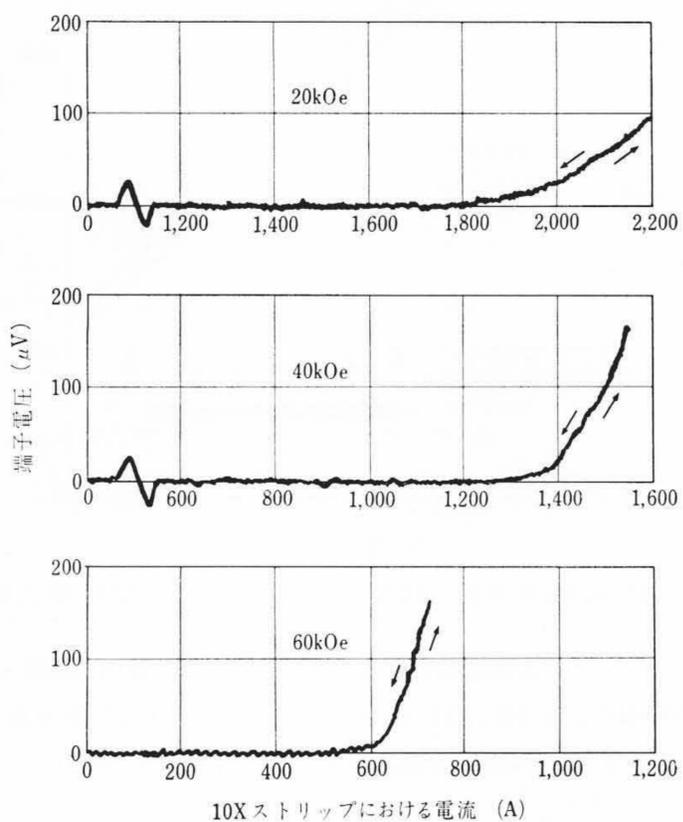


図3 HISUPER-10X ストリップの V-I 特性の磁場依存性

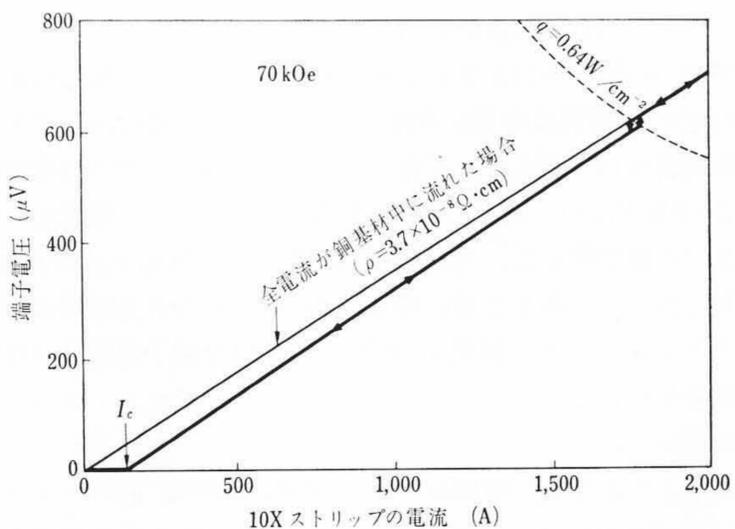


図4 70 kOe における HISUPER-10X ストリップの V-I 特性

Aの電流値で超電導線に戻りはじめて、ついに電流が140Aの臨界電流に達したとき全電流は超電導線中を流れはじめたことを示している。この結果から10Xストリップの熱流束は約0.64W/cm²であ

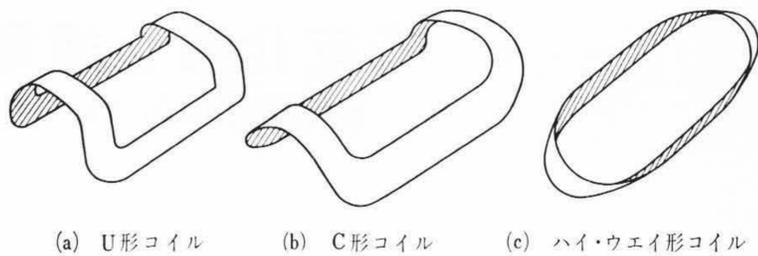
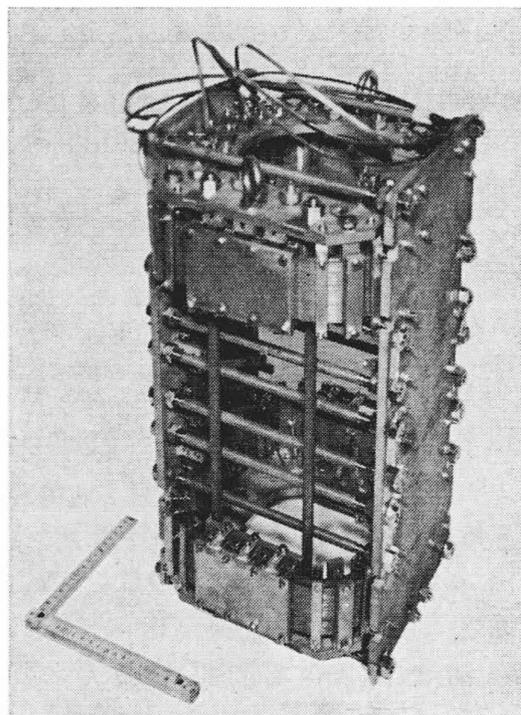
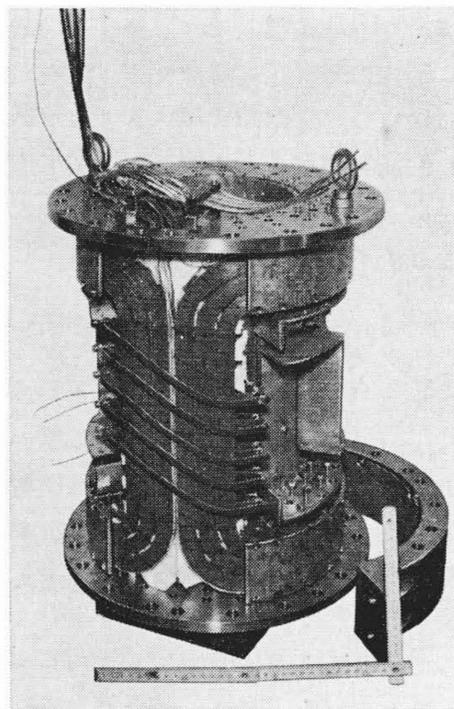


図5 鞍形コイルの種類



(U形, 2層×240 ターン)

図6 鞍形1SUコイル



(C形, 8層×960 ターン)

図7 鞍形3SCコイル

ることがわかった。この事実は本複合超電導体がじゅうぶん安定化されていることを示している。

3. 内径 20 cm 超電導鞍形コイル

鞍形コイルの形状は磁場分布、コイル成形法および製造価格のような種々の条件によって決定される。典型的な鞍形コイルの形状を図5に示した。

HISUPER-4Xストリップを使って、U形および二つのC形鞍形コイルをそれぞれ試作し、実験を行なった。これらのコイルはコイル巻線法が比較的簡単で様な有効磁場長に比べて、コイルの長さを割合短くできる利点もっている。図6には1SUコイル(U形, 2層×240ターン)の外観を、また図7には3SCコイル(C形, 8層

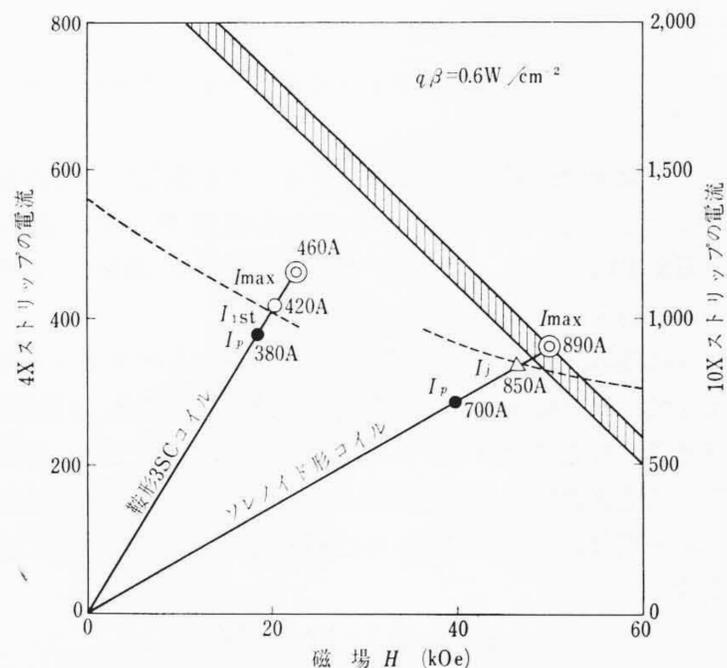


図8 鞍形3 SC コイルとソレノイド形コイルの励磁特性

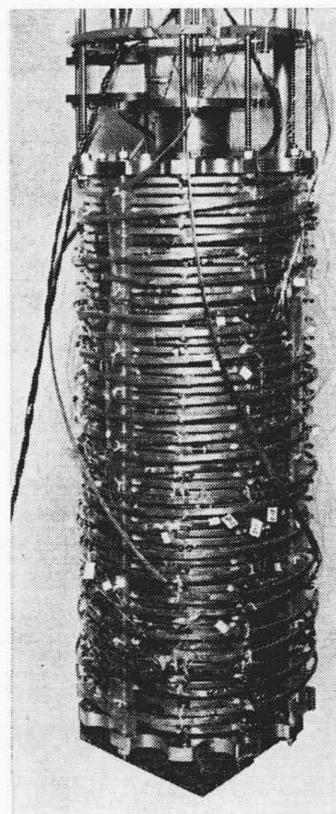


図9 ソレノイド

×960 ターン)の外観を示した。いずれのコイルにおいても、コイル内径は 20 cm, 鞍形の直線部分の長さは 30 cm, そしてコイル長は 42 cm である。また鞍形の曲り部の曲率半径はU形コイルでは 1 cm, C形コイルでは 3 cm である。したがって, HISUPER-4X ストリップは鞍形コイルにじゅうぶん容易に成形することができた。

HITAC 5020 コンピュータの計算結果により, 3 SC コイルではストリップ当たり 400 A の電流が流れたとき動径方向に約 6 t の電磁力が働くことが明らかになったので, コイル外層をステンレス鋼製リングの支持構造物で囲んだ。1 SU と 1 SC コイル (C形, 2 層×240 ターン) は手持ちの電動発電機による安定化されていない電源で励磁した。最大励磁電流 I_{max} は 1 SU コイルの場合には 650 A で, 1 SC コイルの場合には 640 A であった。この各場合における中心磁束密度 B_0 は 1 SU コイルの場合 6.2 kG であり, 1 SC コイルの場合 6.3 kG であった。したがって 1 SC コイルの磁束密度は同じ電流値に対して, 1 SU コイルのそれより高いことがわかった。ホール素子による磁場測定の結果では, 巻線材が経験する最大磁場 B_{max} は 1 SU コイルの場合 13 kG であり, 1 SC コイルの場合 11 kG であった。この差は 1 SC コイルの曲り部における曲率半径が 1 SU コイルのそれより大きいという事実に起因している。電源の安定度が非常に悪かったので, コイル両端子に現われる抵抗が最初に検出される電流 I_{1st} は, 1 SU または 1 SC コイルのいずれにおいても検出できなかった。

3 SC コイルの実験では, リップル ±0.1% の 2,000 A, 20 V 安定化電源を用いて 200 A/min の速度で励磁した。励磁電流が 420 A に達したときは (図 8 の○印) 3 SC コイルから取り出した 10 個の端子には自己誘導以外による電圧上昇は認められなかったが, 励磁電流が 420 A 以上になるにつれて最内層間の端子にその電圧上昇がしだいに現われはじめた。ついに 460 A のとき, 3 SC コイル全体が常電導状態に転移した。このときの中心磁束密度 B_0 は 16 kG であり, 鞍形の曲り部における最大磁束密度 B_{max} は 22 kG であった。コイル両端に自己誘導以外の電圧上昇が認められたのちでは励磁電流をゆっくり減少させると, その電圧上昇は消失した。380 A の励磁電流によって 13 kG の中心磁束密度を発生している状態で 61 分間連続運転を行なったが, コイルの端子電圧の上昇もなく, 安定であった。 $L_c(dI/dt)$ による端子電圧から得られたコイルインダクタンス L_c は 3 SC コイルの場合約 290 mH であった。

1 SU コイルの最大励磁電流が 1 SC コイルのそれより高かったのは前者のコイル構造が後者のものより, 冷却条件がよい構造であ

ったためと考えられる。また, 3 SC コイルの I_{max} が 1 SC コイルのそれよりも低かったのは, 巻線材の経験する磁場の増加と冷却構造が悪かったことに起因していると思われる。

4. 内径 8 cm 超電導ソレノイド形コイル

このソレノイドを試作する際, 強磁場を発生し, 大きな磁場エネルギーをたくわえたコイルの試作経験を得ることが目的であった。使用したクライオスタットの径が正味約 31 cm で, しかも HISUPER-10X ストリップの曲げ加工に対する最小曲率半径が約 4 cm であったことで, ソレノイドの形状や寸法は制約を受けた。したがって 10 X ストリップを使用してコイル内径 8 cm, 外径 27 cm, 長さ 63 cm のパンケーキ状ソレノイドを試作することにした。ソレノイド全体は図 9 に示されるように, 29 個のパンケーキコイルの積み重ねからなっており, 一つのパンケーキコイルは 10 X ストリップで 2 層の円板状に巻かれている。パンケーキコイル間の接続はコイル外縁でストリップを重ね合わせ, Pb-Sn のはんだ付けで行なわれた。動径方向に冷媒の冷却通路を設けるために, マイラーを被覆した放射状スペーサ (ステンレス鋼製, 厚み 0.4 cm) をコイル各層間にそう入した。また一本のストリップに 800 A の電流が一様に流れた場合の電磁力によるコイル軸方向の圧縮応力と動径方向の応力の計算値は, それぞれ 2.1 と 1.4 kg/mm² であったが, この程度の応力では 10 X ストリップはクリープしないので, ソレノイドの冷却構造をよくするため, できるだけ巻線支持構造物を少なくした。またソレノイドを永久電流励磁するために機械的方式の永久電流スイッチを取り付けた。

ソレノイドの実験において, 40 A/min で励磁電流を増加していくと, 850 A で (図 8 中の△印で示される点) 始めてコイル全体間の自己誘導以外による端子電圧の急激な上昇が観測されたが, その後の電流の増加にもかかわらず, その電圧上昇は消失し, ついに 890 A (図 8 中の◎印で示される点) でコイル全体が常電導転移 (Quench) した。このとき巻線部分の最大磁束密度 B_{max} は 50 kG であった。この事実から, 850 A の電流値が銅安定化曲線内にあり, しかもコイルの等価熱流束が約 0.6 W/cm² であったことがわかる。

コイル自己インダクタンス L_c をコイル両端間の端子電圧による $L_c(dI/dt)$ から求めると, 225 mH であった。したがって, 890 A での磁場エネルギーは 89 kJ で, これが Quench 時にすべて液体ヘリウムを蒸発させるのに使われたとすると蒸発液体ヘリウムは 34.5 l

表1 鞍形3SCコイルとソレノイド形コイルの特性

コイルデータ	鞍形3SCコイル	ソレノイド形コイル
中心磁束密度	16 kG	56 kG
アンペア・ターン	4.4×10^5	2.5×10^6
励磁電流	460 A	890 A
線材寸法	0.75 mm × 4 mm	1.6 mm × 7 mm
巻線部の最大磁束密度	22 kG	50 kG
コイルインダクタンス	290 mH	225 mH
ターン数	960	2840
貯蔵エネルギー	31 kJ	89 kJ
ストリップの重量	34 kg	150 kg
コイル内径	20 cm	8 cm
コイル外径	31 cm	27 cm
コイルの長さ	42 cm	63 cm

になる。この値は Quench 時に消失した液体ヘリウムの実測値 31 l とほぼ一致する。

また永久電流励磁は正味 45 分間行なわれ、46 kG の中心磁束密度を発生した。この磁場の減衰から、その時定数は 32 時間であった。したがって、この時定数と上記の $L_c = 225$ mH を用いてソレノイドの全抵抗を求めると、 $2.1 \mu\Omega$ である。ソレノイドには 29 個のパンケーキコイル間の 28 個の Pb-Sn のはんだ付けを行なった接続部と、永久電流スイッチとストリップ間の Pb-Sn のはんだ付の接続部があるので、これらの接続部による抵抗は約 $0.2 \mu\Omega$ となる。したがって、永久電流スイッチの接触抵抗は約 $1.9 \mu\Omega$ である。

5. 結 言

表1は鞍形コイル(3SC)とソレノイド形コイルの特性をまとめたものである。

以上述べた実験結果から超電導マグネットが安定に、しかも容易に運転できることがわかった。これらの基礎データに基づき、HISUPER-10X ストリップを用いて、世界最大の 45 kG、内径 380 mm の鞍形超電導マグネットを製作中である。

終わりに臨み、安定化複合超電導材料の試作とマグネットの製作にあたって、日立製作所中央研究所 佐藤主任研究員、川辺研究員、尾形研究員、日立研究所 多田、佐藤研究員、日立工場 斎藤課員ならびに日立電線株式会社研究部 吉川主管研究員、山路主任研究員、柿崎研究員、山岸研究員らのご協力を得たので、ここに感謝の意を表す。

参 考 文 献

- (1) C. Laverick, G. M. Lobell: Argonne National Laboratory Report, ANL-7002 (1965)
- (2) J. C. Laurence: Proceedings of the First ICEC Kyoto (1967)
- (3) Z. J. J. Stekly: Proceedings of the International Symposium on Magnet Technology (1965)
- (4) 土井, 石田, 川辺, 北田: 日立評論 50, 1065 (昭43-12)
- (5) Z. J. J. Stekly, J. L. Zar: I. E. E. Trans. Nucl. Sci., NS-12, 365 (1965)

Vol. 29

日立評論

No. 3

目 次

■ 論 文

- 原子炉燃料からの気体状核分裂生成物放出量の測定
- 高圧サイリスタ変換装置用パルストランス
- 日本国有鉄道常磐線納搬送式遠方監視制御装置
- 埠頭用コンテナクレーン
- 日立遠心抽出機
- サーモスタットによるディーゼル機関の低温始動検討
- エミューレータ
- LTP レジンモールドトランジスタの開発

- ごみプレス式電気掃除機の開発
- ケーブル被覆用 Pb-Cu-Te 系合金の諸特性

■ ガスタービン特集

- ガスタービンの動向
- ガスタービンの応用
- ガスタービンの運転と制御
- ガスタービン用パッケージ形発電機
- ガスタービンの材料
- ガスタービンとその環境

発行所 日立評論社

東京都千代田区丸の内1丁目4番地
郵便番号 100

取次店 株式会社 オーム社書店

振替口座 東京 71824 番
東京都千代田区神田錦町3丁目1番地
郵便番号 101
振替口座 東京 20018 番

お わ び と 訂 正

本誌論文集(創刊50周年記念 昭和43年12月発行)の本文中に次の誤りがございましたので、おわび致し、訂正申し上げます。

訂 正

訂 正 個 所	誤	正
2頁目左段 下から2行目	600 MVA	600 MW
3頁目左段 上から13行目	600 MVA タンデムコンパウンド	600 MW クロスコンパウンド
3頁目表1(1)の 日立製作所の主担当欄 6行目	原子力発電所設備一式	原子力発電所設備 (共同研究中)