

# 90 kG 超電導マグネット

## 90 kG Superconducting Magnet

相山 義道\* 木村 浩\*\* 工藤 実弘\*\*  
 Yoshimichi Aiyama Hiroshi Kimura Mitsuhiro Kudô  
 多田 直文\*\*\* 齋藤 龍生\*\*\*\*  
 Naofumi Tada Ryusei Saitô

### 要 旨

高磁界用超電導合金として開発したZ合金ならびにS合金線の確性試験として80kGパンケーキ形コイルを試作した。このコイルは外層、内層二つのコイルから成り、外層はX合金(Nb-40Zr-10Ti)を用いたHISUPER-10Xストリップ、内層はZ合金(Nb-62.5Ti-2.5Zr)を用いたHISUPER-16ZMBストリップで巻かれており、あわせて79kGの中心磁界を得た。またS合金(Nb-59Ti-1Si)を用いた小形ソレノイドをこのコイルの中にそう入し、三つの組合せコイルで92kGの中心磁界を得た。これらの実験の結果、高磁界用超電導合金としてのZならびにS合金は高磁界発生コイル用線材としてじゅうぶん使用できることが確認された。

### 1. 緒 言

日立における超電導材料およびマグネットの開発研究は通産省大型プロジェクトを一つの大きな目標として進んできた。その成果は日立の開発したX合金すなわちNb-40Zr-10Ti合金を用いた委託研究45kG鞍(くら)形超電導マグネットの実験成功という形で実った<sup>(1)</sup>。しかし今後、超電導マグネットが各種の分野で実用されるためにはより高い磁界を発生できることが要求される。日立ではこの要求に対処するため高磁界用超電導合金の研究を進め、X合金と同じNb-Ti-Zr3元合金ではあるが、Nb-Ti側の組成を有するZ合金、すなわちNb-62.5Ti-2.5Zr合金の開発を行なった<sup>(2)</sup>。さらに電子技術総合研究所との共同研究によってSiを含む新合金、Nb-59Ti-1Siの組成を持つS合金を開発した<sup>(3)</sup>。本報告はこれら高磁界用超電導合金として開発したZならびにS合金の確性試験ならびに高電流密度の高磁界マグネットの開発を目的として試作した80kGおよび90kG<sup>(4)</sup>マグネットについてまとめたものである。

この種の合金系材料を用いた高磁界超電導マグネットの研究は、国外ではWestinghouse社のCoffey氏らの100kGソレノイド<sup>(5)</sup>、Ferranti-Packard社のAtherton氏らの102kGソレノイド<sup>(6)</sup>がある。また国内では三菱電機株式会社岩本氏らの75kGパンケーキ形コイル<sup>(7)</sup>、日本大学安河内氏の79kG(1.5°Kでは105kG)ソレノイド<sup>(8)</sup>がある。

### 2. コイルの設計

コイルの基本設計方針を次のように決めた。

- (1) コイル全体を第Iブロック(内層)、第IIブロック(中間層)、第IIIブロック(外層)に3分割する。第II、第IIIブロックでそれぞれ約40kGを発生させ80kGとし、第Iブロックで10kGを発生させ、合計90kGとする。
- (2) 第IIIブロックでは性能的にも製作的にも安定しているHISUPER-10Xストリップ<sup>(9)</sup>(委託研究45kG鞍形マグネット用に開発したもの)を用いる。
- (3) 第IIブロックでは高磁界用線材Z合金のメタラジカルボンド線材を用い、高電流密度化をねらって銅と超電導線との断面積比を小さくする。

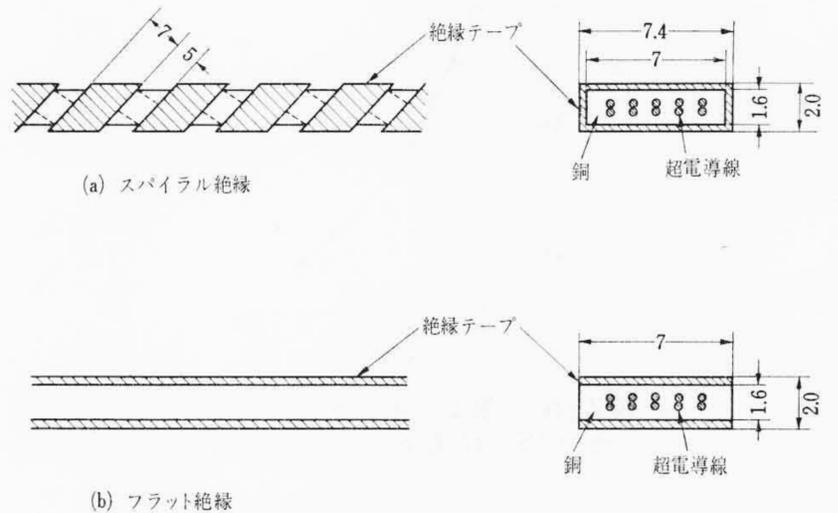


図1 HISUPER-10Xストリップに対する2種の絶縁方式

表1 コイルの設計仕様

		第IIIブロック	第IIブロック	第Iブロック
コイル寸法	内径 (mm)	340	80	20
	外径 (mm)	550	300	65
	長さ (mm)	356	356	100
中心磁束密度 (kG)		40	80	90
電流量 (A)		1,000A at 40 kOe	300A at 80 kOe	8 A at 90 kOe
スペーサ		3mm ギャップ	なし	なし
線材		HISUPER-10X	HISUPER-16 ZMB	HISUPER-1S
	組成 (at%)	Nb-40Zr-10Ti	Nb-60Ti-5Zr	Nb-59Ti-1Si
	寸法 (mm)	7w×1.6t (0.25φ×10本)	2.3φ (0.26φ×16本)	0.37φ×0.25φ
	Cu/Super 比	20:1	4:1	1:1
	絶縁	スパイラル (7w×0.2tテープ)	スパイラル (0.4t×3wテープ)	22μt (ポリイミド)
全長 (km)		3	3	2
重量 (kg)		370	140	

(4) 高電流密度でマグネットを運転するには液体ヘリウムと接する線材の冷却面積をできるだけ広くする必要があり、従来のフラット絶縁方式の代わりにスパイラル絶縁方式を用いた(図1参照)。そして、第IIブロックには冷却通路を設けるためにスペーサをそう入しない。

(5) 第Iブロックは高磁界用線材S合金を用いて巻いた小形ソレノイドとする。

以上の方針で設計したコイルおよび線材の仕様は表1に示すとおりである。

\* 電子技術総合研究所 理学博士  
 \*\* 日立製作所中央研究所  
 \*\*\* 日立製作所日立研究所  
 \*\*\*\* 日立製作所日立工場

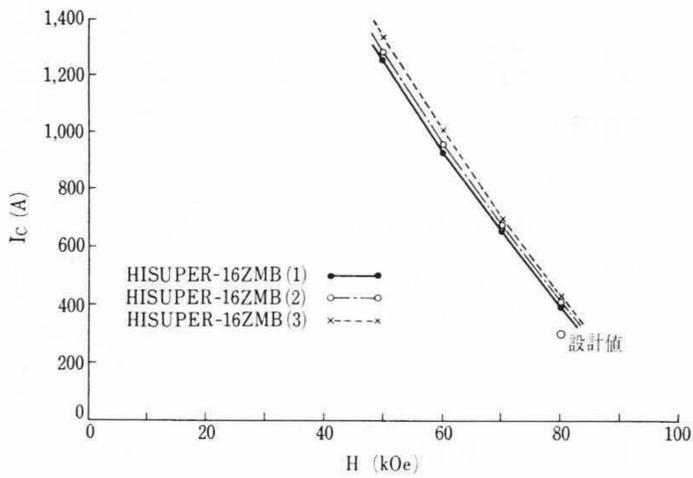


図2(a) 第IIブロックコイル用線材16ZMBのH-Ic特性

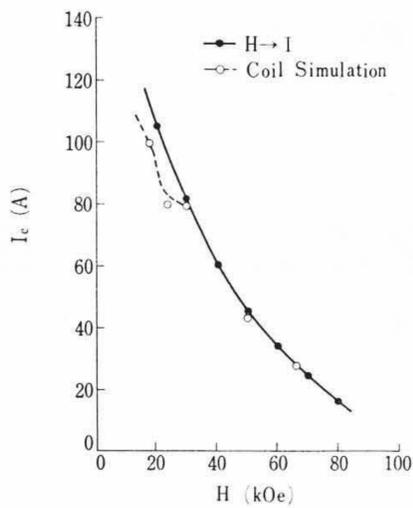


図2(b) 第Iブロックコイル用線材1SのH-IcおよびC.S.特性

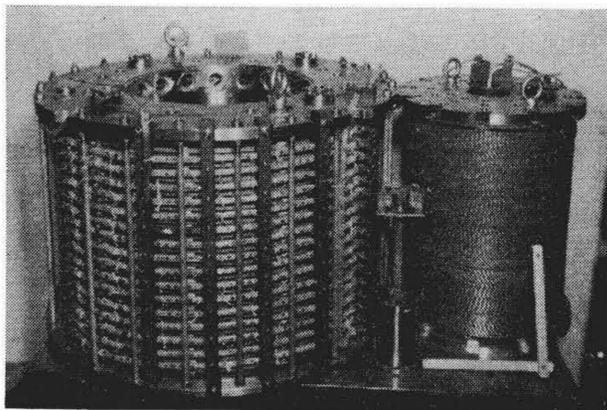


図3 第I, 第II, 第IIIの三つのブロックコイル

### 3. 超電導線材

第IIIブロックコイルに用いたHISUPER-10Xストリップの通電電流量ならびに安定性についてはすでに報告している<sup>(9)</sup>のでここでは省略する。第IIブロックコイル用につくったHISUPER-16ZMBは2.3mm径の銅の中に0.26mm径のZ合金が16本メタラジカル・ボンド加工法によって埋め込まれたものであり、銅と超電導線の断面積比は約4対1である。この線材の界面抵抗<sup>(10)</sup>は $0.004 \mu\Omega\text{-cm}^2$ と非常に小さく銅と超電導線との密着性が良いことを示し、またその磁界-臨界電流(H-Ic)曲線は図2(a)に示したとおりで80kGのIcが400Aであった。第Iブロックコイル用のHISUPER-1Sは0.25mm径のS合金線に58 $\mu$ 厚さの銅クラッド後、22 $\mu$ 厚さのポリイミド絶縁被覆をした外径0.41mm径の単心複合線である。図2(b)はこの線を2ターンの小コイルとして測定したH-Ic曲線を示したものであるが、H→I(磁界一定・電流増加)の操作およびコイル・シミュレーション(磁界と電流とを同時に増加)の操作におけ

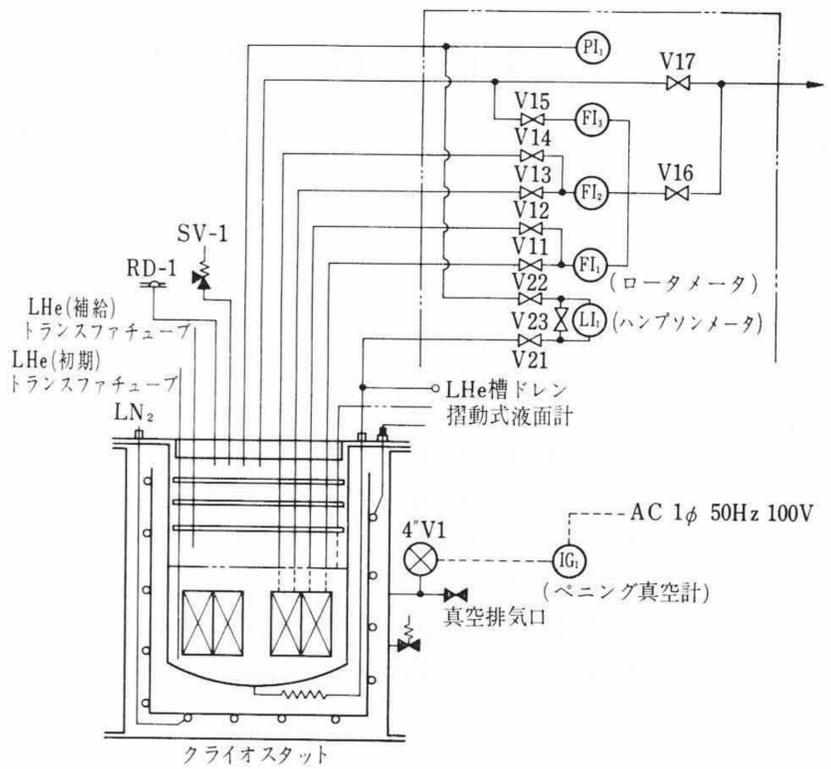


図4 クライオスタットのフローシート

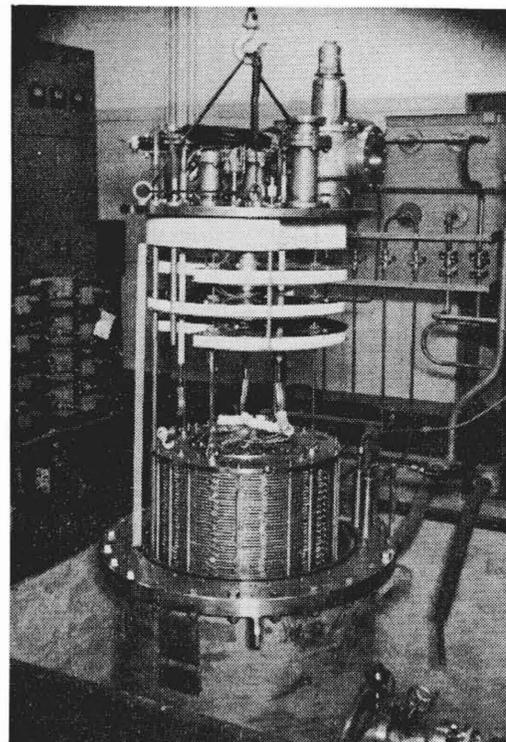


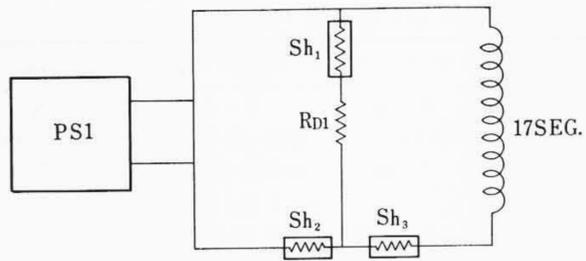
図5 組み上がった90kGコイルをクライオスタットにそう入するところ

るIcが一致し、少なくとも30kOe以上の磁界ではコイル特性の劣化(Degradation)は見られないことが推定された。

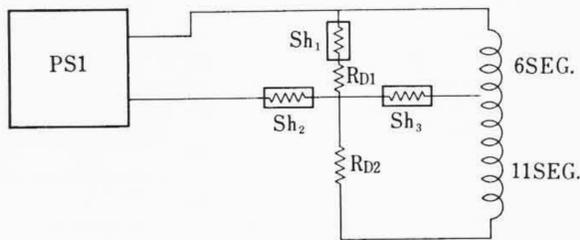
### 4. コイルおよびクライオスタット

試作したコイルの寸法はほぼ設計どおりである。その外観は図3に示すとおりである。第IIIブロックはいわゆるダブル・パンケーキ巻きで54ターン34層から成り、各層間のスペースは3mmで、スペーサとして15mm幅、3mm厚さのものを15度おきにそう入している。第IIブロックにはスペーサを入れず、通常のソレノイドと同様の巻き方をした。したがってこのコイルのクーリング・チャンネルはスパイラル絶縁した円形断面の線のすき間であり、絶縁テープの厚み0.4mmが最小値となる。第Iブロックはコイル自体小さなものでquench(常電導転移)しても特に問題はないと考え、通常の物性研究用ソレノイドと同じ方法で巻いた。

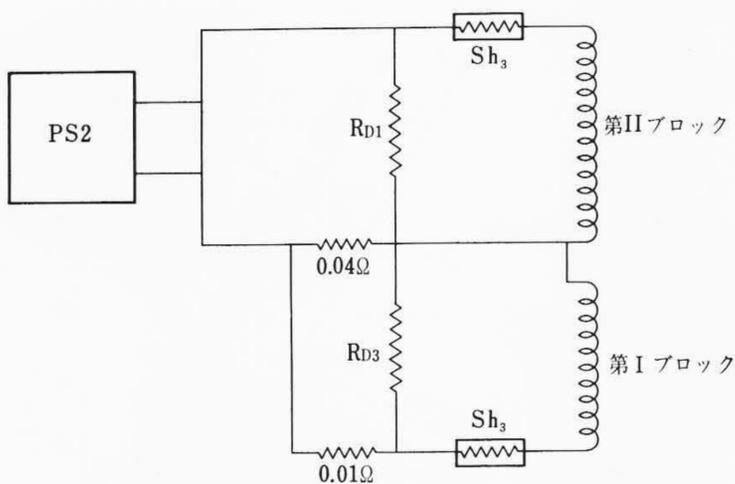
クライオスタットとしては液体ヘリウム槽(そう)内径65cm、深さ125cmのものを製作した。クライオスタット関係のフローシートは図4に示すとおりである。図5は組み上がったコイルをクライオスタットの上ぶたに取り付けたところを撮影したものである。



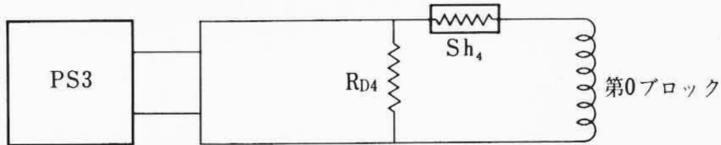
(a) 第IIブロックコイルの励磁回路



(b) 第IIブロックコイルの6SEG.と11SEG.コイルの分割励磁回路



(c) 第I, 第IIブロックコイルの分割励磁回路



(d) 第0ブロックコイルの分割励磁回路

シャント抵抗器: Sh<sub>1</sub>(100 mV/1,000 A), Sh<sub>2</sub>, Sh<sub>3</sub>(100 mV/2,000 A), Sh<sub>4</sub>(10 mV/50 A)  
 直流電源: PS1 (20 V 2,000 A), PS2 (20 V 1,000 A), PS3 (10 V 100 A)  
 外部抵抗: RD<sub>1</sub>(0.25Ω), RD<sub>2</sub>(2.5Ω), RD<sub>3</sub>(0.20Ω), RD<sub>4</sub>(10Ω)

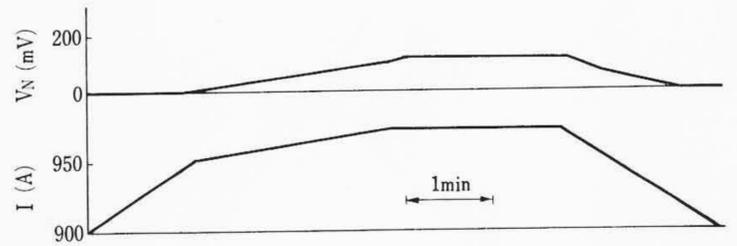
図6 励磁回路

### 5. 励磁実験

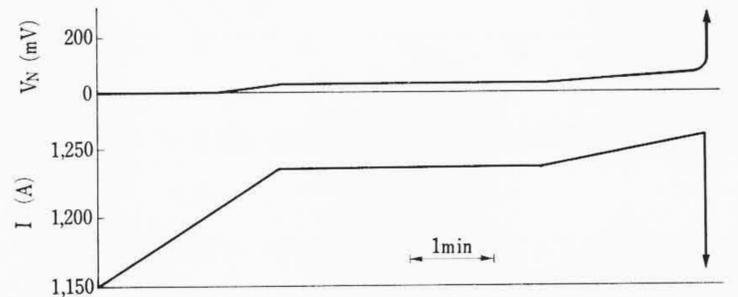
#### 5.1 40 kG コイル (第IIIブロック) の励磁

第IIIブロックコイルは合計17 SEG. (セグメント)(1セグメントはダブルパンケーキ巻きで2層)すなわち34層から成る。これを6 SEG. と11 SEG. に分けてそれぞれ単独に励磁することができるようにした。電圧端子は各 SEG. の端子電圧が測定できるようにし、また中心磁界および最大経験磁界が測定できるようにホール素子をコイルの中心および第9 SEG. の内側に取り付けた。励磁回路は図6 (a), (b)に示すとおりである。

最初は17 SEG. コイルについて励磁回路(a)により40 A/minの上昇速度で900 Aまで励磁した。900 Aまで異常なく励磁できたので、いったん電流をゼロに戻し、次は100 A/minの上昇速度で900 A



(a) 17SEG. コイル



(b) 6SEG. コイル

図7 40 kG コイル (第IIブロック) のコイル電流 I と常電導部の発生により生じた電圧 VN の時間変化

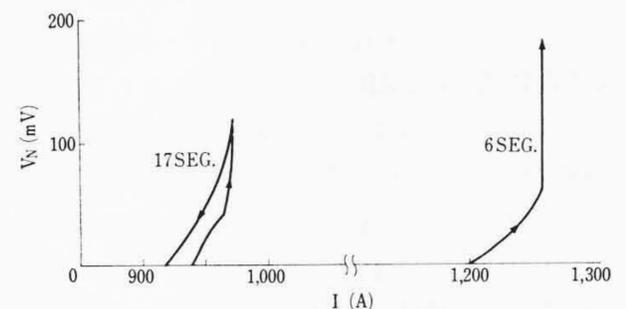


図8 40 kG コイル (第IIブロック) の VN-I 曲線

まで励磁し、その後は40 A/minで励磁を続けた。940 A付近で常電導部分が発生したが、電流上昇を止めると端子電圧は一定値を保ち、常電導部分の伝播(でんば)は見られなかった。さらに10 A/minの低速度で励磁を続けると端子電圧の上昇するのがはっきりわかった。973 Aで励磁を止めたが、そのときの中心磁界 B<sub>0</sub> は39.5 kG, 線材の最大経験磁界は45 kGであった。図7 (a)はこの励磁実験における電流 I と端子電圧 V の時間変化を示したものである。端子電圧はコイルのインダクタンス L によるもの

$$V_s = L \frac{di}{dt}$$

と、常電導部分が発生したときに現われる常電導電圧 VN の和で記録されたが、図7 (a)ではこの VN のみを示した。

次に17 SEG. のコイルの中の上側の6 SEG. のみを励磁した。ゼロから1,000 Aまでは100 A/minで励磁し、1,000 A でいったん電流を停止して常電導部分の発生のないことを確かめたのち、40 A/minの速度で励磁した。電流が1,235 Aに達したときにわずかではあるが常電導部の発生が見られたので、これを確認するため10 A/minで励磁を続けたところ、1,258 Aで急激な電圧の上昇が見られコイルは quench した。このときの線材の最大経験磁界は37 kGであった。図7 (b)は、このときの I と VN の時間変化を示したもので、常電導部が初めて発生したのは1,200 Aであった。

図8は17 SEG. ならびに6 SEG. の励磁実験結果を I と VN でまとめたものである。常電導部が初めて発生する電流値 I<sub>c'</sub> は HISUPER-10X ストリップの I<sub>c</sub> に近い値を示した。

#### 5.2 80 kG コイル (第II, 第IIIブロック) の励磁

一つの電源で第II, 第IIIブロックの二つのコイルを励磁するため

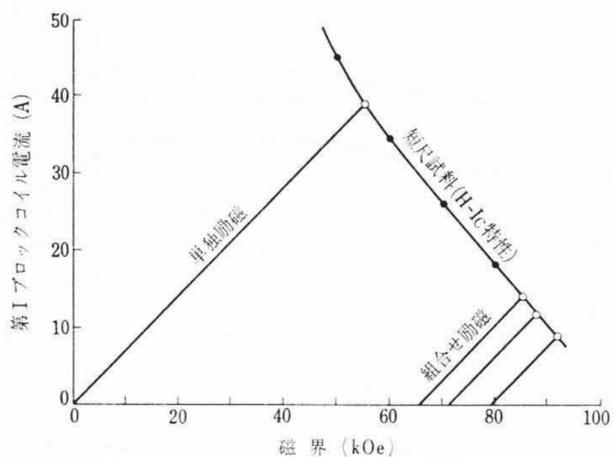


図9 HISUPER-1Sのコイル特性(第Iブロック)

に図6(c)に示すような分割励磁回路を用いて第IIIブロックコイルに流れる電流と第IIブロックに流れる電流の比が5対4になるようにした。まず100A/minの励磁速度で上昇し、第IIIブロックコイルの電流が300, 400, 450, 500Aのときに電流の増加を一時停止し、各コイルの端子電圧に異常のないことを確かめた。第IIIブロックコイルの電流が500Aのとき、第IIブロックコイルの電流は380Aで組合せたコイルの中心磁界は79kGであり、設計の80kGがほぼ満足された。このときの第IIブロックコイルの電流は380Aであったので、HISUPER-16 ZMBのコイル特性としては短尺試料のIc値近くまで安定に電流を流しうることが確認された。

5.3 90kGコイル(第I, 第II, 第IIIブロック組合せ)の励磁

三つのブロックの組合せ励磁は第II, 第IIIの80kGコイルの励磁と同時に行なわれた。すなわち第Iブロックコイルの電源としては別の一つ用意して、80kGコイルの第IIIブロックのコイル電流が400, 415, 450, 500A(第IIブロックコイルの電流はそれぞれ320, 332, 360, 400A)のときに一時電流を停止した状態で、第Iブロックコイルの電流を図6(d)の励磁回路により、3.3A/minの励磁速度でquenchするまで上昇した。第Iブロックコイルがquenchしても第II, 第IIIブロックコイルの端子電圧に異常は認められなかった。第IIIブロックコイルの電流が415, 450, 500Aのときの第II, 第IIIブロックコイルの発生した磁界はそれぞれ65.5, 71, 79kGに相当し、これが第Iブロックコイルのバイアス磁界となる。この関係は図9にまとめて示されている。なお、図9には第Iブロックの単独励磁の場合を示してあるが、トレーニング効果なしで39Aまで励磁でき、そのときの磁界は56kGであった。この単独ならびに組合せ励磁で第Iブロックがquenchしたときのコイル電流と短尺試料のH-Ic特性はよい一致をみた。組合せ励磁のなかで、79kGのバイアス磁界では9Aで13kGの磁界を発生し、三つのコイルを合わせると92kGとなった。この92kGコイルの特性は表2および図10に示すとおりである。このことからHISUPER-1Sは高磁界用線材としてじゅうぶん使用できることが確認された。

6. 結果の検討

6.1 コイル特性

40kGパンケーキコイル(第IIIブロック)を単独励磁したときの中心磁界は39.5kGで40kGより若干下回った。しかしこのときの線材の最大経験磁界は45kGであったのに対して、第IIブロックコイルと組み合わせると最大経験磁界は約41kGまで下がることが計算で求められているので40kGをじゅうぶん満足することがほぼ確実であり、特にこれを確かめるための実験は行なわなかった。また電流が940Aに達してもコイルがquenchすることなく、さらに電流を増加し、一部常電導部分を発生させ電圧が出た状態で電流を保持しても、常電導部分がさらに伝播することなく安定に励磁された。こ

表2 90kG超電導マグネットの特性

	第Iブロック	第IIブロック	第IIIブロック
超電導線材	S合金 (Nb-59Ti-1Si) 単線 ポリイミド絶縁	Z合金 (Nb-62.5Ti-2.5Zr) 銅丸線に16本埋込み メタラジカルボンド 方式 スパイラル絶縁	X合金 (Nb-40Zr-10Ti) 銅ストリップに10本 埋込み 圧延方式 スパイラル絶縁
有効空間内径 (cm)	1.5	7	32
コイル内径 (cm)	2	8	34
コイル外径 (cm)	6.5	30	55
コイル長 (cm)	10	36	35
コイル電流 (A)	9	380	500
磁界係数 (G/A)	1,435	154	43
各ブロック発生磁界 (kG)	13	58	21
総合中心磁界(kG)	92		

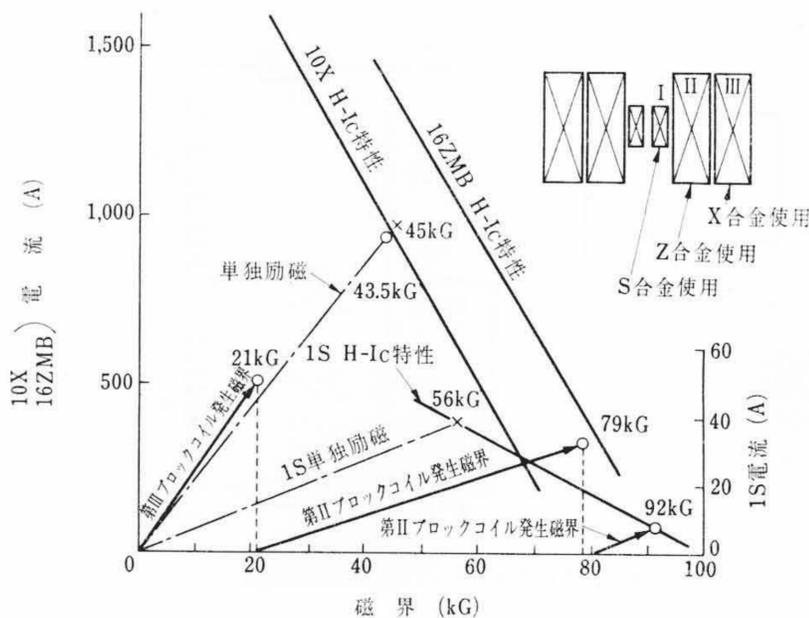


図10 90kG超電導マグネットの発生磁界曲線

のような意味で40kGコイルは安定化されているといえる。このコイルの熱流束qmを安定化パラメータの式を用いて計算してみると

$$\alpha = \frac{\left(\frac{\rho}{A}\right) I^2}{q_m \beta P_0} \dots \dots \dots (1)$$

ここでαは安定化パラメータ、ρは銅の磁気抵抗効果を含めた比抵抗、Aは銅の断面積、P0はストリップの全周囲、βは露出係数<sup>(5)</sup>である。従来、コイルのqmは最大電流Imを(1)式のIに入れ、α=1として求めていた。しかし、コイルのV-I(電圧-電流)特性は短尺試料のV-I特性とは異なり、後者ではIc以上の電流が流れたときに発生する電圧の大きさは抵抗状態における銅への電流の分流の大きさによるが、前者、すなわちコイルのV-I特性におけるIc'以上の電流による電圧の発生は、主として常電導部分の伝播によるものである<sup>(11)</sup>。したがってα=1とするよりは、むしろLontai<sup>(12)</sup>の常電導部分が伝播するかしないかという条件、すなわちコイルがquenchしたときの電流Imとα=2を用いるべきであると考えた。この考え方で求めたコイルのqmは6SEG.で0.24W/cm<sup>2</sup>、qmβで表わすと0.10W/cm<sup>2</sup>であった。17SEG.ではquenchしなかったが、973Aを入れて求めると、qm≥0.17W/cm<sup>2</sup>、qmβ≥0.07W/cm<sup>2</sup>となった。また、尾形研究員らのクーリング・チャンネルによるqmの実験結果<sup>(13)</sup>をもとにして、チャンネル幅3mm、長さ2mmの上向きならびに下向き面およびチャンネル幅0.2mm、チャンネル長さ7mmの垂直面のqからコイルのqmを求めてみると、

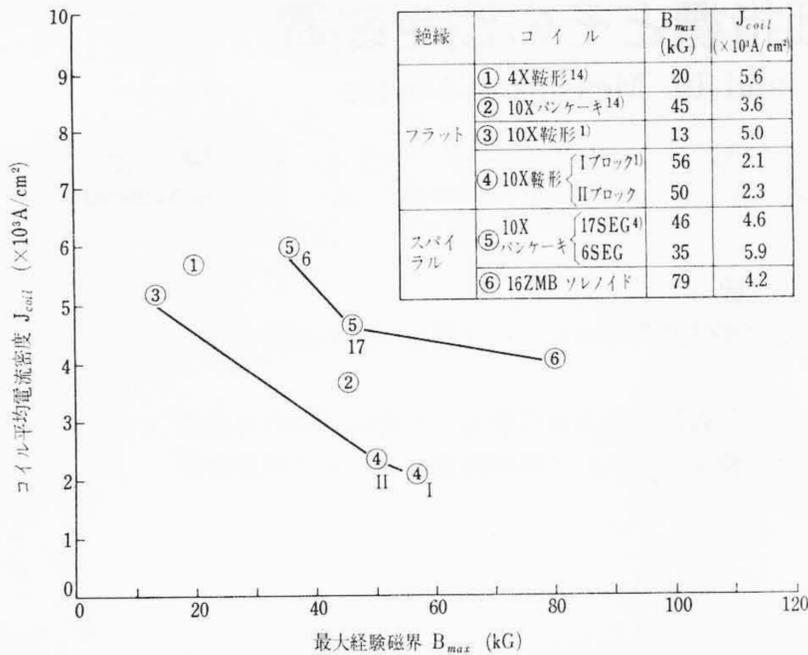


図 11 各種コイルの平均電流密度の比較

$$q_m = \frac{0.16}{1.72} \times 0.55 + \frac{0.16}{1.72} \times 0.01 + \frac{0.7}{1.72} \times 0.22 \times 2 = 0.22 \text{ (W/cm}^2\text{)}$$

(上向き面) (下向き面) (垂直面×2)

となった。この値は先に求めた値 0.24 W/cm<sup>2</sup> とよく一致している。

第IIブロックコイルは quench あるいは常電導部分の発生が認められなかったために q<sub>m</sub> を求めることはできないが、79 kG で 380 A の値を用いて形式的に計算すると、q<sub>m</sub> は 0.30 W/cm<sup>2</sup> 以上、q<sub>m</sub>β では 0.12 W/cm<sup>2</sup> 以上であることが推定された。中形のコイルでは円形断面の線材に厚目のテープでスパイラル絶縁をすれば、特別にクーリング・チャンネルを設けなくても線材の I<sub>c</sub> 近くまで安定に励磁できるものと思われ、高電流密度コイルの製作の可能性を高めたものといえる。

Z合金線の臨界電流密度を HISUPER-16 ZMB の短尺試料の H-I<sub>c</sub> 特性より求めると、80 kOe で 5.3 × 10<sup>4</sup> A/cm<sup>2</sup> の値であった。S合金の臨界電流密度は 80 kOe で 3.7 × 10<sup>4</sup> A/cm<sup>2</sup> と低かったのは、第1回の長尺試作線のため、最適熱処理、加工条件とも少し異なる加工方法を採用したためであり、当然、より高い I<sub>c</sub> 値すなわち 6.2 × 10<sup>4</sup> A/cm<sup>2</sup><sup>(3)</sup> に近い値の線をつくることができると考えられる。

### 6.2 コイルの平均電流密度

図 11 は今までに日立製作所で実験した各種超電導コイルの平均電流密度を比較したものである。本実験に用いたスパイラル絶縁ストリップで巻いたパンケーキコイル(第IIIブロック)の平均電流密度は図中⑤で示され、6 SEG. の場合を⑤<sub>6</sub>、17 SEG. の場合を⑤<sub>17</sub>、で表わしてある。従来のフラット絶縁ストリップによって巻かれたコイル②のそれと比較して 1.3 倍程度高く、高電流密度コイルの製作の可能性を高めたものといえる。また、第IIブロックコイルの平均電流密度は 79 kG で約 4.2 × 10<sup>3</sup> A/cm<sup>2</sup> であり、図中⑥に位置する。これはスパイラル絶縁線材を用いたうえに、クーリング・チャンネルを設けるためのスペーサも省略したためである。スパイラル絶縁ストリップを用い、スペーサを省略する高電流密度化の方式は、少なくとも中形の高磁界発生用パンケーキ形コイルあるいはソレノイドに有効であるといえる。

## 7. 結 言

高磁界、高電流密度の超電導マグネット用線材として開発した Z合金 (Nb-62.5 Ti-2.5 Zr) ならびに S合金 (Nb-59 Ti-1 Si) の確性試験を目的に試作した 80 kG および 90 kG 超電導マグネットの励磁実験を行なった結果、下記の結論を得た。

(1) 第IIIブロック(外層)を HISUPER-10 X ストリップ、第IIブロック(内層)を HISUPER-16 ZMB 線材で巻き、これら二つのコイルを組合せて 79 kG の中心磁界を発生した。また HISUPER-1 S を巻いたソレノイド(第Iブロック)を上記コイルの内側にそう入し、三つのコイルを組合せて最高 92 kG の中心磁界を得た。

(2) スパイラル絶縁を施して冷却面積を広くした HISUPER-10 X ストリップを用いた第IIIブロックコイルは、ある程度安定性を確保して、なおかつ高電流密度化した状態でもストリップの短尺試料の H-I<sub>c</sub> 特性まで励磁できることがわかった。コイル全断面での平均電流密度で比較すると、従来のフラット絶縁 10 X ストリップで巻いたパンケーキコイルの 1.3 倍に達した。スパイラル絶縁方式はパンケーキ形コイルの高電流密度化に有効である。

(3) スパイラル絶縁 HISUPER-16 ZMB で巻き、スペーサを用いず高磁界で高電流密度化を図った第IIブロックコイルの平均電流密度は 79 kG で 4.2 × 10<sup>3</sup> A/cm<sup>2</sup> であった。またこのコイルは HISUPER-16 ZMB の短尺試料の I<sub>c</sub> 値まで安全に運転される。また Z合金は 60~80 kG の高磁界でじゅうぶんな性能を有している。

(4) 種々のバイアス磁界のもとで励磁した第Iブロックコイルの特性から、S合金はコイル特性にも不安定性がみられず、コイルにして用いたときの HISUPER-1 S の電流容量は、短尺試料の H-I<sub>c</sub> 特性と一致した。S合金は 60~90 kG 発生の高磁界物性研究用小形ソレノイド用線材に適している。

本研究を行なうにあたり、電子技術総合研究所富山技官、日立製作所日立研究所飯塚主任研究員、日立工場笠原副技師長、加沢主任技師、中央研究所土井部長、石田研究員には有益なご討論をいただいた。また線材の製作では日立電線株式会社の関係者にご協力いただき、中央研究所黒田主任研究員にはコイルの設計を手伝っていただいた。そのほか、佐藤主任研究員、尾形研究員にはクライオスタットの製作について有益なご助言をいただいた。以上のかたがたに感謝の意を表する次第である。

### 参 考 文 献

- (1) 木村ほか: 低温工学 5, (2), p.69 (1970)
- (2) T. Doi, et al: Trans. AIME 242, p. 1793 (1968)
- (3) 石田ほか: 低温工学 5, (3), p. 157 (1970)
- (4) 相山ほか: 低温工学研究発表会 第6回 30a-S-5
- (5) H. T. Coffey, et al: J. Appl. Phys. 36, p. 128 (1965)
- (6) D. L. Atherton, et al: Canadian J. Appl. Phys. 48, p. 1003 (1970)
- (7) 岩本ほか: 低温工学 5, (2), p.44 (1970)
- (8) 安河内: 日本工業新聞 (45.6.30)
- (9) 土井ほか: Proc. of the First ICEC, Kyoto (1967)
- (10) 工藤ほか: 低温工学 4, (5), p. 213 (1969)
- (11) 工藤ほか: 低温工学研究発表会 第6回 30a-S-6
- (12) L. Lontai: ANL Report No. 7192 (1966-3)
- (13) 尾形ほか: International Institute of Refrigeration, Commission I Meeting, Tokyo (1970)
- (14) T. Doi, et al: Proc. of the Second ICEC, Brighton, England (1968)