U.D.C. [621. 318. 3:538. 945]: [621. 3. 045. 6-713:538. 941]

特集 超電導と応用技術

# 高磁界発生用超電導マグネット

High Field Superconducting Magnets

高磁界用超電導マグネットは,強磁場発生装置として材料物性や磁場中合成の研究設備に用いられているが,将来は核融合装置や理化学機器用NMR(核磁気共鳴装置)の高磁界化に適用できる幅広いニーズがある。

日立製作所では、高磁界特性に優れた(Nb, Ti)<sub>3</sub>Sn極細多心線材, In Situ  $V_3Gaおよび改良型表面拡散V_3Gaテープ線材を新たに開発し、さらにコイルの電磁気的・機械的安定性を改良して4.2 Kの運転で超電導マグネットだけでは世界最高の18.1~18.2 Tの高磁界発生に成功した。今後、さらに高磁界化、大型化を図るには、高臨界磁界超電導材料と超流動He冷却技術の開発が二大ポイントで、設計・製作中のマルチコア計画20 T級マグネットの開発の位置づけについても明らかにした。$ 

井.	F		廉*	Kiyoshi Inoue
太フ	ון כ	恭	治**	Kyôji Tachikawa
多日	田	直	文***	Naofumi Tada
謙丨	田	圀	尚****	Kunihisa Kamata
<b>尾</b>	形	久	直****	Hisanao Ogata
竜	沢	照	宏*****	Teruhiro Takizawa

言

高磁界用超電導マグネットは,主として新超電導線材の評価を行うために開発されてきたが,より高磁界を発生させる ためには長尺の新超電導線材を開発した後,コイル巻線する 必要がある。したがって,日立製作所では将来波及効果の大 きい線材開発と安定化技術など新技術を駆使し,新超電導線 材の開発とそれを用いたコイルによる高磁界発生の実証を両 輪に開発を進めてきた。特に新超電導線材の開発については, 科学技術庁金属材料技術研究所と共同研究を行い,高磁界マ グネットの実用化に際しては日本原子力研究所,科学技術庁 金属材料技術研究所,九州大学および日立製作所社内の研究 設備にそれぞれ記録品を製作し,推進させていただいた。

高磁界用超電導マグネットの発生磁界を左右する主要技術 課題を定性的に示したものを図1に示す。コイルの蓄積エネ ルギーが小さい(コイル規模が小)高磁界マグネットは,線材 の高磁界下での臨界電流が発生限界磁界の大きさを支配し, 超電導の利点を生かすためには,コイルが経験する最大磁界 で線材の安定化材を除く断面積当たり少なくとも200 A/mm<sup>2</sup> 以上の電流密度が必要である。そのため,高臨界磁界材料を 用いて,高磁界中での臨界電流を高める製造プロセスの開発 と,マグネットの動作温度を下げることによって超電導線材 の臨界磁界,臨界電流密度を向上させる方法が実施された。 今後,蓄積エネルギーの大きい高磁界マグネットを実現する 導の臨界性能が低下しない高耐ひずみ性超電導線材の開発が 必要になると考えられる。

## 2 高臨界磁界超電導線材の開発

2.1 (Nb, Ti)₃Sn極細多心線材

種々の合金元素を添加してNb<sub>3</sub>Sn極細多心線材の高磁界特 性改良を,科学技術庁金属材料技術研究所との共同研究で精 力的に行い,ブロンズ法でのCu-SnマトリックスへのTi添加 がもっとも有効であることを明らかにした<sup>1)</sup>。その後,線材の 大容量化と長尺化開発を行い,多くの高磁界マグネットに適 用した結果,現在ではNb<sub>3</sub>Sn極細多心線材に代わり高磁界用 超電導線材の一番手として実用化されている。また最近では, 国際協力VAMAS (Versailles Projects on Advanced Materials and Standards)の一環として臨界電流測定法の標 準化の研究に寄与し,その性能は国際的にも高い評価を得て いる<sup>2)</sup>。

Nb心材とCu-7.5Sn-0.4Ti(原子%)マトリックスの組み合 わせで複合加工法によって製作した(Nb, Ti)<sub>3</sub>Sn極細多心線 材の代表的な横断面を図2に示す。線材は1.8 mm×9.5 mm の平角断面で,約5 μm直径のNb心材が361本単位でNb拡散 障壁で囲まれたTi添加ブロンズ中に埋め込まれ,それらが349 組みCu安定化材中に複合化された構成である。この寸法で

15

# には、膨大な電磁力の支持法および大きな応力に対して超電 933 K×200 hの拡散熱処理を行い、Nb心材の外周部に厚さ約

\* 科学技術庁金属材料技術研究所筑波支所 工学博士 \*\* 東海大学工学部 工学博士 \*\*\* 日立製作所日立研究所 \*\*\*\* 日立電線株式会社金属研究所 工学博士 \*\*\*\*\* 日立製作所機械研究所 工学博士 \*\*\*\*\*\* 日立製作所日立工場 594 日立評論 VOL. 71 No. 7(1989-7)









図3 高磁界用超電導線材の臨界電流密度特性 臨界電流は |µV/ 10 mmの電圧発生時の電流で,臨界電流密度は安定化銅を除く断面積当 たりで表示している。高磁界下での*l*。測定は東北大学のHM(Hybrid Magnet)および科学技術庁金属材料技術研究所のSCM(Superconducting Magnet)で行った。



図2 (Nb, Ti)<sub>3</sub>Sn極細多心線材の横断面図 1.8 mm×9.5 mmの 断面で,黒い点一つはブロンズマトリックスに埋め込まれた361本の (Nb, Ti)<sub>3</sub>Sn心材の複合体,白い部分はCu安定化材である。1<sub>c</sub>は1,650 A at 16Tである。

1µmの(Nb, Ti)<sub>3</sub>Sn層を形成させた。安定化材と超電導部分 (非安定化材)の断面積比は1.0,臨界電流*I*<sub>c</sub>は16 Tの磁界中で 1,650 Aである。

(Nb, Ti)<sub>3</sub>Sn極細多心線材の4.2 Kおよび1.8 Kでの臨界電 流密度 $J_c$ の典型例を図3に示す。4.2 K, 15 Tでの安定化銅を 除いた断面積当たりの $J_c$ は, 無添加のNb<sub>3</sub>Sn極細多心線材の約 2 倍となるが, 拡散熱処理条件の最適化によってこの値は400 A/mm<sup>2</sup>に達する。1.8 Kでの $J_c$ は, 4.2 Kより1.5~2 T高磁界 側にシフトし, 超流動He冷却下では高磁界発生が有利になる ことがわかる。同図から $J_c$ が200 A/mm<sup>2</sup>の磁界強度は, 4.2 K で17.7 T, 1.8 Kで19.6 Tであり, (Nb, Ti)<sub>3</sub>Snコイルで発生 できる最大磁界の目安と考えられる。 ことによる。なお、 $H_{c2}$ の上昇は高磁界下のひずみ特性を大幅 に改善し<sup>3)</sup>、このひずみ効果を考慮すると(Nb、Ti)<sub>3</sub>Sn極細多 心線材の $J_c$ は無添加のNb<sub>3</sub>Sn線材の約3倍にも達することに なる。

### 2.2 V<sub>3</sub>Gaテープ線材

 $V_3GaoH_{c2}$ はNb<sub>3</sub>Snとほぼ同等であるが、表面拡散法で製作したテープ線材は極細多心線材の $H_{c2}$ より高く、優れた高磁界特性を持ち、科学技術庁金属材料技術研究所の17.5 Tマグネットで長い間超電導マグネットの最高磁界発生記録を保持していた<sup>4</sup>。

4章で述べる科学技術庁金属材料技術研究所の18 T級マグ ネットの内層コイルに使用した幅10 mm,厚さ0.13 mmのIn Situ法によるV<sub>3</sub>Ga,および改良型表面拡散法によるV<sub>3</sub>Gaテー プ線材の臨界電流特性も図3に示した。In Situ V<sub>3</sub>Gaテープ は、Cu-35%V鋳塊をアーク溶解法で作製した後、テープ状に 加工し、Gaめっきを施した後、773 Kで(20~100)時間の拡散 熱処理を行い、延伸されたVの樹枝状晶をV<sub>3</sub>Gaフィラメント に変換させたものである。このV<sub>3</sub>Gaフィラメントは長手方向 には不連続であるが、フィラメントどうしが重なり合ってい るため抵抗ゼロの超電導電流が流れるものと考えられている。 In Situ V<sub>3</sub>Gaテープ線材のフラックスジャンプに対する安 定性を図4に示す。従来の表面拡散Nb<sub>3</sub>Snテープ線材で報告さ れているような不安定性が観測された<sup>5)</sup>。すなわち、磁界Bと 電流Iが直角でもテープ面に対する磁界の方向、および磁界の

Kramer Plotによって(Nb, Ti)<sub>3</sub>Sn極細多心線材の上部 臨界磁界 $H_{c2}(4.2 \text{ K})$ を推定した結果, 24~25 Tとなる。無添 加のNb<sub>3</sub>Sn線材の $H_{c2}$ は21 Tであるので, この $H_{c2}$ の上昇は Nb<sub>3</sub>Sn層にTiが入り, 比抵抗 $\rho_n \epsilon_{35} \times 10^{-8}$  Qm程度まで高める



図 4 In Situ V<sub>3</sub>Gaテープ線材の安定性 In Situ V<sub>3</sub>Gaテープの*l*<sub>c</sub> は、テープ面に対する磁界の方向および磁界の変化速度によって大きく 異なる。小コイルの性能は、過渡安定化電流の計算値とよい一致を示 した。

変化速度によって*I*cが大幅に異なることがわかる。特にテープ 面に垂直な磁界が変化するとき(コイル端部の磁界方向に相 当)がもっとも不安定で,過渡安定化電流の計算値とよい一致 を示し,またコイルの励磁性能を推定できることがわかった。 改良型表面拡散テープは,純VまたはV-5 at %Alテープを 基材として用い,さらに2段熱処理を施すことによって,従 来の高磁界性能を大幅に改善できた。 の熱伝達でも、HeⅡの最大熱流束は条件にもよるがHeIの場 合の数倍にも達する。

次に, 超流動Heの生成について述べる。HeⅡの温度が低い ために、その生成にはHeI(4.2K)生成時の約2倍の運転動力 を要する。したがって、冷却システムの効率向上が重要な課 題となる。Heの相図を図5に示す。他の流体と違って絶対零 度でも液相が存在し、λ線の左側の液相で超流動体となる。通 常HeIIの生成は、大気圧の液体Heを飽和HeIIで冷却するか、 もしくはHeII浴の飽和蒸気圧を5kPa {38 Torr}以下に下げ る(飽和HeⅡ冷却)ことによって実現している。最近は前者の 冷却方式を用いた高磁界超電導マグネットの開発が活発であ る。その理由は、システムはやや複雑になるものの熱伝達性 の良さ、マグネットを大気圧下で運転できることなどの長所 にある。日立製作所で開発したHell生成装置の主要部を図6 に示す。
熱交換器(同図中③)の内外表面にフィン加工した銅 管を、またHeIと排出Heガスとの熱交換器(同図中⑤)に積層 多孔板を用いるなど,新機軸を採り入れている。一方,後者 の冷却方式は、従来からのHeI冷却の延長上にあり、構成が 比較的簡単で、しかも同一のクライオスタット構造でHeI冷

#### 2.3 Nb<sub>3</sub>AI極細多心線材

Nb<sub>3</sub>Al系材料は、Nb<sub>3</sub>Alで30 T、Nb<sub>3</sub>(Al·Ge)で40 Tと高い  $H_{c2}(4.2 \text{ K})$ を持つことから、次期高磁界用材料として注目さ れている。日立製作所でも科学技術庁金属材料技術研究所と 共同でNb管とAl-Mg合金心材の組み合わせで複合加工する ことにより、心材径0.1  $\mu$ m以下で4.2 K、10 Tで1,000 A/mm<sup>2</sup>  $OJ_c$ を示すNb<sub>3</sub>Al極細多心線材を開発した(図 3 参照)。本方法 は、高温でだけ安定な化学量論組成を示すNb<sub>3</sub>AlをNbとAlの 拡散距離を小さくすることによって低温で生成させ、 $J_c$ の向上 をねらったものであるが、臨界温度 $T_c$ や $H_{c2}$ が低く、そのため 高磁界特性は急激に低下する欠点がある。したがって、20 T 級の高磁界線材として実用化するためには、急冷法を主体と した新たな技術開発が必要と思われる。

# 3 超流動He冷却技術の開発

超流動液体He(以下, HeⅡと略す。)は, 温度領域が2.17K

却でもHeⅡ冷却でも可能な点を生かして,多目的な超電導マ グネットシステムに利用できると考えられる。

そのほか,特殊なHeII冷却方式として注目されているGGG (ガドリニウム・ガリウム・ガーネット)の断熱消磁を用いた 「磁気冷凍」についても日立製作所は研究開発を進めている<sup>7)</sup>。



以下と低く,かつ熱伝導などの熱流体的性質が通常の液体He (以下, He I と略す。)に比べて格段に優れているため、小型マ グネットの冷媒として好適なことは古くから知られていた。 例えば、NbTi合金系線材のH<sub>c2</sub>は、HeⅡ冷却によってHeI冷 却(4.2 K)のときに比べ約20%上昇する。また、固体表面から

図5 ヘリウムの相図 A点は大気圧のHe Iを, B点は大気圧のHe II を, C点は飽和He IIを示す。



## 4 高磁界発生用超電導マグネット

日立製作所で製作した主な高磁界超電導マグネットの諸元 を表1に示す。一般にこれら研究用の高磁界マグネットは、 高磁界を必要とする空間の範囲内でその磁界強さをいかに効 率的(高電流密度)に発生させるかに苦心する。コイル巻線法 としては、 巻線内にHeの冷却チャネルを持つパンケーキ巻線 と冷却チャネルのない密巻きがあり、また化合物コイルでは 巻線時のひずみを無視できるW & R(Wind and React)法と 通常のR & W法(以下, Pre-react法と言う)がある。パンケ ーキ巻線か密巻きかは主としてコイル規模に関係し、おのず とコイル電流密度が決定される。日立製作所では、化合物極 細多心線材の開発当初から,将来の大型高磁界マグネットへ の適用を目標に、ほとんどのコイルは化合物層を生成した後 コイル巻線するPre-react法を採用している。特に日立製作所 では, 密巻き超電導コイルでの機械的じょう乱の低減策につ いて検討し, ひずみ劣化を生じない範囲で高張力でギャップ レスに巻線する成型巻線法を開発して、これら高磁界コイル に適用し成功した。

No.

$\bigcirc$	He I 容器
2	He II 容器フランジ (直径270 mm)
3	He II 熱交換器
4	弁
(5)	He I 熱交換器
6	排気管
$\bigcirc$	飽和He II 容器

図 6 超流動ヘリウム(He II)生成装置の主要部 熱交換器③の下部に,超電導マグネットなどの被冷却体を収め,フランジ②とともにHe II の密閉容器を形成する。

科学技術庁金属材料技術研究所の新超電導材料の研究開発 用に製作した中心磁界18.1 Tの超電導マグネットの外観を 図7に示す。マグネットは内外層二つのコイルから構成され, 外層はNbTiと(Nb, Ti)<sub>3</sub>Snの極細多心線材をパンケーキ巻線 した14 T級コイル,内層はIn Situ V<sub>3</sub>Gaと改良型表面拡散 V<sub>3</sub>Gaテープをパンケーキ巻きした4Tコイルで,内外層コイ ルを組み合わせて,4.2 Kでは世界最高の18.1 Tの磁界発生に 成功したものである<sup>8)</sup>。

表1 日立製作所で製作した主な高磁界超電導マグネット 日立製作所では将来の大型・高磁界マグネットへの適用を考え,ほとんどの場合 Pre-react線材を用いたコイル巻線法である。

マグネット	設置機関	科学技術庁金属	材料技術研究所	九州	大学	1.11	日立製作所	日立研究所	
コイル寸法 (mm)	ボア径	180	30	230	100	278	120	42	20
	内径	190	40	250	110	300	130	50	30
	外 径	630	150	718	208	477	240	114	100
	軸長	680	231	742	450	402	250	150	89
コイル	電 流(A)	1,180	130	570	330	593	144	155	179
コイル電流密	度(A/mm <sup>2</sup> )	55	69	63	64	148	75	54	88
ター	ン数	8,571	5,958	12,252	5,302	8,621	7,275	1,672	1,544
最大 経 験	磁 界(T)	14.2	18.1	11.7	16.2	12.5	15.8	17.2	18.2
蓄積エネルギー(MJ)		6.1		8.5		2.9			
超電導	線材	NbTi, (Nb, Ti)₃Sn	V3Ga	Nb⊤i, Nb₃Sn	(Nb, Ti) <sub>3</sub> Sn	Nb⊤i, Nb₃Sn	(Nb, Ti)₃Sn	(NbTi)₃Sn	V3Ga
コイルジ	卷線法	パンケーキ巻き Pre-react	パンケーキ巻き Pre-react	密巻き Pre-react	密巻き Pre-react	密巻き Pre-react	密巻き Pre-react	密巻き W & R	パンケーキ巻き Pre-react
完 成	年 度	1984	1986	1983	1985	1984	1985	1986	1986

注:略語説明 W & R(Wind and React)



(b)



100 mm

(a)

高磁界超電導マグネットの世界の現状を図8に示す。4.2 K では科学技術庁金属材料技術研究所の18.1 T, 日立製作所日 立研究所の18.2 Tが世界最高レベルで, 12 T以上の高磁界を 発生するものでは日本原子力研究所のTMC<sup>9,10)</sup>が最大規模で ある。なお, 1.8 Kの運転ではKfK(Kernforschungszentrum Karlsruhe)から20.1 Tの報告がある<sup>11)</sup>。一般にテープ線材の ほうがコイル電流密度を高くとれること,極細多心線材でも W & R法のほうがコイル内径を小さくでき,かつ平角線材を 用いなくてもよいので,より高磁界を発生できるが,いずれ もコイル内径の大きい大型コイルには適用しにくい問題があ る。事実,同図でもテープ線材を用いたコイルでは内径150 mm のものが最大であり,W & Rコイルは内径100 mm程度までで ある。

一方,科学技術庁金属材料技術研究所は科学技術庁マルチ コア・プロジェクトの一環として,20 T級大口径超電導マグ ネットおよび40 T級ハイブリッドマグネット(超電導マグネッ トは15~16 T級)などの高磁界マグネットを計画している。本 計画の現在での設計値を図8の▽印で示した。同図中の値は, 1.8 K運転時のものであるが,現状レベルを大幅に凌駕(りょ うが)しており,特に強大な電磁応力を考慮した設計,高剛性 な高磁界用新線材の開発,効率的な超流動He冷却技術など新 技術の導入が必要と考えられる。



他社	0	Δ	

図8 高磁界超電導マグネットの世界の現状 コイル内径が小さい場合は、テープ線材を用いたり、W & R法で高磁界発生が可能であるが、コイル内径が大きい高磁界マグネットでは新技術の導入が必要と考えられる。

598 日立評論 VOL. 71 No. 7 (1989-7)

# 5 結 言

電力消費の少ない強磁場発生装置として、材料研究に実用 化されている高磁界用超電導マグネットに関し、高磁界特性 に優れた(Nb, Ti)<sub>3</sub>Sn極細多心線材、In Situ V<sub>3</sub>Gaおよび改 良型表面拡散V<sub>3</sub>Gaテープ線材を新たに開発した。さらに、コ イルの巻線法にくふうを加えて機械的じょう乱に対する安定 性を改良し、科学技術庁金属材料技術研究所および日立製作 所日立研究所のマグネットで、4.2 Kの運転で18.1~18.2 Tの 高磁界を発生することができた。

今後,ますます超電導マグネットの高磁界化,大型化の開 発が進む中で,本技術は超電導のエネルギー応用に幅広く適 用され,高性能化に寄与できるものと考えられる。

## 参考文献

- 鎌田,外:高磁界用化合物超電導線の開発動向,日立電線, No.7,1~6(1988-1)
- 2) K. Tachikawa : The VAMAS Intercomparison of Critical

Cryogenics 29(1989)

- 3) J. W. Ekin : Electro-Mechanical Properties of High-Field Superconductors, 3rd. Japan-US Workshop on High Field Superconducting Materials for Fusion, Preprint (Tsukuba, 1984)
- 4) 太刀川,外:17.5T超電導マグネット,低温工学,11,No.6, 12~17(1976)
- 5) M. N. Wilson : Superconducting Magnets, Clarendon Press Oxford(1983)
- 6) 尾形,外:サブクール超流動ヘリウム発生器の熱設計と試験, 日本機械学会論文集(B編),49(1983),1195
- Y. Hakuraku, et al. : A Rotary Magnetic Refrigerator for Superfluid Helium Production, J. Appl. Phys. 60(1986), 3266
- 8) K. Tachikawa, et al. A Superconducting Magnet Generating Fields over 18 T, IEEE Trans. on Magn. Vol. MAG-23, No.2, 907~913(March 1987)
- 9) 安藤,外:TMC-Iの12T発生ー励磁結果-,第34回低温工学研 究発表会予稿集,75(1985-11)
- 10) T. Ando, et al. Development of High Field Superconducting Coil for Tokamak Fusion Machine in JAERI, Proc. of 11th. Fusion Engineering, 991~1000(1986)
- 11) P. Turowski, et al. A 20T Superconducting Magnet

System, to be Published in Physica B.



固体状態でありながら,融点よりもか なり低い温度域から電解液や溶融塩と同 じように,正または負のイオンが移動し て高い電気伝導性(10<sup>-5</sup>~10 S/cm)を示 す物質群が超イオン伝導体である。これ は電流と同時に物質の移動を伴うという 特徴を持っているため,物理的あるいは 電気化学的な現象の基礎的な興味はもち ろんのこと,新しいタイプの電池や各種 センサなどへの応用面からも関心が高ま っている。

本稿では,超イオン伝導現象の原理を 述べた後,超イオン伝導体を結晶質(α-AgI, β-アルミナ,安定ジルコニア),非 晶質(超急冷ガラス,薄膜),高分子(PEO -LiCF<sub>3</sub>SO<sub>3</sub>フィルム)に分けて,それぞれ 構造的観点から超イオン伝導の発現メカ ニズムを概説した。さらに,超イオン伝 導体特有の特性を示し,それを巧みに利 用したいくつかの応用例を述べた。

20

超電導同期発電機の基本構造について 解説し,現用機と比較した相違点を示し た。超電導機は回転子にある超電導界磁 巻線が4K付近に冷却されるため,真空断 熱層を持つ多重の円筒から構成される。 また,回転子は非磁性の材料で作られる。 電機子巻線は銅コイルから構成されるが, 現用機と違い鉄心のスロットはなく鉄心 内周の空隙(げき)に巻かれる。

同期リアクタンスが現用機の<sup>1</sup>/<sub>4</sub>~<sup>1</sup>/<sub>5</sub>に なり、同一出力に対する内部相差角が小 さくなって定態安定度、過渡安定度が大 きくなる。また、固定子鉄心端部加熱が なくなるので、進相領域では定格に等し い無効電力の供給も可能となる。 超電導機では、4 K付近までクールダウ ンと液体へリウムのため込みに50時間程 度必要である。超電導界磁巻線には常電 導転移の危険性があるが、常電導転移し ない設計が必要である。

最近,高温超電導セラミックスが発見 され, 種々の応用が考えられている。な かでもジョセフソン効果を利用した素子 (ジョセフソン素子)を用いれば、マイク ロ波からミリ波,サブミリ波,遠赤外光, 可視光,さらにX線までの電磁波を高感度 に検出することができる。超電導セラミ ックスで超電導臨界温度Tcが80K以上 のYBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-o</sub>薄膜に溝を作りジョセフ ソン素子とし、その上に光導電膜CdSを積 層した素子によって77Kで光信号を検出 した。超電導体による電磁波検出器は, 検出範囲が広く高感度である。最近の超 電導セラミックスの出現によって、これ らの素子が液体窒素温度で動作すれば、応 用範囲がさらに拡大すると考えられる。