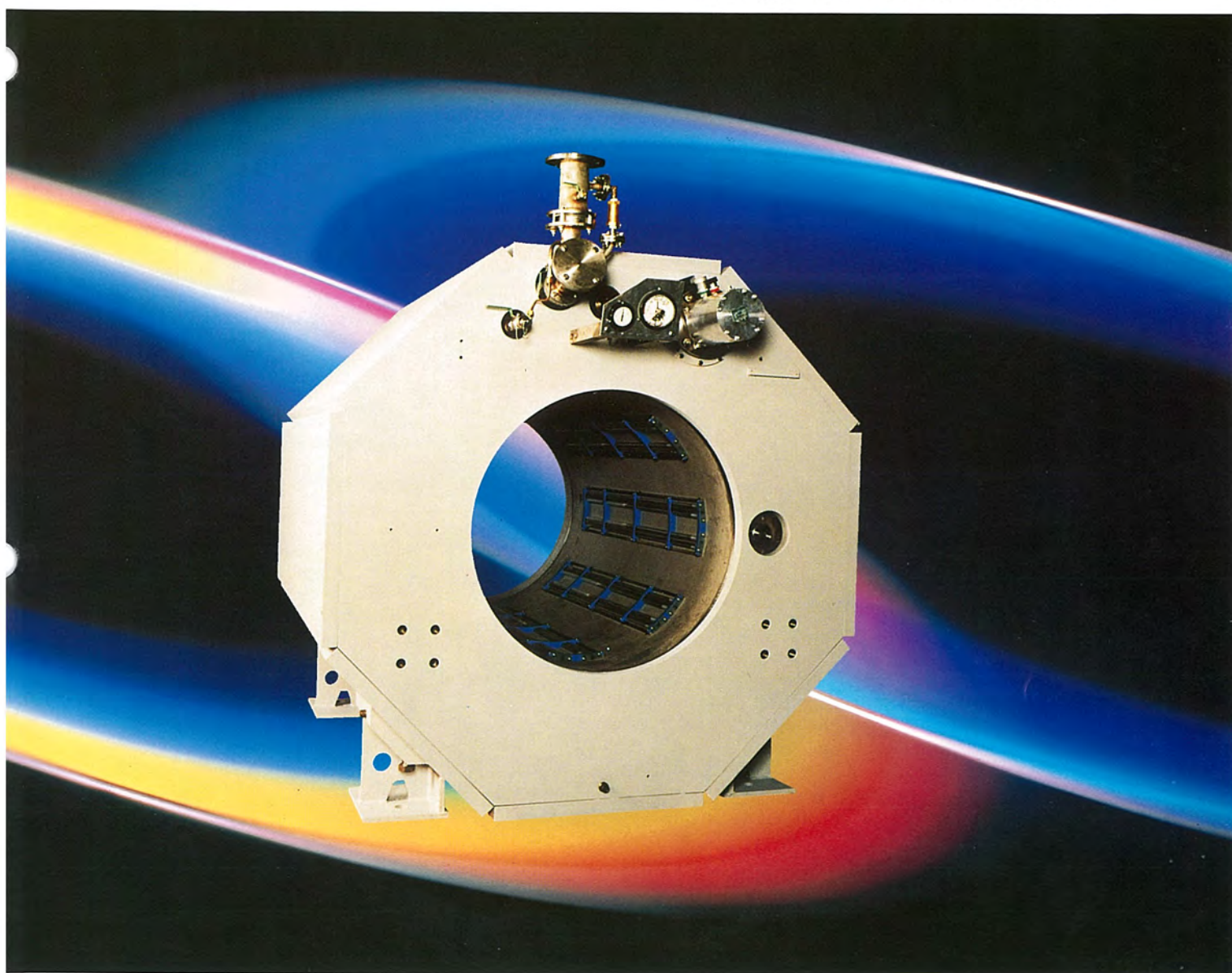


# MITSUBISHI 三菱電機技報

MITSUBISHI DENKI GIHO Vol.66 No. 5

5  
1992

特集“超電導の進展”



## 特集 “超電導の進展”

### 目次

#### 特集論文

カラーグラビア “超電導の進展”	1
超電導の将来	5
岡田隆夫	
超電導線材	6
久保芳生・藤原二三夫・宇都宮 真・佐藤 建・田口 修・中林美明	
小型ヘリウム冷凍機技術	12
吉村秀人・長尾政志・稲口 隆・森津一樹・松本隆博	
断熱技術	15
天野俊之・尾原昭徳・藤本泰司・松本隆博	
核融合炉用超電導マグネット	19
齊藤龍太・田戸 茂・長谷川 満・豊田勝義・市原 直・湊 恒明	
高エネルギー物理研究用超電導機器	26
川口武男・村井 隆・津田芳幸・井上功一・久野和雄・神代哲哉・霧生明弘	
高磁界超電導マグネット	32
津田芳幸・川口武男・守田正夫・久保芳生・黒田成紀	
超電導エネルギー貯蔵(SMES)	36
豊田勝義・川口武男・市原 直・神代哲哉	
超電導発電機	40
上田明紀・平尾俊樹・小林 俊・吉村秀人・守田正夫	
超電導の交流応用	48
守田正夫・中村史朗・山田忠利・久保芳生・藤原康夫・岸田卓也	
MRI用超電導マグネット	52
渡邊次男・武智盛明・森津一樹・島田友二・山田忠利・中村史朗	
磁気浮上式鉄道用超電導マグネット	57
地蔵吉洋・沖 雅雄・山口 孝・守田正夫	
産業装置用超電導マグネット	62
湊 恒明・豊田勝義・尾原昭徳・黒田成紀	
超電導デバイス	65
児島一良・高見哲也・黒田研一・谷村純二・片岡正行・和田 理	
高温超電導膜のデバイス及び線材応用	70
内川英典・吉新喜市・松野 繁・今田勝大・渡井久男ほか	
高温超電導線材	76
宮下章志・樋熊弘子・宇佐美 亮・梅村敏夫・宇都宮 真・谷村純二・佐藤 建	
高温超電導のエネルギー応用	81
横山彰一・下畑賢司・森 貞次郎・中村史朗・山田忠利・松野 繁・江川邦彦	

#### 普通論文

東京都防災情報システム	87
今井直治・金子訓士・岸田和之・森田俊二・今飯田 哲	
中部電力(株)豊根開閉所納め高信頼度形550kV GIS	95
江川 武・加藤 徹・羽馬洋之・土江 瑛・平河宏之	
新形550 kV, 300kV ガス遮断器シリーズにおける小型化・高信頼度化技術	102
米沢 毅・杉山 勉・平野良樹・吉積敏昭・瀬戸山達夫	

#### 特許と新案

超電導コイル, 超電導線の接続法	111
絶縁電線	112

#### スポットライト

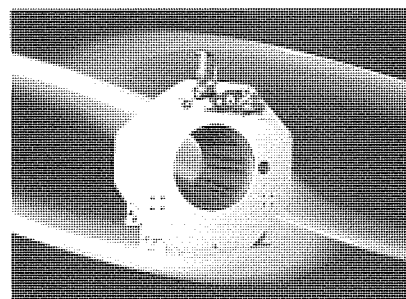
プレアラームリレー “BE-P シリーズ”	109
森永製菓(株)殿生産計画立案支援システム	110
中規模ビル向け三菱ビル管理システム MELBAS-W2000	113
B/NET 電力エネルギー管理システム	114
B/NET 集中自動検針システム	(表3)

#### 表紙

#### 0.5T 自己磁気シールド付き 磁気共鳴イメージング(MRI)用 超電導マグネット

マグネットのコンパクト設計と自己磁気シールドの採用により、漏れ磁界を小さくしている。漏れ磁界0.5mTの領域は、わずか2.3m×3.7mであり、狭い場所にもMRIを設置することを可能にしている。マグネットには小型シールド冷凍機を標準装備しており、液体ヘリウムの消費量を0.05L/h以下に抑えて、低運転費を実現している。また、磁界均一度はコンパクト機でありながら、±4ppm/40cm球体領域を達成している。

本機は中磁界クラスのMRI用超電導マグネットでは最高級の磁界・冷却性能を誇っている。



三菱電機技報に掲載の技術論文では、国際単位“SI”〔SI第2段階(換算値方式)を基本〕を使用しています。ただし、保安上、安全上等の理由で、従来単位を使用している場合があります。

## アブストラクト

### 超電導線材

久保芳生・藤原二三夫・宇都宮 真・佐藤 建・田口 修・中林美明  
三菱電機技報 Vol. 66・No. 5・P 6～11

1983年以降三菱電機㈱で開発された代表的な超電導線材として、当社の線材事業の技術的中核をなす核融合実験炉用のパルス対応導体、そして素粒子検出器用、超電導加速器対応、磁気共鳴イメージングシステム用のNbTi線材、さらには当社のオリジナルな製造法の内部拡散法による16 T級高磁界マグネット用やパルス用のNb<sub>3</sub>Sn線材を取り上げ、その特徴や性能について紹介する。さらに、現在行っているNb<sub>3</sub>Sn線材の高性能化に関する研究開発についても述べる。

### 小型ヘリウム冷凍機技術

吉村秀人・長尾政志・稲口 隆・森津一樹・松本隆博  
三菱電機技報 Vol. 66・No. 5・P 12～14

Ho<sub>1.5</sub>Er<sub>1.5</sub>Ruを第3段蓄冷材に用いた3段式GM (Gifford-McMahon) 冷凍機を開発した。この冷凍機は第1段及び第2段ヒートステージにそれぞれ50W, 3Wの熱を印加した状態で、4.2 Kで200mWの冷凍能力をもっている。この冷凍機を超電導MRIマグネットに適用すると液体ヘリウムの蒸発量を零にできる可能性がある。この論文では、当社が世界に先駆けて開発に成功した、この3段式GM冷凍機の構成と性能について述べる。

### 断熱技術

天野俊之・尾原昭徳・藤本泰司・松本隆博  
三菱電機技報 Vol. 66・No. 5・P 15～18

クライオスタットの断熱技術に関し、断熱支持材、極低温熱放射率、多層断熱材等について記述した。  
断熱支持材からの熱侵入量については熱放射の影響が無視できることを確認した。また、極低温における実効熱放射率について精度の良い予測法を見いだし、多層断熱材の熱侵入特性について数種のパラメータの影響を明らかにした。

### 核融合炉用超電導マグネット

斉藤龍太・田戸 茂・長谷川 満・豊田勝義・市原 直・湊 恒明  
三菱電機技報 Vol. 66・No. 5・P 19～25

超電導マグネットの大規模な応用としての核融合炉用超電導マグネットについて、国際熱核融合実験炉(ITER)を例にとり、その特徴と技術的課題を示し、これまでの当社の取組と技術開発について述べるとともに、当社が開発／製作した、核融合炉用超電導マグネットとしての、パルス超電導コイル、直流超電導コイル及び強制冷却超電導コイルにおける開発技術とその成果について紹介した。

### 高エネルギー物理研究用超電導機器

川口武男・村井 隆・津田芳幸・井上功一・久野和雄ほか  
三菱電機技報 Vol. 66・No. 5・P 26～31

高エネルギー物理では、実験設備の高性能化・小型化・省エネルギー化のために、超電導機器が不可欠なものとなっている。当社は我が国初の実用大型超電導マグネットミュオンチャネルを1980年に納入して以来、加速器用及び検出器用に種々の超電導マグネットを開発・納入してきた。さらに、1984年から超電導加速空洞の開発・試作にも取り組み、我が国初の超電導ライナック用に多数の空洞を納入した。

### 高磁界超電導マグネット

津田芳幸・川口武男・守田正夫・久保芳生・黒田成紀  
三菱電機技報 Vol. 66・No. 5・P 32～35

10 Tを超える高磁界発生に適したNb<sub>3</sub>Sn超電導線を利用した“14 T スプリットソレノイド”，及び“16 T 級超電導マグネット”を製作した。いずれも極めて安定な特性を示し、実用装置への本格的な適用が可能になった。さらに、20～25 T級の超高磁界用材料として“シェブル線材と小コイル”の試作と実験を行い、超高磁界超電導マグネットへの道をひらいた。

### 超電導エネルギー貯蔵(SMES)

豊田勝義・川口武男・市原 直・神代哲哉  
三菱電機技報 Vol. 66・No. 5・P 36～39

超電導エネルギー貯蔵(SMES)は、電力系統機器として効果が期待されている。当社は研究の初期段階から大容量・系統安定化SMESなどの概念設計研究を実施してきた。製作実績では、超電導パルスコイル技術を適用した超電導マグネットと各種変換器から構成されるシステムを製作・納入してきた。今後、総合電機メーカーとして関連部門の一層の協調をとりながらSMES目的ごとに適切なシステムをユーザーに提案・共同開発していく予定である。

### 超電導発電機

上田明紀・平尾俊樹・小林 俊・吉村秀人・守田正夫  
三菱電機技報 Vol. 66・No. 5・P 40～47

工業技術院ムーンライト計画の一環として、7万kW級超電導発電機を開発中である。昭和63年度からの4年間で要素技術開発のため部分モデルの製作・試験を行い、平成4年度からの4年間で7万kW機を製作し、フィールド試験を行う。現在までに回転コイルモデル、界磁巻線モデル等の試験を行い、モデルに用いた超電導導体の構成及び冷却、支持方式が界磁巻線に適切であることを検証するなど、多くの成果を得た。

### 超電導の交流応用

守田正夫・中村史朗・山田忠利・久保芳生・藤原康夫・岸田卓也  
三菱電機技報 Vol. 66・No. 5・P 48～51

筆者等は温度上昇に対する安定性の高いNb<sub>3</sub>Sn超電導体の交流への適用可能性について研究を行っている。まず、交流用Nb<sub>3</sub>Snコイルを試作し、それを60Hzで運転することにより、Nb<sub>3</sub>Sn超電導体が交流用として使用できることを明らかにした。また、275kV, 300MVA超電導変圧器の概念設計を行い、超電導変圧器の利点は損失の低減と輸送重量の低減であることを明らかにした。なお、現在333kVAの容量をもつ実験用超電導変圧器を製作中である。

### MRI用超電導マグネット

渡邊次男・武智盛明・森津一樹・島田友二・山田忠利・中村史朗  
三菱電機技報 Vol. 66・No. 5・P 52～56

MRI (Magnetic Resonance Imaging：磁気共鳴イメージング)システムは、磁気共鳴現象を応用した人体の断層像撮影装置である。マグネットは、MRIシステムの重要な構成部品の一つであり、磁界の強度、空間均一度、時間安定度について高度な特性が要求される一方、医用機器としての信頼性、使いやすさも要求される。当社では、このような市場ニーズにこたえるべく、高性能でコンパクトなMRI用超電導マグネットを開発した。

# Abstracts

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 66, No. 5, pp. 32~35 (1992)

## High-Field-Strength Superconducting Magnets

by Yoshiyuki Tsuda, Takeo Kawaguchi, Masao Morita, Yoshio Kubo & Shigenori Kuroda

A 14T split-type superconducting solenoid and 16T superconducting magnet have been manufactured employing an Nb<sub>3</sub>Sn wire designed for strong fields. Both products are extremely stable, and are suitable for commercial applications. Tests on small coils employing Chevrel wire suitable for 20~25T fields indicate that production of even stronger magnets is feasible.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 66, No. 5, pp. 6~11 (1992)

## Superconducting Wires

by Yoshio Kubo, Fumio Fujiwara, Shin Utsunomiya, Ken Sato, Dsamu Taguchi & Yoshiaki Nakabayashi

The article provides an overview of significant developments in superconducting wire technology at Mitsubishi Electric since 1983. It covers NbTi wire developed for pulsed superconducting magnets for plasma fusion reactors (a field of intensive R&D at the corporation), particle detectors, superconducting accelerators, and magnetic resonance imaging systems. It also covers Nb<sub>3</sub>Sn wire developed using an original internal Sn-diffusion process for 16T-class magnets and pulsed applications, and ongoing R&D work on new Nb<sub>3</sub>Sn materials.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 66, No. 5, pp. 36~39 (1992)

## Superconducting Magnetic Energy Storage

by Katsuyoshi Toyoda, Takeo Kawaguchi, Tadashi Ichihara & Tetsuya Kojiro

Superconducting magnetic energy storage (SMES) technology holds promise of helping to stabilize electric power systems. Mitsubishi Electric has conceived and planned an R&D program for the development of this technology from small-scale experiments to large-scale power-system stabilization apparatus. The corporation has already delivered 500kJ and 3MJ SMES systems employing pulsed superconducting coils and solid-state converters.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 66, No. 5, pp. 12~14 (1992)

## Small Liquid-Helium Refrigerator Technology

by Hideto Yoshimura, Masashi Nagao, Takashi Inaguchi, Kazuki Moritsu & Takahiro Matsumoto

A three-stage Gifford-McMahon cycle refrigerator suitable for maintaining liquid helium has been developed employing Ho<sub>1.5</sub>Er<sub>1.5</sub>Ru in the material for the third regenerator. Applying 50W and 3W of heat respectively to the first and second heat stages yields 200mW of cooling power at 4.2K. Use of this refrigerator in superconducting magnetic resonance imaging applications can reduce evaporative helium losses to zero. The article introduces the construction and performance details of this dramatic innovation.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 66, No. 5, pp. 40~47 (1992)

## Superconducting Generator Development

by Akinori Ueda, Toshiki Hirao, Shun Kobayashi, Hideto Yoshimura & Masao Morita

Mitsubishi Electric is developing a 70MW superconducting generator for the Agency of Industrial Science and Technology under the "Moonlight Project". Production and testing of component models has been underway since 1988. Prototype generator production is planned to be begin in 1992, to be followed by one year of field testing in 1995. Tests on rotor coil and field winding models have established suitable designs for the superconducting coils, supporting structures, and cooling systems. The article reports on these many findings in detail.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 66, No. 5, pp. 15~18 (1992)

## Thermal Insulation Technology

by Toshiyuki Amano, Akinori Dhara, Yasushi Fujimoto & Takahiro Matsumoto

The article covers topics including thermal insulation technology for cryostats, insulation support, thermal emissivity at cryogenic temperatures, and multilayer insulation. Effects on thermal radiation through cryostat insulation supports were found to be negligible in experimental studies. Further, a method to accurately predict effective emissivity at cryogenic temperatures and the effect of several different parameters on heat flux through multilayer insulation were experimentally obtained.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 66, No. 5, pp. 48~51 (1992)

## AC Applications of Superconductivity

by Masao Morita, Shiro Nakamura, Tadatashi Yamada, Yoshio Kubo, Yasuo Fujiwara & Takuya Kishida

The authors have investigated the use of Nb<sub>3</sub>Sn superconducting wire for AC applications. Nb<sub>3</sub>Sn has a relatively high critical temperature, offering a comparatively wide operating temperature range. The material was verified as suitable for AC applications by producing a coil and testing it at 60Hz. Conceptual studies of 275kV/300MVA superconducting transformers indicate that they will offer lower power loss and lighter weight than conventional transformers. A 333kVA superconducting transformer is currently under production.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 66, No. 5, pp. 19~25 (1992)

## Superconducting Magnets for Nuclear Fusion Reactors

by Ryuta Saito, Shigeru Tado, Mitsuru Hasegawa, Katsuyoshi Toyoda, Tadashi Ichihara & Tsuneaki Minato

The article discusses issues in the design and production of large superconducting magnets, specifically those for the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER). It reports on DC and pulsed superconducting coils with integrated cooling apparatus developed at Mitsubishi Electric, and the corporation's development methodology.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 66, No. 5, pp. 52~56 (1992)

## Superconducting Magnets for Magnetic Resonance Imaging

by Tsugio Watanabe, Moriaki Takechi, Kazuki Moritsu, Yuji Shimada, Tadatashi Yamada & Shiro Nakamura

Magnetic resonance imaging (MRI) has developed as an important medical diagnostic tool because it provides a non-radioactive means of viewing a cross section of the human body. The corporation has developed superconducting magnets for MRI applications. These magnets not only comply with MRI requirements in terms of high field strength, field homogeneity and field stability but also satisfy medical needs for reliability and ease of use.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 66, No. 5, pp. 26~31 (1992)

## Powerful Superconducting Apparatus for Research in High-Energy Physics

by Takeo Kawaguchi, Takashi Murai, Yoshiyuki Tsuda, Koichi Inoue, Kazuo Kuno, Tetsuya Kojiro & Akihiro Kiryu

Mitsubishi Electric delivered Japan's first large superconducting magnets in 1980, and since then has developed and delivered many varieties of superconducting magnet for accelerator and spectrometer applications. In 1984, the corporation began development and prototype tests on superconducting cavities. Since that time, it has delivered 44 cavities for Japan's first superconducting linear accelerator. With the help of its users, the apparatus has been designed alongside integrated cooling systems for long-term reliability and reduced maintenance.



## アブストラクト

### 磁気浮上式鉄道用超電導マグネット

地蔵吉洋・沖 雅雄・山口 孝・守田正夫  
三菱電機技報 Vol. 66・No. 5・P 57～61

磁気浮上式鉄道の実用化に向けて、その最終確認を目的とした山梨実験線の建設がスタートした。浮上式鉄道の心臓部である超電導マグネットには高い信頼性が要求される。この論文では、超電導マグネットに対する当社の基本的な考え方を述べるとともに、信頼性の向上に関する開発の概要について紹介している。線材の MQE や交流損失の測定と解析、超電導コイルと内槽との相対滑り対策の効果、CAE による渦電流解析、機械的熱的解析について紹介している。

### 産業装置用超電導マグネット

湊 恒明・豊田勝義・尾原昭徳・黒田成紀  
三菱電機技報 Vol. 66・No. 5・P 62～64

従来、R & D 分野又は研究分野に限られていた超電導マグネットも近年のマグネット技術の進展に伴い、医療分野や産業分野への利用が進みつつある。ここでは産業用の代表的なマグネットとして、結晶引き上げ装置用とジャイロトロン用超電導マグネットを取り上げ、その特徴・性能を紹介する。超電導マグネットは常電導マグネットが容易に達成できない高磁界を安定に、かつ経済的に発生させることが可能であり、今後の産業分野への進展が期待される。

### 超電導デバイス

児島一良・高見哲也・黒田研一・谷村純二・片岡正行・和田 理  
三菱電機技報 Vol. 66・No. 5・P 65～69

超電導デバイスは半導体デバイスにない優れた性能をもっている。当社では金属系超電導体である Nb を用いて記憶回路、超高感度磁気センサとして超電導量子干渉素子 (SQUID)、また超高周波ミキサとして超電導トンネル接合ミキサを研究・試作してきた。白色雑音領域で FLL 駆動した SQUID の磁束分解能として  $6.4 \times 10^{-6} \phi_0 / (\text{Hz})^{1/2}$  を得ている。高温超電導体に関しては Bi 系材料を用いた人工粒界接合ジョセフソン素子、及びそれを用いた SQUID を研究・試作している。

### 高温超電導膜のデバイス及び線材応用

内川英興・吉新喜市・松野 繁・今田勝大・渡井久男ほか  
三菱電機技報 Vol. 66・No. 5・P 70～75

酸化物系高温超電導体の成膜技術が進歩して高品質な膜が作製できるようになり、各方面からその実用化が期待されている。本稿では、まず現在進展の著しい薄膜化要素技術の現状を簡単に記述する。次に高温超電導膜の応用として、 $\text{LiNbO}_3$  光変調器用電極への適用による駆動電圧の低減化と変調効率の向上効果を述べる。さらに、CVD 法による超電導線材製作に適した新合成法の開発及び超電導膜の性能改善結果を中心に、研究開発の現状を紹介する。

### 高温超電導線材

宮下章志・樋熊弘子・宇佐美 亮・梅村敏夫・宇都宮 真ほか  
三菱電機技報 Vol. 66・No. 5・P 76～80

高温超電導体マグネットへの応用が有望視される Bi 系超電導体を用いてコイル化実証試作を行った。Powder-in-tube 法によって作製した高温相 Ag シース線材は、20 K、5 T でも実用的な  $J_c$  値を示した。コイル化技術として、絶縁材、巻棒の材料選定条件に言及し、総合技術としてソレノイドコイル、ダブルパンケーキコイルを試作した。また、線材の高  $J_c$  化に必要なピンニング力強化に関連して、Bi 系高温超電導体のピンニング特性の評価を行った。

### 高温超電導のエネルギー応用

横山彰一・下畑賢司・森 貞次郎・中村史朗・山田忠利ほか  
三菱電機技報 Vol. 66・No. 5・P 81～86

当社は高温超電導体のエネルギー応用にいち早く取り組んできた。なかでも、超電導マグネット・電流リード・限流器、磁気軸受については概念設計や基礎実験により、高温超電導を応用すれば優れたシステムを構成できる可能性があることを見いだした。これらの四つの具体的な応用研究により、高温超電導のエネルギー応用に関する今後の見通し、応用システムの特長及び解決すべき技術課題を明らかにした。

### 東京都防災情報システム

今井直治・金子訓士・岸田和之・森田俊二・今飯田 哲  
三菱電機技報 Vol. 66・No. 5・P 87～94

東京都防災情報システムは、都道府県レベルの地方自治体に導入された初めての本格的な総合防災情報システムであり、平成 3 年 4 月から運用されている。当社はこのシステムの中で、AV システム・画像端末システム・地震被害判読システムを開発・納入した。これらのシステムは、防災行政無線網や地図情報システム等と有機的に結合され映像情報の高度運用化を実現し、東京都の災害対策支援活動に有益な情報を提供している。

### 中部電力(株)豊根開閉所納め高信頼度形 550kV GIS

江川 武・加藤 徹・羽馬洋之・土江 瑛・平河宏之  
三菱電機技報 Vol. 66・No. 5・P 95～101

中部電力(株) 500kV 第二基幹系的重要拠点となる豊根開閉所に、高信頼度形大容量 550kV GIS を納入した。この開閉所は大規模な無人化開閉所であり、ルート断防止の観点からブスタイ遮断器の二重化構成を採用している。また、適用する GIS には、各種高性能機器の採用、絶縁性能の高信頼度化、ミニフラックス方式採用の大容量通電技術、電気所支援システムの導入、現地解放組立ての極少化など、最新の高信頼度化技術及び徹底した品質管理が結集されている。

### 新形 550 kV、300kV ガス遮断器シリーズ における小型化・高信頼度化技術

米沢 毅・杉山 勉・平野良樹・吉積敏昭・瀬戸山達夫  
三菱電機技報 Vol. 66・No. 5・P 102～108

新形 550/300kV ガス遮断器シリーズに適用した設計技術、試験・評価技術を紹介する。遮断部は新技術と新材料を適用し高性能化を図った新形 D シリーズ消弧室を適用し、熱ガス流解析技術や遮断直後の絶縁性能検証試験等によって信頼性を確認した。操作装置部には油中混入空気の影響を排除した常時高圧安定回路方式の新形油圧操作装置や新形カム式補助スイッチの適用により信頼性の向上と保守の簡素化を実現した。

# Abstracts

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 66, No. 5, pp. 81~86 (1992)

## Applications of High-Temperature Superconducting Materials in Electric Power Systems

by Shoichi Yokoyama, Kenji Shimohata, Teijiro Mori, Shiro Nakamura, Tadatoshi Yamada, Shigeru Matsuno & Kunihiro Egawa

Mitsubishi Electric has done conceptual studies and basic experiments on applications of high-critical-temperature superconductors to power systems. This work has identified promising applications in magnets, magnetic bearings, current leads, and current limiters. The article summarizes findings in these four areas, their potential impact on power system design, and principal technical hurdles.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 66, No. 5, pp. 57~61 (1992)

## Superconducting Magnets for Magnetic Levitation Trains

by Yoshihiro Jizo, Masao Oki, Takashi Yamaguchi & Masao Morita

Commercial construction of magnetic levitation trains will begin in Japan following verification of critical technologies at a test track currently under construction in Yamanashi Prefecture. The corporation is developing superconducting magnets for the trains, which must meet exceptionally stringent reliability standards. The article introduces the conceptual design of these magnets and summarizes the corporation's R&D on confirming their reliability. It also describes measurement and analysis of the minimum quench energy of the wire and AC losses and other electrical and mechanical aspects.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 66, No. 5, pp. 87~94 (1992)

## The Tokyo Metropolitan Disaster Information System

by Naoharu Imai, Satoshi Kaneko, Kazuyuki Kishida, Shunji Morita & Satoshi Imaiida

The Tokyo Metropolitan Disaster Information System is the first integrated system of its kind to be implemented by a Japanese prefectural or metropolitan government. Mitsubishi Electric developed the system's main audiovisual interface system, graphic terminals, and earthquake-damage-assessment system. Aerial images are collected by helicopter after a disaster and transmitted to the system. The information is integrated with an extensive geographic database to identify the worst hit areas and the type of damage. The system employs a variety of advanced technologies including a wireless network.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 66, No. 5, pp. 62~64 (1992)

## Superconducting Magnets for Industrial Applications

by Tsuneaki Minato, Katsuyoshi Toyoda, Akinori Ohara & Shigenori Kuroda

As superconducting magnet technology has matured, it has migrated from R&D laboratories to hospitals and factories. This report introduces representative applications for facilitating crystal growth and in gyrotrons. Superconducting magnets are economical means of supplying strong, stable magnetic fields that would be difficult to achieve using conventional magnets. Their further penetration of the manufacturing industry is anticipated.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 66, No. 5, pp. 95~101 (1992)

## Highly Reliable 550kV Gas-Insulated Switchgear for the Chubu Electric Power Co.'s Toyone Switchyard

by Takeshi Egawa, Toru Kato, Hiroyuki Hama, Ei Tsuchie & Hiroyuki Hirakawa

Mitsubishi Electric has delivered high-capacity, high-reliability 550kV gas-insulated switchgear to the Toyone switchyard of the Chubu Electric Power Corporation. A key node on the company's 500kW secondary power trunk, the switchyard employs dual bus tie interrupters to reduce the risk of accidental disconnection, and is designed for high insulation performance. Most enclosures were pressurized with SF<sub>6</sub> gas and sealed at the factory to minimize on-site assembly. Conductors for the three phases were closely spaced to minimize magnetic flux leakage.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 66, No. 5, pp. 65~69 (1992)

## Superconducting Devices

by Kazuyoshi Kojima, Tetsuya Takami, Ken'ichi Kuroda, Junji Tanimura, Masayuki Kataoka & Osamu Wada

Superconducting devices can perform certain tasks far better than semiconductor devices. Using Nb, the corporation has studied manufactured superconducting quantum interference devices (SQUIDs) for high-sensitivity magnetometers, superconducting-tunnel-coupled ultrahigh frequency mixers, and superconducting memory devices. A flux-locked-loop (FLL) driven SQUID was demonstrated to have a flux resolution of  $6.4 \times 10^{-6} \Phi_0 (\text{Hz})^{-1/2}$ . The corporation also studied high-critical-temperature superconducting bismuth compounds, producing a Josephson junction employing artificial grain boundaries. The device has been used in a SQUID prototype.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 66, No. 5, pp. 102~108 (1992)

## Techniques for Size Reduction and Reliability Improvement in New Series 300kV and 550kV Gas Circuit Breakers

by Takashi Yonezawa, Tsutomu Sugiyama, Yoshiki Hirano, Toshiaki Yoshizumi & Tatsuo Setoyama

The article introduces design, production, testing and performance-evaluation technologies for new D Series compact, high-reliability low-maintenance 300kV and 550kV gas circuit breakers. Extensive analysis was performed to optimize the cross section of the puffer cylinder and other factors affecting the gas flow patterns. New materials were also employed, including a PTFE nozzle loaded with traces of inorganic materials and a new-design ceramic condenser that reduce contamination of the SF<sub>6</sub> gas. The reliability of the hydraulic system has been enhanced by maintaining the hydraulic lines under pressure at all times.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 66, No. 5, pp. 70~75 (1992)

## Applications of High-Temperature Superconducting Materials to Thin-Film Devices and Wire

by Fusaoki Uchikawa, Kiichi Yoshiara, Shigeru Matsuno, Katsuhiro Imada, Hisao Watarai, Shin Utsunomiya, Ken Sato, Tadayoshi Kitayama & Takashi Mizuochi

The authors have produced an optical modulator with LiNbO<sub>3</sub> superconducting film electrodes that feature high modulation efficiency and a low drive voltage. Chemical vapor deposition (CVD) techniques have been adapted to produce high-quality, superconducting thin films of high critical temperature oxide materials. These techniques have been successfully employed to produce semiconducting wire. The article introduces these advances and characterizes film-quality improvements.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 66, No. 5, pp. 76~80 (1992)

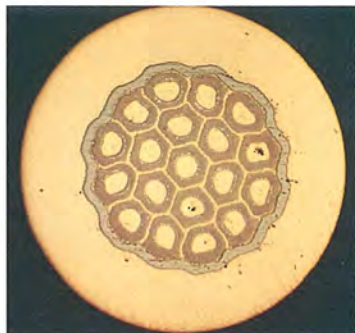
## High-Temperature Superconducting Wires

by Shoji Miyashita, Hiroko Higuma, Ryo Usami, Toshio Umemura, Shin Utsunomiya, Junji Tanimura & Ken Sato

The authors have employed a power-in-tube technique to produce wire consisting of a high-critical-temperature bismuth oxide compound clad with a silver sheath, and formed coils from the wire. The wire demonstrated practical J<sub>c</sub> values at 5 and 20K. The article describes selection criteria for insulation and coil frame materials, and reports on experimental solenoid coils and double-pancake coils. The authors investigated the pinning characteristics of bismuth oxide superconductors and developed a material with the necessary pinning force for the wire.

# 超電導の進展

最近の三菱電機の研究開発の一端を写真で紹介する。



①



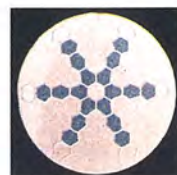
②



③



④



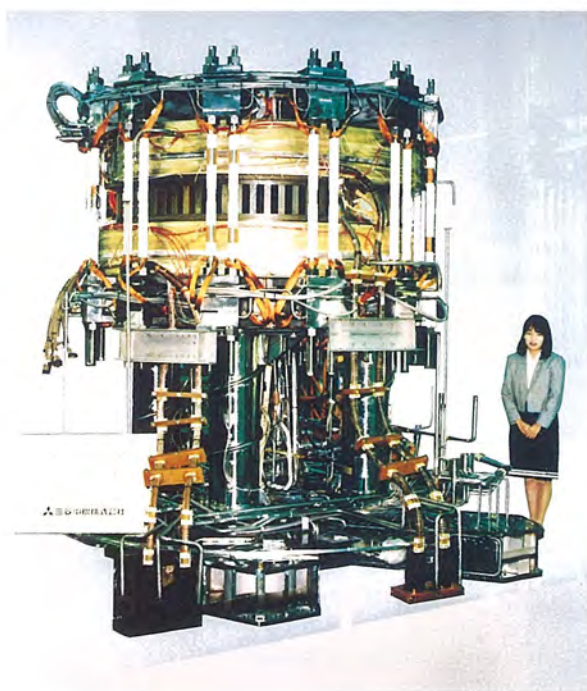
⑤



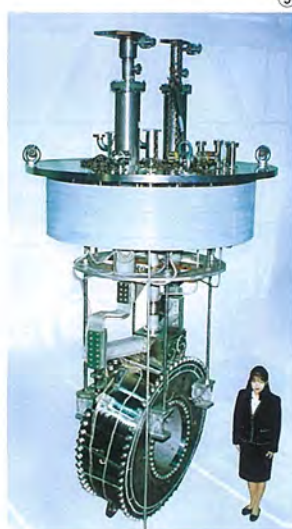
⑥



⑦



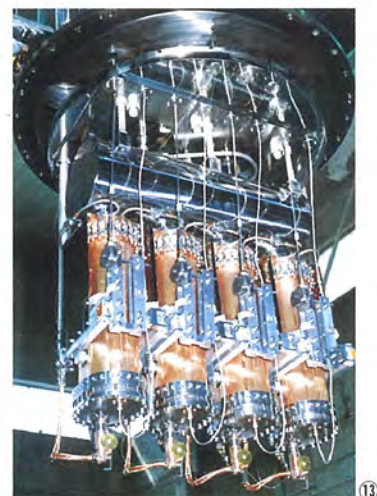
⑧



⑨

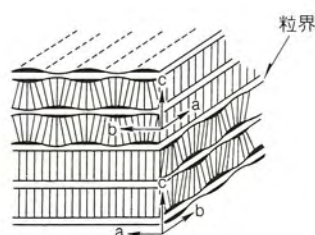
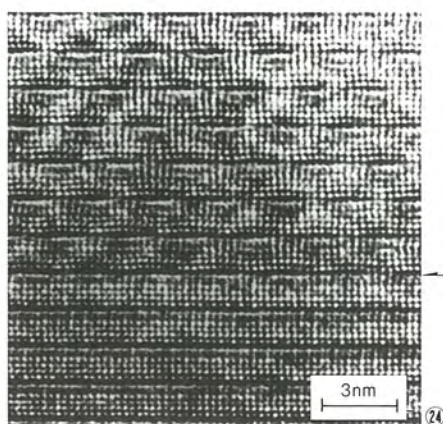
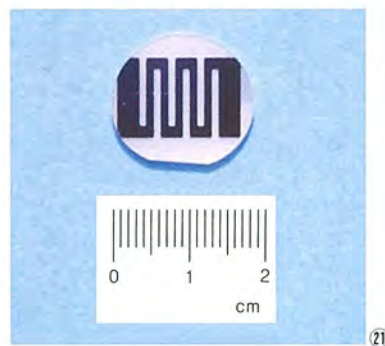
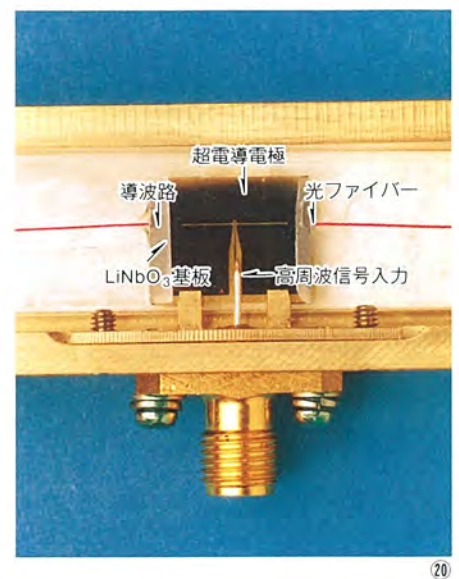
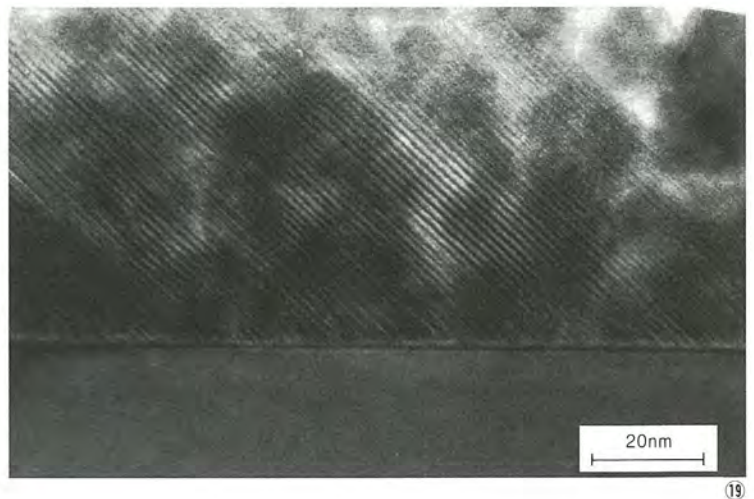
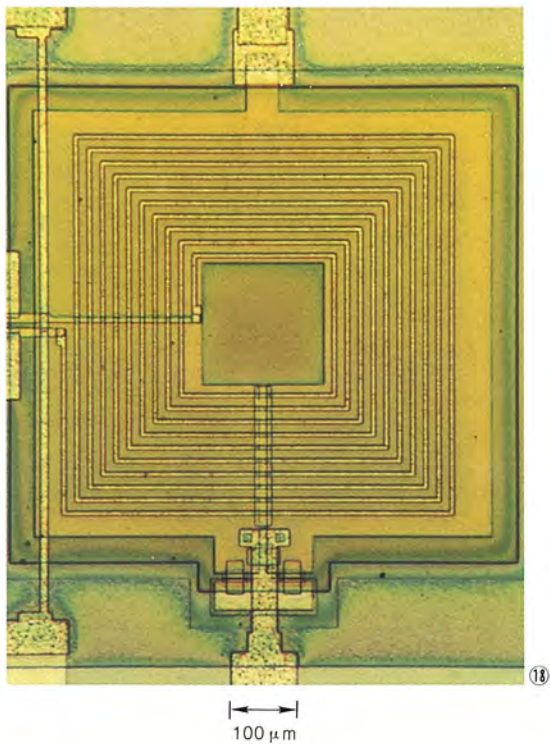
- ① 内部拡散法による Nb<sub>3</sub>Sn 素線の断面と、
  - ② ①の部分拡大、957A/mm<sup>2</sup>(12T、4.2K、非銅部当たり)という高電流密度を誇る。
  - ③ 核融合実験炉ポロイダルコイルの R & D コイル(DPC-EX)用強制冷却型 Nb<sub>3</sub>Sn 導体の断面
  - ④ ポロイダルユニットパンケーキ(PUP)用 NbTi パルス導体と、
  - ⑤ ④の素線の断面 (①～⑤は p. 500 参照)
  - ⑥ 磁気浮上式鉄道実験車 MLU001 と、
  - ⑦ 超電導マグネット試作機 (写真提供(財)鉄道総合技術研究所) (⑥⑦は p. 551 参照)
  - ⑧ 核融合実験炉ポロイダルコイルの R & D コイル (実証ポロイダルコイル)
  - ⑨ 大型ヘリカル装置の R & D コイル (モジュールコイル) (⑧⑨は p. 513 参照)
- (注) ③④⑤⑧は原研との共同開発





- ⑩ 超電導発電機の回転コイルモデルと、
- ⑪ 超電導巻線部 (⑩⑪は p. 534参照)
- ⑫ スペクトロメータ用鉄心付き立形超電導トロイダルマグネット
- ⑬ 超電導高周波空洞(1/4波長共鳴型, 130 MHz)
- ⑭ 大型加速器用超電導 2 極マグネット (⑫~⑭は p. 520参照)
- ⑮ 交流用 Nb<sub>3</sub>Sn コイル (p. 542参照)
- ⑯ 世界で初めてヘリウムの液化に成功したギホードマクマホン式冷凍機と、
- ⑰ ⑯の成果に対して贈られた R & D 100 賞 (⑯⑰は p. 506参照)





- ⑮ Nbを用いた超電導量子干渉素子 (SQUID)
- ⑯ チタン酸ストロンチウム (110) 基板上に斜めに成長した Bi 系高温超電導薄膜 (透過電子顕微鏡写真) (⑮⑯は p. 559 参照)
- ⑰ Y 系高温超電導薄膜を電極に用いた共振タイプの光変調器 (p. 564 参照)
- ⑱ Y 系高温超電導薄膜を用いた限流素子 (100 V 級用)
- ⑲ 2 枚の Y 系高温超電導ディスクで永久磁石をはさんだ構造の超電導磁気軸受 (⑲⑲は p. 575 参照)
- ㉓ Bi 系高温超電導ダブルパンケーキコイル (p. 570 参照)
- ㉔ Bi 系高温超電導体に観測された結晶が 90 度回転した結晶粒界 (透過電子顕微鏡写真)

三菱電機は超電導線、超電導マグネット応用、ヘリウム冷凍機、超電導エレクトロニクスの超電導のすべての分野にわたって最先端の研究開発を実施してきた。

○研究開発完了

## 超電導の将来

1986年末に、高温超電導体が発見されてから早くも5年が過ぎた。フィーバーをきっかけに高温超電導分野に多数の研究者が集結した。一方、息の長い地道な研究が続けられていた低温超電導に対しても関心が高まり、研究が活性化されると共に研究環境が整備された。いまでは当時の騒ぎは静まったが、これは超電導の将来が想像していたほど容易なものでないということが分ってきたためであろう。しかし、その後の超電導技術の進歩は本特集にみられるように、高温超電導のみならず超電導応用技術も着実に進展している。

現在のところ、超電導技術を用いた機器が量産レベルに達したのはMRI用超電導マグネットだけである。この成功は技術の進展によってMRIとして不可欠な高磁界、高均一、高安定化磁界を実現できたためだけでなく、コンピュータによる画像処理技術の進歩にも支えられている。さらに、小型冷凍機の開発による液体ヘリウムの消費量の減少とメンテナンスの簡素化、磁気シールドによる外部への漏れ磁界の減少、マグネットの小型化による設置スペースの減少などが大きく寄与していることを忘れてはならない。超電導応用機器もユーザーに歓迎される性能をもたねばならない。

超電導の電力・エネルギー応用の分野で、超電導発電機、超電導変圧器、超電導エネルギー貯蔵装置、磁気浮上列車などが実用されれば、電気エネルギーシステムにいろんな意味で大きいインパクトを与えることとなる。ただ、これらはいずれも大型システムであるため、開発の困難も大き

京都大学工学部 教授  
工学博士 岡田 隆夫



く、かつ巨額の研究開発費と長期の開発期間を必要とする。さらに、これらの機器やシステムに要求される性能は、信頼性を含めて厳しいものがある。このような研究開発には国家的規模の開発体制が必要なことは論をまたない。

超電導発電機の開発研究が数年前から組合形式で進行しており、さらに超電導電力貯蔵システムの要素開発が、昨年から長期計画で開始された。超電導の成果を期待する研究者としては、将来への希望がふくらんでいる。しかし、超電導応用の研究の流れをみていると、超電導の特質が革新的な成果をもたらすという気負いからか、研究者が性急な進展を期待し過ぎて、かえって研究開発の方向を不透明にしているのではないだろうか。MRI用超電導マグネットの成功の教訓を忘れてはならない。息の長い研究開発を続けていくだけでなく、研究開発の方向を的確に判断して重点的に実行していく必要がある。

超電導の応用面からみたポテンシャルは、エレクトロニクス、エネルギー、宇宙にいたるまでその幅は広い。本特集で論じられている応用は、研究用超電導マグネット、電力・エネルギー応用、医用・交通・産業応用など多方面にわたっている。このような超電導応用の世界は、ほとんどが電気工学の世界と重なっている。また、それは総合電機メーカーの世界でもある。このようなことから、将来超電導は電気工学の基礎技術になるものと期待されるし、総合電機メーカーが超電導応用機器やシステムの開発に不断の努力をされることを期待している。

# 超電導線材

久保芳生\* 佐藤 建\*\*\*  
藤原二三夫\*\* 田口 修+  
宇都宮 真\* 中林美明+

## 1. ま え が き

当社では1962年から超電導線材の研究開発を行っている。現在までに実用化されている超電導材料は、NbTiに代表される合金系と、Nb<sub>3</sub>Sn等の化合物系の2種類に大別され、マグネットに要求される発生磁界と用途によってこれらの材料の選定が行われている。ところで、超電導線は直流電流に対しては無損失に電流を流すことができるが、電流又は磁界の変動に対しては交流損失と総称される損失を伴うことが知られている<sup>(1)</sup>。そのためこれらの条件下で超電導線を使用するには、これらの損失を軽減するため、様々な工夫が必要になる。当社ではパルス用線材や交流用線材の開発も直流用線材の開発と平行して行っており、核融合実験炉用のパルスマグネット、超電導エネルギー貯蔵(SMES)や超電導変圧器などにその成果が適用されている。当社の超電導材料、線材の製造方法、超電導の諸特性等については他に詳細に報告されているので<sup>(2)</sup>、本稿では1983年以降当社で開発された代表的なNbTi線材である素粒子検出器用線材、超電導加速器対応のR & D線材、磁気共鳴イメージングシステム(MRI)用線材を次章で紹介し、続いて内部拡散法によって製作された代表的なNb<sub>3</sub>Sn線材として、16T級高磁界マグネット用線材についてその開発経緯を含めて3章で紹介する。さらに、4章では当社の超電導線材事業で技術的中核をなしている核融合実験炉用<sup>(注)</sup>のパルス導体の開発の経緯を年代順に紹介し、最後の5章では、現在行っている内部拡散法によるNb<sub>3</sub>Sn線の特性向上を中心とした研究開発について紹介する。

## 2. NbTi 線材

合金系のNbTi線材は、超電導マグネットの発生磁界の目安となる $H_{C2}$ が11 T程度と余り高い値ではないが、加工性に優れ、対ひずみ特性に優れるという特長をもつ。そのため、NbTi線材では線材に加わる様々な諸応力(例えば、コイルへの巻回時に線材にかかる応力、冷却時の熱収縮による応力、コイル通電時に発生する電磁力等)に対して線材の臨界電流

密度( $J_c$ )の劣化の問題をほとんど気にせずに利用できるという利点をもつ。NbTi線の直流用としては、高 $J_c$ 化、大電流化、長尺化を目指した開発が行われている。一方、パルス用としては、4章で紹介する核融合用のパルス導体を目指した開発が行われている。

当社が開発した代表的なNbTi線の実用大電流導体として、高エネルギー物理研究所へ納入した素粒子検出器VENUSマグネット用のAl複合安定化NbTi導体が挙げられる。この導体の断面写真を図1に示す。この導体は1982年に製造された直流用の大電流導体であり、特徴として以下の点が挙げられる。

- (1) 素粒子の透過を良くするため普通の安定化材である無酸素銅だけでなく、純度99.999%のアルミを安定化材として押し出しによって複合化させた。
- (2) 1 T程度の低磁界で用いるため、Ti濃度が通常よりも高いNb-53 wt % Ti合金を用いた約1万Aの臨界電流( $I_c$ )をもつ大電流導体である。
- (3) 当社が今までに開発したNbTi線材に比べて、銅比が1.2と小さい。この導体の製作にNb-53 wt % Ti合金を用いた理由は、低磁界での $J_c$ 特性を決定するピンニング機構は、主として冷間線引き後の熱処理により析出する常電導相の $\alpha$ -Tiなので、これを多く析出させ、低磁界での $J_c$ 特性を向上させるためである。このような特徴をもつ単長1,100 mのNbTi/Cu線をバット溶接とAlの押し継ぎ法を用いるこ

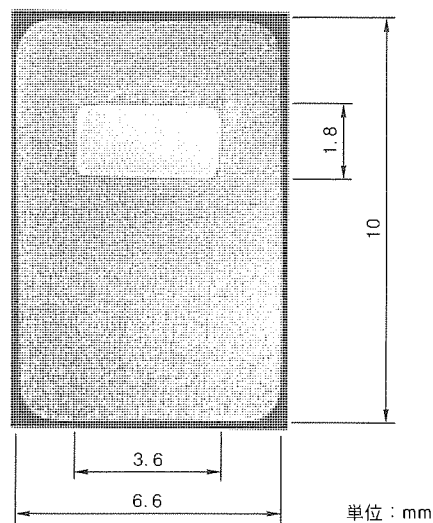


図1. VENUS マグネット用の Al 複合安定化 NbTi 導体の断面

(注) 核融合実験炉超電導磁石技術開発計画は、日本原子力研究所が中心になって進められており、その開発計画に沿って当社は線材、マグネットの開発・製作を行ってきた。なお、マグネットについてはこの特集論文を参照されたい。



とで、連続長10 km に及ぶ導体の製作に成功した。バット溶接で接続した部分は、別のNbTi線をはんだで複合接続することにより、接続抵抗 $0.8\text{ n}\Omega$ を達成することができた。このような導体はその当時として、性能的及び導体製作技術的に最高のものと、非常に高い評価を受けた。

一方、1985年には高 $J_c$ を目指したNbTi線材として、図2に示されるような加速器に用いる2極及び4極マグネット用の低銅比(銅比1.2)のNbTi線が製作された。この素線は、超電導超大型加速器SSC(Superconducting Super Collider)用に必要の高 $J_c$ を達成するために開発されたもので、線径を $0.15\text{ mm}$ 、フィラメント径を $0.9\text{ }\mu\text{m}$ に超極細化することで、 $J_c$ が $5\text{ T}$ の磁界で $2,400\text{ A/mm}^2$ という値を達成している。この値はその当時の線材の特性としてはチャンピオンデータに近い、極めて高い値であった。

また、NbTi線材の大きな市場としてMRIマグネット用の線材がある。この線材の特徴は、銅比が5程度と大きいこと、マグネットの磁界の均一性から線材断面の寸法精度が要求されること、マグネット内での線材の接続箇所を減らすためなるべく長尺線であること、さらには安価であることが挙げられる。当社では図3に示すような長尺の線材を製作しており、MRIマグネットに適用されて実績をあげている。

### 3. Nb<sub>3</sub>Sn 線材

化合物系のNb<sub>3</sub>Sn線材は $H_{c2}$ が $25\text{ T}$ 程度と高く、 $18\sim 20\text{ T}$ 程度の高磁界を発生できるポテンシャルをもっている。しかしながら、もろ(脆)くて線材としての加工が困難という

問題点があった。そのため、化合物の構成要素を線材化しておき、最後の熱処理工程で拡散反応で化合物を生成させる幾通りかの方法が考案されている。当社は、ブロンズ合金を用いないで、冷間で容易に加工ができるNb、Sn及びCuを組み合わせた内部拡散法と呼ばれる当社独自の方法によってNb<sub>3</sub>Sn極細多心線の開発に成功し、Nb<sub>3</sub>Sn線材の製造を行っている。内部拡散法の特長は以下のとおりである。

- (1) ブロンズ法とは異なり、冷間で最終線径まで加工が可能のため製造工程が簡単である。
- (2) ブロンズ法では加工性の限界から、Sn濃度の上限が $13\text{ wt}\%$ 程度なのに比べ、内部拡散法ではSn濃度を $20\text{ wt}\%$ 程度まで増やすことができるため、優れた超電導特性が得られる。
- (3) ブロンズ法では加工が困難なサブミクロンまでフィラメント径を加工することが可能なため、内部拡散法は交流用の線材の製作法としても適している。当社の内部拡散法によるNb<sub>3</sub>Sn線は、古くは1981年に $30\text{ MVA}$ 超電導同期調相機の界磁コイルに適用され、トレーニング現象もなく安定に運転

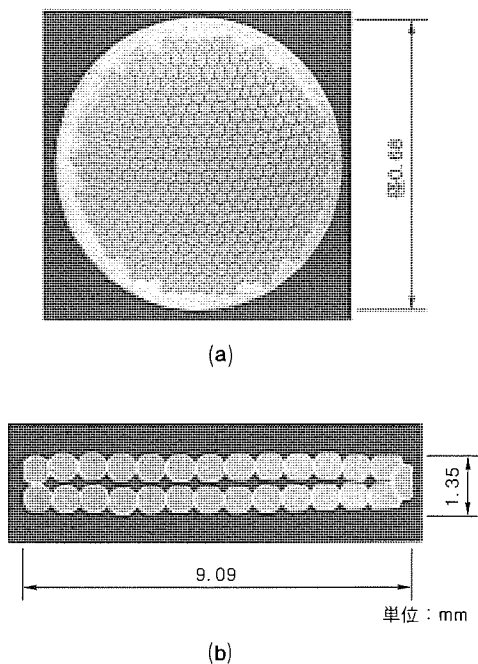


図2. 2極及び4極マグネット用のNbTi素線(a)及びギーストン撚りされた導体(b)の断面

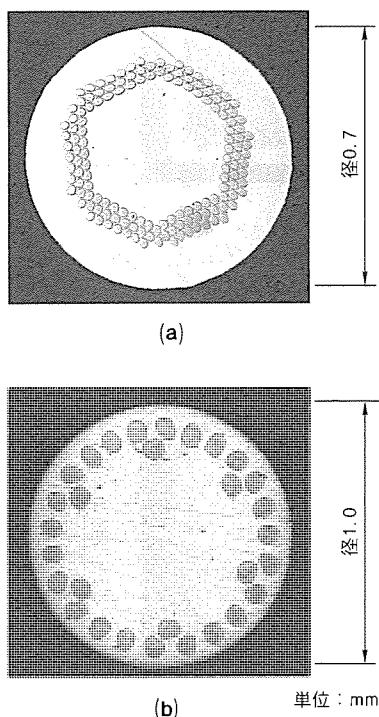


図3. MRIマグネット用の2種類のNbTi素線の断面

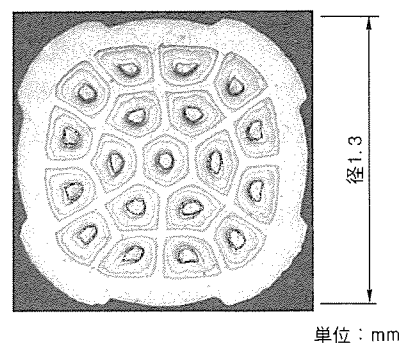


図4. 核融合実験用マグネットのNb<sub>3</sub>Sn素線の断面

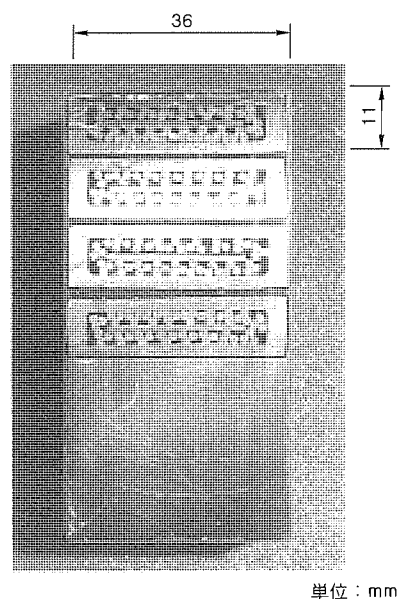


図5. 核融合実験用マグネットの強制冷却導体の断面

された実績がある<sup>(3)</sup>。最近の利用用途としては、NbTi 線材と同様に直流用及びパルス又は交流用の2系統に大別され、直流用では高磁界での高 $J_c$ 化が大きな開発のテーマとなっている。また、交流、パルス用ではヒステリシス損失や結合損失の低減がメインテーマになっている。

当社が開発した1983年以降の代表的なNb<sub>3</sub>Sn 線材としては、1983年に製作された核融合実験炉マグネット開発を目指したNb<sub>3</sub>Sn 線がある。この素線は図4に示されるようなバリヤ分散型19モジュールの構成をしており、さらに冷却効率を向上させるため溝付きの形状を採択している。この素線では12 Tの磁界で $J_c=480$  A/mm<sup>2</sup>という特性が得られた。この値はブロンズ法で製作された線材(12 Tで $J_c=400$  A/mm<sup>2</sup>)よりも高い値であった。導体の最終形状は図5に示すような3本より(燃)線を18本ステンレスの平板の周りに撚り、これをステンレス製のコンジットに入れた強制冷却型コンパクトケーブルの構成で、12 Tで定格の10 kAを越す $I_c$ を達成した。

最近製作された核融合トロイダルマグネット用のNb<sub>3</sub>Sn 導体としては、1990年に製作された原型トロイダルコイル用導体がある。この素線の断面構成を図6に示す。この素線の特徴はポロイダルコイルからの変動磁界による交流損失を低減するため、安定化銅を用いない構成になっていること、大電流容量を達成するため331モジュールという非常に多数のモジュールで構成された高 $J_c$ 、高 $I_c$ 素線であることで、12 Tで $I_c=2,760$  Aという大きな値を達成することができた。原型トロイダルコイル用導体は、この素線23本をキュプロニッケル製の薄板の周りに転移撚りしたのち、銅の冷却チャンネルとともにステンレス製のコンジットに組み込んだ強制冷却導体という構成を採用し、12 Tの磁界で42.3 kAの世界最高の $I_c$ 値が達成された。

ところで、超電導線は直流電流に対しては無損失に電流を流すことができるが、電流又は磁界の変動に対しては交流損失と総称される損失を伴う。この損失は三つに大別され、超電導体内の磁束の再配列に伴うヒステリシス損失・変動磁界に対し、マトリクスを介して超電導フィラメント間に誘起される渦電流による結合損失、さらに変動磁

界に対してマトリクス内で発生する渦電流損からなる。したがって、超電導線をパルスマグネット用又は交流コイル用として利用するためには、超電導線に発生する交流損失をなるべく軽減させることが必要となる。そのためには、線材のフィラメント径をできるだけ細くしてヒステリシス損失を低減させる、又はフィラメントをツイストし、マトリクスの電気抵抗を増大させてフィラメント間に誘起される結合電流の減衰時定数をなるべく短くして結合損失及び渦電流損を低減させる等を行うことが必要になってくる。

パルス又は交流用として用いられる内部拡散法Nb<sub>3</sub>Sn 線材の代表例としては、1987年に高磁界パルスマグネット用線材として、図7に示されるようなバリヤ無しの37モジュール超極細Nb<sub>3</sub>Sn 線材が電子技術総合研究所の指導のもとに製作された。この線材の特徴は以下のとおりである。

- (1) 10 T程度の中磁界で $J_c$ 特性を向上させるため、Sn コアにIn を添加した。
- (2) 変動磁界中でのヒステリシス損失を軽減するためフィラメント径を1  $\mu$ m まで極細化した。
- (3) 結合損失を抑え、機械的強度を増すため銅マトリクスにCr を添加した。

この素線では、10 Tの磁界で $I_c=130$  Aという値が得られた。この素線は補強用のMo 心線に高純度Al 線がともに撚線され高磁界パルスマグネットに用いられた。この素線は線

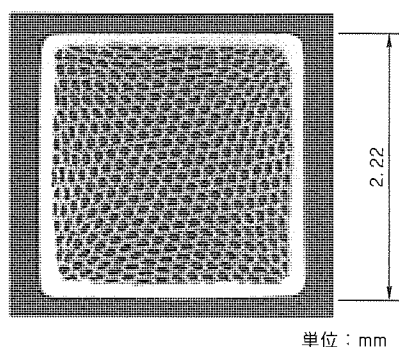


図6. 原型トロイダルコイル用Nb<sub>3</sub>Sn 素線の断面

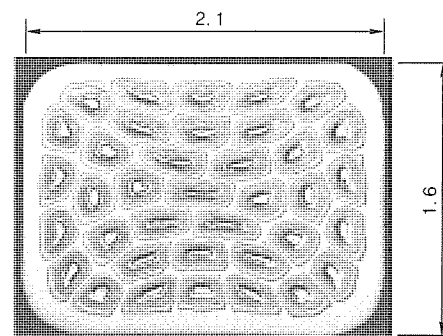


図8. (a) バリヤ分散型37モジュールNb<sub>3</sub>Sn 平角線の断面

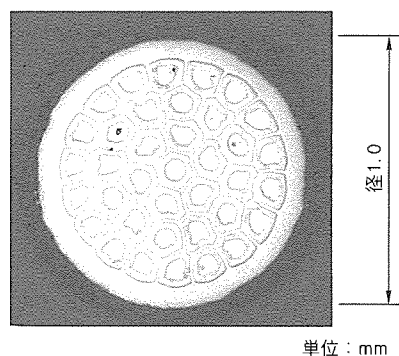


図7. 高磁界パルスマグネット用Nb<sub>3</sub>Sn 素線の断面

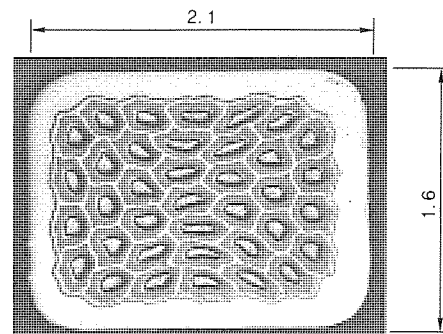


図8. (b) バリヤ一括型37モジュールNb<sub>3</sub>Sn 平角線の断面

径が更に0.2 mm まで縮径され、種々の改良を施されて超電導変圧器用の素線として用いられた。

一方、当社の高磁界対応の代表的な Nb<sub>3</sub>Sn 線材としては、1989年に製作された16 T級高磁界マグネット用の素線がある。当社では、1984年以來12 T以上の高磁界側での  $J_c$  特性を改善するため、Ti を添加した Nb<sub>3</sub>Sn 線材の開発を行ってきており、この素線は以下の経緯で開発された。まず、1987～89年にかけて、図8に示されるようなバリヤ分散型37モジュール平角線(図8(a))、又はバリヤ一括型37モジュール平角線(図8(b))などのSn コアにTi 添加を施した線材の製作を通じて、線材構成上の課題を解決しながら、12 T の磁界で  $J_c=570 \text{ A/mm}^2$  という値を達成することができた。この値は、ブロンズ法によるTi 添加 Nb<sub>3</sub>Sn 線と同レベルであった。引き続いて、 $J_c$  特性で内部拡散法がもつ高ポテンシャルを発揮させるため、研究用の素線においてTi 添加量、Nb フィラメント径、フィラメント数、モジュール径、モジュール数などの線材構成の最適化、及び熱処理条件の最適化を行った。図9に様々な条件で製作した線材の  $J_c-B$  特性を示す。その結果、675℃-160 h の熱処理条件で、12 T において  $J_c=957 \text{ A/mm}^2$  という極めて高い  $J_c$  が得られた。この値はブロンズ法で得られる値600～700  $\text{A/mm}^2$  よりも格段に高い値である。この成果に基づいて、16 T級高磁界マグネット用の素線の製作が行われた。この素線の断面写真を図10に示す。この高磁界対応の平角モノリス線は、以前の図8に示した平角線より、モジュール径を小さくしてSn の拡散距離を短くし、Nb フィラメント径を細くして均質な Nb<sub>3</sub>Sn 層を生成できる構成にしている。その結果、実用線材でも12 Tの磁界で  $J_c=867 \text{ A/mm}^2$  という非常に高い特性が得られた。この線材は高分解能 NMR マグネットへ適用する予定である。

#### 4. 核融合用パルス導体

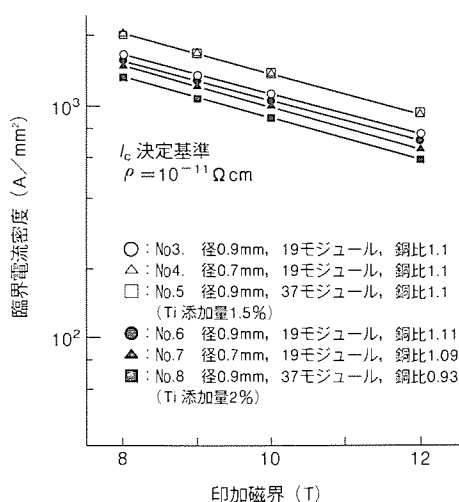


図9. 様々な条件で製作した研究用 Nb<sub>3</sub>Sn 素線の  $J_c-B$  特性

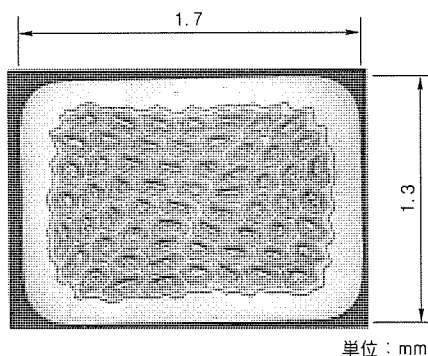


図10. 16 T 級高磁界マグネット用 61モジュール Nb<sub>3</sub>Sn 平角線の断面

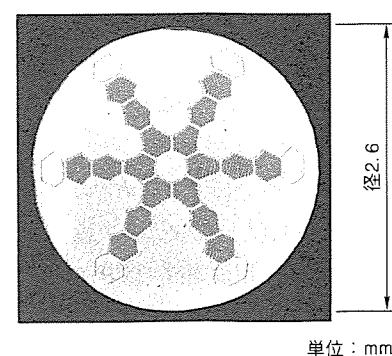


図11. ポロイダルユニットパンケーキ (PUP)用の3層構造 NbTi 線の断面

当社では、超電導パルスマグネットに対して多くの実績をもっており、線材でも合金系・化合物系を問わず日本原子力研究所の指導のもとにパルス用導体の開発を行いながら実力を培ってきた。ここでは、当社の技術的中核をなす核融合用のパルスマグネット用の導体の開発経緯を紹介する。

まず、注目すべきパルス対応の大電流導体として、1985年に製作されたポロイダルユニットパンケーキ (PUP) と呼ばれるパルスマグネット用の3層構造 NbTi 線が挙げられる。この導体の断面写真を図11に示す。この3層構造 NbTi 素線はパルス磁界発生による損失を抑え、しかも大電流で運転するため以下の特徴を持っている。

(1) 交流損失を低減させるためキュプロニッケル (Cu-10 %Ni) 合金を用いた3層構造の素線であり、しかも結合損及び渦電流損を軽減させるため断面形状が雪の結晶のような特殊な構造をしている。

(2) 大電流に対する安定性を確保するため、素線の銅比が NbTi に対し9.5と極めて大きく、さらに図12に示すように素線をステンレスの心線の周りに6本燃った一次ケーブルのストランド線を更にステンレスの薄板の周りに21本燃った大電流容量の燃線構造である。このPUP用の3層構造素線は改良され、さらにマグネットの高磁界化・高蓄積エネルギー化を目指した実証ポロイダルコイル (DPC) 用の素線として用いられた(図13, 1987年製作)。この素線をPUPの素線と比較すると、キュプロニッケルを用いた3層構造線であるという点では同様であるが、 $J_c$  は7 Tの磁界で22%向上しており、しかもフィラメント径もヒステリシス損を軽減するため半分以下の10  $\mu\text{m}$  と細くなっている。さらに、DPC用導体の特徴は、先程のPUP用導体とは異なり、図14に示すように合計486本の素線の燃線(3本燃りを4回施したストランドが更に6本燃り合わされている。)をステンレス製のコンジットに収めた強制冷却導体となっていることである。

核融合実験炉のトロイダルマグネット又はポロイダルマグネットは技術の進展に伴い、最近では10 T以上の高磁界化が要求され、Nb<sub>3</sub>Sn による導体開発が求められるようになってきた。上述のDPCは、拡張試験用のNb<sub>3</sub>Sn コイル

(DPC-EX) を組み合わせて更に高磁界の発生を目指した実験が行われた。このDPC-EX は  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  による初のパルス用の大型マグネットで、その素線は図15に示すように、10 Tの磁界の発生に適したSn コアにIn 添加した7モジュールバリヤー括タイプが採用されている。この素線は10 Tの磁界で  $836 \text{ A/mm}^2$  という  $J_c$  特性が得られた。この素線では今までの  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  線材とは異なり、Nb ではなく Ta バリヤーが採用されている。これはバリヤーを Ta に変えることにより、バリヤーの内周に生成される  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  層の生成を防止し、ヒステリシス損及び結合損の発生を抑えるためである。DPC-EX の導体は、図16に示すように素線の9本燃線をステンレス製の平板の周りに17本燃ってステンレス製のコンジットで覆った強制冷却導体の形状をしている。素線間は結合損失を抑えるため、素線の表面にCr めっきが施されている。これらの技術的な工夫の結果、DPC-EX は7 Tの磁界まで1秒で急峻かつ安定に立ち上げるパルス運転に成功し、世界に先駆けた成果を収めた<sup>(4)</sup>。

DPC-EX の成功は、さらに高磁界化・高蓄積エネルギー化を目指したセンターソレノイド (CS) モデルコイルへと継続され、1991年にはCS モデルコイル用素線として図17に示されるようなDPC-EX 用の素線を更に発展させた高  $J_c$ 、低ヒステリシス損失線材が開発された。この素線では、ヒステリシス損失から算出される有効フィラメント径を  $10 \mu\text{m}$  以下の値に抑えるため、モジュール内のフィラメント配置に工夫を凝らした新タイプの構成が採用されている。

## 5. $\text{Nb}_3\text{Sn}$ 線の研究

この章では、内部拡散法による  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  線の  $J_c$  特性向上に関する研究内容を、図6に示した原型トロイダルコイル用素線に即して紹介する。この素線 (以下“角線”という) は安定化銅がなく、大電流容量を達成するため331モジュールという非常に多数のモジュールで構成されており、 $700^\circ\text{C}$ -80 h の熱処理で素線の断面積当たりの  $J_c$  として  $560 \text{ A/mm}^2$  ( $B=12 \text{ T}$ ) という値が得られている。一方、熱処理条件を把握するためこの角線を更に径1.10 mm まで縮径したR & D用の素線 (以下“R & D丸線”という) で様々な熱処理を行ったところ、更に高い  $J_c = 750 \text{ A/mm}^2$  ( $B=12 \text{ T}$ ) という値が得られた。この値は

$\text{Nb}_3\text{Sn}$  化合物層当たりの  $J_c$  に換算すると、バリヤーが無いにもかかわらず、今まで得られた最高の  $J_c$  値である。表1に両素線の設計仕様とさまざまな熱処理での  $J_c$  特性を示す。そこで、R & D用丸線と角線との  $J_c$  の違いの原因をつかむため、両者の線材のEPMA 分析、ICP 分析及びSQUID 帯磁率磁化測定装置による  $T_c$  評価を行い、両試料の比較検討を行った。その結果、以下のことが判明した。

- (1)  $T_c$  測定の結果は、いずれの熱処理条件でも  $\Delta T_c$  は角線では4 K程度とR & D用素線の1.5 K程度に比べて大きく、明りょうな差が認められた。
- (2) 両試料共バリヤーが無いため、線材外へSn の蒸発がおこる。この影響をEPMA 分析、ICP 分析から調べた結果、素線内のブロンズ中のSn 濃度の分布、線材外へのSn の蒸発量、生成された  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  フィラメント中のSn 濃度等の両素線内のSn の kinetics を熱処理条件の変化に対して定量的に把握することができた。
- (3) 生成された  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  フィラメントを  $1 \mu\text{m}$  のオーダーで定量分析を行い、図18に認められるようにR & D丸線では認められなかったフィラメントの未反応のNb 心が、角線では特に周辺部モジュール外側で多く残存していることを確認した。

以上の結果を総合すると、両者の超電導特性の違いは、角線で生成された  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  がNb : Sn = 3 : 1 よりもSn が欠乏

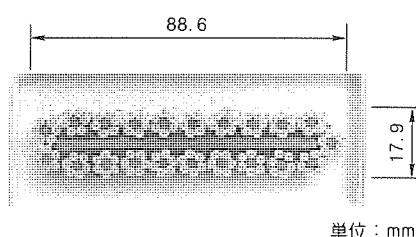


図12. ポロイダルユニットパンケーキ (PUP) 用導体の断面

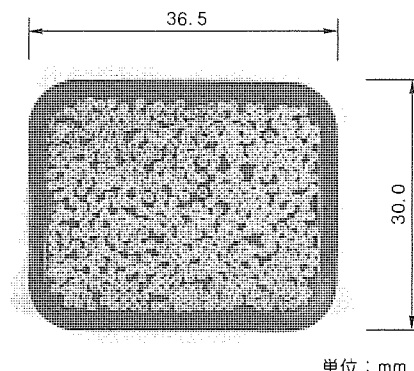


図14. 実証ポロイダルコイル (DPC) 用導体の断面

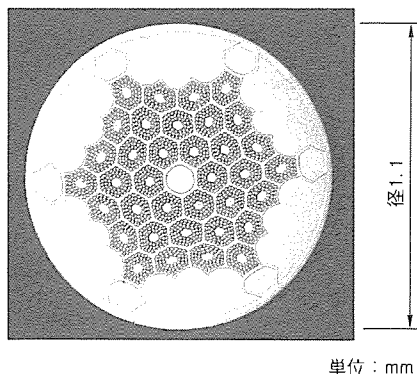


図13. 実証ポロイダルコイル(DPC)用の3層構造 NbTi 線の断面

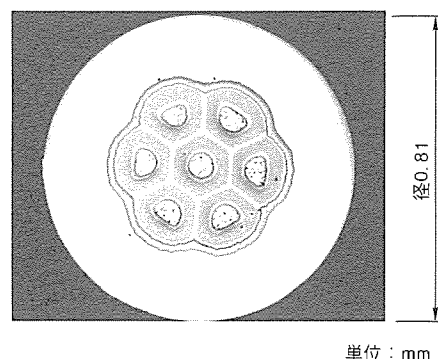


図15. 実証ポロイダルコイルの拡張試験 (DPC-EX) 用  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  素線の断面



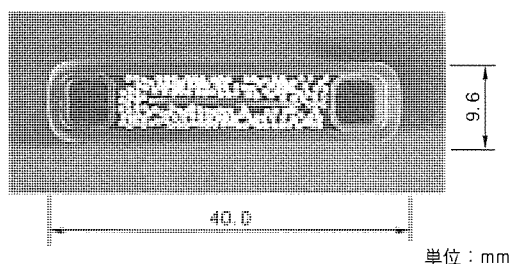


図16. 実証トロイダルコイルの拡張試験  
(DPC-EX)用導体の断面

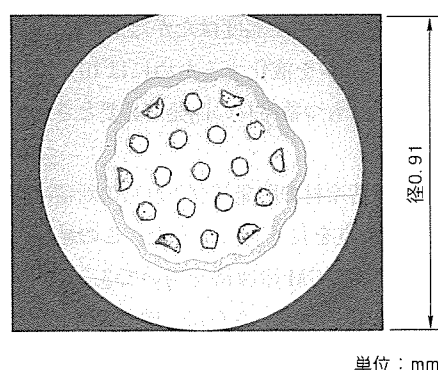


図17. センターソレノイド(CS)モデルコイル  
用導体の一つとして開発した  
Nb<sub>3</sub>Sn 素線の断面

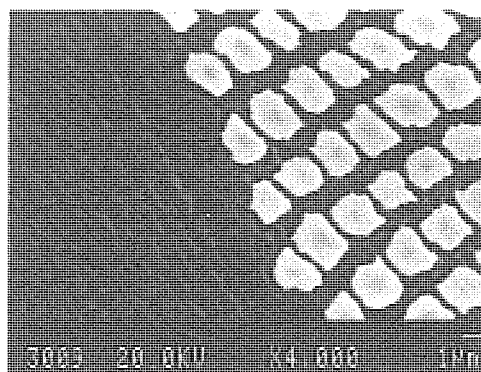


図18. 原型トロイダルコイル用 Nb<sub>3</sub>Sn 素線の  
フィラメントの EPMA 反射電子像  
(周辺部モジュール)

側にずれていることが角線で R & D 素線なみの高  $J_c$  が得られなかった原因であることが判明した。そこで、素線周辺部の Sn の蒸発による減少を抑え、 $J_c$  を向上させるため、Nb<sub>3</sub>Sn の表面をあらかじめ酸化させ、その後の熱処理で線材表面に SnO を生成させ、これをバリヤ代わりにする新プロセスで高  $J_c$  化をねらう実験を行っている。

現在までの内部拡散法 Nb<sub>3</sub>Sn 線材の特性を総括すると、12 T で Nb バリヤによる安定化銅をもった直流用の線材では非銅の断面積当たりの  $J_c$  が 957 A/mm<sup>2</sup>、Ta バリヤによる安定化銅をもつパルス用の線材では非銅の断面積当たりの  $J_c$  が 843 A/mm<sup>2</sup>、安定化銅をもたないパルス用の線材では線材断面積当たりの  $J_c$  が 750 A/mm<sup>2</sup> といずれも極めて高い  $J_c$  が得られている。

## 6. む す び

当社が開発してきた様々な NbTi 線、Nb<sub>3</sub>Sn 線について、その特徴を中心として紹介した。

今後は、NbTi 線では現在実用化されている MRI 用のほかに、シンクロトロン放射光リングや磁気浮上用などの線材として、より高性能に、より安くという商業ベースに乗った

表 1. 両線材の設計仕様及び  $B=12$  T での  $J_c$

諸元／線材種類	角 線	R & D 丸線
モジュール数／径	331／122 $\mu$ m	331／54 $\mu$ m
フィラメント数／径	268,110／2.4 $\mu$ m	268,110／1.1 $\mu$ m
フィラメント間隔	1.1 $\mu$ m	0.5 $\mu$ m
$J_c$ : 675℃ -80h	434 A/mm <sup>2</sup>	750 A/mm <sup>2</sup>
$J_c$ : 700℃ -80h	560 A/mm <sup>2</sup>	642 A/mm <sup>2</sup>
$J_c$ : 725℃ -40h	420 A/mm <sup>2</sup> ( $I_q$ )	620 A/mm <sup>2</sup>

時代になりつつある。また、超電導機器の交流利用が本格的になり始めると、交流用の NbTi 線の用途は飛躍的に拡大するものと思われる。一方、より高磁界対応の Nb<sub>3</sub>Sn 線では、分析用 NMR マグネット用の線材のほかに、 $T_c=17\sim 18$  K という NbTi 線よりも大きな温度マージンを利用して、交流利用への用途が有望であり、現在種々の機器への適用の検討が行われている。

さらに、将来には、より高磁界対応の材料として、シェブレル相線材や Bi 系などの酸化物線材、また液体窒素温度での利用が可能な材料として Bi 系などの高温超電導線材などの実用化が考えられ、それらの線材開発が金属系超電導線材で培われた技術力の応用によって加速されている。

超電導線材の製作に当たり、御指導いただいた高エネルギー物理研究所、日本原子力研究所、電子技術総合研究所の各位に感謝の意を表す。また、超電導導体の製作に当たっては、一部三菱電線工業(株)の協力を得た。関係各位に感謝します。

## 参 考 文 献

- (1) 日本物理学会編：超伝導，p. 249，丸善（1979）
- (2) 吉崎 浄，田口 修，今泉三之，藤原二三夫，橋本康男：超電導材料，三菱電機技報，56，No. 2，123～126（1982）
- (3) 岩本雅民，荻野 治，野村達衛，佐藤 隆，福本紀久男：6 MVA 超電導発電機の試作研究，三菱電機技報，52，No. 11，779～783（1978）
- (4) 日本原子力研究所：核融合研究開発の現状，p. 63（1990）

# 小型ヘリウム冷凍機技術

吉村秀人\* 森津一樹\*\*\*  
長尾政志\*\* 松本隆博\*\*\*  
稲口 隆\*\*

## 1. ま え が き

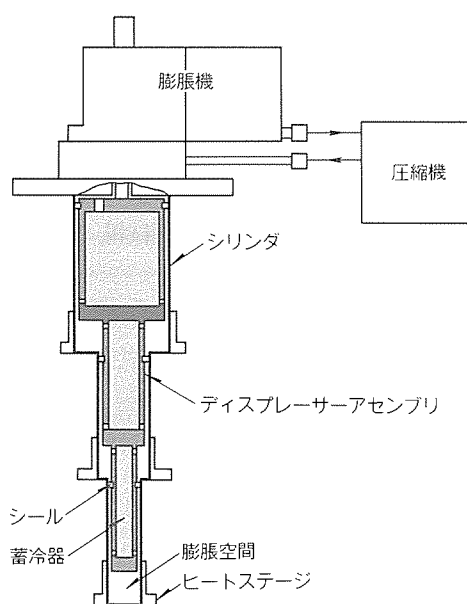
超電導マグネットは高エネルギー物理学や核融合科学の実験設備として用いられる一方、近年産業設備として、また医用設備として広く普及しつつある。超電導マグネットの普及に伴って安価で信頼性の高いヘリウム液化機の需要が高まってきた。さらに、超電導マグネットのより一層の普及のためには、ユーザーがヘリウムの存在を意識する必要のない超電導マグネットを安く製作する必要があると考えられる。このためには安価で信頼性が高く高効率のヘリウム液化機が不可欠である。

当社ではこの目的を達成するために、長らくギフォード・マクマホンサイクル冷凍機（以下“GM 冷凍機”という。）の研究を行ってきた。GM 冷凍機はギフォードとマクマホンによって1959年に発明された<sup>(1)(2)</sup>、蓄冷器を用いる冷凍機である。GM 冷凍機は低コストで信頼性が高いために、クライオポンプのパネル冷却や超電導MRI マグネットのシールド冷却のために広く使用されている<sup>(3)(4)</sup>。しかし、これらのGM 冷凍機を用いて4.2 K（ヘリウムの沸点）以下の温度を発生させ、ヘリウムを液化することはこれまでできなかった<sup>(5)~(7)</sup>。これは、これらのGM 冷凍機に蓄冷材として用

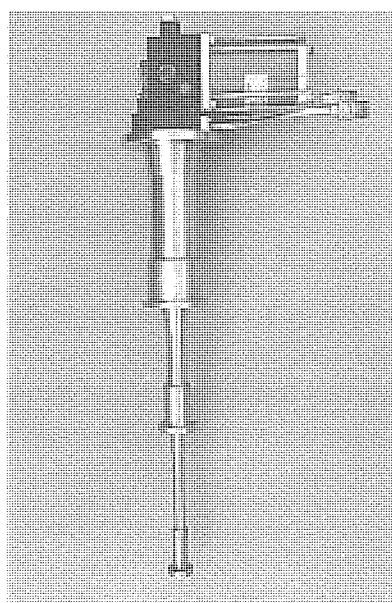
いられている鉛の比熱が極低温領域でほとんど零になり、それゆえ蓄冷器が機能しなくなるためである。このため、鉛を蓄冷材に用いたGM 冷凍機の発生温度はたかだか10 Kであった。GM 冷凍機でヘリウムを液化するためには10 K以下の温度領域で大きな比熱をもつ蓄冷材の開発が必要とされてきた<sup>(8)</sup>。

筆者らはこのような新蓄冷材の開発及びこれらの新蓄冷材を用いたGM 冷凍機の改良を長く行ってきた。この結果、1988年11月に世界で初めてGM 冷凍機を用いて3.3 Kの発生とヘリウムの液化に成功した<sup>(9)</sup>。さらに、翌1989年12月にはやはり世界で初めて3段式GM 冷凍機を用いて2.09 Kの発生と超流動ヘリウムの生成に成功し、この冷凍機の性能を著しく向上させた<sup>(10)</sup>。

そして、このたび三菱マテリアル(株)と共同で、極低温で高い比熱をもつ蓄冷材すなわち $\text{Ho}_{1.5}\text{Er}_{1.5}\text{Ru}$ の開発に成功するとともに、1990年11月には超電導MRI マグネットに適用可能な3段式GM 冷凍機の開発に成功した。この成果に対して、米国R & Dマガジン社から1991年のR & D100賞が授与された。この論文では、当社が世界に先駆けて開発に成功したこの3段式GM 冷凍機の構成と性能について述べる。



(a) GM 式ヘリウム液化機の概略構成



(b) 膨脹機の外観

## 2. 3 段式 GM 冷凍機の構成

図 1 に 3 段式 GM 冷凍機の概略構成と膨脹機の外観を示す。作動流体はヘリウムガスで、ヘリウムガスは圧縮機によって 0.6 MPa から 2.1 MPa に圧縮され、膨脹機のシリンダに流れ込む。シリンダはステンレス鋼で製作されており、この外周には 3 種類のヒートステージがろう付けされている。3 種類の蓄冷器を内部にもったディスプレイサアセンブリがシリンダ内で往復運動する。ヘリウムガスが蓄冷器を通してシリンダ内の膨脹空間に流れ込むとき、ヘリウムガスは蓄冷材と熱交換して冷却される。排気弁 (図 1 には示されていない) が開くとヘリウムガスは膨脹し、更に冷却される。膨脹したヘリウムガスは蓄冷器を通して圧縮機に戻される。このとき、ヘリウムガスは蓄冷材を冷却し、自らは加熱されて戻る。ディスプレイサアセンブリはヘリウムガスの膨脹サイクルに同期してモータによって駆動される。駆動サイクルは 60 r/min であり、ストロークは 31.8 mm である。

ディスプレイサアセンブリは、3 個のディスプレイサによって構成されている。それぞれのディスプレイサはフェノール樹脂で製作されており、相互にピンで結合されている。また、それぞれのディスプレイサは蓄冷器を内蔵している。第 1 段蓄冷器にはりん青銅の金網、第 2 段蓄冷器には鉛粒、そして第 3 段蓄冷器には  $\text{Ho}_{1.5}\text{Er}_{1.5}\text{Ru}$  の粒が用いられている。図 2 に  $\text{Ho}_{1.5}\text{Er}_{1.5}\text{Ru}$  の粒の写真を示し、図 3 に  $\text{Ho}_{1.5}\text{Er}_{1.5}\text{Ru}$  の比熱 (体積比熱) を鉛のそれと比較して示す。図から 10 K 以下の極低温領域で  $\text{Ho}_{1.5}\text{Er}_{1.5}\text{Ru}$  の比熱は鉛の比熱よりも大きいことが分かる。

## 3. 3 段式 GM 冷凍機の性能

### 3.1 性能試験の方法

図 4 に試験装置の概念を示す。3 段式 GM 冷凍機は真空槽に取り付けて試験した。銅製の液化容器が第 3 段のヒートステージに取り付けられている。ヘリウムガスはヘリウムガ

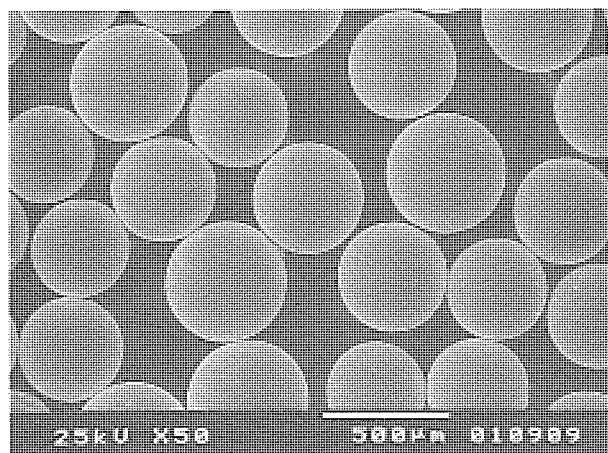


図 2.  $\text{Ho}_{1.5}\text{Er}_{1.5}\text{Ru}$  の粒の写真

スシリンダからステンレスチューブを通して液化容器に導入される。ステンレスチューブは導入されるヘリウムガスを予冷するために、第 1 段、第 2 段ヒートステージに熱的に接触されている。第 2 段、第 3 段ヒートステージは熱放射シールドで囲まれており、この熱放射シールドは第 1 段ヒートステージによって約 40 K に保たれている。第 1 段、第 2 段ヒートステージの温度は、Pt-Co 抵抗温度計によって測定し、第 3 段ヒートステージの温度は校正済みのゲルマニウム抵抗温度計によって測定した。冷凍能力を測定するためにそれぞれのヒートステージにヒータが取り付けられている。ヘリウムの液化速度は質量流量計によって測定した。液化容器内のヘリウムの圧力は、圧力調整器によって調節することが可能である。液体ヘリウムが液化容器に存在している間は、第 3 段ヒートステージの温度を液化容器の圧力によって調節することが可能である。

### 3.2 性能試験の結果

3 段式 GM 冷凍機の第 3 段ヒートステージの温度が室温から 4.2 K に達するのに約 3 時間かかった。その後、第 3 段ヒートステージの温度は一定になった。これは、液化容器内でヘリウムの液化が始まったことを意味している。このときの液化速度は約  $100 \text{ cm}^3/\text{h}$  であった。

圧力調整器を用いて液化容器内の圧力を下げると、第 3 段ヒートステージの温度は 4.2 K から更に低くなる。液化容器内へのヘリウムの導入を完全に停止すると、第 3 段ヒートステージの温度は 2.8 K になった。このとき、液化容器の圧力はヘリウムの飽和圧力 (0.018 MPa) にほぼ等しかった。

図 5 は第 1 段及び第 2 段ヒートステージに、それぞれ 50 W, 3 W の熱を印加した状態における第 3 段ヒートステージの冷凍能力を示している。これは液化容器へのヘリウムの導入を完全に停止した状態で測定した。このときの第 1 段及

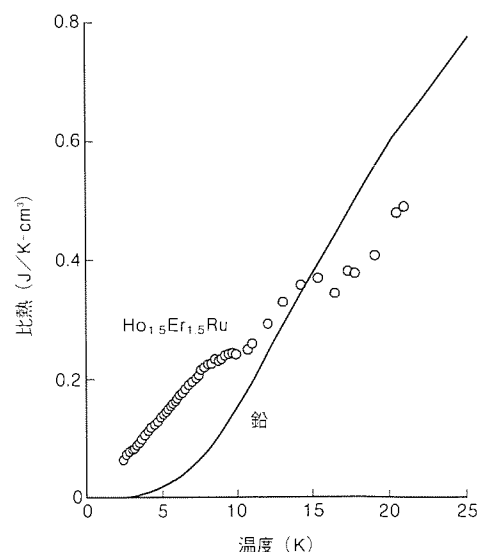


図 3.  $\text{Ho}_{1.5}\text{Er}_{1.5}\text{Ru}$  と鉛の比熱の比較

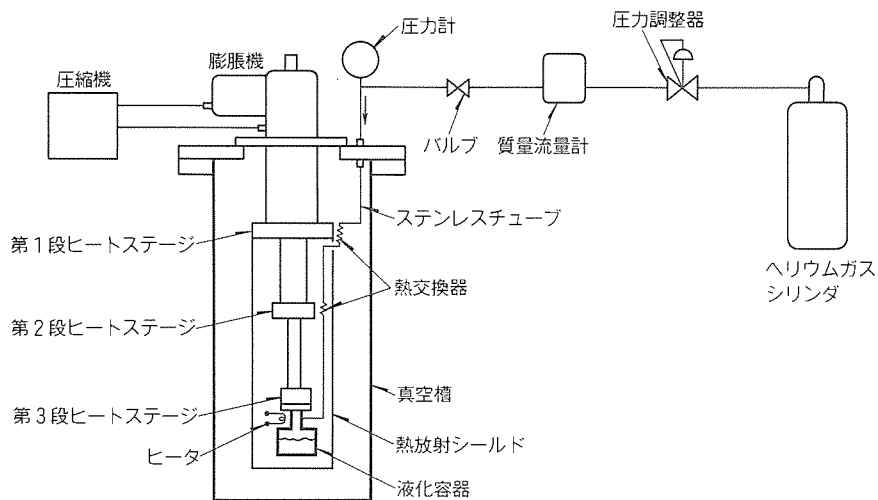


図4. 性能試験装置の概念

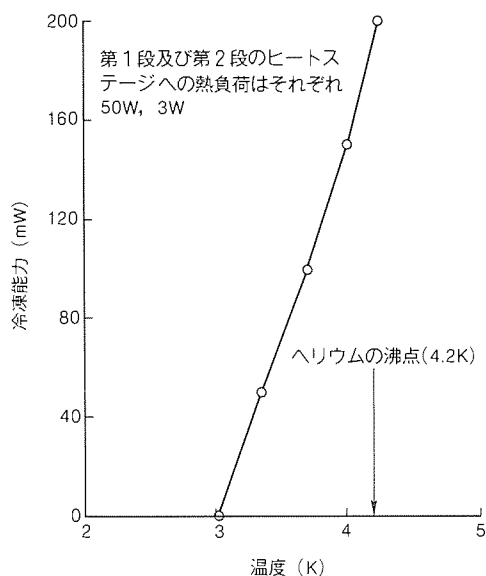


図5. 3段式 GM 冷凍機の第3段ヒートステージの冷凍能力

び第2段ヒートステージの温度は、それぞれ約67 K、約17 Kであり、第3段ヒートステージの温度にかかわらずほぼ一定であった。図から第1段及び第2段ヒートステージにそれぞれ50 W、3 W の熱を印加した状態でも第3段ヒートステージの冷凍能力は4.2 Kで200 mW 程度あることが分かる。

#### 4. む す び

$\text{Ho}_{1.5}\text{Er}_{1.5}\text{Ru}$  を蓄冷材に用いた3段式 GM 冷凍機を用いて、最低到達温度2.8 K を達成するとともに、4.2 K の温度でヘリウムを約100 cm<sup>3</sup>/h で液化することに成功した。

この冷凍機は、また第1段及び第2段ヒートステージにそれぞれ50 W、3 W の熱を印加した状態において4.2 K で200 mW の冷凍能力をもっている。したがって、この3段式 GM 冷凍機を侵入熱量が200 mW 以下の超電導マグネット用の冷凍機として用いれば、ヘリウムの蒸発量を完全に零にできる可能性がある。

#### 参 考 文 献

- (1) Gifford, W. E. : U. S. Patent 2966035 (1960)
- (2) McMahon, H. O., Gifford, W. E. : A New Low-Temperature Gas-Expansion Cycle Parts I, *Advances in Cryogenic Engineering*, **5**, 354~367 (1960)
- (3) Barron, R. F. : *Cryogenic Systems* 2nd edition, Oxford University Press, 449 (1985)
- (4) Partain, C. L., James, A. E., Roll, F. D., Price, R. R. : *Nuclear Magnetic Resonance Imaging*, W. B. Saunders Company, 125 (1983)
- (5) Stuart, R. W., Cohen, B. M. : Operation and Application of a Three-Stage Closed-Cycle Regenerative Refrigerator in the 6.5K Region, *Advances in Cryogenic Engineering*, **15**, 428~435 (1970)
- (6) Daniels, A., duPre, F. K. : Triple-Expansion Stirling-Cycle Refrigerator *Advances in Cryogenic Engineering*, **16**, 178~184 (1971)
- (7) Radebaugh, R. : Prospects for Small Cryocoolers, *Proceeding of the 9th International Cryogenic Engineering Conference*, 761~766 (1982)
- (8) Wade, L. A. : Low Temperature Regenerator, NBS SP-607, 164~172 (1981)
- (9) Yoshimura, H., Nagano, M., Inaguchi, T., Yamada, T., Iwamoto, M. : Helium Liquefaction by a Gifford-McMahon Cycle Cryogenic Refrigerator *Review of Scientific Instruments*, **60**, 3533~3536 (1989)
- (10) Nagao, M., Inaguchi, T., Yoshimura, H., Nakamura, S., Yamada, T., Iwamoto, M. : Generation of Superfluid Helium by a Gifford-McMahon Cycle Cryocooler, *Proceeding of the 6th International Cryocooler Conference*, **2**, 37~47 (1990)



# 断熱技術

天野俊之\* 松本隆博\*\*\*  
尾原昭徳\*  
藤本泰司\*\*

## 1. ま え が き

超電導マグネットの普及及び大型化が進むにつれ、クライオスタット（低温保持装置のこと）の高性能化の要求がますます強くなっている。MRI（Magnetic Resonance Imaging）、磁気浮上式鉄道などが前者の代表例であり、核融合、加速器応用などが後者の代表例といえる。クライオスタットの高性能化とは、端的に言えば超電導マグネットの運転にかかる手間やコストを減らすことである。そのためには、超電導コイルを冷やすための寒剤の消費量を減らすことが最も効果的である。寒剤の消費量を減らすための技術が断熱技術である。

断熱を行うには、熱の移動メカニズムを知り、対策を立てる必要がある。熱の移動形態には伝導・対流・放射の三つがある。クライオスタットではこれら三つの形態による熱侵入を抑えるため、以下に掲げる対策について様々な工夫が施されている。

### (1) 伝導による熱侵入の低減対策

- (a) 熱伝導率を小さくする。
- (b) 伝導面積を小さくする。
- (c) 伝導距離を長くする。

### (2) 対流による熱侵入の低減対策

- (a) 対流を起こすガス自体をなくす。
- (b) 対流を起こすスペースをなくす。
- (c) 強制的なガスブローにより、対流が起きるのを防ぐ。

### (3) 放射による熱侵入の低減対策

- (a) 熱放射率を小さくする。
- (b) 熱放射シールドを挿入する。
- (c) 低温面の熱放射面積を小さくする。

熱侵入としてどうしても避けられないものに、内槽（超電導コイルと液体ヘリウムを収める容器）を支持する構造物（断熱支持材）からの熱伝導、内槽への高温面からの熱放射

がある。クライオスタットでは、タイプにもよるがこれら二つの成分のうちどちらかが、又は二つが熱侵入量の支配項となることが多い。したがって、これらの要因による熱侵入量を抑えることが、そのままクライオスタットの高性能化を図ることになる。

ここでは断熱支持材、熱放射の低減化に関する最近の研究成果について報告する。

## 2. 断熱支持材

断熱支持材は内槽を重力・電磁力・加振力などに対して強度的に十分持つような材質かつ構成である必要がある。その上で、伝導による熱侵入の低減化を図らなければならない。許容応力が大きく、しかも熱伝導率が小さい材料としてよく使用されるのがFRP（繊維強化プラスチック）である。繊維によってガラス系、炭素系、アルミナ系などがある。

さて、断熱支持材を取り付けるスペースが十分に確保できる場合は問題ないが、往々にしてスペースがない条件で伝導距離を稼ぐ必要が生じる場合が多い。磁気浮上式鉄道用クライオスタットもその一例である。その場合、断熱支持材は特殊な形状となる<sup>(1)</sup>。例えば、図1のような円筒状のものを多重にした折り返し構造である。折り返すことで伝導距離を長くし、中間部にサーマルアンカーを採ることで更に熱侵入を抑えるように工夫している。 $m$  回折り返せば元の状態に比べ伝導距離は  $m$  倍になり、熱伝導率は温度によらないとすれば熱侵入量は  $1/m$  になる。しかし、熱伝導率は温度によって大きく変化し、しかも折り返しているため断熱支持材中の高温部から低温部に熱放射による熱侵入が存在する。したがって、見積りはできるものの見積り精度がどの程度か判定しがたく、実用形態での熱侵入量を特定する必要があった。そこで多重円筒系の断熱支持材を実装と同様の状態に置き、サーマルアンカー部の温度を変化させたときの熱侵入量を測定できる試験装置を製作し、実験を行った。

測定結果の一例を図2に示す。測定試料の寸法は図中に示してある。丸印が測定値であり、実線は熱伝導のみを考えた場合の予測値である。十分な精度で予測できており、熱放射の影響を無視してよいことが分かる。測定した断熱支持材1個当たりの熱侵入量はサーマルアンカー部の

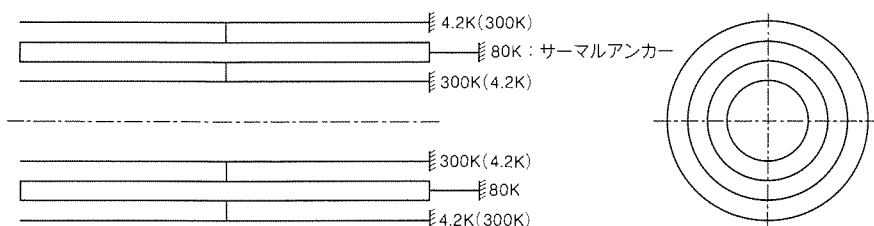


図1. 多重円筒式断熱支持材の例

温度を80 Kとすれば45 mW であり、極めて小さい値に抑えられていることも分かる。さらに、サーマルアンカー部の温度が80 Kから100 Kになると熱侵入量は倍になり、サーマルアンカー部を十分に冷却することが重要であることも分かる。

### 3. 熱放射量の低減化

#### 3.1 極低温熱放射率の測定

熱放射による熱侵入量を抑えるための有効な手段の一つが、熱放射率の低減化である。熱放射量  $Q_R$  は高温面の温度を  $T_H$ 、低温面の温度を  $T_L$ 、低温面の面積を  $A_L$ 、2 面間の実効熱放射率を  $E$ 、形態係数を  $F_{HL}$  とすれば、次の式で与えられる。

$$Q_R = \sigma E A_L F_{HL} (T_H^4 - T_L^4) \dots\dots\dots (1)$$

ここで  $\sigma$  は Stefan-Boltzmann 定数 ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ) である。実効熱放射率  $E$  は放射面の材質と表面状態、温度に依存する。形態係数 ( $\leq 1$ ) は立体角で規定されるが、図 3 のようなすき (隙) 間に比べて面積が大きい (a) 平行平板系又は均一温度の低温面が均一温度の高温面に完全に覆われた (b) 密閉系であれば 1 となる。式 (1) から実効熱放射率  $E$  を小さくすれば、 $Q_R$  を小さくできることが分かる。

そこで超電導機器で一般的に使用される、各種材料の熱放射率の測定を行った。なお実験装置、方法については文献 (2) に詳述してある。測定に供した表面状態と測定結果を表 1 及び図 4 に示した。ただし、表 1 及び図 4 に示したのは各種表面状態の全半球熱放射率  $\epsilon(T)$  (注 1) であり、これと 2 面間の実効熱放射率  $E$  との間には灰色近似 (注 2) を仮定すれば、以下の関係式が成り立つ。

$$E = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_L(T_L)} + \frac{A_L}{A_H} \left( \frac{1}{\epsilon_H(T_H)} - 1 \right)} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\epsilon_H$ 、 $\epsilon_L$  はそれぞれ高温面、低温面の全半球熱放射率であり、温度の関数である。 $A_H$  は高温面の面積である。

測定結果から熱放射率に関して以下のことが分かる。

- (1) 各材質とも冷間圧延面とバフ研磨面とで大差はない。
- (2) 単体材質面としてはアルミ面が最も小さい。
- (3) 単体材質面では純度が高いものほど小さい。
- (4) 表面状態としてはアルミ蒸着面が最も小さい。
- (5) FRP、マイラ、カプトン面は極めて大きい。
- (6) 超電導面 (Nb) は熱放射に対しては常伝導面である。
- (7) 新しい油による油膜面は熱放射に対して透明である。
- (8) 銅めっき、アルミテープてん (貼) 付は低熱放射化に有効である。

(注 1) 対象面の放射方向性として、対象面を覆うような半球面への方向すべてを考えたときの放射率。

(注 2) 対象面の放射エネルギーの波長依存性を黒体放射のそれと相似であるとした近似。灰色面の方が値は小さい。

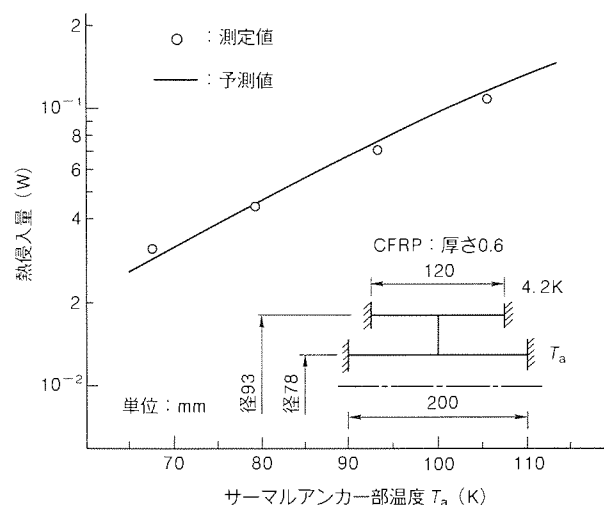
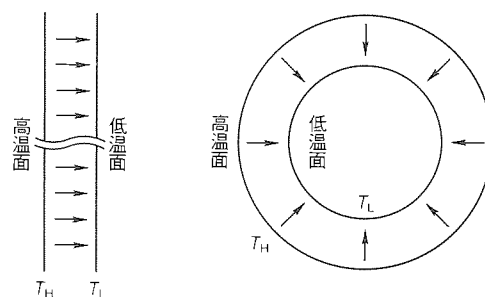


図 2. 多重円筒式断熱支持材の熱侵入特性



(a) 平行平板系 (b) 完全密閉系

図 3. 熱放射系

(9) どのような面であってもアルミ蒸着マイラを 1 枚貼付することで低熱放射面が形成できる。

さて、先に掲げた式 (2) は灰色近似を前提として成り立っている。ところが、低温になればなるほど熱放射率は灰色近似からのずれが大きくなり、式 (2) が成り立たなくなることが知られている。そこで実験結果を基に、低温環境における実効熱放射率を精度良く求める方法を見いだした (2)。その算出方法を示したものが次式である。

$$E = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_L(T_H)} - \frac{A_L}{A_H} \left( \frac{1}{\epsilon_H(T_H)} - 1 \right)} \dots\dots\dots (3)$$

式 (2) との違いは、低温面の全半球熱放射率を高温面の温度で与えたことである。つまり実効熱放射率は低温面の温度には依存しないことになる。表 1 及び図 4 の値は式 (3) をベースとして求められている。これらの値及び式を用いることで、熱放射量を極めて精度良く予測できることを確認している。

#### 3.2 多層断熱 (材) の熱侵入特性

もし高温面と低温面との間に完全に浮いた状態で熱放射面を  $n$  枚施工できれば、各放射面の面積が等しく、実効熱放射率が温度によらず等しいとすれば、施工しない場合に比べて熱侵入量は  $1/(n+1)$  になる。しかし、完全に浮いた状

態の実現は難しく、層数が増えれば放射面同士が接触することになる。そこで各放射面間の接触による熱伝導を抑えるため低熱伝導性のスペーサを挿入する。これを実現させたのが多層断熱材 (Multilayer Insulation : MLI) である。MLI には幾つか種類があるが、一般的にはポリエステル系フィルムの片面ないし両面にアルミ蒸着したものとポリエステル系ネットを交互に多層重ねたものになっている (図5)。前者が熱放射の反射面の役割をし、後者が伝導を抑えるためのスペーサとなる。これら二つの役目をアルミ蒸着フィルムのみで

満たすように、フィルムに突起 (ディンプル) やしわ (クリンクル) を付けた MLI もある<sup>(6)</sup>。

さて、MLI の熱侵入特性に影響を及ぼすパラメータは数多い。例えば、真空度、施工層数、フィルムやスペーサの厚み・材質、施工密度 (層密度)、施工方向、施工方式 (巻付方) などである。これら各パラメータの熱侵入特性に与える影響について実験を中心に研究を進めている<sup>(5)</sup>。以下にこれまでの成果について述べる。

#### (1) 真空度の影響

測定結果を図6に示す<sup>(5)</sup>。これは系内を1週間以上かけ

て真空引きし、その後少しずつガスを系内に注入し、真空度を劣化させながら熱侵入特性を測定したものである。真空度は真空容器の排気口で測っている。図6から真空度が約  $10^{-3}$  Pa { $10^{-5}$  Torr} 以下であれば、真空度の影響がなくなることが分かる。

#### (2) 施工方式

MLI は通常、数十層程度施工する (ただし、この層数にスペーサは勘定しない)。そこで施工作業性の点から、10層程度を1束として扱うことが多い。これを数十層施工する場合、図7中に示すように連続的に巻く“ロール巻き”か重ねて巻く“ラミネート巻き”かで熱侵入量が変化する。その影響を示したものが図7である<sup>(5)</sup>。ラミネート巻きの方が断熱性に優れていることが分かる。

#### (3) 施工層数

図7にも見られるように、MLI の熱侵入特性は層数によっても変わる。層数が増えるほど断熱性能が良くなる。ただし、図7の測定値は MLI を垂直円筒に施工した場合のものである。もし水平円筒に施工した場合 (例えば、水平置きクライオスタット) には、MLI 自身の重さによって MLI が圧縮されるため<sup>(6)</sup>、熱伝導による熱侵入分が増えることになり、ある層数以上になるとかえって断熱性能が劣化する現象が見られる。つまり水平施工の場合には最適層数が存在する。最適層数は MLI の種類や層密度によって異なるが、おおむね 30~60 層程度である。

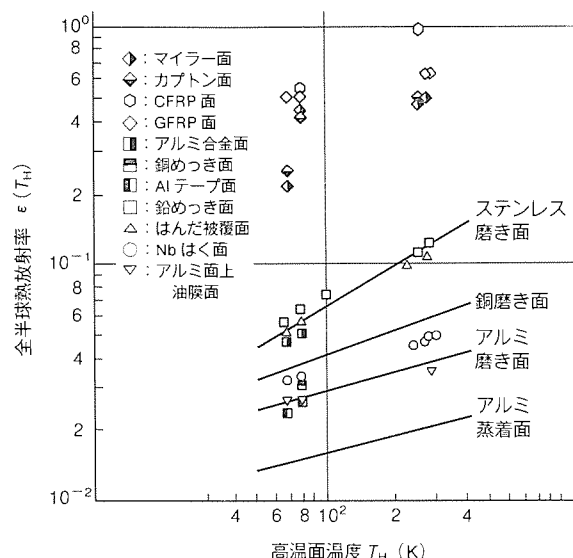


図4. 各種材料・表面状態における全半球熱放射率

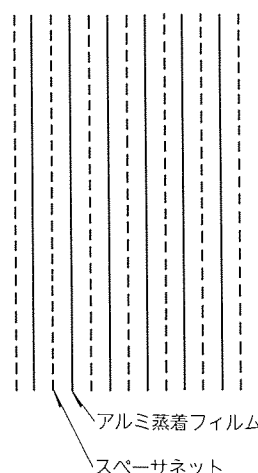


図5. 多層断熱材  
(この図は6層)

表1. 各種表面状態と全半球熱放射率一覧

放射面母材	JIS 記号	表面状態 (備考)	高温面温度	
			65~85 K レベル	270~320 K レベル
ステン	SUS304	未仕上面 (冷間圧延)	0.060~0.080	0.12~0.15
ステン	SUS304	バフ研磨	0.050~0.065	0.11~0.14
ステン	SUS304	バフ研磨+Cu めっき	0.024~0.033	—
銅	C1220	未仕上面 (冷間圧延)	—	0.060~0.066
銅	C1220	バフ研磨	0.029~0.043	0.055~0.065
銅	C1220	酸化面 (戸外に1か月放置)	0.13~0.30	0.56~0.80
銅	C1220	GFRP 未仕上面貼付 ( $t=1\text{mm}$ )	~0.5	0.6~0.7
銅	C1220	CFRP 未仕上面貼付 ( $t=1\text{mm}$ )	0.5~0.6	>0.9
銅	C1220	マイラテープ貼付	0.20~0.45	0.45~0.50
銅	C1220	カプトンテープ貼付	0.25~0.4	~0.5
銅	C1220	鉛めっき面	0.057~0.065	0.11~0.13
銅	C1220	はんだ被覆未仕上面	0.051~0.057	0.10~0.11
銅	C1220	Nb はく貼付 ( $t=10\mu\text{m}$ )	0.032~0.033	0.045~0.050
アルミ	A1050	未仕上面	0.025~0.030	—
アルミ	A1050	バフ研磨	0.024~0.029	0.032~0.038
アルミ	A5083	磨き面 (サンドペーパーによる)	0.045~0.055	—
アルミ	—	テープ面 (東洋テープ社製)	0.020~0.025	—
アルミ	—	蒸着面	0.013~0.017	0.020~0.022
アルミ	A1050	油膜面 (ロータリポンプ用)	0.025~0.026	0.035

#### (4) スペーサの影響

スペーサはMLIの熱侵入のうち熱伝導分にかかわっているために、材質、厚み、ネット目の粗さなどに影響される。ポリエステル系ネットの目の粗さを変えた場合及びネットの挿入枚数を変えた場合の熱侵入量の違いを図8に示す。ただし、これも垂直施工である。目の粗い方が断熱性能が良く、挿入枚数については1枚ないし2枚の方が3枚より断熱性能が良いことが分かる。前者の結果はフィルムとスペーサとの接触伝導面積の減少によって生じている。ただし、目をあまり粗くするとアルミ蒸着フィルム面同士が接触し、伝導分が増えるためこの方法にも限界はある。後者の結果からは以下のことがいえる。熱伝導成分に関してはフィルムとスペーサ間の接触熱抵抗が支配的であり、挿入枚数の増加による伝導距離の増大はスペーサの厚みレベルではほとんど影響しない。むしろ挿入枚数を増やし過ぎると、ネットがアルミ蒸着面を覆い隠すようになり、反射面としての機能が低下し、逆に熱侵入量が増える。このため挿入枚数は1枚が良い。ネット目は今回使用の粗目品が、スペーサの挿入枚数は1枚が適切といえる。

#### 4. む す び

超電導マグネットの高性能化にとって重要な役割を果たす断熱技術に関して、当社では実験を中心とした断熱性能の予測手法及び高断熱化について研究を進めており、この論文では最近の成果について記述した。

記述した技術の多くは当社独自のものであり、既に磁気浮上式鉄道、MRIなどを始めとする種々の超電導マグネットに生かされている。その結果、多くの機種で極めて良好な断熱性能との評価を得るに至っている。しかし、社会の超電導マグネットに対する高性能化への要求はますます強く、より一層の断熱技術の進歩が必要である。

したがって、今後も社会の要求に沿い、時宜にかなった断熱技術の研究を進めていかなければならないと考えている。

#### 参 考 文 献

- (1) Furuta, Y. : Cryostat for Magnetic Levitated Train, Proc. 2nd Int. Seminar on Superconductive Magnetic Levitated Train, 57~64 (1982)
- (2) 天野俊之, 尾原昭徳: 極低温におけるふく射に関する実験研究, 機械学会論文集, 56, No. 521, 146~154 (1990)
- (3) 天野俊之, 尾原昭徳: 極低温における熱ふく射率の測定, 第28回日本伝熱講演論文集, 565~567 (1991)
- (4) Amano, T., Ohara, A., Yamada, T. : An Experimental

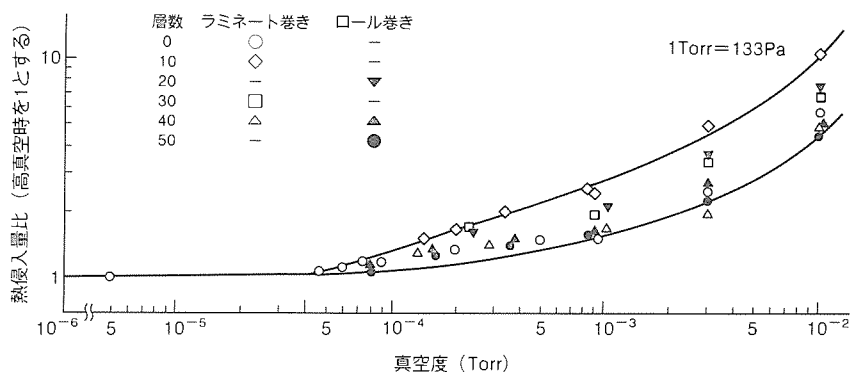


図6. 多層断熱における真空度の影響

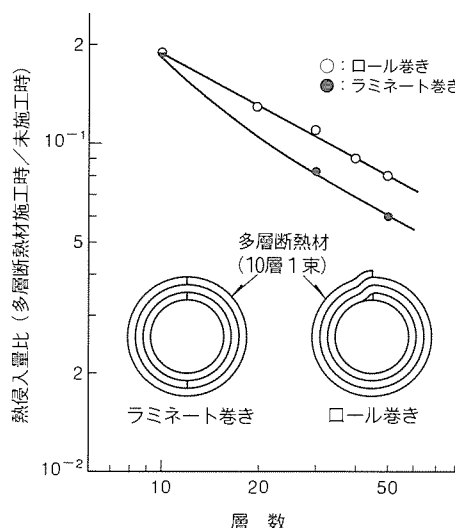


図7. 多層断熱材における巻き方の影響

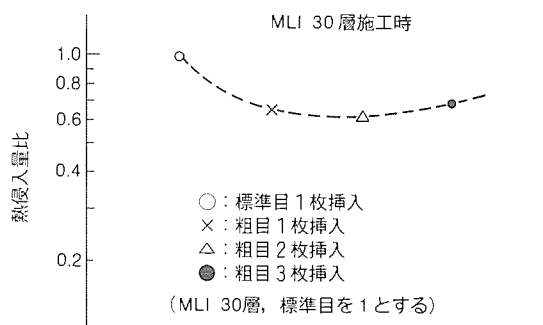


図8. スペーサネット目の粗さ及び挿入枚数の影響

- Study of Thermal Radiation in Low Temperature, Proc. 18th Int. Low Temp. Phys., 1681~1682 (1987)
- (5) Amano, T., Ohara, A., Yamada, T. : Effect of a Radiation System and a Wrapping Method of Multilayer Insulation on Heat Transfer in Cryogenic Systems, Proc. 12th Int. Cryogenic Eng. Conf., 162~166 (1988)
- (6) 大森隆夫: クライオスタットの設計, 低温工学サマーマセミナー講演集, 126~139 (1991)

# 核融合炉用超電導マグネット

齊藤龍太\* 豊田勝義+  
田戸 茂\*\* 市原 直+  
長谷川 満\*\*\* 湊 恒明\*\*

## 1. ま え が き

次世代のエネルギー源として位置付けられる核融合、とりわけ、磁気閉じ込め方式のトカマク型核融合装置を主流とした研究開発が、先進諸国を中心に進められている。核融合炉の研究開発における目標は、臨界プラズマに続き自己点火プラズマを実現し、最終的に核融合動力炉を実現することにある。

近年、常電導コイルを用いた大型トカマク装置(JT-60(日本), JET(EC), TFTR(米国))を中心に、その第一段階の科学的実証である臨界プラズマの実現が達成され、今後は炉心としての最終目標である自己点火条件(加熱入力 $\sim 0$ でも核融合反応を継続維持しうる条件)と長時間燃焼の達成を目指すことになる。こうしたプラズマの実現を目指す核融合実験炉では、大空間に高磁界を発生させるために、大型の超電導コイルの採用が必ず(須)である。その超電導コイルの規模は、コイル径が10 mを越え、最大磁界も12 T程度が必要とされ、他分野に比して最大規模の大型超電導コイルの開発が不可欠なものとなる。

また、日本独自の計画である大型ヘリカル装置は、全コイルが超電導化された装置であり、特にヘリカルコイルはその複雑なコイル形状から多くの開発課題がある。

当社は、1960年代に超電導コイルの研究開発に着手して以降、核融合炉用超電導コイルについても、その大型化と高磁界化に向けた開発を積極的に進めている。ここでは、次期核融合実験炉クラスで必要とされる超電導コイルの特徴と技術的課題について述べるとともに、核融合炉用超電導コイルにおける当社のこれまでの取組と技術開発の概要及び開発した成果の一端を紹介する。

## 2. 核融合炉用超電導コイルの特徴と技術的課題

炉心プラズマの自己点火と長時間燃焼の実現を目指す核融合実験炉として、現在、トカマク型核融合装置 ITER(国際熱核融合実験炉)の設計作業が国際協力のもとに進められており、併せて超電導コイルを含む炉心部主要機器のR&Dも開始されつつある。その炉心構造は、図1に示すように<sup>(1)</sup>環状プラズマが生成される真空容器があり、プラズマの閉じ込めに必要な磁界を発生する超電導トロイダルコイル群が真空容器と鎖交して放射状に配置されている。さらに、ポロイダルコイルと呼ばれる複数の超電導円輪コイルがプラズマと

平行に配置されている。ポロイダルコイルはパルス運転され、その機能上の特徴から、プラズマに磁束を供給するために内側に設置された中心ソレノイドコイル(CSコイル)、プラズマの形状と位置を制御するために外側に設置された外側リングコイル及び主にプラズマのダイバータ配位を形成するために用いられるダイバータコイルに大別される。これらプラズマの生成維持に必要な機器が、超電導コイル周囲の断熱真空空間を維持するためのクライオスタットに格納され、核融合実験炉の炉心部が構成されている。

ITERにおける超電導コイルの主要諸元<sup>(2)</sup>を表1に示す。次期核融合実験炉で要求される超電導コイルの特徴を、ITERを例としてまとめると次のようになる。

### (1) 大型

大容積のプラズマ(主半径6 m, 小半径2 m)を閉じ込める必要から、D形のトロイダルコイルは長径が15.6 m, 短径が7.9 mに達し、16本のコイルから構成されるトロイダルコイル群の総蓄積エネルギーは45 GJにもなる。また、ポロイダルコイルも外側リングコイルでは、その直径が23 mに達する。

### (2) 大電磁力

コイルを押し広げようとする拡張力(1,024 MN)、放射状に配置されていることにより、装置中心軸方向にコイルを押し付けようとする向心力(476 MN)及びポロイダルコイルによる転倒力(転倒モーメントで196 MN・m)として、強大な

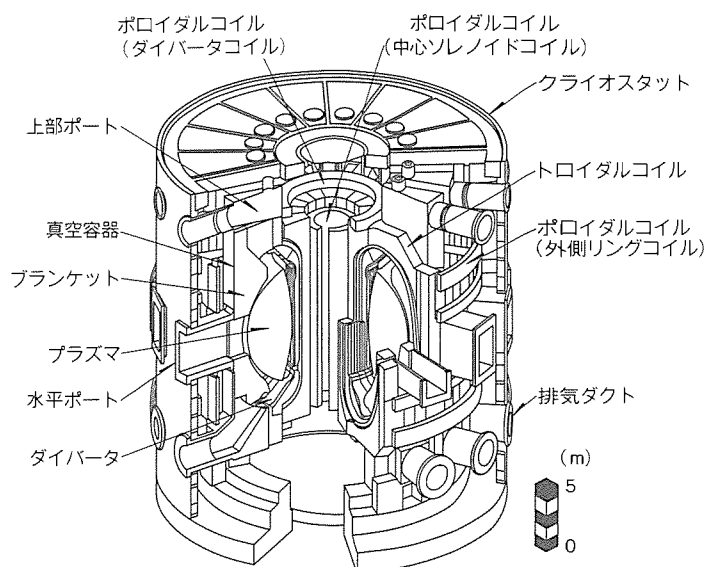


図1. ITER 炉心構造の全体概念(参考文献(1)から引用)



表1. ITER 用超電導コイルの諸元

項目	超電導コイル	トロイダルコイル	中心ソレノイドコイル	外側リングコイル
コイル個数		16	8	4
形状		D型	円形	円形
直径	(m)	7.9(短径) 15.6(長径)	3.5 —	23.0 —
最大磁界	(T)	11.2	13.5	5.5
起磁力/コイル	(MAT)	9.1	22.4	14.0
巻線部電流密度	(A/mm <sup>2</sup> )	33.9	19.0	18.7
コンジット内電流密度	(A/mm <sup>2</sup> )	66.3	48.7	46.6
導体構造		ホロー型	バンドル型	バンドル型
超電導線材		(NbTi) <sub>3</sub> Sn	(NbTi) <sub>3</sub> Sn	NbTi
導体定格電流	(kA)	30.3	37.4	43.8
導体定格温度	(K)	4.2	4.5	4.2
ディスラプション時の磁界変動(垂直)		0.5T/50ms	2T/50ms	0.5T/30ms
(平行)		2T/50ms	0	0
放射線環境:				
高速中性子フルエンス		1 × 10 <sup>19</sup> n/cm <sup>2</sup>		
絶縁材吸収線量		5 × 10 <sup>9</sup> rad		
銅のはじき出し損傷		6 × 10 <sup>-3</sup> dpa		
核発熱:				
巻線/16コイル	(kW)	23(ピーク値 5 mW/cm <sup>3</sup> )		
容器/16コイル	(kW)	42(ピーク値 5 mW/cm <sup>3</sup> )		
電磁力:				
向心力/コイル	(MN)	476		
フープカ/コイル	(MN)	1,024	1,440	223

電磁力がトロイダルコイルに作用する。また、中心ソレノイドコイルの場合には、パルス動作による繰り返し電磁力荷重としての拡張力(1,440 MN)と軸方向圧縮力(360 MN)が働く。

### (3) 高磁界

トロイダルコイルは、大容積のプラズマ領域に5 T近い磁界を発生する必要があることから、そのコイル最大経験磁界は11 Tを超える。また、プラズマに必要磁束を供給する中心ソレノイドコイルでは、その最大磁界が13 Tを超える。

### (4) 高電流密度

炉心構造設計の合理化を考えた場合、炉心構造寸法を決定する主要因となるコイル(特に、トロイダルコイルと中心ソレノイドコイル)のコンパクト化が求められ、それに伴って、コイルの高電流密度化が必要となる。ITERでは、超電導導体を構成する電磁力支持構造材を除いた部分の電流密度が、トロイダルコイルで60 A/mm<sup>2</sup>を超え、パルス運転されるポロイダルコイルで50 A/mm<sup>2</sup>近くになる。

### (5) 大電流

コイルの起磁力は、トロイダルコイルで9 MA、中心ソレノイドコイルで22 MA程度となり、駆動電源、コイルクエンチ保護の観点から、超電導導体の大電流化が必要とされ、

トロイダルコイルで30 kA、外側リングコイルでは40 kAを超える大型導体となる。

### (6) パルス運転

プラズマへの磁束供給のために、中心ソレノイドコイルでは、磁界変化率が数 T/s のパルス動作を要求される。これに加えて、核融合実験炉では、プラズマの突然の消滅(ディスラプション)により、2 T/50 ms 程度の磁界変動を受ける。このことから、核融合炉用超電導コイルでは、交流損失のより少ない超電導導体が必要とされる。

### (7) 耐放射線性

プラズマに近接するトロイダルコイルは、プラズマからの高速中性子にさら(曝)され、その全放電期間中のフルエンスは1 × 10<sup>19</sup> n/cm<sup>2</sup>に達する。これは絶縁材吸収線量で5 × 10<sup>9</sup> rad になり、放射線環境として厳しく、絶縁材には高い耐放射線性能が要

求される。

### (8) 安定性

強大な電磁力による機械的じょう(擾)乱、磁界変動(パルス動作及びディスラプション)に伴う交流損失や中性子核発熱(ピーク値で5 mW/cm<sup>3</sup>)などの熱負荷を受けるなかで、コイルとして安定に機能し得るに十分な超電導安定性をもつ必要がある。

### (9) 高信頼性

炉心部主要機器として、稼働開始後の修理交換が容易ではないため、超電導コイルとして非常に高い信頼性が要求される。

したがって、上記のような特徴をもつ核融合炉用超電導コイルの開発を今後進めるに当たっては、次のような技術課題を解決することが必要である。

- (1) 非円形を含む巨大コイルの製作技術の確立
- (2) 高磁界、高電流密度及び低交流損失の大電流超電導導体の開発
- (3) 大電磁力に耐える機械的強度と磁界変動などによる熱負荷に対する安定性を兼ね備えた大電流超電導導体の開発
- (4) 誘起される渦電流が小さく、巨大な電磁力を支持できるコイル構造の開発

- (5) 高い電気絶縁耐力に加え、機械的な剛性、強度及び耐放射線性でも優れた絶縁材料と絶縁構造の開発

### 3. 当社のこれまでの取組と技術開発

当社の核融合プラズマ実験装置の超電導マグネットの応用は、1968年に東京大学に納入したプラズマ用カスプマグネットの先駆的な取組に始まる。このマグネットは、超電導コイルをクライオスタットに封入した核融合実験装置用超電導マグネットとしては、我が国で最初のものである。それ以降今日まで、核融合炉用超電導コイルの実用化に向けて、数多くの超電導コイル及び超電導導体の開発・製作に取り組み、コイルの大型化、高磁界化及び高電流密度化を目指した技術開発を進めている。当社がこれまでに製作した主な核融合炉用超電導コイルを年表として整理したものを表2に示す。核融合研究開発の進展を示す指標として、我が国の主な核融合装置と開発計画についても表中に併せて示す。

核融合炉用超電導コイル開発における当社の技術的特長としては、以下に示すような特長を挙げることができる。

#### (1) パルス超電導コイル及びパルス超電導コイル用超電導導体技術

当社のパルス超電導コイルの開発は、日本初のパルス超電導コイルとして、1979年に電子技術総合研究所に納入した78kJパルス超電導マグネットに始まる。その後、同研究所に納入した3MJパルス超電導マグネット、名古屋大学プラズマ研究所に納入した高速パルス超電導マグネット(RPC-I, RPC-II)、日本原子力研究所に納入した浸せき(漬)冷

却型大型パルス超電導コイル(PUP)など、浸漬冷却方式のパルス超電導コイルでは多くの製作実績をもっている。これにより、大電磁力に対する十分な機械強度、高い電気絶縁耐力(5~10kV)、数万回以上の通電にも耐える疲労強度を備えた超電導コイルを製作可能な技術を保有するとともに、NbTi 極細多心線による低交流損失大型導体(20~50kA)及びその冷却構造等についての技術蓄積を図ってきた。

#### (2) 強制冷却大型超電導コイル技術

当社における強制冷却型超電導コイルの開発は、1983年に日本原子力研究所に納入したNb<sub>3</sub>Sn 二重より(撚)線を用いたTMC-II R & Dコイルに始まる。その後、強制冷却型大型超電導コイルである実証ボロイダルコイル計画で、NbTi バンドル線を用いたDPC-U1, U2及びTa バリヤ付きNb<sub>3</sub>Sn 平角撚線を用いたDPC-EXを日本原子力研究所の指導のもとに開発・製作した。これにより、コンジット導体設計・製作技術、強制冷却大型導体を使用したパルス超電導コイルの設計・製造技術の開発蓄積を図るとともに、強制冷却型超電導導体の安定性に関しても、実験データの蓄積に加えて、数値シミュレーションによる安定性解析手法<sup>(3)</sup>の開発を進めている。超電導導体の安定性に関する数値シミュレーションの一例を図2に示す。図に示されるように、新しい数値計算手法を取り入れることにより、通電電流と安定性マージンの関係における多重安定性をシミュレーションすることも可能とした。

#### (3) 内部拡散法Nb<sub>3</sub>Sn 超電導導体技術

当社では、高磁界で高い電流密度が得られるNb<sub>3</sub>Sn 線材

表2. 当社の核融合炉用超電導コイル開発における製作実績

項目		年																																												
		*2 S 50 1975	S 51 1976	S 52 1977	S 53 1978	S 54 1979	S 55 1980	S 56 1981	S 57 1982	S 58 1983	S 59 1984	S 60 1985	S 61 1986	S 62 1987	S 63 1988	*3 H 1 1989	H 2 1990	H 3 1991	H 4 1992	H 5 1993	H 6 1994	H 7 1995	H 8 1996	H 9 1997	H 10 1998	H 11 1999	H 12 2000																			
核融合の推移と方向	トカマク型													JT-60	▽完成	臨界条件達成		▽													JT-60U															
		設計						JFT-2					▽完成					JFT-2M	改造						JFT-2MU																					
	ヘリカル型	ヘリオトロン												FER設計																ITER						△建設										
														SCフルトラス/モジュール装置												工学設計																LHD				
														CHS																																
主な核融合炉用超電導コイルの開発	原 研	CTC*1																																				原型 トロイダル コイル R&D				原型トロイダルコイル				
														TCM-II用 R&D コイル*1								PulserE*1				PUP*1								DPC-U*1 DPC-EX*1				CS モデル コイル 導体				CSモデルコイル				
	電総研 & 核融合研 (名大プラ研)	78kJ*1				400kJ*1				RPC-I、II*1				3MJ*1								SCフルトラス*1				モジュール装置*1								LHD大型ヘリカルコイル												

注 \*1 当社が製作し納入したコイル \*2 昭和 \*3 平成

の製造で独自に開発した内部拡散法技術を保有している。この方法では、十分な Sn 濃度を確保できることから優れた超電導特性が得られ、さらにフィラメント径も小さくできるためパルス用の低損失導体に適した線材の製造も可能である。

また、これら以外に、核融合炉用超電導コイルの要素技術についても、耐放射線性の絶縁材料に関する日本原子力研究所との共同研究<sup>(4)</sup>などを積極的に進め、その技術蓄積を図っている。

超電導コイルでは、超電導導体の電気・機械・冷却特性がコイルの特性を支配するので、コイル設計と導体設計が不可分である。特に、 $\text{Nb}_3\text{Sn}$  超電導導体を用いる場合には、製造・製作工程で密接な関連をもつ。当社は超電導導体を内製できる国内唯一の超電導コイルメーカーであり、核融合炉用超電導コイルのように、これまでにない高い性能が要求されるコイルの製作では、超電導線材からコイル製作まで一貫した製造・品質管理が可能なのが、当社の大きな特長の一つにもなっている。

#### 4. パルス超電導コイルの開発

中規模超電導トカマク装置で必要となる高速パルス超電導コイルの技術的実証を目的に、名古屋大学プラズマ研究所、日本大学及び電子技術総合研究所との共同研究で開発、製作した高速パルス超電導コイルに RPC-II パルスマグネットがある(1982年に名古屋大学プラズマ研究所に納入)。RPC-II の全体構造を図3に示す。このコイルは磁界変化率  $200\text{T/s}$  という高速パルス運転の実現を目指したものである。このために、浸漬冷却にもかかわらず、運転時に発生する高電圧(最大約  $10\text{kV}$ )に耐える絶縁構造やパルス運転中の交流損失が非常に小さい超電導導体の開発を行い、さらに巻線部構造についても、効果的に導体が冷却される構造を採用することにより、安定性の確保を図っている。パルス運転実験では、コイル印加電圧  $7.62\text{kV}$ 、パルス電流  $4.26\text{kA}$ (ピーク値)、コイル最大磁界  $3.74\text{T}$  のパルス励磁に成功し、磁界変化率として平均で  $200\text{T/s}$ 、最大では  $314\text{T/s}$  を達成した。こうした急しゅん(峻)励磁の可能性が確認されたことは、

超電導コイルの交流応用の道を開いた点でも画期的なものであった。

核融合実験炉用パルスコイルの基盤技術確立のための大型パルス超電導コイルとして、1984年に電子技術総合研究所に納入した  $3\text{MJ}$  パルスマグネットを図4に示す。導体は高純度アルミニウムを安定化材に使用した三重燃線構造となっている。また、独立の張力制御によって導体と SUS 補強テープを共巻きしたダブルパンケーキ巻きを採用し、さらに軸方向に電磁力相当の圧縮力を加えて巻線の固定をすることにより、安定性を確保している。励磁試験では、トレーニングな

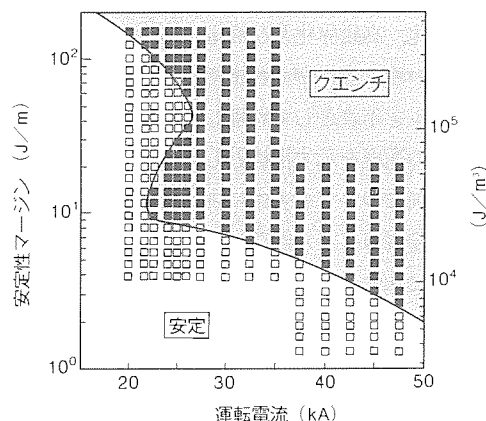
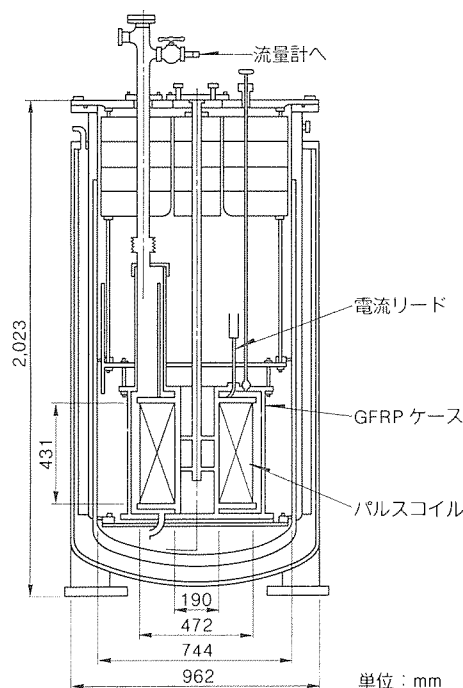
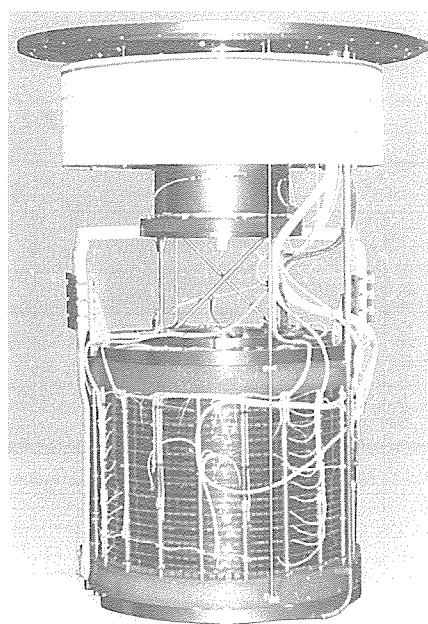


図2. 強制冷却型超電導導体の安定性解析例  
(安定性マージンと通電電流の関係で示される多重安定性)



巻線寸法：内径190mm、外形472mm、高さ370mm  
巻線：370ターン(22層ソレノイド巻き)  
導体： $\text{NbTi}/\text{Cu}/\text{CuNi}$  成形平角燃線  
(4.1mm×23.3mm)  
冷却方式：液体 He 浸漬冷却  
定格電流：4.46kA  
定格磁界：4T  
蓄積エネルギー：170kJ

図3. RPC-II パルスマグネット



巻線寸法：内径500mm、外形860mm、高さ625mm  
巻線：792ターン(12層ダブルパンケーキ)  
導体： $\text{NbTi}/\text{Cu}/\text{CuNi}/\text{Al}$  成形平角3層燃線  
(5.5mm×20mm)  
冷却方式：液体 He 浸漬冷却  
定格電流：5.5kA  
定格磁界：6T  
蓄積エネルギー：3.0MJ

図4. 3MJ パルスマグネット

して定格を超える5.54 kAの通電に成功し、また超電導コイル間のエネルギー移送実験でのパルス運転でも安定した励磁特性が確認された。

超電導ポロイダルコイルの開発の一環として、浸漬冷却型大電流パルス導体の大型コイルへの適用性を実証することを目的に製作し、1986年に日本原子力研究所に納入したポロイダルユニットパンケーキ (PUP) コイルを図5に示す。コイルは、内径700 mm、外径1,723 mmのダブルパンケーキになっている。また、導体は交流損失の低減を図る目的で、NbTi フィラメントの周りにCuNiを配置した素線からなる二重燃線構造で、その定格電流は30 kAである。励磁試験では、クエンチすることなく、定格の30 kA (最大磁界5.8 T) まで通電できるとともに、30 kAからの遮断 (最大磁界変化率9 T/s) でも常電導部が発生しない、安定した励磁特性を得ることができた。

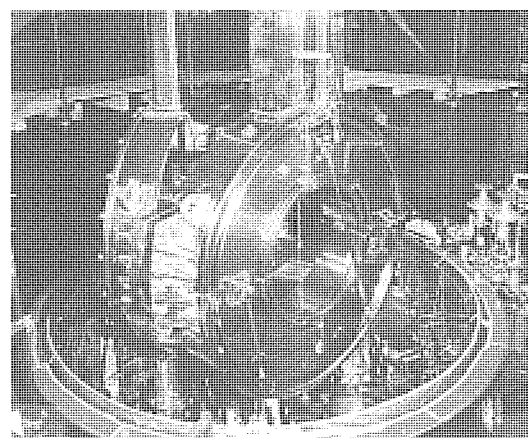
## 5. 直流超電導コイルの開発

日本原子力研究所で、大型超電導トロイダルコイル開発の第一段階として、クラスタテスト計画が実施された。そのテスト装置を構成する超電導コイルの一つとして製作されたものにクラスタテストコイル (CTC) があり、1980年に日本原子力研究所に納入された。試験用クライオスタット内に設置されたCTCを図6に示す。内径1 m、外径2 mのコイルには、NbTi モノリス導体を用いられ、冷却には浸漬冷却方式が採用された。2個のCTCを励磁したときの蓄積エネルギーは20 MJ、このときの平均電流密度は30 A/mm<sup>2</sup>となり、これは、それまでの大型超電導コイルの実績を大きく書き替えるものであった。励磁試験では、コイル電流2,145 A、最大磁界7 Tの定格運転に成功し、安定なコイル動作が実証された。こうしたCTCの製作技術は、その後のLCTコイルやTMCの開発に大いに役立つものであった。

核融合で用いられる直流超電導コイルとしては、トカマク型核融合装置のトロイダルコイルのほか、ヘリカル型核融合装置のヘリカルコイルがあり、そのコイル形状はトーラスにらせん状に巻かれ、超電導コイルとしては他に類のない複雑なものとなっている。当社は、こうしたヘリカルコイルの超電導化に世界で最初に着手し、以下に述べる成果をあげている。

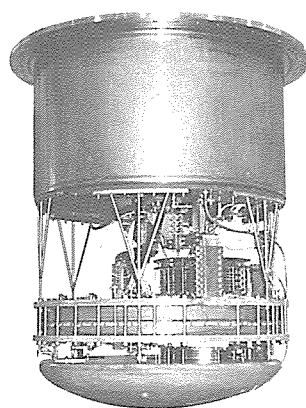
図7に示す小型超電導フルトラスは、当社で開発された世界初の超電導ヘリカルコイルであり、1989年に京都大学ヘリオトロロン核

融合研究センターに納入されたものである。このコイルは、ドーナツ状の巻心に巻かれた2本のヘリカルコイルをもち、コンピュータ制御による自動巻線機によって連続巻線で製作された。超電導線はNbTi フィラメント/銅基材平角超電導線にPVF絶縁を施したものをを用いている。巻線に当たっては、張力巻きが可能な測地線巻きを採用するとともに、冷却チャンネルを構成するチャンネル用スペーサと超電導線を接着固定することにより、機械的安定性を向上させた。これにより、コイル寸法としては、主半径300 mm、小半径63 mmと小型ではあるものの、励磁試験では初回に定格電流での励磁に成功し、その後、数回のトレーニングを経て、超電導線材の臨界電流である1,530 Aまでの励磁に成功した。この小型超電導フルトラスの製作により、ヘリカルコイルの自動連続巻



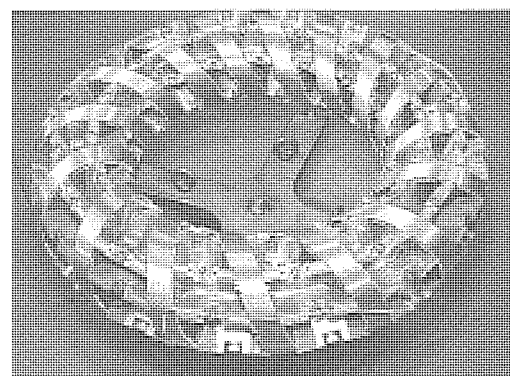
巻線寸法：内径1,048mm、外形1,948mm、高さ250mm  
巻線：1,560ターン(26シングルパンケーキ)  
導体：NbTi/Cuモノリス(7mm×7mm)  
冷却方式：液体He浸漬冷却  
定格電流：2,145A  
定格磁界：7T  
蓄積エネルギー：8.9MJ

図6. クラスタテストコイル(CTC)  
(写真左側コイル：三菱電機製)



巻線寸法：内径700mm、外形1,723mm、高さ190mm  
巻線：54ターン(1ダブルパンケーキ)  
導体：NbTi/Cu/CuNi成形平角二重燃線(17.5mm×88.6mm)  
冷却方式：液体He浸漬冷却  
定格電流：30kA  
最大到達磁界：5.8T  
蓄積エネルギー：1.5MJ

図5. ポロイダルユニットパンケーキ(PUP)



全体寸法：主半径300mm、小半径63mm、巻線：242ターン/コイル(ソレノイド巻き)  
導体：NbTi/Cuモノリス(1.6mm×3.2mm)  
冷却方式：液体He浸漬冷却  
到達電流：1.53kA  
到達中心磁界：4.1T  
蓄積エネルギー：298kJ

図7. 小型超電導フルトラス

線の可能性が実証された。

大型ヘリカル装置のための R & D コイルとして製作され、1991 年に核融合科学研究所に納入されたモジュール装置 (T OKI-MC) を図 8 に示す。円形コイルを S 字状にねじ (捻) ったコイル形状とすることにより、実機ヘリカルコイル形状の特徴である捻れを模擬し、さらに実機ヘリカルコイルの 1,000 t/m 級の複合電磁力 (拡張力 + 転倒力) も模擬したものととなっている。超電導導体には、高純度アルミニウムを安定化材、銅を強度部材とした NbTi はんだ複合超電導導体 (図 9 に示す。) が用いられており、その設計定格電流は、実機相当の 20 kA である。短尺導体による臨界電流特性及び安定性試験では、臨界電流値の測定値は設計値に一致することが確認されたものの、安定性については、回復電流の低下が見られた。これは、大電流のアルミニウム安定化複合導体で生じた新たな技術課題であり、今後、実機大の導体を使用した超電導コイルでの実験も含め、その解明が必要である。なお、モジュール装置の励磁試験では、17.5 kA まで安定に通電できた。

## 6. 強制冷却超電導コイルの開発

日本原子力研究所で、大型超電導ポロイダルコイルの開発計画として、1985 年から実証ポロイダルコイル (DPC) の研究開発が実施された。この計画の中で、当社は日本原子力研究所の指導のもと、二つの試験コイル (DPC-U1, U2) と拡張試験用コイル (DPC-EX) の開発・製作を行った。これらは、すべて強制冷却型コイルであり、その特徴としては、浸漬冷却型に比較して巻線部の機械的強度や電気絶縁特性が優れていることが挙げられる。真空容器内に据え付けられた実証ポロイダルコイルを図 10 に示す。

DPC-U1, U2 では超電導材料として NbTi が使用され、素線の中に CuNi を配置することにより、パルス磁場に対する損失の低減を図っている。導体としては、486 本の素線をよ (撚) り合わせたものが、高強度高靱性ステンレス鋼製のく (矩) 形管 (コンジット) の中に格納されており、このコンジットは、冷媒である超臨界圧ヘリウムの内圧と電磁力に耐えるように設計されている。また、定格電流 30 kA での巻線部平均電流密度は 26 A/mm<sup>2</sup> となる。励磁試

験では、二つの試験コイルを直列接続した同時直流通電で、定格の 30 kA, 7 T が達成された。また、パルス運転時の交流損失についても、パルス運転中に発生する交流損失量が蓄積エネルギーの 0.1 % 以下で、非常に少ないことが確認された。しかしながら、同時に、電流掃引時の超電導不安定性による常電導転移が観測されるなど、こうした大型強制冷却導体の開発を進めるに当たって、新たに解決すべき技術的課題が存在することも明かにされた。

一方、DPC-EX では超電導材料に Nb<sub>3</sub>Sn が採用され、素線では In 添加による低磁界側の電流密度の向上に加え、Sn 拡散バリアに Ta を用いることによる交流損失の低減が図られている。導体としては、素線を平角に撚線したものがコンジットに格納された構造になっており、冷媒の圧力損失低減のためのサブチャネルが設けられている点が特徴として挙げ

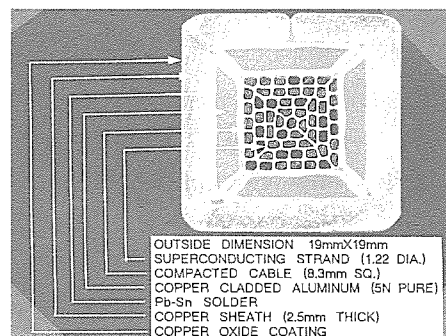
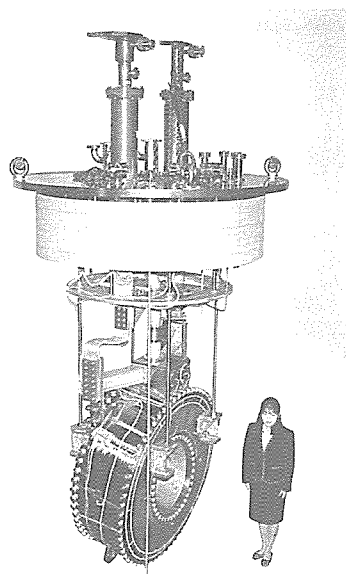
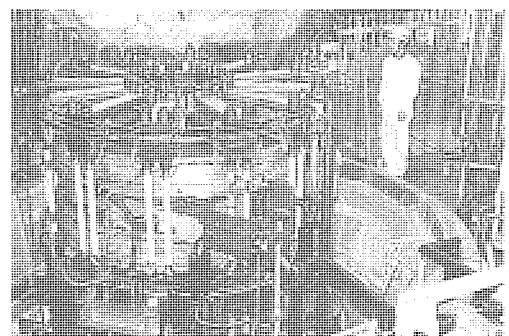


図 9. モジュール装置用超電導導体



巻線寸法：内径 800mm, 外 1,410mm, 高さ 393mm  
巻線：238 ターン (ソレノイド巻き)  
導体：NbTi/Cu/Al はんだ複合導体 (19mm×19mm)  
冷却方式：液体 He 浸漬冷却  
設計定格電流：20kA  
設計定格磁界：7.7T  
蓄積エネルギー：11MJ

図 8. モジュール装置



(DPC-U1, U2)

巻線寸法：内径 1,000mm, 外形 2,000mm, 高さ 320mm  
巻線：127 ターン (4 ダブルパンケーキ)  
導体：NbTi/Cu/CuNi コンジット付きバンドル撚線 (29mm×35.5mm)  
冷却方式：超臨界 He 強制冷却  
設計定格電流：30kA  
設計定格磁界：7T  
蓄積エネルギー：30MJ

(DPC-EX)

巻線寸法：内径 1,000mm, 外形 1,660mm, 高さ 169mm  
巻線：120 ターン (2 ダブルパンケーキ)  
導体：Nb<sub>3</sub>Sn/Ta/Cu コンジット付き平角撚線 (9.4mm×40mm)  
冷却方式：超臨界 He 強制冷却  
設計定格電流：10kA  
設計定格磁界：10T  
蓄積エネルギー (DPC-U1, U2, EX 組合せ時)：40MJ

図 10. 実証ポロイダルコイル (DPC)



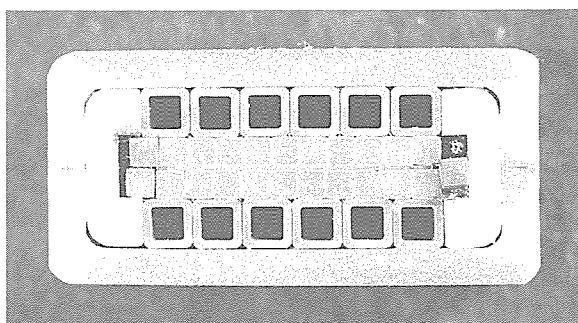


図11. 原型トロイダルコイル用 R &amp; D 導体

られる。なお、試験コイル導体に比べ、定格電流値は10 kAと小さいが、このときの巻線部平均電流密度は $35 \text{ A/mm}^2$ となる。励磁試験では、試験コイル (U1, U2) による補助磁界のもとで、1秒で定格電流を超える17 kAまで立ち上げる運転を行い、7 Tまでの急峻な立ち上げを安定に行えることが確認され、 $7 \text{ T/s}$ のパルス磁界の発生に成功した。また、パルス磁界による交流損失についても、その損失量がコイルの蓄積エネルギーの0.2%以内であり、当初の目標を十分達成するものであった。こうした成果は、今後の $\text{Nb}_3\text{Sn}$ を用いた高磁界パルスコイルの開発に向けて明るい展望を開いたものといえる。

現在、日本原子力研究所の指導を受けながら、強制冷却超電導コイル開発の一環として、次期核融合実験炉クラスを対象に、大電流、高磁界、高電流密度の強制冷却型超電導導体の開発を進めている。開発は $\text{Nb}_3\text{Sn}$ を超電導材料として、高電流密度及び低交流損失を目指した素線の開発に始まり(詳しくは、本特集論文参照)、候補に挙げられている導体構造について、その導体複合化技術の開発にも積極的に取り組んでいる。原型トロイダルコイル用として開発が進められている R & D 導体 (12 T-30 kA) を図11に示す。この導体は、角形断面の素線をレーベル転移熱し、その周囲に安定化材を兼ねる冷媒流路として銅の角管を配置、はんだ複合した後、ステンレスのコンジットをかぶせたホロー型の構造となっている。隣り合う銅角管の間には、交流損失低減のため、電気的絶縁が施してある。このタイプの導体は、DPC-U1, U2, に使用されたバンドル型に比べて、素線に生じる応力集中の軽減、超電導素線のワイヤムーブメントの抑制及び冷媒流路の確保という点で優れた構造である。また、ITERの中心ソレノイドコイルの開発としては、高電流密度で低交流損失の $\text{Nb}_3\text{Sn}$ 素線の開発と併せ、熱処理時のひずみ(歪)による超電導線の劣化軽減などを目的とした。チタン製コンジットによるバンドル型強制冷却導体について、加工法(スウェーピングやフォーミング)や導体長尺化などの導体複合化技術の

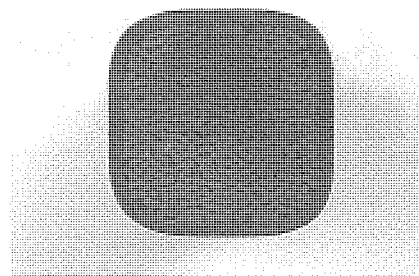


図12. CSモデルコイル用 R &amp; D 導体

開発、実証にも取り組んでいる(図12)。

## 7. む す び

磁気閉じ込めによる核融合炉で不可欠な大型高磁界超電導コイルについて、その特徴と技術課題について述べるとともに、こうした核融合炉用超電導コイル開発における当社のこれまでの取組と開発された超電導コイルについて紹介した。当社は今後とも、各研究機関の御指導のもとに技術蓄積を図り、核融合炉の実現にむけて、その主要構成機器である超電導コイルの開発に積極的に取り組んでいく所存である。

超電導コイルの開発・製作に当たり、御指導、御協力をいただいた日本原子力研究所、電子技術総合研究所、核融合科学研究所、京都大学ヘリオトロン核融合研究センター及び旧名古屋大学プラズマ研究所の関係各位に対し、心から謝意を表する次第である。また、各種導体開発に協力いただいた三菱電線工業(株)の関係各位に感謝するものである。

## 参 考 文 献

- (1) 高津英幸, 多田栄介, 柴沼 清, 黒田敏公, 秋場真人, 吉田 浩: 国際熱核融合炉 (ITER) の概念設計活動と工学 R & D, 原子力学会誌, 33, No. 8, 737~746 (1991)
- (2) Yoshida, K., Hasegawa, M., Okuno, K., Nishi, M., Takahashi, Y., Nakajima, H., Tsuji, H.: Conceptual Design of SC Magnet System for ITER (I), JAERI-M, 91-120 (1991)
- (3) 神谷 淳, 天野俊之, 関谷 慎, 尾原昭徳: 強制冷却型超電導コイルの安定性解析—多重安定性のシミュレーション—, 低温工学, 25, No. 3, 156~164 (1990)
- (4) 宇田川 昂, 萩原 幸, 河西俊一, 貴家恒男, 江草茂則, 橋本 修, 山本 泰, 園田克己, 小野利夫, 長田大三郎, 富田晴彦, 武久正昭: 易加工性・耐放射線性繊維強化プラスチックの研究—I, JAERI-M, 85-220 (1986)

# 高エネルギー物理研究用 超電導機器

川口武男\* 井上功一\* 霧生明弘\*\*  
村井 隆\* 久野和雄\*  
津田芳幸\* 神代哲哉\*

## 1. ま え が き

原子核から素粒子までの幅広いエネルギー領域の物理を、ここでは高エネルギー物理と総称することとする。超電導機器は、高エネルギー物理実験のための加速器及び検出器を、高性能化・小型化・省エネルギー化（電力、冷却水）するために不可欠なものとなっている<sup>(1)(2)</sup>。

高エネルギー物理用超電導機器の大きな特徴は、それらが研究の対象でなく物理実験の道具として実用されることであり、基本性能を満足するばかりでなく良好な運転操作性と長時間運転に対する高い信頼性が必要とされる。

三菱電機(株)が製作した超電導マグネットと超電導加速空洞について、その概要と特徴を述べる。

## 2. 検出器用超電導マグネット

### 2.1 ビーナス用大型薄肉超電導ソレノイド<sup>(3)</sup>

#### 2.1.1 概 要

高エネルギー物理学研究所(KEK)の衝突型加速器トリスタンの検出器“ビーナス(VENUS)”に組み込まれた超電導マグネットで、ビーム衝突によって発生する二次荷電粒子の運動量測定のため、ソレノイド磁場によって粒子軌道を曲げるものである。工場試験、現地試験を経て、1986年11月トリスタン最初の50 GeV 電子・陽電子ビーム衝突の観測<sup>(4)</sup>に使用された。以来、今日まで順調に運転されている。クライオスタット内径3.4 m、外径3.8 m、長さ5.6 mの我が国最大の超電導マグネットで、0.75 Tの磁界を発生する。完成写真を図1に、主要諸元を表1に示す。なお、表1には、ここで述べる他のマグネットの諸元も記載した。

#### 2.1.2 特 徴

ビーナス検出器では超電導ソレノイドの外周にも電磁カロリメータを置き、ソレノイドを通過した粒子のエネルギーを測定するため、ソレノイドの薄肉化が強く求められた。これにこたえるため以下に示す材料・構造を採用し、図2に示すように直径比で世界最小の放射長(Radiation Length)(物質の粒子透過度を表す数字で短いほど透過性が良い。)を実現した。これらの材料・構造は1/4サイズ及び実物大モデルの試作・検証を経て実機に適用したものである。

(a) 真空容器外筒(直径3.8 m、長さ5 m)を厚さ30 mmのカーボン繊維強化プラスチック(CFRP)で製作した。

(b) コイルはボビンレス構造(内径に巻枠をもたない。)で、

外周に電磁力支持と液体ヘリウムの通路を兼用したコイルケースをもつ。

(c) コイルケース部材は薄肉と高剛性を得るために、アルミニウム合金の引抜きで製作し、内部にヘリウム通路をもつ形状とした。

(d) 超電導線はNbTi/Cu モノリス線を高純度アルミニウムで包合したいわゆるアルミ安定化超電導線を使用した。

### 2.2 超電導トロイダルマグネット<sup>(5)</sup>

#### 2.2.1 概 要

K中間子ビームを静止標的に衝突させ発生した二次粒子を大立体角で取り込むため、12か所の磁界空けき(隙)をトロイダル状に配置した検出器用超電導マグネットである。1989年に東京大学に納入し、KEKの12 GeV 陽子シンクロトロンに新設の北カウンターホールに設置された。磁極をもつ立形のトロイダル構成は世界で初めてのものである。コイルクライオスタットと磁極(Warm Iron)を組み合わせたユニットを12台トロイダル状に配置している。最大外径3.9 m、総質量38 t、200 mmの磁極間空隙に1.8 Tの磁界を発生させることができる。図3に完成写真を示す。

#### 2.2.2 特 徴

粒子取り込みの立体角を可能な限り大きくするため、コイル及びクライオスタットをコンパクトにすることが重要な課題であり、次の基本仕様を設定した。

(a) コイル構造を簡単かつコンパクトにするため、エポキシ含浸コイルの間接強制冷却方式とする。

(b) 冷媒として超臨界ヘリウム(SHE)と2相流ヘリウムのいずれを使うかについては、一重熱シールドとしてクラ

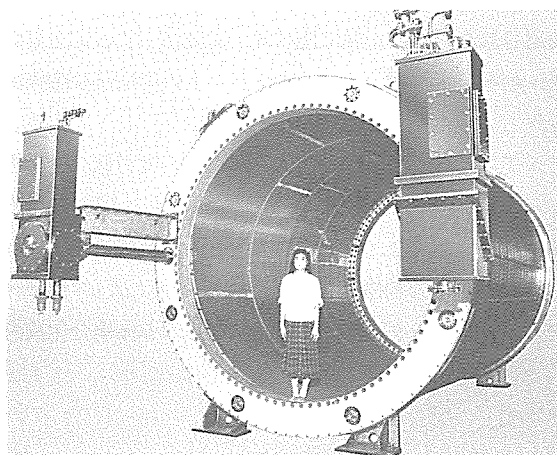


図1. ビーナス超電導ソレノイド

表1. 各種超電導マグネットの主要諸元

マグネット名		ビーナス	トロイダル	スーパー弁慶	2極試作品	ミュオンチャンネル	ラジオメガ
コイル形状		円形（単層）	角形	鞍形	鞍形	円形	円形
コイル代表寸法 （m）		内径 3.54 全長 5.27	周長 3.2 12コイル	周長 8.3 2コイル	内径 0.04 直線長 1.1	内径 0.13 全長 6.0	内径 0.74, 3コイル 単長 0.05/0.07/0.05
コイル冷却方式		2相流間接	2相流間接	浸漬	浸漬	SHE間接	浸漬
中心磁界（T）		0.75	1.83	1.5	6.6	5.0	0.8
最大経験磁界（T）		1.1	2.5	3.5	7.0	5.1	2.7
蓄積エネルギー(MJ)		12	2.9	3.1	0.075	1.2	0.3
運転電流（A）		3,980	1,550	610	6,550	730	152
巻線部平均電流密度 （A/mm <sup>2</sup> ）		60	133	58	340（内）, 460（外）	126	105
超電導線	断面寸法（mm）	6.6×10	1.75×6	2.3×2.3	23×径0.81（内） 30×径0.65（外）	1.6×3.2	0.8×1.5
	材 質	NbTi／Cu／Al	NbTi／Cu	NbTi／Cu	NbTi／Cu	NbTi／Cu	NbTi／Cu
	断面積比	1／1.27／20.9	1／3.5	1／8	1／1.2, 1／1.8	1／3.8	1／3.5
	メーカー名	三菱	古河	MCA, 古河	住友	MCA, 三菱, 古河, 住友	三菱

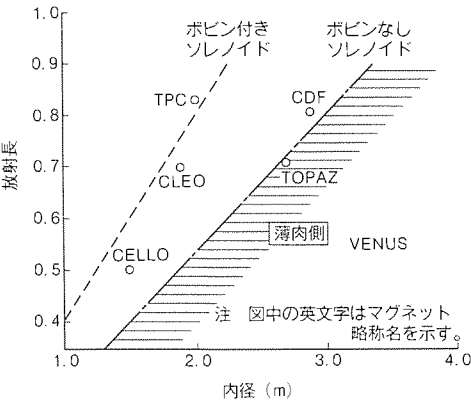


図2. 薄肉超電導ソレノイドの放射長の比較

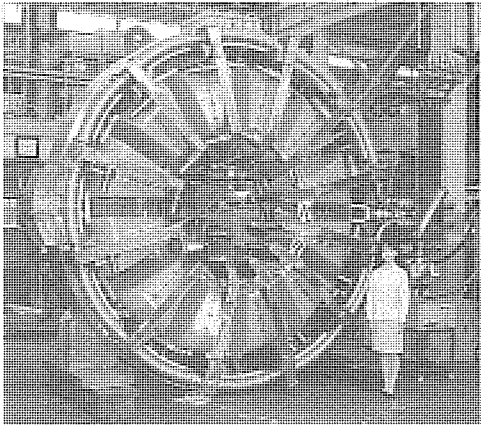


図3. 超電導トロイダルマグネット

イオスタットをコンパクトにしたい (SHE の場合は二重シールドが必要), 2相流の流れ不安定性についてはビーナス等の経験から発生しないと予想される, ことから2相流冷却を選定した。

(c) 真空容器は溶接封じ込めとする。

トロイダル構成に発生する電磁向心力の支持は次のように行った。

(d) 磁極に働く計460tの向心力については, 外周に配置した厚さ150mm, 幅460mmのステンレス製リングと, 磁極相互の一円結合, の両者で支持する。

(e) コイルに働く計96tの向心力については, チタン合金製の断熱支持棒を介し, 真空容器で支持する。

冷却系の設備及び運転保守を簡素化するため, 次のようなシステムとした。

(f) 系内の液体ヘリウム量をできるだけ少なくした。コイル冷却管の総長は53mと短く, サービスポート内に設けたヘリウム容器分も含めマグネット全体の液量はわずか25Lである。マグネットの冷却系統を図4に示す。

(g) 80K熱シールドは冷凍機から供給されるヘリウムガスによって冷却する。

(h) コイル冷却系の耐圧力を高くすることにより, クエンチ時やヘリウム圧縮機停止時でも, コイル内のヘリウムガスを高圧バッファタンクに自然回収できるようにした。

### 2.3 大口径超電導分析マグネット (スーパー弁慶)<sup>(6)</sup>

#### 2.3.1 概要

“スーパー弁慶”は, 銅コイル分析マグネット“弁慶”の有効磁界空隙を0.5mから1mに倍増するとともに, 2MWの電力節減を図るため銅コイル部分を超電導化したものである。国内の大型超電導マグネットの創世期であった1981年に高エネルギー物理学研究所に納入した。有効口径1m (高)×1.5m (幅) の空

間に1.5Tの磁界を発生し, 2.1T・mの磁界積分値を与える。コイルとクライオスタットの質量は16t, 鉄ヨークは“弁慶”のものを改造したもので質量120tである。図5にコイルクライオスタットの構造を示す。

#### 2.3.2 特徴

くら (鞍) 形コイルを上下対称に配置したウインドフレーム形マグネットであり, 超電導コイルに加わる強大な電磁力をコイル自身で支持することができない。次の基本方式及び構造とした。

(a) コイルは液体ヘリウム冷却によって完全安定化を図る。

(b) 二つのコイルを一つのヘリウム容器に収納することにより, 上下コイル間の電磁力をヘリウム容器内で支持する。

(c) コイルを収納するヘリウム容器は厚さ35mmのステンレス全溶接構造とし, コイルと容器壁間に弾性スペーサを挿入してコイルに加わる電磁力を確実にヘリウム容器に伝える構造とした。

コイルの製作法については, 当時既に米国フェルミ国立加速器研究所が鞍形巻棒に沿って線材を手巻きしていく方法を

用いてコイルを完成していたが、巻線寸法の均一性を向上させかつ巻線工数を短縮するため、

- (d) パンケーキコイル製作→曲げ加工  
→パンケーキの積層

の製法とした。

### 3. ビーム偏向用及び集束用超電導マグネット

#### 3.1 大型加速器用超電導 2 極マグネット<sup>(7)</sup>

##### 3.1.1 概要

素粒子物理実験の世界では、トップクォークやヒッグス粒子といった未発見の基本粒子探索のために、加速器のエネルギーを増大し、宇宙のビッグバンに迫ろうとする努力が精力的に進められている。加速リングの直径はビームを偏向する(曲げる)マグネットの磁界の強さに依存するので、リングを小さくするためには高い磁界を発生できる超電導マグネットが必要となる。米国で準備中の SSC (Superconducting Super Collider) では 40 TeV の陽子衝突実験を行うために、6.6 T という高い磁界を発生できる超電導 2 極マグネットがリング周長 87 km 内に約 8,500 台設置される計画である<sup>(8)</sup>。

当社は、高エネルギー物理学研究所の設計検討に参画<sup>(9)</sup>した後の 1990 年に、社内試作として中心磁場 6.6 T、口径 40 mm、直線長さ 1 m の超電導 2 極マグネットの設計及び製作を行い、1991 年 3 月に特性試験を行った。試作品のカラーリング後の写真を図 6 に、クエンチ特性を図 7 に示す。

##### 3.1.2 特徴

この試作品の仕様は SSC を参考にしたので、共通的な特徴としては次の項目がある。

- (a) NbTi 超電導線を用いた 2 極マグネットとしては磁界が高い。例えば、既に実用されている米国テバトロンでは中心磁界が 4.4 T であるが、今回はこれの 1.5 倍であり、巻線部の最大磁界は 7 T にも及ぶ。
- (b) 使用する超電導材料を少なくし、コストを低減するために、巻線部の平均電流密度は  $400 \text{ A/mm}^2$  と非常に高い。試作品は、この高磁界、高電流密度コイルに対して高いクエンチ電流を得るべく、次のような工夫を行った。
- (c) コイルに十分な成型と均一な寸法を与えるため、成型時の加熱温度と印加圧力の最適化を行った。
- (d) 高強度のカラー材で寸法管理されたコイルを締め付け、コイル巻線部に高い初期圧力を残存させた。

この結果、初回クエンチ電流が超電導ケーブルの臨界電流に到達するという、図 7 に示した最良のクエンチ特性を得ることができた。

今後、長尺コイルに対する検討を行いたいと考えている。

#### 3.2 ミュオンチャンネル用超電導ソレノイド<sup>(10)~(12)</sup>

##### 3.2.1 概要

ミュオン(ミュー粒子： $\mu^{+/-}$ )はパイ中間子が自然崩壊して得られるが、これらの粒子を磁界によって閉じ込め飛行さ

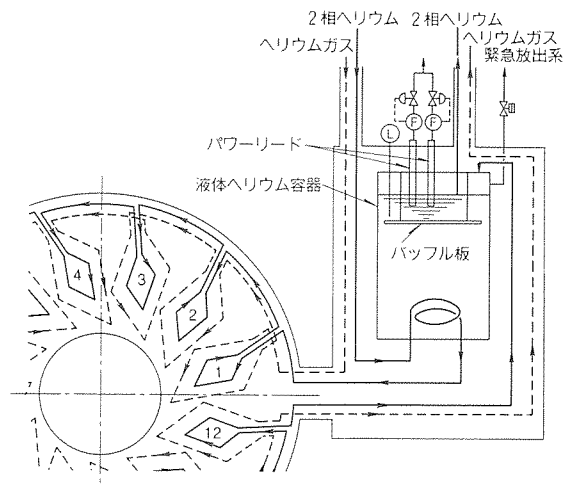


図4. 超電導トロイダルマグネットの冷却系統

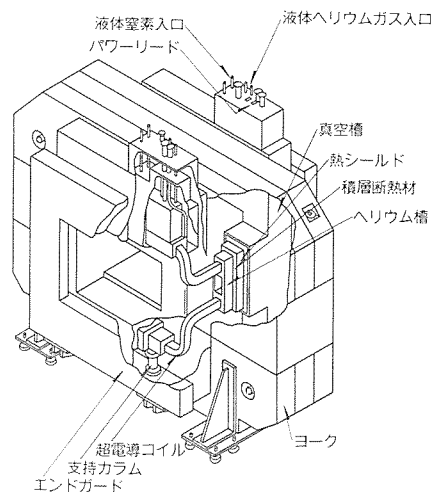


図5. スーパー弁慶のコイルクライオスタット構造

せてミュオンを大量に発生させるビーム系がミュオンチャンネルと呼ばれるもので、内径 120 mm、長さ 6 m の空間に 5 T の磁界を発生させる超電導ソレノイドを 1980 年に東京大学中間子科学実験センターの KEK 分室に納入し、同年 7 月に現地での定格励磁を達成、強力なパルス状ミュオンビームを発生させることに成功した。以来、今日まで年間 2,000 時間以上、累積で 25,000 時間を超える長時間運転が順調に行われている。

この超電導マグネットは我が国で最初の実用大型超電導マグネットであるとともに、冷媒として超臨界ヘリウムを使用したことでも画期的なものである。ほぼ同様な 2 号機を東京大学の注文によって製作し、1988 年カナダ TRIUMF 研究所に設置した。2 号機も順調に運転されており、世界最強の低速直流  $\mu^-$  ビームを発生している<sup>(13)</sup>。現在 3 号機を理化学研究所の注文により、英国ラザフォード アップルトン研究所向けとして製作中である。外観を図 8 に、コイル構造を図 9 に示す。

##### 3.2.2 特徴

長時間連続運転に対するメンテナンスを簡単にし、かつ万



ートラブルが発生した際でも分解・再組立てを簡便にするため、次のような基本仕様とし、それぞれモデルによる検証試験を行った。特に、(a)(b)(e)については東京大学の基本方針として示されたものである。

- (a) コイル外周のヘリウム容器をなくして構造を簡素化するため、間接強制冷却とする。
- (b) 冷媒としては不安定性除去の観点から単相流である超臨界ヘリウムを採用する。
- (c) コイルは長さ0.5 mのユニットコイルを12個連結して6 m長のソレノイドコイルとする。
- (d) ユニットコイルの構造は、ステンレス製巻枠の外周にNbTi平角超電導線を巻き、その外周に冷却管を巻き付けた後、全体をエポキシワニスによって真空加圧含浸した。
- (e) 構造簡素化からソレノイド内に液体ヘリウム貯槽を置かない。
- (f) このためパワーリードを真空中に置くこととなり、0.05 g/s/本の液体ヘリウム供給で低温端温度を超電導線の臨界温度以下に保持する性能が必要となる。
- (g) 低温部質量の削減と構造簡単化のため、鉄リターンヨークを室温領域に置き、更に真空容器と兼用した。
- (h) 全長6 m、質量1.1 tのソレノイドコイルを、厚さ14 mm、全長6.1 mのステンレス製6 K熱シールドによって支持する構造とした。

### 3.3 大立体角集束用超電導マグネット(ラージオメガ)

#### 3.3.1 概要

重イオンビームを標的に当て発生した二次粒子を、3台の

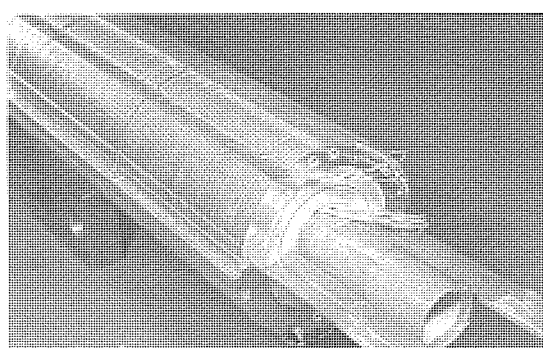


図6. カラーリング後の超電導2極マグネット試作品

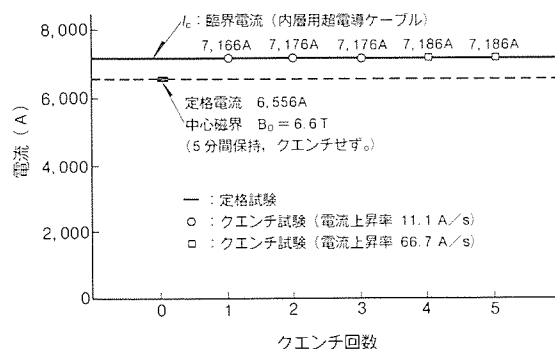


図7. 超電導2極マグネット試作品のクエンチ特性

超電導コイルの磁界によって運動量選択し大立体角で取り込み、かつ2回の集束により、 $\mu$ 粒子のみを選別するというユニークなミュオンチャンネルが理化学研究所に誕生した<sup>(14)</sup>。

当社はこの3コイル系の超電導マグネット(L $\Omega$ :ラージオメガ)を1988年に納入した。図10に外観を示す。

#### 3.3.2 特徴

特徴的な基本仕様、構成を次に示す。

- (a) 3コイルを独立に電流調整できる。コイル間に働く軸方向電磁力は、コイル間に設けたヘリウム温度の支柱によって支持している。
- (b) 当面の冷媒供給は可搬式のコンテナで行うため、コイルは液体ヘリウム浸せき(漬)冷却、80 K熱シールドは液体窒素冷却とした。
- (c) 将来の専用冷凍機設置も考慮して、コイルはNbTi平角超電導線の密巻き方式とし、ヘリウムを汚染するワニス等を使用しないこととした。
- (d) 3組のコイルは並列冷却回路とし、戻り側に流量調整用の低温弁を置いている。

## 4. 超電導加速空洞<sup>(15)</sup>

### 4.1 概要

日本原子力研究所東海研究所では、重イオンエネルギーを現行の4倍にアップするため、現在稼働中のタンデム加速器の後段に、多数の超電導加速空洞から成る超電導ライナックを建設中である。ここで使用する空洞は1/4波長共鳴型で、130 MHzの高周波入力により、5 MV/m以上の加速電界を

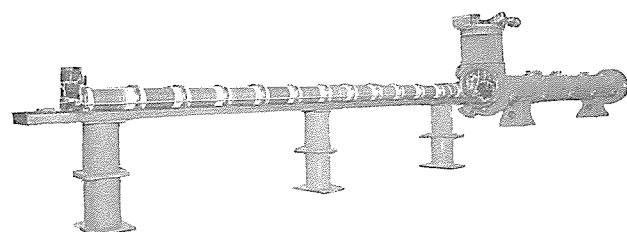


図8. ミュオンチャンネル超電導ソレノイドのソレノイドコイルとクライオスタットの挿入前状態

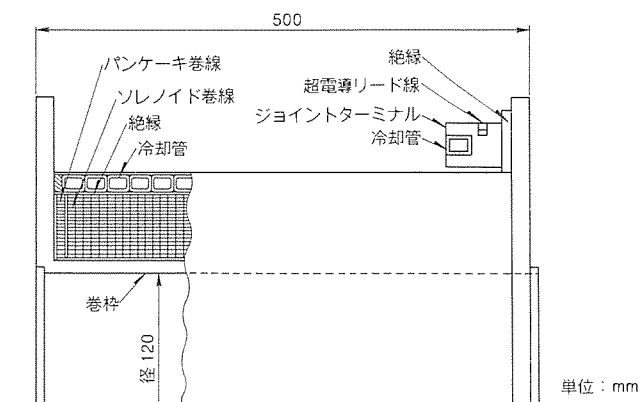


図9. ミュオンチャンネル超電導ソレノイドのコイルユニット構造

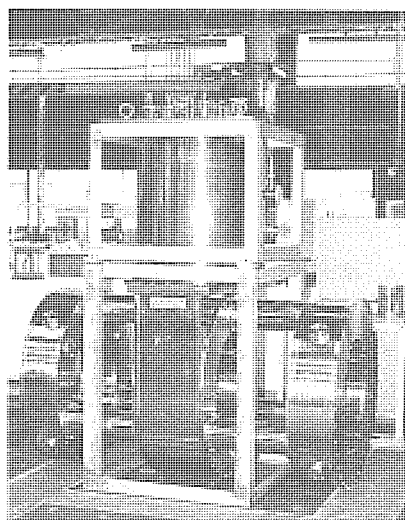


図10. ラージオメガ超電導マグネットの外観

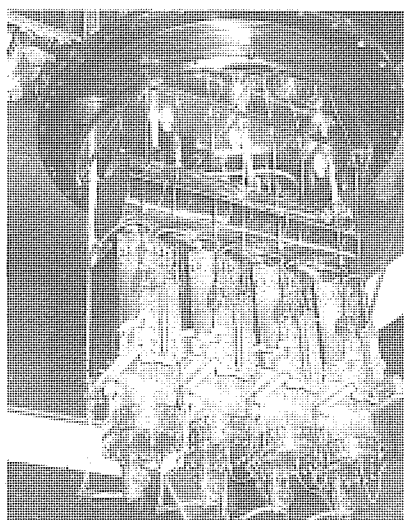


図11. 超電導加速空洞 4 台の外観

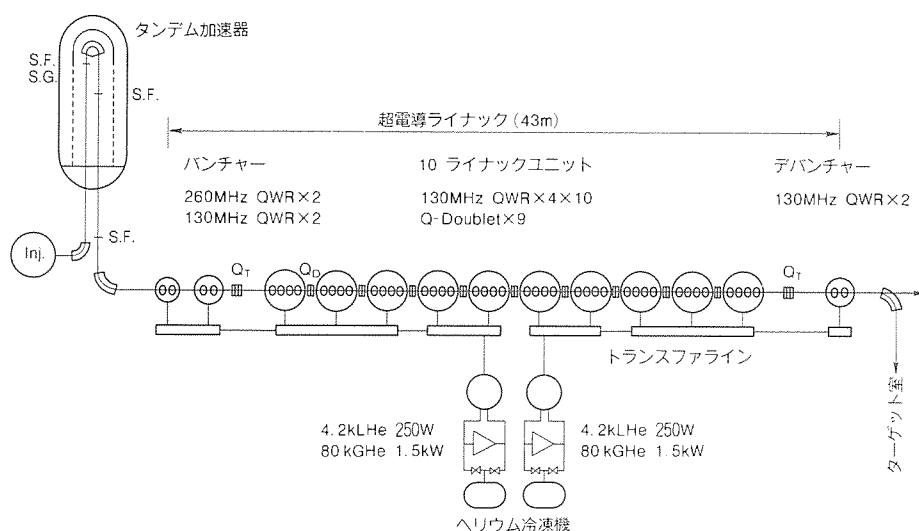


図12. 超電導ライナックの全体配置概念

与えるものである。当社は1986年に空洞の開発試作品を納入した後、1988年までにバンチャー用及びデバンチャー用の空洞4台とクライオスタット2台を、1992年にはライナック用の空洞40台とクライオスタット10台及びヘリウム冷却システムを納入し、現在据付け調整中である。空洞の外観を図11に、全体配置を図12に示す。

## 4.2 特徴

### 4.2.1 空洞

高周波電流による壁面損失を少なくし、かつ高い加速電界を得るために、次のような基本構成及び製法とした。

- (1) ドリフトチューブを含む中心導体部は液体ヘリウムによる直接冷却とした。高純度 Nb 棒から機械加工した部材を電子ビーム溶接によって結合し、製作した。
- (2) 外周導体は構造を簡単にするため、熱伝導により冷却する構成とした。高純度 Nb 板と無酸素銅板を爆発圧着したクラッド板を用い、プレス曲げ、機械加工、電子ビーム溶接等のプロセスを経て製作した。

- (3) Nb の熱伝導率改善と不純物除去のため、製作途上で高真空熱処理を行うとともに、壁面を電解研磨処理した。

### 4.2.2 クライオスタット

- (1) 純鉄で製作した真空容器とその内径側に1mm厚さのパーマロイ板を配置した二重磁気シールド構成により、空洞部分への地磁気の侵入を  $25 \times 10^{-7} \text{T}$  {25 mG} 以下に抑えた。
- (2) クライオスタットの真空は加速ビームの真空と共通であり、アウトガスの点から積層断熱材を使用できない。熱負荷削減のため、真空容器と80Kシールド間に非冷却の中間熱シールドを置き、これを上記のパーマロイ磁気シールドと兼用させた。

### 4.2.3 冷却システム<sup>(16)</sup>

冷却システムは、長時間連続運転に対するメンテナンスを簡単にすることを念頭におき、次の基本仕様とした。

- (1) ヘリウム量をできるだけ少なくするため、中間液体ヘリウムデュワーを置かず、液体ヘリウムを冷凍機から各クライオスタットへ直接圧送する。
- (2) 熱シールドは60～80Kのヘリウムガスで冷却する。
- (3) 冷却管路をすべて清浄な金属としてヘリウムの汚染を防止するとともに、圧縮機のオイルセパレータを強化し、かつ冷凍機コールドボックス内に低温吸着器を設置する。これらにより、低温精製器を置かないシステムとした。
- (4) 上記(2)(3)により、液体窒素を一切使用しないシステムとしている。
- (5) 冷却系統を前・後に分割し、冷凍機を2基設置した。1基当たりの定格は、液体ヘリウム生成410 L/h (250Wの冷凍に相当)、熱シールド負荷1,500 W、圧縮機容量310 kW、高圧バッファタンクは  $30 \text{ m}^3 \times 2$  基である。

## 5. むすび

高エネルギー物理用に限らず今後の超電導機器には、高性能化のみならず高い信頼性と簡便なメンテナンスがますます要求され、冷却系を含めたトータルとしてのシステム設計が重要になる。当社は関係各位の御指導を得ながら、それぞれの用途に合致した更により良い製品及びシステム作りに努力

していきたい。

終わりに、これらの超電導機器を製作する機会と開発指針を与えていただき常日ごろ御指導を賜っている、高エネルギー物理学研究所、東京大学、理化学研究所、日本原子力研究所の関係の方々に感謝申し上げる。

# 参考文献

- (1) 西川哲治：超伝導加速器，日本物理学会誌，**29**，No. 5，390～402（1974）
- (2) 平林洋美：高エネルギー実験への超伝導電磁石の応用，日本物理学会誌，**38**，No. 6，458～466（1983）
- (3) Wake, M., Sakuda, T., Matsui, T., Ishibashi, K., Satow, T., Asai, O., Kuno, K., Kawaguchi, T., Wakamoto, K., Fujita, R., Hirabayashi, H.: A Large Superconducting Thin Solenoid Magnet for Tristan Experiment (VENUS) at KEK, IEEE Transaction on Magnetism, **MAG-21**, No. 2（1985）
- (4) 尾崎 敏：トリスタン計画の概要と建設の経過，学術月報，**40**，No. 3，6～12（1987）
- (5) Imazato, J., Tamura, H., Ishikawa, T., Hayano, R., Yamazaki, T., Yamamoto, A., Kawaguchi, T.: A Superconducting Toroidal Magnet for Charged Particle Spectroscopy, 11th International Conference on Magnet Technology, **1**, 366～371（1989）
- (6) 稲垣隆雄，土井義城，平林洋美，加藤洋二，河野賢悟，佐藤 皓，杉本章二郎，高松邦夫，高崎栄一，都留常暉，浅井脩次，佐藤 隆，吉村秀人：大口径超電導分析電磁石（弁慶），低温工学誌，**18**，No. 6，10～21（1983）
- (7) 津田芳幸，大角 智，津曲一幸，野島敏之，川口武男，神代哲哉：大型加速器用超電導二極電磁石，第46回低温工学・超電導学会予稿集，B1-6（1991）
- (8) Superconducting Super Collider Laboratory：Site Specification Design（1990）
- (9) Shintomi, T., Terashima, A., Hirabayashi, H.: Development of Superconducting Dipole Magnet with Ideal Arch Structure using Large Key Stone Angle Cable, 11th International Conference on Magnet Technology, **1**, 181～186（1989）
- (10) Nagamine, K., Nakayama, H., Imazato, J., Kuno, Y., Fuzita, M., Yamamoto, A., Yamazaki, T.: Superconducting Solenoid and its Cooling System for Pulsed Muon Channel, IEEE Transaction on Magnetism, **MA-17**, 191～194（1982）
- (11) 永嶺謙忠：ミュオンチャネル用超電導ソレノイドとその冷却系，低温工学誌，**20**，No. 4，1～9（1985）
- (12) Satow, T., Kawaguchi, T., Ogino, O., Kawamura, T.: Manufacture of a 6-m Superconducting Solenoid Indirectly Cooled by Supercritical Helium, Advances in Cryogenic Engineering, **27**, 109～117（1982）
- (13) 永嶺謙忠，西山樟生，三宅康博，福地光一，渡辺 康，栗原秀樹，Beveridge, J., Clark, G., Andersson, W.: トライアムフ超電導負ミュオンチャネルの建設とビームチューニング，日本物理学会第44回年会予稿集，28 P-SA-4（1989）
- (14) Ishida, K., Matsuzaki, T., Nagamine, K., Kitazawa, H., Miyake, Y., Torikai, E.: Test of a Superconducting Secondary Beam Transport System with Large Solid Angle (SLΩ), RIKEN Accelerator Progress Report, **22**, 153（1988）
- (15) Takeuchi, S., Ishii, T., Ikezoe, H., Tomita, Y.: Development of the JAERI Tandem Superconducting Booster, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, **A 287**, 257～262（1990）
- (16) 杉山康治，渡辺光男，吉田 忠，金沢修平，竹内末広，村井 隆，川口武男：超電導ライナック用ヘリウム冷凍システム，第43回低温工学・超電導学会予稿集，C1-11（1990）

# 高磁界超電導マグネット

津田芳幸\* 久保芳生\*\*\*  
川口武男\* 黒田成紀+  
守田正夫\*\*

## 1. ま え が き

核融合装置，大型加速器，高分解能 NMR 分析装置などの開発では超電導マグネットの高磁界化が図られている。巨大な装置群は高磁界化によって小型化が可能になるし，高磁界化そのものが装置の能力向上を意味するからである。“高磁界”は超電導マグネットを利用するかなり広い分野に共通する話題であるが，ここでは①大型加速器用超電導線材評価装置として高エネルギー物理学研究所へ製作・納入した“14 T スプリットソレノイド”，②750 MHz 高分解能 NMR 分析装置の開発を目指して製作した“16 T 級超電導マグネット”，さらに，③20～25 T 級超高磁界マグネットの開発を目指した“シェブレル線材と小コイル”について述べる。

## 2. 14 T スプリットソレノイド<sup>(1)～(4)</sup>

現在，ダイポール電磁石に代表される大型加速器用超電導電磁石は合金系のニオブチタン (NbTi) 線材を使用した 7 T 級の電磁石が主流である。高エネルギー物理学研究所では将来計画として 10 T 級の高磁界を発生する電磁石の開発が進められている。この磁界領域では化合物系のニオブ 3 スズ (Nb<sub>3</sub>Sn) 線材が適しているが，大型加速器用電磁石への適用という点では開発段階にある。“14 T スプリットソレノイド”は最高磁界 14 T (定格 12 T) を発生し，5～10 kA 級の高磁界用超電導ケーブルを評価する超電導マグネットである。

### 2.1 主要諸元と構造

表 1. 超電導線及び各 1 コイルの主要諸元

	外コイル	内コイル
超電導材料	NbTi	(NbTi) <sub>3</sub> Sn
寸 法 (mm)	1.2×2.5	1.6×2.1
フィラメント径 (μm)	15	4.7
フィラメント数	7,363	34,000
ツイストピッチ (mm)	28	47
モジュール数	—	37
巻線内径 (mm)	271	72
巻線外径 (mm)	384	228
コイル高さ (mm)	167	61
スプリットギャップ (mm)	30	30
巻線平均電流密度 at B <sub>0</sub> =14 T (A/mm <sup>2</sup> )	164	130
運転電流 (A)	560	
中心磁界 B <sub>0</sub> (T)	14 (4 コイルトータル)	
蓄積エネルギー (kJ)	1,019 (    ♫    )	
インダクタンス (H)	6.5 (    ♫    )	

使用した超電導線とマグネットの主要諸元を表 1 に示す。磁界 7.6 T を発生する外コイルと磁界 6.4 T を発生する内コイルの複合により，コイルボア中心に磁界 14 T を発生する。マグネットの構造を図 1 に示す。合計 4 個のコイルを直列に接続し，1 台の電源で励磁する。ソレノイド中央赤道面に互いに直行する 20 mm×40 mm の試料挿入用貫通口を設けている。マグネットの外観を図 2 に示す

#### (1) 外コイル

NbTi 超電導線を使用し，14 T 発生時で巻線平均電流密度 164 A/mm<sup>2</sup>，巻線部での最大磁界は 8.5 T である。ソレノイド赤道面に 30 mm のスプリットギャップがあるため，コイル上下端だけでなくギャップ面に近い高磁界領域にも軸方向圧縮力が発生する。この圧縮力は超電導コイルのクエンチ (超電導常電導遷移) の原因になる可能性があるが，巻線を強固に製作することによってこの問題を解決した。また，クエンチ時の巻線間の熱伝導を考慮してエポキシ含浸を行った。

#### (2) 内コイル

内部拡散法による Nb<sub>3</sub>Sn 超電導線を使用している。中心磁界 14 T 発生時で巻線平均電流密度は 130 A/mm<sup>2</sup>，巻線部での最大磁界は 14.8 T である。ソレノイド赤道面に外コイル同様 30 mm のスプリットギャップをもつ。巻線後，Nb<sub>3</sub>Sn 生成熟処理を行い，エポキシ含浸で導体を機械的に固定した。

#### (3) 分割構造

別巻枠にしているため，分解して外コイルを 7.6 T コイル，内コイルを 9 T コイルとしての単独使用が可能である。さらに，外コイル巻枠は赤道面で分割構造を採っているため内

コイルの交換が容易である。内コイルを増強すると組合せ磁界は 16 T まで発生が可能となる。

#### (4) 電源

外コイルの NbTi 超電導線及び内コイルの Nb<sub>3</sub>Sn 超電導線の磁界—電流特性を最適化しているため，両コイルの通電は直列励磁となる。電源は直流 600 (14 T 発生時)～800 A (内コイル単独使用時) クラスのもの 1 台を使用する。

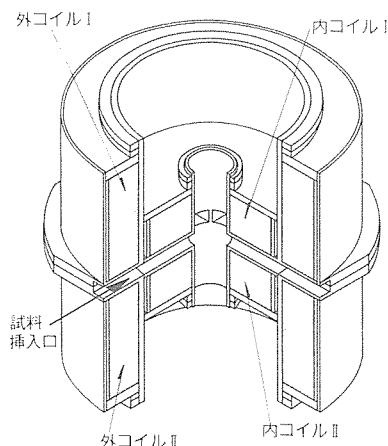


図 1. 14 T スプリットソレノイドの構造



## (5) 水平置き・垂直置き両用

内径600 mmの開放形クライオスタットを使用し、試験目的に応じて磁界方向を水平又は垂直に設置する。クライオスタット内における電流リードとコイルの取合点をコイルのスプリット面に置いたので、同一取合形状のままで水平置き・垂直置きの変更を行える。

## 2.2 試験結果

図3に励磁試験結果を示す。トレーニングクエンチのほとんどは外コイルで発生した。図中大きい○□印はクエンチ点を表し、●印は最終クエンチが外コイルで発生していることを示している。これは、外コイルの方へ相対的に大きな軸方向電磁力がかかることに起因した現象と考えられるが、視点を変えると内コイル(Nb<sub>3</sub>Sn コイル)の特性が極めて安定していることを示している。最高到達点は中心磁界14.3 T、巻線部の最大磁界15.0 Tである。

## 3. 高分解能 NMR 分析装置用超電導マグネット

高磁界超電導マグネット応用の一例として高分解能 NMR 分析装置用超電導マグネットがあげられる。この NMR 分析装置は、核磁気共鳴を利用して生化学情報を得るものである。なお、水素原子核の共鳴周波数は1 Tで42.576 MHzである。現在市販されている NMR 分析装置のなかで最も磁界の高いものは14.1 T (600 MHz)である。磁界(共鳴周波数)が高いほど信号強度が強くなり分解能が向上するため、より高磁界化の要求が高まっている。

筆者らは750 MHz (17.6 T) 高分解能 NMR 分析装置用超電導マグネットの開発を目指して、まず16 T級の磁界を発生できる超電導マグネットを試作し、試験を行った。また、永久電流モードで運転できる17.6 T超電導マグネットを試作中である。

### 3.1 16 T 級超電導マグネット

高磁界マグネットの実証を目指して16 T級超電導マグネットの試作・試験を行った。以下にこのマグネットの仕様及び試験結果を示す。

#### (1) 仕様

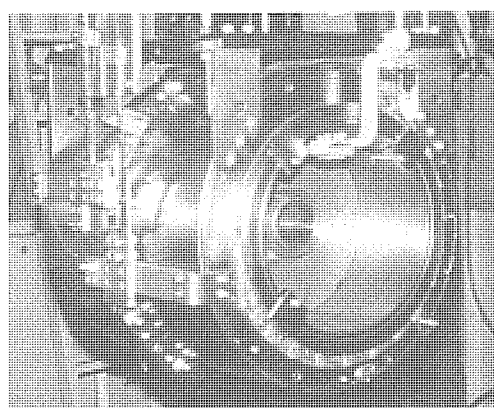


図2. 14 T スプリットソレノイドの外観

マグネットの仕様を表2に、外観を図4に示す。また、超電導線の仕様を表3に、16 Tコイル用超電導線の断面写真を図5に示す。表2に示すように、マグネットは14 Tコイル及び16 Tコイルで構成されている。16 Tコイルは14 Tコイルの中心部に挿入することによって高磁界を発生できる。超電導線は内部拡散法によって製作された Ti を添加した Nb<sub>3</sub>Sn 超電導線である、Ti を添加することにより、高磁界における臨界電流値を向上できる。

巻線後 Nb<sub>3</sub>Sn 生成熱処理を行う方式を用いてコイルを製作した。また、超電導線の動きに起因するクエンチを防止するためにコイルをエポキシで含浸した。

#### (2) 試験結果

上述のコイルを内径150 mm、高さ340 mmの9 TのNbTi バiasコイル中に設置して試験した。まず、bias磁界を9 Tにして14 Tコイルの励磁試験を行った。試験結果を図6に示す。図に示すように7回のトレーニングにより、負荷直線上で線材の短試料臨界電流値に対するコイルのクエンチ電流値(負荷率)は92%に達した。また、初回クエンチにおける負荷率は88%であり、ほとんどトレーニングのない安定なコイルを得ることができた。

次に、16 Tコイルの励磁試験を行い、試験結果を図6に示した。14 Tコイルの発生磁界を13.5 T及び14 Tに設定して16 Tコイルに通電した。トレーニングは全くなく、初回ク

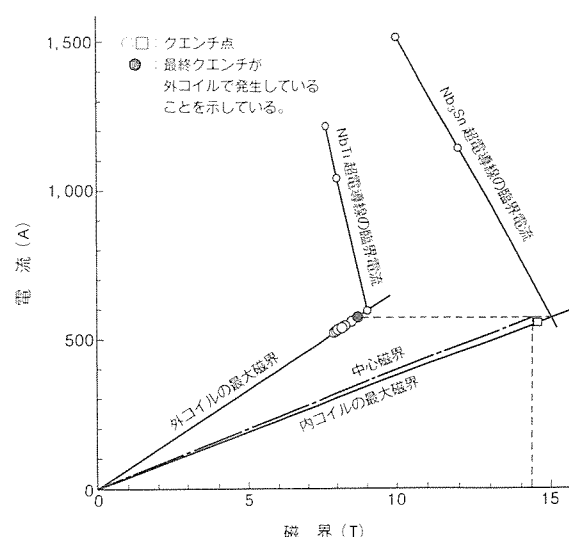


図3. 14 T スプリットソレノイドの励磁試験結果

表2. 16 T 級超電導マグネットの仕様

	14 T Nb <sub>3</sub> Sn コイル	16 T Nb <sub>3</sub> Sn コイル
外 径 (mm)	133.1	55
内 径 (mm)	73.45	26
高 さ (mm)	187	98.7
ターン数	1,137	489
16.2 T 発生時の 電流密度 (A/mm <sup>2</sup> )	146.8	130.9
磁界定数 (計算値) (T/A)	0.006682	0.005752

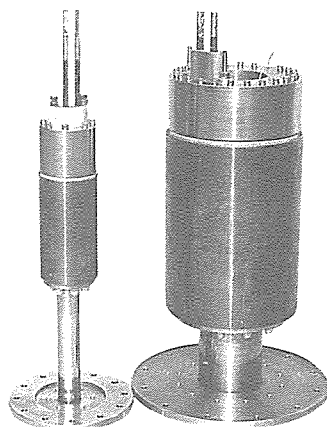


図4. 16 T 級超電導マグネットの外観  
(16 T コイル(左), 14 T コイル(右))

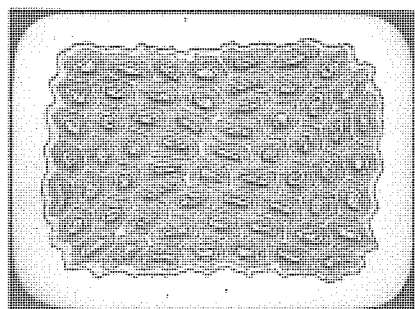


図5. 16 T 級コイル用超電導線の断面

エンチ電流値は線材の短試料臨界電流値に達し、極めて安定なコイルを得ることができた。このときの発生磁界は16.2 Tであった。

### 3.2 17.6 T 超電導マグネット

3.1 節で述べた16 T 級マグネットの製作経験を生かし、現在永久電流モードで運転できる17.6 T 超電導マグネットの製作を行っている。このマグネットはNbTi コイル及びTi を添加したNb<sub>3</sub>Sn コイルで構成される。

高分解能 NMR 分析装置用超電導マグネットの開発のためには時間的に安定で、空間的に超高均一の高磁界の発生が不可欠である。このマグネットで時間的に安定した高磁界発生を実証し、MRI 用超電導マグネットで培った高均一磁界発生技術を併用することにより、高分解能 NMR 分析装置用超電導マグネットの開発は可能となる。

## 4. シェブレール線材と小コイル

シェブレール (Chevrel) 相 PbMo<sub>6</sub>S<sub>8</sub> (以下“PMS”という。) 化合物は上部臨界磁界が高く、20~25 T 級超電導マグネット用線材として注目されている。当社では PMS コイルによる超高磁界マグネットの開発を目指し、その適用可能性を調べるため小コイルを製作し、その評価を行ってきた<sup>(5)(6)</sup>。ここではそれらの結果について紹介する。

### 4.1 シェブレール線材

線材の製作法は、冷間加工が可能な Nb をバリヤ材に用い、

表3. 16 T 級超電導マグネット用超電導線の仕様

	14 T Nb <sub>3</sub> Sn コイル	16 T Nb <sub>3</sub> Sn コイル
寸法(mm)	1.6×2.2	1.3×1.7
フィラメント径(μm)	3.3	3.0
フィラメント数	49,410	
ツイストピッチ(mm)	48.2	46.0
銅比	0.62	0.64

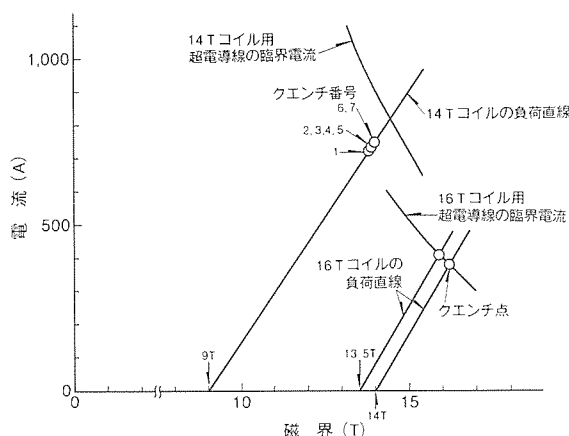


図6. 16 T 級超電導マグネットの励磁試験結果

については16.5 T の超電導マグネットで測定した。小コイルの  $I_C$  の定義は  $10^{-11} \Omega \text{cm}$  とし、 $J_C$  はバリヤ内の化合物層当たりの値として算出した。

熱処理後のシェブレール線材の導体構成比率を表4に、断面写真を図7に示す。写真から分かるとおり、静水圧押出しを用いたことで線材の各部分はほぼ同心円状に加工されており、最終径に至るまで断線することがなく良好に加工することができた。この線材の  $J_C$ - $B$  特性を評価したところ、 $B=23 \text{ T}$  で  $J_C=1.03 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$  という値が得られた。

### 4.2 小コイル

この線材のコイル実証試験を行うため、ポビンとしてアルミナ (熱膨張率  $\alpha=8.0 \times 10^{-6}$ ) とマグネシア ( $\alpha=13.8 \times 10^{-6}$ ) の2種類を用いて3層の小コイルを製作した。図8にコイルの外観写真を、また表5に主要諸元を示す。この小コイルを液体ヘリウム温度まで冷却し、 $B=14.4 \text{ T}$  の磁界下で  $I_C$  評価を行った。その結果、アルミナポビンを用いた小コイルでは  $I_C=24.8 \text{ A}$  であった。この値は  $J_C$  に換算すると  $1.75 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$  になり、この線を短尺評価したときの  $J_C$  値の60%に相当していた。また、コイルの各部分から電圧タップをとってクエンチの発生箇所を調べたところ、クエンチはコイルの内層部から発生していることが判明した。一方、マグネシアのポビンを用いた小コイルでは、14.4 T の磁界下で  $I_C=34.4 \text{ A}$  になった。この値は短尺評価の時の  $J_C$  値の83%に相当している。このポビンでは、クエンチはコイルの外層部から発生しており、マグネシアのポビンを用いることでコイル内層部での線材の  $I_C$  の劣化が解消していることが分かった。以上の結果から、ポビンから受けるひずみの影響をなく

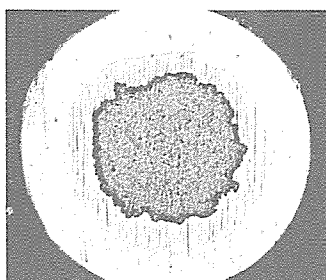


図7. シェブレル線材断面の顕微鏡写真(外径0.92mm)

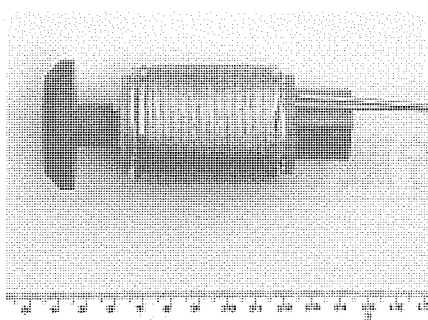


図8. シェブレル線材を用いた小コイル

表4. シェブレル線材の導体構成比率

シェブレル相化合物	Nb バリヤ	安定化銅	Cu-30%Ni シース
19%	24%	28%	29%

表5. シェブレル小コイルの諸元

巻線内径	巻線外形	巻線高さ	層数	ターン数	線長
36mm	42mm	43.6mm	3	107	13.2m

すことでPMS線材によるコイル化は十分に可能であることが判明した。

小コイル評価において、ボビンの種類によってなぜ $I_c$ の値が変わるのかを解明するため、冷却過程で線材がボビンから受けるひずみがどの程度の大きさになるかの推定を行った。まず線材の熱膨張率の評価を行ったところ、 $\alpha = 13.1 \times 10^{-6}$ というアルミナボビンの熱膨張係数よりもかなり大きい値が得られた。次に、この値から冷却過程で線材がボビンから受けるひずみの大きさを推定した結果、線材にはアルミナボビンから0.17%の引張りひずみを受けることが算出された。最後に、この推定値によって線材の $I_c$ の劣化率がどのぐらいになるかを線材の $I_c$ —ひずみ特性の結果から推察した。結果は、引張りひずみ0.17%での $I_c$ の減少率は89%となり、アルミナボビンを用いた実際のコイル評価での $I_c$ の減少率約60%までは減少しないことが判明した。しかしながら、この線材について化合物層の断面積のばらつきは約10%程度あり、このばらつきを考慮すると長尺評価で約10%程度の $I_c$ の減少が考えられること、また、化合物層の断面積のプラス側へのばらつきはNbバリヤ及びシースの占積率の減少につながり、その場合には不可逆ひずみの値は低くなること、さらにこれまでの考察ではPMS線材には単軸の引張りひずみだけが加わるものと仮定したが、実際は線材にはボビンから横圧縮ひずみも受けており、この考慮もなされなければならないことなど以上のことを総合して考えると、アルミナボビンから受けるひずみはPMS線材にとってかなり

厳しいひずみになっており、長尺評価で $I_c$ が劣化していた原因は主としてボビンから受けるひずみであると推定される。

## 5. む す び

10 Tを超える高磁界発生に適した $Nb_3Sn$ 超電導線を利用した“14 T スプリットソレノイド”及び“16 T 級超電導マグネット”について述べた。いずれも極めて安定した特性を示し、実用装置への本格的な適用が可能になったと考える。さらに、20～25 T級の超高磁界用材料として試作した“シェブレル線材と小コイル”の実験結果を紹介した。この実験により、PMS線材を用いたコイルが可能であることが実証され、20～25 T級の超高磁界マグネットへの道がひらかれたといえる。

“14 T スプリットソレノイド”製作に当たり、高エネルギー物理学研究所の諸先生方に御指導、御協力をいただいたことに感謝の意を表する。また、“シェブレル線材と小コイル”の研究は東北大学金属材料研究所の武藤名誉教授、小林教授、渡辺助教授及び岩手大学工学部の能登教授、片桐教授との共同研究によるものである。諸先生方及び超電導材料開発施設の関係各位に感謝の意を表する次第である。

## 参 考 文 献

- (1) Wake, M., Maehata, K., Hirabayashi, H., Tsuda, Y. : Quench Property of a Hybrid Split Solenoid Magnet, Proceeding of 11th International Conference on Magnet Technology, 1090～1095 (1989)
- (2) 和気正芳, 前畑京介, 平林洋美, 津田芳幸, 中林美明, 藤原二三夫: 1989年度秋季低温工学・超電導学会予稿集, 220 (1989)
- (3) 和気正芳, 前畑京介, 津田芳幸, 平林洋美: 1989年度秋季低温工学・超電導学会予稿集, 221 (1989)
- (4) 前畑京介, 和気正芳, 平林洋美, 津田芳幸: 超伝導スプリットソレノイド電磁石の励磁試験, 低温工学, 26, No. 4, 62～69 (1991)
- (5) Kubo, Y., Yoshizaki, K., Fujiwara, F., Noto, K., Watanabe, K. : Proceeding of MRS International Meeting on Advanced Materials, 6, 95～101 (1989)
- (6) 久保芳生, 藤原二三夫, 永井貴之, 吉崎 浄, 小林典男, 武藤芳雄, 能登宏七: 1990年度春季低温工学・超電導学会予稿集, 90 (1990)

# 超電導エネルギー貯蔵(SMES)

豊田勝義\* 神代哲哉\*  
川口武男\*  
市原 直\*

## 1. ま え が き

超電導エネルギー貯蔵 (Superconducting Magnetic Energy Storage : SMES) は、超電導マグネットに循環する電流を変換器で制御することにより、電気的なエネルギーを貯蔵・入出力する装置である。SMES は貯蔵エネルギーが電気エネルギーと同種の磁気エネルギーであること及び超電導コイルを使用しているために、システムの効率が高い、応答が早い、制御が容易などの特長をもち、電力系統機器として、系統安定化用の小容量のものから揚水代替用の大容量のものまでその運用効果が期待されている。また、鉄鋼・電鉄など大型電気機器関連分野への応用効果も期待される。

当社は、SMES 研究開発の初期の段階から大容量 SMES の概念設計研究を開始するとともに、国産初の超電導パルスマグネット<sup>(1)</sup>、世界最大の励磁速度 (200 T/s) をもつ超電導パルスマグネット<sup>(2)</sup>の製作により蓄積した超電導パルスマグネット技術を適用したパルス超電導コイルと、各システムごとに特徴ある変換器から構成される SMES システムを製作してきた。

ここでは、代表的な大容量 SMES の概念設計研究及び SMES システム製作実績を紹介する。

## 2. SMES 概念設計研究

SMES は、その貯蔵効率の高さから初期の段階では夜間の余剰電力を貯蔵し、昼間の負荷対策として使用する揚水代替用の大容量の研究から開始された。当社もいち早く大容量 SMES の概念設計を実施した<sup>(3)(4)</sup>。

図 1 に 10 GWh-SMES 設計の岩盤支持構造部設計例<sup>(4)</sup>を示す。浸せき (漬) 冷却超電導コイルを用いた SMES では液体ヘリウム容器の渦電流損失による効率低下が問題となるが、この設計で Nb<sub>3</sub>Sn 超電導線を用いた超臨界圧ヘリウムの強制冷却導体方式を採用し、SMES のシステム効率向上を図った。

その後、大容量 SMES の概念設計研究ではトロイダルコイル方式の検討、高温超電導材料を使用した SMES の検討・評価などを行ってきた<sup>(5)</sup>。また、大容量 SMES の付加価値を増大させるため、大容量 SMES に AFC (自動周波数制御) 機能、瞬動予備力機能、電圧無効電力制御機能をもたせた場合の運転制御方法、系統運用効果等についての検討も行った<sup>(6)</sup>。

系統安定化 SMES の概念設計研究も各電力会社との共同研究、又は委託研究など数多く実施してきている。

## 3. SMES システム製作実績

### 3.1 500 kJ-SMES システム

大阪大学超電導工学実験センター (現在の大阪大学超電導エレクトロニクス研究センター) における“超電導エネルギー貯蔵装置による電力系統安定化についての実験的研究”<sup>(7)</sup>のための研究設備として、500 kJ 超電導パルスマグネットと電力変換装置から構成される SMES システムを製作・納入した。

表 1 に超電導パルスマグネット諸元を、図 2 に超電導パルスマグネットの外観を示す。

電力変換装置は、2 台の 6 パルスグレーツ結線サイリスタ電力変換装置を直列に接続し、有効電力・無効電力を独立同時制御する方式である。

この SMES システムは、大阪大学超電導工学実験センターの模擬電力系統へ実装され、各種実験が実施された。系統安定化特性については、シミュレーションなどによる系統解析の結果と一致した期待どおりの特性が得られ、また SMES の系統接続時の問題点を明確にし、各種設計指針などが得られた<sup>(7)</sup>。

同センターでは、後に GTO 変換装置を製作してこの超電導パルスマグネットと組み合わせ、GTO 電力変換装置の P-Q 同時制御について位相制御方式と PWM 制御方式の比

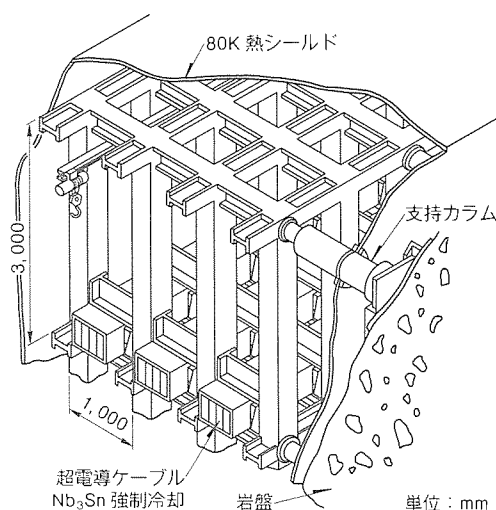


図 1 . 10GWh-SMES 設計例

較等システム研究を行った<sup>(7)</sup>。

この超電導パルスマグネットは、5~7T/s のパルス駆動を既に3,000 回以上も実施し、世界最多のパルス運転実績をもつ超電導パルスマグネットとなっている。

また、当初クライオスタットはステンレス鋼製であったが、金属性クライオスタットの渦電流による液体ヘリウムの蒸発を減らすため、FRP クライオスタットも当社が開発・納入し、超電導パルスマグネットとの組合せ試験を実施した。

### 3.2 3MJ-SMES システム

電子技術総合研究所では、トカマク型核融合炉用パルスマグネットの基盤技術確立のために超電導パルスマグネットの研究を実施してきた。当社は、この開発のために国産初の超電導パルスマグネット (78 kJ)、400 kJ 超電導パルスマグネ

ット、3 MJ パルスマグネットを製作・納入してきた。

ここでは、超電導コイル間のエネルギー転送実験<sup>(9)</sup>に使用された3 MJ 超電導パルスマグネットと変換装置について紹介する。

表2に3 MJ 超電導パルスマグネット諸元を、図3に超電導パルスマグネットの外観を示す。

超電導コイル間のエネルギー転送実験用の変換装置は、サイリスタ式チョッパ回路方式である。図4に回路構成及び転送実験結果を示す<sup>(9)</sup>。転送回路は、エネルギー蓄積マグネット L 1、パルスマグネット L 2、2組のチョッパ回路及び転送用キャパシタ等から構成される。実験の結果90%以上の転送効率が得られた。

### 3.3 多目的利用 SMES 原理実証システム

関西電力(株)では系統安定化を主機能として、AFC (自動周波数制御) など電力系統における多目的利用の可能性について SMES の研究を実施している。関西電力(株)と当社はこ

表1. 500kJ パルスマグネット諸元<sup>(a)</sup>

コイル巻線内径	310mm
コイル巻線外径	494mm
コイル巻線高さ	256mm
定格電流	1,976A
中心磁界	5.0T
最大磁界	6.1T
インダクタンス	0.262H
貯蔵エネルギー	515kJ
定格励磁速度	5 T/s
(最大磁界変化速度	10T/s)
巻線方式	ダブルパンケーキ巻
導体方式	成形より(撚)線
超電導素線	NbTi-Cu-CuNi
クライオスタット	
ヘリウム層内径	646mm
真空層外径	862mm
真空層高さ	1,750mm

表2. 3MJ パルスマグネット諸元<sup>(a)</sup>

コイル巻線内径	400mm
コイル巻線外径	860mm
コイル巻線高さ	625mm
定格電流	5,500 A
中心磁界	6.2T
最大磁界	6.6T
インダクタンス	0.20H
貯蔵エネルギー	3MJ
定格励磁速度	6.6T/1.5s
巻線方式	ダブルパンケーキ巻
導体方式	高純度アルミニウム 安定化成形撚線
超電導素線	NbTi-Cu-CuNi

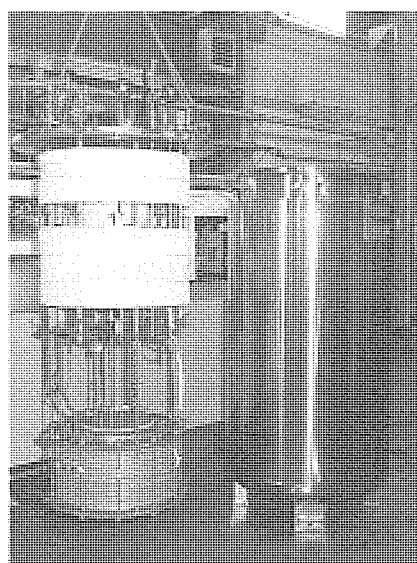


図2. 500kJ 超電導パルスマグネット

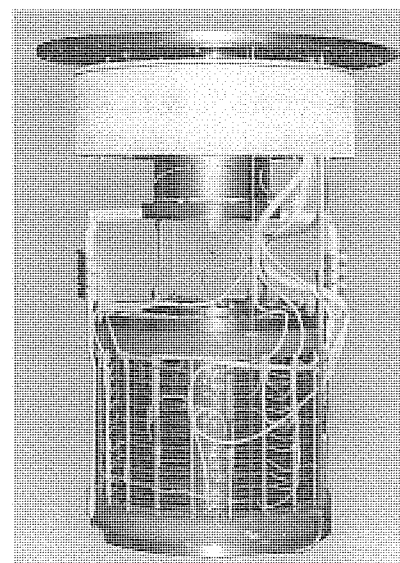
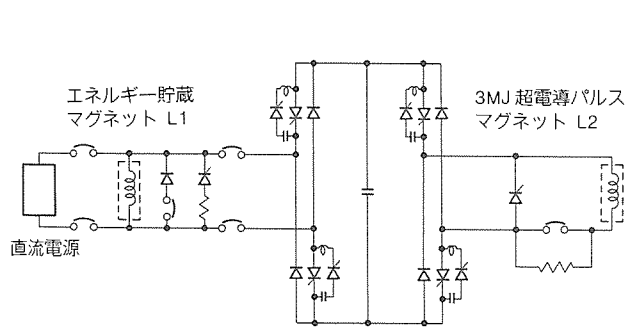
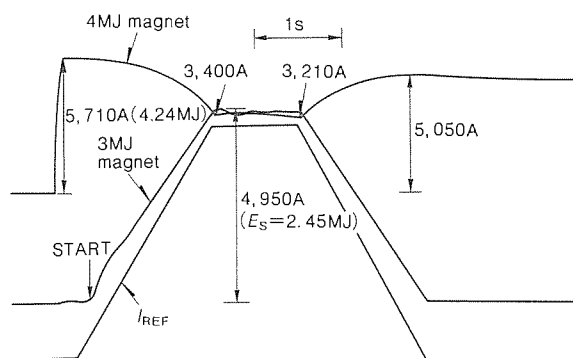


図3. 3MJ 超電導パルスマグネット





(a) エネルギー転送システム主回路構成



(b) エネルギー転送実験例<sup>(9)</sup>

図4. サイリスタ式チョッパ回路とエネルギー転送実験例

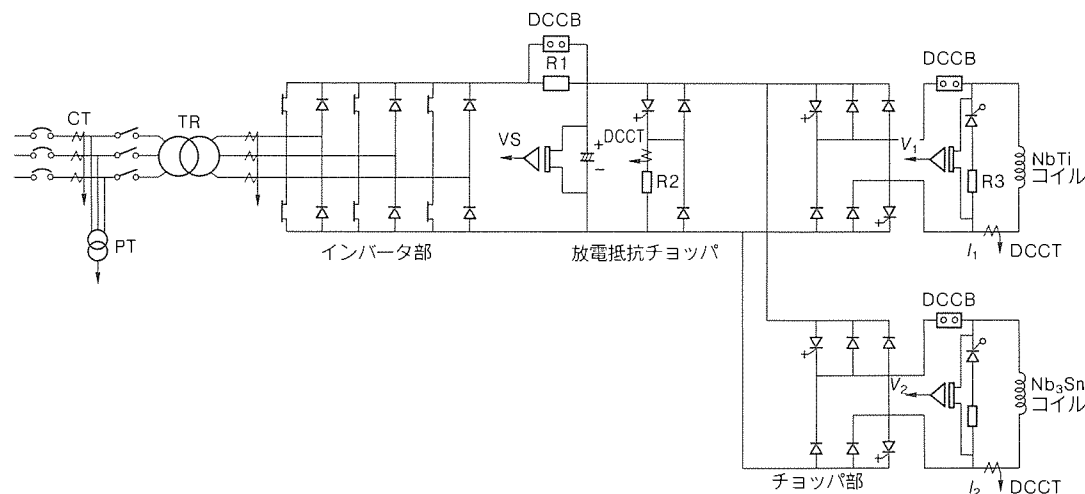


図5. 多目的利用 SMES 原理実証システム構成

の研究の原理実証用に、2個の15 kJ 級超電導コイル (NbTi コイル, Nb<sub>3</sub>Sn コイル) と電圧型インバータ+チョッパ方式で構成される SMES システムを製作し、動作特性試験を実施している<sup>(10)~(12)</sup>。

図5にシステム構成を示す。この方式は多数個の超電導コイルから構成されるトロイダルコイル型 SMES の運転制御を念頭においたものである<sup>(10)</sup>。表3に超電導コイル諸元を示す<sup>(11)</sup>。図6に超電導コイルシステム写真を示す。NbTi コイル・Nb<sub>3</sub>Sn コイルとも内部に冷却チャネルをもつ浸漬冷却超電導コイルである。図7にチョッパを介しての超電導コイル間のエネルギー転送試験、工場ラインとのエネルギー入出力試験結果 (正弦波, 台形波) の一例を示す<sup>(12)</sup>。これら試験結果により、この方式は電力系統における SMES の各種運用に有効な方式であることが示されつつある。

#### 4. む す び

SMES システムの主たる構成機器は超電導パルスマグネットと入出力変換装置である。SMES の実用化にむけては、これら構成機器の要素開発とともに SMES の目的に応じて適

表3. 多目的利用 SMES 原理実証試験用超電導コイル諸元

	NbTi コイル	Nb <sub>3</sub> Sn コイル
巻線部寸法 (mm) (内径×外径×高さ)	35×130×72	35×130×74
インダクタンス (H)	0.96	1.25
定格電流 (A)	196	170
蓄積エネルギー (kJ)	17.3	18.1
最大磁場 (T)	5	5

切なシステム構成を検討していく必要がある。

当社は総合電機メーカーの特徴を生かして、電力システム研究部門、超電導コイル開発部門、パワーエレクトロニクス開発部門が協力して、国家プロジェクトを始めとする各種 SMES プロジェクトに対して適切なシステムをユーザーとともに開発していきたいと考えている。

SMES 研究開発にあたり、大阪大学超電導エレクトロニクス研究センター (旧超電導工学実験センター)、電子技術総合研究所、関西電力 (株) の関係者各位に御協力いただいたことに感謝する。

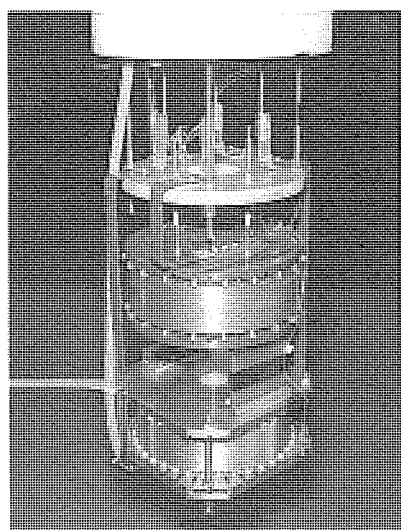
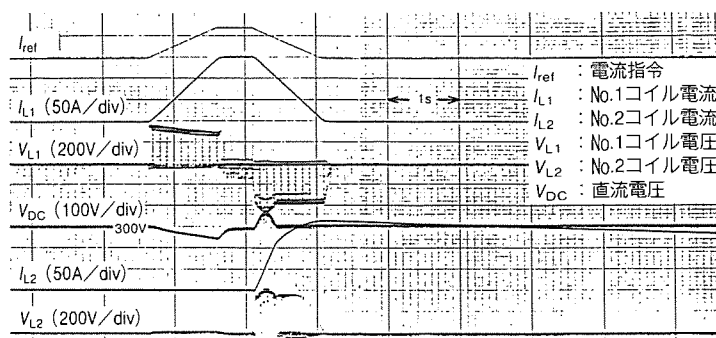


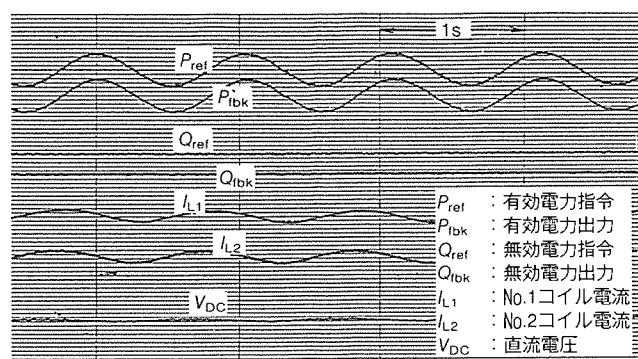
図6. 多目的利用 SMES 原理実証システム超電導コイル  
(Nb<sub>3</sub>Sn(上), NbTi(下))

### 参考文献

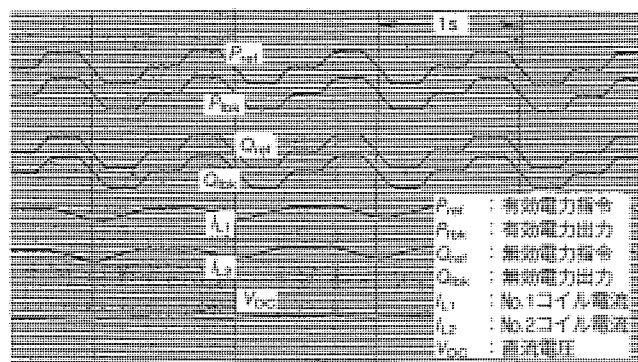
- (1) 小山健一, 服部泰秀: 78 kJ パルス超電導マグネット, 昭和54年電気学会東京支部大会予稿集, 398 (1979)
- (2) Satow, T., Iwamoto, M.: Test Results of High Ramp Rate Pulsed Superconducting Coil for the Reacting Plasma Tokamak, IEEE Trans. on Magnetics, **MAG-21**, 803 (1985)
- (3) Yamada, T., Iwamoto, M.: Aspects of Structural Designs of Large Superconductive Energy Storage, Proc. of the International Symposium on Superconductive Energy Storage, Osaka, 177 (1979)
- (4) 中丸 修, 豊田勝義: 超電導電力貯蔵システムの概念設計研究, 電気学会 新・省エネルギー研究会資料, ESC-82-5 (1982)
- (5) 前川 務, 岩本雅民: 5GWh 超電導電力貯蔵システムの概念設計研究—いろいろな温度の超電導体を仮定して—, 電気学会論文誌 B, **109**, No. 2, 88 (1989)
- (6) 清水雅之, 石黒富士雄: 超電導エネルギー貯蔵装置の運用制御に関する研究, 電気学会電力技術研究会資料 PE-88-104 (1988)
- (7) 村上吉繁: 超電導エネルギー貯蔵装置による電力系統安定化についての実験的研究, 昭和59年度—昭和61年度科学研究費補助金[一般研究(A)]研究成果報告書 (1987)
- (8) Satow, T., Kawaguchi, T.: Development and Characteristics of 0.5 MJ Pulsed Superconducting Magnet, Proc. of ICEC-9, 309 (1982)
- (9) Onishi, T., Takeda, M.: Energy Transfer Experiments between 3 MJ and 4 MJ Pulsed Superconducting Magnet, IEEE Trans. on Magnetics, **MAG-21**, 1107



(a) エネルギー転送試験(超電導コイル1の電流( $I_{L1}$ )減衰とともに超電導コイル2の電流( $I_{L2}$ )が増加する。)



(b) 正弦波入出力(有効電力の正弦波入出力指令に従い超電導コイル電流が正弦波的に変化している。)



(c) 台形波入出力(無効・有効電力の台形波入出力指令に従い超電導コイル電流が台形波的に変化している。)

図7. 多目的利用 SMES 原理実証システム試験例

(1985)

- (10) 寺井晴一郎, 豊田勝義: トロイダル型超電導磁気エネルギー蓄積装置 (SMES) のシステム検討, 平成2年電気学会全国大会講演論文集, No. 874 (1990)
- (11) 寺井晴一郎, 豊田勝義: トロイダル型 SMES の原理実証システム, 平成2年度秋季 低温工学・超電導学会予稿集, C3-17 (1990)
- (12) 深田雅一, 原口英二: 電圧形インバータ+チョップ回路方式を適用した SMES の原理実証システム, 平成3年電気学会全国大会講演論文集, No. 952 (1991)

# 超電導発電機

上田明紀\* 吉村秀人\*\*  
平尾俊樹\* 守田正夫\*\*\*  
小林 俊\*

## 1. ま え が き

超電導発電機には、効率の向上、電力系統の安定度の向上等の利点があり、世界各国で実用化を目指した研究開発が進められている。

当社でも超電導発電機の研究開発を昭和49年度から実施している。初めの3年間で6千kVA機<sup>(1)</sup>を、また昭和52年度からの6年間で3万kVA機<sup>(2)</sup>を、いずれも通商産業省の重要技術開発費補助金を受け、富士電機(株)と共同で開発した。昭和58年度から信頼性及び大容量化技術の向上を目的として100万kVA級回転子の要素試作を実施した。これらの成果を生かし、現在、通商産業省工業技術院のムーンライト計画“超電導電力応用技術開発”の一環として行われている超電導発電機の開発に参画している。

この研究開発は新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から委託を受けた超電導発電関連機器・材料技術研究組合(電力、重電、線材、冷凍機メーカー等16法人)が母体となって昭和63年度から実施しているものであり、初めの4年間で要素技術開発のための部分モデルの製作・試験を行い、次の4年間で7万kW級超電導発電機を製作し、フィールド試験を行う計画である<sup>(3)</sup>。フィールド試験では負荷用同期機と組み合わせた実負荷での運転試験及び事故を想定した過酷試験を実施して、超電導発電機の設計・製作に必要な技術を検証する予定である。また、第2段階として20万kW級超電導発電機を製作し、発電所で電力系統連系を含む実証試験を行うことが検討されている。

当社は、この開発の中で7万kW級超電導発電機の基本設計、回転子の製作及びこれに関連する部分モデルの製作・試験を担当している。現在までに回転コイルモデル及び界磁巻線モデル等の製作・試験を行い、良好な結果を得ている。平成4年度からは7万kW級超電導発電機の回転子を製作する予定である。

ここでは、ムーンライト計画における超電導発電機の技術開発の状況を紹介する。

## 2. 超電導発電機の特長

電力事業用の大容量超電導発電機には次のような特長がある<sup>(4)(5)</sup>。

### (1) 系統安定度向上

超電導発電機は鉄心を用いないため、同期リアクタンスが

現用発電機の1/3～1/5と小さい。このため、電力系統の安定度が向上し、系統で落雷等の事故が発生した場合に送電可能な電力が増大する。また、進相運転領域が拡大する。

### (2) 効率向上

界磁巻線に超電導導体を用いるので、電気抵抗が零となって励磁損失がなくなる。界磁巻線は液体ヘリウムで冷却され、水素ガスによる通風冷却が不要のため、送風動力が減少する。また、回転子が軽量化され、軸受の損失も減少する。損失合計は現用発電機の1/2以下になり、効率は99.5%程度に向上する。

### (3) 大容量化・小型軽量化

高磁界を発生する超電導界磁巻線によって発電機の出力密度が大幅に向上し、製作容量の限界が増大する。同一容量で比較すると、超電導発電機は現用発電機に対して質量が約60%に、軸長が約70%に減少する。

### (4) 高電圧化

超電導発電機には電機子巻線層を貫通する大地電位の鉄心歯部がないため、電気絶縁の距離を確保するのに有利であり、発電機の出力電圧を高電圧化できる可能性がある。

## 3. 超電導発電機の構造

超電導発電機は回転子の界磁巻線を超電導化した発電機である。固定子の電機子巻線には、交流を流せる実用的な超電導線が存在しないため、常電導線(銅線)を用いる。全体構造を図1に示す。

### 3.1 回転子

#### (1) 断熱構造

界磁巻線を極低温に保持するため、周囲の常温部からの熱侵入を極力抑制する必要がある。ヘリウムの蒸発量の低減は、発電機外部のヘリウム液化冷凍機の小形化及び動力の低減に有効である。

回転子は真空断熱層を設けた多重円筒構造である。対流による熱侵入抑制のため、巻線取付軸と常温ダンパ、端部軸で囲まれる空間は真空に保持する。また、巻線取付軸端部のトルクチューブは発電に必要なトルク伝達機能を害さない範囲で断面積を低減するとともに、表面に設けたらせん(螺旋)状の溝にガスヘリウムを流して冷却し、伝導熱の大部分を取り去る。常温ダンパから巻線取付軸へのふく(輻)射熱の大部分は室温と極低温(4K)の中間温度(80K程度)の低温ダンパで吸収する。

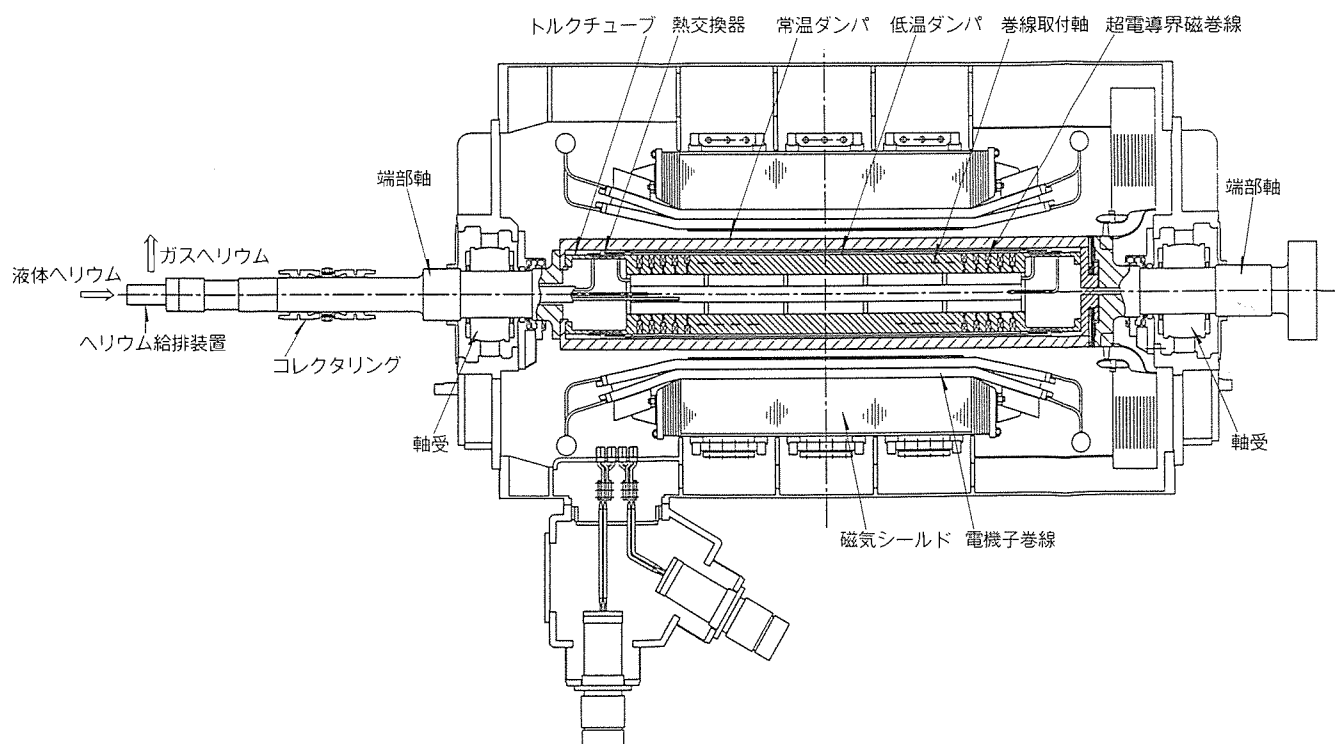


図1. 超電導発電機の全体構造

## (2) ヘリウム冷却システム

界磁巻線の冷却には回転子内のヘリウムに作用する高遠心力を利用した自然対流方式を採用している。

図2に示すように巻線取付軸の内径側には液体ヘリウムを蓄えるヘリウム槽を設け、超電導界磁巻線を納めたスロットと流路で結ぶ。遠心力により、密度の大きい液体ヘリウム(厳密に言えば超臨界ヘリウム)がヘリウム槽の外径側にたまり、円筒状の液面が生じる。液面の内径側には密度の小さいガスヘリウムがたまる。常温部からの侵入熱や界磁巻線の発熱で周囲の液体ヘリウムが加熱される。加熱され密度の減少した液体ヘリウムは内径側へ、また内径側の低温で密度の大きい液体ヘリウムは外径側へ移行する。この現象はサーモサイフォン効果と呼ばれ、高遠心力場ではわずかな温度変化で大きな対流が発生し、熱は迅速に内径側に運ばれる。この熱で蒸発したガスヘリウムはトルクチューブを介して機外に排出される。排出された量に相当する液体ヘリウムは、ヘリウム給排装置から供給される。

トルクチューブを流れるガスヘリウムには次のような作用がある。ヘリウム槽からトルクチューブの熱交換器入口への配管には低温で密度の大きなガスヘリウムが、トルクチューブ熱交換器出口から回転子中心部への配管には熱交換器で加熱され温度上昇した密度の小さなガスヘリウムが流れる。熱交換器前後の配管のヘリウムに働く遠心力に差が発生し、ヘリウム槽中心部の圧力は大気圧から減圧される。これをセルフポンプ効果と呼ぶ。ヘリウム槽の中心部は飽和蒸気の状態にあるので、ヘリウム温度が低下する。

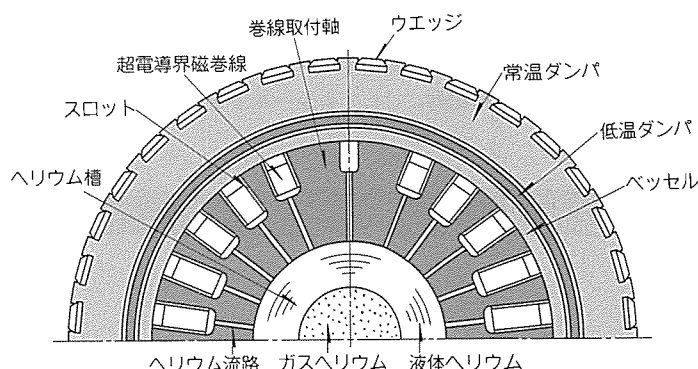


図2. 超電導発電機回転子の横断面

## (3) 超電導導体

回転子の限られたスペースに巻線するため、臨界電流密度の高い超電導導体が必要である。また、電力系統の短絡事故及び励磁制御により、超電導導体の電流及び磁界が急激に変動するため、変動磁界によって生じる超電導導体の交流損失を低減してクエンチを防止する必要がある。

高電流密度・低交流損失の要求を満たすため、図3、図4に示す構造の超電導導体を用いる。1本の導体は数本の素線をよ(撚)り合わせて平角に成形したものであり、導体を素線に細分することによって渦電流を低減する。素線は多数の細いNbTiフィラメントを安定化Cu及び高抵抗CuNiに埋め込みツイストしたもので、高抵抗のCuNi及びツイストの効果により、NbTiフィラメント間に流れる渦電流を低減する。

#### (4) 界磁巻線

超電導導体は温度が2K上がっただけでクエンチする可能性があるため、導体の効果的な冷却が必要である。また、運転中の界磁巻線には重力の3,000倍以上の巨大な遠心力が作用するため、強固に支持する必要がある。さらに、極低温では超電導導体の比熱がほとんど零になり、わずかな摩擦発熱で導体温度が上昇するため、クエンチの原因となる導体相互間の移動をなくすことが必要である。

界磁巻線は巻線取付軸の外周に加工したスロットそれぞれの中に数十ターンの超電導導体を巻いてコイルとし、これを接続したものである。超電導導体間には図5のように絶縁テープをスパイラル状にすかさせ巻きしており、そのすき(隙)間をヘリウム流路とする。液体ヘリウムは界磁巻線内部まで流入し、導体表面を直接冷却する。

巻線後に絶縁テープの樹脂を加熱硬化して超電導導体を相互に接着することで一体となった堅固な界磁巻線を形成する。この界磁巻線を巻線取付軸外側のベッセルで遠心力に対して支持する。

#### (5) ダンパ

ダンパは、系統事故時などに電機子巻線で発生し界磁巻線に向かう変動磁界をシールドして、超電導導体の交流損失及び巻線取付軸の渦電流損を抑制し、クエンチを防止する目的で設ける。ダンパは、電機子巻線からの変動磁界のみならず、界磁巻線からの磁界変動に対してもシールドとして機能する。



図3. 超電導導体の外観

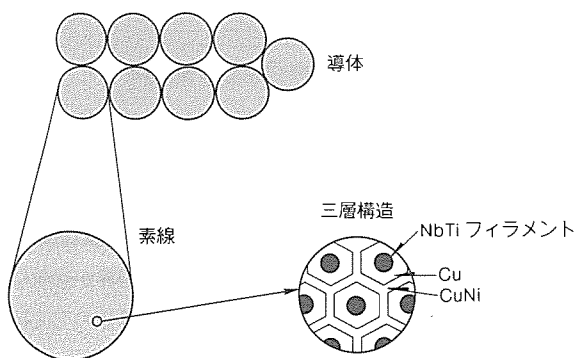


図4. 超電導導体の断面構成

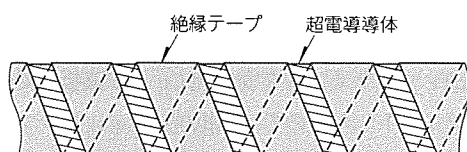


図5. 超電導導体の絶縁

過度のシールド作用は界磁磁束の変化を妨げるため、発電機の運転状況に応じて行う励磁制御の応答を低下させる。したがって、ダンパのシールド特性を過不足ない適切な値とすることが重要である。

また、短絡事故が生じた場合にはダンパをだ円形に変形させる電磁力が作用するため、ダンパには遠心力及び電磁力に対する機械強度が要求される。

常温ダンパは図6に示すかご(籠)型ダンパである。高強度非磁性円筒をダンパサポートとして用い機械強度を確保し、ダンパサポートにスロットを加工し、そこに良導電性のウエッジを納め、両側の軸端に短絡環(ダンパリング)を置いて籠型の電気回路を形成して磁界シールドの機能をもたせている。

低温ダンパには良導電性の高強度アルミニウム合金の円筒を適用し、常温ダンパを通過した低周波の変動磁界をシールドする。

#### (6) 回転子材料

回転子材料は常温から極低温までの範囲で高速心力、熱応

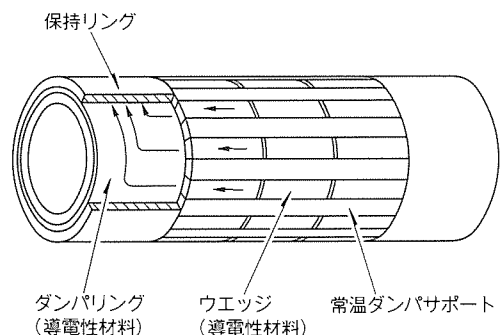


図6. 常温ダンパの構造

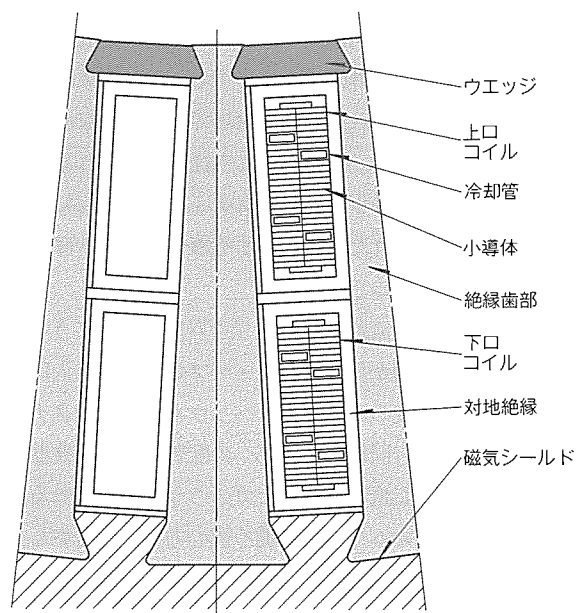


図7. 電機子巻線の構成



力及び発電機突発短絡時の過渡トルクに耐える十分な強度をもつこと、また極低温においてもじん（靱）性を保つこと、さらに溶接が可能であることが要求されている。これらの要求を満たす材料は非磁性の鉄基超合金等に限定される。この種の材料は特殊な用途に使用されるものであり、極低温での使用実績も少ない。

信頼性が高い回転子を製作するには、極低温での疲労強度あるいは溶接部の強度等の実測データの蓄積が必要である。

### 3.2 固定子

#### (1) 電機子巻線

鉄心の磁気飽和を避け、回転子の巨大な起磁力を有効に利用するため、電機子巻線には図7に示すようにコイルを支持する歯部に鉄心を用いない空けき（隙）巻線構造を採用する。歯部はFRPのような高強度絶縁材を使用する。電機子コイルは高磁界にさらされるため、渦電流と循環電流損の増大を抑制する工夫が必要である。このため電機子コイルは、図8に示すように直径1mm程度の銅の素線を撚り合わせた小導体を更にレーベル転位した二重転位構造とする。コイル内に配した冷却管に水を流して冷却する。

#### (2) 磁気シールド

発電機外部への磁束の漏れを防止するために電機子巻線の外周には磁気シールドを設ける。磁気シールドは主磁束が流

れる磁気回路の一部をも形成しており、高透磁率・低損失とするため積層のけい素鋼板を用いる。

### 4. ムーンライト計画における三菱電機の開発状況

当社は表1の仕様の7万kW級超電導発電機を設計するとともに、その回転子を製作する。この発電機は実用規模の20万kW級超電導発電機と径方向寸法を同一にして軸長を短縮したものであり、回転子の機械強度及び冷却特性に対する遠心力の効果を等価としている。

回転子製作の前段階として図9に示すように開発課題に対応して部分モデルで技術検証を実施しており、ロータ部分モデルを除いて検証試験を終えている。以下に主要な検証結果を述べる。

#### 4.1 回転コイルモデル

回転時は高遠心力が界磁巻線に作用して機械的な影響を及ぼすとともに、ヘリウムの温度、圧力及び熱伝達率といった冷却特性も静止時と異なるため、回転試験による通電特性の検証が必要である。そこで回転コイルモデルを製作し、回転時の回転子内ヘリウムの温度分布、コイルの通電特性の試験研究を実施した<sup>(6)</sup>。このモデルで超電導導体の構成、コイルに働く遠心力、液体ヘリウムの状態量は7万kW級超電導発電機を模擬したものとしている。

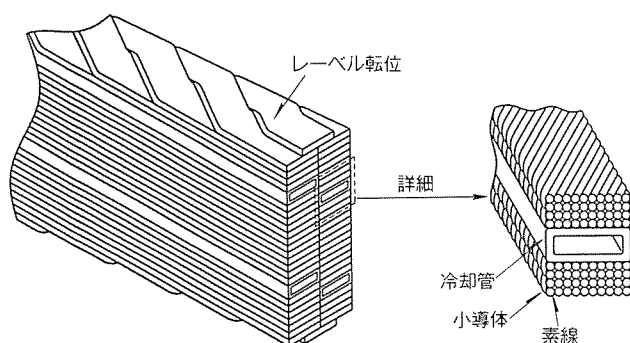


図8. 電機子コイルの構造

表1. 7万kW級超電導発電機の設計仕様

容 量	(MVA)	83
出 力	(MW)	75
電 圧	(kV)	10
電 流	(A)	4,792
力 率		0.9
極 数		2
周波数	(Hz)	60
回転数	(r/min)	3,600
同期リアクタンス	(pu)	0.35

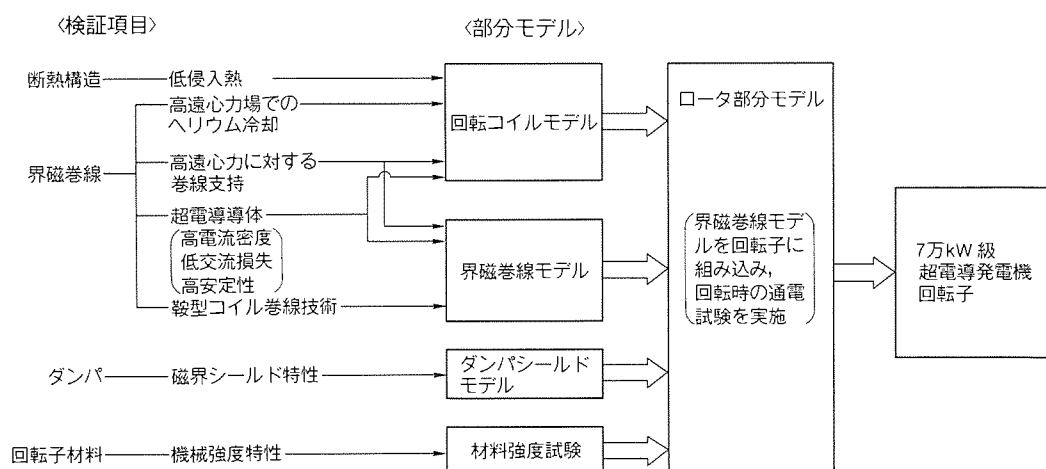


図9. 検証項目と部分モデル

図10に示す回転コイルモデルは超電導発電機とほぼ同一構造の多重円筒の回転子である。コイルの平均回転半径を200 mm、また定格回転数を3,600 r/min とすることにより、コイル周辺のヘリウムは0.23 MPa {2.3 気圧} 以上の超臨界の状態になるようにした。

回転コイルモデルのコイルの諸元を表2に示す。形状は図11に示すレーストラック型コイルである。7万kW級超電導発電機と比較すると、回転コイルモデルはコイルの断面積を同等としてアンペアターン及び遠心力を等価とした。また、超電導導体の電流密度及び交流損失も同等とした。なお、試験装置の制約でクエンチ電流を3,000 A程度に制限するため、導体の断面積は約1/2とし、その代わりにターン数を約2倍にした。

試験には世界初といえる回転中の電流クエンチ試験を含んでおり、貴重なデータが得られた。主要な試験結果を以下に述べる。

#### (1) ヘリウム温度

遠心力の影響で回転子の内径側には密度の小さいガスヘリウムが、外径側には密度の大きな液体ヘリウムが蓄えられる。ガスヘリウムと液体ヘリウムの界面である液面は、ヘリウム槽へのヘリウム供給部の半径位置で回転子内のヘリウム圧力と供給されるヘリウム圧力が釣り合うように形成される。

回転子内のヘリウムの温度分布は次のようにして求める。回転子の軸中心のガスヘリウム圧力はトルクチューブ熱交換器の入口側と出口側の配管を流れるヘリウムの密度差によるセルフポンプ効果によって算出される。任意の半径位置のガスヘリウムの圧力は、ガスヘリウムに作用する遠心力を軸中心から積分することで算出される。ヘリウム槽のガスヘリウムは飽和蒸気の状態にあると仮定すれば、圧力が定まれば温度を含むガスヘリウムの状態量が定まる。液面位置での飽和蒸気の状態量を算出すれば、飽和液の状態量も定まる。液体ヘリウムは高遠心力によって半径方向には大きな圧力こう配が生じており、流れに沿って圧縮と膨張を行い、エンタルピーが変化する。任意の半径位置でのエンタルピーは液面でのエンタルピー、液面との半径の差及び回転数から算出される。ヘリウムの熱伝導率が小さいことを考慮すると、圧縮や膨張は断熱可逆過程と考えられ、エントロピーは一定と仮定できる。エンタルピーとエントロピーの二つの状態量が定ま

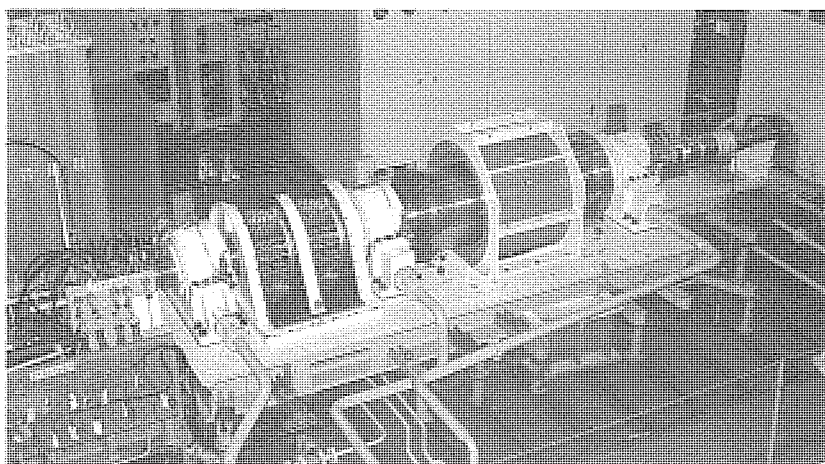


図10. 回転コイルモデルの外観

表2. コイル及び超電導導体の諸元

	回転コイル モデル	界磁巻線モデル	7万kW級 超電導発電機
コイル形状	レーストラック型	鞍型	鞍型
コイル数	2	4	10
コイル長さ (m)	0.28	0.76	1.9
1コイルのターン数	192	90	90
最大コイルエネルギー (MJ)	0.06	0.9	5.4
NbTi フィラメント径 (μm)	7	9	9
Cu/CuNi/NbTi 比	2/1/1	2/1/1	2/1/1
素線直径 (mm)	1.24	1.6	1.6
素線本数	7	9	9
導体外形寸法 (mm)	2.35×4.5	2.9×7.4	2.9×7.4
臨界電流 (A) (5Tにおいて)	4,410	10,500	10,500
交流損失 (kW/m³) (4.5T, 5T/sにおいて)	25	25	25

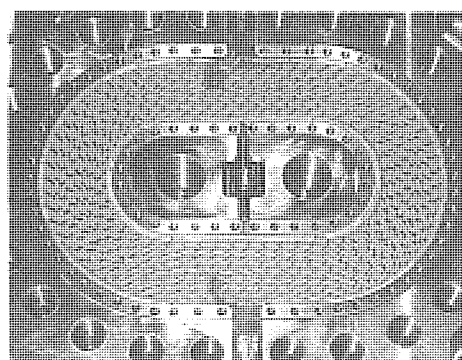


図11. 回転コイルモデルのコイル外観

れば、温度を含む液体ヘリウムの状態量が定まる。

ヘリウムの温度分布を図12に示す。軸中心部の温度はセルフポンプ効果による減圧作用で大気圧での沸点4.2Kより低下している。界磁巻線のコイル部分の温度は4.5K程度であり、回転子内のヘリウム冷却システムが理論どおり機能することが検証できた。

## (2) 通電特性

通電試験結果を図13に示す。回転時のクエンチ電流は静止時と同等であった。また、変動磁界をコイルに加えるパルス励磁を実施した。電力系統の事故の中で変動磁界が最大となるのは発電所近傍の送電線で三相短絡が発生する場合であり、短絡除去までの67 ms 間に磁界が4.5 Tから4.8 Tに変化し、変化率は5 T/s になると想定される。試験では22 T/s の変動磁界を与えたが、静止時と同様クエンチに至らなかった。以上から回転コイルモデルの超電導体構成及び支持・冷却方式は高遠心力場に適用できることを検証した。

## (3) クエンチ時の挙動

クエンチ時には超電導体が発熱し、コイル温度が上昇するとともにヘリウムが急激に蒸発してヘリウム槽及びヘリウム配管の圧力が増大する。定格回転及び低速回転を合わせ

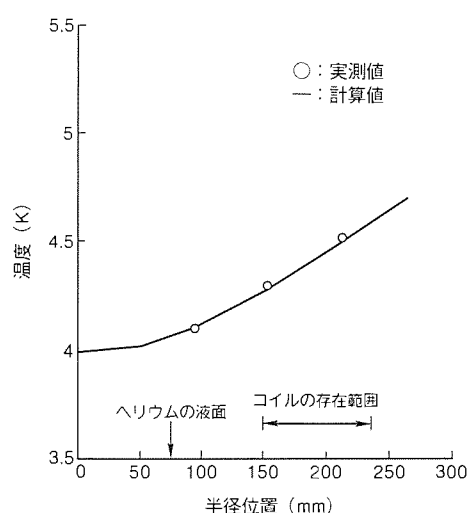


図12. 3,600 r/min における回転子内温度分布

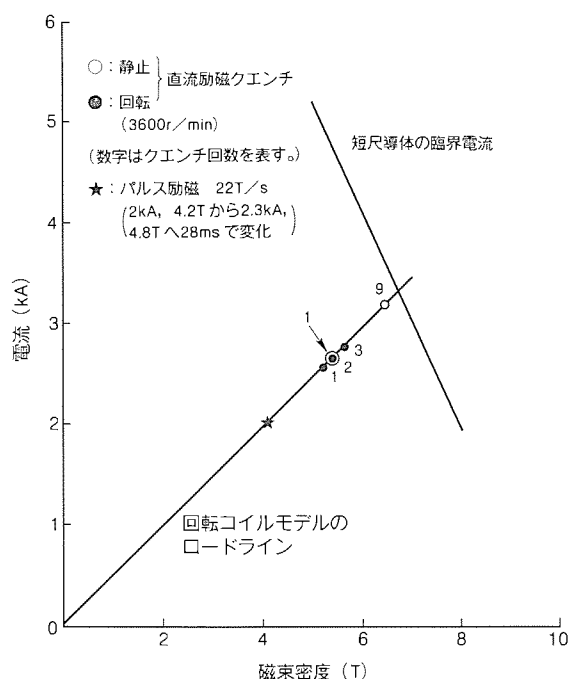


図13. 回転コイルモデルのクエンチ電流

37回のクエンチを行ったが、コイルの通電特性及び回転コイルモデルに異常はみられず、クエンチに対する十分な耐力をもつことを確認した。

## (4) 軸振動特性

回転コイルモデルの軸振動値は、常温及び極低温のいずれの状態でも回転数の全域で全振幅5/100 mm 以下と現用発電機と同等のレベルであった。バランス調整は常温で1回実施しただけであり、冷却後の振動変化は小さかった。また、クエンチ時の振動変化も図14に示すように小さかった。

以上から室温と極低温との温度差に基づく回転子の軸曲がり、またクエンチ時のヘリウム蒸発に伴う質量不釣り合いはいずれも問題ない値であり、軸振動特性が良好であることを確認した。

## 4.2 界磁巻線モデル

コイル形状がくま(鞍)型である界磁巻線の通電特性を検証するため、図15に示す界磁巻線モデルの製作・試験を実施した。界磁巻線モデルは図16及び前出の表2に示すように7万kW級超電導発電機の界磁巻線と直径を同一とし、軸方向長さを短縮したものである。コイル数は4個とし、7万kW級超電導発電機より減らしている。使用した超電導導体の寸法、臨界電流及び交流損失は7万kW級超電導発電機と同一の仕様である。

鞍型コイルは円筒表面にコイルを設置した形状であり、回転コイルモデルに用いた平面的なレーストラック型コイルに比べると高度な巻線技術が必要である。なお、界磁巻線モデルは回転コイルモデルと比べ、コイルエネルギーで約14倍

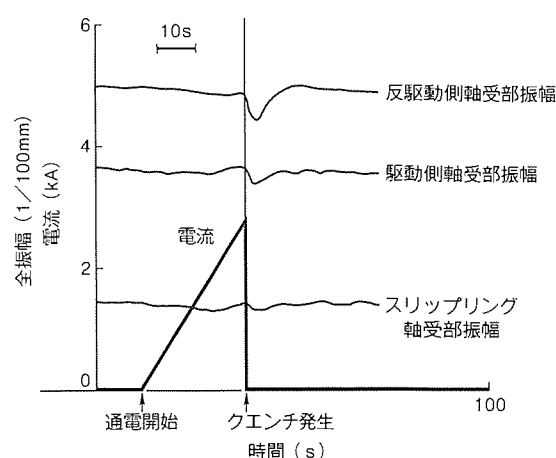


図14. 回転コイルモデルのクエンチ時の軸振動

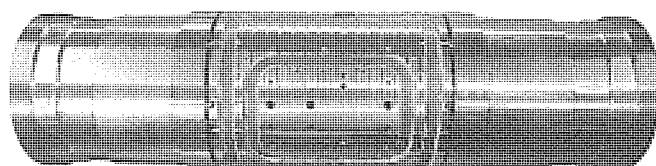


図15. 界磁巻線モデルの外観

の大型のモデルである。

このモデルをクライオスタットに入れて静止状態での通電試験を実施した。

#### (1) クエンチ電流

図17に示すとおり、クエンチ電流は3回のトレーニングで短尺導体の臨界電流のほぼ100%に達した。さらに、続けて4回のクエンチを発生させたが、クエンチ電流は低下することなく安定しており、界磁巻線が強固に支持されていることを確認した。7万kW級超電導発電機の定格運転時の界磁巻線の動作点は3kA、4.5Tであり、ロードライン上の臨界電流の約60%である。界磁巻線モデルのロードライン上で同じ割合になる定格相当点は3.7kA、4.4Tであり、クエンチ点はこれに対し十分な裕度をもつことも確認した。

#### (2) 変動磁界に対する安定性

電力系統事故時の電流及び磁界の変化に対する安定性を確認するため、電流を急変させるパルス励磁試験を行った。電力系統事故時に実機で想定される磁界変動5T/s(67ms間)を定格相当点で与えたが、クエンチは発生しなかった。これは変動磁界に対する交流損失による温度上昇が小さいことを示しており、超電導導体の構成及び冷却が適切であることを確認できた。なお、電源装置の制約から界磁巻線モデルに加えた磁界変動は最大5T/sであるが、回転コイルモデルの試験結果からみて、界磁巻線モデルの磁界変動の許容限界も22T/s以上にあると推定できる。

以上の試験により、超電導導体の構成及び鞍型コイルの巻線方法は適切であり、7万kW級超電導発電機の界磁巻線に適用可能である見通しを得た。

このモデルはロータ部分モデルに組み込み、回転コイルモデルと同様、遠心力場での通電特性の検証を行う予定である。

#### 4.3 ダンパシールドモデル

ダンパの磁界シールド特性を検証する目的で図18に示すダンパシールドモデルの製作・試験を実施した<sup>(7)</sup>。モデルは籠型の常温ダンパと単層の低温ダンパからなり、外径寸法及び軸長は7万kW級超電導発電機のダンパの約1/2とした。磁界シールド特性を実機並みとするため、ダンパウエッジ、短絡環、低温ダンパ等のダンパ電流が流れる部分の厚さは実機並みとするとともに、使用材料は電気抵抗が等しくなるよう選定した。このモデルに外部から1~120Hzの変動磁界を与えて、モデル各部の磁束密度、ダンパ電流及び温度を計測した。

図19は磁界の減衰比の測定結果を示す。電力系統の事故又は不平衡負荷が生じた場合、電機子巻線は回転と同期しない磁界を発生し、回転子に対して60Hz及び120Hzの変動

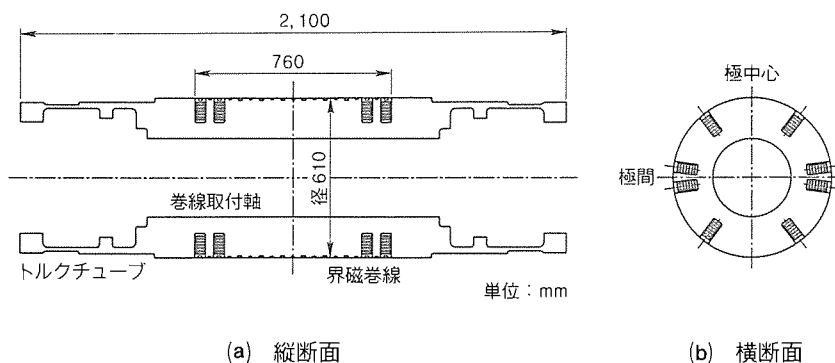


図16. 界磁巻線モデルの断面

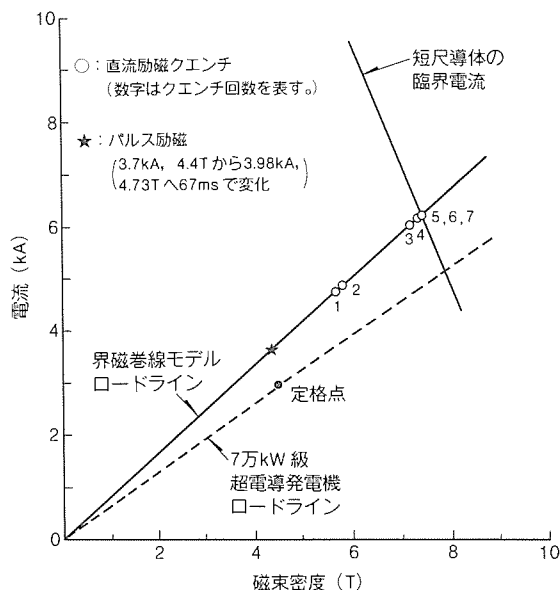


図17. 界磁巻線モデルの通電特性

磁界を加える。これらの磁界に対するダンパの減衰比は60Hzで0.005、また120Hzで0.0012であり、変動磁界を大幅に減衰させる。一方、1Hz以下の変動磁界に対する減衰比はほぼ1、すなわち磁界が減衰することなくダンパを透過できるため励磁制御に悪影響を与えないことを示している。周波数によって減衰比が変化するのは、磁界の表皮効果による。磁界はダンパ表面から内部に入ると指数関数的に減少する。周波数が高ければ磁界が侵入する深さが小さくなるため、ダンパを透過する磁界が減少する。

シールド特性の解析では端部の短絡環を通る電流回路を考慮する必要がある。試験結果と有限要素法による胴部の二次元解析結果との対比から、端部の電流回路の抵抗が把握でき、これを考慮することにより、比較的簡単な二次元解析でシールド性能を正確に評価できるようになった。

以上のモデル試験により、籠型ダンパを用いて適切なシールド特性が得られることを確認するとともに、籠型ダンパの設計・解析技術を確立した。

#### 4.4 回転子材料の機械強度特性試験

回転子を設計する上で必要な機械強度データの蓄積のため、

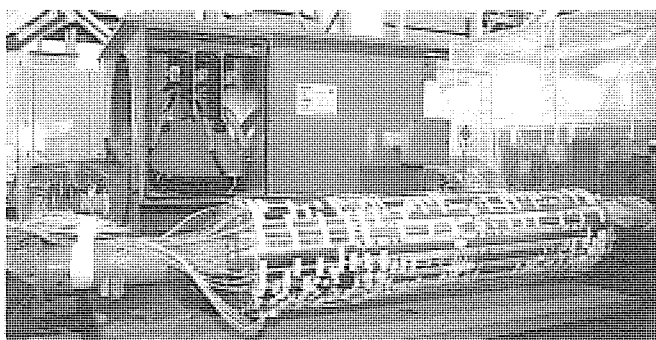


図18. ダンパシールドモデルの外観

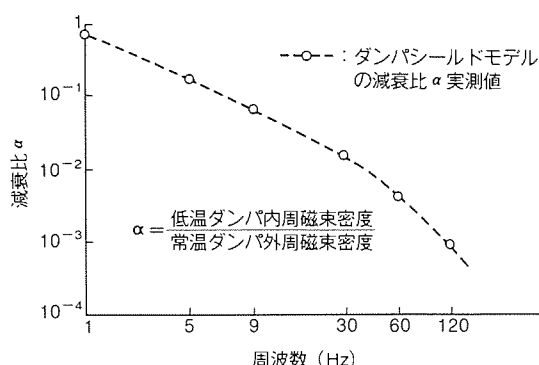


図19. ダンパシールドモデルの磁界シールド特性

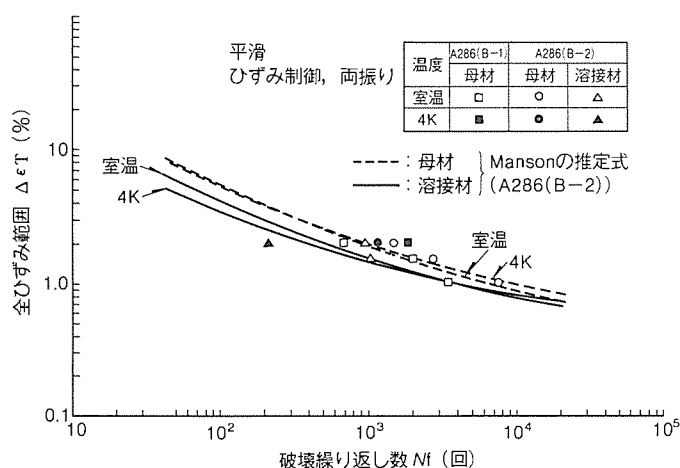


図20. 巻線取付軸材料の低サイクル疲労試験結果

回転子に使用する鉄基超合金，アルミニウム合金，チタン合金及び銅合金の材料特性試験を実施した。一例として，鉄基超合金の試験について紹介する<sup>(8)</sup>。

鉄基超合金 A286 は室温及び極低温で高強度をもち，かつ低温で十分な靱性をもつため，巻線取付軸，トルクチューブ，常温ダンパサポート等に使用する。溶接性，切削性を改善するため化学成分 (B, Ni, Ti) を調整した A286 を選定して，室温，77 K (液体窒素温度)，4 K (液体ヘリウム温度) の各温度条件で，引張り，シャルビ衝撃，破壊靱性，低サイクル疲労，亀裂進展速度の各項目について試験した。また，A286

相互の溶接部，A286 とステンレス鋼との管溶接継手についても同様の機械特性のデータを得た。

図20に A286 の母材と溶接材の低サイクル疲労試験結果を示す。遠心力による応力の繰返し回数は毎日起動停止を行う DSS 運転では30年間に約10,000回になる。これらの運転条件に対し，今回蓄積した特性データを反映させて信頼性の向上を図る。

## 5. む す び

以上，ムーンライト計画の一環として進めてきた超電導発電機の技術開発について述べた。7万 kW 級超電導発電機のフィールド試験によって信頼性を検証し，次のステップで実用規模の20万 kW 級超電導発電機の特性及び信頼性が実証できれば，実用化の可能性が広がるものと考えられる。

今後とも，超電導発電機の技術課題を一つ一つ検証しながら地道に開発を進めていく予定であり，関係各位の御指導，御鞭撻をお願いする次第である。

## 参 考 文 献

- (1) 岩本雅民，藤野治之：6 MVA 超電導発電機の試作研究，低温工学，10，No. 5，169～179 (1975)
- (2) 岩本雅民，中村史朗，山田忠利，野村達衛，藤野治之，石原 昭，新藤義彦，吉村秀人：30 MVA 超電導同期調相機の電磁特性，電気学会論文誌 D，107，No. 4，511～516 (1987)
- (3) 小川哲治：軌道に乗った超電導発電機開発，電気学会雑誌，111，No. 6，487～490 (1991)
- (4) 上田明紀，兔太 亨，平尾俊樹，岡本紘一，中村史朗：超電導発電機，三菱電機技報，57，No. 12，838～843 (1983)
- (5) 上田明紀，平尾俊樹，竹下寿英：600 MW 超電導発電機の概念設計，電気学会論文誌 D，109，No. 8，565～572 (1989)
- (6) 上田明紀，平尾俊樹，小林 俊，吉村秀人，守田正夫，中林幸夫：超電導発電機界磁巻線の高遠心力下における性能，電気学会研究会資料回転機研究会 RM-91-138 (1991)
- (7) 前田 進，泉昭 文，上田明紀，阪部茂一，米谷晴之，野村達衛，田中正昭：超電導発電機のかご型ダンパ構造の実験研究，電気学会論文誌 B，111，No. 4，381～388 (1991)
- (8) 平賀啓二郎，緒形俊夫，長井 寿，由利哲美，石川圭介，吉岡純夫，井上彰夫，高柳貞敏：A286 合金溶接材の4 K および300 K における機械的性質と低サイクル疲労強度，鉄と鉄鋼，73，No. 14，158～165 (1987)



# 超電導の交流応用

守田正夫\* 久保芳生\*\*\*  
中村史朗\* 藤原康夫+  
山田忠利\*\* 岸田卓也++

## 1. ま え が き

フランスで素線径が0.1 mm でフィラメント径がサブミクロンの超極細多心線が開発されて以来<sup>(1)</sup>，交流超電導の研究が盛んに行われるようになった。最近では変圧器などの交流機器への適用を目指した研究が行われている。現在，直流用として実用化されている超電導材料は，合金系の NbTi と化合物系の Nb<sub>3</sub>Sn である。交流用超電導体としてもこれら2種類の超電導体がいられる。交流用 NbTi 超電導体を用いた応用研究は多くの研究機関で行われている。筆者等は NbTi 超電導体に比べて臨界温度の高い，すなわち温度上昇に対する安定性の高い Nb<sub>3</sub>Sn 超電導体の交流への適用可能性について研究を行っている。

Nb<sub>3</sub>Sn 超電導体が交流用として適用可能かどうかを調べるために，まず素線を試作してその超電導特性を調べた。次に素線をより(撚)線してケーブルを作り，交流運転を実証するコイルを試作して交流 60 Hz で運転を行った。この論文ではこれらの実験結果について述べる。また，275 kV，300 MVA 超電導変圧器の概念設計を行い，超電導変圧器の利点について調べた。なお，上述の結果をふまえ，現在 333 kVA の容量をもつ実験用超電導変圧器を製作中である。

## 2. Nb<sub>3</sub>Sn 超電導線

### 2.1 超電導線の構造

#### 2.1.1 素線の構造

Nb フィラメントの極細化が可能な内部拡散法を用いて Nb<sub>3</sub>Sn 超電導素線(以下“素線”という)を試作した<sup>(2)</sup>。試作した素線の諸元を表1に示す。また，Nb<sub>3</sub>Sn 生成熱処理前の最終線引された素線の断面を図1に示す。Nb フィラメント径が細いほどヒステリシス損失は小さくなる。この素線では，加工性を考慮して Nb

表1. 素線の諸元

素線径(mm)	0.2
フィラメント径(μm)	0.4
フィラメント数(本)	17,020
フィラメント間隔(μm)	0.57
ツイストピッチ(mm)	2
Nb 占積率(%)	6

フィラメント径の設計値を 0.4 μm とした。

素線は 37 本の基本モジュールで構成されている。基本モジュールはマトリクス(Nb<sub>3</sub>Sn 生成熱処理前は Cu，熱処理後は CuSn) 中に Nb フィラメントが 460 本埋設されたものであり，その中心には Sn が配置されている。なお，表中に示したフィラメント間隔は，素線の断面を観察して数か所実測した平均値である。

また，Nb<sub>3</sub>Sn 生成熱処理を行うと，この素線のマトリクス中の Cu はすべて CuSn に置換される。つまり，熱処理後の素線は安定化銅がない構造である。

#### 2.1.2 ケーブルの構造

素線を 7 本撚り(以下“一次撚線”という)し，さらに 7 本撚り(計 49 本)した撚線(以下“ケーブル”という)を試作した。ケーブルの構成を図2に示す。ケーブルの絶縁には高温熱処理に耐える絶縁材であるガラスを用いた。なお，一次撚線のツイストピッチは 6 mm，ケーブルのツイストピッチは 22 mm である。

### 2.2 超電導線の特性

#### 2.2.1 臨界電流特性

バイアス磁界中における素線の臨界電流密度を四端子法で測定した。測定結果を図3に示す。なお，バイアス磁界及び素線への通電電流は直流であり，熱処理条件は 630℃，24 時間である。この熱処理条件における素線の全断面積当たりの臨界電流密度は，1 T において 2,050 A/mm<sup>2</sup> であった。Nb の全断面積(設計値)当たりの臨界電流密度に換算すると 34,000 A/mm<sup>2</sup> となる。

#### 2.2.2 交流損失特性

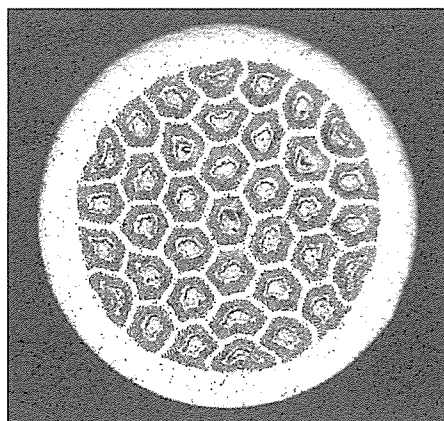


図1. 素線の断面

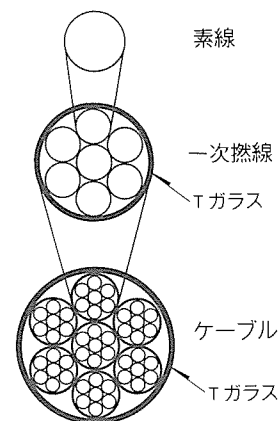


図2. ケーブルの構成

通電電流がゼロの場合における素線、一次撚線及びケーブルの60 Hz における1 サイクル当たりの交流損失を、磁化法によって測定した。結果を図4に示す。横軸は外部磁界のピーク値、縦軸は1 サイクルにおける素線の単位体積当たりの損失であり、図中に示した破線は臨界状態モデルの計算値である。素線、一次撚線及びケーブルともに同様の交流損失であり、ケーブル化による交流損失の増加は認められなかった。

なお、交流損失の実測値は計算値よりも5 倍程度大きいと考えられる。この理由は、フィラメント径が不ぞろい及び偏平であること(断面観察結果)に起因すると推測される。

今後、加工性を改善することにより、交流損失を計算値に近い値まで低減できる。

### 3. 交流運転実証コイル

#### 3.1 コイルの諸元

素線を49 本撚りしたケーブルを用いて交流用  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  コイル(以下“コイル”という。)を、巻線後  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  生成熱処理を行う方法によって試作した<sup>(2)</sup>。諸元を表2に、外観を図5に示す。コイルは内径156 mm, 外径188 mm, 高さ34 mm, 17 ターン×4 層である。交流60 Hz で用いること及び巻線後高温で熱処理を行うことから、渦電流損失がなく耐熱温度が高いセラミック製の巻枠を用いた。

巻線部の各層間及び巻枠のフランジ部には、スペーサを設置し、冷却チャンネルとした。層間スペーサの厚さは3 mm とし、円周方向に24 個設置した。巻枠のフランジ部のスペーサは厚さ5 mm とし、層間スペーサと同数設置した。

コイルを熱処理した後、エポキシで含浸した。なお、コイルの熱処理条件は素線の場合と同様630 °C, 24 時間である。含浸されるとターン間にはエポキシで完全に固定され、層間は液体ヘリウムで満たされるよう冷却チャンネルが確保されている。

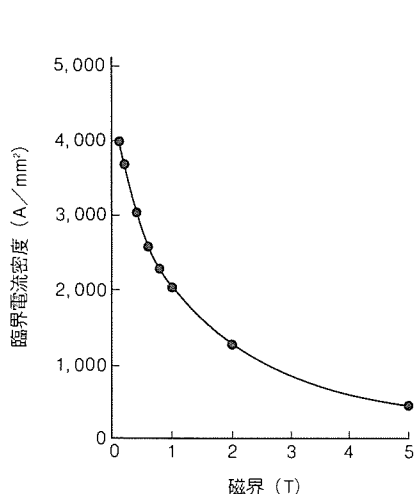


図3. 素線の臨界電流密度

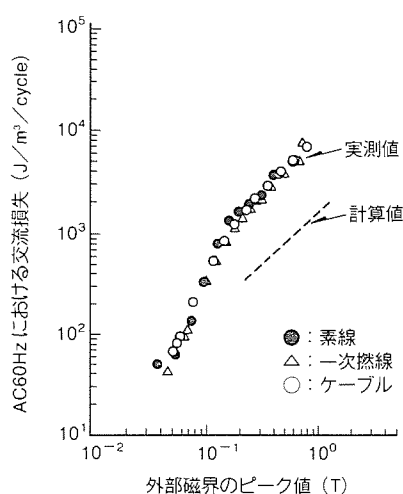


図4. 交流損失特性

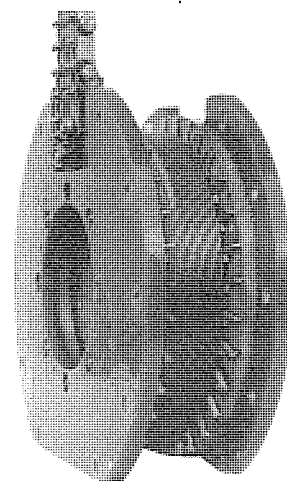


図5. コイルの外観

#### 3.2 コイルの運転特性

コイルに約10 A/s の掃引速度で電流を通電し、クエンチ(コイルが常電導転移を起こすこと)電流値を調べた(直流クエンチ電流という。)。また、60 Hz の交流電流を通電してクエンチ電流値を調べた(交流クエンチ電流という。)。直流クエンチ電流測定結果及び交流クエンチ電流測定結果を図6に示す。交流クエンチ電流の場合には縦軸、横軸共にピーク値を表している。図中に示した実線は、ケーブルに垂直方向に直流磁界を印加して測定した臨界電流である。破線は素線に垂直方向に直流磁界を印加して測定した臨界電流を49 倍(ケーブルの素線数)したものである。また、●印に付けた番号は直流クエンチの順番を示す。ケーブルの臨界電流(5  $\mu\text{V}/\text{cm}$  の判定基準)まで電流を通電できた。

直流クエンチ電流は、クエンチ回数を重ねると少し上昇し、コイルの逆トレーニングは観測されなかった。なお、ケーブルの臨界電流と素線の臨界電流を49 倍したものは、ほぼ同じである。したがって、撚線化に伴う臨界電流の劣化は認められなかった。

交流クエンチ電流の測定結果も図6に示した。コイルのクエンチ電流値は340 A (rms) である。数回クエンチを繰り返したが全く同じ電流値であった。素線の外径断面積当たりの電流密度にすると221 A (rms)/ $\text{mm}^2$  となる。また、Nb の全断面積(設計値)当たりの電流密度に換算すると3,680 A

表2. コイルの諸元

内 径(mm)	156
外 径(mm)	188
高 さ(mm)	34
ターン数	68
インダクタンス(mH)	1.05
巻線部最高磁界(T)	0.6 (peak) at 340A (rms)
巻線部中心磁界(T)	0.24 (peak) at 340A (rms)

(rms)/mm<sup>2</sup>となる。

交流クエンチ時のコイルの容量は48kVAである。Nb<sub>3</sub>Snコイルでは、この値は世界で最大の規模である。このコイルの交流運転によって、初めてNb<sub>3</sub>Snが交流で使用できることが明らかになったといえる。

なお、交流クエンチ電流が直流クエンチ電流に比べて低い原因は、ケーブルの交流損失によるものである。これは、一次熱線に絶縁を施していないケーブルを用いたためである。一次熱線を絶縁したケーブルを用いることにより、交流クエンチ電流値は増加するものと考えられる。

#### 4. 超電導変圧器

##### 4.1 275 kV, 300 MVA 器の概念設計

275 kV, 300 MVA 超電導変圧器の概念設計を行い、重量や損失を従来器と比較することにより、超電導化による利点を明らかにした<sup>(3)</sup>。

##### 4.1.1 概念設計の基本思想

“損失低減”と“輸送重量の低減”を設計の基本思想とした。

(1) 損失低減策は次のとおりである。

- 超電導線の交流損失の低減
- 超電導線が経験する磁束密度を小さくする。
- 銅機械化で鉄心の量を少なくして常温に設置する。
- 渦電流損失の低減のため構造物は極力非金属とする。

(2) 輸送重量の低減策は以下のとおりである。

- 鉄心の量を減らす。
- 液体ヘリウムと絶縁物の複合系で耐電圧を確保する。

##### 4.1.2 概念設計の条件

以下に示す定格の超電導変圧器の概念設計を行った。変圧器の形式としてコイル群数の多群化で巻線の経験する磁界を小さくしやすい外鉄形を採用した。

- 高圧：275 kV, 300 MVA

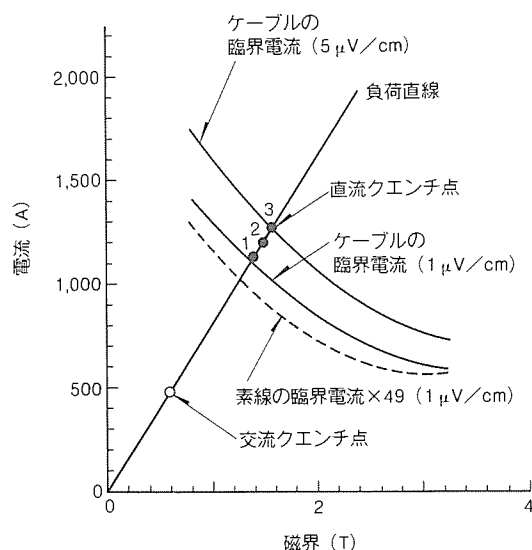


図6. コイルの通電特性

- 中圧：77 kV, 300 MVA
- 低圧：22 kV, 90 MVA
- インピーダンス：18 %

なお、設計条件として次の事項を設定した。

- (1) 短絡電流：外部装置で定格電流の2倍以下に抑制する。
- (2) 電流密度：ストランド当たり 300 A/mm<sup>2</sup>  
ケーブル当たり 120 A/mm<sup>2</sup>
- (3) 超電導線が経験する磁束密度：0.1 T
- (4) 超電導線の交流損失：6.6 kW/m<sup>3</sup> at 0.1 T
- (5) 冷凍機入力変換乗数：LHe：500, LN<sub>2</sub>：10

##### 4.1.3 概念設計結果

三相を常温部で結線する方式の超電導変圧器と従来器の比較を表3に示す。また、構造を図7に示す。超電導変圧器では負荷損がほとんどゼロになるとともに、無負荷損も大幅に減少する。一方、補機損は大きく増加する。これは低温部で発生した負荷損や常温からの熱侵入を除去するための冷凍機の電力である。変圧器の超電導化によって損失は約40 %に減少する(100 %負荷の場合)。また、超電導線の損失が小さいから導体量を増やして鉄心を少なくすることにより、輸送重量を約40 %に減少できる。

##### 4.2 実験用超電導変圧器

今までに述べた交流用Nb<sub>3</sub>Sn超電導線、コイル及び概念設計結果をふまえて、現在実験用超電導変圧器を製作中である<sup>(4)</sup>。この超電導変圧器は、大電流の実証ができるものである。また、大容量器を想定して外鉄形を採用した。容量を三相1,000 kVAの1相分(333 kVA)とした。諸元を表4に、断面を図8に示す。コイル群を6 HL(高圧、低圧コイル対

表3. 275kV 300MVA 超電導変圧器と従来器の比較

		超電導器	従来器
インピーダンス (%)		18	18
材 料	鉄心 (kg)	22,000	83,000
	導線 (kg)	4,000	30,000
	絶縁物 (L)	8,000	12,000
	絶縁油 (L)	—	44,000
	液体 He (L)	12,000	—
	液体 N <sub>2</sub> (L)	4,000	—
輸送重量 (t)		70	165
電流密度* (A/mm <sup>2</sup> )		120	3.5
交互配置数		16	4
空間磁束密度 (T)		0.1	0.21
損 失	無負荷損 (kW)	40	160
	負荷損 (kW)	0.6	1,000
	補機損 (kW)	450	40
	全損失 (kW)		
	100 % 負荷時	490.6	1,200
	50 % 負荷時	215	450

注 \* 導体外形当たり

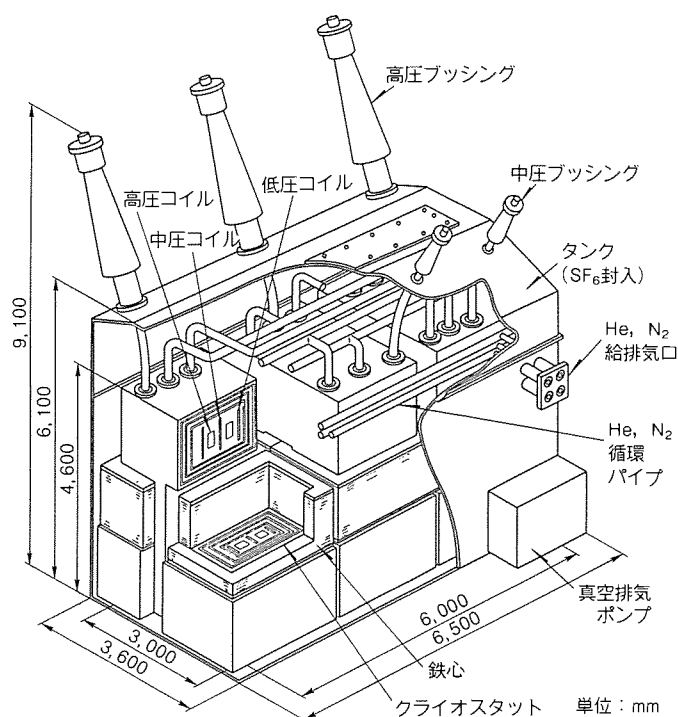


図7. 275kV, 300MVA 超電導変圧器の構造  
(三相常温部結線方式)

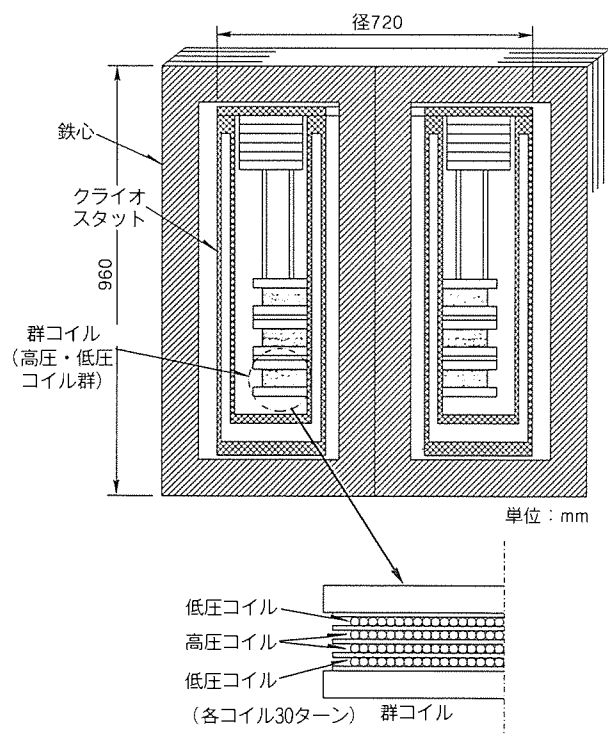


図8. 実験用超電導変圧器の断面

表4. 実験用超電導変圧器の諸元

容量 (kVA)	1,000/3 (単相)
電圧 (V)	440/220
電流 (A)	758/1,515
コイル	
巻線方式	パンケーキ巻
高圧コイル	2 直列 3 並列結線
低圧コイル	6 並列結線
全重量 (kg)	700

向部が6対)として巻線経験磁束密度を0.21 Tとした。6 HL とすることにより、高圧・低圧コイルともに並列巻線となり、ケーブル当たりの電流値を抑制できる。

## 5. む す び

交流用  $Nb_3Sn$  コイルを試作し、それを60 Hz で運転することにより、 $Nb_3Sn$  超電導体が交流用として使用できることを明らかにした。また、275 kV, 300 MVA 超電導変圧器の概念設計を行い、超電導変圧器の利点は損失の低減と輸送重量の低減であることを明らかにした。なお、これらの結果をふまえて、現在製作中である333 kVA の容量をもつ実験用超電導変圧器の試験を行うことにより、 $Nb_3Sn$  超電導線の交流への応用が一段と進歩するものと確信する。

## 参 考 文 献

- (1) Dubots, P., Fevrier, A., Renard, J. C., Goyer, J. C., Hoang Gia Ky : Behaviour of Multifilamentary Nb-Ti Conductors with Very Fine Filaments under A. C. Magnetic Fields, MT-8 Conference, Grenoble Sept. 467~470 (1983)
- (2) 岸田卓也, 垣内 隆, 水口大和, 守田正夫, 山田忠利, 尾原昭徳, 藤原康夫, 藤原二三夫, 吉崎 浄: 交流用  $Nb_3Sn$  コイルに関する研究, 低温工学, **26**, No. 3, 197~203 (1991)
- (3) 林 茂明, 斎川康二, 岸田卓也, 山田忠利, 尾原昭徳, 守田正夫, 塩野克己, 光庵豊一, 中澤宏司: 275 kV 300 MVA 外鉄形超電導変圧器の概念設計, 電気関係学会関西支部連合大会, G 3-8 (1988)
- (4) 岸田卓也, 垣内 隆, 原口英二, 守田正夫, 藤原康夫, 久保芳生, 中村史朗, 山田忠利:  $Nb_3Sn$  超電導線を用いた実験用外鉄形超電導変圧器の設計, 電気学会全国大会, 923 (1992)

# MRI 用超電導マグネット

渡邊次男\* 島田友二\*  
武智盛明\* 山田忠利\*\*  
森津一樹\* 中村史朗\*\*\*

## 1. ま え が き

MRI (Magnetic Resonance Imaging: 磁気共鳴イメージング) システムは、生体組織中の原子核の磁気共鳴現象を利用して人体の断層撮影を行うもので、新しい医用画像診断装置として期待を集めている。マグネットはMRIシステムの重要な構成要素であり、磁界の強度、磁界均一度、磁界安定度について極めて高度な特性が要求される。MRI用マグネットとして、永久磁石、常電導マグネット、そして超電導マグネットが実用化され、MRIシステムの国内での稼働台数は1,000台を超えた。そのうち、超電導マグネットを用いたシステムが750台以上を占めており、MRIシステムの主流であるといえる。超電導マグネットがこれほどまでに多数用いられるようになったのは、磁界特性の観点からMRIシステムの要求に超電導マグネットの特長が正にピッタリと適合していること、また近年の超電導マグネットの技術進歩がMRIの普及に寄与したことによるものと考えられる。

当社では三十数年間にわたる超電導技術・極低温技術の蓄積を基に、市場要求にこたえるべく医用機器として使いやすく、信頼性の高いMRI用超電導マグネットを製品化し、国内外の多数の病院に納入し順調に稼働中である。本稿では、当社最新のMRI用超電導マグネットの特長を紹介し、次に今後の取組について述べる。

## 2. MRIシステムの原理と構成

図1にMRIの原理を簡単に図示する。人体組織中には、水の分子を構成する多数の水素核が存在している。この水素核は磁気モーメントをもっているが、磁界のない熱平衡状態では磁気モーメントの方向は無秩序となっている。人体に一

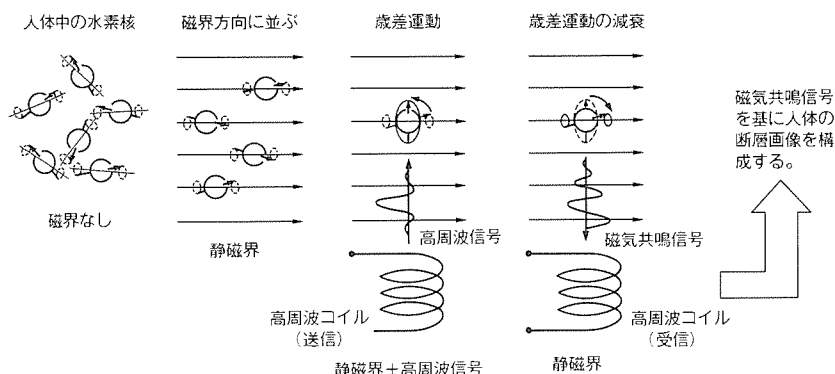


図1. MRIの原理

様な静磁界を印加すると、水素核の磁気モーメントは、静磁界と同方向に並ぶ。この状態で高周波コイルによって水素核の共鳴周波数をもつ高周波パルスで静磁界に垂直に歳差運動を起こす。その後、高周波パルスを切ると歳差運動が減衰し、水素核の磁気モーメントは静磁界の方向に戻っていく。この間に、水素核は高周波パルスから吸収したエネルギーを放出する。この放出エネルギーが磁気共鳴信号として受信コイルでとらえられる。MRIは、このようにして得られる磁気共鳴信号を計算機によって信号処理し、断層画像として再構成するものである。

図2にMRIシステムの構成を示す<sup>(1)</sup>。検査室内には静磁界を発生する超電導マグネット(この中には磁気共鳴信号を発生し、これを受信するための高周波コイル、磁気共鳴信号に位置情報をもたせる傾斜磁界コイルが装備されている。)及びマグネット本体に隣接して寝台が配置される。機械室にはシステムを制御し、磁気共鳴信号を画像処理するコンピュータ、傾斜磁界コイル用電源、高周波コイル用電源、さらに傾斜磁界コイル用電源と高周波コイル用電源を制御するシーケンスコントローラが設置される。そして診断室には断層画像を表示し、かつ診断のための各種操作を行うメインコンソール、診断画像を写真記録するためのマルチイメージカメラ等が設置される。この中で超電導マグネットはMRIシステムの心臓部である。

## 3. MRI用超電導マグネットの仕様

当社最新の0.5T、1.0T及び1.5T自己磁気シールド付きMRI用超電導マグネットの主仕様を表1に、またその特長を表2に示す。仕様の設定に当たっては、病院設置機器としての漏れ磁界のシールド、経済性と設置条件の緩和、長期信頼性等を考慮して下記項目に配慮して決定した。

- (1) 外部への漏れ磁界の低減
- (2) 設置スペース緩和のため水平サービスポートの採用、マグネットのコンパクト化
- (3) 低寒剤消費によるランニングコスト低減
- (4) クライオスタットの耐振強度の強化による輸送条件緩和



(5) 全溶接構造のクライオスタットによる信頼性の確保

図3に0.5 T自己磁気シールド付きMRI用超電導マグネットの外観を示す。大きさは、常温ボア径920 mm、高さ1.79 m、幅1.8 m、長さ1.85 mで、質量は寒剤込みで7,900 kgである。磁界均一度は標準値 $\pm 4 \text{ ppm} / 40 \text{ cm DSV}$  (Diameter Spherical Volume: 球体領域)、0.5 mT 漏れ磁界は径方向2.3 m、軸方向3.7 mでこのクラスの磁石では最高級の仕様を実現している。また、高断熱クライオスタットにシールド冷凍機を標準装備することにより、液体ヘリウムの消費量0.05 L/h以下を達成している。

以下、主要項目について、その内容を説明する。

3.1 磁気シールド

MRI用超電導マグネットの漏れ磁界のシールドは、心臓にペースメーカーを取り付けた人に対する安全や磁界の影響を受ける医療機器など周辺に対する対策の点で極めて重要な技術であり、漏れ磁界を低減し、外部への影響を少なくする必要がある。このため、MRIの設置室に鉄板をは(貼)るルームシールド方式、超電導マグネットを鉄板で囲む自己磁気シールド方式、さらには従来の主磁界を形成する超電導主コイルのほかに、その外側に反対方向の磁界を形成する超電導のキャンセルコイルを設け、漏れ磁界を小さく抑えるアクティブシールド方式がある。一方、鮮明で安定したMRI画像を得るためには、外部の磁気環境変化(例えば、検査室の近辺で漏れ磁界によって磁化されたエレベーターや自動車の移動)による磁界の乱れを抑える対策も必要である。このため、MRI検査室をエレベーターや自動車など磁化されやすい可動鉄体の影響が現れない所まで遠ざけるか、又はMRI検査室に更に鉄板を貼るなどして磁界の乱れを緩和する等の対策がとられる。ところで、自己磁気シールド付き超電導マグネットは漏れ磁界の

低減のみならず、このような磁界の乱れを緩和して磁界均一性を保持する機能をも兼ね備えている。

このため当社はMRI用超電導マグネット開発の当初から一貫して自己磁気シールドの開発を進め、1985年以来自己磁気シールド付き超電導マグネットを製作している。磁気シールド設計では、漏れ磁界の低減、磁界均一度の確保、及び電磁力対策が重要であるが、これら特性を検討の結果、全周鉄ヨーク型自己磁気シールドを採用した。以下にその内容を述べる。

3.1.1 磁気シールド特性

磁気シールドの特性はシールド材の特性と磁気シールドの形状に大きく依存する。鉄ヨークシールドの形状として図4(a)に示す全周シールド型と、(b)に示すような部分シールド型が考えられる。そこで、磁気シールド効果を定量評価するため設計の初期段階で三次元磁界解析により、両者の磁気シールド特性を比較検討した。表3に解析結果の一例を示す。表から磁気シールド質量が同一条件のもとでは全周鉄ヨーク型が磁気シールド効果が最も高く、かつ経済的であることが分かる。図5に0.5 T、1.5 Tの自己磁気シールド付き超電導マグネットの漏れ磁界分布を示す。図に示すとおり、0.5 T

表1. MRI用超電導マグネットの主仕様

磁界強度(T)	0.5	1.0	1.5
磁界均一度 (ppm)	$\pm 4 / 40 \text{ cm DSV}$ (標準値)	$\pm 3 / 40 \text{ cm DSV}$ (標準値)	$\pm 3 / 40 \text{ cm DSV}$ (標準値)
磁界安定度 (ppm/h)	0.1	0.1	0.1
ヘリウム消費量 (L/h)	0.05 (標準値)	0.05 (標準値)	0.05 (標準値)
耐振強度 ( $\text{m/s}^2$ )	19.6 (2G)	19.6 (2G)	19.6 (2G)
シム方式	超電導シム + 磁性体シム	超電導シム + 磁性体シム	超電導シム
磁気シールド	磁性体	磁性体	磁性体
外形寸法 (m)	1.8W×1.85L	2.0W×2.0L	2.1W×2.3L

表2. 三菱超電導マグネットの特長

特 長	内 容
ランニングコストが小	高性能クライオスタットと冷凍機の使用によって液体窒素が不要となり、液体ヘリウムの低消費量化を実現している。そのため、ランニングコストが少なく、経済的である。また、液体ヘリウム補充間隔が長く、効率的な運転が可能である。
コンパクト化	分割ソレノイドコイルの採用によってマグネットを小型化し、比較的小さな搬入口からの搬入が可能である。
漏れ磁界が小	自己磁気シールドを取り付けることができ、漏れ磁界を大幅に低減できる。
天井の低い部屋への設置が可能	水平サービスポートの採用により、天井高さの低い部屋にも設置が可能である。また、液体ヘリウム注液作業が水平アクセスとなり、作業性が優れている。
耐振強度が大	耐振強度が大きいため、冷却状態のまま輸送及び据付けが可能である。したがって、現地での初期冷却作業が不要であり、初期冷却用の寒剤も不要となる。また、据付け、調整作業が容易で作業時間が短縮できる。
長期信頼性の確保	全溶接構造のクライオスタットを採用して耐真空性を高め、長期信頼性を確保している。

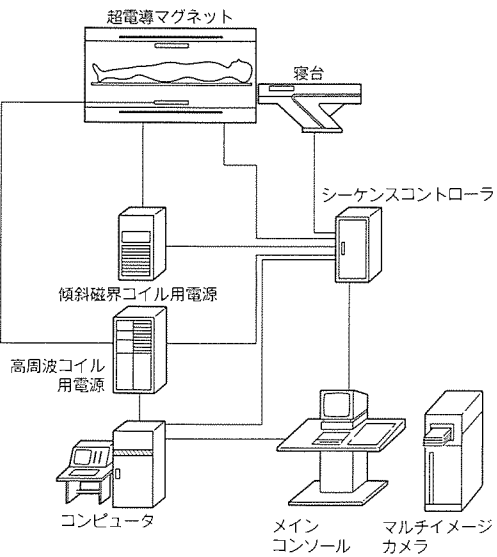


図2. MRIシステムの構成

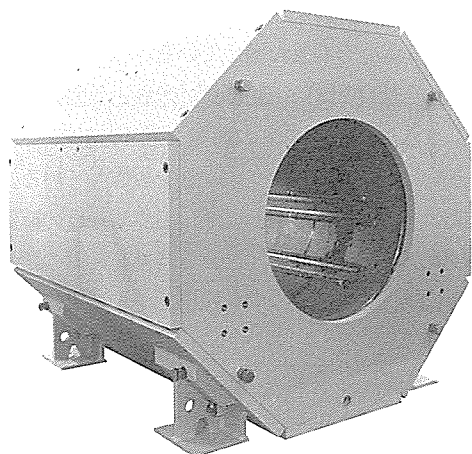


図3. 磁性体シムを取り付けた超電導マグネット

マグネットの0.5 mT 領域は34 m<sup>2</sup> 以下であり、優れた磁気シールド特性をもっていることが分かる。

また、磁気シールドの効果としては外部磁性体の影響が低減されることである。図6は1.5 T マグネットについてマグネット直下に配置された銅製のチャネルが磁界均一度に与える影響を解析したものであるが、磁気シールド付きでは磁界均一度に何等の影響も及ぼさないことが分かる。

### 3.1.2 磁界均一性

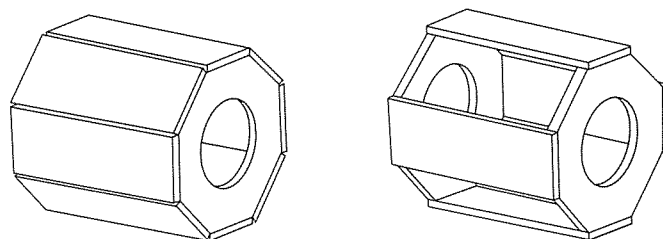
自己磁気シールドなしの空心コイルの設計は解析アプローチが可能で容易であるが、これに磁気シールドを設けると磁界分布が変化して磁界均一性が得られない。このため、MRI用のコイル設計では磁気シールド材の非線形特性を考慮して、磁界均一性を評価できる高精度磁界計算が必要である。当社はこのために図7に示すように磁気シールドを含む非線形領域には有限要素法を、コイルを含む領域には境界要素法を適用した新たな磁界解析プログラムを開発した。この解析プログラムを利用し、磁気シールド取付状態で均一な磁界分布が得られるような最適コイル配置を求めることが可能となった。

## 3.2 超電導コイル

MRIによる鮮明な診断画像を得るためには、超電導マグネットの基本要件として高い磁界均一性、高い磁界安定性の確保が重要である。以下にその内容を述べる。

### 3.2.1 コイル構造

分析用・加速器用マグネットでは磁界均一度（使用磁界強度に対する不均一磁界強度の比率）は使用領域内で10<sup>4</sup> ppmから10<sup>3</sup> ppm程度であることが要求されるが、MRI用マグネットでは40 cm 球体領域内で10 ppmもの高い磁界均一度が要求される。すなわち、高い磁界均一度をもつことはMRI用マグネットの基本要件である。そこで、当社最新のMRI用超電導マグネットではできるだけ短いコイルで高い磁界均一性を得るために5ないし6分割の高次補償ソレノイドタイプを採用している。マグネット長さは磁気シールドを含め、0.5 Tで1.85 m、1.0 Tで2.1 m、そして1.5 Tでは2.3 mであり、コンパクト化を実現している。



(a) 全周シールド鉄ヨーク (b) 部分シールド鉄ヨーク

図4. 磁気シールドの構造

表3. 磁気シールド構造の比較

解析ケース		ケース 1	ケース 2	ケース 3
磁気シールド	ヨークの構造	図4 (a)	図4 (b)	図4 (b)
	フランジの厚さ (mm)	48	48	58
	ヨークの厚さ (mm)	48	96	58
	質量 (kg)	5,700	5,700	5,700
漏れ磁界 (0.5 mT)	径方向 (m)	2.3	2.7	2.9
	軸方向 (m)	3.7	4.1	4.1

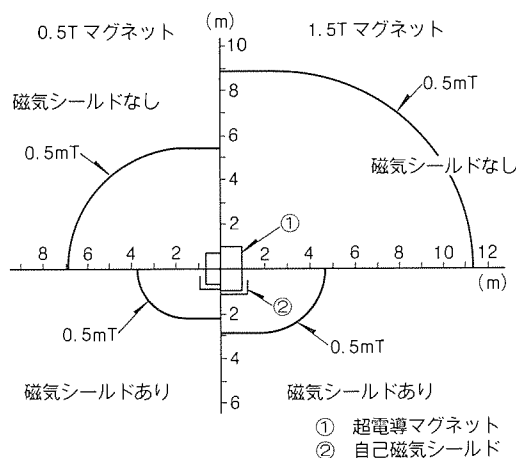


図5. 漏れ磁界分布

また、コイル導体にはニオブチタン (NbTi) 超電導線を専用の高精度巻線機によって巻回し、高次補償コイルを製作している。コイル単体として高い磁界均一度が得られるよう設計しているが、実際にはコイル製作上できる寸法精度の限界や、磁気シールド取付誤差などにより、誤差磁界が発生し、得られる磁界均一度は理論限界値より低下する。このような誤差磁界を打ち消し磁界均一度を補正することをシミングと呼んでいる。シミングには、コイル方式（超電導シムコイルと常電導シムコイル）と磁性体方式（磁性体シム又はパッシブシム）がある。超電導シムコイルは出力が大であり、磁界補正後は永久電流運転されるため電源や運転電力が不要、さらに近傍の磁性をもつ装置の移動による磁界の乱れを自動補正する機能をもつ等の利点がある。一方、磁性体シムは磁性体の磁化を利用し磁界補正を行うもので、通常はマグネットボア内に配置される。磁性体シムは構造が簡単で薄い鉄シート、細い鉄の棒で構成される。当社が独自に開発した磁性体シムは容易にしかも短時間で磁界均一度調整が行える特長

をもっている。

### 3.2.2 磁界安定性

MRI 用超電導マグネットの要件の一つとして永久電流による安定な磁界の供給が挙げられる。このため、高い磁界安定性の維持は医用機器としての信頼性の観点から極めて重要である。永久電流は超電導コイル内に発生する微小抵抗によってわずかな減衰し、これが磁界安定度を定める。微小抵抗の最も大きいものは超電導線の接続抵抗である。通常  $0.1 \text{ ppm/h}$  以下の高い磁界安定性を得るためには、超電導コイルの接続抵抗の総和は一般に  $10^{-9} \sim 10^{-10} \Omega$  以下でなければならない。当社では高い磁界安定性を確保するため超電導線の接続に関し、スポット溶接法及び圧着接続法による低抵抗接続技術を開発し、実機における抵抗値は  $10^{-11} \Omega$  オーダーに達し、ほとんど磁界減衰のないコイルを実現している。

### 3.3 クライオスタット

この超電導磁石のクライオスタットは、医用機器としての信頼性確保、低熱侵入による運転経費低減及びメンテナンス軽減、設置条件緩和、高強度化による冷却輸送等の技術課題を解決して開発された<sup>(2)</sup>。以下にその内容を述べる。

#### 3.3.1 信頼性

クライオスタットは高真空断熱容器であり、微少な真空リークでも長期的には断熱特性を著しく損なう原因となる。このため、マグネットの長期信頼性の向上を図るため、クライオスタットの主要部分を溶接構造とし、高真空度の長期維持を図っている。

#### 3.3.2 低熱侵入

MRI 用超電導マグネットの運転経費の大部分は、超電導コイルを極低温に維持するために消費する液体ヘリウムの費用である。当社では液体ヘリウムの消費を減らすためクライオスタットの断熱構造の改良を図り、かつ液体窒素不要の冷凍機付きとしている。超電導コイルを収納する液体ヘリウム槽は二重の中間熱シールド(第1熱シールド、第2熱シールド)に囲まれ、これら中間熱シールドは二段式の冷凍機によって冷却され外部からの熱侵入を低減している。

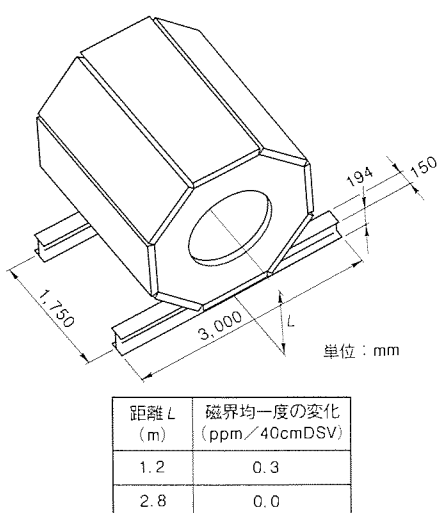


図6．外部磁性体の磁界均一度への影響

中間熱シールドについては以下の配慮がなされている。傾斜磁界コイル運転時は傾斜磁界の変動によって熱シールド上に渦電流が発生するが、この渦電流による液体ヘリウム蒸発量の定量評価が必要である。傾斜磁界コイルと中間熱シールドは三次元構造配置となっている。このため新たに三次元渦電流解析プログラムを開発した。これにより、クライオスタット内に発生する熱損失の定量評価が可能となり、熱シールドの材質と板厚の決定が容易になったのみならず、渦電流を含む傾斜磁界特性の評価も同時に可能となった。図8は傾斜磁界コイル駆動時、第1熱シールド上に誘導される渦電流分布を示したものである。

#### 3.3.3 水平サービスポート

クライオスタットのサービスポートは通常垂直構造でマグネットの上部に設けられるが、本機では水平サービスポートを採用することにより、寒剤注液作業性の改善と設置条件の緩和を図っている。図9にクライオスタットの断面構造を示す。この構造の水平サービスポートの採用はマグネット設置のために必要な天井高さを低減でき、しかも液体ヘリウム注液管の挿入が容易であるため、作業性が向上する利点があることが分かる。しかしながら、水平サービスポート構造ではサービスポート内でヘリウムガスが対流を起こし、熱侵入量が増加しやすい。これを防止するため、我々はサービスポートの部分モデルによる実験により、ガスの対流が直接ヘリウム槽に到達しない最低限必要な傾斜角度を求め、水平サービスポートを実現した。これによってマグネット設置のための必要天井高を低減することができた。0.5 T機の最小天井高は2.1 mである。

#### 3.3.4 高強度

MRI 用超電導マグネットではクライオスタットの断熱特性に加え、耐振強度も重要な特性である。本機は支持材に繊維強化プラスチックを用い、支持材の形状を選定することにより、断熱特性を損なうことなく中身の支持強度を向上させ、連続  $19.6 \text{ m/s}^2 \{2G\}$ 、最大  $49.0 \text{ m/s}^2 \{5G\}$  の振動加速度に耐え得るよう設計されている。これによって通常のトラックによる冷却輸送が可能となっている。なお、輸送期間中長期にわたって冷凍機が停止される場合は、ヘリウム温度の維持が困難であるので、昇温輸送するが、この場合でもクライオスタットは

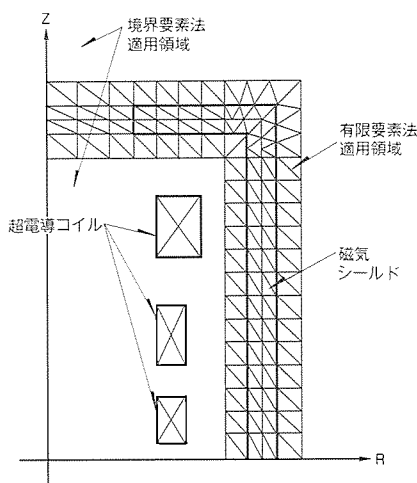


図7．有限/境界要素法による超電導マグネットの設計

真空を保持したまま輸送可能で、現地での再冷却において真空引は不要である。また、米国等では、自動車両にMRIシステムを搭載した移動用MRIが使用されているケースもあるが、この移動用MRIでは頻繁な励消磁等による撮像前の準備作業を減らすため、マグネットを励磁した状態での移動が要求されるので、車両搭載状態での走行試験により、耐振強度の検証を行った。走行試験の結果、所定の耐振強度をもつことを確認するとともに、走行後の磁界均一度変化についても問題のないことを確認した。また、図10は耐振強度試験中のマグネットを示したもので、耐振試験の結果、所定の耐振強度をもつことを確認している。

#### 4. 高機能型MRI用超電導マグネット

##### 4.1 GM式ヘリウム液化機付きMRI用超電導マグネット

当社は、長年にわたり培ってきた極低温技術をもとにヘリウム液化機の開発を進めてきたが、1989年世界で初めてGM (Gifford-McMahon) サイクル式冷凍機によるヘリウムの液化に成功した。この小型ヘリウム液化機の開発により、1991年米国R & D マガジン社主催のR & D 100 賞を受賞した。現在、その液化能力はMRI用超電導マグネットのヘリウム蒸発量を零とするレベルに十分達している。当社では市場ニーズにこたえるべく、高価でしかも煩わしい注液作業を

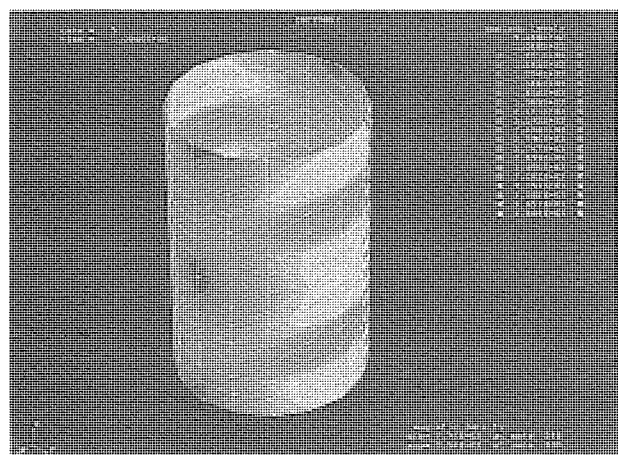


図8. 第1熱シールド上の渦電流分布

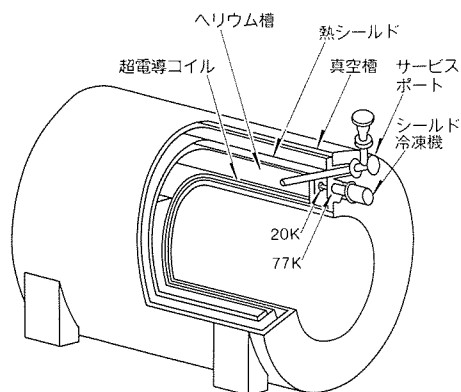


図9. クライオスタットの断面構造

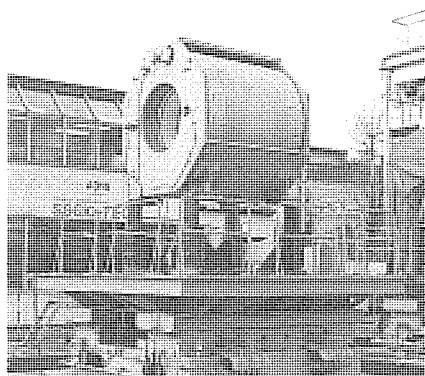


図10. 耐振強度試験中のマグネット

伴う液体ヘリウムの補給を全く不要とするGM式ヘリウム液化機を搭載した画期的なMRI用超電導マグネットを市場投入する。

##### 4.2 アクティブシールドマグネット

病院の既存の部屋に設置できるよう、より軽量化されたマグネットが必要となる場合がある。この場合、漏れ磁界を小さくし、周辺への影響を及ぼさない対策がマグネット側で必要である。それにはマグネットを同軸の内外2台の超電導コイルで構成し、外側コイルには漏れ磁界を打ち消す方向に、内側コイルには主磁界を発生する方向に電流を流すアクティブシールド方式が有効である。当社ではこのような市場ニーズにもこたえるべくアクティブシールドマグネットを製品系列に加えている。

#### 5. む す び

当社が開発した最新の0.5T、1.0T及び1.5TのMRI用超電導マグネットについて紹介した。これらのMRI用超電導マグネットは、全機種とも鉄ヨーク式の自己磁気シールドを採用し、漏れ磁界の広がりを抑え、省スペース化を実現している。さらに、低ヘリウム消費によるランニングコストの低減、水平サービスポートの採用による液体ヘリウムの注液時の作業改善を図るなど多くの特長をもった製品である。これらの機種はMRI用マグネットの市場ニーズとマッチし、多くのユーザーに幅広く受け入れられている。MRIは、今後ますます需要が増加し、市場ニーズも多様化していくが、当社は高度な超電導技術・極低温技術を基に、医用機器としてより一層高い信頼性をもち、市場のニーズに合ったMRI用超電導マグネットを開発し、提供していく所存である。

#### 参 考 文 献

- (1) 菅 寿郎, 渡邊次男, 武智盛明, 荻野 治, 山田忠利: 磁気共鳴イメージングシステム用超電導マグネット, 三菱電機技報, 60, No. 5, 337~341 (1986)
- (2) 渡邊次男, 森津一樹, 松本隆博, 荻野 治, 尾原昭徳: MRI用超電導マグネットのクライオスタットと低温技術, 三菱電機技報, 61, No. 4, 325~328 (1987)

# 磁気浮上式鉄道用超電導マグネット

地蔵吉洋\* 守田正夫\*\*  
沖 雅雄\*  
山口 孝\*

## 1. ま え が き<sup>(1)</sup>

次世代の超高速大量輸送機関として、超電導を使用した磁気浮上式鉄道の開発が進められている。

この磁気浮上式鉄道の開発は、1960年代に当時の日本国有鉄道を中心として始められ、1972年から1975年にかけての鉄道技術研究所内(当時)における原理的な開発実証試験を経て、宮崎県日向市の浮上式鉄道宮崎実験線での応用技術開発へと移行した。

浮上式鉄道宮崎実験線では、1979年に実験車 ML 500 による世界最高速度 517 km/h の達成、続いて実験車 MLU 001 による編成走行、400.8 km/h での有人走行を経て、1987 年からは実用車両のプロトタイプとしての位置付けにある MLU 002 による走行実験が繰り返され、現在まで着実に成果を挙げてきた。

この間、1987 年に開発の中心的役割は、(財)鉄道総合技術研究所に引き継がれ、さらに1990年には東海旅客鉄道(株)、鉄道建設公団を加えたプロジェクトチームが結成され、磁気浮上式鉄道の実用化に向けて、その最終確認を目的とした山梨実験線の建設がスタートした。

本稿では、浮上式鉄道の最重要構成要素である超電導マグネットの概要を紹介するとともに最近の開発状況について報告する。

## 2. 浮上式鉄道用超電導マグネットの概要

### 2.1 超電導マグネットに要求される特性

浮上式鉄道用超電導マグネットは車両に搭載されることから、主に次のような特性が要求される。

#### (1) 軽量であること

浮上式鉄道用車両は乗客を乗せて高速で浮上走行するため航空機のイメージに近く、軽量化が強く要求される。

#### (2) コンパクトであること

浮上力・案内力・推進力を有効に発生させるため、走行の安全に必要な空間を確保しつつ、超電導コイルと軌道に沿って敷設された地上コイルとの間の距離をできるだけ近づける必要がある。このため、極低温のコイルから常温の表面までの断熱距離を極力薄く設計することが要求される。

#### (3) 振動外乱に対して安定なこと

走行中に地上コイルから受ける種々の変動電磁力

や車両運動に伴う振動外乱に対し、安定に永久電流状態を保って運転できる信頼性が要求される。

#### (4) 低熱侵入であること

地上からの液体ヘリウムの補給を不要とする車載冷凍システムを実現するため、超電導マグネットは熱侵入量の極力少ない構造とすることが重要である。

#### (5) 運用が容易なこと

極低温への冷却、車載冷凍機の運転、励消磁作業などの運転操作性が良いことも重要な要素である。

### 2.2 超電導マグネットの構造

浮上式鉄道用の超電導マグネットの外観を図1に示す。これまでの種々の開発成果を反映して以下に示す構造となっている。

(1) 低銅比本質安定化超電導線を使用した超電導コイルをエポキシ樹脂で含浸し、ステンレスの薄肉内槽と強固に一体化することにより、安定性・耐振性の向上を図り、高起磁力で軽量の超電導コイルを実現している。

(2) 内槽をく(矩)形断面形状として超電導コイルと地上コイル間の距離を短縮している。

(3) 荷重支持材として FRP (Fiber Reinforced Plastics) の多重円筒構造を採用し、剛性を確保しつつ断熱特性を向上して低熱侵入化を図っている。

(4) 電流リードは短時間定格として導体の薄肉化を図り、低熱侵入化している。

(5) 外槽にアルミの溶接構造を採用し、軽量化を図っている。

(6) 永久電流スイッチを高抵抗化し、励消磁速度を 5~10 A/s と高速化するなど運転操作性を向上している。

## 3. 最近の開発状況

浮上式鉄道の実用化に向けて、心臓部である超電導マグネットには高い信頼性が要求されるため、信頼性に重点をおいた開発検証が重要である。

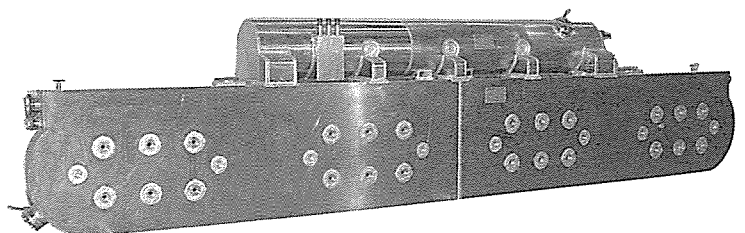


図1. 浮上式鉄道用超電導マグネットの外観



### 3.1 実用超電導マグネットの基本的な考え方

#### 3.1.1 安定性

超電導常電導遷移いわゆるクエンチに対する超電導コイルの安定性に関しては、十分な余裕を持たせた設計を行う。

すなわち、

- (1) クエンチを起こす最小のエネルギー MQE (Minimum Quench Energy) を評価基準として、銅比、臨界電流密度等の線材パラメータを評価し、最適な線材を選定する。
- (2) 寸法・質量の許容範囲内で、コイルの剛性を強化するとともに電流密度を低減して温度余裕を大きく採り、安定性の向上を図る。
- (3) 超電導コイル表面における超電導コイルとコイル支持部材との相対滑りによる摩擦発熱の影響を低減するため、熱バッファとしてのダミー線をコイルの内外周に設けた巻線構造とする。

#### 3.1.2 走行時の外乱に対する信頼性

超電導マグネットは走行中に地上コイルから絶えず変動磁界を受ける。この変動磁界によって超電導マグネットは電磁的に加振されると同時に超電導マグネットの外槽、ふく(輻)射シールド、内槽には渦電流が誘導され損失が発生する。

そこで、変動磁界の影響を受けにくい超電導マグネットの構造として、以下の構成が考えられる。

- (1) 超電導コイル、内槽の振動を抑制するため荷重支持材の配置を最適化する。
- (2) 輻射シールド板を高抵抗の部材で構成し、内槽表面を低抵抗化することにより内槽の渦電流損失の低減を図る。
- (3) 変動磁界に対する外槽の磁気シールド効果を強化する。

### 3.2 超電導コイルの安定性の向上

浮上式鉄道用超電導マグネットは、自身の発生する強大な電磁力とともに外部からの変動磁界やそれに起因する加振力を受ける。筆者らは、これらの外乱に対する超電導コイルの安定性の向上に関し、線材レベルやコイルレベルでの解析や実験による評価を行っており、ここではその一部について紹介する。

#### 3.2.1 超電導線の最小クエンチエネルギー<sup>(2)(3)</sup>

超電導線材が安定な状態からクエンチに至るまでの最小のエネルギー余裕を最小クエンチエネルギー (MQE) という。MQE は超電導線の安定性について評価する場合に大きな指標となる値である。

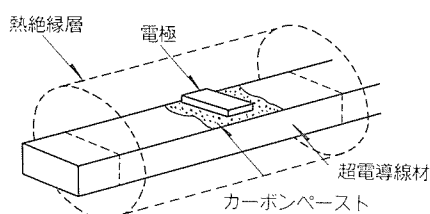


図2. MQE 測定用試料

線材パラメータ (銅比、臨界電流密度、残留抵抗比、線材寸法等) の異なる超電導線について、MQE を測定することにより、浮上式鉄道用超電導コイルに使用する線材の耐クエンチ性について検討を行っている。

図2にMQE 測定のための試料を示す。超電導線にヒータを取り付け、ある大きさの熱エネルギーをパルス的に与えて超電導線をクエンチさせる。超電導線がクエンチする最小の入力エネルギーがMQE である。図3はMQE のパルス印加時間依存性を示したもので、種々のヒータ施工法について測定したものである。図3から線材とヒータの熱抵抗を極力小さくすることが測定精度向上のために必要であり、カーボンペーストを用いて電極を押さえつける方法が有効なことが分かった。図4はMQE の磁界、電流依存性を示したものである。印加磁界、通電電流が大きいほどMQE は小さく、超電導線にとって厳しい条件であることが分かる。

実験と並行してシミュレーションも行っている。シミュレーションのモデルは、図2に示した試料をモデル化しており、1本の超電導線の長さ140mmにわたって周囲は断熱状態とし、線材の両端は4.2Kで線長方向の熱伝導を考慮している。また、線材の長手方向中央部2mmの部分に直接ヒートパルスを加えている。図5にシミュレーション結果の一例を示す。線材銅比、線材寸法をパラメータとしたときのMQE の変化を示したものである。

図5(a)は、線材銅比とMQE の関係を示したものであり、銅比1.0~2.0の範囲ではMQE に大きな差がない結果となっている。同図(b)は、線材断面積比とMQE の関係を示したものであり、断面積比以上にMQE が大きくなっている。線材断面積を大きくすることは超電導線の安定性向上に有効な方法であることが分かる。

#### 3.2.2 超電導線の交流損失<sup>(4)</sup>

超電導コイルは走行中、地上コイルからの交流磁界及び永久電流の変化に伴う交流磁界を受ける。この交流磁界により、

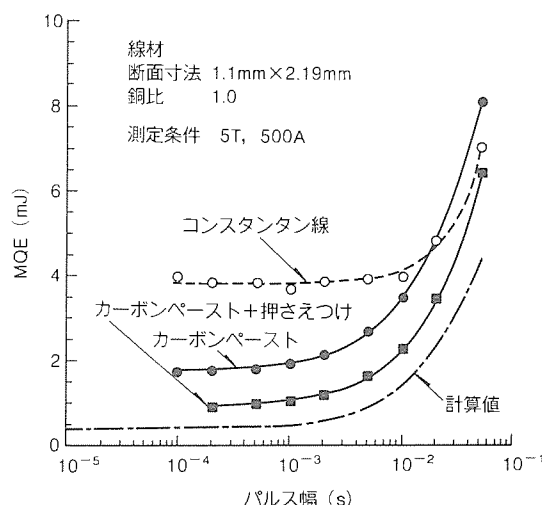


図3. MQE のパルス印加時間依存性

超電導線には交流損失が生じる。この交流損失により、超電導コイルの温度マージンの低下や液体ヘリウムの蒸発量の増加等が起るため、交流損失の大きさは定量的に把握しておく必要がある。

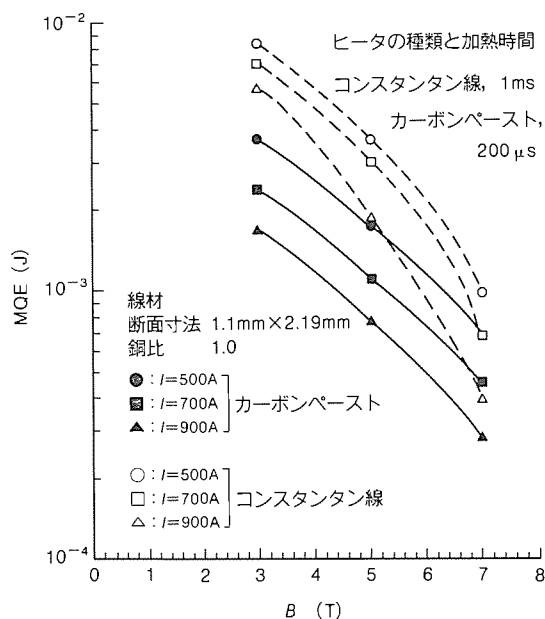
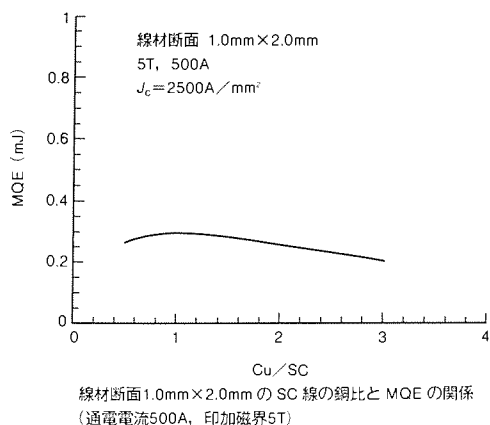
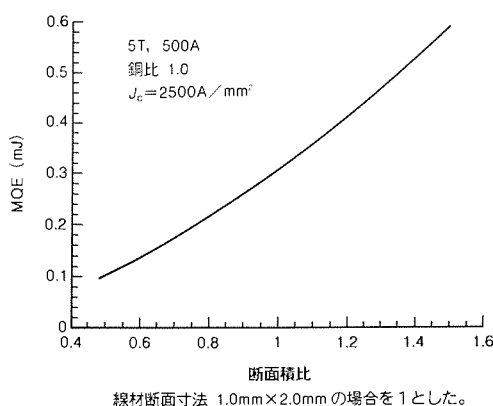


図4. MQEの磁界、電流依存性



(a) 銅比とMQEの関係



(b) 線材断面積比とMQEの関係

図5. MQEに関するシミュレーション結果

磁界強度と交流損失の関係、交流損失の周波数特性に関する実験結果の一例を図6に示す。コイルに生じる交流損失の大きさは印加磁界強度、周波数、超電導線のツイストピッチ、フィラメント径に依存しており、浮上式鉄道用の最適な超電導線について検討している。

### 3.2.3 ダミー線による耐クエンチ性の向上<sup>(5)</sup>

超電導コイルのクエンチは、含浸によって一体化された超電導コイルとコイル支持部材との相対的な滑りによる摩擦発熱が大きな原因と考えられている。

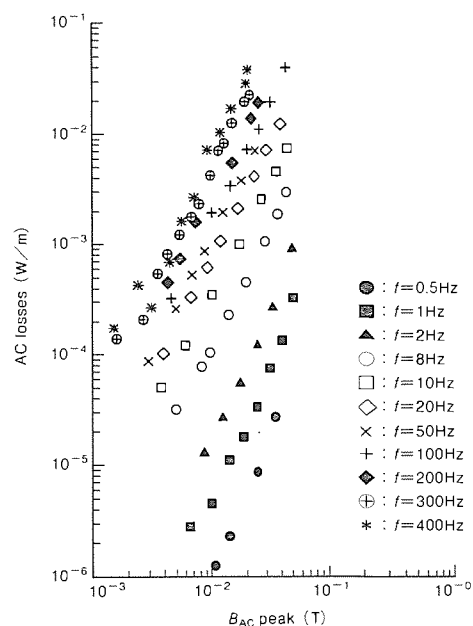
この摩擦発熱によるクエンチの対策として、超電導コイルの最内層及び最外層に通電しないダミーの超電導線を巻線することが考えられる。このダミー線が、摩擦発熱に対して熱的なバッファになり、クエンチが発生しにくくなる。

ダミー線の効果を示す解析例を以下に示す。図7に解析モデルを示す。超電導線が5層あり、最外層にはコイル支持部材が一定ピッチで施工され、支持部材がない部分が液体ヘリウム (LHe) で冷却されるモデルである。

一つの支持部材の中央にパルス的に熱を印加したとき、ダミー線を1層実施した場合、2層実施した場合、しなかった場合について各層の超電導線の温度を計算した。

図8に計算結果の一例を示す。同じ大きさの熱を印加したとき、ダミー線がない場合はクエンチしているが、ダミー線を1層実施した場合はクエンチしていない。

この計算モデルでのMQEの計算結果を表1に示す。表中の値は、ダミー線なし銅比1.0の場合のMQEを1.0とした場合のそれぞれの場合の比である。ダミー線の効果は銅比によって若干異なるが、ダミー線を1層実施することにより、MQEは3倍程度になる。超電導コイルの最外層、最内層に



線材断面 1.1mm×2.19mm、銅比1.0の超電導線に通電電流が0Aの状態と交流磁界を印加した時の交流損失測定値。

図6. 超電導線の交流損失

ダミー線を実施することにより、超電導コイルの安定性が向上することが分かる。

### 3.3 電磁機械的外乱に対する信頼性の向上

超電導マグネットの設計の最適化及び製品の信頼性向上のツールとしてCAE (Computer-Aided Engineering) による解析を行っている。

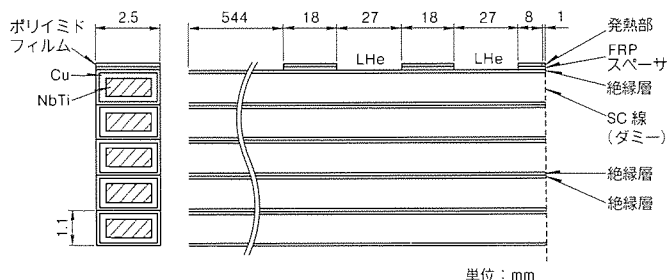
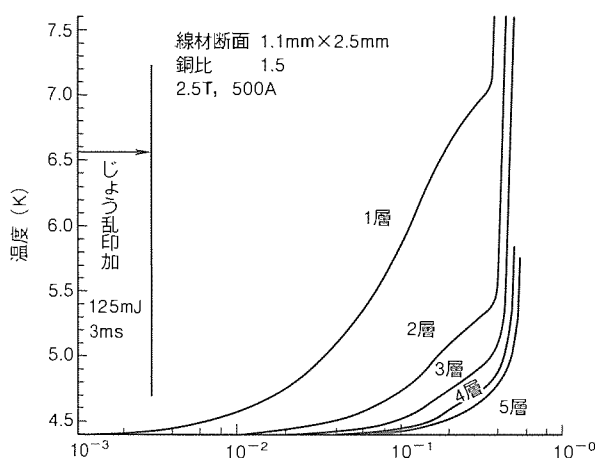
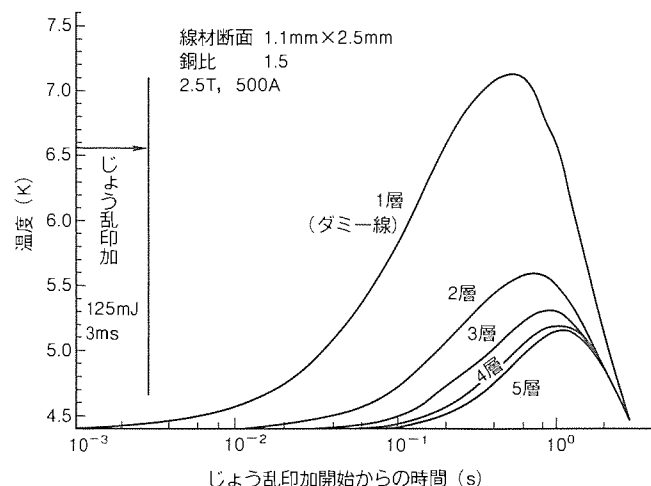


図7. 解析モデル



じょう乱印加開始からの時間 (s)

(a) ダミー線を実施しない場合



じょう乱印加開始からの時間 (s)

線材断面1.1mm×2.5mm, 銅比1.5のSC線に外部エネルギー125mJを3ms印加した時のコイル温度上昇シミュレーション (通電電流500A, 印加磁界2.5T)

(b) ダミー線を1層実施した場合

図8. コイル各層の温度上昇シミュレーション結果

### 3.3.1 地上コイルからの電磁的外乱に対する

#### 解析的アプローチ

地上コイルからの変動磁界の影響を受けにくい超電導マグネットの構成を検討するために、電磁気的な側面から種々の解析を行っている。超電導マグネットの代表的な電磁気的解析事項としては、次のような項目が挙げられる。

#### (1) 電磁力解析

地上コイルから超電導マグネットに働く浮上力・案内力・推進力等の定常・変動電磁力の解析。

#### (2) 渦電流解析

(a) 地上コイルからの変動磁界に起因する外槽, 輻射シールド板, 内槽等の渦電流解析。

(b) 超電導コイルの磁界中で外槽, 輻射シールド板が振動することによって起因する外槽, 輻射シールド板, 内槽等の渦電流解析。

### 3.3.2 機械的熱的信頼性設計

超電導マグネットの代表的な機械的熱的解析事項としては、次のような項目が挙げられる。

#### (1) 静的強度解析

浮上・推進・案内時に外槽や内槽など超電導マグネット各部に定常的に作用する力に対する信頼性

#### (2) 熱伝導解析

内槽や熱シールド板の冷却経路の最適化

#### (3) 振動解析

走行時に作用する変動電磁力などの外乱に対する超電導マグネットの挙動の把握や荷重支持材の配置の最適化

ここでは輻射シールド板の熱伝導解析と振動解析例を紹介する。

図9は輻射シールド板の熱伝導解析をしたものである。外槽に接続されている荷重支持材は300Kであり、80Kである液体窒素の冷却経路により、輻射熱シールド板が冷却されている様子を示す。温度分布から、中央に一部100K程度の部分があるものの、良好に冷却されていることが分かる。このように、実際には測定が困難な場所の温度分布がビジュアルに表現でき、設計段階で評価が可能である。

図10は電磁加振時の超電導コイル内槽コーナ部の振動加速度の解析例を示す。低周波数域でのピークは超電導磁石全体の剛体的な振動であり、350Hzのピークは内槽の曲げ振動である。

以上のように、CAEを応用して設計段階での計算機による設計評価・製品の評価を行っており、信頼性向上に努めている。

### 3.4 超電導マグネットの信頼性・耐久性の検証評価

以上に述べた浮上式鉄道用超電導マグネットの安定性、信頼性に関する種々の開発に加えて、以下のような評価検証試験も実施している。

表1. MQE の計算結果

(Cu/NbTi) 比	1.0	1.5
ダミーなし	1.0	1.4
ダミー1層あり	3.2	3.8
ダミー2層あり	4.5	4.8

注 線材断面寸法 : 1.1mm×2.5mm  
 通電電流 : 500A  
 印加磁界 : 2.5T  
 じょう乱印加時間 : 3ms

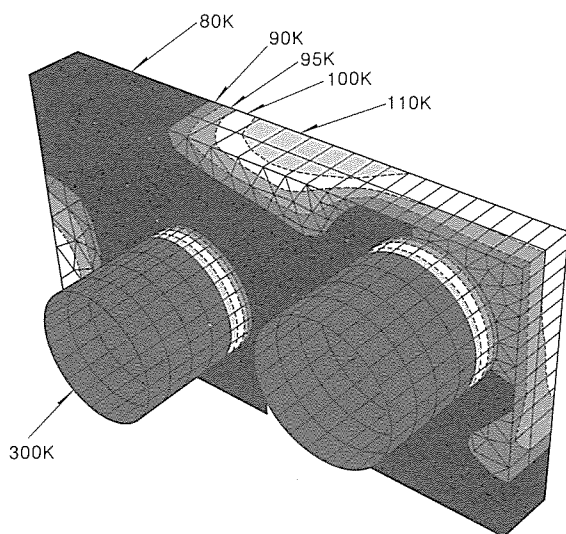


図9. 輻射シールド板の熱伝導解析例

#### (1) 超電導コイルの電磁曲げ加振試験による耐クエンチ性の評価

超電導コイル断面積 (電流密度, コイル・内槽剛性), 線材銅比, 内槽・コイル間の滑り対策としてのダミー線の有無等のパラメータを変えた数種の超電導コイルに対し, 曲げやねじりなどの電磁加振力を加えて超電導コイルの耐クエンチ性の比較評価を行うことを目的とした試験を, 東海旅客鉄道(株)と平成2～3年度共同開発として実施した。

#### (2) 超電導マグネットシステムの信頼性・耐久性の検証

3.3.1項で述べたように, 浮上式鉄道用超電導マグネットは, 走行に伴い電磁機械的外乱を受ける。このような外乱に対する車載冷凍機を含む超電導マグネットシステムの総合的な信頼性・耐久性の検証を行っている。これらの検証は, (財)鉄道総合技術研究所の御指導により, 走行時に超電導マグネットに加わる地上コイルからの電磁的な外乱を, 定置で模擬することによって実施している。

### 4. む す び

浮上式鉄道の開発はいよいよ最終段階を迎え, 山梨実験線の建設も急ピッチで進められている。

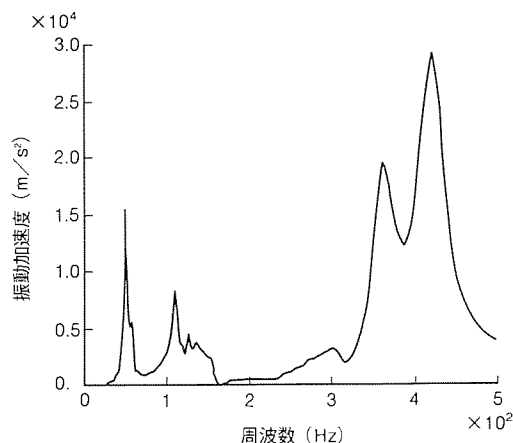


図10. 超電導コイルの振動解析例

当社としても浮上式鉄道システムの実用化に向けて, その最重要機器である超電導マグネットに関し,

- (1) MQE や交流損失を定量的に把握することによる超電導線材の最適化
- (2) ダミー線による超電導コイルの安定性の向上
- (3) 走行時の外乱に対する超電導マグネットの高信頼性設計のための種々の解析
- (4) 走行時の外乱に対する超電導マグネットの安定性や信頼性・耐久性に関する検証

等の課題に取り組んできた。

今後, これらの開発成果を山梨実験線用超電導マグネットの設計に反映し, より高い信頼性をもった超電導マグネットの実現に向けてまい (邁) 進していく所存である。

最後に, 浮上式鉄道用超電導マグネットの開発に当たり, 御指導いただいた(財)鉄道総合技術研究所及び東海旅客鉄道(株)の関係各位に, 深く感謝の意を表する次第である。

### 参 考 文 献

- (1) 特集: リニアモーターカー・マグレブの世界, RRR (Railway Research Review), 44, No. 11 (1987)
- (2) 守田正夫, 妹尾和威, 中村史郎, 山田忠利, 沖 雅雄, 地蔵吉洋: 超電導線の最小クエンチエネルギーの測定方法, 第46回1991年度秋季低温工学予稿集, 316 (1991)
- (3) 沖 雅雄, 地蔵吉洋, 守田正夫: 磁気浮上用超電導線の最適パラメータの検討 (計算機シミュレーション), 第45回1991年度春季低温工学予稿集, 127 (1991)
- (4) 守田正夫, 中村史郎, 山田忠利, 沖 雅雄, 地蔵吉洋: Cu/NbTi 超電導線の交流損失, 第45回1991年度春季低温工学予稿集, 93 (1991)
- (5) 天野俊之, 沖 雅雄, 地蔵吉洋: ダミー線による超電導コイルの安定性向上の検討, 第45回1991年度春季低温工学予稿集, 15 (1991)

# 産業装置用超電導マグネット

湊 恒明\* 黒田成紀+  
豊田勝義\*\*  
尾原昭徳\*\*\*

## 1. ま え が き

超電導マグネットは核融合や核物理などといった研究開発分野のみならず、産業分野においても検討・実用化が進展している<sup>(1)</sup>。産業分野における超電導マグネットの用途は、従来常電導電磁石又は永久磁石を使用していたものの代替又は高性能化が主なものである。超電導マグネットの特徴は、常電導電磁石又は永久磁石に比べて、より大きな空間により高い磁界を初期コスト及び運転コストが安価に実現できることである。

応用の原理は磁界と流体との相互作用を利用したもの、粒子と磁界との相互作用を利用したものなど多岐にわたる。ここではその代表的な例として、結晶引上げ装置用の超電導マグネットとジャイロトロン用の超電導マグネットを紹介する。また、産業応用超電導マグネットの検討されている分野についても概観する。

## 2. 結晶引上げ装置用超電導マグネット

### 2.1 マグネットの目的

導電性の流体に対して磁界を印加してその流体を閉じ込めたり、流体の運動を制御する試みはいろいろな領域で行われている。ここで紹介する結晶引上げ装置用超電導マグネットは結晶の原料であるつば内の熔融液に静磁界を印加する装置である。静磁界の印加はつば内の熔融液の対流を妨げるように作用する。熔融液の運動が妨げられると、熔融液の温

度変動が小さくなったり、製品結晶の不純物の濃度が変化するなどの効果が見られ、結果として大口径の結晶の品質を向上させる効果が期待できる<sup>(2)(3)</sup>。

### 2.2 マグネットの仕様と構造

2.1節に示した用途でユーザーのマグネットに対する要求は、溶液部の磁界が0.2~1 T程度で、その磁界が安定・安価かつ少ないメンテナンスで得られることである。

これら要求仕様をもとに設計・製作した結晶引上げ装置用超電導マグネットを以下に示す。超電導マグネットの構造として、鉄心付きと空心型が考えられる。鉄心付き結晶引上げ装置用超電導マグネットの例を図1に示す。マグネットはC型の鉄心を持ち、引上げ装置の両側に超電導コイルを置いた構成になっている。クライオスタットは溶接封じ込め式で、小型冷凍機によって熱シールドの冷却を行い、液体ヘリウム消費量の低減を図っている。マグネットの仕様を表1左欄に示す。

超電導マグネットではコイルの電流密度を100 A/mm<sup>2</sup>以上に設定できるので、空心であっても十分な起磁力が可能であり、必要とする磁界強度が確保できる。表1右欄に結晶引上げ装置用超電導マグネットとして製作した空心型超電導マグネットの仕様を示す。漏れ磁界が許容できる場合には、表1に示すような軽量化を特長とした空心超電導マグネットの適用が可能となる。

## 3. ジャイロトロン用超電導マグネット

### 3.1 マグネットの目的

ジャイロトロンは大電力のミリ波源として核融合プラズマ

表1. 結晶引上げ装置用超電導マグネットの例

項 目	内 容	
形 式	鉄心付き超電導マグネット	空心型超電導マグネット
中心磁界 (T)	約0.4	約0.4
磁極間隔 (m)	約1.2	約1.2
概略外形 (m)	幅 約3.6 奥行き 約3 高さ 約3	内径 約1 外形 約2 本体部高さ 約1
質 量 (t)	約60	約3
液体ヘリウム注液間隔 (日)	約30	約30
付属品	シールド冷凍機 励磁電源操作盤	シールド冷凍機 励磁電源操作盤

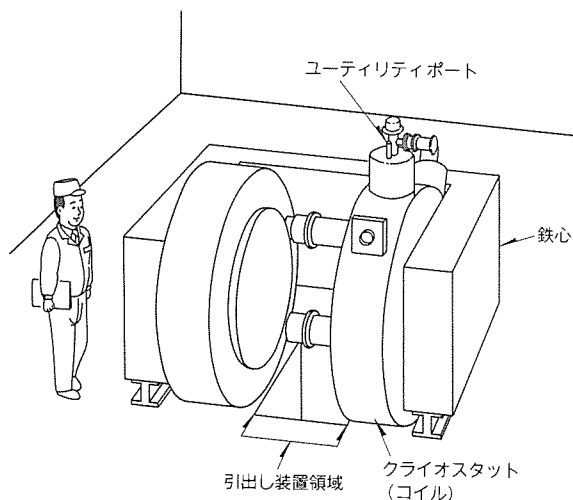


図1. 結晶引上げ装置用超電導マグネットの概念

の加熱や高性能セラミックスの焼結といった分野への応用が期待されている<sup>(4)(5)</sup>。ジャイロトロンは図2に示すように、磁界中で電子がらせん（螺旋）運動することを利用して、電子のエネルギーをミリ波のエネルギーに変換する装置である。数十GHzを超える周波数を発振させるためには電子のサイクロトロン周波数との関係から安定な高磁界が必要である。低コストで安定な高磁界を実現するためには、超電導マグネットを磁界の発生装置として採用する必要がある。

### 3.2 マグネットの仕様例

表2に当社中央研究所でジャイロトロンの研究開発<sup>(6)(7)</sup>に使用している120GHzジャイロトロン用超電導マグネットの仕様を示す。マグネットは高精度な磁界を発生させるとともに、省メンテナンスのために液体ヘリウム注液作業間隔が長いこと、発生磁界が安定なことが要求される。

### 3.3 マグネット構造

図3にマグネットの外観を示す。マグネットは表2、図4に示すように、三つのメインコイルと2対のステアリングコイルから構成される。液体ヘリウム消費量を低減するため、コイルは直列に結線し、通電電流を小さくして電流リード容量・本数を最小化する構成とした。また、非励磁時の液体ヘリウム消費量を低減するために、電流リードは脱着可能方式としている。このマグネットは永久電流モード運転を採用していないが、これはジャイロトロンの各種の実験で電流の精密な調整を頻繁に行う必要があるためである。熱シールドは

液体ヘリウム槽への侵入熱を低減するため、蒸発ヘリウムガスを使用した熱シールドと液体窒素を使用した熱シールドを採用している。

液体ヘリウムと液体窒素の消費量は表2に示したように小さい。

## 4. その他の産業応用超電導マグネット

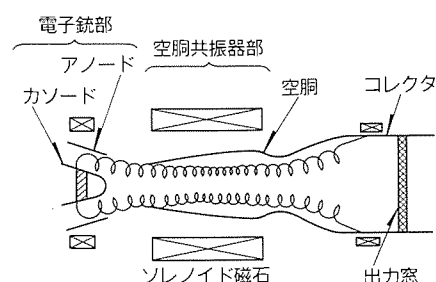
今後の発展が期待されている超電導マグネットの産業応用としては、①や（治）金分野での溶融液の流動を制御する電磁制動・加振、②流体中の物質を選別する磁気分離、などがある<sup>(8)(9)</sup>。

超電導マグネットの適用事例拡大とともに、超電導マグネットが工業製品化されてきたという認識が広まりつつある。今後、超電導マグネットが発生する磁界を有効に利用できる応用技術が拡大し、超電導マグネットがエネルギー及び設備運転費用の節約に有用でありかつ信頼性があることに対する認識が一般化するとともに、これらの分野での応用が進むことを期待している。

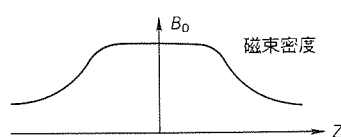
## 5. む す び

産業用超電導マグネットとして、当社の代表的な製品である結晶引上げ装置用超電導マグネットとジャイロトロン用超電導マグネットを紹介した。どちらのマグネットも、ユーザーが使用しやすいマグネットとして設計製作し、共にその目的を果たしている。

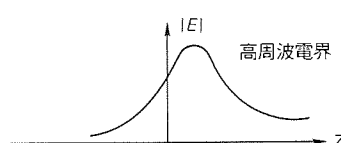
産業用超電導マグネットは、安定して容易に磁界を発生す



(a) ジャイロトロンの基本構造



(b) 静磁界の軸方向の分布



(c) 高周波電界の軸方向の分布

図2. ジャイロトロンの動作原理<sup>(4)</sup>

表2. 120GHzジャイロトロン用超電導マグネットの仕様と特性

項 目	内 容	
中心磁界 (T)	6.0	
$B_r/B_z$	0.2%以下/軸上40mm	
コイル構成	メインコイル	ステアリングコイル
コイル数	3	2対
巻線寸法 (mm)	ID178×OD315×H70	11×11(くら形)
1コイル当たり起磁力 (kA)	555	10.4
定格電流 (A)	50.6	10.0
超電導線断面寸法 (mm)	径0.66	径0.3
超電導線材質	NbTi/Cu モノリス	NbTi/Cu モノリス
蓄積エネルギー (kJ)	176	
クライオスタット		
室温ボア径 (mm)	120	
外径 (mm)	1,000	
高さ (mm)	570	
液体ヘリウム貯液量 (L)	57	
液体ヘリウム消費量 (L/h) (実測値)	通電時	0.37
	非通電時	0.30(リード着)
	非通電時	0.17(リード脱)
液体窒素貯液量 (L)	90	
液体窒素消費量 (L/h) (実測値)	0.45	
液体ヘリウム・液体窒素補給周期	1週間	



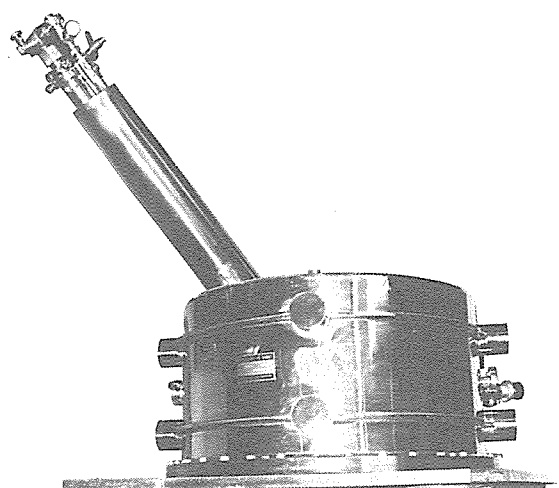


図3. 120GHz ジャイロトロン用超電導マグネットの外観

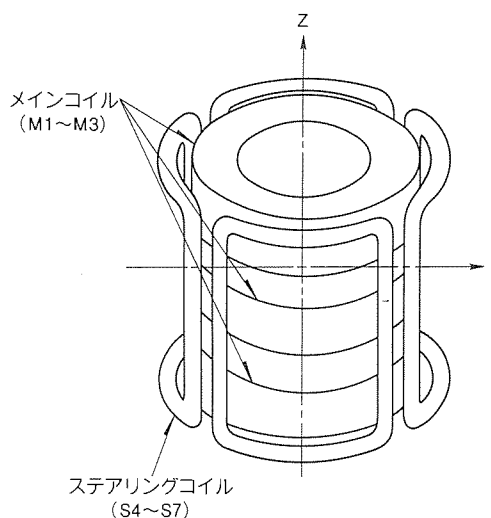


図4. 120GHz ジャイロトロン用超電導マグネットのコイル構成

ることが可能な超電導コイル技術とランニングコストを抑えるための液体ヘリウム消費量低減技術により、シーズとしての技術はほぼ確立されたといえる。今後はニーズとしての磁界応用技術を的確に発掘し、産業界の要請にこたえることが大切であると考えている。

#### 参考文献

- (1) 佐藤 隆, 大西利只: 超電導技術の現状と課題, プラズマ核融合学会誌, **54**, 664~692 (1985)
- (2) Witt, A. F., Herman, C. J., Gatos, H. C.: Chochralski-Type Crystal Growth in Transverse Magnetic Field, J. Materials Science, **5**, 822~824 (1970)
- (3) 高須新一郎: 結晶育成基礎技術, 東京大学出版会, 194~198 (1990)
- (4) 山本 巧: プラズマ加熱用ジャイロトロン, 電学誌, **106**, 975~978 (1986)
- (5) Kimrey, H. D., Janney, M. A., Becher, P. F.: Techniques for Ceramic Sintering Using Microwave Energy, 12th Int. Conf. on Millimeter Waves, Orland, 136 (1987)
- (6) Yasojima, Y., Kikunaga, T., Shimojuma, T., Asano, H., Tsukamoto, T.: Design and Operation of a High Power 120GHz Gyrotron, IEEE Denshi Tokyo, **27**, 121~125 (1988)
- (7) 菊永敏之, 下妻 隆, 浅野啓行, 八十島義行, 中島国彦, 塚本忠則: 120GHz 大出力ジャイロトロン, プラズマ核融合学会誌, **67**, No. 3 (1992)
- (8) 山根隆一郎, 大島修造: マテリアルプロセッシングへの電磁力応用技術, 機械の研究, **44**, 203~207 (1992)
- (9) 公害対策電気技術常置専門委員会: 大勾配磁気分離技術の現状と動向, 電気学会 (1981)

# 超電導デバイス

児島一良\* 谷村純二\*\*\*  
高見哲也\*\* 片岡正行\*\*\*  
黒田研一\*\* 和田 理\*\*\*

## 1. ま え が き

超電導デバイスは低温で動作し、なおかつ動作電圧が低いために低雑音・高感度・高速動作を特長としている。超電導デバイスにも半導体デバイス同様デジタル応用とアナログ応用がある。デジタル回路としては半導体デバイスをしのぐ高速・低消費電力動作をする論理回路、記憶回路が実証されつつある。一方、アナログ回路としては非常に高感度な磁気センサ、超高周波で動作するミキサが知られている。また、超電導体を用いれば非常に損失の少ないアンテナ・導波回路が実現できることが知られている。ここでは、当社で研究している超電導デバイスについて紹介する。

アナログ応用のデバイスのなかでも超高感度磁気センサとしての超電導量子干渉素子 (SQUID)、超低雑音マイクロ波検出器としての超電導トンネル接合ミキサ素子はよく知られている。しかしながら、例えば典型的な超電導金属元素であるニオブの超電導転移温度は 9 K (−264 °C) と非常に低温である。そのために、これらの素子の優れた性能も金属系の超電導体では液体ヘリウムを用いた冷却を必要とし、限られた用途でしか利用されなかった。ところが数年前にその超電導転移温度が非常に高い幾つかの物質群が発見された。それらはいずれも酸化物である。今までの最高超電導転移温度としては、タリウム (Tl) 系の酸化物における 130 K (−143 °C) を越える値が知られている。現在も多くの研究機関で物質探索の研究は続けられており、さらに高い転移温度をもつ物質が発見される可能性もある。高温超電導体の発見以後、超電導デバイスの優れた性能が液体窒素温度 (77 K 又は −196 °C) で実現される可能性が生じ、実用に当たって冷却の負担が軽くなるためにその応用範囲が広がることが期待されている。

例えば、超高感度磁気センサとしての SQUID はこれからの高齢化社会の医療や、人間の脳によく似た働きをするニューロコンピュータ研究に必要な脳機能の解明に重要な役割を果たすものと思われる。また、これまでは電波天文学でしか利用されていなかった超電導トンネル接合ミキサ素子も今後人工衛星から地上の状態を調べるリモートセンシング等その応用範囲が広がっていくことが期待される。

## 2. 金属系超電導体を用いたデバイス

### 2.1 Nb を用いた SQUID

1962 年のジョセフソン効果の発見直後から SQUID は、高感度磁気センサとして注目されていた。SQUID の一つの応用は資源探査のように地中、海水中の磁性物質を飛行機又は地上から検出することにある。一方、最近非常に注目されているのは脳磁波などの微弱な磁気信号を検出する生体磁気計測である。かつては高度なデバイス作製プロセス、極低温、低雑音環境の必要等周辺技術の困難さから SQUID はそれほど普及しなかった。しかし最近では、脳磁界検出用の多チャネル SQUID 磁束計が相次いで発表されている。このような多チャネル化が進めば MRI-CT と同様な SQUID-CT も夢ではない。

生体磁気信号は心臓や肺、脳、そしてあらゆる筋肉から発生するが、その強度は極めて微弱である。SQUID はこのように微弱な生体磁気信号を検出するのに十分な感度をもっているが、通常環境雑音はこれより数けた大きなレベルにある。このように大きな環境磁界雑音に埋もれた微弱な生体磁気信号を検出するために磁気シールドルームを用いたり、検出コイルを微分型に配置して雑音を打ち消したりする工夫がなされている。当社においても Nb を用いた SQUID と微分型の検出コイルを組み合わせ磁気シールドルーム無しで心臓からの磁界を検出することに成功した。

実際に当社で研究試作されている金属系超電導体を用いた SQUID の断面模式を図 1 に示す。このようなデバイスを作るには通常の半導体デバイスと同様にシリコン基板上に絶縁体の酸化シリコン (SiO<sub>2</sub>)、抵抗体のモリブデン (Mo)、超電

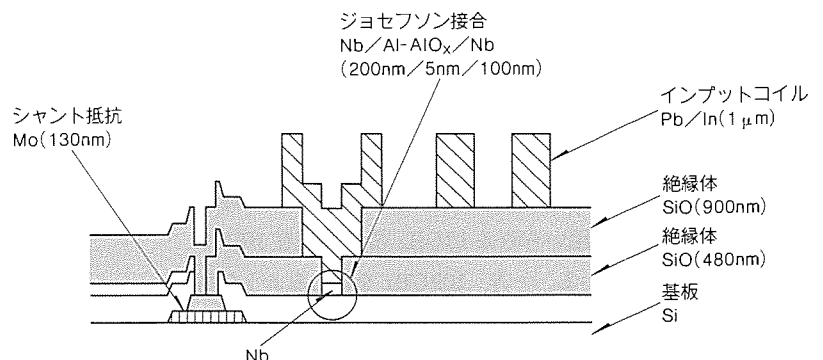


図 1. Nb 系 SQUID の断面模式

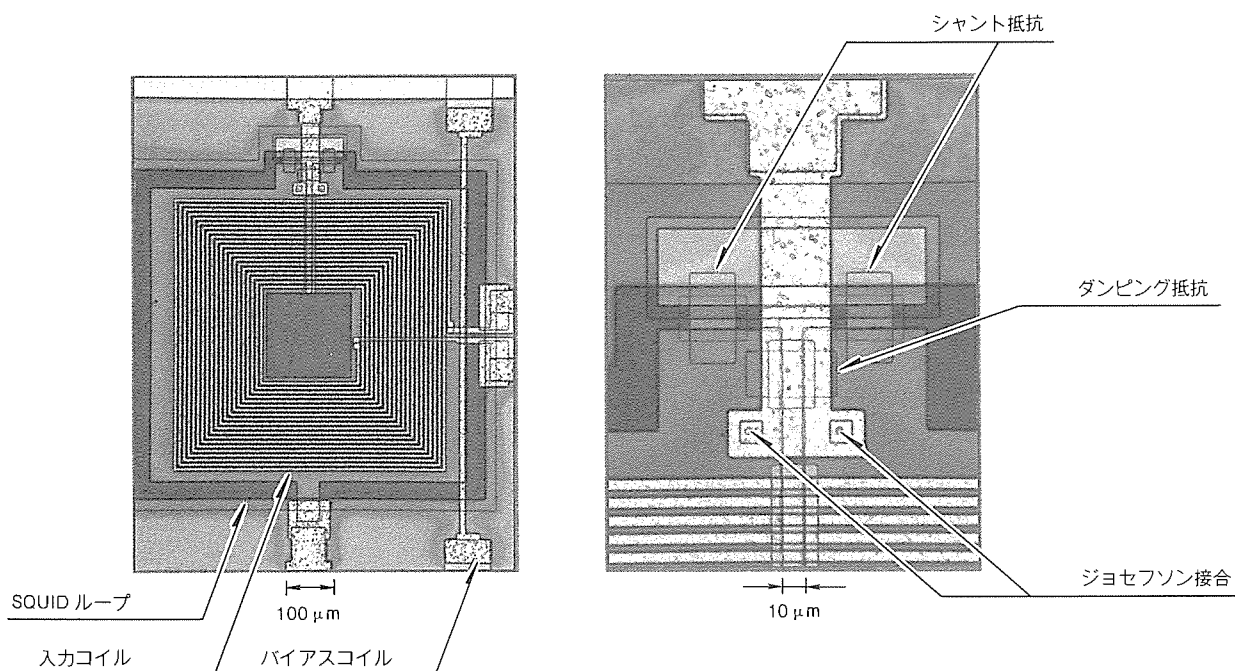


図2. Nb系 SQUID の光学写真

導体のニオブ (Nb) 及び鉛合金 (Pb/In) を写真製版技術で微細加工しながら積層する。出来上がったデバイスの顕微鏡写真を図2に示す。渦巻状に見える線がSQUID に磁場を導くための入力コイルである。ジョセフソン接合としてはNb/Alを用いたトンネル接合を利用している。このようにNb系のSQUIDでは非常に完成度の高いデバイスが試作されるに至っている<sup>(1)</sup>。

一方、高温超電導薄膜を用いたSQUIDではまだ原理的な回路が試作されているにすぎない。高温超電導SQUIDに関しては後に述べる。

また、SQUIDは入力コイルに信号電流を流せば増幅器としても動作する。SQUIDのもつ低雑音性を利用できるため、数百MHzまで増幅可能な低雑音増幅器となる<sup>(2)</sup>。

## 2.2 超電導ミキサ

超電導体はその直流抵抗成分がないため高周波の伝送線路及び空洞共振器等の受動素子として応用した場合も非常に低損失の回路が構成できることが知られている。

一方、能動素子としては超電導トンネル接合 (SIS) が低雑音ミキサとして電波天文台等で使われている。超電導体の電子のバンド構造には半導体と同様のバンドギャップがある。ただし、その値は非常に小さくNbで数mVで、このバンドギャップのために超電導トンネル接合の電流-電圧特性に非線形特性が現れる。この非線形特性を利用してミキサ動作を行う。衛星放送等に用いられる12GHz帯では現在HEMT増幅器が用いられている。一方、100GHzを越えるような高周波では超電導トンネル接合 (SIS) が量子限界に近い低雑音動作を行うため、電波天文学等に利用されている。

当社で研究している90GHz帯での超電導ミキサ回路の写

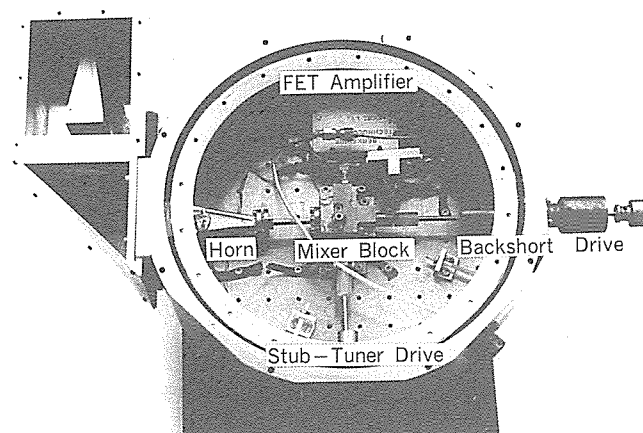


図3. 超電導ミキサ回路

真を図3に示す。トンネル接合としてはNb/Al接合を用いている<sup>(8)</sup>。

## 2.3 超電導記憶回路

超電導記憶回路の動作原理は半導体記憶回路のそれと相補的な関係にある。半導体記憶回路では情報はコンデンサに電荷の形で記憶される。一方、超電導記憶回路では情報はインダクタンスに電流の形で記憶される。しかも、この電流が超電導体固有の性質によって永久電流の形で流れる。そのため、半導体記憶回路でいうところのリフレッシュ動作が不要となる。また、回路を微細に形成し、電流レベルを小さくすればこの永久電流は量子化されており、永久電流によって生じる磁束は磁束量子 ( $\Phi_0$ ) の整数倍となる。

図4に示すのは当社独自の磁気結合型回路を採用した非破壊型単一磁束量子記憶超電導記憶回路の光学写真である。メモリセル選択に当たって独自の磁気結合型回路を採用したた

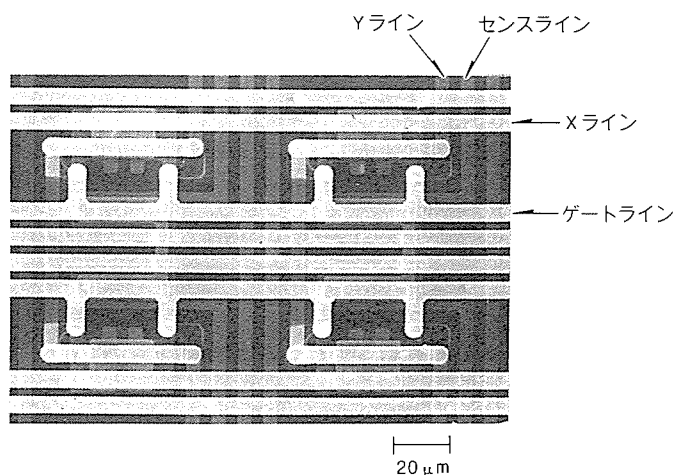


図4.(a) 磁気結合型非破壊読み出し単一磁束超電導記憶回路 (4個のセルが示されている)

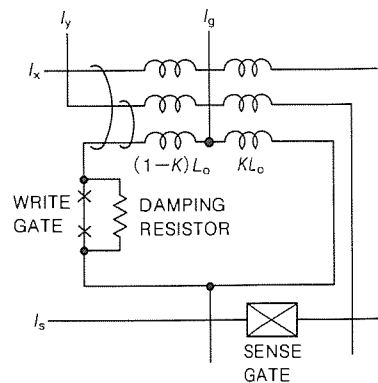


図4.(b) 等価回路

めにセル面積を大幅に減少することに成功した<sup>(9)</sup>。

## 2.4 準粒子注入型弱結合素子

一般的に電子回路を構成するには非線形素子が必要である。超電導電子回路では、ジョセフソン素子がこの非線形素子としての機能を担っている。しかしながら、ジョセフソン素子は二端子素子であり、半導体でのトランジスタのような三端子素子があれば非常に使いやすいものとなる。このような超電導三端子素子を対象とする探索的な研究も当社で行われている。

超電導体の中では電子は対をなしてエネルギー的に安定した状態にある。このような状態から励起されて一電子状態になった電子を準粒子と呼ぶ。この準粒子はトンネル接合で生成することができ、これを超電導体の中に注入すればジョセフソン素子と同様の弱結合素子を形成できる。図5に示したのはこのような準粒子注入型弱結合素子を利用したSQUIDである<sup>(10)</sup>。

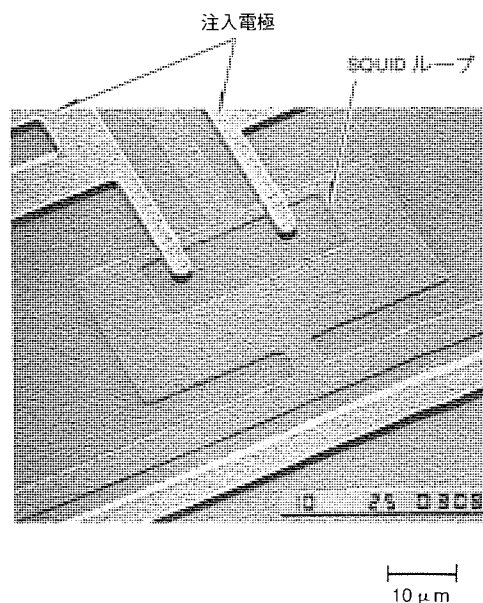


図5. 準粒子注入型弱結合素子

## 3. 高温超電導デバイス

### 3.1 三ターゲットスパッタ法

高温超電導体を用いたデバイスを試作するためには高品質の薄膜を形成する必要がある。高温超電導体はその構成元素が非常に多く、また良好な超電導特性を得るためにはその組成の精密な制御と完全な結晶構造を必要とする。例えば、Bi系超電導体ではその金属元素組成を正確に  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_x$ 、又は  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  に制御しなければならない。このような精密組成制御を行うために、真空蒸着法、スパッタ法等を検討したが、ここでは当社独自の三ターゲットスパッタ法について述べる<sup>(3)</sup>。

図6に示すように組成の少し異なる3個のターゲットを同時に放電し、それらの上で加熱された基板を順次滞在させる。それぞれのターゲット上の滞在時間を調節することにより、膜上にたい(堆)積する金属元素の組成を精密に制御するこ

とができる。また、スパッタ時に薄膜中に酸素が十分に取込まれるようにスパッタガスとして純酸素を用いた。この方法を用いることにより、熱処理を施さことなくBi系の超電導膜で液体窒素温度を越える超電導転移温度をもち、表面形状も良好な薄膜を再現性良く、安定に形成できるようになった<sup>(4)</sup>。同様の成膜はY系の薄膜でも可能である<sup>(12)(13)</sup>。

### 3.2 Bi系超電導体の自然超格子構造

この三ターゲットスパッタ法で薄膜の組成を精密に制御することにより、Bi系の低温相と高温相が交互に積み重なった超格子構造が形成できることを当社が最初に発見した<sup>(11)</sup>。

Bi系の超電導体としては低温相と呼ばれる  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_x$  構造と高温相と呼ばれる  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  構造が知られている。薄膜中の組成がこの中間となるように精密に組成制御を行うとこの二つの結晶構造が交互に積み重なった超格子構造となる。化合物半導体で作られる超格子構造は構

成元素を交互に供給して人工的に形成される。しかしながら、この超電導体の超格子構造は交互供給することなく自然に形成される。

### 3.3 集束イオンビーム加工を用いた高温超電導 SQUID

高温超電導体のコヒーレンス長は数 Å と非常に短い。ちなみに、例えば Nb のコヒーレンス長は数百 Å である。ジョセフソン素子の加工にはこのコヒーレンス長程度の加工を必要とする。そこで高温超電導体を用いたジョセフソン素子の加工には非常に微細な加工を必要とする。通常、高温超電導体薄膜の加工にはりん(燐)酸等の酸の希釈液を用いたウェットエッチング法が用いられる。このような方法では超微細加工は不可能である。当社では集束イオンビームを用いてジョセフソン素子の加工を行った<sup>(14)</sup>。加工に際しては高温超電導薄膜をエッチングするのではなくイオンビームを照射した部分をその損傷で非超電導化した。この方法のために非常に少ないイオンビーム量で加工が可能となった。超電導薄膜として MgO 基板上的 Y 系薄膜、イオンビームとして Ga を用いた。

### 3.4 配向性制御及び人工粒界接合ジョセフソン素子

高温超電導体は層状ペロブスカイト構造と呼ばれる層状の

結晶構造をしている。通常スパッタ法等で Bi 系の超電導薄膜を MgO 基板の上に形成すると c 軸配向膜が形成される<sup>(5)</sup>。ところが基板として SrTiO<sub>3</sub> (1 1 0) の基板を用いると結晶軸が傾いた薄膜が形成できる<sup>(6)</sup>。そこで基板の一部分に前もって薄い MgO を形成し、その後 Bi 系の薄膜を形成すれば MgO の端部には方位の異なる結晶どうしの境界である結晶粒界が形成される。この境界部の透過電子顕微鏡写真を図 7 に示す。基板である傾いた SrTiO<sub>3</sub> (1 1 0) 結晶の上に部分的に MgO が 15 nm 形成されており、この MgO の端部に Bi 系超電導体結晶の粒界がみえる。この粒界部での結晶構造の模式を図 8 に示す。この模式で Bi 系超電導体の層状結晶構造を面の繰り返しで表現している。この人工粒界接合がジョセフソン素子として機能することをマイクロ波応答及び SQUID の外部磁界に対する周期応答で確認した。この素子にマイクロ波を照射したときの電流-電圧特性の変化を図 9 に示す。マイクロ波の周波数に応じた定電圧ステップが生じている。この電圧ステップはシャピロステップと呼ばれるものでジョセフソン素子に固有な性質である。また、このような人工粒界接合を 2 個リング状に接続すれば SQUID を形成でき、図 10 に示すように外部磁界に対して周期的な出力電圧を示した。

Nb 系の SQUID は他の磁気センサの追従を許さないほどの高感度をもっているが、高温超電導薄膜の SQUID はまだ

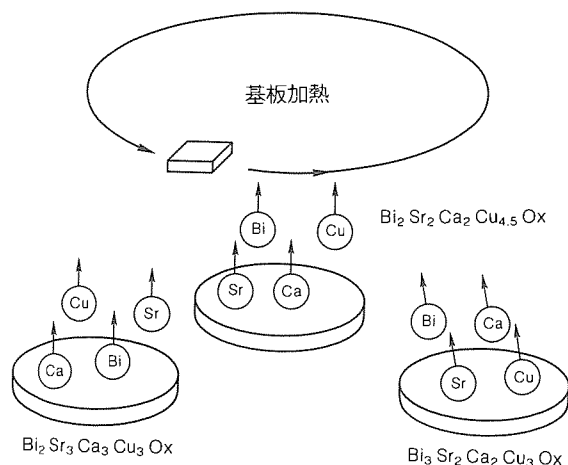


図 6. 三ターゲットスパッタ法概念

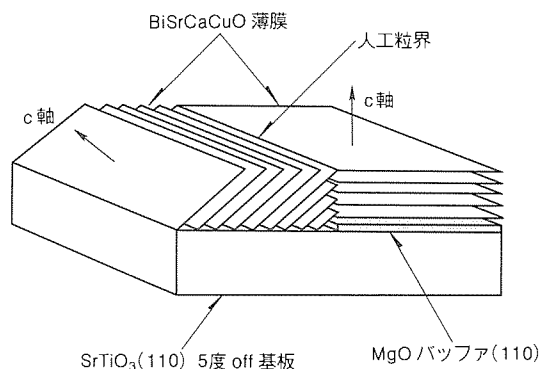


図 8. 人工粒界接合の模式

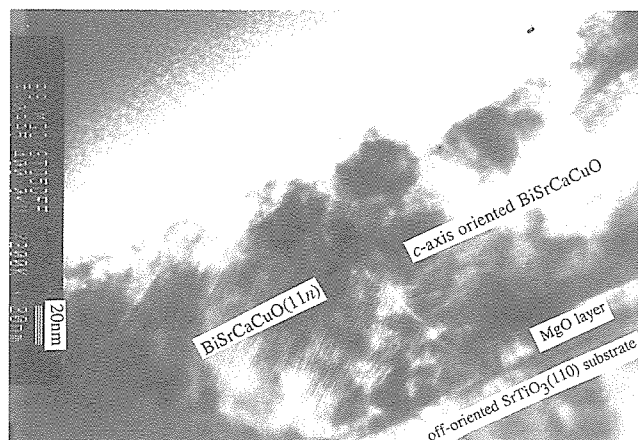


図 7. 人工粒界接合の透過電子顕微鏡写真

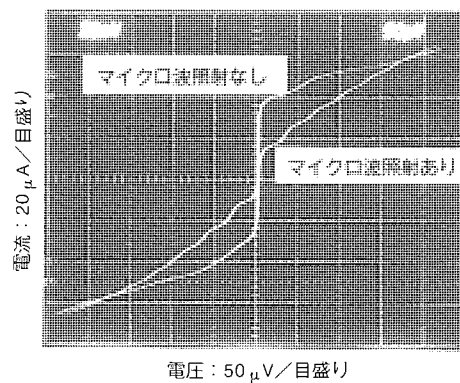


図 9. 人工粒界接合にマイクロ波を照射したときの電流-電圧特性の変化

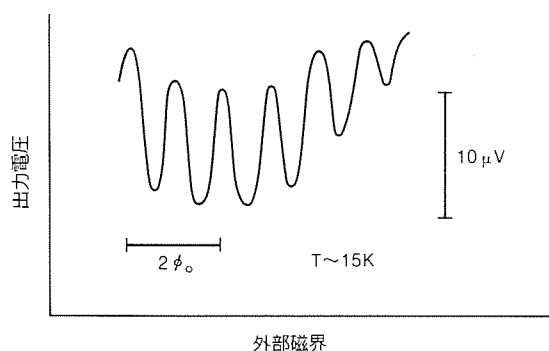


図10. 高温超電導 SQUID の外部磁界に対する出力電圧の周期的応答

十分な磁界感度を得るに至っていない。高温超電導 SQUID は Nb 系の SQUID ほどに完成しておらず、特に生体計測等を目的とする磁気検出器では低周波の応答を観測するために  $1/f$  雑音の低減が重要な課題となる。

#### 4. む す び

以上当社における超電導デバイスの研究について紹介した。高温超電導体の発見以前から、Nb を用いて超電導デバイスの研究を行ってきた。一連の研究を通じて超電導デバイスは半導体デバイスに無い優れた性能をもつことが実証されている。今後高温超電導体のプロセス技術の進展に伴い、その応用範囲が広がることが期待される。

#### 参 考 文 献

- (1) Ohkawa, N., Noguchi, T., Tsukada, N. : Measurements of Noise Characteristics of a dc SQUID with a Resistively Shunted Inductance, Jpn. J. Appl. Phys., **26**, 1643~1644 (1987)
- (2) Takami, T., Noguchi, T., Hamanaka, K. : A dc SQUID Amplifier with a Novel Tuning Circuit, IEEE Trans. on Magnetics, **MAG-25**, No. 2, 1030~1033 (1989)
- (3) Kojima, K., Kuroda, K., Tanioku, M., Hamanaka, K. : As-grown Superconductivity of BiSrCaCuO Thin Films Prepared by Magnetron Sputtering with Three Targets, Jpn. J. Appl. Phys. **28**, L643~L645 (1989)
- (4) Kuroda, K., Kojima, K., Tanioku, M., Yokoyama, K., Hamanaka, K. : Surface Morphology and Crystal Structures of As-grown BiSrCaCuO Thin Films Prepared by Magnetron Sputtering from Three Targets, Jpn. J. Appl. Phys., **28**, 1586~1591 (1989)
- (5) Kojima, K., Scholom, D. G., Kuroda, K., Tanioku, M., Hamanaka, K., Eckstein, J. N., Harris, J. S. Jr. : Superstructure in Thin Films of Bi-based Compounds on MgO, Jpn. J. Appl. Phys. **29**, L1638~L1641 (1990)
- (6) Kuroda, K., Wada, O., Tanimura, J., Kojima, K., Takami, T., Kataoka, M., Ogama, T., Hamanaka, K. : BiSrCaCuO Thin Film Grown on SrTiO<sub>3</sub> Substrate with Off-oriented (110) Surface, Jpn. J. Appl. Phys., **30**, L582~L584 (1991)
- (7) Takami, T., Kuroda, K., Kojima, K., Wada, O., Tanimura, J., Kataoka, M., Ogama, T., Hamanaka, K. : Artificial Grain Boundary Junctions in BiSrCaCuO Thin Films with (11n) and (001) Orientation, to be published in Jpn. J. Appl. Phys.
- (8) Noguchi, T., Takami, T., Hamanaka, K. : Quasiparticle 30 GHz Mixer with a Nb-based SIS Junction, Superconductivity Electronics, 133~136, Ohmsha (1987)
- (9) Kojima, K., Noguchi, T., Hamanaka, K. : An Inductively Coupled Single-Flux Quantum NDRO Memory Cell, IEEE Electron Device Letters, **EDL-4**, 264~266 (1983)
- (10) Kojima, K., Nara, S., Hamanaka, K. : Thin Film dc SQUID Consisting of Quasiparticle-injected Superconducting Weak Links, Appl. Phys. Lett. **47**, 325~327 (1985)
- (11) Kojima, K., Schlom, D. G., Kuroda, K., Tanioku, M., Hamanaka, K., Eckstein, J. N., Harris, J. M. : Superstructure in Thin Films of Bi-Based Compound on MgO, Jpn. J. Appl. Phys., **29**, L1638~L1641 (1990)
- (12) Kuroda, K., Kojima, K., Tanioku, M., Yokoyama, K., Hamanaka, K. : Formation of As-grown YBaCuO Thin Films by Magnetron Sputtering from Three Targets, Jpn. J. Appl. Phys., **28**, 1797~1803 (1989)
- (13) Kuroda, K., Kojima, K., Tanioku, M., Yokoyama, K., Kuroki, H., Hamanaka, K. : Preparation of Ca-doped YBaCuO Thin Films Containing 248 Phase by RF Magnetron Sputtering, Jpn. J. Appl. Phys., **29**, 1439~1443 (1990)
- (14) Tanioku, M., Kuroda, K., Kojima, K., Hamanaka, K., Hisaoka, Y.H., Shuhara, A., Murakami, H. : Fabrication of dc SQUID with As-grown YBaCuO Thin Film by Focused Ion Beam, Proc. of 2nd Int. Symp. on Supercond. (ISS'89), Tsukuba, 987~991 (1989)



# 高温超電導膜のデバイス 及び線材応用

内川英興\* 今田勝大\*\* 佐藤 建\*  
吉新喜市\*\* 渡井久男\*\* 北山忠善\*\*\*  
松野 繁\*\* 宇都宮 真\*\* 水落隆司\*\*\*

## 1. ま え が き

酸化物系高温超電導体の発見以来、その基礎物性に関する研究及び応用を目指した研究が活発化している。特に、超電導薄膜の良好な結晶性に基づく極めて低い表面抵抗及び高臨界電流密度は、エレクトロニクス応用、電力応用両面で大きな魅力であり、能動及び受動デバイス化や成膜法を利用した線材化検討が実施されている。しかし、このような特性をもつにもかかわらず各種基板上への良質膜の形成、接合の作製、異方性の改善、長尺化など解決すべき多くの技術課題が山積している。さらには、超電導性を得るために冷却が必要であるというシステムサイドから見た大きなデメリットも存在するため、高温超電導体の実用化はいまだ達成されていない。現在、これらの課題の解決に向けてプロセスの改良による低温成膜、配向制御、多層構造の作製及び小型冷却器の採用などに関し、多方面から検討されている。このような中で、米国ではいち早く1992年中に、宇宙ステーション内での高温超電導膜を用いたマイクロ波回路部品(共振器、フィルタ等)の実用試験が予定され、高周波分野では早い時期の実用化が期待されてきた。

本稿では、現在進展の著しい超電導体の薄膜化要素技術について簡単に記述し、次に高温超電導膜のデバイス応用例として、 $\text{LiNbO}_3$  (以下“LN”という。)光変調器用電極への適用化、さらにCVD法による線材化のための基礎検討に関し、解決すべき課題と開発現状を紹介する。

## 2. 超電導体の薄膜化要素技術の現状

酸化物系高温超電導体は、高臨界温度、電気伝導の異方性、低キャリア濃度と大きなエネルギーギャップなどの特徴的な物性をもつが、その超電導機構がほとんど解明されていないため、デバイスや線材設計のためのパラメータはすべて明確になっていない。薄膜を実際に応用する場合、エレクトロニクス分野では超電導体のエピタキシャル成長技術が最も重要であり、電力応用のための線材化ではこれに加えて粒界制御及び配向制御技術が必要と考えられる。高温超電導体の発見以来、Y系(Y-Ba-Cu-O)を中心に薄膜化の検討が進められ、現在ではかなり良質なエピタキシャル膜がスパッタリング等の手法で得られている。しかし、Bi系(Bi-Sr-Ca-Cu-O)やTl系(Tl-Ba-Ca-Cu-O)では、組成制御が難しく、最適なプロセス条件の決定のためには、まだ不明確な点が多く存在

している。

エレクトロニクス応用では、主として半導体基板上に300℃以下の低温で超電導薄膜を成膜できれば、広汎な応用につながるはずである。そこで、プロセスの改良によって成膜時の基板温度を下げる検討が行われている。高真空中での酸化のため、 $\text{O}_3$ 、原子状酸素、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{NO}_2$ などの活性酸素源を用いることが必ず(須)とされている。Y系では500℃付近が最低基板温度として報告されている<sup>(1)</sup>。Bi系では分子線エピタキシー(MBE)法により、酸化ガスとして $\text{NO}_2$ を用いてlayer-by-layer成長を行い、300℃で成膜に成功したという報告がある<sup>(2)</sup>。また、高周波分野での応用のために、特にエピタキシャル成長しやすく、かつ低誘電率をもつ結晶基板の開発も進んでいる。

高温超電導体における超電導コヒーレンス長の強い異方性に対する対策として、基板温度、基板の結晶方位、酸素分圧などを変化させて薄膜の配向制御が検討されている。成膜手法にもよるが、一般に基板の温度が高いほどc軸配向しやすく、低温側でa軸配向しやすい傾向にある。超電導体の層状構造では、結晶のc軸方向とそれに垂直な方向とでは成長速度が異なり、PVD(スパッタなどの物理蒸着)法では基板温度を変えることで容易に配向制御が可能である。また、CVD(化学気相堆積)法では、Y系において原料ガスの輸送順や組成を変えることによって配向制御が行えることが見いだされている<sup>(3)</sup>。

デバイス化のための接合形成の検討として、超電導薄膜の間に薄い絶縁膜又は常電導膜を挟んだ薄膜積層型超電導接合が形成されている。さらに、ペロブスカイト又は層状ペロブスカイト構造をもつ各種の複合酸化物同士のエピタキシャル積層膜が形成され、近接効果や超電導超格子としての特性が研究されるようになった。これらの研究は、超電導発現機構の解明及び新超電導体の探索において今後威力を発揮するものと期待される。

積層構造に関連して、成膜を用いた線材化検討においては、ベースとなる金属上にバッファ層としてイットリア安定化ジルコニア(YSZ)、 $\text{SrTiO}_3$ などを形成し、その上に超電導膜を形成する試みが実施されている。この場合、界面において金属との拡散反応を抑制し、さらに超電導膜の配向性を損なわないバッファ材を選定、成膜する必要がある。積層構成の線材では、臨界電流特性の向上と長尺化が最大の課題であり、その解決のためには、エピタキシャル厚膜の形成、粒界一

配向制御、磁束ピンニングセンターの導入など非常に難しい技術を必要とする。

### 3. 超電導薄膜の光変調器電極への適用化

#### 3.1 光変調器の概要

コヒーレント光通信を始めとする超高速・大容量光通信システムでは、従来の半導体レーザの直接変調方式では対応し難く、送信側で使用する外部(光)変調器の開発が各社で活発化している。これは、高周波化に対しては直接変調方式では、レーザの波長が広がって信号がなくなってしまう(周波数チャージング)という問題のためである。光変調器はチャージングを伴わない光変調が行え<sup>(4)</sup>、かつ材料として大きな電気光学係数をもつLNを使用すると、その高速応答性から超高周波域での利用が可能であることが実証されている<sup>(5)</sup>。

光変調器には、マイクロ波の給電方法によって大きく分けて、進行波型と集中定数(共振)型の2種類がある。前者は一般に、導波路上に形成された直線上の対向電極をもち、マイクロ波が導波光とともに進行する。素子の駆動電圧(電力)が高くないと変調を行えないことが欠点である。後者は、マイクロ波を一点で給電し、電極部が共振器構造をなしており、狭帯域で一定の周波数で使用するという欠点がある。しかし、十数GHz以上の高周波で使用でき、電極部のQ値を増大させることによって、駆動電圧を低減化することが可能であるという大きな利点がある<sup>(6)(7)</sup>。導波路型のLN光変調器を実用化するための最大の課題は、広帯域で使用でき、かつ駆動電圧の低減化を達成して効率の良い光変調を実現することである。ただし、光変調器では一般にその性能を示す低電圧化と広帯域化とはトレードオフの関係にある。

#### 3.2 超電導電極の形成とその特性

ここで述べる光変調器で、超電導薄膜はマイクロ波の給電電極及び変調電極として作用する。光変調器の電極に酸化物超電導薄膜を適用する場合、進行波型では光波とマイクロ波の速度を整合させること及び電極長を長くすることなどが必要であり、必ずしも大きな利点が得られるとはいえない。そこで、酸化物超電導膜のもつ低表面抵抗のメリットがより有効に活用できる共振型について、当社での開発現状を述べる。

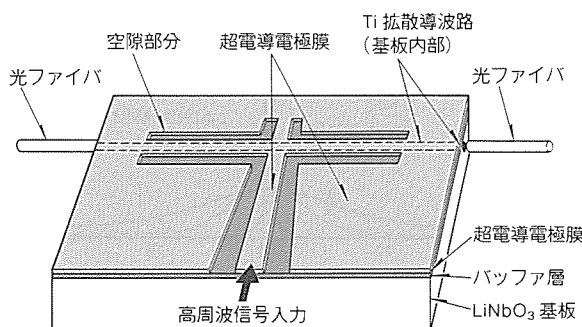


図1. 光変調器用共振電極の一例

#### (1) バッファ層の作用及び超電導薄膜の高周波表面抵抗

図1に光変調器における共振電極の一例を示す。図2に試作した図1のような電極構成をもつ光変調器の超電導電極部を示す。十字状超電導電極(図2では中央部)に沿って空けき(隙)部があり、マイクロ波の反射による共鳴を利用して18GHzの周波数に共振するように設計されている。給電されたマイクロ波信号は1.55  $\mu\text{m}$ の赤外光によって光ファイバ伝送される。光ファイバは、LN基板内部に形成されたTi拡散導波路に接続される。進行方向に電界成分をもち、磁界成分を全くもたない光のモード(TM光)を用いる場合には、電極部において導波路から光が散乱されるのを防ぐために、バッファ層を形成する必要がある。したがって、超電導電極はこのバッファ層上に積層して形成せねばならない。一般に、LN基板はLiが拡散しやすくかつ酸素が脱離しやすいため、バッファ材料の選定が一つのキーポイントである。すなわち、バッファ層に要求される性質としては、①導波路よりも屈折率が低いこと、②LN基板と反応しにくいこと、③酸化物超電導膜と反応せず、かつ超電導膜に良好な配向性を与えることなどが挙げられる。そのため、バッファ層としてMgO、 $\text{Y}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZrO}_2$ 等が検討されている<sup>(8)</sup>。図3は種々のバッファ層を形成した場合のY系超電導膜の臨界温度(抵抗の温度特性)を示したものであり、臨界温度として76~86Kの膜が得られている。

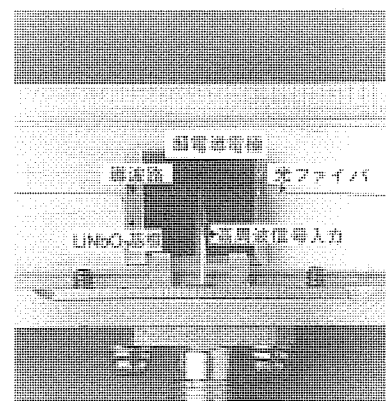


図2. 光変調器試作品の超電導薄膜電極部

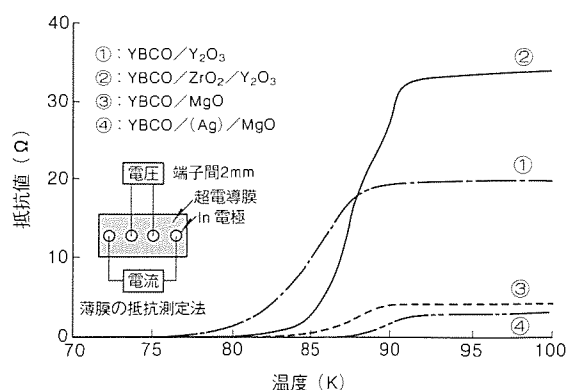


図3. バッファ層上Y系超電導膜の抵抗の温度特性

高周波における超電導体の等価回路は、超電導電子によるインダクタンスと常電導電子による抵抗を伴うインダクタンスの並列回路で表される。また、表面抵抗については、金属では周波数の平方根に比例するが、超電導体では周波数の2乗に比例する。数十GHzの高い周波数でも、超電導体は通常の金属よりもはるかに低い表面抵抗をもつため、高周波域における伝送路、電極等として非常に有望である。図4に、一例としてY系超電導薄膜とCu及びAlの18GHzにおける表面抵抗の温度特性の相違(各物性値から計算した結果)を示す<sup>(9)</sup>。このように、酸化物超電導膜では、臨界温度以下の超電導状態においては、理論上通常の金属に比べて3けた以上低い表面抵抗値が得られるはずである。ただし、低い表面抵抗が実験的に実証されているのは単結晶基板上に形成された良質な薄膜のみであり、バルクや厚膜では高い値しか得られていない。図5は、図3に示したバッファ層上Y系超電導薄膜の18GHzにおける表面抵抗の温度変化を測定したものである。この図から分かるように、現在我々はLN上にMgOを形成し、その上にAg層を設けた場合に最も臨界

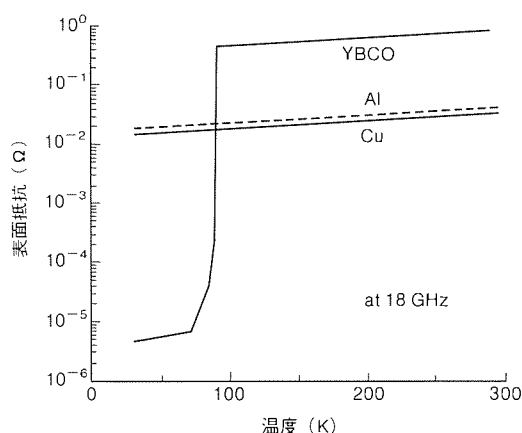


図4. Y系超電導膜の18GHzにおける表面抵抗の温度特性(計算値)

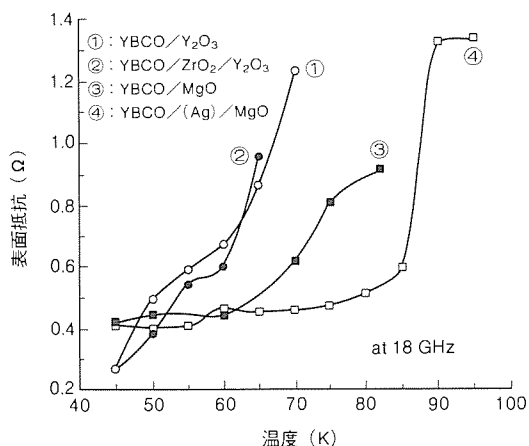


図5. 種々のバッファ層上Y系超電導膜の表面抵抗の温度特性

温度が高く(図3参照)、かつマイクロ波に対する表面抵抗が低い超電導膜が得られることを見いだしている<sup>(8)</sup>。MgO上にAg層を形成した場合には、Y系超電導膜は良好なc軸配向となり、超電導特性が向上する。Ag層の役割については今のところ明らかでないが、何らかの結晶性促進作用、触媒作用、濡れ性等が影響しているものと推定される。図5における表面抵抗の値は理論値と比べるといまだ不満足なものであるが、更に良好なバッファ層の探索によって理論値に近づく可能性がある。

## (2) 伝送損失及び変調効率

表面抵抗の理論値に近い超電導膜が形成できた場合、共振電極のQ値が向上し、変調効率が向上するのは明らかである。シミュレーション<sup>(10)</sup>によればY系超電導膜を用いたコプレーナ電極(同一平面内に伝送路とアースをもつ)の伝送損失は図6に示したようになる。LN基板を使用し、電極をAlで形成した場合には、室温において約10 dB/cmの損失がある。これに対して、Y系超電導膜自体の80 Kにおける

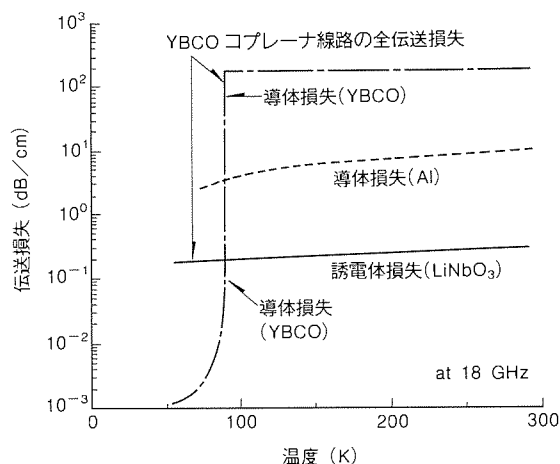


図6. LN基板上Y系コプレーナ線路における伝送損失の温度特性(計算値)

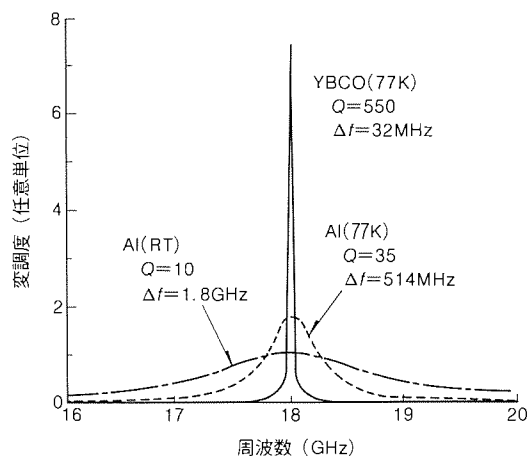


図7. 電極の相違による共振型光変調器の変調深さの周波数依存性(計算値)

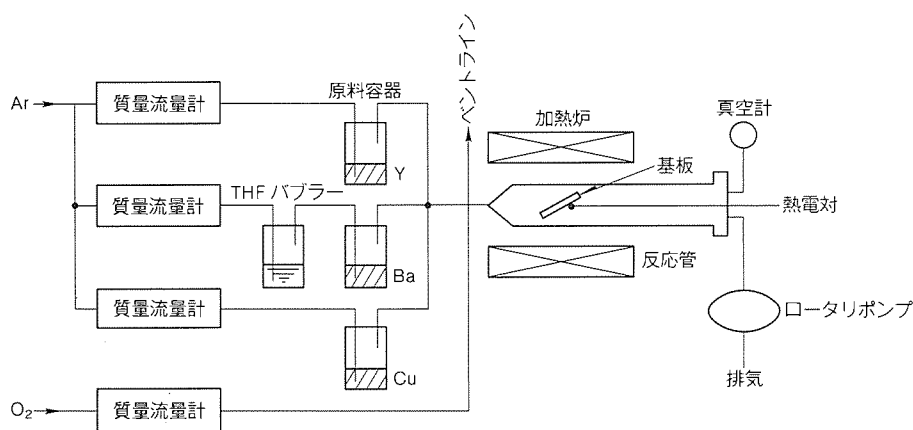


図8. 溶剤付加 CVD 法の装置概略

表1. 溶剤付加 CVD 法の代表的な合成条件

原 料	Y (DPM) <sub>3</sub>	Ba (DPM) <sub>2</sub>	Cu (DPM) <sub>2</sub>
原料加熱温度 (℃)	100~130	200~220	100~130
キャリアガス流量 (CCM*)	5~20	5	8~20
THF 蒸気流量 (CCM)		10~100	
酸素ガス流量 (CCM)		200	
基板温度 (℃)		850	
基 板		SrTiO <sub>3</sub> (1 0 0)	
反応圧力 (Pa [Torr])		1.333 [10]	
合成時間 (min)		20~30	

注 \* cm<sup>3</sup>/min (at 25℃)

損失は  $10^{-3}$  dB/cm オーダーである。しかし、超電導膜を LN 基板上に形成したコプレーナ電極の場合には、臨界温度以上で導体損失が支配的であるが、臨界温度以下では LN 基板の誘電損失 ( $10^{-1}$  dB/cm オーダー) が全伝送損失を支配することが分かる。

図7は、Y系超電導電極と Al 電極の  $Q$  値、帯域幅及び変調効率 (変調深さ) を比較した計算結果<sup>(10)</sup>である。Y系電極では、帯域幅は狭くなるが、 $Q$  値の向上に伴って変調度 (深さ) が增大することが明らかである。この結果から駆動電圧を見積もると、Al 電極の 20 V と比べると Y 系膜では約 2 V に低減化され、高温超電導薄膜の適用によって実用化上、非常に大きな利点が生まれる。

#### 4. CVD 膜を用いた線材化の基礎検討

当社では、通商産業省工業技術院ムーンライト計画“超電導電力応用技術開発”の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) からの受託により、高温超電導体の線材化の研究開発を実施中である。具体的には、超電導発電関連機器・材料技術研究組合に参画し、特性の良好な酸化物系高温超電導線材を CVD 法によって開発するための研究を行っている。

CVD 法は、PVD 法と並ぶ代表的な成膜方法であり、特に PVD 法と比べて高速成膜が可能で、複雑な形状物へ大面積に成膜できるなどの利点を備えているため、成膜法を応用した超電導体の線材化に最も有利と考えられる。ここでは、CVD 法を用いた高温超電導材料の線材化における基礎研究の現状を紹介する。

##### 4.1 CVD 原料の問題点と合成法の改良

CVD 法は半導体や耐高温無機材料等の合成において、成膜手法としての優れた実績をもっている。しかし、酸化物系高温超電導体の場合には、良好な気化性をもつ安定な CVD 原料が存在しないという大きな問題があった。現存する主な原料は、ジピバロイルメタネート (DPM 化合物) と呼ばれる固体状の  $\beta$ -ジケトン金属錯体であり、酸化物系超電導材料で

は特に Ba の気化特性及び安定性が良好でないことが知られている。このため、通常の CVD 法では組成制御が行いにくく、線材化の観点からは高速合成及び安定な連続合成が困難であるという致命的な欠点があった。

上記の欠点を克服するために、溶剤付加 CVD 法<sup>(11)</sup>が開発された。装置の概略を図8に、また表1に合成条件の一例を示す。この方法の特長は、Ba 原料に有機溶剤であるテトラヒドロフラン (THF) をアルゴンガスとともに接触させるものであり、これによって Ba 原料の気化温度は通常の場合と比較して 80~120℃ 低下し、かつ気化量は数十倍にも達する。この理由は、THF が原料に接触することによって形成されたある種の付加体の気化特性が、低温加熱でも非常に良好であることに起因すると考えられている<sup>(11)</sup>。

##### 4.2 高速合成及び再現性の向上

前記のように、CVD 原料に溶剤を付加する新しい手法を開発したことにより、精密な組成制御を安定して行うことができるようになった。これによって、薄膜から厚膜まで再現性良く合成することが可能である。厚膜の一例として、膜厚 5.5  $\mu$ m の膜を 20  $\mu$ m/h という従来法の 50 倍程度の高速により、SrTiO<sub>3</sub> (1 0 0) 基板上に Y 系超電導膜が合成可能である。この厚膜は、図9に示したように  $c$  軸配向のみの X 線回析パターンを示し、配向性が良好である。

この手法によって Y 系超電導薄膜 (膜厚 0.3  $\mu$ m) を形成した場合、臨界温度は膜としては最高の 92 K を示す<sup>(12)</sup>。同一

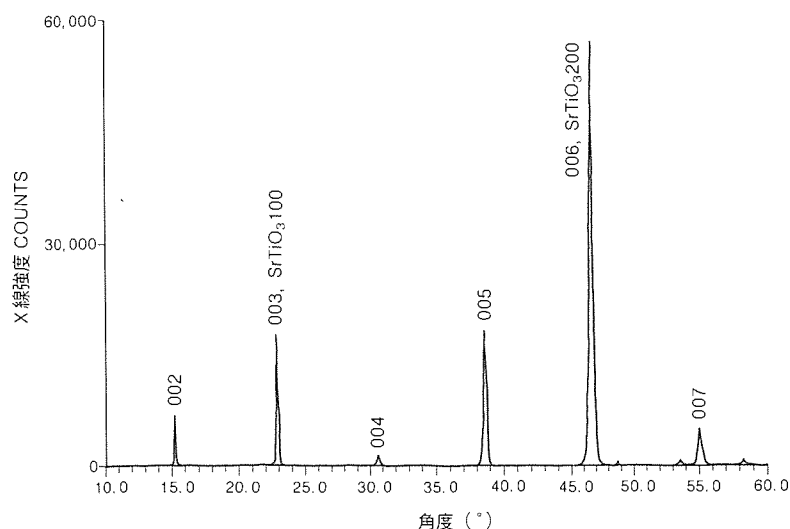


図9. 溶剤付加 CVD 法による Y 系超電導厚膜の X 線回折パターン

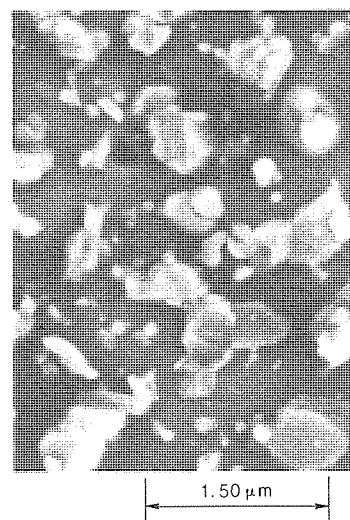


図10. Y 系 CVD 膜の表面 SEM 像

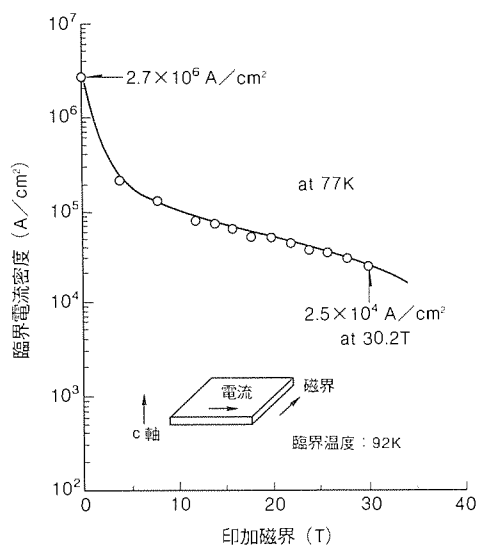


図11. Y 系超電導膜における臨界電流密度の磁界依存性

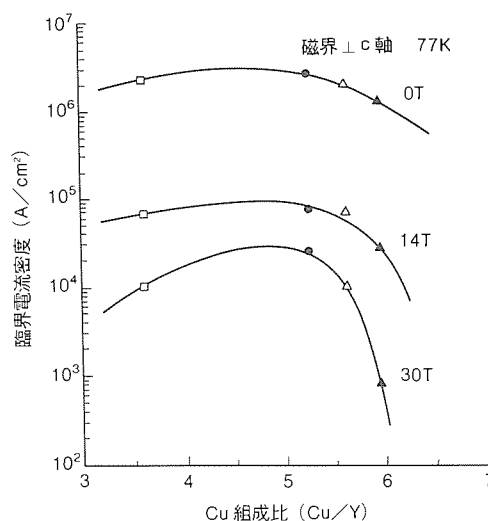


図12. Cu 組成比による Y 系超電導膜の臨界電流密度の磁界変化

条件で連続合成を行って、超電導薄膜の作製再現性について調べたところ、続けて 5 回の成膜によっても臨界温度は上記の値の  $-0.5$  K 以内であった。この膜の表面には、図 10 に示した SEM 像のように大小の CuO 粒子の析出が見られ、また X 線回折パターンにはわずかに a 軸配向が存在する<sup>(12)</sup>。これは、膜の組成を含有成分である Cu 過剰側にずらしているためであり、このようにすることによって超電導特性が良好になる。ただし、膜と基板との界面には CuO の析出がなく、わずかの不整合転位を除いては、SrTiO<sub>3</sub> の (1 1 0) 面と Y 系膜の (1 0 3) 面とが界面を通じて整合性良く連続していることが透過型電子顕微鏡を用いた観察によって確認されている<sup>(12)</sup>。酸化物超電導材料の線材化のためには、高速で合成した厚膜においてもこのように良好な膜成長が維持されることが必要であり、現在各社ともこの点の解決に注力している。

#### 4.3 組成、配向性制御による高臨界電流密度化

上記の Y 系超電導薄膜では、ゼロ磁界下で臨界電流密度が世界でもトップクラスの  $600$  万  $\text{A}/\text{cm}^2$  以上のものが得られている<sup>(11)</sup>。また、臨界電流密度値  $200$  万  $\text{A}/\text{cm}^2$  程度の膜は、かなり再現性良く合成可能である。図 11 に、代表的な膜の c 軸に垂直な方向における臨界電流密度の磁界依存性を示す。印加磁界が低い場合には、臨界電流密度の低下が急激であるが、高磁界側では比較的緩やかな低下を示す。そして、 $30.2$  T の高磁界中においても実に  $2.5$  万  $\text{A}/\text{cm}^2$  の値をもっている<sup>(13)</sup>。この値は高温超電導体では、現在のところ世界で最も高い値である。さらに、成分元素である Y, Ba, Cu の組成比を変えて膜の配向性と臨界電流密度との相関関係について検討した。臨界温度及び臨界電流密度とも、化学量論組成である  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  よりも Cu が過剰の場合に高い値を示した。この場合に、Cu の比率を変えると超電導膜の配向性が変化する。Cu 比 (Y を 1 とする) を 3 から 6 まで増加 (したがって、析出物である CuO の量を増加) させるにつれて a 軸配向成分の含有率が増加する傾向があり、Cu 比 5.2

あたりからこの増加が著しくなる<sup>(13)</sup>。また、図12に示すように、臨界電流密度はa軸配向成分が急増するCu比5.2のところで極大を示す<sup>(13)</sup>。この挙動は、印加磁界が大であるほど顕著に表れる。これらのことから、CuO又はa軸配向成分が磁束のピンニングセンターとなっている可能性が認められるが、その特定化は今後の検討課題である。

## 5. む す び

酸化物系高温超電導膜のデバイス応用及びパワー応用を目指す、例として光変調器の電極及び線材に適用するための基礎的な研究の現状を紹介した。超電導膜を共振電極に適用した光変調器が実現した場合、通常のドライブIC回路での低電圧動作が可能となり、実用上非常に大きなインパクトがある。一定周波数での高効率な光変調が行えるため、まず超高速光計測等が実現されるものと考えられる。さらに、位相変調のみならず、強度変調方式等へと適用範囲を拡大することによって、計測の用途のみならず、光通信及びマイクロ波関連システム等に大きな応用がひらけることを確信する。また、従来型の超電導システムに高温超電導体を適用した場合の真に大きなメリットは、主として発電機などの電力応用において見込まれている。今回開発した原料に有機溶剤を付加する新しい合成法によって、本来CVD法のもつ利点が高温超電導材料の線材化においても期待できることが立証された。今後の検討では、金属基板上への高性能膜の作製、このためのバッファ層の形成と界面の挙動分析、磁束ピンニングセンターの導入などの課題が存在するが、当社としても高温超電導線材の実用化に向け、これらの課題を克服すべく引き続き研究開発を進めていく。

最後に、東北大学金属材料研究所を始め、この研究開発に当たり、御指導及び御協力をいただいている関係各位に対し深謝する。

## 参 考 文 献

- (1) Terashima T., Bando, Y., Iijima, K., Yamamoto, K., Hirata, K. : Appl. Phys. Lett., **53**, 2232 (1988)
- (2) Watanabe, S., Kawai M., Handa, T. : Jpn. J. Appl. Phys., **29**, L1111 (1990)
- (3) 平井敏雄, 山根久典 : 応用物理, **59**, 134 (1990)
- (4) Komiya, F., Iga, K. : J. Lightwave Tech., **6**, 87 (1988)
- (5) Sueta, T., Izutsu, M. : IEEE. Trans. Microwave Theory Tech., **38**, 477 (1990)
- (6) Izutsu, M., Sueta, T. : Tech. Dig. CLEO88, 485 (1988)
- (7) 水落隆司, 北山忠善, 井筒雅之, 末田 正 : 電子情報通信学会技術研究報告 OQE 89-98 (1989)
- (8) Imada, K., Yoshiara, K., Uchikawa, F., Utsunomiya, S., Mizuochi, T., Kitayama, T., Isoda, Y. : Superconductor Sci. and Tech., **4**, 473 (1991)
- (9) 吉新喜市, 今田勝大, 河又 巖, 内川英興, 宇都宮 真, 水落隆司, 北山忠善 : 電子情報通信学会春季全国大会 SC-7-5 (1991)
- (10) Yoshiara, K., Uchikawa, F., Matsuno, S., Utsunomiya, S., Mizuochi, T., Kitayama, T. : IEICE Trans. Electron. E 75-C, 65 (1992)
- (11) Matsuno, S., Uchikawa, F., Yoshizaki, K. : Jpn. J. Appl. Phys., **26**, L 947 (1990)
- (12) Matsuno, S., Uchikawa, F., Utsunomiya, S., Tanaka, M. : Advances in Superconductivity III, p. 965 (1990)
- (13) Matsuno, S., Uchikawa, F., Yoshizaki, K., Kobayashi, N., Watanabe, K., Muto, Y., Tanaka, M. : IEEE Trans. Mag., **27**, 1398 (1991)



# 高温超電導線材

宮下章志\* 梅村敏夫\*\* 佐藤 建\*\*\*  
樋熊弘子\* 宇都宮 真\*  
宇佐美 亮\* 谷村純二\*

## 1. ま え が き

液体窒素温度で5 Tの磁界を発生する超電導コイル、これが高温超電導体に課せられた大きな宿題である。1986年のLa系の発見に続く液体窒素温度以上の転移温度をもつ多くの酸化物超電導体がこれまでに発見されたが、上記の宿題に対して数々の酸化物超電導体ならではの課題があることも明らかにされてきた。一つには、結晶成長が極めて異方的な反応性の高い酸化物であることである。コイル化に必要な線材を作製することに対して、この性質は大きな障害となる。また一方では、従来の金属系が運転される液体ヘリウム温度では高磁界下でも良好な臨界電流特性を示すが、より高い温度では臨界電流は磁界の上昇とともに急激に低下する欠点を示す。

様々な超電導酸化物に対して線材化が試みられる中で、Bi系酸化物は結晶の配向がそろいやすく、また粒間界面での超電導特性の低下が少ないことから、Bi系銀シース線材は比較的高い臨界電流密度( $J_c$ )が得られる。このため、高温超電導マグネット用材料としての研究開発が盛んである。

当社は、20 Kにおける高温超電導マグネットへの応用を提案し、短尺線材によるBi系低温相( $T_c=80$  K)、高温相( $T_c=110$  K)の研究とともに、その高温超電導マグネットを実現するためのコイル化技術の研究を進めている<sup>(1)</sup>。実用的な高温超電導マグネットの実現には材料自身の磁場中 $J_c$ の向上、いわゆるピンニング力の強化が不可欠であるが、コイル化においては線材特性とともに絶縁、巻線等の適用技術の充実が必要である。長尺線材の製造とコイル巻を主体と考えた研究は、高温超電導マグネットを実現する上で不可避のテーマである<sup>(2)</sup>。これまでの研究により、高温超電導酸化物の線材化適用技術の数々が判明してきた。以下にその幾つかについて述べる。

## 2. 線材の作製とコイル試作

この章ではコイル化による線材特性、絶縁方法、巻線の検討を行った結果について述べる。材料としてBi系低温相を用いた丸線材、同高温相を用いたテープ線材の2種類を作製した。丸線材はコイル化で問題となる $J_c$ の磁界に対する結晶軸方向依存性への対策、テープ線材は結晶の高配向化による高 $J_c$ 化の実現を目標として、各線材の特性を評価している。従来の研究により、近未来では20 Kにおける高磁界高

温超電導マグネットの実現が期待できる。したがって、以下では各線材の20 K応用を目指した線材化技術及び特性について検討した。

### 2.1 線材の評価

#### 2.1.1 線材の作製

丸線材(低温相:  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_y$ ; (2212)), テープ線材(高温相:  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ ; (2223))ともに同一の線材作製工程に従い、テープ線では最後に圧延工程が加わる。

原料粉末は均一性の高い湿式共沈粉末を用いた。粉末を仮焼した後、プレス成形したものを、外形24 mm、内径17 mmのAg製ピレットに詰めて押し出し加工を実施した。押し出し後は、スウェーijing、引き抜き、圧延加工によって所定形状の線材を作製した。図1に線材作製工程を示す。

#### 2.1.2 線材の $J_c$ 特性

作製した線材の $J_c$ - $B$ - $T$ 特性を図2に示す。高温相からなるテープ線材では、磁界がテープ面に平行かつ電流に垂直な場合、30 Kでも1 T下の $J_c$ に対する5 T下での $J_c$ の低下は1/2以下である。一方、低温相からなる丸線材は20 Kで、 $J_c$ の磁界依存性は高温相テープ線材に比べかなり劣るが、図3に示すように、磁界中における $J_c$ の異方性が無い特長がある。コイル端部での自己磁界の向きによる影響が低減でき、丸線材であることによってテープ線材に比べて平易にソレノイドを巻くことができる利点がある。しかしながら、高温高磁界マグネット製作の観点から、低温相を用いた丸線材より高温相テープ線材による5 T (20 K)の実現の方がより可能性があると思われる。

#### 2.1.3 線材の $J_c$ 特性と絶縁材料

線材は酸化物の特徴であるもろ(脆)く延性がほとんどない性質を示し、コイルを作製する場合、wind and react法(Wind & React)を選択するために、線材の絶縁



図1. 線材作製のフローチャート

材料は、熱処理中の銀シースの酸素呼吸作用を妨げず、線材にひずみを与えない材料が望ましい。また、超電導体の断面当たりの占積率を高めるために極力薄く線材間を絶縁できる材料が良い。

従来の金属系超電導線の絶縁に使われているガラス繊維は、ガラスの軟化点 (970℃) が低温相丸線材の熱処理温度である 890℃ に近いために銀シース表面に影響を与える可能性がある。そこで  $\text{Al}_2\text{O}_3$  と  $\text{SiO}_2$  の粉末を所定の比率で混合、線材表面に塗布して熱処理した低温相丸線材を作製した。その  $J_c$  特性は、図 4 に示すように、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  比が多いほど  $J_c$  が高いことが判明した。これは  $\text{Al}_2\text{O}_3$  の含有比率の高い繊維で線材を編組することが望ましいことを示している。

一方、高温相テープ線材の熱処理温度は 830℃ とやや低く、ガラス繊維絶縁による  $J_c$  の劣化は見受けられない。

他の絶縁手法として、アルミナ粉を分散させた液を塗布する方法がある。この手法は線材の  $J_c$  の劣化を防ぐとともに、絶縁膜を非常に薄くでき、コイルをコンパクトに巻き上げることが期待できる。

## 2.2 Bi 系高温超電導コイル

### 2.2.1 コイルの試作

低温相丸線材、高温相テープ線材を用いて試作したコイルの諸元を表 1 に示す。

### 2.2.2 コイル巻枠の材料

#### 選定について

線材は酸化性雰囲気中で熱処理されるために、巻枠には酸化性雰囲気中で化学的に安定な材料を用いなければならない。また、熱処理時の巻枠材料の膨脹、収縮によって線材にダメージを与えないために、線材の熱膨脹係数と近い値をもつ材料であることが条件となる。

線材の熱膨脹係数を測定した結果によると  $15.4 \times 10^{-6}$  である。今回、それに近い膨脹係数 ( $12.3 \times 10^{-6}$ ) をもち、機械加工しやすい快削性セラミックスの一つであるマコール (コーニングガラス製) を用いた。マコールは一般の金属加工機械でも十分加工が可能であり、巻枠に構造上の問題が生じた場合に対処しやすい。

### 2.2.3 コイルの特性評価

低温相丸線材で巻かれたソ

レノイドコイルの  $J_c$ - $B$ - $T$  特性を図 5 に、その外観を図 6 に示す。

コイルの  $J_c$  は、 $2,000 \sim 1,500 \text{ A/cm}^2$  ( $10^{-11} \Omega \cdot \text{cm}$ , 4.2K, 0T) と低く、発生磁界も 0.045 T [450 G] 程度である。 $J_c$  は 1T 以下で弱結合の影響と考えられる低下を示すが、その後 5T の測定範囲内での低下はわずかである。一方、20K ではわずかな磁場を加えることで急激に  $J_c$  が低下し、2T の磁場で事実上  $J_c = 0$  であった。

コイルの  $J_c$  が低い原因としては、線材の長尺化による酸化物の相の不均一性、コイル化によるひずみの影響等が考えられる。

高温相テープ線材で巻かれたダブルパンケーキコイルについては、液体窒素中で 0.01 T [100 G] の磁界を発生できることを確認した。このコイルでは熱処理の工夫により、コイルの  $J_c$  を短尺線材の 6 割程度まで向上できた。線材内部の SEM 観察、EPMA, XD 等の分析から、酸化物は混相状態で結晶配向も不十分であることから  $J_c$  向上の余地は大きく、コイル特性の向上が期待できる。その外観について図 7 に示す。

コイル化における今後の課題として、繰り返し冷却による熱履歴が線材の  $J_c$  に与える影響、又は線材自身の劣化 (酸化物の経時変化) の問題の検討が必要で、また高磁界中にお

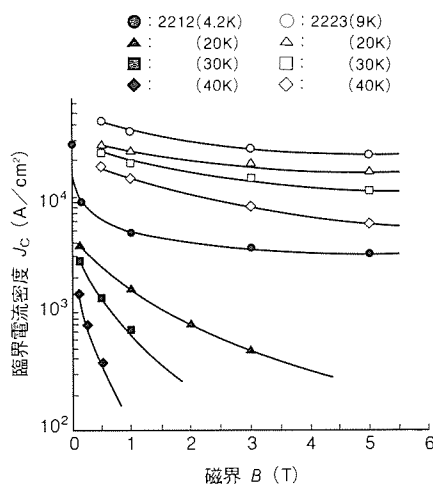


図 2. 低温相、高温相線材の  $J_c$ - $B$ - $T$  特性

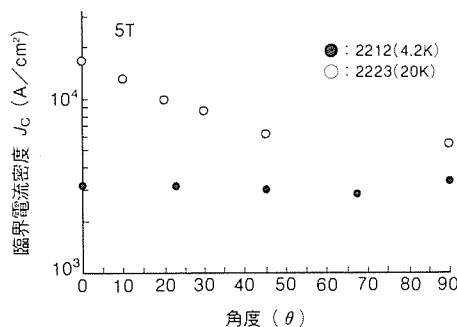


図 3. 低温相、高温相線材の  $J_c$  の角度依存性

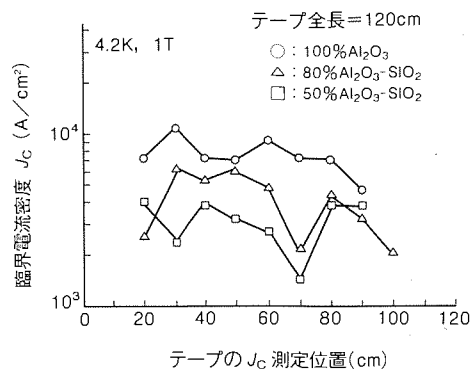


図 4. 絶縁材の  $J_c$  に与える影響

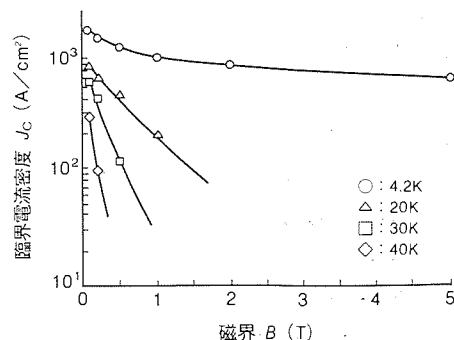


図 5. ソレノイドコイルの  $J_c$ - $B$ - $T$  特性

表1. 試作コイルの諸元

組 成	低 温 相	高 温 相
コイル形状	ソレノイド	ダブルパンケーキ
コイル寸法 (mm)	径70×径30×H40	径70×径27
線 長 (m)	58	6 (3枚重ね)
層 数	15	2
ターン数	26	20
絶縁材	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 袋編み	80% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> テープ
巻枠材料	SUS+セラミック	セラミック

ける線材利用を考えた場合、 $J_c$  向上に伴って線材に強い電磁力がかかるために、線材の補強、含浸による固定方法の検討が加わる。

さらに、マグネットを永久電流モードで運転するためには酸化物の超電導接続がブレークスルーを要する研究課題である。

### 3. 高温超電導体におけるピンニング

臨界電流特性に見られる磁界の印加による著しい低下、超電導体内を流れる無損失電流が時間の経過とともに著しく減少するフラックスクリープ、これらの現象は磁束のピン止め特性を反映したものである。したがって、磁束ピン止め機構の解明及びピン止め中心の導入が実用化への物性面での最重要課題である。

磁束ピン止め機構の研究は、臨界電流の温度磁界依存性の実験結果と各種ピン中心によるピン止め特性の理論予測との比較、又はピン中心の物性を利用したピン止め力の測定等によって行われている。例えば、ピン中心によって臨界電流の温度磁界依存性が異なることにより、ピン中心の識別(点欠陥、析出物等)が行われ、他方、Y系で観測される双晶面によるピン止めでは磁界中にある試料のトルクを測定することによってピン止め力が評価されている<sup>(3)</sup>。

これまでのBi系における臨界電流密度の温度磁界依存性の測定から、よく調製されたBi系超電導体におけるピン中心の候補として点欠陥が推測できること、微細常電導析出物が粒内分散した試料ではこの析出物がピンニング力を高めることなどを示してきた。この常電導析出物によるピンニングは溶融法によるY系超電導体で報告されているように液体窒素温度で特に有効と期待されるものであり、線材化に適したBi系に導入できれば液体窒素温度における高磁界コイルの実現に大きく貢献する。

この章では、業界に先駆けて行った常電導析出物が導入されたBi系超電導体の作製方法及びその超電導特性の結果について述べる。

#### 3.1 評価方法

##### 3.1.1 試料作製

試料は固相反応法(試料1)及び溶融再結晶化法(試料2)

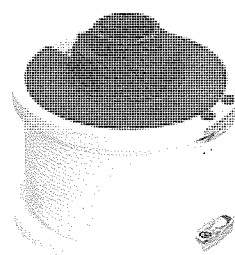


図6. 低温相丸線材で試作したソレノイドコイル

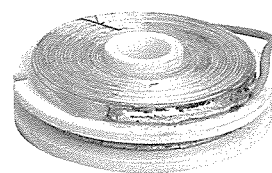


図7. 高温相テープ線材で試作したダブルパンケーキ

試料1: 組成 (Bi, Pb): Sr: Ca: Cu=2: 2: 2: 3

仮焼 500℃ for 10h 750℃ for 12h in air  
成形 70MPa {700kgf/cm<sup>2</sup>}  
反応 835℃ for 120h in air  
粉碎 smaller than 5 μm  
成形 70MPa {700kgf/cm<sup>2</sup>}  
焼結 850℃ for 75h in air  
成形 400MPa {4t/cm<sup>2</sup>}  
焼結 845℃ for 75h in air  
成形 1GPa {10t/cm<sup>2</sup>}  
焼結 845℃ for 75h in air

試料2: 組成 Bi: Sr: Ca: Cu=2: 2: 1+2n: 2+n

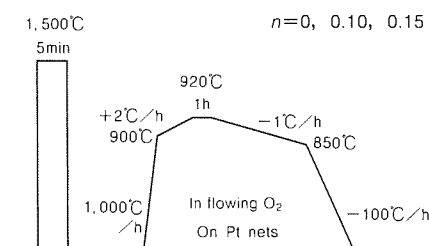


図8. 試料の作製方法

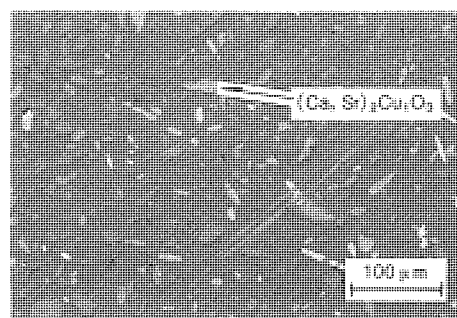


図9. 試料2 (n=0.10)の偏光顕微鏡組織写真

によって得た2種類を用意した。作製方法を図8に示す。

試料1は片状結晶(〜径5 μm×1 μm)が重ね合わさった組織構造をもち、片状結晶の広い面がab面に対応するためにc軸配向した多結晶体(寸法: 0.2 mm×1.0 mm×20 mm)である。XRD測定からこの試料は高温相((Bi, Pb)<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>)からなり、抵抗測定によって超電導転移温度( $T_c$ )は106 Kであった。

試料2は図9に見られるように数mmに成長した単粒子中に数μmの常電導粒子が分散した組織構造をもっている。

$T_C$  は 83 K、寸法は 1.5 mm × 1.5 mm × 0.25 mm である。

### 3.1.2 臨界電流の測定

臨界電流密度 ( $J_C$ ) の温度磁界依存性は、微小交流磁界重畳法 (AC 法) によって測定した。AC 法は、磁界 ( $B$ ) 中にある試料に微小な交流磁界 ( $b$ ) を重畳し、交流振幅に対する侵入磁束 ( $\Phi$ ) 量の変化により表面からの侵入深さ  $\lambda'$  を見積もる方法で、臨界電流密度は  $\lambda' \text{ vs } b$  曲線のこう (勾) 配として計算される。

$$\lambda' = (1/2w) \delta \Phi / \delta b$$

$$J_C = \mu_0^{-1} (d \lambda' / db)$$

ただし、 $w$  は試料の厚みである。

AC 法は粒間及び粒内の臨界電流を非破壊で測定できるとともに、磁界と結晶軸の方位を選ぶことにより、臨界電流の結晶軸異方性を観測することができる<sup>(4)</sup>。

### 3.2 臨界電流密度とピンニング特性

試料 1 の臨界電流密度の温度磁界依存性を図 10 に示す。試料は  $c$  軸が磁界に垂直となるよう配置されている。臨界電流密度は 25 K 以下では 5 T の磁界下でも比較的大きな値をもつが、77 K では磁界の上昇とともに急激に減少する<sup>(5)</sup>。高温超電導体における臨界電流は熱的に励起されるフラックスクリープにより、強く影響されていると考えられ、その影響は不可逆磁界 ( $B_i$ ) に現れる。不可逆磁界は各温度で臨界電流密度が零と定義されときの印加磁界を示し、図 11 に  $B_i$  の温度依存性を示す。ただし、各温度における  $B_i$  は、 $J_C = 10^5 \text{ A/m}^2$  で決定した。

$B_i$  の温度依存性は一般に以下のように表される。

$$B_i(T) = [1 - (T/T_C)^2]^\ell \quad \dots\dots\dots (1)$$

指数  $\ell$  は Y 系では  $\ell = 1.5$  が報告されている。フラックスクリープの理論<sup>(3)</sup>に従えば、 $B_i$  はフラックスクリープが無い場合のピンニング力密度 ( $F_p$ ) の温度・磁界依存性を表す係数 (各々、 $m$ ,  $\gamma$ ) を用いて以下のように表される。

$$B_i(T) = (K/T_C)^{4/(3-2\gamma)} [1 - (T/T_C)^2]^{2m/(3-2\gamma)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$F_p(B, T) = A \cdot B_{C2}(T) \cdot B [1 - (B/B_{C2}(T))] \cdot \dots (3)$$

ただし、 $A$ ,  $K$  は定数、上部臨界磁界の  $B_{C2}$  の温度依存性は  $1 - (T/T_C)^2$  と仮定した。 $m$  は臨界電流を  $1 - (T/T_C)^2$  の温度関数としてプロットしたときの低温側 (フラックスクリープの影響を受けにくい領域) のこう配から求められ、 $m = 4.4$  であった。また、 $\gamma$  は低温 (4.2 K) における臨界電流の磁界依存性から求められ、 $\gamma = 0.66$  であった。得られた係数から不可逆磁界の温度依存性は、 $\ell = 2m/(3-2\gamma)$  から、 $\ell = 5.2$  となる。図 11 に実線で  $\ell = 5.2$  における式 (1) の曲線を示した。Y 系で観測された  $\ell = 1.5$  に比べ Bi 系に

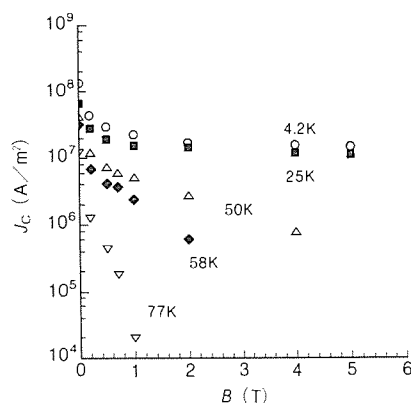


図10. 試料 1 の臨界電流密度

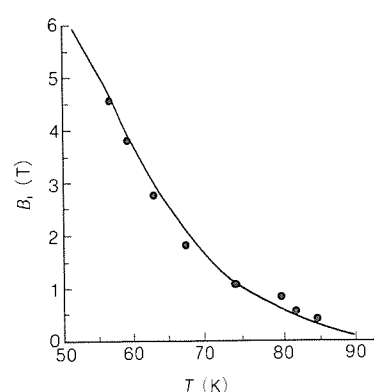


図11. 試料 1 の不可逆磁界の温度依存性

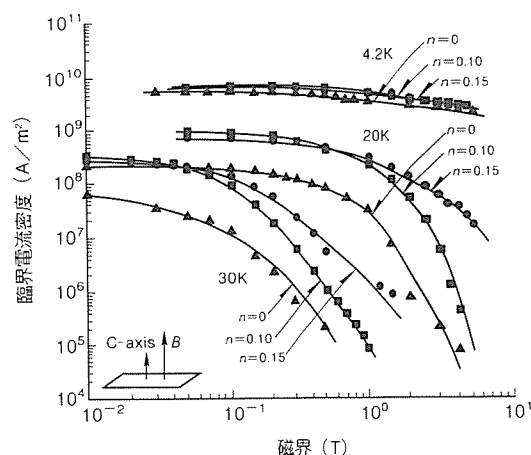


図12. 試料 2 ( $n=0, 0.10, 0.15$ ) の臨界電流密度

における温度依存性は強く、ピンニング力密度の強い温度依存性を示すものである。ピン中心の候補として点状の欠陥が推定される。

Bi 系に比して Y 系における弱い  $B_i$  の温度依存性は、 $Y_1Ba_2Cu_3O_7$  ((123)) 相中に分散した微細な  $Y_2BaCuO_5$  ((211)) 相によるピンニング力密度の温度依存性を反映したものと考えられる。特に、溶融法で作製された多量に (211) 相を粒内に含む Y 系超電導体のフラックスクリープは、77 K でさえ焼結体のそれに比べ極めて小さい<sup>(6)</sup>。このような常電導粒子が Bi 系超電導体中でも強いピンニング力を与えるピン中心と成り得るかどうかは理論応用両面で興味深い<sup>(7)</sup>。試料 2 は図 9 に見られるように、粒内に微小な Ca-Cu-O 相が分散した構造をもつ。この常電導粒子を含まない試料、及び含む試料 ( $n = 0, 0.1, 0.15$ ) の磁化から求めた臨界電流密度を図 12 に示す。4.2 K では試料 1 と同様に磁界依存性は弱く、常電導粒子の有無に陽には依存しない。一方、20 K 以上の温度で、低磁界における臨界電流密度は常電導粒子を含まない試料に対して約 1 けた向上するが、常電導粒子の数に明確には依存しない。しかしながら、高磁界では常電導粒子の数に明らかに依存するようになり、 $n=0.15$  の 3 T の値は  $n=0$  のそれに比べ 2 けた向上しており、常電導粒子による

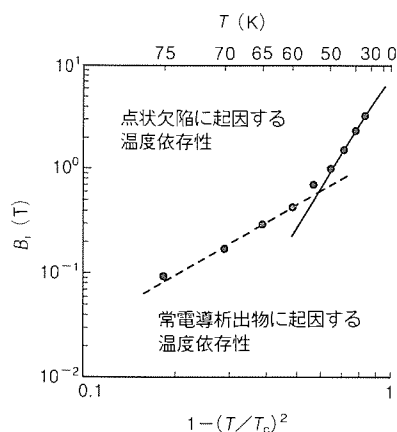


図13. 試料2 ( $n=0.10$ ) の不可逆磁界の温度依存性

強いピンニング力が期待できる。図13に試料1と同様に試料2の不可逆磁界の温度依存性を示す。50K以下の低温部における温度依存性は常電導析出物によるピンニングで期待されるものよりかなり大きく、試料1と同様に点状欠陥がピン中心となっているものと考えられる。

一方、60 K以上の高温部で引かれている破線は  $B_i \propto [1 - (T/T_c)^2]^{3/2}$  を示しており、常電導析出物によるピンニングが高温で有効に働くことが期待できる<sup>(8)</sup>。この傾向はY系における(211)相によるピンニングの傾向と極めて類似している。

この研究で導入された常電導析出物によるピンニング力は有効ではあるが、Y系におけるそれに比べ極めて不十分なものである。これらの巨大析出物によるピンニングは超電導相との界面で起こっている可能性が高い。その意味で、超電導特性と析出物の組織構造との相関を定量的に調査研究することが今後重要である(図14)。

#### 4. む す び

Bi系超電導体は、多結晶体の輸送超電導特性を著しく低下させる粒間弱結合が結晶軸の配向及び緻密化によって低減されるために、長尺線材として、つまり高温超電導コイルへの適用に有望である。我々は、酸化物であることから由来する脆さにより、酸化物高温超電導マグネットの製作はワインドアンドリアクト法を用いて行った。この方法に起因する課題として、材料自身の熱処理とともに絶縁材、コイル巻枠等について述べた。高温超電導体を利用したマグネットは大きな期待がもたれ実用レベルの実証コイルの製作が急がれる。

そのためには熱履歴の影響、材料の経時変化、電磁力に対

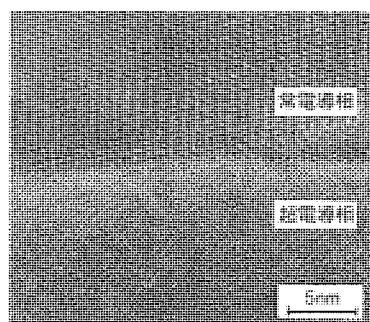


図14. 試料2の析出物界面の透過電子顕微鏡写真

する補強又は超電導接続等をクリアしなくてはならないが、これらの課題は従来の金属系で数多く研究されてきたものであり、30年にわたる当社の超電導技術の知識と経験を生かし近い将来解決されるものと思われる。また、液体窒素温度での適用には強いピンニング力を与えるピン止め中心の導入が不可欠である。この課題に対して、上記したように我々はその候補として常電導析出物が有

効であることを示した。現時点のピンニング力では実用性能を引き出すことは難しいが、ピンニング現象を正確に把握することによる機構の解明等の基礎研究が上記課題のブレークスルーを導くことを確信している。

この研究を進めるに当たり、測定、評価の両面で九州大学工学部山藤研のBaorong Ni氏、九州工業大学情報工学部松下照男教授、小田部荘司助手の御指導を仰ぎ深く感謝の意を表す。

#### 参 考 文 献

- (1) 下畑賢司, 竹内敏恵, 横山彰一, 吉村秀人, 中村史朗, 山田忠利, 宇都宮 真: 1991年度秋季低温工学・超電導学会講演予稿集, p.43
- (2) Ueyama, M., Hikata, T., Kato, K., Sato, K.: Jpn. J. Appl. Phys., **30**, L1384 (1991)
- (3) Gyorgy, E.M., van Dover, R. B., Schneemeyer, L. F., White, A. E., O' Bryan, H. M., Felder, R. J., Waszczak, J. V., Rhodes, W. W.: Appl. Phys. Lett. **56**, 2465 (1990)
- (4) Ni, B., Munakata, T., Matsushita, T., Iwakuma, M., Funaki, K., Takeo, M., Yamafuji, K.: Jpn. J. Appl. Phys. **27**, 1659 (1988)
- (5) Umemura, T., Egawa, K., Wakata, M., Yoshizaki, K., Ni, B., Matsushita, T.: Physica B **165 & 166**, 1411 (1990)
- (6) 松下照男: 応用物理, **58**, 762~765 (1989)
- (7) Shi, D., Boley, M. S., Welp, U., Chen, J. G., Liao, Y.: Phys. Rev. B **40**, 5255 (1989)
- (8) 小田部荘司, 中谷達彦, 松下照男, Ni, B., 山藤 馨, 梅村敏夫, 江川邦彦, 宇都宮 真: 1991年度秋季低温工学・超電導学会講演予稿集, p. 32

# 高温超電導のエネルギー応用

横山彰一\* 中村史朗\* 江川邦彦\*\*\*  
下畑賢司\* 山田忠利\*\*  
森 貞次郎\* 松野 繁\*\*\*

## 1. ま え が き

臨界温度が液体窒素温度を越える高温超電導体が発見されて以来、臨界電流密度は年々向上し、実用可能なレベルに近づきつつあり、高温超電導体のエネルギー応用への関心が急速に高まってきた。当社は、高温超電導のエネルギー応用に関する研究にいち早く取り組んできた。なかでも、超電導マグネット・電流リド・限流器・磁気軸受については概念設計や基礎実験を行い、それらの特長や技術的見通しを検討してきた。この論文では、これら四つの具体的な応用研究の内容を紹介し、応用システムの特長や今後解決すべき技術課題を明らかにする。

## 2. 超電導マグネット

### 2.1 高温超電導マグネットの特長

高温超電導線材を用いたマグネットの最大の特長は、液体ヘリウムが不要になることである。液体ヘリウムが不要になれば、冷却効率が大幅に向上し、冷却系ひいてはマグネットとしての信頼性が格段に向上することが期待される。もう一つの大きな特長は、超電導の安定性が向上することである。コイルの運転温度によっては臨界温度までの温度マージンが大きくとれる。また、一般的に物質の比熱は温度の3乗に比例し大きくなるので、4.2 Kより高い温度で運転した場合、外部じょう(擾)乱による温度上昇が小さいので、超電導-常電導転移(クエンチ)しにくいコイルが得られる。

以下、具体的に磁気浮上列車用の高温超電導マグネットの概念設計研究について述べ、高温超電導のマグネット応用における利点と技術課題を明らかにする。

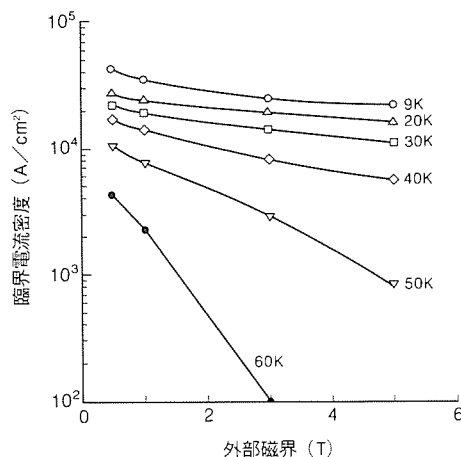
### 2.2 概念設計

#### 2.2.1 運転温度

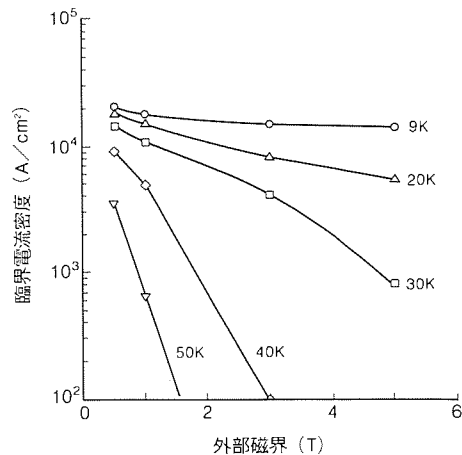
概念設計で用いた線材は、臨界電流密度が比較的高く長尺化が可能なBi系銀シーステープ線材である。図1(a), (b)に、Bi系銀シーステープの臨界電流密度の磁界及び温度依存性を示す。磁気浮上列車用コイルの巻線内の最大磁界は約5 Tである<sup>(1)</sup>。液体ヘリウム温度と比較して、約20 Kの温度までは超電導特性に大差はなく、30 Kを越えると超電導特性は急激に低下する。一方、効率及び冷却の観点からは、20 Kでは液体ヘリウム冷凍機に比べて信頼性が高い冷凍機を適用できる。例えば、クライオポンプやシールド冷凍機として10,000時間以上の長期連続運転実績のあるギフォード・マクマホン冷凍機(GM冷凍機)が適用可能である。また、20 Kでの冷却効率は、4 Kと比較して5倍向上するというメリットは大きい。すなわち、コイルの運転温度を20 K程度とすることで、超電導線材の臨界電流密度特性及び冷却システムの効率、信頼性の面で高温超電導適用のメリットを生かせる。

#### 2.2.2 マグネット構造と高温超電導線の電流密度

図2にGM冷凍機で冷却され20 Kで運転される高温超電導マグネットの構成、表1にマグネット諸元を示す。超電導線材は、幅2 mm、厚さ0.2 mmのBi系銀シーステープを5



(a) 外部磁界がテープ面に平行



(b) 外部磁界がテープ面に垂直

図1. Bi系((BiPb)<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>Oy)銀シーステープ線材の臨界電流密度の磁界及び温度依存性



枚重ねて構成した。コイルの起磁力を 700 kAT、超電導体と銀の割合を 1 : 1 とすると超電導体の運転電流密度は、60,000 A/cm<sup>2</sup> となる。仮に、超電導体の運転電流密度がこの値より低い場合、例えば 30,000 A/cm<sup>2</sup> とするとコイル 1 台当たりの質量は従来の NbTi コイルに比べて 250 kg 以上増加してしまう。運転温度を 20 K とすることで、コイル容器や冷凍機の質量がある程度軽くなるとしてもコイル自体の極端な質量増加は避けなければならない。ここでは、コイルの質量を同程度にすることを念頭に、60,000 A/cm<sup>2</sup> の値を採用した。後述するように、高温超電導線に適用したコイルは安定性が従来の NbTi に比べ大幅に向上する。したがっ

て、運転率（運転電流／臨界電流）を 1.0 に近づけることが可能である。設計では、運転率として 0.9 と定めた。これにより、必要な臨界電流密度は、67,000 A/cm<sup>2</sup> となった。この値は、現状の短尺サンプルではほぼ実現可能なレベルである。今後、長尺線でこの臨界電流密度を達成できるよう線材の特性向上が必要である。

磁気浮上列車の超電導コイルは永久電流で運転される。このため、接続抵抗等の微小な抵抗について、電流の減衰すなわち磁界の減衰の観点から評価する必要がある。永久電流の減衰率を例えば 10 %/日とすると、コイルのインダクタンスを 3 H として、コイルに許される抵抗値は  $4.3 \times 10^{-6} \Omega$  と

なる。さらに、減衰率を 1 けた以上小さくするためには高温超電導線とおしの超電導接続が必要になる。

## 2.3 コイルの安定性

表 2 は、コイルの安定性を検討するために行ったクエンチに至る臨界エネルギー ( $Q_{MPZ}$ ) の計算結果である。最小伝搬長さ (MPZ) は線材の断面積よりはるかに大きいので線材断面内の温度は一定とし、最小伝搬領域 ( $V_{MPZ}$ ) は、 $[MPZ] \times [線材断面積]$  とした。例えば、超電導体の臨界電流密度を 67,000 A/cm<sup>2</sup> (運転率=0.9) と設定すれば、 $Q_{MPZ}$  は

20 mJ となる。この値は、現在の NbTi 線を用いたコイルの約 3 けた大きい値である。すなわち、高温超電導コイルの外部擾乱に対する安定性は極めて高いということが分かった。これは、20 K での超電導線の比熱が、液体ヘリウム温度と比較して 100 倍以上大きいことが主要因である。これにより、高温超電導コイルの運転電流は超電導線の臨界電流の 90 % 近くで用いることができ、クエンチしにくいコイルを作ることができる。

図 3 に高温超電導コイルがクエンチした場合の温度上昇のシミュレーション結果を示す。クエンチは線材長方向にのみ伝搬し、層方向には伝搬しないとした。ケース A は、線材の 1 点だけにクエンチが発生した通常の場合である。これから、クエンチ保護を施さない場合、クエンチによって線材が焼き切れてしまうことが分かる。高温超電導コイルの場合、クエ

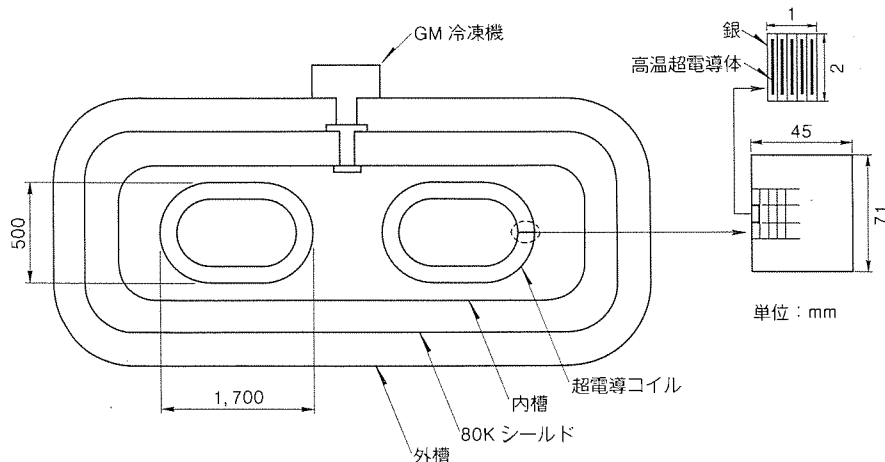


図 2. 磁気浮上列車用高温超電導マグネットの構成

表 1. 磁気浮上列車用高温超電導マグネットの諸元

項 目	高温超電導磁石
磁石構成	2 コイル／クライオスタット
寸法 (m)	4.4 (L) × 0.885 (W)
コイル寸法 (m)	1.7 (L) × 0.5 (W)
インダクタンス (H)	3.04
断面寸法 (mm)	45 × 71
最大磁界 (T)	5.1
起磁力 (kA)	700 (600 A × 1,167 ターン)
電流密度 (A/mm <sup>2</sup> )	219
蓄積エネルギー (kJ)	550
導 体	Ag/Bi <sub>2</sub> Sr <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>y</sub>
断面寸法 (mm)	(0.2 × 2.0) × 5 Tape
銀比	1.0
熱侵入 (W)	3
冷凍機容量 (W)	5 at 20 K

表 2. Bi 系銀シーステープ線と Cu/NbTi 超電導線の臨界エネルギー  $Q_{MPZ}$  計算結果

導 体	$J_c$ (A/cm <sup>2</sup> )	運転率	温度マージン (K)	MPZ (mm)	$V_{MPZ}$ (mm <sup>3</sup> )	$Q_{MPZ}$ (mJ)
Bi 系銀シーステープ線	$1.2 \times 10^5$	0.5	40	182	364	1,270
	$6.7 \times 10^4$	0.9	8	81	162	20
	$6.1 \times 10^4$	0.99	0.8	25	50	0.37
Cu/NbTi 線	$2.4 \times 10^5$	0.25	2	4.3	8.6	0.017

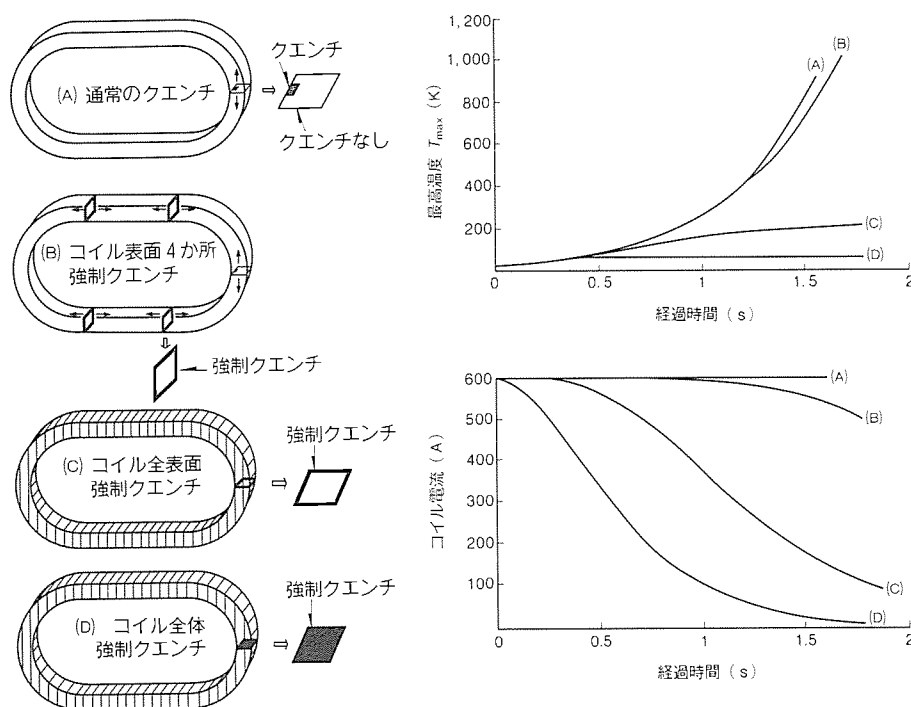


図3. 超電導コイルがクエンチした場合の計算機シミュレーション

クエンチの伝搬速度は約0.5 m/sである。この値は、NbTi コイルの1/40と遅く、高温超電導コイルでは、クエンチ時に局部的に加熱されやすいことを示す。ケースBは、クエンチ発生と同時に、4か所のコイル表面部分に強制的にクエンチを発生させた場合である。この場合も、コイルはクエンチ時に焼損してしまい、コイルは保護できない。コースCは、クエンチ時にコイル全表面を強制的にクエンチさせた場合である。この場合、クエンチ時のコイルの最高温度は200 Kにとどまりコイルの焼損は避けられることが分かる。ケースDは、コイル全体が同時にクエンチした場合の温度上昇である。これは、コイル保護には理想的な場合である。以上のシミュレーションの結果から、クエンチ時にコイルの磁気エネルギーをコイルの熱容量で吸収することは可能であるが、コイルの全表面を強制的にクエンチさせる程度の保護系が必要なが分かった。

### 3. 超電導マグネット用電流リードへの応用

#### 3.1 高温超電導電流リードの特長

最近、超電導マグネット応用機器で長期間運転するケースが増え、低熱侵入の機器が要求されている。従来の銅製の電流リードの熱侵入量はガス冷却型でも約1 W/1 kA<sup>(2)</sup>と比較的大きく、超電導マグネット機器の熱侵入量の半分以上を占める場合がある。高温超電導体は、熱伝導率がステンレス以下<sup>(3)</sup>と小さく、電気抵抗がゼロであるため電流リードに応用した場合、熱侵入量を非常に小さくできる。また、超電導体部は通電時でも発熱しないので、真空中のような両端部だけで冷却する構造の電流リードにも応用できる。

#### 3.2 Bi系電流リードの試作

電流リード用材料としては、Ag シーステープ、パルク材等がある。臨界電流密度 ( $J_c$ ) の高い Ag シーステープ材は、高熱伝導率の Ag があるために低熱伝導の電流リードを構成しにくい。我々が用いた Bi 系超電導体は、一般的な粉末焼結+プレス法によって作製した。幅10 mm 厚さ1 mm 程度の薄板状のパルク材である。熱処理は大気中で850℃で行い、中間プレスを数回行った。電極部は試料両端部に酸化銀ペーストを塗布し、熱処理して形成した。

10 cm 長試料の通電特性は、主に液体窒素中で4端子法でパルス通電によって測定した。試料の臨界電流は144 A ( $J_c = 2,610 \text{ A/cm}^2$ ) が得られ、このときの端子部の接続抵抗率は  $3.90 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$  であった。高

温超電導体の接続抵抗率は、Y系試料で銀の析出の温度条件を最適化することによって  $0.2 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$  程度の値を得ており、Bi系試料でも同程度まで下がるのが期待できる。

#### 3.3 熱侵入量計算及び測定

高温超電導電流リードを用いた超電導マグネットの構成は図4のようになる。10 cm 長試料の結果を基に設計した500 A級電流リードの諸元を図中に示した。この諸元から、熱平衡状態モデルの解析プログラムを用いて計算した電流リードの温度分布の結果例を図5に示す。同プログラムによる熱侵入量の計算結果は、ガス冷却がなくても80 Kの温度定点を採ると、500 A通電時で70 mW、非通電時で45 mWと従来の電流リードの15%程度と非常に小さいことが分かった。さらに、自己熱侵入分のガス冷却を行うと通電時でも24 mWと従来の4%にまで小さくできる。一方、80 Kの温度定点がない構成では、自己熱侵入による蒸発ガス冷却で通電した場合は超電導体が焼損する。したがって、高温超電導体を用いた電流リードは80 Kの温度定点が必要であることが分かる。

この設計を基に30 cm 長高温超電導電流リードを試作し、液体ヘリウムを用いた熱侵入量を測定した。その結果、ガス冷却のない状態で、平均で約25 mW (非通電時) が得られた。測定結果は計算値の約1/2である。これは計算ではBi系超電導体の単結晶の熱伝導率を用いているが、実際のパルク材は多結晶体であるため熱伝導率が小さいことによると考えられる。

これらの結果から高温超電導体を用いた電流リードは、従来の銅製の電流リードに比べて熱侵入を大幅に低減できることが分かった。

500 A 級電流リード諸元

(銅リード部)	長さ60cm, 断面積0.8cm <sup>2</sup>
(超電導リード部) Bi 系バルク形状 運転電流密度 接続抵抗	長さ30cm, 断面積0.5cm <sup>2</sup> 0.1mm×10mm×300mm×5枚 1,000A/cm <sup>2</sup> 0.1 μΩ
(低温部) Cu/SC 線	長さ5cm, Cu 断面積0.1cm <sup>2</sup>
(低温端)	液体ヘリウム(4.2K)

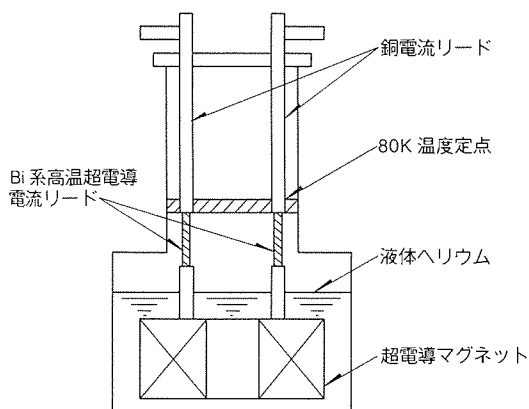


図4. 高温超電導体を用いた電流リードの構成

#### 4. 高温超電導限流器

##### 4.1 超電導限流器の特長

高温超電導体の応用が期待されている電力機器の一つとして限流器がある。限流器は短絡電流を限流することにより、電力機器や回路のジュール発熱による熱的損傷と電磁力による機械的損傷を低減するために利用されている。汎用的な限流器として限流リアクトルがあるが、①限流性能が低い、②負荷電流通電時の発熱が多く電圧降下が大きい等の欠点がある。

上記の欠点を取り除くため、超電導体を応用した限流器の研究が行われている。超電導限流器は、超電導体に臨界電流を越える電流が流れると抵抗が発生する現象を利用して、短絡電流を限流する。液体ヘリウム(4.2K)中で超電導を示す金属線を用いた低温超電導限流器の研究<sup>(4)(5)</sup>も行われているが、液体ヘリウムを必要とするため、コストが極めて高いという欠点をもつ。限流素子として液体窒素(77K)中で超電導を示す高温超電導体を用いることにより、コストを顕著に低減できるので、最近では高温超電導限流器の研究が盛んに行われている。

超電導限流器の主な限流方式として、SN 転移式(超電導・常電導転移式)と無誘導コイル式の二つの方式がある。SN 転移式限流器<sup>(6)</sup>は、図6(a)に示すように限流素子として超電導のバルク材や膜を用いたものである。短絡電流が超電導体の臨界電流を越えると、超電導体が超電導状態から常電導状態に転移し、抵抗が発生することによって短絡電流が限流される。SN 転移式限流器は、構成が簡単で外形寸法が小さいという特長をもつ。また、超電導体として膜材を用いたも

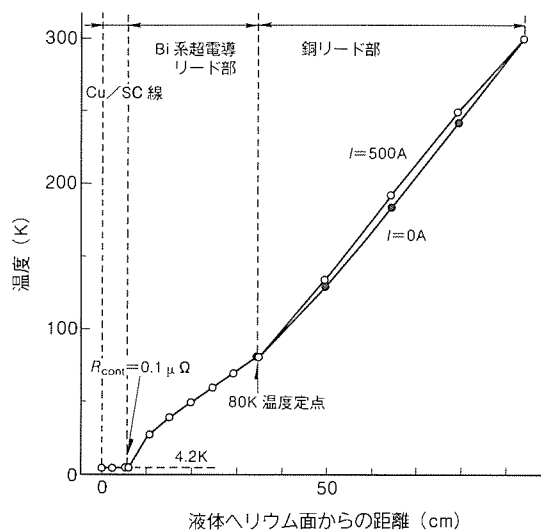
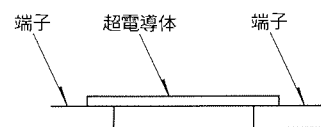
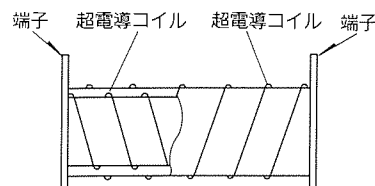


図5. 30cm 長 Bi 系電流リードの温度分布の計算結果



(a) SN 転移式



(b) 無誘導コイル式

図6. 超電導限流器の限流方式

のでは、限流動作後の復旧時間が短いという特長がある。

無誘導コイル式限流器の一例<sup>(5)</sup>を図6(b)に示す。この方式の限流器は、臨界電流が異なる二つの超電導コイルをインダクタンスがほぼゼロになるように並列接続したものである。短絡事故時、臨界電流が低いコイルがクエンチし、二つの超電導コイルに流れる電流にアンバランスが生ずることによってインダクタンスが発生し、短絡電流が限流される。無誘導コイル式限流器には、高電圧化が比較的容易という特長があるが、超電導体として線材が用いられるので、限流動作後の復旧時間が長いという欠点がある。現在、高温超電導限流器を研究中のほとんどのメーカーや大学で検討されている方式は、SN 転移式である。

##### 4.2 高温超電導限流器の試作及び特性

当社では、高温超電導体として超電導板や超電導膜を用いた SN 転移式限流器の研究を行っている。以下、Y 系高温超電導膜を用いた限流素子の実験結果の一例について紹介する。実験に用いた膜の厚さは0.25 μm、幅は1mm、長さは2mm、直流臨界電流密度は $8.8 \times 10^5$  A/cm<sup>2</sup>、直流臨界電流は2.2

Aである。実験回路を図7(a)に示すが、この実験回路の推定短絡電流は420 Aである。限流波形を同図(b)に示すが、シミュレーション<sup>(6)</sup>で得られた限流波形と同様な波形が得られた。この実験では、波高値420 Aの短絡電流が8 Aに達した後、限流素子に高い抵抗が急激に発生し、短絡電流が顕著に限流された。

限流波高値は、直流臨界電流の3.6倍、電圧ピーク時における超電導膜の抵抗値は約7 Ωであった。

上記の実験結果を基に、超電導膜の許容電位傾度が3.5 Vrms/mm、限流波高値が直流臨界電流の3.6倍であると仮定し、100 V級限流素子の試設計を行った。最近、臨界電流密度が $10^6$  A/cm<sup>2</sup>級の高温超電導膜を再現性よく製作できるようになったので、この試設計では臨界電流密度を $1.4 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup>とし、高温超電導膜は均質であると仮定した。試設計の一例を表3に示す。上記の検討結果を基に、100 V級限流素子を試作して限流実験中であるが、良好な結果が得られつつある。

## 5. 超電導磁気軸受

### 5.1 超電導磁気軸受の特長

超電導の特長の一つである電気抵抗がゼロという特性を利用して、永久磁石等の磁界中で超電導体を浮上させることができる。これは超電導体内に磁界変化を与えることによって生じる遮へい電流が流れ続けるためである。また、第2種超電導体では、磁界が臨界磁界 $B_{C1}$ を超えると磁束が超電導体内に侵入するが、磁束ピン止め力(以下“ピン力”という。)によって磁束はトラップされてしまい、浮上体は動けなくなる。この現象を利用したのが磁気軸受である。

最近酸化銀を混合した溶融法<sup>(7)</sup>によって結晶粒径が大きくなり、ピン力の大きいY系超電導バルク材が作成できるようになった。このピン力の大きい超電導体を磁気軸受に用いることにより、位置の安定点は初期冷却時に任意に決めることができ、動作時にはその安定点で拘束されるため従来型のような複雑な位置制御が不要になる。このように、超電導磁気軸受の特長は、①非接触であるため回転損失が非常に小さい、②浮上位置は受動的に固定されるため位置制御系が不要、等である。

### 5.2 小型超電導磁気軸受モデルの試作

ここでは、Y系超電導体を用いた磁気軸受モデルを原理実証用として試作した結果について述べる。

図8に試作した磁気軸受モデル構成を示した。Y系超電導体は外径75 mm—厚さ15 mmの円盤型と外径75 mm—内

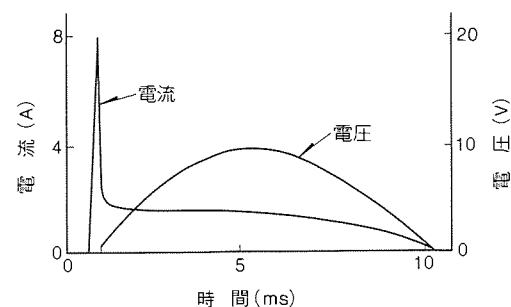
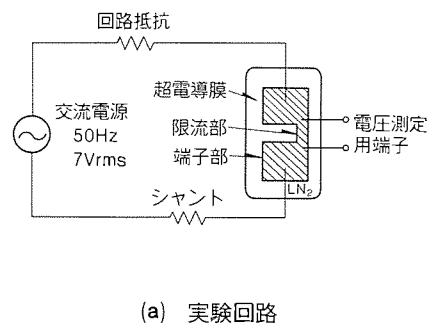


図7. 限流実験

表3. 100Vrms用限流素子の設計例

素子	A	B	C	D
連続通電限界電流 $I$ (Arms)	1	10	100	1,000
臨界電流密度 $J_c$ (A/cm <sup>2</sup> )	$1.4 \times 10^6$			
素子長 $L$ (cm)	3.0			
素子断面積 $S$ (cm <sup>2</sup> )	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
素子肉厚 $t$ (μm)	0.25			
素子幅 $W$ (cm)	0.04	0.4	4.0	40
限流波高値 $I_p$ (A)	5.1	51	510	5,100
続流波高値 $I_f$ (A)	0.55	5.5	55	550
限流動作時抵抗値 $R$ (Ω)	258	25.8	2.58	0.258

径15mm—厚さ15mmのリング型である。永久磁石はSm-Co系で外径65 mm—内径45 mm—厚さ20 mmのリング状のものを用いた。モデル機は図に示すように回転軸に固定した永久磁石を上記Y系超電導体の中間に挟んだ構造である。回転軸上部にはステンレス製(外径100 mm—厚さ5 mm)の模擬フライホイールと磁気クラッチを設けた。回転体の質量は約1.1 kgである。回転力は磁気クラッチを介して上部に設けたモータによって与えた。

超電導体の冷却手順は、冷却前に回転軸をスパーサで位置を固定し、液体窒素で超電導体部を冷却した後にスパーサを外し回転軸を浮上固定した。回転特性測定時は、内層の液体窒素を抜き真空引き(約13 Pa {約 $10^{-1}$  torr})を行った。

### 5.3 小型超電導磁気軸受モデルの特性

超電導体の浮上力特性を図9に示す。これは、外径75 mmの円盤型の超電導体を液体窒素で冷却した後に永久磁石を近づけた場合の浮上力を測定したものである。最大浮上力は、約3 kgであった。不均一磁界中における超電導体に加わる力は、次式で表される。

$$F = \text{grad } M \cdot H$$

ここで $F$ は力、 $M$ は超電導体の磁化、 $H$ は磁界強度を表すベクトルである。上式から浮上力を数値計算で求めた結果を図9に加えた。図から分かるように計算結果は測定値と良い一致をしている。この超電導体の磁化特性は、約0.1 T以上では磁化はほぼ一定値になるので、上式から、浮上力を更に向上させるためには磁場こう配を向上させることが有効であ

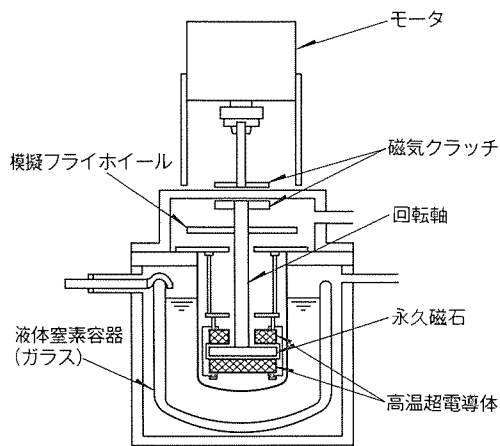


図8．超電導磁気軸受モデルの構成

る。

回転数は、100～200 r/min の低い回転数で共振が生じたもののそれ以上では4,500 r/min まで上昇させても安定して回転できた。回転数が4,500 r/min での蓄積エネルギーは、密度及び形状から約0.3 kJ と求められた。回転時に磁気クラッチを切り離れた自由回転（フリーラン）特性では、回転数2,000 r/min から停止まで1時間の時間を要し、低損失の軸受であることが分かった。超電導バルク材の磁化特性から、超電導体のヒステリシス損失は0.3 T 付近の磁界変動が±0.01 T 以上になると急激に増加する。このことから超電導磁気軸受を設計する際には、超電導体に加わる磁界変動は±0.01 T 以下に抑制することが効果的であり、永久磁石の回転方向の磁界均一度や回転体の振動をこの観点から検討する必要があることが判明した。

## 6. む す び

これまで述べてきたように、種々の高温超電導体のエネルギー応用で、従来の金属系超電導体に比べて優れた特長を持つことが分かった。例えば、マグネット応用では、液体ヘリウムが不要となり冷却効率及び信頼性が大幅に向上するとともに、クエンチが生じにくいコイルをつくることができる。また、超電導マグネット機器の電流リードへの応用では、マグネットの熱侵入量を従来の電流リードの1/10に低減できる。限流器応用では液体窒素温度で、限流特性の良いものが得られる。さらに、浮上力が大きく、低損失で位置制御系がない構成の磁気軸受をつくることができる。

これらの高温超電導体のエネルギー応用を実現するにはこ

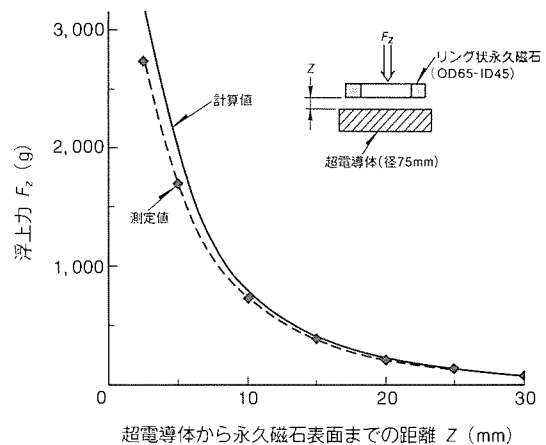


図9．超電導体の浮上力特性

の論文で指摘した種々の課題を解決していくことが必要である。今後も実用化に向けて技術向上を図り、これらの課題の解決を目指したい。

## 参 考 文 献

- (1) 中島 洋：超電導磁石と冷凍システム，電気学会雑誌，111，No. 6，468～470（1991）
- (2) Maehata K., Wake M., Sato N., Fujino T., Hirabayashi H. : Development of Co-Axial Type Current Lead, Proceedings of 11th International Conference on Magnet Technology, 2, 1376～1379（1989）
- (3) 能登宏七，高橋長衛，斎藤良則，松川倫明，森 克徳，小木曾祥明，久保幸雄，道下和雄：帯融法で作製した  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$  の超電導特性と熱伝導度，第43回低温工学・超電導学会講演予稿集，227（1990）
- (4) Gray, K. E., Fowler, D. E. : Superconducting Fault Current Limiter, EPRI EL-329（1976）
- (5) 原 築志，岡庭 潔，星野晴彦，山本隆彦：限流器用交流超電導マグネットの基礎特性評価実験，平成2年電気学会 電力・エネルギー部門全国大会，No. 241（1990）
- (6) 山田忠利，森 貞次郎：エレクトロニクス応用に必要なエネルギー技術とは，エレクトロニクス，36，No. 3，49～53（1991）
- (7) 藤本浩之，村上雅人，小山央二，後藤聡志，高田 勉，塩原 融，腰塚直己，田中昭二：溶融法による YBa-CuO の合成と臨界電流特性，低温工学，25，No. 2，77～80（1990）

# 東京都防災情報システム

今井直治\* 金子訓士\* 岸田和之\*\* 森田俊二\*\*\* 今飯田 哲+

## 1. ま え が き

東京都防災情報システムは、都道府県レベルの地方自治体に導入された初めての本格的な総合防災情報システムであり、平成3年4月の新都庁舎オープンと同時に同庁舎内の“東京都防災センター”を中心として運用が開始された。当社は同システムのうち“AV システム”“画像端末システム”“地震被害判読システム”を開発・納入した。本稿ではこの3システムの紹介を行う。

## 2. “東京都防災センター”の概要

### 2.1 構築の背景

我が国は、その地理的条件、気象条件から台風、集中豪雨、地震、火山噴火等に起因する災害を受けやすい国土である。このような災害を未然に防止するとともに、被害を最小限に止めることを目的として地方自治体は各種の防災活動業務を展開しており、その一環として既に多くの地方自治体で防災行政無線網や防災テレメータシステム等が導入され、災害時の情報収集、伝達、意思決定等の業務に活用されている。

首都東京は、近年ますます政治・経済の集中化が加速され、日本のみならず世界経済の重要な拠点となりつつあるが、上記の国土特性にかんがみ、災害、特に大地震による首都大災害が早くから危ぐ（惧）され、各種対策や調査が計画・実施されてきた。東京都では今回の新都庁舎建設に当たり、その主要な機能の一つとして、総合的な災害対策活動の中核的役割を担う“東京都防災センター整備計画”を策定した。

### 2.2 “東京都防災センター”の概要

“東京都防災センター”（以下“都防災センター”という。）は最新の通信、コンピュータ、映像等の高度技術を駆使し、災害情報の一元管理、被害状況の迅速な把握、災害支援活動の立案・審議等の効率化を図り、万一の場合に備えての対策支援活動に万全を期することを主要な目的としている。

サブシステムとして、災害情報システム、延焼予測システム、浸水被害予測システム、地図情報システム、AV システム、画像端末システム及び地震被害判読システムがあり、これらの有機的な活用によって上記目的の達成を図るも

のである。サブシステム相互間の関連を図1に示す。

また、同センターは主要な部屋として次の3部屋があり、各々機能を分担し、効率の良い災害対策支援活動の実現を目指している。

#### (1) 指令情報室

この部屋では、都防災センターで扱う情報を一元管理し、外部関係機関等との調整を行い、情報の収集・蓄積・分析・配信を行っている。災害の有無にかかわらず24時間体制となっている。

#### (2) 災害対策本部室

この部屋では、災害時に災害対策活動の審議・決定を行い、また平常時には、都民への防災活動PR用に利用される都防災センターの中心施設である。

#### (3) 本部長執務室

この部屋は、災害時における本部長の臨時執務室であるほか、関係局長等との検討を行う会議室としても使用される。

上記各室の全景を各々図2、図3、図4に示す。

## 3. AV システム

AV システムは、人間に最も理解しやすい映像（画像）・音声等の情報を災害対策に最大限に活用し、有効な災害対策支援活動を実現するための全体システムのマンマシンインタフェース部である。

AV システムの構築に際しては表1に示す各事項に留意し、これを実現する機能をもたせるよう配慮した。都防災センタ

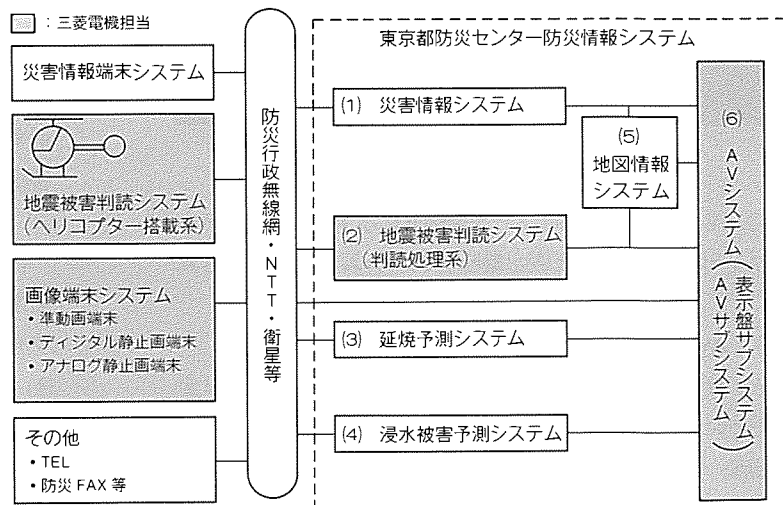


図1. 東京都防災情報システムサブシステム構成





図 2. 指令情報室

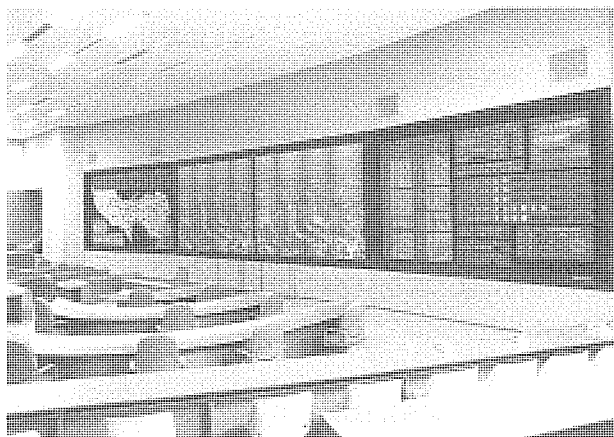


図 3. 災害対策本部室

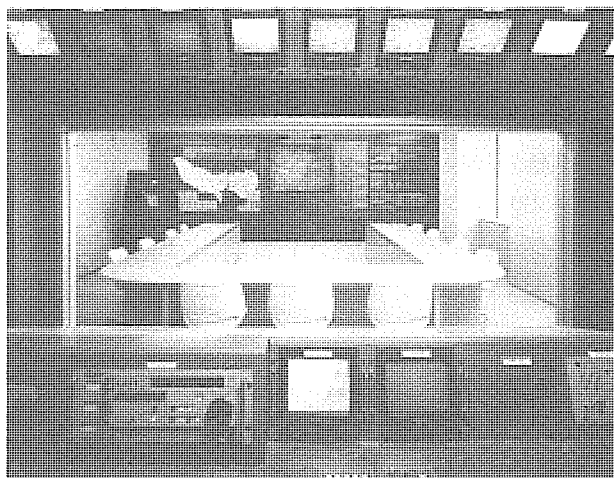


図 4. 本部長執務室

一の AV システム全体イメージを図 5 に示す。AV システムは AV サブシステムと表示盤サブシステムとから構成される。

### 3.1 AV サブシステム

AV サブシステムは、ヘリコプターテレビ（以下“ヘリテレ”という。）、屋上カメラ、庁内 CATV、車載 ITV カメラ、準動画／静止画端末局（詳細は 4 章で記述）からの映像・音声情報や災害情報システム、地図情報システム、地震被害判読情報システム、延焼予測システム等の画像（コンピュータ

表 1. AV システム構築のポイントと機能

構築のポイント	対応する機能
少ない要員での効率的な運用	<ul style="list-style-type: none"> <li>映像情報の収集、監視、配信の一元管理</li> <li>着信映像・音声の自動記録</li> <li>記録静止画の検索再生</li> <li>操作の自動化、集中化</li> </ul>
多人数への効率的な情報提供	<ul style="list-style-type: none"> <li>大型マルチスクリーンによる多元表示</li> <li>異種多数の画像・映像の切替表示</li> </ul>
平常時にも活用できる設備	<ul style="list-style-type: none"> <li>関係各機関との TV 会議</li> <li>マイクシステムを含めた電子会議</li> <li>防災啓蒙、PR に最適な映像ソース機器</li> </ul>

端末の画像) 情報を大型スクリーン上に表示し、効果のある災害対策支援活動を行うことを目的とする。

このサブシステムは映像・音声や画像の集配信・表示・加工・記録・再生・電子会議・TV 会議等の機能をもっており、各部屋ごとの機能を表 2 に示す。

### 3.2 表示盤サブシステム

このサブシステムは、都内で発生した被害概況及び各区市町村の活動状況を盤面上に表示し、迅速な災害対策活動の支援を行うことを目的としている。表示盤は都防災センターで取り扱う全情報の“索引”ともいえる機器で、ここに表示された内容をもとに、災害情報システム、画像端末システム等を稼働させ、より詳細な被害状況等を把握する。表示盤は、地図表示盤及び状況表示盤の 2 面 1 組で、指令情報室、災害対策本部室及び本部長執務室に各 1 組、計 3 組設置している。

下記に各装置の概要を説明する。

#### (1) 地図表示盤

都内 64 区市町村を地図上にレイアウトし、各々人的被害、建物浸水、建物倒壊、火災の被害状況の程度を段階表示する。また、これらの被害と公共土木施設・鉄道施設被害及びライフライン（水道・ガス等の供給設備）被害に関して、区部、多摩部、島しょ部（大島等）ごと及び東京都全体の被害合計値を定量的に表示する。盤面を図 6 に示す。

#### (2) 状況表示盤

都内 64 区市町村の措置状況、都の運営状況、気象注意報・警報発生状況、都内代表点の気象情報・地震情報等を表示する。また、文字表示器（6 台）を使用した文章による災害状況表示も行う。盤面を図 7 に示す。

#### (3) 警報盤

夜間防災連絡室及び災害対策部事務室に設置され、災害の発生、気象注意報・警報の発生及び地震の発生で、アラームブザーの鳴動及び LED の点灯を行う。

#### (4) 表示制御装置

災害情報システムと接続し、表示盤に表示する情報を受信する装置であり、32 ビットミニコン MELCOM70-MX/1600R で構成されている。受信情報は、この装置内で整理され各表示盤へ送信される。また、東京管区気象台からの気

象情報及び都防災センター設置の地震計情報も直接この装置に取り込まれている。

災害情報システム（IBM 汎用機）との接続には、プロトコルとして SNA/SDLC を採用し、データ伝送の誤り率低下、据付け時の接続試験期間短縮を実現した。

#### 4. 画像端末システム

画像端末システムとは、新都庁（都防災センターを含む）、区市町村等の防災機関、都事業所、警視庁・東京消防庁・自衛隊等関連他機関の間で、防災行政無線網を経由して準動画又は静止画映像通信を行うシステムである。このシステムは新都庁（以下“都庁局”という。）と前記各機関（以下“端末局”という。）に設置された映像伝送用の機器群から構成されており、映像情報の形態、利用回線の種類から

- (1) 準動画端末システム
- (2) デジタル回線利用静止画端末システム  
（以下“デジタル静止画端末システム”という。）
- (3) アナログ回線利用静止画端末システム  
（以下“アナログ静止画端末システム”という。）

の各サブシステムに大別できる。

映像情報の通信を行う東京都防災映像情報ネットワークシステム及び画像端末システムの構成を各々図 8、図 9 に示す。

##### 4.1 準動画端末システム

都庁局に設置の準動画コーデック（符号化装置）7 台と区市や関係機関に設置されている準動画端末局装置から構成される。都庁局～端末局間の通信形態としては、次の 4 種類がある。

- (1) 一斉同報  
都庁局から同一映像情報を指定した同報グループの端末局に対し、一斉に同報発信ができる。
- (2) 放送形式  
都庁局の複数の準動画コーデックから、各々異なる映像情報が常時送信されており、端末局で任意に選択受信ができる。
- (3) TV 会議  
都庁局（都防災センターの本部長執務室）と端末局間、又は端末局相互間で 1 対 1 の TV 会議ができ、災害時のみでなく平常時の打合せ・連絡にも利用できる。
- (4) モニタ（監視）利用

建設事務所に設置の端末局経由で河川水位監視カメラの映像が都水防システムへ常時送信されており、それらの映像を都庁局や端末局からモニタすることにより、災害の早期察知・安全対策等に利用できる。

この準動画端末局装置は、国際標準に準拠した準動画コーデック、送・受信モニタ、一斉同報を受信したとき自動録画する VTR、TV 会議用電動カメラ、準動画制御装置等から構成される。端末局装置の外観を図 10 に示す。

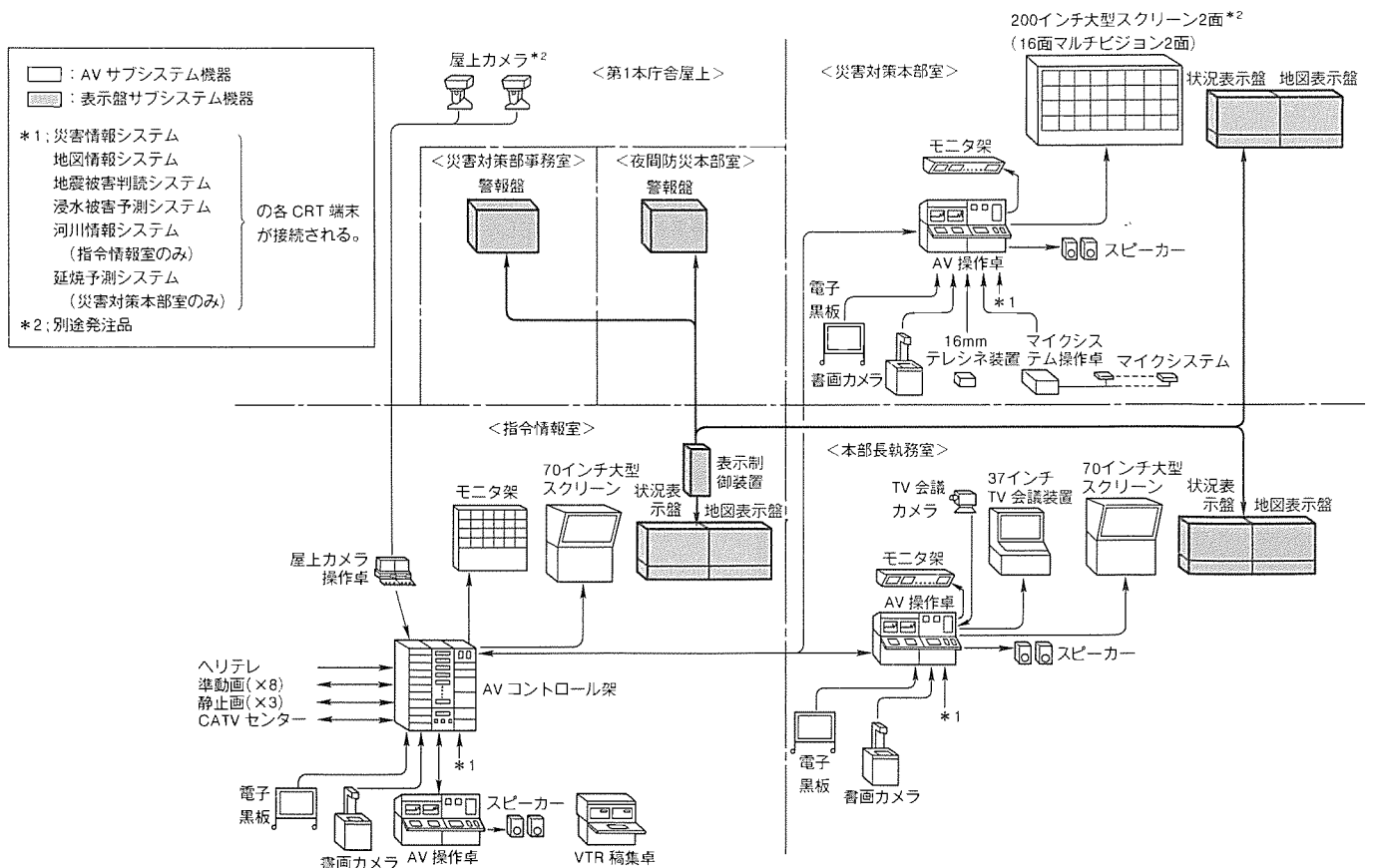


図 5. AV システム構成

車載ITVにも、同一の準動画コーデックが搭載されており、衛星系の回線を利用し災害現場情報収集に利用される。都庁局にも衛星系専用の準動画コーデック1台が設置されている。

## 4.2 デジタル静止画端末システム

都庁局の静止画伝送装置(デジタル回線用)2台と、主として伊豆諸島に設置されるデジタル静止画端末局装置(平成4年度設置予定)とから構成される。通信形態として、

表2. AVサブシステムの機能

機能区分	室名称	指令情報室	災害対策本部室	本部長執務室
映像・音声の集配信		①防災行政無線網を経由して、区市町村や外部関係機関等からの映像(準動画、静止画)を自動着信・自動録画する。また、このAVサブシステムで取り扱う種々の映像を選択し、同無線網経由で発信する。 ②都防災センター各室や庁内CATV設備等に映像を選択・配信する。 ③本部長執務室からのTV会議映像・音声を受信する。	①指令情報室から配信される映像・音声の受信。	①指令情報室から配信される映像・音声の受信。 ②TV会議装置から出力される映像・音声を指令情報室へ配信する。
映像・画像表示		①集配信する映像はすべてモニタTVで監視する。 ②上記①の映像や、本室設置の各種コンピュータ端末* <sup>1</sup> の画像を大型スクリーン(70インチ)に表示し、多人数の職員に最新情報を提供する。	①50インチビデオプロジェクター16面構成による200インチ大型スクリーン2面に、映像や各種コンピュータ画像* <sup>2</sup> を自由に組合せ表示でき、多人数の本部員に最適な映像・画像情報を提供する。	①大型スクリーン(70インチ)に映像や各種コンピュータ画像* <sup>3</sup> を表示する。また、TV会議時も上記大型スクリーンが利用可能である。
映像・音声の記録、再生、加工		①防災行政無線網を経由して受信した映像に対し、受信日時、発信場所等の情報を自動的に付加し、収集映像の取扱を容易にしている。 ②静止画については、光磁気ディスクを利用したVDR(ビデオディスクレコーダー)とAXパソコン(製品名:MAXY)で静止画検索システムを構築し、日時、発信場所、災害種別等によって検索利用ができる。 ③準動画、動画等を記録したVTRテープの映像編集もVTR編集卓を使用し可能である。	①記録再生用VTR、書画カメラ、16mmテレシネ装置(16mmフィルムの再生用)等のAV機器を操作室に装備している。	①記録再生用VTR、書画カメラ等のAV機器を操作室に装備している。
その他 (電子会議、TV会議等)		①庁舎屋上の2台の望楼カメラを個別に遠隔制御するAXパソコンを2式設け、手動、プリセット、自動等の各種制御をマウスによる操作環境で実現している。 ②電子黒板上の手書情報を大型スクリーン(70インチ)に表示可能である。	①室内の本部員卓にマイク、スピーカー、発言要求ボタン等を一体化したマイクシステムを組み込み、多人数での音声会議の円滑化を図る。室外への音声出力を禁止する秘話機能も備えている。 ②電子黒板上の手書情報を大型スクリーン(200インチ)に表示可能である。	①37インチTV会議装置を使用し、防災行政無線網を経由して庁外他機関とのTV会議が可能であり、本室と他機関における映像・音声の送受が容易に行える。 ②電子黒板上の手書情報を大型スクリーン(70インチ)に表示可能である。

注 \*1:災害情報システム、地図情報システム、地震被害判読システム、河川情報システムの端末  
\*2:災害情報システム、地図情報システム、地震被害判読システム、延焼予測システムの端末  
\*3:災害情報システム、地図情報システム、地震被害判読システムの端末

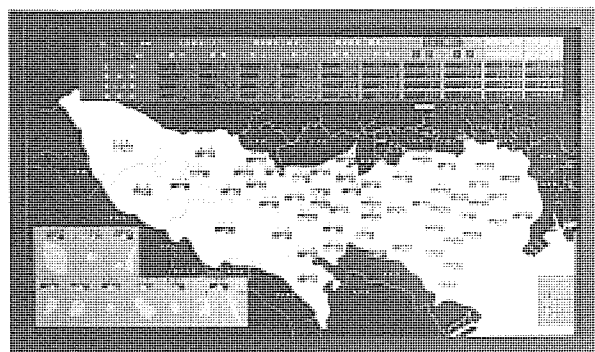


図6. 地図表示盤(指令情報室)

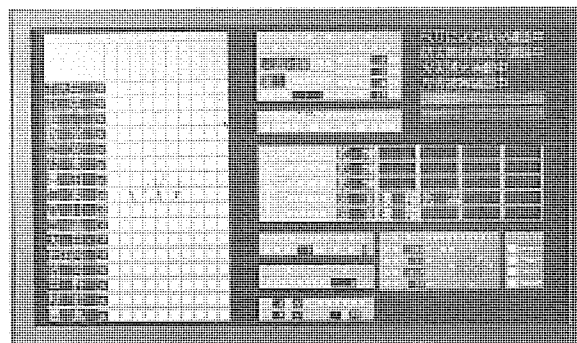


図7. 状況表示盤(指令情報室)

以下の2種類がある。

(1) 順次同報

都庁局から同一の静止画を、あらかじめ指定された端末局に対し、自動的に順次同報発信が可能である。

(2) 1対1静止画送受信

都庁局と端末局の間、又は端末局相互間で1対1の静止画の送受信が可能で、災害現場をスチールビデオカメラで撮影した画像等の伝送に利用される。

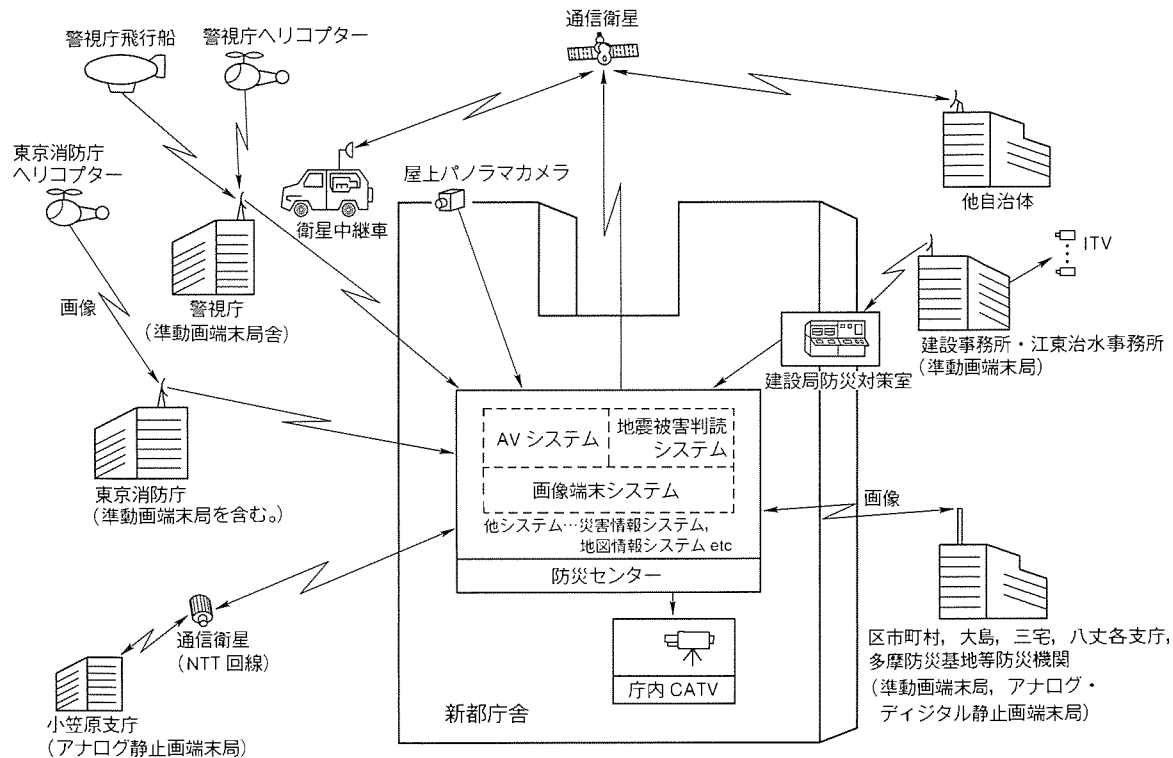
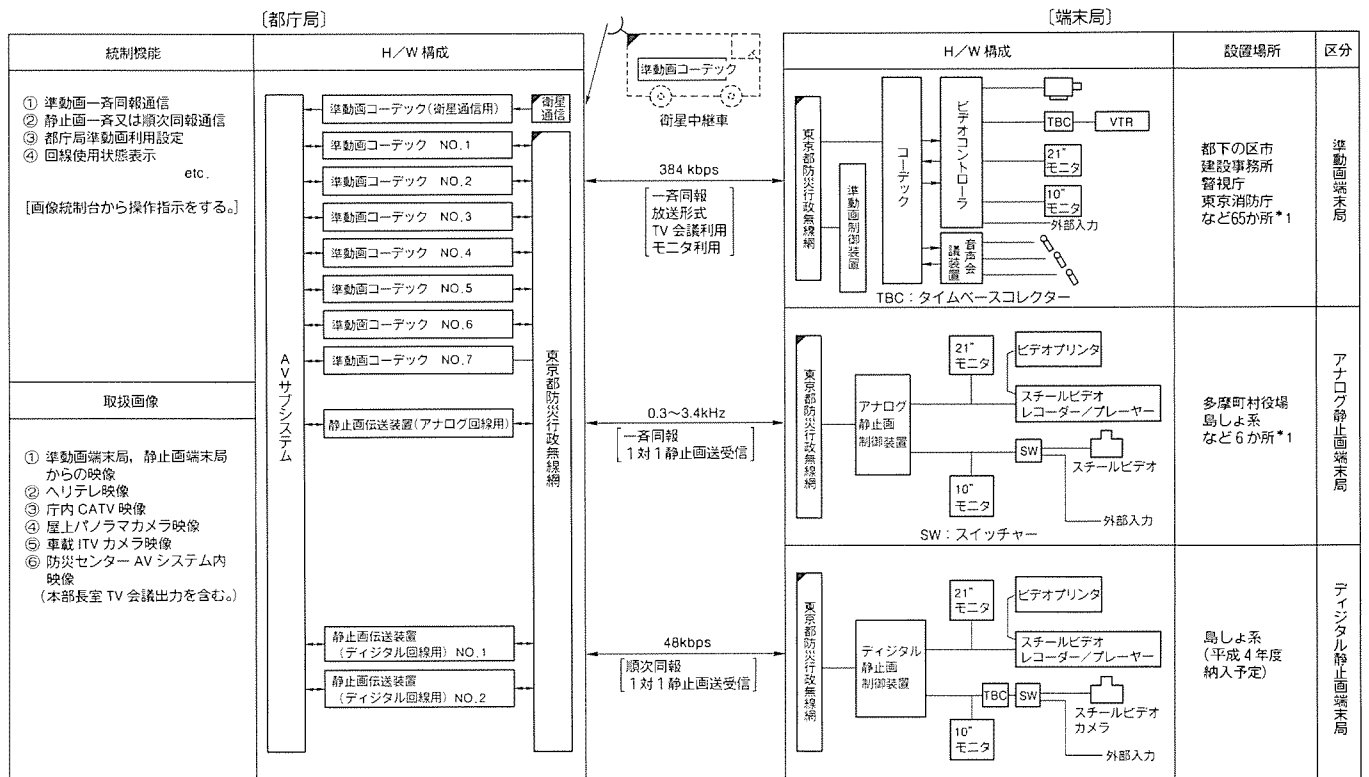


図8. 東京都防災映像情報ネットワークシステム



注 \*1 の設置場所数は平成3年4月現在の固定局の数値である。  
 \*2 この構成図は図1の画像端末システムを詳細展開したものである。

図9. 画像端末システム構成\*2

このデジタル静止画端末局装置は、短時間で高精細の静止画像を誤りなく伝送する静止画コーデック、受信した静止画を自動録画するスチールビデオレコーダー／プレーヤー、静止画をカラー印刷するビデオプリンタ等から構成される。通信回線は48 kbpsのX.21デジタル回線を使用予定である。

#### 4.3 アナログ静止画端末システム

都庁局の静止画伝送装置（アナログ回線用）1台と多摩町村、小笠原諸島に設置されるアナログ静止画端末局とから構成される。通信形態として、以下の2種類がある。

##### (1) 一斉同報

防災行政無線網の情報交換機との連携動作により、都庁局から同一の静止画を端末局に一斉に同報発信が可能である。

##### (2) 1対1静止画送受信

デジタル静止画端末システムと同様に、1対1の静止画送受信が可能である。

このアナログ静止画端末局装置は、アナログ電話回線を使用して鮮明な静止画を伝送する静止画伝送装置、受信した静止画を自動録画するスチールビデオレコーダー／プレーヤー、静止画を印刷するビデオプリンタ等から構成される。端末局装置の外観を図11に示す。

端末局が被災した場合のバックアップや災害現場情報の収集に利用されるアナログ静止画端末局相当の機能をもつ無線の移動多重車も整備されている。

### 5. 地震被害判読システム

大地震が発生した場合、最初の数時間はいわゆる情報空白期間として、広域的被害等に関する情報はほとんど入手できず、断片的な被害情報しか入手できないと考えられている。地震被害判読システムはこのような情報空白期に最も活用が期待されるシステムであり、次のような特長をもっている。

(1) 地震発生直後の混乱した交通、通信基盤を介さずに、ヘリコプターを使用して上空から被害発生現場の映像情報と位置情報を収集できる。

(2) 収集した情報を都防災センター、警視庁、東京消防庁に無線で配信する。

(3) 地上ではこれらの映像・位置情報から、より正確な広域被害状況を把握し、地図上で被害エリア、被害種別（火災、建物倒壊、浸水等）ごとに管理できる。

(4) これらの情報を災害対策本部室等に提供することで、具体的な対策支援活動の迅速な決定に活用可能である。

地震被害判読システムの構成を図12に示す。

システムは大別すると、上空から映像及び位置情報の収集を行う“ヘリコプター搭載系”と、その収集情報から所定の地図を検索し、ヘリコプター位置及び映像を同時表示する“判読処理系”から構成される。

#### 5.1 ヘリコプター搭載系

ヘリコプターは災害時においても有効な機動力が期待でき、上空から撮影した映像は広域的な被災地の状況を把握するのに最も有効な手段である。ヘリコプター搭載系は従来のヘリテレシステムの高度活用を目的としたシステムである。

ヘリコプター搭載系は映像収集のためのカメラ装置、カメラ防震装置（スタビライザ）、ヘリコプターの位置検出を行うGPS（Global Positioning System）装置、映像伝送を行う映像送信装置等の機器で構成されており、これらの機器を搭載したヘリコプターの外観を図13に示す。主な機器について以下に説明する。

##### (1) カメラ装置

ヘリコプター搭載系には可視カメラ（3板CCD方式）と赤外線カメラ（512×512画素でIRCSD方式）の2台のカメラを搭載している。夜間や視界の悪いときでも撮影が可能のように、高解像度かつリアルタイム映像が得られる赤外線カメラを搭載している点に特長がある。

##### (2) カメラ防震装置（スタビライザ）

高性能カメラを搭載しても、機体の震動等で安定した映像が得られないのでは被害判読作業は困難である。カメラ防震装置はXYZ3軸のジャイロを内蔵し、機体からの震動を吸収して安定した映像を得ることができる。また、機体の姿勢によらず一度設定した撮影方向を保持することも可能である。さらに、2台のカメラを同一防震装置内に収納し、操作性・保守性を向上させている。図14にカメラ防震装置の内部とカメラ装置を示す。

##### (3) GPS装置

GPSは地球上どこでも24時間高精度

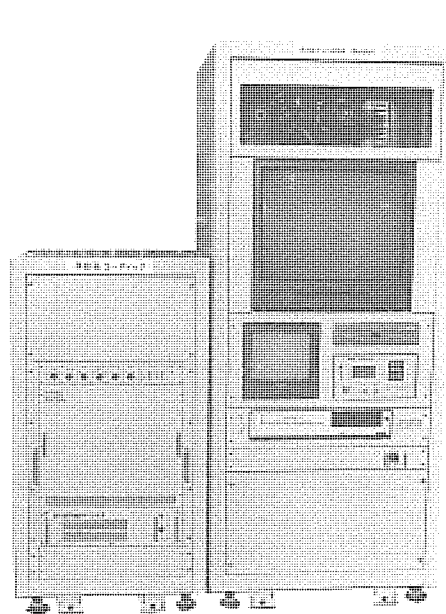


図10. 準動画端末局装置

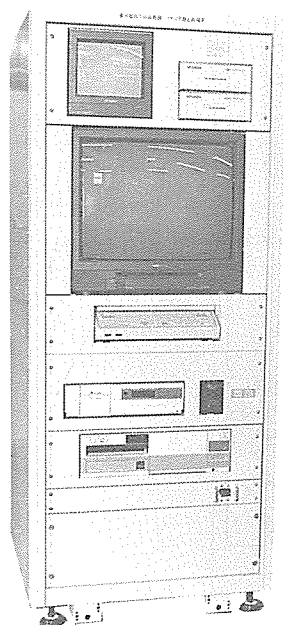


図11. アナログ静止画端末局装置

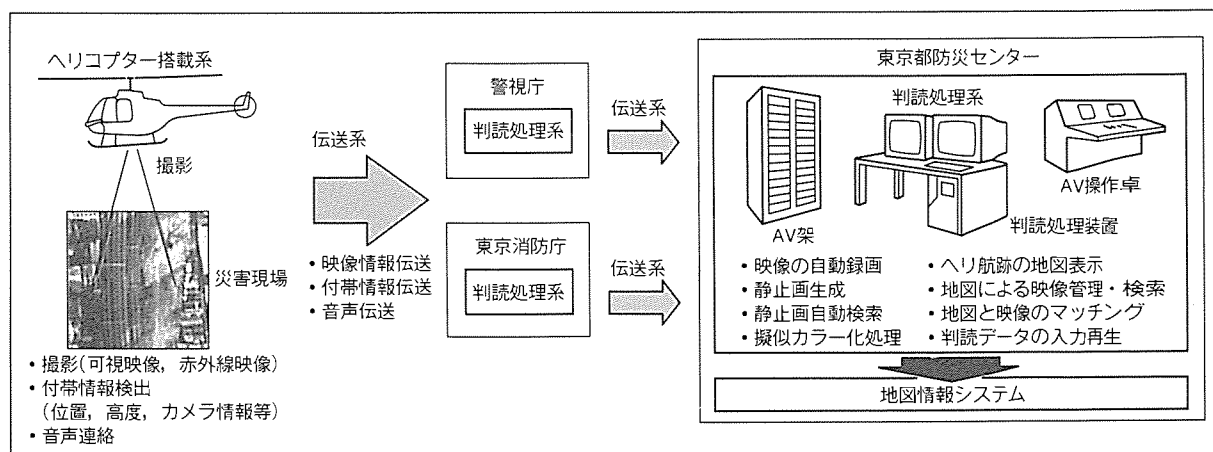


図12. 地震被害判読システム構成



図13. 地震被害判読システム(ヘリコプターの外観)

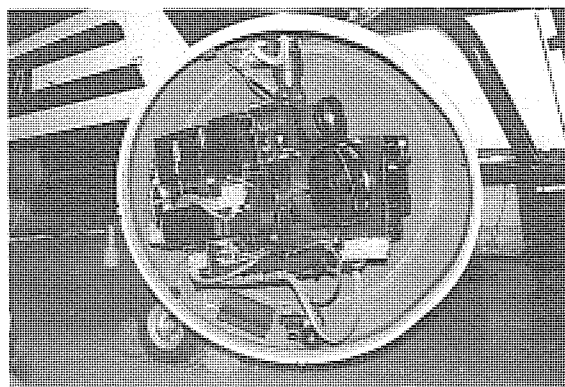


図14. カメラ防震装置搭載機器

の測位が可能なシステムとして米国で計画が進められ、数年前から自動車の位置検知にも利用されている。このシステムの要求性能(精度100m以内)から考えGPSを採用することとした。ヘリコプターに搭載したシステムとして運用するのは世界でも例がないため、実機による受信試験を実施し、ヘリコプターの航行や他の無線機等に影響がないことを確認し、最適な取付場所を決定した。

#### (4) 映像送信装置及びデータ伝送装置

ヘリコプターで収集した映像及び位置情報等を地上に伝送する回線としてヘリテレ回線(マイクロ波帯で15GHz)を利用した。本来、この回線は映像送信用であるが、データを映像と同時に送る必要があるため、データの映像多重方式を新規開発した。

### 5.2 判読処理系

判読処理系は、ヘリコプター搭載系が収集した情報を処理し、ヘリテレ映像を有効活用するために、映像と地図情報を同時提供し、オペレータの被災状況判読作業を支援する。判読処理系の外観を図15に示す。

#### 5.2.1 構成

判読処理系は、扱う情報の種類によって以下の二つのサブシステムで構成されている。

##### (1) 地図処理系

判読処理装置を中心とし、判読処理系のマンマシン部として機能する。判読処理装置は地図データベースをもち、地図の高速検索及びスクロール等が可能であり、ヘリコプターの動きにも十分追従できる。このシステムでは9種類の縮尺比(1/6,250~1/300,000)の中から地図を使い分けることができる。

##### (2) AV(映像・音声)系

主にヘリコプターから送られてきた映像・音声を扱うサブシステムであり、映像・音声の処理、記録/再生を行うAV機器及びこれらを制御するAVコントローラによって構成され、以下に示す機能をもっている。

###### (a) 生映像の自動記録

地図処理系での収集開始操作に連動し、自動的にヘリテレ映像をVTRに記録する。

###### (b) 静止画の自動生成/記録

生映像から一定時間(サンプリングタイム:設定は任意)ごとに静止画を生成して記録する。

###### (c) 映像加工

判読作業を支援するため、必要に応じて赤外線映像(白黒映像)の擬似カラー化やメッシュを付加する。

#### 5.2.2 機能

判読処理系のもつ機能を以下に示す。



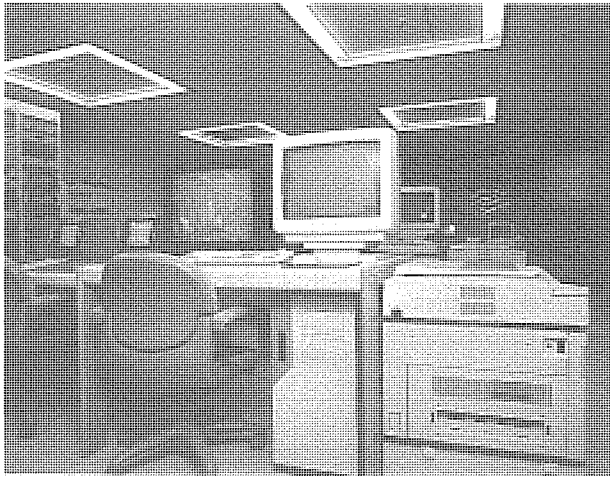


図15. 地震被害判読システム(判読処理系)

#### (1) トラッキング (航跡表示)

ヘリコプター搭載系から送られてくる情報をリアルタイムに提供する機能である。AV系のモニタTVには空撮映像を表示し、同時に判読処理装置(CRT)の地図上にサンプリングタイムごとに最新のヘリコプター位置をマークで示し、ヘリコプターの移動に伴って自動的に地図をスクロールしてヘリコプターの航跡を表示する。

#### (2) 静止画検索

判読処理装置の地図上に表示されている航跡を指示(ピック)することにより、その地点で撮影した映像(静止画)を自動検索して表示する。

#### (3) 被害判読処理

収集した映像からオペレータが被害を認識し、判読処理装置の地図上に被害エリアとして入力する。被害エリアには、被害種別・検知時刻を付帯情報として入力し、管理することができる。処理画面例を図16に示す。

#### (4) 被害判読情報の検索表示

入力された被害判読情報は、種別・時刻による被害の検索／再表示が可能であり、発生した被害の特性や時間経過による状況変化の追跡にも活用できる。また、入力された被害判読情報は、地図情報システム(別システム)に送信し、他の災害関連情報と併せて、一連の情報として処理が行われる。

### 6. む す び

このシステムはシステム規模が大きく、機器設置場所も都防災センター、警視庁、東京消防庁、64区市町村等と多岐にわたり、関係する他システム・設備も災害情報システム、

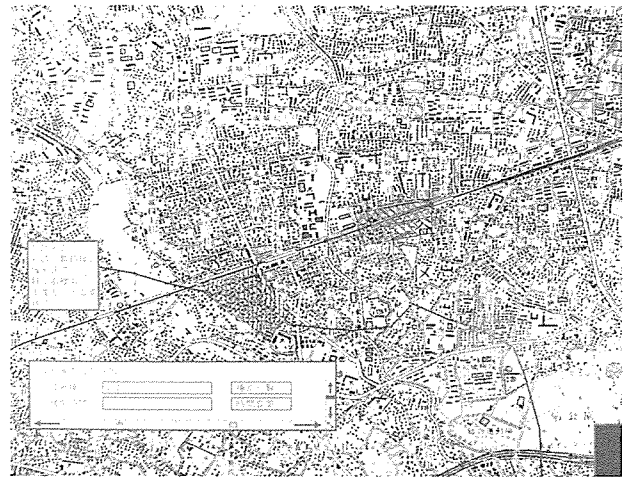


図16. 判読処理系 CRT 画面例(航跡表示及び判読処理)

地図情報システム、延焼予測システム、防災行政無線網、庁内CATV、气象台と広範囲に及んでいる。

さらに、技術的にも国際標準準拠の準動画コーデック開発、防災行政無線網を利用した映像情報集配信機能の実現、GPS、映像情報、地図ハンドリング技術の使用によるヘリテレ映像の高度利用化、都防災センターでの情報の一元管理と提供機能の高度化などを実現している。

これらは当社の最新技術の応用力と防災分野での各種システム構築実績を背景として可能となったものであるが、全体システムの構築に際してはユーザー、他メーカーの区別なくいろいろな専門の方々から御指導、御意見を頂くことができ本紙を借りて深く感謝する次第である。また、今後とも防災分野での各種情報システムの構築に尽力し、自治体の防災業務高度化に貢献していく所存である。

### 参 考 文 献

- (1) 東京都地域防災計画—震災編 (1986)
- (2) 東京都地域防災計画—風水害編 (1986)
- (3) 糸井川栄一, 北村英久, 日方俊幸: 防災情報処理の現状と動向, 電気学会論文誌D, 110, No. 9, 944~947 (1990)
- (4) 椎野 茂, 白田幸雄, 佐野昌利, 井田 勝, 日方俊幸: 総合防災情報システム, 三菱電機技報, 61, No. 12, 966~971 (1987)
- (5) 田中健一, 今井直治, 日方俊幸, 金子訓士, 岸田和之, 森田俊二, 野々山泰匡, 山倉智之: 地震被害判読システム, 電子情報通信学会, SANE 91-28, 29~36 (1991)

# 中部電力(株)豊根開閉所納め高信頼度形550kV GIS

江川 武\* 加藤 徹\* 羽馬洋之\*\* 土江 瑛\*\* 平河宏之\*\*

## 1. ま え が き

中部電力(株)は、将来開発される電源の安定輸送とルート故障等における広範囲、長時間停電の防止をねらいとして、既設500kV系統の更に外側(山側)に位置する500kV第二基幹系統建設に着手した。現在、その一期工事である静岡幹線と、既設500kV信濃幹線とを連系する豊根開閉所(平成5年6月運開予定)の建設工事が進められている。ここでは、豊根開閉所に適用する高信頼度形550kVガス絶縁開閉装置(以下“GIS”という。)を中心に紹介する。

## 2. 豊根開閉所の概要

中部電力(株)の基幹系統構成(平成7年度末)を図1に示す。豊根開閉所(当面6回線、最終8回線)は、浜岡原子力発電所からの電源線である静岡幹線と長野方面への電力輸送の幹

線である信濃幹線を連系する基幹開閉所である。そのため、従来以上に系統の信頼性を高めるべく、単一故障での各幹線2回線の同時停止(ルート断)防止策として、ブスタイ遮断器の二重化構成を採用している。また、当開閉所は愛知、長野の県境に近い山間地に位置し、中部電力500kV系としては初めての無人開閉所となる。

ここに適用するGISは、改めて高信頼度化技術を結集したもので、その概要は、

- (1) 各種高性能機器の採用
  - (2) 混入異物対策を含めた絶縁性能の高信頼度化
  - (3) 電気所システム面からの信頼度向上対策の適用
- 等で、製造から現地据付けに至る徹底した品質管理による信頼度向上を図ったものである。なお、これに併せ、縮小化設計等による合理化、経済性の追求についても織り込んだ設計となっている。

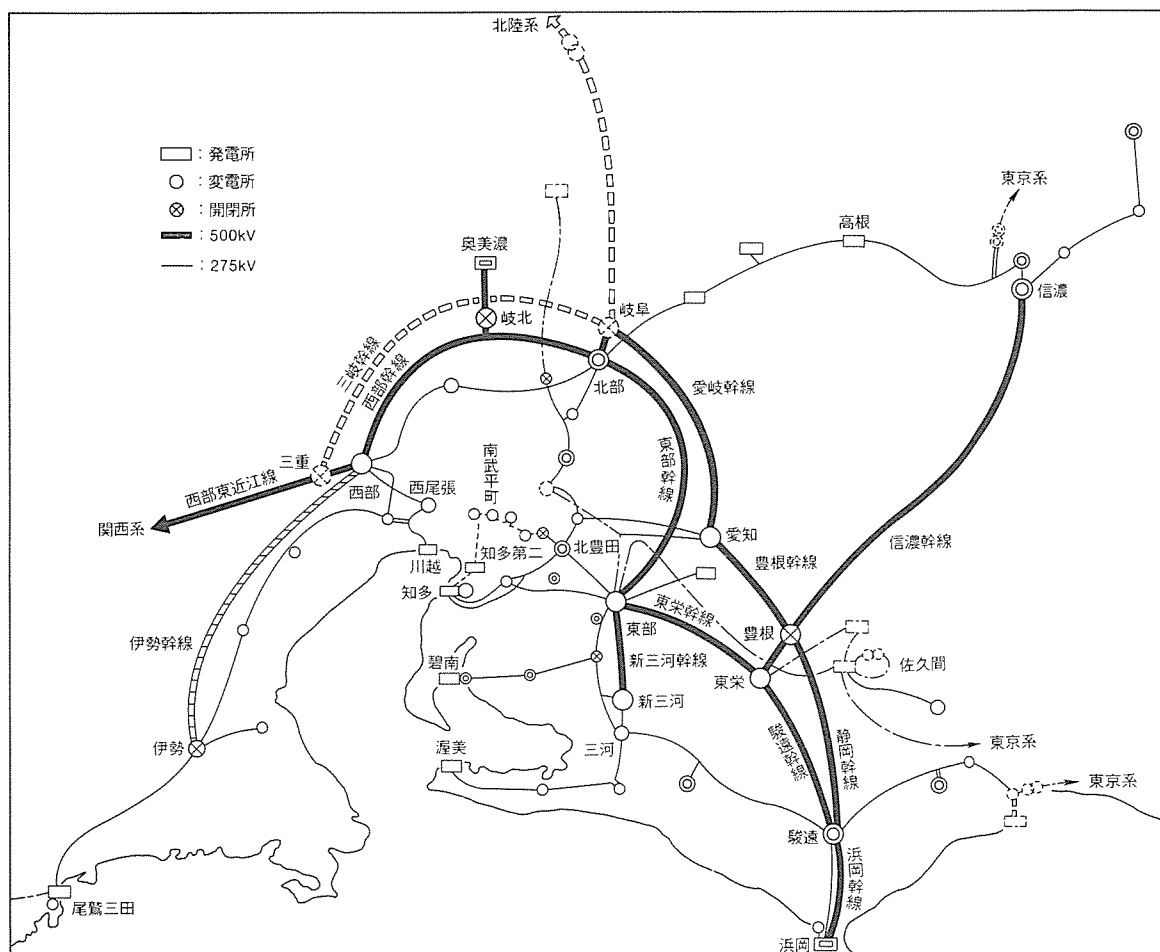


図1. 中部電力(株)の基幹系統構成(平成7年度末)

### 3. 高信頼度形 550 kV GIS の特徴

#### 3.1 GIS の配置構成と主要定格

豊根開閉所の機器配置を図2に、単線結線を図3に示す。また、主要構成機器の定格を表1に示す。設計に際しては、接続母線長・所要スペースの縮減、工場組立形態の直送化、運転・保守性、増設の容易性、事故時対応等を勘案の上、以下のように最も合理的な配置構成を達成している。

(1) 雷インパルス耐電圧レベル（以下“LIWL”という。）低

減効果を反映し、ブッシング間隔は8 mを6.5 mへ、引留鉄塔間隔は32～36 mを28 mへと縮小し、開閉所の所要面積を大幅に縮減。

(2) ブスタイ用遮断器の二重化に際し、両遮断器は主母線を挟んだ対向配置とし、機器の据付け面積を縮減。加えて、万一事故時における隣接回線活線下での重機進入域を確保。

(3) 主母線部にはユニット間に2枚の絶縁スペーサを、主要機器の両側には区分スペーサを設置する等、ガス区分を適正に設定し、主要機器はガス空間を開放することなく、現地搬

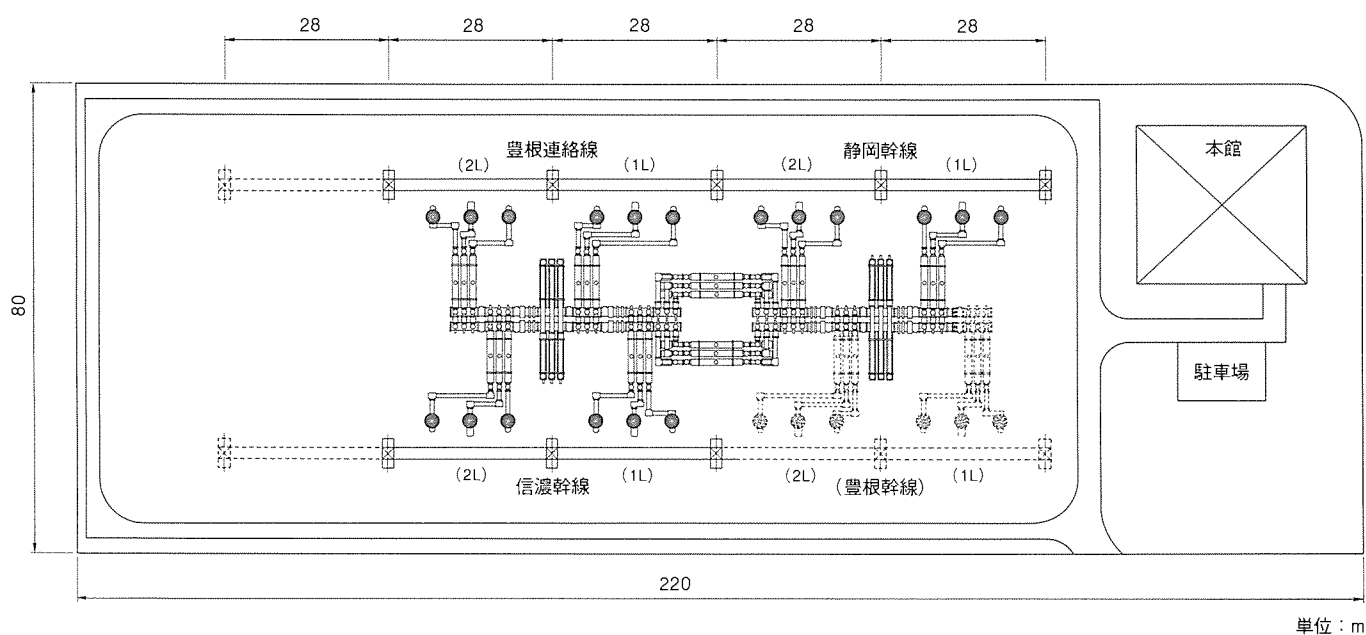


図2．豊根開閉所の機器配置

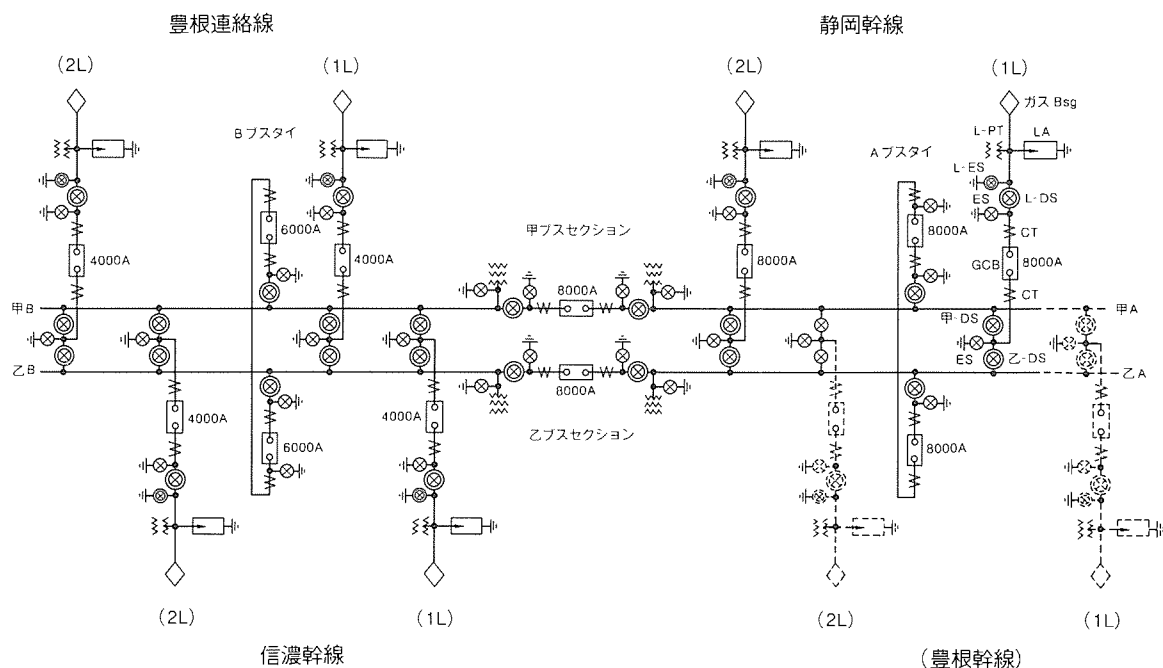


図3．主回路単線結線

表1. 主要構成機器の定格

全 般	定格電圧	550kV
	定格電流	8,000, 6,000, 4,000A
	定格短時間電流	50kA, 2s
	絶縁階級	500号L, ただし線路側は実力 LIWL 1,800kV 設計
	SF <sub>6</sub> ガス圧力	GB: 0.49MPa {5 kgf/cm <sup>2</sup> }, その他: 0.39MPa {4 kgf/cm <sup>2</sup> }
遮 断 器	形 名	500-SFMT-50D
	定格遮断電流	50kA
	定格遮断時間	2 サイクル
	操作方式	油圧操作 (31.4MPa {320kgf/cm <sup>2</sup> })
断 路 器	形 名	500-GR-80, 60, 40
	電流開閉能力	進み小電流: 0.5A, 2,000回 ループ電流: 8,000A, 300V, 200回
	操作方式	三極単投, 電動ばね操作
接 地 開 閉 器	形 名	50-GRE
	電流開閉能力	静電誘導: 32kV, 24A, 200回 電磁誘導: 70kV, 1,000A, 200回
	操作方式	三極単投, 電動ばね又は手動操作
避 雷 器	形 名	MAU-TA
	定格電圧	420kV
	動作開始電圧	V <sub>10kA</sub> : 870kV
計 器 用 変 圧 器	形 名	GV-501
	線路用	550/√3 kV-110/√3 V, 50VA, 3 P
	母線用	550/√3 kV-110/√3 V (副二次110/√3 V), 500VA (副二次50VA), 1 P (副二次3 P)
計器用変流器		貫通形内装 CT 過渡特性付き及び普通形
ガスプッシング		5.4m (500-L)

入が可能な構成。

- (4) 水平スペーサを排除し、万一の混入異物が絶縁スペーサへ付着することによる絶縁性能の低下を抑制。
- (5) 操作、監視部はすべて地上レベルに設置。また、保守・点検通路は400mm以上、操作・作業スペースは600mm以上を確保することで運転・保守性を向上。

## 3.2 高性能機器の適用

### 3.2.1 遮断器

GISへの適用に際しては、小型化とともに、高性能・高信頼度化及び保守の簡素化を達成した新形550kV二点切りガス遮断器を開発・製品化している。遮断部には新形300kV一点切りガス遮断器(平成元年秋に製品化)<sup>(1)</sup>に適用したDシリーズ用消弧室を2ユニット用い、各ユニットに対して並列に投入抵抗接点を設けている。操作装置部には常時高圧安定回路方式によるコンパクトなOMシリーズ操作装置を適用し、動作信頼性と保守の簡素化を実現している。この遮断器には新形300kV一点切りガス遮断器と同様に数々の新技術を適用しており、これらの詳細については、本誌掲載の“新形550kV, 300kV ガス遮断器シリーズにおける小型・高信頼度化技術”の中で述べられている。

### 3.2.2 母線切換用断路器

従来の小型パッファ方式に代わる抵抗限流遮断方式を適用し、駆動力を70%(従来比)に低減している。これにより、三極単投操作方式の採用が可能となり、駆動系部品点数も削減されるため駆動系全体の信頼性が向上している。図4に母線切換用断路器の構造と等価回路を示す。この断路器は投入状態では主接触子を介して通電しているが、遮断動作時には主接触子と並列で、かつ抵抗体と直列に接続される固定側アークコンタクトに転流させ、限流した電流を遮断する構造である。この方式では転流の際、主接点解離後の過渡回復電圧上昇率は挿入される抵抗が小さいほど低減されるため、低抵抗ほど転流が容易である。遮断の際は抵抗値が大きいのほど限流効果があり、また力率の改善による過渡回復条件の軽減もできるため遮断しやすくなる。したがって、転流性能と遮断性能の両者を考慮した最適抵抗値の選定が重要になり、この関係を図5に示す。図から最適抵抗値としては0.15Ω程度が得られている。実機で抵抗値を0.15Ωに設定し、容器に常規対地電圧1.0E(E=550/√3kV)を印加して200回のループ電流遮断試験を実施したがコンタクト類の損耗も軽微であり、また容器への地絡も発生せず十分な信頼性を確認している。

### 3.2.3 避雷器

大規模開閉所の合理的な絶縁協調を図るためには、避雷器の適切な配置のみならず、その保護特性の向上も不可欠である。このため、JECに規定されている放電電流10kAでの制限電圧特性(V<sub>10kA</sub>)を現行の1,220kVから870kVへ低減可能な高性能避雷器を適用している。適用に際しては、制限電圧特性を低減するため従来以上に避雷器の交流過電圧及び処理エネルギーに対する責務が厳しくなることから、過渡現象解析プログラム(EMTP)を用いて系統過電圧解析を実施している。解析の結果、最も厳しい系統運用条件で発生する交流最大過電圧は675kV(1.5E相当)であり、また最大処理エネルギーは2.6MJで高性能避雷器の処理エネルギーが7MJであることを考慮すれば、十分な裕度をもっている。さらに、雷サージ解析も実施し、LIWL1,550kVの妥当性も確認しており、合理的な絶縁協調を達成している。

## 3.3 現地開放組立ての極少化とクリーンハウス工法の適用

GIS内への混入異物を抑制し高信頼性を実現すべく、可動部収納機器、避雷器、計器用変圧器等の主要機器は、工場組立形態(機器内部に0.049MPa{0.5kgf/cm<sup>2</sup>}程度ガス封入)で直送し、現地解放組立箇所を極少化を図っている。ま

た、現地組立て・据付け工事では工場内の環境を再現させるためクリーンハウス工法を適用し、総合信頼性の向上にも配慮している。クリーンハウスは機器接続部を覆うため床面を含めた六面閉鎖構造で、機器の四面貫通も対応可能である。現地組立時のハウス内作業に対しては、清浄空気を注入して作業環境を向上させているほか、クレーン使用によるハウスの開放を避けるため機器に搬送治具を取り付け、水平移動で接続するクレーンレス工法を採用している。

### 3.4 開閉所の無人化と保守の高度化

豊根開閉所には、無人化対応・保守の高度化を目的とする電気所支援システムを導入している。このシステムの機能を以下に示す。

- (1) 運転支援：設備故障情報から故障部位を標定し、その復旧の支援を行う。
- (2) 保守支援：通常の運転状態で設備故障に至る前の異常状態を検知し、予測保全の支援を行う。
- (3) 保安支援：災害防止のため人身や設備への被害を及ぼす異常を検知し、保安監視業務の支援を行う。

システムの構築に際しては、各支援システムを機能別に分離している。また、異なる製造業者間におけるシステムの結合を前提としており、境界線の明確化及び結合の円滑化のため情報伝送プロトコルを統一している。無人電気所側の計算機はマイクロプロセッサで、また保守担当の有人電力所側はマンマシン機能をもつ必要があるため、ワークステーションで構成している。

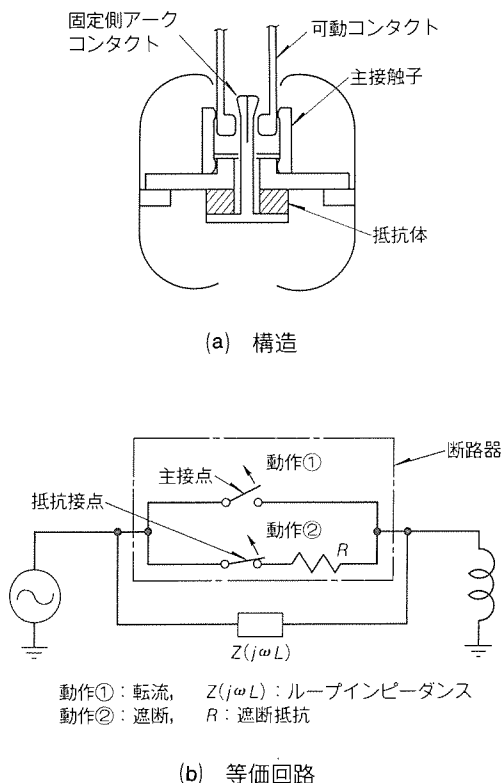


図4 母線切替用断路器的構造と等価回路

図6に支援システムのうち、GISに直接関係する運転保守支援システムの構成を示す。運転支援システムでは、保護リレー情報はLANを、また故障点標定センサ(圧力式故障検出器)情報はGIS制御箱を経由して運転支援情報処理盤へ入力され、ここで論理演算を行うことによって故障部位を標定する。また、故障点の切離し操作及び系統復旧のための準備操作という系統条件に左右されず電気所構内の復旧操作を行う運転支援機能も付加されている。このため圧力式故障検出器を二重化することにより、システムの高信頼度化を図っているほか、三相一括形主母線等の大容量容器に対しても検出可能な高感度形圧力式故障検出器を適用している。

保守支援システムでは、機器監視用センサ(部分放電センサ、LA漏れ電流センサ及びLA動作回数センサ)の検出した信号をセンサ信号処理盤又は保守支援情報処理盤で処理することにより、監視対象の異常を検知する。

以上、両支援システムによる判定結果は電気所側運転保守支援結合装置で集約され、さらに上位局である電力所側運転保守支援結合装置へ伝送される。電力所運転保守支援結合装置では必要に応じてデータやガイダンスの表示、データの蓄積等を行う。

## 4. 高信頼度化・縮小化技術

### 4.1 最適機器寸法の選定とミニフラックス方式の適用

一般的に機器の寸法は絶縁設計と熱設計とによって決定されるが、絶縁設計の合理化を図る場合は従来に比べて運転電

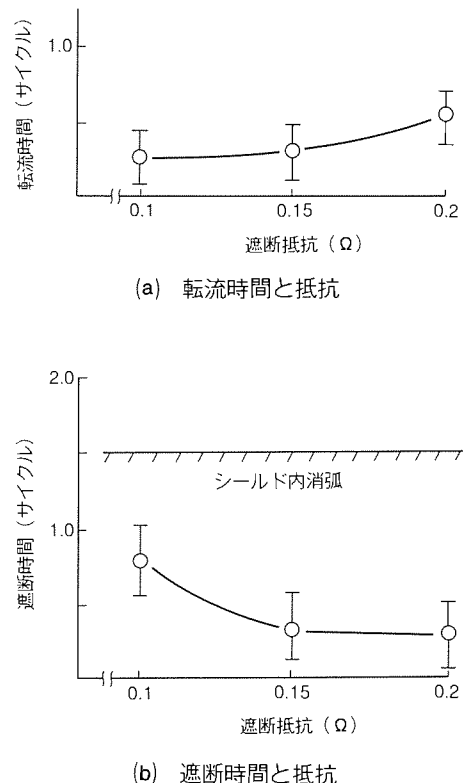


図5 転流時間/遮断時間と抵抗との関係

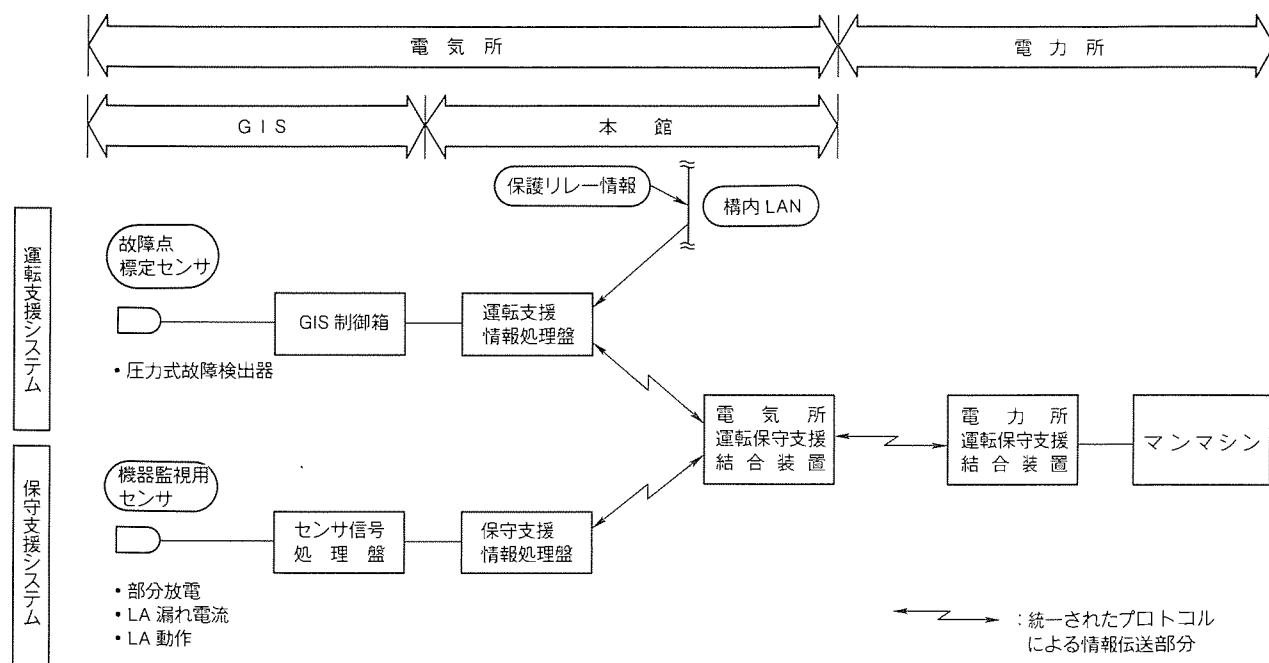


図6. 運転保守支援システム構成

圧/LIWLの比が大きくなるためAC印加時における絶縁性能に配慮する必要がある。図7に三相一括形主母線における最適機器寸法の選定例を示す。絶縁設計では、LIWL 1,550 kV に対する耐電圧性能のほかに、金属異物の挙動に影響を及ぼす容器底面電界を考慮し、この値を1 kV/mm 以下に設定している。熱設計では、定格電流8,000 A に対する導体及び容器の温度上昇規格値を満たすことを条件としている。このため、導体表面に黒化処理を施し、ふく（幅）射放熱特性を向上させるとともに、容器材質には大電流通電時にジュール損の少ないアルミニウムを採用し、導体温度及び容器温度上昇を低減することで機器寸法の縮小化を図っている。以上の絶縁設計及び熱設計に対する条件は、図7に示す4種類の特性曲線によって表され、これらによって機器の最適寸法が選定される。相分離形母線に対しても同様な手法を適用し、いずれの母線に対しても絶縁性能・熱的性能の高信頼度化を図りつつ、機器寸法を従来比で約80~90%に縮小した。

以上のような機器寸法の最適化を行った上で、相間寸法の極小化を図り、ミニフラックス方式を適用している。この方式により、外部漏えい磁束が低減されるため、多点接地系における接地線電流の低減、低圧制御系への誘導障害の抑制、及び架台等の構造物における局所過熱の抑制が可能となり、開閉所全体の信頼性が向上できる。

#### 4.2 絶縁性能の高信頼度化

近年、解析技術の向上により、準平等電界下における絶縁設計技術はほぼ成熟の域に達している。しかしながら、高信頼性を維持した縮小化を実現するには、SF<sub>6</sub>ガス中における固体絶縁物と電極との三重接触部（トリプルジャンクション）近傍での局所的電界集中、及び容器内に混入した金属異

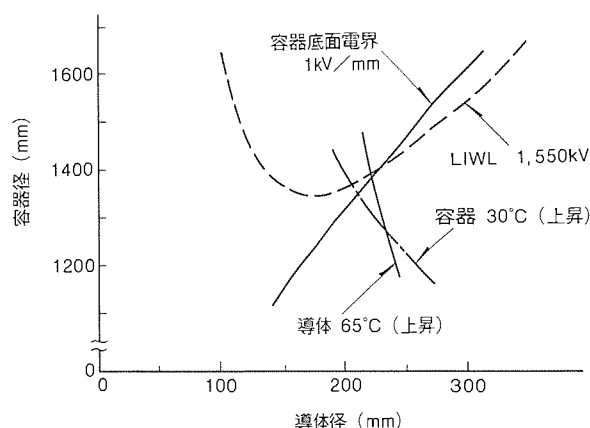


図7. 三相一括形主母線の最適設計例

物による絶縁性能の低下に対して十分な配慮が必要である。ここでは、絶縁性能のかなめとなる三相一括形絶縁スペーサの設計に対する配慮事項及び金属異物対策について述べる。

一般に絶縁スペーサは圧力隔壁として使用されるため、機器の大型化に伴い厚肉樹脂のものが必要となる。このため、接地側の樹脂フランジ部に形成されるトリプルジャンクション近傍で局所的電界集中が顕在化する。この対策として、樹脂フランジ内にシールド電極を埋め込む埋込みシールド電極方式、及び樹脂フランジ両面にシールド電極を配置する外部シールド電極方式があるが、樹脂内における埋込み金具の極少化による注型時の残留応力の低減、及び外力付加時の発生応力の低減を図るため、外部シールド電極方式を採用している<sup>(2)</sup>。この方式を採用するに際しては、モデルスペーサを用いた基礎実験からトリプルジャンクション近傍での局所的電界集中現象を定式化し<sup>(3)</sup>、外部シールド電極の最適設計



手法を確立した。

図8はモデルスペーサにおける外部シールド電極の効果を示しており、 $g$  はスペーサフランジ部の段差寸法、 $h$  は外部シールド電極の突出高さである。図中の曲線は電極間におけるガス空間せん（閃）絡電圧の最大値がスペーサ沿面閃絡電圧の最小値と等しくなる場合の  $g$  と  $h$  との関係を表す。すなわち、図中の曲線から上の範囲（領域1）で  $g$  と  $h$  を選択すれば、接地側トリプルジャンクション近傍からの沿面閃絡は防止でき、閃絡はすべて特性の安定したガス空間で起こる。また、突出高さ  $h$  を適切に大きくすれば段差  $g$  を小さくすることができるため、大型の三相スペーサを適用する際にはスペーサフランジ部の薄肉化が可能となる。

金属異物対策としては、前述のように容器底面電界の極小化を図るとともに、容器底面に誘電体コーティングを施して異物の浮上を抑制している。基礎実験結果によれば、長さ6 mm、直径0.4 mm のアルミニウム線の容器底面における浮上電界は約4 kV/mm であり<sup>(4)</sup>、設計基準の1 kV/mm に対しては十分な裕度を確保している。さらに、絶縁スペーサの近傍に低電界部を形成し、万一異物が浮上してもこの部分で補そくすることで絶縁スペーサへの付着を防止している。

### 4.3 複 合 化

GIS は種々の機器要素から構成されているため、機能の複合化による構成部品点数の削減が高信頼性を維持した縮小化と経済性の向上を可能にする。主な実施例として次の3項目が挙げられる。

- (1) 母線切換用断路器と主母線とを一体化し、従来、断路器と主母線との間に介在した水平配置の絶縁スペーサを省略している。このため、可動部から発生する金属異物が絶縁スペーサに付着することがなく、絶縁性能の低下が抑制できるほか、機器の低層化が実現でき一体輸送が可能となっている。
- (2) 計器用変流器収納容器とベローズ容器とを一体化し、容器数を低減することで、機器の合理的配置を実現している。
- (3) 駆動系に関しては、断路器及び接地開閉器を三極単投方式とすることによって部品点数が削減できる上、相間寸法の極小化が図れるため、上述のミニフラックス方式の適用も容易となっている。

## 5. 機器の性能検証

### 5.1 信頼性検証試験の概要

性能検証は機器単体及びGIS 組合せ形態で、規格に準拠した形式・参考試験、及び精密・受入試験のほか、設計の基本である高信頼度化・縮小化技術の妥当性、及び実使用条件下での実用性能を確認するため特殊試験に類する種々の検証試験も実施している。主な検証内容は、絶縁設計の合理化による最適機器寸法の妥当性と絶縁性能上の裕度、及び大容量通電性能の妥当性である。また、実使用状態での信頼性検証のため1ユニット形態で1年間の長期課電・通電試験を実施

し、この間、一定期間放置後における開閉特性変化の有無を確認する希頻度開閉試験、及び振動加速度や騒音を測定し、自機器及び他機器へ及ぼす影響を確認する操作振動・騒音測定を実施している。さらに、実際の系統運用状態を考慮し、電圧印加状態で機器の開閉を行う課電開閉試験も実施して、発生異物が絶縁性能に与える影響を確認するとともに、低圧制御回路の発生サージも測定している。以下に主要な検証試験内容を述べる。

### 5.2 絶縁性能検証

機器内部に著しい局所的電界集中部が存在しないことを確認するためには、定格及び最低保証ガス圧力で性能を検証することが望ましい。これは機器に局所的電界集中が生じていると、低ガス圧力領域ではコロナ放電による電界緩和作用のため、この部分の破壊電圧は上昇し機器の弱点とはならないが、緩和作用が消滅する高ガス圧力領域では逆に破壊値が低下し、機器の絶縁性能に大きな影響を及ぼす場合があるためである。したがって、三相一括形絶縁スペーサ単品や三相一括形主母線に対しては、超超高压試験設備(UHVL)でガス圧力を低減することなく絶縁破壊特性を検証しており、LIWL、SIWL(開閉インパルス耐電圧レベル)、及びACWL(商用周波耐電圧レベル)に対して十分な裕度があることを確認している。

また、金属異物混入時の絶縁性能を確認するため、GIS 内部にあらかじめ異物を混入させた状態で断路器サージを発生させ、機器の性能を検証している。図9にその試験回路を示している。供試器は三相一括形主母線に母線切換用断路器を組み合わせ、さらにB相断路器の負荷側には長さ数mの相分離形母線が接続されている。金属異物は長さ5 mm 及び10 mm、直径0.2 mm 及び0.4 mm のアルミニウム線を5本とし、相分離母線内に混入させている。断路器サージはB相にAC電圧を印加した状態で断路器を開閉させることによって発生させ、その波形は図9中のa、b部に設置された測

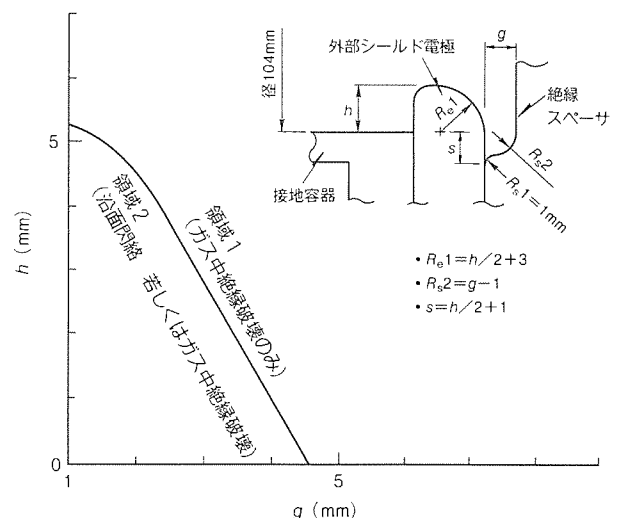


図8．外部シールド電極の効果

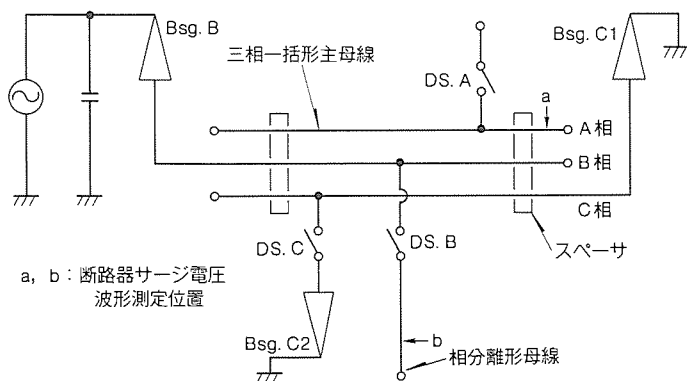


図9. 断路器サージ試験回路

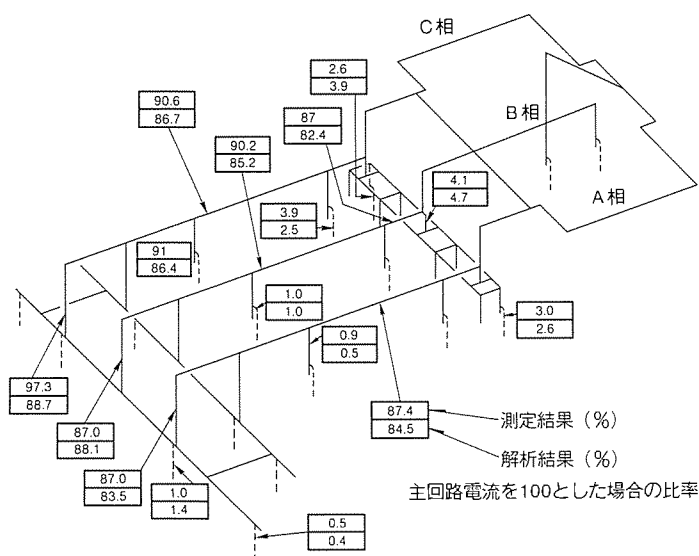


図10. 誘導電流測定結果及び解析結果

定系で計測される。ガス圧力は定格値近傍の0.5MPaで、印加電圧は1.0E及び1.3Eの2ケースとし、断路器の開閉は各ケース100回実施している。発生した断路器サージの最大値は1.0E課電時で1.35pu（発生確率4%）、1.3Eでは1.9pu（1.0E基準、発生確率2%）である。この結果、長さ10mmの金属異物に対しても機器の閃絡はなく、GIS内部に混入、残存する懸念のある金属異物長は最大でも5mm程度を考慮すればよいことから、実用上十分な絶縁性能をもつものと考えられる。

### 5.3 大容量通電性能検証

大容量通電性能検証では1ユニット形態のGIS（線路ユニット）を用い、温度上昇試験でGIS各部の温度上昇値が規格値以下であることを確認しているほか、ミニフラックス方式

の効果を検証するため誘導電流測定も実施している。以下、多点接地系の大容量GISで重要な検証試験である後者について説明する。

供試器は製品の据付け状況と等価になるように配筋・接地メッシュを埋設したコンクリート基礎上に設置され、試験用変圧器を用いて主母線側から三相電流を供給している。接地メッシュは断面積100mm<sup>2</sup>として、GIS下部のコンクリート中に1.5mないしは3.0m間隔で布設されており、これから断面積200mm<sup>2</sup>の接地線を機器へ立ち上げている。通電電流は8,000A、60Hzの三相交流で、通電経路は主母線～母線断路器～遮断器～ブッシングである。図10に主要機器及び接地線への誘導電流測定結果とその解析値を示す。測定結果からGIS容器には主回路電流の87～97%のシース電流が流れており、接地系に誘導される電流は埋設接地メッシュ、立ち上げ接地線共に4%以下と低減されていることから、ミニフラックス方式が効果的に実現されていることが分かる。

## 6. む す び

以上、豊根開閉所納め高信頼度形550kV GISには、各種高性能機器の採用、絶縁性能の高信頼度化、ミニフラックス方式採用の大容量通電技術、電気所支援システムの導入、現地開放組立ての極限化等最新の高信頼度化技術及び徹底した品質管理が結集されている。これらの成果は、今後の電気所建設にも大きく貢献するものと期待される。

終わりに、豊根開閉所建設に際して御指導、御尽力を賜った関係者各位に深く感謝の意を表する次第である

## 参 考 文 献

- (1) 伊吹恒二, 細見 守, 吉積敏昭, 杉山 勉, 石垣一三, 善野剛次: 新形300kV一点切タンク形ガス遮断器, 平成2年電気学会全国大会, 1306 (1990)
- (2) 羽馬洋之, 山本 宏, 尾崎幸夫, 高塚桂三: 550kV GIS用三相一括形絶縁スペーサの開発, 平成2年電気学会全国大会, 1278 (1990)
- (3) 羽馬洋之, 岡本隆司, 笹森健次, 山本 宏: トリプルジャンクション近傍の電界集中によるスペーサ沿面閃絡特性, 平成元年電気関係学会関西支部連合大会, G163 (1989)
- (4) 青木 浩, 広兼昇一, 笹森健次, 山本 宏: GIS内混入異物の浮上抑制に関する一考察, 昭和63年電気関係学会関西支部連合大会, G169 (1988)

# 新形550 kV, 300kV ガス遮断器シリーズ における小型化・高信頼度化技術

米沢 毅\* 杉山 勉\* 平野良樹\* 吉積敏昭\*\* 瀬戸山達夫\*

## 1. ま え が き

当社では1981年に300 kV 一点切りガス遮断器(以下“GCB”という。), 翌1982年に550 kV 二点切りGCBの製品化<sup>(1)</sup>を行って以来, GCBの更なる小型化・高信頼度化, 保守の簡素化を目的として技術開発を進め, GCBの新形化を図ってきた。

300 kV 一点切り, 550 kV 二点切り GCB を製品化して以来, 今日までの約10年の間に技術開発の成果は, 小型化・高信頼度化された新形72/84/120 kV, 31.5 kA クラスの単販用及びGIS用GCB(1984年), 新形168/204 kV, 40 kA クラスの単販用及びGIS用GCB(1988年), 300 kV 三相一括形GIS用GCB<sup>(2)</sup>, 及び輸出向けの420 kV, 50 kA 一点切り単販用及びGIS用GCB(1987年)の製品化<sup>(3)</sup>等に反映されてきた。

さらに, 上記GCBの製品化の過程で蓄積された設計技術, 製造技術, 試験・評価技術を背景に, これらの技術を向上させ適用することにより, 550 kV 二点切りGCB, 300 kV 一点切りGCB(図1)の小型化・高信頼度化を行った。

本報では, これら新形GCBの製品化に当たって適用した各種技術のうち, 設計技術, 試験・評価技術を紹介する。

## 2. 新形550 kV, 300 kV ガス遮断器シリーズ

新形550 kV, 300 kV GCBの主要定格事項を表1に, 新形550 kV GCBの構造を図2に示す。新形GCBには, 各種

の解析技術, 試験・評価技術と新材料ノズルや新形セラミックコンデンサにより小型化・高性能化を図った新形Dシリーズ消弧室を適用している。新形300 kV GCBはDシリーズ消弧室を1ユニット, 新形550 kV GCBはDシリーズ消弧室2ユニット及び抵抗接点を備えた構造である。いずれのGCBも定格電流8,000 A, 定格遮断電流63 kA までを製品シリーズとして備えている。

操作装置には, 既に72~300 kV クラスのGCBに適用し, 多数の運転実績をもつ新形油圧操作装置(OM形)シリーズを適用し, 高い動作信頼性を実現した。また, OMシリーズの特徴である配置構成の自由度の高さを生かした効率的配置によって, 油圧操作ハウジングの小型化を図るとともに, 接点のグリス塗布作業が不要になった新形カム式補助スイッチの採用などによって保守の簡素化を実現した。

## 3. 遮断部の小型化・高信頼度化

### 3.1 遮断性能

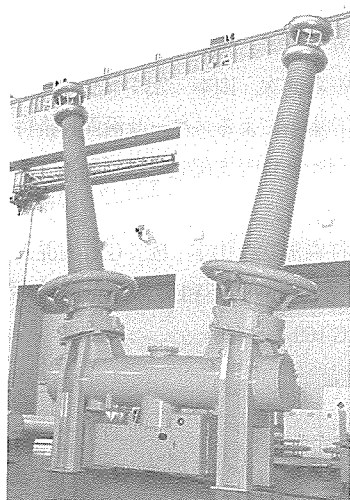
新形Dシリーズ消弧室は, 各種新技術と新材料の適用によって高性能化が図られており, 消弧室の基本的な諸元はすべて短絡遮断電流63 kA を考慮したものである。新形300 kV 一点切り遮断器による63 kA 遮断試験オシログラムの一例を図3に示す。この章では新形消弧室の高性能化に当たって適用した新技術と新材料について述べる。

#### 3.1.1 新形Dシリーズ消弧室

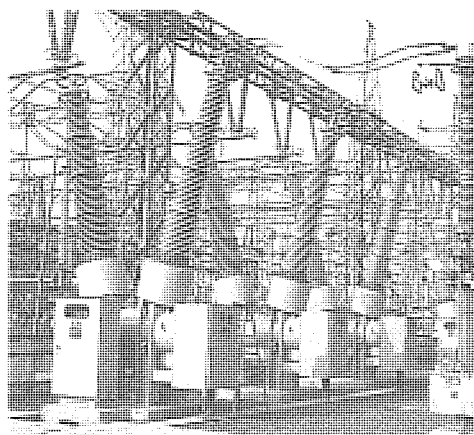
##### (1) パッファシリンドラ断面積の最適化<sup>(4)</sup>

短絡遮断時にパッファ室内の圧力が高まると, アークに対する強いガスの吹付けが行われ, 熱的遮断性能が向上すると同時に, ノズル内部の高温ガスが速やかに排出されるため絶縁回復特性が向上する。図4は新形消弧室の設計に当たってパッファ室内の圧力・温度, 遮断速度とパッファシリンドラ断面積の関係を一次元流れアークモデルを用いた計算機解析によって求めたものである。遮断電流は63 kA, 50 kA とした。

パッファシリンドラ断面積の減少につれて, 遮断速度が単調に増加するにもかかわらず, パッファ室



(a) 工場試験中の新形550kV GCB



(b) 新形300kV GCB

図1. 新形550kV, 新形300kV ガス遮断器

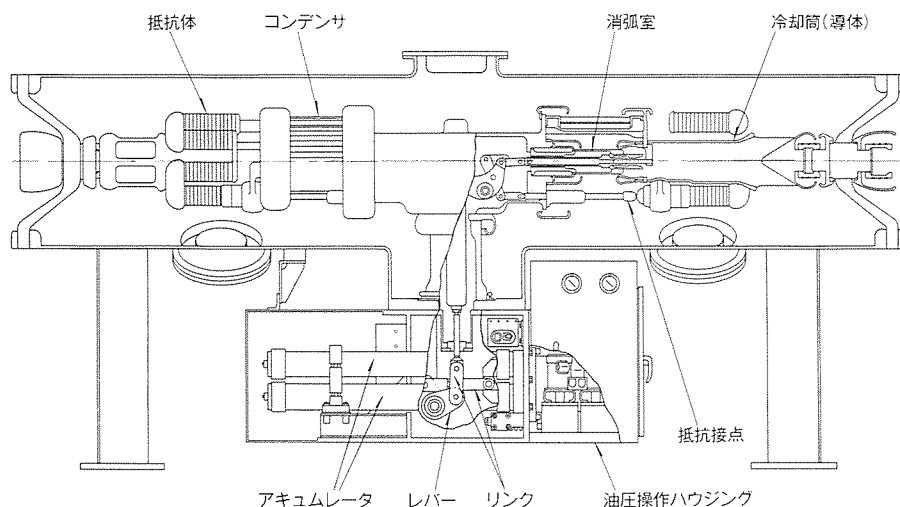
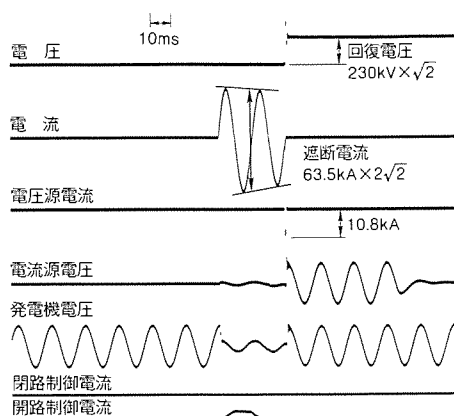
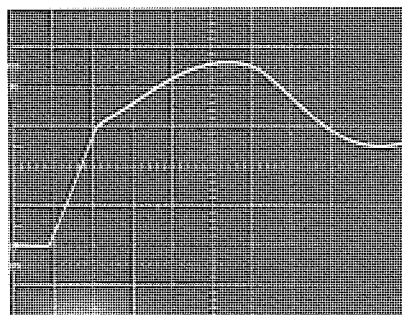


図2. 新形550kV 二点切り GCB の構造



(a) 低速オシログラム



(b) 電流遮断点付近の高速オシログラム

図3. 短絡遮断試験オシログラムの一例  
(遮断電流63kA, アーク時間1サイクル)

表1. 新形550kV GCB, 新形300kV GCBの主要定格事項

定格電圧	550kV	300kV
定格電流	2,000 A, 4,000 A, 6,000/8,000 A	2,000 A, 4,000 A, 6,000 A, 8,000 A
定格遮断電流	50kA, 63kA	50kA, 63kA *

注\* 50kA 定格器と過渡回復電圧制御用コンデンサ容量のみ異なる。

内圧力は極大値を示す。このとき遮断直後の極間の絶縁耐力に影響を及ぼすパuffa室内ガス温度の変化は小さい。遮断電流の大きさによって、パuffa室内圧力の極大値を与えるパuffaシリンダ断面積は幾分異なるが、新形Dシリーズ消弧室では各遮断電流にほぼ適した図中の▲印の値とした。

## (2) ガス流路形状の改善と遮断速度の向上

パuffa室から絶縁ノズルに至る流路を超音速流を生じさせるのに適した形状に改善して、アークに吹き付けるガス流速を高め熱的遮断性能の向上を図った。さらにパuffa室を軽量化して、従来と同一の操作力で遮断速度を約20%高め、極間の絶縁回復特性を向上させた。また、遮断速度の向上に

対応して遮断ストロークを20%増大し、遮断時のアーク時間幅を確保した。また、SF<sub>6</sub>ガスの熱力学的非線形性を考慮した圧縮性粘性流体解析プログラム(SOLA-SF<sub>6</sub>)<sup>(5)</sup>を用いた熱ガス流解析結果に基づいて、ノズル長を長くし、熱ガス流の直進性を高めて遮断時の極間の絶縁回復特性を向上させた。さらに、極間の絶縁支持物を棒状から筒状にすることでタンク軸直角方向への熱ガスの流出を防止し、消弧室の径方向寸法を縮小して遮断器タンクの小径化を実現した。

新形消弧室の熱的遮断性能の評価に当たっては、電流零点近傍のアークの動特性をより詳細に検討するために、大電流遮断時のアークと遮断器が置かれる電力系統との相互作用によって定まる電流零点近傍の電圧・電流の変化を測定し、デジタル信号に変換して記録した。測定で得られた電圧・電流の波形を数学的アークモデルを用いて計算機処理し、遮断性能評価の参考とした<sup>(6)</sup>。

## 3.1.2 新材料の適用

### (1) 新材料ノズル<sup>(7)</sup>

パuffa形GCBの消弧室の絶縁ノズル(以下“ノズル”という。)の内面は高温のアークにさら(曝)されるため、大電流遮断を多数回繰り返すと徐々に消耗し、また汚損していく。ノズル内面の形状や寸法は、大電流遮断時の熱的遮断性能に、また汚損は絶縁性能に影響を与えることが知られている。この問題に対して、当社では、PTFE(ポリテトラフルーオロエチレン)に微量の無機質充てん材を加えた新しい材料のノズルを既に開発し、420kV一点切りGCBなどへの適用を通じて実用化を行い、この問題を解決した。PTFEに混入する充てん材の量と短絡遮断によるノズルの損傷の関係を調査するために、計算機を用いた解析と実遮断器による短絡遮断を行った結果を図5に示す。従来のPTFE製ノズルはアークに接するスロート部内面のみならず深部まで熱影響を受けるが、充てん材の混入量の増加に伴って熱影響領域の深さは減少する。一方、内径の消耗量は混入量の増加に伴って増大する。新形GCB用のノズル材料は、遮断責務と上述の特性を考慮し充てん材の混入量の適正化を図ったものである。

## (2) 新形セラミックコンデンサ<sup>(8)</sup>

当社のGCBには近距離線路故障遮断時の高周波過渡回復電圧の抑制や多点切り遮断器の遮断点間の電圧分担の改善を目的として、電力機器用セラミックコンデンサ素子を多数個直並列に接続して用いている。GCBの消弧室は、CAEの活用による設計の合理化と試験・検証法や評価技術の進歩によって小型化が進み、しかも一遮断点当たりの電圧は次第に高くなっており、これに応じてセラミックコンデンサ1素子当たりに要求される耐電圧値も更により高くなりつつある<sup>(3)</sup>。

従来のセラミックコンデンサは、限界試験を実施した場合、素子の両端に構成した電極周縁部から進展したと考えられる破壊形態が多く見られ、この電極周縁部の電界強度が、素子の耐電圧性能を大きく支配するものと考えられる。今回適用したセラミックコンデンサは、セラミック素子両端の電極周縁部の電界緩和を図り(図5(b))、従来品に比べて絶縁耐力をAC電圧で1.5倍、雷インパルス電圧で1.7倍に向上させた

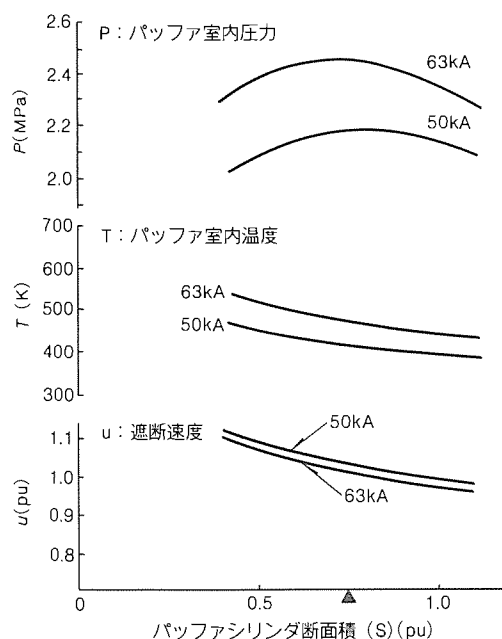
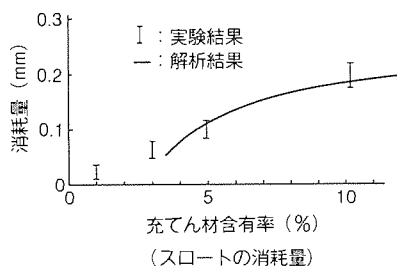
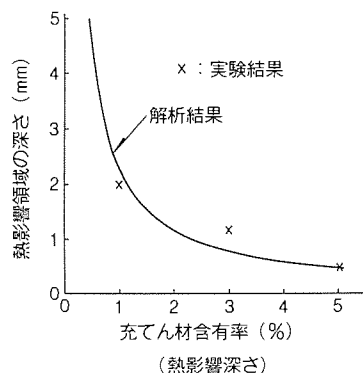
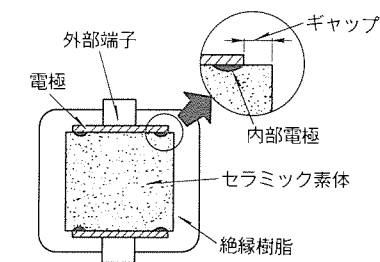


図4. パッファシリンダ断面の消弧室の特性に与える影響(電流遮断点)



(a) 新ノズル材料の特性



(b) 新形セラミックコンデンサの構造

図5. 新材料の適用

たものである。これにより、絶縁裕度を向上させ、同時に極間の固定・可動電極表面の電界強度を低減した。

## 3.2 絶縁性能

### 3.2.1 短絡遮断直後の絶縁性能<sup>(9)(10)</sup>

大電流遮断時には、アークによって高温化されたガスが存在するため、GCBの極間及び対地間の過渡的な絶縁性能は静的な状態に比べて低下する。通常の短絡遮断では、対地間や極間の電圧責務は過渡回復電圧期間に最過酷となる。しかし、遮断直後の多重雷撃を想定すれば、対地間や極間の電圧責務が最も過酷となる時期を遮断時の過渡回復電圧期間のみに限定することはできない。このため550kV二点切りや300kV一点切りGCBのように一遮断点当たりの電圧の高いGCBについては、大電流遮断時の熱ガスの挙動を解析し、このような多重雷撃に対する過渡的な絶縁信頼性を高めることが必要となる。これに対し、当社では計算機を用いた熱ガス流シミュレーションと実機を用いた微小ギャップによる測定によって熱ガスの振舞を解析し<sup>(11)</sup>、これに基づきGCB消弧室のガス流路形状や電極形状の適正化を図り、大電流遮断時の過渡的な絶縁信頼性を高めている。

熱ガスシミュレーションの実施例を図6(a)に、熱ガス流を実測するための微小ギャップの取付状況を同図(b)に示す。

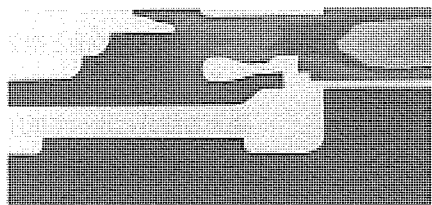
多重雷撃に対する大電流遮断時の過渡的な絶縁性能は、短絡遮断後数msから数十msの間にLIWV相当の振動性インパルス電圧(図(b))を印加して評価した<sup>(12)</sup>。試験の実施例を図7に示す。なお、この試験手法は168~550kVの新形GCBに適用され信頼性の高い絶縁設計に寄与している。

### 3.2.2 高速再閉路時の絶縁協調<sup>(13)</sup>

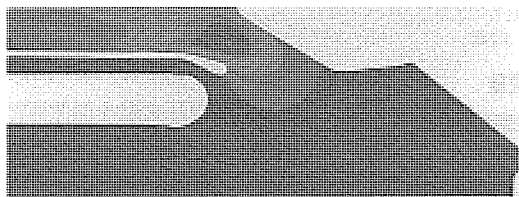
投入抵抗付きの二点切り遮断器では、高速再閉路過程の各遮断点でギャップ間げきのばらつきや放電のばらつきなどのために、せん(閃)絡するタイミングにずれを生じ、各遮断点に異なった電圧が加わる。図8は投入抵抗付き二点切り遮断器による無負荷送電線的高速再閉路時の現象を説明するものである。

無負荷送電線的高速再閉路を行う場合、遮断器極間には $2\sqrt{2}E$ ( $E$ :定格電圧)の電圧が加わる。再閉路過程で線路に $+\sqrt{2}E$ の電圧が残留した状態で、抵抗接点 $SR_1$ が並列イン

ピーダンスと各部の浮遊容量で決まる分担電圧  $V_1 (\approx \sqrt{2}E)$  で先に閃絡すると ( $t=t_1$ )、 $SR_1$ の閃絡前に零であった遮断器中極Nの電位は線路から残留電荷を供給され雷インパル

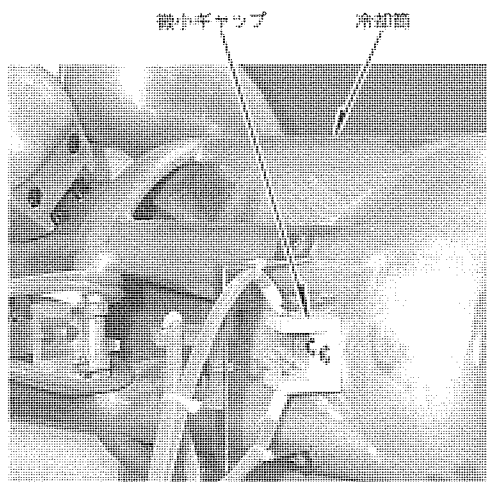


消弧室のガス温度分布(遮断後5ms)



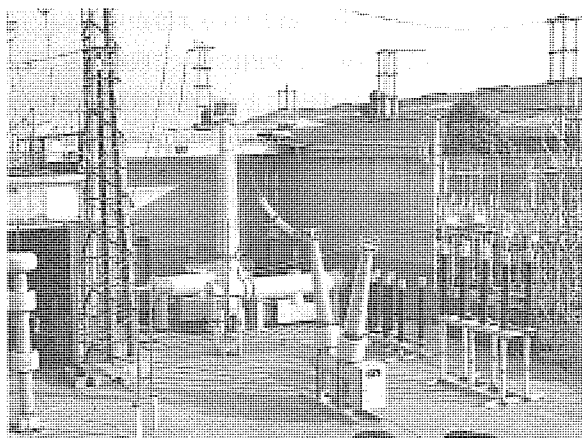
冷却筒のガス温度分布(遮断後35ms)

(a) 熱ガス流解析結果の一例



(b) 微小ギャップの取付状況

図6. 新形550kV GCB への熱ガス流解析技術の適用  
(遮断電流63kA, アーク時間1サイクル)



(a) 新形550kV GCB の試験実施状況

ス電圧相当のしゅん(峻)度で立ち上がる。もう一つの抵抗接点  $SR_2$  は電圧  $V_2$  ( $t=t_2$ ) で閃絡を生じ、このとき抵抗  $R_2$  には急峻な電圧  $V_2$  が加わる。ガス中での閃絡電圧のばらつきを考慮すると、 $V_2$  は最大で  $V_1$  の約1.5倍まで高まることが想定される。投入抵抗付き二点切り遮断器では、このような高い電圧に対する主接点間や、抵抗接点と主回路導体間の絶縁協調に関する検証が重要である。

二遮断点を供試し、通常は無負荷送電線路の投入試験によって上述の電圧に対する検証を行おうとすると、確率現象を考慮した多数回の試験の実施が必要となり実際上困難となる。そこで、このような検証を合理的に行うことができる、図9に示した試験回路を考案し、新形550kV GCBの投入時の絶縁協調の検証に適用して極間絶縁の信頼性向上を図った。

この回路では二点切り遮断器の一遮断点を供試し、先行して放電する遮断点は補助遮断器  $B_{a1}$  で、また二遮断点のギャップ間けき及び放電のばらつきは  $B_{a1}$  の投入時期を先行させることで模擬している。

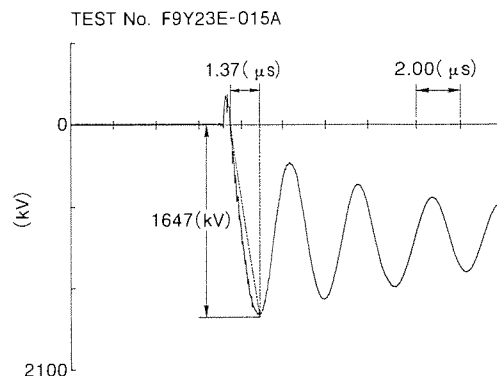
### 3.3 通電性能<sup>(4)</sup>

相分離形 GIS を小型化するには、GCB タンク外径や相間間隔を縮減する必要がある。相間間隔を縮減すると通電時に他相の作る磁界の影響が強まり、タンクに誘起される電流が増加してタンクの温度上昇値が大きくなる。また、タンク外径を小さくするとタンク内部の導体やタンク自体の冷却効果が低下するためにタンクや導体の温度上昇値が大きくなり通電性能は低下する。

新形 GCB の開発に当たっては、タンク外径及び GIS 適用時の相間間隔を最小化するために、GIS 形態でのタンクシースに流れる循環電流を解析によって求め、タンク材質や相間短絡導体の配置、形状の適正化を図った。

図10は新形550kV LIWL 低減形 GIS 用 GCB のタンクシースに流れる電流とタンク近傍の磁束密度の解析結果と実測結果を示したものである。

相間短絡導体を設けない場合、タンクシースの相間側に多くの電流が流れ、他相が作る磁界の影響を強く受けていることが分かる。タンク相間に短絡導体を設けタンクシースに循



(b) 印加電圧波形

図7. 遮断直後の絶縁性能検証試験

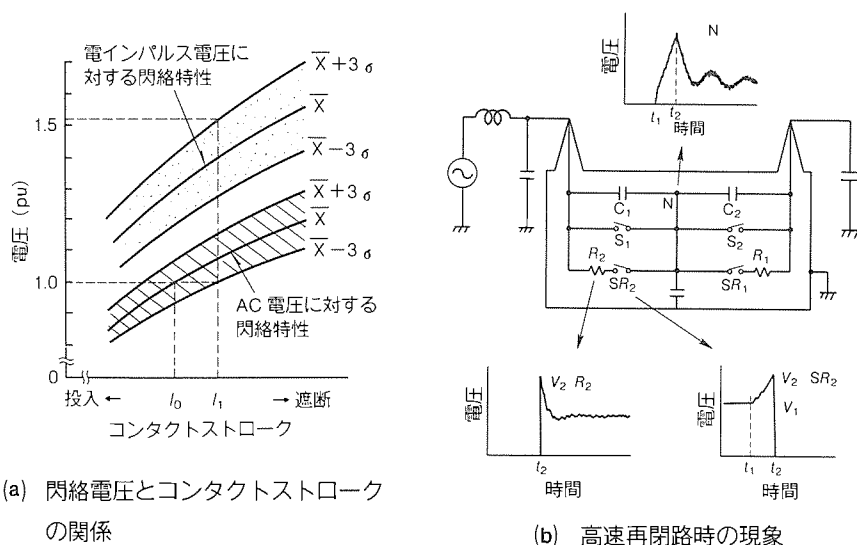


図 8．投入抵抗付き二点切り遮断器による無負荷送電線路の高速再開路時の現象

達時間に遅れを生じ、動作の遅れや遮断器三相間の動作不ぞろいを生じるという問題をもっていた。このため、高圧と低圧に変動する回路中への空気の混入を避けるために、回路中の油と空気が置換されないように油圧回路の大気へ連通する部分に比べて低圧油面の高さを高く保つ必要があり、操作装置の配置構成上の大きな制約となっていた。

新形 GCB に適用した新形油圧操作装置 (OM 形) は、回路内の油圧の高低圧変動を開閉極動作の瞬時のみに限定する新しい概念に

基づく回路方式 (常時高圧安定回路方式) を採用している。この方式では、開極の完了後に回路各部が常に高圧に保たれ、油中に溶解した空気が気泡となることがないため、回路中の気泡による動作の遅れや三相不ぞろいなどを生じることがなく、動作信頼性が大幅に向上した。

この新回路の開発に当たっては、油圧回路内の油の流れと弁の運動を同時に取り扱える油圧シミュレーション手法を開発<sup>(15)</sup>し、油圧回路内の過渡的な現象の理解や、管路や弁サイズの最適設計<sup>(16)</sup>を行う手段として用いた。

#### 4.2 高度集積化とユニット化

新形油圧操作装置は空間を有効に利用することによってハウジング全体としての小型化を達成するために操作装置を駆動 (アクチュエータ)、昇圧 (ポンプ)、蓄圧 (アキュムレータ) の主要なユニットに分割して分散配置することを基本的な設計の思想としている (図 11)。各々のユニットは単独で機能及び形態を完結させ、ブラックボックス化を図っているため、ハウジング内での配置構成が容易である。また、各ユニットを構成する部品は機能要素を複合化することによって、高度に集積化を図り小型化・軽量化を実現した。これによって油圧シリンダや排油弁、操作ブロック等からなる高圧駆動部は、小型化された低圧タンク内にすべて収納することが可能となった。この構造の採用によって低圧管路の機能が低圧タンクで置き換えられ、かつ一つのタンクに集中されることになるため、これまで必要であった低圧管路を接続する機能が不要となり、機能ユニットの複合化による小型化がさらに進んだ。

新形油圧操作装置は、表 2 に示すように従来形に比べ質量、容積とも大幅に低減された。

#### 4.3 油圧操作ハウジングの小型化

油圧操作ハウジングは操作駆動部や制御部品を収納する箱としての機能に加え、大きな操作力を発生する操作装置を保持し、その操作力を遮断器内の消弧室可動部に効率良く伝達

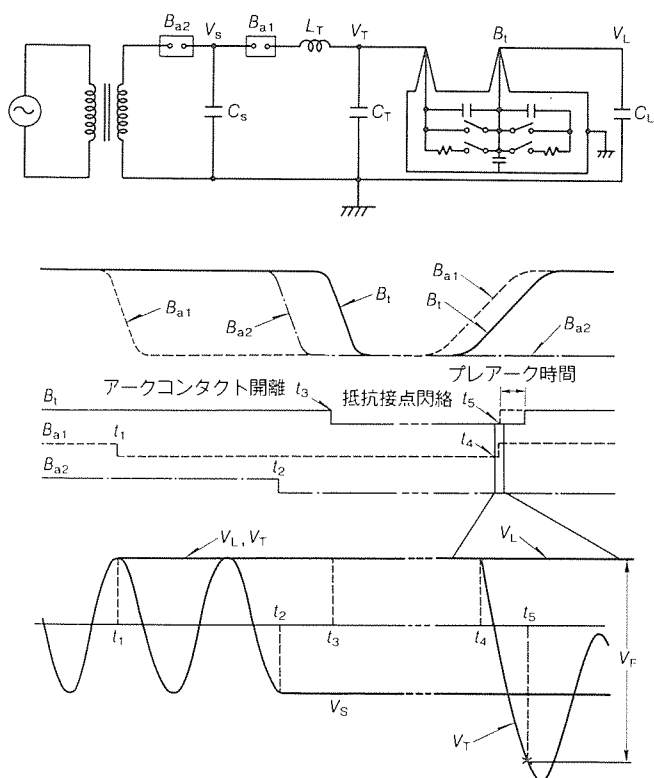


図 9．無負荷送電線路の高速再開路模擬試験回路とそのシーケンス

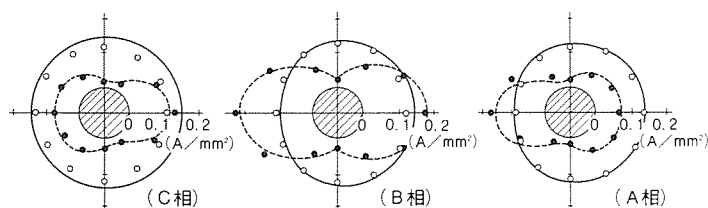
環電流を流すことによって、タンクシースの局所的な発熱が抑制されるため、相間間隔を縮減しても大電流化が可能であることが分かる。

### 4. 操作系の小型化・高信頼度化<sup>(2)</sup>

#### 4.1 常時高圧安定回路方式

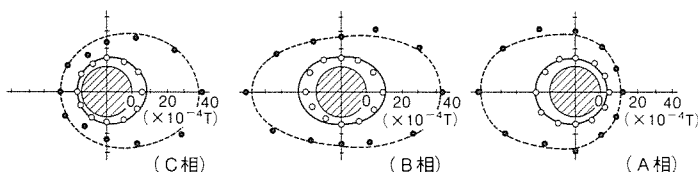
従来の油圧操作装置には、開路及び閉路の各状態で回路中の高圧と低圧状態が切り替わるいわゆる高低圧変動回路方式を用いていた。この回路方式は低圧回路中に空気が混入すると次の高圧切替時に、この空気を圧縮する過程で油圧力の伝





(a) シース電流の分布

短絡導体	実測	計算
有	○	—
無	●	----



(b) 磁束密度分布

図10. 磁界解析による相間間隔の縮減

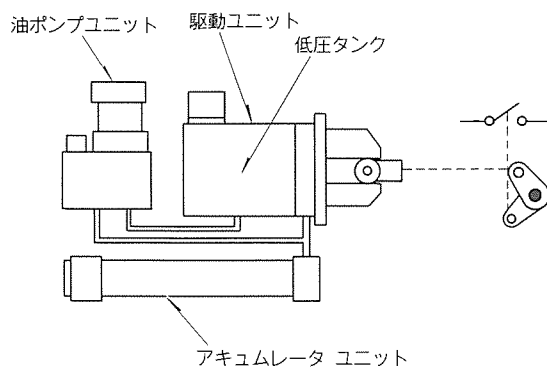
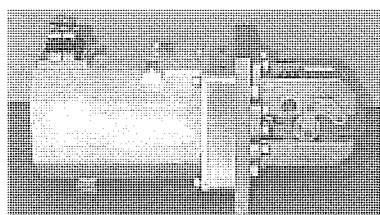


図11. 新形油圧操作装置の構成

表 2. 新形油圧操作装置と従来形の質量, 容積比較

単位: %

	300kV GCB 用		550kV GCB 用	
	新形(OM)	従来形	新形(OM)	従来形
質 量	52	100	74	100
容 積	64	100	65	100

するための強度メンバーとしての機能をもっている。このため油圧操作ハウジングの小型化に当たっては収納部品の効率的配置のみならず、遮断器の開閉操作時の衝撃的な荷重に対する部材の変形や振動等に注意し、設計を進める必要がある。

図12は新形550 kV GCB 用油圧操作ハウジングの外観と、開路操作時の油圧操作ハウジングの変形状況を計算機を用いて解析した結果の一例である。開閉操作時の油圧操作装置ハウジングの変形はハウジング自体の強度上の問題を生じるば

かりでなく、油圧操作装置の出力軸やリンク、レバー等の連結部材の発生応力に余分な振動成分を発生させる。この振動成分の重量によって高い応力を生じると、強度上の問題となることもある。新形GCB 用油圧操作ハウジングの設計に当たっては、上述の計算機解析と実機測定を繰り返し、操作時のひずみを低減しつつ小型化を実現した。

#### 4.4 新形カム式補助スイッチ

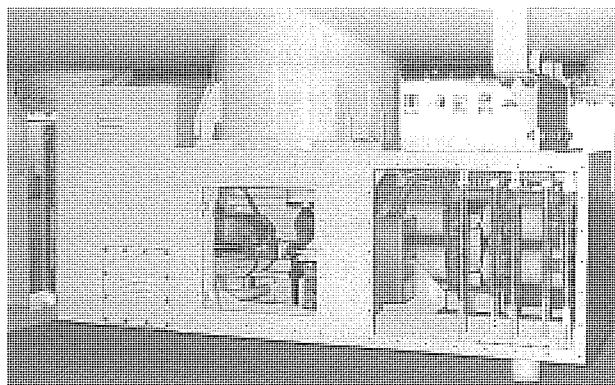
遮断器における補助スイッチは制御系に対し遮断器の入切状態を伝える重要な機能をもっている。従来の回転しゅう(摺)動形の補助スイッチは接点部にグリスを塗布する必要があるため、定期的な保守作業を必要としていた。新形GCB では無保守化を推進するために、突合せ方式の接点(バットコンタクト)を採用しグリス塗布作業を不要とした遮断器用の新形カム式補助スイッチを開発して適用した。新形カム式補助スイッチの外観と構造を図13に示す。一つのカムで開閉を行う a, b 両接点が一つのユニットに組み込まれ、このユニット10個で一つのスイッチを構成している。容積で従来品の約50%に縮小された新形カム式補助スイッチは、油圧操作ハウジングの小型化に寄与している。

#### 5. む す び

新形550 kV, 新形300 kV GCB のシリーズ化に当たって適用した設計技術、評価・検証技術を紹介した。今後これらの技術は更に高度化することによって、GCB の小型化(遮断点数の低減、タンク径の縮小など)、高性能化(遮断容量の増大)、保守・点検作業の簡素化がより一層進むものと思われる。

#### 参 考 文 献

- (1) 伊吹恒二, 懸山 弘, 近藤和正, 田中正治, 尾田真治: 240/300 kV 一点切り及び550 kV 二点切りタンク形ガス遮断器, 三菱電機技報, **56**, No. 9, 601~605 (1982)
- (2) 吉積敏昭, 杉山 勉, 米沢 毅, 細見 守, 伊吹恒二: 新型三相一括ガス遮断器シリーズにおける高信頼度化技術, 三菱電機技報, **62**, No. 8, 699~704 (1988)
- (3) 伊吹恒二, 細見 守, 吉積敏昭, 米沢 毅: 420 kV 50kA 一点切タンク形ガス遮断器の開発, 電気学会全大, No. 1182 (1988)
- (4) 吉積敏昭, 森山貴旨, 細見 守, 瀬戸山達夫, 伊吹恒二: 遮断電流及び操作力を考慮したパフファシリテータ断面積の最適化, 電気学会全大, No. 1445 (1991)
- (5) Yoshizumi, T., Ibuki, K., Hosomi, M., Yonezawa, T., Kawasaki, H.: Hot Gas Flow Analysis in SF<sub>6</sub> Gas Circuit Breaker during the Short Circuit Interruption, IEEE Trans. on Power Delivery, **4**, No. 3, 1757~1764 (1989-7)
- (6) 吉積敏昭, 亀井健次, 森山貴旨, 細見 守, 伊吹恒二:



(a) 油圧操作ハウジング

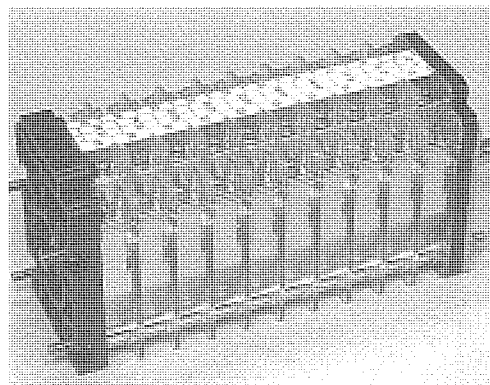
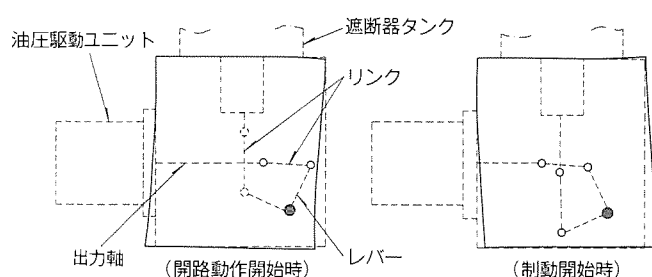


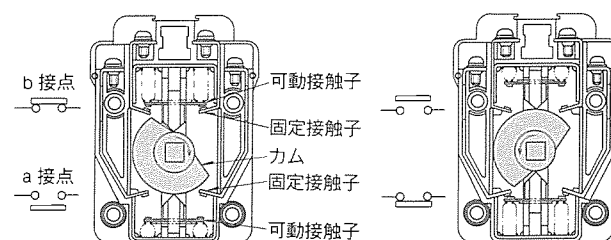
図13. 新形カム式補助スイッチ



(b) 開路操作時の変形モード解析例

図12. 油圧操作ハウジングの小型化

- パフファ形ガス遮断器の遮断アークの動特性解析, 電気学会全大, No. 1344 (1989)
- (7) Ibuki, K., Yonezawa, T., Yoshizumi, T., Kuwahara, H. : Key Technologies for Developing a 420kV 50kA GCB Interrupter Unit, IEEE Trans. on Power Delivery, 4, No. 3, 1738~1744 (1989-7)
- (8) 伊吹恒二, 吉積敏昭, 米沢 毅, 荒川 元, 久保田和幸, 垣尾源明: 高性能新形セラミックコンデンサの開発, 電気学会全大, No. 1227 (1988)
- (9) 吉積敏昭, 伊吹恒二, 細見 守, 米沢 毅: ガス遮断器の大電流遮断時の絶縁性能の解析と評価, 電気学会全大, S.12-3 (1988)
- (10) 伊吹恒二, 吉積敏昭, 細見 守, 中村 等, 亀井健次: 多重襲雷を想定した絶縁性能検証試験, 電気学会全大, No. 1300 (1990)



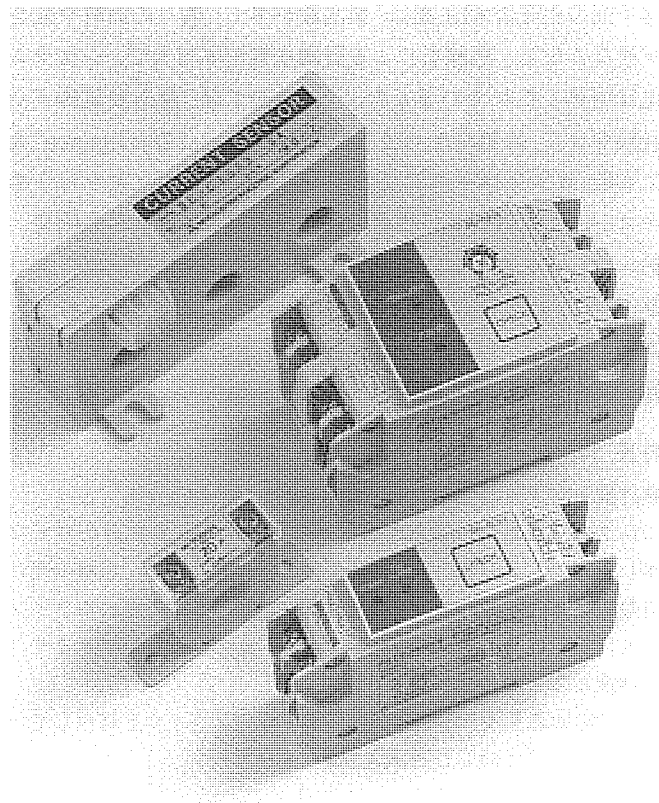
- (11) 吉積敏昭, 森山貴旨, 米沢 毅, 細見 守, 伊吹恒二: 熱ガス流解析技術のGCB 設計への適用—新形550kV GCBの絶縁設計—, 電気学会全大, No. 1319 (1990)
- (12) 亀井健次, 中村 等, 佐久間秀一, 吉積敏昭, 細見 守, 伊吹恒二: 550kV タンク形ガス遮断器の遮断直後の耐雷試験法, 電気学会全大, No. 1311 (1990)
- (13) 米沢 毅, 吉積敏昭, 細見 守, 中村 等, 伊吹恒二: 投入抵抗付2点切遮断器による線路再投入時の現象と極間の絶縁協調の評価方法, 電気学会全大, No. 1452 (1991)
- (14) 米沢 毅, 吉積敏昭, 菊池邦夫, 小倉新三, 細見 守, 伊吹恒二: 新形550kV GIS用GCBの通電性能の検討, 電気学会全大, No. 1301 (1990)
- (15) 山下 透, 杉山 勉, 吉積敏昭, 高橋康英: 遮断器用油圧操作機構の回路及び動作シミュレーション, 電気学会全大, No. 1185 (1988)
- (16) 平野良樹, 山下 透, 杉山 勉, 吉積敏昭, 伊吹恒二: 油圧回路シミュレーションを用いた遮断器開極時間の改善, 電気学会全大, No. 1357 (1989)

# スポットライト プレアラーム リレー “BE-Pシリーズ”

オフィス内でのOA機器の増加，コンセント回路の増設等により負荷電流は当初の予想を越えて増加する傾向にあります。三菱電機ではこのたび，コンセント回路に最適な負荷電流監視ユニット，プレアラームリレーを発売致しました。プレアラームリレーは負荷電流の変動を検知し，ひいては突然の遮断器過負荷トリップ動作によるOA機器のデータ消失を未然に防止することができます。プレアラームリレーでは，専用の変流器を遮断器の負荷側に取り付けることにより，遮断器の負荷電流を監視しますので，過負荷により遮断器がトリップ動作する前に警報を発することができます。また，電流検出方式は実効値検出方式を採用しておりますので，OA・FA機器によって発生する高調波を含んだ歪み波形も確実に検出します。プレアラーム値の設定は，変流器の定格に対して50～100%（又は70，80%）の範囲で設定でき，また，不要な動作を避けるため，この設定値以上の電流が40秒（又は20秒）継続したときに，初めて警報を発するよう構成されています。遮断器のトリップ動作事前警報のほか，変流器の定格とプレアラーム値を組み合わせることにより，より広範囲な負荷電流の監視を行うこともできます。

## 特長

- 実績のある実効検出  
三菱プレアラーム遮断器で実績のある実効検出方式を採用しています。
- 広範囲な電流監視  
プレアラーム値の調整，及び変流器の定格を選定することにより広範囲な電流の監視ができます。
- 出力接点仕様の充実  
出力接点は過電流状態が無くなれば自動的にリセットする自動リセット式と，過電流状態が無くなっても出力を保持する自己保持式があります。
- 分電盤に使いやすいJIS協約寸法モジュール  
外形寸法がJIS協約形ですので，盤構造，取付方法の標準化が図れます。
- IEC35mmレール取付け対応  
IECレールにワンタッチで取付け可能です。



## 仕様

### プレアラームユニット

形 名	BE-P03A	BE-P03B	BE-P01A	BE-P01B
制 御 電 圧	AC100V, AC200V		AC24V	
定 格 消 費 電 力	2VA		1.2VA	
ピ ッ ク ア ッ プ (定格電流に対する%)	50～100%可調整		70, 80%タップ切替 (注1)	
動 作 時 間 (秒)	40		20	
出 力 接 点	自動リセット式 自己保持式		自動リセット式 自己保持式	
	有接点出力 Ic AC250V 3A (cosφ=1)		有接点出力 Ia AC250V 3A (cosφ=1)	
	最小適用負荷 DC5V 10mA			
	チャタリング時間 10ms以下			
表 示	電源表示(赤色LED), 動作表示(黄色LED)			
操 作 ボ タ ン	チェック ボタン	リセット/ チェックボタン	チェック ボタン	リセット/ チェックボタン
用 途	3相回路のPAL検出		単相回路のPAL検出	
検 出 方 式	電子式実効値検出			

### 変流器

形 名	BE-CT1003	BE-CT053	BE-CT501
極 数 (P)	3		1
定 格 (A) (注2)	50, 100	5	15, 20, 30, 50
最大使用電圧 (ACV)	660		250
専 用 リ ー ド 線	1m付き		—
用 途	BE-P03A・B用		BE-P01A・B用

注1 90%，100%タップ切替形も製作できます。詳細はご照会ください。

2 その他の定格電流については，ご照会ください。

# 森永製菓(株)殿

## スポットライト 生産計画立案支援システム

菓子類の生産計画立案は、製品数が多く、個々の原料や配合が異なるなど、熟練者による計画立案が不可欠で、システム化は困難とされていました。三菱電機では、森永製菓株式会社殿向けに、長年培ってきたAI(Artificial Intelligence:人工知能)技術をベースにこの菓子類の生産計画立案を行うエキスパートシステム“生産計画立案支援システム”を開発、納入致しました。このシステムは、毎月の需給計画値に基づき、工場での生産を行うための日程計画を立案するもので、設備や製品等の多種多様な制約条件を考慮しながら計画立案を行います。

### 特長

#### ●計画立案時間の大幅短縮

これまでは複数の熟練者が毎月の計画をおよそ5日間かけて立案していたところが、1日で行えるようになるため、市場の売れ筋などに即応し計画立案が行えます。このほか、仕入れやラインの人員の配置、出荷の体制などの効率アップにもつながります。

#### ●熟練者のノウハウに基づく計画立案

熟練者の知識をモデル化し、計画作成時のノウハウを利用しているため、現場に即した計画立案が行えます。

#### ●豊富な対話編集機能

自動立案後の計画の修正、追加等を結果表示の画面上で対話式で行えます。これにより、現場の事情で制約条件などが矛盾するような場合でも、柔軟な計画が策定できます。

#### ●高速推論

世界最高水準の推論性能(140万回/秒)をもつPSI上で推論するため、実用規模の生産計画でも数十秒で計画立案できます。

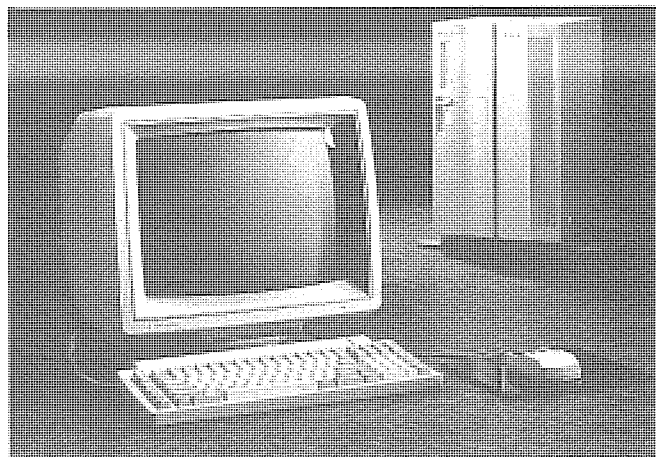
#### ●UNIXとSIMPOSの融合

H/Wとして、MELCOM PSI/UXシリーズを採用しました。マンマシン系は、業界標準の“UNIX”上でOSF/Motifを用いて、推論系は、知識処理向きOS“SIMPOS”上で実現したので、それぞれの長所を十分に活用して、開発/実行を効率良く行えます。

\*UNIXはUNIXシステムラボラトリーズ社が開発し、ライセンスしています。

\*MELCOM PSI/UX、SIMPOSは通産省の推進する第5世代コンピュータプロジェクトの成果を利用して三菱電機㈱が製品化したものです。

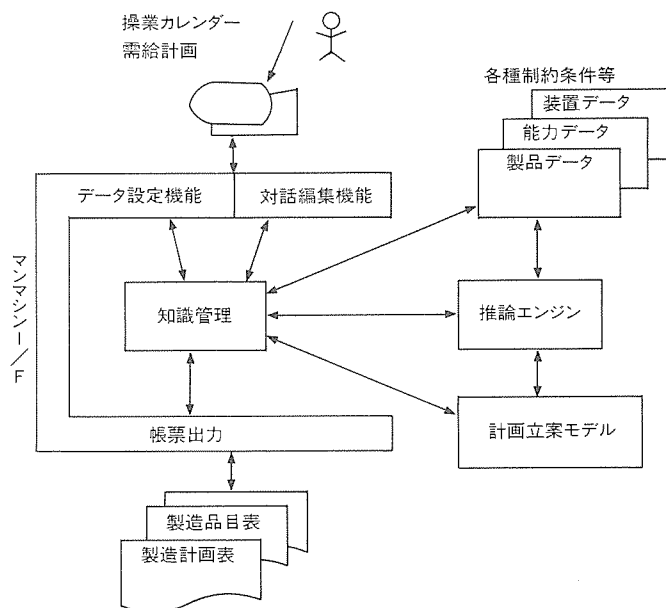
\*OSF/Motifは、オープン・ソフトウェア・ファンデーションの登録商標です。



PSI/UXモデル350

### 機能概要

名称	内 容
データ設定機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 操業カレンダーや需給データ等の月々の計画立案に必要なデータをはじめ、製品データ、設備データ等の種々のデータの設定が行えます。</li> <li>● 設備ごとのカレンダーや新製品の登録等が容易に行えます。</li> </ul>
自動立案機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 設定されたデータに基づいて、各種制約条件を考慮しながら、自動立案を行います。1月分を行う新規計画案と月の途中から行う再計画立案とがあります。月の途中の計画変更も容易に行えます。</li> </ul>
対話編集機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 自動立案された結果の画面上で対話式で変更、追加、削除等を行います。</li> <li>● 日産量調整、日程変更、機械競合チェック等の種々の機能により、より現場の状況にマッチした計画が策定できます。</li> </ul>
帳票出力機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 立案された結果等を帳票出力します。製造計画表等は本機能での出力結果を現場で使用します。</li> </ul>



システム構成



# 特許と新案\*\*\*

三菱電機は全ての特許及び新案を有償開放しております

有償開放についてのお問合せは  
三菱電機株式会社 知的財産渉外部  
特許営業グループ Tel (03) 3218-2137

## 超電導コイル (特許 第1308050号)

この発明は、超電導コイルの絶縁に関するものである。

従来この種の絶縁は、図1に示すように超電導線(1)とガラス繊維を編組してなるガラスシース(2)から構成されているので、ガラス繊維の隙間に液体ヘリウムは浸透するが、超電導線に局部的な発熱のため液体ヘリウムに気泡が生じた場合には気泡の逃げる通路が形成されていないため、発熱が滞り、温度上昇をもたらす超電導破壊にいたることが多い。

この発明は上記のような従来のものの欠点を除去するためになされたもので、図2の発明の実施例に示すように、未反応の化合物系超電導線(1)に沿って高融点のガラステープ(3)をヘリカムに巻き付け絶縁したものをコイル状に巻回し、しかる後に熱処理により超電導化合物を反応生成せしめるようにしたので、ガラステープ(3)が一種の巻線間スペーサとなり、液体ヘリウムや気泡の通路が形成されるため、超電導線に局

発明者 田中光雄, 岩本雅民  
部分的な発熱が生じた場合にも発熱が速やかに取り去られる。また、超電導線材の表面の一部が液体ヘリウムと直接接触しているため冷却度が高められるとともに、絶縁工程はガラステープ(3)を超電導線(1)に巻き付けるだけでよいので時間短縮も図れる。

以上のようにこの発明によれば、性能の優れた安価な化合物系の超電導コイルが得られる。

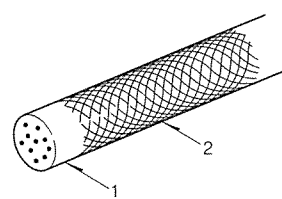


図1

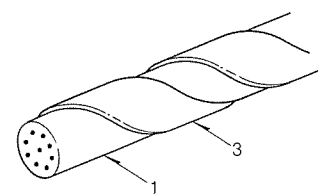


図2

## 超電導線の接続法 (特許 第1626237号)

この発明は、超電導線の接続法に関するものである。

従来の超電導線(1)の接続は、通常の金属溶接では高温過ぎて超電導特性が悪化するため、図1のようにハンダを用いて行われていた。しかし、一方の超電導フィラメント(3)から他方の超電導フィラメント(3)へ電流が流れ込む際に、通過する低抵抗基材(2)及びハンダ層(4)で抵抗損失が生じ、例えば磁気浮上列車用超電導コイルのように永久電流運転が必要な場合には、超電導コイルの電流が減衰するという欠点があった。

この発明は、上記のような欠点を除去するためになされたもので、図2に示すように、超電導線(1)の端の低抵抗基材(2)を除去して心線である超電導フィラメント(3)を取り出し、それらを電流を流し得る金属フィルム(5)で囲む。次に、図3のように、互いに重ねた金属フィルム(5)の上から、溶接時の電流制御の容易なスポット溶接により接合する。この場合において、完全な溶融ではなく各々の超電導フィラメント(3)の密着している部分の表皮のみが互いに結合するように溶接電流を制御する。

以上のようにこの発明によれば、超電導フィラメントを金属フィルムで囲み、スポット溶接を用いて超電導フィラメントにほとんど熱的損傷を与えることなく結合するようにしたので、電気抵抗をほぼ零にできる超電導線の接続法を提供で

きるものである。

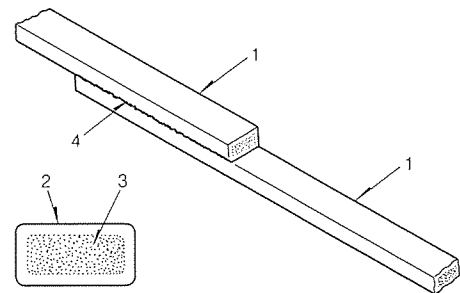


図1

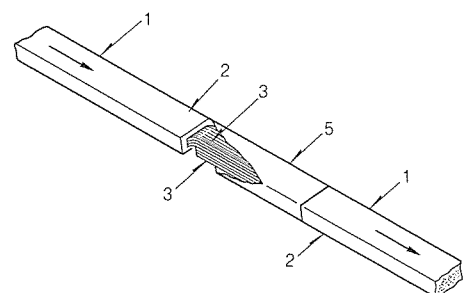


図2

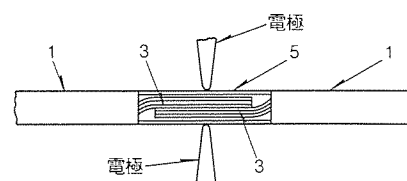


図3



# 特許と新案\*\*\*

三菱電機は全ての特許及び新案を有償開放しております

有償開放についてのお問合せは  
三菱電機株式会社 知的財産渉外部  
特許営業グループ Tel (03) 3218-2137

## 絶縁電線 (特許 第1516182号)

この発明は、平角断面の導体を並列に接合形成するための絶縁電線に関するものである。

最近の変圧器やリアクトル等に用いられる絶縁電線は、導体の渦電流損失を低減するために平角断面のものが使用され、導体にエナメル被膜を被着した上に接着剤を塗布した自己融着性電線を並列接合して実用に供していた。しかし、図1に示すように単なる平角導体(1)では、エナメル被膜(2)がコーナー部(2a)で厚くなる傾向があり、そのため図2のごとく平面部の接合が不完全になるという欠点があった。

この発明は、上述のような従来の絶縁電線の欠点にかんがみなされたものであり、図3に示すように、コーナー部の平角導体(1)の厚さ $t_2$ を平面部の厚さ $t_1$ より小にして外表面にエナメル被膜(2)を形成するようにしたものである(なお、エナメルの特性上、平面部が盛り上がる場合には逆の断面形状にすればよい。)このような導体(1)は、線引きダイスの断面を当該形状にすれば容易に得られ、またエナメルの外表面

に塗布される接着剤(3)は、加熱時に融解するので断面形状の影響はほとんど受けない。

以上のように、この発明によれば、エナメルが厚く塗布される平角導体の部分をその分あらかじめ薄く形成したので、接合面が実質的に平面になり、接合強度が著しく増大するという効果がある。

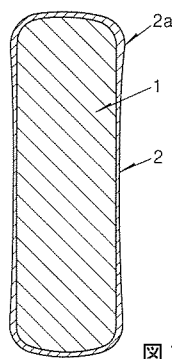


図1

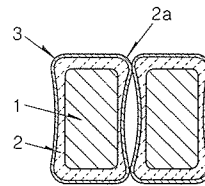


図2

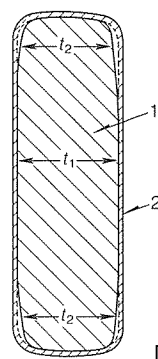


図3

### <次号予定> 三菱電機技報 Vol. 66 No. 6 光記録技術特集

#### 特集論文

- 光磁気ディスク技術の過去・現在・未来
- 光記録技術の展望
- 大容量化技術
- 光ディスク装置用レーザー光源
- 光変調オーバーライト光磁気ディスク
- 90mm 光ディスク装置におけるドライブ制御技術
- 90mm 光ディスク装置用 LSI
- 分離方式リライタブル光ヘッド
- CD-R 用光ピックアップ

#### ●130mm 光ディスク装置

- 光ディスク媒体の信頼性評価
- 光ディスク応用装置

#### 普通論文

- 特注形乗用エレベーター“ACCEL-AI”
- “MELFANET” 光ディスクファイリング機能付き  
ファクシミリ情報通信システムの構築
- マルチメディア文書処理システム DOCMSTAR 登場
- 大規模高速回路シミュレータ MICS
- 並列推論マシン PIM のアーキテクチャ

#### 三菱電機技報編集委員

委員長	山田 郁夫
委員	小澤 文明
〃	福岡 正安
〃	谷 豊文
〃	風呂 功
〃	大原 啓治
〃	松村 恒男
〃	名取 直幸
〃	吉岡 猛
〃	鳥取 浩
〃	岡田 久雄
幹事	長崎 忠一
5月号特集担当	山田 忠利

#### 三菱電機技報 66 巻 5 号

(無断転載を禁ず)

1992年 5月22日 印刷  
1992年 5月25日 発行

編集兼発行人	長崎 忠一
印刷所	千葉県市川市塩浜三丁目12番地 (〒272-01) 菱電印刷株式会社
発行所	東京都港区新橋六丁目4番地 9号 北海ビル新橋 (〒105) 三菱電機エンジニアリング株式会社内 「三菱電機技報社」 Tel. (03) 3437局2692
発売元	東京都千代田区神田錦町三丁目1番地 (〒101) 株式会社 オーム社 Tel. (03) 3233局0641代, 振替口座東京 6-20018
定価	1部 721円 (本体 700円) 送料別 年間予約は送料共 9,373円 (本体 9,100円)



# 中規模ビル向け三菱ビル管理システム

## スポットライト MELBAS-W2000



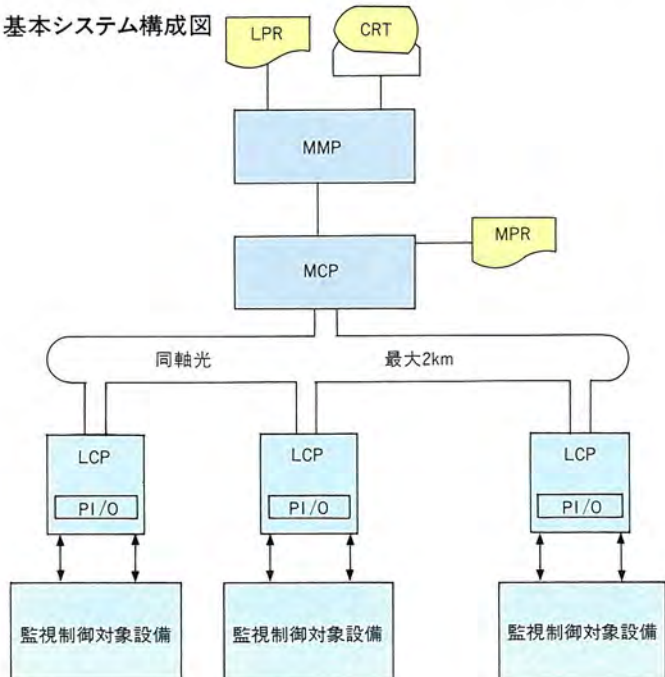
〈MELBAS-W2000〉は、中規模ビルを対象とした、最大管理点数2000点、常駐管理形態のビル管理システムです。ハードウェア構成は、大規模ビル管理システム〈MELBAS-D〉と同様、機能分散形システムとし、高い信頼性を確保しています。標準機能を大規模ビル管理システムレベルとしながら、標準構成におけるコストパフォーマンスを追求。使いやすさと機能を究めたコンソールを中心に、充実したビル管理システムを構築できます。

### 特長

#### ●集中管理システムの実現

空調、電気、防災、防犯などのビル設備及び関連設備の機器を集中管理し、ビル管理業務の効率化と省エネルギー化、安全性の向上を実現します。

### 基本システム構成図



#### ●管理運用機能の充実

自動検針、保守データ(運転時間・運転回数・故障回数)収集や機器ごとの連絡先表示、定期点検通知等の機能を実現し、管理運用業務をサポートします。

#### ●使いやすい監視操作方法の実現

マンマシン装置にEWSを採用し、マウス、マルチウィンドウにより使いやすい操作方法を実現しています。

#### ●機能のユーザー解放

ユーザー側で、変更要求の多い機能(スケジュール機器グループ、日報印字グループ、上下限設定グループ等)は、グループの組み替えがユーザー側で自由に行えます。

### 仕様

機 器 名 称		仕 様
メインコントローラ (MCP)		CPU部 電源 16ビットCPU AC100V ±10%、50/60Hz、100VA
マニピュレータ装置 (MMP)	本体	CPU部 ディスク部 電源 外形・質量 32ビットCPU 3.5インチ FDD 1MB 3.5インチ HDD 169MB AC100V ±10%、50/60Hz 250VA 133mm(W)×440mm(H)×360mm(D)、17kg
	CRT	画面仕様 電源 外形・質量 20インチCRT 16色、1280×1024ドット 90×24文字 AC100V ±10%、50/60Hz 240VA 498mm(W)×522mm(H)×544mm(D)、37kg
	入力装置	仕様 JISキーボード、マウス
	メッセージ プリンタ	印字文字 印字仕様 電源 外形・質量 漢字、ひらがな、カタカナ、英数字 紙幅5～16インチ、赤黒印字 AC100V ±10%、50/60Hz 130VA 580mm(W)×120mm(H)×345mm(D)、12kg
	ロギング プリンタ	印字文字 印字仕様 電源 外形・質量 漢字、ひらがな、カタカナ、英数字 紙幅5～16インチ、黒印字 AC100V ±10%、50/60Hz、300VA 500mm(W)×160mm(H)×380mm(D)、20kg
オペレータコンソール		周囲環境 温度10～35℃、湿度30～80%
	MCP・CRT卓	外形・質量 800mm(W)×1130mm(H)×1150mm(D)、150kg (MCP、本体、CRT含む)
	プリンタ卓	外形・質量 1440mm(W)×920mm(H)×800mm(D)、200kg (プリンタ2台含む)
ローカルコントローラ (LCP)		入出力仕様 電源 周囲環境 外形・質量 各種入出力カード16枚収納 AC100V ±10%、50/60Hz、200VA 温度 -10～40℃、湿度30～90% 600mm(W)×380mm(H)×210mm(D)、30kg



# スポットライト B/NET電力エネルギー管理システム

B/NET電力エネルギー管理システム(B/NETエネ管)は、データロガー・MICAMシリーズの豊富な実績と配電制御ネットワーク機器B/NETの技術を基に完成した全く新しいタイプの電力エネルギー管理システムです。B/NETエネ管は、電力エネルギー管理に必要な各種データをきめ細かく記録・監視するシステムで、従来のロガーの枠を超え、デマンド制御・力率制御・スケジュール制御やリモコン機器の個別発停など多くの機能を実現しています。

## 特長

### ●最大500点までの計測が可能

アナログ・パルス・接点入力・接点出力などの計測監視点数は最大点数の範囲内で自由に組み合わせられます。点数は、100点、300点、500点の各シリーズを品揃えし、規模に応じて最適な機器が選べます。

### ●各種制御が可能

スケジュール制御・デマンド監視制御・力率監視制御個別制御・グループ制御のほか、B/NETアナンシェータ、B/NETリモコンスイッチによる多箇所制御ができます。

### ●充実のマンマシンインタフェース

エネ管コントローラにはタッチパネルを採用し操作がより簡単になりました。パソコンタイプでは、ウィンドウ表示によるメンテナンスガイダンスやヘルプメッセージなどを充実、系統図画面への各種データの直接表示など多くの使いやす機能を実現しています。

### ●高度な計測が可能

B/NETエネ管システムのために、新たに多機能な電力計測コントロールユニット(B-MRU1)、4ch入力の温度計測コントロールユニット(B-TPU4)、デマンドコントロールユニット(B-DMU1)を準備しました。例えばB-MRU1では、電圧・電流・電力・無効電力・力率・周波数・高調波電流・電力量・無効電力量等の計測、及び上下限監視や最大値・最小値・トレンドデータ表示などが1台でできます。

### ●フロッピー記録が可能

日・月報の各種データをフロッピーに記録できる機種を準備。モデルPでは、ロータス1-2-3\*の汎用ファイル出力により、ユーザーご自身によるデータ解析も可能となります。(\*ロータス1-2-3はLotus Development Corporationの商標です。)

### ●伝送線が共用可能

B/NET照明制御システム、B/NET自動検針システムなどと伝

送線を共用できます。

(○：標準、△：オプション)

## システム構成と仕様

モデル		S			F			P		
システム		B-ES100S	B-ES300S	B-ES500S	B-ES100S	B-ES300S	B-ES500S	B-ES100S	B-ES300S	B-ES500S
入出力点数		100	300	500	100	300	500	100	300	500
機能	監視機能	状態監視	○		○			○		
	故障監視	○			○			○		
	操作運転監視	○			○			○		
	発停失敗	○			○			○		
	上下限監視	○			○			○		
	表示機能	系統図表示						○最大20枚		
	警報履歴表示	○モノクロ			○モノクロ			○カラー		
	警報発生状況表示							○		
	データ表示(接点、アナログ、パルス)	○モノクロ			○モノクロ			○カラー		
	デマンド表示	○モノクロ			○モノクロ			○カラーグラフィック		
制御機能	トレンド表示							○カラーグラフィック		
	発停制御(個別、グループ)	○			○			○		
	スケジュール制御	○			○			○		
	力率監視制御	○(8系統)			○(8系統)			○(8系統)		
	デマンド監視制御	○(8系統)			○(8系統)			○(8系統)		
	補助機能	メンテナンスガイダンス						○		
	ヘルプ機能							○		
	記録機能	警報記録	○		○			○		
	状態変化記録	○			○			○		
	発停/発停失敗記録	○			○			○		
設定機能	デマンド制御記録	○			○			○		
	日月報記録	各最大 ○ 7枚	各最大 ○ 19枚	各最大 ○ 32枚	各最大 ○ 7枚	各最大 ○ 19枚	各最大 ○ 33枚	各最大 ○ 7枚	各最大 ○ 19枚	各最大 ○ 32枚
	警報状況消書記録							○		
	ハードコピー							○		
	設定値記録							○		
	システム登録	○専用設定器による			○専用設定器による			○		
	回路名称登録	○専用設定器による			○専用設定器による			○		
	日月報フォーマット登録	○専用設定器による			○専用設定器による			○		
	系統図登録							○		
	演算式登録							○		
外部接続	定数設定	○			○			○		
	上位伝送	△			△			△		
	フロッピー記録				○			○		
汎用ファイル出力								○ロータス1-2-3 テキストファイル		



# スポットライト B/NET集中自動検針システム

B/NET集中自動検針システム(B/NET検針)は、自動検針システムMICAMシリーズの豊富な実績と配電制御ネットワーク機器B/NETの技術を基に完成した画期的な集中自動検針システムです。B/NET検針は、電力・ガス・水道などの使用量を検針し、これを基に使用料金の計算・請求書の発行など効率的に処理するシステムで、共用空調機のある分機能、漢字表示・印字の全面採用など多くの新しい機能を実現しています。

## 特長

### ● 容易な検針操作

設定された検針手順をワンタッチで実行するワンタッチ検針、予約により自動的に検針を行う予約検針等多くの機能があり、容易に検針ができます。

### ● 全機種漢字表示・印字

コントローラの大形LCD画面に見やすい漢字表示をします。ミニプリンタにも読みやすい漢字表示を採用し、表示・印字機能が充実しました。

### ● 豊富な料金計算機能

料金計算には、4段階料金制を採用し、将来の料金体系にも対応できます。また、テナント別料金集計、共用部のあん分も可能です。

### ● 空調機の料金あん分が可能

各テナントの空調機の稼働時間計測により、共用空調機の料金あん分ができます。

### ● 最大500点までの検針が可能

最大500点まで、検針点数に応じ100点、300点、500点のシステムが選択できます。

### ● 伝送線が共用可能

B/NET照明制御システムや、B/NET電力・エネルギー管理システムなどと伝送線を共用できますので、複合システムが容易に構成できます。

## システム構成と仕様

(○：標準 △：オプション)



モ デ ル		S			K			P		
シ ス テ ム		B-AM 100S	B-AM 300S	B-AM 500S	B-AM 100K	B-AM 300K	B-AM 500K	B-AM 100P	B-AM 300P	B-AM 500P
項 目										
検 針	全点検針		○			○			○	
	ワンタッチ検針		○			○			○	
	予約検針	1回検針		○	○		○	○		○
		毎月検針		○	○		○	○		○
		隔月検針		○	○		○	○		○
	種別検針		○			○			○	
	個別検針、テナント検針		○			○			○	
	メンテナンス検針		○			○			○	
	検針点数	合計			100点	300点	500点	100点	300点	500点
	稼働時間計測点数				100点	300点	500点	100点	300点	500点
印 字	検針結果印字		○			○			○	
	簡易請求書発行		○			○			○	
	台帳更新メモ印字		○			○			○	
	検針エラー印字		○			○			○	
	メータ台帳印字		○			○			○	
	テナント台帳印字		○			○			○	
	料金台帳印字		○			○			○	
	テナントリスト印字		○			○			○	
	テナント集計印字		○			○			○	
	メンテナンス検針印字		○			○			○	
機 能	稼働時間データ印字		○			○			○	
	15インチ漢字プリンタ印字					○			○	
	請求書領収書発行 (当社標準フォーマット)								○	
	請求書領収書発行 (お客様ご指定フォーマット)								△	
	メータごと使用量		○			○			○	
	対前比率 = $\frac{\text{今回使用量}}{\text{前回使用量}} \times 100$		○			○			○	
	メータ種別ごと使用量合計		○			○			○	
	メータごと料金 = 基本料金 + Σ(使用量Vi × 単価Ci)		○			○			○	
	テナント別 料金合計	種別合計		○	○		○	○		○
		合計		○	○		○	○		○
演 算	メータ種別ごと料金合計		○			○			○	
	総合計料金		○			○			○	
	共用部の 使用料金 のあん分	テナントの面積率		○	○		○	○		○
		テナントの使用量率		○	○		○	○		○
		テナントの稼働時間率		○	○		○	○		○
	メータ台帳設定		○			○			○	
	テナント台帳設定		○			○			○	
	上 位	RS-232C + モデム		△	△		△	△		△
	リンク	FDDによるデータ渡し						△		△