

# 超電導技術の加速器への応用

## Superconducting Magnet Technology for Accelerators

加速器での超電導技術の重要性は、最近の加速器の多様化する要求とともにますます高いものとなってきている。特に加速器の重要な構成要素であるマグネットへの超電導技術の応用はその最たるもので、加速器用マグネットへの高磁場化、高電流密度化、高精度化などの要求、検出器用マグネットへの大型化、大容量化などの要求にこたえるうえで不可欠なものである。日立製作所は、高エネルギー物理学研究所をはじめとした各研究機関の指導のもとに、加速器関連の超電導マグネットの開発を行ってきた。ここでは近年開発した超電導マグネットを系統的に分類し、要求される機能・性能、開発の経緯、技術内容、成果などについてまとめた。得られた成果は、現状の加速器の性能向上に寄与するだけでなく、今後の加速器技術に対する知見と基礎技術を得たものとして位置づけられるものである。

浅野克彦\* Katsuhiko Asano  
 山際 威\* Takeshi Yamagiwa  
 森合英純\*\* Hidezumi Moriai

### 1 緒 言

近年、加速器の多分野にわたる応用が急速に進められているが、加速器の高エネルギー化、高性能化、コンパクト化およびエネルギー効率の改善といった多様化する要求にこたえるうえで、超電導技術は無視できないものとなっている。これは超電導技術が、各種機器の性能(発生磁場など)を飛躍的に向上させるとともに、省電力を可能とするということに起因しており、将来、この傾向はますます高まってくるものと思われる。

加速器に応用される具体的な超電導技術は、大別すると、  
 (1) 粒子の軌道を制御する磁場発生装置(マグネット)  
 (2) 粒子の運動量を分析するための磁場発生装置(マグネット)  
 (3) 粒子の加速と放射光損失を補う高周波加速空洞  
 となる。特に(1)、(2)は、目的によって種々の用途があり、加速器機器として粒子の偏向・収束要素として用いる加速器用超電導マグネット、実験用として粒子の分析・検出に用いる

表1 加速器関連の超電導マグネット 日立製作所で製作した加速器関連の超電導マグネットを示す。

形 式	用 途	顧 客	製作年	員数	中心磁場 (T)	蓄積エネルギー (MJ)	備 考	
加 速 器	双 極 ウインドウ フレーム	高エネルギー加速器	KEK	1984	1	9.3*	0.7	R & D (1.8 K超流動He冷却)
			KEK	1988	1	6.6	0.09	R & D
	くら形	2						
	セクター	SOR光源	A社	1988	2	3.0	0.6	
	四 極	高エネルギー加速器	KEK	1988	2	70 T/m (磁場こう配)	0.34	TRISTAN-QCS
検 出 器	ソレノイド	衝突実験装置	筑波大学・KEK	1981	1	1.1	0.047	R & D
			KEK	1984	1	1.5	30	TEVATRON-CDF
			KEK	1986	1	3.0	40	TRISTAN-AMY
挿入光源	ウィグラー	分子科学研究所	1984	1	4.0	0.02	UV-SOR	

注：略語説明ほか \* 双極マグネットとして世界最高級磁場を発生  
 SOR(Synchrotron Orbital Radiation：シンクロトロン軌道放射光), KEK(高エネルギー物理学研究所), UV-SOR(Ultra Violet-SOR), QCS(強収束超電導四極電磁石), CDF(Collider Detector Facility)

\* 日立製作所日立工場 \*\* 日立電線株式会社土浦工場

スペクトロメータあるいは検出器用超電導マグネット、さらには放射光利用のための特殊マグネット(ウィグラー)などがある。

以上の背景のもとに、日立製作所でも加速器に超電導技術を適用し、表1に示すように数種類の超電導マグネットを製作してきた<sup>1)~6)</sup>。これらの超電導マグネットには、その目的・用途に応じて多様化した要求がなされる。例えば、加速器用には高磁場化、高電流密度化、高精度化が、また検出器用には大形化、大容量化といったものであり、それらは年々高度かつ複雑化したものとなっている。

この状況に対応するため、適宜各種の解析とモデル試験による実証を通して、新技術の開発とともに各種の超電導マグネットを製作してきた。ここでは、表1に示した各種マグネットの中から最近の例を選定し、その特徴、性能などについて概説する。

## 2 超電導導体

超電導マグネットの要求性能を達成するうえで、超電導導体の開発は必須(す)で、目的・用途に応じた技術開発をマグネットの開発とともに進めてきた。表1に示した各超電導マグネットのために開発した超電導導体の諸元、特徴を表2に示す。1章で言及した各種の超電導マグネットに対する要求に対応するものとして、加速器用マグネットの超電導導体に対しては、高電流密度・低銅比・極細フィラメント・高寸法

精度が、また検出器用マグネットの超電導導体に対しては、高安定化(アルミ安定化など)・高強度化が主な要求であり、また開発課題であったが、高精度より線技術、アルミ安定化技術などの要素技術の開発を通してこれを達成した。

## 3 加速器用超電導マグネット

### 3.1 概要

加速器では、マグネットの高磁場化によってリングサイズを極力小さくして建設・運転コストを低減するとともに、マグネット自身も高電流密度化などによって、高性能化とコスト低減を達成することが、特に大形・高エネルギー加速器では重要で、超電導技術は不可欠である。実際、高エネルギー物理の分野では、超電導マグネットによる加速器として米国FNAL(Fermi National Accelerator Laboratory)のTEVATRONが稼動中、欧州DESY(ドイツ電子シンクロトロン研究所)のHERA(Hadron-Electron Ring Accelerator)が建設中であり、さらに米国SSC、欧州LHCプロジェクトも計画されている。また、衝突実験のビーム強収束用としてKEK-TRISTANのQCS(強収束超電導四極電磁石)、欧州CERN-LEPの強収束超電導四極電磁石では、超電導技術の利点を生かし、実験上重要な役目を担っている。一方、他の分野でも超電導技術を利用して高磁場化・コンパクト化を図ることが世界的に行われている。例えば、日本、米国、欧州で競争の盛んな工業用SOR(Synchrotron Orbital Radiation)装置の

表2 加速器関連の超電導マグネット用超電導導体 表1に示した各種の超電導マグネットに適用した超電導導体を示す。

種別 項目	加 速 器 用				検 出 器 用		ウィグラー	
	双 極 マ グ ネ ッ ト			四 極 マ グ ネ ッ ト	ソ レ ノ イ ド			
	ウインドウフレーム	く ら 形	セ ク タ ー	Q C S	C D F	A M Y		
材 質	NbTi/Cu	NbTi/Cu		NbTi/Cu/CuNi	NbTi/Cu	NbTi/Cu/Al	NbTi/Cu/Al	NbTi/Cu
寸 法 (mm)	1.7×12.6	内層(1.35-1.61)×9.30 外層(1.06-1.27)×9.73		2.1×5.2	(1.19-1.35) ×9.09	3.59×20	9.8×10.2	φ0.9
形 式	より線	より線		より線	より線	Al安定化 モノリス	Cu+Al安定化 より線	モノリス
フィラメント径 (μm)	13	5		7	9	50	30	16
基 材 比	SC:Cu=1:1.4	内層 SC:Cu =1:1.5	外層 SC:Cu =1:1.8	SC:Cu =1:3	SC:Cu =1:1.8	SC:Cu:Al =1:1:21	SC:Cu:Al =1:15:2	SC:Cu=1:1
臨 界 電 流 at 4.2 K(A)	>7,970 at 7.6 T	内層 >7,167 at 7 T	外層 >7,860 at 5.6 T	>4,500 at 3 T	>6,500 at 6 T	>10,350 at 1.5 T	>9,000 at 4.4 T	>420 at 6 T
特 徴 開 発 課 題	高電流密度 低銅比 極細フィラメント 高寸法精度				高安定化 高強度			

開発はその典型的な例である。このように、加速器での超電導技術の必要性は言うまでもなく、今後さらにその重要性が高まることは疑いない。

本稿では、日立製作所で最近製作したくら形双極マグネット、および四極マグネットを例に、その技術的特徴などを次節以降で述べる。

### 3.2 くら形双極マグネット

#### 3.2.1 概要

本マグネットの基本計画・設計は高エネルギー物理学研究所で行われたが、主要諸元を表3に示す。また、カラーリング後のコイルの完成状態を図1に示す。本マグネットは、超電導双極マグネットの経済性と高性能達成のため、徹底した合理化の追求と最適化を目的として製作されたものである。特に、過去に類例のない大きな特徴を次に述べる。

- (1) 小口径くら形形状… $\phi 40$  mm
- (2) 高電流密度コイル…450 A/mm<sup>2</sup>
- (3) 高負荷率…97%

超電導コイルは、内層および外層から構成される長さ約1 mのくら形コイルを上下に組み合わせ、カラーと称する非磁性薄板によって締め付け、固定されている。このカラーの外側に鉄ヨークを配置させて、これらをヘリウム容器に収納し、全体を液体ヘリウム温度まで冷却するものである。

#### 3.2.2 設計および製作

本マグネットの開発に当たっては、設計・製作条件がわずかに異なる3個のマグネットを製作し、達成性能に対する影響や相違を得る方針とした。

超電導導体は2種類のNbTi/Cuキーストンより線で、カプ

表3 くら形双極マグネットの主要諸元 くら形双極マグネットの主要諸元を示す。小口径くら形形状、高電流密度などが主要な特徴である。

項目	数 値	
中心磁場	6.6 T	
最大磁場	7 T	
電 流	6,504 A	
コイル形状	cos $\theta$ 巻き, くら形	
コイル内径	$\phi 40$ mm	
コイル軸長(直線部)	内層	1,000 mm
	外層	969 mm
コイル巻数	内層	16×2
	外層	20×2
コイル電流密度	450 A/mm <sup>2</sup>	
インダクタンス	4.3 mH	
蓄積エネルギー	90 kJ	
超電導導体	NbTi/Cuより線	

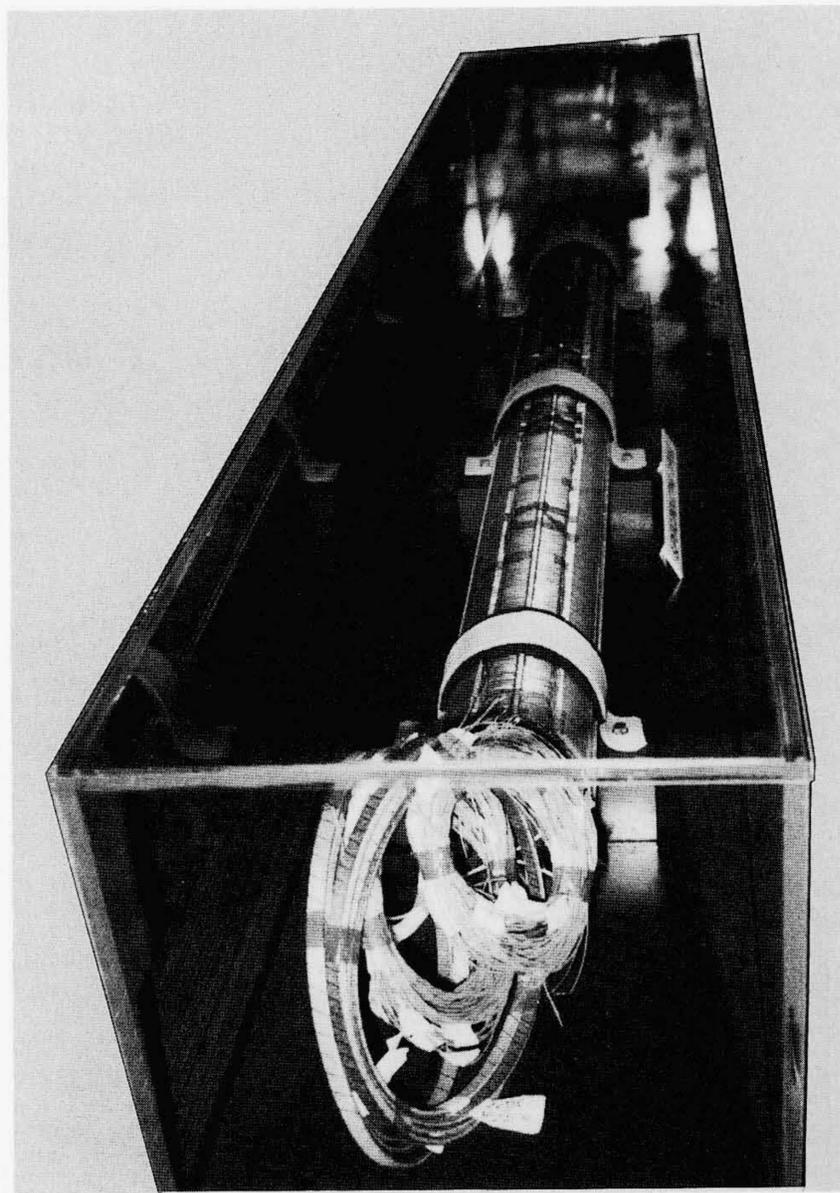


図1 超電導くら形双極コイルの外観 カラーリング後の超電導くら形双極コイルの全体外観を示す。

トンとガラステープで絶縁している。おのおのの導体を用いて内層、外層コイルをくら形状に巻線した内径 $\phi 40$  mm、長さ約1 mのコイルを、ビームパイプに対し上下方向に組み合わせ、全体を板厚1.5 mmの高マンガン鋼を積層して構成されるカラーで、上下方向に締め付けキーを用いて固定している。カラーの外側に、板厚1.6 mmの低炭素鋼を積層したヨークを配し、全体をSUS304Lのヘリウム容器に収納し溶接によって封入している。

本コイルの場合、高電流密度化の基本的要請からコイルを機械的に固定し、励磁時の電磁力の動きに起因する熱的外乱を極力抑えて安定化を図ることが本質的な考えである。このための設計前提条件を次に述べる。

- (1) 励磁に至るまでのすべてのプロセスの履歴を考慮して、一体化したコイルとカラーがプリストレスを保持すること。
- (2) コイルの動きが十分小さくなるように、カラーが必要かつ十分な剛性を持つこと。

上記を達成するうえで重要なことを具体的に次に述べる。

- (1) コイルおよびカラーが高寸法精度、高剛性であること。
- (2) 製作したコイルおよびカラーの機械的特性(寸法、剛性)をすべて実測し、これに基づきプリストレス条件を決めたこと。

(3) 特に、各コイルの機械的特性(寸法、剛性)が均質でばらつきが小さいこと。

カラー材質は、オーステナイトステンレスと高マンガン鋼の特性を総合的に比較・評価した結果、熱収縮率が低いという問題点を持つが透磁率特性に優れる高マンガン鋼(KHMN-30L)を選定した。

以上の結果、決定したコイルおよびカラーの寸法、特性条件で励磁時の応力解析を行った一例として変形図を図2に示す。また、本マグネットの磁場解析を行った結果を図3に示す。設計電流6,504 Aで中心磁場6.6 Tを得ることがわかる。

### 3.2.3 特性試験

前項の製作したマグネットの特性試験で、特に到達電流とトレーニング特性について述べる。その結果をまとめて図4

に示す。3台とも定格励磁を達成するとともに、トレーニング特性の相違についての知見も得られ、当初の目標を達成した。

## 3.3 四極マグネット

### 3.3.1 概要

高エネルギー物理学研究所で稼動中の衝突型加速器TRISTANでは、ルミノシティ向上のために2台のQCSを

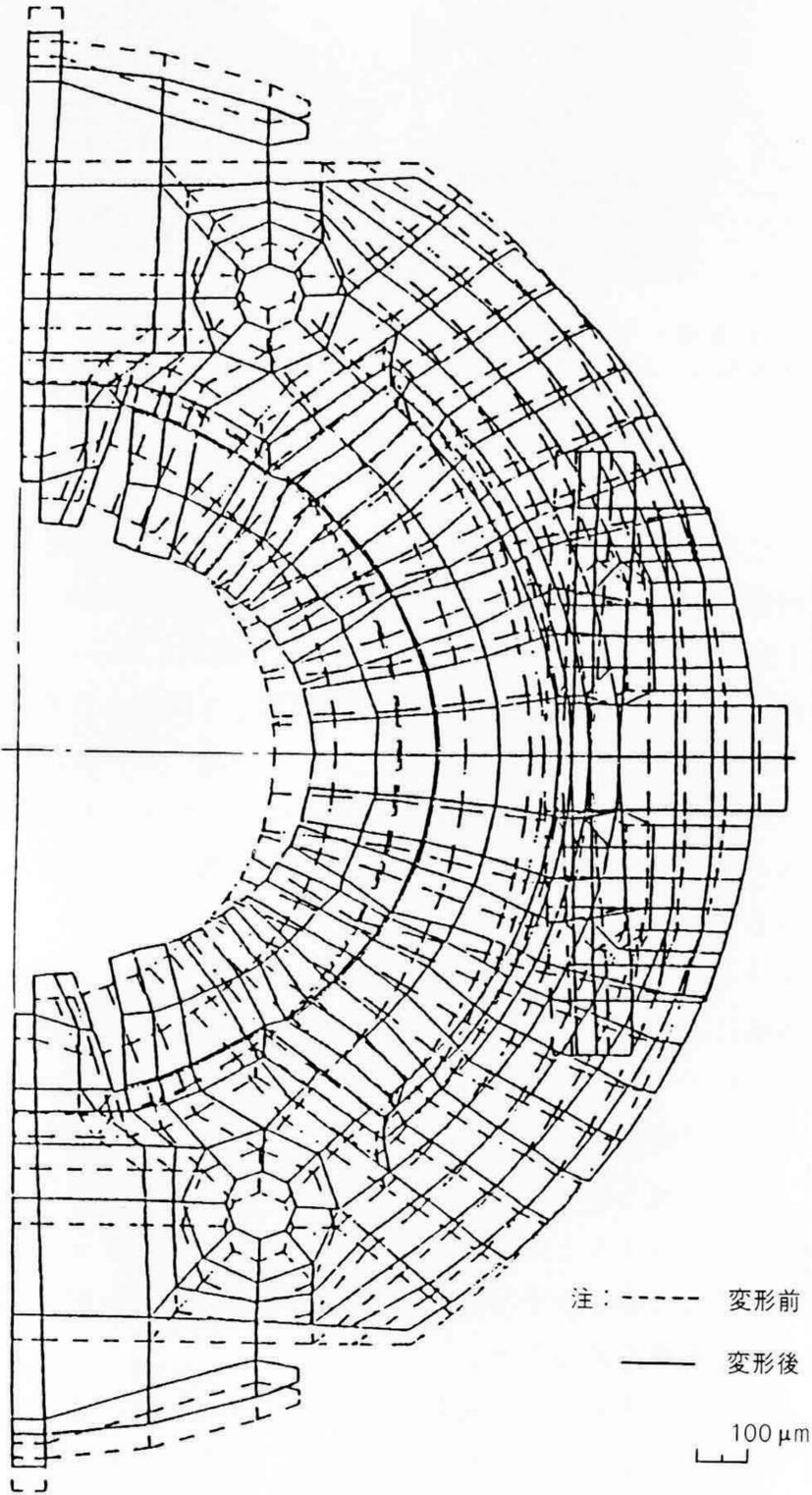


図2 双極コイル(カラー付き)の励磁時の応力解析 双極コイル(カラー付き)の、励磁時の応力解析結果として変形図を示す。

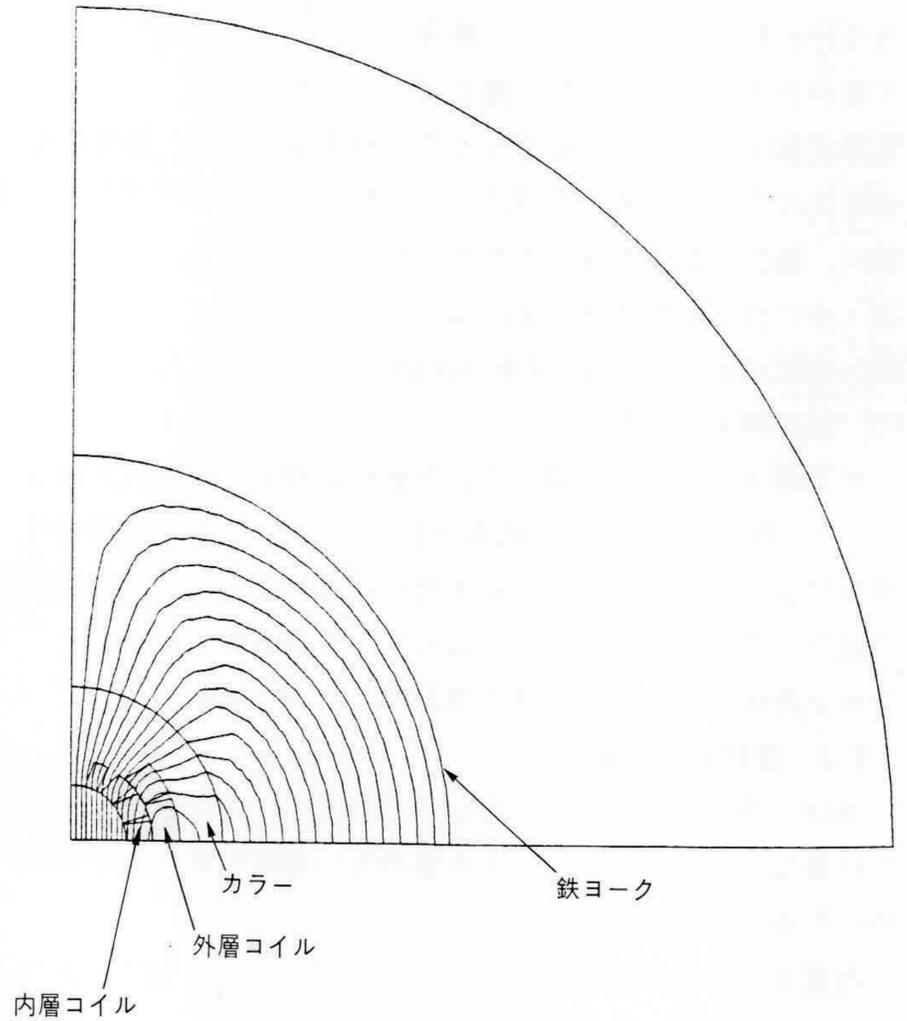


図3 双極マグネットの磁場分布 双極マグネットの磁場分布計算結果を示す。電流6,504 Aで中心磁場6.6 Tが得られる。

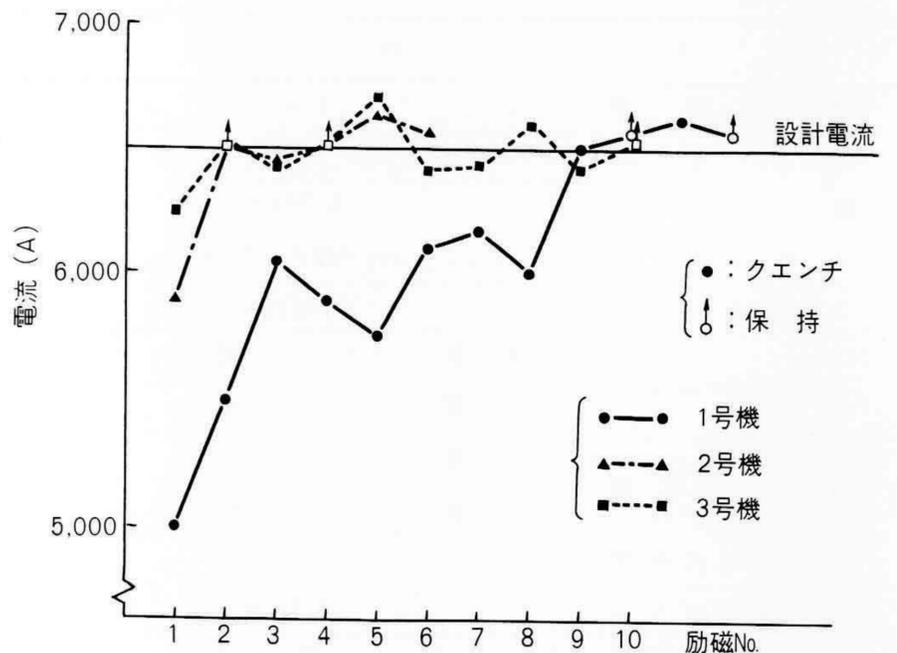


図4 双極マグネットの励磁試験結果 双極マグネット(3台)の到達電流、トレーニング特性を示す。

衝突点の対称な位置に設置する予定である。強収束、すなわち高磁場こう配とともに衝突実験の粒子検出のための立体角のロスをも最小限とするためにコンパクト化が必要で、したがって超電導四極マグネットが必然となる。その要求仕様を次に述べる。

- (1) ビームオプティックスの要請からコイル内径は $\phi 140$  mm以上で、磁場こう配は70 T/mが必要である。
- (2) 衝突装置に対する磁気的影響、寸法上の干渉を避けるため、空心かつクライオスタット外径は $\phi 400$  mm以下であることが必要である。

本マグネットの基本的設計および試作開発は高エネルギー

表4 QCS四極マグネット主要諸元 QCS四極マグネットの主要諸元を示す。

項目	数	値
磁場こう配		70 T/m
最大磁場		5.8 T
電流		3,405 A
コイル形状		$\cos \theta$ 巻き, くら形
コイル内径		$\phi 140$ mm
コイル軸長		1,134 mm
コイル巻き数		120 $\times$ 4
コイル電流密度		250 A/mm <sup>2</sup>
インダクタンス		58 mH
蓄積エネルギー		340 kJ
超電導導体		NbTi/Cuより線

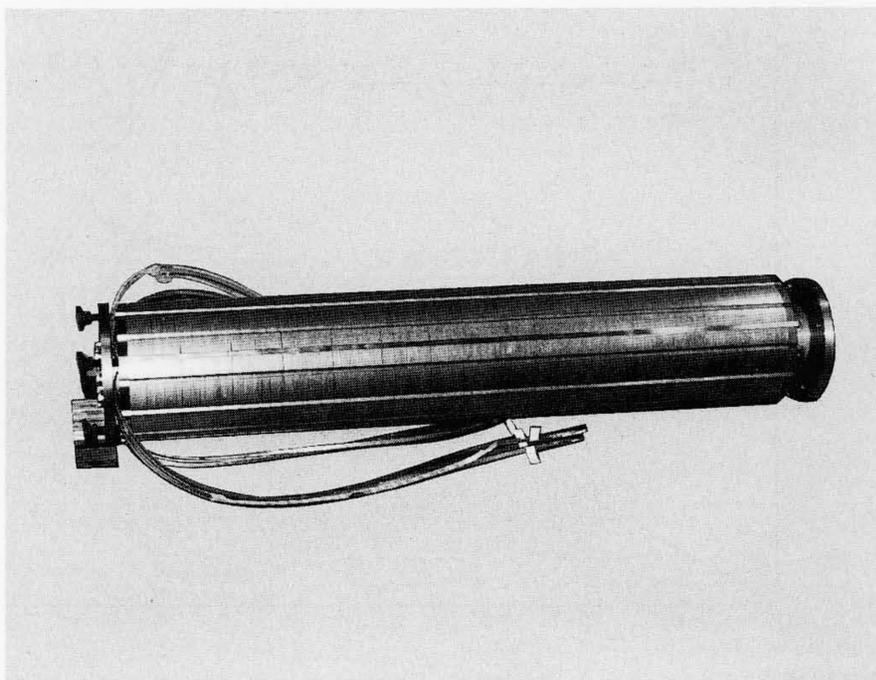


図5 QCSコイルの完成状態 コイルカラーリング後の完成状態を示す。

物理学研究所で行われ<sup>7)</sup>, その技術移管の基に日立製作所で製作した。マグネットの主要諸元を表4に示す。また、カラーリング後のコイルの完成状態を図5に示す。

超電導コイルは、4層から構成される約1.4 mのくら形コイルを四極に配置させ、これをカラーで上下、左右から締め付けて固定するものである。このカラーによるコイル固定の基本理念は、3.2節のくら形双極マグネットと同一である。

### 3.3.2 設計および製作

超電導導体は、直径0.68 mmのNbTi/Cuストランド27本をキーストン状により合わせたもので、表面にステイブライト処理を施している。導体の表面は、カプトンで2層に絶縁している。この超電導導体で巻線した2種類のダブルパンケーキで1磁極を構成する。これを4磁極分組み合わせ、全体を上下、左右から板厚1.5 mmのSUS316 LN製積層カラーで締め付け、キーを挿入後溶接することによって固定している。この断面構成を図6に示す。本配置によって定格電流3,405 Aで磁場こう配70 T/mを発生する。

本コイルは、3.2.2項の双極マグネットと比べ、カラーリング手法やカラー材質に違いはあるものの安定化に関する考え方は基本的に同一である。具体的には、径方向の残留応力を得るためにコイルを最終寸法よりも約0.5 mm大きく製作し、またコイルとカラー間に厚さ調整のシムを設置することで、最終的に電磁力による応力相当のプリストレス(約3 kg/mm<sup>2</sup>)

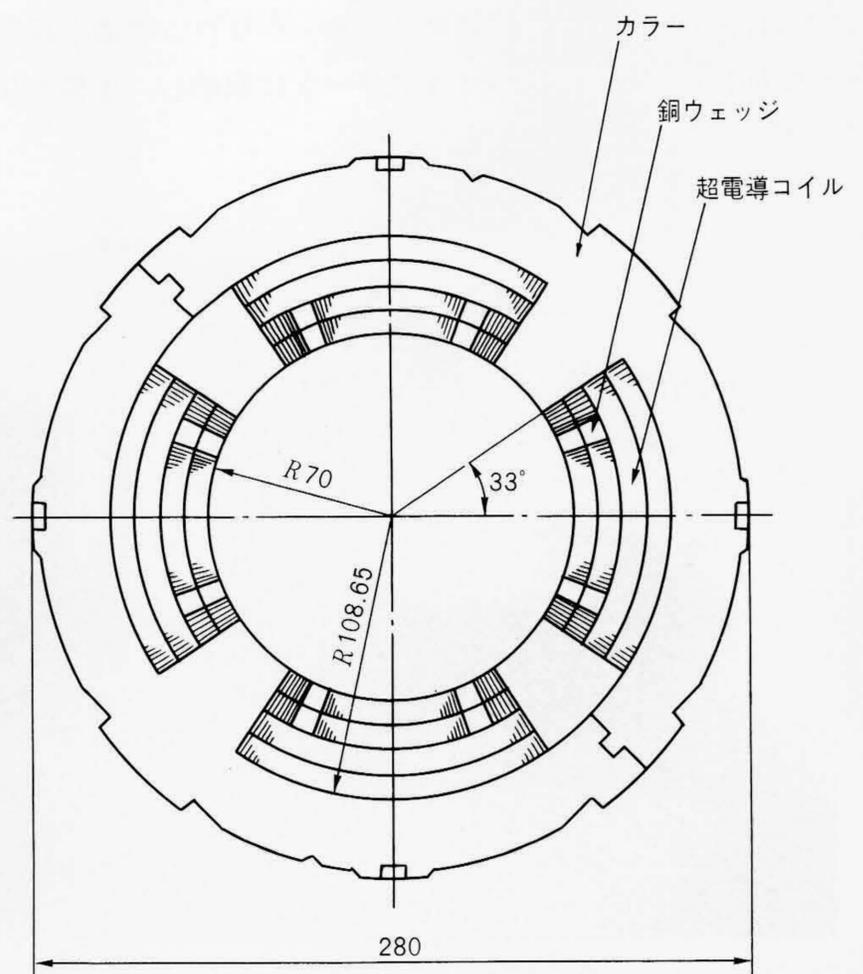


図6 QCSコイル断面 QCSコイルの断面図を示す。

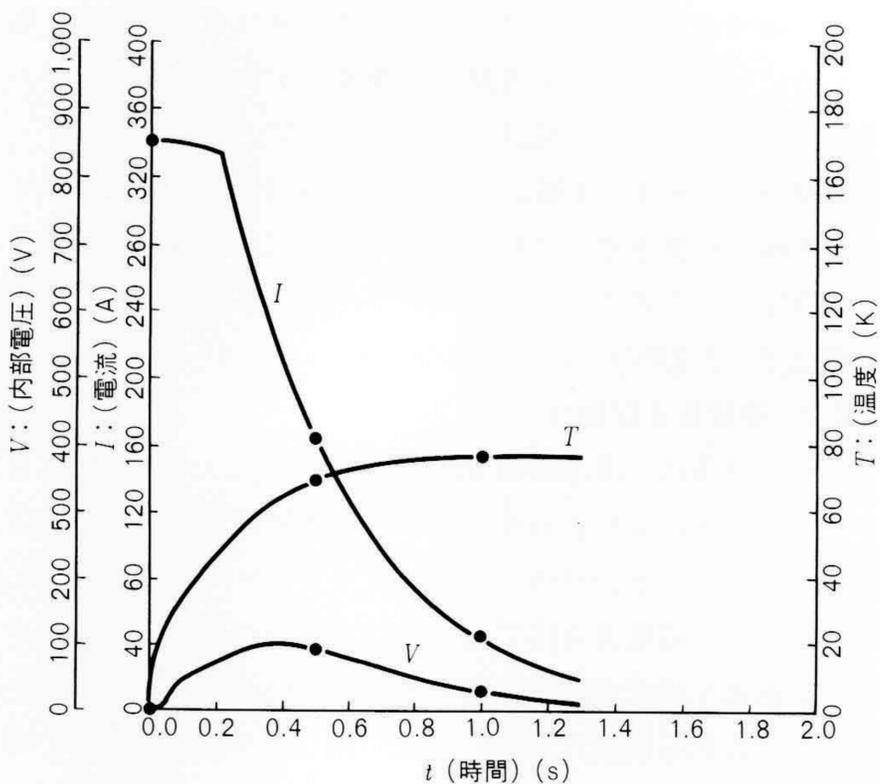


図7 QCSコイルのクエンチ特性 QCSコイルのクエンチ特性を示す。温度、電圧上昇とも許容値内でコイルは安全であることがわかる。

を残している。

パンケーキコイル間の接続は、磁場の低いコイル外の端部で、専用治具を用いてはんだ付けによって行っている。

クエンチ解析の結果を図7に示す。保護抵抗 $0.125 \Omega$ で発生する内部電圧99 V、温度上昇は77 Kで安全であることが確認された。

コイルをヘリウム容器に入れた後、横形クライオスタットに収納した完成状態を図8に示す。

### 3.3.3 特性試験

特性試験は、コイル単独でくらは形・ヘリウム浸漬冷却方式で実施した後、横形クライオスタットに収納し、単相ヘリウ

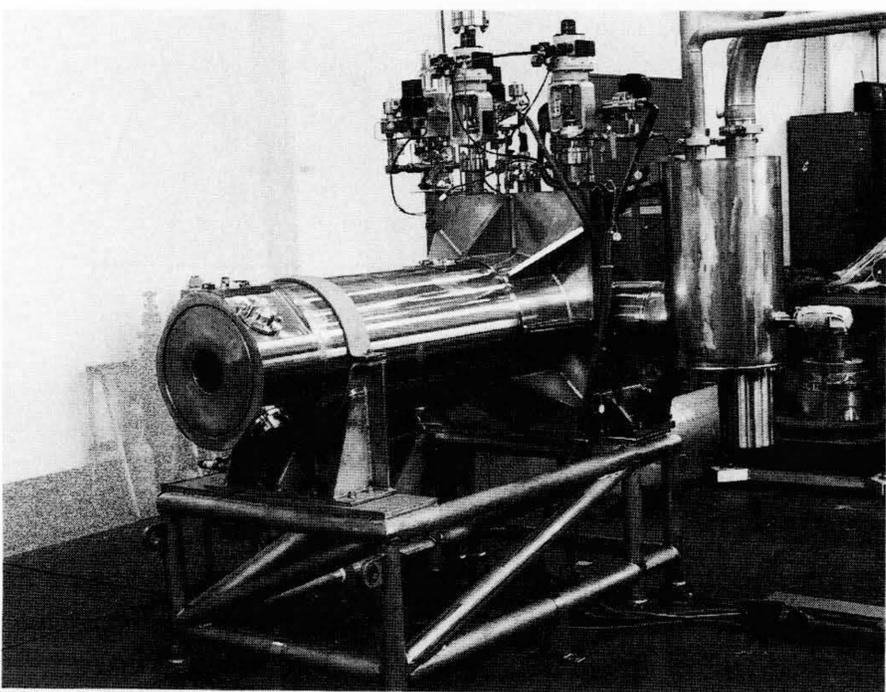


図8 QCS四極マグネットの完成状態外観 QCS四極マグネット完成状態を示す。

ム強制冷却方式で実施した。コイル単独試験の到達電流・トレーニング特性を図9に示す。本試験は4,000 Aを通電電流の上限値と設定したが、2台のコイルともほぼ同じ特性を持って所定の性能を達成した。さらに、実施した横形クライオスタットでの試験では、通電電流上限設定値3,500 Aまで、2台ともクエンチなしで励磁できた。

## 4 検出器用超電導マグネット

### 4.1 概要

加速器による衝突実験では、衝突によって発生する粒子の運動量を分析するための磁場発生装置として大型ソレノイドが必要である。粒子の高エネルギー化に伴って、ソレノイドの空間と磁場を大きくする必要があり、所要電力の節減の理由とともに、ここでも超電導技術は不可欠のものとなっている。実際、米国FNAL-TEVATRON, KEK-TRISTAN, 欧州CERN-LEPなど、世界中の衝突型加速器の検出器のほとんどに、超電導ソレノイドが用いられている。

日立製作所が製作した検出器用超電導ソレノイドについて、次節以降に述べる。1章の図1に示した2種類のソレノイドは実験の要請の違いから、冷却方式、安定化の手法などまったく異なっている。CDF(Collider Detector Facility)ソレノイドについてはすでに報告<sup>8)</sup>があるので、ここではAMYソレ

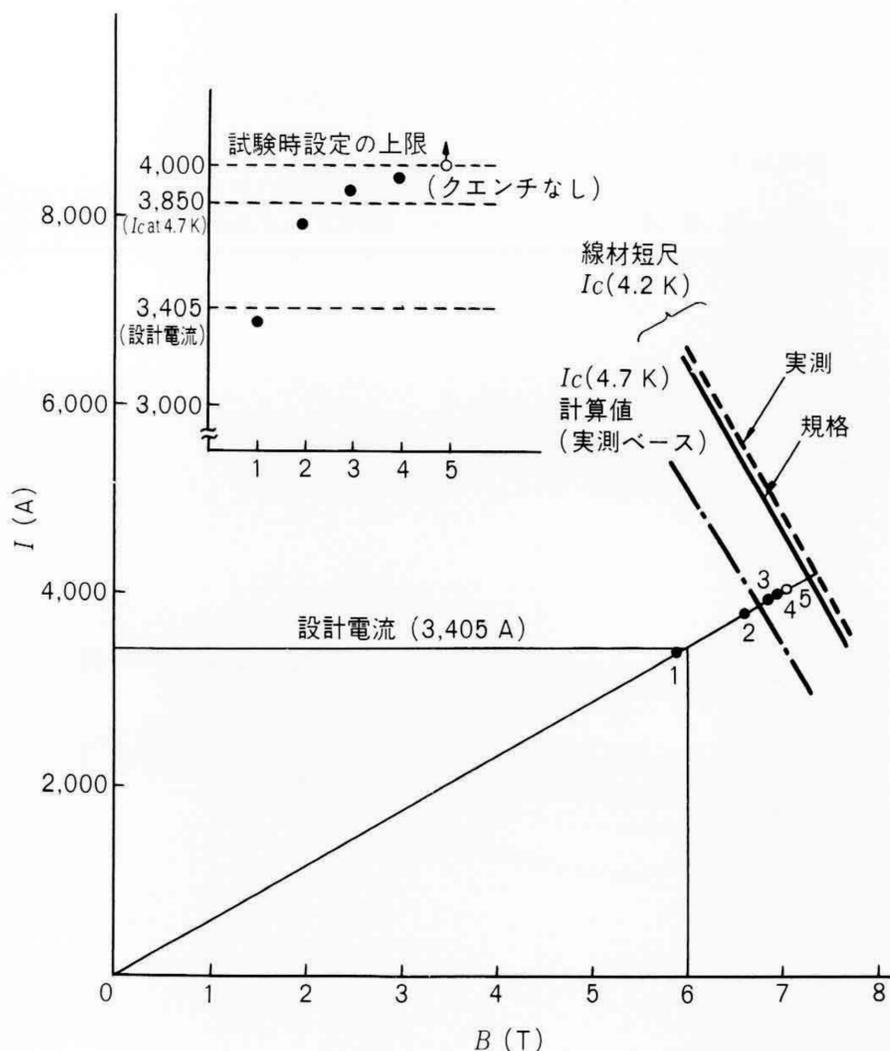


図9 QCSコイルの励磁試験結果 QCSコイル(1号機)の到達電流およびトレーニング特性を示す。2号機もほぼ同様の結果が得られた。

ノイドについて述べる。

## 4.2 AMYソレノイド

### 4.2.1 概 要

AMY検出器は、TRISTANの3か所の検出器のうちの一つで、高磁場・コンパクトという他と際立って異なる特徴を持っている。このAMY検出器に設置した超電導ソレノイドについて高エネルギー物理学研究所の基本計画に基づき決定した主要諸元を表5に示す。内径 $\phi 2.4$  m、軸長1.5 mの空間に3 Tの磁場を発生させ、蓄積エネルギー40 MJを持つ大型ソレノイドである。

### 4.2.2 設計および製作

本マグネットは、きわめて大きな蓄積エネルギーを持っており、運転に当たっては安全性および信頼性の高いものでなければならない。したがって、本マグネットの設計は浸漬冷却による完全安定化とすることを基本方針とした。

超電導導体は、7本のNbTiストランドを高純度アルミニウムとともに、門形形状の硬銅にはんだで埋め込んだものである。門形安定化銅の特殊形状と高純度アルミニウムによって安定化を、また硬銅によって機械的強度を保っている。

超電導コイルは8層の多層ソレノイドで、ターン間および層間にはFRP(ガラス繊維強化プラスチック)のスペーサを配置し、絶縁とともに液体ヘリウムのクーリングチャンネルを形成している。導体の接続はすべてコイル端部ではんだ付けによって行っており、接続抵抗は $2 \times 10^{-9} \Omega$ (at 4.2 K)以下であ

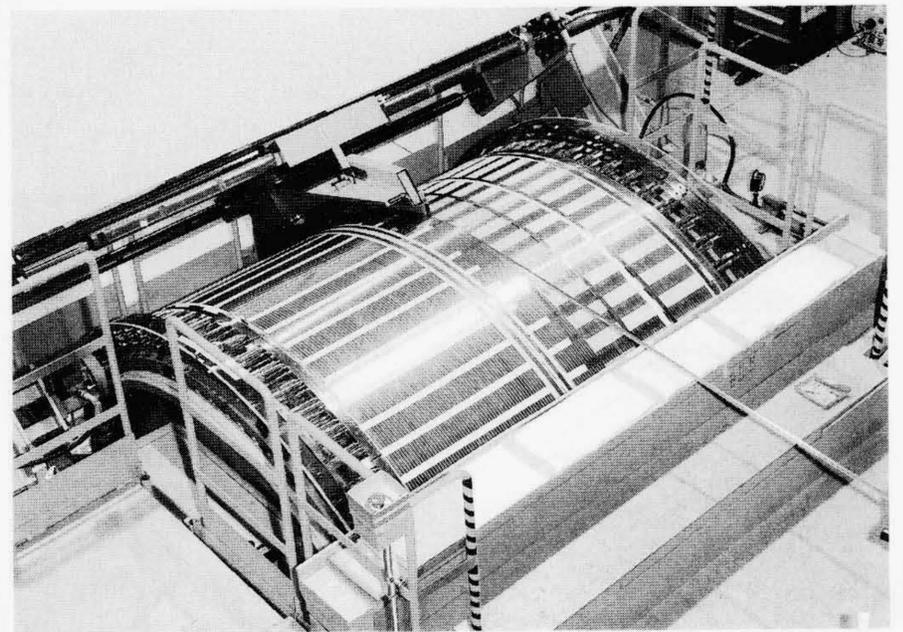


図10 AMY超電導コイル AMY超電導コイル巻線完成状態を示す。

る。コイル完成状態を図10に示す。

巻線完了後、コイルの固定とプリストレスを残すため、コイル外周側にヘリウム容器外筒を焼ばめし、また軸方向にも固定して、ヘリウム容器に収納した。

ヘリウム容器は、サポートロッドによって横形クライオスタット内に保持される。クライオスタットには、接続管を介してマグネットデューワーが設置されており、この部分から冷媒、電気の導入などが行われる。クライオスタット内の液体

表5 AMY超電導マグネットの主要諸元 AMY超電導マグネットの主要諸元を示す。

項 目	数	値
中 心 磁 場	3.0 T	
最 大 磁 場	4.0 T	
電 流	5,000 A	
コイル形状	多層ソレノイド	
コイル内径	$\phi 2,386$ mm	
コイル軸長	1,540 mm	
コイル巻き数	1,080	
コイル電流密度	35	
インダクタンス	3.2 H	
蓄積エネルギー	40 MJ	
超 電 導 導 体	門形安定化銅および安定化アルミニウム付きNbTi	
スク タラ ツイ トオ	内 径	$\phi 2,220$ mm
	外 径	$\phi 2,920$ mm
	軸 長	2,120 mm

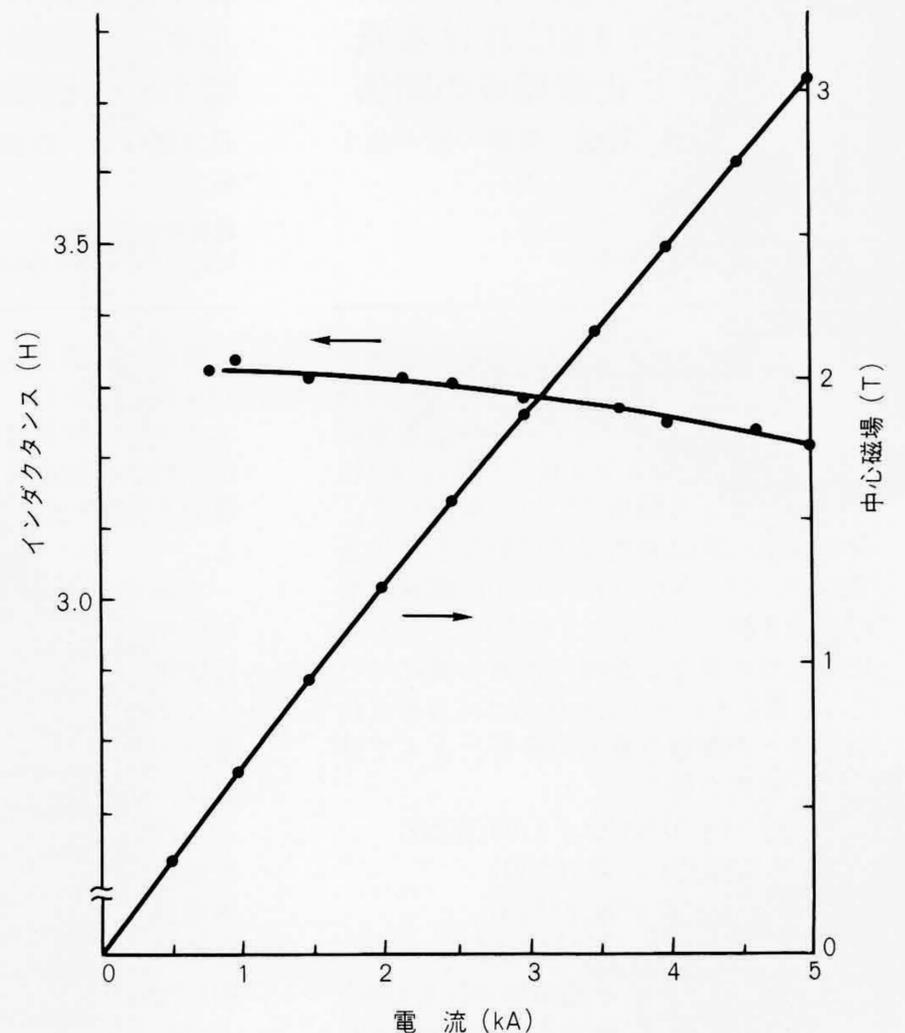


図11 AMY励磁試験結果 定格電流までの中心磁場およびインダクタンスの測定結果を示す。

ヘリウム貯液量は約500 lである。

#### 4.2.3 特性試験

本試験では冷却、定格励磁、遮断、熱負荷測定など各種試験を行ったが、得られた結果はいずれも設計値を満足するとともに、磁場分布などすべての性能について良好なものであった。試験結果の一例として、中心磁場とインダクタンスの電流依存性を図11に示す。

### 5 結 言

加速器に応用される超電導技術の実施例として、超電導マグネットについて概説した。ここで述べた各種の超電導マグネットは、加速器の性能向上の見通し・可能性を示唆するとともに、そのいくつかのものは実際に稼動中の加速器の重要な構成要素として運転されている。

加速器用、検出器用を問わず、各種の超電導マグネットは多様化する要求にこたえるうえでいずれも難度が高く、設計・製作は困難を極めたが、多くの新技術開発とともに当初の目標を達成することができた。これらの成果は、今後さらに厳しい要求をもって建設されると思われる同種の加速器の超電導技術に対応できる基礎技術を確立したものと考えられる。

終わりに、各種超電導マグネットの設計・製作に当たり、ご指導、ご協力をいただいた文部省高エネルギー物理学研究

所ほかの関係各位に対し、深謝の意を表す次第である。

#### 参考文献

- 1) K. Asano, et al. : Hitachi Review, Vol.35, No.2(1986)
- 2) T. Shintomi, et al. : The Construction and Test Results of a 10T Dipole Magnet, IEEE Trans, Nucl. Sci., NS-32, 3181(1985)
- 3) H. Minemura, et al. : Construction and Testing of a 3m diameter ×5m Superconducting Solenoid for the Fermilab Collider Detector Facility (CDF), Nucl. Inst. & Meth. 238, 18(1985)
- 4) R. W. Fast, et al. : Testing of the Superconducting Solenoid for the Fermilab Collider Detector, Proc. of Cryogenic Engineering Cryogenic Conference(1985)
- 5) R. W. Fast, et al. : Superconducting Solenoid for the Fermilab Collider Detector : Installation and Testing, Proc. of the 9th International Conference on Magnet Technology(1985)
- 6) K. Tsuchiya, et al. : Testing of a 3 Tesla Superconducting Magnet for the AMY Detector at TRISTAN, Proc. of Cryogenic Engineering Cryogenic Conference(1988)
- 7) K. Tsuchiya, et al. : A prototype Superconducting Insertion Quadrupole Magnet for TRISTAN, Advance Cryogenic Engineering 31(1986)173
- 8) 近藤, 外 : 粒子測定器用大型薄肉超電導ソレノイド, 日立評論, 66, 11, 807~812(昭59-11)

## 論文抄録

### オーステナイト系ステンレス鋼溶着金属の4Kにおける吸収エネルギーと化学組成の関係

日立製作所 森 誉延・佐藤 宏・他1名

低温工学  
22, 3, 207~212(昭62-6)

超電導コイル容器などの極低温機器を溶接する際に適用される308系、および316系のオーステナイトステンレス溶着金属について、77 Kおよび4 Kでの靱(じん)性と化学成分との関係について検討した。その結果、Niは極低温での靱性を増加させるが、Cr, Nb, OおよびPは極低温での靱性を減少させるように作用している。化学成分の異なる26種の溶着金属について、4 Kでのシャルピー吸収エネルギーと化学成分との関係を重回帰分析によって計算し、次式を得た。

$$vE = 390 - 19.9(\%Cr) + 6.00(\%Ni) \\ - 35.3(\%Nb) - 784(\%O) \\ - 1,890(\%P) + 98.8(\%Si) \\ - 3.34(\%Mn) - 9.16(\%Mo)$$

ここで、 $vE$ は4 Kでの吸収エネルギー(単位はJ), %Cr, %Niなどは各元素のmass%である。この式を用いて極低温靱性の高い溶接材料を選定することが可能である。

### 非干渉制御による超電導エネルギー貯蔵装置の有効・無効電力同時制御方式

日立製作所 白濱秀文・桜井芳美・他3名

電気学会論文誌 C  
108, 1, 17~24(昭63-1)

将来の系統安定化装置や核融合装置用パルス電源として期待されている超電導エネルギー貯蔵装置を実現するには、交流系統から流入する有効電力および無効電力を同時に制御することが不可欠である。

本論文では、2台のサイリスタ変換器の位相指令値を操作量として電力系統の安定化制御を行う系統安定化用超電導エネルギー貯蔵装置を対象に、有効・無効電力の同時制御方式を検討した。上記装置は、2入力2出力の多変数系であるとともに非線形特性を持っており、比例積分制御などの従来制御方式では制御系の実現が困難である。このため、今回は多変数制御の一手法である非干渉制御を応用した制御方式を検討し、デジタルシミュレーションおよび実験によってその効果を検証した。

### 水溶性すす触媒による石炭の液化

日立製作所 西村真琴・宮寺 博

燃料協会誌  
67, 3, 162~166(昭63-3)

鉄、モリブデン、すすおよび亜鉛の各酸化物の粉末と、それらの化合物の水溶液を触媒として添加し、クレオソート油を溶媒として太平洋炭の液化実験を行った。実験には溶融浴による急速加熱式オートクレーブを用い、水素圧力100 kg/cm<sup>2</sup>、450 °Cで30分間反応した。反応生成物はソックスレー抽出によりオイル、アスファルテン、およびトルエン不溶分に分別した。すすおよび亜鉛を含む触媒は、モリブデンを含む触媒よりも高い液化収率を示し、かつ水溶液のほうがオイル収率が増加した。特にK<sub>2</sub>SnO<sub>3</sub>の水溶液を添加するとアスファルテンが少なく、高いオイル収率が得られた。この理由として、触媒活性種である金属すすを容易に生成し、かつ微粒子化して触媒の有効表面積を高めるためと推定した。