研究論文

トリスタン加速器における超伝導四極電磁石システム

土屋 清澄, 江川 一美, 遠藤 有馨
大内 徳人, 寺島 昭男, 森田 欣之

高エネルギー物理学研究所 つくば市大穂 1-1

(1992 年 12 月 11 日受理)

Superconducting Quadrupole Magnets for the TRISTAN Mini-Beta Insertions

Kiyosumi TSUCHIYA, Kazumi EGAWA, Kuninori ENDO,
Norihito OHUCHI, Akio TERASHIMA and Yoshiyuki MORITA

National Laboratory for High Energy Physics, 1-1 Oho, Tsukuba 305

(Received December 11, 1992)

Synopsis:

In order to increase the luminosity of the TRISTAN electron-positron collider, eight superconducting quadrupole magnets are required. For this purpose, KEK has developed an iron-free quadrupole with a field gradient of 70 T/m. It has an inner diameter of 140 mm and an effective length of 1.145 m. The coils, which are of $\cos 2\theta$ type, are made from four layers of 27-strand NbTi Rutherford-type cable with Kapton insulation and firmly clamped with 316 LN stainless steel collars. Following the successful test of a prototype, nine quadrupoles were manufactured by industry, for which KEK provided all scientific and technical information about the magnet, and were installed in the TRISTAN main ring. Since they were commissioned in January 1991, the eight quadrupoles have been operated without trouble and the luminosity has been improved up to about twice the old value. The total operating time of the magnets is presently about 10,000 hours. In this paper, a brief description of the magnets and the results of the tests as well as the experience over the first two years of operation are presented.

1. はじめに

衝突型加速器の性能を示す重要なパラメータの1つにルミノシティー(加速粒子の衝突頻度)がある。この値を2倍にすれば、同一時間内に収集できる実験データ量が倍増され、運転経費と運転時間の大幅な節約が期待できる。このため、高エネルギー物理学研究所(以下、高エネルギー研と略す)では、トリスタン電子・陽電子衝突型加速器のルミノシティーを倍増する計画を進めてきた。これは、強力な超伝導四極電磁石(QCS)をトリスタン主リングの衝突点から2.5 mの位置に置き、衝突点における電子・陽電子ビームを $0.32 \text{ mm}^H \times 0.02 \text{ mm}^V$ まで絞ることにより実現しようというものである。ここで必要とされる四極電磁石

の磁場勾配は70 T/mであり、欧州原子核研究センター(CERN)の電子・陽電子衝突型加速器(LEP)における同種の超伝導四極電磁石¹⁾の約2倍の強さである。このため、世界でも例のない4層コイル構造の高磁場勾配超伝導四極電磁石を独自に開発し、蓄積された製作技術を企業に移すことにより9台(1台は予備)の超伝導四極電磁石(No. 1~No. 9)を製作²⁾した。高エネルギー研における各種テストを終えた8台の超伝導電磁石はトリスタン加速器の4つの衝突点近傍に設置³⁾され、1991年春から運転を開始し、目的としたトリスタン加速器のルミノシティーの倍増に成功した。

このQCS電磁石は、ルミノシティー増強用の四極電磁石としては世界第一級の高磁場電磁石であると共に、高エネルギー加速器用の実用超伝導電磁石として

Fig. 1 Layout of the superconducting quadrupole (QCS) system near an experimental detector of TRISTAN.

も国内初のものである。本報告では、このトリスタン用超伝導四極電磁石の設計・製作の概略とその特性および運転実績について述べる。

2. 四極電磁石の開発

2.1 設計

Fig. 1 の配置図に示すように、QCS 電磁石の先端は物理実験装置の中に位置する。そのため、実験装置のソレノイドが作る磁場との相互作用を避ける必要から、この電磁石は鉄ヨークを持たない設計となっている。他の設計条件としては、1) 定格磁場勾配は 70 T/m, 実効磁石長は約 1 m, 2) 横型クライオスタットの常温口径は 100 mm 以上, 外径は 400 mm 以下, 3) 衝突点近くに設置するため、電磁石先端部の長さを極力短くする, 4) 常伝導の加速器用電磁石と同程度の高い磁場均一度 ($\Delta B/B_2 \sim 5 \times 10^{-4}$) を持つ, 5) 磁石の冷却は 0.16 MPa の単相液体ヘリウムによる強制循環冷却⁴⁾ とし、その運転温度は約 4.5~4.7 K とする、等が挙げられる。

超伝導四極電磁石の主要諸元を Table 1 に、その断面を Fig. 2 に示す。この電磁石は 4 層の超伝導コイルとそれに電磁力相当の圧縮応力をかける SUS 316 LN 製カラーから成る。この四極電磁石の全重量は約 400 kg である。四極磁場の発生に必要な $\cos 2\theta$ 型の電流分布は Fig. 2 に示すような 4 層の扇型コイルで作成、内側の 2 層には磁場勾配の均一度を確保するための銅の楔を入れた。1 層目コイルの巻き数は 18+6 ターン、2 層目コイルは 20+7 ターンである。外側 2 層のコイルには楔は無く、それぞれ 37 ターン、41 ターンから成る。これらのコイル形状や楔の位置は、4

Table 1 Parameters of the superconducting quadrupole.

Field gradient	70 [T/m]
Current	3,405 [A]
Overall length	1,450 [mm]
Stored energy	336 [kJ]
Field uniformity (at $r=40$ mm)	
$\Delta B/B_2$ ^{a)}	$<5 \times 10^{-4}$
Max. field on the conductor	6 [T]
Coil (4-layer)	
Inner diameter	140 [mm]
Outer diameter	217.7 [mm]
Collars	
Materials	SUS 316 LN
Radial thickness, nominal	30 [mm]

^{a)} B_2 is the quadrupole field.

極磁場に対する 12 極成分および 20 極成分の割合が半径 40 mm の空間内で 1×10^{-4} 以下となるように設計した。二次元計算におけるコイル内最大磁場は定格電流において 5.67 T (Fig. 3 参照)、三次元磁場計算における最大磁場は 5.95 T でその位置は 2 層目コイルの端部である。

コイルの機械的特性の設計は電磁力および磁場均一度を考慮して行った。コイルの設計 Young 率は 3,900 MPa、低温においてコイルに必要なプリストレスは 34.3 MPa である。

カラーは 1.5 mm^t の薄板を積層したもので、各板は 4 本の SUS 316 LN 製キー棒により固定される。カラーの設計においては、1) 定格通電時の半径方向電磁力 0.88 MN/m が作用した場合の変形量を 0.1

Fig. 2 Cross section of the quadrupole magnet in a horizontal cryostat.

Fig. 3 Flux-line plot of the quadrupole magnet and constant B lines in the coil region. The numbers indicate field strength in Tesla at a current of 3,405 A.

mm 以下とする, 2) カラー内局所応力を 98 MPa 以下とする, 3) 低温状態 (~ 4.5 K, $I=0$ A) におけるコイル内プリストレスを 34.3 MPa 以上とする, 等を考慮した。

端部支持構造は磁石のクエンチ発生に大きな影響を与えるところと考えられる。したがって, コイル端部

Fig. 4 Precisely machined FRP end spacers for the quadrupole magnet.

の機械的強度を上げるため, NC マシンで精度良く加工した FRP のエンドスペーサを巻き線間に挿入する構造を採用した。エンドスペーサの設計では 1) 製作が容易な形状にする, 2) 端部コイルにより生ずる磁場の多極成分をできるだけ小さくする, 3) 端部におけるコイルの最高経験磁界をできるだけ小さくする, 等を考慮した。Fig. 4 に本電磁石の FRP エンドスペーサを示す。

2.2 導 体

導体は 27 本の極細多芯超伝導線 (素線) を撚り合

Table 2 Conductor parameters.

Cable dimensions	
Height	9.09 ± 0.05 [mm]
Small width	1.19 ± 0.02 [mm]
Large width	1.35 ± 0.02 [mm]
Number of strands	27
Strand diameter	0.683 ± 0.005 [mm]
Filament diameter	less than $9 \mu\text{m}$
RRR of stabilizing copper	180 ± 20
Cable twist pitch	70 ± 5 [mm]
Critical current in cable (at 4.2 K)	
	more than 6,500 A at 6 T
	more than 4,700 A at 7 T

おせたラザフォード・ケーブルで、約1度のキーストン角を持つ。素線外径は 0.68 mm で、フィラメント径は約 $8 \mu\text{m}$ 、フィラメント間隔は約 $1.2 \mu\text{m}$ である。また、表面状態の経年変化を防ぐため素線表面には AgSn ハンダをメッキした。導体撚り線の充填率は 0.89 である。

導体の絶縁は3層のカプトンテープから成る。導体表面に $25 \mu\text{m}$ のカプトンテープを半重ねでスパイラル状に巻き、その上に外表面に約 $25 \mu\text{m}$ のBステージエポキシ樹脂を塗布した $50 \mu\text{m}$ のカプトンテープをギャップ巻きした構造である。

導体の寸法はコイルの仕上がり寸法に大きな影響を与える。このため、加圧状態での導体の平均厚みの測定を行った。厚みは $1.261 \pm 0.006 \text{ mm}$ (at 29.4 MPa) の間に分布しており設計値 ($1.27 \pm 0.02 \text{ mm}$) を満たしていた。Table 2 に導体の主要諸元を示す。

2.3 製作

コイルの製作で重要なことは、Young 率が大きく、寸法精度の良いコイルを如何に作るか、という点である。大きな Young 率は電磁力により線材が動くのを防ぎトレーニングを減らす上で重要であり、寸法精度は良い磁場を得るのに重要である。このため、導体の圧縮量と Young 率の関係をあらかじめ測定し、この値を基に磁石断面構造やコイル製作治具の設計を行った。ここに用いた導体では、設計 Young 率を得るには平均厚みを 1.44 mm まで圧縮することが必要であった。

四極電磁石のコイルは各極4層のコイルから成り、各4層コイルは2個のダブルパンケーキ巻きコイルから構成される。ダブルパンケーキコイルは、1層目コイルの巻線、加圧昇温による導体絶縁表面のエポキシ樹脂の硬化(キュアー)、2層目コイルの巻線、1, 2

層コイルの同時キュアー、の手順で製作した。巻線時に線材にかかる張力は 392 N から 274 N までであり、巻き始めは強く、徐々に下げていった。また、コイル層間には冷却スリットのある 0.5 mm の G-10 シートを入れた。ダブルパンケーキコイルを製作した後、2つを組み合わせる再キュアーすることにより1極分のコイル(4層コイル)を成形した。この最後のコイル成形は良い磁場勾配均一度を得る上で非常に重要であった。また、本電磁石開発の初期に導体の撚り方向に磁石全体が振れる傾向が見られたので、これを避けるため、極ごとに撚り方向の異なる導体を使用した。

カラーの組み付けはコイルを立てて行った。カラーを一枚ずつ交互にはめ込んで、4方向から同時加圧ができるカラー締め付けプレス (0.2 m 長)を用いて規定寸法までカラーを締めた。この工程で重要なことは4方向から均一に加圧し、カラー締め付けを対称に行うことである。キー棒挿入時のカラー締め付け力(1方向当たり)は $0.49 \sim 0.69 \text{ MN}/0.2 \text{ m}$ であった。キー棒を挿入した後、溶接してカラーを固定した。コイルとカラー間の対地絶縁には2枚の $250 \mu\text{m}$ マイラーを用いた。

磁石先端部の長さを短くするため、各コイル間の導体接続(7か所)は全て磁石後端で行った。接続には Ag 入りハンダを用い、その長さは約 80 mm であった。この接続抵抗値は $\sim 1.5 \times 10^{-9} \Omega$ (at $3,500 \text{ A}$, 4.2 K) であった。

Fig. 5 Excitation curve of a prototype quadrupole and its training history. The numerals on the load line show the quench numbers.

Fig.6 Field error of the prototype quadrupole at 3,500 A.

2.4 開発電磁石の性能

励磁テストは電磁石を縦型クライオスタットに入れ、液体ヘリウムの浸漬冷却 (4.2 K) で行った。試作4号機のクエンチ履歴を Fig.5 に示す。最初のクエンチ電流は設計値よりわずか上の 3,450 A であったが、5回目以降のクエンチ電流は 4,230 A, 4,250 A, 4,260 A とほぼ一定となり導体の臨界電流値に達した。この値は三次元磁場計算の予想と良く一致した。4,250 A における磁石の蓄積エネルギーは 526 kJ, 導体上の最大磁束密度は 7.4 T, コイル平均電流密度は 316.7 A/mm² である。

Fig.6 は半径 40 mm, 長さ 1.5 m のハーモニックコイルで測定した試作電磁石の磁場勾配誤差分布を示す。半径 4 cm 以内で四極磁場に対する誤差磁場 ($\Delta B/B_2$) は $\sim 5 \times 10^{-4}$ 以下であり、加速器用磁石として十分な性能を持つものであった。

3. 四極電磁石の量産

高エネルギー研で開発した製作手法により工場で9台の四極電磁石を量産した。工場では磁石の機械的特性および電気絶縁の測定を、高エネルギー研では冷却励磁テストおよび磁場測定を行った。以下にそれぞれの特性を述べる。

3.1 機械的特性

量産時におけるコイル特性のばらつきを調べるためキュアー後のコイル寸法, Young 率を測定した。Fig.7 に製作したコイルの長さの設計値からのずれの分布を示す。第1層から第4層と外側コイルになるに従い、設計値からのずれは大きくなっている。設計では全て同一の導体厚みを仮定したため、巻き数が多く、コイ

Fig.7 Histograms of the deviations of the cured coil lengths from their design values.

ル端部での導体曲げ半径が大きい外側コイルで設計値からのずれが大きくなったものと思われる。Fig.8 はキュアー完了後のコイルを周方向に基準圧力 (34.3 MPa) で圧縮したときの周方向のコイル寸法 (設計値からのずれ) と Young 率を示す。この値はコイルの長手方向9カ所での測定値の平均値である。コイルの周方向寸法 (設計値からのずれ) は 0.1~0.4 mm の範囲にばらついている。原因としては導体厚みのばらつきが考えられる。Young 率はほぼ 3,200~3,700 MPa の範囲に収まっておりほぼ設計どおりであった。これらのコイルを組み合わせて四極電磁石を製作した場合、コイルの機械的特性のばらつきから発生が予測される多極成分磁場の割合は四極磁場の $\sim 2 \times 10^{-4}$ (at $R=42.1$ mm) と比較的小さなものであり、多極成分について言えば、各コイルの機械的特性は十分揃っていると言える。

3.2 クエンチ特性

3.2.1 トレーニング

超伝導磁石を縦型クライオスタットに入れ、浸漬冷却 (4.2 K) で電源リミットである 4,000 A (導体 I_c 値の $\sim 95\%$) までの励磁テストを行った。この間、各コイルの電圧信号測定を行いクエンチ発生の様子も調べた。Fig.9 に9台の磁石のトレーニングの様子を示

Fig.8 The deviations of the coil azimuthal sizes from their design values and Young's modulus of the coil. Circle and triangle correspond to right and left side of the coil, respectively.

Fig.9 Training history of the nine quadrupole magnets. The black circles indicate inner coil quenches and the black triangles indicate outer coil quenches. The numerals in the figure show which pole winding initiated the quenches.

す。どの磁石も2回目の励磁では設計電流値に達し、10回以内のトレーニングで $\sim 4,000$ Aに達している。全て同一の方法で製作したにもかかわらずトレーニングの様子は磁石によりかなり異なっている。トレーニング特性と3.1節に示すコイルの機械的特性との相関は明白でないことから、トレーニングはコイル単体の機械的特性よりも、コイルの組合せ時(カラー締め付け時)の影響を大きく受けているものと思われる。

トレーニング試験は基本的には10 A/sの励磁速度で行った。トレーニング完了後、数台の電磁石では25 A/sの励磁速度で励磁したがリトレーニングは起きなかった。また、No. 1電磁石では4,000 Aまで25 A/sで励磁した後、再び3,500 Aまで100 A/sの速度で通電したがクエンチは起きず安定であった。

3.2.2 導体の動きによる信号

各励磁テストにおいて、導体の動きを詳細に調べる

Fig. 10 Examples of canceled coil voltages just before quenching. The left side traces were recorded at the first quench of magnet No. 8. The upper trace shows details of the wire motion signal. The right side traces were recorded at the third quench of the magnet. The voltage rise due to the normal zone propagation can be seen in Pole #4 trace, however, no wire motion signal can be found.

ため内外コイルの電圧信号差から真に導体の動きに起因する信号を取り出し観測した⁵⁾。多くのクエンチ発生直前には導体の動きによる信号が観測され、また、そのときにはAE信号も見られた。これはクエンチの原因がコイル内部の導体の動きであることを示しているものと思われる。しかしながら、全く信号の見られないクエンチもあった。Fig. 10にクエンチ直前に導体の動きによる電圧信号が観測された場合の一例(#1 Quench)を示す。導体の動きによる電圧信号から、導体は $\sim 150 \mu\text{s}$ の間に振動的に1周期分動き、その後振幅は減衰していることがわかる。この信号より導体の動きを直接推定することは困難であるが、動いた導体長を素線の燃りピッチの半分(35 mm)の長さで仮定すると、導体の動きの振幅は約 $10 \mu\text{m}$ と推定される。クエンチ直前に導体の動きの信号が全く見られない場合の一例(#3 Quench)もFig. 10に示す。この場合にはAE信号も観測されない。No. 8電磁石の場合には、3, 5, 7番目のクエンチ(Fig. 9参照)がそれであった。導体 I_c 値よりも低い電流でのクエンチであることから冷却状態の微妙な変化が関係している可能性がある。

3.3 磁場特性

縦型クライオスタットによるテスト終了後、各電磁石を横型クライオスタットに入れ、トリスタン加速器での使用状態と同一の冷却状態(4.5 K, 0.162 MPa)の単相ヘリウムによる強制循環冷却で精密な磁場測定⁶⁾を行った。測定に用いたハーモニックコイルはエアベアリングによる両端支持方式のもので、電磁石軸に沿って磁場の積分値を測る2 m長のコイル(Lコイル)と局所磁場測定用の3個の0.2 m長コイル(S1, S2, S3コイル)から成っている。Lコイルの半径は47.0 mm, S1~S3コイルの半径は42.1 mmで、その回転周波数は10 Hzであった。測定の再現精度は積分磁場強度では 2×10^{-4} 、多極成分の測定では 2×10^{-5} であった。

3.3.1 電磁石軸に沿って積分した磁場特性

Fig. 11は、8台の磁石の2,540 Aにおける電流当たりの積分磁場勾配 $\int G dl / I$ (G は磁場勾配、 dl は磁石軸方向の微小長さ、 I は電流)と実効電磁石長を示す。前者のばらつきは $\pm 0.1\%$ 、後者のばらつきは $\pm 0.3\%$ とかなり小さい。これらの設計値は23.82 T/kA, 1,174 mmであり、設計値と実測値はかなり良く一致している。

Fig. 11 $\int Gdl/I$ and effective length at 2,540 A.

Table 3 に各電磁石の 4 極磁場に対する多極成分の割合を示す。これらの値は半径 47 mm におけるものである。この表から明らかなように主な多極磁場成分は 6 極 (3 N, 3 S), 8 極 (4 S), 12 極 (6 N) である。6 極, 8 極成分の存在はコイルが完全な四極対称性を保持していないことを示している。

3.3.2 電磁石直線部の磁場特性

磁石中央部においた局所コイル (S 2 コイル) より求めた 8 台の電磁石の単位電流当たりの磁場勾配は 20.804~20.651 T/m/kA (at 2,500 A) に分布している。この値からコイル半径を逆算すると 68.52~68.75

Fig. 12 Harmonics at the central part of the magnet straight section.

mm となり、電磁石によってコイル半径が 0.23 mm 程度異なっていることがわかる。また、熱収縮を考慮した設計値は 20.673 T/m/kA (コイル半径は 69.8 mm) であることから、量産電磁石のコイル半径は設計値より幾分小さくできていることが窺われる。

Fig. 12 には電磁石直線部の多極磁場成分の電流依存性を示す。12 極成分以外には顕著な電流依存性は見られない。これは電磁力により非対称なコイル変形

Table 3 Harmonic content of the integrated magnetic field at 2,540 A. ($B_n/B_2 \times 10^{-4}$)

	H 1	H 2	H 3	H 4	H 5	H 6	H 7	H 8
3 N	1.1	0.7	1.3	-2.2	0.2	0.5	1.7	0.6
S	0.6	-5.4	-3.5	-2.1	-2.5	-10.0	-6.3	-6.0
4 N	-0.5	-0.7	0.1	-0.4	-0.3	-0.5	-1.0	-1.0
S	-5.9	-3.8	1.3	-0.5	-0.6	-0.8	0.9	-2.0
5 N	-0.1	-0.4	-0.3	-0.1	0.5	-0.1	-0.5	-0.3
S	0.8	1.1	-0.3	0.3	-0.1	-0.5	-0.2	0.2
6 N	-3.3	-2.7	-2.6	-3.4	-2.6	-2.8	-2.6	-2.0
S	-0.9	-0.6	0.4	0.1	0.1	0.1	-0.1	-0.2
7 N	0.3	-0.1	0.3	-0.2	0.2	-0.2	0.2	-0.2
S	-0.3	-0.4	0.0	-0.2	0.1	-0.3	-0.2	-0.1
8 N	-0.1	0.0	0.1	-0.1	-0.2	-0.0	-0.3	-0.3
S	-0.5	-0.1	0.1	0.0	-0.2	-0.3	0.2	-0.2
9 N	0.1	-0.1	-0.3	-0.2	-0.2	-0.0	0.1	-0.3
S	0.3	0.1	0.1	0.1	0.2	-0.3	-0.1	-0.3
10 N	-1.3	-1.3	-1.2	-1.4	-1.4	-1.2	-1.2	-1.4
S	-0.1	-0.1	0.0	0.2	-0.2	-0.2	0.1	0.1

The harmonic content is expressed as the ratio of the harmonic field strength to the quadrupole field at the radius of 47 mm.

Table 4 Major harmonics at the central part of the magnet straight section and estimated coil deformations.

Magnet	Harmonics at $r=42\text{mm}$ ($B_n/B_2 \times 10^{-4}$)				Estimated Deformation
	3 N	3 S	4 N	4 S	
No. 1	-3.3	-2.6	0	-5.9	$\Delta r=0.17$ mm
No. 2	-2.1	-6.0	0	-2.5	$\Delta r=0.14$ mm
No. 3	0	-4.7	0	0	$\Delta r=0.08$ mm
No. 4	0	-6.3	0	0	$\Delta r=0.10$ mm
No. 5	0	-4.3	0	0	$\Delta r=0.07$ mm
No. 6	0	-11.3	0	0	$\Delta r=0.18$ mm
No. 7	0	-9.3	0	0	$\Delta r=0.15$ mm
No. 8	0	-8.0	0	0	$\Delta r=0.13$ mm

は生じていないことを示している。超伝導導体の磁化の影響を差し引いた12極成分は電流の2乗に比例する変化を示している。これは電磁力によりコイルが四極対称性を保持した変形をしていることを示すものである。この12極成分の大きさ(0 Aと3,500 Aとの差 $\sim 2 \times 10^{-4}$)からコイル変形を推測すると3,500 A

通電時には横方向(X軸方向)に $50 \mu\text{m}$ 膨らみ、円周方向(θ 方向)に $23 \mu\text{m}$ 縮んでいることになる。この12極成分の変化量は8台の電磁石でほぼ同一であった。

次にコイル直線部の主要な多極磁場成分(2×10^{-4} 以上のもの)の大きさからコイルの変形を推測してみ

る。観測された主要な多極磁場は四極対称性の崩れからくるものであり、電流依存性はほとんどない。したがって、1,000~3,500 A の多極磁場の平均値を用いて各電磁石の多極磁場を再現できる コイル 変形モード、および、変形量を求めた。計算に用いた平均多極磁場成分、および推定されたコイル変形を Table 4 に示す。これらの変形モードや変形量は電磁石製作手法およびその精度からは十分考えうる範囲のものである。これらの結果から、量産した四極電磁石の主な多極成分はコイル組立時に生じた対称性の崩れに起因していると思われる。

4. 運転実績

8 台の超伝導四極電磁石は、トリスタン加速器の構成要素として既に約 10,000 時間以上実用に供されてきた。この間、磁石は 5 回の冷却・加温サイクルと、約 1,800 回の励磁 サイクル (650 A-2,600 A-650 A) を経験したが、リトレーニング (3,500 A 以下での自発的クエンチ) は無かった。現在までに、6 回のクエンチを経験した。それらは全て高エネルギーの電子・陽電子ビームの制御異常時に発生し、かつ、内側コイルからクエンチが発生していることから、全てビームのエネルギー損失^{7,8)}(いわゆる beam induced quench) によるものと思われる。今後、ビーム強度の強い加速器での超伝導電磁石応用が広がることを考えると、ビーム損失量とクエンチとの定量的相関を明らかにすることが望まれる。

5. ま と め

衝突型加速器のルミノシティー向上用の高磁場勾配超伝導四極電磁石を開発した。それは 1) 鉄ヨークの無い電磁石で、コイル内径 140 mm の空間に 70 T/m の高磁場勾配を発生する、2) 世界に例のない 4 層構造コイルの超伝導四極磁石である、3) ダブルパンケーキ巻コイルの採用によりコイル間の導体接続箇所を減らしている、4) 右撚り、左撚りの 2 種類の成形撚線を用いて電磁石全体の振れを防いでいる、等の特長

を持つものである。

この製作技術を工場に技術移転して 9 台の電磁石を量産し、その性能試験を行った結果、全ての電磁石は 2 回以内のトレーニングで設計電流に到達し、磁場特性も加速器の要求を満たした。これは、開発した電磁石製作技術の妥当性を示すものと思われる。

実用に供された 8 台の超伝導電磁石は既に 10,000 時間以上安定に運転され、トリスタン加速器のルミノシティー倍増に寄与している。このような高ルミノシティー化は超伝導電磁石の応用なくしては達成できないことであり、超伝導技術の有効性を実証するものであった。

この電磁石の開発、量産電磁石の性能テストでは高エネルギー物理学研究所工作センター、およびトリスタン電磁石グループの諸氏にお世話になり、ここに感謝の意を表します。また、AE 計測を行っていただいた横浜国立大学塚本研究室の方々、量産電磁石の製作および機械的特性の計測をしていただいた(株)日立製作所に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) P. J. Ferry, et al.: Proc. 11th Int. Conf. on Magnet Technology (MT-11) (1989) 253
- 2) K. Tsuchiya, et al.: IEEE Trans. Magn. **27** (1991) 1940
- 3) K. Endo, et al.: IEEE Trans Magn. **28**(1992) 542
- 4) K. Tsuchiya, et al.: Adv. Cryog. Eng. **37 A** (1991) 667
- 5) T. Ogitsu, K. Tsuchiya and A. Devred: IEEE Trans. Magn. **27** (1991) 1940
- 6) K. Egawa, et al.: Proc. of IEEE Particle Accelerator Conf. (1991) 2462
- 7) T. Tominaka, et al.: Cryogenics **22** (1982) 161
- 8) Ph. Lebrun, et al.: Proc. of XVth Int. Conf. on High Energy Accelerators (1992)