薄肉超電導マグネットの問題点

森 茂 樹

筑波大学物理工学系 茨城県新治郡桜村天王台1-1

(1984年7月10日受理)

Technical Reviews of Thin Superconducting Magnets

Shigeki MORI

Institute of Applied Physics, University of Tsukuba
Sakura, Niihari, Ibaraki 305, Japan

(Received July 10, 1984)

Synopsis:

Large superconducting solenoid magnets are used in high energy physics experiments with colliding beam accelerators. Since solenoids are surrounded with other detectors, they are required to be thin in terms of radiation length in order for particles produced by interactions to pass through the coils with minimal absorption. Various techniques have been developed for construction of large, thin superconducting solenoids. First, heavier materials of solenoid components are substituted by lighter materials of aluminum alloys. Second, the forced flow cooling method of two-phase helium is applied since the pool cooling requires a substantially thicker cryostat arrangement. Since such solenoids are not cryogenically stable and since they hold large stored magnetic energies of about 10×10^6 J or more, it is essential to make them intrinsically safe against quenches.

The CELLO solenoid used pure aluminum as the stabilizer of the NbTi/Cu superconductor, while the TPC solenoid used the conductive bore tube for diverting the magnetic current from the superconducting coil to protect the coil against quenches. The CELLO-type aluminum stabilized conductor can be fabricated intrinsically stable and it has the advantage that the maximum voltage and temperature at the coil during quenches can be easily controlled by optimizing the amount of aluminum stabilizer.

The aluminum-stabilized NbTi/Cu superconductor with the EFT method is used in the CDF solenoid ($3\text{ m}\phi \times 5\text{ m}$, 1.5 T, 30×10^6 J). Two solenoids for TRISTAN experiments (TOPAZ and VENUS) also use conductors fabricated essentially with the same method as in the CDF solenoid. All the three solenoids do not possess permanent inner bobbins in order to reduce the coil material thickness. The shrink-fit method is used for the CDF solenoid, while the inner winding method is used for the TOPAZ solenoid.

Various technical difficulties with construction of large, thin superconducting solenoids will be described.

1. はじめに

近年、高エネルギー物理学の研究で衝突型加速器を用いた素粒子物理実験が重要な位置を占めてきているが、衝突によって生成される荷電粒子の運動量解析に大型のソレノイド電磁石が使用されることが多い。

一般にソレノイドの内部に荷電粒子の飛跡を測定するチェンバーを置き、その外側に粒子のエネルギーを測定するカロリメーター等の検出器が置かれるので、外側の検出器の効率と性能を良くするために、ソレノ

イド自身による粒子の吸収を極力小さくすることが要求される。特に、電磁シャワーカロリメーターのエネルギー分解能と電子の識別能力を上げるために、できるだけ輻射長にして薄いソレノイドが望まれる。磁場強度は各々の実験の目的によって選ばれるが、経済面も考慮して1から1.5テスラが使用される。

以上の条件を充たすソレノイドの製作は常電導コイルでは非常に困難で、超電導コイルの使用が不可欠となる。特に輻射長に関して薄肉にする要請から、原子番号の小さい物質が望ましく、アルミニウム(1輻射

長=8.9cm)が、銅(1 輻射長=1.43cm)やステンレス鋼(1 輻射長=1.76cm)より適していることが多い。磁束密度が比較的に高くなくことから、超電導線材として NbTi が主に使われる。NbTi に直接アルミニウム安定化材を被覆する方法は技術的に確立していないので、銅比の小さい NbTi/Cu 複合多心線超電導線にアルミニウム安定化材を付加する方法が用いられる。

通常使用される浸漬冷却法、即ち、超電導線を直接液体ヘリウム槽の中にじゃぶ漬けにする方法では、クライオスタットが構造的に厚くなり、輻射長にして肉厚になる傾向が強い。従って、強制間接冷却法が採用され、1 気圧に近い2 相流ヘリウムが使用される。

間接冷却法では非常時のコイルのクエンチは避けられず、ソレノイド設計の最大目標はクエンチに対して、どのような条件の下でも安全にする事である。大体の目安として、クエンチの時にコイルの最高温度を約100K以下、最高対地電圧を約1kV以下に抑える必要がある。コイルの局所温度が短時間に100K 以上になると熱膨張による機械的歪みが大きくなり望ましくない。

この解説では、大型薄肉超電導ソレノイドに限定して、これまでにどのような技術開発がなされたか、特に現在フェルミ国立加速器研究所で建設中の陽子反陽子衝突型検出器* (以下、CDF) のマグネットとして、最近製作された直径3 m、長さ5 m、磁場強度1.5 テスラの CDF ソレノイド**を中心に問題点を述べる。

2. 大型薄肉超電導ソレノイド

衝突型加速器の検出器の一例として、CDF検出器の

Fig. 2 Section view of the coil and cryostat of the CDF solenoid. One of the six axial supports is shown.

Fig. 1 Side view of the CDF detector.

断面図をFig. 1に示す。マグネットの主要部はコイルクライオスタット、コントロールジュワー、チムニー

* Design Report for the Fermilab Collider Detector Facility (CDF), Fermilab, Batavia, Illinois, USA, August 1981 (unpublished).

** Design Report for an Indirectly Cooled 3-m Diameter Superconducting Solenoid for the Fermilab Collider Detector Facility, Fermilab, Batavia, Illinois, USA, October 1982 (unpublished).

Table I Design parameters of recent large, thin superconducting solenoids.

	CELLO	TPC	CLEO	CDF	TOPAZ	VENUS
Inner diameter (m)	1.5	2.0	1.9	2.9	2.7	3.4
Overall length (m)	3.5	3.4	3.4	5.1	5.4	5.5
Central field (T)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.2	0.75
Number of turns	1400	2000	2300	1200	1300	650
Number of conductor layers	1	2	2	1	1	1
Current (A)	3100	2100	2300	5000	3600	5000
Inductance (H)	1.5	4.8	3.7	2.4	3.0	0.9
Stored energy (10^6 J)	7.0	10.7	9.4	30	19	11
Conductor						
NbTi/Cu/Al ratio	1:1:11	1:1.8:0	1:3.9:0	1:1:21	1:1:20	1:1:20
Current density (10^7 A/m ²)	14	88	42	6.4	5	5.2
Al stabilizer	Solder	—	—	Extrusion	Extrusion	Extrusion
Inner bobbin	Yes	Yes	Yes	No	No	No
Thickness (radiation leng.)	0.5	0.4	0.7	0.8	0.7	0.7
Cold mass (tons)	1.4	1.4	1.6	5.6	4	4
Completion year	1979	—	1982	1984	1984	1985
Installation	DESY	SLAC	CORNELL	FNAL	KEK	KEK

とハドロンカロリメーターの一部をなすリターンヨークからなる。Fig. 2 に、CDF ソレノイドの端部の断面図を示す。Table I に、最近製作された大型薄肉超電導ソレノイドと、現在製作が進行中のものの主要パラメーターを示す。これら以前に浸漬冷却法を採用して製作された ISR*, PLUTO¹¹ ソレノイドについては説明を省略する。表に示されたソレノイドは全て強制間接冷却法を採用し、クエンチで熱破壊、絶縁破壊が起こらないように対策を講じている。間接冷却法によってクライオスタットを薄くすることができた。又、ソレノイドの冷却開始時の温度分布を十分に制御できる事と、クエンチの際に生じる高圧ヘリウムに対する安全性も充分確保できる。冷媒として 1 気圧に近い 2 相流ヘリウムを使用しているが、これによる利点は 1 相流超臨界ヘリウムに比べて低温であることと、入口と出口の温度差が小さいこと、又、冷却にヘリウムの気化熱を使うので、ヘリウム流量が少なく済む。

CELLO ソレノイド²¹⁾は CEN (Saclay) で開発、製作された。Fig. 3(a) に超電導線の断面図を示すが、単線構造の NbTi/Cu 超電導線に高純度のアルミニウム安定化材を半田付けしている。高純度アルミニウムは、低温及び高磁界下で電気伝導度と熱伝導率が銅に比較

して相当大きく、更に輻射長が長い利点がある。クエンチの際にジュール熱による局所的な温度上昇を抑え、同時に、クエンチ伝播速度を早めてコイルの熱損

Fig. 3 Cross sections of aluminum stabilized superconductor. (a) CELLO solenoid, (b) CDF R&D solenoid, and (c) a conductor joint of the CDF R&D solenoid.

* W. Eschricht et al., The Operation of a Three Coil 5 Megajoule Superconducting Magnet System at the Electron Positron Storage Ring DORIS, a DESY Report, Hamburg, W. Germany, 1976 (unpublished).

傷を防ぐ役割をする。CELLO ソレノイドのコイルは内筒ボビンに単層で巻かれ、その上を支持バンドで補強する。本体ではコイル端部で NbTi/Cu 線に断線箇所が発見され修理された。又、内筒ボビンとコイルの接触面で数ヶ所の絶縁不良が検出され修理を必要としたが、設計に近い磁場強度で運転に成功している。

TPCソレノイド³⁾はLBL(米国)で開発された。CELLO ソレノイドとの主な相違点は、導線として NbTi/Cu を使用して、アルミニウム安定化材を併用していない。その結果、超電導線の設計電流密度は $9 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ で、CELLO ソレノイドの $1.4 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ に比較して非常に高い。クエンチに対する対策はコイルが巻かれている導電性の内筒ボビンに、磁気誘導を利用してコイルを流れている電流を転移させて、大部分の蓄積磁気エネルギーを超電導線以外の部分で吸収させる。内筒ボビンの加熱によって、コイル全体を常電導にするクエンチバック現象が起こりコイルを保護する。更に磁気誘導の効果を高めるために、極めて高い導電性をもつ高純度アルミニウム線をコイルと同じ方向に巻いて短絡回路を作り、クエンチの際にはこの回

路に電流を速やかに転移させる方法を併用する。この方法では、クエンチの時にコイルから他の部分への電流の転移速度が、コイルと直列の回路を作っている抵抗値に依存するので、保護回路が作動しない非常の際に問題を起こす可能性が残る。又、一般に CELLO 型に比べて大きい対地絶縁性が要求される。最初に製作されたTPCソレノイドは不幸にして製作工程中にコイルに付着したと思われる微小な金属片のために絶縁破壊を起こして失敗に終わった。

CLEO ソレノイド⁴⁾は TPC ソレノイドをプロトタイプとして製作された。運転の当初において、パワーリード部分で問題があったが運転に成功している。

CDF, TOPAZ ソレノイド⁵⁾は最近完成し、VENUS ソレノイド⁶⁾は現在製作中である。CDF ソレノイドの付加的パラメーターを Table II に示す。TOPAZ と VENUS ソレノイドは高エネルギー物理学研究所で建設中の e^+e^- 衝突型加速器 TRISTAN 実験用の2つのマグネットである。これらのソレノイドに共通している点は、超電導線として高純度アルミニウム安定化材を用いたCELLO型を採用しているが、従来の半田付け

Table II Parameters of the CDF solenoid which are not given in Table I

Items	Parameters
Aluminum stabilized superconductor	
NbTi filaments	Nb—46.5 Ti, $50 \mu\text{m}\phi \times 1700$
Twist pitch	25mm
NbTi short sample current density	$2.6 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ at 2T, 4.2K
Purity of aluminum stabilizer	$\geq 99.99\%$
Overall short sample current	10.4kA at 1.5T, 4.2K
Vacuum vessel	
Material	5083 aluminum
Thickness; outer/inner	20.0mm/6.4mm
Radiation shields (inner and outer)	
Material	6061-T6 aluminum
Thickness	2mm
Outer support cylinder	
Material	5083 aluminum
Thickness	16mm
Liquid nitrogen cryogenics	
Cooling mode	Forced flow
Steady state heat load	$\sim 600\text{W}$
Liquid Helium cryogenics	
Coil cooling mode	Forced flow two phase He $10 \sim 20 \text{ g/s}$ at 1.2atm
Steady state heat load	$40\text{W} + 14 \text{ L/h}$
Inlet/outlet quality	$\sim 80\% / \sim 70\%$
Length of cooling loop on magnet	$\cong 140\text{m}$
Diameter of cooling tube	20mm ID
Cooldown time	$\leq 6 \text{ days}$ 300K to 80K $\leq 2 \text{ days}$ 80K to 4.2K

法に代わって押し出し被覆方式によるアルミニウム安定化NbTi/Cu超電導線を使用していることである^{7b)}。CDFソレノイドで最初に開発された押し出し被覆方式による超電導線は、電気的特性や機械的接合強度、更に品質の一様性という点で優れている。

もう一つの共通点は、更に薄肉にする試みとして内筒ボビンを持たない構造になっている。次章でCDFソレノイドを中心にして大型薄肉超電導ソレノイドの問題点を詳しく述べる。

3. 各主要部の問題点

衝突型加速器の実験では、測定器全体が非常に複雑なこともあり修理などが困難なため、まず第一にマグネットは安定に長時間運転できることが要求される。第二に、実験データの質を向上するために、できるだけ薄肉にすることである。

CDFソレノイドの設計では以上のことを考慮して、特にアルミニウム安定化超電導線の工法に重点を置いて開発が進められた。クエンチ時のコイルの最高温度を約100K以下、最高対地電圧を約500V以下に抑えることがソレノイドの安全性から望まれる。これらの条件は保護回路の作動の有無に関わらず満たされなければならない。そこで、超電導線は安定化材を十分に備えたCELLO型が選ばれた。新しく開発されたアルミニウム安定化超電導線の種々の特性を検討する目的で、直径と長さが各1mのR&Dソレノイド⁷⁾を試作した。この章では、その試作結果も含め薄肉超電導ソレノイドの主要部分の問題点を検討する。

3.1 アルミニウム安定化 NbTi/Cu 超電導線

Fig. 3(b)にR&Dソレノイドに使用された押し出し被覆方式によるアルミニウム安定化 NbTi/Cu 超電導線の断面図を示す。この方式は架空送電線用アルミニウム被覆鋼線の製造に使用されるEFT法(Extrusion with Front Tension, 前方張力付加押し出し法)を応用して、NbTi/Cu超電導線の表面を形成している銅と、高純度アルミニウムを剪断摩擦接合したものである。NbTi/Cu 複合多心線超電導線は銅の安定化材としての機能にそれ程頼る必要がないので銅の比率を極力小さくしている。Fig. 4に Al/Cu 界面のX線マイクロアナライザーによる線分析結果を示す。加熱時間や温度条件によって、界面で Al Cu の脆い2金属間化合物が形成され接合強度を弱める恐れがある。開発された被覆線は約1 μ mの2金属拡散層を持ち化合物層の存在が認められず、約3 kg/mm²の界面剪断強度を持つ。界

面抵抗は単位長当り、 $2.4 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{cm}$ で同じ条件のもとで測定された半田付け法に比べて約 $1/10$ である。EFT法によるアルミニウム被覆の前後では、超電導線の特性の劣化はない。

単線構造を持つ NbTi/Cu 線では、インクルージョンなどによる断線事故や不良箇所の問題を避けるために、複数の NbTi/Cu 線を導線内に挿入する案や、多重撚線を使用することが考えられたが、アルミニウムの被覆工程が複雑になり、接触面が隙隙を生じる可能性が大きいので採用しなかった。EFT法では、NbTi/Cu 超電導線をかなりの張力で引くので、インクルージョンなどのため機械的に弱い箇所は工程中に断線するので容易に発見される。

通常、費用の面でコイルを巻く前に超電導線全長の低温特性検査は不可能に近い。そこで、NbTi/Cu線は製造工程の制約で単位長さが1~1.5kmになるので、両端の短試料試験を行うことと、超電導線の最大電流値に十分な余裕を持たせることが必要となる。

アルミニウム安定化 NbTi/Cu 超電導線では、高純度アルミニウムの低温における高い熱伝導率のため、導線内の局所的熱源に対して、温度上昇が抑えられる。外部条件にもよるが、モデル計算によると、導線内で0.5Wの点熱源に対して温度上昇が0.5K以下になる。

Fig. 3(c)に CDF・R&D ソレノイドで考案された溶接法による接続部の断面図を示す。溶接法は信頼性が高く、4.5Kで接続当りの抵抗値を $10^{-9} \Omega$ 以下に保つ事が容易で半田付け法に比べ一段と優れている。

3.2 クエンチ特性の計算機解析

超電導マグネットのクエンチ特性を研究するために種々の計算機解析が行われているが、ここではCDF・

Fig. 4 Intensity of characteristic X-rays of aluminum and copper by an X-ray micro-analyzer at the aluminum-copper boundary of the EFT aluminum-stabilized NbTi/Cu superconductor.

Fig. 5 Equivalent circuit of the magnet system of the CDF solenoid used in the computer analysis.

R&D ソレノイドの測定結果を基にして行われた計算結果を紹介する⁹⁾。Fig. 5 にクエンチ時のソレノイドの等価回路を示す。 R_{ext} は保護抵抗で通常スイッチ S は閉じているが、クエンチ検出直後に S を開く。従って保護回路が作動しない状態は $R_{ext}=0$ に対応する。 R_m はクエンチによってコイルに生じる抵抗で、クエンチの伝播と共に大きくなる。 R_2 は支持内筒の円周方向の抵抗である。

まず、支持内筒に電流が流れない状態 ($R_2 \rightarrow \infty$) の最高対地電圧と温度を Figs. 6, 7 に、 R_{ext} と超電導線の幅 (コイル半径方向) のパラメーターとして示す。超電導線の厚さ (コイル軸方向) は体積比 5% の絶縁材を含めて 4.19 mm である。 R_{ext} が大きくなると最高電圧はスイッチ S を開いた直後に R_{ext} によって起こる。幅が大きい程コイルは安定する。これらの値はクエンチの発生場所やクエンチ伝播速度に依存するが、影響はそれ程大きくない。

CDF ソレノイドのように支持外筒がアルミニウム合金の場合、4.5 K で $R_2=3.6\mu\Omega$ となり支持外筒に電流が流れそのジュール熱によってクエンチバックが起こる。Figs. 6, 7 に幅 2 cm の超電導線に対する最高電圧と温度の関係を示す。明らかに、クエンチバックは電圧と温度上昇を小さくする。電流の減衰時間も早くなり 10~20 秒になる。保護回路が作動しない非常時でも、最高電圧 140 V、最高温度 180 K となり、温度に関しては多少の不満が残るが、CDF ソレノイドの超電導線幅は 2 cm と決められた。

支持外筒が電導性の場合はクエンチバックによってクエンチ特性は有利になるが、ソレノイドの励磁速度を速くする必要のある場合に、誘導電流によって支持外筒が加熱される。例えば、CDF ソレノイドを 10 分間

で励磁する場合に、約 100 W の熱量が発生する。従って、励磁速度を速くする必要のある場合には、 R_2 を大きくし超電導線の幅を大きくする必要がある。コイルに発生する渦電流によるジュール熱は導電性支持外筒に比べ無視できる。

Fig. 6 Computed maximum voltages as a function of the external resistance with and without the quench-back effect.

Fig. 7 Computed maximum temperature rises as a function of the external resistance with and without the quench-back effect, 30 seconds after the onset of a quench.

クエンチの際にソレノイド各部で吸収されるエネルギーの割合は R_{ext} の値に依存し、 R_{ext} が大きい程ソレノイド自身が吸収するエネルギーが小さくなる。 $R_{\text{ext}}=0.1\Omega$ では、コイルで約 50%、支持外筒で約 6% の蓄積エネルギーが吸収される。

3.3 ソレノイドに働く応力

CDF ソレノイドを例にとり、ソレノイドに働く応力を説明する。励磁している時にコイルの半径方向に外向きの磁気圧力 $P=B^2/2\mu$ が働く。 $B=1.5\text{ T}$ では $P=8.95\times 10^5\text{ Pa}=9.1\text{ kg/cm}^2$ で約 9 気圧の圧力になる。支持外筒の厚さ t_s はこの圧力によって決められ、JIS 規格から $t_s\geq 1.6\text{ cm}$ となる。アルミニウム安定化超電導線の幅 t_e 、コイル半径 R とすると、フープ応力 σ 、歪み ε は、

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R} = \frac{\sigma}{E} = \frac{1}{E} \times \frac{PR}{t_e + t_s}$$

で与えられる。 E はアルミニウムのヤング率で、4.5K で $8.3\times 10^3\text{ kg/cm}^2$ である。 $t_e=2\text{ cm}$ 、 $t_s=1.6\text{ cm}$ 、 $R=150\text{ cm}$ では、 $\sigma=380\text{ kg/cm}^2$ 、 $\varepsilon=0.04\%$ 、 $\Delta R=0.067\text{ cm}$ となる。仮に支持外筒が全ての圧力を受けるとすると、外筒では $\sigma=860\text{ kg/cm}^2$ 、 $\varepsilon=0.1\%$ となる。アルミニウム安定化超電導線の許容応力は、約 300 kg/cm^2 であるが、外筒と圧力を分担させることにより歪みを 0.1% 以下に保つことができる。焼き詰め加工の場合、締め代を適当に選ぶことによって、コイルと支持外筒の間の接触圧力が決められる¹⁰⁾。CDF ソレノイドでは 0.9mm の有効締め代に対して接触圧力は 2.7 kg/cm^2 となり、励磁中の応力はコイルで 2.4 kg/cm^2 、支持外筒で 6.7 kg/cm^2 となる。

ソレノイドの両端部である程度磁場が半径方向に漏れるため超電導線はコイルの軸方向に圧縮力を受ける。支持外筒との摩擦による減衰を無視すると、この圧力は端部から蓄積されて、CDF ソレノイドでは約 100 トンに達する。従って、コイル製作過程で軸方向の加圧によって、絶縁材や接着材を充分締めつけコイル全体として軸方向の有効ヤング率を大きくする必要がある。ヨークのない場合、同一励磁電流では圧縮力は約 7 倍大きくなるので充分注意を要する。

その他に、後述するようにヨークの中心からの変位によって生じる不平衡力があり、大型のソレノイドで支持系統の設計で特に重要になる。

3.4 内筒ボビンを持たないソレノイド

従来のソレノイドは製造工程上の理由から巻棒である内筒ボビンに超電導線を巻いてコイルを作り、外側

を支持バンドで何層か巻く方式を採った。この構造では電磁力は外部支持バンドで支えられ、励磁によって内筒ボビンには半径方向の力は加わらない。コイルには外向きの力が加わるので、コイルが内筒ボビンから剝離する可能性が生じる。更に、コイルの予備加圧が大きすぎると、内筒ボビンが挫屈する危険も出る。

以上の欠点を避けて、更により薄肉のソレノイドを製作する必要から、最近内筒ボビンを持たない薄肉ソレノイドの工法が開発された。CDF ソレノイドではコイルを仮巻棒で従来の方法で製作し、次にアルミニウム合金の支持外筒に焼き詰め加工した後に、仮巻棒を取りはずす工法を用いる¹⁰⁾。TOPAZ ソレノイドでは支持外筒を巻棒として外筒の内側から超電導線を巻く工法が開発された⁹⁾。コイルと支持外筒との間の適当な予備加圧、冷却時の熱伝導を良くするために、すき間のない接着が必要となり高度の技術が要求される。

3.5 液体ヘリウム冷却管

CDF ソレノイドでは液体ヘリウム冷却管を支持外筒の外側に溶接する。重力による液面振動によって、冷媒の不均一分布を避けるため、冷却管はソレノイド軸方向に水平に 40cm の間隔で配管されている。焼き詰め法によるコイルと支持外筒の間の接触面圧も手伝って CDF ソレノイドでは熱的安定性が極めて高いことが確認されている。外部支持バンド構造を持つソレノイドでは、外部表面の凹凸のため冷却管の溶接が困難である。

間接冷却法では、局所的熱浸入は避けなければならないので、支持系統など定常的熱浸入がある所では、浸入部の近くに液体ヘリウム冷却管を配置する等の配慮を要する。

3.6 支持系統

ソレノイドが完全にヨークの中心に置かれれば、原理上、ソレノイド全体に加わる電磁力は打ち消し合うが、ヨークの不均一性などの理由で、軸と半径方向の変位に対して不平衡力が生じる。CDF ソレノイドでは軸方向に 17.6 MN/m 、半径方向に 12.3 MN/m の不平衡力が働く。従って、支持系統はこれらの変位力より大きい剛性を持つと同時に、最大許容変位 (約 2cm) に対して十分な強度を持たねばならない。

室温から 4.4K まで冷却すると、CDF ソレノイドではコイルと支持外筒の半径が 0.65cm、長さが 2.1cm だけ収縮する。従って、軸方向の支持は一端で 6 本の支持棒でなされ、半径方向は両端で各 12 本の支持棒でなされる。軸、半径両支持棒両端の球状ベアリングで

半径方向の熱収縮による影響を吸収する。支持棒の材質はインコネル 718 が使用され、4.4K で熱負荷は約 6 W と推定される。

3.7 真空容器

真空容器の外筒の厚さは挫屈強度から決まり、挫屈に強い蜂巢構造のアルミニウム材が使用されることもあるが、CDF ソレノイドでは真空漏れなどの危険を避けるため、単に 2 cm のアルミニウム板を円筒加工している。又、真空の問題を解消するため、“O”リングを使用せず全て溶接密封を行っている。

VENUS ソレノイドでは、輻射長の面で有利な厚さ 3 cm の CFRP 材を使用するが、真空漏れに対して構造上の問題が残らないとは言えない⁷⁾。

3.8 チムニー、コントロールジュワー

Fig. 1 に示した様にコントロールジュワーはマグネットヨークの外側に置かれ、液体ヘリウムと窒素の流量制御と、電流リードの接続、真空系や種々計測線の接続を行う。約 60 l の液体ヘリウム溜を持ち、入力液体ヘリウムの熱交換と J-T バルブによる圧力温度調節が行われる。

チムニーはコイルとコントロールジュワーを接続する真空容器で、超電導線の電流リード、冷却管、計測線を内蔵する。他の測定器との干渉を避けるため、できるだけ容積を取らない構造が要求される。

3.9 計測装置

クエンチ検出のための電圧端子、各種温度計、特に支持系における応力計測、真空計などが必要となる。電圧端子の場合、電気的ショートに結びつく可能性を持つので、必要最少数に限るべきである。

4. むすび

衝突型加速器の実験に使われる大型薄肉超電導ソレノイドの現状と問題点を解説したが、最近日本で開発及び製作されたソレノイドの特徴は、安全性を第一の条件とし、その枠内で薄肉にする努力をしている点である。強制間接冷却法を採用し、非常時に起るクエンチに対して、コイルの対地電圧と温度上昇を安全な範囲に抑えるようにアルミニウム安定化材の量を決定している。CDF ソレノイドで開発された EFT 法によるアルミニウム安定化 NbTi/Cu 超電導線は、電気的特性と機械的特性が半田付け法に比べて一段と優れてお

り、製作工程中の品質管理も容易である。内筒ボビンなしのソレノイドの工法で、CDF ソレノイドは焼き嵌め法、TOPAZ ソレノイドでは内面巻き法を開発した。電磁力を強度の違う支持外筒とコイルで分担させるためには、両者の間で適当な予備圧力が必要になる。焼き嵌め法では締め代を調整して行われる。

真空容器の外筒の厚さは挫屈強度によって決まるので、種々の方法が使われているが、CDF ソレノイドでは真空漏れに対する安全性とコストパフォーマンスの点から、アルミニウム板を使用し接続は全て溶接で行っている点を注目したい。

これまで衝突型加速器用のソレノイドについて述べたが、輻射長にして短い薄肉超電導マグネットは X 線など放射能の強い環境では、エネルギーの吸収が少ないため適している。又、間接冷却法はクライオスタットをコンパクトにできるので、複雑な構造を要求される超電導マグネットに適している。

最後に、CDF ソレノイドの製作と技術開発で御協力を頂いた(株)日立製作所、日立電線(株)をはじめ関係者各位に対し深く感謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) M. Morpurgo: Cryogenics, February 1977, p. 89
- 2) H. Desportes, J. Lebars and Mayaux: Adv. Cryog. Eng. 25 (1980) 175
- 3) M.A. Green, P.H. Eberhart, R.R. Ross and J. D. Taylor: Adv. Cryog. Eng. 25 (1980) 194
- 4) D. Andrews: Adv. Cryog. Eng. 27 (1982) 143
- 5) A. Yamamoto et al.: MT-8 (1983) 337
- 6) M. Wake et al.: MT-8 (1983) 347
- 7) H. Hirabayashi et al.: Jpn. J. Appl. Phys. 20 (1981) 2243 and 21 (1982) 1149
- 8) S. Suzuki, Y. Miyake, M. Nagai and H. Moriai: Hitachi Densen 1982.12 No. 2, p. 57
- 9) T. Kishimoto, S. Mori and M. Noguchi: Jpn. J. Appl. Phys. 22(1983) 57 and S. Mori and M. Noguchi: Jpn. J. Appl. Phys. 22 (1983) 812
- 10) H. Minemura et al.: Nucl. Instrum. Methods 219 (1984) 472