最近の極低温用電気絶縁材料

門 谷 建 蔵

日立化成工業株式会社 茨城県日立市東町4-13-1

(1984年11月27日受理)

Recent Progress in Electrical Insulating

Materials for Cryogenic Usage

Kenzo KADOTANI

Yamazaki Works, Hitachi Chemical Co. Ltd.
13-1, 4-chome, Higashi-cho, Hitachi-shi, Ibaraki-ken

(Received November 27, 1984)

Synopsis:

Electrical insulators for various types of superconducting magnets are reviewed. Epoxy resins and their composites have been widely used for magnets of radiation resistance up to 1×10^7 Gy (1×10^9 rad). For higher radiation resistant magnets ($\sim 1 \times 10^8$ Gy) polyimides and their composites should be adopted. Adequate study should be made to select insulators for INTOR magnets which are expected to withstand $2 \sim 5 \times 10^7$ Gy.

For resin moulded type magnets, epoxy resin impregnants with adequate toughness at cryogenic temperatures should be adopted with vacuum pressure moulding process. Turn layer insulators, ground wall insulators, and spacers between pipes are needed for pool boiling type magnets. These insulators are all FRP in their last state. High density FRP with low thermal contraction and high compressive strength have been developed in several countries. They are compared in their properties essential for spacer use.

Ground insulators for forced flow type magnets are also reviewed. Voltage withstand test conditions for superconducting magnets are checked. FRP cryostats or dewars have been constructed in several facilities. Some unique cryostats, W type and U type, are introduced.

1. まえがき

超電導機器に関連する極低温用電気絶縁材料についての解説は、古くは「超電導ハンドブック」(電気学会刊, 1968)に、最近では電気学会技術報告(Ⅱ部)第93, 94号(1980)の一部にのっている。超電導マグネット技術の最近の進歩は目覚ましく、電気絶縁材料もより信頼性の高いものが求められてきた。現在電気学会内に「極低温絶縁材料調査専門委員会」(河野委員長)がおかれ、いづれ最新の技術報告がまとめられるであろう。本解説は両技術報告の中間にあって、最近の動向を示し、超電導マグネット設計者の渇をいや

すことができれば幸いである。

従来超電導マグネットの構成材料は、導電材、構造材、電気絶縁材、熱絶縁材に分類されていた。ここで電気絶縁材とは、機能と材質のどちらを主にして区分しているか不明確であった。材料開発技術者からみると、電気絶縁を主目的とする材料も、構造部材として使われるプラスチック系複合材料(FRP)も含めて、非金属系材料と分類してもらうのが便利である。本解説は、真空積層断熱材をのぞく有機複合材料の全般について触れる。

各種有機絶縁体の極低温における誘電特性、絶縁破壊特性、熱的特性は、前述の技術報告にのっている。

また機械的特性についてはすでにまとめた¹⁾。ここでは最近の情報として、超電導マグネットの方式（密巻モールド、浸漬冷却、強制冷却）ごとに材料を紹介し、さらに FRP クライオスタットに触れる。核融合装置の超電導マグネットでは、耐放射線性を考慮した材料の選択が必要となってくるので、その点についても触れる。

2. 耐放射線性について

核融合装置の超電導マグネットは、高速中性子、熱中性子及びガンマ線の照射を受ける。絶縁材料が受けるトータルの放射線エネルギー（吸収線量）は、実用炉（30年ライフ）で最大 $1 \times 10^8 \text{Gy}$ ($1 \times 10^{10} \text{rads}$) である。IAEA で計画している実験炉 INTOR では $2 \sim 5 \times 10^7 \text{Gy}$ を設定している。我国の JT-60U では $2 \times 10^6 \text{Gy}$ 、LCT では 10^5Gy オーダーを設定して材料を選んだ。

超電導マグネット用絶縁材料の耐放射線性は、線源（14MeV 中性子源、原子炉、 ^{60}Co ）及び環境（4.2K、77K、室温）によって異なるのであるが、よく用いられる材料についてはおおよそ次のようになる^{2~10)}。

- 1) エポキシ樹脂(含浸樹脂、接着剤、パテ等)に使用) 及びその FRP (スぺーサ、クライオスタット用) は、 $\sim 1 \times 10^7 \text{Gy}$ に耐えるが、 $2 \sim 5 \times 10^7 \text{Gy}$ では強度が半分以下に低下する。もちろん $1 \times 10^7 \text{Gy}$ でかなり劣化するエポキシ樹脂もある。
- 2) 不飽和ポリエステル樹脂の FRP (クライオスタット、金属クライオスタットの内張り絶縁用) も、 $\sim 1 \times 10^7 \text{Gy}$ には耐えるであろう。ポリエステル(フィルム、織布、不織布用) は、 $\sim 2 \times 10^6 \text{Gy}$ に耐えるが、 $\sim 1 \times 10^7 \text{Gy}$ にはもたない。
- 3) 縮合タイプのポリイミド(カプトンフィルム、ベスベル成形品、NR150接着剤、ポリイミド線、PIQ 等) は $\sim 1 \times 10^8 \text{Gy}$ まで耐える。
- 4) 付加タイプのポリイミド(ケルイミド、イミダロイ、BT、TI ポリマー等)、ISOX レジン(含浸樹脂及び FRP 用)、芳香族ポリアミドイミド(フィルム、ポリアミドイミド線用)、ポリアミドイミドエステル(オメガ等) は、 $\sim 1 \times 10^8 \text{Gy}$ までは耐えないにしても、 $2 \sim 5 \times 10^7 \text{Gy}$ には十分耐えるであろう。
- 5) 無機材料(ガラス繊維、マイカ、マコール等) は $\sim 1 \times 10^8 \text{Gy}$ には十分に耐える。中性子を捕獲しやすいボロンを B_2O_3 のかたちで含む通常の E ガラスの代りに、ボロンレスの E ガラス、S ガラス、R ガ

ラス、石英ガラスを強化材とする FRP が試作されているが、 $\sim 1 \times 10^8 \text{Gy}$ までを考えるならほとんど差がない。つまり強化材よりもマトリックス樹脂の耐放射線性できまってしまう。

初期の超電導マグネットには、ベーク板(紙フェノール積層品)が多用されていたが、現在ではエポキシ樹脂及びその FRP がほとんどである。INTOR の耐放射線性設定 $2 \sim 5 \times 10^7 \text{Gy}$ の根拠は知らないが、絶縁材料はエポキシ樹脂をベースに想定しているようである。実用炉に至るまでの実験炉、実証炉、原型炉等のステップで、脱エポキシ樹脂を進めるか、あるいはシールドを強化してエポキシ樹脂ベースのままゆくかの選択があろう。

$2 \sim 5 \times 10^7 \text{Gy}$ あるいは $\sim 1 \times 10^8 \text{Gy}$ に耐える、フィルム、各種テープ、FRP はすでにある。しかし超電導マグネットを構成するのにかせない、接着剤、含浸樹脂、パテで同程度の耐放射線性グレードのものがそろっていない。FRP クライオスタットの材料も同様である。核融合装置の耐放射線性を設定するのに構成材料の協調を念頭におく必要がでてくるであろう。

3. 密巻モールド方式における材料

この方式は小型のソレノイドコイルや、磁気浮上列車のレーストラックコイル、超電導発電機や粒子加速器のくら形コイル等に適用される。エナメル被覆した平角の安定化超電導線を、なるべく密に巻回しておき、エポキシ樹脂を減圧含浸して一体にモールドする。段間絶縁としてガラスクロスを挿入することもある。熱伝導をよくし、かつワイヤムーブメントによる不安定をなくすため、線はなるべく密着させ、内部にボイドを残さないようにモールドするのがポイントである。

くら形コイルやレーストラックコイルでは、エナメル被覆平角線を密に多層巻すために、室温硬化形エポキシ接着剤とガラスクロステープ等で、部分的に固定しながら巻回及び成形をすることがある。この場合にはエポキシ樹脂を内部まで完全に含浸するため、減圧含浸したのち、さらに液体圧を加えながら加熱硬化するとよい。この減圧含浸加圧モールド法によると、エポキシ樹脂の硬化収縮による残留応力を低減し、極低温にしたときのクラックの発生を抑制できる。含浸するエポキシ樹脂は、熱収縮率が比較的小さく、かつ極低温での破断ひずみが大きい、タフな配合にしている¹¹⁾。図1は当社の加圧モールドタンク(直径2m、

Fig. 1 Pressure moulding equipment.

Fig. 2 Epoxy resin moulded coil for superconducting generator.

長さ5 m)で、100気圧の液体圧を加えながら加熱硬化ができる。図2はこのタンクでモールドした、超電導発電機の界磁コイルである¹²⁾。

粒子加速器のビーム偏向用コイルで、 $1 \times 10^7 \text{ Gy}$ をこえる耐放射線性が要求される場合は、エポキシ樹脂の代りに ISOX レジンを含浸することとし、巻線時及び成形時には BT レジンのプリプレグテープ（ガラスクロス、ノメックス等）で仮止めすれば対応できよう。 $\sim 1 \times 10^8 \text{ Gy}$ に耐える縮合形ポリイミドのみで密巻モールドするのは困難である。エポキシ樹脂でモールドせずに、機械的にクランプする方法も検討されている¹³⁾。

4. 浸漬冷却方式における材料

4.1 日本 LCT の絶縁

浸漬冷却方式コイルの代表例は日本 LCT である。強制冷却方式コイルの代表例は WH の LCP（日本では Large Coil Task, 外国では Large Coil Program）がある。

浸漬冷却方式の超電導マグネットに必要な絶縁材料

は、レヤー絶縁材、スペーサ材、及び SUS 容器の内側に貼り付ける内張り(対地)絶縁材である。次に LCT の絶縁¹⁴⁾を紹介する。図3は組立て途中の LCT であり、白い格子状のがパイ間のスペーサ（当社の「日立ボイドレス FRP, VL-E 200」）である¹⁵⁾。

電磁力及び熱応力の解析結果から、絶縁材の要求性能が次のように設定された。

1) パイ間スペーサ及び内張り絶縁

- 圧縮強さは4 Kで400MPa（約40kg/mn²）以上
- 熱収縮率（面垂直方向）は銅と同じ
- 絶縁破壊電圧は4 Kで3 kV以上

2) レヤー絶縁

- 圧縮強さは4 Kで400MPa 以上
- 剪断接着強さは4 Kで4 MPa 以上
- レヤー絶縁の接着剤がはみ出して導体側面に付着しないこと

耐放射線性の設定は 10^5 Gy オーダーであるため、エポキシ樹脂を中心として材料が選出された。機械的強度は4 Kと77 Kで大差がないため¹⁾、主として77 Kで評価された。

スペーサ材には前述の脂環式エポキシガラスクロス積層板 VL-E200 が選ばれた。圧縮強さは77 Kで1032 MPa と余裕がある。面垂直方向の熱収縮率（300 K → 77 K）は0.55%であり、銅（0.31%）よりもかなり大きい。

内張り絶縁材は、SUS 容器の内面形状にそって、継ぎ目なしに形成させる必要上から、当社の室温硬化形不飽和ポリエステル樹脂「ポリセット, PS518A」をガラスクロスに含浸し、ハンドレイアップした。これは77 Kの圧縮強さ901 MPa であった。熱収縮率は0.83%でかなり大きい。

Fig. 3 Pool boiling type LCT coil under construction.

レーヤ絶縁材は、当社のエポキシガラスプリプレグ「SGT-F 7036」を硬化しスリットしたテープに、少量の室温硬化形エポキシ接着剤を塗布して挿入した。これは77Kの圧縮強さが753MPaで、剪断接着強さは黒色酸化銅との界面で7.9MPaあった。熱収縮率は0.75%であった。

液体 He 中 4 K における絶縁破壊電圧は、内張り絶縁材 (1.02mm 厚) の貫通破壊電圧が14kV、レーヤ絶縁材 (0.70mm 厚) 及びスペーサ (1.10mm 厚で測定) の沿面クリープ電圧が5.9kV及び10.7kV (以上いずれも AC 実効値) であった。これは十分に余裕がある。

LCT の絶縁は、最終的に全て FRP の形になっている。FRP は強化材のガラス繊維とマトリックス樹脂からなり、それぞれの物性から FRP の特性を推定することが容易である。また FRP の樹脂含有率、密度、熱収縮率 (面垂直、面平行及び体積)、強さ (圧縮、引張り、曲げ)、弾性率の間には、トータル的によい相関性がある。

浸漬冷却方式コイルをより強固にするには、ガラス含有率を多くした (高密度化) 低熱収縮率高強度 FRP を採用すればよい。後述するようにスペーサ材には高密度 FRP が開発されている。内張り絶縁材とレーヤ絶縁材は、プレスができないのでどうしても樹脂リッチになるが、無機質フィラー (アルミナ、シリカ等) を併用するか、あるいは極力薄くして影響を少なくするのがよいであろう。

レーヤ絶縁の見かけの剪断接着強さは一般に次式で表わすことができる。

$$\tau = \tau_0 - \mu_1 \sigma_1 + \mu_2 \sigma_2 \quad (1)$$

ここで τ_0 は真の接着強さ、 σ_1 はレーヤ絶縁材と導体の熱収縮率差により冷却時に発生した面垂直方向の引張り応力、 σ_2 は電磁力による面垂直方向の圧縮応力、 μ_1, μ_2 は係数である。 σ_1 を小さくするにはレーヤ絶縁材の熱収縮率を小さくするとともに、接着剤の硬化は室温で行うのがよい。

耐放射線性グレードの絶縁材で統一する場合に、スペーサ材の FRP は後述するようにすでに開発されている。レーヤ絶縁のテープはポリイミドガラステープがある。レーヤ絶縁の接着剤は縮合タイプあるいは付加タイプのポリイミドを使うとして、硬化温度はどうしても200°C前後が必要である。 σ_1 を小さくするにはレーヤ絶縁層の全体としての樹脂含有率をへらし、かつ必要十分に薄くするべきであり、テープの材質から

考えなおす必要がでてくるであろう。

4.2 TORE SUPPA の絶縁

EURATOM-CEA で計画している TORE SUPPA 超電導コイルの絶縁は、絶縁材の選定に幾分の考慮がなされている¹⁶⁾。設定仕様は次のごとくである。

1) スペーサ材 (エポキシガラスクロス積層板)

- 圧縮強さは300Kで、面垂直方向が630MPa 以上、面平行方向が370MPa 以上
- 圧縮弾性率は300Kで、面垂直方向が17GPa 以上、面平行方向が30GPa 以上
- 密度2.1 g/cm³以上
- 熱収縮率 (300K→4 K) は、面垂直方向が0.4% 未満、面平行方向が0.18% 未満

2) 内張り絶縁 (同上)

- 圧縮強さは300Kで面垂直方向が520MPa 以上
- 圧縮弾性率は300Kで面垂直方向が15GPa 以上
- 熱収縮率 (300K→4 K) は、面垂直方向が0.45% 未満
- 絶縁破壊の強さ (温度は不明) は、8 kV/mm 以上

3) レーヤ絶縁 (エポキシガラスクロスプリプレグ)

- 剪断接着強さ (温度は不明) は、40MPa 以上
- 引張り接着強さ (同上) は、8 MPa 以上

ここで解説しておく、FRP で密度を2.1 g/cm³以上にすると、圧縮強さ、弾性率、熱収縮率を自ずとスペーサ材の設定仕様を満足する。また面垂直方向の特性が本質的に重要であり、面平行方向の特性は、たまたまそうであるにすぎず、つまり付帯的である。レーヤ絶縁の2通りの接着強さは、それぞれ τ と τ_0 に対応するものと思われる。接着強さは試験方法によって見かけの測定値がちがってくるので注意を要する¹⁷⁾。また電磁力に対するコイルの強固さという観点からすると、圧縮強さよりも圧縮弾性率のほうが本質的に重要である。しかし圧縮弾性率の測定には誤差が入り易く、また FRP の圧縮強さと弾性率は良い相関があるので、一般には強さで比較している。

TORE SUPPA の絶縁材も全て FRP であるが、LCT に比べると、高密度 (ガラス含有率大) で、熱収縮率が小さく、圧縮強度の大きい FRP を選んでいるといえる。スペーサ材には、新しく開発した高密度のエポキシガラスクロス積層板¹⁸⁾を選定している。これについては次節で触れる。

4.3 極低温用低熱収縮率高強度 FRP

本節では積層板の面垂直方向の熱収縮率 (300K→

77K)及び圧縮強さ(77K)において比較することにする。なお一般的にFRPでは、300K(室温)の圧縮強さに対して、77Kでは約1.60倍、4.2Kでは約1.66倍となる¹⁾。また300K→77Kの熱収縮率に対して、300K→4.2Kのそれは約1.10倍となる¹⁹⁾。

TORE SUPPA の R&D で J. Hamelin は¹⁸⁾、エポキシガラスクロスプリプレグを積層して熱圧プレス成形するFRPにおいて、プレス圧を通常の3倍程度にして樹脂を追い出し、ガラス含有率の多い高密度FRPを得た。密度 2.15 g/cm^3 のFRPで、熱収縮率が銅と同じになる。その圧縮強さは300Kで700MPaあり、77Kでは約1120MPa(つまり1.6倍)であると推定される。

一方米国 NBS の M.B. Kasen らは¹⁹⁾、エネルギー省核融合エネルギー局の依頼で、米国電機工業会 NE MA 規格の G-10及び G-11グレードFRPをベースにして、極低温耐放射線性(CRグレード)のFRPを開発している。なおGEのLCPは浸漬冷却方式で、スペーサ材はG-10を用いている。

G-10CR及びG-11CRはSpaulding Fibre Co.で製品化され²⁰⁾、“Spauldite CR”及び“Spauldite SCR”と称されている。前者はジシアンジアミド触媒硬化ビスフェノールAエポキシ樹脂、後者は芳香族アミン硬化ビスフェノールAエポキシ樹脂が使われており、後者のほうが幾分耐放射線性に優れるが、 $\sim 1 \times 10^7\text{ Gy}$ ではかなり劣化する⁹⁾。G-10CR(密度 1.904 g/cm^3)とG-11CR(同 1.956 g/cm^3)のちがいは、主にガラス含有率であり、後者のほうが特性に優れる。同社ではその後、縮合タイプのポリイミド(全芳香族)による耐放射線性グレードのFRP“Spaulrad”(密度 2.04 g/cm^3)を出している。

我国では科学技術振興調整費による「超電導・極低温基礎技術に関する研究」の一環として、日立が国内の代表的なFRPメーカー4社の協力を得て、極低温用FRPを開発している^{21~23)}。57年度にはエポキシFRP²¹⁾、58年度には付加タイプのポリイミドによる耐放射線性FRPを開発した^{22,23)}。

それぞれの最高グレード品(密度 $2.18 \sim 2.20\text{ g/cm}^3$)は、既存の“VL-E200”、“Spauldite CR”(G-10CR)、“同SCR”(G-11CR)、“Spaulrad”及びJ. Hamelinの開発品(その後“PERMAGLAS N°TE.631”として仏国で市販)¹⁶⁾よりも優れたバランスのよい特性を有する。主要な特性である面垂直方向の圧縮強さと熱収縮率をもって、それぞれを位置付けしたのが図4であ

Fig. 4 Comparison and valuation of various FRP for cryogenic use.

る。

FRPはボイドレスと仮定すると、その密度からガラス及び樹脂含有率(重量比、体積比)が分かり、熱収縮率のもとより機械強度もかなり正確に推定できる。J. HamelinのFRPは当初熱収縮率0.26%と発表していたが¹⁸⁾、筆者は測定誤差が入っているのではないかと指摘した²⁴⁾。D. Duthooらの実測では0.31%に訂正されていた¹⁶⁾。

浸漬冷却方式の絶縁材として優れたFRPスペーサ材が開発された。今後はレーヤ絶縁と内張り絶縁、ならびにスペーサをコイルと接着する接着剤の検討が必要である。

5. 強制冷却方式における絶縁

5.1 WHのLCPの絶縁

一般に強制冷却方式のコイルでは、内部冷却ホローコンダクタの周囲に、薄葉絶縁材を巻付けて絶縁し、これを多層巻してコイル状にし、絶縁スペーサを介して真空容器におさめる。薄葉絶縁材で対地絶縁に耐えるようになっているので、スペーサは金属であっても、あるいはスペーサがなくてもよい。そこで絶縁材としては薄葉絶縁材とその接着剤が問題となる。ここではWHのLCPの絶縁²⁵⁾を紹介する。

設定仕様は次のごとくである。

○ 10^{-5} Torr の真空中に置かれ 10^5 Gy の放射線を受ける。4Kまで50回冷却される。

○絶縁にかかる電圧は、通常時はDC数Vであるが放電時には約1800Vpで減衰時定数8.05秒のサー

ジ電圧がかかる。放電は約500回と考える。

○室温大気中で DC 7.5kV ($1.8\text{kVp} \times 4.2$) の絶縁抵抗が $100\text{k}\Omega$ 以上あること。

○室温大気中で AC 5.4kV_{rms} ($1.8\text{kVp} \times 3$) に1分間耐えること。

○導体に巻付けた状態で軸方向のひずみ1.5%に耐えること(温度は明記していないが4Kであろう)。

ここで試験電圧条件をきめた根拠は明らかでない。しかし追加試験として、 10^{-8}Torr 真空中77K及び4.2Kで AC 5kV_{rms} を3600サイクル(60Hzで1分間)印加して誘電正接の測定をしており、これが実際の放電回数の6倍の寿命保証試験になっていると言っている。

採用した絶縁は、カプトンフィルム(25 μm 厚)を半がけ2回巻いた上に、エポキシガラスブリプレグテープ(0.23mm厚)を半がけ2回巻きし、150°C 4hで硬化した厚さ1.0mmの絶縁である。その絶縁破壊電圧は室温大気中で15kV、4.2K、 10^{-5}Torr では9.1kVであった。この絶縁は $2 \times 10^6\text{Gy}$ には十分耐えるが、 $2 \times 10^7\text{Gy}$ ではかなり劣化するであろうと言っている。

$2 \sim 5 \times 10^7\text{Gy}$ に耐える絶縁にするには、エポキシの代わりに付加タイプのポリイミドを用いるとよい。これは硬化温度を200°C前後にする必要があるが、材料としては手に入る。 $\sim 1 \times 10^8\text{Gy}$ に耐える縮合タイプのポリイミドを用いる場合は、ブリプレグにするより液状ワニス(例えば当社のPIQ)をガラステープに塗布しながら巻付けるのがよいであろう。

5.2 試験電圧条件について

設定運転条件に対して、絶縁の信頼性を保証するための試験電圧条件をどうきめるかについて考察しておく。一般に高圧回転電機では定格電圧 E (常規運転電圧は $E/\sqrt{3}$)に対して、 $2E + \alpha$ を1分間加えて試験する。これは15~25年の連続運転による絶縁劣化を考えて設定されている。劣化要因はまず熱であり、次に機械的応力と電圧である。

超電導マグネットで運転中に加わるピーク電圧が E_P の場合は、これを実効値 $E_P/\sqrt{2}$ になおし、これを常規電圧として、 $2(\sqrt{3}E_P/\sqrt{2}) + \alpha = 2.45E_P + \alpha \approx 3E_P$ のAC電圧(rms)を1分間加えることが考えられる。WHのLCPは恐らくこの考え方に従ったのであろう。

日本LCTはクエンチ時の発生電圧を1000Vと設

定しているので¹⁴⁾、試験電圧は3kVということになろう。内張り絶縁の絶縁破壊強さは4Kで14kV、77Kでは21kVあり¹⁴⁾、十分に耐えることができる。しかし耐電圧試験を室温のガスHe中でやるとすれば問題がでてくる。平板電極間の絶縁破壊強さは、4Kの液体Heでは約10kV/mm、ガスHeでは約6kV/mmあるのに、室温のガスHe中では約0.7kV/mmしかない(いずれもACのrms)。そこで室温ガスHe中では、低い電圧でグロー放電が発生し²⁶⁾、内張り絶縁があるため絶縁破壊はしないが、電流が急増して試験器によっては一見絶縁破壊と同じ標示ができることになる。

そこで提案であるが、耐電圧試験は2段階とし、まず室温空气中(約3kV/mm)で $3E_P$ を1分間加えて、対地絶縁を試験する。次に浸漬冷却方式ではクエンチ時の最悪環境を考えて室温ガスHe中で、また強制冷却方式では室温高真空中で、 E_P の1.2倍程度を加えて放電が生じないことを測定するのがよい。放電が生じなければ絶縁劣化はおこらないからである。

6. FRP クライオスタット

FRPの非磁性、電気絶縁性、熱伝導率小、軽量などの特長を生かした、非金属クライオスタットが開発されている^{27~33)}。

特徴のあるFRPクライオスタットを紹介する。図5はカリフォルニア大の「2mトロイダル開口デュワー」である²⁷⁾。図6は日立と当社で共同開発した、パルスマグネット試験用FRPクライオスタットの断面図である。通常のスレート形に対し、図5はW形、図6はU形と称することができ、ともに液体Heの量を低減する工夫をしている。なおFRPクライオスタットの開発現況は別途に紹介する³³⁾。

Fig. 5 Two-meter toroidal open-mouth dewar (California University)

7. むすび

耐熱性あるいは耐放射線性の電気絶縁材料という言

Fig. 6 Cross section of Hitachi U-type FRP cryostat.

い方は一般化しているが、極低温用電気絶縁材料というのは最近まで一寸抵抗があった。つまり今までは既存の材料のなかで、極低温での特性がよいものを選んで使ってきたにすぎない。しかし最近では、極低温用に特殊な機能をもたせた材料が登場してきた。例えば低熱収縮率高强度 FRP スペーサ材、ガス He を透過しにくい FRP クライオスタット壁、放射線照射しても強度低下が小さく、また分解ガスが発生しにくい絶縁材、極低温での熱伝導率が小さい CFRP 等である。

需要が多くなれば、極低温で最高の性能を発揮する有機複合材料を、本気になって開発するメーカーや技術者が多くなり、急速な進歩が期待できる。本解説から将来の方向を読みとり、より優れた材料の要求を出していただければ、材料メーカーとして対応したい。

参 考 文 献

- 1) 門谷他：電気学会研究会資料 EIM-83-104 (1983)
- 2) 飯田他：同上 EIM-83-128 (1983)
- 3) R.R. Coltman, Jr. et al.: Proc. 8th Sym. Engineering Problems of Fusion Research (1979) 1694
- 4) R.H. Kernohan et al.: Journal of Nuclear Materials 85&86 (1979) 379
- 5) R.R. Coltman, Jr. et al.: ibid 103 (1981) 717
- 6) S. Takamura et al.: ibid 103 (1981) 729
- 7) G.F. Hurley et al.: Cryogenics 28 (1983) 415
- 8) K. Jahn et al.: ibid 28 (1983) 160
- 9) 加藤他：低温工学18 (1983) 193
- 10) 門谷他：電気学会研究会資料 EIM-83-127 (1983)
- 11) 門谷他：日立評論57 (1975) 499
- 12) 牧他：電気学会研究会資料 SA-82-19 (1982)
- 13) C. Taylor et al.: IEEE Trans. Magnetics M AG-17 (1981) 1571
- 14) K. Koizumi et al.: ICMC (1981)
- 15) 斎藤他：日立評論66 (1984) 71
- 16) D. Duthoo et al.: Fusion Technology (1982) 1015
- 17) K. Kadotani et al.: Composites 15 (1984) 5
- 18) J. Hamelin: Advances in Cryogenic Engineering (ACE) 26 (1980) 295
- 19) M.B. Kasen et al.: ibid 26 (1980) 235
- 20) J.R. Benzinger: ibid 26 (1980) 252
- 21) 門谷他：強化プラスチック29 (1983) 537
- 22) 永井他：第19回電絶展予稿集 (1984) 83
- 23) K. Fukushi et al.: ICMC Nonmetallic Materials for Low Temperature Use Conf. (1984)
- 24) K. Kadotani et al.: Cryogenics 23 (1983) 267
- 25) S.K. Singh et al.: Proc. 8th Sym. Fusion Research (1979) 144
- 26) 富士他：第16回電気絶縁材料シンポジウム予稿集 (1983) 75
- 27) W.V. Vogen et al.: ACE 21 (1975) 51
- 28) S.T. Wang et al.: Intern. Sym. Superconductive Energy Storage (1979) 90
- 29) 別所他：低温工学17 (1982) 322
- 30) 伊藤他：同上17 (1982) 326
- 31) 倉岡他：同上17 (1982) 332
- 32) 河村他：三菱電機技報58 (1984) 273
- 33) 門谷：強化プラスチック31 (1985)