F.R.P. クライオスタット

別所久美, 細田義門, 笹島洋一, 川島眞生

住友電気工業株式会社研究開発本部 大阪市此花区島屋1-1-3

(1981年9月4日受理)

F.R.P. Cryostat

Hisami BESSHO, Yoshikado HOSODA, Yōichi SASAJIMA and
Maumi KAWASHIMA

SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES, LTD. R&D Group
1 3, Shimaya 1-chome, Konohana-ku, Osaka, 554

(Received September 4, 1981)

Synopsis:

Materials for the F.R.P. cryostat should be selected out of various Fiber Reinforced Plastics. A F.R.P. cryostat for pulsed superconducting magnets has been made of F.R.P. by filament winding method. Its inner diameter is 200 mm and the depth is 800 mm. The evaporating rate of liquid helium was 0.42 l/H initially and was 0.45 l/H after one month.

1. まえがき

核融合炉や、加速器に用いられる超電導磁石の1部は、変動磁場を発生するので、それらの超電導磁石を収納するクライオスタットは、渦電流損防止の点で、金属よりも絶縁物で作る方が有利である。

絶縁物の中で、極低温で、構造材として、使用出来るものは、実用的には、F.R.P.に限られるため、近年、F.R.P. クライオスタットが、試作されるようになってきた¹⁾。

本報告では、F.R.P. クライオスタットの概要と試作例について述べる。

2. F.R.P. クライオスタットの製法

現在行われている F.R.P. クライオスタットの製法として、構造的には、円筒部と底板部とを一体で製作する方法と、別々に製作し、これを接着等により一体化する方法とがある。また F.R.P. の製造方法は種々のものが考えられており、その代表的方法及び、特

徴は表1に示す如くである。これらの製造方法のいずれもが、F.R.P. クライオスタットとして適用可能と考えられるが、同一寸法、形状の製品が少なく、寸法形状の変るたびに型を作ることを考えると型費の安価なハンドレイアップ法が適しており、高強度、低気泡率、寸法精度といった性能面から判断すると、フィラメントワインディング法、真空含浸法が適している。

3. F.R.P. クライオスタットの問題点

F.R.P. クライオスタットは渦電流損がない、という利点を有する反面、次に述べるような問題を有しており、今後検討を必要とする。

(1)ヘリウムガスの透過; プラスチックが層を形成し、その両側で、分圧の差があるガスと接している場合には、この層を通して、分圧の高い側から低い側へガスが移動する。F.R.P. の場合は、プラスチック中に繊維が存在するので、その界面に沿っての透過も加算される。

表 1 代表的 F.R.P. の製造方法と特徴

方法名	ハンドレイアップ法	スプレードアップ法	フラインディング法	遠心成形法	真空含浸法	バッグ法	プレス法	SMC法
製造方法	<p>樹脂 繊維 型</p> <p>マット、クロスを型に置き樹脂を塗布し含浸させる。</p>	<p>樹脂 繊維 型</p> <p>特殊スプレーガンを用い、型上に樹脂とガラスを一緒に吹きつける。</p>	<p>樹脂 繊維 マンドレル</p> <p>ロービング、ヤーンを前もって樹脂に含浸し、回転するマンドレルに張力をかけながら巻付ける。</p>	<p>樹脂 繊維 マンドレル</p> <p>中空のマンドレル内に樹脂、繊維を入れ回転させながら含浸する。</p>	<p>樹脂 繊維 型</p> <p>繊維を型内に入れ、型内を真空引きしながら樹脂を注入し、含浸する。</p>	<p>空気 型</p> <p>繊維と樹脂を型上に置き、ゴム袋を用いて加圧する。</p>	<p>上型 下型 繊維と樹脂</p> <p>繊維と樹脂を型上に置き、加圧成形する。</p>	<p>上型 下型 SMC</p> <p>SMCを用い、加圧成形する。</p>
特徴	<ul style="list-style-type: none"> 最も簡単な方法 型材安価 (石コウ・木・FRP) 大きき自在 	<ul style="list-style-type: none"> 現場施工可 型材安価 	<ul style="list-style-type: none"> 比強度最大 配列の均一性最高 寸法精度よい 量産化可能 気泡率小 	<ul style="list-style-type: none"> 外表面の仕上り良 マンドレル簡単 長尺物も可能 量産化可能 	<ul style="list-style-type: none"> 寸法精度良好 気泡率小 配列性良 	<ul style="list-style-type: none"> 気泡率小 筒型成形可能 	<ul style="list-style-type: none"> 寸法精度良好 量産化可能 高繊維含有量可能 均一性良好 	<ul style="list-style-type: none"> 寸法精度良好 量産化可能 均一性良好
欠点	<ul style="list-style-type: none"> 作業員の技術に左右される。 	<ul style="list-style-type: none"> 設備高い 成形品の大きさ限度 	<ul style="list-style-type: none"> 設備高い 回転体形状に限定 	<ul style="list-style-type: none"> パイプ形状に限定 	<ul style="list-style-type: none"> 作業時間長い 筒型成形困難 	<ul style="list-style-type: none"> 作業性悪い 品質不安定 	<ul style="list-style-type: none"> 設備高い 筒型成形困難 	<ul style="list-style-type: none"> 設備高い 筒型成形困難
クライオスタットへの適用性	◎ (一体成形可) (コスト低)	△	◎ (円筒体部に適用) (高品質)	△	◎ (底板部に適用) (高品質)	○	○	○

(2)材料選定；F.R.P. は繊維強化プラスチックのことであり、樹脂と繊維の種々の組合せにより、多種多様の材料が存在する。従って材料の選定に当っては、その低温特性を十分把握しておく必要がある。現在考えられる樹脂としては、エポキシ系、不飽和ポリエステル系、ビニールエステル系樹脂があり、繊維基材には、渦電流損のない、即ち電気絶縁性の基材として、ガラス繊維、ケブラー（芳香族ポリアミド）繊維、SiC 繊維があるが、コスト面から一般的にガラス繊維が用いられる。その形態としては、ロービング、チョップストランドマット、ロービングクロス、ガラスクロス（朱子織、平織他）がある。代表的な F.R.P. の常温機械特性を表2にまとめた。

表2 F.R.P. の機械特性（常温）
各種カタログ値より抜粋

素 材	曲 げ 強 さ (kg/mm ²)	曲 げ 弾 性 率 (kg/mm ²)	ガラス 含有率 (%)	備 考
エポキシ系樹脂 ＋平織ガラス布	60	1750	35	G-10
同 上	54	2240	38	G-11
ビニールエステル 系樹脂＋マット	12	600	27	
ビニールエステル 系樹脂＋朱子織 ガラスクロス	47	1450	53	
不飽和ポリエス テル＋平織ガラ ス布	37	1500	52	
エポキシ系樹脂 ＋ロービング	140	6300	65	繊維方向

(3)異方性；F.R.P. は繊維の方向による異方性があるため、応力解析に当っては、それを考慮する必要がある。

(4)外圧に対する強度；内圧容器や液体容器としてのF.R.P. 容器は、かなりの実績があるが、外圧容器としての実績は少ないため、外槽の座屈による破壊（いわゆる縦割れ）には、(3)項の異方性の問題と合せて、十分な注意が必要である。

(5)表面からのガス放出；一般にプラスチック材は金属に比べ表面からのガス放出が多く、真空断熱層の真空度に悪影響を及ぼす。ガス放出を出来るだけ少くするためには、十分な硬化を行う必要がある。

図1 F.R.P. クライオスタット基本構造

4. 試作結果

フィラメントワインデング法により試作した、F.R.P. クライオスタットの基本構造を図1に示した。基本的には、内筒と鏡板よりなる内槽部と、外筒及び底板よりなる外槽部の間を高真空に保ち、かつ輻射に対しては、アルミ蒸着マイラーフィルムとポリエステルネットを交互に積層した断熱層により、液体ヘリウム温度（4.2K）と室温との間の熱伝達を防止する構造になっている。

内筒からの透過ヘリウムは、吸着剤（モレキュラーシーブス3A）で吸着するようになっている。吸着剤は、例えば20.4Kに比べ4.2Kでは2桁程吸着性能が向上する、というように温度の低い方が吸着性能が良いので、接着剤で直に内筒壁面に貼付け、4.2K近傍に保たれている。

F.R.P. 部材同士の接着部は、内筒－鏡板、外筒－底板、外筒一端板及び内筒一端板間に存在する。これら接着部のうち、液体ヘリウム及び、その蒸発ガスに直接晒され、大きな熱応力が発生するのは、内筒－鏡板間と、内筒一端板間であり、この2箇所では、いづれも外側の部材の熱膨張係数を大きくしてあり、冷却

時には、外側から、締付ける方向に力が作用して、接着部が剥れない構造になっている。

上蓋には、ユーザー側で超電導磁石を取付けられるが、ここでは、熱侵入防止のための、液体窒素タンクとしゃへい板が取付けられている。

表3 F.R.P. クライオスタット諸元

項目	諸元	項目	諸元
内筒内径	200mm	本体材質	エポキシ ガラス F. R. P.
内筒深	800mm		
内筒肉厚	1.5mm	断熱材質	アルミ蒸着 ファイバーと ポリエス テルネット
外筒外径	322mm		
外筒高	1,000mm	断熱材層数	70層
外筒厚	5mm	断熱材厚	~30mm
重量	19.6kg (但し、上蓋部 除く)	吸着剤	モレキュラー シーフス 3A
		吸着剤使用量	~500g

表3には、クライオスタットの諸元を示した。使い易さも含めた、性能評価項目として、以下の4項目を取上げ、評価した。

(1)予冷時間：不均一な材料や、不適切な接着部構造があれば、熱応力を低減する必要がある、クライオスタットを徐々に冷却してから、液体ヘリウムを注入しなければならない（例えば当社で別途試作したハンドレイアップ法によるクライオスタットでは、LN₂注液に4hrとGHe予冷に2hrを必要とした。）。他方均一材料を用い、接着部構造が上記説明のように熱応力に対して十分考慮されたものであれば、このような予冷は不要となる。

(2)到達真空度：断熱部の熱伝達率は真空度に対し $P = 10^{-1}$ Torr で 10^{-7} W/mK, 10^{-2} Torr で 4×10^{-8} W/mK, 10^{-3} Torr で 1.2×10^{-8} W/mK と小さくなり、 10^{-4} Torr 以下では 8×10^{-9} W/mK になる。従って真空度が良い程、断熱部の性能が良く、液体ヘリウムの蒸発量が少ない。

(3)ヘリウム蒸発量：クライオスタットの総合的な性能を表わすもので、小さい程良い。

表4 F.R.P. クライオスタットの性能

項目	性能
予冷時間	不 要
断熱層真空度	2×10^{-6} Torr
ヘリウム蒸発量	0.42ℓ/hr
真空引間隔	約1ヶ月*

*1ヶ月間封じ切り後ヘリウム蒸発量 0.47 ℓ/hr

(4)真空引間隔：断熱層の真空引きをクライオスタット使用毎に行う事は面倒であり、一定期間封じ切ったままで使用出来ることが望ましい。

試験結果は表4に示すものとなり一応満足できるものであった。なお、ここではフィラメントワインディング法の試作結果を述べたが、外槽 SUS、内筒 ハンドレイアップ法による FRP（内径φ400mm、深1000mm）というものも試作し、LN₂断熱なしで2ℓ/hrのLHe蒸発量という結果を得ている。

5. あとがき

本文で述べたような、問題点に加えて今後の課題として次の点を考えている。

(1)F.R.P.クライオスタットは、現状では使用実績が短かいため、繰返し使用に対する性能変化を確認する必要がある。

(2)F.R.P. クライオスタットはLN₂ 槽のない形が多いので GHe のエンタルピー利用技術を開発する必要がある。

(3)大型化に対しての適切な製法の研究を行う必要がある。

参 考 文 献

1) S.T. Wang and S.H. Kim, ‘Argonne national laboratory superconducting pulsed coil program’, Proc. of the international symposium on superconductive energy storage, 1979