中空導体を用いた超電導電磁石

島 本 進

電気試験所超電導研究室 東京都田無市向台町5-4-1

(サックレー原子力研究所滞在)

(1970年6月4日受理)

Superconducting Magnet with Hollow Conductor

Susumu SHIMAMOTO*

Département de physique des Particules Élémentaires, CEN-Saclay, France.

(Received June. 4, 1970)

The superconducting magnet with hollow conductor has various merits, when it is compared with the conventional superconducting magnet, and it will be applied for big bubble chamber, big spark chamber, etc. in near future. In this article, its merits, refrigeration systems, optimum operation, examples of superconducting hollow conductor, examples of actual magnets and future projects for big magnet in the world are presented.

1. ま え が き

現在、実用大型超電導石の代表的なものは bubble chamber 用電磁石である。米国の Argonne 研究所、Brookhaven 研究所およびジュネーブにある CERN の bubble chamber 用電磁石が稼働中あるいは建設中であり、その中でも代表的なものである。これらはいずれも周知の如く、安定な動作のために充分な銅の中に超電導線を埋め込んだ帯状の導体を用い、これを液体ヘリウム中に浸し、帯の両側面および面あるいは両側面のみから液体ヘリウムの自然対流によって電磁石中の巻線を冷却する方法が取られている。自然対流による冷却方法は概念的には小型のコンパクトに巻かれた超電導電磁石の方法を scale up したもので大型化するにともない、冷却のために層間およびターン間に間隙を設けたものである。沸点にある液体ヘリウムの熱伝達の不安定性は超電導性の安定に非常に障害になるし、更に上記の方法による間隙による電流密度の低下、電磁力に対する構造上の問題などは避けにくい。

電磁石を製作する場合電磁力の問題に重きを置き、

たとえば巻線をエポキシ樹脂やパラフィンで固めその動きを防止することが考えられる。しかし、この方式によると flux jump 等により内部に熱が生じた場合、他の部分への熱の吸収が充分でないと温度上昇があり premature quenching は避けられない。最近開発されている flux jump が無い本質的に安定な導体、つまり多数のフィラメント状超電導母材を twist したりあるいは transposed した導体を用いることによると、局所的な温度上昇が無いのでコイル中でも short sample と同じ電流密度が得られることも報告されている。この方法では、極低温迄の冷却および過渡状態における発熱の冷却はすべて伝導によるものである。しかし、現段階ではこの方式による大きな電磁石の実験結果あるいは計画については報告されていない。

対流とか伝導とかによる自然に頼る方式ではなく、ヘリウムを強制循環する方法がもう一つここに考えられる。もちろん、上記の自然対流による方式のコイル

* On leave of absence from Electrotechnical Laboratory, Machinery Division, 4-1, 5 Chome, Mukodai-Machi, Tanashi, Tokyo, Japan.

の中を液体ヘリウムを何らかの手段で循環させる方式も考えられるが、中空導体 (hollow conductor) による内部循環方式が優れている。またこの時のヘリウムの状態として Supercritic state が沸点にあるヘリウムの状態より優れている。supercritic state の helium の諸性質については既に本誌を通じて詳細に解説されているので、本文では主に電磁石の製作の立場から解説を進める。

2. Hollow conductor 方式による長所

①自然対流による冷却と比較すると導体内にヘリウムを強制循環することにより各部が均等に冷却される。

②Supercritic helium を用いることにより温度上昇があつても常に単一相であるのでいわゆる沸騰が無く、沸点にある液体ヘリウムの熱束のような不安定現象はない。

③従来の方式と比較すると、ターン間および層間のヘリウム流路が全く不要になり、コンパクトで機械的に強いコイルが可能である。したがって、コイルの形状の選択度が大きい。

④冷却のために直接外部に露出した導体部分が無いので製作上ターン間および層間の短絡の心配が無く、絶縁耐力も上る。また、絶縁物を通じて冷却することが無いので、丈夫な絶縁物を用いることができる。

⑤液体ヘリウムを貯える必要が無く、ヘリウムデューワーは全く不要となる。従来難題を与えていたデューワーの形状および強度に対する問題が軽減される。

⑥導体の中に含まれるヘリウムの量は、従来のデューワーの中に含まれるヘリウムの量よりずっと少なく経済的である。

⑦コイルの予冷に於ても同一システムを用いヘリウムガスを導体内に強制循環することにより均等に冷却される。

⑧一般に液体ヘリウムをトランスファチューブでくみ出す効率は悪く、かつ大量のヘリウムを要する場合にはこれにかなりの時間を要する。閉回路方式を選ぶとこの手間は不要となり外部にヘリウムを逃がすことも無い。

それぞれの電磁石に冷却システムが必要であること、またヘリウムを supercritical 状態にするための熱交換器が必要であることがこの方式をいささか複雑にしている。また、hollow conductor は導体中の冷却孔のために一見平均電流密度が低下するように見える。しか

し、Argonne の bubble chamber 用電磁石の平均電流密度が 775 A/cm^2 ²⁾、CERN の同目的のものにおいて $1,030 \text{ A/cm}^2$ ³⁾、Brookhaven の同目的のものにおいて $2,500 \text{ A/cm}^2$ ⁴⁾ であるので、これらの値と比較すると hollow conductor でこの値を上回することは後に示す値からみても困難なことではない。

3. ヘリウムの強制循環方式および最適動作

ヘリウムの循環システムとしては次に示す方式が考えられる。

①極低温で動作する機械的ポンプを用いる。循環閉回路中のヘリウムの温度は $4\sim 6^\circ\text{K}$ であり supercritical helium のための熱交換器の液体ヘリウムは外部より別途供給する。閉回路を閉じる時に既にヘリウムを supercritical にしておきポンプは流れを作るためのみに用いる方法とポンプにより一度に両者の機能をさせる方法が考えられる。(第1図)

第1図 機械的ポンプによるヘリウムの循環系統

②ヘリウムは室温と極低温の間の閉回路をなし、常温のコンプレッサーを用いカスケード式の熱交換器の最終段を液体ヘリウム中に浸し、ここで supercritical helium を作りコイルに供給する。supercritical helium 用の熱交換器の液体ヘリウムは別途外部より供給する。この場合コンプレッサーが supercritical helium を作る作用と流れを作る作用と二つの機能をす

る。(第2図)

③外部から単独に液体ヘリウムを供給する代わりに、コイル通過後のヘリウムを Joule-Thomson 弁により液化し、これを supercritical helium 用熱交換器に供給する。この場合冷却能力によつては既設のヘリウム液化機を利用することも可能である。つまり液化機の最終熱交換器と Joule-Thomson 弁の間に supercritical helium 用熱交換器とコイルを付加することによりこの系統を作ることができる。液化機のコンプレッサーは②におけると同様二つの機能をする。

(第3図)

①の方式は極低温における機械的ポンプの製作という点がいささか煩雑であり、また大型コイル用としてはポンプの大型化という問題もありむしろ小型のコイル用である。②と③の方式は類似した点が多いが、外部からの液体ヘリウムの供給という手間を考えると③の方式が将来の実用大型電磁石に一番適していると言えよう。

ヘリウムを supercritical 状態に保つためには、4.2°K付近で 2.2 気圧以上の状態に保たねばならない。ヘリウムは低温で圧力が上っても他の流体と比較する

第2図 コンプレッサーによるヘリウムの循環系統

と粘性度は余り大きくなく問題を与えないが熱伝達率の点から最適値を選ぶべきである。第4図はヘリウムの比熱第5図は密度⁴⁾を示すものである。熱伝達率はほぼ両者の積に比例するので 4~5°Kの間の両者の積を取ってみると気圧の上昇とともにこの値は低下し、10 気圧以上では圧力の値には余り関係ない一定値となる。したがって、2.2 気圧以上 10 気圧程度迄が最適圧力と言えよう。流量は熱伝達率、導体中の圧力降下およびこれらに関係した超電導状態の安定性によって決ってくる。電磁石への熱侵入としては三つの主要原因がある。電流上昇に供う current lead からの熱侵入および pancake の間の結合部からの発熱。第二に flux flow resistance および eddy current による発熱。この第二の原因は定常状態には考慮しなくとも良い。第三に flux jump による発熱がある。十分な冷却能力としてはこれら三つの値の和を上廻るものが電流上昇に時には要求される。

4. 超電導 hollow conductor の製作例

これまで試作あるいは実用に用いられた超電導 hollow conductor を第1表に示す。多く利用されたの

第3図 液化機を利用したヘリウムの循環系統

は IMI の導体である。製作方法としては IMI, Thomson-Houston, AIRCO の製品は Nb-Ti と安定化材を同時に線引きしたものである。この線引きの際は

じめから管状に引く方法と板状に引きこれを矩形断面を持った管状に製作する方法とがあり、IMI は前者の方法を取り、Thomson-Houston は後者の方法を

第4図 低温における圧力をパラメータとしたヘリウムの比熱

第5図 低温における圧力をパラメータとしたヘリウムの密度

第1表 超電導 hollow conductor の製作例

製 造		IMI		Thomson-Houston		AIRCO	CGE	
外 側 サイズ		6.5×5.0 mm ²	18.0×18.0 mm ²	6.5×5.0 mm ²		18.0×18.0 mm ²	10.4×10.4 mm ²	10.0×10.0 mm ²
内 側 サイズ		3.7×2.1 mm ²	8.5×8.5 mm ²	3.8×2.3 mm ²		9.0×9.0 mm ²	5.2 mmφ	5.0 mmφ
臨界値		1,700A 4.2°K, 70 kG	5,500A 4.2°K, 40 kG	1,600A 5°K 70 kG				
超 電 導 材	材 料	Nb-44% Ti	Nb-44% Ti	Nb-40% Ti	Nb-40% Ti	Nb-40% Ti	Nb-Ti	Nb-Ti
	本 数	14 本	16 本	342 本	456 本		37 本	12×4 本
	サイ ズ	半円形 約 0.2 mm ²	左記のものよ り少し大きい	0.1mmφ	0.1mmφ			0.254 mmφ +Cu
超電導 線の占 積率 (含穴)		8.6%		8.3%	11.0%			
使用例		CERN Saclay	CERN	CERN		CERN	Stanford Univ. Brookhaven Nat. Lab.	CERN
安定化 材 料		Cu	Cu	Cu		Cu	Cu	Al

取っている。CGE の製品は Nb-Ti 線を補強用のステンレス線と供に撚り線とし、これに外部からアルミニウムを被せこの際 hollow conductor として全体を引いたものである。更に超電導電力ケーブル用として、Thomson-Houston が銅を安定化材として円形断面を持った hollow conductor を試作した。その諸特性に第2表に示すとおりである。簡単な製作方法として矩形断面の銅の hollow conductor の上に安定化した複合超電導線を巻きつけこれをインジウムなどにより半田付する方法が取られている。第6図に IMI によりこの方法で試作された導体の断面を示す。後に述べる Omega Project の導体もこの方法により、長さの限界の技術的問題が緩和される。ここに紹介した導体は製作例であり、電磁石を建設するに当っては、それぞれの動作特性や流体回路からサイズを決めるべきである。

第2表 Thomson-Houston 製電力ケーブル用 hollow conductor の試作例

内 径	3.5 mm
外 径	8.0 mm
臨 界 値	0 kG 20,000 A 50 kG 5,000 A
超 電 導 材	Nb-40% Ti 150 $\mu\phi$ 130 本

Thomson-Houston 社が試作した。
ケーブル用超電導材

第6図 IMI の multifilament super-conductor を利用した hollow conductor

Hollow conductor による電磁石は導体は流体的には並列に、電気的には直列に連結される。従来方式の場合の如く、線引きされた線の長さが不整いの場合巻線途上で電線を連結するという方法は取れない。Morpurgo は後に述べる第2回目に製作した電磁石

に於て、電子ビーム加工により導体を溶接し、更に他の安定化超電導線で補助をするという方法で成功している。

5. 電磁石の製作例

Supercritic helium によって超電導体を冷却することは MIT の Kolm ら⁵⁾ によって既に 1965 年にその考え方が発表されており、彼らは supercritic helium の密度を測定した。その後、Stanford 大学の Brechna⁶⁾ によりより進んだ計画が発表された。Brechna⁷⁾ は以後少しずつ実験を進め、Nb₃Sn を張りつけた角形 hollow conductor を製作し、外部磁界中での流速と超電導転移との関係を調べた。彼が次に製作した、Nb-Ti を用いた外サイズ 0.50 cm×0.50 cm 内サイズ 0.22 cm×0.22 cm の正方形断面を持った hollow conductor では、電源によって限定された最高の電流密度（穴を含む導体の平均値、以下も同様の定義）16,000 A/cm² でも十分に安定であった。これらの薄体の長さとしては数 m、流体としては supercritic helium ではなく通常の液体ヘリウムが用いられた点など実験の段階を出なかった。

この間、CERN の Morpurgo⁸⁾ は前述の高純度アルミニウムを安定化材として使用した hollow conductor で円筒ソレノイドを製作した。種々のデモンションは第3表実験 I に示すものである。冷却系としては加圧により supercritic helium を作り、double action ポンプで流れを作るという方法を取った。最大臨界値は 900 A で 28°K に達した。この時の導体内の電流密度は 3,600 A/cm²、コイル内の圧力は 3~4 気圧、コイルの圧力降下は約 18m の長さに於て 0.10~0.15 気圧、コイルの入口温度 4.7°K、一本の conductor の流量は 26 l/h であった。

第3表 CERN の hollow conductor 電磁石の実験

	実 験 I	実 験 II
内 径	60 mm ϕ	280 mm ϕ
外 径	260 mm ϕ	580 mm ϕ
高 さ	170 mm	450 mm
ダブル パンケーキの数	16	32
一本の流路の長さ	18.3 m	304 m
コイル内の平均 電流密度	3,050 A/cm ²	3,450 A/cm ²

次の段階として、Morpurgo⁹⁾ は Nb-Ti と銅による外サイズ $0.65\text{ cm} \times 0.50\text{ cm}$ 、内サイズ $0.37\text{ cm} \times 0.21\text{ cm}$ の矩形断面の hollow conductor (前述の IMI 製作によるもの) を使って円筒ソレノイドを再び製作した。種々のデimensionは第3表実験IIに示すものである。冷却系としては ADL のヘリウム液化機を使用した前述③の方法によるものである。この実験結果は臨界値 $1,400\text{ A}$ (導体内の電流密度 $4,300\text{ A/cm}^2$)、 48 kG 、入口の圧力 8 気圧 、出口圧力 5 気圧 、He の入口の温度 4.5°K 、出口の温度 5.0°K であった。常電導転移は上記二つのコイルに於ていずれも再現性があったことが報告されている一方、サックレー原子力研の筆者らのグループ¹⁰⁾¹¹⁾ は Morpurgo と同様の IMI 製作の hollow conductor を用いレーストラック状のパンケーキコイルを重ねた電磁石を製作し、入口圧力 5.5 気圧 、出口圧力 4.8 気圧 、He の入口温度 4.8°K 、出口温度 5.1°K 、quenching current $2,300\text{ A}$ (導体内電流密度 $7,000\text{ A/cm}^2$) を得た。第4表にこのコイルの寸法を示す。

第4表 Saclay における筆者らの hollow conductor 電磁石

レーストラック型	
内 寸 法	15.8 cm × 25.0 cm
外 寸 法	41.4 cm × 50.6 cm
高 さ	11 cm
パンケーキ数	6
導体平均電流密度 (含穴)	$3,080\text{ A/cm}^2$ at $1,000\text{ A}$
中心磁界	10.5 G/A
最大磁界	14.6 G/A
インダクタンス	15 mH

筆者らが用いたナイロン円板による絶縁方式で、インジウムガasketにより高圧力に耐えるようにしてある。第9図の方法は解体の時便利であるという利点がある。

6. Hollow Conductor のプロジェクト

Brookhaven 国立研究所の Prodel¹²⁾ らは Na-

第7図 Brechna による絶縁連結部分

第8図 CERN の絶縁連結部分

電磁石組立ての場合、実際に問題となるのは流体回路の連結で極低温で充分高圧に耐え、かつ電氣的に良く絶縁される必要がある。第7図は Brechna らが用いた ceramic による絶縁方式で、第8図は Morpurgo らが用いたアルミニウム陽極酸化物による絶縁方式で、機械的には少し温度を上げはめ込む方法により極低温でも 300 気圧 、 $4,000\text{ V}$ に耐える。第9図は

第9図 Saclay 筆者らの絶縁連結部分

第10図 Brookhaven 提案の hollow conductor

第5表 Brookhaven National Laboratory
提案の hollow conductor を用いた
bubble chamber magnet

中心磁界	38 kG
平均磁界	40 kG
超電導線上の磁界	65 kG
一つのコイルの高さ	135 cm
内 径	690 cm
外 径	875 cm
コイルの間隔	150 cm
二つのコイルの引力	30,000 tons
全 重 量	400 tons
起 磁 力	3×10^7 AT
冷 却 系	4.5°K, 2.23 気圧以上

tional Accelerator Laboratory の 200 GeV Proton Synchrotron を用いる実験の Bubble Chamber 電用磁石として第 10 図に示すような hollow conductor を用いた内径 7m の超電導電磁石の建設を提案した。第 5 表に電磁石の諸特性を示す。第 11 図はその組立図を示すものである。

Saclay 原子力研究所の筆者らのグループ¹³⁾では、現在ソ連のセルプコフで組立中の Bubble Chamber “Mirabelle” の磁界を増加する手段として、磁気回路および Bubble Chamber 本体をそのままにしておき Coil のみを超電導で置き換える試算を行なった。超電導 hollow conductor による方法がその唯一の解法であり、技術的には充分可能である。試算の結果は

第6表 Saclay “Mirabelle” の hollow
conductor coil 置換の試算

アンペア・ターン	13.75×10^6
巻 数	2,500
導体の全長	43.5 km
導体重量	100 tons
導体中の電流密度	22 A/mm ²
自己インダクタンス	37 H
蓄積エネルギー	550 MJ
中心磁界	40 kG
導体上の磁界	55 kG
コイル間の引力	5,500 tons
直線部に加わる力	4,000 tons
5,500 A 用 Current Lead による 損失 (4 本)	110W
水平支持柱による損失	20W
垂直支持柱による損失	30W
副射による損失	25W
合計	185W
液体窒素の消費量	100l/h

第6表に示すコイルおよび冷却系となる。Mirabelle の特徴としては磁界が水平方向であること、コイルがレーストラック型で直線部が比較的に長いことである。とくに後者はこの部分に加わる電磁石の問題を充分検討する必要がある、その一案として第 12 図に示すようにレーストラックのいくつかのグループの間にステンレスの板を入れこれらによって電磁力に耐える方法を取っている。

CERN の Morpurgo ら¹⁴⁾¹⁵⁾ は前述の hollow conductor による二つの実験の成功に基いて、Omega Project と呼ばれる spark chamber 用の超電導電磁石の建設を決定した。電磁石、導体、冷却機の特徴は第7表に示すものである。電磁石の継鉄はフランスの Schneider-Creusot 超電導体とコイルの製作はスイスの Oerlikon に、冷却機はスイスの Sulzer Brothers に既に発注され、合計邦貨8億円の予算で1971

年末始運転の予定で作業が進行中である。第13図は Omega Magnet の見取り図を示す。巻線部の断面詳細は第14図の如くになっており、導体の絶縁はガラステープを巻きつけ、更に全体をエポキシ樹脂で固定する。したがって、ターン間層間には電磁力に対する補強材としては何も加えられていない。全体の補強材としてコイルを二枚のステンレス・スチール板ではさみこれを72本の支持柱にて電磁石の継鉄の部分に固定

第11図 Brokhaven 提案 hollow conductor による Bubble Chamber Magnet

第7表 CERN “Omega Project” の
hollow conductor の設計仕様

電磁石系	
中心磁界	18 kG
円形コイルの内径	3.0 m
コイル間の距離	1.5 m
ポール間の距離	2.0 m
全重量	1,400 tons
定格電流	5,000 A
ターン数	408 turns/coil
継鉄間の電磁力	4,000 tons
継鉄に対するコイルの電磁力	2,000 tons
コイルに加わる水平方向の力	150 tons
起磁力 (コイル二個)	4×10^6 AT
蓄積エネルギー	50 MJ
導 体	
導体外部寸法	18×18 mm ²
導体内部寸法	9×9 mm ²
単位長	920 m
抵抗率 (於 4.2°K 35 kG)	$2.5 \times 10^{-8} \Omega\text{-cm}$
臨界電流値 (於 5°K 35 kG)	6,350 A
超電導線の直径	0.25 mm ϕ
超電導線の本数	120 本
撚りのピッチ	20 cm
導体電流密度	1,960 A/cm ²

冷 却 機

4.5°Kにおける熱侵入

コイルの支持柱からの熱侵入 180 W

輻射による損失 80 W

その他 40 W

合計 300 W

Current lead 4本に要する 43 l/h

液体ヘリウム

冷却機能力として安全率を考え

4.5°K 500 W

液体ヘリウム 72 l/h

80°K 4,000 W

第12図 Mirabelle の hollow conductor
の補強方法

第13図 Omega Magnet の見取り図

OMEGA MAGNET

Magnetic field 18 kG

Useful volume 14m²

Total weight 1,400 Tons.

Gap between poles 2 m

Gap between coils 1.5 m

第14図 Omega Magnet の巻線部

する。ステンレス・スチール板は更に銅の板で外部を被覆し、この銅板の端部は 4.4°K のヘリウムガスと液体の混合体を循環させることにより冷却される。一方、支持柱は多量の熱伝導を防ぐため第 15 図に示すようコイル面に斜めに連結される。更に、この支持柱の高温端は第 16 図に示すよう液体窒素の循環により冷却される。水平方向の力を保持するためには同様の方法で 36 本の支持柱でコイルを内側より固定する。導体は第 17 図に示す如く正方形断面を持った銅の hollow conductor の上に、それぞれ 4 本の超電導線 ($0.25\text{mm}\phi$) が入った導体 30 本がはりつけられ、更にその外部に 41 本の銅線が補強のため巻きつけられ、

全体を SnAg 5 の半田で固めたものである。導体の撚りのピッチは 20cm である。コイル全体の平均電流密度は $1,800\text{A}/\text{cm}^2$ である。

コイル部分への熱侵入としては支持柱からの熱侵入がその主なもので、 4.5°K に於て 180W 、輻射による熱侵入 80W 、その他 40W 合計 300W 、current lead 4 本を冷却するに要する液体ヘリウム 43l/h が必要である。安全率を考え、 4.5°K にて 500W 、液体ヘリウムの消費量 72l/h 、支持柱の冷却用として 80°K にて $4,000\text{W}$ 、これらを冷却機的能力と決定した。冷却回路としては、前述③の方式を用い第 18 図に示すよう一つのパンケーキをヘリウムが通過した後、再び予備クライオスタットに入り冷却され次のパンケーキに進むよう連結する。一つのパンケーキの hollow conductor の長さ 1km を三本直列につなぎ、一つのコイルを二つの並列回路とする。Omega Magnet は hollow conductor を用いた最初の実用超電導電磁石としてその完成が期待されている。

7. Hollow Conductor の安定性

強制冷却による超電導 hollow conductor の安定性は、従来の自然対流による冷却の場合とは同じでは

第15図 Omega Magnet の支持系統

ない。後者の場合には冷媒の温度は導体の常電導部で消費される電力に無関係であるのに対し、前者では流れにそって導体と流体とが相互に影響を及ぼす。hollow conductor の一部分が常電導になった時、熱平衡の関係は次式によって示される。

$$\left. \begin{aligned} K \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial x^2} - C_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial t} + G + P - Q &= 0 \\ C_2 V \frac{\partial \theta_2}{\partial x} + C_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial t} - Q &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

θ_1 : 導体温度

θ_2 : ヘリウム温度

K : 導体単位長当たりの熱伝導度

C_1 : 導体単位長の比熱

C_2 : ヘリウム単位長当たりの比熱

V : ヘリウムの速度

G (θ_1) : 単位長のジュール発熱

$P(x, t)$: 単位長当たりの外部からの侵入熱

$Q(\theta_1, \theta_2)$: 導体からヘリウムへの単位長当たりの power flow

hollow conductor がある長さにわたって熱パルスを受け常電導になった後、再び超電導になるかどうかは(1)式を説くことによって求まる。(1)式は種々の仮定をもうけると解析的にとける¹⁶⁾が、Morpurgo¹⁵⁾は先に述べた Omega Magnet の導体についてより正確に数値解析法をもって解を求めた。解の条件は次に示すものである。

- 冷却回路は充分に長いものとする。
- $t=0$ に於て導体とヘリウムはどこでも同じ温度 θ_0 を有する。
- 導体の中央部長さ L にわたって、 τ の時間 P の power の熱パルスを受ける。
- $Q = \alpha \cdot h (\theta_1 - \theta_2)$

第16図 Omega Magnet の支持棒の詳細

第17図 Omega Magnet の hollow conductor

AUXILIARY CRYOSTAT

第18図 Omega Magnet の冷却サイクル

α は熱伝達係数 $0.15 \text{ W/cm}^2\text{K}$ h 導体の穴の周囲

e) $\theta_1 < \theta_1'$ において $G = 0$
 $\theta_1' < \theta_1 < \theta_1''$ において $G = I^2 R \left(\frac{\theta_1'' - \theta_1}{\theta_1'' - \theta_1'} \right)$
 $\theta_1 > \theta_1''$ において $G = I^2 R$

第 19 図 (a), (b) に示す結果は長さ 30 cm にわたって, 0.2 sec の間それぞれ $P=2.5 \text{ W/cm}$, $P=1.5 \text{ W/cm}$ の熱パルスが加わった場合の計算値である。(a) の場合には常電導部はいささかずつ振幅が増加する傾向があるが, (b) の場合にはいささかずつ消滅する傾向にある。第 20 図は, 0.2 sec の熱パルスを加えた場合, 常電導部の消滅, 成長の条件を入力 power と加熱距離によって示したものである。曲線の上部領域が不安定で, 下部領域が安定であることを示す。

8. む す び

CERN の Omega Project は既に製作が進行中であるが, 超電導電磁石の立場から安定度, 常電導転移の問題などについてこの方法の電磁石において未だ検討すべき点が多い。一方, 冷却系の方からみても熱伝達率, 圧力降下などを充分検討した上で最適設計にもってくるべきである。本方式は最近話題になっている超電導電力ケーブルへ直ちに应用可能であることから

$\theta_1 = \theta_2 = 4.8^\circ\text{K}$ at $t=0$, $\theta_1' = 5.5^\circ\text{K}$,
 $\theta_1'' = 7.5^\circ\text{K}$, $V = 100\text{cm/sec}$,
 $R = 1.5 \cdot 10^{-8} \Omega/\text{cm}$, $K = 6\text{W.cm/K}^\circ$,
 $hA = 0.5\text{W/cm.K}^\circ$, $C_2 = 0.35\text{Joules/cm.K}^\circ$,
 $C_1 = 20(10^{-5} \cdot \theta_1 + 7 \cdot 10^{-5} \cdot \theta_1^3)\text{Joules/cm.k}^\circ$.

第19図 Omega 導体における常電導部の伝搬

第20図 Omega 導体における安定条件

も興味ある技術である。

参考文献

- 1) 米満博夫: 低温工学 Vol. 4 No. 6 (1969).
- 2) J.Purcell: Superconducting Magnet System for the 12 foot Bubble Chamber ANL/HEP 6813 Argonne, Illinois.
- 3) F.Wittgenstein: Proceedings of the 1968 Summer Study on Superconducting Devices and Accelerators, p. 828.
- 4) D.P.Brown et al: ibid p. 794.
- 5) H.H.Kolm et al: Advances in Cryogenic Engineering Vol. 11, p. 530.
- 6) H.Brechna: The proceedings of 1st ICEC 1967 (Heywood-Temple Industrial Publications) p. 119.
- 7) H.Brechna: Proceedings of the 1968 Summer Study on Superconducting Devices and Accelerators P. 478.
- 8) M.Morpurgo: CERN 68-17, Nuclear Physics Division 13 May 1968.
- 9) M.Morpurgo: CERN 69-25, Nuclear Physics Division 22 September 1969.
- 10) C.Lesmond, C.Lottin, S.Shimamoto: Experiment with Hollow Conductor Superconducting Magnet, International Conference on Magnet Technology, May, 1970 Hamburg.
- 11) S.Shimamoto: to be published.
- 12) A.G.Prodell: Proceedings of the 1968 Summer Study on Superconducting Devices and Accelerators, p. 786
- 13) H.Desportes, C.Lesmond, S.Shimamoto, B.Tsai: Estimation Preliminaire de Bobines Supraconductrices pour "Mirabelle" 6/3/1969, Notes Techniques du STIPE Saclay
- 14) The Omega project: proposal for a large magnet and spark chamber system, internal report 68-11 CERN
- 15) M.Morpurgo: The Design of the Superconducting Magnet for the "OMEGA" Project, to be published in Particle Accelerators.
- 16) W.J.Greene and E.Saibel: Advances in Cryogenic Engineering Vol. 14. p. 138.