宇宙線測定用超電導電磁石の設計

島 本 進*

*電気試験所・機器部超電導研究室
(サックレー原子力研究所滞在)

(1970年6月27日)

The Design of a Air-borne Superconducting Magnet for Cosmic Ray Measurement

Susumu SHIMAMOTO

Electrotechnical Laboratory, Tokyo, Japan
(On stay at Centre d'Etude Nucleaire de Saclay)

(Received June 27, 1970)

The design process of a air-borne superconducting magnet for cosmic ray measurement is presented. The weight of all this magnet system must be less than 300 kg and the magnetic field is 20 kG with enough accesses for cosmic ray and for optical system.

The superconducting magnet must work during 12 hours with persistent current mode. The construction of this magnet system is possible with a helium tank of 80l, utilizing the aluminum stabilized superconducting wire or the multiple filamentary superconducting wire.

1. ま え が き

放電箱 (spark chamber), セレンコフ・カウンタ (Cerenkov counter) 等とともに気球で超電導電磁石をもちあげ、各種の宇宙線の運動量或はエネルギーを測定することが可能である。すでにカリフォルニア大学¹⁾でこの種の超電導電磁石の製作、動作に成功している。本目的の超電導電磁石は、強磁界を必要とすること、上空で使用するため軽量であること、永久電流で使用されること、ヘリウムの長時間接続等超電導電磁石の特性を著しく要求されるので、その設計からみて大変興味深いものである。また、宇宙技術の進歩とともに、宇宙ステーション内に大きな超電導電磁石を設置し、宇宙線の測定が可能になることからみても興味深い。筆者等はサックレー原子力研究所内の宇宙線測定を行っているグループより、設計、製作の依頼をうけ、設計案をまとめたので報告する。

2. 使 用 条 件

本電磁石は次に列記する使用条件を要する。

- ①使用磁界は約 20kG あるいはそれ以上で、上空で磁界を零にできること。電流を変化することはおこなわない。
- ②磁界の均一性はきびしくなく、三桁の精度で軸成分 B_z の磁界が解っていれば良い。
- ③磁界の中心にたいし、50度～80度の角度を持った宇宙線の入口を要する。
- ④永久電流状態で、地上からのヘリウムの補給なしに 10～12時間一定磁界を保てること。
- ⑤電磁石本体、巻枠、クライオスタット、液体ヘリウム等全体で 300kg をこえないこと。
- ⑥放電箱の大きさは、巾 24cm、高さ 24cm、奥行 22cm である。
- ⑦粒子の軌道を光学系統で写すため、充分な空間が必要である。

⑥地上落下の時、気球全体は最大 4.5m/sec の速度になるので、この時の力に充分耐えること。(但し、クライオスタットその他全体はパネで充分、力を緩和される。)

上記の使用条件の中で⑥の重さの制限が一番きびしく、この点が設計の第一歩となった。カリフォルニア大学の場合は鞍型コイルを二つ向き合せた方式をとったが、筆者等の案では、電磁力、磁界分布、クライオスタットの各問題点から考えて、ソレノイド形式を選んだ。ソレノイド形式をとるにしても、二つのソレノイドにするか、一つのソレノイドにするかは以下に述べるように検討を進めた。

二つのソレノイドにすると放電箱は当然この二つのソレノイドの中に入り磁界利用の点から理想的であるが、電磁力を支えるための充分な構造物が必要である。また、この構造物の間は諸々の光学装置、宇宙線の入口等の点からできるだけ室温の利用空間にしなければならないので、熱絶縁の構造が複雑になる。一方、一つのソレノイドにすると、電磁力に対する問題は全く無くなり、液体ヘリウムの補給、デュワーの機構の点からみても楽になるが、放電箱はソレノイドの側面に接して設置されるので、磁界の点からは発生する磁界を充分に利用できず、必ずしもよい方法とはいえない。このように、それぞれの方法に長所、短所があるので、一応入射角 60° 及び 80° の二つのソレノイドの方式と、一つのソレノイド方式の三つを検討した。二つのソレノイドによる実験装置の配置は第 1 図に示す様なものとなる。

3. 電磁石の寸法と磁界分布

きまった重さで所要の磁界の発生ができるかどうかは次の方法によった。二つのソレノイドの場合、ソレノイドの間の距離 L をきめる。ソレノイドの長さ l 、内半径 a_1 、外半径 a_2 とすると、電線の占める体積 V は二つのソレノイドにたいし、

$$V = 2l\pi(a_2^2 - a_1^2) \quad (1)$$

となる。後に述べるように、アルミニウム安定化導線を用いる可能性もあるが、一応銅安定化線を想定して設計を進めると、比重を 0.8 (全平均) とし、重さは $M = 0.8V$ であたえられる。一方、二つのソレノイドによる中心磁界は、

Fig. 1 宇宙線測定装置

$$B_z = u_0 j \left\{ \left(\frac{L}{2} + l \right) \ln \frac{a_2 + \sqrt{a_2^2 + (L/2 + l)^2}}{a_1 + \sqrt{a_1^2 + (L/2 + l)^2}} - \frac{L}{2} \ln \frac{a_2 + \sqrt{a_2^2 + (L/2)^2}}{a_1 + \sqrt{a_1^2 + (L/2)^2}} \right\} \quad (2)$$

であたえられる。(式中の単位系はすべて MKS 以下同様) したがって、コイルの重さをめると、体積の式 (1) より a_1 , a_2 , l の中一変数少くなるので、 B_z は a_1 , a_2 の二変数の式となる。 a_1 を変数、 a_2 をパラメータとして、電流密度 j は degradation の可能性を含み 10^4A/cm^2 とし、 B_z の最大値を求めることを行った。

一つのソレノイドの場合、 Z をソレノイドの中心点からみた放電箱の中心の点とすると、その点の磁界はよく知られた式

$$B_z = \frac{u_0 j}{2} \left\{ \left(\frac{l}{2} - z \right) \ln \frac{a_2 + \sqrt{a_2^2 + (l/2 - Z)^2}}{a_1 + \sqrt{a_1^2 + (l/2 - Z)^2}} + \left(\frac{l}{2} + z \right) \ln \frac{a_2 + \sqrt{a_2^2 + (l/2 + Z)^2}}{a_1 + \sqrt{a_1^2 + (l/2 + Z)^2}} \right\} \quad (3)$$

によってあたえられ、二つのソレノイドの場合と同様の方法で B_z の最大値をもとめる。

ソレノイドの寸法及び位置がきまると磁界分布をもとめる。一つのソレノイドの任意の点 (r, z) の磁界はつぎの式であたえられる。ソレノイドの長さの座標は ξ_1 , ξ_2 、半径は ρ_1 , ρ_2 で示すと、

$$B_z = \frac{j\mu_0}{4\pi} \int_{\xi_1}^{\xi_2} \int_{\rho_1}^{\rho_2} \int_0^{2\pi} \frac{(\rho - r \cos \phi) \rho d\phi d\rho d\xi}{[(z - \xi)^2 + \rho^2 - 2\rho r \cos \phi + r^2]^{3/2}}$$

$$= -\frac{\pi_0 j z}{4\pi} \int_0^{2\pi} \left\{ \ln[(\rho - r \cos \phi) + \sqrt{Z^2 + r^2 + \rho^2 - 2\rho r \cos \phi}] + \frac{1}{2} \frac{r \cos \phi}{Z} \right.$$

$$\ln \frac{\sqrt{Z^2 + r^2 + \rho^2 - 2\rho r \cos \phi} - |Z|}{\sqrt{Z^2 + r^2 + \rho^2 - 2\rho r \cos \phi} + |Z|}$$

$$- \frac{r \sin \phi}{|Z|} \tan^{-1} \frac{|Z|(\rho - r \cos \phi)}{r \sin \phi \sqrt{Z^2 + r^2 + \rho^2 - 2\rho r \cos \phi}} \left. \right\} d\phi \Big|_{\xi_1}^{\xi_2} \Big|_{\rho_1}^{\rho_2} \quad (4)$$

$$B_r = \frac{j\mu_0}{4\pi} \int_{\xi_1}^{\xi_2} \int_{\rho_1}^{\rho_2} \int_0^{2\pi} \frac{(z - \xi) \rho \cos \phi d\phi d\rho d\xi}{[(z - \xi)^2 + \rho^2 - 2\rho r \cos \phi + r^2]^{3/2}}$$

$$= \frac{j\mu_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} \left\{ \cos \phi \sqrt{Z^2 + \rho^2 + r^2 - 2\rho r \cos \phi} \right.$$

$$+ r \cos^2 \phi \ln[(\rho - r \cos \phi) + \sqrt{Z^2 + \rho^2 + r^2 - 2\rho r \cos \phi}] \left. \right\} d\phi \Big|_{\xi_1}^{\xi_2} \Big|_{\rho_1}^{\rho_2} \quad (5)$$

となる。ただし、 $Z_1 = z - \xi_1$ 、 $Z_2 = z - \xi_2$ である。二つのソレノイドの場合はいうまでもなく、ソレノイドの座標をきめて、上式のそれぞれのソレノイドによる和を取ればよい。

二つのソレノイドの場合は、 $L = 30\text{cm}$ として(2)式による最適条件の解析をおこない、ソレノイドの寸法をきめた。銅安定化線を想定すると、二つのソレノイドの場合は、線の重さ 120kg、一つのソレノイドの場合は線の重さ 160kg とした。300kg の内残された量がクライオスタット、巻棒にあてられる。ソレノイドの内径は放電箱の方からみても余り選択度は大きくないが、(2)式の最適条件もきびしいものでなく、 a_1 、 a_2 の数 cm の変化によって大きく変るものではない。一つのソレノイドについても同様の解析を行った。60度の入射角をもった二つのソ

レノイドの系を No. 1、一つのソレノイドの系を No. 2、80 度の入射角度の入射角を持った二つのソレノイドの系を No. 3 と呼ぶと、それぞれの寸法、磁界は第 1 表に、ソレノイドの配置及び磁界分布は第 2 図～第 8 図に示すものである。これらの図表を検討した結果、それぞれの問題は次のようなものとなった。No. 1 は入射角がクライオスタットに取り付けると 50 度しかとれない。

No. 2 はソレノイドに接して放電箱を設置するとしても、放電箱中で所要の磁界を得るためにはソレノイド中の最大磁界が非常に大きくなり、超電導線の特性からみて限界に近い値となる。

No. 3 は入射角は大きくとれるが、中心磁界が No.

第 1 表 三つの案の電磁石の特性 (重さは銅安定化線を想定したもの)

	No. 1	No. 2	No. 3
ソレノイドの長さ	5.0cm	13.0cm	11.5cm
ソレノイドの内径	24.0cm	24.0cm	20.0cm
” の外径	50.0cm	50.0cm	35.0cm
ソレノイド間の距離	30.0cm		30.0cm
超電導線の重量	120kg	160kg	120kg
中心磁界 (放電箱)	16.4kG	17.0kG	11.8kG
最大磁界	42.4kG	78.0kG	51.4kG

Fig. 2 第 1 案 (No. 1) の電磁石

1 より低下し、それに反して最大磁界が No. 1 よりあがり、degradation の問題からみた場合 No. 1 より不利である。上記の考察から、入射角に譲歩をあたえ、No. 1 の系をここで取りあげた。(4), (5)式より No.1による磁界をもとめ、等磁界強度線及び磁力線の分布をもとめた。結果を第9図に示す。

No. 1 の方式において、一つのソレノイドによる他

Fig. 3 No. 1 電磁石の B_z の分布

Fig. 4 第2案 (No. 2) の電磁石, P_1 , P_2 はそれぞれの角度に対する放電箱の中心点を示す

Fig. 5 No. 2 電磁石の B_z の分布

のソレノイドが受ける電磁力は、 10^4 A/cm^2 を想定すると内側で 4 kg/cm^2 , 外側で 5 kg/cm^2 となり、もう一方の対称の部分を考えてと引力はそれぞれ 8 kg/cm^2 , 10 kg/cm^2 となる。全面に加わる引力は 14.2 tons になる。これを支持するためにソレノイド間に充分な構造物が必要であるが、上記の値は 10^4 A/cm^2 の想定であるので、臨界電流密度がこの値をうまわった場合の利用を考えると、2.5 倍以上の強度が必要である。コイル巻棒は外径に加わる電磁力が大きいことを考え、二つの円筒と円板の一体となったものを作り、巻

Fig. 6 No. 2 電磁石の B_z の分布

Fig. 7 第3案 (No. 3) の電磁石

Fig. 8 No. 3 電磁石の B_z の分布

線は別途行った後この巻枠中にソレノイドをおさめ、その後もう一枚の円板で封じ込めこれを溶接してコンパクトな形にする。こうすることによって巻枠の外周部が変形することを防ぐ。

4. 超電導線の選択

この設計にたいして考えられる超電導線には、重さの点を考慮してアルミニウム安定化線、もう一つの案として degradation が殆どないといわれているフィラメント状超電導線が挙げられる。両者について以下のように検討した。

1) アルミニウム安定化線

CGE (Compagnie Générale d' Electricité) から製作、市販されているアルミニウム安定化線について検討を進めた。これは Supercon T 48 B 0.013"φ の超電導線 6 本と同径のステンレス線 1 本を中心に撚り合せた上にアルミニウムを被覆し、表面に陽極酸素を施しさらに エボキシ 系絶縁材で絶縁された直径 1.41 mm の線である。この線については筆者等が既に種々

の条件下で minimum propagating current の実験を行っている²⁾。本目的の基礎実験として、内径 56.0 mm、外径 90.5mm、長さ 198.0mm のソレノイドをつくりこれを他のソレノイドの中に入れてその特性を調べた。第10図に minimum propagating current の結果とともにこの結果を示す。電流固定、外部磁界掃引の臨界値と、その逆の場合の臨界値には著しい差はみられず、これらの結果は Supercon T 48 B の臨界値³⁾とも殆ど一致している。図中に示した本電磁石の動作線は十分に超電状態の領域に入っている。一方重さの点からみても比重は線のみで 4g/cc であり巻線の占積率を考えると更に下る。この値は次に述べる銅安定化線の密度の約半分であり、気球に掛る負担を少くしたり或はその分クライオスタットの強度を増加させることができる。上記の結果からこの超電導線をわれわれの目的の電磁石に利用することは可能であり、これを用いることにより電線自体の重さを減輕するという特徴がある。

2) フィラメント状銅安定化線

Fig. 9 No. 1 電磁石の磁束分布 (実線) と等磁束密度分布 (一点鎖線)

IMI と AIRCO の夫々のフィラメント状銅安定化線を考える。IMI の C 361 は銅と超電導材の比が 2:1 で、44kG に於て全平均電流密度 $6 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ が得られることが報告されている⁴⁾。一方, Argonne 研究所における, 銅と超電導の比が 3:1 の AIRCO の電線を用いた 56 Kjoule のソレノイドの実験では全平均電流密度 $1.7 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ が得られている⁵⁾。この値は短線の特性和殆ど同じ値とみてよい⁶⁾。われわれのソレノイドのエネルギー, 設計のスタートの 10^4 A/cm^2 の電流密度を考慮すると AIRCO の電線で充分であり, かつ quenching の場合を考えると銅の量が多いことが好ましい。第11図は AIRCO の短線の特性和, われわれの電磁石の動作特性和を比較して示すもので, 動作点は十分に余裕を取ってある。第2表には CGE と AIRCO の導線の性較を比較して示した。

第2表 CGE と AIRCO の超電導線の特性和

Alustable (CGE)

外 径	1.41mm ϕ
超 電 導 線	0.33mm ϕ (銅被覆) $\times$ 6
絶 縁	陽極酸化+エポキシ
単位長価格	¥1,200/m

KRYOCONDUCTOR (AIRCO)

銅と超電導線との比	3:1
超 電 導 線	30 μ
超電導線の数	361
絶縁された導体の寸法 (正方断面)	1.2mm $\times$ 1.2mm
絶 縁	フォルマル
絶縁材の厚さ	20 μ
撚りのピッチ	12.5mm
単位長価格	¥600/m

Fig. 10 CGE. Alustable の諸条件による minimum propagating current と Coil の臨界値及び No. 1 電磁石の動作線

5. クライオスタット

この電磁石の巻棒はヘリウム容器をかねる。この方法は既にサックレーで偏極ターゲットの超電導電磁石で成功している⁷⁾。もう一つの本装置の特徴はヘリウムの補給タンクがあり単に液の補給をしているということである。理想的には補給タンクなしで巻棒である容器が縦方向に充分長く、これに充したヘリウムが時

間内持続するのがよい。しかし、この方法ではセレンコフ・カウンター等の設置ができなくなる。したがって、第12図に示すように、電磁石の横に補給タンクを設置し、電磁石とは下部のパイプでつなぎ、液面を一定とするために、この内圧によって下部から補給する方法をとる。二つのソレノイドは電気的に直列につながれ、その連結は電磁力を支持するパイプの中におさめ、この支持棒の中にも液体ヘリウムが入るようにする。電流供給の導線は、充電の時のみ用い永久電流状態ではその後はずし外部に引きぬけるようにする。電磁石放電のための抵抗は重さのためからできるだけ用

Fig. 11 AIRCO. filamentary superconducting wire の shot sample の臨界値と No. 1 電磁石の動作線

第3表 No. 1 電磁石の特性の詳細

巻線の内半径	12cm
巻線の外半径	25cm
1 ソレノイドの長さ	5cm
ソレノイド間の距離	30cm
絶縁電線の寸法	0.120cm (正方形)
総電線長	11,000m
(銅安定化線 KRYOCONDUCTOR)	
全ターン数	9,000
重量(超電導線のみ)	120kg (銅安定化線)
定格電流値	150A
(KRYOCONDUCTOR)	
定格平均電流密度	10,000A/cm ²
エネルギー(於定格電流値)	175 KJ
アンペア・ターン	1.3×10 ⁶ AT
中心磁界	16.4 KG
導体上最大磁界	42.4 KG
インダクタンス	13 ヘンリ

Fig. 12 No. 1 電磁石用クライオスタット系

第4表 No. 1 電磁石とカリフォルニア大
宇宙線用電磁石

	カリフォルニア大	サックレー
中心磁界	11 KG	17 KG
形 式	鞍型	ソレノイド
利用空間直径	1.0m	22cm
導 体	0.51mmφ Nb Ti 3 本 16本の銅の撚線	フィラメント状 Nb-Ti
電 流	870A	150A
インダクタンス	3.9H	13H
エネルギー	$1.2 \times 10^6 \text{J}$	$1.3 \times 10^6 \text{J}$
重さ(全部含)	1,630kg	300kg
コイル枠	330	60
ヘリウム容器	135	20
超電導線	500	120 (銅安定線) 60 (アルミニウ ム安定線)
構造支持	280	10
デュワー本体	385	30
使用時間(全)	48時間	12時間

いないようにし、永久電流スイッチ或は電磁石自体の帯電導の抵抗値で放電できるよう工夫する。この点については十分な基礎実験を行う予定である。

電磁石の重さは第12図の右側のコイルについては上部から二つの支持棒で、左側のコイルについては左側のクライオスタットの首で支持する。電磁石の重さ及び電磁力以外に加わる力としては、気球の落下の時、4.5m/sec の速度を持っているので、全体の支持棒か

ら十分なバネでこの系統を支持する。このことは他の光学系やカウンター系も同様の条件が要求されるので、全体として充分安全な範囲にまとめる。結局、予備タンクのヘリウムの量は80lとし、クライオスタットの厚みは1mmのステンレスを用い、デュワー本体及びヘリウム容器等で50kg、コイル枠は60kgとなる。最終的には電磁石の特特性は第4表のようになる。参考にカリフォルニア大学で製作したものの諸特性を列記した。

謝 辞

この設計を進めるにあたって、参考意見、討論を進めていただいたChef de Groupe の Monsierr Tsai に感謝致します。また、日本語で発表を許可して下さい、Chef de Service の Monsierr Prugne に御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) C.E. Taylor et al: Proceedings International Conference on Magnet Technology, p. 617 (1967) Oxford.
- 2) S.Shimamoto and H.Desportes, to be published in JAP July 1970.
- 3) Supercon Division: Catalogue 1967 T 48 B
- 4) IMI: Catalogue, May 1970.
- 5) H.Desportes: private communication
- 6) AIRCO: private communication
- 7) H.Desportes: Proceedings International Conference on Magnet Techogy, p. 603 (1967) Oxford.