

8. 検出器用マグネット

高エネルギー加速器研究機構

槇田 康 博

目 次

検出器用マグネット

1	はじめに	8-1
2	荷電粒子の運動量測定	8-1
2.1	磁場中の荷電粒子の動き	8-1
2.2	サジッタの測定から運動量へ	8-2
3	検出器のタイプとコイルの種類	8-3
3.1	ソレノイド型スペクトロメーター	8-3
3.2	ダイポール型スペクトロメーター	8-4
3.3	トロイダル型スペクトロメーター	8-4
3.4	KEKに所在するスペクトロメーター	8-4
4	検出器における超伝導磁石技術	8-5
4.1	検出器用超伝導磁石の特徴	8-5
4.2	超伝導ソレノイドとトロイダルの特徴	8-5
4.3	低物質質量を目指すコイルと指標:E/M比	8-6
4.4	高E/M比を目指したこれまでの技術展開	8-7
4.5	アルミ被覆された超伝導線	8-8
4.6	伝導冷却超伝導コイル	8-12
4.7	クエンチ保護	8-15
5	クライオスタット	8-16
6	コイルの製造方法	8-18
7	まとめ	8-19
	参考文献	8-20

検出器用マグネット

1. はじめに

超伝導ではない導体、すなわち水冷銅導体を用いた常伝導コイルでは、発熱量と冷却容量とのバランスから、電流密度は約 5 A/mm^2 以下に制限され、利用可能な磁場としては約 0.5 T が限界であった。超伝導磁石技術を用いることによってコイル電流密度を一桁以上高めることができ、磁場 1 T を超える広い磁場空間を創出する粒子検出器用の大型電磁石が可能となった。

超伝導磁石の粒子検出器への応用は、1960年代の代表的な粒子検出器である「水素泡箱」のために大規模磁場空間を生成したことに始まる¹⁻³⁾。そしてより高い加速エネルギーを必要とする素粒子物理実験エネルギーフロンティア領域において、粒子検出のための必須の装置として超伝導磁石は技術的に展開してきた⁴⁻⁶⁾。現在では、高磁場はもとより最小の物質質量で磁場空間を実現するために必須の技術となっている。

現在、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) では SuperKEKB 計画の BelleII 検出器において口径 3.6 m の超伝導ソレノイド⁷⁾が稼働しており (Fig. 1)、ヒッグス粒子の発見をもたらした欧州原子核機構 (CERN) での LHC 計画では、ATLAS および CMS 検出器にて、超伝導ソレノイドや超伝導トロイダルが基盤装置として稼働している⁸⁻¹⁰⁾。実現が期待される国際リニアコライダー (ILC), FCC 等の大型計画においても、さらに巨大な超伝導磁石の検討がされている¹¹⁻¹⁶⁾。

エネルギーフロンティア領域での巨大な超伝導磁石の一方で1メートルサイズの検出器用超伝導磁石も数を増やしている。4 K の小型冷凍機 (クライオクーラー) によって冷却に関わる運転負担が軽減されている。励磁電流は 300 A 程度、出力電圧も 10 V 程度なので、計測ラックサイズ励磁電源となり、システム全体で常伝導磁石と比較してもコンパクトで軽量の電磁石システムが実現している^{17, 18)}。

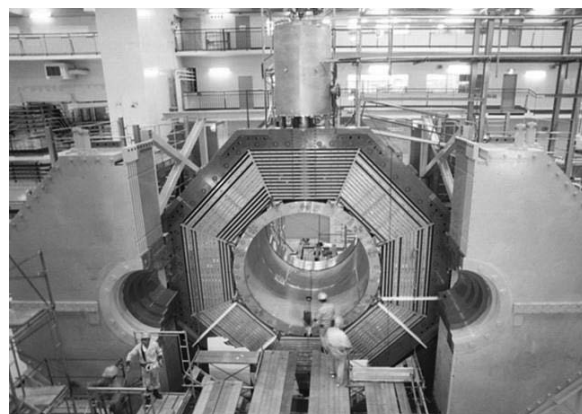


Fig. 1 KEK 筑波実験棟で稼働中の Belle ソレノイド (設置時の写真)

超伝導磁石は超伝導線のみで回路を組むことで永久電流モード運転が可能になり、医療用 MRI の超伝導磁石はこの励磁方法を採用している。宇宙粒子線観測などフィールド実験用の粒子検出器においてもより軽量で物質質量の少ない強磁場発生装置として永久電流回路で励磁される超伝導磁石 BESS や BessPolar が開発され、実績を残している^{19, 20)}。

本稿では主にエネルギーフロンティア領域の検出器用超伝導磁石で展開してきた技術要素、アルミ安定化超伝導線、伝導冷却 (間接冷却)、クエンチ保護などに重点を置きながら、検出器用超伝導磁石技術を解説する。

2. 荷電粒子の運動量測定

2.1. 磁場中の荷電粒子の動き

荷電粒子 (電荷を帯びた素粒子) の運動量 \mathbf{p} は磁場 \mathbf{B} 中での飛跡を測定することで求めることが出来る。荷電粒子の質量を m 、電荷を q 、速度を \mathbf{v} とすると荷電粒子には下式のようにローレンツ力が作用し運動量が偏向する。

$$\mathbf{F} = \dot{\mathbf{p}} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}), \mathbf{p} = m\mathbf{v}, \dot{\mathbf{p}} = m\dot{\mathbf{v}} \text{ より}$$

$$\dot{\mathbf{v}} = \frac{q}{m}(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (1)$$

磁場 \mathbf{B} の構成を $B_x = B_y = 0, B_z = B$ とし、磁場に垂直な速度成分を v_T とすると (1) 式の解は下式のようなになる。

$$\begin{aligned} v_x &= v_T \cos(\eta\omega_B t + \psi_0) \\ v_y &= -v_T \sin(\eta\omega_B t + \psi_0) \\ v_z &= v_z \end{aligned} \quad (2)$$

ここで

$$\omega_B = \frac{|q|B}{m}, \quad \eta = \frac{q}{|q|}, \quad v_T = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$

(2)式を積分すると、粒子の位置（飛跡）を表す。

$$\begin{aligned} x &= \frac{v_T}{\eta\omega_B} \sin(\eta\omega_B t + \psi_0) + x_0 \\ y &= \frac{v_T}{\eta\omega_B} \cos(\eta\omega_B t + \psi_0) + y_0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$z = v_z t + z_0$$

これは、らせん状の飛跡 (**Fig. 1(a)**) を意味し、中心軸が磁場の方向を向いた半径 R の円筒面上に描かれる (**Fig. 1(b)**)。

$$\begin{aligned} R &= \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} = \frac{v_T}{\omega_B} = \frac{mv_T}{|q|B} \\ &= \frac{p_T}{|q|B} \end{aligned} \quad (4)$$

(4)式は曲率半径 R の測定が、“Rigidity”と呼ばれる p_T/q を決定する。これと、電荷に対応する適切な媒体中でのエネルギーロス測定や、時間差による速度測定など他の原理の測定と組み合わせ、 q や v を求め、被測定粒子の質量を決定していく。

磁場と並行する運動量成分 $p_z = mv_z$ は p_T 同様時間変化が無く、磁場と運動量間の角度 θ (**Fig. 2(c)**) と下記の関係にある。

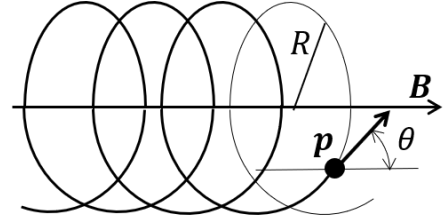
$$\cos \theta = \frac{p_z}{p} \quad \text{or} \quad \tan \theta = \frac{p_T}{p_z} \quad \text{or} \quad \sin \theta = \frac{p_T}{p} \quad (5)$$

荷電粒子の飛跡の測定から分析（構築）される R と θ によって、(4)(5)式より運動量は下記のように求まる。

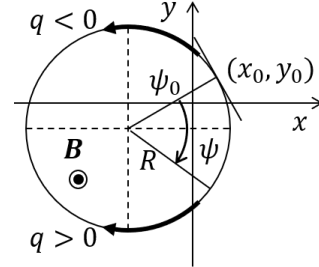
$$p = \frac{|q|BR}{\sin \theta} \quad (6)$$

ここで運動量の単位を加速器物理でよく用いられる[GeV/c]を利用できるようにするため、光速 $c \approx 0.3 \times 10^9 [m/s]$ と単位間の関係[T] = [Vs/m²]を用いて下記の単位間の関係を導き、

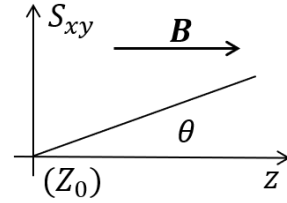
$$[\text{GeV}/c] = \left[\frac{\text{GeV}}{0.3 \times 10^9} \right] = \left[\frac{1 \text{ eVs}}{0.3 \text{ m}} \right] = \left[\frac{e}{0.3} \text{ Tm} \right]$$



(a) 磁場空間中の荷電粒子のらせん軌道



(b) 磁場軸上から見た荷電粒子の飛跡



(c) 磁場と垂直な面上の荷電粒子

Fig. 2 磁場中を飛翔する荷電粒子

(4)式を下記のように記述する。

$$p_T = 0.3|\hat{q}|BR \quad (7)$$

ここで p_T の単位は[GeV/c]、 B は[T]、 R は[m]で $\hat{q} = q/e$ 電気素量単位による電荷量である。

2.2. サジッタの測定から運動量へ

実際の粒子検出器では**Fig. 2**のようならせん状の飛跡ではなく、小さな偏向角 α での曲率半径 R と**Fig. 3**に描かれているサジッタ s とアーム L_p の関係から、磁場に垂直な運動量成分 p_T を求めている。その関係を下記する。

$$\frac{R - s}{R} = \cos \frac{\alpha}{2} \approx 1 - \frac{\alpha^2}{8} \quad \text{and} \quad \frac{L_p}{2R} = \sin \frac{\alpha}{2} \approx \frac{\alpha}{2}$$

より、

$$s \approx \frac{1}{8} \frac{L_p^2}{R} = \frac{1}{8} L_p^2 |\kappa| \quad (8)$$

ここで $|\kappa| = 1/R$ は曲率を示す。(7)(8)式より、

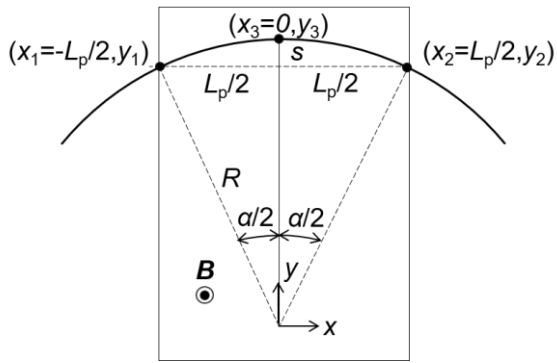


Fig. 5 サジッタの測定から円軌道へ

$$p_T = \frac{0.3 L_p^2 B}{8 s} \quad (9)$$

単位は、 p_T [GeV/c]、 L_p [m]、 s [m]、 B [T]となる。(9)式より粒子の軌跡(位置)精度に限界がある、すなわちサジッタ s を小さくすることに限界があるとすると、より高い運動量の粒子の識別には大きな $L_p^2 B$ が必要になることを示している。 B も無制限に大きくすることはできないので、加速器のエネルギーの高くなればなるほど測定器のサイズも増していく。目安として運動量とサジッタ s の関係を Table 1 に整理する。

Table 1 運動量 VS サジッタ @ $B=1$ T, $L_p=1$ m

p_T (GeV/c)	s (mm)
1000	0.037
100	0.37
10	3.7
1	37

3. 検出器のタイプとコイルの種類

粒子の運動量を決定するために粒子の飛跡を追うトラッカーと磁場空間を創出する磁石を組み合わせた測定器は、マグネットスペクトロメーターと呼ばれる。典型的なマグネットスペクトロメーターの構成として、ソレノイド型及びダイポール型及びトロイダル型がある。

3.1. ソレノイド型スペクトロメーター

SuperKEKB の BelleII 測定器をはじめ、多くの衝突型加速器(コライダー)実験ではソレノイド型スペクトロメーターが採用されてきた。

入射ビームとソレノイド磁場が平行になるよう向きをそろえ、ビーム衝突点がソレノイド磁石の中心となるようスペクトロメーターを配置し、衝突点周囲を円筒形状のトラッカーが囲み、ソレノイド磁場で偏向する生成粒子の飛跡や2次崩壊の様子を全方位(4π)で追跡する(Fig. 4)。トラッカーには円筒状のドリフトチェンバーや半導体検出器が使用されている。

通常ソレノイド磁石はビームラインが通過する中心軸付近を除いて鉄ヨークで囲まれ、磁気回路が形成されている。ソレノイドの両開口部を塞ぐエンドヨークは、トラッカーが配置されるソレノイド内部空間の磁場均一度を改善するよう内側(磁極)の形状が工夫されている。ソレノイドの外側のリターンヨークやエンドヨークの外周部は積層構造で検出器がヨーク層間に差し込まれソレノイドや鉄を通過して飛翔する粒子(ミュオンなど)を測定する(Fig. 5)。

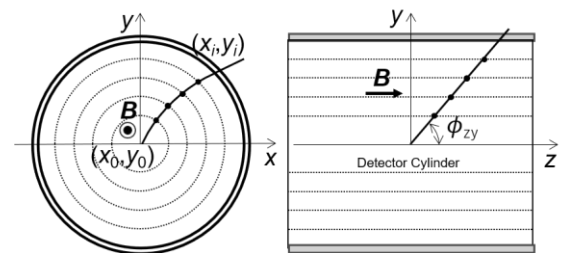


Fig. 3 ソレノイド型スペクトロメーター

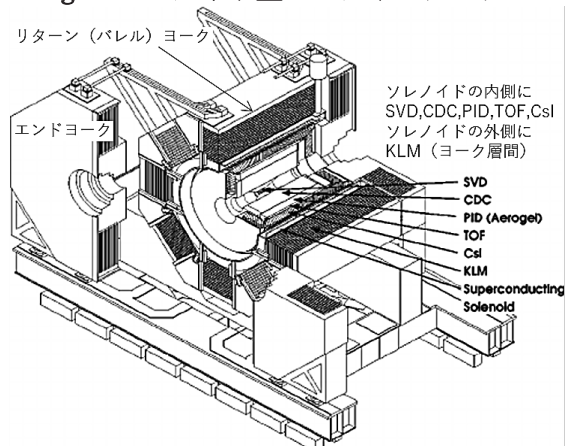


Fig. 4 ソレノイド型の例 (Belle 検出器)

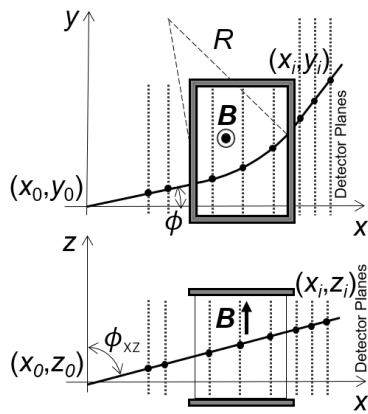


Fig. 6 ダイポール型スペクトロメーター

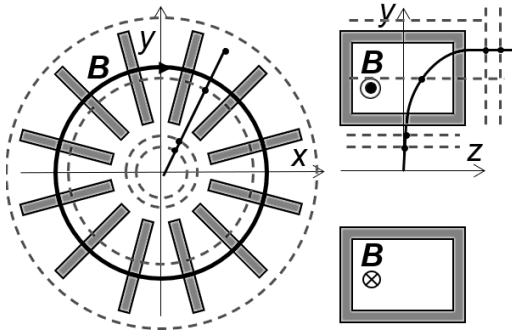


Fig. 7 トロイダル型スペクトロメーター

ATLAS

Fig. 8 ソレノイドとトロイダルの組合せ⁹⁾

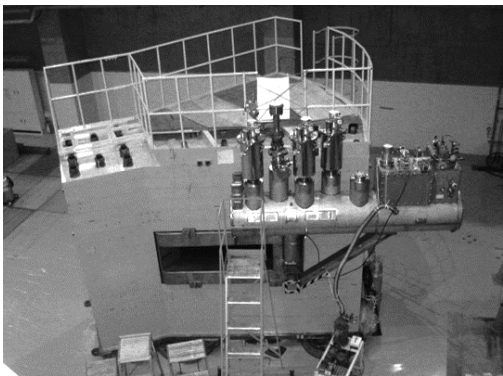


Fig. 9 SKS (フォワード型) @J-PARC²¹⁾

3.2. ダイポール型スペクトロメーター

J-PARC ハドロンホールでの原子核実験をはじめ、固定実験標的を使用する実験ではダイポール型スペクトロメーターが主に採用されている。**Fig. 6**に描かれるように、固定標的の先方にダイポールマグネットが配置され、入射ビームとは垂直方向の磁場領域を生成する。マグネット内部や前後にトラッカーが配置され標的で生成された粒子の運動量を測定する。ソレノイド型が全方位で粒子を測定するのに対して、本タイプでは前方に出てくる粒子に限定される。

3.3. トロイダル型スペクトロメーター

固定標的の実験でビーム軸と垂直方向に飛翔する粒子を大立体角で測定する (**Fig. 7**)。標的や衝突点そのものや直近への磁場の印加は難しいので、LHC の ATLAS 測定器のように衝突点周辺はソレノイド磁場で、遠方はトロイダルによって大きな磁場空間を創出している実例もある (**Fig. 8**)。逆に標的や入射ビームラインに磁場をかけず、大立体角で粒子検出をしたい場合は本方式が好ましい。

3.4. KEK に所在するスペクトロメーター

KEK には、**Fig. 5** で示すソレノイド型の Belle 測定器以外に超伝導磁石を使用したフォワード型 (**Fig. 9**) やトロイダル型のスペクトロメーターもあるのでここで紹介しておく (**Fig. 10**)。どちらも J-PARC のハドロンホールで稼働した実績があるが、現在は保管されている。

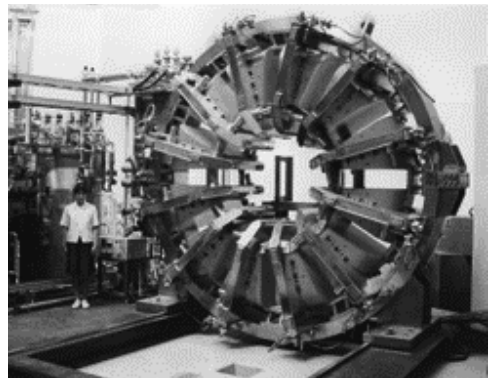


Fig. 10 TREK (トロイダル型) @J-PARC²²⁾

4. 検出器における超伝導磁石技術

4.1. 検出器用超伝導磁石の特徴

最初に検出器用超伝導磁石に期待されている要件やその特徴を整理する。

- ① 2.2 節で述べたように運動量測定のための十分な磁場空間 BL_0^2 が確保されなければならない。その空間は検出器が設置されるので大寸法の室温空間になる。
- ② 様々な検出器が磁石の内外に稠密に組み込まれるので、磁石（超伝導コイルの入ったクライオスタット）の物理的サイズ（厚み）の最小化を図るとともに、物質質量も最小にして、ノイズ源となる粒子散乱を抑える。特にソレノイドタイプで外側に粒子のエネルギーを測定するカロリメーターを配置する場合には物質質量の最小化（粒子の透過性）が最重要な設計条件になる。
- ③ 超伝導コイルへ冷媒を供給する配管や励磁用の電流バスラインも粒子検出器を設置できないデッドスペースとみなされてしまうので、最小化しないとイケない。
- ④ 磁石は内部の検出器の支持構造の一部となりその荷重を受ける。一方、自身は外部の検出器構造体から支持され、シンプルな床設置にはならないことが多い。検出器構造体へのインストール方法も含め固定方法の検討が必要となる。
- ⑤ 検出器用超伝導磁石は一台限りでバックアップは大抵製作されない。また検出器への組み込み後は磁石へのアクセスの難しくなるので、修理も困難になる。高い安全率、堅牢性と冗長性が求められる。
- ⑥ 要求される磁場の高さは最大 5 T 程度なので、ヘリウム液化冷凍機による 4.5 K に冷却された NbTi コイルを選択し、より高い磁場のための過冷却 2 K 運転や Nb₃Sn の使用は考えない。

4.2. 超伝導ソレノイドとトロイダルの特徴

検出器のタイプごとの特徴は 3 節で述べたが、超伝導コイルとしての特徴を整理する。

ソレノイドコイル

- コイル巻線中の最大磁場 B_{peak} は中心磁場 B_0 の 1.2 倍程度。トロイダルは $B_{peak}/B_0 \approx \sim 4$ 程度になってしまう。
- 円筒状の巻線はシンプルで自立構造となる。
- 電磁力はフープ力と軸圧縮力となり、基本的にコイル内部で力は閉じている。外部との電磁力支持を最小にすることで熱侵入も少なくなる。
- コイル巻線はそれを外周側から支えるサポートシリンダーで保持される。このサポートシリンダーは電磁力支持を補助するとともに伝導冷却の伝導板としても機能する。
- 従ってコイルは薄く、軽く、透明性を持たせることができる。
- 飛跡に対して平行方向の磁場があり、ビーム軸方向に近い粒子に対しては感度が落ち、効率が落ちる。
- 重たい鉄ヨークによる磁気回路（リターン部）を必要とする。

トロイダルコイル

- 飛跡に対して垂直な磁場を生成する。
- コイルだけで磁気回路が形成され鉄ヨークが不要。
- ビーム軸上はゼロ磁場で入射ビームへの干渉がない。逆に欠点として衝突点近傍への磁場の提供ができない。
- トロイダル磁場は外周に行くほど下がり均一度が低い。
- 電磁力はコイル内部に留まらないので、強固な付加構造が必要となる。

以上整理したようにソレノイド形状がコイルの物質質量低減（透明化）に即しており、実際「薄肉ソレノイド」として様々な磁石が開発されてきた。本稿では、これ以降特に断らない限り薄肉ソレノイドタイプを前提として解説をすすめる。

4.3. 低物質質量を目指すコイルと指標：E/M 比

粒子検出器では、4.1 節で述べたように、大きな磁場空間をできる限り少ない物質質量で生成することが要請される。その性能を表すスケーリングパラメータが蓄積エネルギー／コイル質量 (E/M) 比である。コイルの質量には、コイル巻線に加えて巻線に係る電磁力を支持する構造体 (例えばソレノイドコイル外周側のサポートシリンダー) や冷却のための物質 (熱伝導板や浸漬冷却の場合液体ヘリウム容器) も加えられる。

4.3.1. E/M 比-電磁応力からの考察

簡単に半径 R_i の無限長ソレノイド単位長さ (1 m 長) あたりで E/M 比の持つ意味を表記してみる。コイル内部は均一磁場 B_0 で蓄積されている磁気エネルギーは下式となる。

$$E = \left(\frac{B_0^2}{2\mu_0} \right) (\pi R_i^2)$$

コイルの厚さを t_h 、平均の密度を γ_0 と置くと、コイルの質量は下式となる。

$$M = 2\pi R_i t_h \gamma_0$$

よって E/M 比は

$$E/M = \left(\frac{B_0^2}{2\mu_0} \right) \left(\frac{R_i}{2t_h \gamma_0} \right) = \left(\frac{B_0^2}{4\mu_0} \right) \frac{R_i}{\gamma_0 t_h} \quad (10)$$

となる。径 R_i や磁場 B_0 の異なるコイル間で物質質量 $\gamma_0 t_h$ の少なさを評価しているパラメーターであることが示されている。

さらに t_h の最小値について考察する。無限長ソレノイドの内部磁場 B_0 はコイルの単位長あたりのコイル巻数 n とコイル電流 I により以下のように求められる。

$$B_0 = \mu_0 n I \quad (11)$$

B_0 は軸方向、 I は周方向でコイル線材に径方向外向きに線材の単位長当たり電磁力 f_r が発生する。コイル外周側は磁場ゼロとなるので、コイル部の磁場は平均して $B_0/2$ とみなせて

$$f_r = \frac{B_0}{2} n I$$

となる。 f_r の合力は Fig. 11 に描かれるように周方向のいわゆるフープ力

$$\begin{aligned} f_\phi &= \frac{B_0}{2} n I R_i \\ &= \frac{B_0^2}{2\mu_0} R_i \end{aligned}$$

となる。コイルの厚さが t_h なのでフープ応力

$$\sigma_\phi = \frac{B_0^2 R_i}{2\mu_0 t_h} \quad (12)$$

(11)式は下記のように書き換えられる。

$$E/M = \frac{\sigma_\phi}{2\gamma_0}$$

これは E/M 比がコイルのフープ応力と密度の比で表されることを示し、高い許容応力 $\sigma_a (> \sigma_\phi)$ を持つ軽い材料でコイルを構成すれば高い E/M 比を実現することを示している。このため、後述するように検出器ソレノイドでは線材やサポートシリンダー、熱伝導板や冷却管などにはアルミ材が多用されている。

4.3.2. E/M 比-熱的な考察とクエンチ保護

クエンチ発生時、それまでコイルに貯えられていた磁気エネルギーは、外部の保護抵抗に吐き出される以外は、熱エネルギーに変換すなわちコイル自身の温度上昇になる。全磁気エネルギーが熱エネルギーとしてコイルが均等に吸収すると下記の関係になる。

$$\begin{aligned} E &= M(h(\theta_Q) - h(\theta_0)) \\ E/M &= h(\theta_Q) - h(\theta_0) \end{aligned} \quad (13)$$

$h(\theta_Q)$ はクエンチ後の均等に θ_Q まで温度上昇した時のエンタルピー、 $h(\theta_0)$ はクエンチ前温度 θ_0 でのエンタルピーを表す。(13)式に示されるように E/M 比は均等に蓄積エネルギーをコイル自身が吸収した時の温度上昇と言える。コイルに使用される主な材料 (銅とアルミ) のエンタルピーの温度変化を Fig. 12 にまとめるが、E/M=10 kJ/kg というのはアルミ主体のコイルだと 80 K に相当している。

実際にはクエンチ発生点をはじめ温度上昇の high spot が発生する。E/M 比が高くなり、クエンチ後の均一温度上昇がより高くなると、ホットスポットが発生してコイルの焼損、絶縁破壊、熱ひずみ損傷などの危険性が高まるのは明らかで、クエンチ保護処置の重要性は増す。

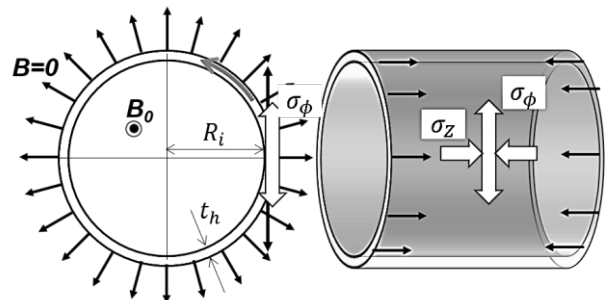


Fig. 11 ソレノイドに誘起される電磁応力

クエンチ保護法として、いったんクエンチが発生すると、逆にコイル全体をクエンチさせるやり方がある。コイル全域で抵抗成分を持つことで、電流の減衰が早くなりクエンチ発生点の温度上昇が抑えられるとともに、抵抗性電圧と誘導性電圧が相殺し合い高い内部電圧の発生を防ぐ。具体策は後述するが、E/M パラメーターに対応する θ_q がこのクエンチ保護手法で抑制される上昇温度目標値に相当する。

4.3.3. E/M比のまとめと比較

将来計画も含め主要な検出器用超伝導ソレノイドの E/M 比を Fig. 13 にまとめた。初期の PLUTO や AMY は浸漬冷却方式で液体ヘリウム容器も質量 M に加算されているので低い値となっている。E/M 比が 7 kJ/kg を超える ATLAS CS、SDC-Proto、BessPolar(Main & Proto)、CMS は後述するアルミ化材の機械強度を上げた線材を採用しており、将来計画のソレノイドもその導入を検討している。一方、PEP4/TPC は低い銅比 1.8 の NbTi/Cu を用いたコイルで、こちらも E/M 比 7.8 kJ/kg を達成しているが、クエンチ時の高電圧でショートと焼損事故を発生しており、その後の検出器用ソレノイドの導体としてアルミ被覆導体の採用を促す結果となった。

4.4. 高 E/M 比を目指したこれまでの技術展開

Table 2 低物質質量のために導入された技術要素

技術要素	導入機
アルミ安定化超伝導線	ISR,
伝導冷却	CELLO
同時押出法によるアルミ安定化線	CDF
直接内巻き法	TOPAZ
サーモサイフォンによる冷媒供給	ALEPH, DELPHI
CFRP 真空容器外筒	VENUS
純アルミ板によるクエンチ伝播	BESS
アルミハニカム真空容器外筒	
Zn 添加によるアルミ材強化	SDC-P
無絶縁巻線*	CMD-2
Ni 添加によるアルミ材強化	ATLAS
アルミ合金付加による強化	CMS
サポートシリンダー無	BessPolar

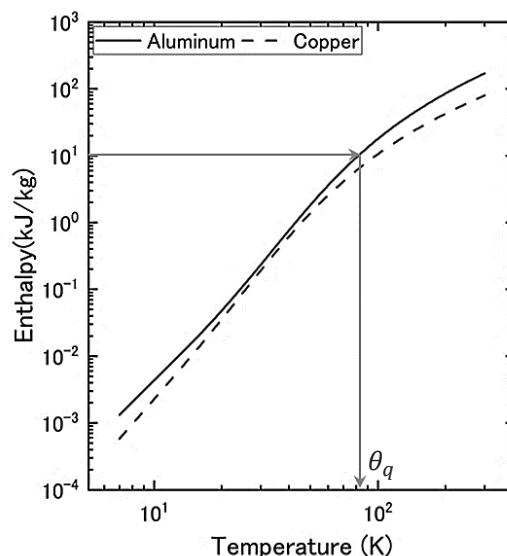


Fig. 12 コイル主要材料のエンタルピー

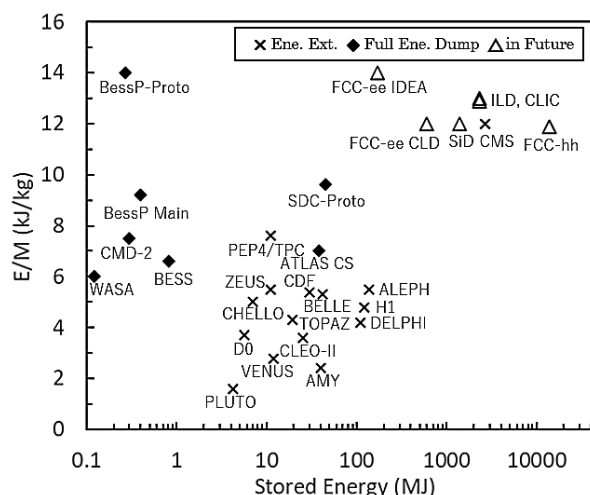


Fig. 13 主要な検出器用超伝導ソレノイド（将来計画も含む）の E/M 比

E/M 比を高めるために導入してきた技術要素を Table 2 に整理する。これらを収斂させて、現時点では下記のように薄肉ソレノイドの特徴をまとめることができる。

- ① 純アルミで被覆された NbTi/Cu ケーブル（アルミ安定化超伝導線）によるコイル巻線。アルミ部分の強化による電磁力支持。
- ② 巻線外周をサポートシリンダーで補強する。冷却配管はサポートシリンダー外面に配置され、コイルは伝導冷却される。
- ③ 巻線内側には巻枠など構造物は無い。

- ④ 巻線はエポキシ樹脂で含浸され、サポートシリンダーも含めて、機械的・熱的に一体化させている。
- ⑤ ハニカムやアイソグリッド構造で物質量を下げつつ剛性を確保した真空容器外筒や端部フランジ。

①～④の概念に基づくコイルは透明性の他に下記のような長所を有する。

- 軽量なコイルとなり、その支持材の負担が減り侵入熱が下がり、予冷時間が短縮される。また、耐震負荷も減る。
- 伝導冷却のため、浸漬冷却のようにクエンチ時の液体ヘリウム突沸が起きない。
- 樹脂含浸によりコイルは一体化しており、表面に貼り付けた温度計でコイル内部の温度も推定でき、冷却系の運転制御に正しく反映することができる。

このようなメリットから、カロリメーターがソレノイドの内側に配置され粒子透過性を要求されていないソレノイド (CMS や Belle など) においても、同じ「薄肉ソレノイド」の概念に基づいてコイルは設計されている。

4.5. アルミ被覆された超伝導線

薄肉ソレノイドを特徴づける技術要素として純アルミを高い断面比率で銅マトリックス NbTi 複合多芯線 (通常の NbTi 超伝導線) に付加した構成の線材があげられる。これまでに開発されてきたこのアルミ安定化超伝導線の断面を Fig. 14 に整理する。加速エネルギー増大に伴い、よ

り大きな検出器磁石が必要となり、より大きなアルミ安定化超伝導線が開発されてきたことが示されている。このアルミ安定化材は、クエンチ源になりかねない擾乱を吸収し (安定化)、クエンチに発展した時のジュール発熱と温度上昇・電圧上昇を緩和 (クエンチ保護) するために導入された。さらに機械強度の向上が図られ電磁力の支持も担うようになり、ヘリウム容器を廃止し、サポートシリンダーを薄くして、コイルの薄肉化に貢献している。

アルミ安定化の付加は、当初 (CELLO) はハンダ含浸であったが、Fermilab-CDF 実験用超伝導磁石開発に際し、日本で「NbTi/Cu とアルミ安定化材の同時押し出しによる一体成形」法が開発され、コアとなる NbTi/Cu 超伝導部とアルミ被覆部の金属間接合が可能となった。NbTi/Cu 超伝導線の表面を形成している銅と高純度のアルミがせん断摩擦接合した複合材である。被覆電気的特性や機械的接合強度の点で優れている本方式が、その後の主流となり、S-KEKB での Belle ソレノイドにも、同種の線材が使用されている。さらに LHC での ATLAS ソレノイドおよび CMS 実験用超伝導磁石では、アルミ安定化材の高強度化技術が導入された。将来計画で提案されているアルミ安定化超伝導線も高強度アルミを被覆した超伝導線の採用を検討している。

安定化、薄肉化の観点から銅のない完全アルミ安定化導体が望ましいが、アルミマトリックスの NbTi 複合多芯線の製作が困難なため、導体

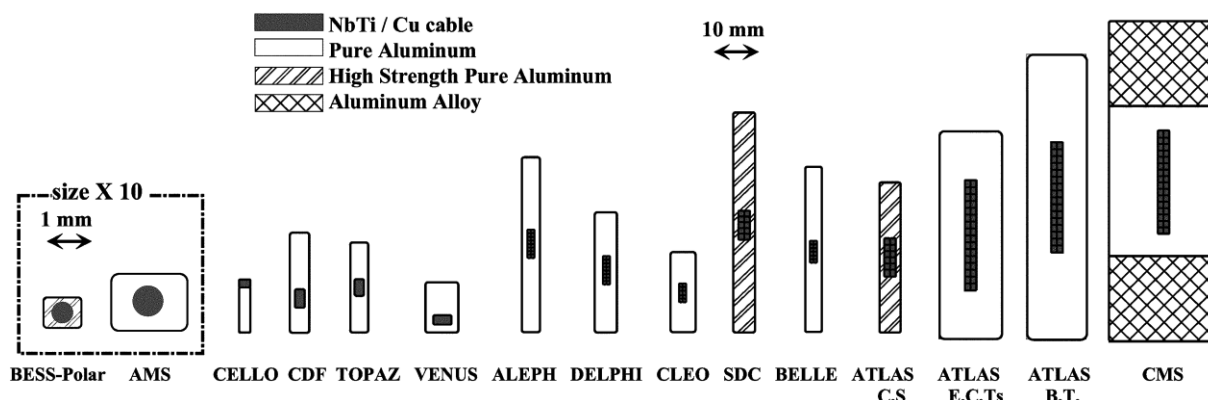


Fig. 14 アルミ安定化超伝導線の系譜

製作上銅は不可欠である。従って銅比はなるべく小さい方がよく、0.8~1.2 の NbTi/Cu 線でコア部を形成している。

4.5.1. アルミ安定化超伝導線の製造

アルミ安定化超伝導線の工程を Fig. 15 に示す。アルミ被覆までの工程は通常の銅マトリックス NbTi 複合多芯線による撚線ケーブルと同じである。アルミの被覆工程には NbTi 複合多芯線製造と同様静水圧式の同時押し出機²³⁾やコンフォーム機が使用される²⁴⁾。互いに 1 μm 程度の

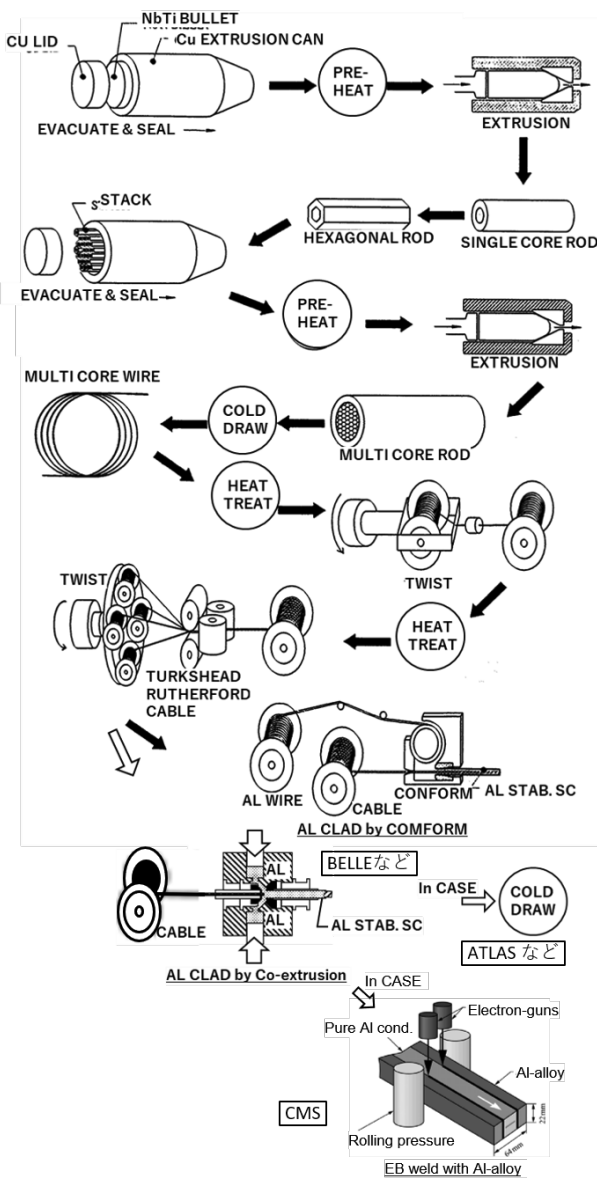


Fig. 15 アルミ安定化超伝導線 製造工程

Al/Cu 拡散層が形成し、約 30 MPa の界面弾性強度、 $10^{-11} \Omega \cdot m$ の界面抵抗を持つようになる。脆い AlCu 金属間化合物が形成されない通過時間や温度、被覆される直前での NbTi/Cu 線の余熱や表面洗浄が重要である。

Fig. 15 に描かれるように BELLE の線材はアルミ被覆工程で完了しているが、ATLAS ソレノイドの線材では 20 %減の冷間引抜をかけてアルミの機械強度を向上させている。また CMS 用の線材では純アルミの両サイドにアルミ合金 (AW6082) を電子ビーム連続溶接で付加して機械強度を向上させている²⁵⁾ (Fig. 14, Fig. 15)。

4.5.2. 冷却安定性の考察、MPZ, MQE

4.4 節で述べたように薄肉ソレノイドはエポキシ含浸され伝導冷却されるので、液体ヘリウムなど冷媒への熱伝達による「冷却安定性」は期待できない。線材に沿った方向及び横断方向への熱伝達による冷却と擾乱によって生成された常伝導部でのジュール発熱とのバランスで「冷却安定性」を考察する。擾乱の原因としては電磁応力によりエポキシのひび割れやそれに伴う線材の動きが考えられ、実際クエンチ発生直前に音を聞き、クエンチ検出器が減衰振動波形をモニター出力することはしばしばある。

発生した常伝導部が小さければ、常伝導部で生じるジュール発熱に対して相対的に熱伝達による冷却が大きくなるし、大きければ冷却量は相対的に小さくなる。従って Fig. 16 中に太い実線で示したような常伝導部の消滅もしくは発展

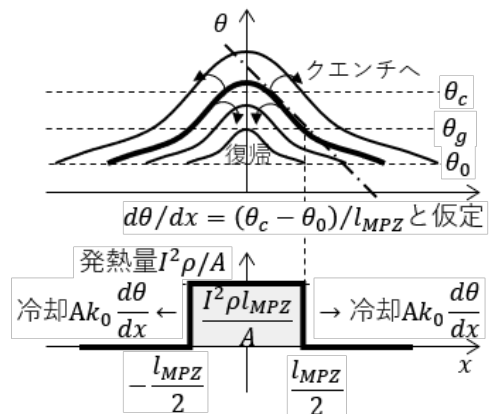


Fig. 16 最小伝播領域 (MPZ) 概念図

の限界に相当する常伝導部の大きさがあり、これを MPZ (Minimum Propagation Zone, 最小伝播領域) と呼んでいる。

常伝導領域の大きさ (MPZ の長さ) の概略を知るために簡単な近似計算を行う。常伝導部の長さを l_{MPZ} [m] とし、線の断面積を A [m²]、通電電流密度を $J = I/A$ [A/m²]、常伝導時の抵抗率を ρ [Ω m]、熱伝導率を k_0 [W/m·K]、超伝導体の臨界温度 θ_c [K] と定常冷却温度 θ_0 [K] とする。熱伝導は線材方向のみ、ジュール発熱は常伝導部のみとする。常伝導部の発熱量は $I^2 \rho l_{MPZ}/A$ 、常伝導端部での温度勾配を $(\theta_c - \theta_0)/l_{MPZ}$ と仮定すると伝熱冷却量とのバランスは

$$I^2 \frac{\rho l_{MPZ}}{A} = 2Ak_0 \frac{(\theta_c - \theta_0)}{l_{MPZ}}$$

となり、

$$\begin{aligned} l_{MPZ} &= \left\{ \frac{2k_0(\theta_c - \theta_0)}{\rho} \right\}^{\frac{1}{2}} \frac{A}{I} \\ &= (2L_0\theta_0(\theta_c - \theta_0))^{\frac{1}{2}} \frac{A}{\rho I} \end{aligned} \quad (14)$$

となる。ここで $L_0 = 2.45 \times 10^{-8}$ [WΩ/K²] はヴィーデマン・フランツの法則のローレンツ定数で、 $L_0\theta = k\rho$ の関係がある。そして MPZ を臨界温度まで温度上昇させる最小クエンチエネルギー MQE (Minimum Quench Energy) は、線材のエンタルピーの増加 $\Delta h = h(\theta_c) - h(\theta_0)$ から

$$\begin{aligned} E_{MQE} &= Al_{MPZ}\gamma_0\Delta h \\ &= \{2k_0(\theta_c - \theta_0)\}^{\frac{1}{2}}\gamma_0\Delta h \frac{A^2}{\rho I} \end{aligned} \quad (15)$$

となる。このようにコイルの等価電流密度 J_e ($\approx I/A$) を下げてしまうが線材の熱容量を大きくして安定化を図ることはエンタルピー安定化と呼ばれている。アルミの被覆は(14),(15)式の断面積 A を増すだけでなく、低温での電気抵抗率 ρ が銅より低いことから、MQE をより大きくすることができる。

4.5.3. クエンチ保護としての役割

コイルのクエンチ保護を検討するにあたっては、まず常伝導転移をした箇所の温度上昇を冷媒への伝熱を考慮しない断熱状態 (ホットスポットモデル) で予想し、許容できる温度に達す

る時間をクエンチ保護のための許容消磁時間として設定する。ジュール発熱が温度上昇に反映する関係から

$$\frac{\rho(\theta)}{A} I(t)^2 dt = A\gamma_0 C(\theta) d\theta$$

電流が減衰しきったところで最高温度 (θ_m) に達するとすると

$$\int_0^\infty I(t)^2 dt = A^2\gamma_0 \int_{\theta_0}^{\theta_m} \frac{C(\theta)}{\rho(\theta)} d\theta \quad (16)$$

となり、クエンチ保護は電流 $I(t)$ を如何に早く下げることが主眼となることが、(16)式には示されている。一方右辺に注目すると、アルミの付加は A の増大を意味し、電流減衰への時間的要求を二乗で緩和する効果があり、クエンチ保護として機能していることを示している (Fig. 17)。

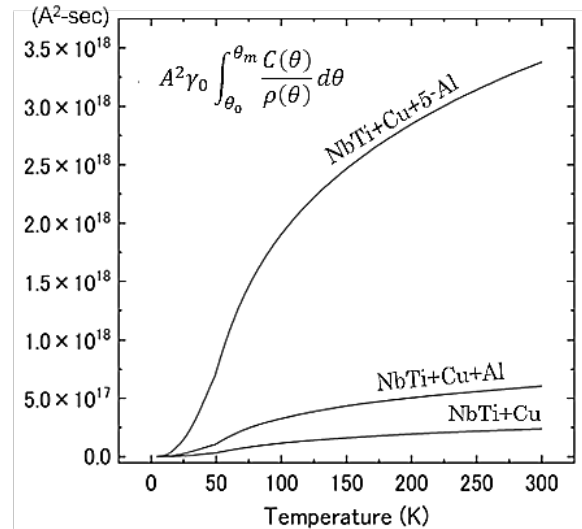


Fig. 17 断熱温度上昇を抑えるアルミ被覆

4.5.4. アルミ安定化材の機械強度強化

ソレノイド巻線に係る電磁力（フープ力）は線材自身の張力とアルミ合金（A5083 など）製のサポートシリンダーで保持される。99.999 % 純度純アルミの降伏強さ（0.2 %耐力）は 30 MPa 程度しかなく、180 MPa のサポートシリンダー及び NbTi-Cu のケーブルが主体となって電磁力を保持する。このことは言い換えるとアルミ安定化材の強度が増すと、外周のサポートシリンダーを薄くできることを意味している（Fig. 18）。そして純アルミの低抵抗率を維持したまま、機械強度を上げる手法の確立に努力が払われてきた（Fig. 19）。現時点では ATLAS ソレノイド向けに開発されたアルミ材の微量合金法が良い成績を示している²²⁾。

ATLAS ソレノイドでは、純アルミ材（純度 >99.999%）に Ni を微量（1,000 ppm）添加し、これまでと同様に同時押し出し法によって被覆し、さらに 20 % 減サイズの冷間加工を加えることによって通常の銅安定化材を超える高強度化を得ている。アルミ材に添加した Ni が、析出後 Al_3Ni 金属間化合物として粒状に晶質化し、機械

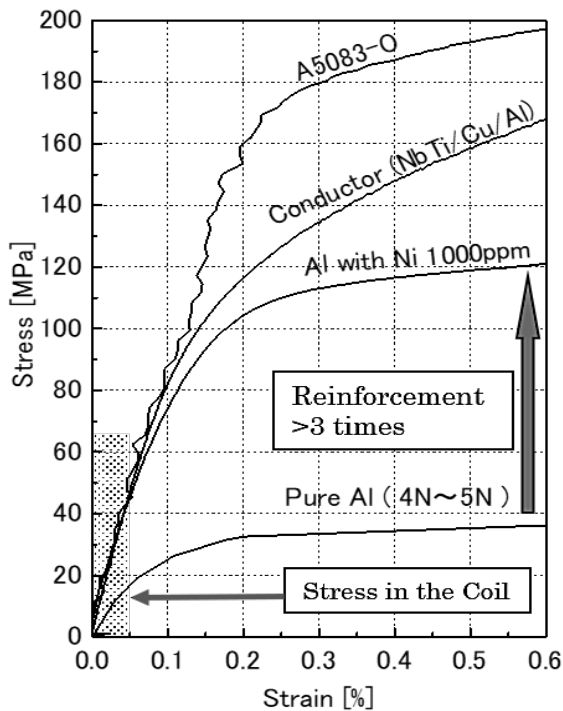


Fig. 18 SS 曲線で示す純アルミの高強度化

加工硬化を加える（加工により細くする）過程で繊維状に絡み合い、アルミニウム母材との複合構造が形成される。前者が機械強度を、後者が低い抵抗率の保持に寄与して両者の両立を導いている。この様子は SEM により Fig. 20 のように観察されている。また残留抵抗比（RRR：室温抵抗（300 K）/低温抵抗（10 K）の比）とアルミ安定化材の強度（0.2% 耐力）の相関を Fig. 21 に示す。括弧内の数値は冷間加工における断面積減少率を示している。

4.5.1節で述べたように、CMS ソレノイドでは、異なるアプローチをとっている。同時押し出で形成された純アルミニウム安定化超伝導線の両短辺側に高強度アルミ合金構造材（AW6082）を連続電子ビーム溶接によって Fig. 13 に描かれているように一体化し、全体として強度が 250 MPa

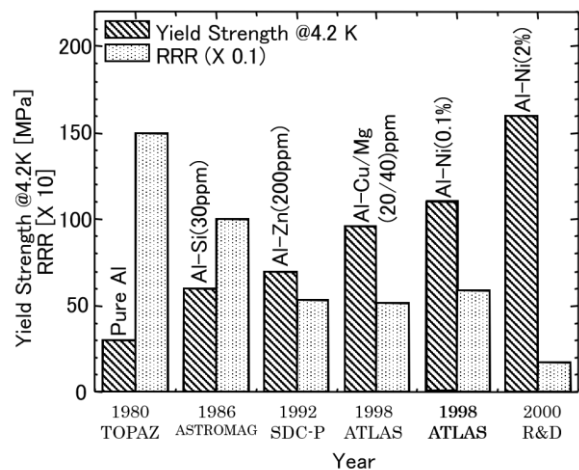
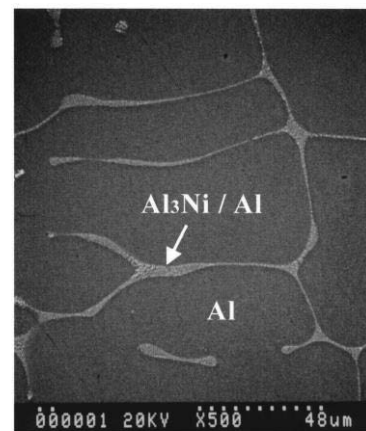


Fig. 19 高強度化と高 RRR の両立の探索



b) Al-0.5wt%Ni Alloy

Fig. 20 複合構造を持つ Ni 添加 Al

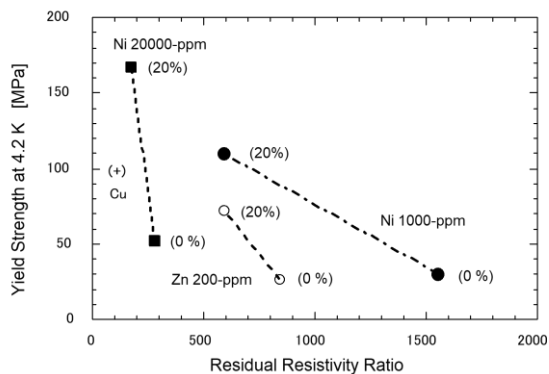


Fig. 21 添加材と冷間加工による Al 安定化材の強度アップ状況、(数値)は断面減少率

(@4.2 K) を超える線材としている。

今後計画されている検出器磁石用の超伝導線は、コイルサイズのさらなる大型化により電磁力もさらに大きくなることから、ATLASソレノイドとCMSソレノイドでの成果に基づいた線材が起案され基礎開発がすすめられている²⁵⁾。

4.6. 伝導冷却超伝導コイル

超伝導コイルを液体ヘリウムの槽に浸す冷却法(浸漬冷却)では、液体ヘリウム槽が物質として存在する。これを排する手法として検出器用超伝導ソレノイドでは、冷却配管をサポートシリンダー外表面に分散配置して冷却しコイル自身の固体熱伝導でコイル全体を冷却している。コイルからの最大熱除去能力という観点からは浸漬冷却に及ばないが、4.4節でまとめたようなメリットがある。

4.6.1. 熱伝導設計、純アルミ熱伝導板の活用

伝導冷却の宿命として熱の輸送のためには温度差(勾配)が必要となる。特にコイル巻線部の導体に垂直な方向は熱伝導率 $0.1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ オーダーの電気絶縁層を繰り返し横切するため正味の熱伝導率は低くなり、温度差も付きやすくなる。コイル外周を覆うサポートシリンダーは冷却管からの寒冷を巻線部全体に均一にして伝えるとともに、外周側からの輻射熱を遮っている。

熱伝導率が数千 $\text{W/m}\cdot\text{K}$ の高い純金属の熱伝導板(純アルミストリップなど)を有効に配置して巻線部を熱の輸送路としない工夫が有効である。コイルの内表面に純アルミストリップを軸方向に沿って貼ることで、内周側からの輻射熱を遮り、コイル端部からサポートシリンダーへ(最終的には冷却配管へ)伝えることができる。

Fig. 22 クエンチ保護と兼ねてタンクから純アルミストリップを内表面に施したコイル(BESS ソレノイド)

巻線部内表面へのアルミストリップの施工は、後述する高速常伝導伝播によるクエンチ保護機能が主目的だが、冷却に関しても有効に機能している(Fig. 22)。他にも、コイル支持材の低温端と冷却配管を純アルミストリップで熱的に短絡しコイルの局所的な温度分布を防ぐなどの工夫もできる。

4.6.2. 2相流ヘリウムの循環方式、冷却配管

冷却配管に2相流を循環させる方法としては、冷凍機用の圧縮機やポンプによる強制循環(Belle など)と、CMSのように上部に配置した気液分離槽からの気液の密度差を利用したサーモサイフォン(重力と浮力による自然循環)方式がある。

強制循環の場合、1本の配管が折り返しながらサポートシリンダー外表面を1周するように配置されている。コイルを出た配管は電流リード下端を冷却するタンクに至り、一部蒸発ガスを電流リード冷却用に分流して冷凍機に戻って行く。循環する所要流量 \dot{M}_a [kg/s]は①定常冷却時の

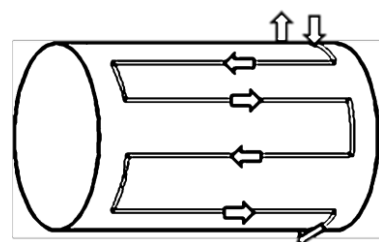


Fig. 23 二相流強制循環流路励 (CDF, TOPAZ, BELLE など)

熱負荷（励消磁時の AC ロスと電流リードへの分流分も含める）と②予冷時間やクエンチ後の再予冷時間から算定され、次に圧力損失 ΔP が十分低くなるよう冷却管の内径 D_p を決める。さらに冷凍機トラブルで冷媒供給が停止しても、クエンチしないで消磁できる液量を保有するよう配管の容積を確保するようにしている。

一般に配管長はサポートシリンダー上に配置される配管の間隔（熱伝導距離）によって決まり、配管の内径は配管長、流量及び圧力損失を考慮して決める。圧力損失 ΔP [Pa]は、予冷時の方が定常時よりも流量は多く必要で、温度が高いほど密度が低くなるので、室温時の条件で確認すればよい。圧力損失は、室温の物性値を使って次式で計算する。

$$\Delta P = \left(f \frac{l_p}{D_p} + nK \right) \left(\frac{8\dot{M}_a^2}{\pi^2 D_p^4 \rho_g} \right)$$

$$f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (17)$$

$$K = 0.096 + 13f$$

ここで f は管摩擦係数（Darcy's friction factor）、 l_p は直線部の配管長[m]、 D_p は配管内径[m]、 n は90度曲げの個数、 K は曲げ損失係数、サーモサイフォン方式の場合、 \dot{M}_a は質量流量[kg/s]、 ρ_g はガス（ヘリウム）の密度[kg/m³]、 Re はレイノルズ数を表す。

サーモサイフンの場合、コイルの上部と下部にマニホールとなる太めの配管が配置され、サポートシリンダー外表面を鉛直方向に結ぶ多くの冷却配管（フィッシュボーン）が両者を繋いでいる。気液分離槽の底から下部マニホールには熱負荷を受けないまま液が供給され、冷却配管にてコイルの熱負荷を受けとり、発生する蒸発ガスは浮力によって上部マニホールを経て気液分離槽の気相部へと戻る（Fig. 24）。従って熱負荷に応じた流量がサーモサイフォン中を循環する。冷凍機のトラブルで液体ヘリウムの供給が停止しても貯液量分は循環を続けることができる。ALEPH や CMS ソレノイドが本方式を採用している。

ATLAS ソレノイドでは、コイル上方の気液分離槽でのバルブ切り替えで両方のモードでコイ

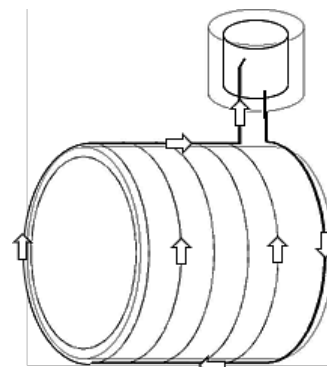


Fig. 24 サーモサイフォン配管（CMS,CLEO-II など）

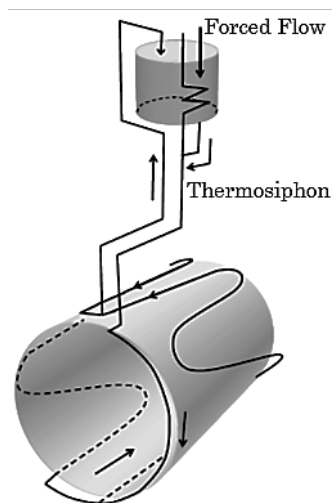


Fig. 25 強制循環とサーモサイフォン切り替えできる ATLAS ソレノイド

ルへの2相流循環ができるようにしている（Fig. 25）。コイルに入った冷却配管は一旦コイルの底まで下りて2本に分かれ、2本に分かれた配管はサポートシリンダー外表面を折り返しながら上方に移動し、再合流して気液分離槽の上部に戻っている。サポートシリンダー上の配管は水平ではなく上方に向かった勾配を持つようにし、気泡が滞留しないようにしている。冷媒の供給はバルブ切り替えで、冷凍機からか気液分離槽の底からか選択できるようにしている。通常時は強制循環で冷凍機トラブル時も数時間は励磁を維持するという冗長性の確保の方針からこのような冷却配管構成にした。

4.6.3. 電磁力とサポートシリンダー

伝導冷却ソレノイドは、エポキシ樹脂で一体化した巻線とサポートシリンダーの剛性で電磁力に対して形状を維持する。半径方向外向きの電磁力が集合して周方向にフープ応力が、コイル端部の半径方向磁場による軸方向の電磁力による軸圧縮力が励磁時には発生する (Fig. 11)。より高い E/M 比を目指していくと、電磁力によるコイル内部応力がコイルに使用している材料の応力許容値に迫ってくるため、その評価は厳密に行われなければならない。通常は、等価応力やミーゼス応力を CAE (Computer Aided Engineering) で計算し使用している材料の許容応力以下であることを確認しているが、概略値は下記のようにして見積もることができる。

フープ応力は 4.3.1 節の式(12)で表される。

$$\sigma_{\phi} = \frac{B_0^2 R_i}{2\mu_0 t_h} \quad (12)$$

軸圧縮力は仮想変位法により下記のように導出される。

$$\begin{aligned} F_z &= \frac{dE}{dz} = \frac{d}{dz} \left(V \frac{B_0^2}{2\mu_0} \right) = \frac{d}{dz} \left(zS \frac{B_0^2}{2\mu_0} \right) \\ &= S \frac{B_0^2}{2\mu_0} \end{aligned} \quad (18)$$

ここで、 V は磁場空間の体積 (コイル口径部の体積) [m³]、 S コイル口径面積[m²]を表す。軸圧縮力による応力は

$$\sigma_z = \frac{F_z}{2\pi R_i t_h} = \frac{B_0^2 R_i}{4\mu_0 t_h} \quad (19)$$

上記2つの応力はコイル中央面最大となり、そこで両者を複合した応力で、強度を評価している。応力強度 (Stress Intensity) σ_{int} を使うと

$$\sigma_{int} \approx \sigma_{\phi} - \sigma_z \quad (20)$$

となる。ミーゼス応力を使うと

$$\sigma_{eq} = \left\{ \frac{1}{2} \left[(\sigma_{\phi} - \sigma_z)^2 + \sigma_z^2 + \sigma_{\phi}^2 \right] \right\}^{1/2} \quad (21)$$

これらがサポートシリンダーや線材の許容応力 (0.2 %耐力) $\sigma_{0.2}$ 以下であることを確認して機械的な安定性を評価している (Fig. 26)。

線材に関しては 4.5 節で述べたが、サポートシリンダーに適したアルミ合金としては、溶接性、切削性、強度、熱伝導率などを総合的に判断して A5083 が良く採用されている。

コイル巻線とサポートシリンダー間のせん断応力も両者間のエポキシ樹脂による接着強度の制限から重要になる。最も厳しい条件としてはコイル端部での径方向の磁場成分 B_r による軸圧縮力をサポートシリンダーに伝達するせん断応力 σ_{shm} [Pa] で、巻線部の電流密度 J_{ϕ} [A/m²]、巻線部の厚さ t_w [m] とすると下記ようになる。

$$\sigma_{shm} = t_w J_{\phi} B_r \quad (22)$$

接着せん断強度 σ_{sha} [Pa] は樹脂の選択やサポートシリンダーや線材の表面処理、絶縁材の選択で 20 MPa は達成するので、CAE 解析をして $\sigma_{shm} < 5$ MPa 程度にとどまっていることを確認して接着の評価をしている (Fig. 27)。

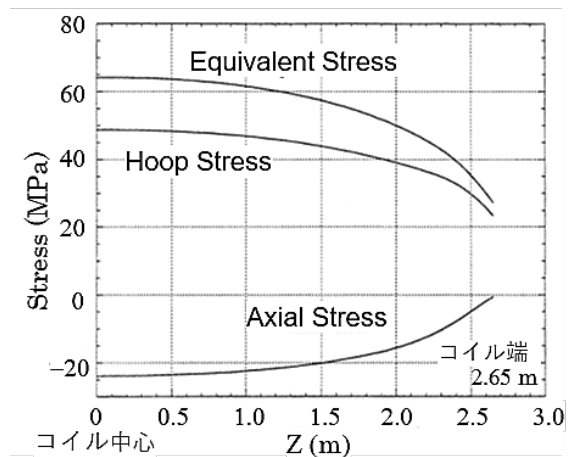


Fig. 26 コイル内の応力分布例 (ATLAS ソレノイド)

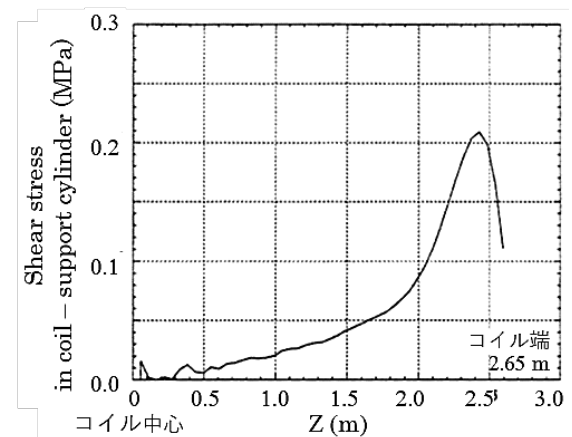


Fig. 27 巻線とサポートシリンダー間のせん断応力分布例 (ATLAS ソレノイド)

4.7. クエンチ保護

4.5.3 で述べたように、クエンチ保護はクエンチ源の温度 θ_m が許容値（例えば 300 K）に収まるよう電流 $I(t)$ を如何に早く下げることが基本的方針となる。クエンチ時のコイル電流は Fig. 28 に示すLR直列回路となる。抵抗成分 R としては磁石外部に設置される保護抵抗 R_p やコイル自身の常伝導転移部の抵抗 R_m があり、励磁電流は時定数 $\tau_m = L/(R_p + R_m)$ で減衰する。

保護抵抗 R_p は運転電流を I_{op} [A]とすると通常対地絶縁を考慮してコイルの端子管電圧が $R_p I_{op} \leq 1000$ [V]くらいで設定される。蓄積エネルギーをコイル外部に取り出すので、再予冷時間の削減となる上、渦電流発熱による強制クエンチを誘発して内部抵抗 R_m を生成（クエンチバックと呼ばれる）し時定数 τ_m を短縮する。一方で、端子間電圧 $R_p I_{op}$ の制限から大型化による貯蔵エネルギー増加（インダクタンスの増加）に合わせて保護抵抗 R_p を大きくすることはできない。従って時定数 τ_m はコイル大型化とともに伸びていく。また、クエンチの検出と電源との遮断が動作の前提となるので、その動作が失効した時のバックアップが必要となる。

常伝導転移部を拡大して抵抗 R_m を早く立ち上げることも時定数 τ_m の短縮につながる。

通常、ソレノイド周方向（線材に沿った方向）の常伝導部の拡大（クエンチ伝播）速度 v_ϕ [m/s]は

$$v_\phi = \frac{j_e}{\gamma C} \left(\frac{L_0 \theta_s}{\theta_t - \theta_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (23)$$

で表される。 j_e は導体全体での電流密度[A/m²]、 γC は体積比熱[J/kg·K]、 L_0 はローレンツ定数 $= 2.45 \times 10^{-8}$ [WΩ/K²]、 θ_0 は超伝導部（初期）温度[K]、 θ_s は常伝導領域端部温度[K]で以下のように定義する。

$$\theta_s = \frac{\theta_c + \theta_g}{2}$$

θ_c はある磁場の下で電流ゼロでの臨界温度[K]、 θ_g はある磁場下である電流通電中での臨界温度（分流開始温度）[K]を表す。次にソレノイド軸方向と半径方向のクエンチ伝播速度 v_z 、 v_r は熱伝導率の比を使って、下記のように表される。

$$v_z = \left(\frac{k_z}{k_\phi} \right)^{\frac{1}{2}} v_\phi, \quad v_r = \left(\frac{k_r}{k_\phi} \right)^{\frac{1}{2}} v_\phi$$

巻線部の k_z/k_ϕ や k_r/k_ϕ は電気絶縁材の熱抵抗が効いて1/1000未満にとどまる。ここで Fig. 22 に示す BESS コイルのようにコイル内表面に軸方向に沿って純アルミストリップを貼り付けると正味の k_z/k_ϕ は 1/10 程度になり v_z は 1 桁早くなる。このようにしてソレノイドの軸方向クエンチ伝播が著しく早くなり、内部抵抗 R_m がより早く立ち上がって電流減衰を早めるとともに磁気

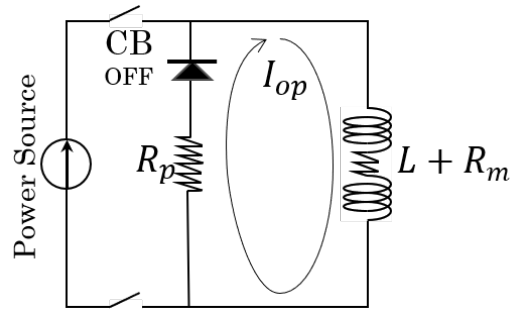


Fig. 28 クエンチ保護作動後の励磁回路

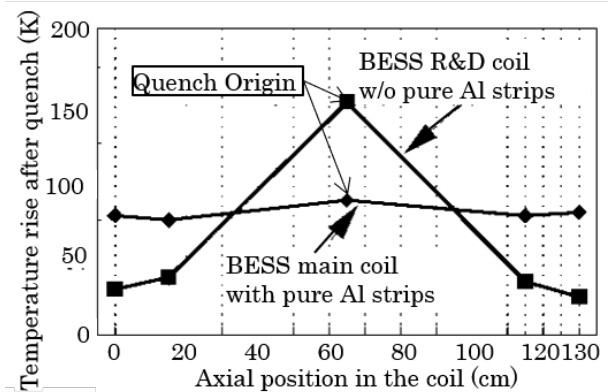


Fig. 29 純アルミストリップの有無による BESS コイルのクエンチ後の温度上昇分布の違い

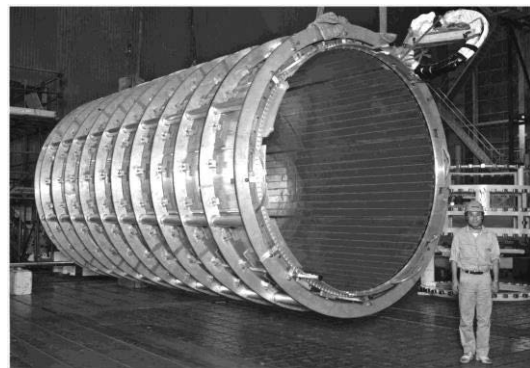


Fig. 30 ATLAS ソレノイド（注意：仮外枠付）内面に純アルミストリップが施工されている。

エネルギーを消費する領域が拡大し、均一な温度上昇に近づくことができる。この純アルミストリップによる高速クエンチ伝播は、コイル自身の耐クエンチ性能を高めるもので、動作の失効は無く信頼性は高い。Fig. 29 に示すように、この保護法を始めて採用した BESS ソレノイドの開発を通じてその有効性を確認している²⁶⁾。4.6.1 節で述べているように伝導冷却観点からも純アルミストリップは有用で、Belle や ATLAS ソレノイドの内表面にも 99.999 %以上の純度のアルミストリップが貼りつけてある (Fig. 30)。

クエンチ検出後にヒーターを焚いて強制的にコイル全体を常伝導転移させて均一エネルギー消費を目指す保護法もある。クエンチ伝播よりもより遠くの超伝導領域をより早く強制的に常伝導転移させることができる。とはいえ、巨大な検出器磁石用コイル全体にヒーターを施すというより、コイル両端及び一定の間隔でヒーターを施しその間を高速クエンチ伝播で保護するというのが現実的な保護法と思われる。ATLAS ソレノイドではコイル両端及び軸方向 1/4 ごとにフィルムヒーターをターン間に挟みクエンチ保護ヒーターとして使用している。Fig. 31 は試運転時のクエンチ保護試験結果を示しているが、純アルミによるクエンチ保護に加えて、ヒーターによる保護も機能してクエンチ源の温度上昇はより低く抑えられている²⁷⁾。さらに、外部保護抵抗を追加した時の試験も行っており、より低い温度上昇となっている。このように各クエンチ保護法は競合することなく、保護機能をより高めることができる。

不連続のソレノイドやトロイダル、ダイポールのように分割されたコイル間ではクエンチ伝播は期待できないのでクエンチ保護にはさらなる注意が必要となる。常伝導転移したコイルと超伝導のままのコイルで消磁を続けるとコイル接続部において kV 級の高い電圧が発生する。外部保護抵抗を効かせ、クエンチバックでコイル全体の常伝導転移を期待することもできるが、大型になるほどそのメカニズムは低下するので、ヒーターによる強制クエンチが必要になる。ATLAS トロイダルでは各コイルに保護ヒーターを施している。また、コイルごとに消磁回路を組むという保護法もあるが、減衰中のコイルどうしやリターンヨークとの電磁力のかかり方が定常時とは異なることもあるのでコイル支持材の補強など十分検討しなければならない。

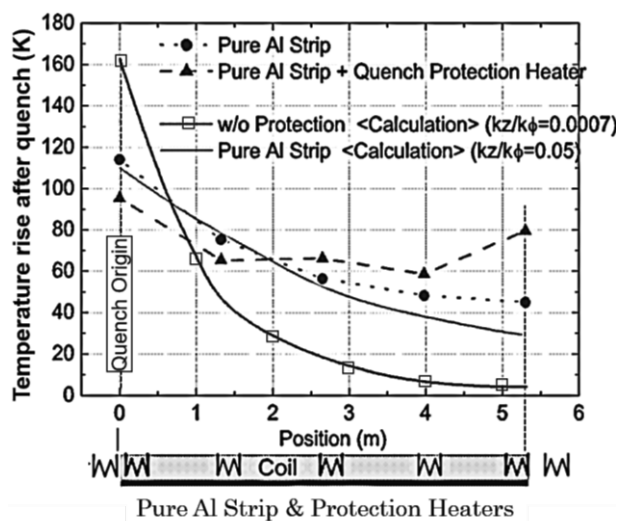


Fig. 31 純アルミに加え保護ヒーターを作動させたときのクエンチ後の温度上昇分布

5. クライオスタット

検出器超伝導磁石用クライオスタットは断熱性能だけでなく、検出器が設置される内部室温空間を確保し、場合によっては内部検出器の荷重を支えなければならない。さらにノイズ源とならないよう物質量はなるべく少なく、物理的なサイズも最小となるよう求められている。ここでは、透明性を追求する中で開発されたクライオスタット要素、真空容器外筒とコイル支持材について紹介する。

5.1.1. 真空容器外筒

薄肉ソレノイドではクライオスタットも物質質量低減に努めなければならない。特に真空容器外筒は 100 kPa の外圧円筒となるので、座屈モードの応力を受けそれに耐える曲げ剛性が必要になるので、厚肉の円筒になってしまう。Fig. 32 に示す構造のアルミハニカムは剛性を確保しながら物質質量を低減できる板材として着目され、SSC 向けの超伝導ソレノイドの真空容器に試作された。その製造工程を Fig. 33 に示している。航空機や新幹線用に製造されているロウ付けハニカム平板を 4 点曲げで曲げシェルとし、溶接接続で円筒に仕上げている²⁸⁾。

ハニカムには及ばないものの Fig. 34 の写真のようなアイソグリッド構造も曲げ剛性を確保しながら物質質量の低減を図ることができる。こち

らもアイソグリッド構造の平板を曲げ加工して円筒形状に溶接組立してした真空容器が SSC 向けに開発されている²⁹⁾。

両者の性能を **Table 3** にまとめる。どちらかを選択するというよりは端部フランジやサポートの取り付け座、配管貫通部などはアイソグリッド構造で、それ以外はハニカムでという適材適所になる。

他のアプローチとしては CFRP や GFRP といった高分子材料もトリストラン VENUS などでの実績があり、現在もクライオスタット利用にむけた R&D が進められている。

5.1.2. コイル支持材

超伝導コイルはクライオスタット内で浮遊しているが如く断熱支持固定されている。断熱支持構造体の設計の要点をまとめると以下のようになる。

- コイルの静荷重 (1 G) に加えて、地震や輸送・組立時の振動を前提に 2G の加速度を支える。
- 数センチの設置位置誤差や熱収縮変位にて生成する対ヨーク不平衡電磁力を支える。
- 4.1 節で述べているように、検出器内でクライオスタットが占有する空間の最小化も求められている。コイルの断熱支持構造も無用に真空容器のサイズを大きくすることが無いように工夫する。
- 伝導熱侵入路になるので、断熱性の良い材料 (GFRP や Ti など) を採用し、サイズも考慮しつつ断熱距離を確保する。
- コイルの熱収縮を吸収し、収縮後にコイルが正しい位置になるよう、摺動機構や回転機構を有する。

Table 3 アイソグリッド及びハニカム構造による薄肉化の相対評価

Type	厚板	アイソ グリッド	ハニカム
材料	5083	5083 -H32	6951/ 4045-T6
全厚(mm)	27	46	46
表面厚 (mm)	(27)	4.0	3.0+3.0
実効厚 (mm)	27	11	7
相対重量	1	0.4	0.26
輻射長 (Xo)	0.303	0.123	0.079

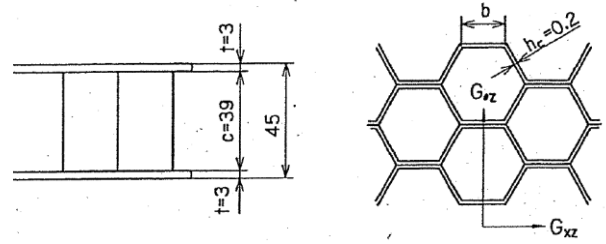


Fig. 32 ロー付けハニカム構造

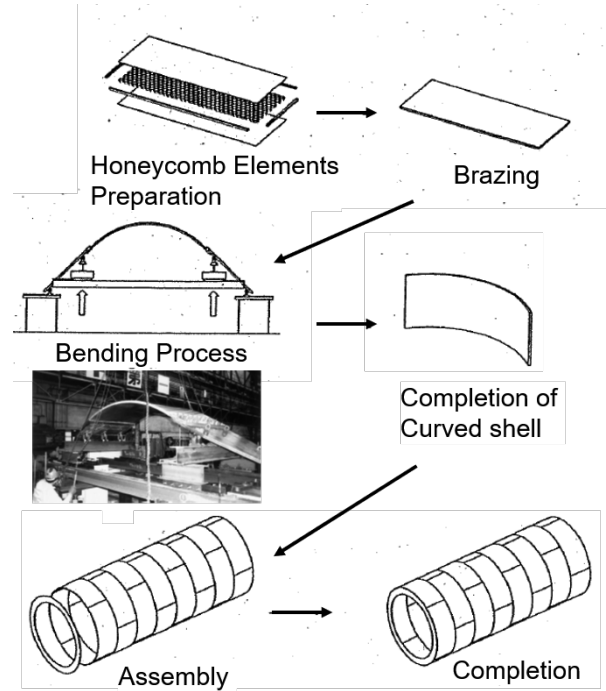


Fig. 33 ロー付けハニカム真空容器円筒製作工程

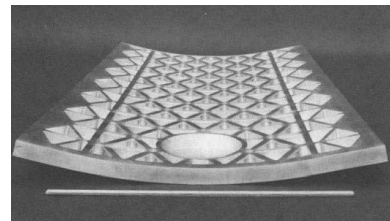


Fig. 34 アイソグリッド構造材による真空容器

径方向の寸法制限が厳しい中コイルを断熱支持している例として ATLAS ソレノイドのトライアングルサポートを紹介する。コイル両端からサポートシリンダーに向かって真空容器内筒のフランジから三角形上のサポートが並び、コイル荷重と軸方向の固定両方を支えている。真空容器側 2 か所とコイル側 1 か所の接続部には球面座が組み込まれて径方向の熱収縮に追随している。冷却配管や超伝導バスラインと接続する側の軸方向は固定され、反対側はコイル軸方向の収縮を吸収するようコイル接続部はスライドするようになっている。

6. コイルの製造方法

薄肉ソレノイド構造のコイルは巻線の外周をサポートシリンダーで囲い、線材と協調して電磁力を支持する構造を取っており巻線内側には純アルミストリップをクエンチ保護のために貼り付けているだけで、巻線時に必要とされる巻枠は存在しない。このような構造を形成するには、巻線とサポートシリンダーを接着する樹脂層は接着強度や熱伝導、クラック発生防止の観点から薄い方がよく、巻線からサポートシリンダーに向かって押し付ける状態になっているのが望ましい。工法としては、①サポートシリンダー焼き嵌め法と②直接内巻き法があり、おおむね 2 m 径を超えると嵌め合わせ失敗のリスクが無い直接内巻き法が適用されている。

Fig. 36 ATLAS コイルのトライアングル支持材

直接内巻き法はトリスタン計画の TOPAZ ソレノイド開発のために確立し、その後の薄肉ソレノイドの巻線にも応用されている。Fig. 37 にはその工程を図示している。まず内巻きの前段階としてドラムから引き出した線材を絶縁テーピングを施しながら仮巻枠上に巻く。ただ実際は、3 点ローラーの組合せでアルミ平角棒をエッジワイズに曲げて仮巻枠の外周に載せていく状態に近い。内表面に対地絶縁を施したサポートシリンダーを垂直に立て、中に巻線機を挿入する。その上方に仮巻枠に巻かれた仮巻線を配置

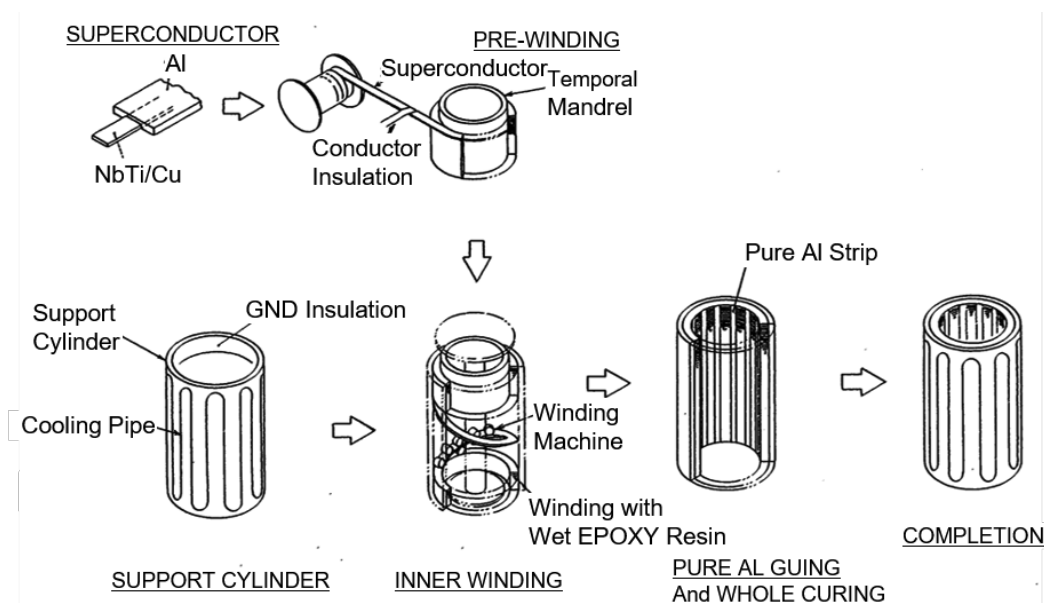


Fig. 35 薄肉ソレノイドコイル製造工程

して、巻線機のローラーユニットに線材を供給する。ローラーユニットはサポートシリンダー内面に線材を押し付けながら置いていく。線材を置く手前では加熱硬化タイプのレジンを塗布している。軸方向は巻線機の重量が巻き終えた個所押し掛かるようにしており、巻線中は軸圧縮力を加え続けている。巻き終わると巻線機は取出し、内表面に純アルミストリップを取り付け、コイル全体を加熱してレジンの硬化処置をして、コイルの完成となる。

7. まとめ

主にエネルギーフロンティア領域の検出器用超伝導磁石で展開してきた技術要素、アルミ安定化超伝導線、伝導冷却（間接冷却）、クエンチ

保護などに重点を置きながら、検出器用超伝導磁石技術を解説してきた。最後に、主要な検出器用超伝導ソレノイドを **Table 4** にまとめた。比較のために超伝導ソレノイドが普及する前に利用されていた常伝導の検出器ソレノイドの情報及び FCC や ILC など将来計画されている検出器ソレノイドも記入している。加速器の性能が上がるにつれより巨大な磁石が開発されてきたことがわかる。将来計画のソレノイドは運搬もままならないサイズとなっている。これまで透明性を求めて培ってきた薄肉ソレノイド技術は磁石のサイズを飛跡検出器（トラック）サイズに押しとどめ磁石コストを下げる意味でも益々重要になっている。

Table 4 主要な検出器用ソレノイドの性能

検出器名	設置/開発	磁場 (T)	口径 (m)	利用長 (m)	Energy (MJ)	E/M (kJ/kg)	Power (MW)
PLUTO*	DESY	2.2	1.4	1.05	4.25	1.6*	
CELLO	DESY/Saclay	1.5	1.5	4.02	7	5.0	
PEP4/TPC	SLAC/LBL	1.5	2.04	3.84	11	7.6	
CDF	FNAL/Tsukuba	1.5	2.86	5.07	30	5.4	
D0	FNAL	2	1.07	2.7	5.6	3.7	
CLEO-II	Cornell	1.5	2.9	3.8	25	3.6	
ALEPH	CERN/Saclay	1.5	5.0	6.3	136	5.5	
DELPHI	CERN/RAL	1.2	5.2	7.4	109	4.2	
ZEUS	DESY/INFN	1.72	3.0	2.85	11	5.5	
H1	DESY/RAL	1.2	5.2	5.75	120	4.8	
TOPAZ	KEK	1.2	2.72	5.4	19.5	4.3	
VENUS	KEK	0.75	3.4	5.64	12	2.8	
AMY*	KEK	3.0	2.2	1.54	40	2.4*	
Belle	KEK	1.5	3.6	4	42	5.3	
ATLAS (CS)	CERN/KEK	2	2.3	5.3	38	7	
CMS	CERN	4	6	12.5	2670	12	
BESS	KEK	1.2	0.85	1.0	0.82	6.6	
BESS-Polar	KEK	0.8	0.8	1.0	0.40	9.2	
将来計画：							
ILD		3.5	7.2	7.5	2300	13	
SiD		3	5.4	5.6	1400	12	
FCC-ee CLD		2	8	7.2	600	12	
FCC-ee IDEA		2	4.4	5.8	170	14	
FCC-hh		4	10	20	1380	11.9	
CLIC		4	7	8.3	2320	12.9	
常伝導磁石：							
TASSO	DESY	0.5	2.7	4.4			2.8
ARGUS	DESY	0.8	2.8	2.8			2
OPAL	CERN	0.44	4.36	6.3			5

参考文献

- [1] M. Derrick et al., "History of the superconducting magnet bubble chambers", AIP Conference Proceedings 60, 198 (1980);
- [2] A. Yamamoto and T. Taylor, "Review of Accelerator Science and Technology", Vol. 5, eds. A. Chao and W. Chou, 91 (World Scientific, 2012).
- [3] A. Yamamoto, Y. Makida et al., "Development towards ultra-thin superconducting solenoid magnets for high energy particle detectors", Nuclear Physics B, 78 (1999) 565 -570.
- [4] 山本明 : 日本物理学会誌 72, 163 (2017).
- [5] A. Yamamoto, Y. Makida, K. Tanaka, Y. Doi, T. Kondo, K. Wada and S. Meguro: Nucl. Phys. B Proc. Suppl. 78, 565(1999).
- [6] A. Yamamoto and Y. Makida: Nucl. Instrum. Methods A494, 255 (2002).
- [7] Y. Makida, et al., "Development of a superconducting solenoid magnet system for the B-factory detector (BELLE)," Adv. in Cryogenic Engineering, vol. 43, pp. 221-228, 1998.
- [8] A. Yamamoto, et al., "The ATLAS central solenoid," Nucl. Instr. and Meth. A, Vol. 584, Is. 1, PP. 53-74, 2008.
- [9] H. Kate, et al., "Superconducting magnet system for the ATLAS detector at CERN", IEEE Tans. on Appl. Super. Vol. 9, No. 2 pp.841-846.
- [10] H. Herve et al., "Status of the construction of the CMS magnet," IEEE Trans. Appl. Super. Vol. 14, pp. 542-547, 2004.
- [11] A. Abada et al., "FCC-ee: The Lepton Collider: Future Circular Collider Conceptual Design Report Volume 2," Eur. Phys. J. ST, vol. 228, no. 2, pp. 261-623, 2019.
- [12] N. Alipour Tehrani et al., "CLICdet: The post-CDR CLIC detector model," CLICdp-Note-2017-001. Revised 2019.
- [13] "FCC-hh: The Hadron Collider," EUR. Phys. J. Special Topics 228, p. 755-1107 (2019).
- [14] M. Mentink, H. Silva, A. Dudarev, E. Bielert, V. Klyukhin, B. Cure, H. Gerwig, A. Gaddi, C. Berriaud, U. Wagner, and H. ten Kate, "Evolution of the Conceptual FCC-hh Baseline Detector Magnet Design," IEEE Trans. Appl. Super. 28, p. 4002710 (2018).
- [15] F. Kircher et. al, "Conceptual design of the ILD detector magnet system", LC-DET-2018-081.
- [16] Updating the SiD detector concept. <https://arxiv.org/abs/2110.09965>.
- [17] N. Sumi et al., "Construction Status of the Superconducting Magnet System for the COMET Experiment," IEEE Trans. Appl. Super. Vol. 32, No. 6, 4101204, 2022.
- [18] M. Kawai, et al., "Superconducting solenoid magnet of the DCBA-T3 experiment searching for neutrino-less double beta decay", Prog. Theor. Exp. Phys. 2014, 023H01
- [19] Y. Makida et al., "Ballooning of a thin superconducting solenoid for particle astrophysics," IEEE Trans. Appl. Super, Vol. 5, No. 2, pp.658-661, 1995.
- [20] Y. Makida et al., "The BESS-Polar Ultra-Thin Superconducting Solenoid Magnet and Its Operational Characteristics During Long-Duration Scientific Ballooning Over Antarctica," IEEE Trans. Appl. Super. Vol. 19, p.1315, 2009.
- [21] 青木香苗他、「SKS 超伝導電磁石の改造と移設 -GM/JT 冷凍機による冷凍システム-」, 低温工学, 45 卷 4 号, pp.191-198, 2010.
- [22] J. Imazato, et al., "A Superconducting Toroidal Magnet for Charged Particle Spectroscopy," Proceedings of 11th International Conference on Magnet Technology (MT-11) pp 366-371.
- [23] 森茂樹, 「高エネルギー実験用大型薄肉超伝導ソレノイド」, 日本物理学会誌, 第 41 卷, 第 1 号, pp.33-40, 1986.
- [24] I.L. Horvath, et al., "Aluminum stabilized superconductor for the BELLE detector at KEK-B", Proceedings of 15th Int. Conf. on Magnet Technology, October 20-24, 1997. Beijing. China.
- [25] S. Sgobba et al., "Toward an Improved High Strength, High RRR CMS Conductor," IEEE Trans. Appl. Super., vol. 16, pp. 521-524, 2006.
- [26] Y. Makida et al., "Performance test of a thin superconducting solenoid for particle astrophysics," Adv. In Cryogenic Eng. Vol. 37A, pp.401-407, 1991.
- [27] Y. Makida et al., "Quench protection and safety of the ATLAS central solenoid," IEEE Trans. Appl. Super., Vol.12, No. 1, pp.407-410, 2002.
- [28] H. Yamaoka et al., "Development of a brazed-aluminum-honeycomb vacuum vessel for a thin superconducting solenoid magnet," Adv. Cryogenic Eng., Vol. 39, pp.1983-1990, 1994.
- [29] R.W. Fast et al., "Isogrid vacuum shell for large superconducting solenoid," Adv. Cryogenic Eng. Vol. 39, pp.1991-1998, 1994