# 8. 検出器用マグネット

## 高エネルギー加速器研究機構

## 槙 田 康 博

# 目 次

## 検出器用マグネット

1	はじ	めに	3 - 1
2	荷電	粒子の運動量測定	-1
	2.1	磁場中の荷電粒子の動き	3 - 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	s — 3
	3.1	ソレノイド型スペクトロメータ—	3 - 3
	3.2	ダイポール型スペクトロメータ—	3 - 4
	3.3	トロイダル型スペクトロメーター	3 - 4
	3.4	KEKに所在するスペクトロメータ— 8	3 - 4
4	検出	器における超伝導磁石技術	s — 5
	4.1	検出器用超伝導磁石の特徴	3 - 5
	4.2	超伝導ソレノイドとトロイダルの特徴	-5
	4.3	低物質量を目指すコイルと指標:E/M比 ······ <b>8</b>	3 - 6
	4.4	高E/M比を目指したこれまでの技術展開	3 - 7
	4.5	アルミ被覆された超伝導線	-8
	4.6	伝導冷却超伝導コイル	-12
	4.7	クエンチ保護	-15
5	クラ	イオスタット・・・・・・8	-16
6	コイ	ルの製造方法	-18
7	まと	<i>రు</i> 8	-19
参	考文献		-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5A/mm<sup>2</sup>以下に 制限され,利用可能な磁場としては約0.5T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1T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<sup>1-</sup> <sup>3)</sup>。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<sup>の</sup>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<sup>8-10<sup>9</sup></sup>.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<sup>11-</sup> <sup>16<sup>9</sup></sup>。

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300A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な電磁石システム が実現している<sup>17,18)</sup>。



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ってい 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<sup>19,20</sup>。

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pは 磁場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 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。

$$F = \dot{p} = q(\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}), \, \boldsymbol{p} = m\boldsymbol{v}, \, \dot{\boldsymbol{p}} = m\dot{\boldsymbol{v}} \downarrow \, \boldsymbol{v}$$
$$\dot{\boldsymbol{v}} = \frac{q}{m} (\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}) \tag{1}$$

磁場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 のようになる。

$$v_x = v_T \cos(\eta \varpi_B t + \psi_0)$$
  

$$v_y = -v_T \sin(\eta \varpi_B t + \psi_0)$$
(2)

ここで

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

 $v_z = v_z$ 

(2)式を積分すると、粒子の位置(飛跡)を表す。

$$x = \frac{v_T}{\eta \varpi_B} \sin(\eta \varpi_B t + \psi_0) + x_0$$
$$y = \frac{v_T}{\eta \varpi_B} \cos(\eta \varpi_B t + \psi_0) + y_0$$
(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)**)。

$$R = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} = \frac{v_T}{\varpi_B} = \frac{mv_T}{|q|B}$$
$$= \frac{p_T}{|q|B}$$
(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て、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 $\theta$  (Fig. 2(c))と下記の関係にある。

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

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。

$$p = \frac{|q|BR}{\sin\theta} \tag{6}$$

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/m<sup>2</sup>] を用いて下記の単位間の関係を導き、

$$\begin{bmatrix} \text{GeV}/c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\text{GeV}}{0.3 \times 10^9} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{0.3} \frac{\text{eVs}}{\text{m}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\text{e}}{0.3} \text{Tm} \end{bmatrix}$$



(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。

$$p_T = 0.3|\hat{q}|BR \tag{7}$$

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 $\alpha$ 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。

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

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

ここで|κ| = 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

$$p_T = \frac{0.3 L_p^2 B}{8 s} \tag{9}$$

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 $L_p^2B$ 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<sub>p</sub>=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(ミューオンなど)を測定する(**Fig. 5**)。



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<sup>9)</sup>



Fig. 9 SKS (フォワード型) @J-PARC<sup>21)</sup>

## 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 一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-PARC<sup>22)</sup>

## 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<sup>2</sup>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ー メーターを配置する場合には物質量の最 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、最小化しないといけない。
- 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。
- ⑤ 要求される磁場の高さは最大5T程度なので、ヘリウム液化冷凍機による4.5K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2K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。トロイドダルは $B_{peak}/B_0 \approx \sim 4$ 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。
- 一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 冷却の場合液体へリウム容器)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<sub>i</sub>*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*<sub>0</sub>で蓄積されている 磁気エネルギーは下式となる。

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

コイルの厚さを $t_h$ 、平均の密度を $\gamma_0$ 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

$$E/_{M} = \left(\frac{B_{0}^{2}}{2\mu_{0}}\right) \left(\frac{R_{i}}{2t_{b}\gamma_{0}}\right) = \left(\frac{B_{0}^{2}}{4\mu_{0}}\right) \frac{R_{i}}{\gamma_{0}t_{b}}$$
(10)

となる。径 $R_i$ や磁場 $B_0$ の異なるコイル間で物質 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。

$$B_0 = \mu_0 n I \tag{11}$$

 $B_0$ 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

$$f_r = \frac{B_0}{2}nt$$

となる。*f<sub>r</sub>*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

$$f_{\phi} = \frac{B_0}{2} n I R_i$$
$$= \frac{B_0^2}{2\mu_0} R_i$$

となる。コイルの厚さがthなのでフープ応力

$$\sigma_{\phi} = \frac{B_0^2 R_i}{2\mu_0 t_h}$$
(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。

$$E = M(h(\theta_Q) - h(\theta_0))$$
  

$$E/_M = h(\theta_0) - h(\theta_0)$$
(13)

 $h(\theta_Q)$ はクエンチ後の均等に $\theta_Q$ 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 $\theta_0$ 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=10kJ/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 高いか所が発生する。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<sub>Q</sub>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

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

Table 2 低物質量のために導入された技術要素







**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。

- 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侵され、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。

 ④~④の概念に基づくコイルは透明性の他に下 記のようなり長所を有する。

- 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。
- 樹脂含侵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、カロリーメーターが 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 ンダ含侵であったが、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出機<sup>23)</sup>やコンフォ ーム機が使用される<sup>24)</sup>。互いに 1 µ m 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<sup>-11</sup> Ω·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<sup>25)</sup>(**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 シ含侵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 の熱伝導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導に 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[m<sup>2</sup>]、通電 電流密度をJ = I/A [A/m<sup>2</sup>]、常伝導時の抵抗率を  $\rho$ [ $\Omega$ m]、熱伝導率を $k_0$ [W/m·K]、超伝導体の臨 界温度 $\theta_c$ [K]と定常冷却温度 $\theta_0$ [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、

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

となる。ここで $L_0 = 2.45 \times 10^{-8} [W\Omega/K^2]$ 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

$$E_{MQE} = A l_{MPZ} \gamma_0 \Delta h$$
$$= \{2k_0(\theta_c - \theta_0)\}^{\frac{1}{2}} \gamma_0 \Delta h \frac{A^2}{\rho I}$$
(15)

となる。このようにコイルの等価電流密度J<sub>e</sub>(≈ 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

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

電流が減衰しきったところで最高温度 ( $\theta_m$ ) に達するとすると

$$\int_{0}^{\infty} I(t)^{2} dt = A^{2} \gamma_{0} \int_{\theta_{0}}^{\theta_{m}} \frac{C(\theta)}{\rho(\theta)} d\theta \qquad (16)$$

となり、クエンチ保護は電流*I*(*t*)を如何に早く下 げるか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<sup>22)</sup>。

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 AlaNi 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







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<sup>25)</sup>。

#### 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量 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 W/m-Kオーダ ーの電気絶縁層を繰り返し横切るため正味の熱 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 W/m-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。

<u>強制循環の場合</u>、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*M<sub>a</sub>*[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<sub>p</sub>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。

$$\Delta P = \left( f \frac{l_p}{D_p} + nK \right) \left( \frac{8\dot{M_a}^2}{\pi^2 D_p^4 \rho_g} \right)$$
$$f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \tag{17}$$

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]、 $\rho_g$ は ガス (ヘリウム)の密度[kg/m<sup>3</sup>]、Reはレイノル ズ数を表す。

<u>サーモサイフォンの場合、コイルの上部と下</u> 部にマニホールド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 を繋いている。気液分離槽の底から下部マニホ ールド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 ルド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 オン中を循環する。冷凍機のトラブルで液体へ 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。

$$\sigma_{\phi} = \frac{B_0^2}{2\mu_0} \frac{R_i}{t_h} \tag{12}$$

軸圧縮力は仮想変位法により下記のように導出 される。

$$F_{z} = \frac{dE}{dz} = \frac{d}{dz} \left( V \frac{B_{0}^{2}}{2\mu_{0}} \right) = \frac{d}{dz} \left( zS \frac{B_{0}^{2}}{2\mu_{0}} \right)$$
$$= S \frac{B_{0}^{2}}{2\mu_{0}}$$
(18)

ここで、Vは磁場空間の体積(コイルロ径部の体 積)[m<sup>3</sup>]、Sコイルロ径面積[m<sup>2</sup>]を表す。軸圧縮 力による応力は

$$\sigma_Z = \frac{F_Z}{2\pi R_i t_h} = \frac{B_0^2}{4\mu_0} \frac{R_i}{t_h}$$
(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) *o<sub>int</sub>を*使うと

$$\sigma_{int} \approx \sigma_{\phi} - \sigma_Z \tag{20}$$

となる。ミーゼス応力を使うと

$$\sigma_{eq} = \left\{ \frac{1}{2} \left[ \left( \sigma_{\phi} - \sigma_{Z} \right)^{2} + \sigma_{Z}^{2} + \sigma_{\phi}^{2} \right] \right\}^{1/2}$$
(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) σ<sub>0.2</sub>以下であることを確認して機械 的な安定を評価している (**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 $\sigma_{shm}$ [Pa]で、巻線部の電流密度 $J_{\phi}$ [A/m<sup>2</sup>]、巻線 部の厚さ $t_w$ [m]とすると下記のようになる。

$$\sigma_{shm} = t_w J_\phi B_r \tag{22}$$

接着せん断強度 $\sigma_{sha}$ [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)



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 $\theta_m$ 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かが基本的方 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  $\tau_m = L/(R_n + R_m)$ 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 $R_pI_{op} \leq$ 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 $\tau_m$ を短縮する。一方で、端子 間電圧 $R_pI_{op}$ 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 $\tau_m$ 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<sub>m</sub>*を早く立ち上 げることも時定数*τ<sub>m</sub>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  $v_{\phi}$ [m/s]は

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

で表される。 $j_e$ は導体全体での電流密度[A/m2]、  $\gamma C$ は体積比熱[J/kg-K]、 $L_0$ はローレンツ定数= 2.45 × 10<sup>-8</sup> $[W\Omega/K^2]$ 、 $\theta_0$ は超伝導部(初期)温 度[K]、 $\theta_s$ は常伝導領域端部温度[K]で以下のよう に定義する。

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

 $\theta_c$ はある磁場の下で電流ゼロでの臨界温度[K]、  $\theta_g$ 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。

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

巻線部の $k_z/k_\phi \approx k_r/k_\phi$ 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つけると 正味の $k_z/k_\phi$ 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<sup>26)</sup>。 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 トロイド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 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 <sup>28)</sup>。

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<sup>29)</sup>。

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タン 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(1G)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 / 1	ンクリツ	「下及びハニス	/ム 博道によ
	る薄肉化	ヒの相対評価	

Туре	厚板	アイソ	ハニカム
		グリッド	
材料	5083	5083	6951/
		-H32	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. 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際 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 個所圧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。巻き終えると巻線機は 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(トラッカー)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。

検出器名	設置/開発	磁場	口径	利用長	Energy (MI)	E/M	Power
	DECV	(1)	(m)	(m)	(1113)	(KJ/Kg)	
PLUTO	DESY	2.2	1.4	1.05	4.25	1.6	
CELLO DED (TDDC	DEST/Saciay	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

Table 4 主要な検出器用ソレノイドの性能

## 参考文献

- 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-T3experiment 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巻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巻,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