SuperKEKB 超伝導電磁石システム

SuperKEKB ビーム最終集束用超伝導 電磁石システムの概要と機能

SuperKEKB[1,2]プロジェクトは、陽電子と電子 を衝突させて生成されるB中間子等を含む反応実 験を詳細に研究することにより、今までに観測さ れていなかった物理現象を発見することを目的 としている。SuperKEKB は主に、陽電子用と電子 用の二つのリング型加速器 (LER/HER) と、リ ングに陽電子・電子を供給する直線型加速器(入 射器)、LER/HER と入射器を接続するビーム輸送 ラインから構成されている。地下 11m に掘られた 一周約3kmのトンネルの中には、二つのリングが 並んで配置され、それぞれのリングの中を陽電子 ビーム (エネルギー40 億電子ボルト) と電子ビー ム(70億電子ボルト)が光速に近いスピードで逆 方向に周回する。二つのビームは、加速器リング の一点で衝突するように設計されており、衝突点 に設置された Belle II 測定器が衝突によっておこ る素粒子反応をとらえる。この加速器全体図を図 1に示した。



図1 SuperKEKB 加速器全体図

SuperKEKB では、ビーム衝突点での陽電子と電子の衝突確率 (ルミノシティー) を前加速器 KEKB の最高記録 2.1×10³⁴ cm⁻²s⁻¹の 40 倍まで高めることを目標としている。加速器の基本設計として、 衝突点での垂直方向のビームサイズを KEKB の 20分の1とし、またビーム電流値を2倍にするこ とを設計値とした。ビームサイズを20分の1に することにより衝突点での陽電子と電子の密度 を上げ衝突の頻度を高めようとするもので、ビー ムサイズは、垂直方向に~50nm、水平方向に~1 µm となる。式(1)に加速器ルミノシティーの定 義式を示した。

$$L \sim \frac{\gamma_{\pm}}{2er_e} \left(1 + \frac{\sigma_y^*}{\sigma_x^*} \right) \frac{R_L}{R_y} \xi_{\pm y} \frac{I_{\pm}}{\beta_{\pm y}^*} \tag{1}$$

式(1) で後半にある H±がビーム電流値、β_{±v}がビ ーム衝突点での垂直方向のビームサイズのパラ メータを示している。

このビームサイズを絞り込むために非常に強い4 極磁場を発生する超伝導電磁石が使用される。また、この超伝導4極電磁石にはビーム運転上必要とされる多くの超伝導補正磁石が組み込まれている。

本講義では、このビーム衝突点に建設された超 伝導電磁石システム、電磁石、クライオスタット、 冷却システムについて解説する。[3,4,5]

2. 加速器用電磁石磁場について(特に超 伝導電磁石)

加速器で使用される電磁石は、ビームを加速器 に沿って維持するために特定の磁場形状を持つ ように作られる。特に、2極、4極、6極電磁石が よく使用される。これらの磁石の磁場について本 章で説明する。

2.1. 加速器用電磁石内での磁場とその形状

加速器電磁石 2 極、4 極、6 極の磁場の形状を 図 2 に示した。図 2 に示した磁束の向き、形状は 常伝導電磁石の鉄ヨーク(磁気回路)とコイルを 想定した。2 極磁場では、磁極間で平行な磁場を 磁石はつくる。4 極、6 極磁石の磁石中心では磁場 はゼロとなり、磁場中心が存在する。

図 3 に示すように 2 極磁場の内部では進行する 電子(*e*)は磁場(*B*)から Lorentz(*F*)力を受 け、進行方向を曲げられる。*F*は以下の式で示さ れる。





Skew Dipole

Normal Dipole





Normal Quadrupole



Skew Quadrupole



Normal Sextupole

Skew Sextupole

図 2 素粒子加速器で用いられる電磁石の磁場形 状。(2 極磁石: Normal dipole、Skew dipole、4 極 磁場: Normal quadrupole、Skew quadrupole、6 極磁 場: Normal sextupole、Skew sextupole)



図3 2極磁場、4極磁場内を通過する電子に作用 する力。電子は、紙面の表から裏に向かって進む。 各磁石内の磁場の向きは、点線で示された矢印で 示されている。

F = q (電荷)・
√ (速度) ×
B (磁場) (2)

また、4 極磁場内では垂直或いは水平方向に収 束或いは発散の力を受ける。

図2で示した磁場を作る加速器用常伝導電磁石を 図4に示した。上から、2極、4極、6極電磁石であ る。



図 4 加速器用電磁石。上から Normal 2 極、 Normal 4 極、Normal 6 極電磁石。

加速器で必要とされる磁場の精度として、これ らの磁石が発生する磁場の主成分に対してエラ ー成分を0.01%(1×10⁴或いは1units)程度に制 御しようとする場合、磁極の加工精度、組立精度、 磁性体材料(鉄)の均一性も同レベルに制御する 必要がある。超伝導電磁石の場合は、ケーブルに 大きな電流を流すことが可能となり、磁極部にあ たる部分では鉄の飽和磁場を超える磁石の設計 が行われることから、磁場は超伝導ケーブルを流 れる電流で作ることになる。高い磁場性能を持つ 超伝導電磁石を作るためには、超伝導電磁石内の ケーブルの位置設計・配置精度が重要な課題とな る。

2.2. 線電流が作る磁場

超伝導電磁石では超伝導ケーブルを流れる電 流が主に磁場を作る。そこで先ず基本的な事項と して、1本の線電流の作る磁場について説明し、 その後、加速器磁場について解説を進めたい。[6]

図5に、空間に配置された線電流の座標系と磁場の定義を示した。



図 5 ビーム軸を Z 軸とした (r, θ, z) 円筒座標系 (a)と線電流モデル(b)。

図 5-b に示した線電流の作るベクトルポテンシャル Azは、式3 で示される。

$$A_z(r,\theta) = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln\left(\frac{R}{a}\right) \qquad (3) \quad ,$$

ここで、 $R = \sqrt{a^2 + r^2 - 2 \operatorname{ar} \cos(\phi - \theta)}$ は位置 P=(r, θ)と線電流間の距離を示している。

r < aの場合、 $\ln\left(\frac{R}{a}\right)$ は以下のように変換できる。

$$R^{2} = a^{2} \left(1 - \frac{r}{a}e^{i(\emptyset - \theta)}\right) \left(1 - \frac{r}{a}e^{-i(\emptyset - \theta)}\right) ,$$

$$\ln\left(\frac{R}{a}\right) = \frac{1}{2} \ln\left(1 - \frac{r}{a}e^{i(\emptyset - \theta)}\right) + \frac{1}{2} \ln\left(1 - \frac{r}{a}e^{-i(\emptyset - \theta)}\right) .$$

任意の複素数ξ(|ξ|<1)に対して、

$$\ln(1-\xi) = -\xi - \frac{1}{2}\xi^2 - \frac{1}{3}\xi^3 - \dots - \frac{1}{n}\xi^n$$

となりr < aの空間において $A_{z}(r, \theta)$ は次の式で示される。

$$A_{z}(r,\theta) = -\frac{\mu_{0}I}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left(\frac{r}{a}\right)^{n} \cos\left(n(\phi-\theta)\right) \quad (4) .$$

r>aの空間では、

$$R^{2} = r^{2} \left(1 - \frac{a}{r} e^{i(\emptyset - \theta)}\right) \left(1 - \frac{a}{r} e^{-i(\emptyset - \theta)}\right) ,$$

$$A_{z} (r, \theta) = -\frac{\mu_{0}I}{2\pi} \ln \frac{r}{a} + \frac{\mu_{0}I}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left(\frac{a}{r}\right)^{n} \cos\left(n(\emptyset - \theta)\right)$$
(5) .

式(4)、(5)は Z 軸に平行な線電流が作る A_z の多極展開となる。この結果から、 B_{θ} 、 B_r 、 B_z 成分は以下のように表される。

r < aの場合、

$$B_{\theta} = -\frac{\partial A_z}{\partial r} = -\frac{\mu_0 I}{2\pi a} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{a}\right)^{n-1} \cos\left(n(\emptyset - \theta)\right) ,$$

$$B_r = \frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial \theta} = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{a}\right)^{n-1} \sin\left(n(\emptyset - \theta)\right) ,$$

$$B_z = 0 \qquad .$$

$$r > a \mathcal{O} \stackrel{\text{H}}{=} \stackrel{\text{Comp}}{\to} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{a}\right)^{n-1} \sin\left(n(\emptyset - \theta)\right) ,$$

$$B_{\theta} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} + \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \cos\left(n(\emptyset - \theta)\right) ,$$
$$B_r = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \sin\left(n(\emptyset - \theta)\right) ,$$

 $B_z = 0$

2.3. 加速器用電磁石磁場を作るには?

前節で示したように線電流は全ての 2n 極磁場 を発生する。そこで、半径 a の円筒上に配置され た線電流の作る磁場について考える。仮に線電流 が円筒の周方向に依存した電流密度を持つとす る。その電流は、式(6)で与えられるとする。

$$I(\phi) = I_0 \cos(m\phi) \tag{6}$$

この電流分布を図6に示した。式(6)で示した 電流分の作る *r* < *a* の空間でのベクトルポテンシ ャルは次式のように変換できる。

$$A_{z}(r, \theta) = -\frac{\mu_{0}I}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left(\frac{r}{a}\right)^{n} \int_{0}^{2\pi} \cos(m\phi) \cos(n(\phi - \theta)) d\phi$$
(7)

$$B_{\theta}(r, \theta) = -\frac{\mu_0 I_0}{2a} \left(\frac{r}{a}\right)^{m-1} \cos(m\theta) \qquad (8.2)$$

$$B_r(r, \theta) = -\frac{\mu_0 I_0}{2a} \left(\frac{r}{a}\right)^{m-1} \sin(m\theta) \qquad (8.3)$$

Dipole
$$I(\phi) = I_0 \cos \phi$$



Quadrupole $I(\phi) = I_0 \cos 2\phi$



Sextupole $I(\phi) = I_0 \cos 3\phi$



図 6 cos mθ電流分布 (m=1, 2, 3)

図6に示した電流分布を式8.2 と 8.3 に代入し
て B_x、B_y成分を求める。
m = 1 (*I* = *I*₀ cos
$$\phi$$
) の場合、
B_x = *B_r* cos θ - *B_θ* sin θ = 0 ,
B_y = *B_r* sin θ + *B_θ* cos θ = - $\frac{\mu_0 I_0}{2a}$ = constant ,
となり垂直方向に一定の磁場 (2 極磁場) とな
る。水平成分はゼロとなるため、エラー成分の
ない Normal 2 極磁場となる。
m = 2 (*I* = *I*₀ cos 2 ϕ) も同様に計算すると、
B_x = *B_r* cos θ - *B_θ* sin θ
= *gr* sin(2 θ) cos θ - *gr* cos(2 θ) sin θ
= *gr* sin(2 θ) cos θ - *gr* cos(2 θ) sin θ
= *gr* sin(2 θ) sin θ + *gr* cos(2 θ) cos θ
= *gr* cos θ = *gx* ,
ここで*g* = $-\frac{\mu_0 I_0}{2a^2}$ となり、この電流分布が作る
磁場もエラー成分の無い4 極磁場となる。
最後に m = 3 (*I* = *I*₀ cos 3 ϕ) の場合、
B_x = $\frac{1}{2}g'r^2(\sin 3\theta \cos \theta - \cos 3\theta \sin \theta)$
= $\frac{1}{2}g'r^2(\sin 3\theta \sin \theta + \cos 3\theta \cos \theta)$
= $\frac{1}{2}g'r^2(\sin 3\theta \sin \theta + \cos 3\theta \cos \theta)$

$$= \frac{1}{2}g'r^{2}((\cos\theta)^{2} - (\sin\theta)^{2})$$
$$= \frac{1}{2}g'(x^{2} - y^{2}) ,$$

ここで $g' = -\frac{\mu_0 I_0}{a^3}$ となり、エラー成分の無い6 極磁場となる。

2.4. 加速器用電磁石磁場の Normal 成分と Skew 成分

式 (4) で示したr < aでのベクトルポテンシャル A_z の第n項は2つの項に展開される。

 $A_{z}(r,\theta) = -\frac{\mu_{0}I}{2\pi} \frac{1}{n} \left(\frac{r}{a}\right)^{n} \left(\cos(n\theta) \cos(n\theta) - \frac{\mu_{0}I}{n}\right)$

 $\sin(n\emptyset)\sin(n\theta))$

 $= \beta_n \cos(n\theta) + \alpha_n \sin(n\theta) \qquad (9) \quad .$

加速器用電磁石の磁場を評価する上で、式 (9) の $\beta_n \cos(n\theta)$ を normal 磁場成分、 $\alpha_n \sin(n\theta)$ を skew 磁場成分と呼んでいる。

skew 磁場成分は、 $I(\phi) = I_0 \sin(m\phi)$ の電流分布 により作られる。この時の A_z 、 B_θ 、 B_r は式 (10.1, 10.2, 10.3) となる。

$$A_{z}(r, \theta) = \frac{\mu_{0}I_{0}}{2} \frac{1}{m} \left(\frac{r}{a}\right)^{m} \sin(m\theta) \quad (10.1) \quad ,$$

$$B_{\theta}(r, \theta) = -\frac{\mu_{0}I_{0}}{2a} \left(\frac{r}{a}\right)^{m-1} \sin(m\theta) \quad (10.2) \quad ,$$

$$B_{r}(r, \theta) = -\frac{\mu_{0}I_{0}}{2a} \left(\frac{r}{a}\right)^{m-1} \cos(m\theta) \quad (10.3)$$

2.5. 実際の加速器用超伝導電磁石では?

2.3.で説明したように、円筒上に *I*₀× cos(*n*θ)の電 流分布を作ることができると 2*n* 極のみの磁場を 作り出すことは可能である。実際の電磁石では、 このような状況を作り出すことは極めて難しい。 実例の電磁石の断面構造から、このような場合の 電磁石が発生する磁場について考えてみる。実際 の電磁石の断面形状として、欧州原子核研究機構 CERN の Large Hadron Collider (LHC)の 2 極電磁石 断面[7]を図 7 に示した。超伝導コイルは、図 7 の 上図右下に示した長方形断面形状のケーブルで 作られる。超伝導ケーブルは、Rutherford ケーブ ルと呼ばれ直径 1mm 程度のストランド線から構 成されている。図 7 の下図に電磁石クライオスタ ット断面を示した。超伝導電磁石としては、2 台 の 2 極電磁石を 1 組の磁性ヨークで包んでいる。

超伝導コイル部に cos(の)の電流分布を作るため に、コイル内の超伝導ケーブルを複数のブロック に分けている。

本節では、単純なケーブルブロックを用いて 2 極、4 極電磁石の発生する磁場を考えてみたい。 先ず、図 8 (左図) に示すような理想的な 2 極電 磁石の電流分布を模擬した 4 本の線電流の配置を 考える。角度 ϕ と- ϕ の位置に+I、角度 π + ϕ と π - ϕ の 位置に-Iの線電流を持つ。



図7 LHC2極超伝導電磁石コイル断面(上)と 電磁石クライオスタット断面(下)



2個対称 (Dipole Symmetry) 2個対称コイク を持つ4本の線電流 ブロック

図8 2極対称性を持つ4本の線電流モデル(左図)と2極コイルブロックモデル(右図)

4本の線電流が作るベクトルポテンシャルは以下の三角関数の公式から、

 $cos(n\phi)+cos(-n\phi)-cos(n(\pi - \phi))-cos(n(\pi + \phi)) =$ $4 cos(n\phi), n=1, 3, 5, , ,$ 或いは 0, n=2, 4, 6, , ,cin(n f)+cin((n f)), cin(n(n f)), cin(n(n f))) = $cos(n\phi) + cos(n(\pi - \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n\phi) + cos(n(\pi - \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n\phi) + cos(n(\pi - \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi - \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\phi) + cos(n(\pi - \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\phi) + cos(n(\pi - \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\phi) + cos(n(\pi - \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\phi) + cos(n(\pi - \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\phi) + cos(n(\pi - \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\phi) + cos(n(\pi - \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\phi) + cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\phi) + cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\phi) + cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\phi) + cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\phi) + cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\phi) + cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) =$ $cos(n(\pi + \phi)) - cos(n(\pi + \phi)) - cos$

 $sin(n\phi)+sin(-n\phi)-sin(n(\pi - \phi))-sin(n(\pi + \phi))=0$ n=1, 2, 3, 4, , ,

$$A_z(r, \theta) = -\frac{2\mu_0 I}{\pi} \sum_n^{\infty} \frac{1}{n} \left(\frac{r}{a}\right)^n \cos(n\theta) \cos n\theta$$

n=1, 3, 5, , (11).

次に図8(右図)に示す単純な2極コイルブロ ックの磁場について考えてみる。

コイル部の電流密度をJとし、コイルの開き 角度を ϕ 、内半径を a_1 、外半径を a_2 とする。 A_z (r, θ は、式(12)で示される。

$$A_z(r, \theta) = -\frac{2\mu_0 J}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \int_{a_1}^{a_2} \left(\frac{r}{a}\right)^n a \, da \int_0^{\phi_1} \cos(n\phi)$$

 $d\emptyset\cos(n\theta)$,

$$n=1, 3, 5, , ,$$
 (12).

コイルの厚み $\Delta a = a_2 - a_1$ がコイルブロック平均 半径 $a = (a_1 + a_2)/2$ よりも十分小さいと仮定した場 合、ベクトルポテンシャル $A_z(r, \theta)$ は式 (13)で示 される。

$$A_z(r, \theta) = \frac{2\mu_0 J a \Delta a}{\pi} \sum_n \frac{1}{n^2} \left(\frac{r}{a}\right)^n \sin(n \emptyset_1) \cos(n\theta) ,$$

n=1, 3, 5, , , (13) .

n 次の多極磁場成分の大きさは、

$$B_n = \sqrt{B_{\theta,n}^2 + B_{r,n}^2} \quad \succeq \uparrow z \not\supset_{\circ}$$

 $\theta=0$ では、 B_r 成分はゼロとなり B_{θ} 成分のみが 残る。この時、 B_n 成分は式(14)となる。

$$B_n = B_{\theta,n}(r, \ \theta = 0) = -\frac{2\mu_0 J}{\pi} \Delta a \frac{1}{n} \left(\frac{r}{a}\right)^{n-1} \sin(n(\phi_1))$$

n=1, 3, 5, , , (14) .

2 極電磁石として一般的に用いられる角度 *φ*_{*l*}= 60°を選んだ場合、*n*=3の6極磁場成分は式(14) からゼロとなることが分かる。最初に現れる高次 の磁場成分は、*n*=5の10極磁場成分となる。この 単純な2極電磁石のブロックモデルで作られる磁 場の主成分 *B*_{*l*} と *B*₅を比較すると、

$$B_5/B_1 = \frac{1}{5} \left(\frac{R_{ref}}{a}\right)^4 \frac{\sin 300^\circ}{\sin 60^\circ} \qquad \succeq t_a \gtrsim 3_\circ$$

電磁石の磁場を評価する半径 (R_{ref}) を 20 mm と し、コイルのブロックの平均半径 a = 30 mm を考 えると $B_5/B_1 = -3.95 \times 10^2$ となる。加速器用電磁 石磁場では、主成分以外の高次の磁場成分を 1× 10⁻⁴ レベルになるようにコイル断面は設計される ので、このような単純なモデルでは磁場性能とし ては不十分となる。この為、コイルブロックを分 割し、図6で示した cos nθの電流分布に近づける 設計を行う。

これまでの議論から、 B_{θ} と B_r 磁場成分は式(15) で示される。

$$B_{\theta}(r, \theta) = B_{ref} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{R_{ref}}\right)^{n-1} \times$$

 $(b_n \cos(n\theta) + a_n \sin(n\theta))$,

$$B_r(r,\theta) = B_{ref} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{R_{ref}}\right)^{n-1} \times$$

$$(-a_n \cos(n\theta) + b_n \sin(n\theta))$$
 (15)

 R_{ref} は、電磁石の磁場性能を評価する時の参考半径 (Reference Radius) と呼ばれるもので、一般的 にはコイル内半径の 2/3 の値が用いられる。 B_{ref} は 基準磁場で、2m 極電磁石の場合、 $B_{ref} = B_m(R_{ref})$ が 使用される。2 極電磁石の場合は $B_{ref} = B_1 と \alpha b$ 、 4 極電磁石 (m=2) では $B_{ref} = B_2(R_{ref}) = g \times R_{ref} c$ なる。gは4 極電磁石が作る磁場勾配 ($B_2(R_{ref})/R_{ref}$) を示している。 $b_n c a_n$ は、2n 極磁場成分の normal 係数と skew 係数と呼ばれる。この係数は、2m 極 電磁石の基準磁場 $B_{ref} c 1 c$ して正規化した値で ある。超伝導電磁石の分野では、 $10^4 \nu$ ベルの誤 差磁場をよく議論するので表記として units=1× 10^4 を使用する。

3. SuperKEKB 超伝導電磁石システムの構 成

SuperKEKB 加速器では、電子・陽電子ビームの 衝突直前のビームの集束は、各ビームラインのビ ーム衝突点(Interaction Point: IP)前後直近に設置 された二組の超伝導4極電磁石で行われる。この ため、ビーム衝突用として8台の超伝導4極電磁 石がビーム衝突点直近(Interaction Region: IR)に 設置されている。更に、IRにはビーム調整用の47 台の超伝導電磁石が組み込まれており、超伝導電 磁石の総数は55台となる。この55台の超伝導電 磁石は、IPを挟んで設置されている断熱真空容器 クライオスタットQCS-RとQCS-Lに分割されて 組み込まれ、QCS-Rには30台、QCS-Lには25台



図92台のクライオスタット内の超伝導電磁石構成



図 10 SuperKEKB IR を上から見た超伝導電磁石クライオスタット、ヘリウム冷凍機、加速器常伝導電磁石とビームライン、Belle-II 検出器(水平断面)。図中、ゼロの位置がビーム衝突点。

表 1: ビーム最終集束用超伝導電磁石

| | 主4極電磁石:8台 | 補正磁石:35 台 | QC1P 漏磁場補正磁石:8 台 | 補正ソレノイド |
|-------|-----------|--------------------------------|------------------|--------------|
| QCS-L | QC1LP | a_1, b_1, a_2, b_4 | | |
| | QC2LP | a_1, b_1, a_2, b_4 | h h h h | ESI |
| | QC1LE | a_1, b_1, a_2, b_4 | 03, 04, 05, 06 | ESL |
| | QC2LE | a_1, b_1, a_2, b_4 | | |
| | QC1RP | $a_1, b_1, a_2, a_3(b_3), b_4$ | | |
| | QC2RP | a_1, b_1, a_2, a_3 | | ESP1 |
| QCS-R | QC1RE | a_1, b_1, a_2, a_3 | h h h h | ESRI ESD2 |
| | QC2RE | a_1, b_1, a_2, a_3 | 03, 04, 05, 06 | ESR2 |
| | QC1-2RP | <i>b</i> ₃ | | LSKJ |
| | QC1-2RE | <i>b</i> ₃ | | |



図 11 QCS-R、QCS-L クライオスタットと Belle-II 測定器。この写真は、ビーム運転前の状態で Belle-II 測定器がビームラインより移動している。

が非常に高い組立精度で配置されている。図9に は、2 台のクライオスタットの中の超伝導電磁石 の構成を概念的に示してある。

図 9 と表 1 に示した *a_n* と *b_n* は、第 2 章で示し た第 2*n* 極を示し、その多極磁場を主成分とする 補正磁石である。

55 台の超伝導電磁石は3 つのタイプに分けら れる。これらは、1)ビームを集束するための8 台の超伝導4極電磁石、2)ビーム運転調整とQCIP 4 極電磁石からの漏れ磁場を打ち消す働きを持つ 補正電磁石、3)Belle-II検出器ソレノイドの1.5T 磁場を積分的に打ち消すための4台の補正ソレノ イド磁石である。55 台の超伝導電磁石は図9に示 されるように2台のクライオスタットに分割され て組み込まれている。全ての電磁石が表1に記載 されている。

LER 4 極電磁石 QC1RP と QC1LP は IP に最も 近い位置に設置されている。この 2 つの 4 極磁石 は陽電子ビームを垂直方向にビームを集束する。 QC2RP と QC2LP は陽電子ビームを水平方向に集 束する。同様に、QC1RE と QC1LE は電子ビーム を垂直方向にビームを集束し、QC2RE と QC2LE は電子ビームを水平方向に集束する。

各超伝導4極電磁石には、4~5台の超伝導補正 電磁石が組み込まれている。また、QC1RP と QC2RP 間、QC1RE と QC2RE 間のビームライン 上に各々1台の超伝導補正6極電磁石が設置され ている。

補正ソレノイド ESL と ESR1 は衝突点に最も近 い位置に配置され、ESR2 と ESR3 は、QCS-R ク ライオスタット後方の液体ヘリウム容器の HER と LER ビームラインに取り付けられている。

図 10 は、筑波実験室に配置された加速器ビー ムラインを上から眺めた状態を示してある。この 図には、超伝導電磁石を冷却するためのヘリウム 冷凍機も示されている。また、Belle-II 検出器は水 平断面を示し、その内部に挿入されたマグネット クライオスタットは外形を示している。QCS-R、 QCS-L クライオスタットは、完全に Belle-II 検出 器内部に配置されている。ビーム衝突位置は、図 10 に示すように Belle-II 測定器中心から QCS-L 側 に 470 mm ずれている。Belle-II ソレノイドは、検 出器中心部で 1.5 T の磁場を発生し、55 台の加速 器超伝導電磁石システムは、この磁場中で運転さ れる。表 2 に、ビーム衝突用超伝導電磁石システ ムの主パラメータをまとめた。図 11 は、筑波実験 室に設置された QCS-R、QCS-L クライオスタット と Belle-II 検出器の写真である。写真は加速器リ ング外から撮影されたものである。

表2 超伝導電磁石システム主パラメータ

| 超伝導電磁石台数 | 55 |
|----------------|--------------|
| 4 極電磁石 | 積分4極磁場、T |
| QC1RP, QC1LP | 22.96, 22.96 |
| QC2RP, QC2LP | 11.54, 11.48 |
| QC1RE, QC1LE | 25.36, 26.94 |
| QC2RE, QC2LE | 13.04, 15.27 |
| 補正ソレノイド | 積分磁場、Tm |
| ESR1+ESR2/ESR3 | 3.86 |
| ESL | 2.31 |
| 磁石クライオスタット | 冷却重量、kg |
| QCS-R, QCS-L | 3,139, 1,786 |
| He 冷凍機システム | 2 基 |
| 1 基冷却能力@4.5K | 250W |

4. 超伝導電磁石の設計

4.1. 超伝導電磁石設計の制約条件

4.1.1. 電磁石クライオスタット設計上の空間 的・熱的な制約

超伝導4極電磁石の設計を行うにあたり、Belle-Ⅱ 検出器と加速器機器との境界が最初に定義され た。この境界は、先代加速器 KEKB と Belle 検出 器との空間制約条件を踏襲したもので、その結 果、ビーム衝突領域の機器の設計を促進させた。 物理実験に必要な空間は Belle-II 検出器中心軸に 対して衝突点から右側は角度17度、左側は30度 の円錐の外部となり、加速器機器及び検出器から 出てくる信号線、配管等はこの円錐の内部に配置 する必要がある。QCS-R と QCS-L クライオスタ ットの先頭部円錐状の面は境界面にたいして 各々233 mm、402 mm 後退している。これは、検 出器に接続される大量の信号ケーブル・パイプ等 を配置するための空間を確保するためである。電 子・陽電子ビームを垂直方向に集束する QC1P と QC1E 超伝導4極電磁石は、このような検出器と の境界条件と2つの室温のビームライン(室温の ビームパイプで4極電磁石内筒に組込まれる)の 間の空間内で可能な限り IP に近い位置に配置さ れるように設計されている。

4.1.2. IR 加速器電磁石への背景磁場分布

Belle-II 超伝導ソレノイドは検出器内部に 1.5 T の磁場を発生している。この磁場分布を図 12 に 示した。図中の Z=0 がビーム衝突点 (IP) である。 ビーム集束に使われる、超伝導 4 極電磁石を IP か らの距離を用いて図中に示した。加速器超伝導電



図 12 Belle-II 検出器軸上での検出器ソレノイドが発生する磁場分布(計算)。Z=0の位置は IP に相当する。 また図中には、横から見た4極電磁石の位置を各磁石の長さを持つ長方形のブロックで示した。

磁石は、ソレノイド磁場強度の強弱はあれ全て検 出器ソレノイド磁場中で運転されている。

4.2. ビーム最終集束システムの磁場設計

4.1 で示したように、二つのビームは Belle-II ソ レノイドの 1.5 T の磁場中を 83 mrad の角度を持 って衝突点に入ってくる。ソレノイド磁場はビー ム運転に影響を与えるため、この磁場はビームラ イン上で積分的に補正ソレノイド(ESL、 ESR1/2/3)により打ち消される。

超伝導4極電磁石は、ソレノイド磁場中で更に 2 つのビームラインの限られた空間に組込まれる 為、4 極磁場からの磁場が対抗するビームライン へ漏れないように QC1LP と QC1RP 以外の6台の 4 極電磁石 (QC1LE, QC1RE, QC2LE, QC2RE, QC2LP, QC2RP) には磁性体ヨークが取り付けら れている。この6台の4極磁石が設置された空間 では、Belle-II ソレノイド磁場によりヨークが磁気 飽和しないように補正ソレノイドは 1.5 T の磁場 を打ち消す。図 12 で示される IP を含む QC1LP~ QC1RP 間の Belle-II ソレノイド磁場は、強い補正 ソレノイド磁場で積分的に打ち消される。QC1LP とQC1RPはこのソレノイド内部に組み込まれる。 QC1LP と QC1RP には、Belle-II ソレノイド磁場と 補正ソレノイド磁場から合成された約 2.6 T の磁 場が重畳されることになるため、この4極電磁石 にはヨークは取り付けられていない。QC1LP と OC1RPの4極磁場からの漏れ磁場は、非常に特殊 な形状の超伝導補正磁石を電子ビームラインに 設置し、漏れ磁場を打消し電子ビーム運転への影 響を極力小さくする工夫がされている。超伝導電 磁石の詳細は、第5章~7章で説明する。

5. ビーム最終集束超伝導4極電磁石

5.1. ビーム最終集束4極電磁石

超伝導4極電磁石は、ビームライン上の決めら れた位置に配置される。このパラメータを表3に 示した。また、LERビームライン上の4極電磁石 は設計として水平面に対して4極磁場の位相角度 が回転している。また、その磁場中心はIPを通過

表34極電磁石のビーム光学からの磁場仕様

| 電磁石 | 磁場強度 | Ζ | $\Delta \mathbf{x}$ | Δy | $\Delta \theta$ |
|-------|-------|-------|---------------------|------|-----------------|
| | Т | m | mm | mm | mrad |
| QC1LP | 22.96 | -935 | 0.0 | -1.5 | -13.4 |
| QC1RP | 22.96 | 935 | 0.0 | -1.0 | 7.2 |
| QC2LP | 11.48 | -1925 | 0.0 | -1.5 | -3.7 |
| QC2RP | 11.54 | 1925 | 0.0 | -1.0 | -2.1 |
| QC1LE | 26.94 | -1410 | 0.7 | 0.0 | 0.0 |
| QC1RE | 25.39 | 1410 | -0.7 | 0.0 | 0.0 |
| QC2LE | 15.27 | -2700 | 0.7 | 0.0 | 0.0 |
| QC2RE | 13.04 | 2925 | -0.7 | 0.0 | 0.0 |

する水平面に対して垂直方向に偏心している。こ れに対して、HER用の4極電磁石は磁場の位相角 度の回転はないが、磁場中心が水平方向に偏心し ている。この4極電磁石のビーム光学からの仕様 は、電磁石本体を非常に精密に製作するだけでは なく、温度4Kまで冷却した4極電磁石をビーム 運転中の電磁石への熱的・機械的な負荷がある状 態で配置することが求められる。ハードウエアー システムを完成させる上では非常に厳しい設計 条件である。超伝導4極電磁石の製作については、 2019年度のOHO'19「SuperKEKB-ルミノシテイ フロンテイアを切り拓く電子陽電子コライダー」 の講義9:ビーム衝突点超伝導電磁石(有本氏) で詳しく紹介されているので一読して頂きたい。

5.1.1. QC1RP、QC1LP 超伝導 4 極電磁石

8 台の4 極電磁石の中で QC1RP と QC1LP は最 も IP に近い位置に設置される。4.2 節で述べたが、 この4 極電磁石は磁性体ヨークを持たない電磁石 である。QC1LP と QC1RP は同じ設計パラメータ を持つため、磁石本体の区別を必要としない場合 は、これらの電磁石を QC1P と呼ぶことにする。 他の4 極電磁石も同じ表現方法を用いる。

この4極電磁石の基本設計は、第2章で説明し たようにコイル周方向の電流分布を cos(20)形状 に近づけることを設計方針とした。図13に、この 磁石の断面形状を示した。図中の赤線で示された 部分が超伝導ケーブルに相当する部分でこれら が鞍型のコイル状に巻かれたものが断面図の下 に示されている。電磁石用のコイルは、図に示す ように2つの薄いコイルを重ねた構造(ダブルパ



図 13 QC1Pの磁石断面設計とコイル形状

ンケーキ型)を持っている。QC1P は、ソレノイ ド磁場中で励磁されるため4極電磁石本体が発生 する磁場も加えると超伝導コイル内の最大磁場 は、設計電流1800 A に対して 4.56 T となる。コ イル内の電流と磁場により発生する電磁力に対 抗するために、超伝導コイルにはステンレス製の カラーにより内部応力を掛け、コイル形状を保持 している。

表4にQC1Pの磁石パラメータを示した。電磁 石電流 1800 A は陽電子と電子の衝突エネルギー が12 GeV として設計した。通常の物理実験は11 GeV で行われている。QC1P をビーム運転状態で 1800 A まで励磁した場合、QC1Pのケーブル臨界 電流値(2490 A)と1800 A との比(負荷率: R_l) は、72.3%である。実運転では、電流値は1600 A 付近となり、 R_L はこれよりも低い値となる。超伝 導4極電磁石の形状として、コイル1層目内半径 25 mm、2層目外半径 30.4 mm、SUS カラー外半径 35.5 mm、磁石長さ409.3 mmの小型の電磁石であ る。表4に示した磁石パラメータの表記は、他の 4極電磁石でも同じとする。

表4 QC1LPとQC1RPのパラメータ

| 設計磁場勾配、 G_d | 76.37 T/m |
|--|---------------|
| 設計電流、I _d | 1800 A |
| 超伝導コイル内最大磁場、Bp | 4.56 T |
| 臨界値までの負荷率@4.7 K、RL | 72.3 % |
| 超伝導機コイル形状 | |
| 第1コイル | |
| コイル内/外半径、 R _{i-cl} /R _{o-cl} | 25.0 /27.7 mm |
| コイル長、Lcl | 344.6 mm |
| ターン数、 <i>T</i> _{c1} | 12 |
| 第2コイル | |
| コイル内/外半径、 <i>R_{i-c2}/R_{o-c2}</i> | 27.8/30.4 mm |
| コイル長、 Lc2 | 361.9 mm |
| ターン数、 T _{c2} | 13 |
| SUS カラー内/外半径、R _{i-col} /R _{o-} | 30.8/35.5 mm |
| col | 409.3 mm |
| 磁石長、 <i>L_{pm}</i> | 333.6 mm |
| 実効磁場長、Lem | 0.88 mH |
| インダクタンス、L | NbTi |
| Rutherford 超伝導ケーブル | |
| ストランドワイヤー | |
| 外径、Ds | 0.498 mm |
| 銅比、Cu/S | 1.0 |
| フィラメント径、 D _f | 7.7 μm |
| フィラメント数、 N _f | 2113 |
| 臨界電流@5T,4.22K、Ic | 317 A |
| Rutherford ケーブル | |
| ケーブル幅、Wc | 2.50 mm |
| ケーブル中間部厚、 T_{cm} | 0.93 mm |
| キーストン角度、0k | 2.09 deg. |
| ストランド数、 Ns | 10 |



図 14 QC1P 用超伝導ケーブル断面

4 極電磁石に使用されているケーブルは、材質 NbTi、Rutherford タイプで、外径 0.49 mm のスト ランド線 10 本から構成されている。ストランド 線は、磁場 5 T、温度 4.22 K の条件で 317 A を通 電することができる。ケーブルサイズは、幅 2.5 mm、厚み 0.93 mm で 2.09 度のキーストン角度を 持っている。キーストン角度は、ケーブルをコイ ル周方向アーチ状に精度よく配置するために QC1PRutherford ケーブルに施工された。超伝導ケ ーブルの断面図を図 14 に示した。

加速器用電磁石は、一般的にはその電磁石が発 生する磁場主成分に対して 1×10⁻⁴ (1 units) 以下の 誤差磁場であることが要求される。QC1P の磁場 設計に於いても、4 次以上の高次の磁場成分に対 して 1 units 以下になるように設計されている。ま ず、図 13 で示した電磁石断面(2 次元)でのコイ ルの周方向の位置の最適化を行い、コイル 3 次元

表 5 QC1Pの設計誤差磁場 @R_{ref}=10 mm

| 誤差磁場成分 | 2 次元、units | 3 次元、units |
|----------|------------|------------|
| b_4 | 0 | 0.24 |
| b_6 | 0.10 | 0.54 |
| b_8 | 0 | 0.01 |
| b_{10} | -0.21 | -0.21 |
| b_{12} | 0.00 | 0.00 |
| b_{14} | 0.02 | 0.00 |
| | | |



図 15: QC1LP(上)、QC1RP 用超伝導コイル(下)、 SUS カラー(コイル左側)

形状での電磁石全体の誤差磁場を1 units以下とな るようにコイル端部の形状の最適化を行った。磁 場設計結果を表5に示した。表中の値は、参考半 径(*R_{ref}*)10 mm の位置での磁場分布から計算され た。2 次元電磁石断面設計モデル、電磁石全体の 3 次元モデルともに高次の誤差成分は1 units以下 に調整されている。図 15 に完成した QC1LP と QC1RP 用に製作した超伝導コイル、SUS カラー を示した。

5.1.2. QC1RE、QC1LE 超伝導 4 極電磁石



図 16 QC1E の磁石断面設計とコイル形状

QCIRE と QCILE は、HER ビームライン上で IP に最も近い位置に配置された4極電磁石で、磁 性体のヨークを SUS カラー外周部に持っている。 磁性体ヨークにより QCIE から LER ビームライ ンへの磁場の漏れはビーム運転に影響を与えな いレベルまで減少させている。以下にこの4極電 磁石設計時の検討について説明する。

QC1E の電磁石断面設計と超伝導コイル形状を 図 16 に示した。QC1E のコイル断面設計は、QC1P と同様、 $cos(2\theta)$ の電流分布を作るように超伝導ケ ーブルを配置している。QC1E の電磁石としての パラメータは、表 6 に示した。QC1E は QC1P よ り IP から離れたビームライン上に設置されるの で、第1コイル内半径は QC1P よりも大きく R_{i-cl} = 33.0 mm で、カラー外径は R_{o-col} =47.0 mm、ヨ ーク外半径 R_{o-y} =70.0 mm である。設計電流値は I_d = 2000A で設計されており、発生する磁場勾配 は G_d =91.57 T/m である。超伝導コイルに使用さ れている超伝導ケーブルの基本的なパラメータ は QC1P と同じだが、ケーブルにつけられたキー ストン角度 (θ_k) はコイル内径に合わせて 1.59 度 に設定されている。

QC1E の設計誤差磁場は表 7 に纏められ、磁場の評価半径 R_{ref} =15 mm において 1 units 以下となるようにコイル断面、コイル端部形状が設計されている。

QC1E には磁性体ヨークが取付けられている が、ヨークが Belle-II ソレノイドの 1.5 T 磁場で磁 気飽和しないように補正ソレノイドで Belle-II ソ レノイド磁場を打消している。3 次元磁場解析に より設計された補正ソレノイドでは一部 Belle-II ソレノイド磁場が残留し、QC1E のヨークに吸収 されることが分かっている。この為、磁性ヨーク 及び磁性を持つ部品は、-0.5 T~0.5 T 程度の磁場 分布を持っている。図 17 には、QC1RE を組込ん だクライオスタット断面図を示した。陽電子ビー ムラインと電子ビームラインが交差角度を持っ ているため、IP に近づくと陽電子用へリウム容器 内筒が QC1RE ヨークと干渉しヨークの一部を円 弧状に削っている。電子ビームライン上には磁気 シールドが取付けられている。この QC1E ヨーク

表6 QC1LEとQC1REのパラメータ

| Gd | 91.57 |
|---|--------------|
| Id | T/m2.000 A |
| R _n | 3 50 T |
| Bp R | 73.4 % |
| 祝仁道燃ってル形性 | /3.4 /0 |
| | |
| 弗 I ユイル | |
| R_{i-cl}/R_{o-cl} | 33.0/35.7mm |
| L_{cl} | 401.1 mm |
| T_{cl} | 16 |
| 第2コイル | |
| $R_{i-c} \gamma / R_{o-c} \gamma$ | 35.8/38.4 mm |
| Lee | 396 6 mm |
| T_{c2} | 18 |
| 1_{C2} | 20.0/47.0 |
| K_{i-col}/K_{o-col} | 38.8/4/.0 mm |
| ヨーク内/外半径, R _{i-y} / R _{o-y} | 47.0/70.0 mm |
| L_{pm} | 455.4 mm |
| Lem | 373.1 mm |
| L | 2.19 mH |
| Putherford 招伝道ケーブル | NhTi |
| Runchold 起囚守/ ノル | NUTI |
| ストラントリイヤー | |
| $I_c(a)$ 5T, 4.22 K | 307 A |
| Rutherford ケーブル | |
| キーストン角度、0% | 1.59 deg. |

表7 QC1Eの設計誤差磁場 @R_{ref}=15 mm

| 誤差磁場成分 | 2 次元、units | 3 次元、units |
|----------|------------|------------|
| b_4 | 0 | -0.01 |
| b_6 | -0.05 | -0.03 |
| b_8 | 0 | 0.04 |
| b_{10} | -0.26 | -0.33 |
| b_{12} | 0 | 0.04 |
| b_{14} | -0.01 | -0.06 |



図 17 QC1RE IP 側のクライオスタット断面

形状を用いて、QC1E から陽電子ビームラインへ の漏れ磁場量を計算した。ヨークの材質として鉄 とパーメンジュールを用いた。パーメンジュール は、磁気飽和の磁場が 2.30 T と純鉄の 2 T より高 い。図 18 は、QC1RE を 1577 A に励磁した場合の コイル、ヨーク、磁気シールド内の磁場強度の分 布を示している。図 19、図 20 は、ヨーク内に 0.5 T の残留 ソレノイド磁場がある場合の計算結果を 示してある。鉄を用いた場合、陽電子ビームライ ン上での QC1RE からの漏れ磁場は約 1.8 Gauss で あるのに対して、パーメンジュールを用いた場 合、0.2 Gauss 以下まで漏れ磁場を抑えることがで きている。このような計算結果をもとに、QC1E の ヨークと磁気シールド材料にはパーメンジュー ルが使用された。



図 18 QC1RE を 1577A まで励磁した時のコイ ル、ヨーク、磁気シールドの磁場強度分布。コン ター図の表示レンジは 0T~2.72T である。



図 19 ヨーク、磁気シールド材料が鉄の場合の 磁場計算結果。コンター図表示範囲=0~5 Gauss。



図 20 ヨーク、磁気シールド材料がパーメンジ ュールの場合の磁場計算結果。コンター図表示 範囲=0~5 Gauss。

5.1.3. QC2RP、QC2LP 超伝導 4 極電磁石

QC2RP と QC2LP 超伝導 4 極電磁石は、図 9 に 示すように IP から見て QC1P、QC1E の後方に配 置されている。この為、4 極電磁石コイル内半径 はこれらの 4 極電磁石よりも大きい設計となって いる。QC2P の断面設計とコイル形状を図 21 に示 した。QC2P の 4 極電磁石パラメーターを表 8 に 纏めた。第1 コイル内半径は R_{i-cl} =53.8 mm で、 カラー外半径は R_{o-col} =68.0 mm、ヨーク外半径 R_{o-y} =93.0 mm である。設計電流値 1000 A で G_d =31.97 T/m の 4 極磁場勾配を発生する。磁石長 L_{pm} =495.5 mm、1 極当たりのケーブルターン数 53 (T_{cl} =26+ T_{c2} =27) となるので磁石のインダクタン ス L は QC1P と QC1E より大きく 7.32 mH であ る。QC2P の誤差磁場を表 9 に纏めた。評価半径 R_{ref} =30 mm で 1 units 以下に抑えられている。



図 21 QC2P の磁石断面設計とコイル形状

表8 QC2LPとQC2RPのパラメータ

| G_d | 31.97 T/m |
|-----------------------|--------------|
| I_d | 1,000 A |
| B_p | 2.43 T |
| $\dot{R_L}$ | 44 % |
| 超伝導機コイル形状 | |
| 第1コイル | |
| R_{i-cl}/R_{o-cl} | 53.8/56.5 mm |
| L_{cl} | 442.3 mm |
| T_{cl} | 26 |
| 第2コイル | |
| R_{i-c2}/R_{o-c2} | 56.6/59.2 mm |
| L_{c2} | 443.6 mm |
| T_{c2} | 27 |
| R_{i-col}/R_{o-col} | 59.6/68.0 mm |
| R_{i-y}/R_{o-y} | 68.0/93.0 mm |
| L_{pm} | 495.5 mm |
| L _{em} | 409.9 mm |
| L | 7.32 mH |
| Rutherford 超伝導ケーブル | NbTi |
| ワイヤー Ic@ 5T, 4.22 K | 309 A |
| $	heta_k$ | 1.00 deg. |

表 9 QC2P の設計誤差磁場 @Rref=30 mm

| 誤差磁場成分 | 2 次元、units | 3 次元、units |
|----------|------------|------------|
| b_4 | 0 | -0.04 |
| b_6 | -0.003 | 0.18 |
| b_8 | 0 | 0.08 |
| b_{10} | -0.10 | -0.96 |
| b_{12} | 0 | 0.02 |
| b_{14} | -0.03 | -0.07 |

5.1.4. QC2RE、QC2LE 超伝導 4 極電磁石

QC2RE と QC2LE の電磁石断面図と QC2LE の 超伝導コイル形状を図 22 に示した。2 つの4 極電 磁石に使われている超伝導コイルの断面設計は 同じであるが、組み立てられた電磁石ユニットと しては大きく異なっている。QC2LE は、QC1E/ QC2P と同じように超伝導コイルを固定する SUS カラーの外周部に磁性体のヨークを持つ単純な 構造であるが、QC2RE は SUS カラーとヨークの 間に補正ソレノイド(ESR2)が組み込まれている。

図9に示したように、QCS-R クライオスタット には後方ヘリウム容器内に各ビームラインに補 正ソレノイド ESR2 と ERS3 が設置されている。 クライオスタット内の空間的な制約から、ESR2

表 10 QC2LE と QC2RE のパラメータ

| $G_{d (2RE, 2LE)}$ | 38.56, 36.39 T/m |
|-----------------------------|------------------|
| I _{d (2RE, 2LE)} | 1562.5, 1250.0 A |
| $B_{p(2RE, 2LE)}$ | 2.81, 2.63 T |
| $R_{L(2RE, 2LE)}$ | 57.4, 50.0 % |
| 超伝導機コイル形状 | |
| 第1コイル | |
| R_{i-cl}/R_{o-cl} | 59.3/62.0 mm |
| $L_{cl}(2RE, 2LE)$ | 451.1. 569.1 mm |
| T_{cl} | 28 |
| 第2コイル | |
| R_{i-c^2}/R_{o-c^2} | 56.6/59.2 mm |
| L_{c2} (2RE 2LE) | 455.9, 573.9 mm |
| T_{c2} | 30 |
| R_{i-col}/R_{o-col} | 65.1/75.0 mm |
| $R_{i-\nu}/R_{o-\nu}(2RE)$ | 85/108.5 mm |
| $R_{i-\nu}/R_{o-\nu}$ (2LE) | 75/115.0 mm |
| L_{pm} (2RE 2LE) | 560.7, 618.0 mm |
| $L_{em}(2RE, 2LE)$ | 419.0, 537.0 mm |
| $L_{(2RE, 2LE)}$ | 10.36, 13.28 mH |
| 超伝導ケーブル | NbTi |
| ワイヤー Ic@ 5T. 4.22 K | 313 A |
| θ_k | 0.94 deg. |
| | ě |

表 11 QC2RE/2LE の設計誤差磁場 @Rref=35 mm

| 誤差磁 | 2 次元、units | | 3 次元、units | |
|----------|-------------|-------|-------------|-------|
| 場成分 | QC2RE/QC2LE | | QC2RE/QC2LE | |
| b_4 | 0 | 0 | 0.07 | 0.05 |
| b_6 | -0.19 | -0.16 | -0.04 | -0.09 |
| b_8 | 0 | 0 | 0.06 | 0.04 |
| b_{10} | -0.11 | -0.09 | -1.88 | -1.30 |
| b_{12} | 0 | 0 | 0.03 | 0.02 |
| b_{14} | 0.03 | 0.02 | -0.05 | -0.03 |

補正ソレノイドは QC2RE と同じビームライン位 置に設置された。後ほど説明する補正超伝導電磁 石も QC2RE 内筒に設置されているので、QC2RE は非常に多機能で複雑な超伝導電磁石となって いる。

QC2RE と QC2LE の電磁石パラメータを表 10 に纏めた。4 極電磁石コイル内半径は、4 タイプの 電磁石の中で最も大きい *R_{i-cl}=59.3* mm である。

設計電流値は、 $I_{d(2RE)}$ =1562.5A、 $I_{d(2LE)}$ =1250A である。また、設計4極磁場勾配は、 $G_{d(2LE)}$ =36.39 T/m である。4極電磁石の長さは2つの電磁石で 異なり、 $L_{pm(2RE)}$ =419.0 mm、 $L_{pm(2LE)}$ =537.0 mm で ある。これは、QC2RE と QC2LE の IP からの距



図 22 QC2LEとQC2REの磁石断面設計とQC2LE コイル形状

離が異なることと Belle-II 測定器へのバックグラ ンドノイズの低減のために設定された。

2 台の電磁石の誤差磁場についても他の4 極電 磁石と同様、2 次元の磁石断面モデルと超伝導コ イルの形状 3 次元モデルを用いて計算された。2 次元断面では、評価半径 *R_{ref}=35* mm で多極成分は 1 units 以下となっているが、コイル端部を含んだ 3 次元磁場計算では、normal 20 極成分(*b₁₀*)が QC2RE では-1.88 units、QC2LE では-1.30 units あ り、この結果はビーム光学の計算に取り入れられ てビーム運転上問題ないことが確認されている。

5.2. 超伝導4極電磁石の磁場測定と測定結果

超伝導4極電磁石の磁場測定では、先ず設計電 流で4極磁場勾配を作ることができているか、加 速器運転時にビームにとって誤差磁場となる多 極磁場成分が設計値通り抑えられているか、4極 磁場センターがクライオスタットに設置された 基準位置に対してどの程度の誤差を持っている かを測定した。また、ビーム最終集束用超伝導4 極電磁石の場合、電磁石内部のビームラインに沿 った磁場分布もビーム運転に影響を与えるため 特殊な磁場測定器が必要となる。これら磁場測定 器を簡単に説明して、製作された8台の超伝導4 極電磁石の磁場測定結果について説明する。

5.2.1. 磁場測定装置

4 極磁場強度、誤差磁場多極磁場成分、磁石軸 に沿った磁場成分の分布は、Tangential コイルを組 み合わせた Harmonic コイルを 4 極電磁石コイル 内筒の室温空間で回転して測定を行った。回転時 のコイルに発生する誘導電圧を測定することに より磁束の分布を測定する。Tangential コイルの概



図 23 Tangential コイル 2 次元断面図。図中、黒 丸」がコイル部に相当する。 Δ :ループを作る 2 つの ワイヤーの開き角度、 R_c :ループ半径。

念図を図 23 に示した。Tangential コイルは、ワイ ヤーでコイル状のループを作るが、図 23 に示す ように円筒上に配置される。超伝導 4 極電磁石の 磁場測定には、図 24 で示されている Harmonic コ イルを用いた。このコイルには $\Delta = ~23.7$ 度の Tangential コイルと $\Delta = 90$ 度、180 度の 4 極磁場測 定コイル (3 台)、2 極磁場測定コイル (3 台) が



図 24 超伝導電磁石磁場測定に使用された Harmonic コイル

組み込まれている。Δ=~23.7 度の Tangential コイ ルを用いて多極磁場成分の測定を行い、4 極コイ ルの1台を用いて超伝導4極電磁石の主磁場成分 である4極磁場強度を0.1%以下の精度で測定す る。また、4極コイルと2極コイルの信号を用い て4極磁場と2極磁場のバッキング処理を行い、 4 極磁場から誘導される測定上の誤差を取り除く 測定を行う。本セミナーでは磁場測定方法につい

表 12 Harmonic コイルパラメータ

| 雪磁工 | 積分値測定 | | 磁場分布測定 | |
|-----------|----------------|------|------------------------|------|
| | L_c/R_c (mm) | | $L_c/R_c \text{ (mm)}$ | |
| QC1P/QC1E | 594.6 | 12.0 | 20.4 | 12.0 |
| QC2P | 695.0 | 25.0 | 20.4 | 25.0 |
| QC2E | 795.0 | 33.1 | 19.9 | 33.0 |

て詳しい説明は行わないが、参考文献として[7,8] を紹介する。興味のある方は、ご一読頂きたい。

また、図 24 には SuperKEKB 超伝導電磁石 QC1P、QC1E の磁場測定に使用した Harmonic コ イルの1つを示した。このコイルのパラメータ は、長さ $L_c=20.4 \text{ mm}$ 、コイル半径 $R_c=12.0 \text{ mm}$ 、 Tangential コイルの開き角度 Δ=21.2 度、ワイヤー のターン数 T=120 である。この Harmonic コイル には、Tangential コイルのほかに3個の4極コイ ル、3個の2極コイルが組み込まれている。すべ てのコイル形状は、標準常伝導2極、4極、6極電 磁石を用いて校正されている。この Harmonic コ イルは、電磁石軸方向の磁場分布を測定するもの であるが、磁石全体の積分磁場を測定する Harmonic コイルもあり、このコイルの長さは、 L_c=600 mm である。SuperKEKB 超伝導電磁石シス テムの磁場測定に使用された Harmonic コイルを 表 12 に示した。これらの磁場測定用コイルは全 て KEK 内で製作され、校正されている。



図 25 SuperKEKB 超伝導 4 極電磁石磁場中心測定: Single Stretched Wire (SSW)。赤線が Be-Cu 線。

超伝導4極電磁石はクライオスタット内に組込 まれるので、常伝導電磁石のように磁場中心を機 械的な外部基準点で置き換えることは非常に難 しい。超伝導4極電磁石は、ヘリウム容器・クラ イオスタット内に組込まれるので直接光学的手 法で電磁石につけた基準点を測定することがで きないからである。

4 極磁場中心位置を測定するために、Single Stretched Wire (SSW) と呼ばれる装置を用いる。 この磁場測定方式は、英語表記そのもので加速器 用電磁石内筒に張られた1本の金属線を精度よく 移動し磁束の変化量を測定することで直接磁場 中心を測定する方法である。実測では図25[9] に 示すように、直径0.1 mmのBe-Cuの線を2台の マグネットクライオスタット後方から支持し、設 計ビームラインに配置する。4台の超伝導4極電 磁石の磁場中心を1本のBe-Cu線で測定する。測 定時には各4極電磁石が単独で励磁される。Be-Cu線の長さは8.7mあり、重力によりBe-Cu線は 垂れ下がるが、この効果は補正することが可能で ある。

5.2.2. 4極電磁石磁場強度と誤差磁場

超伝導4極電磁石の磁場の強度は、この磁石が SuperKEKBのビーム最終集束を行うことから高 い精度で測定されることが要求されている。磁場 測定は5.2.1で示した Harmonic コイルを用いて行 った。積分4極磁場の電流に対する変化を図26に 示した。プロットの縦軸は、Transfer 関数(*TF*) と呼ばれるもので、測定された4極磁場を電流値 で割った値である。*TF*は、以下の式で定義される。

表 13 超伝導 4 極電磁石 TF

| 雷磁石 | 電流 | TF cal. | TF | TF up- | TF dw- |
|-------|------|---------|-------|--------|--------|
| | kA | | meas. | ramp | ramp |
| QC1LP | 1.70 | 14.15 | 14.38 | 14.38 | 14.38 |
| QC1RP | 1.70 | 14.15 | 14.36 | 14.36 | 14.36 |
| QC1LE | 1.70 | 17.08 | 17.06 | 17.06 | 17.06 |
| QC1RE | 1.70 | 17.08 | 17.02 | 17.02 | 17.02 |
| QC2LP | 0.9 | 13.10 | 12.97 | 12.97 | 12.98 |
| QC2RP | 0.9 | 13.10 | 12.97 | 12.97 | 12.97 |
| QC2LE | 1.00 | 15.63 | 15.26 | 15.26 | 15.27 |
| QC2RE | 1.00 | 10.34 | 10.47 | 10.46 | 10.48 |



図 26 超伝導 4 極電磁石の 4 極磁場強度の電流 値依存性。図中、矢印は電流変化の方向を示して いる。

$$TF = \frac{\int B_2}{I} \tag{16}$$

図 26 に示すように、超伝導ケーブルの磁化の 影響により電磁石の励磁と消磁の方向により *TF* の値は運転電流近くで 0.1%程度異なる。 SuperKEKB ビーム運転では、非常に高い精度で磁



図 27 超伝導 4 極電磁石の多極磁場成分

場を作ることが要求されることから、電磁石の電 流値は 0A からビーム運転で使用される電流値ま で上昇する時の TF-I 曲線を用いて定義している。

表 13 には、磁場測定の代表値を示した。計算値 と比較して、QC1P では 1%、QC1E 0.4%、QC2P 1%、QC2LE 2.4%、QC2RE 1.2%の誤差がある。こ の誤差は、電磁石製作・組立誤差から誘導された と考えている。

4 極電磁石の積分磁場値に含まれる多極成分に ついても測定値から解析され。結果は図 27 に示 した。多極成分は、横軸 n 値で示され、n=3 は 6 極磁場 (2n) 成分に対応し、プロットでは 20 極磁 場成分 (n=10) までが示されている。また、各 2n 極に対して a_n は skew 成分、 b_n は normal 成分を示 している。超伝導4極電磁石は、Belle-II ソレノイ ドと補正ソレノイドの合成磁場の中で励磁され ることから、その影響を確認するためにソレノイ ド磁場有・無の条件で測定した結果についても示 した。図中では、ソレノイド磁場有が「with S.F.」 で、ソレノイド磁場無しが「without S.F.」で示し た。8台の超伝導4極電磁石で最も加速器ビーム 衝突性能・ビーム運転に影響を持つQC1PとQC1E の磁場性能について先ず説明する。図 27 からわ かるように n=3 の 6 極磁場成分以外は 1 units 以 下である。また、高次の多極磁場成分は、ソレノ イド磁場の有無で大きな変化はない。6 極磁場成 分は、磁性ヨークが取付けられている QC1E にお いては大きな影響は見られない。測定結果から、 ソレノイド磁場が重畳された場合でも*a*₃、*b*₃共に 1 units 以下である。QC1P は、ビームライン上で ~2.5T のソレノイド磁場が印加されるのでその影 響は大きい。QC1RP では、ソレノイド磁場がない 状態では a3、b3 は 1.5 units であるが、QC1RP のビ ームライン上のソレノイド磁場に含まれる6極磁 場成分によりキャンセルされ1 units以下まで小さ くなっている。 逆に、 QC1LP ではソレノイド磁場 無い状態で a₃=0.14 units、b₃=-1.15 units であるの に対して、ソレノイド磁場が印加されると a= -0.07 units、b₃=-1.74 units と b₃が 1 units を超え る値となっている。この値は、ビームラインに組

込まれている b₃ 補正電磁石で補正できることが 確認されている。

以上説明してきた磁場精度の要求が実際の4極 電磁石においては、どの程度の製作誤差に相当す るのかを以下に説明する。以下の事象は、QC1P と QC1E のプロトタイプ製作時に実際に経験した内 容である。

4 極電磁石設計の節で磁石のパラメータについ て説明したが、超伝導4極電磁石は、幅2.5mmの 超伝導ケーブルを使用している。2 層で構成され る超伝導コイルの厚みは絶縁部も含めても 5.4 mm である。超伝導コイル形状は、冷却による熱 収縮と励磁中の電磁力を考慮して、電磁石組立時 に圧縮応力を加える。QCSの超伝導4極電磁石で は、組立時に30MPaの圧力をかける設計になって いた。この圧力は、超伝導ケーブルのヤング率(E) とコイル/電磁石設計により計算されるが、プロト タイプ設計時には E=648 MPa が用いられた。 QC1E と QC1P プロトタイプ製作後、磁場測定を 行い得られた高次の誤差磁場を表 14 に示した。 測定結果からは、4 極電磁石が cos(20)電流分布を 持つ場合に設計上発生する高次磁場成分(b₆, b₁₀) 以外の誤差磁場成分が測定され、特に製作された プロトタイプは 1 units 以上の 6 極磁場成分 (a_3 、 b3)を持つことが分かった。ビーム光学グループ の検討により、この6極磁場成分はビームライフ タイムに著しく影響し、ライフタイムを短くする が判明した。

6 極磁場成分の発生源を特定するため、これま で製作してきた製作過程のコイルの写真を用い

表 14 QC1P と QC1E プロトタイプ誤差磁場 (測定値)

| | QC1P R _{ref} | QC1P <i>R_{ref=}</i> 10mm | | ≘15mm |
|----|-----------------------|-----------------------------------|-------|-------|
| n | a_n | b_n | a_n | b_n |
| 2 | 0 | 10000 | 0 | 10000 |
| 3 | 2.82 | 3.66 | 1.78 | 8.59 |
| 4 | 2.08 | 0.24 | 0.44 | -0.68 |
| 5 | 0.35 | 0.23 | 0.23 | -1.83 |
| 6 | 0.03 | -0.59 | -0.39 | -1.85 |
| 7 | 0.07 | 0.13 | -0.09 | 0.10 |
| 8 | 0.03 | 0.01 | 0.69 | -0.02 |
| 9 | -0.08 | 0.05 | 0.51 | -0.09 |
| 10 | 0.02 | 0.01 | -0.10 | -0.62 |



図 28 QC1E 超伝導コイル端部変形



図 29 QC1E 超伝導コイル変形解析

た調査と4極電磁石内部のコイルの変形モード解 析を行った。

図 28 の超伝導コイル製作の写真から、コイル 端部スペーサーに加工された固定用穴が楕円に 変形していることが分かり、過大な圧縮がコイル に加えられたことが推定された。また、超伝導ケ ーブルのヤング率 E の測定を行い、実測値は E=8 GPa であることが判明した。電磁石設計時の機械 的なパラメータの不具合から4極電磁石組立時に 超伝導コイルに過大な応力を与え、コイルを変形 させたと考えられる。

コイル変形解析では、4 つのコイルに図 29 に示 す楕円変形を発生していた場合、磁場測定で観測 された高次磁場成分を再現することが分かった。 表 15 に 2 つの半径方向のシフト量 (Δr) について

表 15 QC1E 断面を模擬したコイル変形評価

| | $\Delta r=50 \ \mu m$ | | $\Delta r=2$ | 20 μm |
|---|-----------------------|-------|--------------|-------|
| n | a_n | b_n | a_n | b_n |
| 2 | 0 | 10000 | 0 | 10000 |
| 3 | 0 | 13.62 | 0 | 5.45 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | -1.63 | 0 | -0.65 |

示した。解析結果から、コイルに図 29 の楕円変形 が生じた場合、6 極と 10 極磁場成分が誘起される ことが分かる。この変形は、QC1E プロトタイプ の磁場測定結果とも一致する。仮に測定された b_3 =8.59 units が楕円変形に依るものとすると半径 方向の変形量は Δr =31.5 μ m と計算され、これによ って b_5 =-1.02 units も発生する。光学グループから の要求されている 1 units 以下に 6 極磁場成分を低 減するためには、半径方向のコイル位置の組立誤 差を±4 μ m 以下にする必要がある。

以上の磁場測定結果とそれにより評価された 4 極電磁石の組立精度の非常に厳しい要求から、当 初、超伝導補正電磁石システムには 6 極補正磁石 は組み込まれていなかったが、その時点で製作を 開始していなかった QCS-R の補正電磁石に 6 極 電磁石を組込むことになった。

5.2.3. 4 極電磁石内磁場分布

ビーム最終集束用超伝導4極電磁石内のビーム ライン上ではビームサイズが大きく変化するこ とから、4 極電磁石軸に沿った 4 極磁場と多極磁 場成分の分布を用いたビーム光学設計を行う必 要がある。また、超伝導4極電磁石の物理的な長 さが非常に短く4極電磁石軸に沿った4極磁場強 度においても一定の部分が少ないため、加速器ビ ーム衝突点設計では製作形状の4極電磁石の3次 元モデルを製作し、このモデルの作る磁場分布を 用いて光学設計を行った。製作を完了した超伝導 4 極電磁石の磁場の分布は、長さが 20 mm の Harmonic コイルを用いて測定された。この Harmonic コイルは、図 24 に示している。磁場強 度の小さい高次の多極磁場成分を高精度で測定 するため、Tangential コイルは直径 60 µm の銅線 を120ターン巻いて製作した。コイル全体の実効

的サイズは、標準2極、4極、6極常伝導電磁石で 校正されている。

この磁場測定器を用いて測定された QC1LP(実 機)の磁場分布を図 30 に示した。QC1LPの電流 値は 1625A である。QCS-L クライオスタットをビ ームラインに据え付け後、Harmonic コイルをビー ム軸方向に 5 mm 間隔で移動し磁場測定を行っ た。Belle-II ソレノイドと補正ソレノイドも励磁さ れ、その影響も調べられた。

図中に示したプロットは、横軸が設計上のビー ム衝突点からの位置を示している。このプロット では、縦軸は半径 *R_{ref}*での磁場の値で示している。 表示は *A_n、B_n*を用いている。加速器ビームライン



図 30 QC1LP 4 極電磁石軸に沿った磁場分布

の座標系を用いているため、プロットの右側に IP (Z=0)が位置する。縦軸は QC1P の評価半径 R_{ref} = 10 mm の位置での磁場強度を示している。最上 段に示されている B_2 は4極磁場を示している。プ ロットの中で、実線(黒)は設計値、 \bullet (赤)は Belle-II ソレノイド励磁中での測定値、×(青)は Belle-II ソレノイド励磁無での測定値を示してい る。プロットで示される実機の4極磁場分布は設 計値をほぼ再現していることが分かる。また、ソ レノイド磁場の有無の影響も小さい。他の高次磁 場成分の測定結果についても同様の方法で示し てある。

6 極磁場成分 (*A*₃、*B*₃) は設計モデルではゼロで あるが、5.2.2.の QC1P/E プロトタイプ製作事例で も示したように 4 極コイルの組立誤差からも容易 に出現しやすく、実機の QC1LP でもプロットに 示す磁場分布を持っている。また、超伝導コイル は図 28 (この場合 QC1E) に示すコイル端部をコ



表 16 超伝導 4 極電磁石のソレノイド磁場電磁 力による変移

| 雷磁石 | 設計 | wo SF | w SF | Δ_{EMF} | $\Delta_{\rm D}$ |
|-------|-------|---------|---------|----------------|------------------|
| | mm | mm | mm | mm | mm |
| QC2LE | -2700 | -2700.5 | -2700.7 | -0.2 | -0.7 |
| QC2LP | -1925 | -1924.2 | -1927.1 | -2.9 | -2.1 |
| QC1LE | -1410 | -1411.8 | -1413.5 | -1.7 | -3.5 |
| QC1LP | -935 | -934.5 | -936.9 | -2.4 | -1.9 |
| QC1RP | 935 | 935.0 | 935.9 | 0.9 | 0.9 |
| QC1RE | 1410 | 1409.8 | 1410.7 | 0.9 | 0.7 |
| QC2RP | 1925 | 1925.2 | 1926.1 | 0.9 | 1.1 |
| QC2RE | 2925 | 2925.8 | 2925.9 | 0.1 | 0.9 |

イル両端に持ち、この部分の形状を設計通りに作 ることは極めて困難であり、その結果、コイル両 端部に相当する位置で局部的に大きな6極磁場の 分布が測定されている。

コイル端部の超伝導ケーブル取り出し側では コイルの対称性が4極対称とはならない設計とし ているので B4成分が設計上作られる。この B4成 分の磁石軸に沿った分布も測定で確認されてい る。

12 極磁場(*B₆*)は設計時にコイル端部でプロットに示す分布が作られるが、その分布の形は測定されている。図 30 では上記の主成分の 4 極磁場の分布と 6 極、8 極、12 極磁場の分布を示したが、 20 極磁場までの磁場分布データを光学グループに報告し、運転上の問題点を検証中である。

長さ 20mm の Harmonic coil を用いた磁場測定 結果より、Belle-II ソレノイドと QCS 補正ソレノ イド間で発生する電磁力による超伝導電磁石を 格納したヘリウム容器のクライオスタット軸方 向の動きを評価することができる。ソレノイド間 に発生する電磁力については、補正ソレノイドの 章で説明をする。

図 30 の B₂成分の変化が大きい部分の Z 軸方向 を拡大したプロットを図 31 に示した。●を直線 で結んだ線がソレノイド励磁中の QC1LP のコイ ル端部での電磁石軸に沿った変化を示している。 ソレノイド磁場がない場合の測定値(×)と比較 すると QC1LP は IP から離れる方向にシフトして いることが分かる。尚、ソレノイド磁場の無い OC1LP の測定値は設計値に非常に正確に一致し ており、QC1LP がビーム進行方向に対しては正し く設置されたことが分かる。電磁力による4極電 磁石のビーム軸方向への変位量を表 16 に示した。 QCS-Rクライオスタットに組込まれた超伝導4極 電磁石は、ソレノイド磁場による電磁力の影響を 含めても設計値から1 mm 程度の誤差となってい るが、QCS-Lクライオスタット内の超伝導4極電 磁石は2mm以上の変位があることが分かった。 QCS-Lの2台のヘリウム容器のうち、IP側に組込 まれた4極電磁石において大きな変位があり、そ の原因については現在検討が進められている。ま

た、このビーム進行方向の4極磁場位置の誤差に ついては、ビーム光学グループに運転上の影響に ついて確認をして頂き、光学調整で対応できるこ とを確認している。

5.2.4. SSW による 4 極電磁石磁場中心測定

SSW 測定装置ワイヤー位置制御部の写真を図 32 に示した。この測定装置が図 25 に示したよう に 2 台のマグネットクライオスタットの後方に据 付け、Be-Cu ワイヤーを設計ビームライン位置に 配置する。写真に示した装置は、QCS-L クライオ スタットを KEK 内超伝導低温真空実験棟で性能 試験を行ったときの様子で、SSW 測定装置と QCS-L 電磁石クライオスタット先端が写されて いる。下の写真にBe-Cu ワイヤーが微かに見える。



図 32 SSW 測定装置ワイヤー位置制御部



図 33 SSW と電磁石に対する座標系

SSW の測定原理を図 33 と式 (17)、(18) を用い て示す。[10]

 $A_{z} = \mathcal{R} \ [\int_{n=1}^{\infty} R_{ref} \ g \ \left(\frac{b_{n}+ia_{n}}{nR^{n-1}}\right) [(x-x_{0})+i(y-y_{0})]^{n}],$ (17)

 $\Phi = L_m[A_z(x_2, y_2) - A_z(x_1, y_1)]$ (18).

磁場勾配gの4極磁場中心でのベクトルポテン シャル A_z は、式(17)で表される。式中の、x, yはワイヤーの基準座標系での水平、垂直成分、 x_0 、 y_0 は磁石の座標系でのオフセットである。

測定器のワイヤーが点1(x₁、y₁)から点2(x₂、 y₂)に移動することによる磁束の変化量Φは、式 (18)で示される。Φの測定から、4極磁場中心位 置を測定する。

SSW を用いて測定された超伝導4極電磁石の磁場中心を表17に示した。表17には、Belle-II ソレノイドと補正ソレノイド磁場の有無の影響についても示した。ソレノイド磁場間の電磁力により、

表 17 ビームライン上の 4 極磁場中心(ビーム垂 直面内)とソレノイド磁場電磁力の影響

| 雪磁工 | Δx , mm | | Δy , mm | |
|--------------|-----------------|-------|-----------------|-------|
| 电燃石 | w SF | wo SF | w SF | wo SF |
| QC1LE | -0.21 | -0.16 | -0.29 | -0.56 |
| QC2LE | 0.13 | 0.11 | -0.54 | -0.58 |
| QC1RE | 0.25 | 0.14 | -0.37 | -0.54 |
| QC2RE | 0.08 | 0.07 | -0.58 | -0.63 |
| QC1LP | -0.03 | -0.14 | -0.21 | -0.38 |
| QC2LP | -0.31 | -0.41 | -0.68 | -0.83 |
| QC1RP | 0.04 | 0.69 | -0.30 | -0.43 |
| QC2RP | 0.43 | 0.45 | 0.04 | -0.19 |

補正ソレノイドは IP から押し出される方向に電磁力が作用し、この電磁力はクライオスタットが受けることになる。クライオスタットは床から固定された架台で支持され、且つ片持ち支持されているので、クライオスタット全体が上向きに押し上げられる。表 17 から分かるように、クライオスタット先端部に設置されている QC1LP と QC1RP の垂直方向の電磁力による変位は、各々0.17mm と 0.13mm である。ビーム運転状態(ソレノイド磁場有)での4 極電磁石中心の設計ビームラインからの誤差は、QC1P/E が± 0.5mm 以内、QC2P/E も± 1mm 以内であり、この誤差は補正電磁石として組込まれている *a*₁、*b*₁ 2 極電磁石により補正することができる。

6. 超伝導補正電磁石

6.1. 超伝導補正電磁石の設計

超伝導補正磁石の総数は43 台で、その機能上、 2 つに分類される。1 つはビーム調整用に使用す るものと、他は QC1LP と QC1RP から HER ビー ムラインに漏れてくる磁場をキャンセルする補 正電磁石である。ビーム調整用に使用する電磁石 は、超伝導4極電磁石中心位置のビーム垂直面内 のビーム軌道からの誤差を調整するための a_1 と b_1 補正磁石、4極磁場の位相角度を調整するため の a_2 補正磁石が4極磁石ボアー内に組込まれて いる。また、4極電磁石の製作誤差から発生する 6極磁場、8極磁場の影響を補正するための a_3 、

表18 ビーム調整用補正電磁石設計磁場強度

| 雪磁石 | a_1 | b_1 | a_2 | <i>a</i> 3 | b3 | b_4 |
|---------|-------|-------|-------|------------|------|---------|
| 电视幻 | Tm | Tm | Т | T/m | T/m | T/m^2 |
| QC2RE | 0.015 | 0.015 | 0.37 | 1.1 | - | - |
| QC2RP | 0.03 | 0.03 | 0.31 | 0.9 | - | - |
| QC1-2RE | - | - | - | - | 18.2 | - |
| QC1-2RP | - | - | - | - | 11.5 | - |
| QC1RE | 0.027 | 0.046 | 0.75 | 4.6 | - | - |
| QC1RP | 0.016 | 0.016 | 0.64 | - | 5.1 | 60 |
| QC1LP | 0.016 | 0.016 | 0.64 | - | - | 60 |
| QC1LE | 0.027 | 0.046 | 0.75 | - | - | 60 |
| QC2LP | 0.03 | 0.03 | 0.31 | - | - | 60 |
| QC2LE | 0.015 | 0.015 | 0.37 | - | - | 60 |



図 34 QC1LP/RP から HER ビームラインへの漏 れ磁場分布。Z:IP からの距離。

b3、b4補正電磁石が組み込まれている。図 13 で示 した QC1P 4 極電磁石断面図には、空間的な制約 から a1、b1、a2の補正電磁石が QC1P 4 極電磁石 コイル内筒部に組み込まれ、また QC1LP カラー 外周部に b4補正電磁石、QC1RP には a3 と b4補正 電磁石が取付けられている。超伝導線は、直径が 0.35 mmの細い NbTi 超伝導線を使用し、厚みが 1 mm 以下の超伝導コイルを製作した。QC1E、 QC2P、QC2E 超伝導 4 極電磁石では、4 極コイル 円筒内に 4 台の超伝導電磁石が組み込まれてい る。超伝導補正電磁石の設計磁場強度を表 18 に 纏めた。



図 35 QC1P 漏れ磁場キャンセル超伝導 6 極コイ ル展開図(上)、超伝導 6 極電磁石と QC1P。

QC1P は磁気ヨークを持たないため、2 台の電 磁石の直近にある HER ビームラインには、4 極電 磁石から発生した磁場が重畳される。この漏れ磁 場は全ての多極成分を含んでおり、ビーム運転に 対する影響は非常に大きい。図 34 にビームライ ンに沿った 2 極(B₁)~12 極(B₆)の漏れ磁場分布を 示した。B1はピーク値として 0.1184 T に達する。 これら磁場成分の内、B1と B2 についてはこの磁 場分布を含んだビーム光学設計を行い、B3~B6に ついては磁場分布そのものをキャンセルする補 正電磁石を製作し HER ビームラインに設置する ことにした。ビーム進行方向に沿った QC1P から の漏れ磁場は、電子と陽電子のビームラインが交 差角度を持って配置されているのでビーム軸上 で図に示す分布を持つ。この磁場分布を打消すた めに特殊な形状(各ターンのコイル直線部の長さ を調節した超伝導コイル)の超伝導コイルを設計 した。そのコイルの展開図と QC1P との位置関係 を図 35 に示した。

6.2. 超伝導補正電磁石の製作

超伝導補正磁石は米国 Brookhaven 国立研究所 (BNL)との共同研究で開発され、BNL が持つ特殊 技術である Direct Winding Method[8]を用いて製作 した。この技術は、接着剤を表面に塗布した超伝 導線を超音波で加熱しパイプ表面に接着するも ので、超伝導線を正確に配置することができる。 QCS では、DWM 方式により超伝導4極電磁石内 筒部の限られた空間に3台~4台の補正磁石を多 層状に組込むことができた。使用した超伝導ワイ ヤーのパラメータを表 19 に示した。補正電磁石 製作例として、BNL でコイル巻き線中の QC1RP 用スキュー2極(*a*₁)補正電磁石を図 36 に示した。

製作中の QC1P からの漏れ磁場の成分のうち 6 極磁場(b₃)をキャンセルする超伝導補正コイルを

表 19 超伝導補正磁石用超伝導線パラメータ

| 線径、mm | 0.351 |
|---------------------------|-------|
| Cu/NbTi 比 | 1.0 |
| NbTi フィラメント径、µm | 5.4 |
| NbTi フィラメント数 | 2113 |
| I_c at 4.2 K and 4 T, A | 156 |



図 36 BNL で製作中の QC1RP 用 a₁ 補正磁石



図 37 QCS-L HER ビームライン用 b3 漏れ磁場 キャンセル電磁石

図 37 に示した。このコイルの上表面に 8 極(b4)、 10 極(b5)、12 極(b6)補正磁石が重ね巻されている。

6.3. 超伝導補正電磁石の磁場測定結果

製作された補正電磁石は、BNL で室温の磁場測 定が実施され、磁石が設計された磁場を定電流で 発生することが確認された。KEK に到着後、液体 ヘリウムで冷却され超伝導状態で補正電磁石単 体の磁場測定が行われた。また、超伝導4極電磁 石に取付け・クライオスタットに組込み、ビーム ラインにシステムを据え付けた後に最終的な磁 場測定を行い、補正電磁石としての性能を確認し た。磁場測定は Harmonic コイルにより行った。補 正電磁石は-60 A~+60 A の動作領域を持つため、 0A→60A→-60A→0A の電流ループで測定電流値 を細かく区切り磁場測定を行った。磁場測定結果 を、表 20 に纏めた。表中の値は、測定の代表値と して±60A での測定値と 0A での電流上昇時と下 降時の超伝導体内のヒステリシスによる測定値 の差を示した。0A 近くで使用される補正電磁石 は、超伝導体内部のヒステリシスの影響が大き く、QC1Pの a1、b1 補正電磁石は±60 A で作るこ

| 電磁石 | Туре | 60A | -60A | Δ_h @0A | θ mrad |
|--------|------------------------|--------|--------|----------------|---------------|
| | a_1 | 0.018 | -0.018 | -0.001 | 15.0 |
| OCILD | b_I | 0.015 | -0.014 | -0.001 | 25.6 |
| QCILP | a_2 | 0.806 | -0.803 | -0.038 | -31.0 |
| | b_4 | 294.5 | -292.6 | 13.4 | -1.7 |
| | a_1 | 0.017 | -0.018 | 0.001 | 10.7 |
| | b_I | 0.016 | -0.016 | -0.001 | 11.9 |
| QC1RP | <i>a</i> _{2,} | 0.797 | -0.799 | -0.043 | 5.2 |
| | b_4 | -264.8 | 267.1 | 14.2 | -14.3 |
| | b_3 | -9.55 | 9.41 | 0.21 | -4.4 |
| | a_1 | 0.033 | -0.032 | -0.001 | -16.2 |
| OC1LE | b_{I} | 0.055 | -0.055 | -0.001 | -6.1 |
| QUILE | $a_{2,}$ | 0.932 | -0.931 | -0.055 | -6.1 |
| | b_4 | 724.3 | -723.6 | 23.9 | -1.2 |
| | a_1 | -0.031 | 0.0313 | 0.001 | 3.8 |
| OCIDE | b_{I} | 0.0550 | -0.055 | -0.001 | 2.4 |
| QUIKE | <i>a</i> _{2,} | 0.888 | -0.889 | -0.051 | -4.0 |
| | <i>a</i> ₃ | -22.60 | 22.69 | 1.29 | 4.1 |
| | a_l | 0.036 | -0.036 | -0.001 | 3.9 |
| | b_{I} | 0.041 | -0.041 | -0.001 | 8.6 |
| QC2LP | a_2 | 0.640 | -0.640 | -0.031 | 9.3 |
| | b_4 | -159.5 | 159.4 | 9.18 | 10.2 |
| | a_1 | -0.058 | 0.058 | 0.001 | -0.1 |
| OCIDD | b_I | 0.042 | -0.042 | -0.001 | -0.1 |
| QC2Kr | <i>a</i> 2, | 0.630 | -0.629 | -0.032 | 5.9 |
| | <i>a</i> ₃ | -1.585 | 1.662 | 0.138 | 28.0 |
| | a_1 | 0.040 | -0.040 | -0.001 | 2.3 |
| 0021 E | b_I | 0.044 | -0.044 | -0.001 | 3.8 |
| QC2LE | a_2 | 0.753 | -0.752 | -0.035 | -8.0 |
| | b_4 | 142.0 | -142.0 | -6.70 | -4.4 |
| | a_1 | -0.031 | 0.031 | 0.001 | -6.6 |
| OC2PE | b_I | -0.035 | 0.035 | 0.001 | 11.2 |
| QC2RE | <i>a</i> _{2,} | 0.600 | -0.600 | -0.034 | -7.6 |
| | a_3 | 6.493 | -6.446 | -0.322 | -12.6 |
| QC1- | ha | 55 51 | -55 40 | -0.080 | -15 3 |
| 2RE | 03 | 55.51 | -55.49 | -0.009 | -+5.5 |
| QC1- | h. | -28.03 | 28.03 | 0.051 | . 1 5 |
| 2RP | 03 | -20.03 | 20.05 | 0.031 | -4.3 |

表 20 補正電磁石磁場測定結果

この表中で積分磁場の単位は、 $a_1 \ge b_1$ 補正電磁 石は Tm 、 a_2 補正電磁石では T、 $a_3 \ge b_3$ 補正 電磁石は T/m 、 b_4 補正電磁石は T/m²、 Δ_h は電 流を上げ下げする時の 0A での測定値の差、 θ は それが組込まれている4 極電磁石の磁場面との位 相角度の差を示している。

とができる 2 極磁場の 3%~4%に相当する。この 為、補正電磁石の運用方法については注意が必要 である。補正電磁石とそれらが組み込まれる4極 電磁石との磁場面の位相角度は製作誤差から-30 mrad~30 mradの回転誤差が含まれている。*a*1、*b*1 補正電磁石の回転は、補正電磁石内の磁場の合成 で運用上問題なく補正することができる。*a*2補正 電磁石についても主4極電磁石との合成磁場とな ることから、補正電磁石の電流値の調整で調整す ることができる。6極、8極補正電磁石の角度誤差



図 38 QC1LP 用漏れ磁場 *b*₃, *b*₄, *b*₅, *b*₆ キャンセ ル電磁石の磁場分布(上)、QC1LP からの漏れ磁 場を *b*₃, *b*₄, *b*₅, *b*₆ 電磁石で打ち消した磁場測定結 果(下)。測定時の QC1LP の励磁電流は 1625A である。

については、ビーム光学的にその影響を検討する 必要がある。

QC1P から漏れてくる磁場を打消す b_3 、 b_4 、 b_5 、 b_6 電磁石についても磁場測定が行われ、その機能 が確認された。図 38 (上図) には、QC1LP を 1625A に励磁した場合の電子ビームライン上での QC1LP の漏れ磁場の測定結果を示している。ま た、同下図に、各キャンセル電磁石に設計値であ る 40.1 A (B_3)、26.0 A (B_4)、17.2 A (B_5)、13.5 A (B_6)を通電し、QC1LP からの漏れ磁場を打消す ことに成功している様子を示した。



図 39 Belle-II ソレノイドと QCS 補償ソレノイ ド磁場分布

7. 超伝導補正ソレノイド

7.1. 超伝導補正ソレノイドの設計

電子・陽電子ビームは Belle-II 超伝導ソレノイ ドが発生する 1.5 T の磁場中を 83mrad の交差角度 を持って衝突する。補償ソレノイド (ESL、ESR1、 ESR2/3)は、Belle-IIソレノイド磁場のビームへの 影響を取り除くために、反対の向きを持ち磁場の 積分量としてビームライン上で打ち消すソレノ イド磁場を発生させる。これらの超伝導ソレノイ ドが発生する磁場分布を図 39 に示した。Belle-II ソレノイド単体が作る磁場分布を赤丸と実線 (赤)で示し、全てのソレノイドが励磁された場合 の磁場分布を実線(黒)で示した。グラフ横軸の Z=0 はビーム衝突点で、Z=0 から±4m の各区間の ビームライン上での積分ソレノイド磁場が各々 ゼロになるように補償ソレノイドは設計されて いる。図中には QC1 と QC2 の位置も示した。 QC1LP と QC1RP の位置で Belle-II ソレノイド、 ESL、ESR1 の合成磁場が 1.5 T から-2.6 T まで変 化する。光学設計から求められる磁場分布を正確 に再現できるよう ESL と ESR1 は複数の短いソレ ノイドで構成されている。また、QC1LE/RE と QC2LP/RP では磁気ヨークを持つ為、ESL と ESR1 は Belle-II ソレノイド磁場を打消し、合成された 磁場分布が概ねゼロとなるように設計されてい る。

QCS-R 側では、QC2RP と QC2RE 間の空間に Belle-II ソレノイド磁場が侵入してくることから、 各ビームラインのQC2REの位置に組込んだESR2

表 21 超伝導補正ソレノイドパラメータ

| 電磁石 | ESL | ESR1 | ESR2/3 | | |
|------------------------------|---------------------|------|--------|--|--|
| ソレノイド磁石 | | | | | |
| 積分磁場、Tm | 2.31 | 3.86 | 0.17 | | |
| $I_{D_{\lambda}} \mathbf{A}$ | 390 | 450 | 151.1 | | |
| L, H | 2.46 | 8.04 | 0.035 | | |
| B_{P} , T | 3.56 | 3.05 | 0.3 | | |
| L_{pm} , m | 914 | 1575 | 720 | | |
| コイル数 | 12 | 15 | 1 | | |
| 総ターン数 | 4610 | 6237 | 1356 | | |
| $R_{L}, \%$ | 49.9 | 46.4 | 11 | | |
| 蓄積エネルギ、kJ | 187 | 814 | 0.725 | | |
| 超伝導線 | | NbTi | | | |
| サイズ、mm | 0.93×1.380 | | | | |
| Cu/NbTi 比 | 1.8 | | | | |
| I_{c} A | 1814 @4 T, 4.22 K | | | | |

と ESR3 により侵入してきたソレノイド磁場を打 消す。4 台のソレノイド電磁石のパラメータを表 21 にまとめた。ESL と ESR1 の外形図と補正ソレ ノイドのクライオスタット内に組込まれた様子 を図 40 と図 41 に示した。ESL は 12 個、ESR1 は 15 個の短いソレノイドから構成されている。

ソレノイドコイルは、サイズ 0.932 mm×1.384 mm の矩形型 NbTi モノリスケーブルで作られ、 ESL と ESR1 は総ターン数が 4610.1 と 6237.1 の 密巻コイルである。Belle-II ソレノイド磁場がある 状態でのインダクタンスは、各々2.46 H と 8.04 H であり、4 極電磁石と比較して大きな値をもつ。



図 40 ESL 補正ソレノイド(上) とクライオスタ ット内配置図



図 41 ESR1 補正ソレノイド(上)と ESR1 と ESR2/3 クライオスタット内配置図

また、ESL と ESR1 は内部に磁性体を持つことか ら励磁中にインダクタンスが大きく変化する。こ の様子も励磁試験及び磁場測定結果の節で説明 する。ESR2 と ESR3 は同じ磁石パラメータを持 ち、ターン数は 1356 である。この 2 台のソレノ イドは、LER/HER ビームラインに各々設置される が、直列に電気接続され、励磁は1台の電源で行 う。

ソレノイド電磁石単体では、自己磁場と通電電 流による電磁力によりコイル本体は半径方向に 膨れ、軸方向に圧縮される向きに電磁力は作用す る。然しながら、この補正ソレノイドは、Belle-II ソレノイド磁場と反対向きの磁場を作るように 設計されているので、通電電流値が小さい間は半 径方向に圧縮され、軸方向に伸びる向きに電磁力 が作用する。半径方向の電磁力の変化について図 42に示した。図中のプロットは、ESLと ESR1の IP に最も近いコイルに作用する電磁力総和をコ イル内面の面積に作用する圧力に換算した値で ある。横軸は、設計電流(100%)に対する比率を 示している。励磁初期の段階でコイル自身が半径 方向(円の中心に向かって)に Belle-II から電磁 力を受ける。この圧力は-1.5~-1.9 MPaに相当し、 ESL と ESR1 のコイルボビンがこの圧力を受け る。コイルボビンは、この圧力に耐える厚み (5mm)となっている。設計電流では、ESL と ESR1 自己磁場による電磁力が Belle-II ソレノイド磁場

からの電磁力よりも大きくなり半径方向外向き の力が作用する。

7.2. 超伝導補償ソレノイドの製作

図43と図44にESLとESR1の製作完了後の写 真を示した。電子・陽電子のビームラインが83 mradの角度を持つことから、ソレノイド磁石の内 径はIPからの距離に従って大きくなっている。ま た、電磁力による超伝導ケーブルのゆるみを抑え るため、コイル製作時には超伝導ケーブルに張力 をかけ、エポキシ含侵を行いながら巻き線を行っ た。



図 42 励磁により ESL と ESR1 に作用する Belle-II からの半径方向の電磁力



図 43 QCS-L に組込まれた ESL



図 44 QCS-R に組込まれた ESR1

7.3. ビームラインでの励磁試験とソレノイド 磁場測定

ESL と ESR1、ESR2/3 は、図 40 と図 41 に示す ようにクライオスタットに組込まれた。クライオ スタットをビームラインに設置後、電磁石の励磁 試験を行った。ESR2/3については、設計電流の151 A まで励磁できたが、ESL と ESR1 についてはソ レノイド内筒部に磁性体を持つことから電源の 調整に時間を要した。電磁石全体のシステム設計 では、Belle-II ソレノイドを励磁後に補正ソレノイ ドの励磁を行うことになっている。補正ソレノイ ド内部に組込まれた磁性体のヒステリシスよる 磁場変化に再現性を持たせるために、このプロセ スによって補正ソレノイド励磁前に磁性体を Belle-II ソレノイド磁場で完全に磁気飽和し初期 化する。然しながら、補正ソレノイドの励磁電流 の増加に伴い、飽和した磁性体がその磁性を回復 する状況となり、電源から見ると負荷となってい る補正ソレノイドのインダクタンス(L)は、空芯 ソレノイドから内部に磁性体を持つLの大きなソ レノイドに変化することになる。この様子は、補 正ソレノイド励磁中の電源電圧の測定値と Belle-II ソレノイドと補正ソレノイドの3次元磁場計算 結果から確認された。この結果を示したものが図 45 である。図中の赤丸(〇)とそれに沿った実線 が ESL の L の計算結果と測定値を示し、青三角 (▲)と青実線が ESR1 の計算結果と測定値に対応 する。電流値が小さい間は、磁性体は飽和した状 態であるので ESL と ESR1 の L は、計算値として 1.16 H と 1.69 H であるが、ビーム運転時の電流値 では 2.47 H と 8.04 H まで上昇する。この負荷の 変化は、電源を安定に制御して使用するには大き すぎる。

表 22 ソレノイド磁場による電磁力とロッド応力

| | QCS-L | QCS-R |
|--------------|----------|----------|
| ESL/ESR 励磁 | -52.6 kN | 35.7 kN |
| ロッド応力 | 161 MPa | 206 MPa |
| ESL/ESR1 励磁無 | 57.3 kN | -23.5 kN |
| ロッド応力 | 174 MPa | 152 MPa |



図 45 励磁電流に伴う ESL と ESR1 のインダク タンスの変化

現在では、電流の掃引速度も含めて電流値を安 定に運転できる状態に調整されている。

電源システムを安定に動作できるようになっ た後、Belle-II ソレノイド磁場有り無しの状態で LER と HER のビームラインに沿ったソレノイド 磁場の測定を行った。電子ビームラインの測定結 果を図 46 に示した。KEK 加速器グループの測定 結果、Belle-II グループの測定結果、また赤の実 線は計算結果を示している。

図中の−0.4 m < Z < 0.5 m の測定値(□)は、 Belle-II グループの測定値で、Z<−0.6 m と 0.6 m< Z の測定値(・)は KEK 加速器グループの測定 結果である。Belle-II グループの測定は、CERN から提供された校正済みの3軸のプローブを複数 内部に設置して行われた。また、KEK 加速器グル ープの磁場測定は、Lakeshore 製 3 軸のプローブ をビーム軸方向に 20 mm ステップで移動して測 定した。測定結果と計算結果は非常に良い一致を 示している。この測定結果から、ソレノイド積分 磁場がゼロとなる ESL、ESR1、ESR2/3 の運転 電流を 390 A、450 A、151 A とした。

また、ソレノイド磁場分布の測定と計算の詳細 な比較から、Belle-II ソレノイドと補正ソレノイ ド間の電磁力による補正ソレノイドの位置の変 化を調べた。Belle-II ソレノイド磁場との電磁的な 干渉により補正ソレノイド全体が軸方向に大き な電磁力を受ける。この電磁力を表 22 に纏めた。 ESL では、励磁中は IP から ESL を押し出す向き に 52.6 kN の電磁力が作用するが、ESL の励磁が 無くなった場合、ESL 内筒に組込まれた超伝導電

磁石の磁性体が Belle-II ソレノイド磁場に引きつ けられ、IP に引き込む方向に 57.3 kN の電磁力が 作用する。この電磁力に対して、超伝導電磁石を 組込んだヘリウム容器は Ti 合金のロッドにより クライオスタット真空容器から支持される。支持 ロッドについては、クライオスタットの章で説明 する。この非常に大きな電磁力の影響は、ヘリウ ム容器全体をソレノイド軸方向に変位する力と なる。その変位量をソレノイド磁場の変化が大き い、-1.4 m < Z < -0.6 m と 0.6 m < Z < 1.4 m の測 定値から評価した。測定結果と設計計算値との差 は、ESL 側では Z 方向に-2.3 mm±0.5 mm、ESR1 側では 0.4 mm± 0.5 mm 各々シフトしていること が確認された。この結果は、表 16 で示した QCS-LとQCS-Rの3台の4極電磁石(QC1P、QC1E、 QC2P)の電磁力によるビーム軸方向の変位量の 平均値が-2.3 mm と 0.9 mm であることと良く一 致している。ヘリウム容器内では、補正ソレノイ ドと4極電磁石・補正電磁石は機械的に固定され ていることから、Belle-II ソレノイド磁場との磁



図46 HERビームライン上のソレノイド磁場分布。 上図はビーム進行方向磁場(*B_z*)、下図は半径方向磁場 (*B_t*)を示している。

気的な干渉により全ての電磁石が組み込まれた ヘリウム容器全体が動いていることが確かめら れたことになる。

以上示したように、ビーム運転状態での電磁力 によりヘリウム容器全体が変位する。超伝導4極 電磁石の章で説明した内容も含めて、精密な磁場 測定により、ソレノイド間の電磁力、4極電磁石 に取付けられている磁性ヨークに作用する電磁 力により4極電磁石磁場中心は変位し、QC1LEで は電磁力と製作誤差も含めて IP 外向きに 3.5 mm 変位していることが分かっている。

超伝導電磁石の説明はここまでとして、これら 超伝導電磁石の組立てた時の写真を添付資料に 示した。添付資料-1:超伝導4極電磁石と補正超 伝導電磁石、磁性体ヨーク等の組立、添付資料-2: 以上の加速器用超伝導電磁石に金属カバーをか け完全に固定した状態、添付資料-3:ESLを超伝 導電磁石の集合体に接続、添付資料-4:ESL外周 部に放射線からシールドタングステン合金が取 付けられた状態、等を示している。

8. マグネットクライオスタットと冷却シ ステム

超伝導電磁石を安定に運転する上では、クライ オスタットと冷却システムは非常に重要な役割 を持っている。SuperKEKBビーム最終集束用超伝 導電磁石に使用されている超伝導材料は、低温超 伝導材のNbTi(合金系)が使用されているので超 伝導材料の臨界状態を決める磁場、温度、電流密 度の内、動作温度は6K以下となる。この動作温 度と十分な運転マージンを持つために電磁石は 過冷却液体へリウムで冷却されている。液体へリ ウムは各クライオスタットに接続された個別の ヘリウム冷凍機から供給される。

8.1. クライオスタットのシステム設計

図 47 に QCS-R クライオスタットの全体図と超 伝導電磁石を組込んだクライオスタットの断面 図を示した。クライオスタットは、電磁石クライ オスタット、サービスクライオスタット、低温配 管、支持架台から構成されている。QCS-L クライ

オスタットも基本的な構成は同じである。図10に 示すように2台の電磁石クライオスタットは Belle-II 検出器内部に組込まれるが、検出器内部の 空間的な制約からクライオスタット本体は、その 後面で支持架台から片持ちで保持されている。ク ライオスタットのパラメータを表 23 に示した。 QCS-R/L 電磁石クライオスタット部の長さは、 3287mm/2724mm で、システム全体の長さは 6.5 m/7.1 m である。図 47 中段には QCS-R クライオ スタットの水平断面を示した。電子・陽電子ビー ムが通過するビームパイプ(室温) は角度を持っ て組込まれるため、先頭部(IP 側)では超伝導電磁 石の設置空間に厳しい制約がある。図 47 下図に は、マグネットクライオスタットのクライオスタ ット軸垂直断面が示されている。QC1RP 部の断面 (図中 M-M 断面) で示すように, QC1RP ボアー内 のビームパイプ表面に3台の超伝導補正電磁石が

表23 クライオスタットパラメータ

| | QCS-L | QCS-R |
|----------------|-------|-------------|
| 電磁石クライオスタット | | |
| 真空容器長さ(mm) | 2724 | 3287 |
| 真空容器最大径 (mm) | φ1100 | ф638 |
| 真空容器重量(kg) | 1570 | 1472 |
| 4K 冷却重量 | | |
| 前方部電磁石(kg) | 949 | 805 |
| 放射線遮蔽(kg) | 495 | 1271 |
| 後方部電磁石(kg) | 342 | 1063 |
| 80 K 熱輻射遮蔽(kg) | 45 | 36 |
| サービス容器 | | |
| 真空容器長さ(mm) | 2757 | 2757 |
| 真空容器高さ (mm) | 917 | 917 |
| 真空容器幅(mm) | 900 | 863 |
| 真空容器重量(kg) | 2523 | 2501 |
| 80 K 熱輻射遮蔽(kg) | 79 | 77 |
| Heガス冷却電流リード | | |
| 通常リード | 5 組+1 | 5 組 |
| 8 電極リード | 5 台 | 7 台 |
| He ガス流量制御弁 | 2 台 | 2 台 |
| 支持架台 | | |
| 長さ (mm) | 3810 | 3810 |
| 重量(kg) | 6279 | 6061 |
| システム全体長 (mm) | 6533 | 7087 |
| 重量 (kg) | 12814 | 15000 |



図 47 QCS-R クライオスタット全体図と水平・ 垂直断面図。上から、システム全体外形図(上、 横から)、水平断面、マグネットクライオスタット 垂直断面。垂直断面は、各電磁石の軸方向の中心 位置を示している。

設置され、またビーム調整のため QC1RP の外周 部にも補正電磁石 2 台が取り付けられている。 QC1RP 横を走る HER ビームパイプには QC1RP からの漏れ磁場を消去するための4種類の超伝導 補正電磁石が取り付けられている。これら加速器 用超伝導電磁石は ESR1 の内筒に組込まれてい る。加速器用超伝導電磁石と ESR1 との間には、 この位置で発生する放射線から検出器を遮蔽す るタングステン合金が隙間なく詰め込まれてい

る。クライオスタット先頭部の電磁石の複雑な配置は、添付資料-1に示した QCS-LIP 側ヘリウム 容器に組込まれる磁石の組立写真から理解して 頂きたい。このコールドマスには、3 台の超伝導 4 極電磁石と 16 台の補正電磁石が組込まれてい る。

サービスクライオスタットには、電流リードが 取付けられ、また冷凍機からの低温配管の接続が 行われる。各磁石は個別に励磁されることから、 QCS-L と QCS-R クライオスタットには、各々25 組+1 本と 30 組+1 本の電流リードが取付けられ ている。「1 本」は、ESL と ESR1 の長手方向の磁 場分布調整用にソレノイドの中間部に接続され た超伝導ケーブル用電流リードである。

電磁石クライオスタット内液体窒素熱シール ドの材質は SUS304 を使用した。ESL、ESR1、Belle-II ソレノイドのクエンチ時に発生するシールド板 内の渦電流による電磁力が、シールド板の変形・ 破損することを考慮して,熱伝導率が小さいステ ンレスを用いた。このため、外部からの熱負荷に 対するシールド内の温度分布を計算し,分布内の 温度差が5K以下になるように設計した。サービ スクライオスタット内の熱シールドに関しては、 磁場の大きな変化を受けることは無いことから、 アルミ合金を選択した。

8.2. クライオスタットの機械設計

超伝導電磁石システムを構成する補償ソレノ イド ESR1 と ESL は、Belle-II ソレノイドとは逆 向きの磁場を発生するため、励磁中は IP から押し 出す方向に電磁力が作用する。また、ESR1 と ESL が励磁されない(クエンチした時も含めて)場合 には、内部に組込まれた磁性体が IP 方向に引き込まれる。この電磁力は表 22 に示した。クライオスタットでは、この電磁力に対する支持方法としてチタン合金(Ti-6Al-4V)のサポートロッド 8 本でへリウム容器を支持する方式を採用している。図 48 に、QCS-R クライオスタット IP 側へリウム容器の支持ロッドの構造を示した。ロッドの長さは、

IP 側の 4 本が 75.5 mm で、反 IP 側の 4 本が 108 mm である。ロッドの片端は室温部に、他端は液 体へリウム温度に結合されている。

支持ロッドは、電磁力とコールドマスの重量で大 きな応力を受ける。QCS-R の場合、重量が 2076 kg であることから、ESR1 励磁中はロッドに作用す る最大の応力は 206 MPa で、励磁が無くなると 152 MPa となる。QCS-L と QCS-R のロッドの断 面積は 182.3 mm² と 81 mm²で設計され、最大応力 は 174 MPa と 205 MPa である。この応力は、チタ ン合金の室温での降伏応力 (825 MPa) よりも十分 に小さい。



図 48 QCS-R クライオスタット IP 側ヘリウム容 器サポートロッド(左)と ロッド設計(右)

また、このロッドはヘリウム容器支持点間の中 心位置が熱収縮より変位しないように容器軸の 垂線に対して傾きを持っている。室温での角度 は、IP 側と反 IP 側のロッドに対して、20.16 度と 20.74 度であるが、4K に冷却された時点で熱収縮 により 18.83 度と 19.72 度に変化する。この熱収 縮による影響で、室温で組み立てた超伝導4極電 磁石の中心位置は4K で変位するが、クライオス タット内の構成部品は、この熱収縮による変化を 考慮し4極電磁石が冷却後にビーム光学で要求さ れた位置に配置されるよう設計されている。 QC1RP の場合、磁石中心位置はクライオスタット 軸方向に 2.35 mm、水平方向に 0.12 mm 変位する。

8.3. クライオスタットの熱設計と冷却システム

QCS 超伝導電磁石は、横型クライオスタットに 組込まれかつ空間的な制約から十分な熱遮蔽・熱 絶縁を4K部に施すことができないことから、電 磁石を安定に冷却するため過冷却の単相液体へ リウム(LHe)を用いている。電磁石通電時のク ライオスタット入口部のLHeの状態は、圧力0.15 MPa、温度4.4Kである。クライオスタットへの 過冷却LHeの設計ガス流量は20g/sで、このLHe が単相流である許容熱負荷は32.8Wである。

表 24 にクライオスタットの設計熱負荷を示し た。QCS-L と QCS-R 電磁石クライオスタットの 4 K への侵入熱は、16.3 W と 15.9 W で LHe は単 相流の状態にある。熱負荷のリストからヘリウム 容器への侵入熱では、熱輻射による熱負荷が大き な割合を占めていることが分かる。クライオスタ ット内の空間的制約から、室温のビームパイプと 4K のヘリウム容器内面との間に一般的に低温機 器で使用される熱遮蔽の方法を用いることがで きない。ビームパイプ外周(室温)には5層のス ーパーインシュレーションが巻かれてあるが、こ れでは不十分で、熱輻射による熱負荷を抑えるた めに SUS316L のヘリウム容器内面を鏡面加工し

表 24 クライオスタット設計熱負荷

| | QCS-I | QCS-R |
|------------|--------------|--------------|
| 磁石クライオスタット | | |
| サポートロッド | 9.7 V | V 5.8 W |
| 熱輻射 | 6.6 V | W 10.1 W |
| Sub-total | 16.3 V | W 15.9 W |
| サービス容器 | | |
| 熱輻射 | 1.9 V | V 2.1 W |
| 伝導熱負荷 | | |
| パイプ | 11.5 V | W 12.5 W |
| 低温配管·弁 | 6.0 V | W 6.0 W |
| 信号線 | 3.8 V | W 3.4 W |
| リード冷却ガス | 1.0 g | /s 1.0 g/s |
| Sub-total | 23.2W+1.0g/s | 24.0W+1.0g/s |
| Total | 40.5W+1.0g/s | 40.7W+1.0g/s |

アルミを蒸着している。アルミの4Kでの熱輻射 率は0.02以下まで小さくなり、この効果によりア ルミ蒸着していない SUS316Lの容器への輻射に よる侵入熱と比較して、50%以上熱輻射による侵 入熱を小さくできる。

また、QCS-R と QCS-L サービスクライオスタ ットには各磁石を単独励磁できるように 69 本/61 本の電流リードが取付けられている。この電流リ ードの冷却のために,各クライオスタットで1g/s の4KのLHeが使用される。

2 台のクライオスタットは、2017 年 3 月にビー ムラインへ設置・冷却システムへの接続が完了し



図 49 SuperKEKB ビーム衝突点に設置された QCS-L と QCS-R クライオスタット



図 50 Belle-II 検出器に組込まれる QCS-L クライ オスタット

た。この様子を図 49 に示した。手前に写っている クライオスタットが QCS-R、奥が QCS-L である。 QCS-L の後方に加速器リングに設置された常伝 導電磁石が見える。また, 図中右上に見えるのが QCS-L 用ヘリウム冷凍機である。図 50 には、Belle-II 検出器に組みこまれた QCS-L クライオスタッ トを示した。

最後に、QCS 超伝導電磁石を超伝導状態とする 冷却システムについて簡単に説明する。冷却シス テムは、ヘリウム冷凍機、圧縮機、過冷却器、液 体窒素貯槽 (CE)、低温配管、計装空気圧縮機か ら構成されている。使用されているヘリウム冷凍 機、圧縮機、CE は、1989年に高エネルギー物理 学研究所(現機構)の「TRISTAN」加速器ビーム 衝突用超伝導4極電磁石の冷却システムとして使 用された機器で、QCS-L 用は KEKB 加速器 QCS に使用され、今回 SuperKEKB 用に再調整して使 用されている。QCS-R 用は、1995 年に TRISTAN 加速器運転終了後、一時冷却機器試験用として運 転されたが長期にわたり保管されていた。2 台の ヘリウム冷凍機と圧縮機は、同じ運転パラメータ を持ち、4.4K で 250W の冷凍能力を持つ。 冷却シ ステムのパラメータを表 25 に纏めた。現在まで のビーム運転では、システムとして余剰冷凍能力 は温度 4.5 K で 20W 程度であるが、全ての超伝導 電磁石を安定に運転することができている。

今後、ビーム電流値が増加し、超伝導電磁石シ ステムへの熱負荷が大きくなる場合には、クライ オスタット側の熱負荷を低減する必要がある。現 在最大の熱負荷となっているのは、電流リードで

表 25 冷却機器(QCS-L, QCS-R 各 1 ユニット)

| ヘリウム冷凍機 | クロードサイクル型 |
|-----------|-----------------------------------|
| 冷凍能力@4.4K | 250 W(液体窒素使用) |
| 圧縮機 | スクリュー型 |
| 最大風量 | 1250 Nm ³ /h |
| 油分離装置 | 4 器 |
| ヘリウムタンク | V=20m ³ ×2, P=2.06 MPa |
| ヘリウム過冷却器 | V=200 L |
| 熱交換器 | フィン付き銅管 32m |
| ヘリウムタンク | クエンチ時蒸発ガス回収 |
| 体積 | V=5m ³ , P=0.395MPa |
| 液体窒素貯槽 | V=9800 L |

高温超伝導体を用いた電流リードへの改造を行 い、冷凍機への負荷を低減することが必要とな る。

9. まとめ

SuperKEKB は、KEKB 加速器が記録したルミノ シテイーの 40 倍を目標として設計・建設され、 2018 年 4 月から 2022 年 6 月まで目標ルミノシテ イーを目指して非常に繊細なビーム運転を行っ ている。ルミノシテイーは、Belle-II 測定器運転 中では 4.65×10³⁴ cm⁻²s⁻¹ まで到達し、加速器のみ の運転時には 4.707×10³⁴ cm⁻²s⁻¹ に達している。

ビーム最終集束用超伝導電磁石は、これまで大 きなトラブルでビーム運転を長期間停止するこ とはなかったが、今後以下の点を改善・理解を進 めることで、効率的なビーム運転や今後のシステ ム改良に寄与できると考えている。

- 1. ビームによる超電導電磁石クエンチ発生場 所と頻度。
- 4極電磁石、補正磁石の磁場特性の更に精密 な理解。4極磁場の長期時間変動、超伝導ケ ーブルのヒステリシスの理解、等。
- 冷凍機システム冷凍能力の改善、クライオ スタット熱負荷の低減。
- 冷却システムを含めたQCSシステム全体の 運転状態と加速器ビーム運転状態との関連 付けを可能にするモニター、データ収集シ ステムの確立。
- 5. 超伝導電磁石励磁手法の自動化、或いは単 純化。
- 等、である。

以上の課題は、直接ルミノシテイーを高めるも のではないが、長期運転では限られた時間内での ビーム保持時間を高め、積分ルミノシテイーの向 上に寄与できるものと考えている。

謝辞

SuperKEKB ビーム最終集束用超伝導電磁石シ ステムは、超伝導電磁石の開発・建設以外にも多 くの先端技術を必要としました。KEKB 電磁石グ ループ、光学グループ、KEKB IR グループ、機械 工学センター、超伝導低温工学センター、BNL 超 伝導電磁石グループ、FNAL 超伝導電磁石グルー プ、Belle-II グループの皆様には、多大なる協力を 頂き感謝しています。

参考文献

- [1] SuperKEKB design report, https://kds.kek.jp/event/15914/
- [2] H. Koiso., "Colliders for B-Factories", Proc. of IPAC'11, 2011, pp. 1931-1935.
- [3] N. Ohuchi, et al., "SuperKEKB beam final focus superconducting magnet system", NIM-A, 1021 (2022) 165930.
- [4] 大内 徳人、他「SuperKEKB ビーム最終集束 超伝導電磁石」、低温工学 54 巻 1 号、2019 年、 pp. 23-32。
- [5] 大内 徳人、「SuperKEKB ビーム最終集束用 超伝導電磁石の製作」、加速器 15 巻 4 号、2018 年、pp. 1-10。

- [6] K. -H. Meβ, "Superconducting Accelerator Magnets", CERN 89-04, 10 March 1989, pp. 87-148.
- [7] L. Rossi and L. Bottura, "Superconducting Magnets for Particle Accelerators", CERN-ATS-2013-019.
- [8] B. Parker, et al., "BNL Direct Wind Superconducting Magnets", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 22, No. 3, June 2012, 4101604.
- [9] W. G. Davies, "The theory of the measurement of magnetic multipole fields with rotating coil magnetometers", NIM-A, 311 (1992), pp. 399-436.
- [10] Animesh K. Jain, "Harmonic coils", CERN 98-05, 4 August 1998, pp. 175-217.
- [11] Y. Arimoto, et al, "Magnetic measurement with single stretched wire method on SuperKEKB final focus quadrupoles", in *Proc. of IPAC2019*, Melbourne, Australia, May 2019, pp.432-435.
- [12] J. DiMarco, *et al.*, "Field alignment of quadrupole magnets for the LHC interaction regions", IEEE *Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 10, No. 1, March 2000, pp. 127-130.

添付資料



添付資料-1 QCS-L 先頭部ヘリウム容器内3台の超伝導4極電磁石、12台の超伝導補正磁石、4台の QC1LP漏れ磁場キャンセル超伝導電磁石組立時状態図



添付資料-2 上記電磁石を金属カバー固定



添付資料-3 QC1LP、QC1LE 部に ESL ソレノイドを固定



添付資料-4 タングステンシールドの取付け