

## 5. SuperKEKB 超伝導電磁石システム

高エネルギー加速器研究機構

大 内 徳 人

# 目 次

## SuperKEKB 超伝導電磁石システム

1 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	5-1
2 加速器用電磁石磁場について(特に超伝導電磁石)	5-1
2.1 加速器用電磁石内での磁場とその形状	5-1
2.2 線電流が作る磁場	5-3
2.3 加速器用電磁石磁場を作るには?	5-3
2.4 加速器用電磁石磁場の Normal 成分と Skew 成分	5-4
2.5 実際の加速器用超伝導電磁石では?	5-5
3 SuperKEKB 超伝導電磁石システムの構成	5-6
4 超伝導電磁石の設計	5-9
4.1 超伝導電磁石設計の制約条件	5-9
4.2 ビーム最終集束システムの磁場設計	5-10
5 ビーム最終集束超伝導 4 極電磁石	5-10
5.1 ビーム最終集束 4 極電磁石	5-10
5.2 超伝導 4 極電磁石の磁場測定と測定結果	5-16
6 超伝導補正電磁石	5-24
6.1 超伝導補正電磁石の設計	5-24
6.2 超伝導補正電磁石の製作	5-25
6.3 超伝導補正電磁石の磁場測定結果	5-25
7 超伝導補正ソレノイド	5-27
7.1 超伝導補正ソレノイドの設計	5-27
7.2 超伝導補償ソレノイドの製作	5-28
7.3 ビームラインでの励磁試験とソレノイド磁場測定	5-29
8 マグネットクライオスタットと冷却システム	5-30
8.1 クライオスタットのシステム設計	5-30
8.2 クライオスタットの機械設計	5-32
8.3 クライオスタットの熱設計と冷却システム	5-33
9 まとめ	5-34
謝辞	5-34
参考文献	5-35
添付資料	5-36

# SuperKEKB 超伝導電磁石システム

## 1. 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。

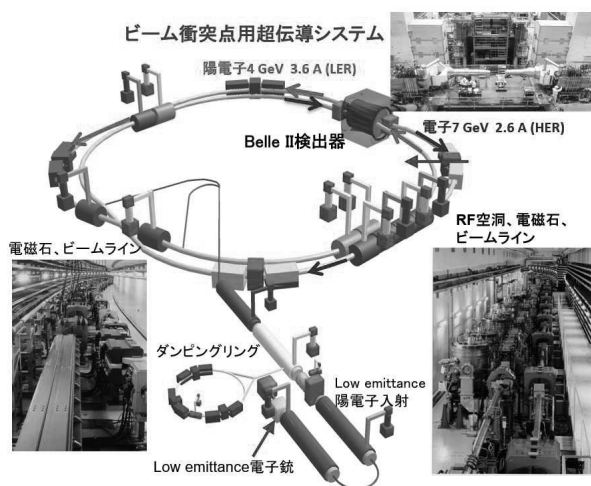


図 1 SuperKEKB 加速器全体図

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）を前加速器 KEKB の最高記録  $2.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  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  $\sim 50 \text{ nm}$ 、水平方向に  $\sim 1 \mu\text{m}$  となる。式 (1) に加速器ルミノシティの定義式を示した。

$$L \sim \frac{Y_{\pm}}{2\epsilon r_e} \left(1 + \frac{\sigma_y^*}{\sigma_x^*}\right) \frac{R_L}{R_y} \xi_{\pm y} \frac{I_{\pm}}{\beta_{\pm y}^*} \quad (1)$$

式 (1) で後半にある  $I_{\pm}$  がビーム電流値、 $\beta_{\pm y}^*$  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。

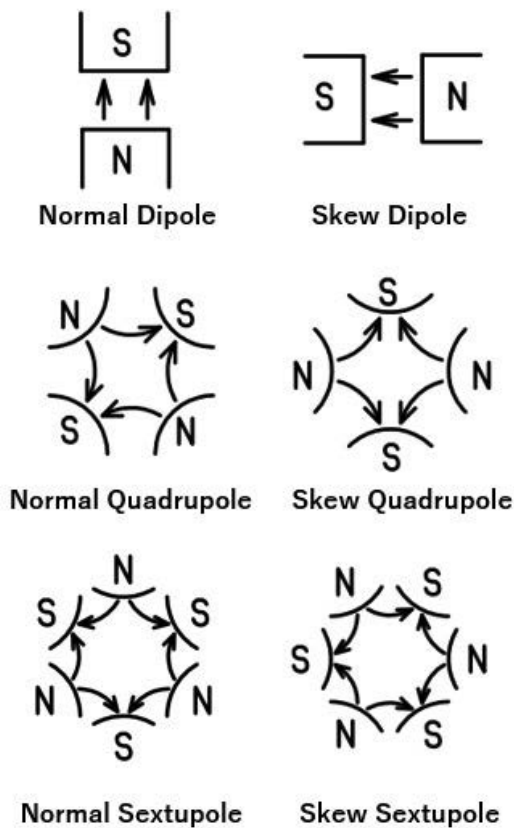


図 2 素粒子加速器で用いられる電磁石の磁場形状。(2 極磁石 : Normal dipole、Skew dipole、4 極磁場 : Normal quadrupole、Skew quadrupole、6 極磁場 : Normal sextupole、Skew sextupole)

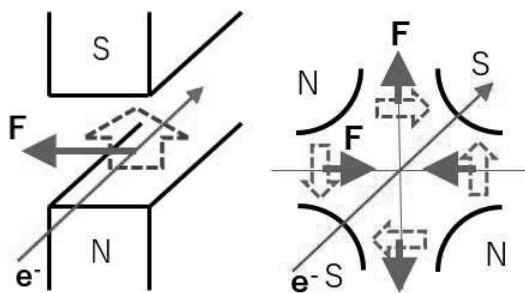


図 3 2 極磁場、4 極磁場内を通過する電子に作用する力。電子は、紙面の表から裏に向かって進む。各磁石内の磁場の向きは、点線で示された矢印で示されている。

$$F = q (\text{電荷}) \cdot V (\text{速度}) \times B (\text{磁場}) \quad (2)$$

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。

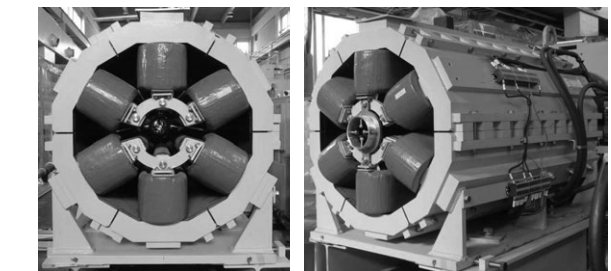
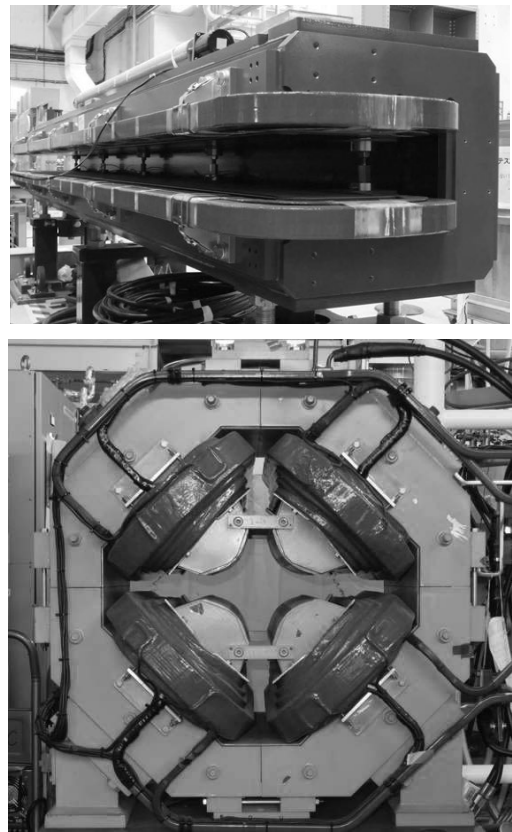


図 4 加速器用電磁石。上から Normal 2 極、Normal 4 極、Normal 6 極電磁石。

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% ( $1 \times 10^{-4}$  或いは 1 units) 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。

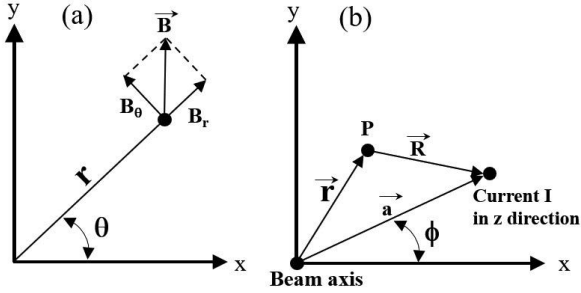


図5 ビーム軸をZ軸とした  $(r, \theta, z)$  円筒座標系 (a)と線電流モデル(b)。

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

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

ここで、 $R = \sqrt{a^2 + r^2 - 2ar \cos(\phi - \theta)}$  は位置  $P=(r, \theta)$  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。

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

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

任意の複素数  $\xi$  ( $|\xi| < 1$ ) 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。

$$A_z(r, \theta) = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left(\frac{r}{a}\right)^n \cos(n(\phi - \theta)) \quad (4) .$$

$r > a$  の空間では、

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

$$A_z(r, \theta) = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln\frac{r}{a} + \frac{\mu_0 I}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left(\frac{a}{r}\right)^n \cos(n(\phi - \theta)) \quad (5) .$$

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、 $B_\theta$ 、 $B_r$ 、 $B_z$  成分は以下のように表される。

$r < a$  の場合、

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

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

$$B_z = 0 .$$

$r > a$  の場合、

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

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

$$B_z = 0 .$$

## 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。

$$I(\phi) = I_0 \cos(m\phi) \quad (6) .$$

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。

$$A_z(r, \theta) = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left(\frac{r}{a}\right)^n \int_0^{2\pi} \cos(m\phi) \cos(n(\phi - \theta)) d\phi \quad (7) ,$$

ここで、

$$\cos(n(\phi - \theta)) = \cos(n\phi) \cos(n\theta) + \sin(n\phi) \sin(n\theta),$$

$$\int_0^{2\pi} \cos(m\phi) \cos(n\phi) d\phi = \pi \delta_{m,n},$$

$$\int_0^{2\pi} \cos(m\phi) \sin(n\phi) d\phi = 0 \text{ となることから,}$$

$$A_z(r, \theta) = \frac{\mu_0 I_0}{2} \frac{1}{m} \left(\frac{r}{a}\right)^m \cos(m\theta) \quad (8.1),$$

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

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

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、

$$B_x = B_r \cos \theta - B_\theta \sin \theta = 0,$$

$$B_y = B_r \sin \theta + B_\theta \cos \theta = -\frac{\mu_0 I_0}{2a} = \text{constant},$$

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。

$m = 2$  ( $I = I_0 \cos 2\phi$ ) も同様に計算すると、

$$B_x = B_r \cos \theta - B_\theta \sin \theta$$

$$= gr \sin(2\theta) \cos \theta - gr \cos(2\theta) \sin \theta$$

$$= gr \sin \theta = gy,$$

$$B_y = B_r \sin \theta + B_\theta \cos \theta$$

$$= gr \sin(2\theta) \sin \theta + gr \cos(2\theta) \cos \theta$$

$$= gr \cos \theta = gx,$$

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  $m = 3$  ( $I = I_0 \cos 3\phi$ ) の場合、

$$B_x = \frac{1}{2} g' r^2 (\sin 3\theta \cos \theta - \cos 3\theta \sin \theta)$$

$$= \frac{1}{2} g' r^2 2 \sin \theta \cos \theta = g' xy,$$

$$B_y = \frac{1}{2} g' r^2 (\sin 3\theta \sin \theta + \cos 3\theta \cos \theta)$$

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

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

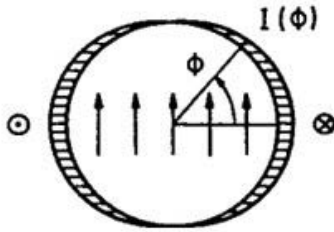
ここで  $g' = -\frac{\mu_0 I_0}{a^3}$  となり、エラー成分の無い6極磁場となる。

#### 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。

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

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  $\cos m\theta$ 電流分布 ( $m=1, 2, 3$ )

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

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 $A_z$ 、 $B_\theta$ 、 $B_r$ は式(10.1, 10.2, 10.3)となる。

$$A_z(r, \theta) = \frac{\mu_0 I_0}{2} \frac{1}{m} \left(\frac{r}{a}\right)^m \sin(m\theta) \quad (10.1)$$

$$B_\theta(r, \theta) = -\frac{\mu_0 I_0}{2a} \left(\frac{r}{a}\right)^{m-1} \sin(m\theta) \quad (10.2)$$

$$B_r(r, \theta) = -\frac{\mu_0 I_0}{2a} \left(\frac{r}{a}\right)^{m-1} \cos(m\theta) \quad (10.3)$$

## 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 $I_0 \times \cos(n\theta)$ の電流分布を作ることができると $2n$ 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。实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 $\cos(\theta)$ 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。まず、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 $\phi$ と $-\phi$ の位置に $+I$ 、角度 $\pi + \phi$ と $\pi - \phi$ の位置に $-I$ の線電流を持つ。

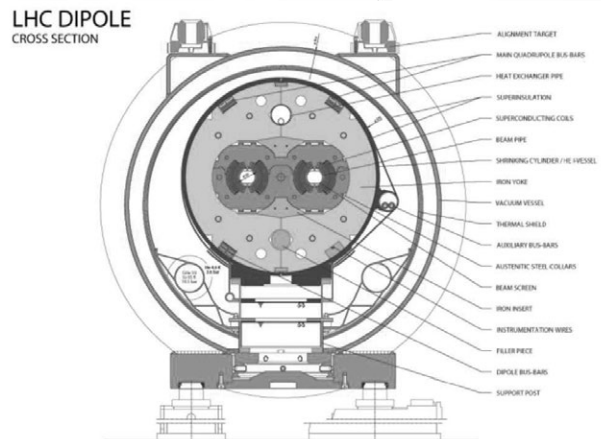
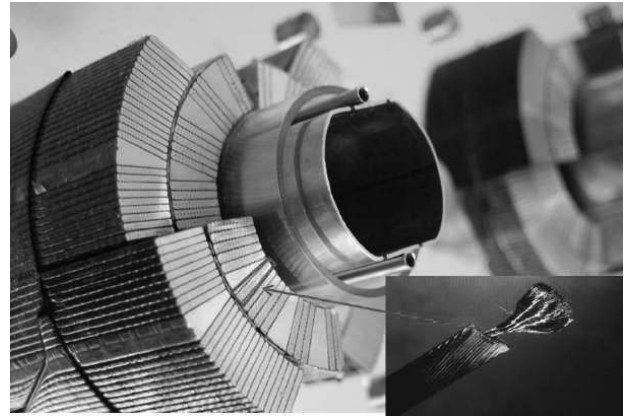
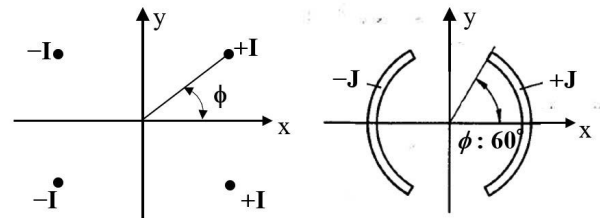


図7 LHC 2極超伝導電磁石コイル断面(上)と電磁石クライオスタット断面(下)



2極対称 (Dipole Symmetry) を持つ4本の線電流

2極対称コイルブロック

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、

$$\begin{aligned} \cos(n\phi) + \cos(-n\phi) - \cos(n(\pi - \phi)) - \cos(n(\pi + \phi)) &= \\ 4 \cos(n\phi), \quad n = 1, 3, 5, \dots, \\ \text{或いは } 0, \quad n = 2, 4, 6, \dots, \\ \sin(n\phi) + \sin(-n\phi) - \sin(n(\pi - \phi)) - \sin(n(\pi + \phi)) &= 0 \\ n = 1, 2, 3, 4, \dots \end{aligned}$$

$$A_z(r, \theta) = \frac{2\mu_0 I}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} \left(\frac{r}{a}\right)^n \cos(n\theta) \cos n\theta \quad (11)$$

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  $\phi$ 、内半径を  $a_1$ 、外半径を  $a_2$  とする。 $A_z(r, \theta)$  は、式 (12) で示される。

$$A_z(r, \theta) = -\frac{2\mu_0 J}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} \int_{a_1}^{a_2} \left(\frac{r}{a}\right)^n a da \int_0^{\phi_1} \cos(n\theta) d\theta \cos(n\theta), \quad (12)$$

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。

$$A_z(r, \theta) = \frac{2\mu_0 J a \Delta a}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^2} \left(\frac{r}{a}\right)^n \sin(n\phi_1) \cos(n\theta), \quad (13)$$

$n$  次の多極磁場成分の大きさは、

$$B_n = \sqrt{B_{\theta,n}^2 + B_{r,n}^2} \quad \text{となる。}$$

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

$$B_n = B_{\theta,n}(r, \theta=0) = -\frac{2\mu_0 J}{\pi} \Delta a \frac{1}{n} \left(\frac{r}{a}\right)^{n-1} \sin(n\phi_1) \quad (14)$$

2 極電磁石として一般的に用いられる角度  $\phi=60^\circ$  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  $B_1$  と  $B_5$  を比較すると、

$$B_5/B_1 = \frac{1}{5} \left(\frac{R_{ref}}{a}\right)^4 \frac{\sin 300^\circ}{\sin 60^\circ} \quad \text{となる。}$$

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  $1 \times 10^{-4}$  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  $\cos n\theta$  の電流分布に近づける設計を行う。

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

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

$$B_r(r, \theta) = B_{ref} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{R_{ref}}\right)^{n-1} \times (-a_n \cos(n\theta) + b_n \sin(n\theta)) \quad (15)$$

$R_{ref}$  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、2 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  $B_{ref} = B_1$  となり、4 極電磁石 ( $m=2$ ) では  $B_{ref} = B_2(R_{ref}) = g \times R_{ref}$  となる。 $g$  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。 $b_n$  と  $a_n$  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  $B_{ref}$  を 1 として正規化した値である。超伝導電磁石の分野では、 $10^{-4}$  レベルの誤差磁場をよく議論するので表記として  $\text{units}=1 \times 10^{-4}$  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



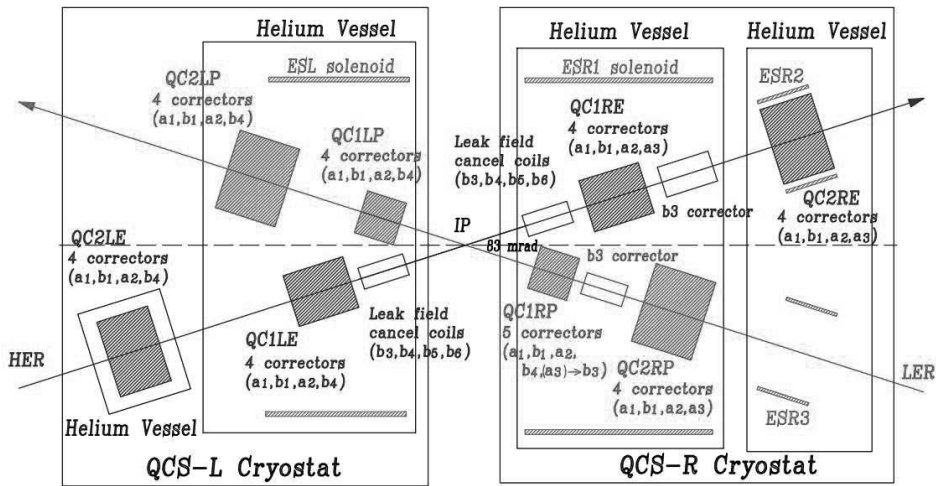


図9 2台のクライオスタット内の超伝導電磁石構成

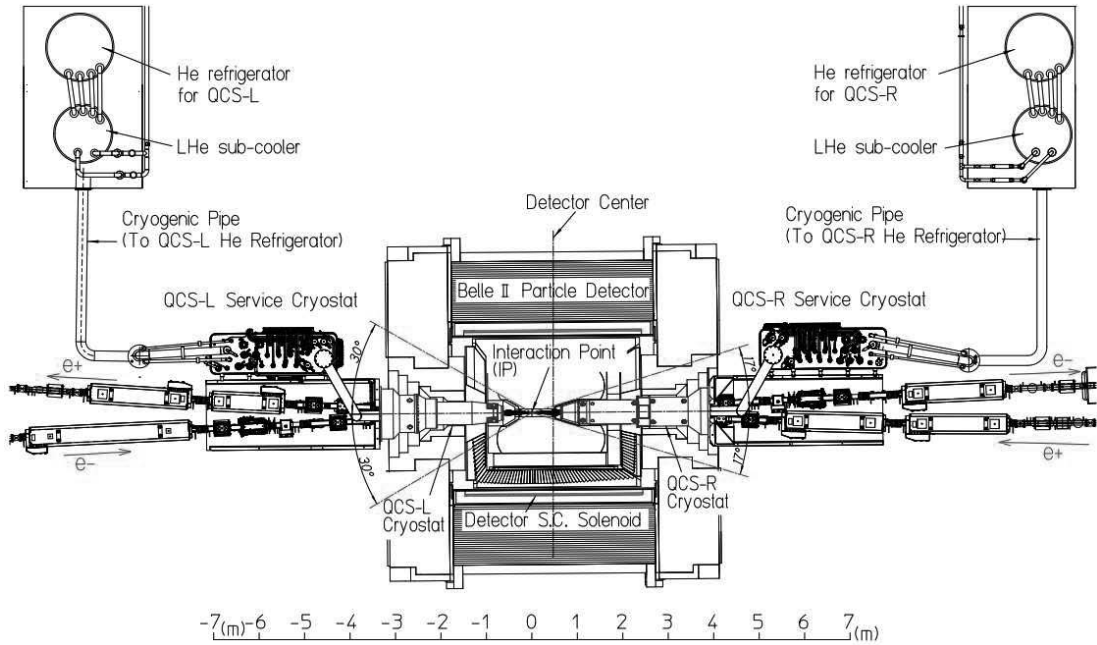


図10 SuperKEKB IR を上から見た超伝導電磁石クライオスタット、ヘリウム冷凍機、加速器常伝導電磁石とビームライン、Belle-II 検出器 (水平断面)。図中、ゼロの位置がビーム衝突点。

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	$a_1, b_1, a_2, b_4$	$b_3, b_4, b_5, b_6$	ESL
	QC1LE	$a_1, b_1, a_2, b_4$		
	QC2LE	$a_1, b_1, a_2, b_4$		
QCS-R	QC1RP	$a_1, b_1, a_2, a_3(b_3), b_4$		
	QC2RP	$a_1, b_1, a_2, a_3$		
	QC1RE	$a_1, b_1, a_2, a_3$	$b_3, b_4, b_5, b_6$	ESR1
	QC2RE	$a_1, b_1, a_2, a_3$		ESR2
	QC1-2RP	$b_3$		ESR3
	QC1-2RE	$b_3$		

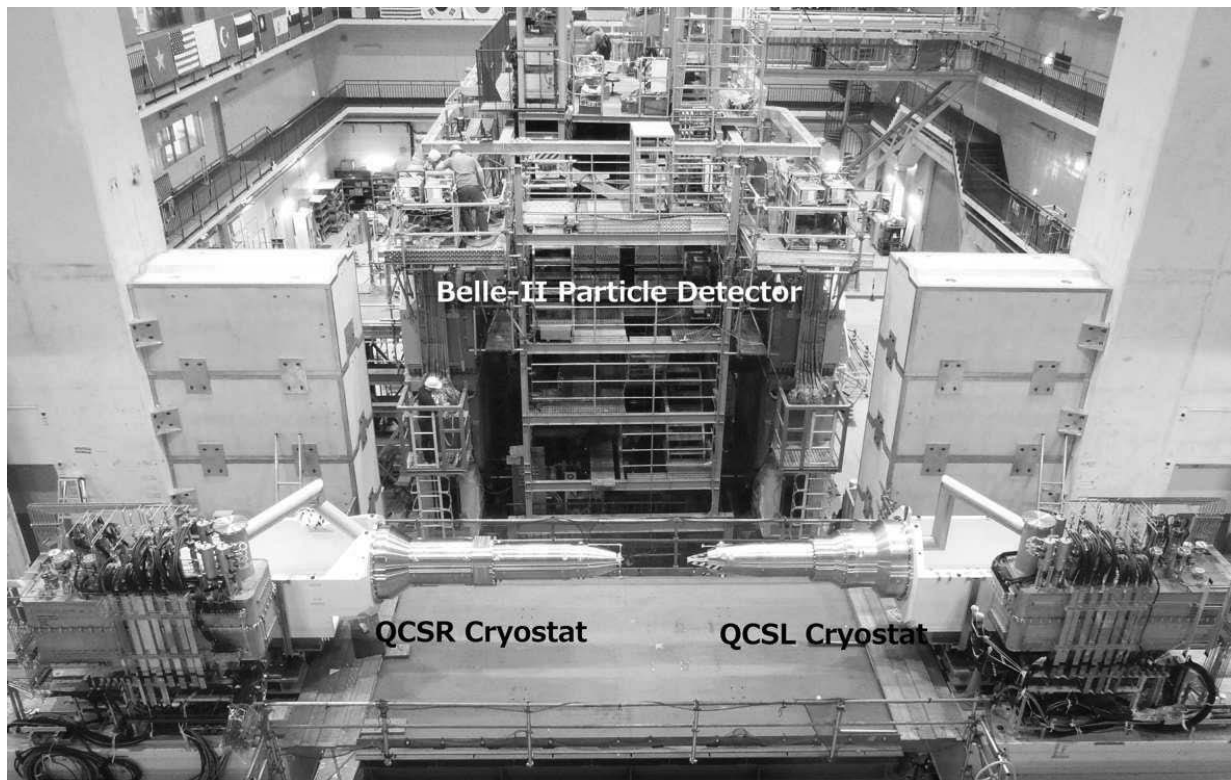


図 11 QCS-R、QCS-L クライオスタットと Belle-II 測定器。この写真は、ビーム運転前の状態で Belle-II 測定器がビームラインより移動している。

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  $2n$  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 QC1P 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

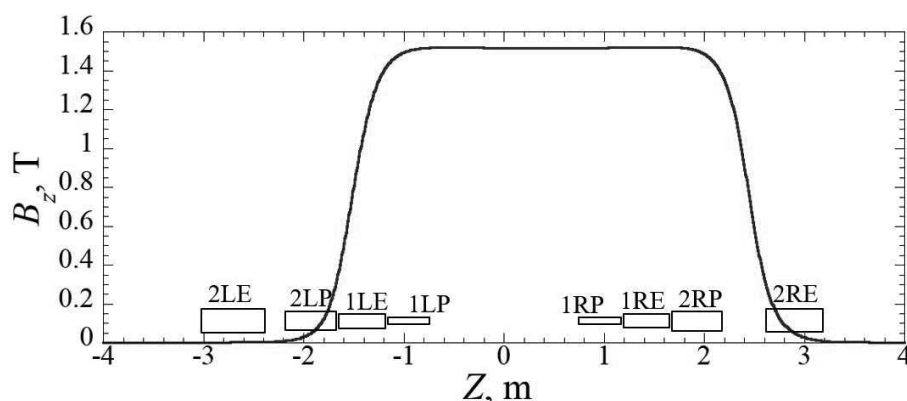


図 12 Belle-II 検出器軸上での検出器ソレノイドが発生する磁場分布(計算)。 $Z=0$  の位置は IP に相当する。また図中には、横から見た 4 極電磁石の位置を各磁石の長さを持つ長方形のブロックで示した。

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 QC1RP 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 3 4 極電磁石のビーム光学からの磁場仕様

電磁石	磁場強度 T	Z m	$\Delta x$ mm	$\Delta y$ mm	$\Delta\theta$ 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なく、温度 4 K 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。ハードウェア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ィ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  $\cos(2\theta)$  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

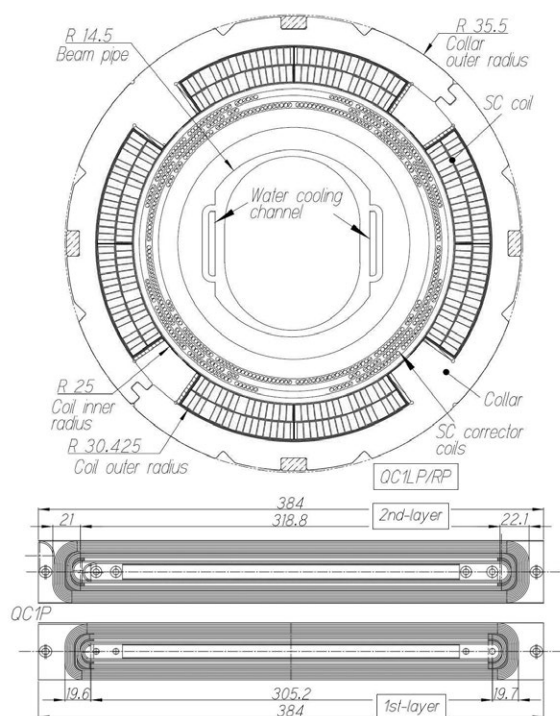


図 13 QC1P の磁石断面設計とコイル形状

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、 $B_p$	4.56 T
臨界値までの負荷率@4.7 K、 $R_L$	72.3 %
超伝導機コイル形状	
第 1 コイル	
コイル内/外半径、 $R_{i-c1}/R_{o-c1}$	25.0 / 27.7 mm
コイル長、 $L_{c1}$	344.6 mm
ターン数、 $T_{c1}$	12
第 2 コイル	
コイル内/外半径、 $R_{i-c2}/R_{o-c2}$	27.8/30.4 mm
コイル長、 $L_{c2}$	361.9 mm
ターン数、 $T_{c2}$	13
SUS カラー内/外半径、 $R_{i-col}/R_{o-col}$	30.8/35.5 mm
磁石長、 $L_{pm}$	409.3 mm
実効磁場長、 $L_{em}$	333.6 mm
インダクタンス、 $L$	0.88 mH
Rutherford 超伝導ケーブル	
ストランドワイヤー	
外径、 $D_s$	0.498 mm
銅比、Cu/S	1.0
フィラメント径、 $D_f$	7.7 $\mu$ m
フィラメント数、 $N_f$	2113
臨界電流@ 5T, 4.22 K、 $I_c$	317 A
Rutherford ケーブル	
ケーブル幅、 $W_c$	2.50 mm
ケーブル中間部厚、 $T_{cm}$	0.93 mm
キーストン角度、 $\theta_k$	2.09 deg.
ストランド数、 $N_s$	10

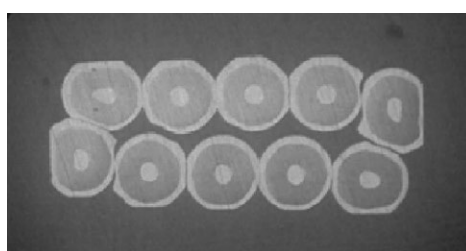


図 14 QC1P 用超伝導ケーブル断面

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 QC1P Rutherford 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  $1 \times 10^{-4}$  (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

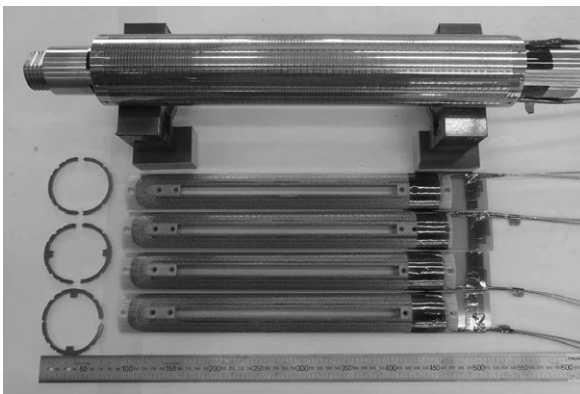


図 15: QC1LP(上)、QC1RP 用超伝導コイル(下)、SUS カラー(コイル左側)

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

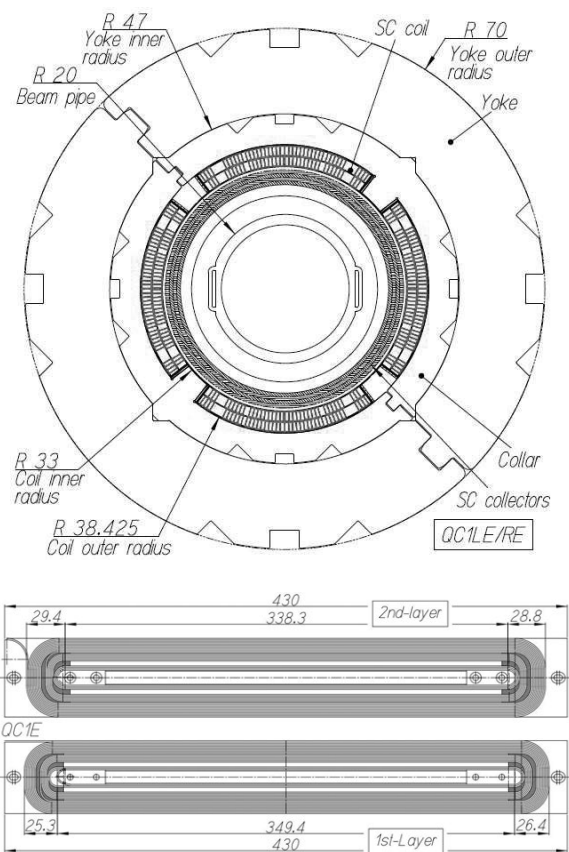


図 16 QC1E の磁石断面設計とコイル形状

QC1RE と QC1LE 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 QC1E 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  $I_d = 2000$  A 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 ( $\theta_k$ ) 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  $R_{ref}=15\text{ mm}$  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、 $-0.5\text{ T}\sim 0.5\text{ T}$  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ヘリウム容器内筒が 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 7 QC1E の設計誤差磁場 @ $R_{ref}=15\text{ mm}$

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

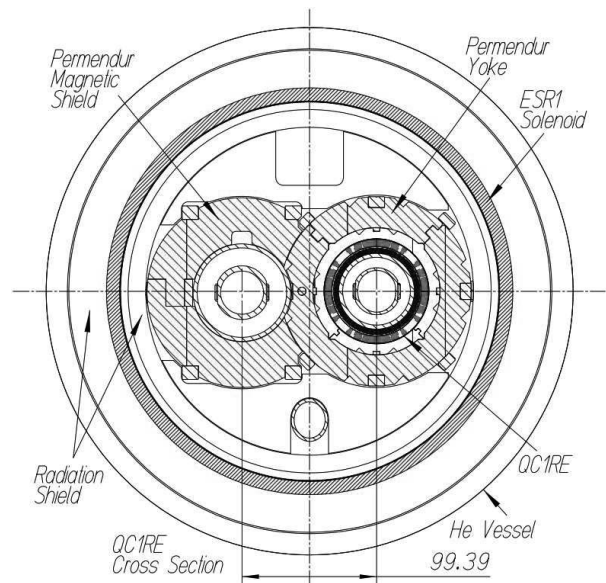


図 17 QC1RE IP 側のクライオスタット断面

表 6 QC1E と QC1RE のパラメータ

$G_d$	91.57
$I_d$	T/m2,000 A
$B_p$	3.50 T
$R_L$	73.4 %
超伝導機コイル形状	
第 1 コイル	
$R_{i-c1}/R_{o-c1}$	33.0/35.7mm
$L_{c1}$	401.1 mm
$T_{c1}$	16
第 2 コイル	
$R_{i-c2}/R_{o-c2}$	35.8/38.4 mm
$L_{c2}$	396.6 mm
$T_{c2}$	18
$R_{i-col}/R_{o-col}$	38.8/47.0 mm
ヨーク内/外半径, $R_{i-y}/R_{o-y}$	47.0/70.0 mm
$L_{pm}$	455.4 mm
$L_{em}$	373.1 mm
$L$	2.19 mH
Rutherford 超伝導ケーブル	NbTi
ストランドワイヤー	
$I_c@ 5\text{ T}, 4.22\text{ K}$	307 A
Rutherford ケーブル	
キーストン角度, $\theta_k$	1.59 deg.

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。

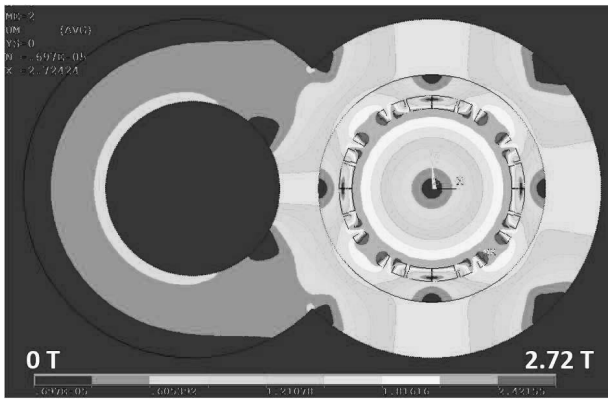


図 18 QC1RE を 1577A まで励磁した時のコイル、ヨーク、磁気シールドの磁場強度分布。コンター図の表示レンジは 0T~2.72T である。

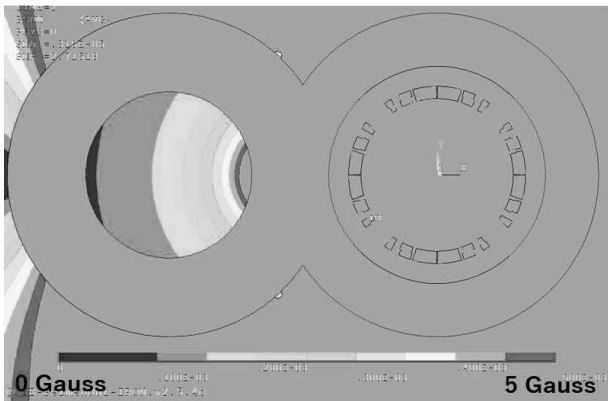


図 19 ヨーク、磁気シールド材料が鉄の場合の磁場計算結果。コンター図表示範囲=0~5 Gauss。

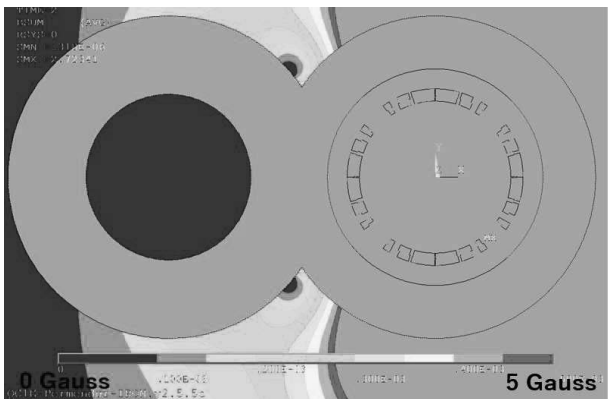


図 20 ヨーク、磁気シールド材料がパーメンジェールの場合の磁場計算結果。コンター図表示範囲=0~5 Gauss。

### 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 ( $T_{c1}=26+T_{c2}=27$ ) 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。

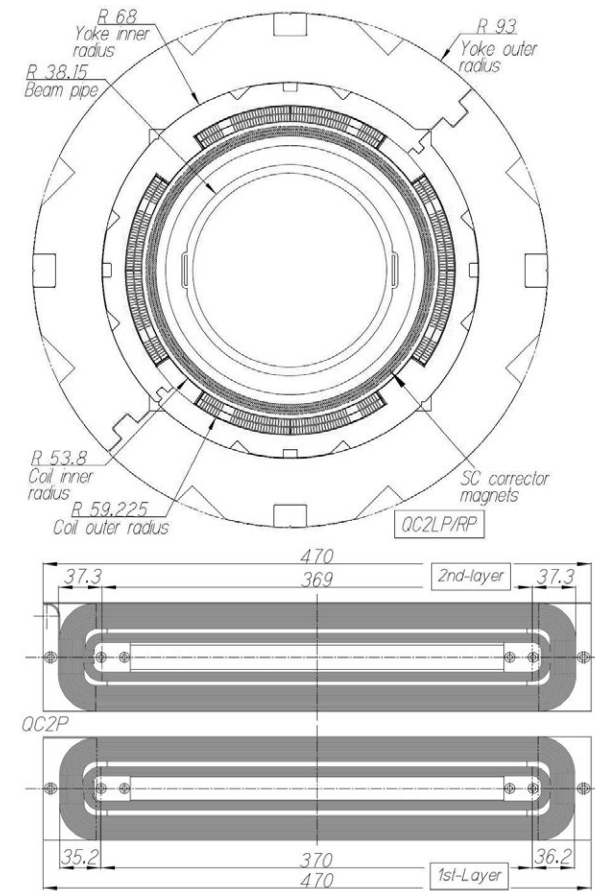


図 21 QC2P の磁石断面設計とコイル形状



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
$R_L$	44 %
超伝導機コイル形状	
第 1 コイル	
$R_{i-c1}/R_{o-c1}$	53.8/56.5 mm
$L_{c1}$	442.3 mm
$T_{c1}$	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 $I_c@ 5T, 4.22 K$	309 A
$\theta_k$	1.00 deg.

表 9 QC2P の設計誤差磁場 @ $R_{ref}=30$  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	
$R_{i-c1}/R_{o-c1}$	59.3/62.0 mm
$L_{c1} (2RE, 2LE)$	451.1, 569.1 mm
$T_{c1}$	28
第 2 コイル	
$R_{i-c2}/R_{o-c2}$	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
$R_{i-y}/R_{o-y} (2RE)$	85/108.5 mm
$R_{i-y}/R_{o-y} (2LE)$	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	
ワイヤー $I_c@ 5T, 4.22 K$	NbTi
$\theta_k$	0.94 deg.

表 11 QC2RE/2LE の設計誤差磁場 @ $R_{ref}=35$  mm

誤差磁場成分	2 次元, units		3 次元, units	
	QC2RE/QC2LE	QC2RE/QC2LE	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  $R_{i-c1}=59.3$  mm である。

設計電流値は、 $I_d(2RE)=1562.5$  A、 $I_d(2LE)=1250$  A 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

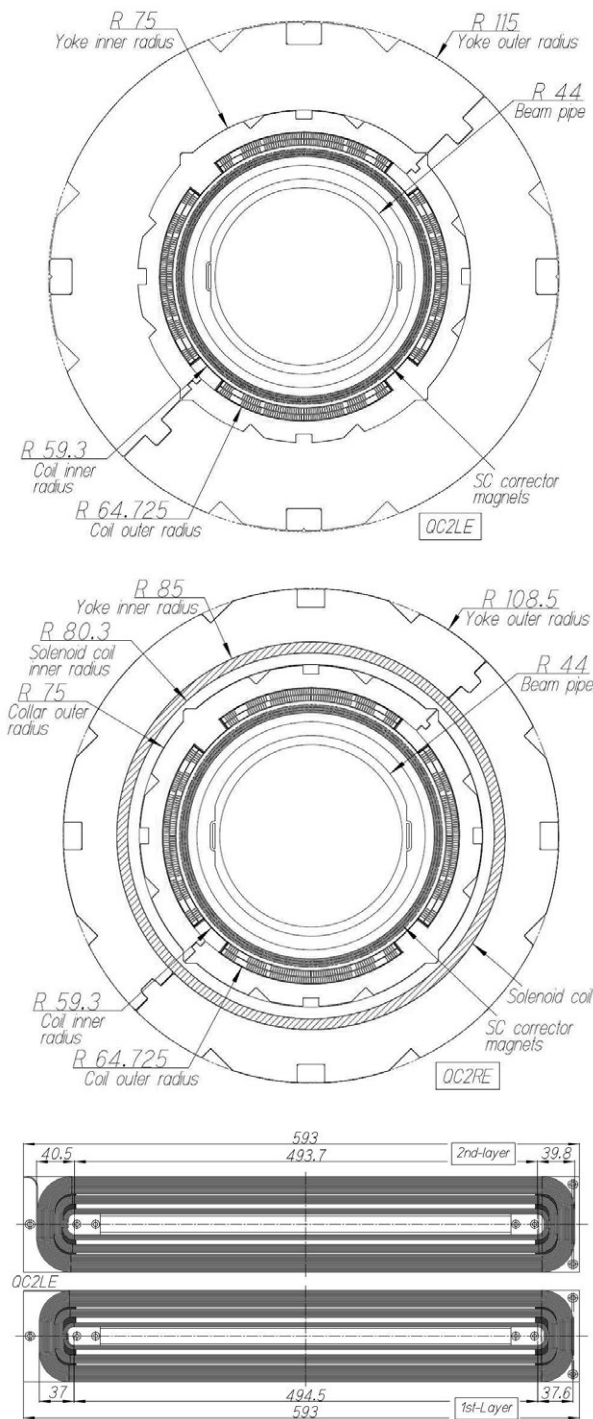


図 22 QC2LEとQC2REの磁石断面設計とQC2LEコイル形状

離が異なることと Belle-II 測定器へのバックグラウ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  $R_{ref}=35\text{ mm}$  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 ( $b_{10}$ ) が QC2RE では  $-1.88\text{ units}$ 、QC2LE では  $-1.30\text{ units}$  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

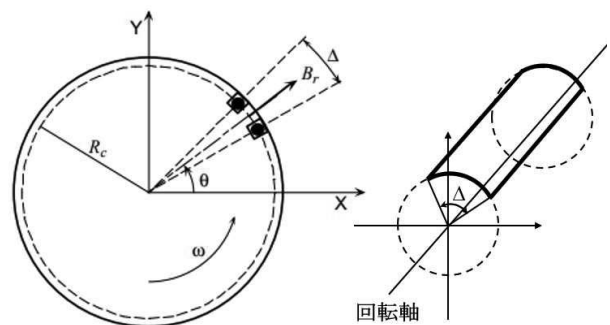


図 23 Tangential コイル 2 次元断面図。図中、黒丸がコイル部に相当する。 $\Delta$ : ループを作る 2 つのワイヤーの開き角度、 $R_c$ : ループ半径。

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  $\Delta \approx 23.7$  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

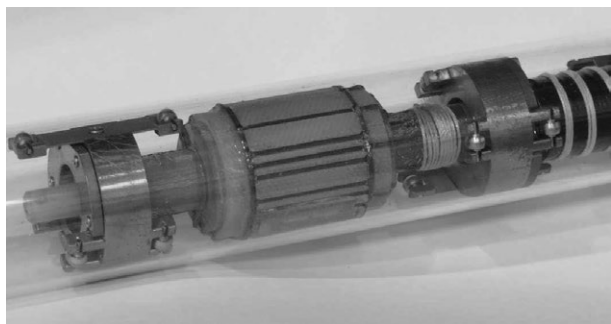


図 24 超伝導電磁石磁場測定に使用された Harmonic コイル

組み込まれている。 $\Delta \approx 23.7$  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 極磁場のバックグランド処理を行い、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

電磁石	積分値測定		磁場分布測定	
	$L_c/R_c$ (mm)	$L_c/R_c$ (mm)	$L_c/R_c$ (mm)	$L_c/R_c$ (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  $L_c = 20.4$  mm、コイル半径  $R_c = 12.0$  mm、Tangential コイルの開き角度  $\Delta = 21.2$  度、ワイヤのターン数  $T = 120$  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。

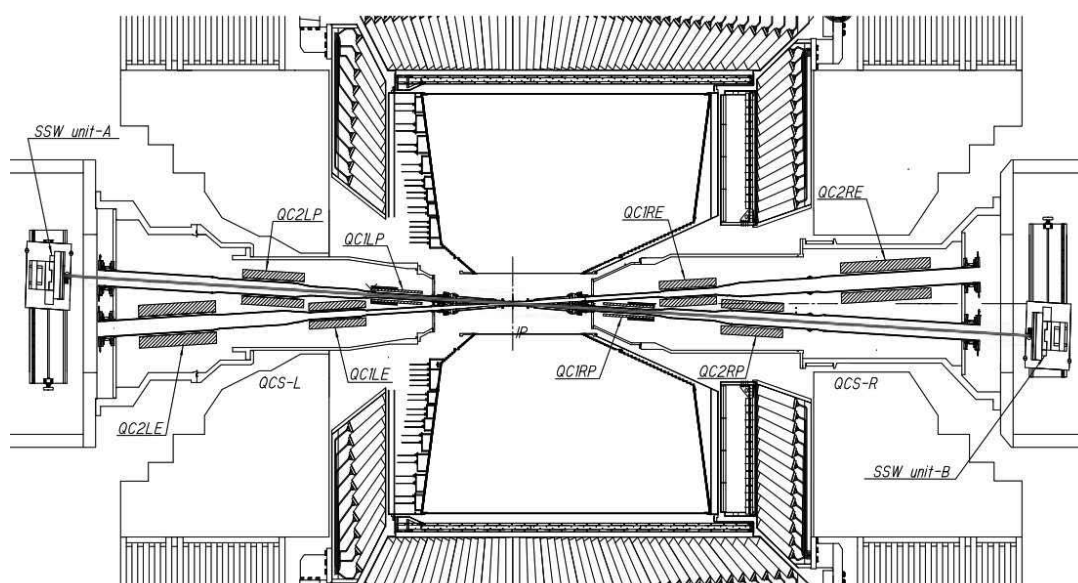


図 25 SuperKEKB 超伝導 4 極電磁石磁場中心測定: Single Stretched Wire (SSW)。赤線が Be-Cu 線。

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 8.7 m 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

電磁石	電流 kA	TF cal.	TF meas.	TF up- ramp	TF dw- 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

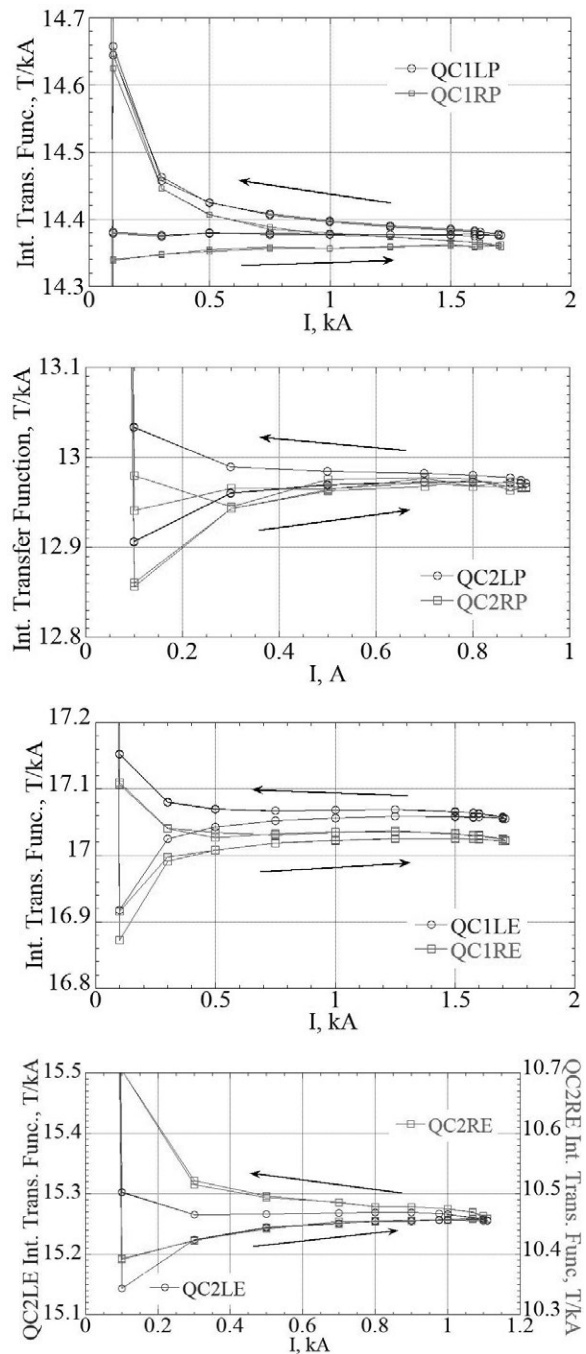


図 26 超伝導 4 極電磁石の 4 極磁場強度の電流値依存性。図中、矢印は電流変化の方向を示している。

$$TF = \int B_2 / I \quad (16)$$

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

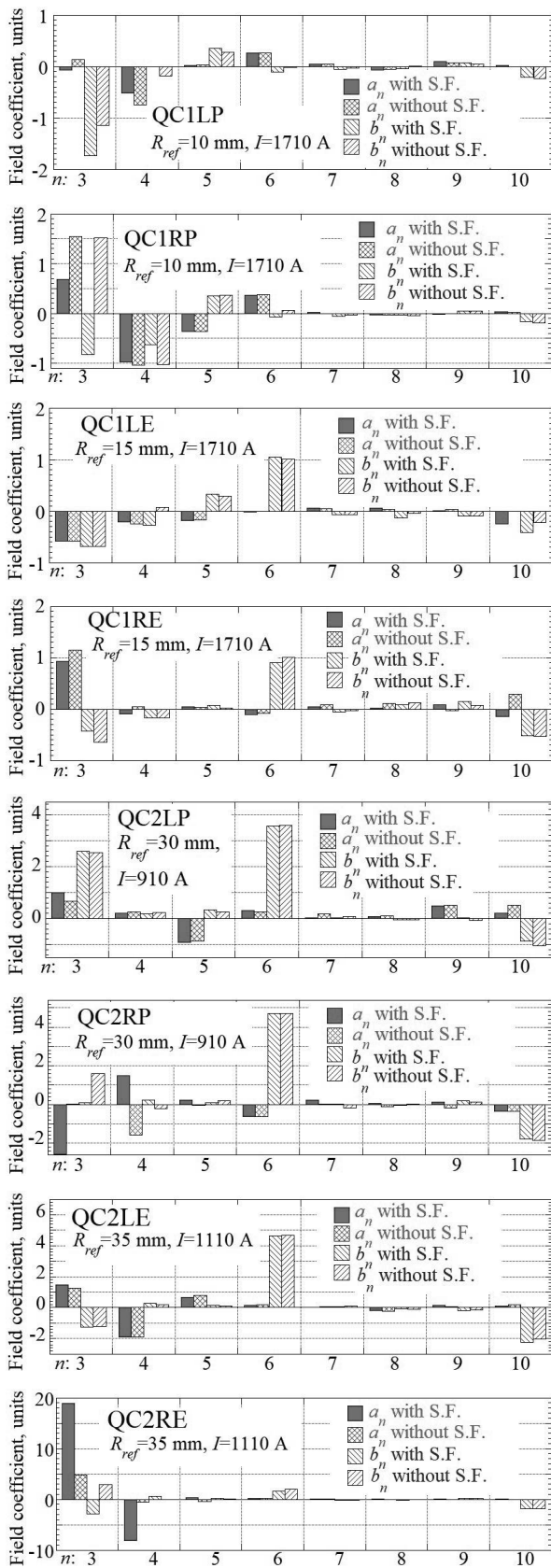


図 27 超伝導 4 極電磁石の多極磁場成分

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、磁性ヨークが取り付けられている 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  $\sim 2.5T$  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  $a_3$ 、 $b_3$  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  $a_3=0.14$  units、 $b_3=-1.15$  units であるのに対して、ソレノイド磁場が印加されると  $a_3=-0.07$  units、 $b_3=-1.74$  units と  $b_3$  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  $b_3$  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5.4mm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 $\cos(2\theta)$ 電流分布を持つ場合に設計上発生する高次磁場成分( $b_6, b_{10}$ )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1units以上の6極磁場成分( $a_3, b_3$ )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)

$n$	QC1P $R_{ref}=10\text{mm}$		QC1E $R_{ref}=15\text{mm}$	
	$a_n$	$b_n$	$a_n$	$b_n$
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

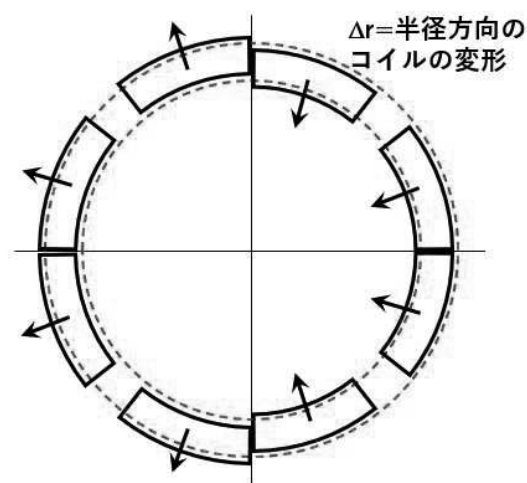


図29 QC1E超伝導コイル変形解析

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( $\Delta r$ )について

表 15 QC1E 断面を模擬したコイル変形評価

$n$	$\Delta r=50 \mu\text{m}$		$\Delta r=20 \mu\text{m}$	
	$a_n$	$b_n$	$a_n$	$b_n$
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  $b_3=8.59 \text{ units}$  が楕円変形に依るものとする半径方向の変形量は  $\Delta r=31.5 \mu\text{m}$  と計算され、これによって  $b_5=-1.02 \text{ units}$  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  $\pm 4 \mu\text{m}$  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  $60 \mu\text{m}$  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

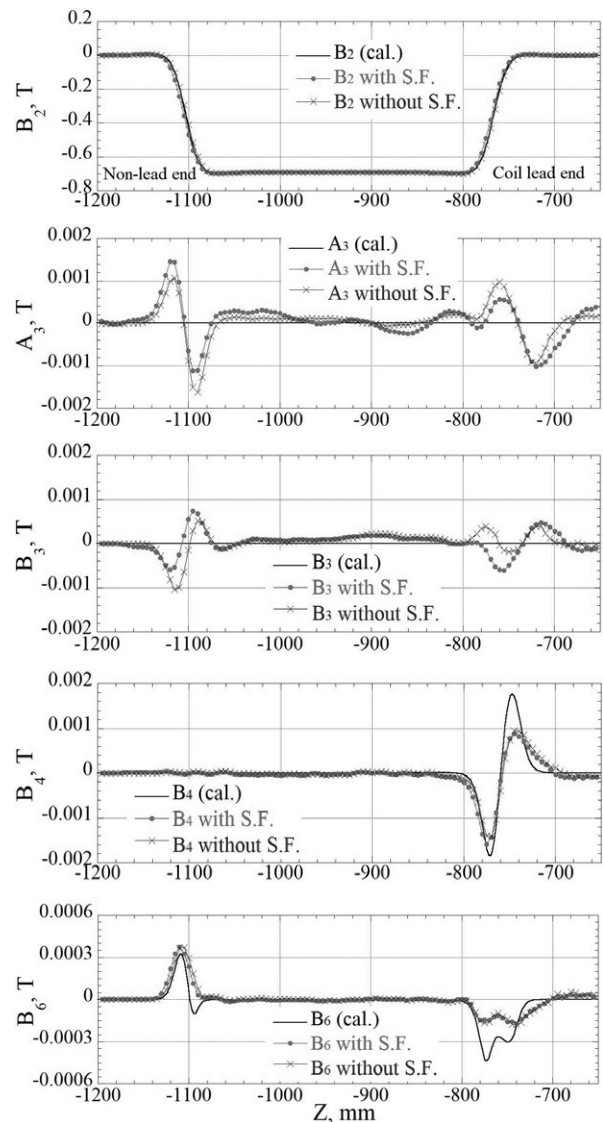


図 30 QC1LP 4 極電磁石軸に沿った磁場分布

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  $R_{ref} = 10 \text{ mm}$  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、● (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

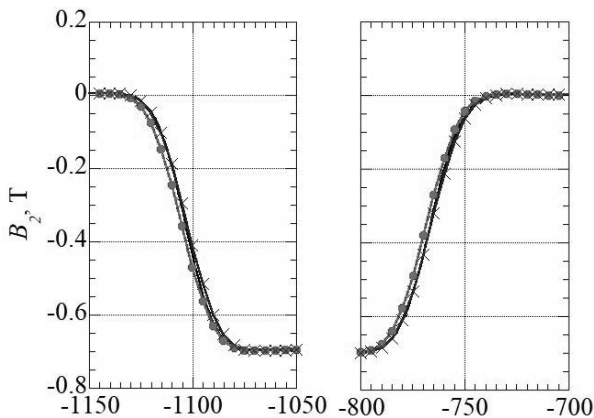


図 31 QC1LP コイル端部磁場分布 (拡大版)

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

電磁石	設計 mm	wo SF mm	w SF mm	$\Delta_{EMF}$ mm	$\Delta_D$ 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  $B_4$  成分が設計上作られる。この  $B_4$  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 ( $B_6$ ) 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  $B_2$  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 QC1LP 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 2 mm 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。

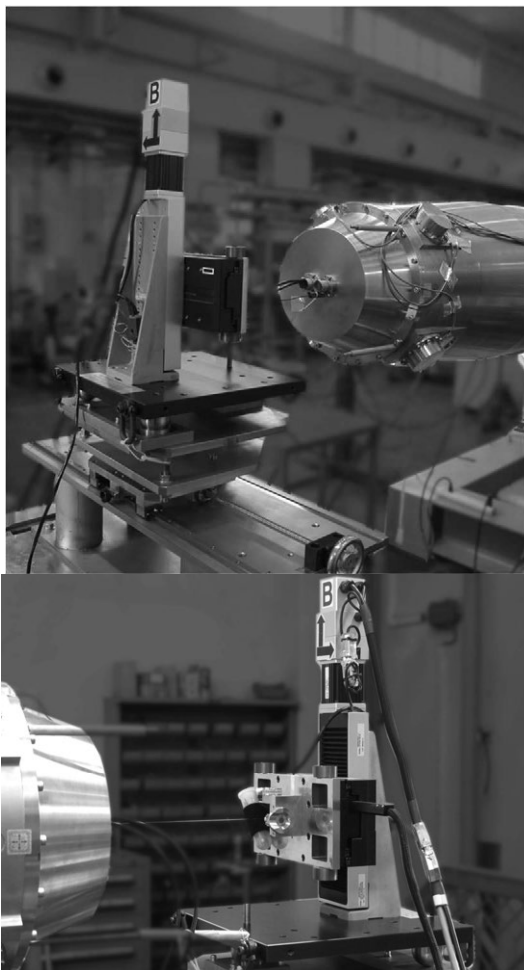


図32 SSW 測定装置ワイヤー位置制御部

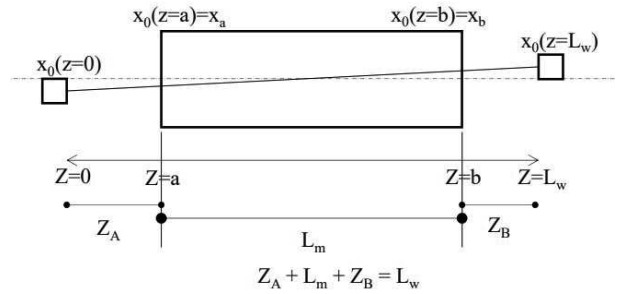


図33 SSW と電磁石に対する座標系

SSW の測定原理を図33と式(17)、(18)を用いて示す。[10]

$$A_z = \Re \left[ \int_{n=1}^{\infty} R_{ref} g \left( \frac{b_n + ia_n}{nR^{n-1}} \right) [(x - x_0) + i(y - y_0)]^n \right], \quad (17)$$

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

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 ( $x_1$ ,  $y_1$ ) から点2 ( $x_2$ ,  $y_2$ ) に移動することによる磁束の変化量  $\Phi$  は、式(18)で示される。 $\Phi$  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

電磁石	$\Delta x$ , mm		$\Delta y$ , mm	
	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  $\pm 0.5\text{mm}$  以内、QC2P/E も  $\pm 1\text{mm}$  以内であり、この誤差は補正電磁石として組み込まれている  $a_1$ 、 $b_1$  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 極電磁石ボア内に組み込まれている。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

電磁石	$a_1$ Tm	$b_1$ Tm	$a_2$ T	$a_3$ T/m	$b_3$ T/m	$b_4$ T/m <sup>2</sup>
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

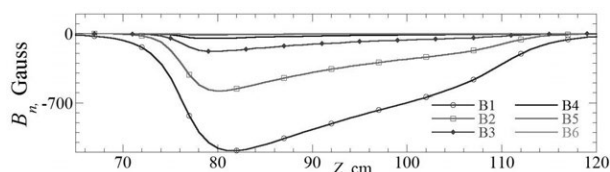


図 34 QC1LP/RP から HER ビームラインへの漏れ磁場分布。Z:IP からの距離。

$b_3$ 、 $b_4$  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  $a_1$ 、 $b_1$ 、 $a_2$  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  $b_4$  補正電磁石、QC1RP には  $a_3$  と  $b_4$  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。

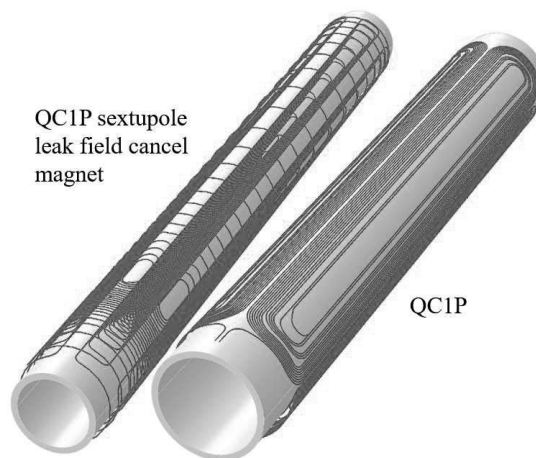
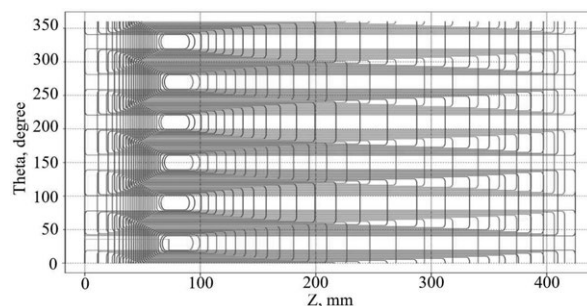


図 35 QC1P 漏れ磁場キャンセル超伝導 6 極コイル展開図（上）、超伝導 6 極電磁石と QC1P。

QCIP 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( $B_1$ )~12 極( $B_6$ )の漏れ磁場分布を示した。 $B_1$ はピーク値として 0.1184 T に達する。これら磁場成分の内、 $B_1$  と  $B_2$  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、 $B_3$ ~ $B_6$ 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 QCIP 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 QCIP 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 用スクュー 2 極 ( $a_1$ ) 補正電磁石を図 36 に示した。

製作中の QCIP からの漏れ磁場の成分のうち 6 極磁場( $b_3$ )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、 $\mu\text{m}$	5.4
NbTi フィラメント数	2113
$I_c$ at 4.2 K and 4 T, A	156

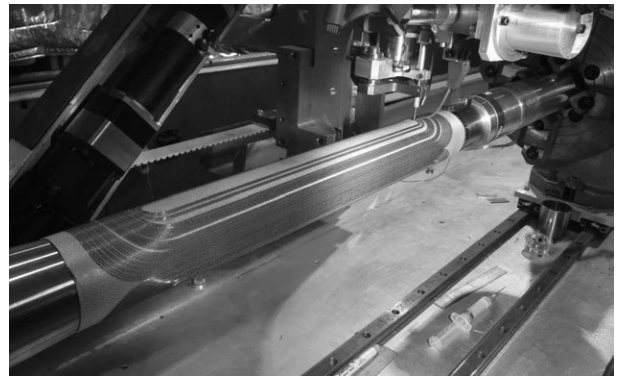


図 36 BNL で製作中の QC1RP 用  $a_1$  補正磁石



図 37 QCS-L HER ビームライン用  $b_3$  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( $b_4$ )、10 極( $b_5$ )、12 極( $b_6$ )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み込み、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  $-60\text{ A} \sim +60\text{ A}$  の動作領域を持つため、 $0\text{ A} \rightarrow 60\text{ A} \rightarrow -60\text{ A} \rightarrow 0\text{ A}$  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  $\pm 60\text{ A}$  での測定値と  $0\text{ A}$  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。 $0\text{ A}$  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、QCIP の  $a_1$ 、 $b_1$  補正電磁石は  $\pm 60\text{ A}$  で作るこ

表 20 補正電磁石磁場測定結果

電磁石	Type	60A	-60A	$\Delta_h$ @0A	$\theta$ mrad
QC1LP	$a_1$	0.018	-0.018	-0.001	15.0
	$b_1$	0.015	-0.014	-0.001	25.6
	$a_2$	0.806	-0.803	-0.038	-31.0
	$b_4$	294.5	-292.6	13.4	-1.7
QC1RP	$a_1$	0.017	-0.018	0.001	10.7
	$b_1$	0.016	-0.016	-0.001	11.9
	$a_2$	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
QC1LE	$a_1$	0.033	-0.032	-0.001	-16.2
	$b_1$	0.055	-0.055	-0.001	-6.1
	$a_2$	0.932	-0.931	-0.055	-6.1
	$b_4$	724.3	-723.6	23.9	-1.2
QC1RE	$a_1$	-0.031	0.0313	0.001	3.8
	$b_1$	0.0550	-0.055	-0.001	2.4
	$a_2$	0.888	-0.889	-0.051	-4.0
	$a_3$	-22.60	22.69	1.29	4.1
QC2LP	$a_1$	0.036	-0.036	-0.001	3.9
	$b_1$	0.041	-0.041	-0.001	8.6
	$a_2$	0.640	-0.640	-0.031	9.3
	$b_4$	-159.5	159.4	9.18	10.2
QC2RP	$a_1$	-0.058	0.058	0.001	-0.1
	$b_1$	0.042	-0.042	-0.001	-0.1
	$a_2$	0.630	-0.629	-0.032	5.9
	$a_3$	-1.585	1.662	0.138	28.0
QC2LE	$a_1$	0.040	-0.040	-0.001	2.3
	$b_1$	0.044	-0.044	-0.001	3.8
	$a_2$	0.753	-0.752	-0.035	-8.0
	$b_4$	142.0	-142.0	-6.70	-4.4
QC2RE	$a_1$	-0.031	0.031	0.001	-6.6
	$b_1$	-0.035	0.035	0.001	11.2
	$a_2$	0.600	-0.600	-0.034	-7.6
	$a_3$	6.493	-6.446	-0.322	-12.6
QC1-2RE	$b_3$	55.51	-55.49	-0.089	-45.3
QC1-2RP	$b_3$	-28.03	28.03	0.051	-4.5

この表中で積分磁場の単位は、 $a_1$  と  $b_1$  補正電磁石は Tm、 $a_2$  補正電磁石では T、 $a_3$  と  $b_3$  補正電磁石は T/m、 $b_4$  補正電磁石は T/m<sup>2</sup>、 $\Delta_h$  は電流を上げ下げする時の 0A での測定値の差、 $\theta$  はそれが組み込まれている 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

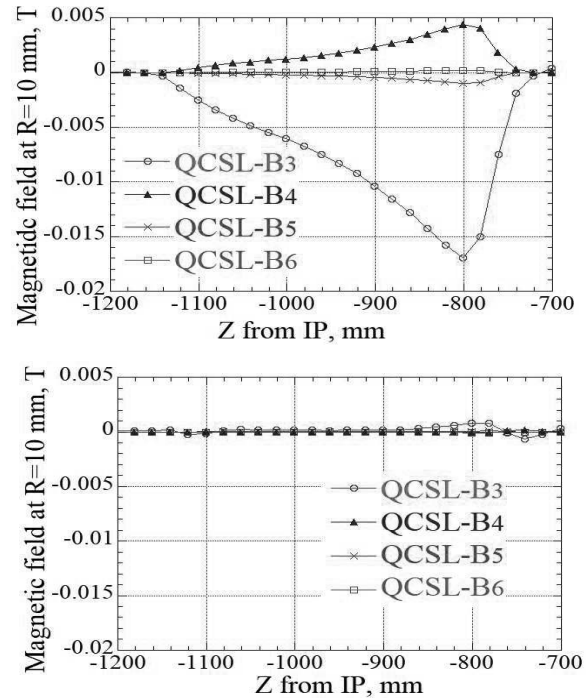


図 38 QC1LP 用漏れ磁場  $b_3$ ,  $b_4$ ,  $b_5$ ,  $b_6$  キャンセル電磁石の磁場分布 (上)、QC1LP からの漏れ磁場を  $b_3$ ,  $b_4$ ,  $b_5$ ,  $b_6$  電磁石で打ち消した磁場測定結果 (下)。測定時の QC1LP の励磁電流は 1625A である。

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。

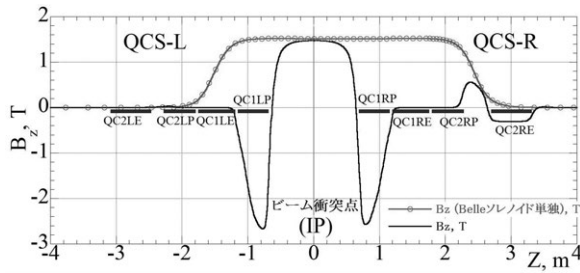


図 39 Belle-II ソレノイドと QCS 補償ソレノイド磁場分布

## 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 ソレノイド単体で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  $\pm 4\text{m}$  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
$I_D$ , 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
蓄積エネルギー, 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。

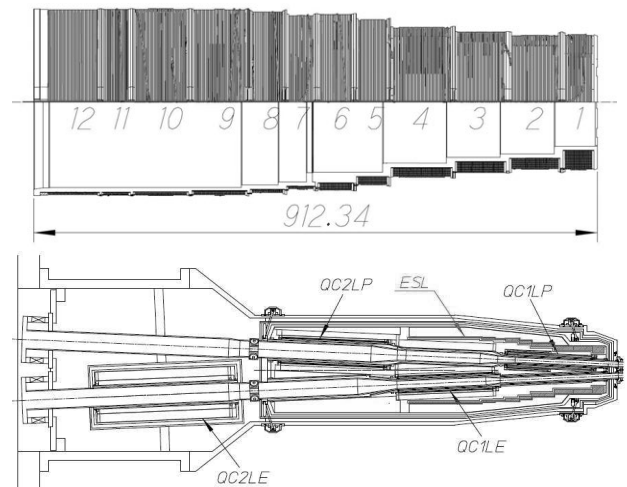


図 40 ESL 補正ソレノイド (上) とクライオスタット内配置図

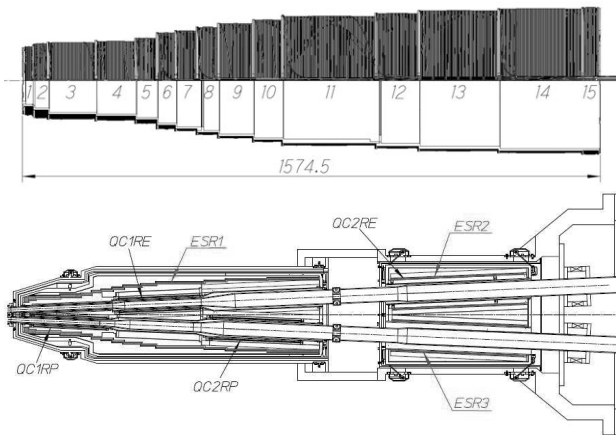


図 41 ESR1 補正ソレノイド (上) と ESR1 と ESR2/3 クライオスタット内配置図

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  $-1.5 \sim -1.9$  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、エポキシ含浸を行いながら巻き線を行った。

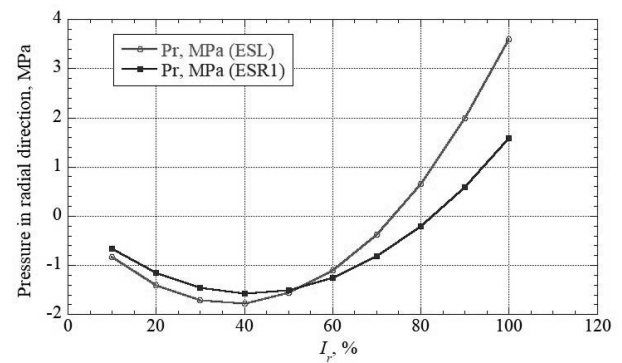


図 42 励磁により ESL と ESR1 に作用する Belle-II からの半径方向の電磁力

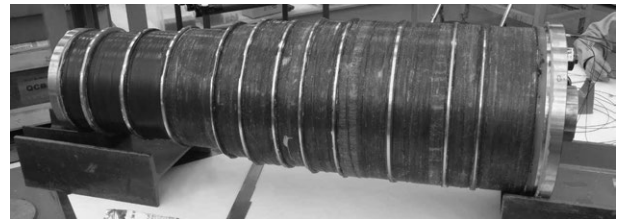


図 43 QCS-L に組込まれた ESL



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に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、飽和した磁性体は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 (○) 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

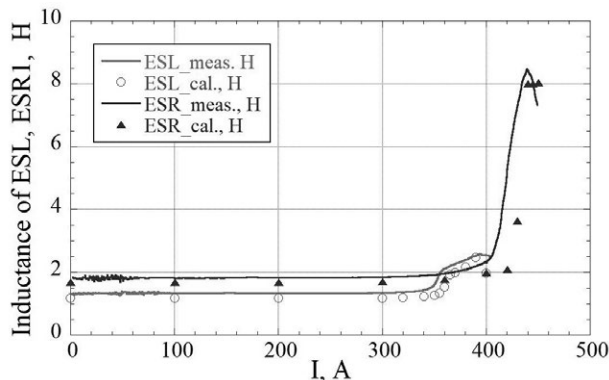


図 45 励磁電流に伴う ESL と ESR1 のインダクタンスの変化

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  $-0.4 \text{ m} < Z < 0.5 \text{ m}$  の測定値 (□) は、Belle-II グループの測定値で、 $Z < -0.6 \text{ m}$  と  $0.6 \text{ m} < Z$  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、 $-1.4\text{ m} < Z < -0.6\text{ m}$  と  $0.6\text{ m} < Z < 1.4\text{ m}$  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  $-2.3\text{ mm} \pm 0.5\text{ mm}$ 、ESR1 側では  $0.4\text{ mm} \pm 0.5\text{ mm}$  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  $-2.3\text{ mm}$  と  $0.9\text{ mm}$  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

氣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、QCILE 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。

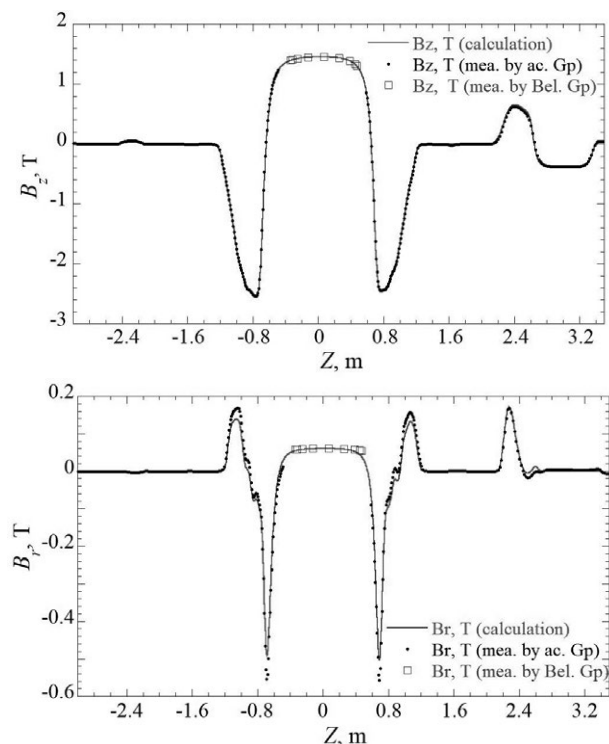


図46 HERビームライン上のソレノイド磁場分布。上図はビーム進行方向磁場( $B_z$ )、下図は半径方向磁場( $B_r$ )を示している。

## 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 6 K 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ヘリウムで冷却されている。液体ヘ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、その後方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

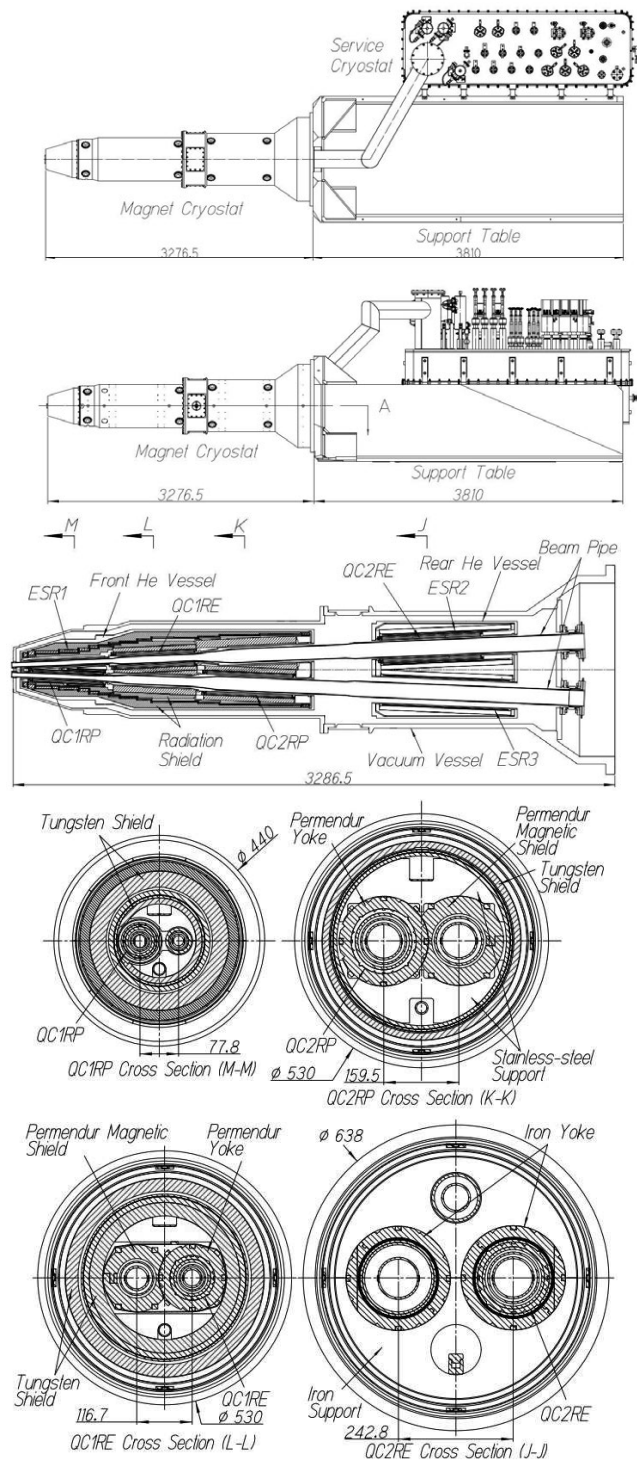


表 23 クライオスタットパラメータ

	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	φ638
真空容器重量 (kg)	1570	1472
4 K 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)		
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-L IP 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、電流リードが取り付けられ、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り付けられている。「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 5 K 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 本でヘ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 側ヘ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、他端は液体ヘ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 mm<sup>2</sup> と 81 mm<sup>2</sup> 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。

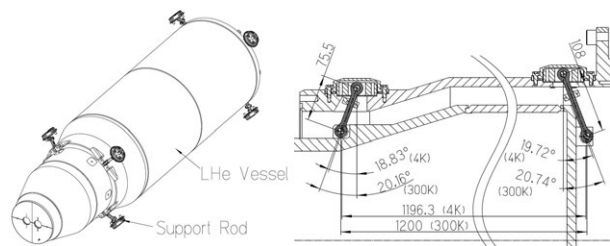


図 48 QCS-R クライオスタット IP 側ヘリウム容器サポートロッド (左) と ロッド設計 (右)

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、4 K 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 4 K 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 4 K 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ヘリウム (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 4.4 K 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 20 g/s で、この LHe が単相流である許容熱負荷は 32.8 W 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

アルミを蒸着している。アルミの 4 K 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 1 g/s の 4 K 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

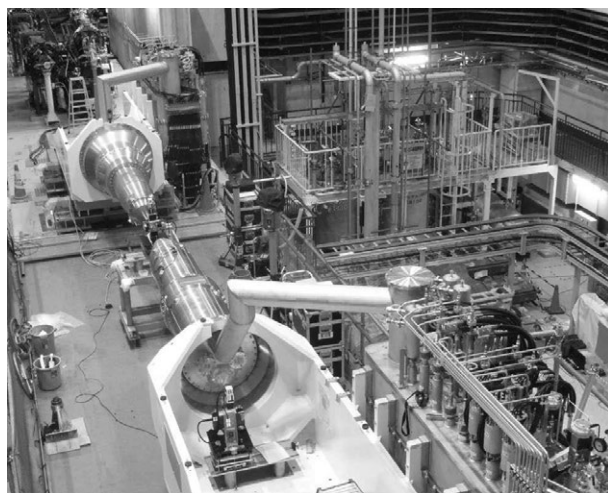


図 49 SuperKEKB ビーム衝突点に設置された QCS-L と QCS-R クライオスタット

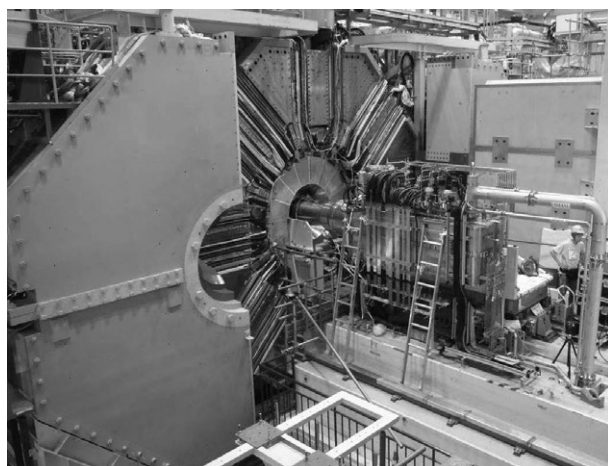


図 50 Belle-II 検出器に組込まれる QCS-L クライオスタット

表 24 クライオスタット設計熱負荷

	QCS-L	QCS-R
磁石クライオスタット		
サポートロッド	9.7 W	5.8 W
熱輻射	6.6 W	10.1 W
Sub-total	16.3 W	15.9 W
サービス容器		
熱輻射	1.9 W	2.1 W
伝導熱負荷		
パイプ	11.5 W	12.5 W
低温配管・弁	6.0 W	6.0 W
信号線	3.8 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

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、4.4 K で 250 W 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 20 W 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	スクルー型
最大風量	1250 Nm <sup>3</sup> /h
油分離装置	4 器
ヘリウムタンク	V=20m <sup>3</sup> ×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 <sup>3</sup> 、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ターの 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ターを目指して非常に繊細なビーム運転を行っている。ルミノシテターは、Belle-II 測定器運転中では  $4.65 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  まで到達し、加速器のみの運転時には  $4.707 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  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. ビームによる超伝導電磁石クエンチ発生場所と頻度。
  2. 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。
  3. 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。
  4. 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、直接ルミノシテタ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、積分ルミノシテターの向上に寄与できるものと考えている。

謝辞

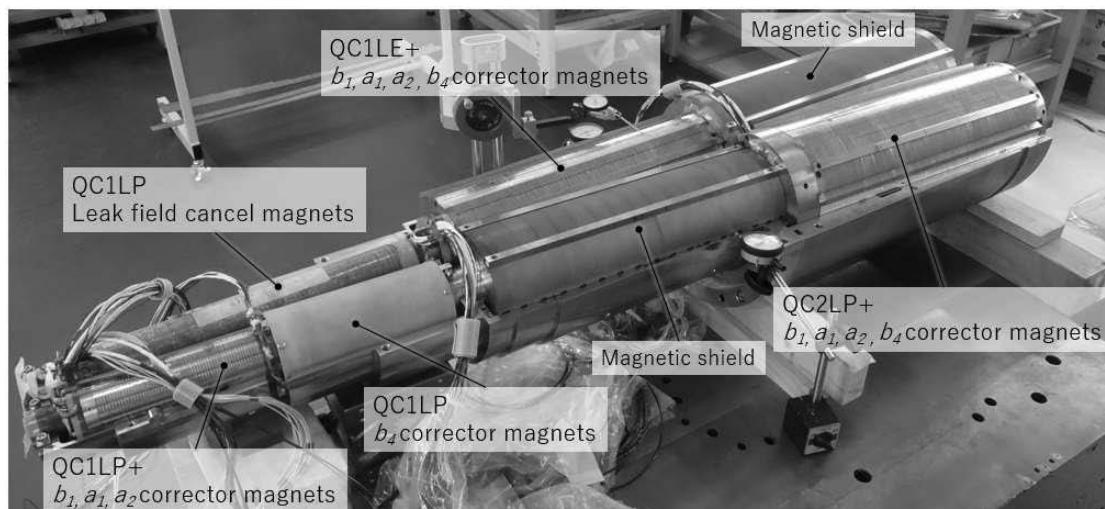
SuperKEKB ビーム最終集束用超伝導電磁石システムは、超伝導電磁石の開発・建設以外にも多くの先端技術を必要としました。KEKB 電磁石グ

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。

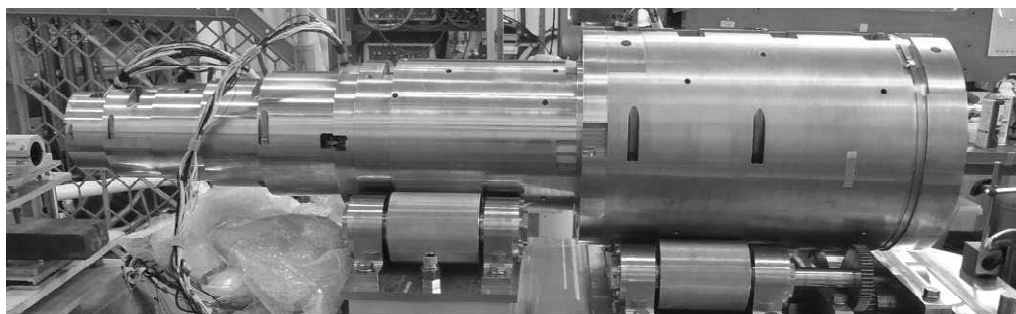
## 参考文献

- [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. Meß, “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.

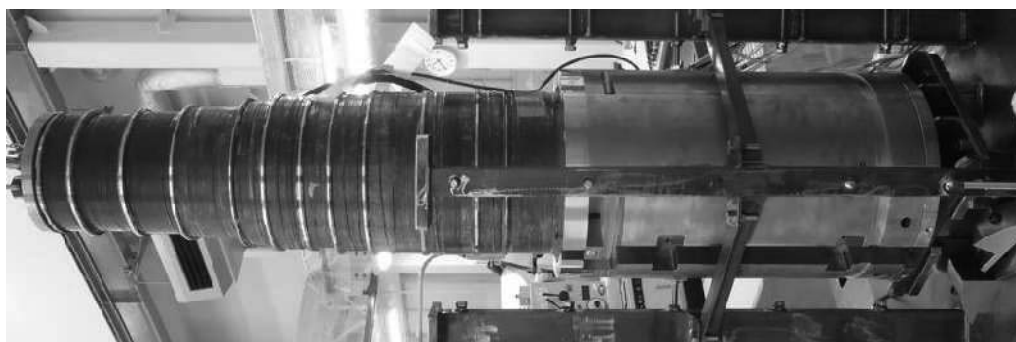
添付資料



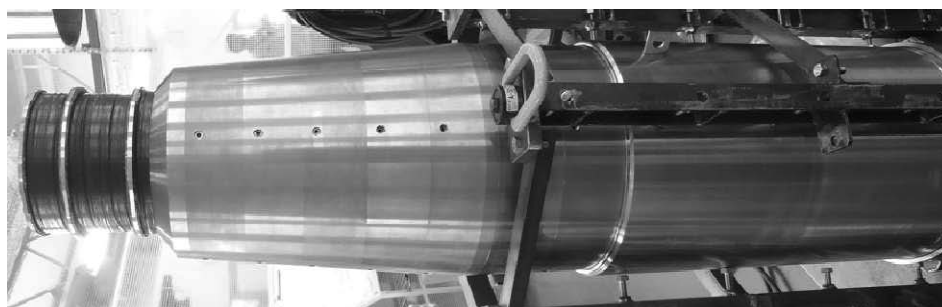
添付資料-1 QCS-L 先頭部ヘリウム容器内 3 台の超伝導 4 極電磁石、12 台の超伝導補正磁石、4 台の QC1LP 漏れ磁場キャンセル超伝導電磁石組立時状態図



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