

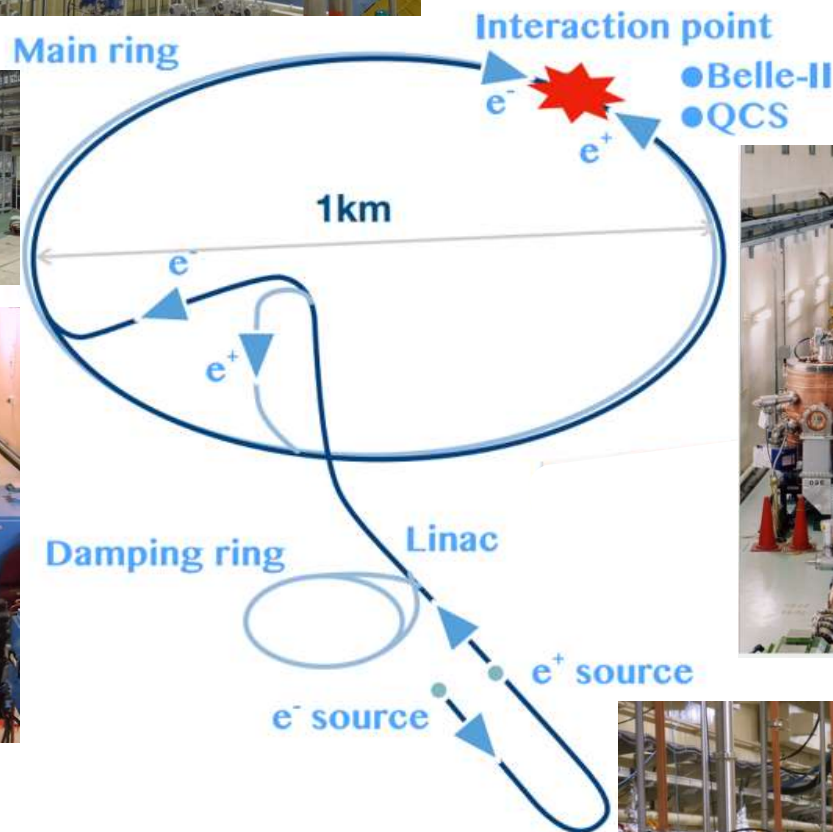
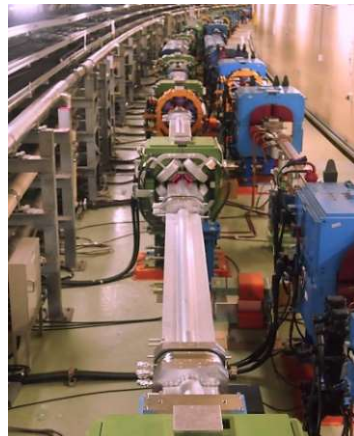
SuperKEKB加速器ビーム衝突点用 超伝導電磁石(1)

高エネルギー加速器研究機構
加速器研究施設
大内 徳人

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**
2. **加速器用電磁石磁場について(特に超伝導電磁石)**
3. **SuperKEKB超伝導電磁石システムの構成**
4. **超伝導電磁石の設計**
5. 超伝導4極電磁石
6. 超伝導補正電磁石
7. 超伝導補正ソレノイド
8. 電磁石クライオスタットと冷却システム
9. まとめ

SuperKEKB加速器

- 周長3km電子・陽電子コライダー
- 2つのビーム蓄積リング
 - 電子リング(e⁻):HER
 - High Energy Ring
 - 7 GeV
 - 陽電子リング(e⁺):LER
 - Low Energy Ring
 - 4 GeV
- ルミノシティーフロンティア
 - ナノビーム衝突方式
 - 設計ルミノシティー
 - KEKBの40倍
 - ✓ KEKB: 当時の世界記録
 - ✓ $L(\text{KEKB})=2.1 \times 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
 - $L(\text{SuperKEKB})= 8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$



KEKB/Belle(KEK) + BaBar(SLAC)
“小林・益川理論”を実験的に証明



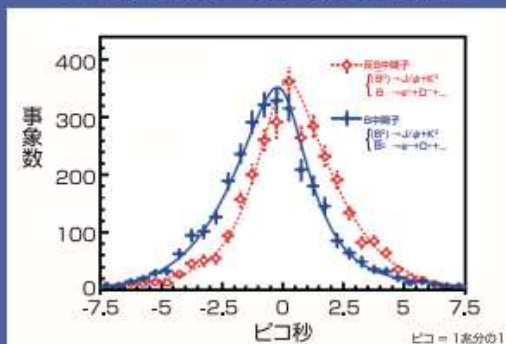
The Nobel Prize in Physics 2008
Yoichiro Nambu, Makoto Kobayashi, Toshihide Maskawa

KEKB加速器・Belle実験での成果

Belle実験で「B中間子におけるCP対称性の破れ」を測定

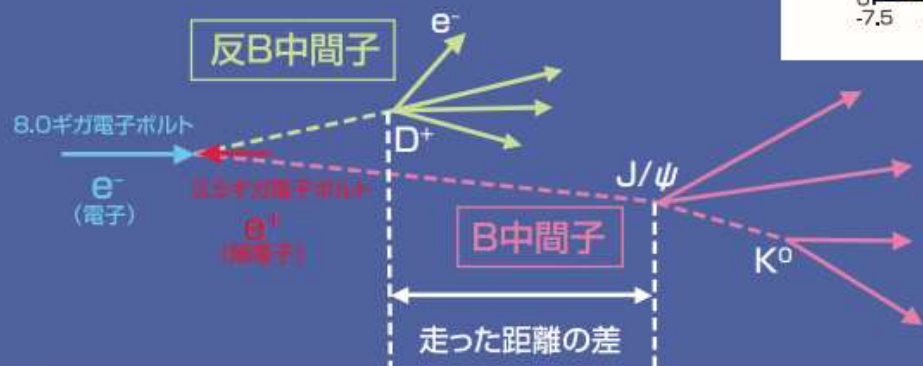
1. B中間子と反B中間子が崩壊するまでの時間の違いを測定します。
2. 電子と陽電子の衝突後にできるB中間子と反B中間子を、走らせた状態で作り出し、走った距離の差から時間の差を求めます。
3. このため、電子と陽電子は異なるエネルギーで衝突させています。

実際にBelle測定器で観測されたB中間子と反B中間子の壊れ方の違い



小林 誠氏

益川 敏英氏



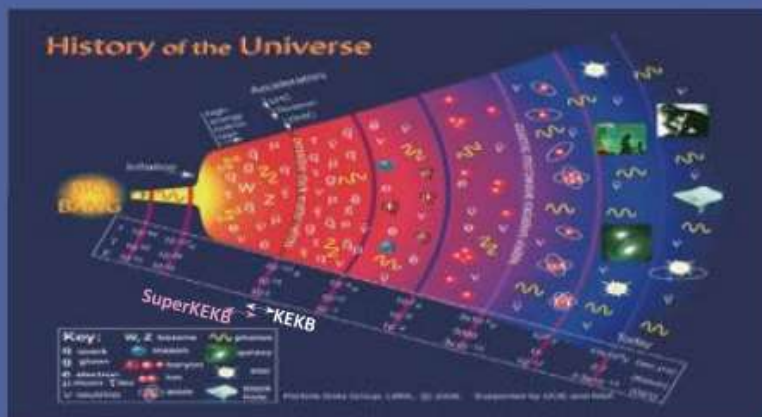
$$\text{崩壊までの時間差} = \text{走った距離の差} \div \text{粒子の速度}$$

- 2008年のノーベル物理学賞は南部陽一郎氏、小林誠氏 (KEK 特別栄誉教授)、益川敏英氏に与えられました。
- 小林・益川両氏は、クォークが6種類あれば「CP対称性の破れ」が説明できるという理論(小林・益川理論)を提唱しました。
- Belle実験はB中間子におけるCP対称性の破れを初めて観測し、小林・益川理論を実験的に証明しました。
- Belle II 実験ではB中間子のCP対称性の破れをさらに精密に測定することにより、宇宙誕生の謎に迫ります。

「もっと知りたい！ SuperKEKB加速器」から

SuperKEKB・Belle-II実験で目指すもの

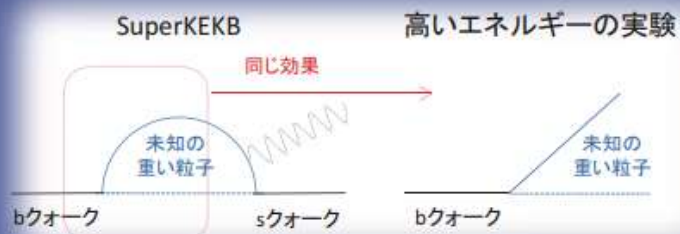
SuperKEKBで新しい物理を探索



SuperKEKBは、高いルミノシティによって
宇宙創成期 (=高いエネルギースケール) に
近づくことができる

新しい物理を探索

なぜ高いルミノシティだと高いエネルギーになるの？



- 不確定性原理により、短い時間内では高いエネルギー状態になることができる
→ 低いエネルギーでも、ごく稀に重い粒子が生成できる
- 数がたくさんあれば (=高いルミノシティ) 重い粒子の効果が観測できる
→ 高いエネルギーであることに相当する

高いエネルギーの実験

相補的 ↔ 未知の重い粒子を直接生成

高いルミノシティの実験

← SuperKEKB

未知の重い粒子を
量子効果によって短時間生成

直接生成できない粒子の効果も
間接的に調べる事ができる

「もっと知りたい！ SuperKEKB加速器」から

ナノビーム方式

衝突点でのビームサイズを鉛直方向にナノメートルまで集束

- $\sigma_y^* \sim 50 \text{ nm}$

- $\sigma_y^* = \sqrt{\beta_y^* \varepsilon_y}$

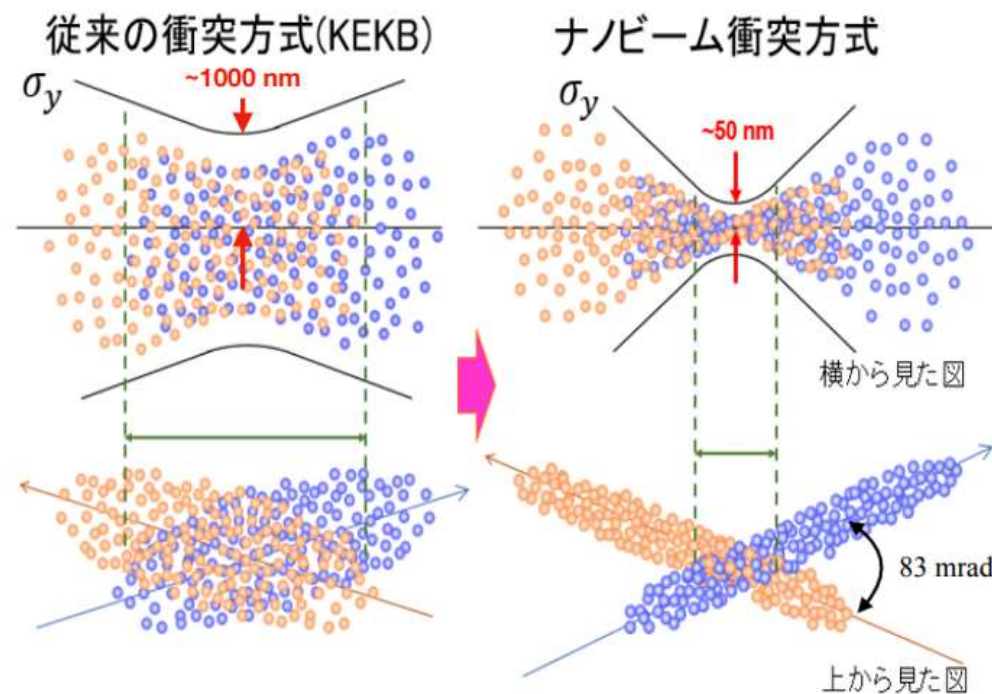
- β_y^* : ビーム衝突点での鉛直方向ベータ関数

- ✓ $\beta_y^* = 0.3 \text{ mm}$

- ε_y : 鉛直方向エミッタンス

- ルミノシティー

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



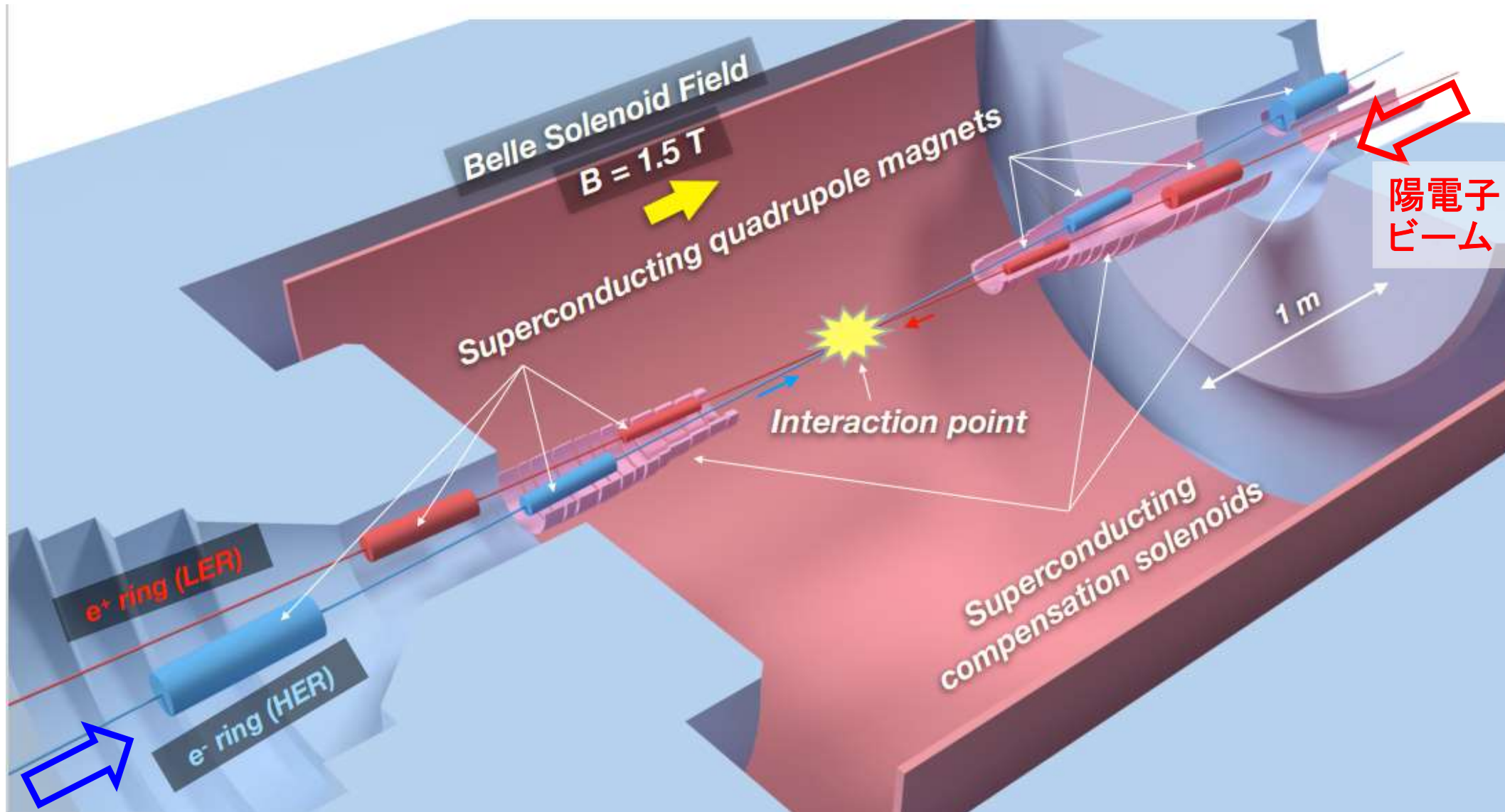
KEKB: LER($I_+ = 1.072 \text{ A}$, $\beta_y^* = 6.5 \text{ mm}$), HER($I_- = 0.76 \text{ A}$, $\beta_y^* = 7.0 \text{ mm}$) ← 到達値

SuperKEKB: LER($I_+ = 3.6 \text{ A}$, $\beta_y^* = 0.27 \text{ mm}$), HER($I_- = 2.6 \text{ A}$, $\beta_y^* = 0.3 \text{ mm}$) ← 設計値

加速器リング内を光速に近い速度で走ってきた電子・陽電子ビームを衝突点でナノメートルサイズまで集束する、

- **強力な4極磁場でビームを集束**

- ✓ 光学的な凸レンズに相当
- ✓ 集束力にビーム断面での位置が関連する
 - ビームが衝突点に入射される前に2つの4極磁場（極性が反転した）でビームを最終形状に集束
 - 1つのビームライン上で衝突点までに2台の強力な4極磁場が必要。衝突点からリングに戻すために更に2台の4極磁場が必要。

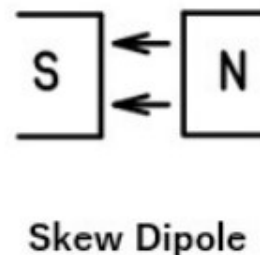
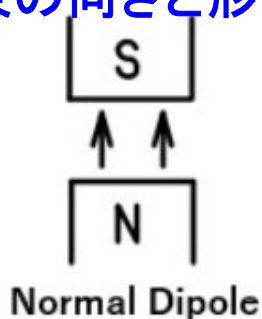


電子
ビーム

加速器用電磁石内での磁場とその形状

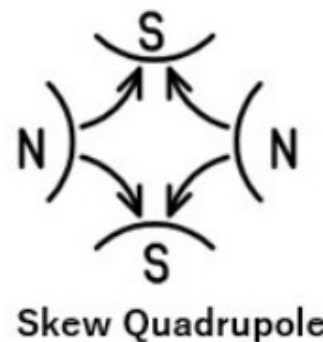
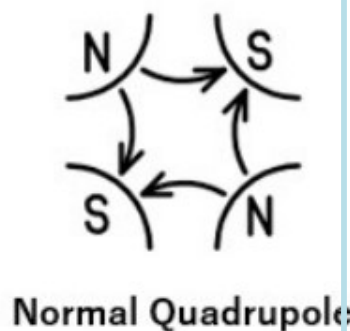
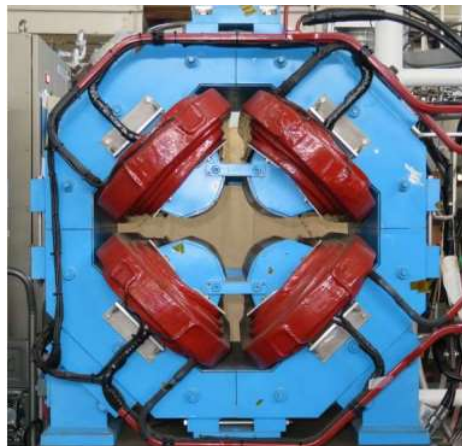
- SuperKEKB加速器リングを構成する電磁石の内98%が常伝導電磁石
磁束の向きと形

2極電磁石
(Dipole)



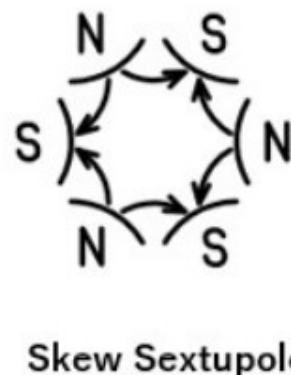
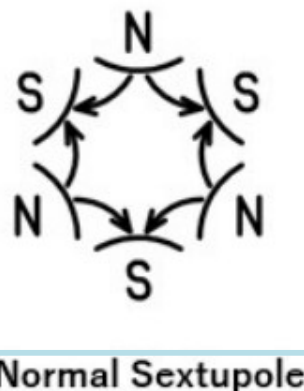
(Skew Dipole: Normal Dipoleを90度回転)

4極電磁石
(Quadrupole)



(Skew Quadrupole: Normal Quadrupoleを45度回転)

6極電磁石
(Sextupole)



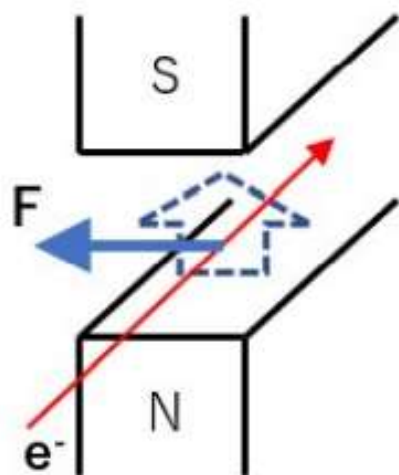
(Skew Sextupole: Normal Sextupoleを30度回転)

加速器用電磁石磁場のビームへの作用

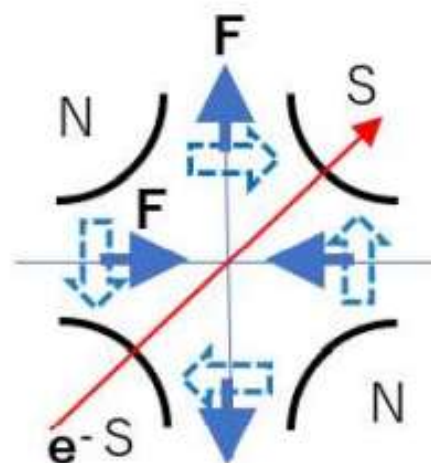
- 荷電粒子が磁場中に速度 \vec{V} で移動する時に荷電粒子に作用する電磁力Lorentz力(\vec{F}):

$$\vec{F} = q(\text{電荷量}) \cdot \vec{V} \times \vec{B} \text{ (磁場)}$$

Normal 2極
電磁石



Normal 4極
電磁石

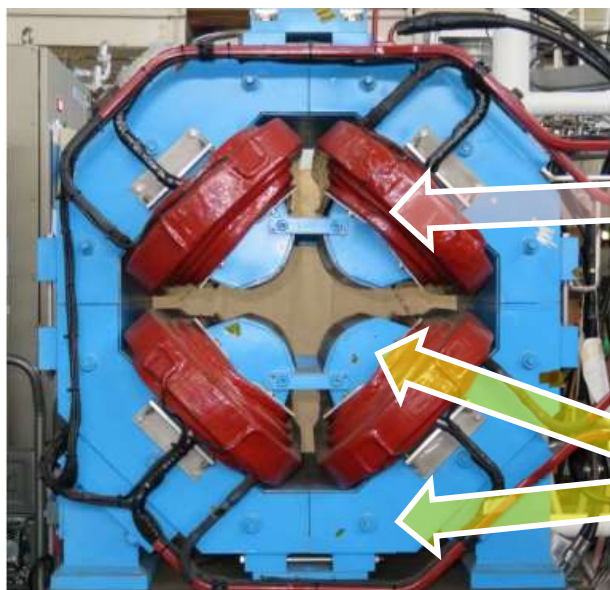


磁束の向きと荷電粒子の進行方向の関係で、

- Normal 2極磁場では、図中では鉛直方向の磁場に対してビームは水平方向左側に曲げられる。
- Normal 4極磁場では、電磁石中心に対して上下方向の位置にある荷電粒子は中心から外側へ、左右方向の位置にある荷電粒子は中心へ引き付けられる力を受ける。

加速器超電磁石の磁場について:

常伝導4極電磁石



磁場発生源:
コイル

鉄ヨーク
(磁気回路)



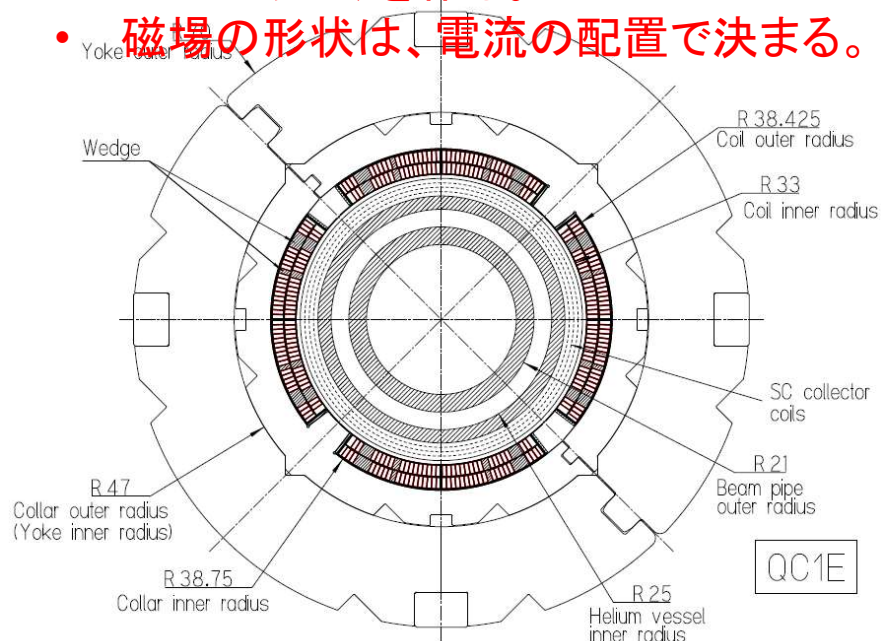
コイル部断面:
銅ホロー導体、導体に
冷却水用穴を持つ。

常伝導電磁石:

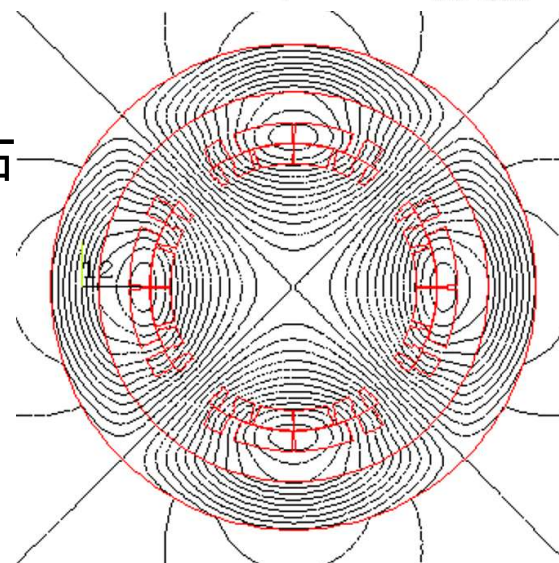
- 鉄ヨークが磁束の形状を作る。
 - ✓ 高い磁場精度(エラー磁場の無い)
電磁石を設計する場合、鉄が磁気飽和しないことを条件とする。
- 磁極の形状、配置が重要。

超伝導4極電磁石

- 超伝導特性を利用して、高磁場(一般的には2T以上)を作る。
- 磁場の形状は、電流の配置で決まる。

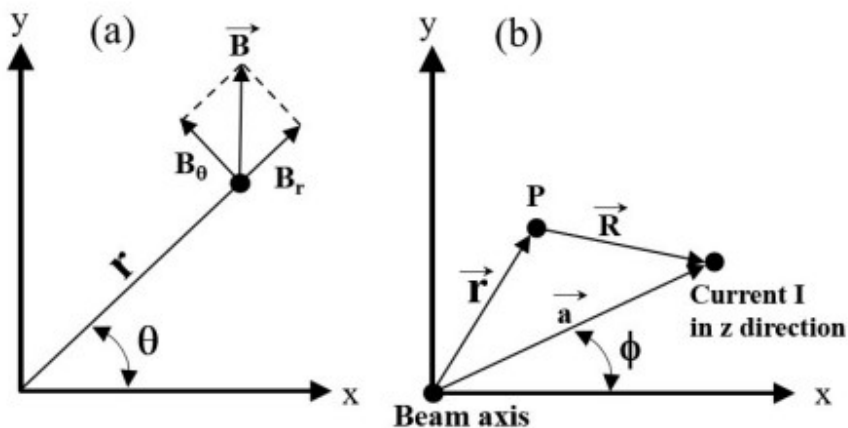


4極電磁石 磁束形状



線電流の作る磁場について:

空間中の1本の電流線がつくる磁場の表記



ビーム軸をz軸とした
(r, theta, z)円筒座標

線電流モデル

線電流が点Pに作るベクトルポテンシャル $A_z(r, \theta)$:

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

I : 電流

μ_0 : 真空の透磁率

R : 電流線素とP点との距離

$$R = \sqrt{a^2 + r^2 - 2ar \cos \phi(-\theta)}$$

$R < a$ の場合、

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

複素数 ξ ($|\xi| < 1$) に対して、

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

A_z の多極展開:

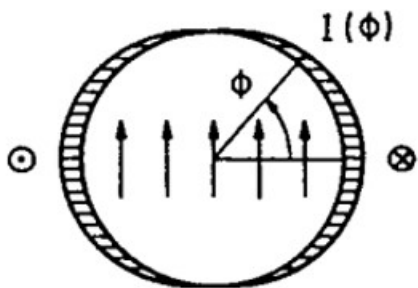
$$A_z(r, \theta) = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left(\frac{r}{a}\right)^n \cos(n(\phi - \theta))$$

加速器用電磁石磁場を作るには？

半径 a の円筒上に線電流が円筒の周方向に角度依存した電流密度を持って並べられた場合を考える。

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

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



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



ベクトルポテンシャル $A_z(r, \theta)$:

$$A_z(r, \theta) = -\frac{\mu_0 I_0}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left(\frac{r}{a}\right)^n \int_0^{2\pi} \cos(m\phi) \cos(n(\phi - \theta)) d\phi$$

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

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

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

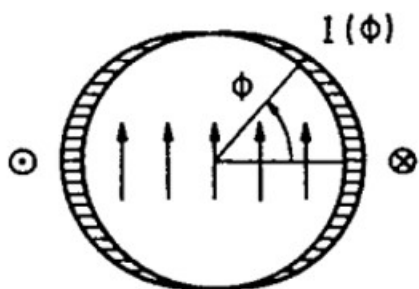
$$A_z(r, \theta) = \frac{\mu_0 I_0}{2} \frac{1}{m} \left(\frac{r}{a}\right)^m \cos(m\theta),$$

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

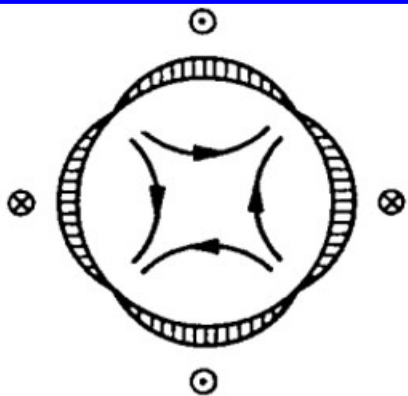
$$B_r(r, \theta) = \frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial \theta} = -\frac{\mu_0 I_0}{2a} \left(\frac{r}{a}\right)^{m-1} \sin(m\theta).$$

加速器用電磁石磁場を作るには？

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



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



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

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

m=1:

$$B_{\theta}(r, \theta) = -\frac{\mu_0 I_0}{2a} \cos \theta, \quad B_r(r, \theta) = -\frac{\mu_0 I_0}{2a} \sin \theta,$$

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

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

2極電磁石
(Dipole Magnet)

m=2:

$$B_{\theta}(r, \theta) = -\frac{\mu_0 I_0}{2a} \left(\frac{r}{a}\right) \cos 2\theta, \quad B_r(r, \theta) = -\frac{\mu_0 I_0}{2a} \left(\frac{r}{a}\right) \sin 2\theta,$$

(同様に) $B_x = -\frac{\mu_0 I_0}{2a^2} r (\sin 2\theta \cos \theta - \cos 2\theta \sin \theta)$

$$= -\frac{\mu_0 I_0}{2a^2} r \sin \theta = -\frac{\mu_0 I_0}{2a^2} x ,$$

$$B_x = -\frac{\mu_0 I_0}{2a^2} r (\sin 2\theta \sin \theta + \cos 2\theta \cos \theta)$$

$$= -\frac{\mu_0 I_0}{2a^2} r \cos \theta = -\frac{\mu_0 I_0}{2a^2} y .$$

4極電磁石
(Quadrupole Magnet)

加速器用電磁石磁場を作るには？

加速器用電磁石のNormal成分とSkew成分

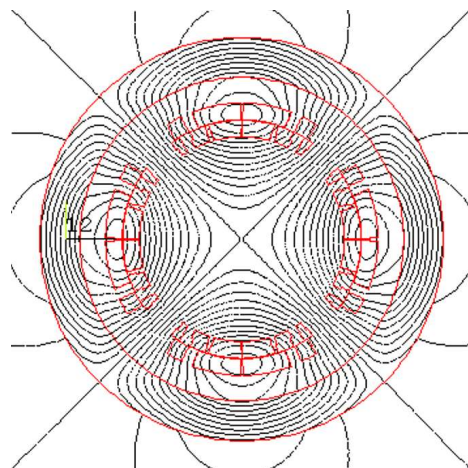
ベクトルポテンシャル $A_z(r, \theta)$ の第 n 項について:

$$A_z(r, \theta) = -\frac{\mu_0 I_0}{2\pi} \frac{1}{n} \left(\frac{r}{a}\right)^n \cos(n(\phi - \theta))$$

$$= -\frac{\mu_0 I_0}{2\pi} \frac{1}{n} \left(\frac{r}{a}\right)^n (\cos(n\phi) \cos(n\theta) - \sin(n\phi) \sin(n\theta))$$

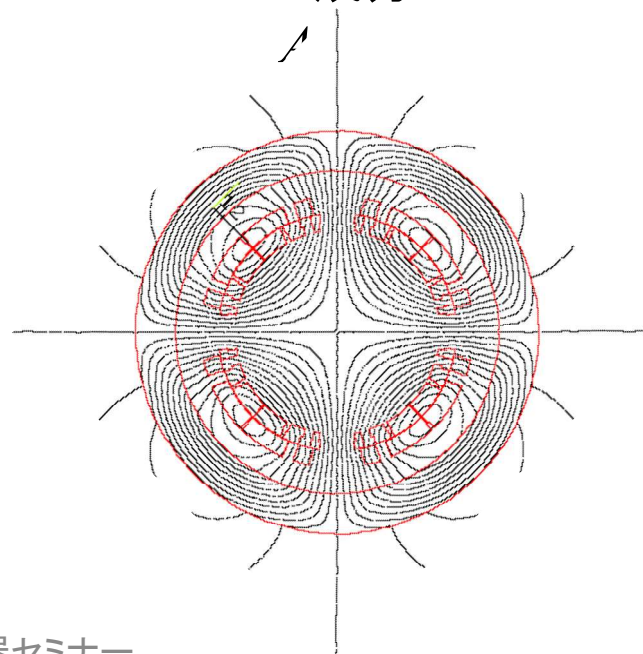
Normal成分

B_n



Skew成分

A

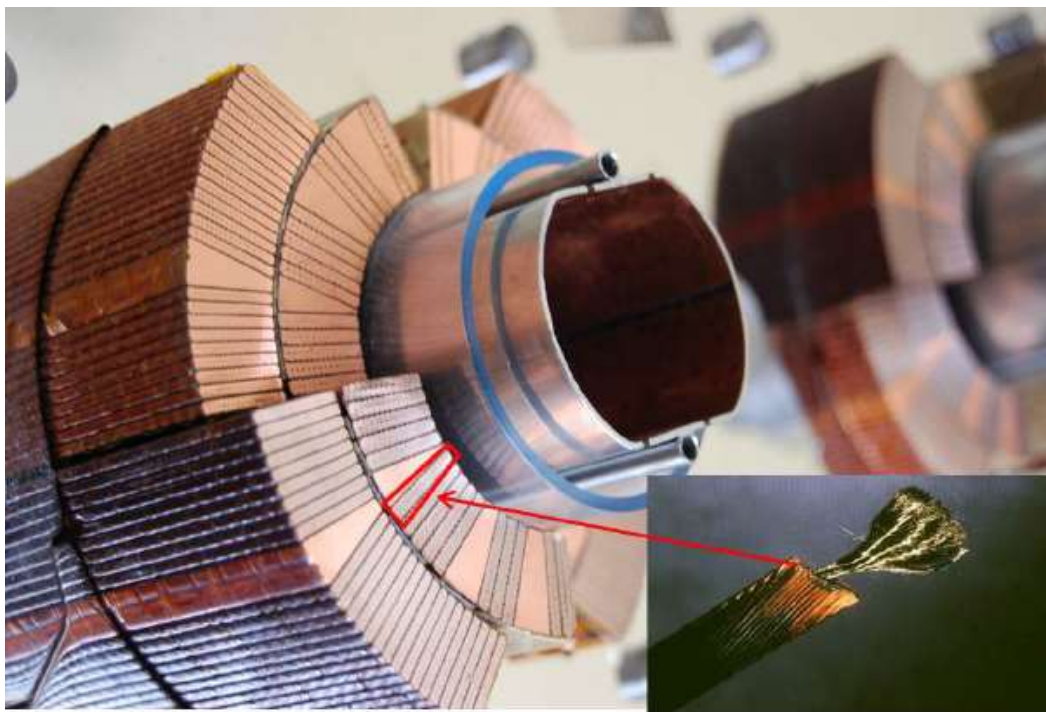




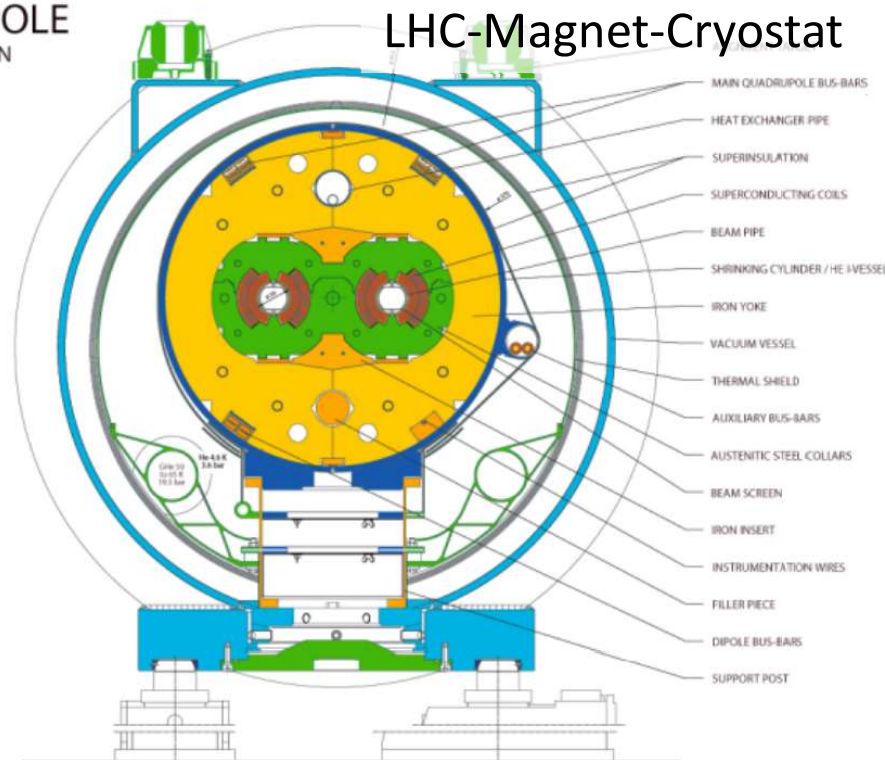
加速器用電磁石磁場について(特に超伝導電磁石)

実際の超伝導電磁石では！

LHC Dipole Magnet (Coil) 断面



LHC DIPOLE CROSS SECTION



超伝導コイルを構成するのは、薄い平板状の超伝導ケーブル(Rutherford type cable)

Cable specification:

Inner layer: # of strands=28, strand dia. =1.065mm, $I_c > 13750$ A @ 10 T, 1.9 K

Outer layer: # of strands=36, strand dia. =0.825 mm, $I_c > 12960$ A @ 9 T, 1.9 K

コイル θ 方向に $\cos(m\theta)$ 電流分布を作ること
は非常に難しい。

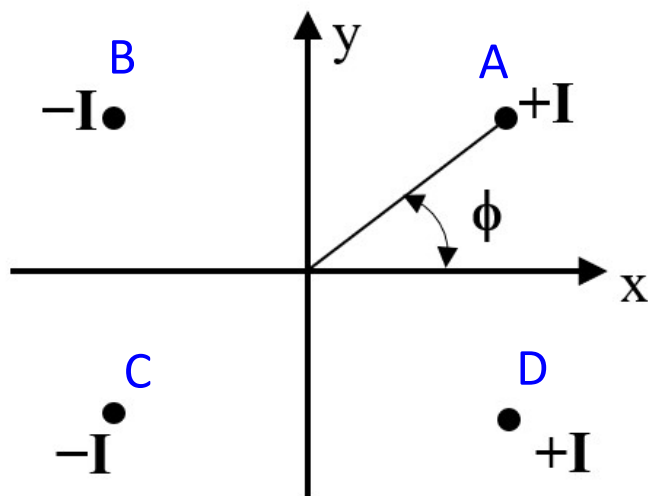
器セミナ



実際の超伝導電磁石では！

単純なコイルモデルで2極磁場を考えてみる。

4本の線電流が、2極対称を持つと左図のような配置となる。



- 原点から各線電流までの距離は同じ。
- 角度は、
 - A: ϕ
 - B: $\pi - \phi$
 - C: $\pi + \phi$
 - D: $-\phi$

2極対称 (Dipole Symmetry)
を持つ4本の線電流

各線の作るベクトルポテンシャルの和は、

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

$$n=1, 3, 5, \dots$$

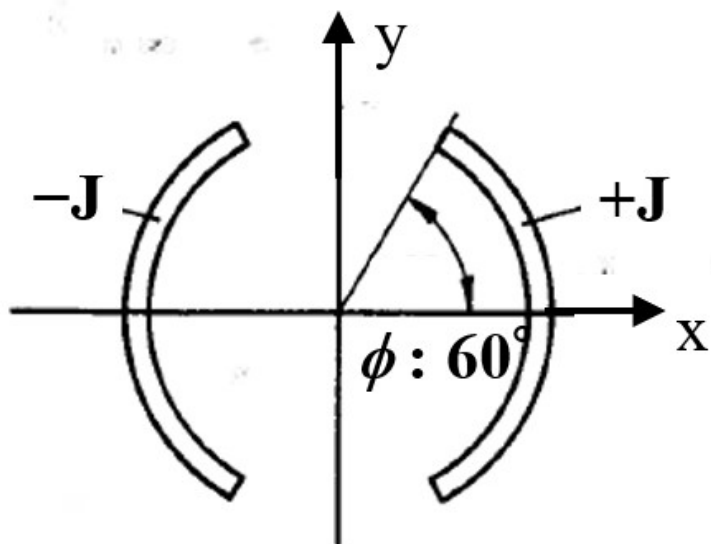
$$\cos(n\phi) + \cos(-n\phi) - \cos(n(\pi - \phi)) - \cos(n(\pi + \phi)) = 4 \cos(n\phi) \text{ for } n = 1, 3, 5, \dots$$

$$= 0 \text{ for } n = 2, 4, 6, \dots$$

$$\sin(n\phi) + \sin(-n\phi) - \sin(n(\pi - \phi)) - \sin(n(\pi + \phi)) = 0 \text{ for } n = 1, 2, 3, 4, \dots$$

実際の超伝導電磁石では！

コイル部内半径 a_1 、外半径 a_2 、コイル部角度 $0^\circ \sim 60^\circ$ 、電流密度 J とすると、



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

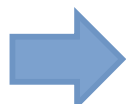
コイル厚み $\Delta a = a_2 - a_1$ がコイルブロック平均半径 $a = (a_1 + a_2)/2$ よりも十分小さければ、

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

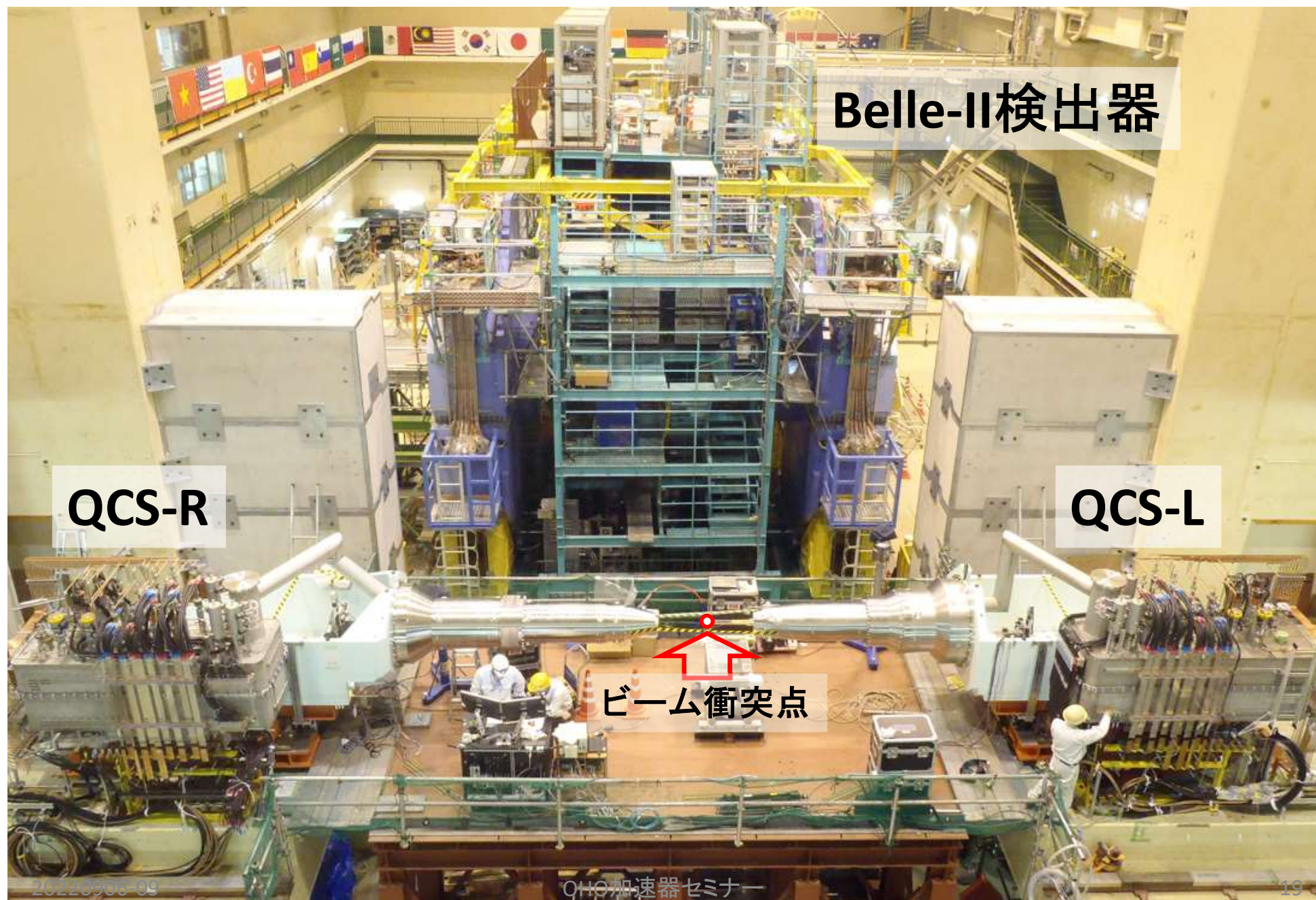
2極対称コイル
ブロック

n 次の多極磁場成分の大きさ: $B_n = \sqrt{B_{\theta,n}^2 + B_{r,n}^2}$

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

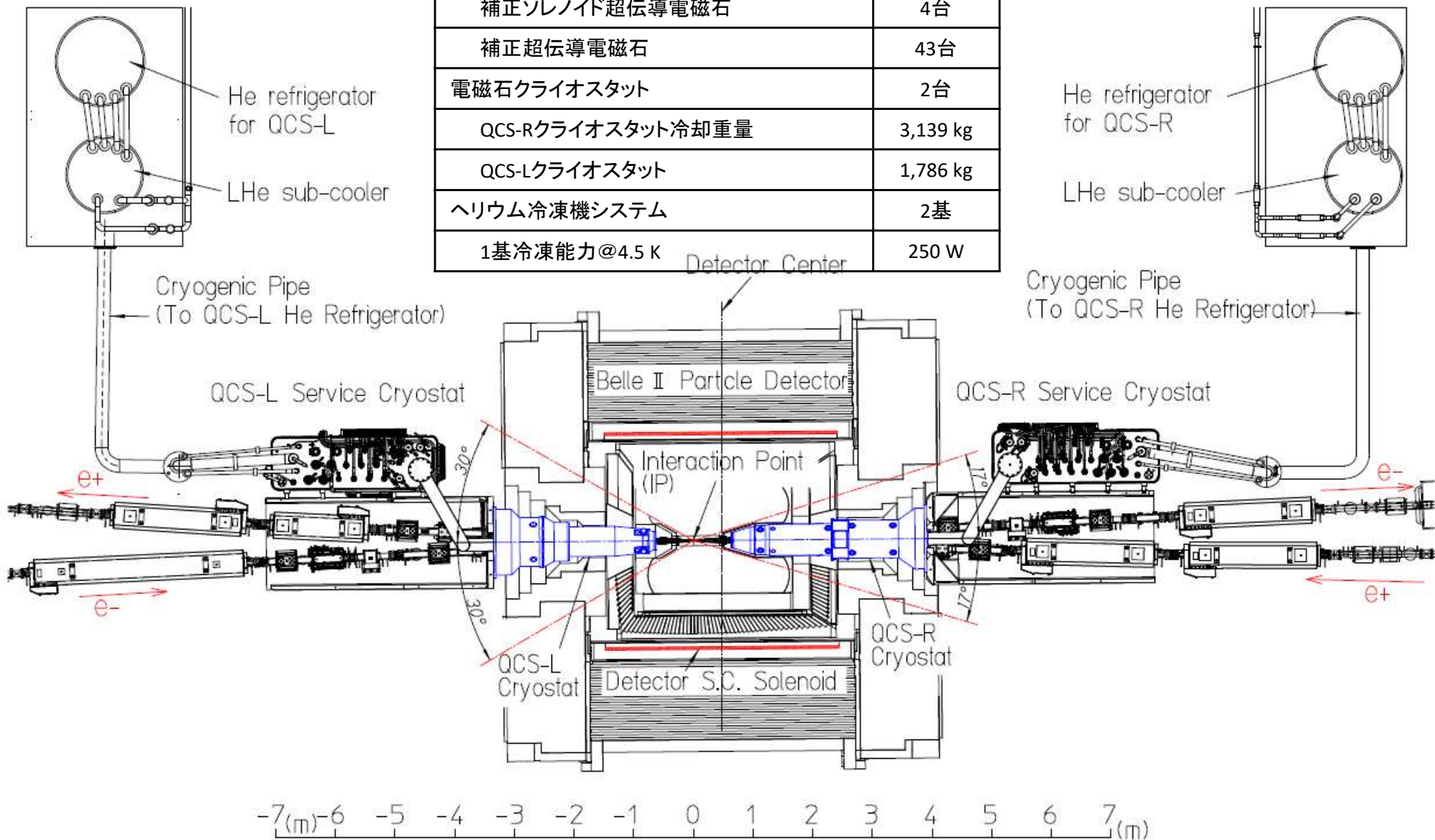
10極磁場: $B_5/B_1 = \frac{1}{5} \left(\frac{R_{ref}}{a}\right)^4 \left(\frac{\sin 300^\circ}{\sin 60^\circ}\right)$ 

$a=30\text{mm}, R_{ref}=20\text{mm}$
 $B_5/B_1 = -3.95 \times 10^{-2}$



SuperKEKB超伝導電磁石システムの構成

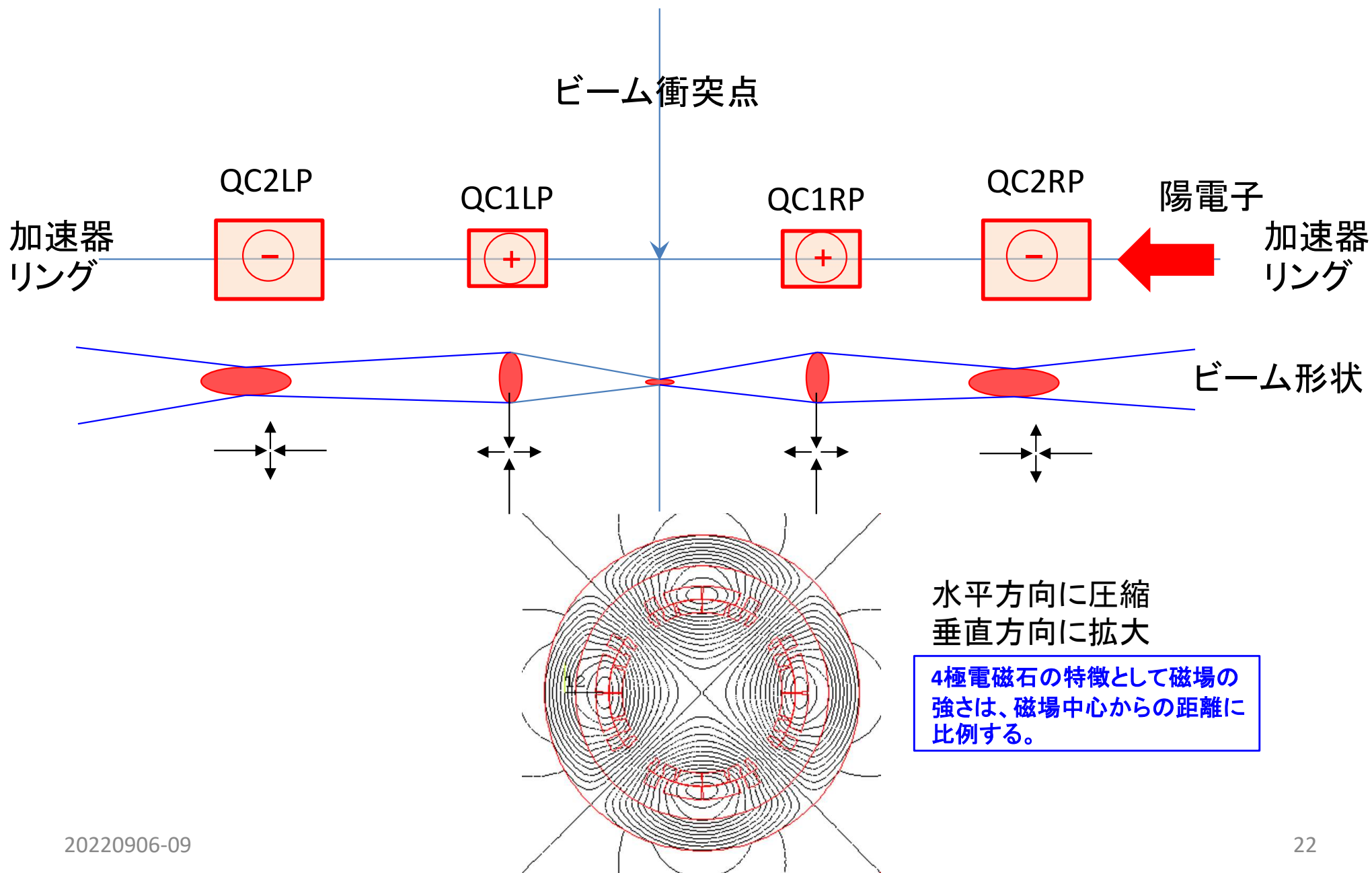
超伝導電磁石	55台
ビーム集束用超伝導4極電磁石	8台
補正ソレノイド超伝導電磁石	4台
補正超伝導電磁石	43台
電磁石クライオスタット	2台
QCS-Rクライオスタット冷却重量	3,139 kg
QCS-Lクライオスタット	1,786 kg
ヘリウム冷凍機システム	2基
1基冷凍能力@4.5 K	250 W

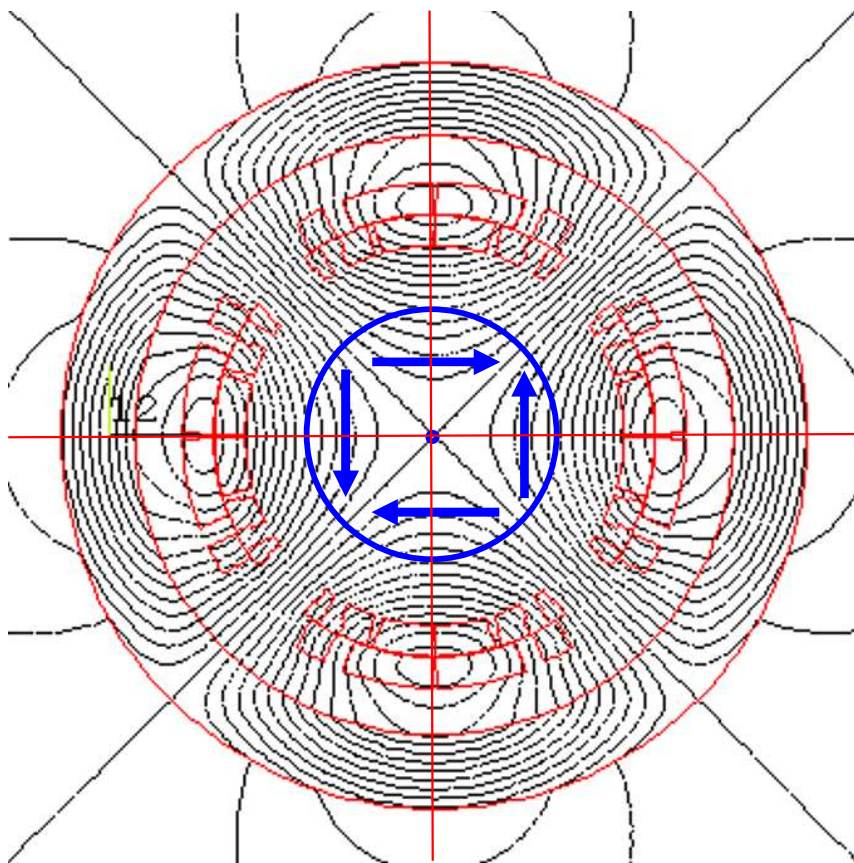


超伝導電磁石の構成: 磁石数=55台

- **主4極超伝導電磁石: 8台**
 - ビーム最終集束、ダブレット配置
- **補正超伝導電磁石: 35台**
 - 各主4極磁石にビームに対する磁場中心と磁場の傾きを調整する補正電磁石 b_1 、 a_1 、 a_2 が組み込まれている。(24台)
 - 多極磁場で4極磁場を微調整。6極補正電磁石と8極補正電磁石。
 - 主4極磁石1台当たり4台~5台組み込まれている。
- **補正超伝導電ソレノイド: 4台**
 - Belle IIソレノイド磁場(1.5 T)を打ち消す。
- **主4極磁石漏れ磁場キャンセル超伝導電磁石: 8台**
 - 陽電子ビームライン衝突点側空芯4極磁石からの漏れ磁場他極成分を打ち消す。

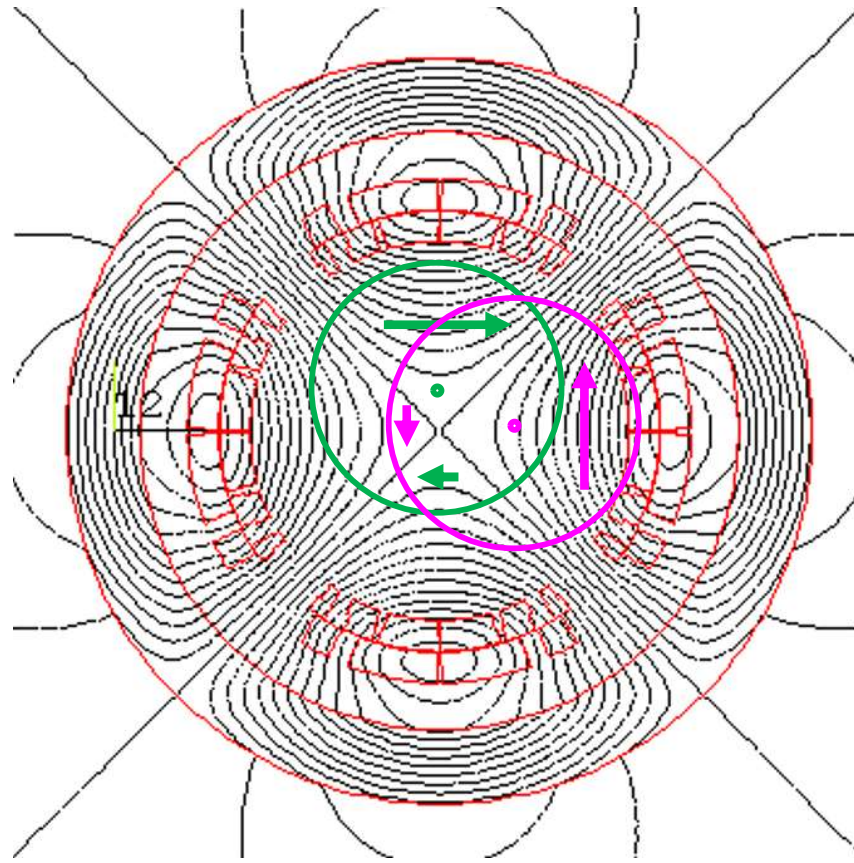
SuperKEKB超伝導電磁石システムの構成





ビームを円形状と仮定:

- 円の中心と4極磁場の中心が一致
- 水平、垂直各方向の磁場の和はゼロ

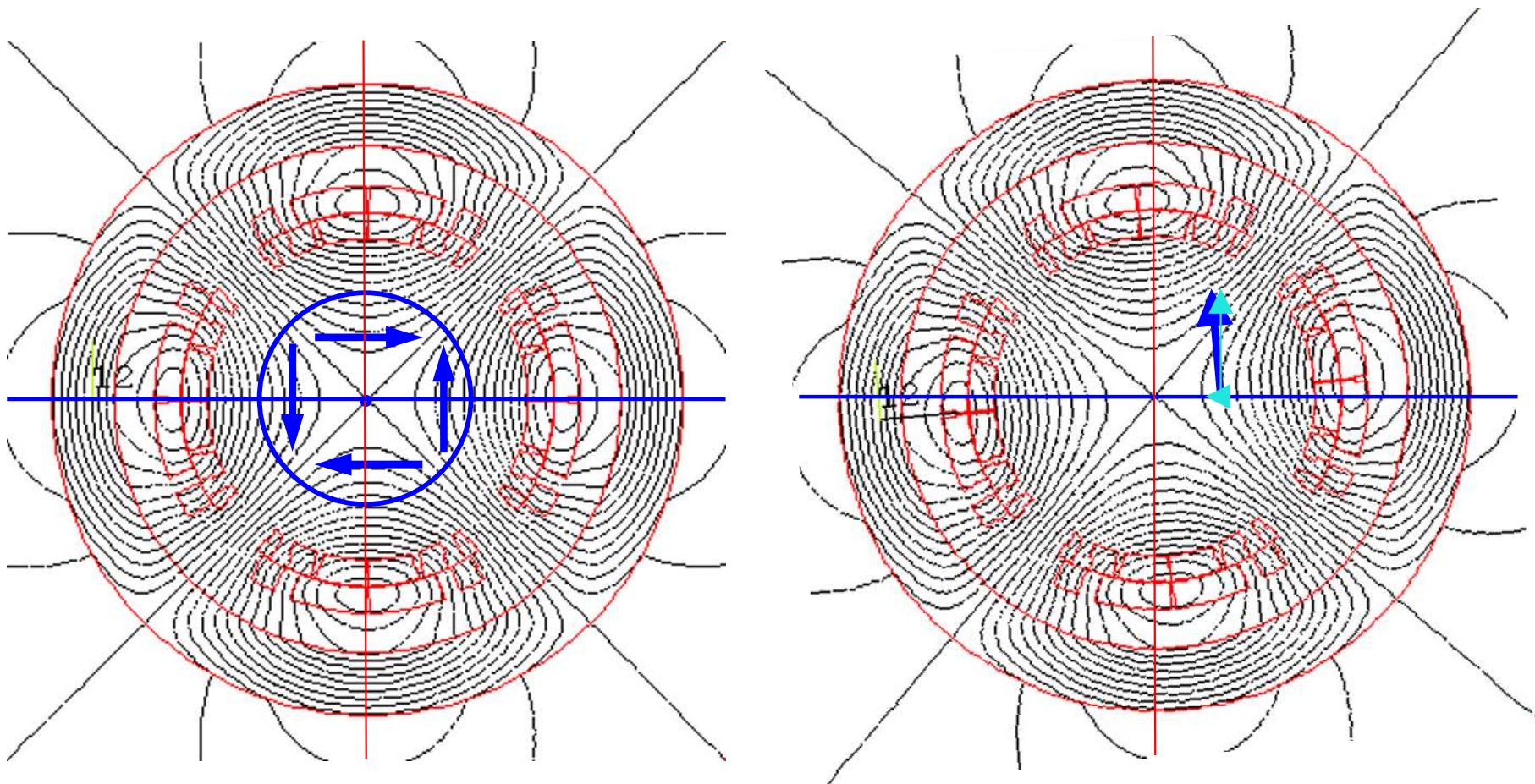


ビーム中心が磁場中心より上下方向にずれる:

- ビームは水平方向の磁場を感じる。
 - Skew dipole (a_1)

ビーム中心が磁場中心より左右方向にずれる:

- ビームは垂直方向の磁場を感じる。
 - Normal dipole (b_1)



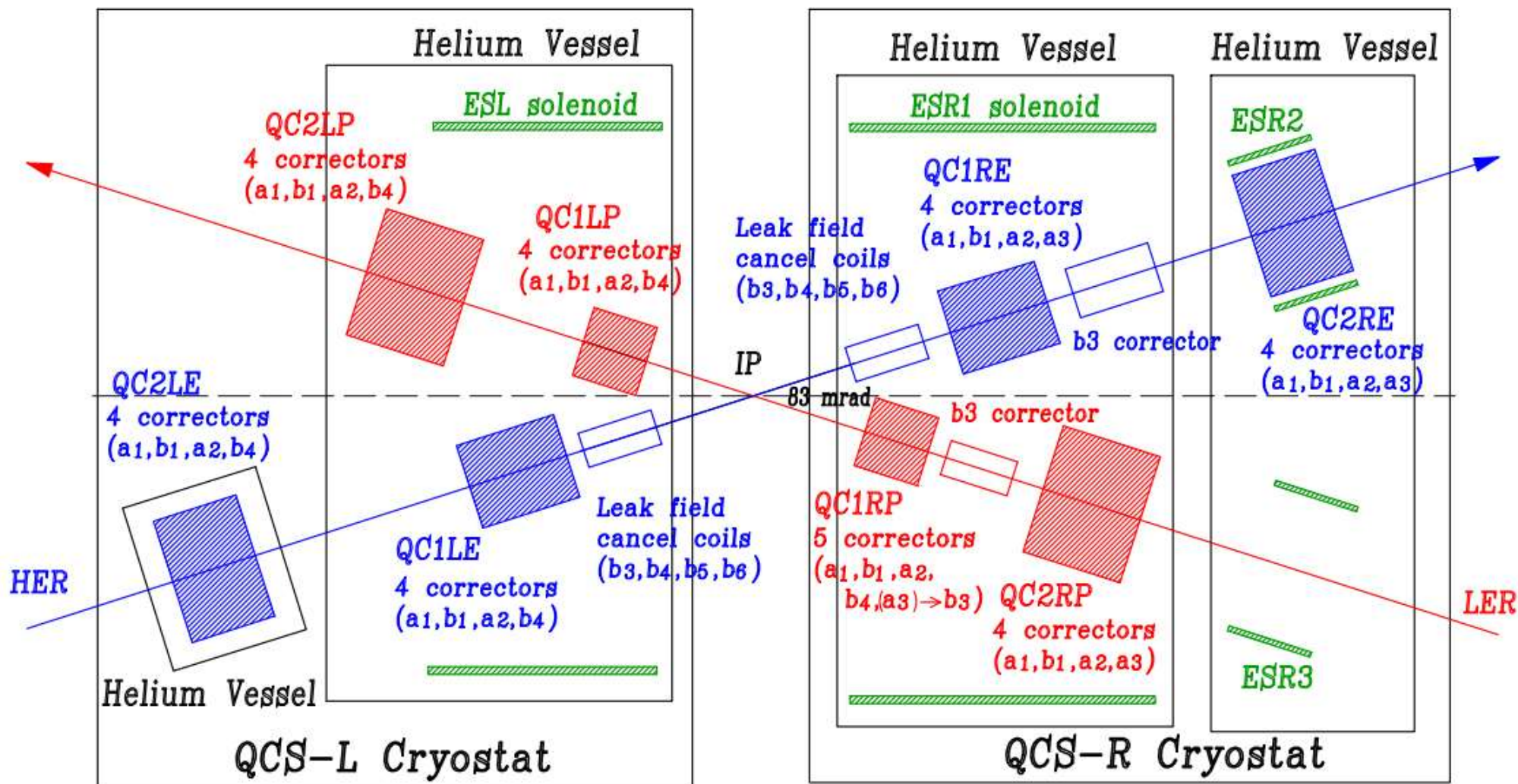
4極電磁石が水平・垂直に正しく配置:

- 超伝導コイルの組立製作誤差が無い
 - $\theta=0^\circ$ では、磁場は垂直成分のみ

4極電磁石が水平・垂直面に対して回転して配置:

- ビームは、 $\theta=0^\circ$ で垂直・水平磁場成分を感じる。
 - 水平4極磁場成分 = Skew quadrupole (a_2)

SuperKEKB超伝導電磁石システムの構成

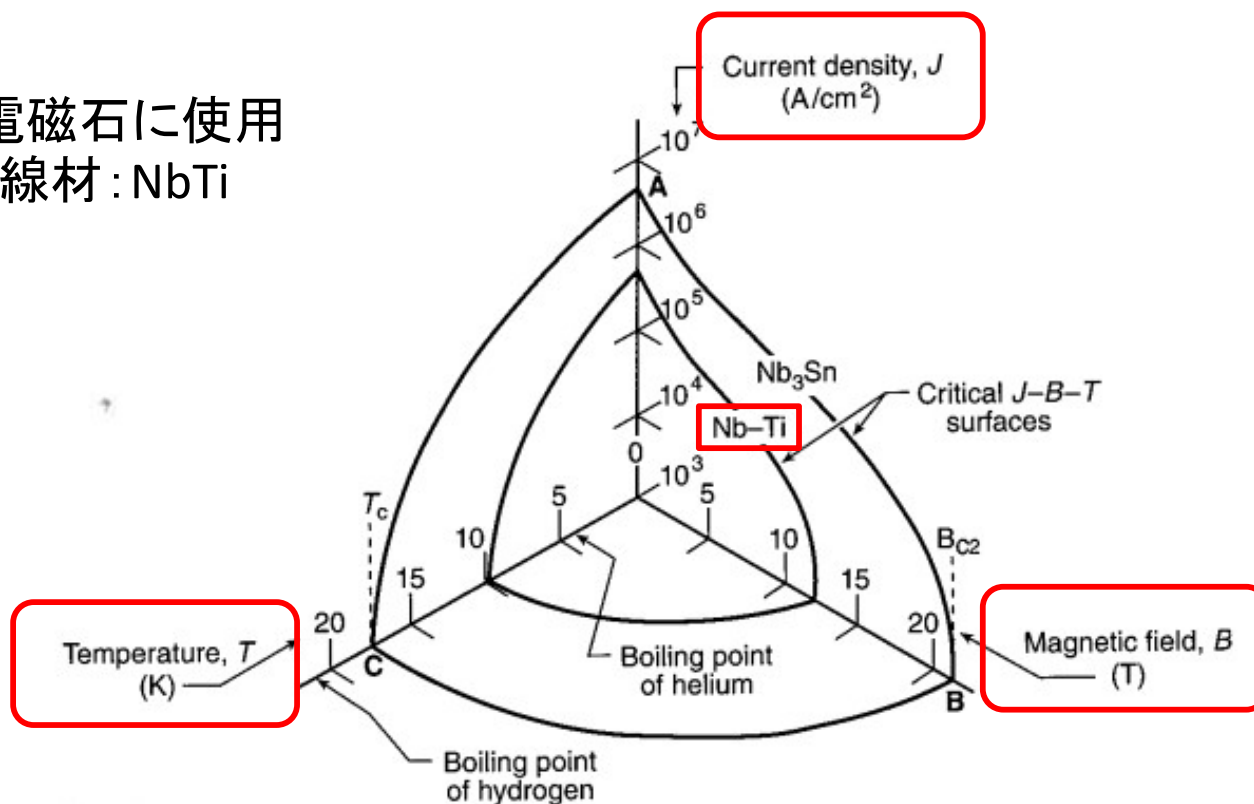


超伝導電磁石の設計

超伝導電磁石設計の制約条件(工学的な見地から)

- 電磁石クライオスタット設計上の空間的・熱的な制約
- IR加速器電磁石への背景磁場分布

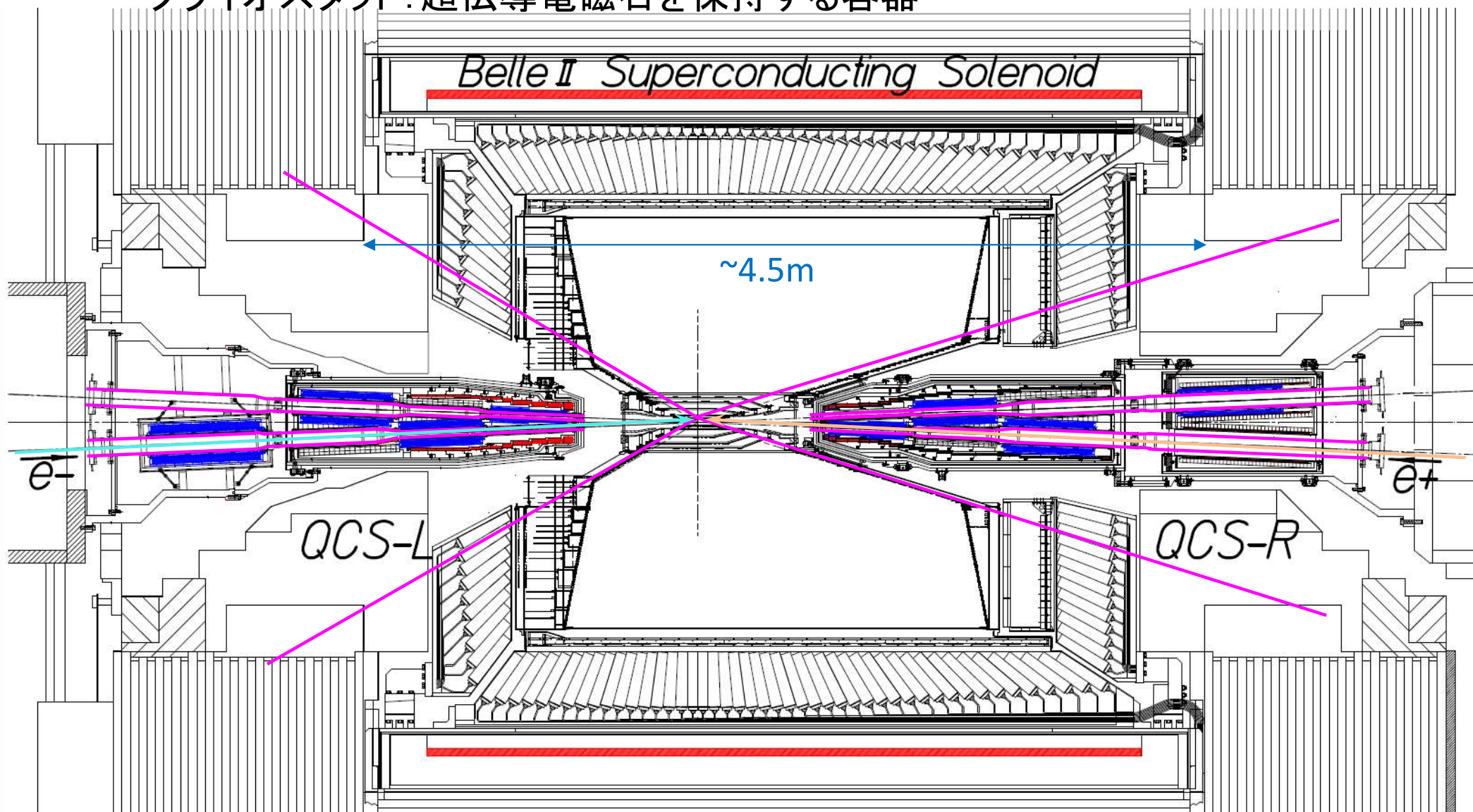
超伝導電磁石に使用
している線材: NbTi



超伝導電磁石の設計

電磁石クライオスタットの設計上の空間的・熱的制約

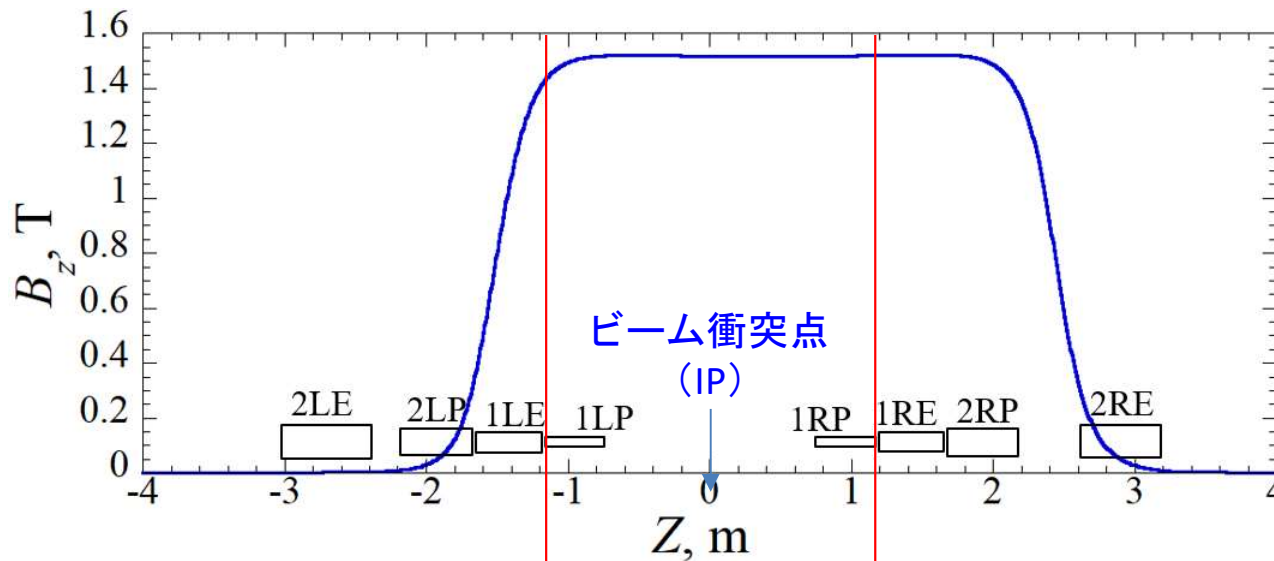
- クライオスタット: 超伝導電磁石を保持する容器



主4極超伝導電磁石

IR加速器電磁石への背景磁場分布

- Belle-II超伝導ソレノイド磁場の影響
 - Belle-IIソレノイド単体は、検出器内で非常に均一な1.5Tの磁場を発生する。
 - ソレノイド磁場の強弱はあるが、加速器用超伝導電磁石はこの磁場下で運転される。
 - ソレノイド磁場は、ビームの運動に対しても影響を与える。



ビーム衝突点での磁場設計

- Belle-IIソレノイド磁場は、積分値として加速器ビームライン上で打ち消す。
 - QC2E~QC1E: Belle-IIソレノイド磁場の分布を補正ソレノイドで打ち消す。
 - ✓ 4極電磁石は磁気ヨーク持つ。
 - QC1P~IP: Belle-IIソレノイド積分磁場をQC1Pの周りに設置された補正ソレノイドで打ち消す。
 - ✓ QC1P超伝導4極電磁石は磁気ヨークを持たない。