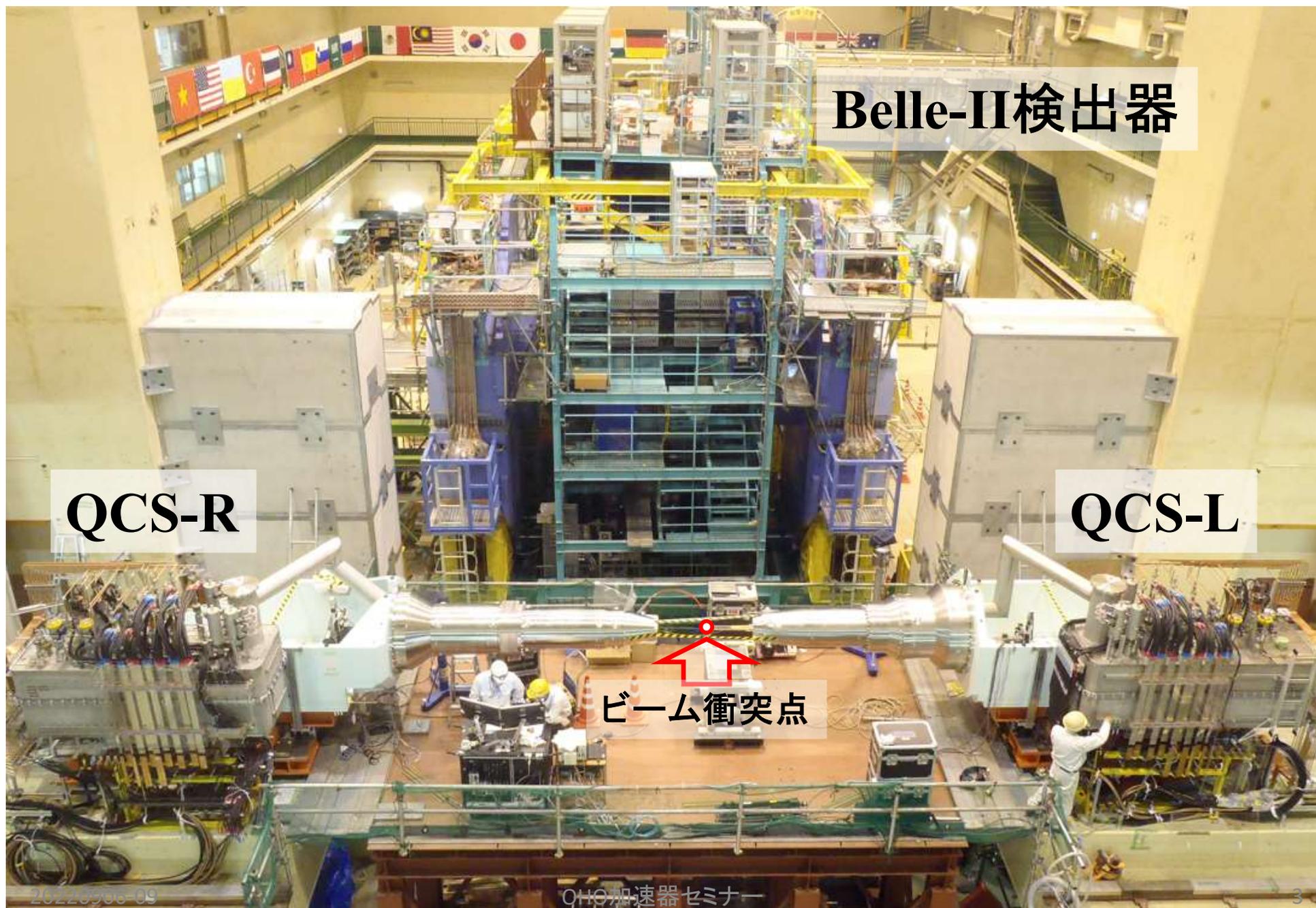


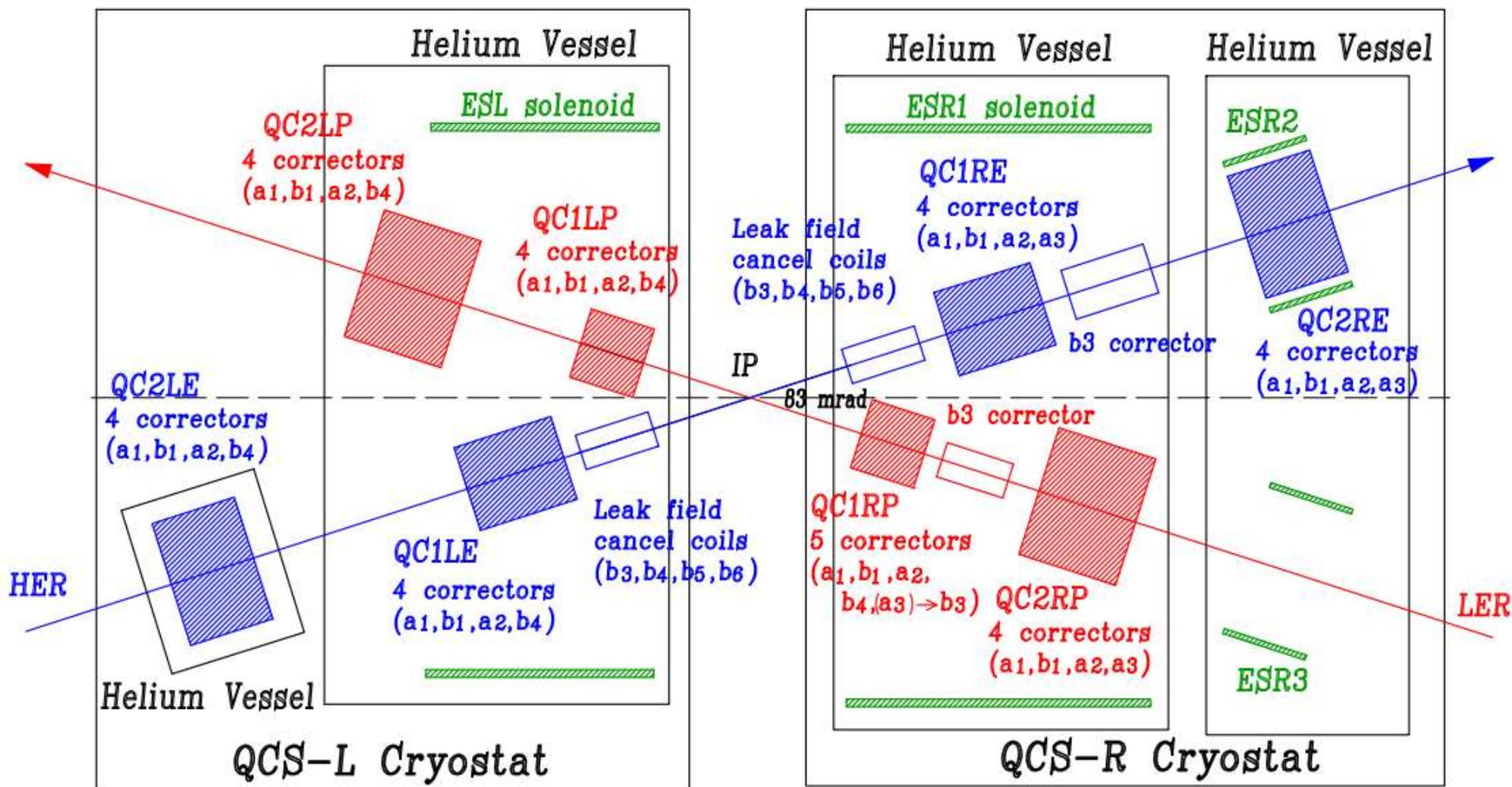
SuperKEKB加速器ビーム衝突点用 超伝導電磁石(2)

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超伝導電磁石システムの構成

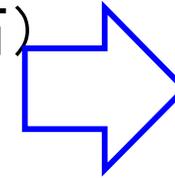


超伝導電磁石: 55台、電磁石クライオスタット: 2台

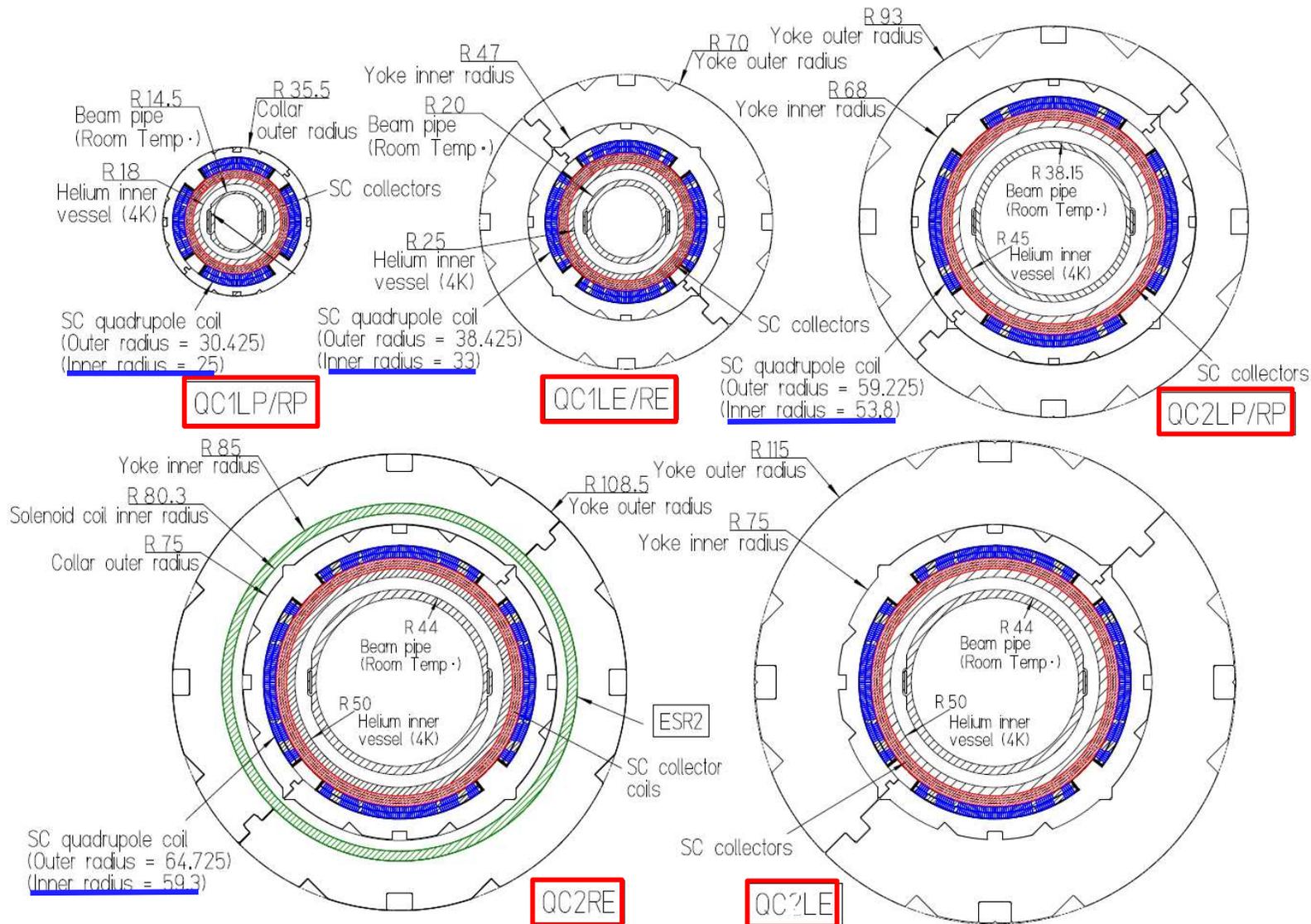
超伝導4極電磁石

超伝導4極電磁石 (システムの中で最も重要な電磁石)

- 陽電子ビームライン4台、電子ビームライン4台
- ✓ 補正超伝導電磁石が組み込まれている。

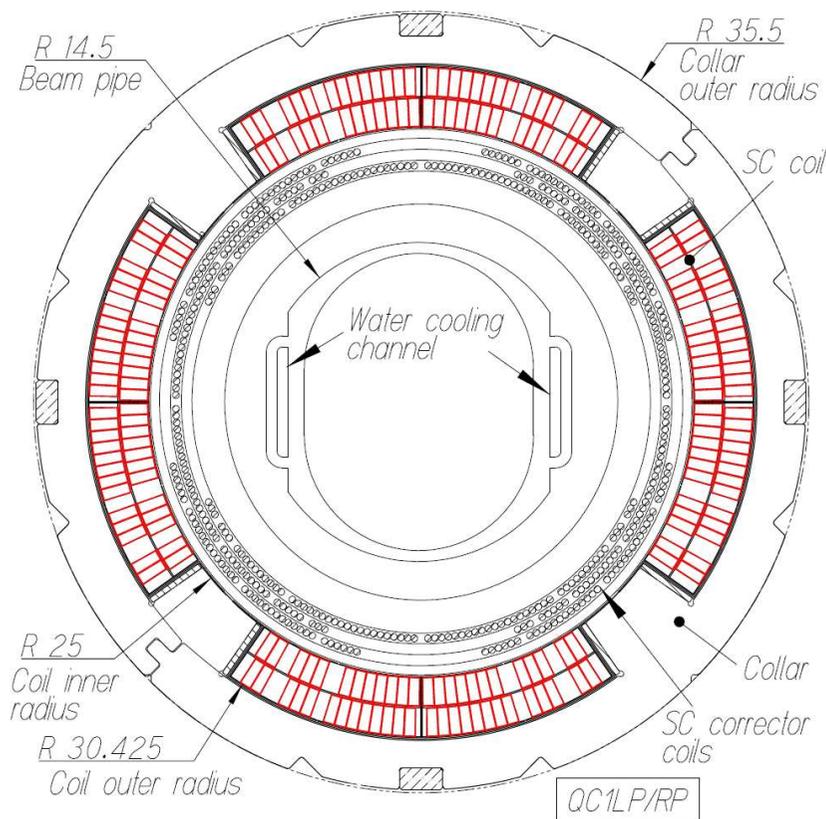


電磁石の構成は概ね同じ



超伝導4極電磁石

IPに最も近い超伝導4極電磁石: QC1P (LER陽電子ビームライン)



QC1P断面設計

QC1P電磁石パラメータ

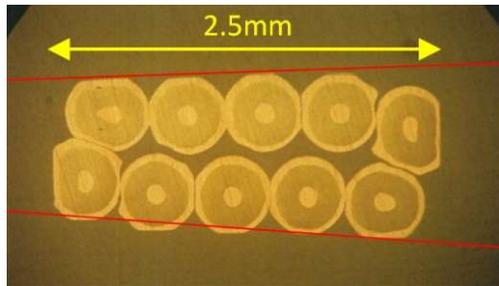
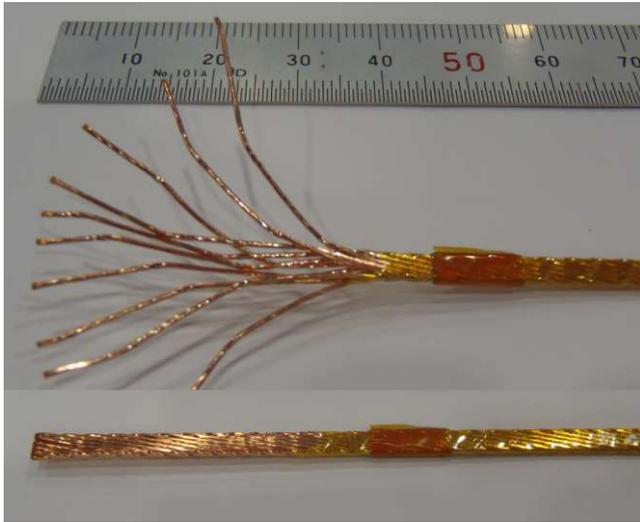
電磁石タイプ	磁性体ヨーク無し 2層コイル
超伝導コイル最内半径	25.0 mm
超伝導コイル最外半径	30.4 mm
1極当たりターン数	25
磁場勾配	76.37 T/m
設計電流	1800 A
実効磁場長	333.6 mm
ソレノイド磁場有リコイル最高磁場	4.56 T
臨界電流 I_c に対する運転負荷率	72.3 %

超伝導ケーブルパラメータ

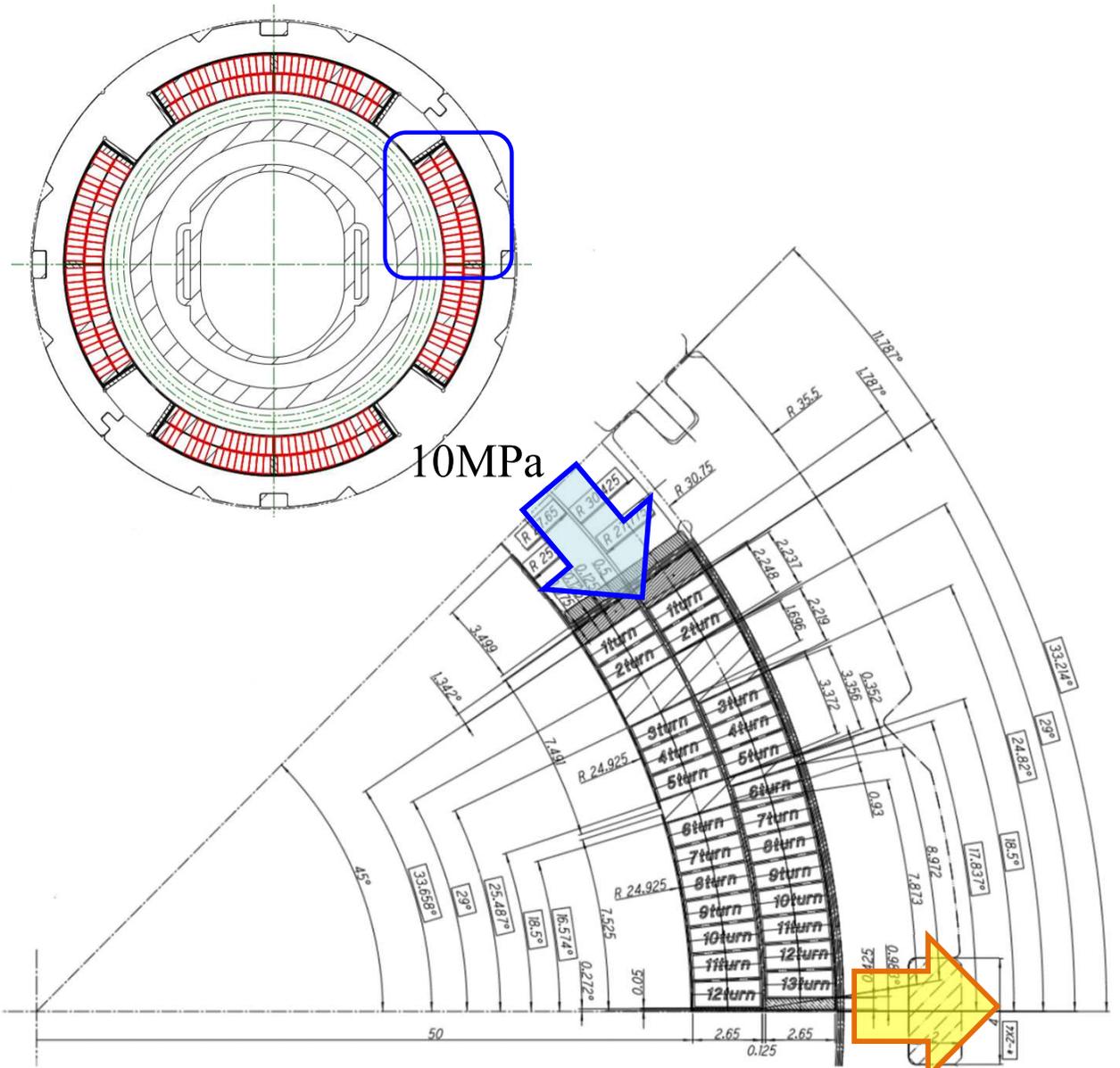
ストランド		ケーブル	
線径	0.5 mm	高さ	2.5 mm
Cu/SC 比	1.0	厚み	0.93 mm
フィラメント径	7.7 μ m	Keyston角度	2.14°
フィラメント数	2113	ストランド数	10
RRR	≥ 150	I_c at 5T, 4.2 K	3170 A
I_c at 5T, 4.2 K	317 A		

超伝導4極電磁石

QC1P 4極電磁石で使用された超伝導ケーブル



ケーブルサイズ = 2.5 mm × 0.93 mm
 ケーブル角度 = 2.14度
 設計電流値 = 1800 A @ 4.7 K, 4.56 T



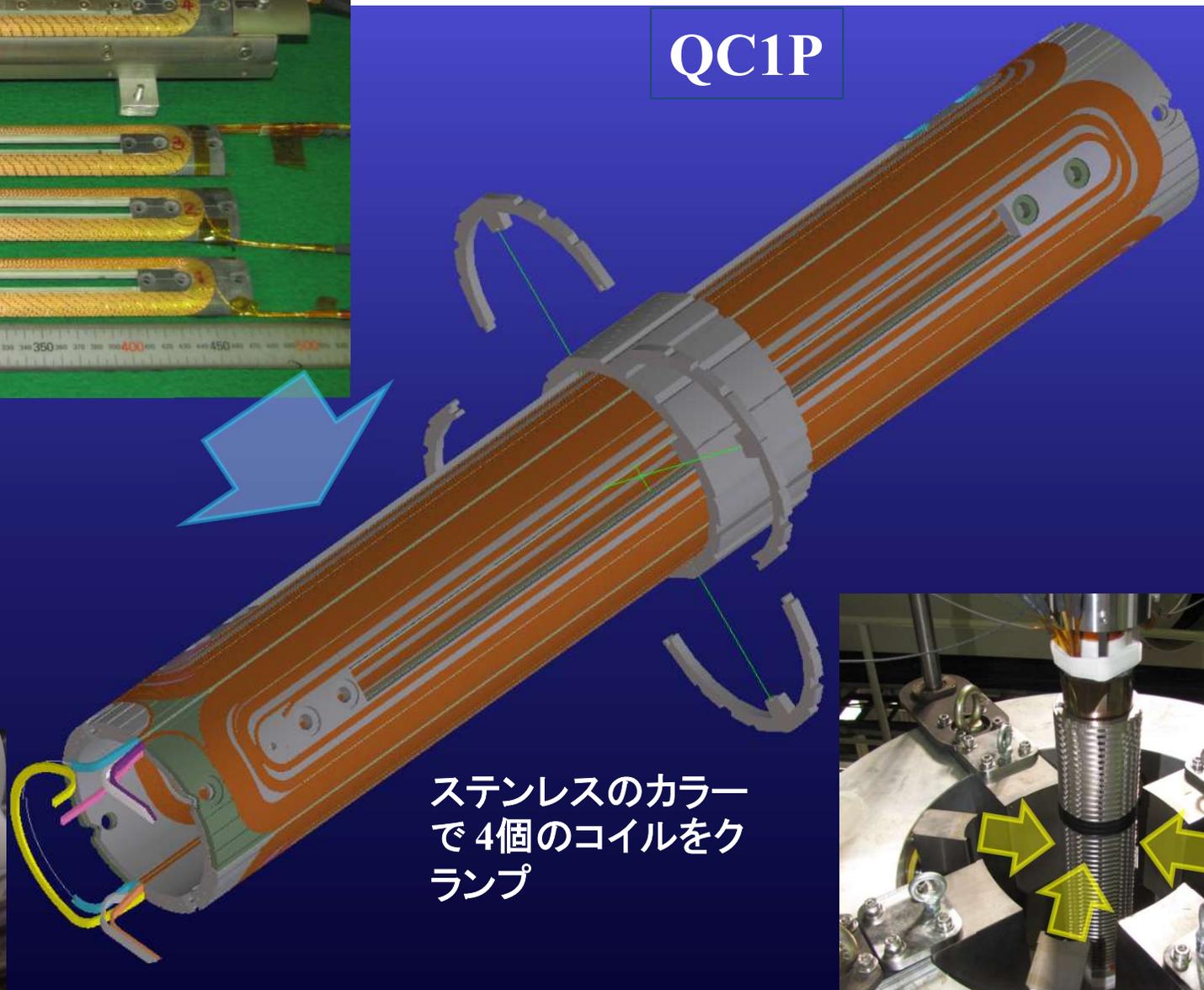
コイル断面形状: 強力な電磁力に耐えるようにアーチ型

0.6 MPa

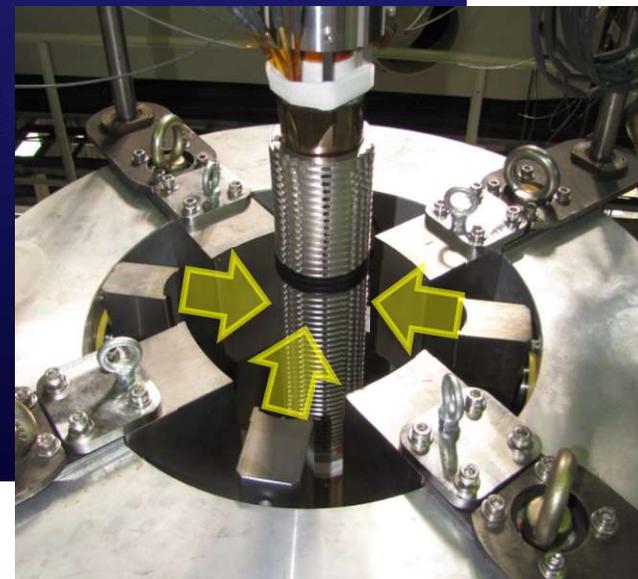
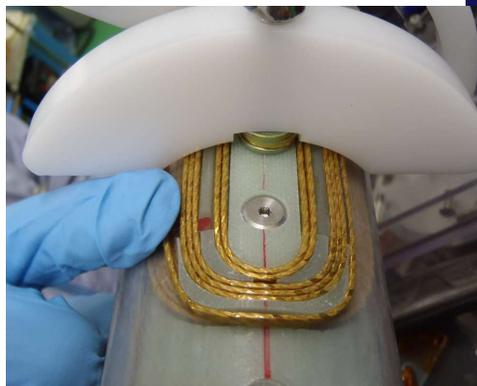
超伝導4極電磁石



QC1P

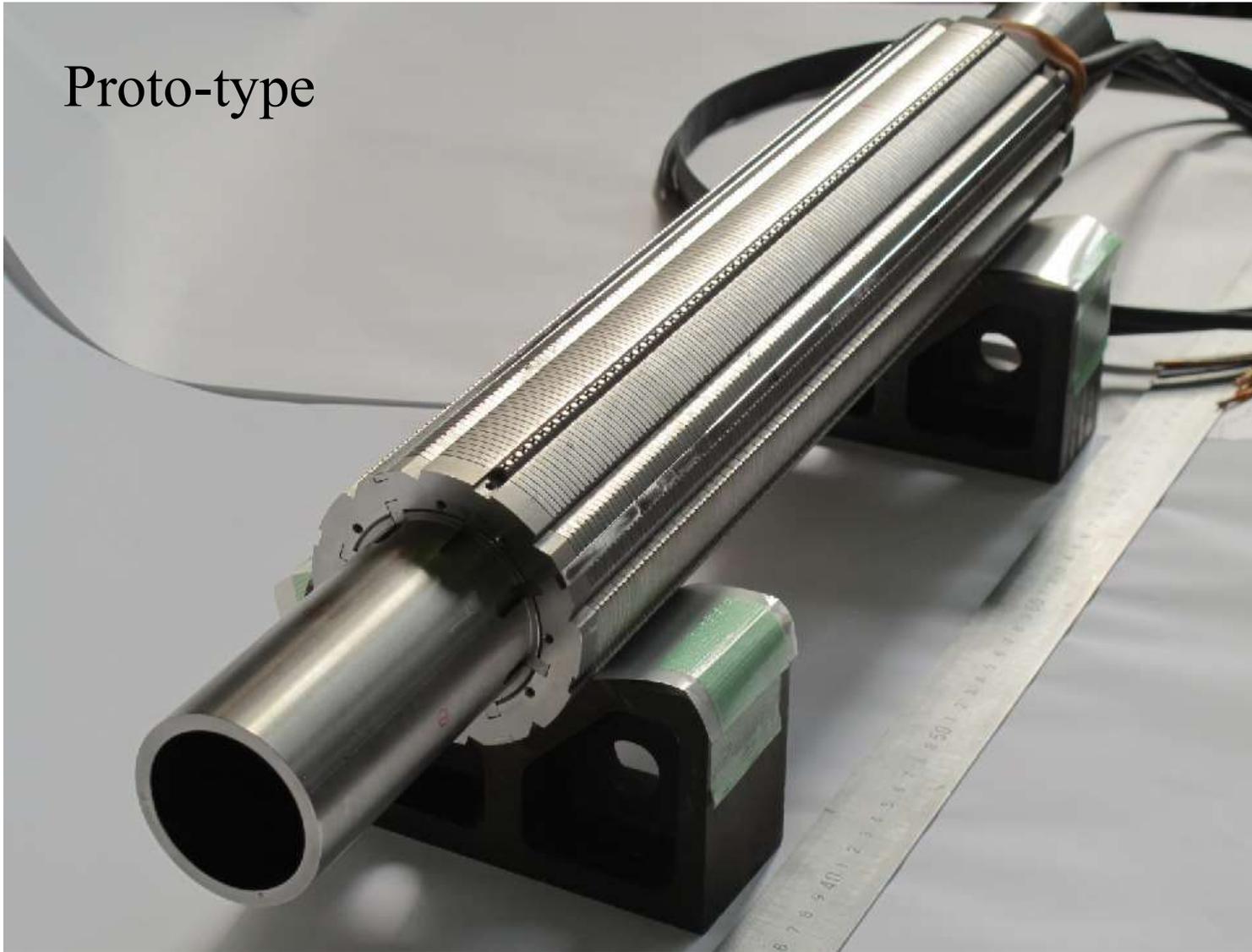


ステンレスのカラー
で4個のコイルをク
ランプ



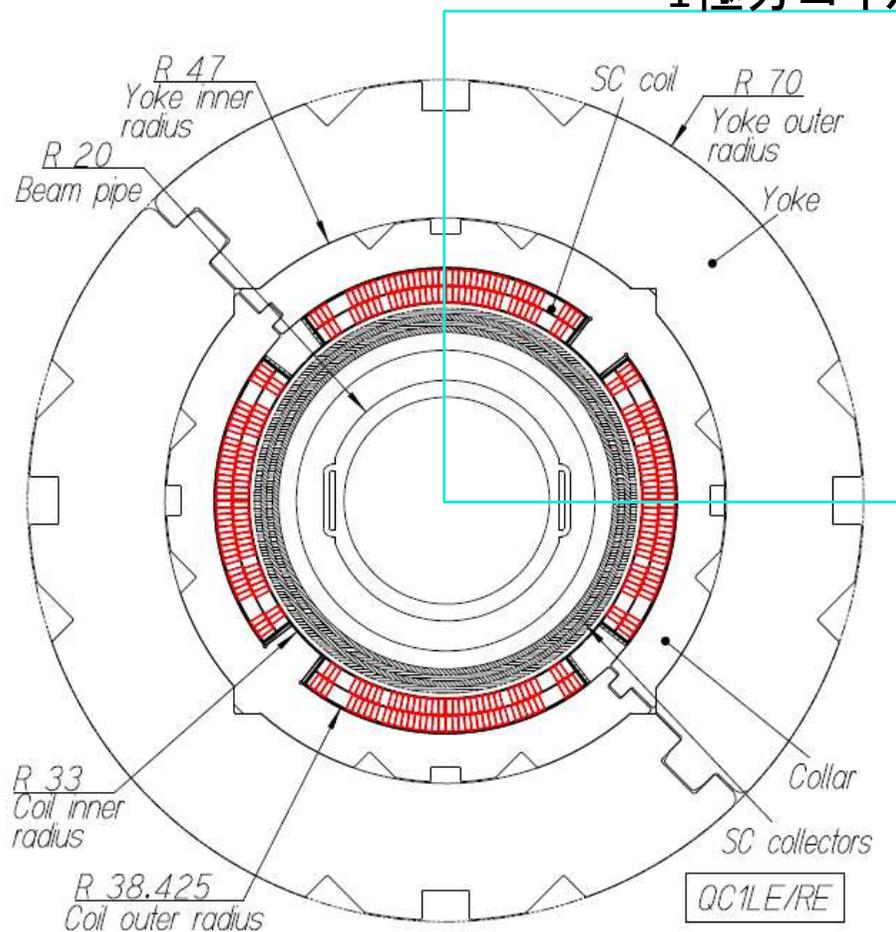
QC1P

Proto-type



超伝導4極電磁石: QC1E (HER電子ビームライン)

1極分コイル



QC1E断面設計

QC1E電磁石パラメータ

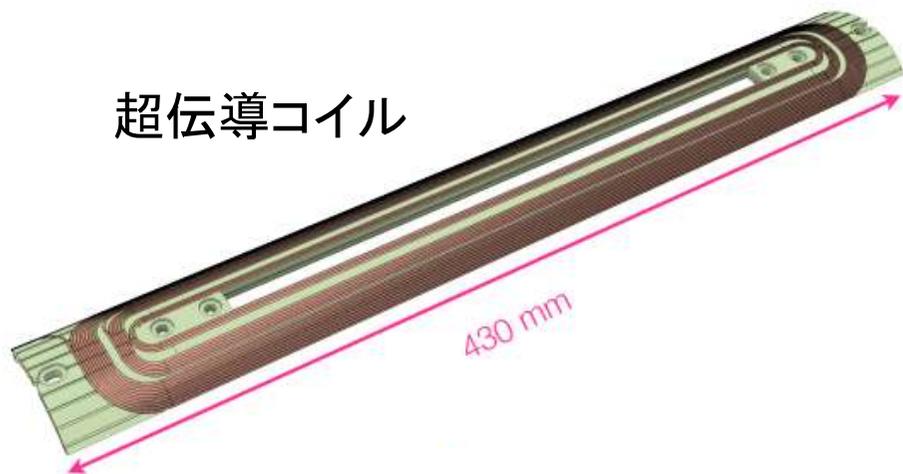
電磁石タイプ	磁性体ヨーク(Permendur) 2層コイル
超伝導コイル最内半径	33.0 mm
超伝導コイル最外半径	38.4 mm
1極当たりターン数	34
磁場勾配	91.57 T/m
設計電流	2000 A
実効磁場長	373.1 mm
コイル最高磁場	3.5 T
臨界電流 I_c に対する運転負荷率	73.4 %

超伝導ケーブルパラメータ

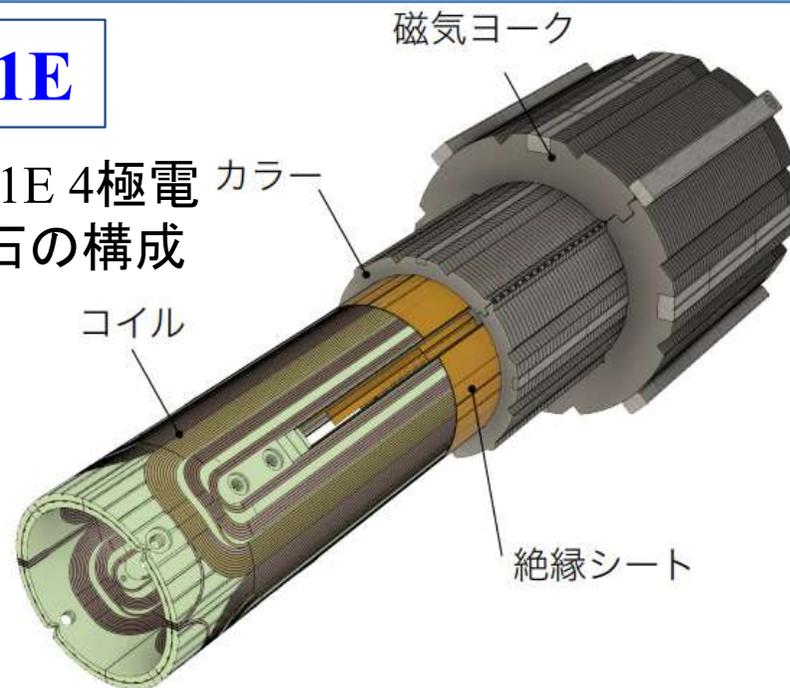
ストランド		ケーブル	
線径	0.5 mm	高さ	2.5 mm
Cu/SC 比	1.1	厚み	0.93 mm
フィラメント径	7.7 μm	Keyston角度	1.59°
フィラメント数	2113	ストランド数	10
RRR	186	I_c at 5T, 4.2 K	3070 A
I_c at 5T, 4.2 K	307 A		

超伝導4極電磁石

電子ビームライン用4極電磁石QC1E



QC1E 4極電磁石の構成



4極磁石用4個の超伝導コイル

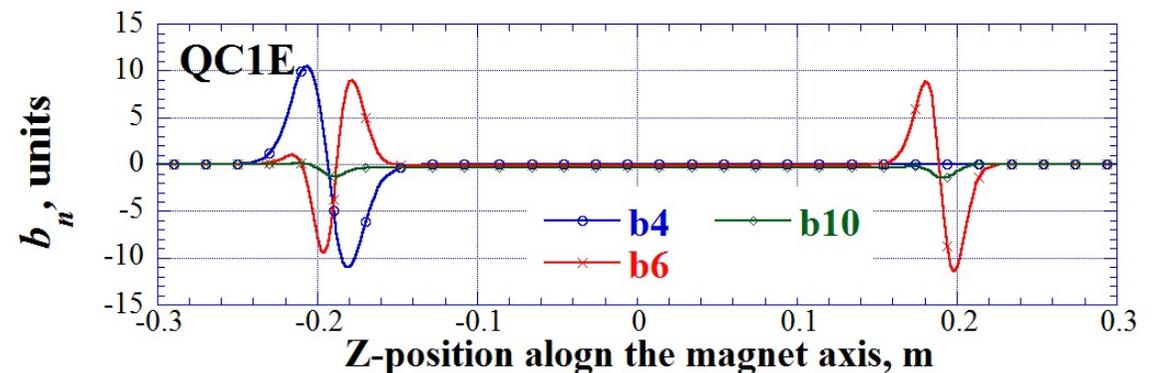
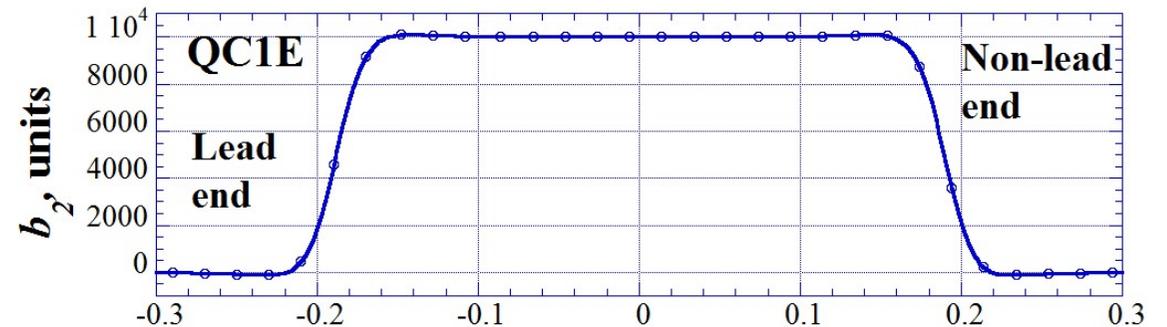
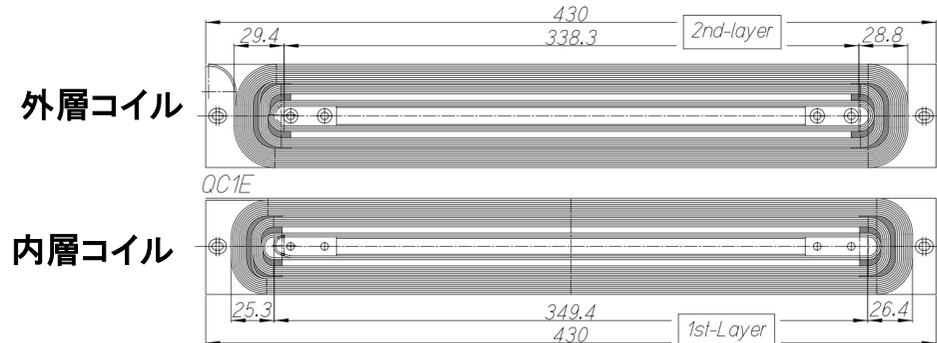


電子ビームライン用4極電磁石QC1E

QC1Eの磁場成分について

設計磁場:

磁場成分	2D cross section, units	磁場成分	3D integral field, units
b_2	10000	b_2	10000
b_3	0	b_3	0
b_4	0	b_4	-0.01
b_5	0	b_5	0
b_6	-0.05	b_6	-0.03
b_7	0	b_7	0
b_8	0	b_8	0.04
b_9	0	b_9	0
b_{10}	-0.26	b_{10}	-0.33



磁場性能の評価

基準半径: R_{ref}

- 電磁石コイル最内半径の2/3の位置
- 光学グループから指定された半径位置

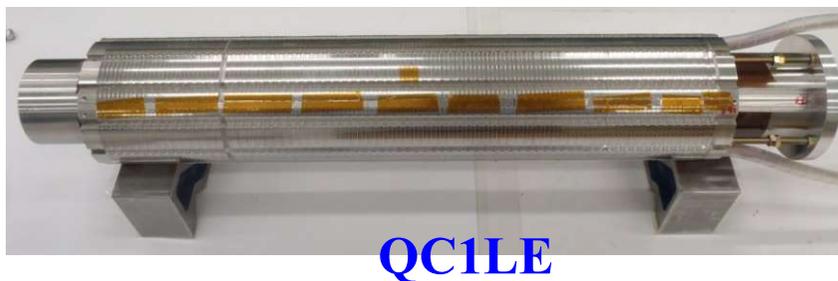
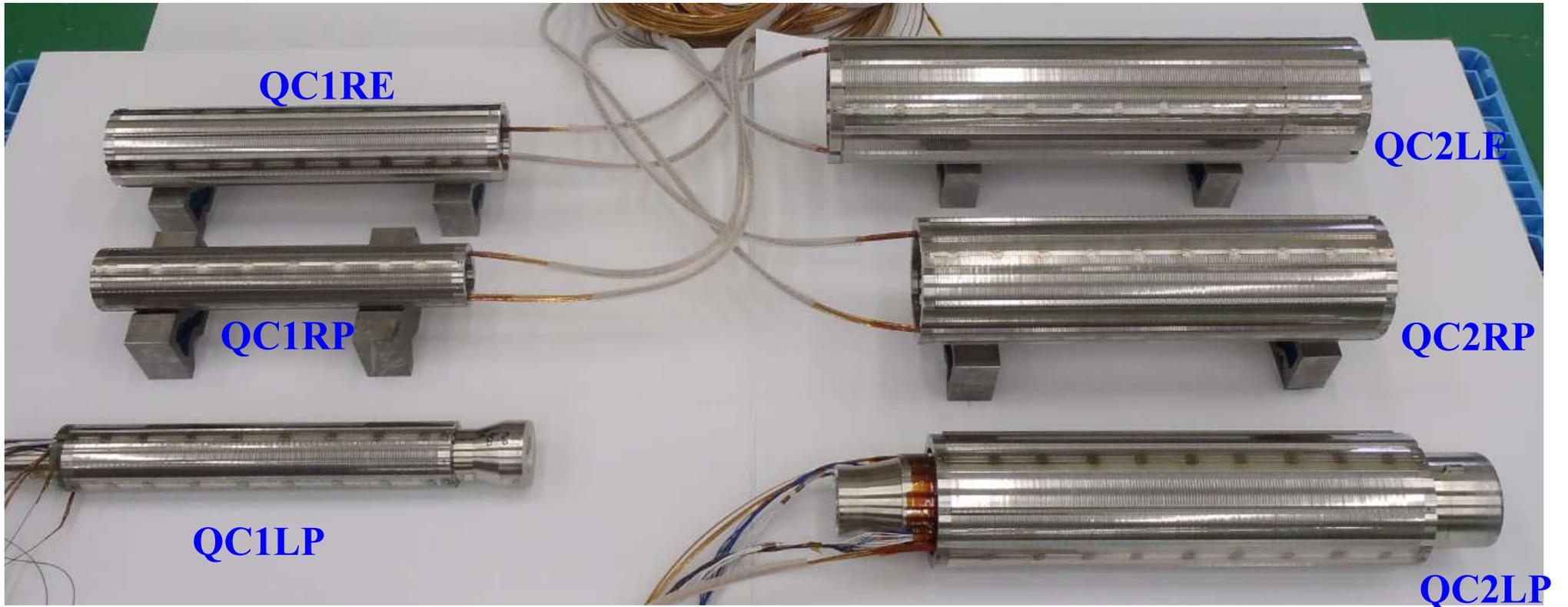
Units:

- 磁場成分を磁石の主成分で割って、10000倍した値
- 上記テーブルの4極電磁石の場合(2次元)、

$$b_6 = B_6/B_2 \times 10000 = -0.05 \text{ units}$$

超伝導4極電磁石

8台の超伝導4極電磁石(ステンレスカラーでコイルの固定が完成した状態)

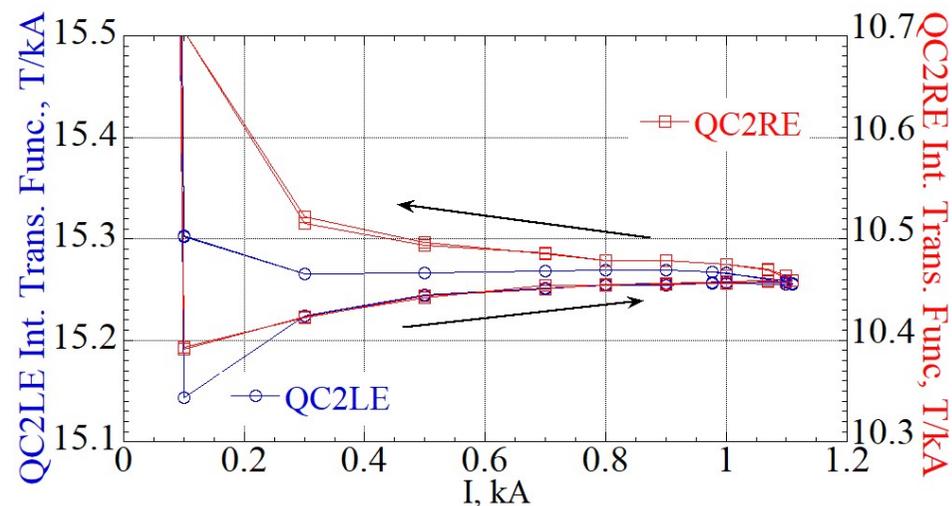
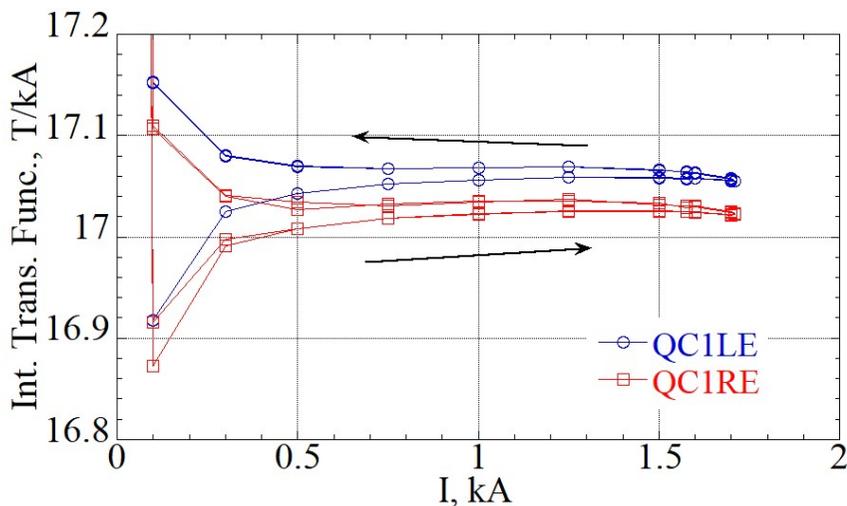
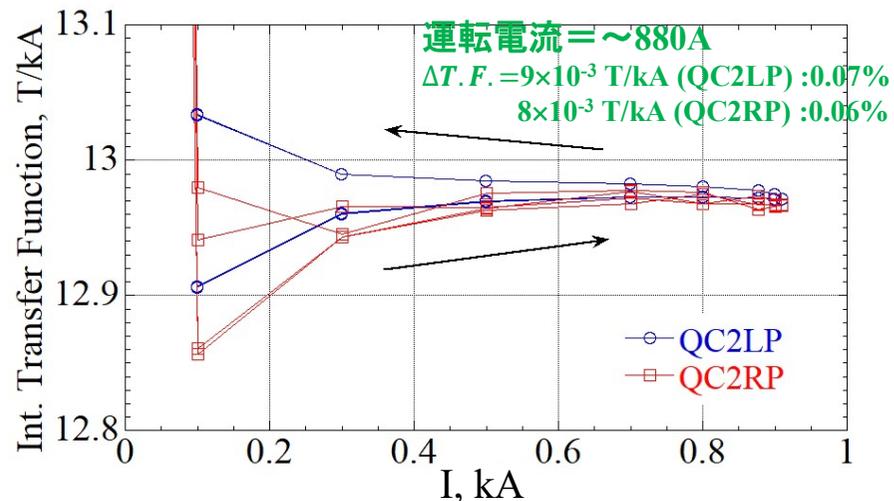
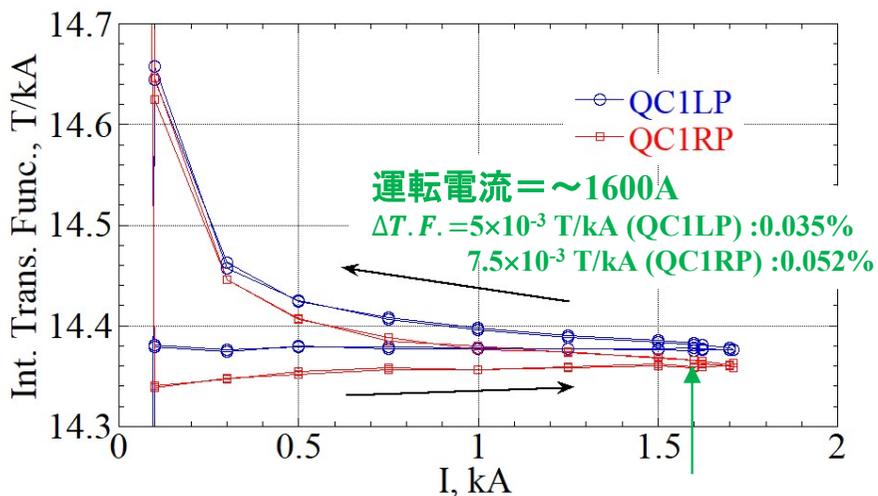


超伝導4極電磁石

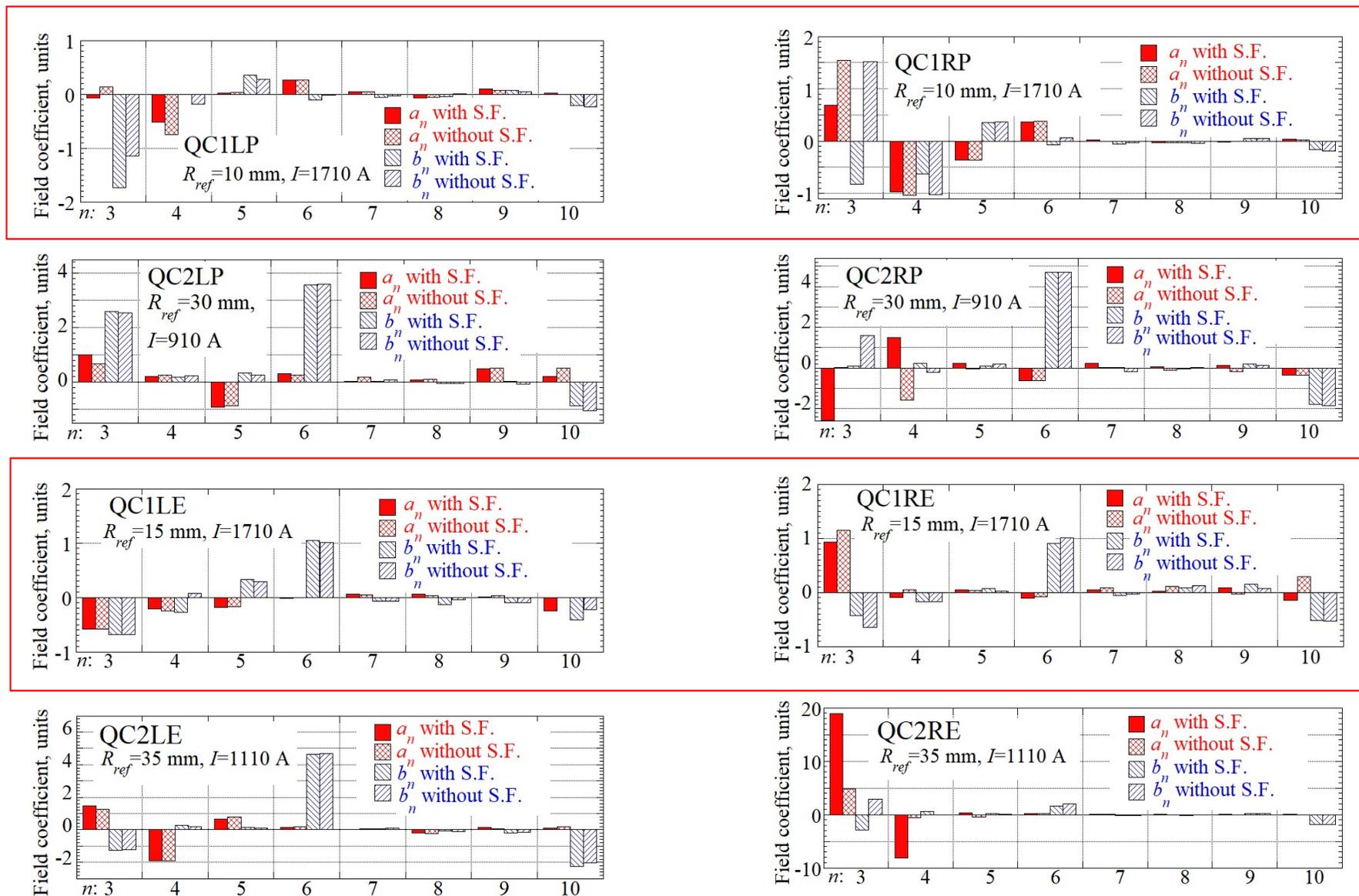
実機の8台の4極電磁石の磁場強度

$$T.F. = \int B_2 / I$$

超伝導ケーブル特性で励磁電流のUp-ramp/Down-rampで磁場の値に差がある。



実機の8台の4極電磁石の磁場性能



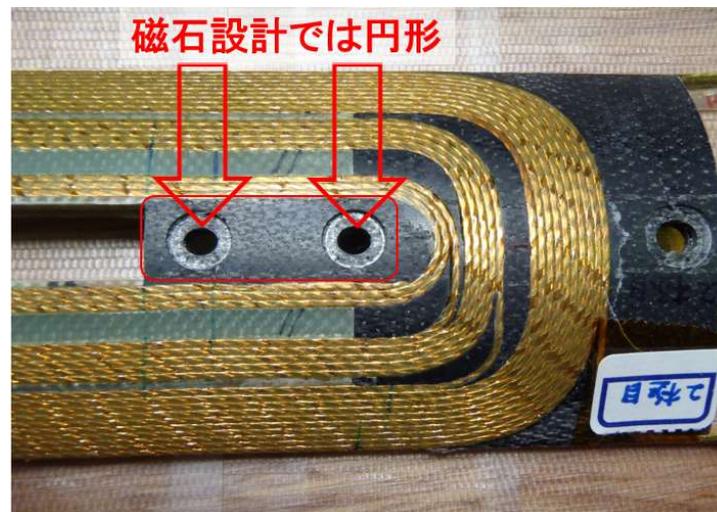
QC1P/QC1Eプロトタイプ製作時の経験

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

6極成分はビームライフタイムを著しく減少する。

製作時の写真調査

コイルスペーサの穴形状の変形



4極電磁石組立時には30MPaの圧力をかける。

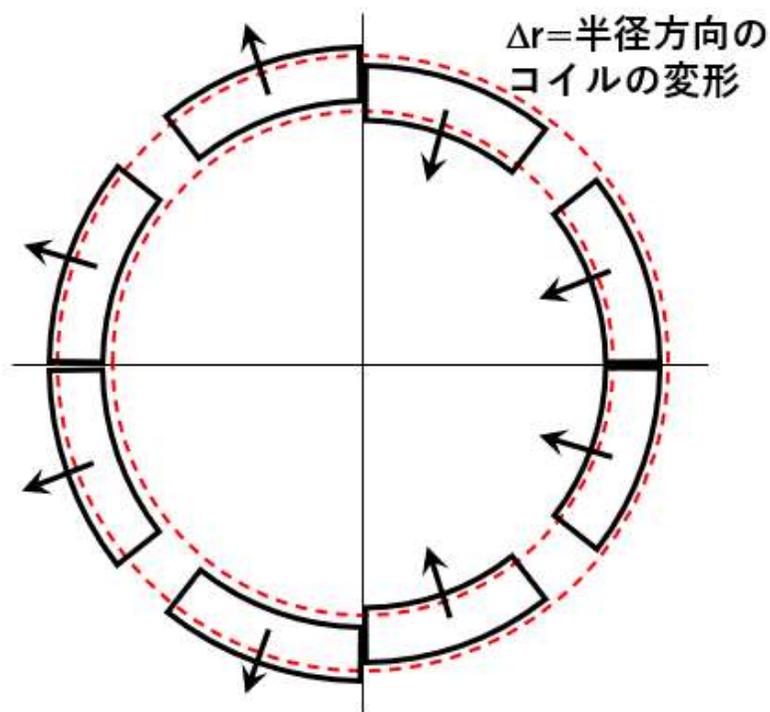
- 励磁中に超伝導ケーブルが動かない圧力を保持。(クエンチの原因)
- 冷却中に熱収縮により、圧力が下がる。
- 圧力による変形も考慮した、コイル設計。

□ コイルのヤング率

- 設計当初: $E=648\text{MPa}$
- 修正後: $E=8\text{ GPa}$

超伝導4極電磁石

超伝導コイルの変形モードの解析



- 4極磁場のエラー成分に6極成分が大きく出ている。
- コイルが作る電流分布に2極磁場を作る変形が加味されている。(Dipole deformation)

コイルの半径方向への変形量を Δr とすると:

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

QC1Eプロトタイプの $b_3=8.56$ units \Rightarrow $\Delta r=31.5 \mu\text{m}$
 $b_5=-1.02$ units

6極磁場成分を1unit以下にするには、 $\Delta r < \pm 4 \mu\text{m}$

超伝導補正電磁石

超伝導補正電磁石は、4極電磁石のビームに対する配置誤差、4極電磁石が作る誤差磁場を打消すために組込まれた。

配置誤差の補正: normal 2極 (b_1)、skew 2極 (a_1)、skew 4極 (a_2)

配置誤差の補正量(4極電磁石中心の水平、垂直成分の誤差、4極電磁石の回転誤差)

QC1P/E: $\Delta x, \Delta y = \pm 0.5 \text{ mm}, \Delta \theta = \pm 10 \text{ mrad}$

QC2P/E: $\Delta x, \Delta y = \pm 1 \text{ mm}, \Delta \theta = \pm 10 \text{ mrad}$ 8台の4極電磁石全てには必要

b_1, a_1, a_2 補正電磁石は、4極電磁石ボア一内に組込まれている。

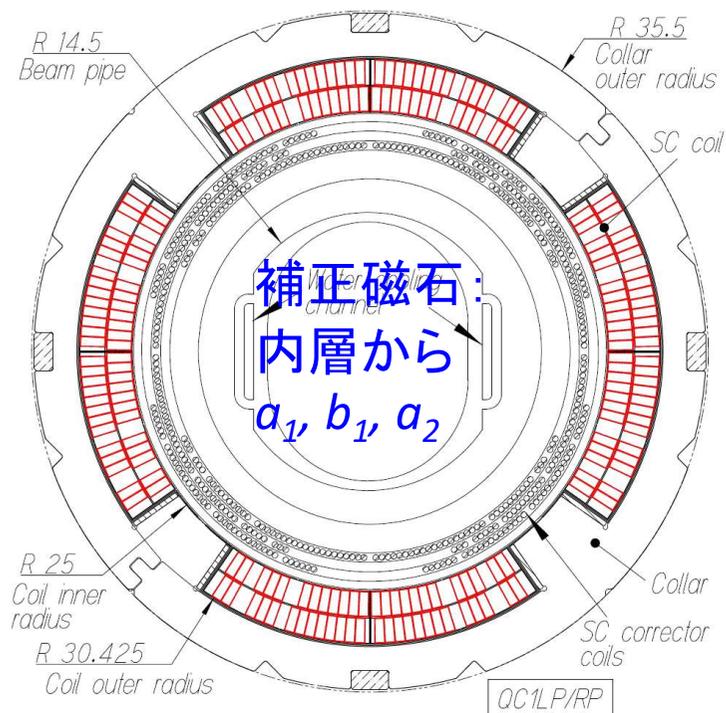
4極電磁石が作る誤差磁場: normal 6極 (b_3)、skew 6極 (a_3)、normal 8極 (b_4)

- QC1プロトタイプ4極電磁石の製作経験から、6極電磁石が組み込まれる。
 - 初期設計では、この誤差磁場は検討に入っていなかった。
 - QCS-R側のクライオスタットに、6極補正電磁石が組み込まれている。
- 8極電磁石は、超伝導コイルのリード端部形状から発生する磁場の効果を打消す。

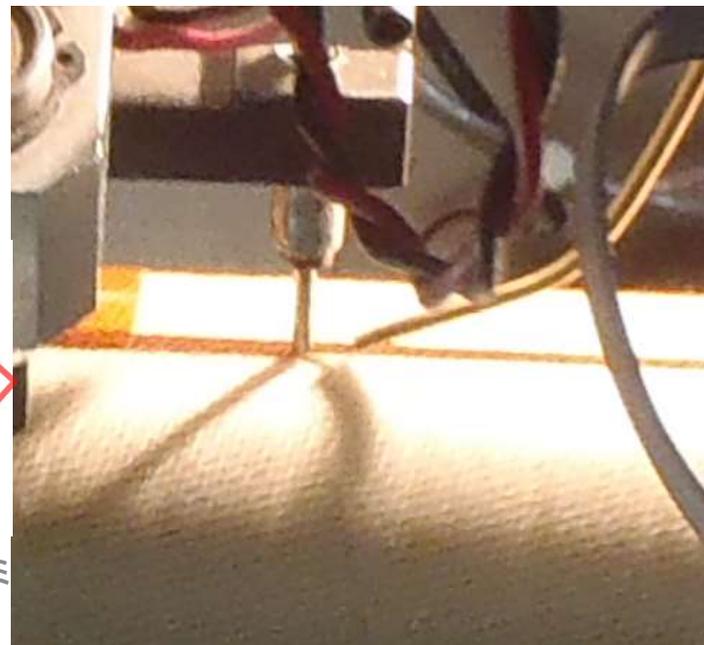
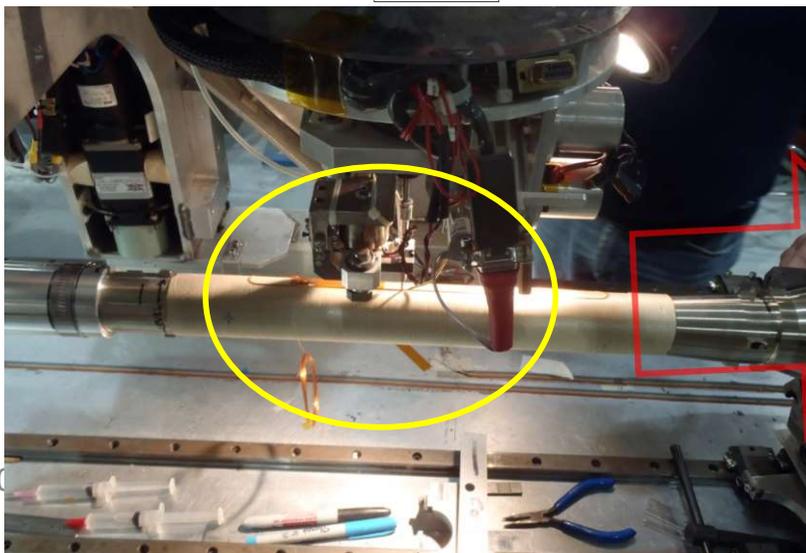
超伝導補正電磁石

QC1P超伝導4極電磁石+補正電磁石

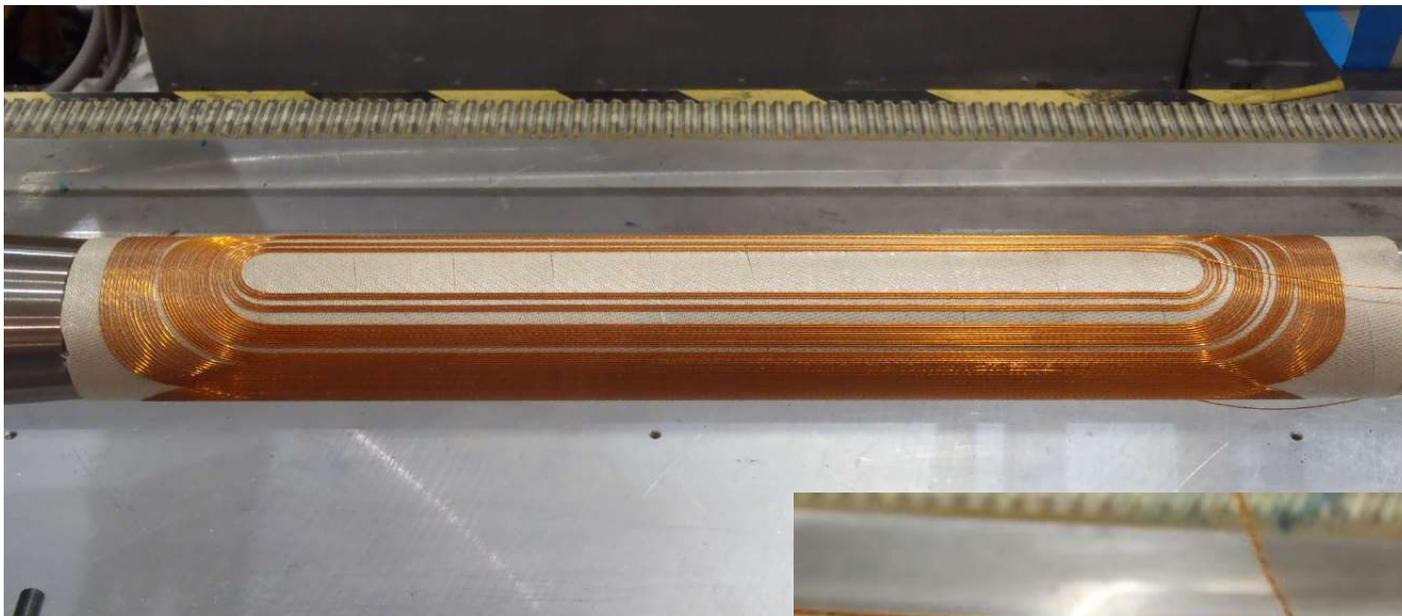
超伝導補正磁石は、米国Brookhaven National Lab. (BNL)との共同研究で製作。



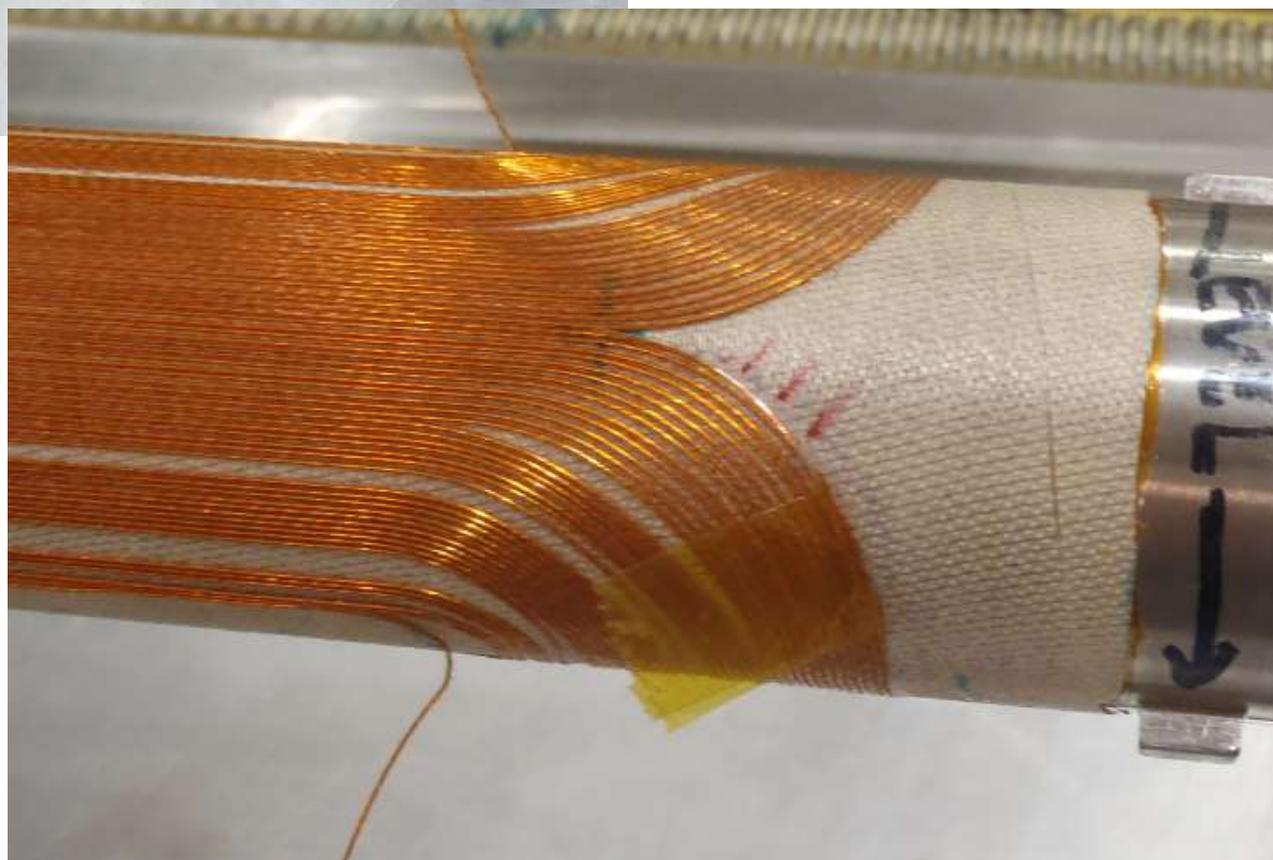
- BNL の特殊技術: Direct Winding Method
 - 超伝導線をポビンに直接接着しコイル形状とする。多層磁石を形成。1層の厚み=0.67 mm
 - 超伝導線表面に塗布されたエポキシを超音波過熱し接着する。
 - 磁石の設置空間に制限がある場合は非常に有効。
- 補正磁石に使用された超伝導線(NbTi)の性能
 - 超伝導線外径(電気絶縁無し) = Φ 0.35mm
 - フィラメント径、本数 = Φ 6 mm、2100本
 - 臨界電流値 = 156 A @ 4 T、4.2 K



超伝導補正電磁石



液体ヘリウム内筒



- QC1LP用超伝導補正2極磁石 (a_1)
 - 超伝導線の位置は計算機制御されてボビンに固定されている。
 - この磁石の上面に電気絶縁シートが取付けられ、次の磁石(補正2極磁石 b_1) が巻かれる。

超伝導補正電磁石

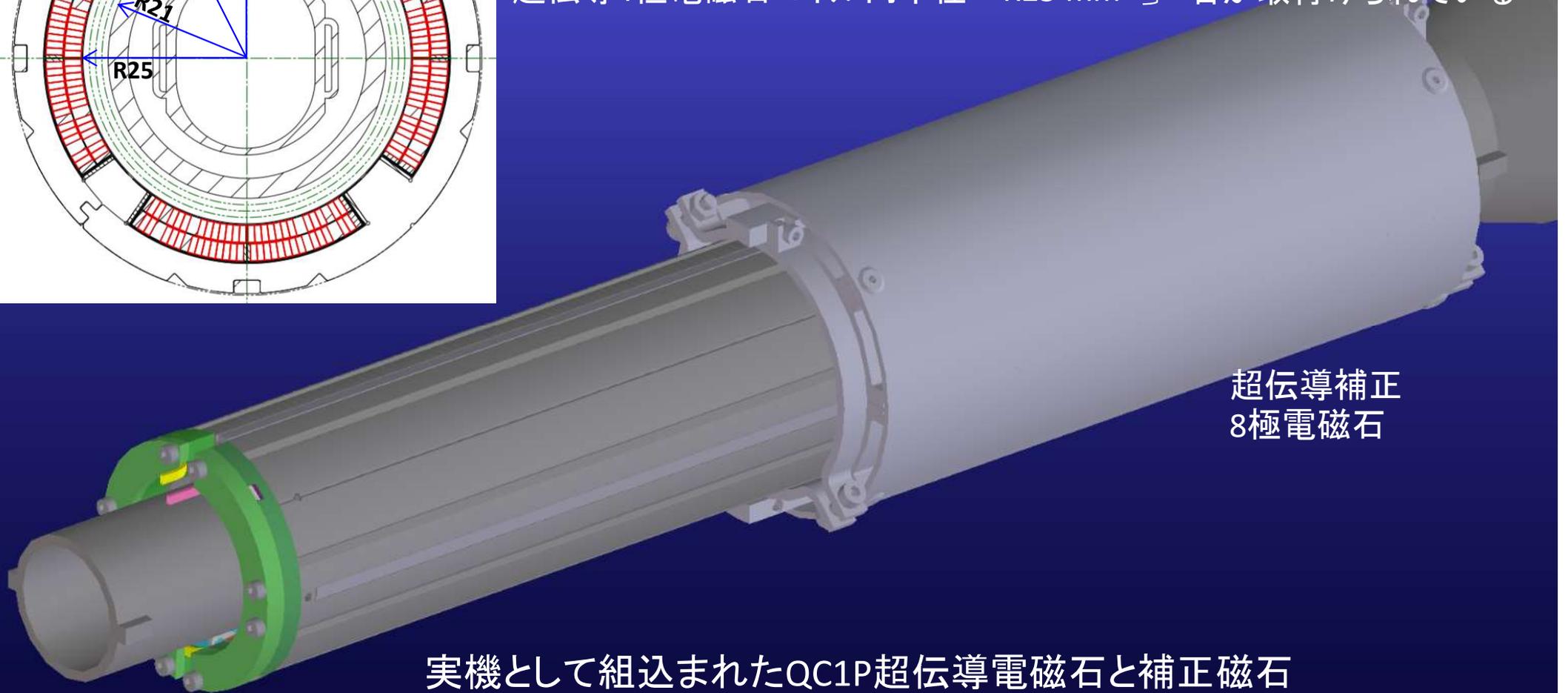
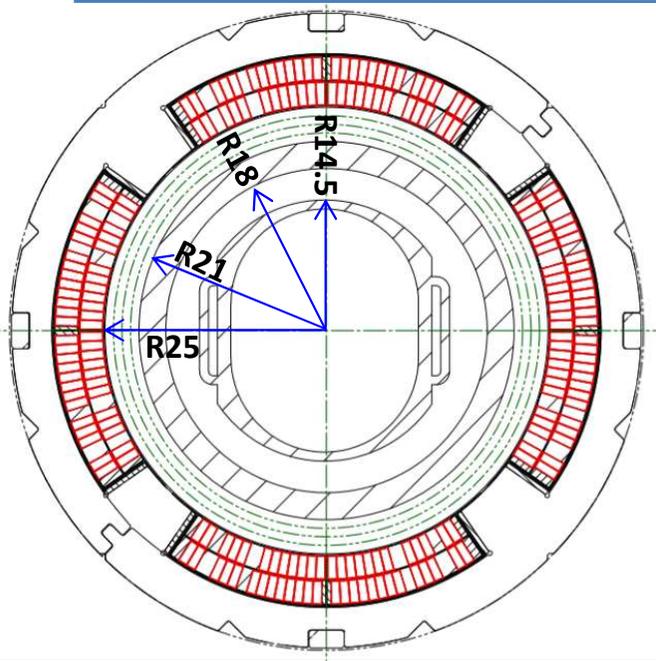
ビームパイプ(室温)外半径=R14.5 mm

ヘリウム容器内筒(-269°C)内半径=R18 mm

ヘリウム容器内筒外半径=R21 mm

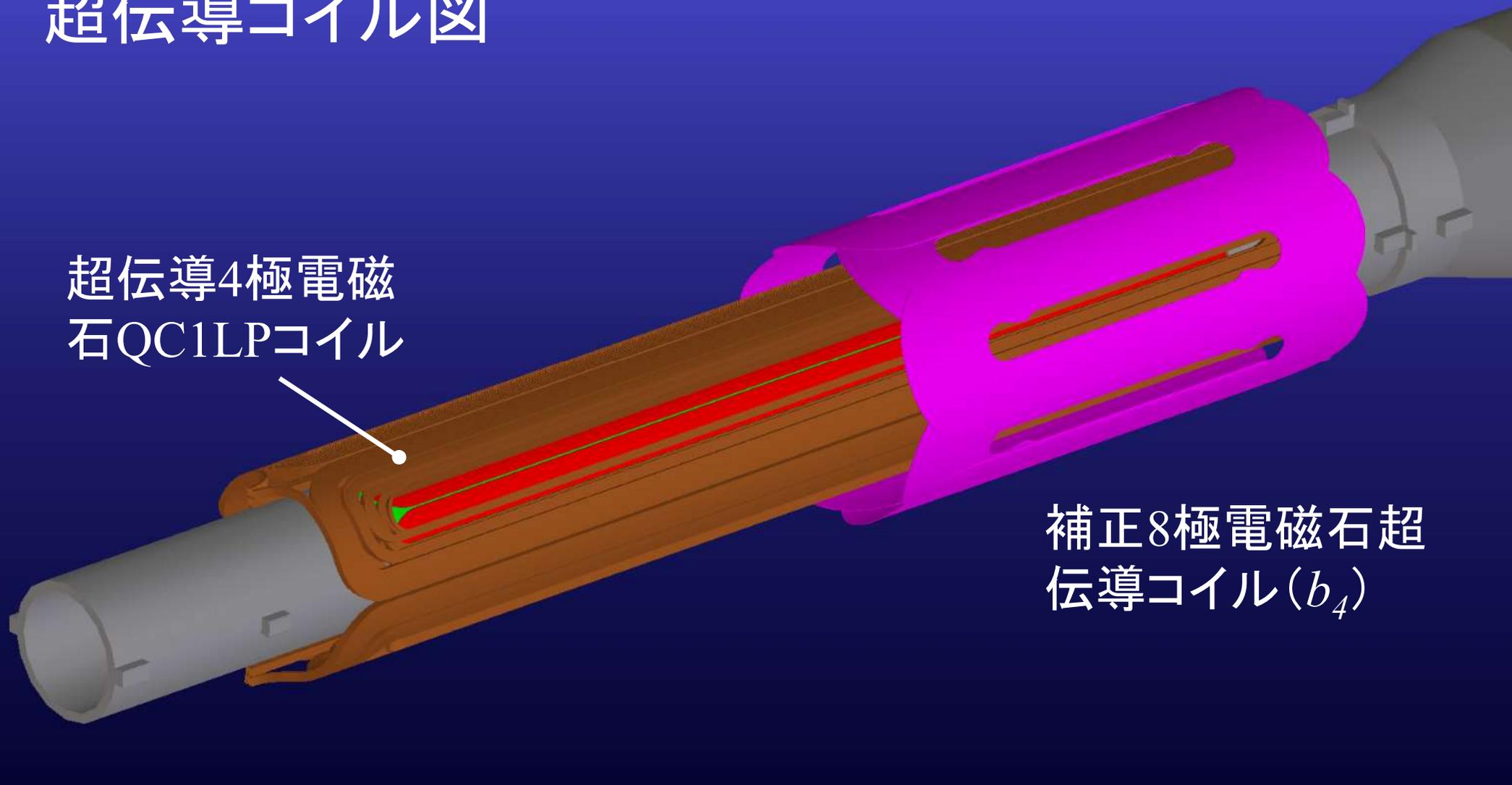
超伝導4極電磁石コイル内半径=R25 mm

3種類の超伝導補正磁石が取付けられている

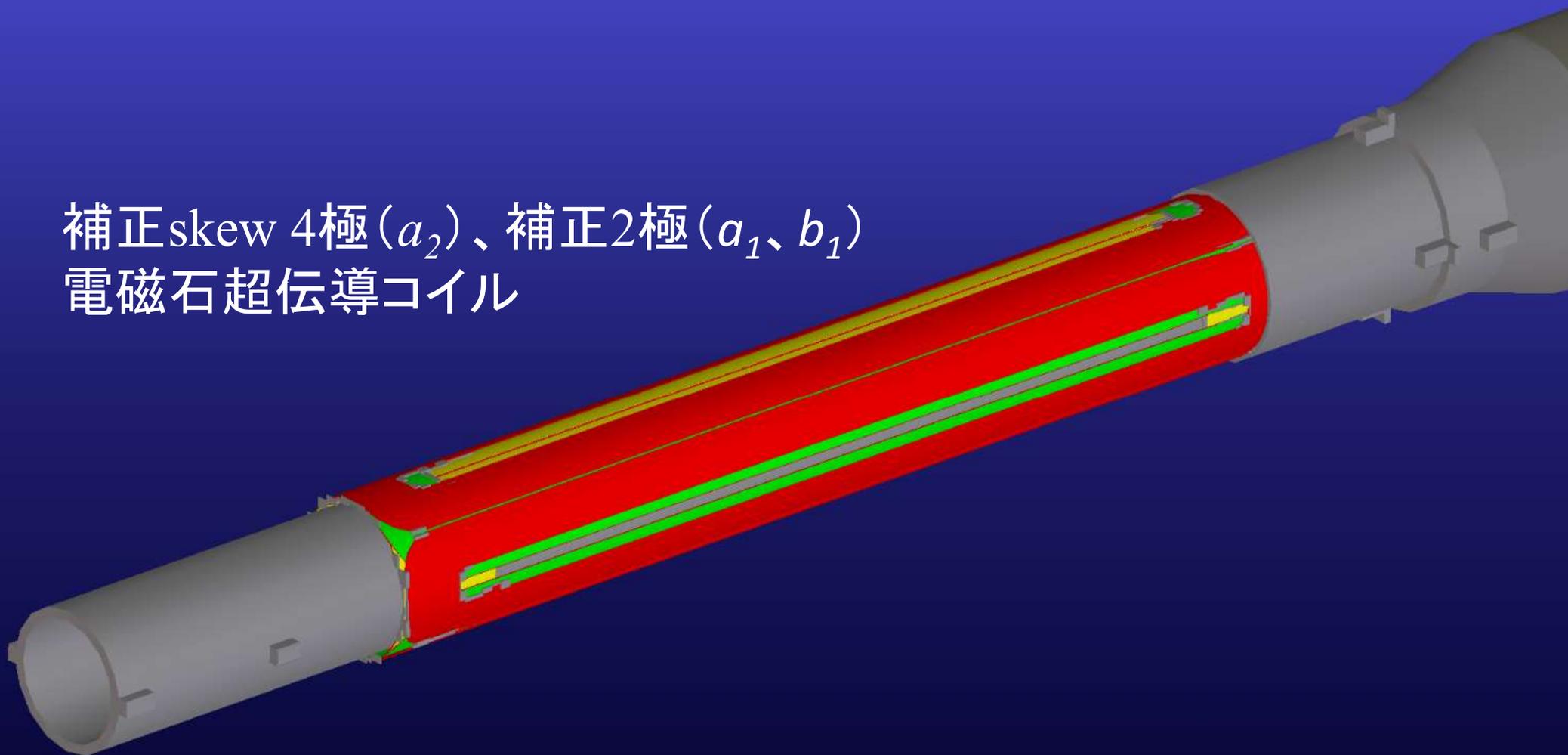


実機として組込まれたQC1P超伝導電磁石と補正磁石

超伝導コイル図

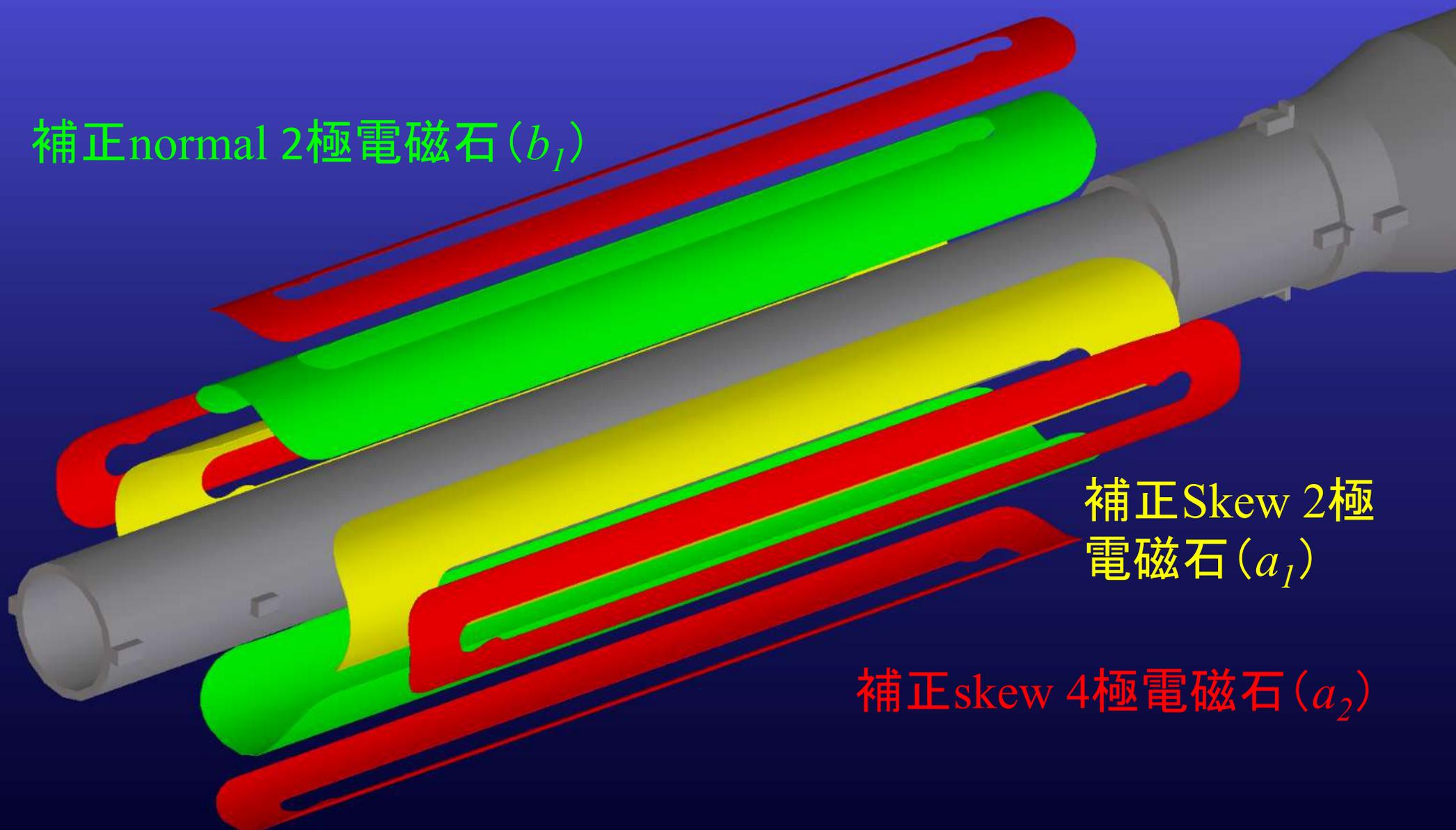


補正skew 4極 (a_2)、補正2極 (a_1 、 b_1)
電磁石超伝導コイル



超伝導補正電磁石

補正normal 2極電磁石 (b_1)



補正Skew 2極
電磁石 (a_1)

補正skew 4極電磁石 (a_2)

超伝導補正電磁石



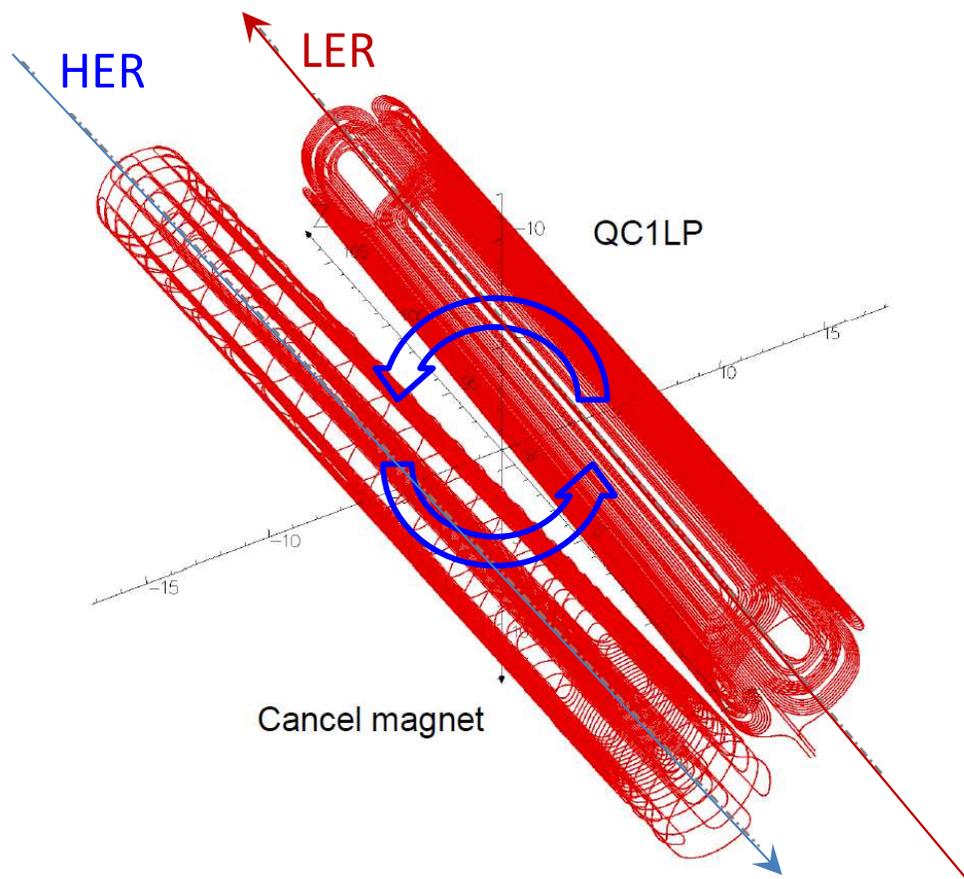
完成したQC1LP超伝導4極
電磁石と超伝導補正磁石

超伝導補正電磁石

QC1P超伝導4極電磁石漏れ磁場キャンセル用超伝導補正電磁石

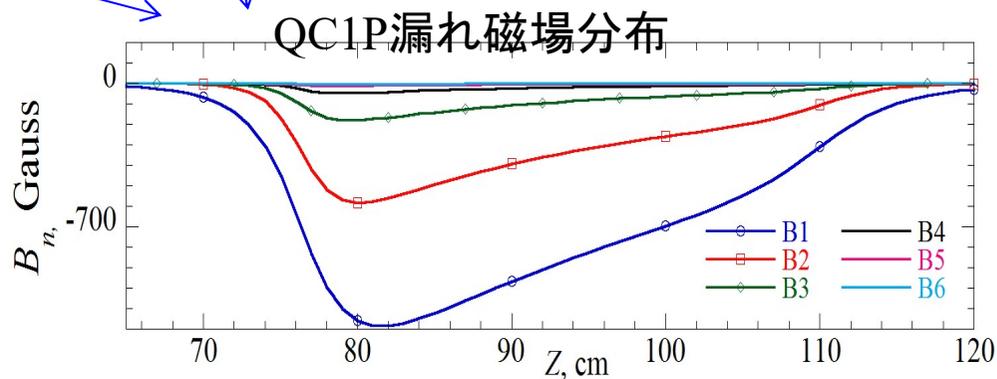
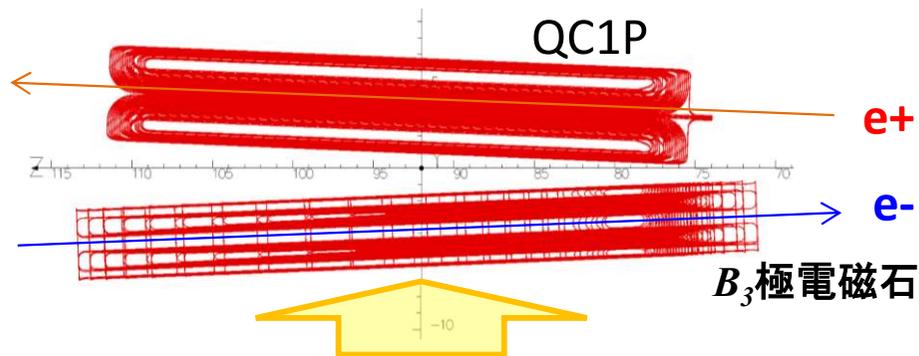
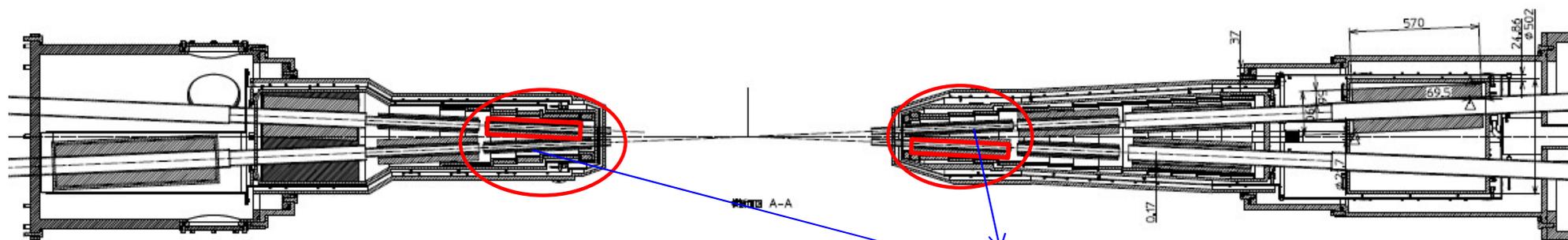
SuperKEKBビーム最終集束超伝導電磁石システム全体の磁場設計から:

- QC1P超伝導4極電磁石は、磁性体ヨークを持たない。
- 4極電磁石の本体部分では、磁石軸に対して磁場は垂直面で磁束のループを作る。この磁束が隣のビームライン(HER)に侵入してくる。

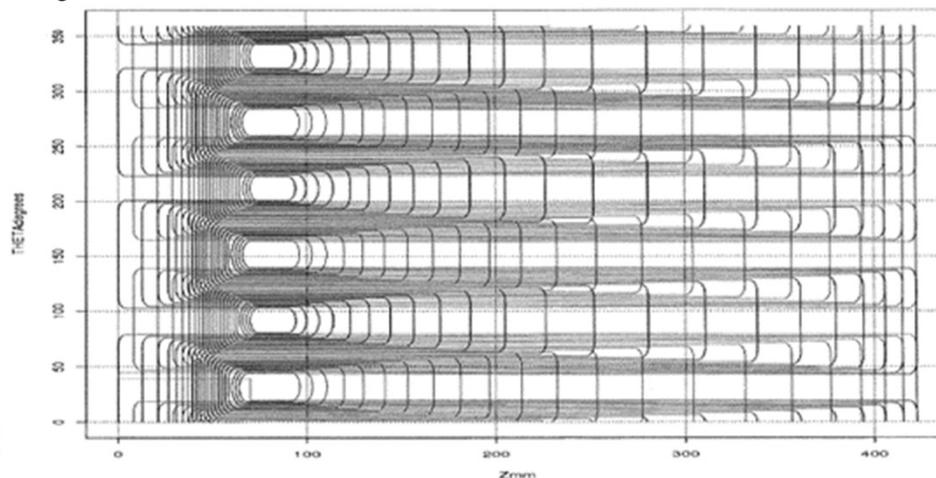


超伝導補正電磁石

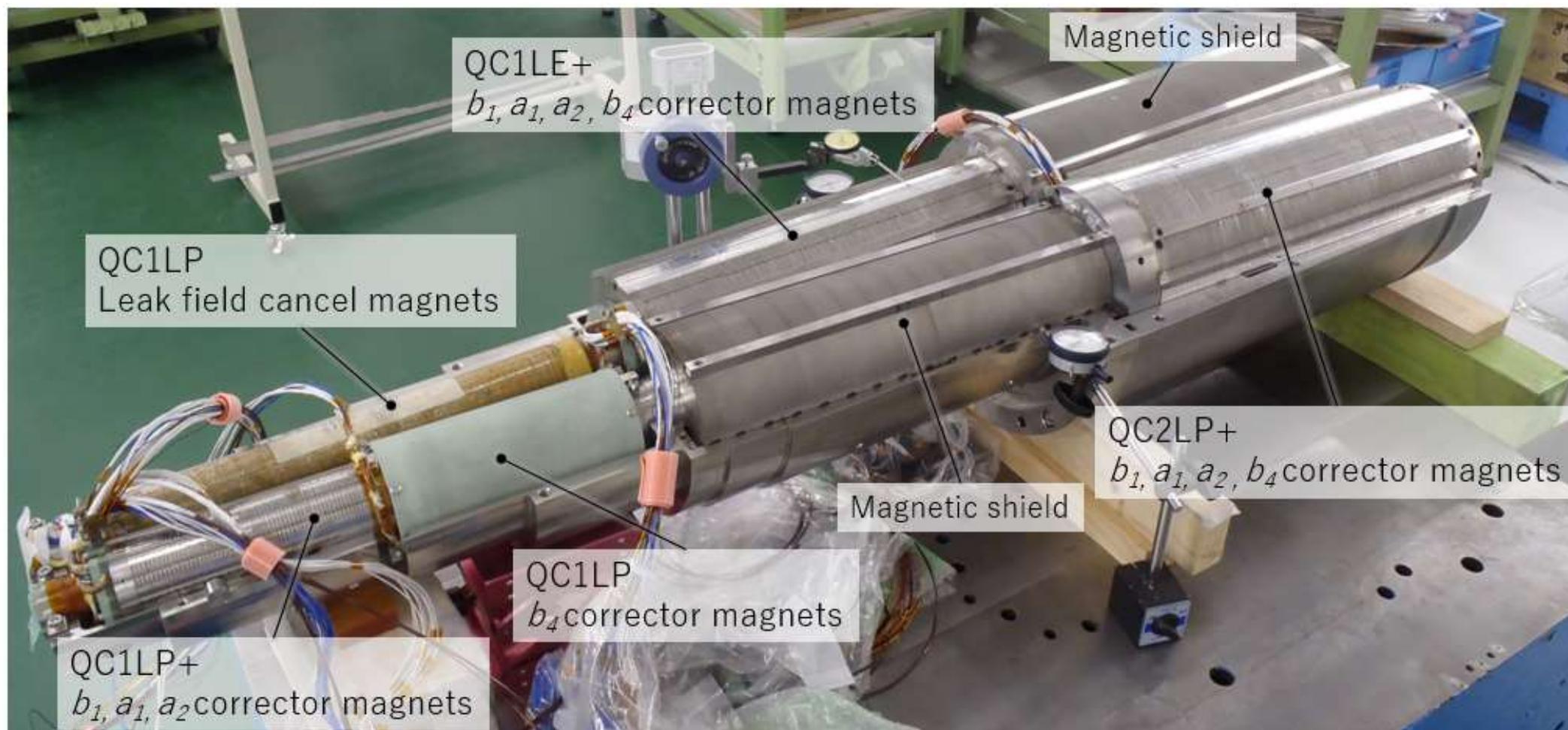
QC1P超伝導4極電磁石漏れ磁場キャンセル用超伝導補正電磁石



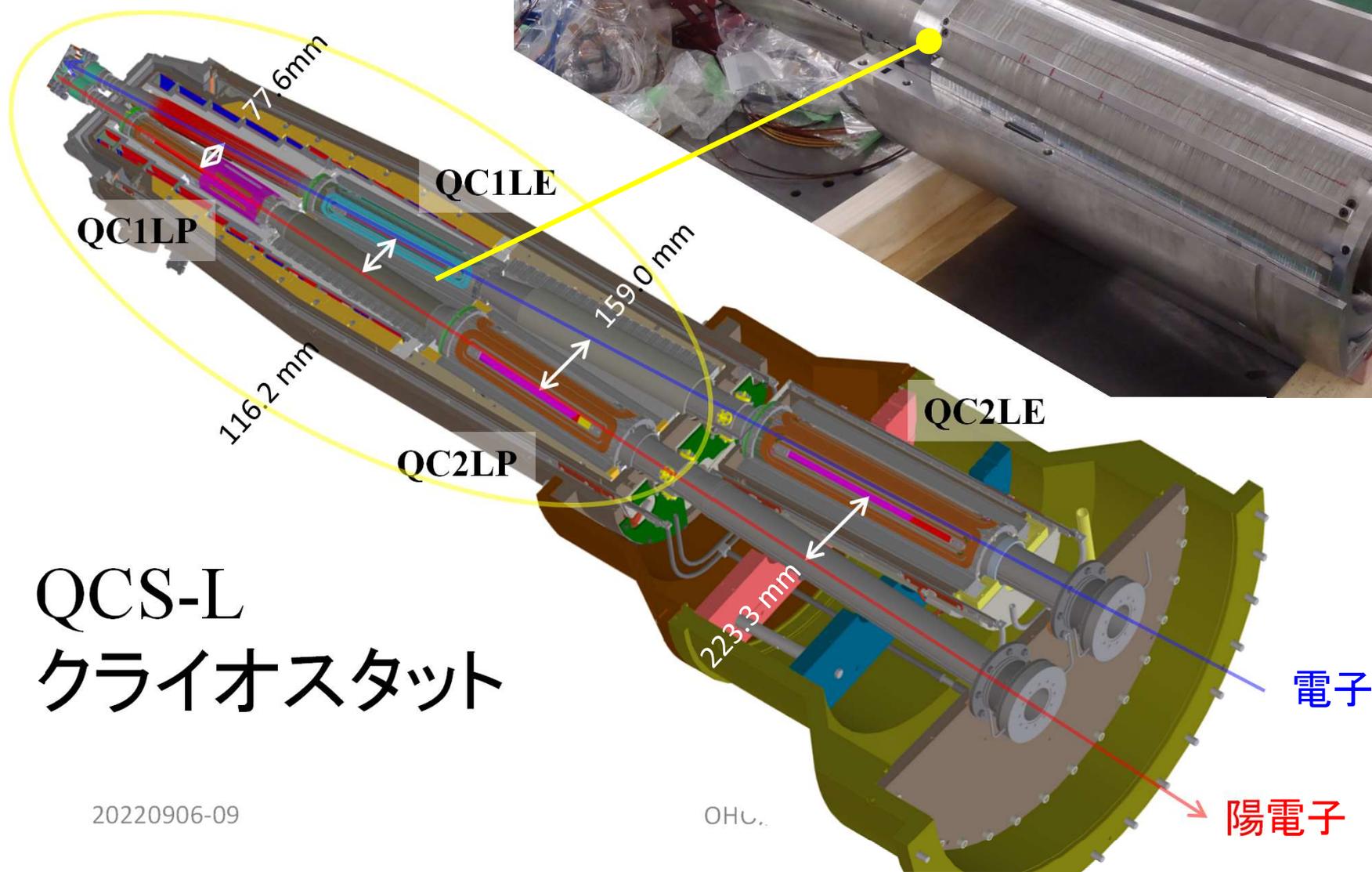
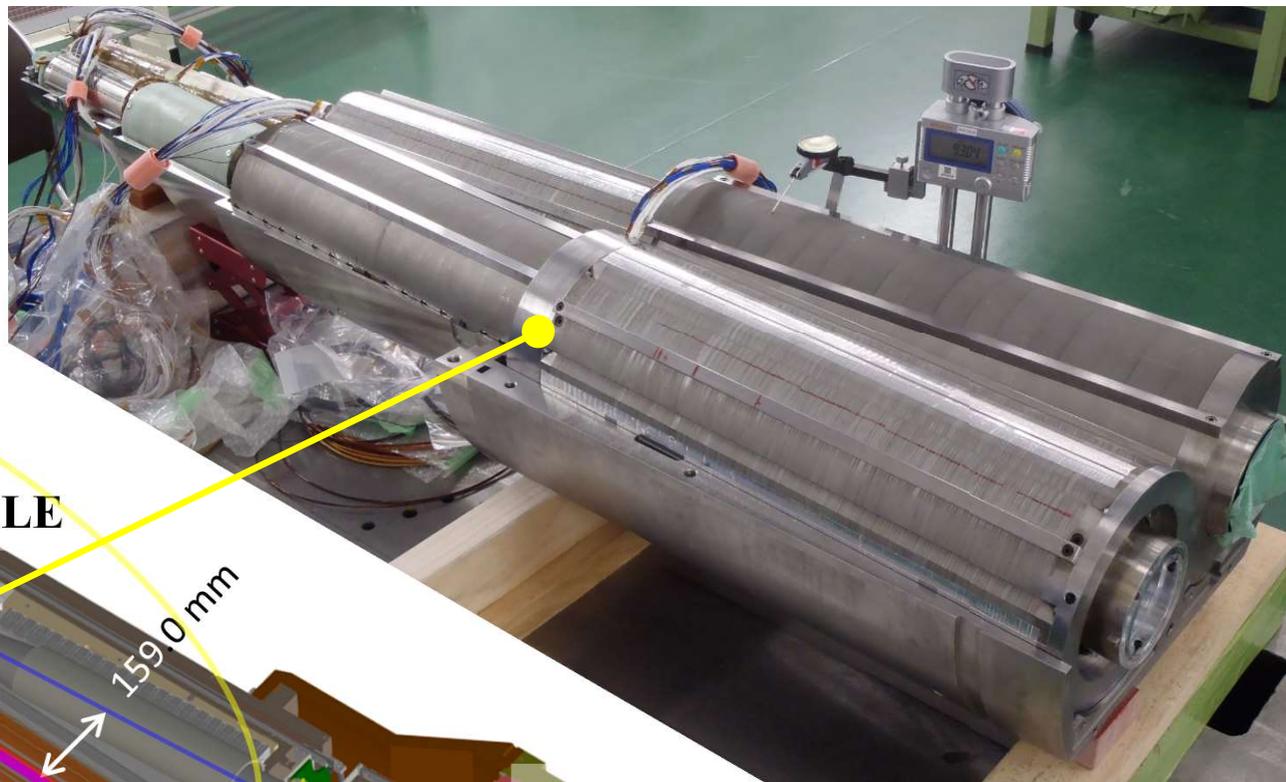
B_3 コイル展開図



QCS-L用超伝導4極電磁石と補正電磁石



超伝導4極・補正電磁石

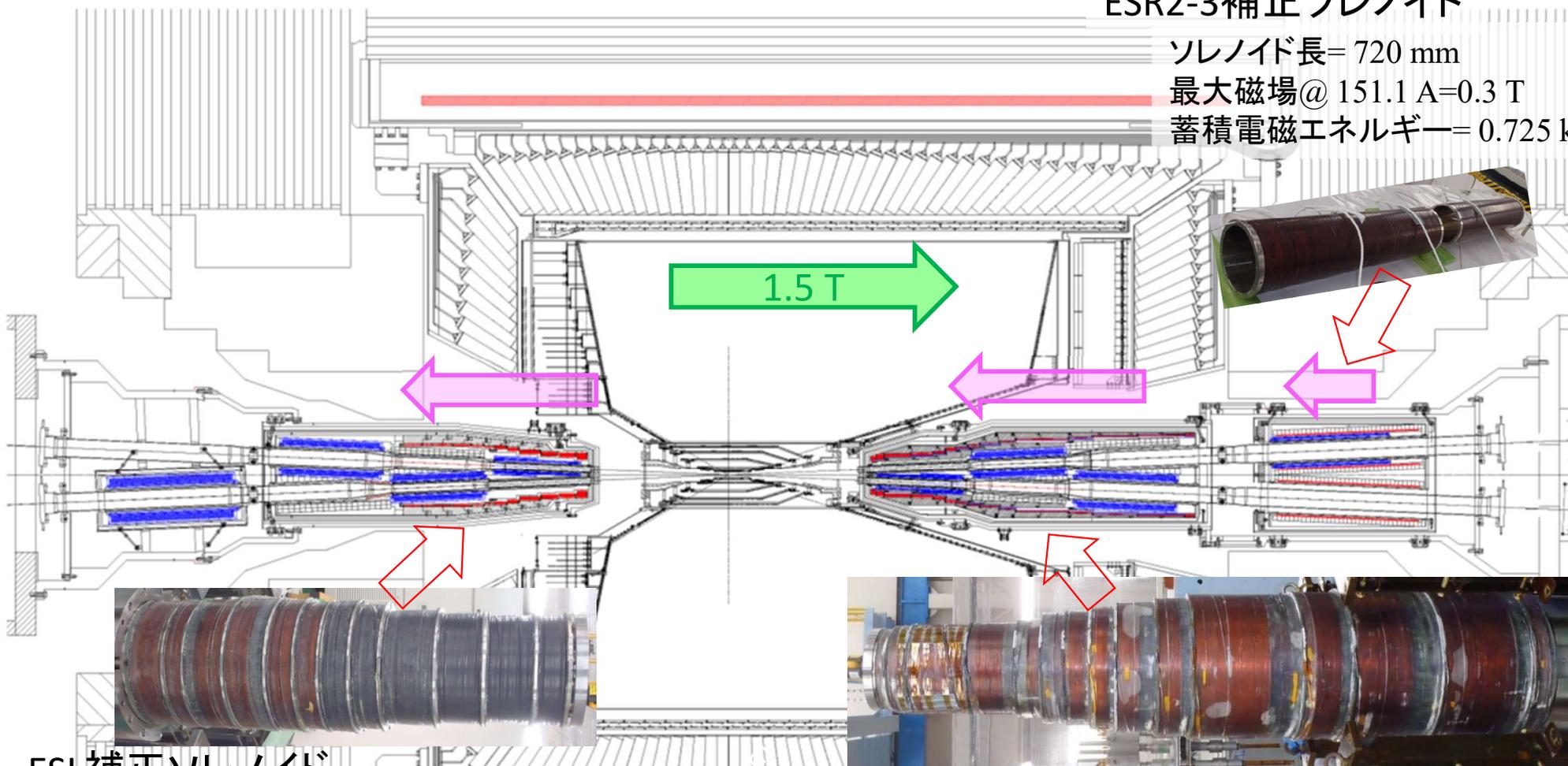


QCS-L
クライオスタット

超伝導補正ソレノイド

ESR2-3補正ソレノイド

ソレノイド長= 720 mm
 最大磁場@ 151.1 A=0.3 T
 蓄積電磁エネルギー= 0.725 kJ



ESL補正ソレノイド

ソレノイド長= 914 mm
 最大磁場@ 390 A= 3.41 T
 蓄積電磁エネルギー= 190 kJ
 12個の小ソレノイド

ESR1補正ソレノイド

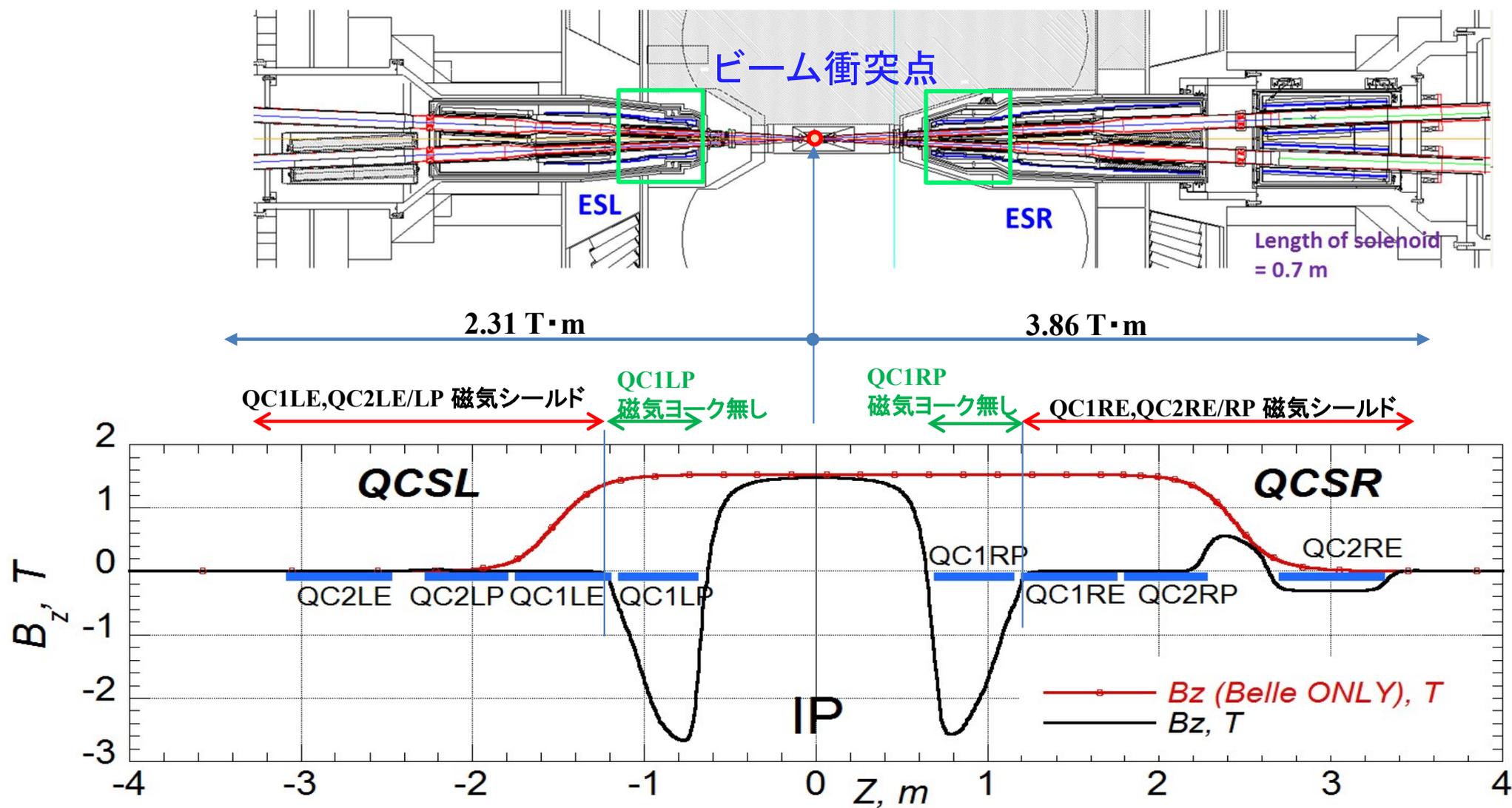
ソレノイド長= 1575 mm
 最大磁場@ 450 A=3.19 T
 蓄積電磁エネルギー= 810 kJ
 15個の小ソレノイド

補償ソレノイドのパラメータ

	ESL	ESR1	ESR2/3
Integral solenoid field, Tm	2.31	3.86	0.17
I_D , A	390	450	151.1
B_p , T	3.56	3.05	0.3
Number of element solenoids	12	15	1
Total turn number	4610	6237	1356
Inductance, H	2.5	8.0	0.035
Load Ratio @4.7 K, %	49.9	46.4	11
Magnet physical length, mm	914	1575	720
SC cable	NbTi		
Cable size, mm	0.932 × 1.384		
Cu/NbTi ratio	1.8		
I_c @ 4 T and 4.22 K, A	1814		

超伝導補正ソレノイド

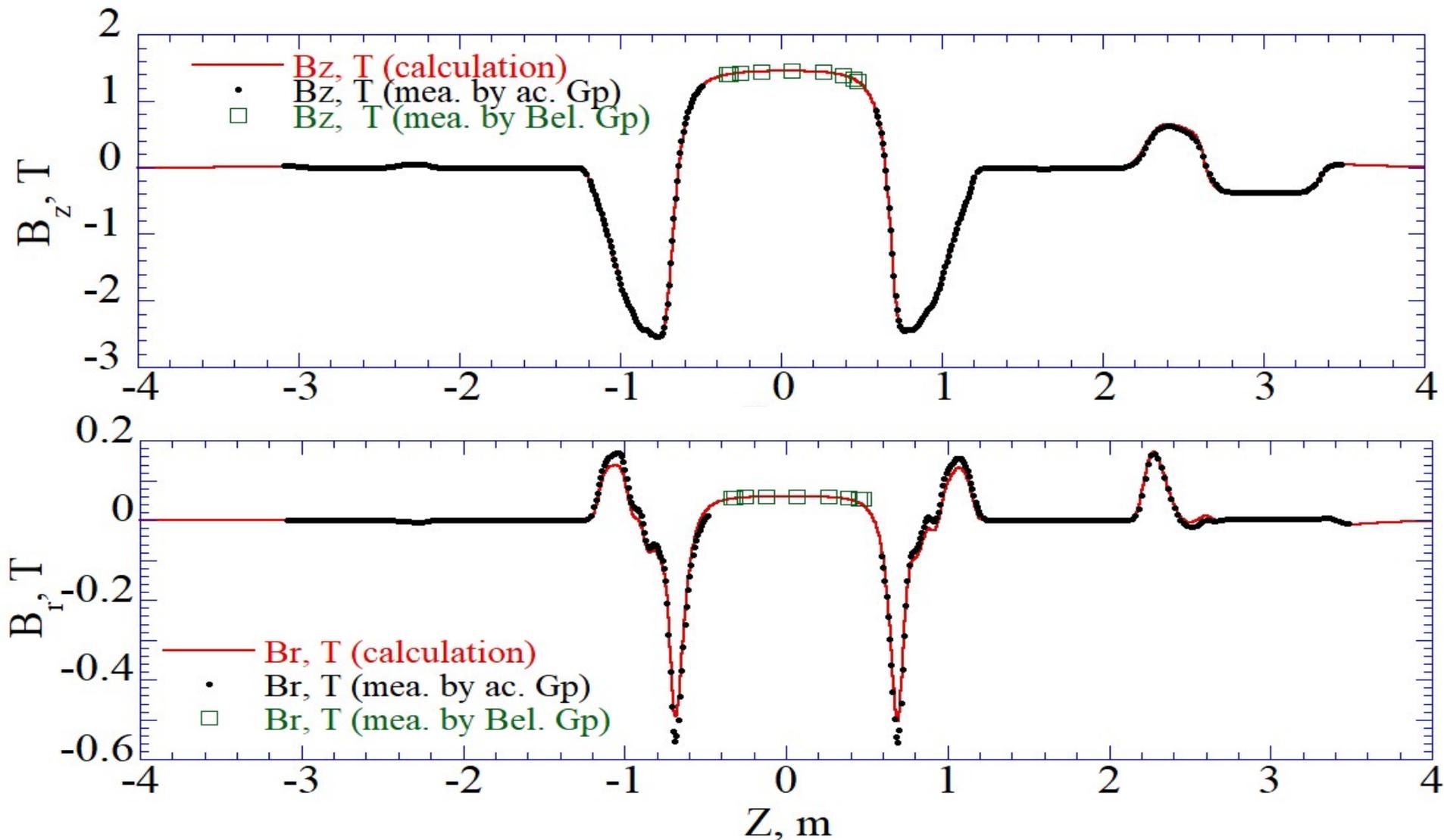
超伝導補正ソレノイドとBelle-IIソレノイドが作る磁場分布



- QC1LPとQC1RPの空間にある小ソレノイドでIPからQC1E先端までのBelle-IIソレノイド積分磁場を打消す。

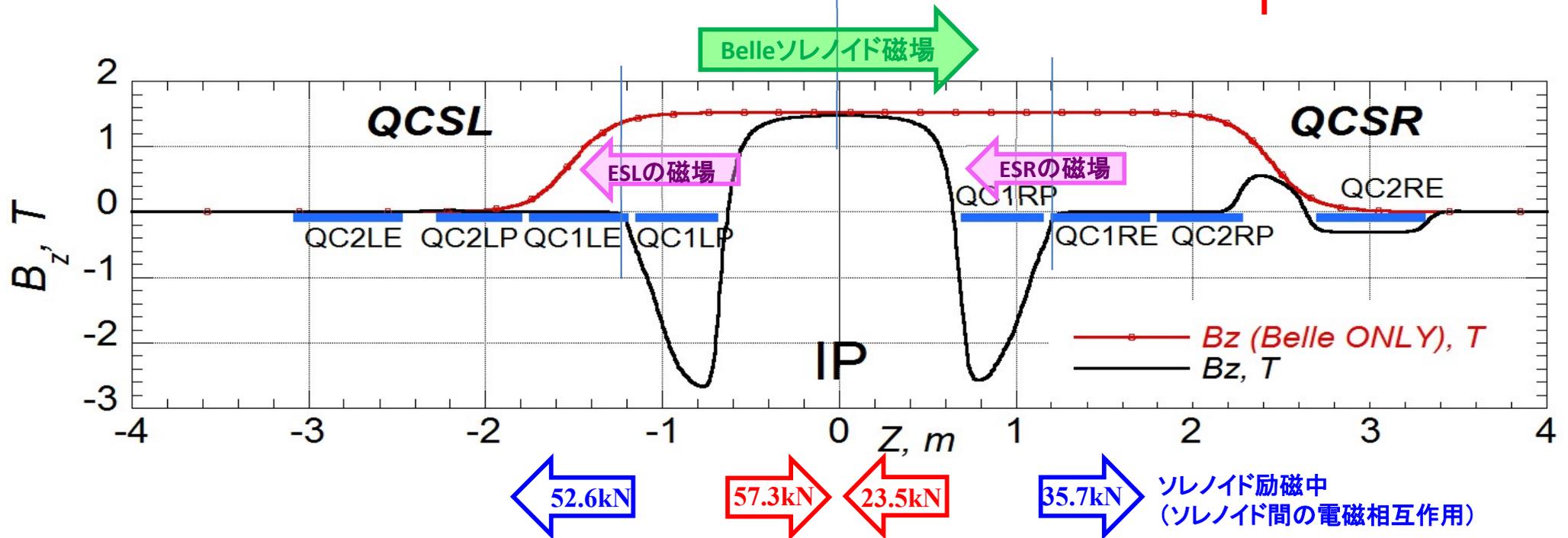
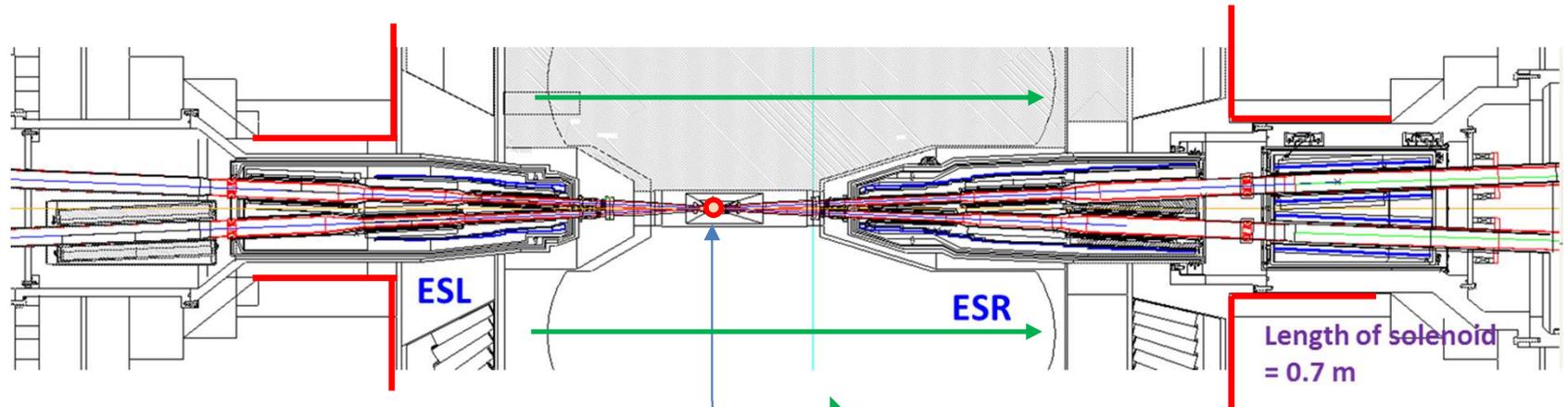
ビームライン上でのソレノイド磁場分布(測定値)

HERビームライン 3軸ホールプローブ測定

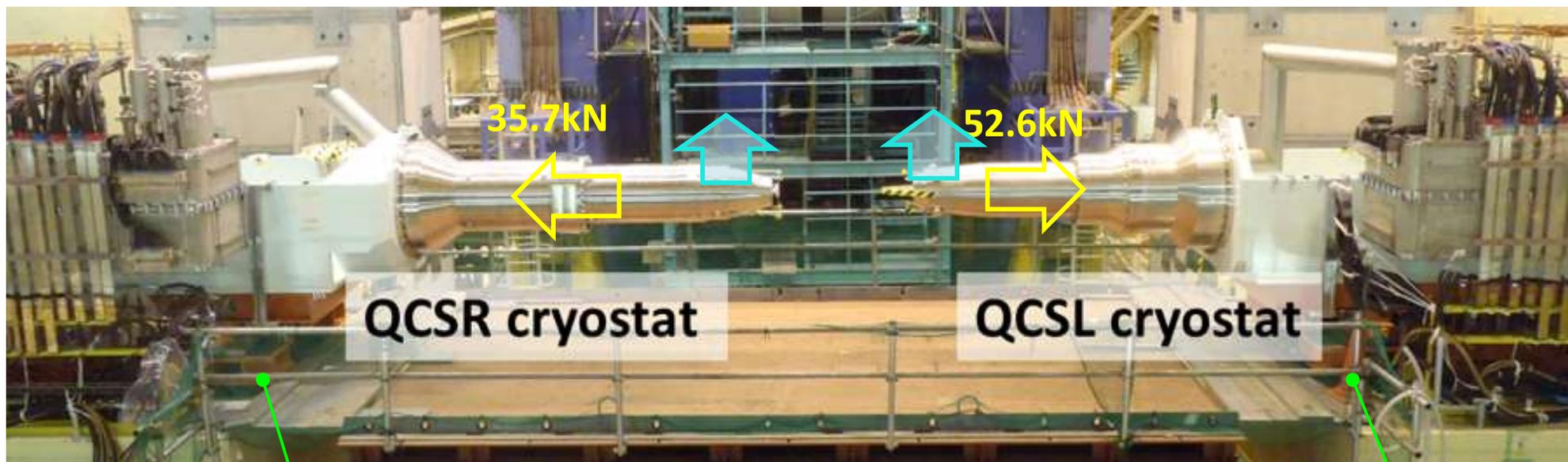


超伝導補正ソレノイド

超伝導補正ソレノイドとBelle-IIソレノイド磁場の相互作用(電磁力)



超伝導補正ソレノイドとBelle-IIソレノイド磁場の相互作用(電磁力)



機械的な支持点

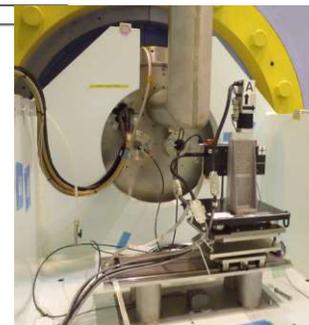
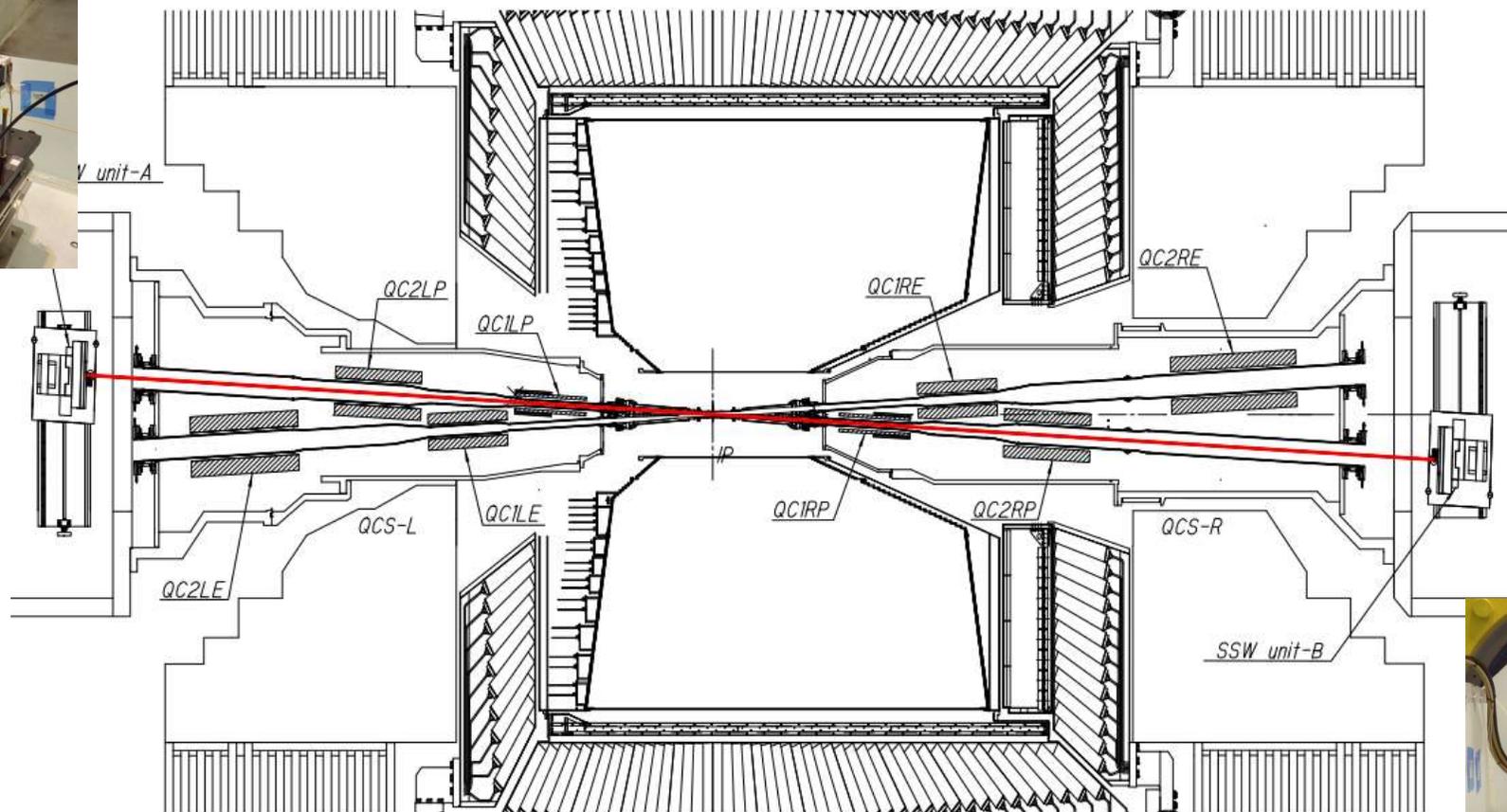
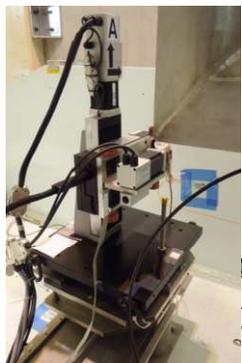
機械的な支持点

超伝導補正ソレノイド(磁場測定)

Single Stretched Wire (SSW)磁場測定: FNALとの共同研究

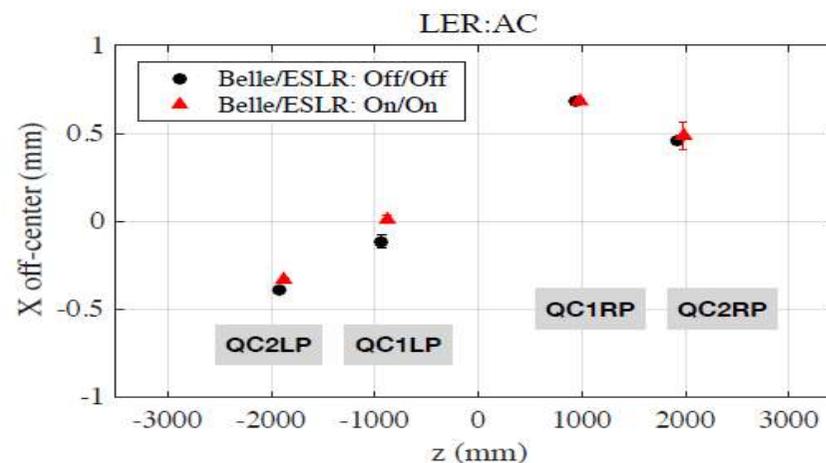
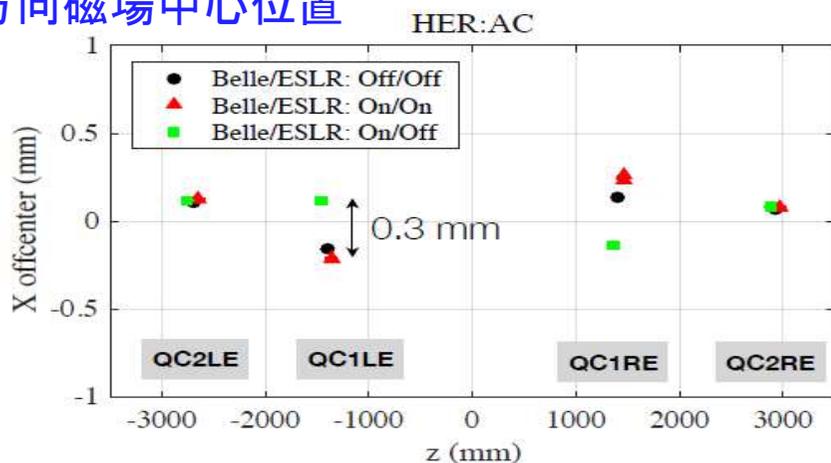
2台のクライオスタットのビームラインに直径 $\phi 0.1\text{mm}$ のBeCuのワイヤーを張り、ワイヤーを精度よく移動し、空間内の磁束量を測定することで4極磁場中心を測定する。

この測定により、ソレノイド励磁による4極磁場中心の変化を観測。
BeCuワイヤーの支持点を設計ビームラインに設置することで、設計上の4極磁場中心からの誤差を測定できる。

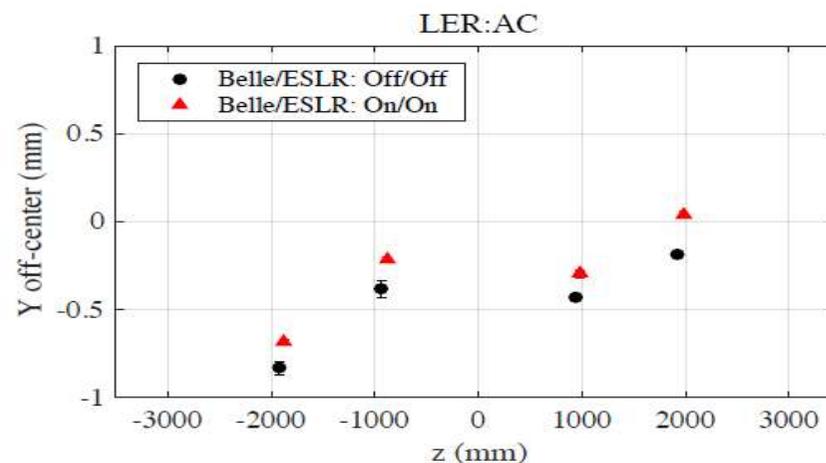
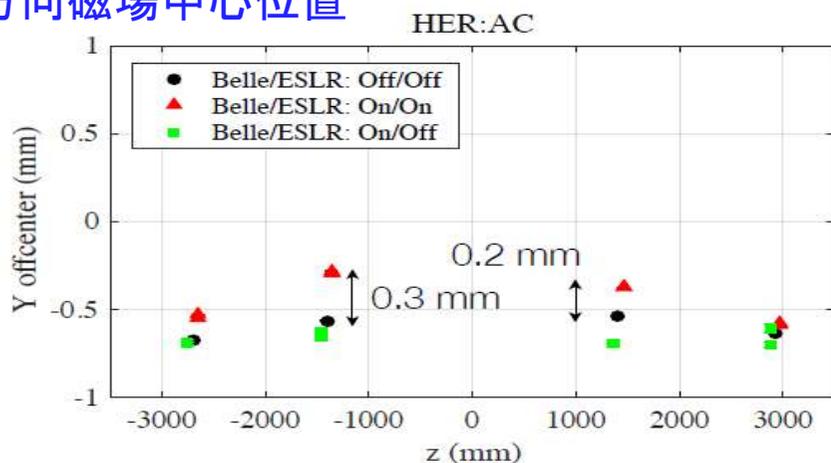


SSWによる4極磁場中心の設置測定結果

水平方向磁場中心位置



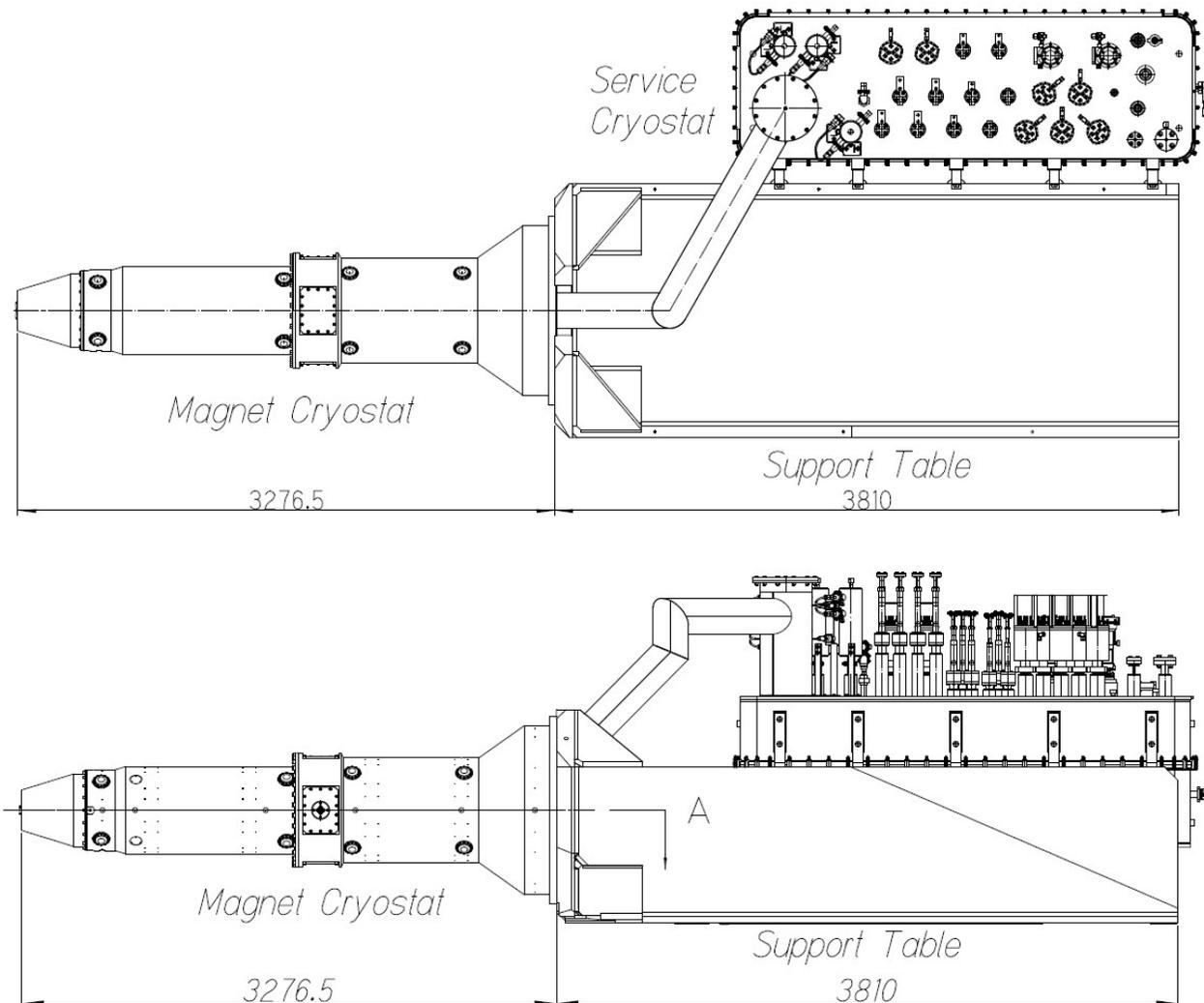
垂直方向磁場中心位置



Belle-IIソレノイドと補正ソレノイドを励磁することによりクライオスタットが持ち上げられる。

QCSRクライオスタット

- 超伝導電磁石を安定に作動させるために非常に重要な部品

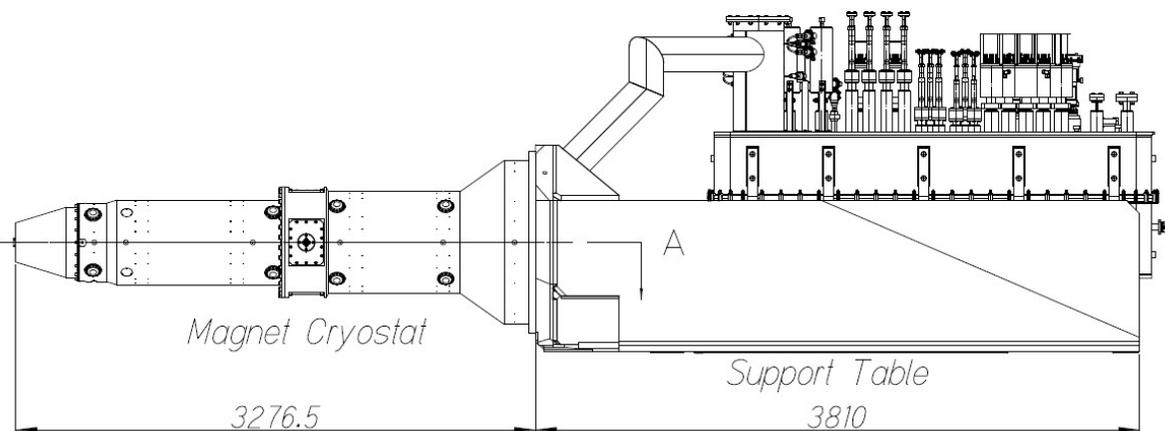
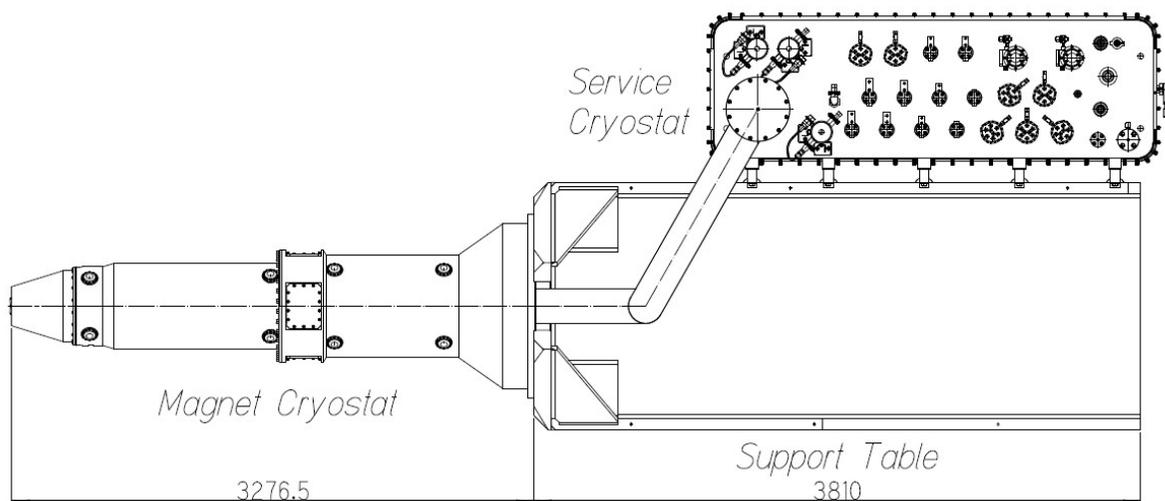


サービスクライオスタットの付属品

電流リード	5組
補正電磁石用8電極リード	7台
Heガス流量制御弁	2台
冷凍機側低温配管接続ポート	3
電磁石クライオスタット低温配管	1

QCSRクライオスタット

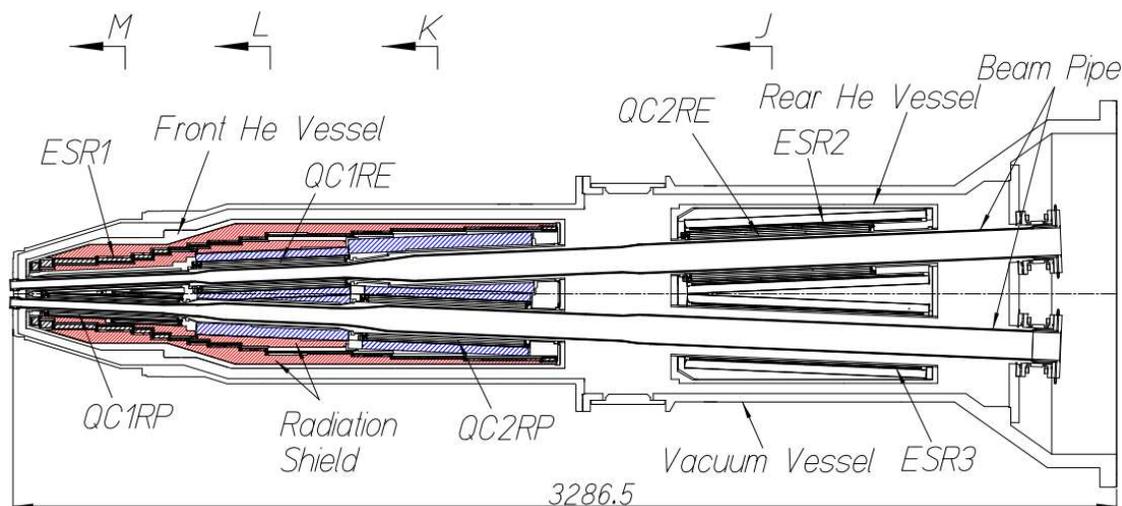
- 超伝導電磁石を安定に作動させるために非常に重要な部品



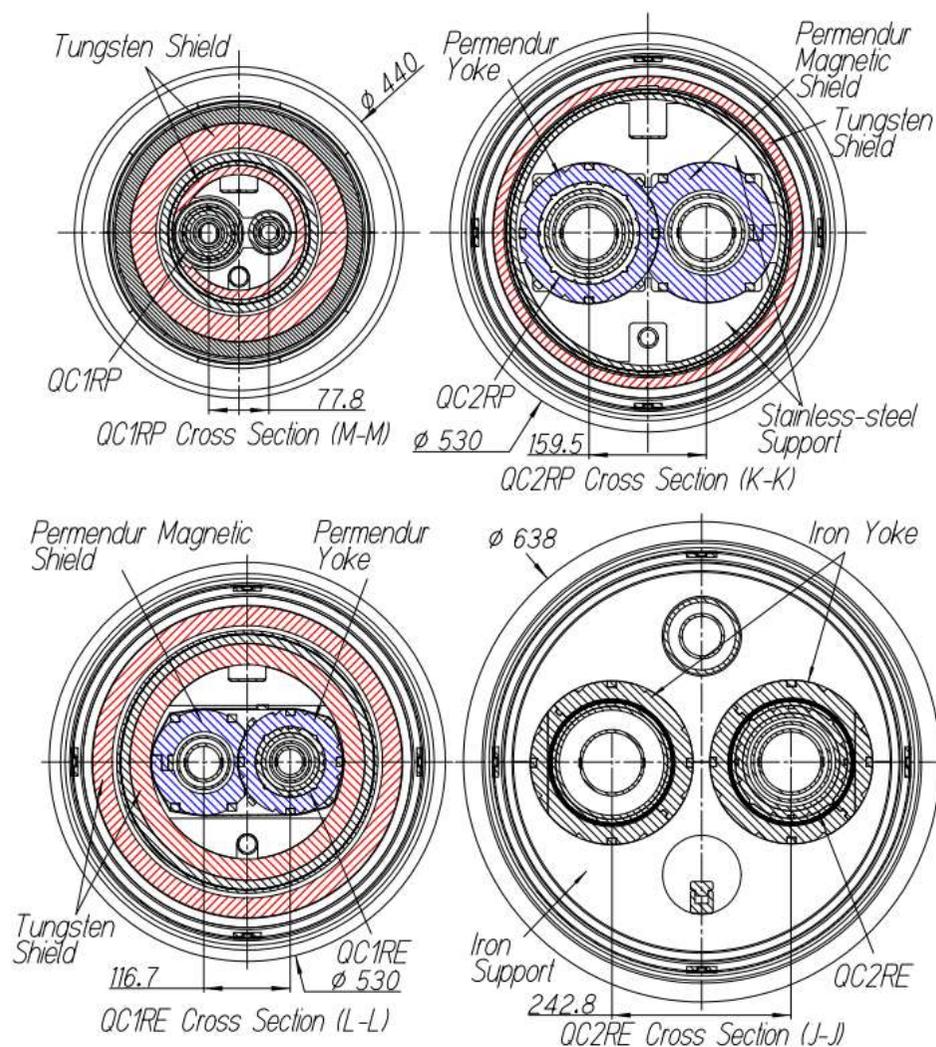
クライオスタットパラメータ

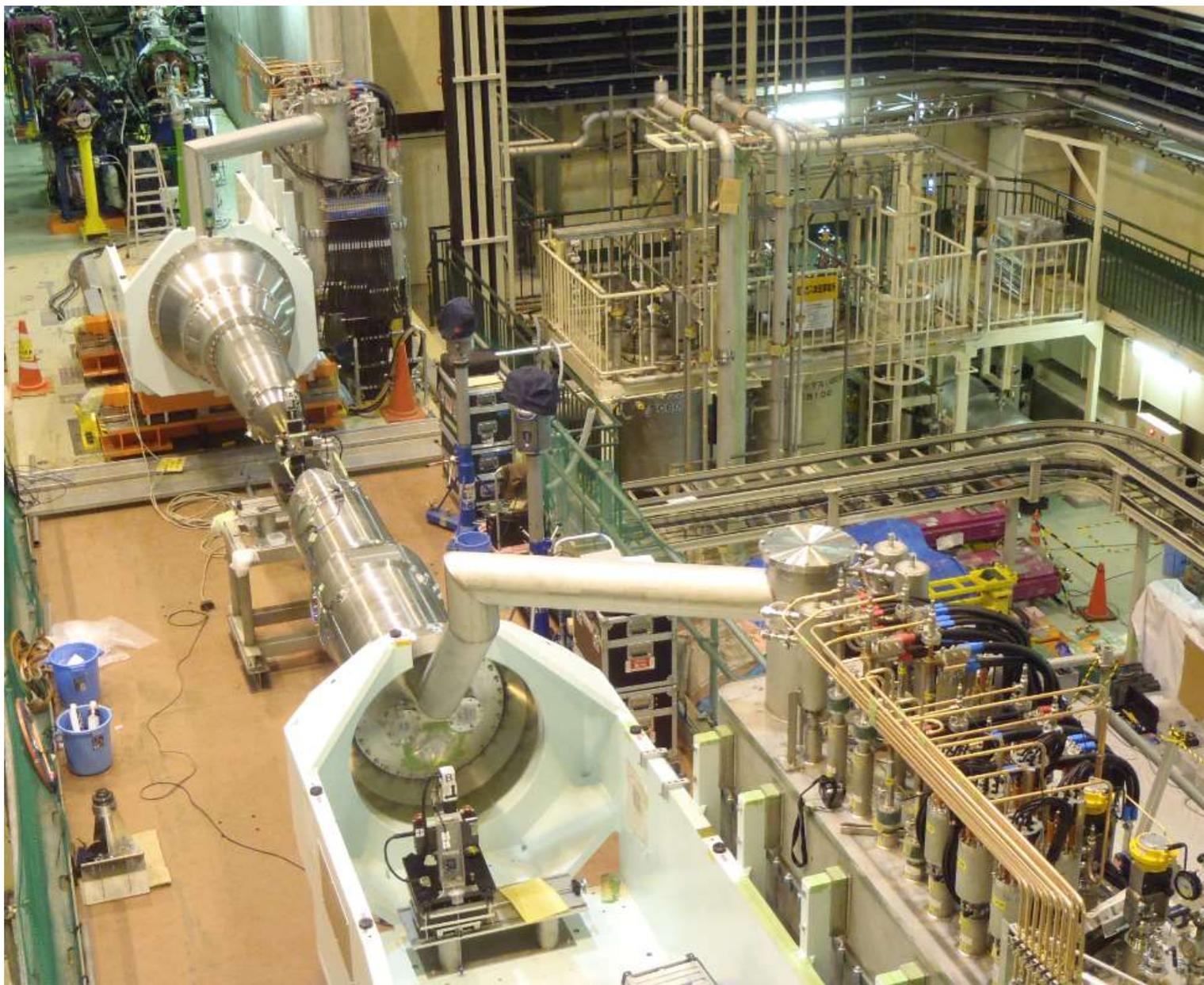
	QCS-L	QCS-R
電磁石クライオスタット		
真空容器長さ(mm)	2724	3287
真空容器最大径 (mm)	φ1100	φ638
真空容器重量 (kg)	1570	1472
4 K冷却重量		
前方部電磁石 (kg)	949	805
放射線遮蔽 (kg)	495	1271
後方部電磁石 (kg)	342	1063
80 K熱輻射遮蔽 (kg)	45	36
サービス容器		
真空容器長さ(mm)	2757	2757
真空容器高さ (mm)	917	917
真空容器幅 (mm)	900	863
真空容器重量 (kg)	2523	2501
80 K熱輻射遮蔽 (kg)	79	77
Heガス冷却電流リード		
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)	6533	7087
重量 (kg)	12814	15000

QCS-R電磁石クライオスタット



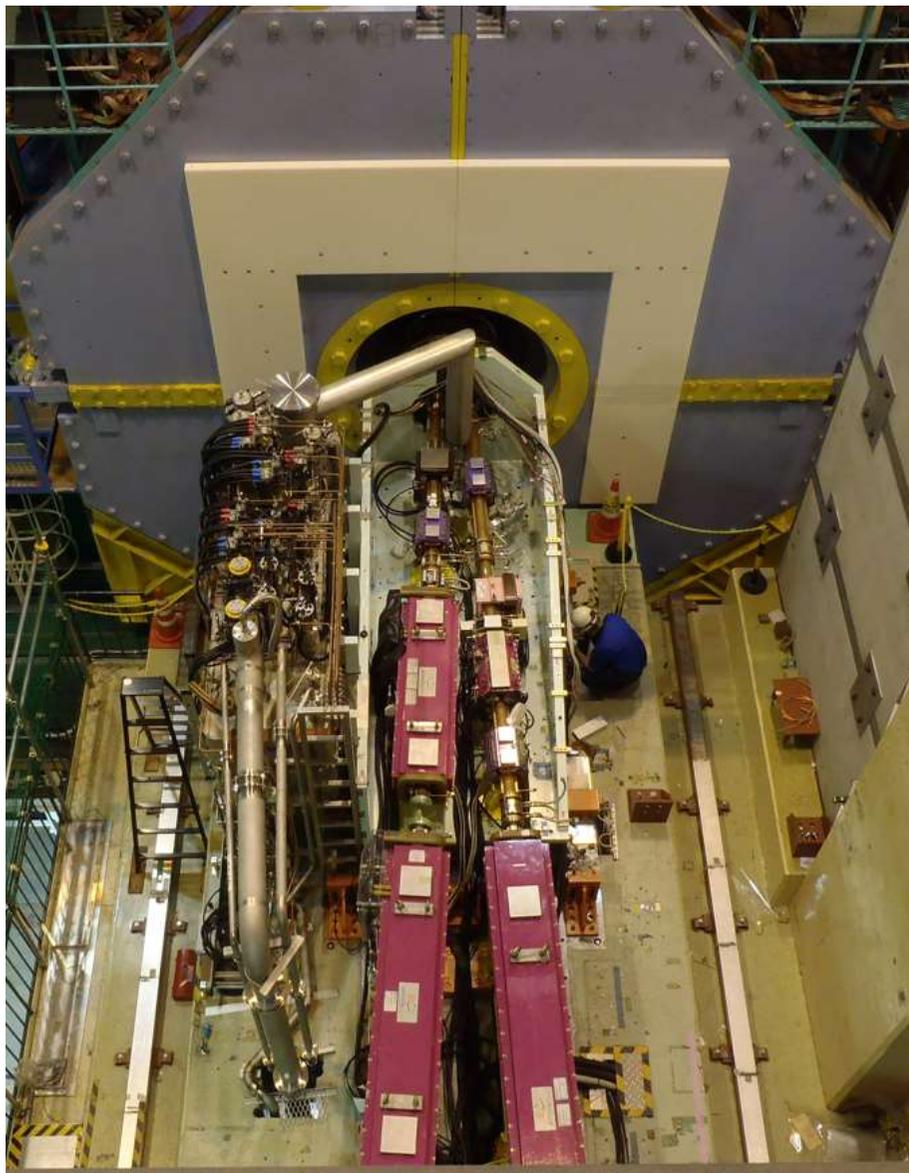
SuperKEKBのビームパイプは室温となるように水で温度管理されている。



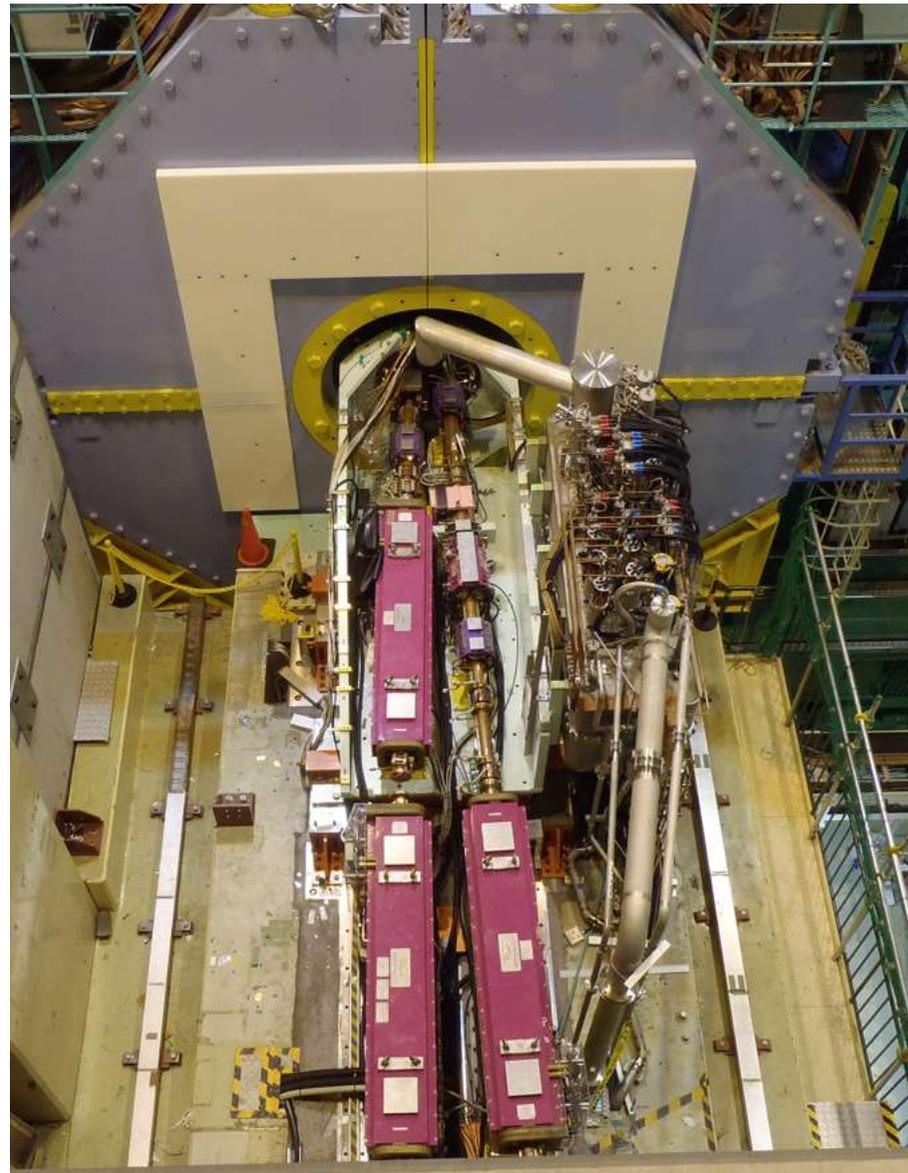


電磁石クライオスタットと冷却システム

QCS-L



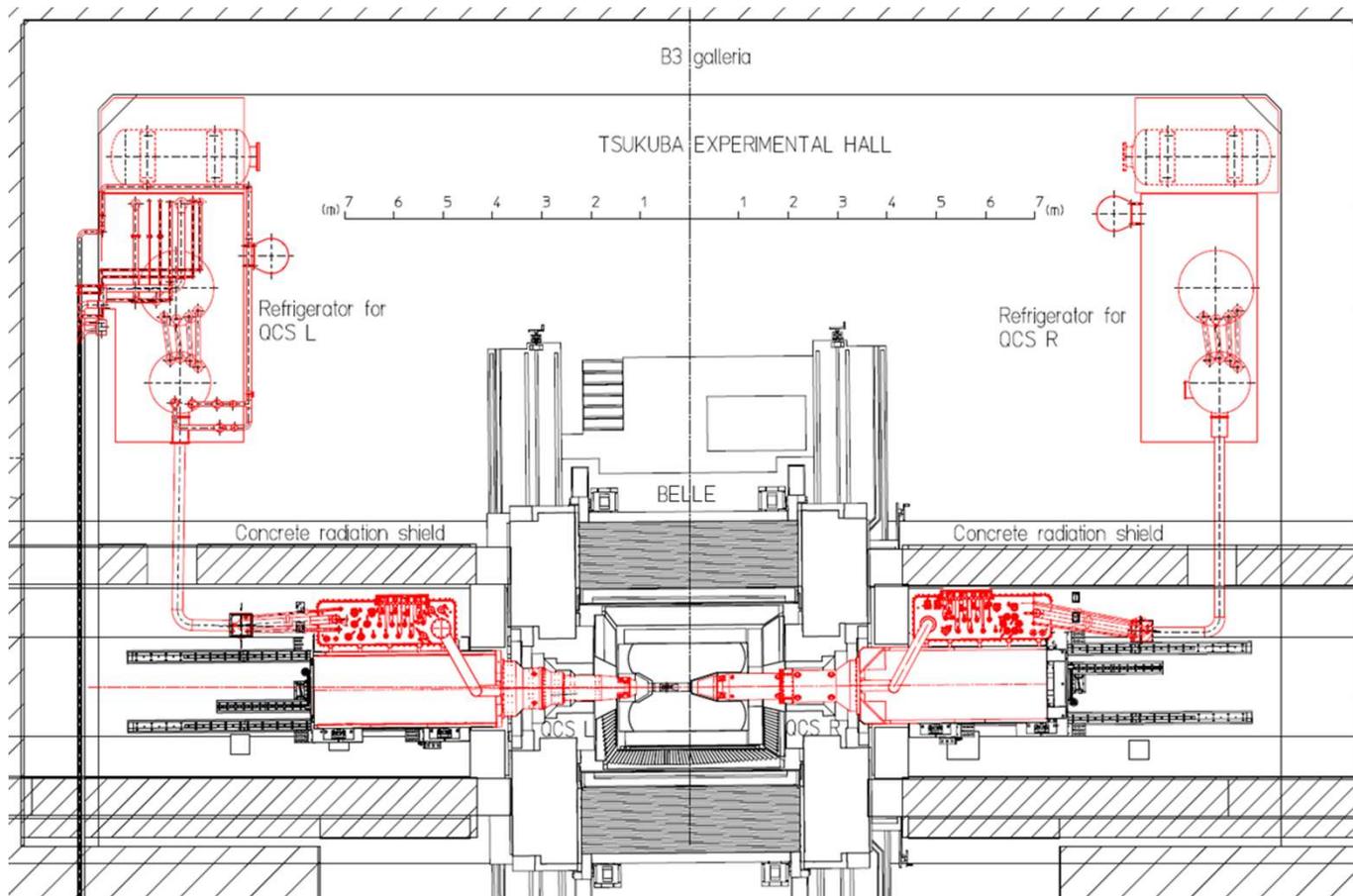
QCS-R



電磁石クライオスタットと冷却システム

各クライオスタットに単独のヘリウム冷凍機システム

- ヘリウム冷凍機は、1995年製作 (TRISTAN QCS用) を再利用。
- 冷凍能力: 250 W @ 4.4K



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 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

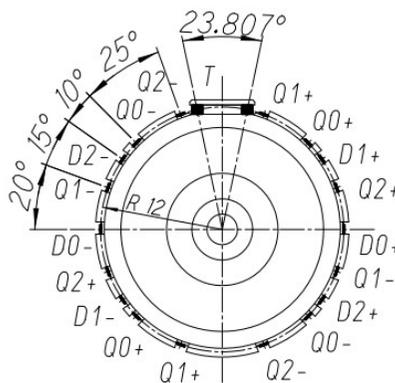
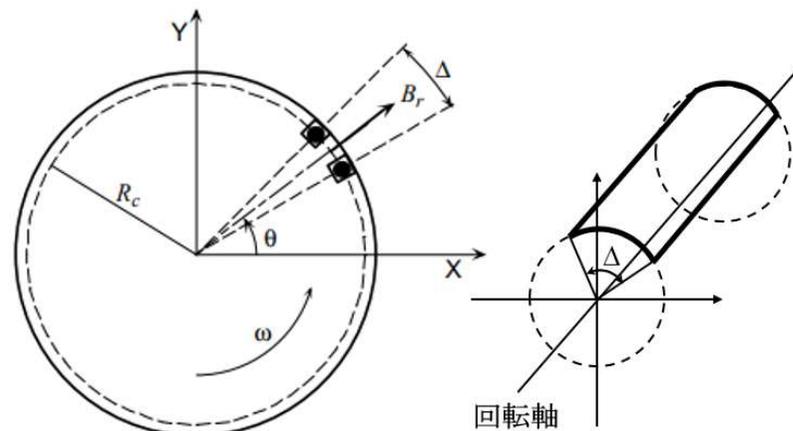
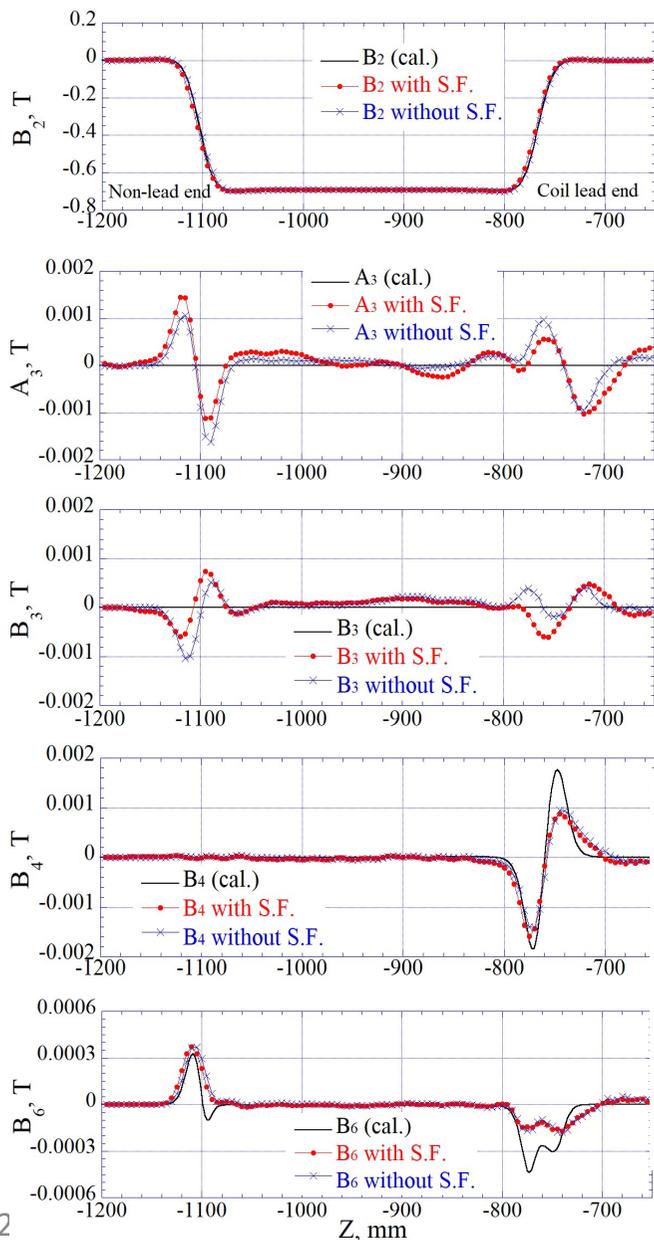
SuperKEKBは、2018年4月から2022年6月まで目標ルミノシティーを目指して非常に繊細なビーム運転を行っている。ルミノシティーは、Belle-II測定器運転中では $4.65 \times 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ まで到達し、加速器のみの運転時には $4.707 \times 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に達している。

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。

Back-up

4極電磁石磁石軸方向磁場分布: QC1LP



Tangential coil: $L=20.43\text{mm}$, $R=12.0\text{mm}$, $T=120$, $OA=21.185^\circ$
 DB coil: $L=23.1\text{mm}$, $R=12.0\text{mm}$, $T=10$, $OA=180.0^\circ$
 QB coil: $L=23.0\text{mm}$, $R=12.0\text{mm}$, $T=10$, $OA=90.0^\circ$