

QCS超伝導電磁石システム 建設状況

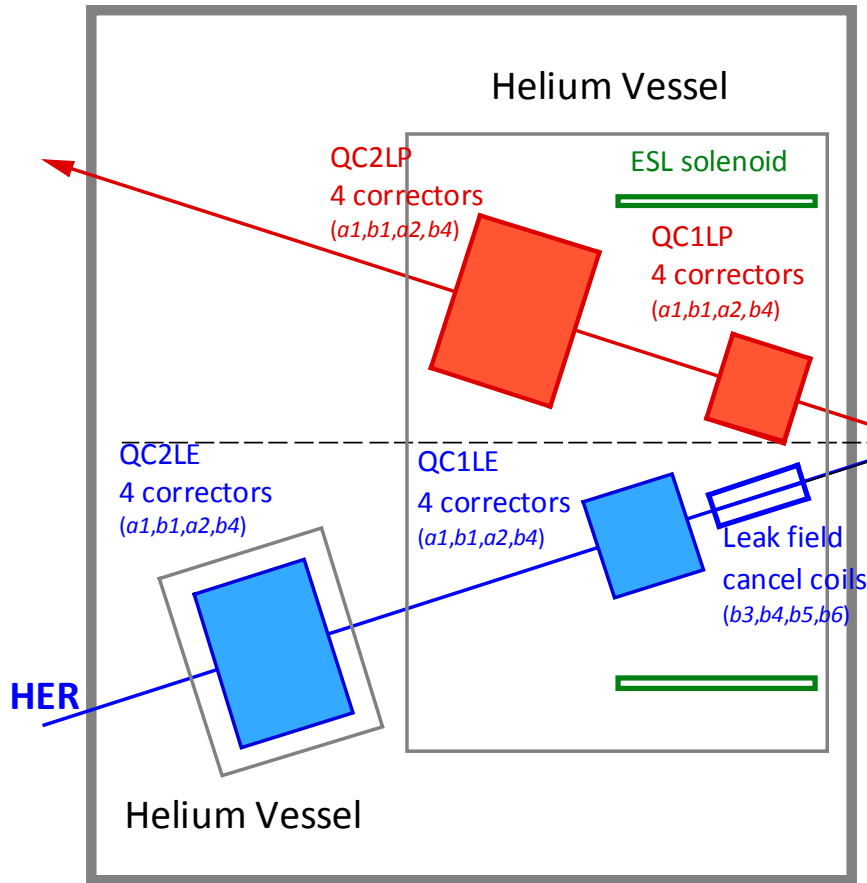
大内 徳人

KEKB Gp:有本、山岡、宗、王、土屋、植木、増澤、川本、大澤、大木、中村
Belle Gp:川井、近藤、青木

1. QCSシステム建設状況
2. QCSシステム冷却試験・励磁試験
3. 超伝導電磁石磁場測定
4. 今後の作業
5. まとめ

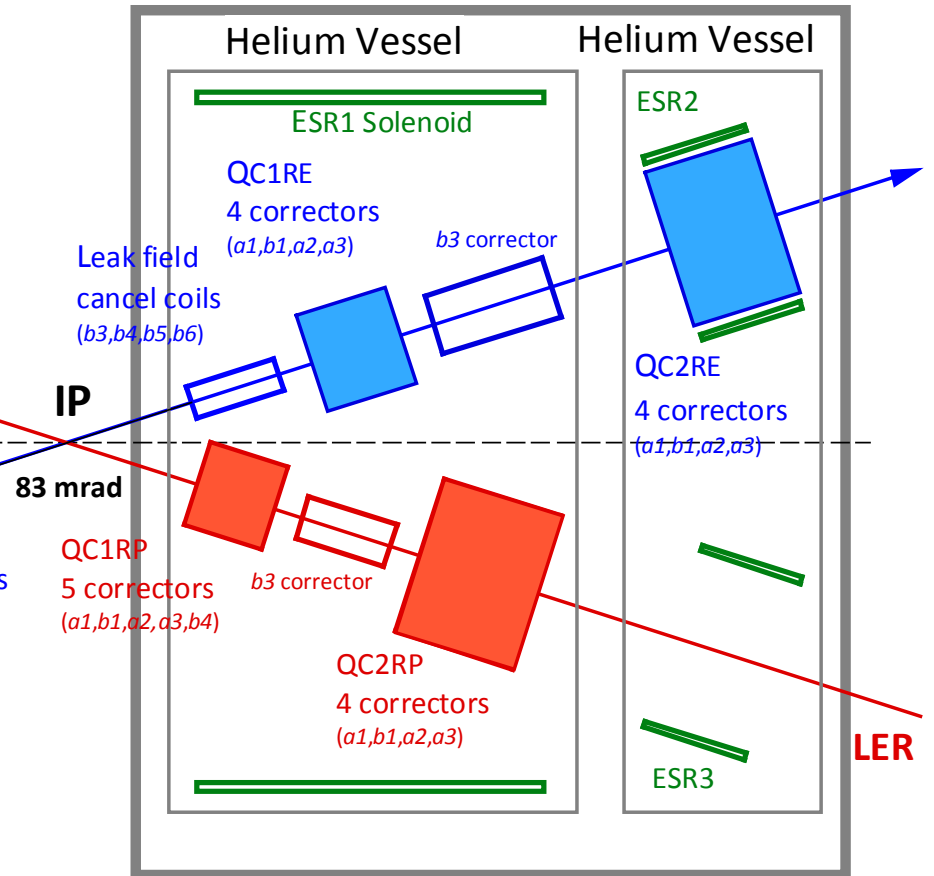
QCS超伝導電磁石システム構成

QCS-L Cryostat



超伝導4極電磁石: 4台
 超伝導補正磁石 (a1, b1, a2, b4): 16台
 QC1LP漏れ磁場キャンセル磁石 (b3, b4, b5, b6): 4台
 超伝導補正ソレノイド: 1台

QCS-R Cryostat

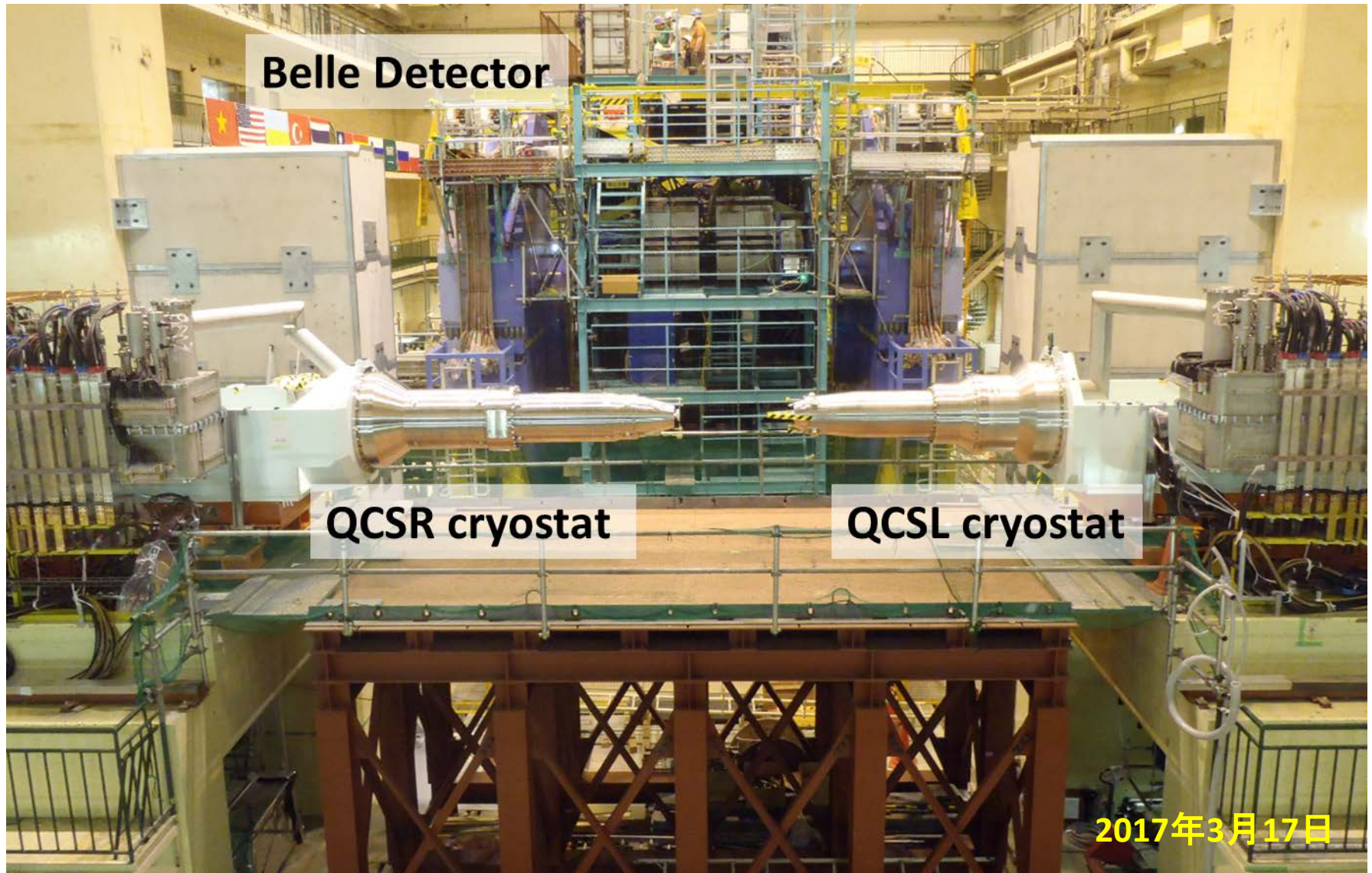


超伝導4極電磁石: 4台
 超伝導補正磁石 (a1, b1, a2, a3, b3, b4): 19台
 QC1RP漏れ磁場キャンセル磁石 (b3, b4, b5, b6): 4台
 超伝導補正ソレノイド: 3台

QCSシステムの建設状況

- 2015年12月: QCSLクライオスタット納品
- 2016年2月～7月: QCSLクライオスタット冷却試験
 - 超伝導低温真空実験棟にて冷却・励磁試験
 - 磁場測定 (Belleソレノイド磁場無し)
- 2016年8月: QCSLクライオスタットビームライン据付
- 2016年9月～10月: QCSL冷却システム建設
- 2016年11月～12月: QCSL冷却・励磁試験
- 2017年2月: QCSRクライオスタット納品・ビームライン据付
- 2017年2月～3月: QCSR冷却システム建設
- 2017年4月11日: Belle-IIロールイン
- 2017年5月～8月: QCSL/QCSRシステム冷却・励磁・磁場測定
 - Belleソレノイド磁場 (1.5T) 下での励磁試験・磁場測定
 - 磁場測定: SSW、ハーモニックコイル、ホールプローブ
 - SSW: 6月19日～6月30日
 - ハーモニックコイル: 7月3日～7月29日、8月17日～19日
 - ホールプローブ: 8月21日～28日

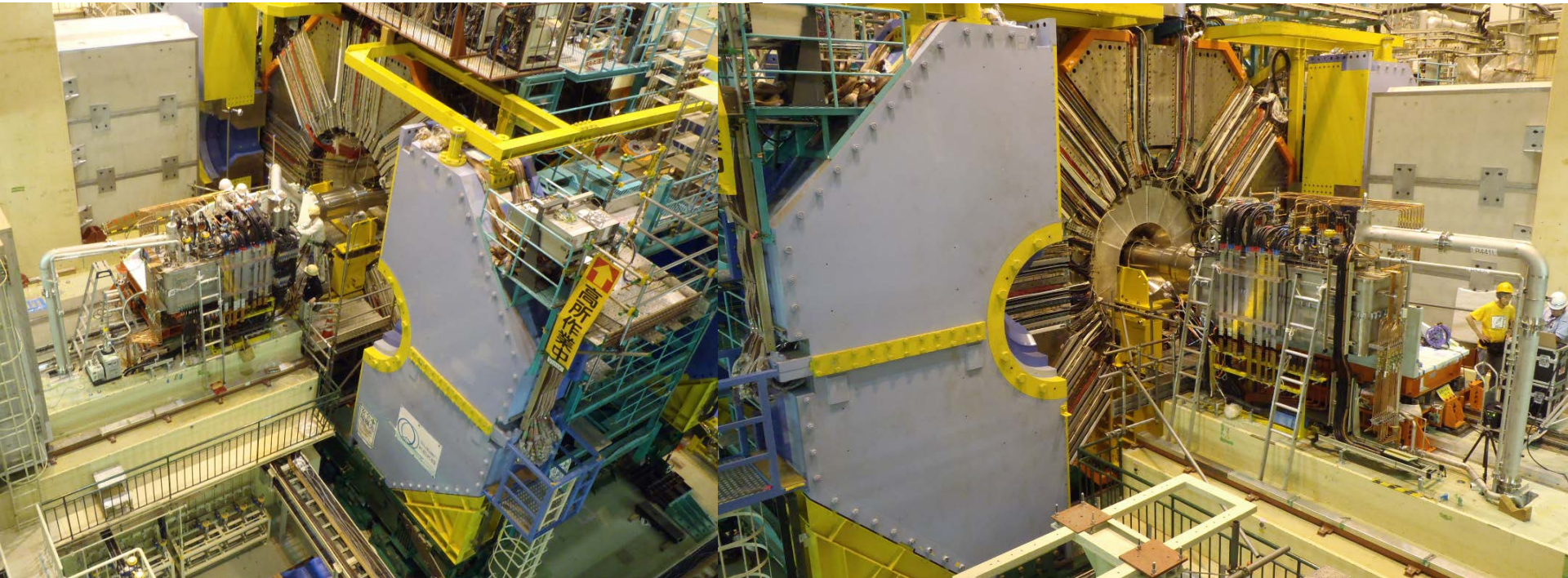
QCSシステムの建設状況



QCSシステムの建設状況

4月11日 : Belle-IIロールイン

5月8日 : QCSL・QCSRクライオスタットIP側へ前進



QCSRクライオスタット

QCSLクライオスタット

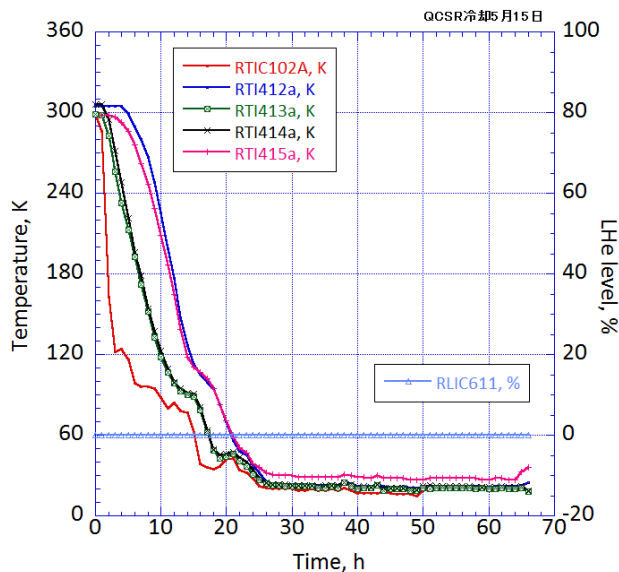
● QCSRシステム冷却試験

– 2017年5月10日: 冷却システム運転開始

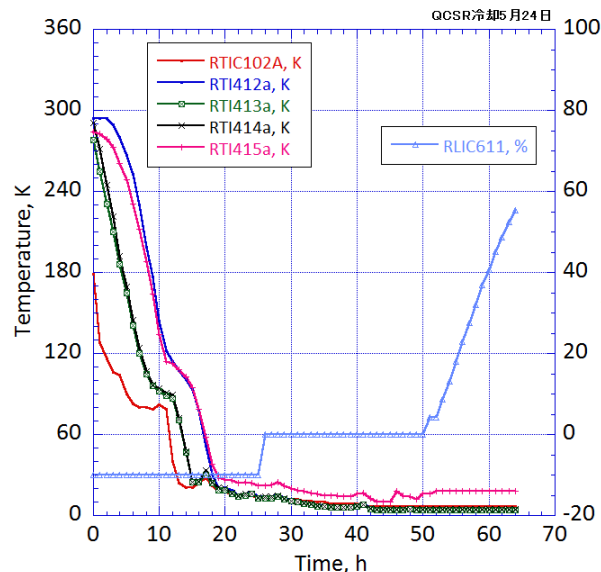
- 1回目の冷却では磁石を液体ヘリウム温度まで冷却できず。
- 冷凍機膨張タービン(寒冷発生源)のモニター(ヘリウムガス流量)が正しく表示せず。
- 問題解決の為、冷却一時停止(圧縮機停止)。
- 2回目の冷却で液体ヘリウム温度まで冷却。

– 2017年8月14日: 再冷却(マグネット温度150K~200Kから冷却)

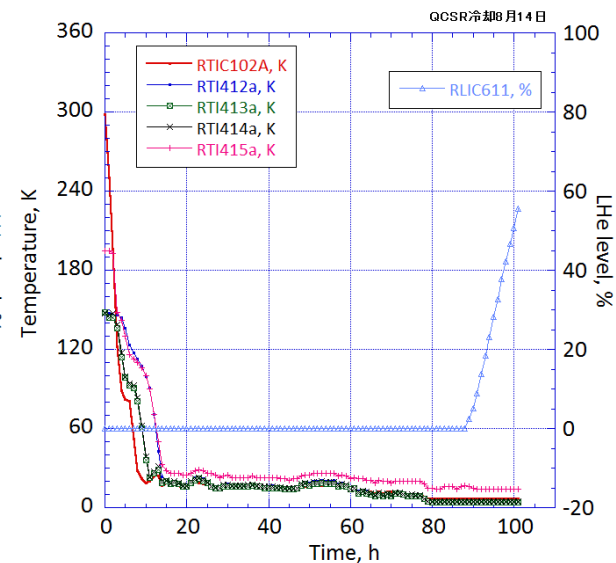
- 冷却に100時間(4日)かかる。
- 冷却システムパラメータの調整が必要。



2017/09/08

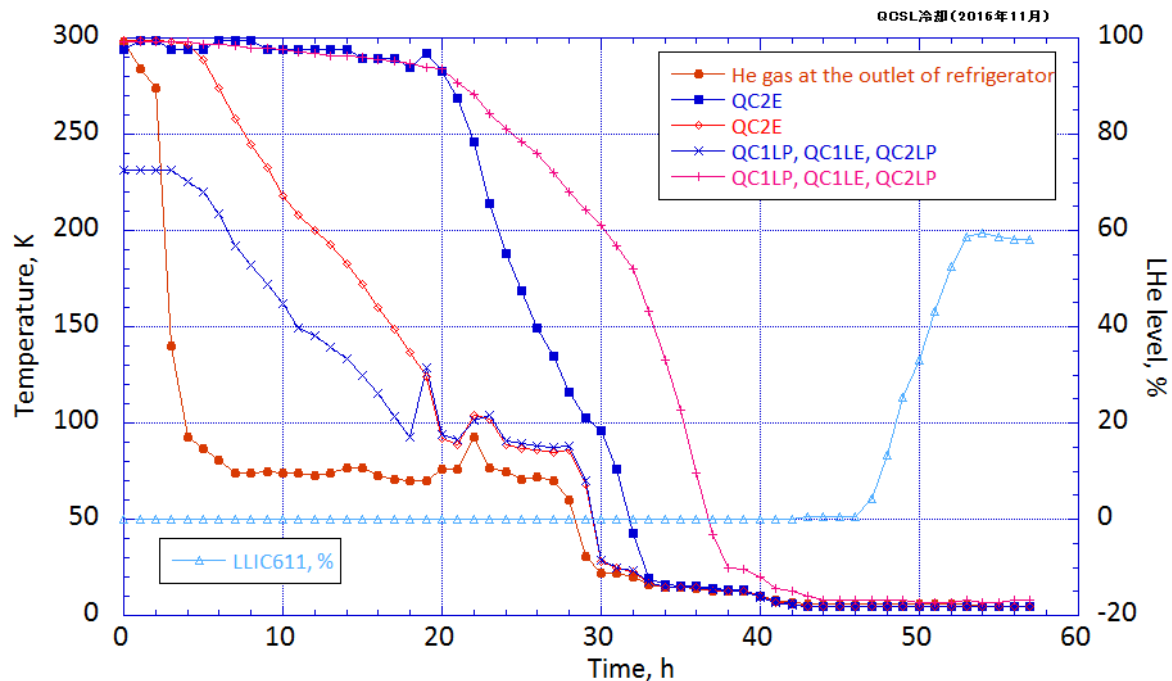


superKEKB 国際リニアコライダー (2017年5月)



● QCSLシステム冷却試験

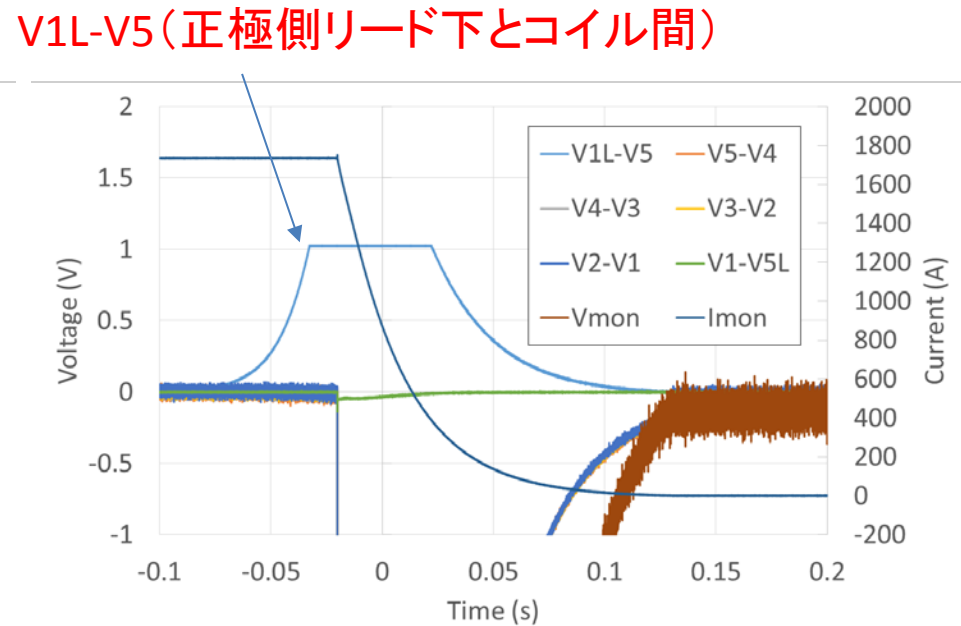
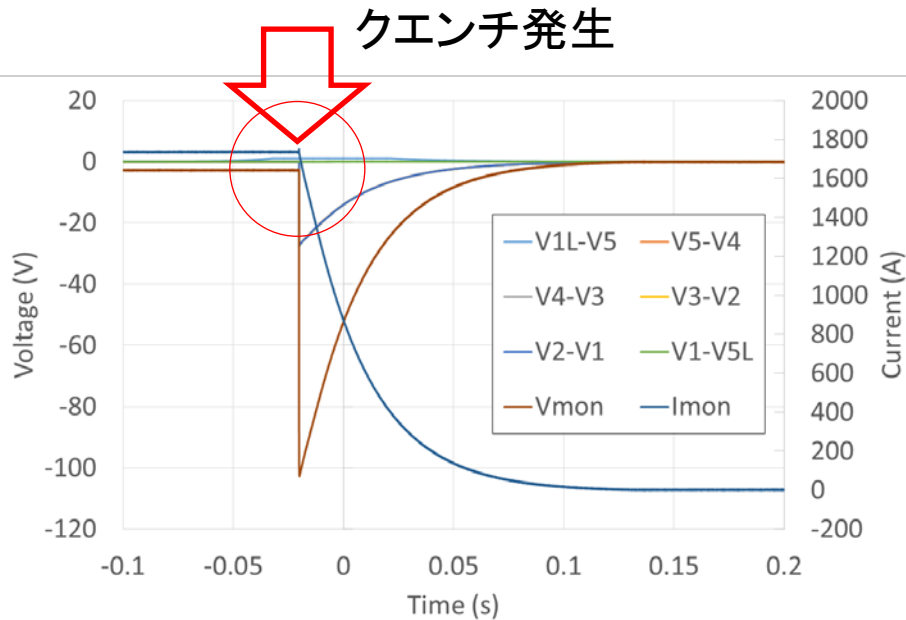
- 2016年11月10日：冷却システム運転開始
 - 1回目の冷却で超伝導マグネットを液体ヘリウム温度まで冷却完了。
 - 定常運転までに要した時間：55時間。
- 2017年5月14日：第2回目の冷却
 - 室温からの冷却時間：44時間
 - 冷却運転ソフト不具合部を修正。



- QCSL/R超伝導マグネット励磁試験
 - 全マグネット(55台)のビーム運転電流値までの励磁に成功
 - Belle-IIソレノイド1.5Tの磁場有。
 - 全4極マグネット同時励磁。
 - 補償ソレノイドESR1、ESLの定格電流値までの励磁中にクエンチ検出器が動作し電源遮断をする。
 - 100A以下の電流値に於いて、電源ノイズ電圧がクエンチ検出電圧を越える。
 - 5月～8月の励磁試験・磁場測定では、100A迄はクエンチ検出器の動作を止めて励磁を行った。
 - 9月以降に電源調整を行う予定。
 - 4極電磁石マグネットクエンチ
 - QC1LE: 2000A励磁中に1752Aでクエンチ(2016年12月6日)
 - クエンチ発生場所: 電流リード下端—超伝導コイル間
 - QC2LP: 1250A励磁中に1240Aでクエンチ(2016年12月9日)
 - クエンチ発生場所: 電流リード下端—超伝導コイル間
 - QC1LE: 1577A励磁中に1090Aでクエンチ(2017年6月13日)
 - クエンチ発生場所: 電流リード下端—超伝導コイル間

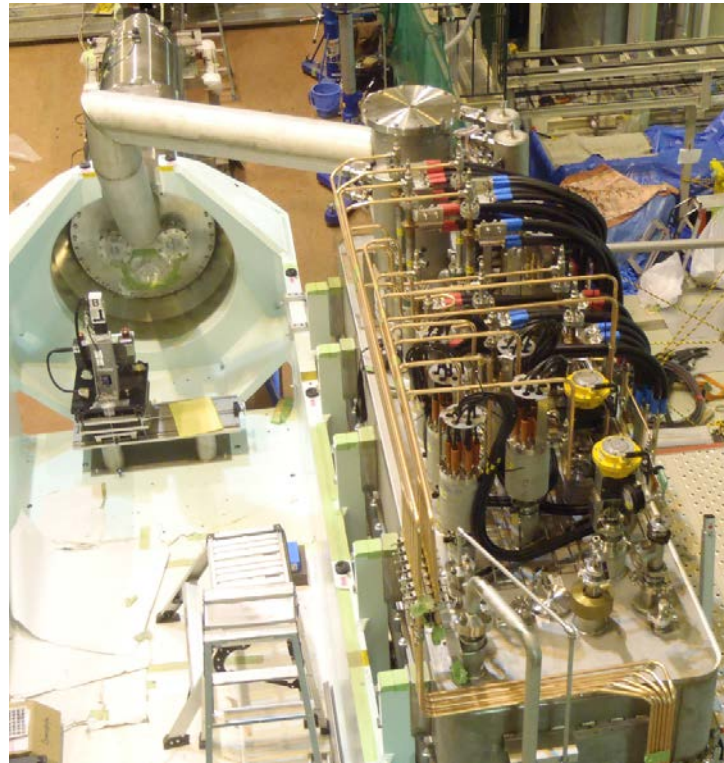
● 4極マグネットのクエンチ

－ QC1LE: 2016年12月6日クエンチ時超伝導コイル電圧波形



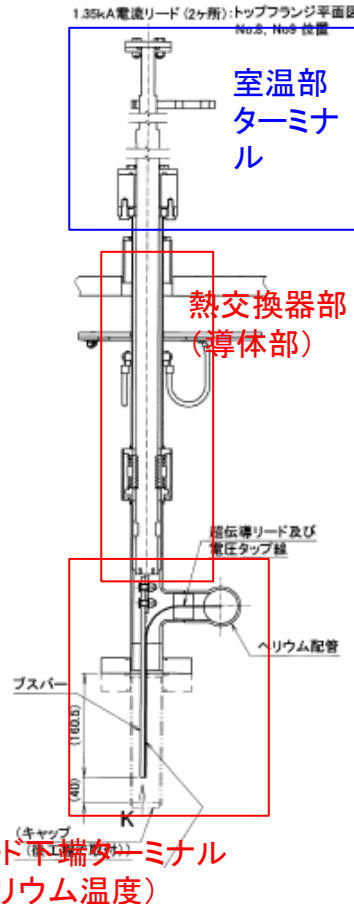
- 電流リード冷却ガス量の不足により、電流リード下端の温度が超伝導ケーブルの臨界温度を越えたと考えられる。
- 試験時の対策: 電流リード冷却ガス量を1.5流し、超伝導電磁石の通電を行った。

● 電流リード下端温度の推定



サービスクライオスタット上面

電流リード構造



現状：超伝導磁石ケーブルを電流リード下端バスバーに半田接続

- 超伝導ケーブル(NbTi)
 - 線径0.5mm(銅比1)ストランド10本
 - ストランド性能
 - 5T @ 4.22 K 307A
 - 6T @ 4.22 K 247A
- NbTiの0T, 4Kでの $J_c=5500$ A/mm²
 - $T_{cs}=T_b + [T_c(B) - T_b][1 - (I_{op}/I_c)]$
 - $T_c(0) = 9.2$ K, $T_b = 4.2$ K
 - **$T_{cs} = 7.52$ K**
 - 上記の計算に於いて、 $I_c=5500$ A/mm², $I_{op}=1848$ A/mm² (1800A相当)としている。

対策：マグネットに使用したケーブル2本を銅バーに追加する

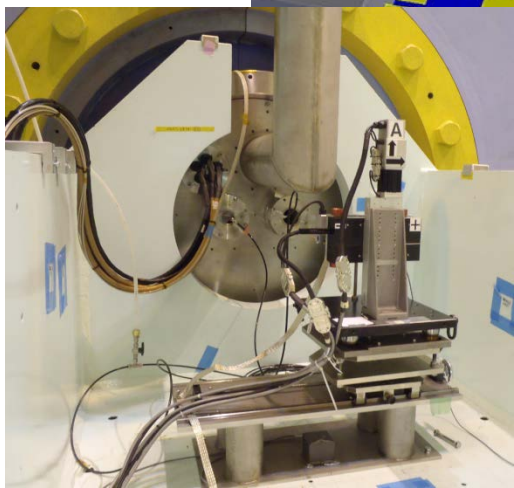
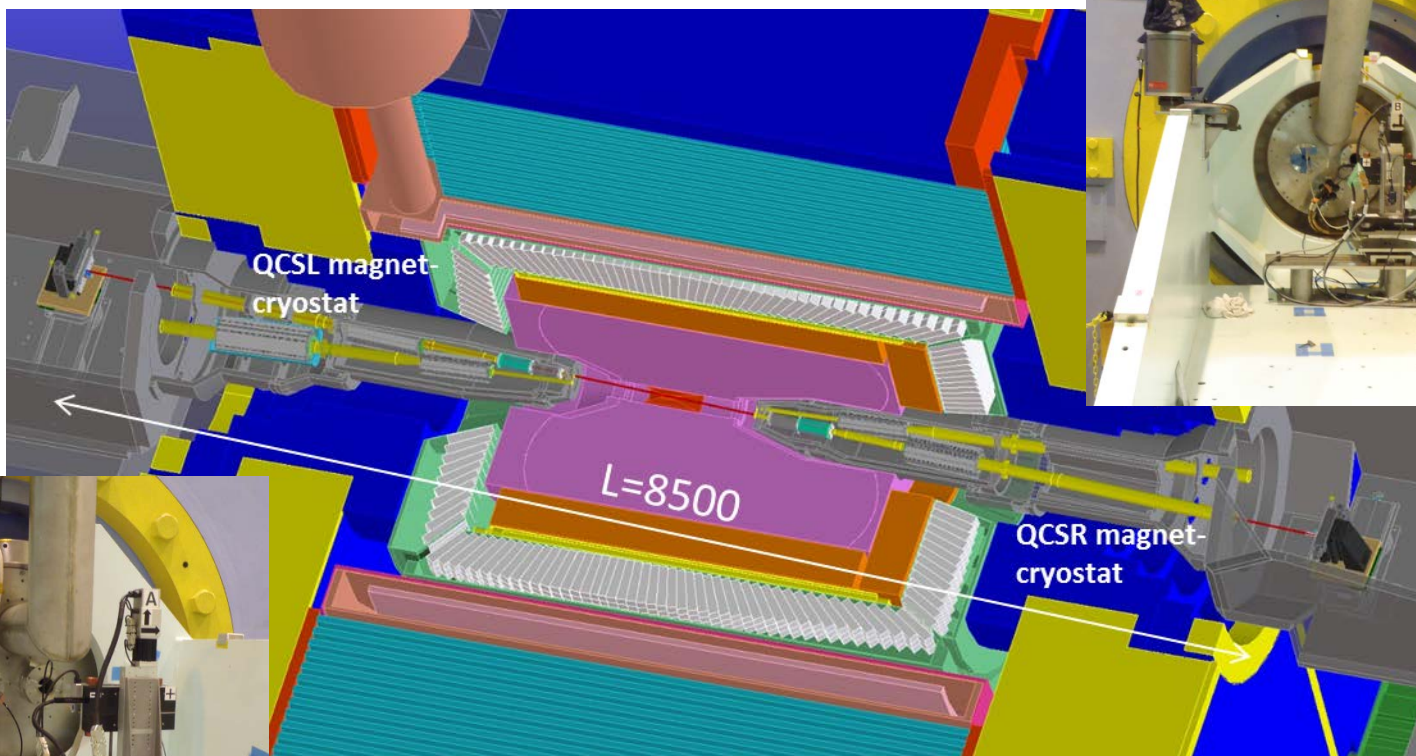
- 電流密度が1/3となり、 **$T_{cs} = 8.64$ K**

- Single Stretched Wire (SSW)
 - ビームラインに対する4極磁石中心位置、4極磁場面角度の測定
- Harmonic Coil
 - 全加速器用磁石主成分の電流依存性の測定(積分型コイル)
 - 多極成分(エラー磁場)の電流依存性についても測定
 - ビームライン上での磁場分布の測定(20mm長コイル)
 - 主成分及び多極成分の測定
 - 4極磁石のIPからの位置の測定
- ホールプローブ
 - ビームライン上での B_x , B_y , B_z 測定
 - Belle-IIソレノイドと補正ソレノイドによる磁場分布測定
 - 積分磁場の計算を行い、積分磁場をゼロに調整する。

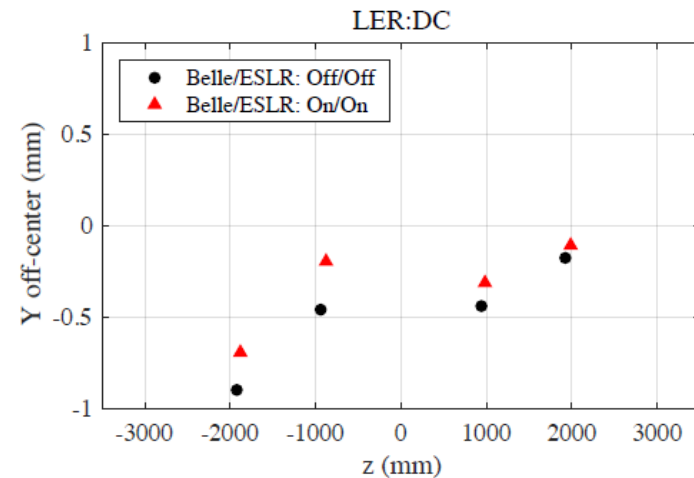
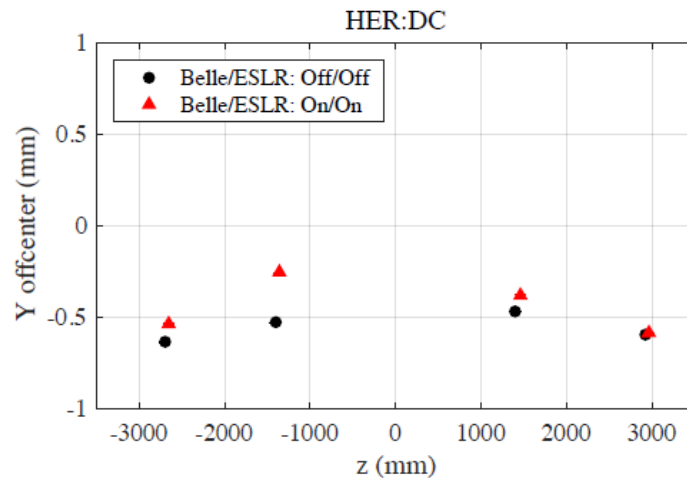
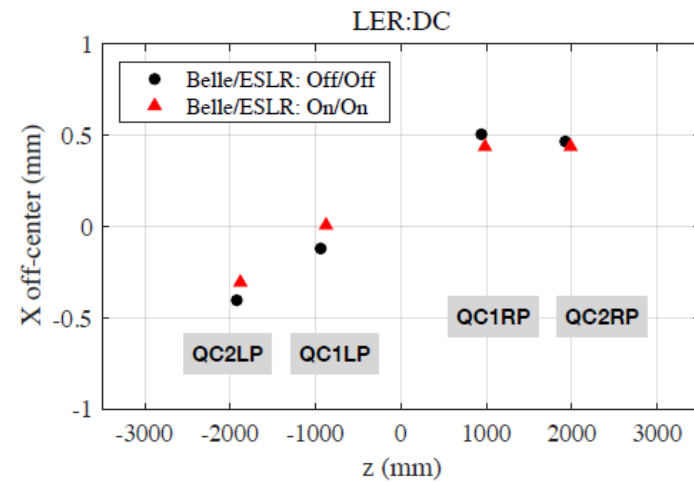
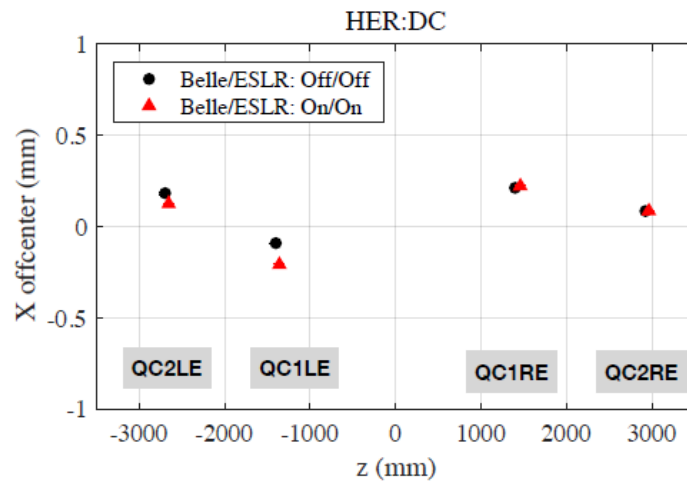
SSW磁場測定

- Single Stretched Wire (SSW)磁場測定

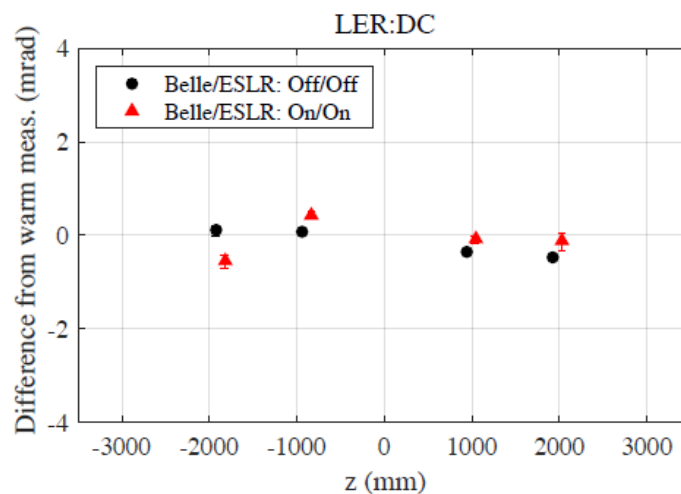
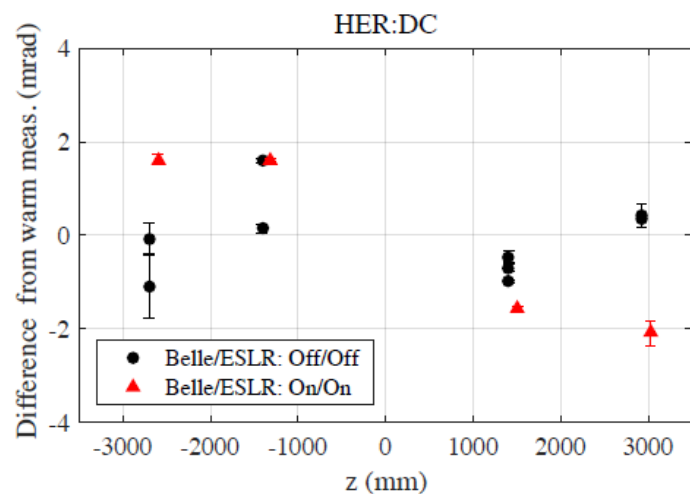
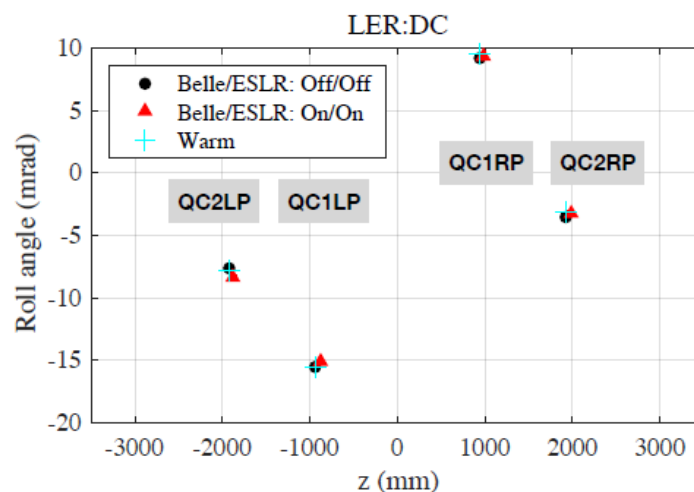
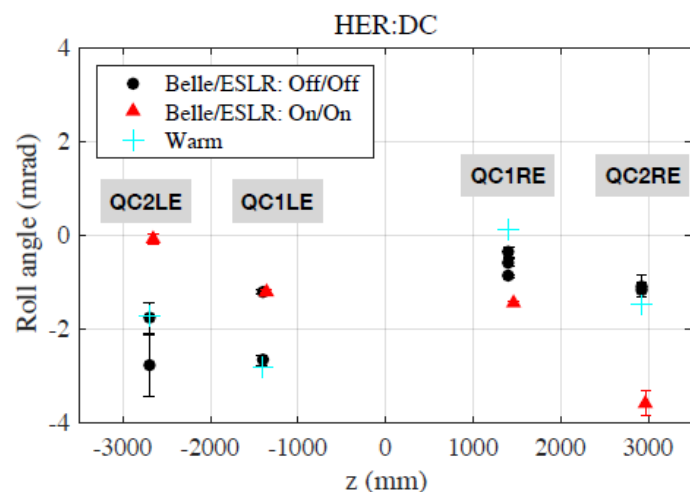
- 2台のクライオスタット後方から、 $\phi 0.1$ mmのBeCuワイヤーをビームライン上に張り4極磁石の磁場センター、磁場面角度測定を行う。
- FNALとの共同研究。



- 4極磁石磁場センター測定結果



● 4極磁石磁場面角度測定結果



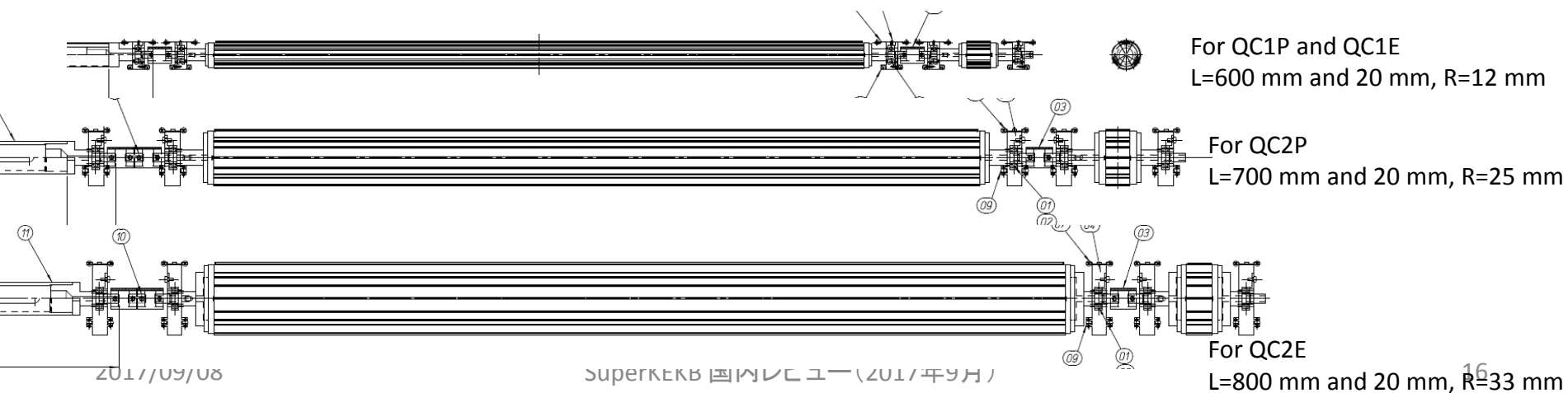
4極磁場面角度 (設計値)、mrad

QC1LP = -13.65
 QC2LP = -3.725
 QC1RP = 7.204
 QC2RP = -2.114
 QC1LE = 0.0
 QC2LE = 0.0
 QC1RE = 0.0
 QC2RE = 0.0

ハーモニックコイル磁場測定

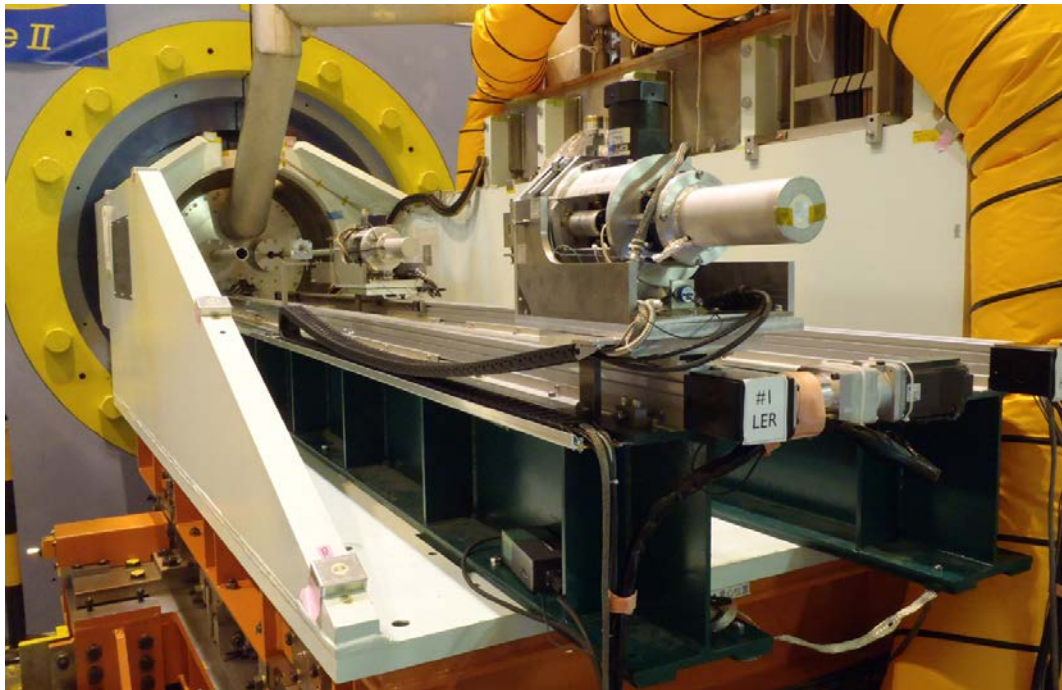
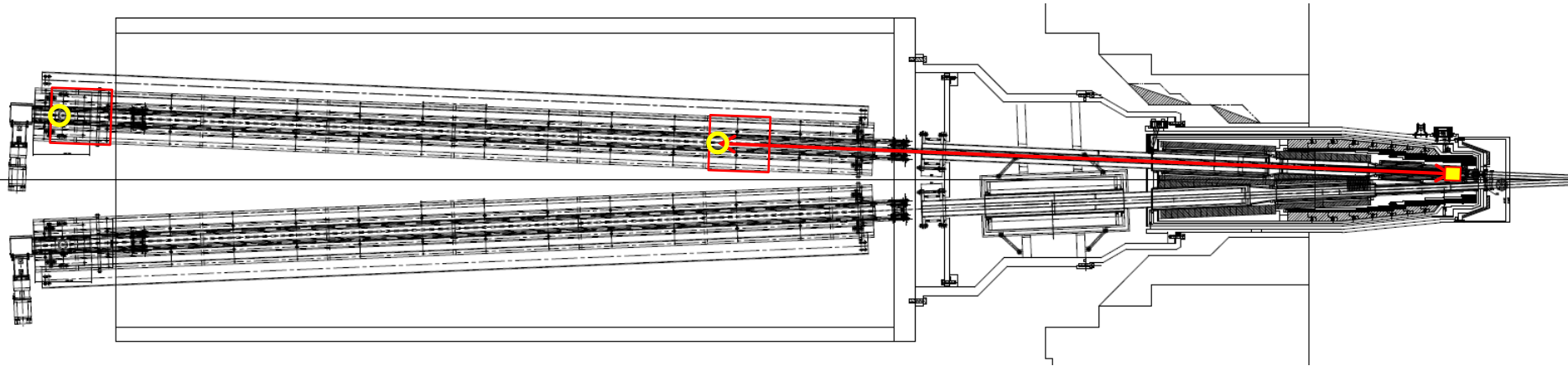
- ハーモニックコイル (Tangential Coil)

- QC1P ($R_{ref}=10\text{mm}$)、QC1E ($R_{ref}=15\text{mm}$)
 - ハーモニックコイル半径 = 12 mm
 - コイル長: 積分型 = 600 mm、磁場分布測定用 = 20 mm
- QC2P ($R_{ref}=30\text{mm}$)
 - ハーモニックコイル半径 = 25 mm
 - コイル長: 積分型 = 700 mm、磁場分布測定用 = 20 mm
- QC2E ($R_{ref}=35\text{mm}$)
 - ハーモニックコイル半径 = 33 mm
 - コイル長: 積分型 = 800 mm、磁場分布測定用 = 20 mm



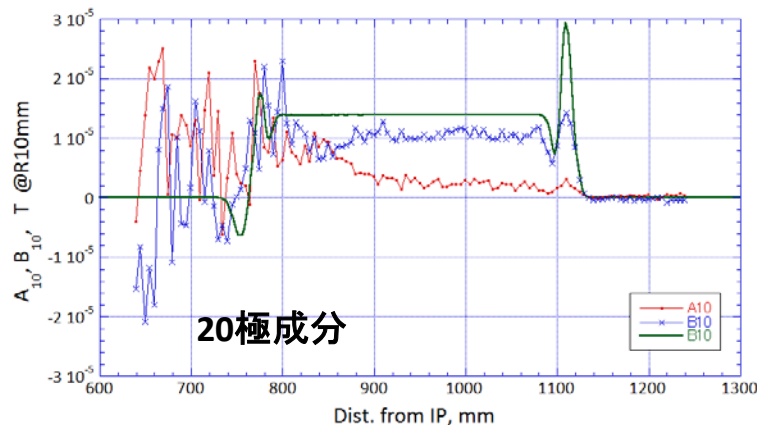
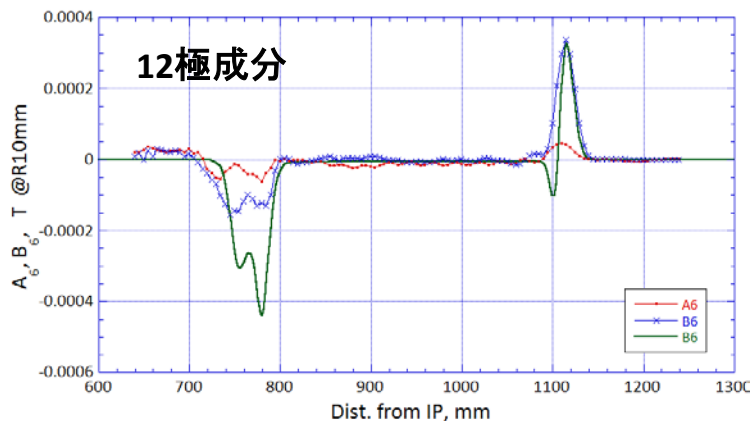
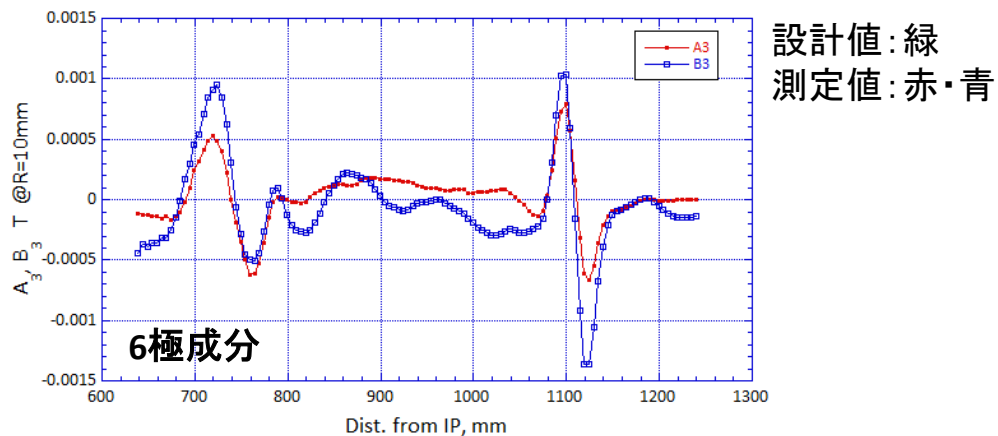
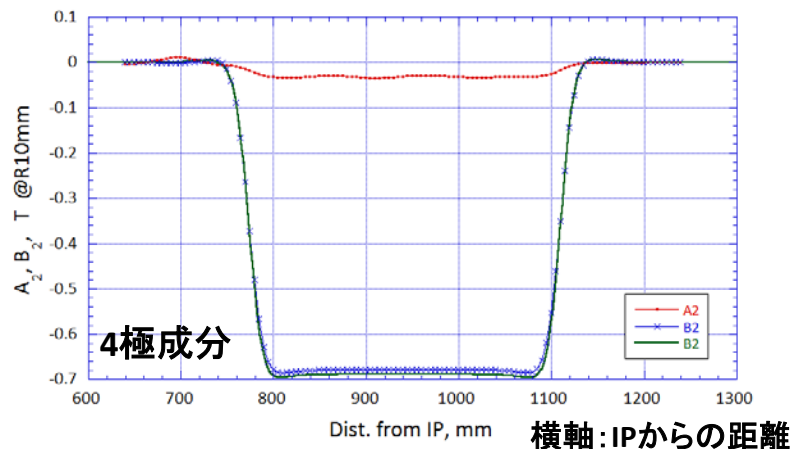
ハーモニックコイル磁場測定

ムーバーの初期位置とIPからの距離を測定



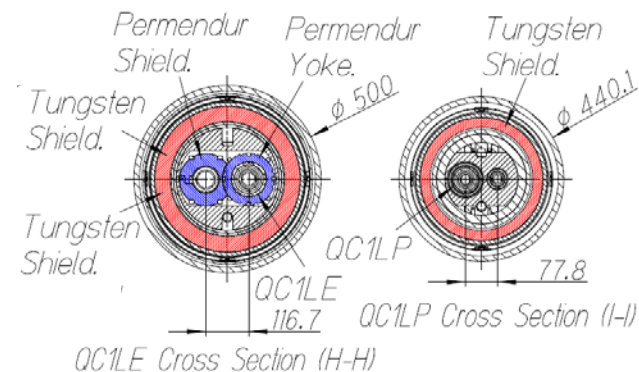
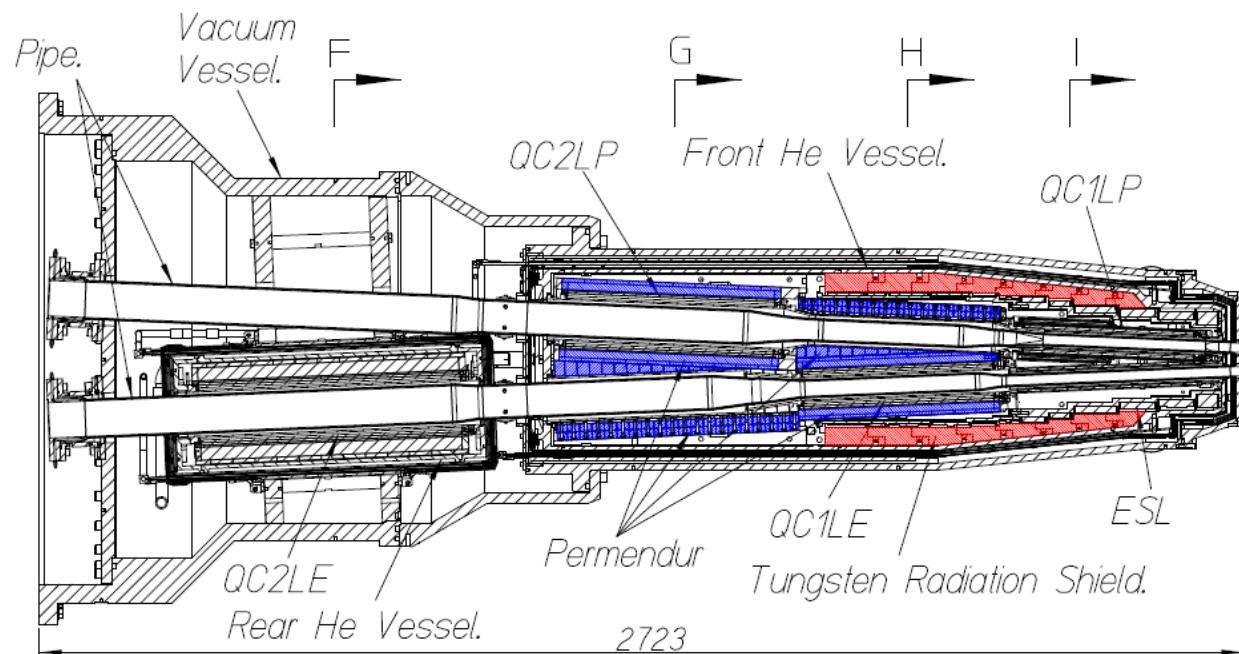
ハーモニックコイル磁場測定

- QC1LPの磁場測定結果(ビームライン上の磁場分布)

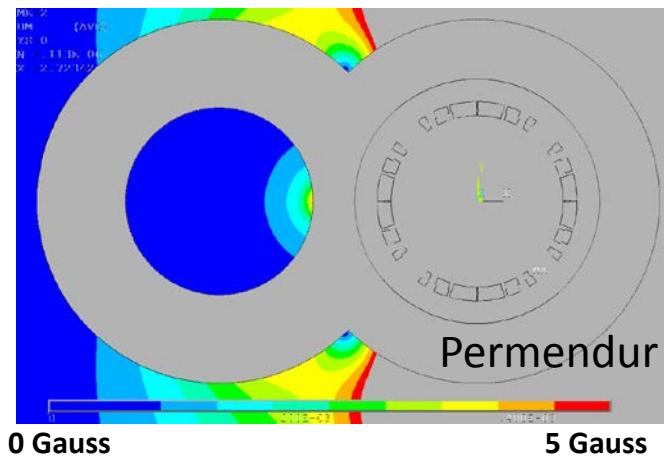
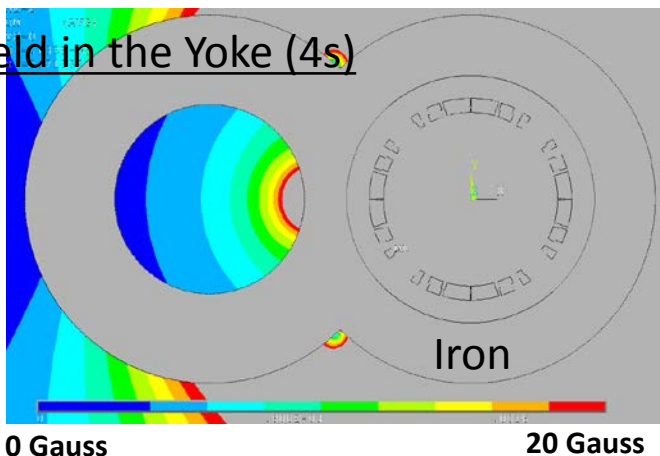


QC1LP電流値=1625A、磁場測定結果はQC1LPの回転あり。計算結果は回転無し。
 4極磁場分布から計算される磁石中心位置=937.2 mm (設計値=935 mm): $\Delta=2.2$ mm

ハーモニックコイル磁場測定



With 0.5 T field in the Yoke (4s)



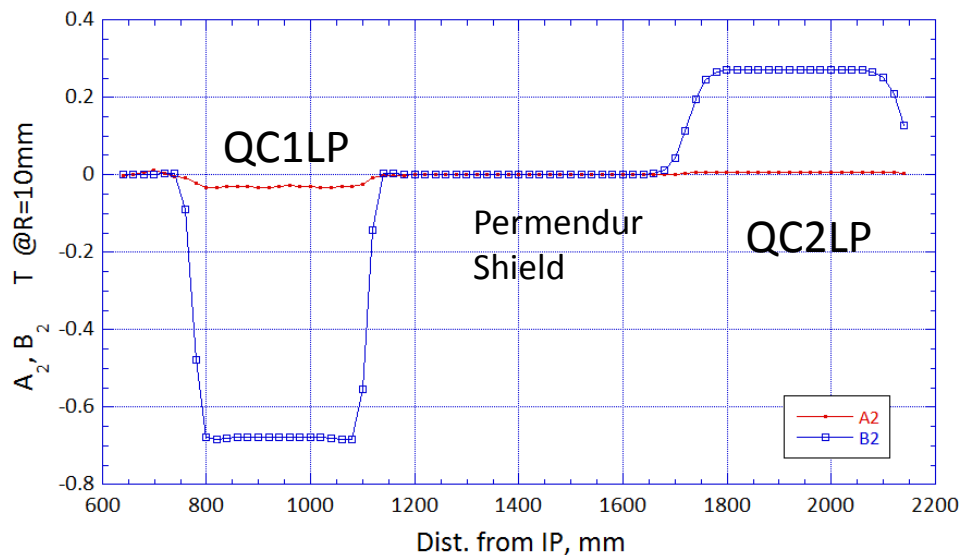
2017/09/08

Leak field at e+ center = 6 Gauss

0 Gauss

Leak field at e+ center < 1 Gauss

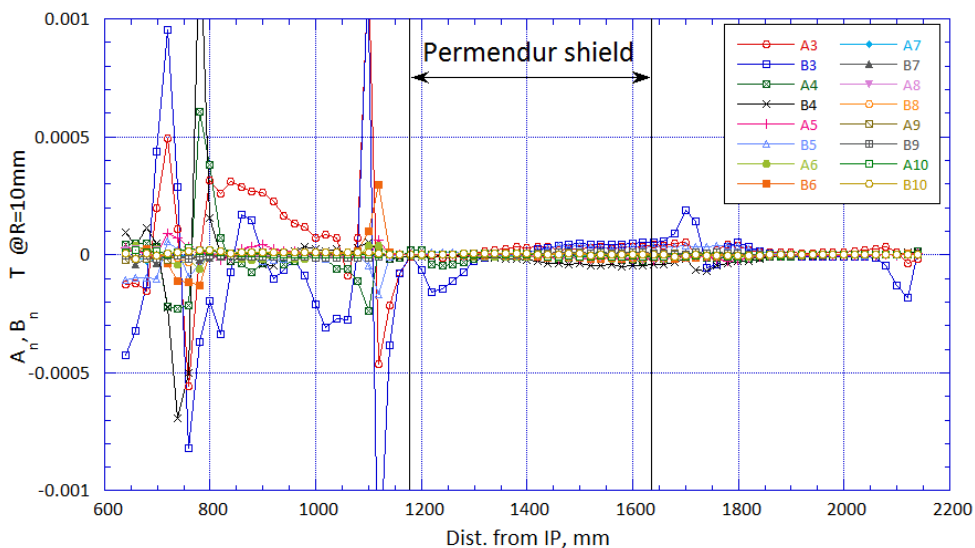
ハーモニクコイル磁場測定



磁石中心位置 (IPからの距離):

QC1LP: 937.24 mm (設計=935 mm): $\Delta=2.2$ mm

QC2LP: 1927.6 mm (設計=1925 mm): $\Delta=2.6$ mm



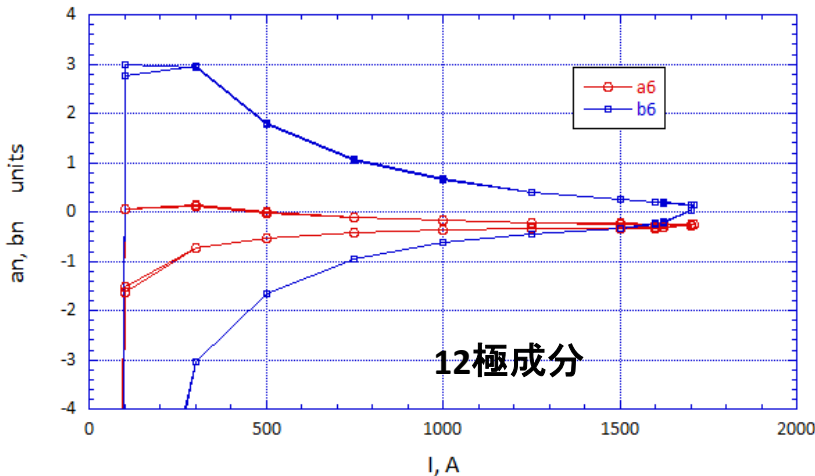
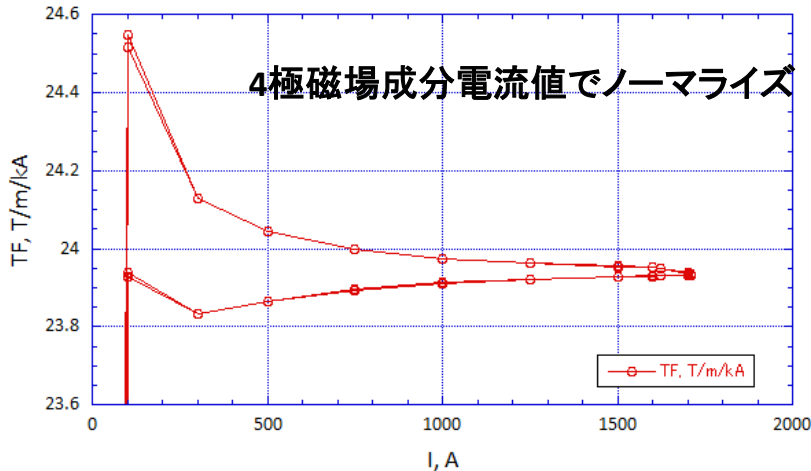
Parmendur磁気シールド内:

6極以上の多極成分 < 1 Gauss @ R=10 mm

ハーモニックコイル磁場測定

● QC1LPの磁場測定結果(積分磁場)

ー 電磁石の電流依存性の測定



1625A (up-ramp)でのエラー成分 (units)、
 $R_{ref}=10$ mm

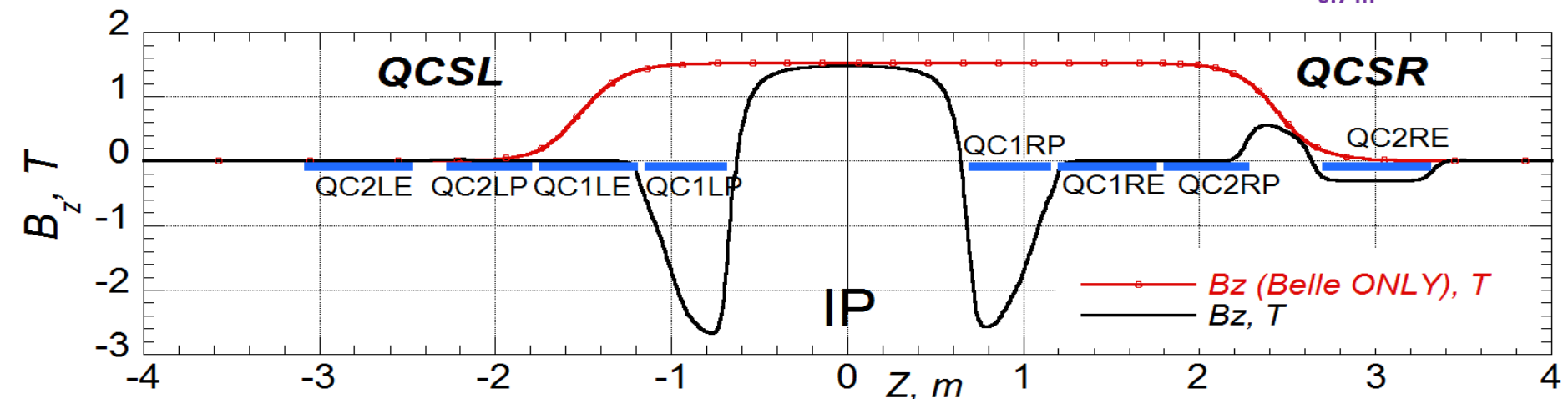
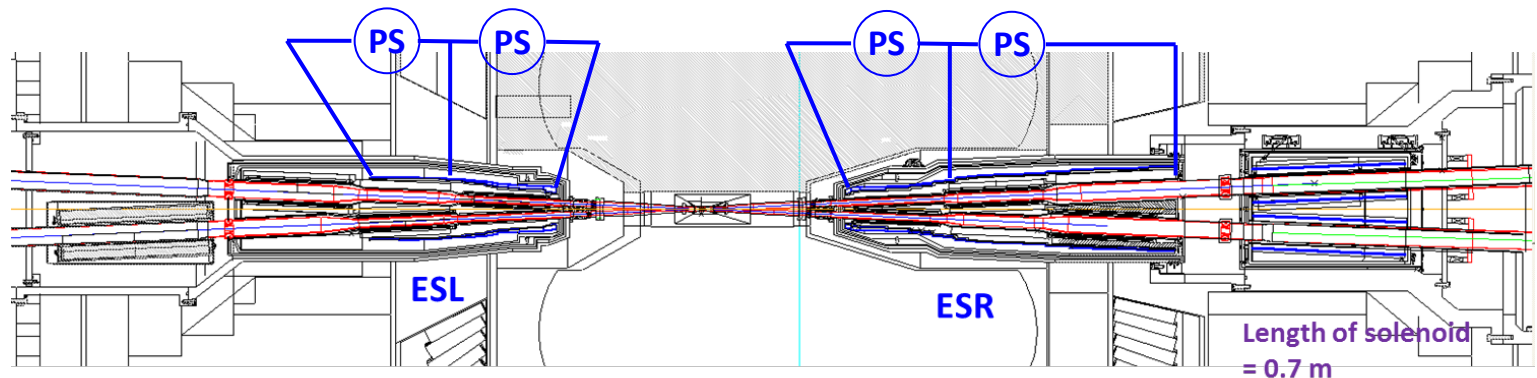
n	a_n	b_n
1	-249.9	-849.3
2	-439.2	-9990.3
3	1.7	-0.16
4	-0.54	0.00
5	0.35	-0.06
6	-0.25	0.18
7	0.06	0.03
8	-0.06	-0.02
9	0.03	-0.11
10	0.02	0.19

プロトタイプQC1P製作時に問題となった、超伝導コイル変形による a_3, b_3 成分 (~ 10 units) は、磁石断面形状の設計変更により十分小さい値に抑えられている。

- QC1LPの磁場測定結果(積分磁場)
 - － QC1LPの運転電流値(1625A)での積分磁場
 - 測定積分磁場=23.124 T @ R_{ref} =10mm
 - 設計積分磁場=22.996 T @ R_{ref} =10mm
 - － 4極磁場面回転角度
 - 測定角度=-21.55 mrad (QCSR側より見て)
 - 設計回転角度=-13.65 mrad
- 他の4極電磁石、補正磁石についても同様の磁場測定を行っている。
 - － 補正磁石については、主4極電磁石(QC1, QC2)との複合励磁での磁場測定も行い、主4極磁場の影響を測定している。
 - 測定結果の解析は、これから行う予定。

ホールプローブ磁場測定

- 3軸プローブによるクライオスタットボア内ソレノイド磁場分布測定
 - Belle-IIソレノイド: 4096A
 - ESL: 403A、ESR1: 450A、ESR2/3: 151A
 - ソレノイド磁場分布調整: IP側の電源を+5A、-10A変化させて、磁場分布への影響を測定



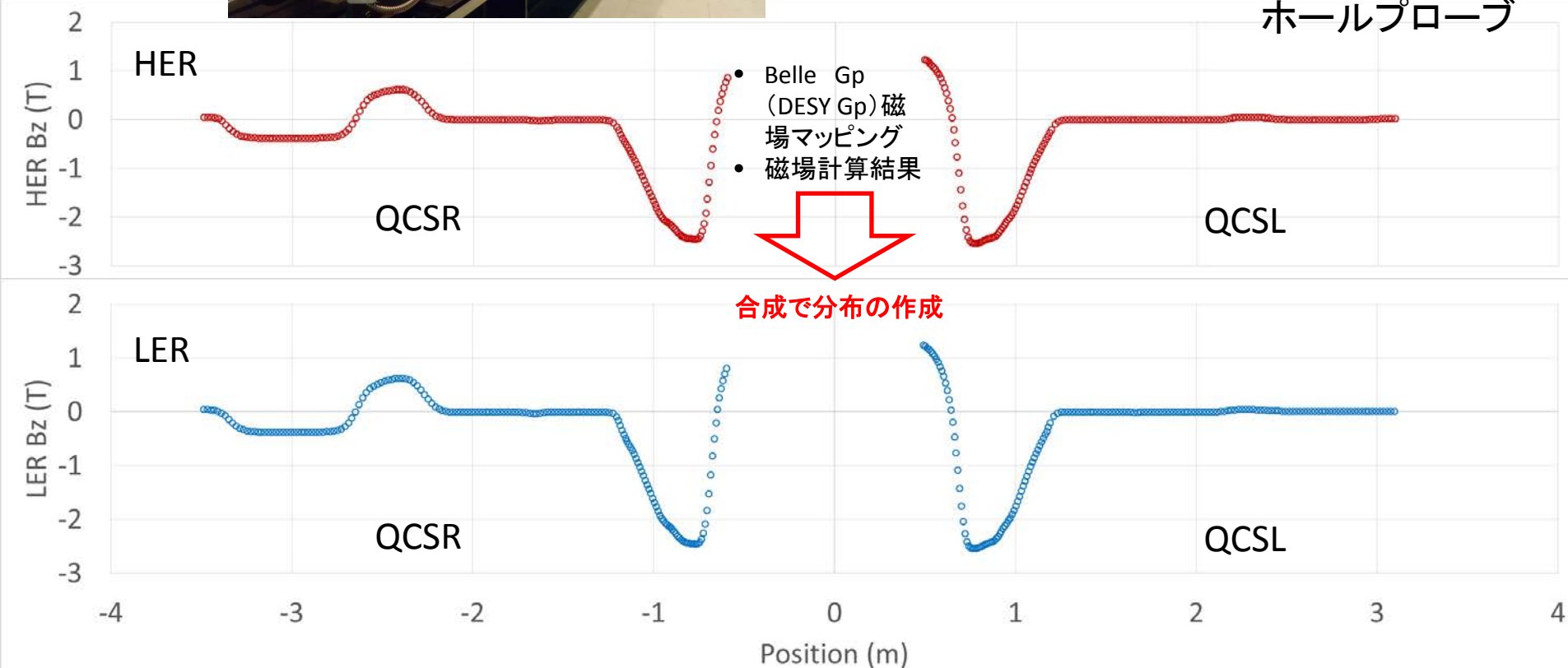
ソレノイド磁場測定結果



ホール素子



ホールプローブ



今後の作業

- ハード

1. 磁場測定パイプからビームパイプへの交換
 - クライオスタット先頭部のキャップ部の交換
2. 電流リード下端部の改善
3. ESR1、ESL電源改造
 - 100A以下での電源ノイズの低減
4. パトライト・インターロックシステムの完成

- ソフト

1. 磁場測定結果の解析
 - 電源運転パラメータの作成
 - 光学計算用のデータ作成(3D磁場計算モデル)
2. 冷却運転ソフトパラメータ調整

まとめ

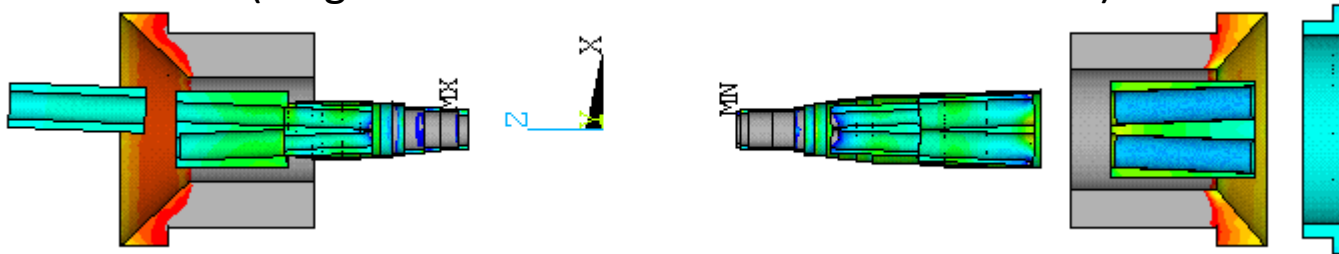
- QCSL/QCSRマグネットクライオスタットは、2017年2月にビームラインに据付けが完了した。
- 55台の超伝導電磁石は、一部冷却の為の改造を必要とするがBelle-IIソレノイドの1.5Tの磁場中で励磁を行うことができた。
- 磁場解析等、繊細な作業は残っているが、2018年2月のPhase-2運転を目指して準備を行う。

Back up

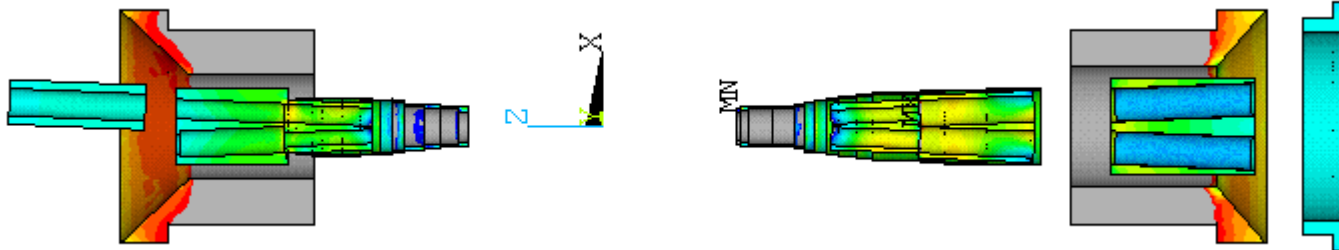
Magnet design: Permendur yoke

Field profile in the iron components (3D ANSYS)

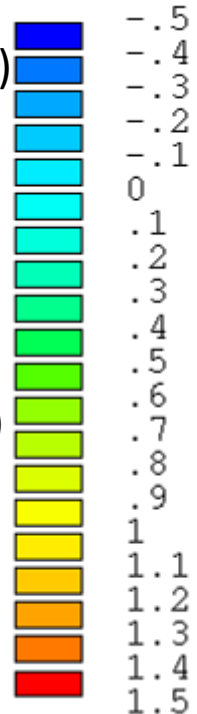
Optimized condition (magnetic field in the iron: $-0.5 \text{ T} < B < 0.5 \text{ T}$)



Increasing Belle solenoid current by 1 % (magnetic field in the iron: $-0.5 \text{ T} < B < 1 \text{ T}$)



Increasing acc. solenoid current by 1 % (magnetic field in the iron: $-0.1 \text{ T} < B < 1 \text{ T}$)



Field calculation by 3D model

IR 3D model : all magnets with the corrector magnets are included.

- The calculation model is now being refined by Y. Arimoto.

