

# LHC高輝度アップグレード用 超伝導磁石の開発(5)

-改造したモデル磁石の励磁試験結果-

高エネルギー加速器研究機構(KEK)

榎本 瞬,

KEK

菅野 未知央, 中本 建志, 鈴木研人, 川又 弘史,  
岡田 尚起, 池本由希子, 岡田 竜太郎, 東 憲男,  
荻津 透, 佐々木 憲一, 木村 誠宏, 田中賢一,  
大畠洋克, 飯田真久, 高橋直人

CERN

MUSSO Andrea, TODESCO Ezio

第14回日本加速器学会年会@北海道大学

2017.8.1

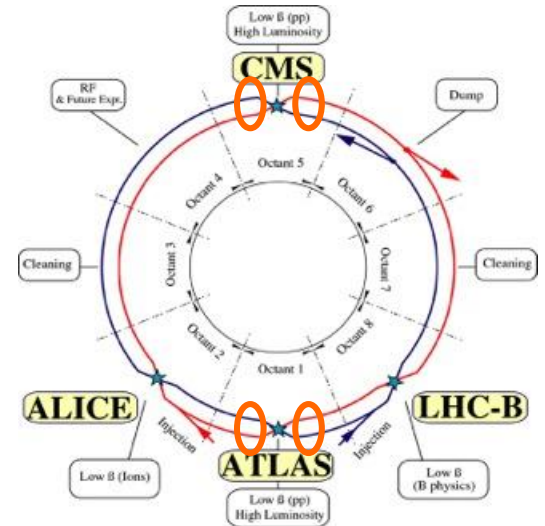
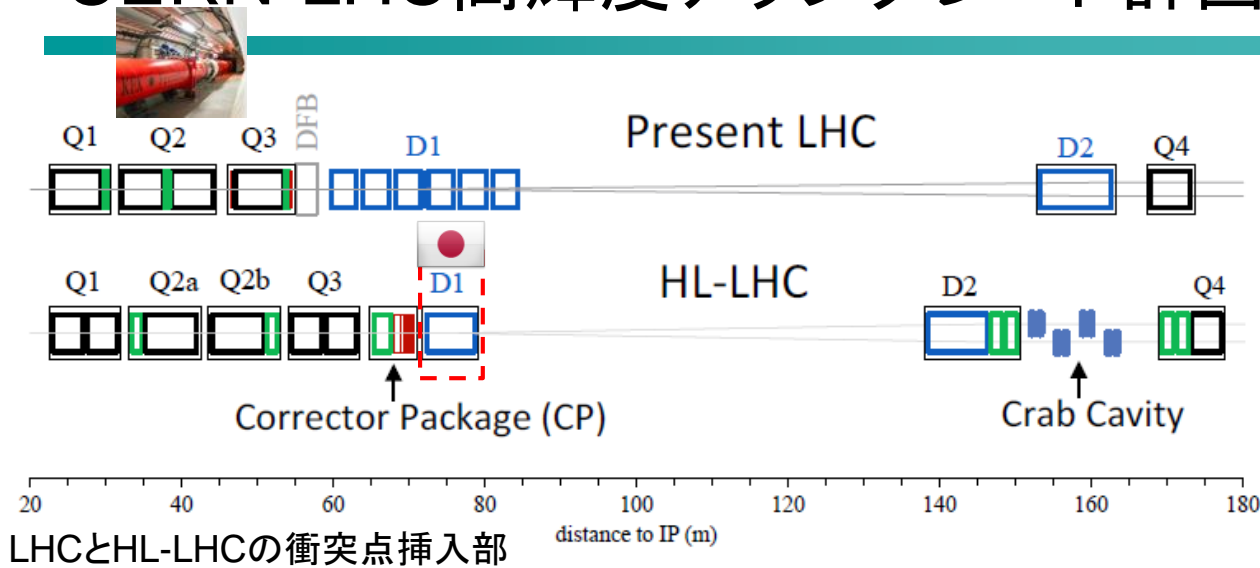


Research supported by the High Luminosity LHC project

# コンテンツ

- 概要 ~HL-LHC, D1磁石~
- 背景
  - 前回の試験結果・問題点
  - モデル磁石(01号機)の改造
- 今回の測定目的
- モデル磁石01b号機(改造後)の試験結果
  - クエンチトレーニング
  - 磁場測定
- まとめ

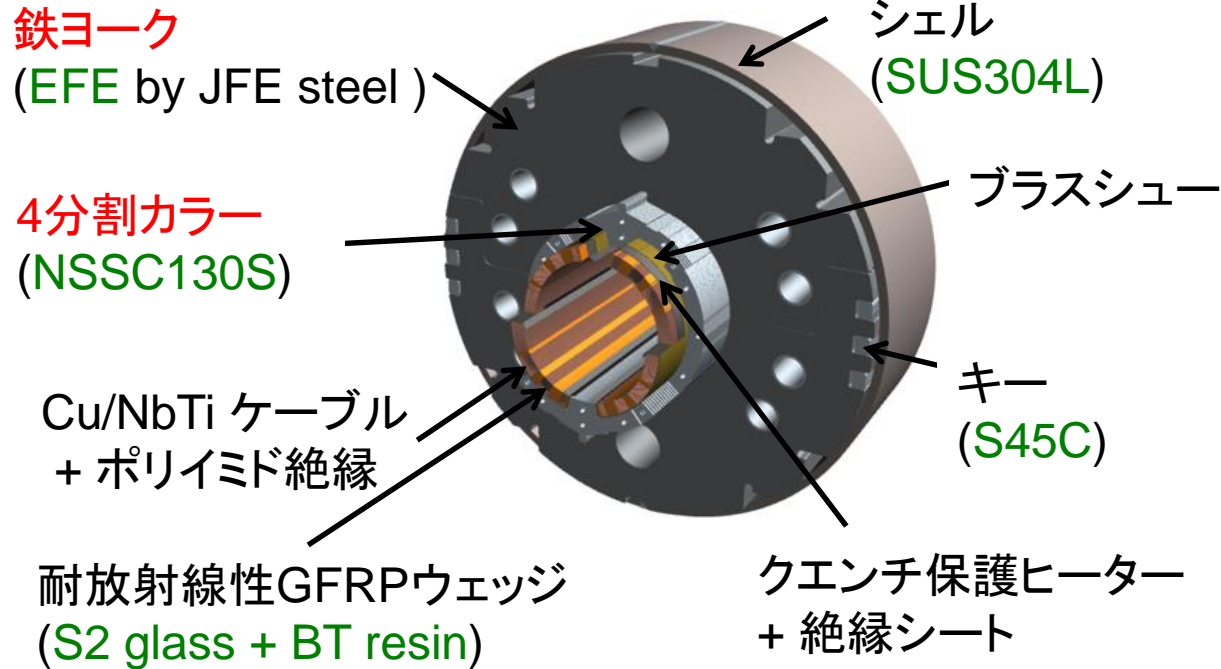
# CERN-LHC高輝度アップグレード計画 (HiLumi-LHC)



- ピークルミノシティ:  $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (LHCの5倍)
- 積分ルミノシティ:  $3000 \text{ fb}^{-1}$  (LHCの10倍)
- 新しい衝突点磁石(最終収束四極磁石)への入れ替え
  - 大口径化  $\Phi 70 \text{ mm} \rightarrow \Phi 150 \text{ mm}$
  - 高磁場化  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ 超伝導磁石 + (約25 m  $\rightarrow$  約35 m)
- クラブ空洞の導入

**KEK(日本):ビーム分離双極磁石(D1) 7m長NbTi超伝導磁石**  
 **$\rightarrow$  現行の常伝導D1磁石(1.28 T)の超伝導化による**  
**大口径化、磁石長の短縮**

# D1磁石の概要



コイル内径(口径)	150 mm
定格/ピーク 磁場	5.58 T / 6.71 T
積分磁場	35 T・m
運転電流	12 kA
磁場精度	$<10^{-4}$
動作温度	1.9 K
コイル機械長	6.6 m
磁石機械長	7.1 m
磁石外径	570 mm
コイル線量	$>25$ MGy
熱負荷	135 W (total)
NbTi/Cu ラザフォードケーブル	LHC MB outer cable

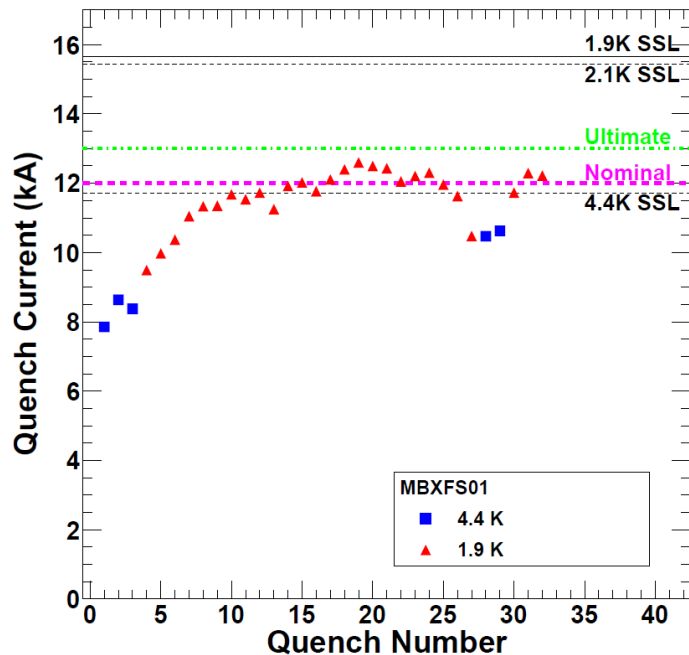
## 技術的課題

- ・大口徑化  
→ 電磁力の積み重ね大、組立中のコイル変形大
- ・耐放射線性  
→ 構成材料の選択、除熱を考慮した磁石構造
- ・鉄の飽和  
→ 磁場設計で考慮

これらを満足した上で $10^{-4}$ 以下の磁場精度が要求される

# 前回(2016)の試験 ~01号機~

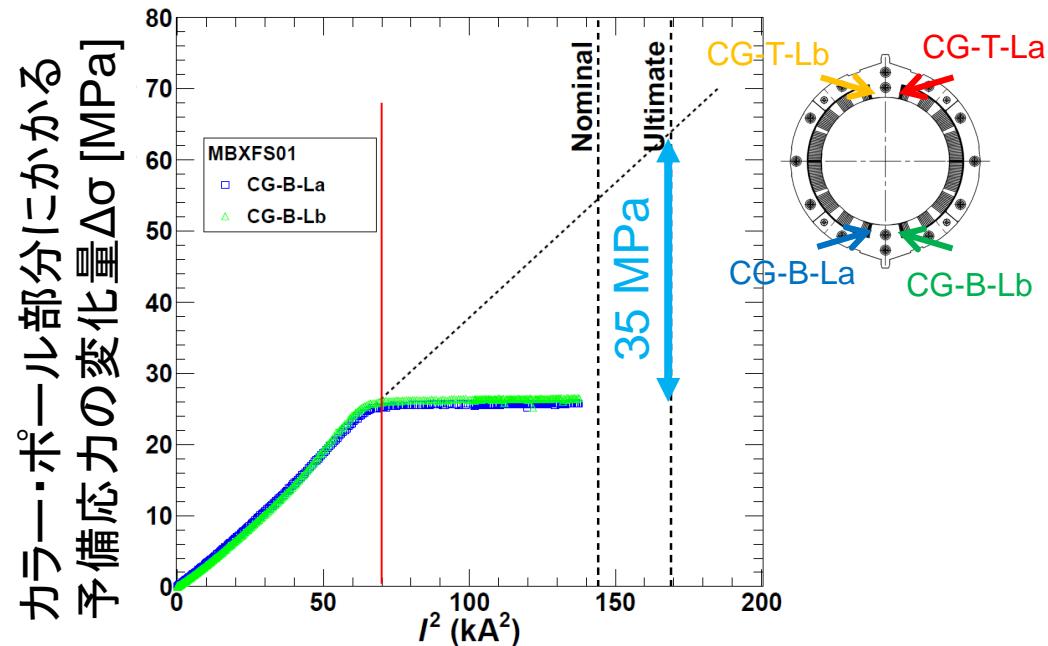
## クエンチトレーニング結果



- 定格12kA以上は達成したが不安定な振る舞い。
  - 最大クエンチ電流は受け入れ基準 13 kA に到達しなかった。
- 不十分なトレーニング特性

- 磁場測定は10kA まで実施。
- 定格12kAの測定は未実施。

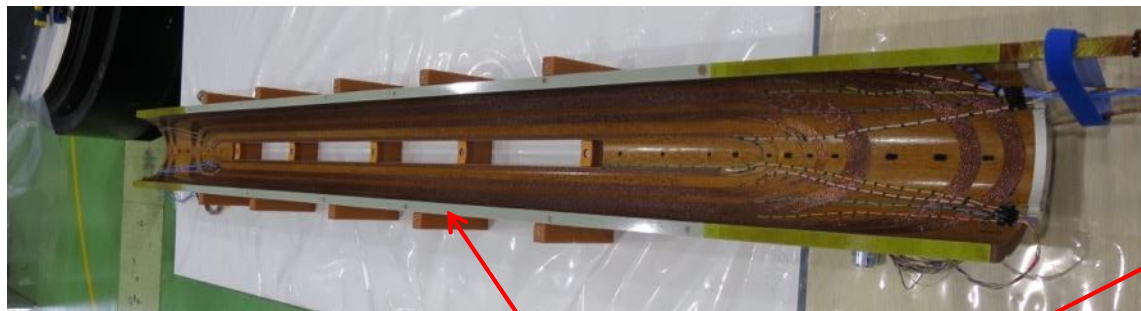
## 励磁中のコイル予備応力の変化量



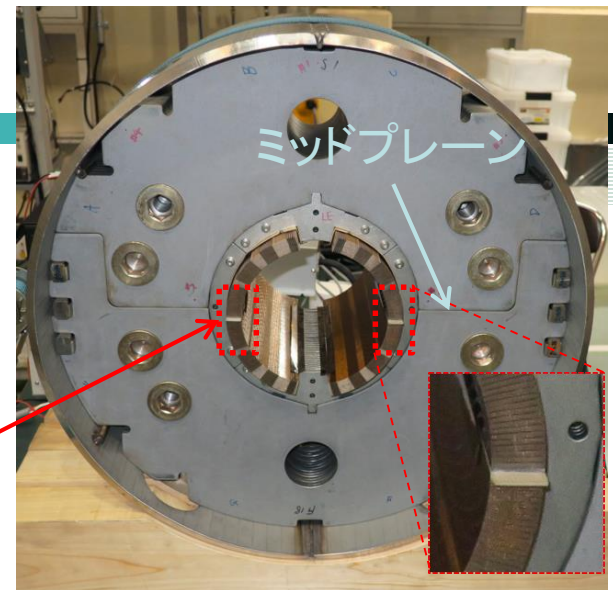
- 励磁とともに、カラーへの圧縮荷重が減少。8500 A 以上で抜け切る。
- 冷却による予備応力の減少が、設計よりも大きかった可能性。

- 予備応力を向上されるための改造を行う。

# 改善点と今回(01b号機)の試験目的



0.8 mm厚G10シム



## 改善点

- 励磁試験後の磁石を分解、予備応力増加のため、ミッドプレーンに**0.8 mm厚のシムを挿入**。再組み立て。
- 磁石の再組み立ての工程で**35 MPaの予備応力増加**を確認。

## 改造した磁石(01b号機)の試験目的

- コイル予備応力の増強に伴うクエンチレーニング特性の確認。
  - クエンチ保護ヒーター試験および設計のためのデータ取得
  - 磁場測定(定格電流12 kA)。
    - 測定の再現確認、鉄の飽和の影響、大口径化の影響確認
- 多極磁場に、コイル形状の変更から**オフセット**が生じる。
- 絶対値評価**ではなく、**相対的な評価(磁場分布・傾向)**を主眼において結果を示す。



# トレーニングクエンチ試験

- トレーニングクエンチ試験 @ 1.9 K
- 定格電流12 kA /受け入れ基準13 kA  
を目安にトレーニング。
- エネルギー回収: 73m $\Omega$  / 50 m $\Omega$  ダンプ抵抗
- クエンチ検出器の設定。
  - 閾値電圧: 0.1 V / 検出時間: 10msec
- ランプレート: 10 A/sec (Fast ramp test 50-200 A/s)

## 電圧タップ

クエンチ発生場所の特定、クエンチ伝搬測定

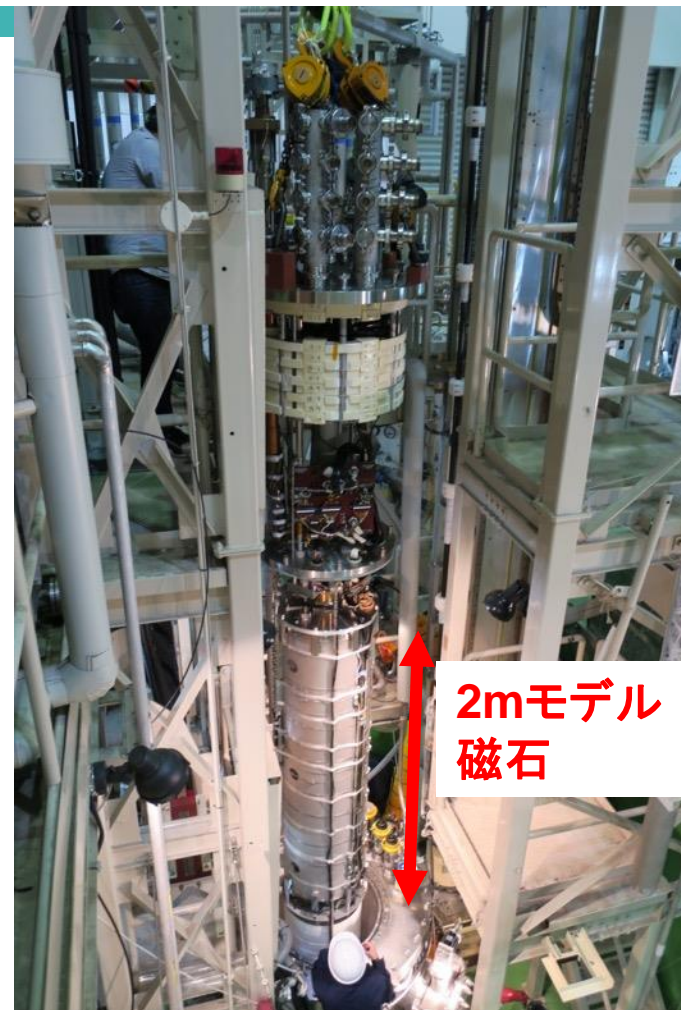
## クエンチアンテナ

長手方向、周方向のクエンチ発生場所の特定。

間接測定

## ひずみゲージ

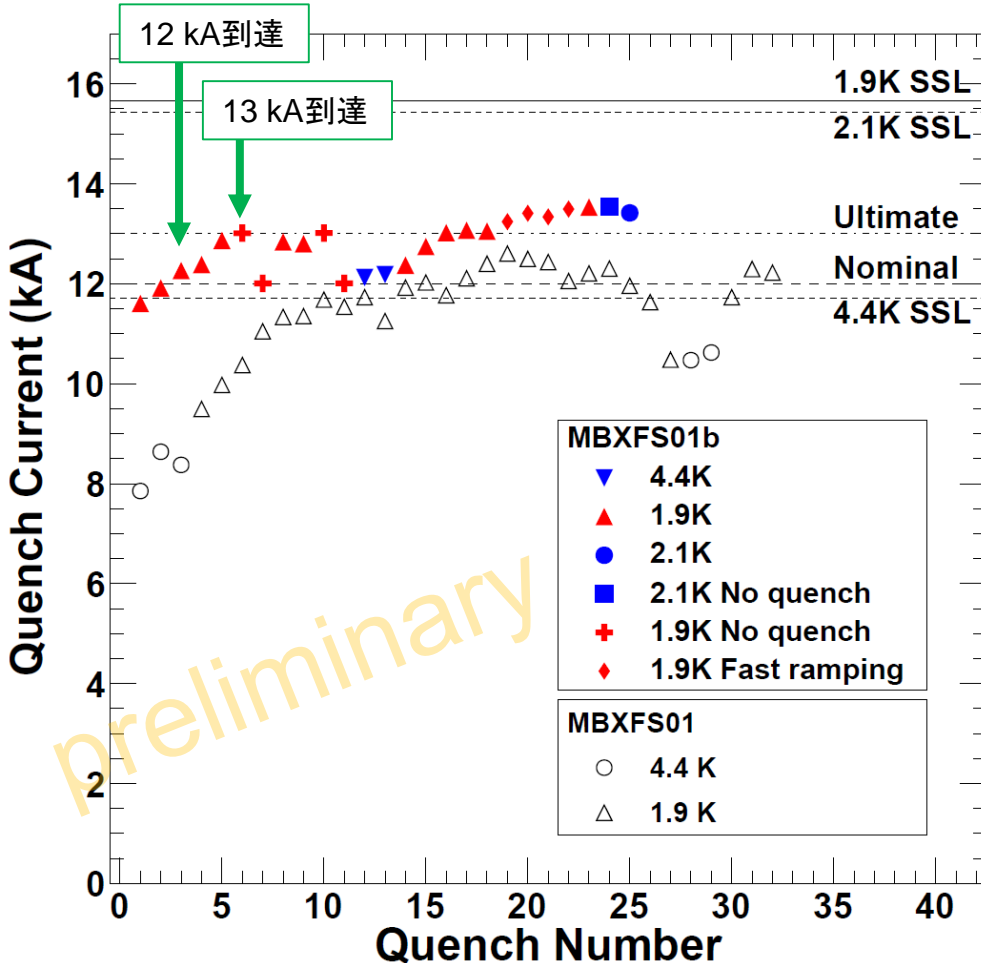
冷却、励磁時の磁石構造体の応力変化の測定。



2mモデル  
磁石

KEK超伝導低温工学センターの  
9 m深さの縦型クライオスタットに  
挿入中の2 mモデル磁石

# クエンチヒストリー

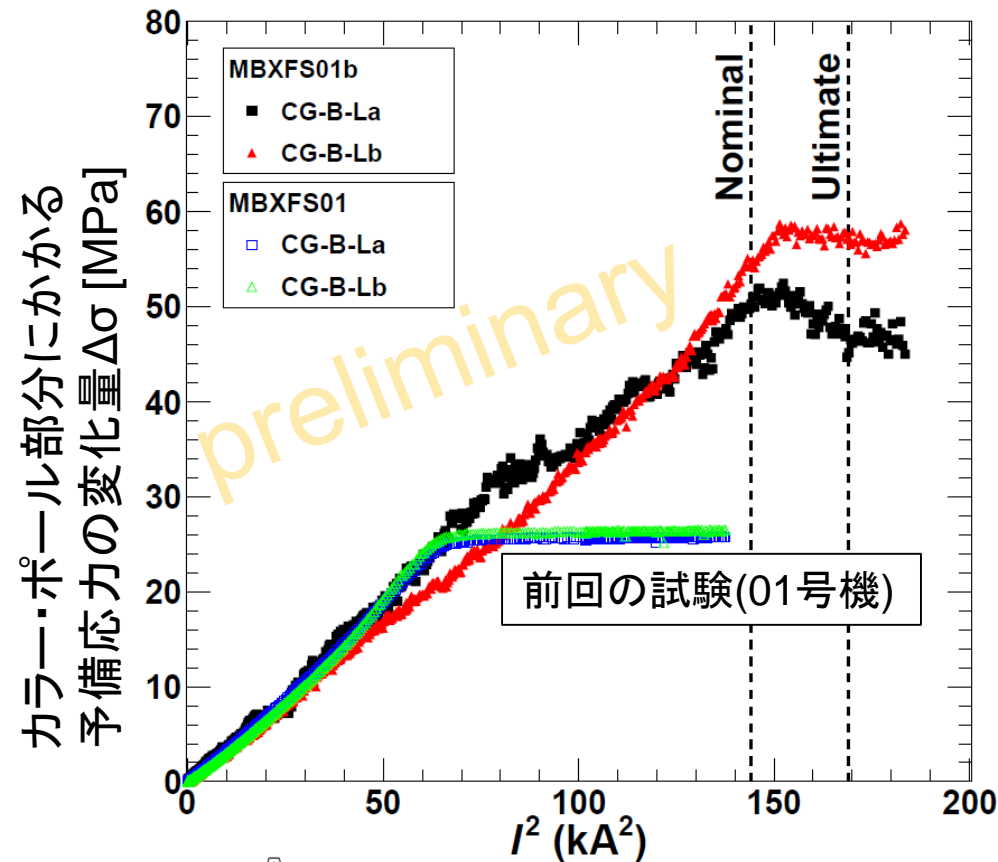


1. 定格電流12kA到達までのクエンチ回数15回→3回
2. 5回のクエンチ後に受け入れ基準13kA到達。
3. 13kAで1分、12kAで1時間ホールド。
4. 4.4Kでのクエンチ電流は臨界電流に近い値(+1.9Kと2.1Kでほぼ同値のクエンチ電流)→最大クエンチ電流は臨界電流でなく機械的支持で制限されている。

予備応力を増加させた改造機で**トレーニング性能の改善**を確認  
また、クエンチ発生箇所多くは磁石のピーク磁場にあたる。



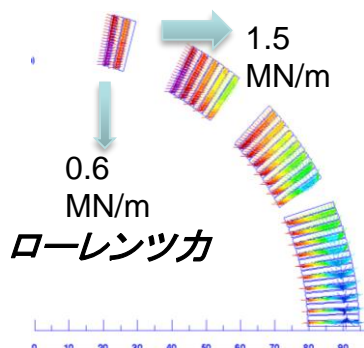
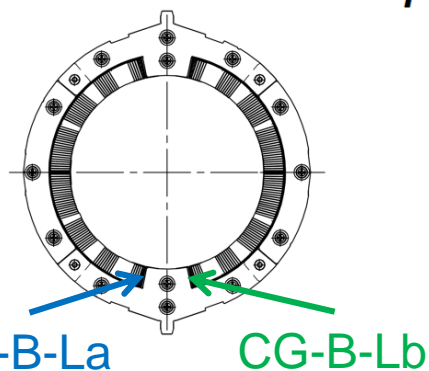
# 改造後の予備応力



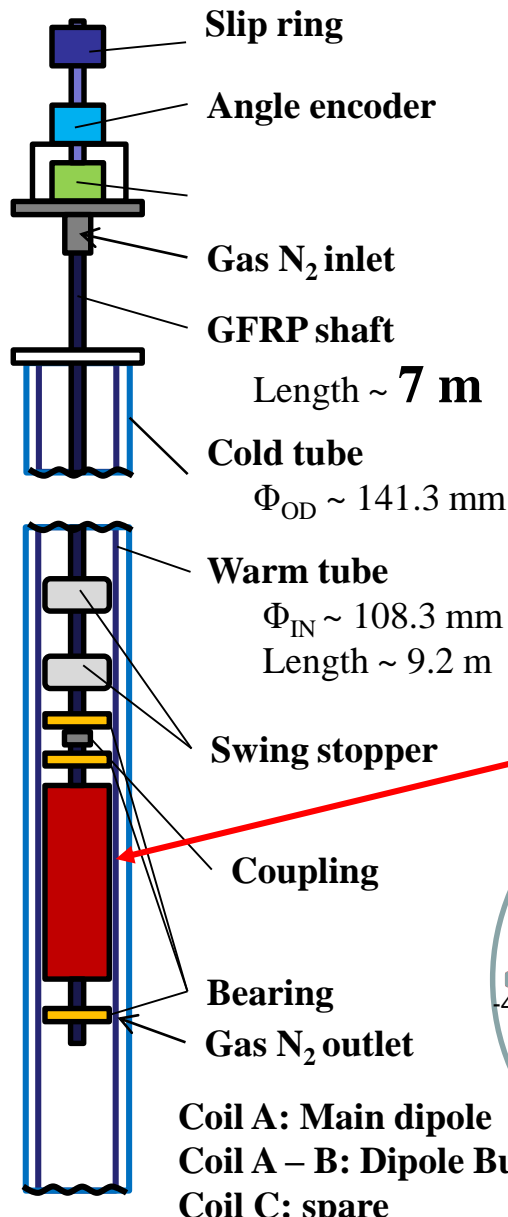
・改造後(01b号機)は定格電流12kA以上まで予備応力が残留。

・若干、受け入れ基準13kA周辺で予備応力の解放( $\Delta\sigma=0$ )

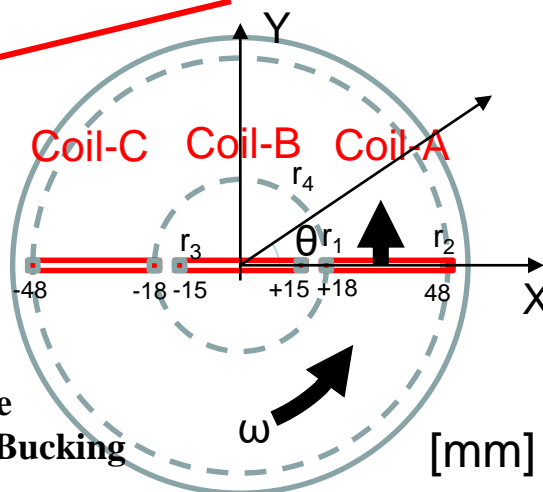
→次機(2号機)では、ケーブルの絶縁損傷を考慮しつつ、~15 MPaの予備応力増加が必要。



# 磁場測定方法



ピックアップコイル



$$B_{\theta}(r, \theta) = B_{ref} \times 10^{-4} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{R_{ref}}\right)^{n-1} \{b_n \cos n\theta + a_n \sin n\theta\}$$

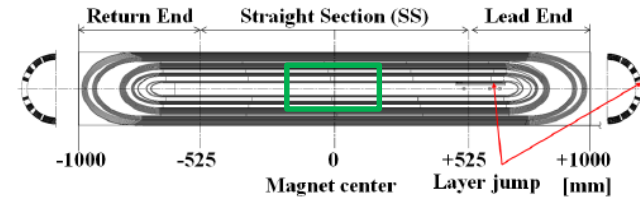
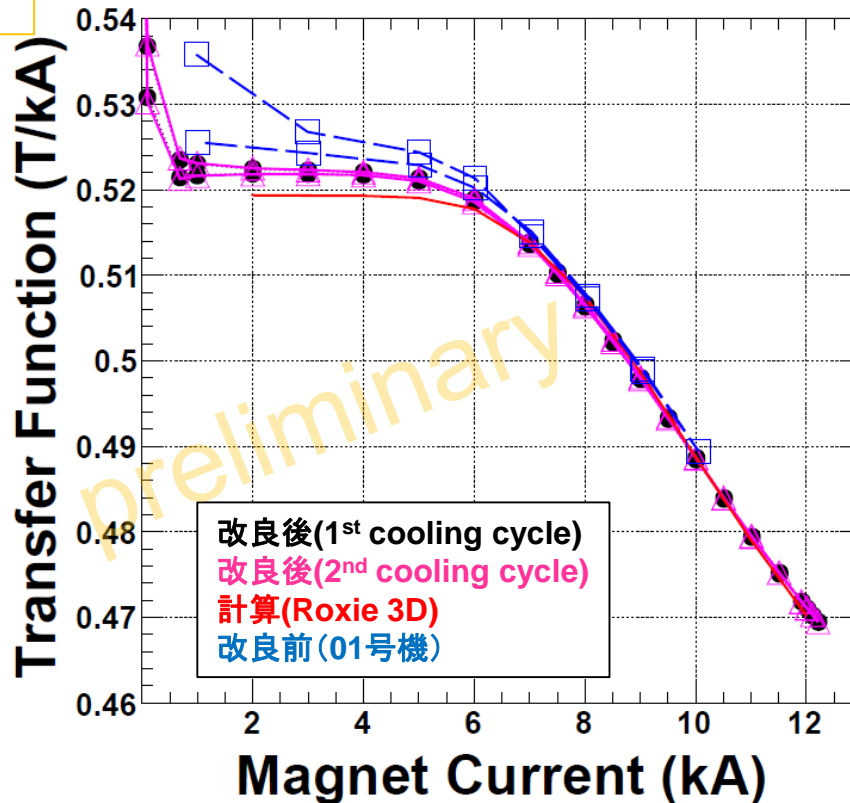
B<sub>ref</sub>: Main dipole field. R<sub>ref</sub>: 50 mm.

b<sub>n</sub>, a<sub>n</sub>: normal, skew 2n-pole components.

- 磁石中心での電流依存性
  - Transfer Function(B<sub>1</sub>/I)
  - 多極成分b<sub>3</sub>,
  - 多極成分a<sub>n</sub>, b<sub>n</sub>
- 長手方向の磁場分布
  - 定格電流12 kA
  - 積分磁場
  - 電流依存性

# 磁石中心での電流依存性 - Transfer Function -

$$T.F. (I, z = 0) = \frac{B_1(I, z = 0)}{\text{Current}}$$

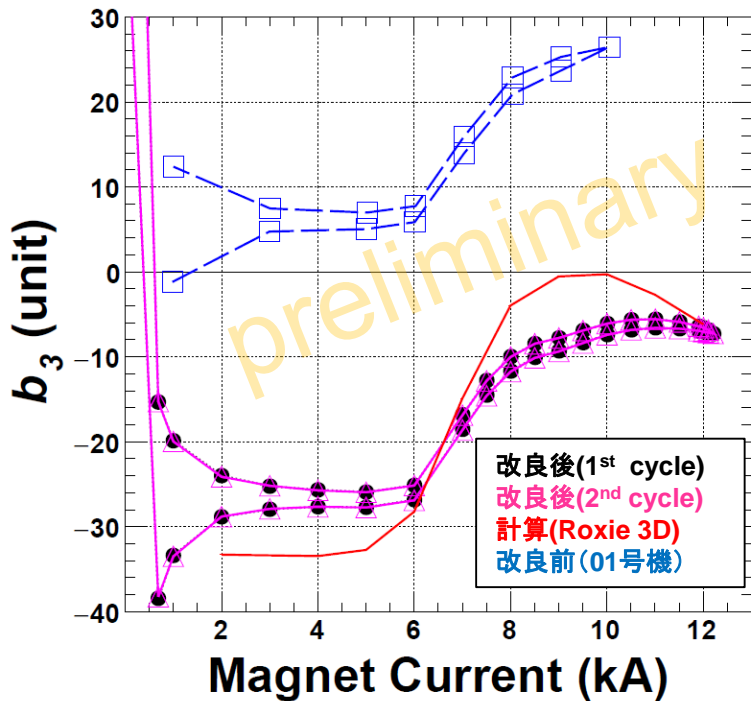


- 磁石中心(±175mm)で測定
- 各電流値に対して5回転分測定。  
→5回の平均値を表示。

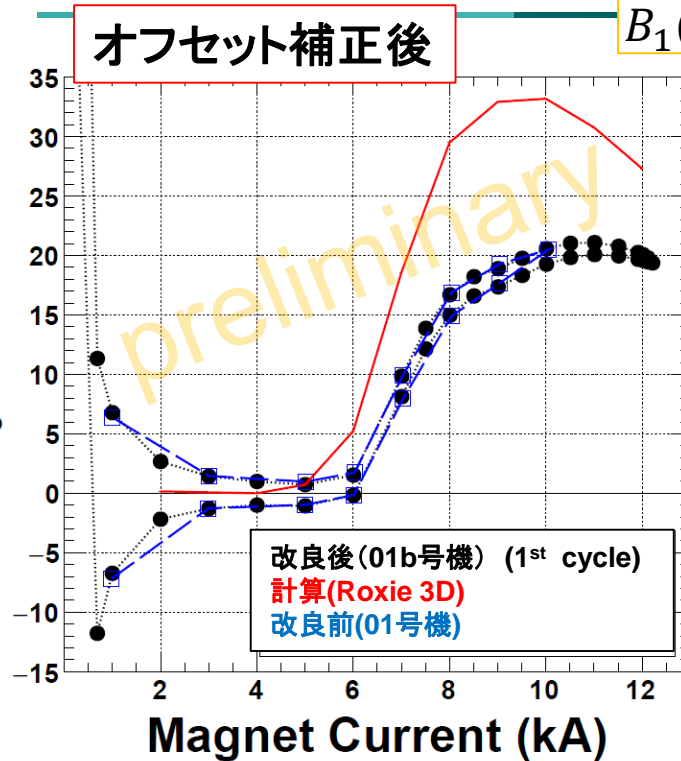
- 5-6kA以上で鉄の飽和による影響が確認できる。
- 改良前(01号機)と改良後(01b号機)で測定結果はよく再現している。
- 測定結果と計算結果(Roxie 3D)はよく一致している。

# 磁石中心での電流依存性: ノーマル多極成分 $b_3$

$$b_n(I, z = 0) = \frac{B_n(I, z = 0)}{B_1(I, z = 0)} \times 10^4$$



$b_3$  (unit)

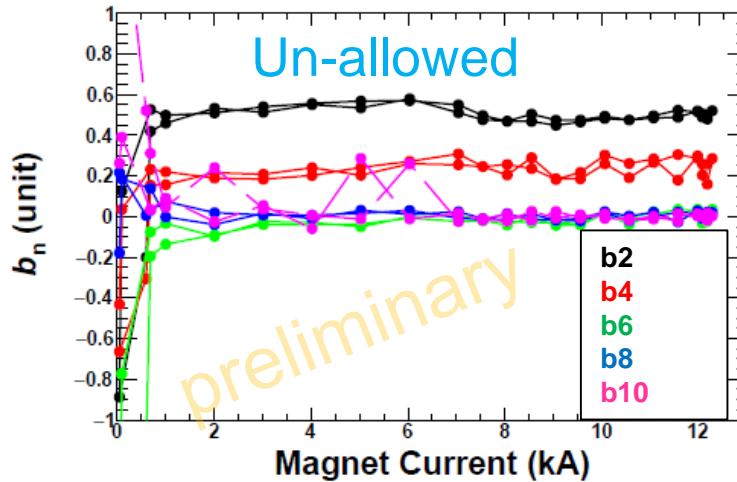
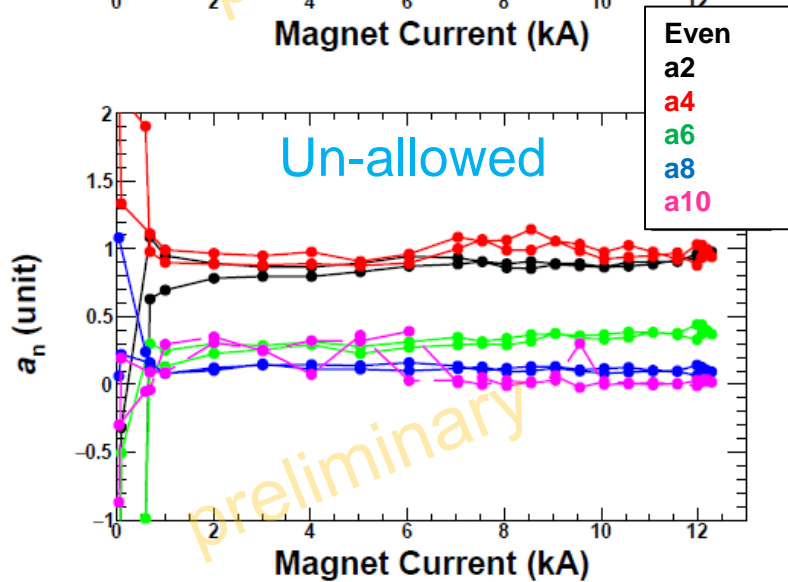
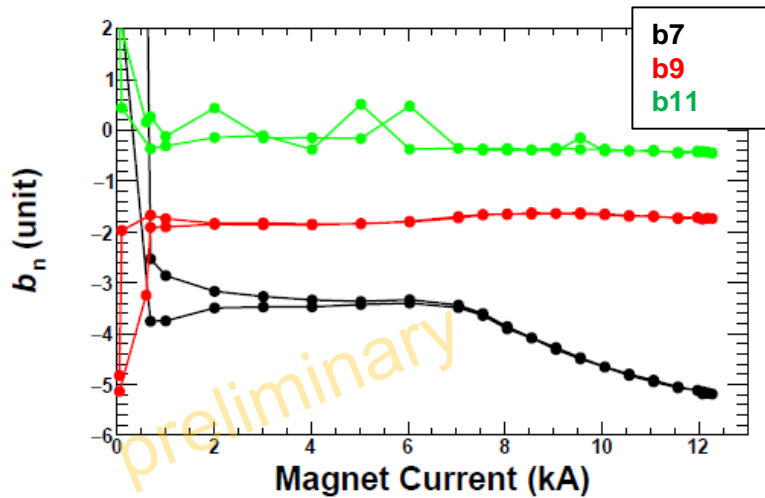
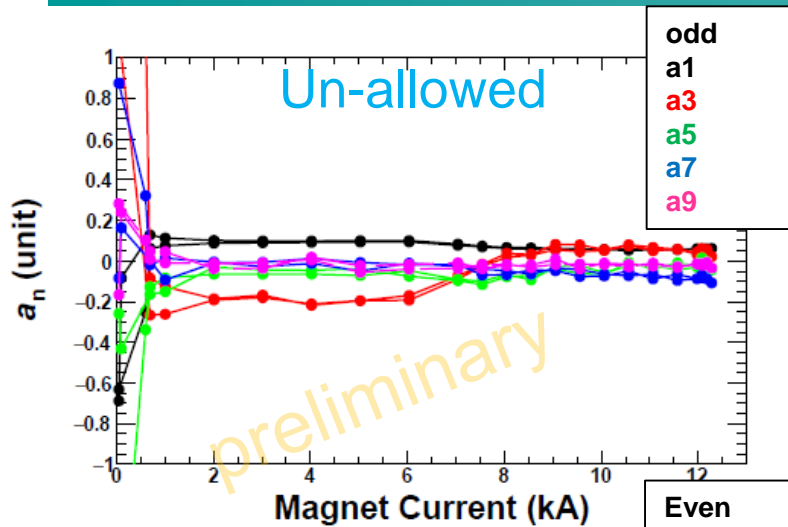


- ・オフセンター補正済み
- ・改良後では水平面にシムを入れているため、多極成分でオフセットが生じる。

- 改良前(01号機)と改良後(01b号機)で測定結果はよく再現している。
- 6kA以上で鉄ヨークの飽和による影響が顕著に見られる。しかし、計算結果(ROXIE3D)とは大きな差が見られる。
  1. 最大10 unit以上の差。
  2. 10kA以上で測定値は立ち下がらない。フラットに近い。
- 電流の上げ下げで磁場に差(1.5units~)が見られる。(ヒステリシス曲線)

# 磁石中心での電流依存性: 多極成分 $a_n, b_n$

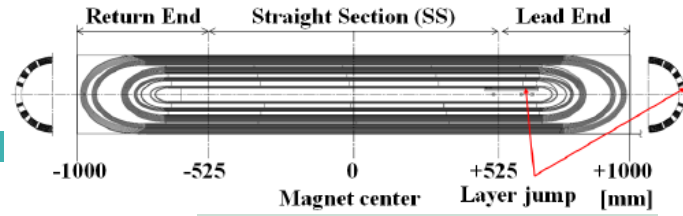
$$\frac{b_n(I, z=0) = B_n(I, z=0)}{B_1(I, z=0)} \times 10^4$$



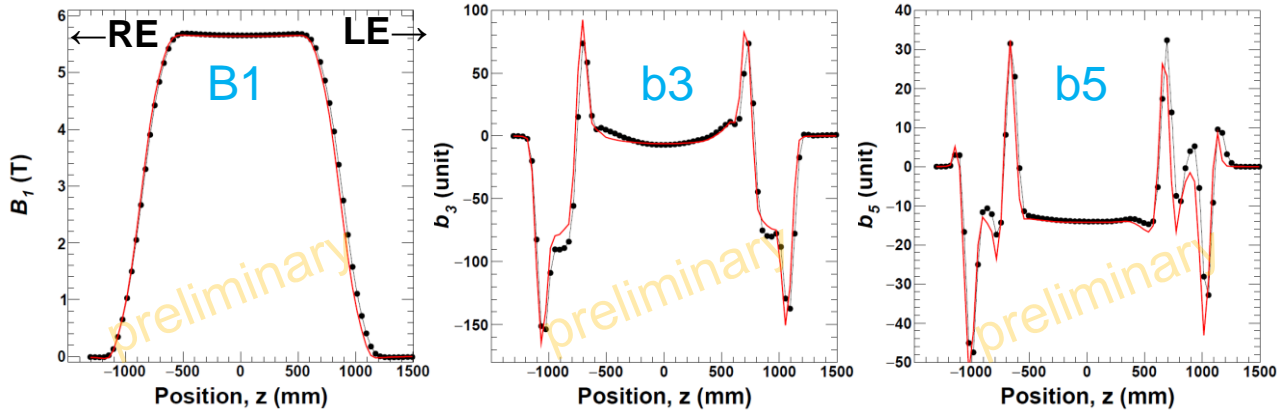
- 改良後の試験でもUn-allowedの多極成分が ( $B_1$  に対して)  $10^{-4}$  以下に抑えられている。

# 長手方向の磁場分布 @ 12kA

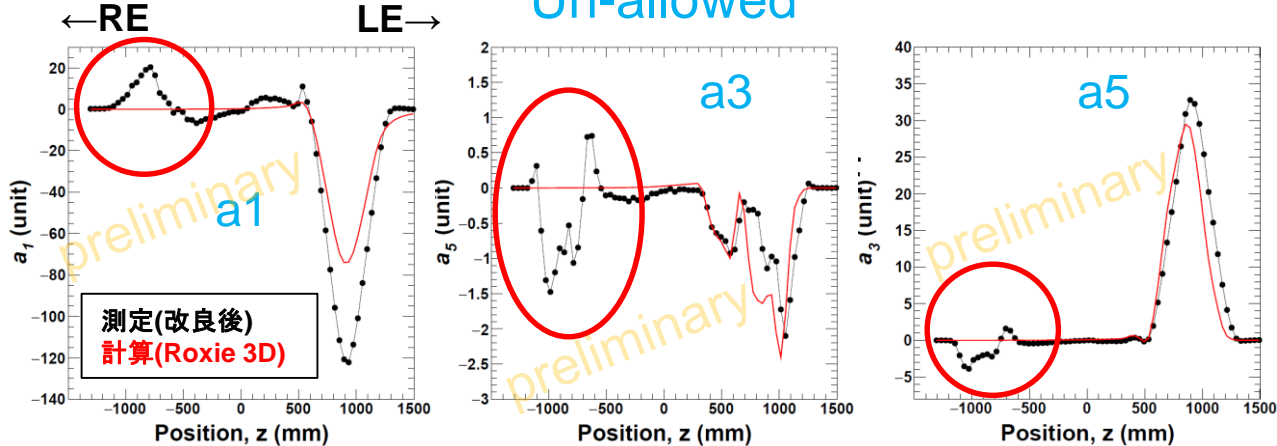
## 多極成分 ( $B_1, b_3, b_5, a_1, a_3, a_5$ )



Allowed



Un-allowed



測定(改良後)  
計算(Roxie 3D)

$$\frac{a_n, b_n(z, I = 12kA)}{A_n, B_n(z, I = 12kA)} = \frac{a_n, b_n(z, I = 12kA)}{B_1(z = 0, I = 12kA)} \times 10^4$$

Allowed ( $b_{2m}$ )

> 計算結果がプロファイルとよく一致している。

Un-allowed ( $a_{2m+1}$ )

LE > 絶対値の違いはあるが、分布の傾向は計算とほぼ一致。

RE > ツイストしている可能性あり。

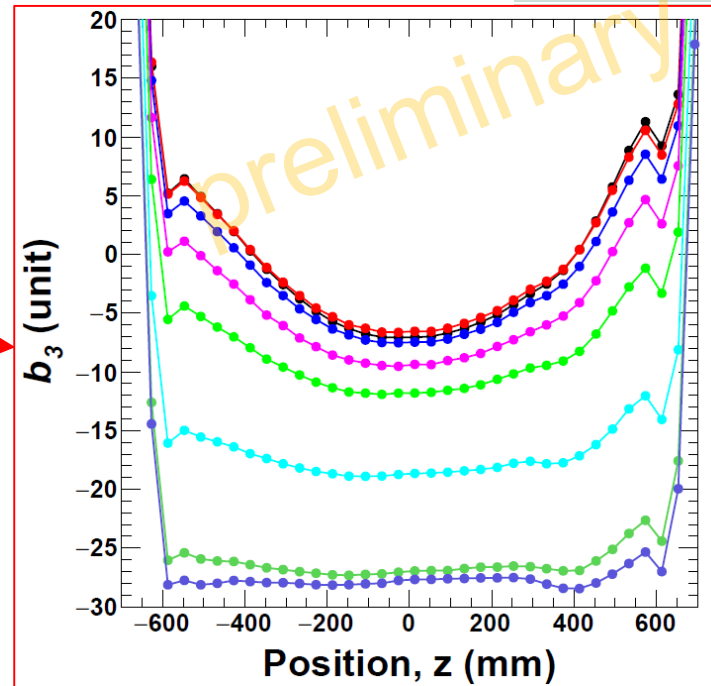
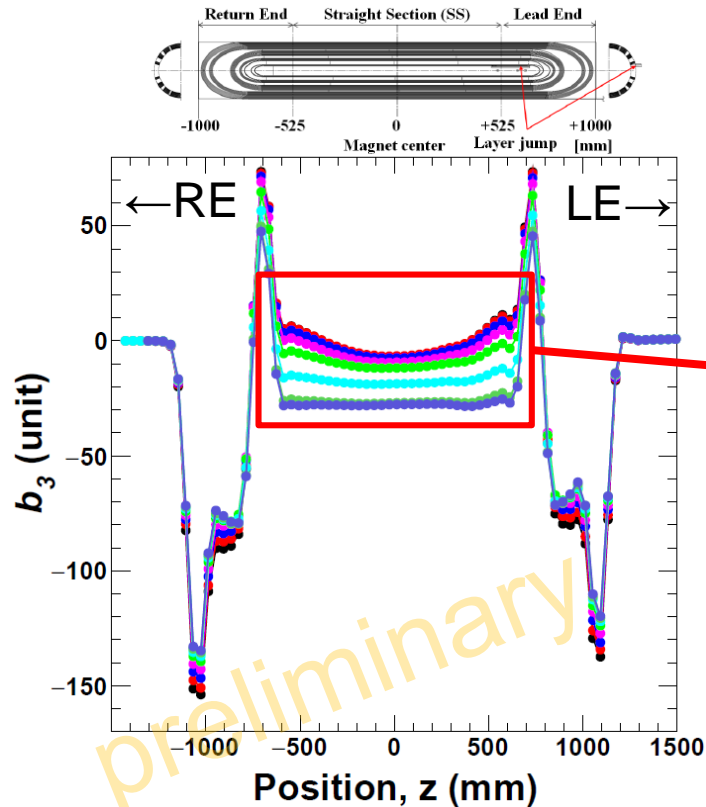
→ 回転していると仮定すると、 $a_1$ のピークを消すには ~2.6 mrad 回転させる必要あり。

→ ただし、それだけでは他の多極成分のピークは消えない。



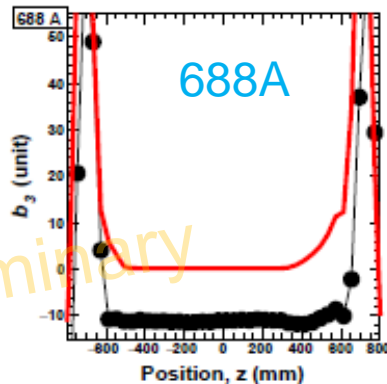
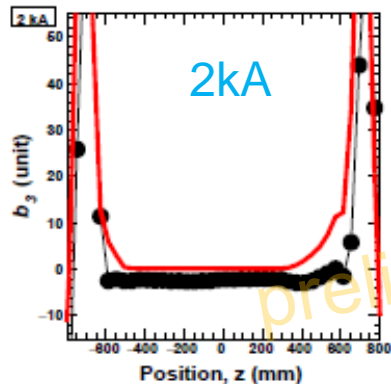
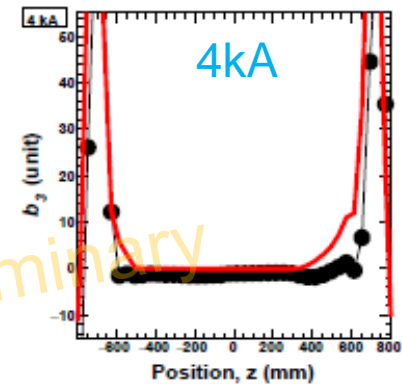
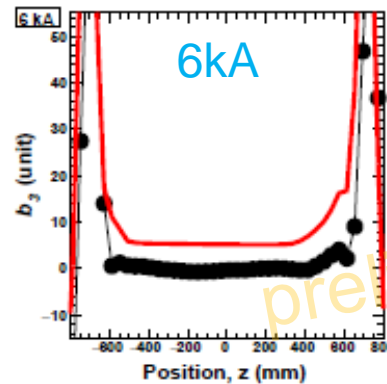
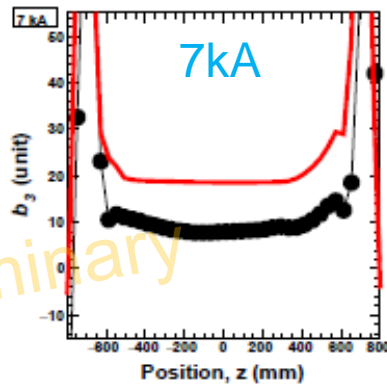
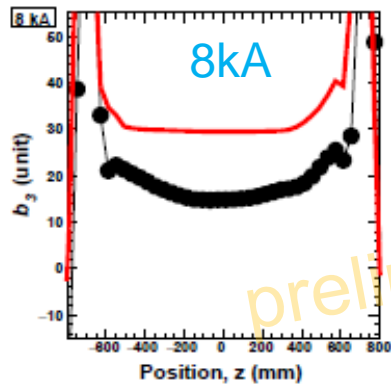
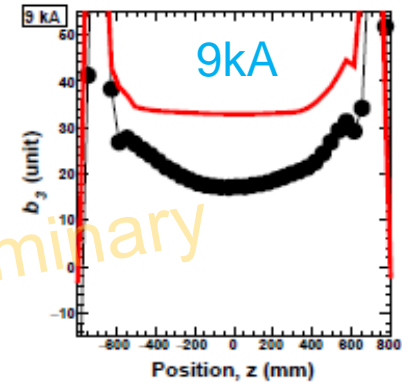
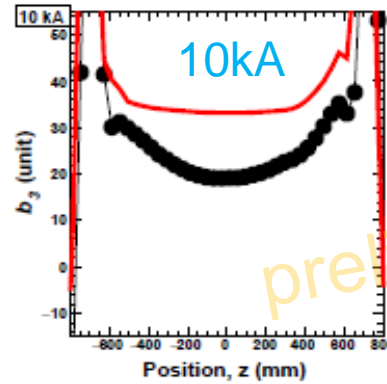
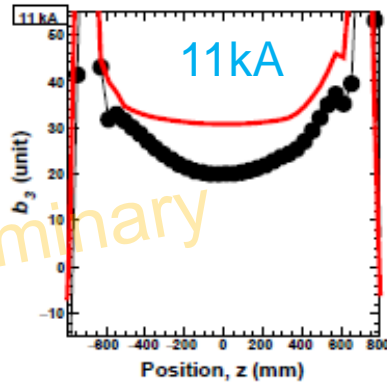
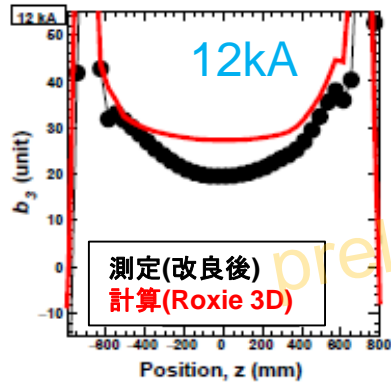
# 長手方向の磁場分布 電流依存性 $b_3$

$$b_3(z, I_n) = \frac{B_3(z, I_n)}{B_1(z=0, I_n)} \times 10^4$$



- コイル直線部に対してコイルエンドからの影響が強く見られる。
  - 鉄の飽和する領域(6kA以上)で徐々に「すり鉢型」の分布が見られる。
  - 計算との比較を次のページに示す。

# 長手方向の磁場分布 $b_3$ -電流依存性- 測定値 vs 計算値



計算値ではコイル直線部ではほぼフラットである。

\*図はオフセット補正済み

# まとめ

- KEKでは、LHC高輝度アップグレード用超伝導双極磁石の開発を行っている。
- トレーニング特性が不十分であった2mモデル磁石01号機について、**コイル予備応力を増加される改造**を行い、改造した2mモデル磁石01b号機の冷却・励磁試験を2017年春に実施した。
- トレーニング特性に顕著な改善が確認され、**クエンチ電流が受け入れ基準13kAに到達した**。
- 双極磁場、多極成分の磁場精度など大部分で**十分な性能が出ていることを確認した**。一方、多極成分( $b_3$ など)でいくつか設計値(計算値)との差異を確認した。
- 現状、2mモデル磁石2号機に向けた設計変更を進めており、2018年に再び冷却励磁試験を行う予定である。