

# LHC高輝度アップグレード用 超伝導磁石の開発(4) -2 mモデル磁石の冷却・励磁試験-

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, 川又 弘史,  
岡田 尚起, 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,  
菅原繁勝, 飯田真久, 高橋直人

CERN

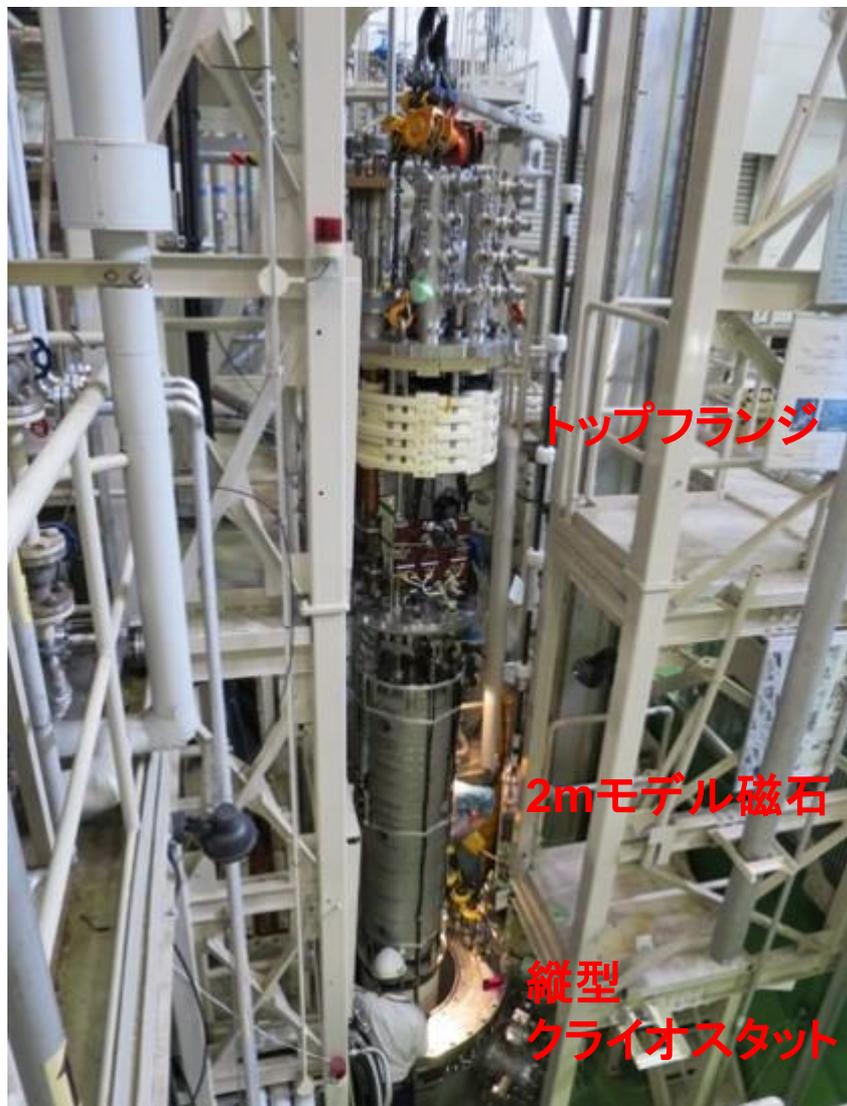
MUSSO Andrea, TODESCO Ezio

第13回日本加速器学会年会@幕張メッセ  
2016.8.9



Research supported by the High Luminosity LHC project

# 2mモデル磁石1号機 -冷却・励磁試験-

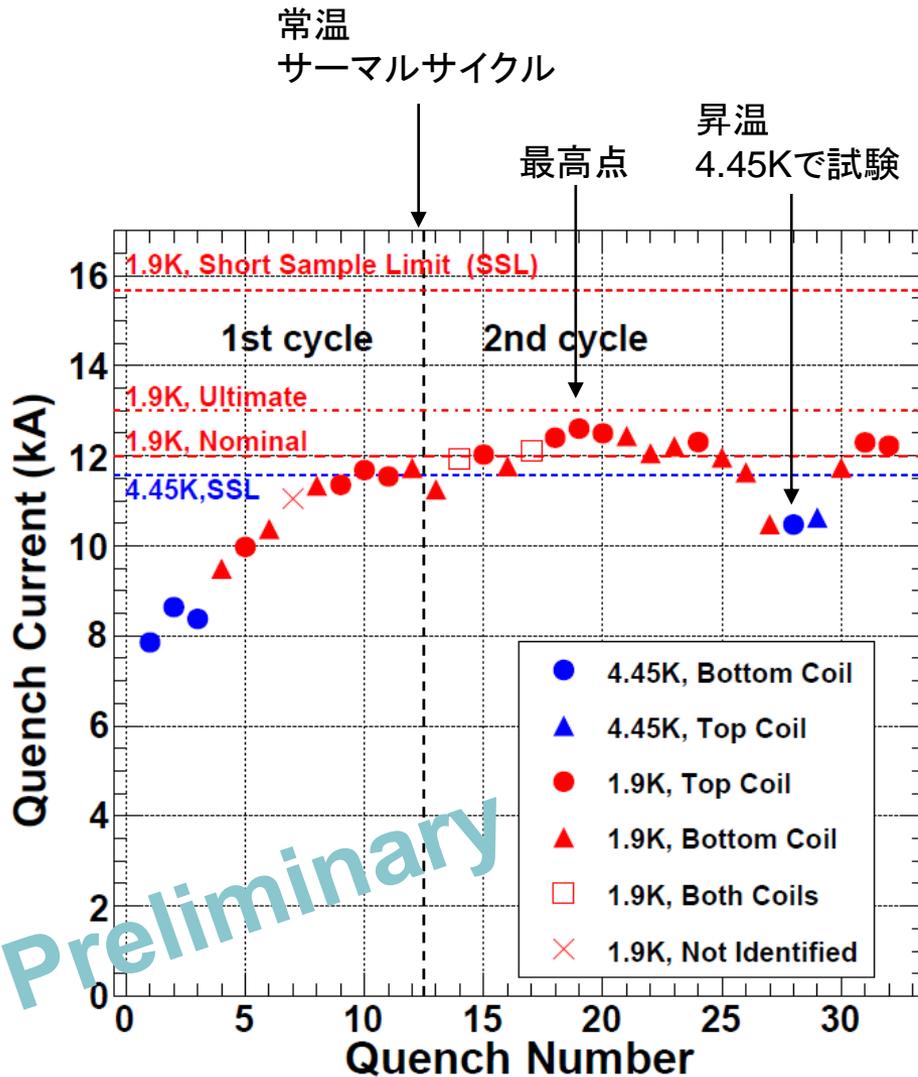


- 試験日程
  - 1<sup>st</sup> cycle: 4/20~23 @4.2K
  - 4/25~30 @1.9K
  - 2<sup>nd</sup> cycle: 5/15~6/3 @ 1.9K
- 場所
  - KEK低温センター
  - 深さ9m縦型クライオスタット
- 試験項目
  - トレーニングクエンチ試験
  - ヒータークエンチ試験
  - 磁場測定
    - 電流依存性(DC-loop)
    - 位置依存性(Z-scan)

# トレーニングクエンチ試験

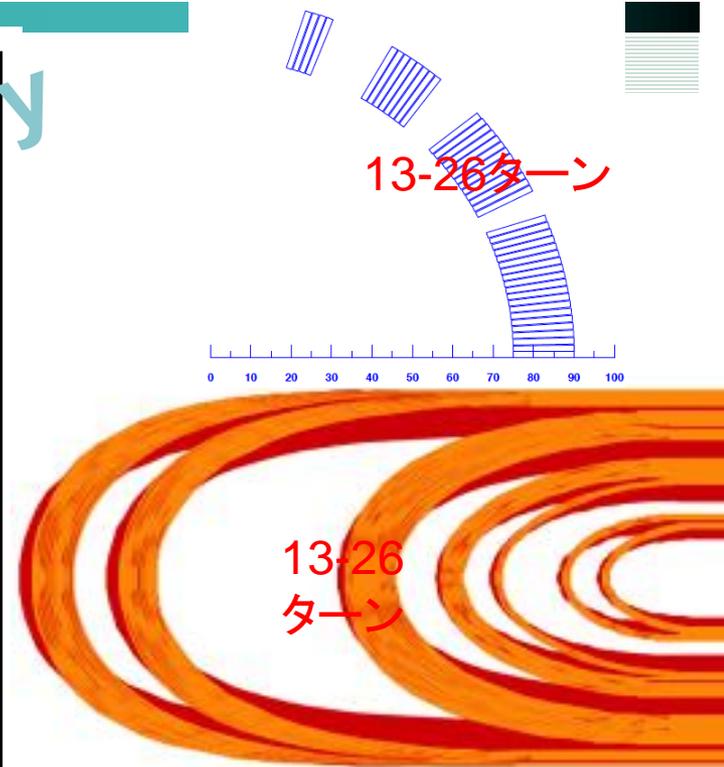
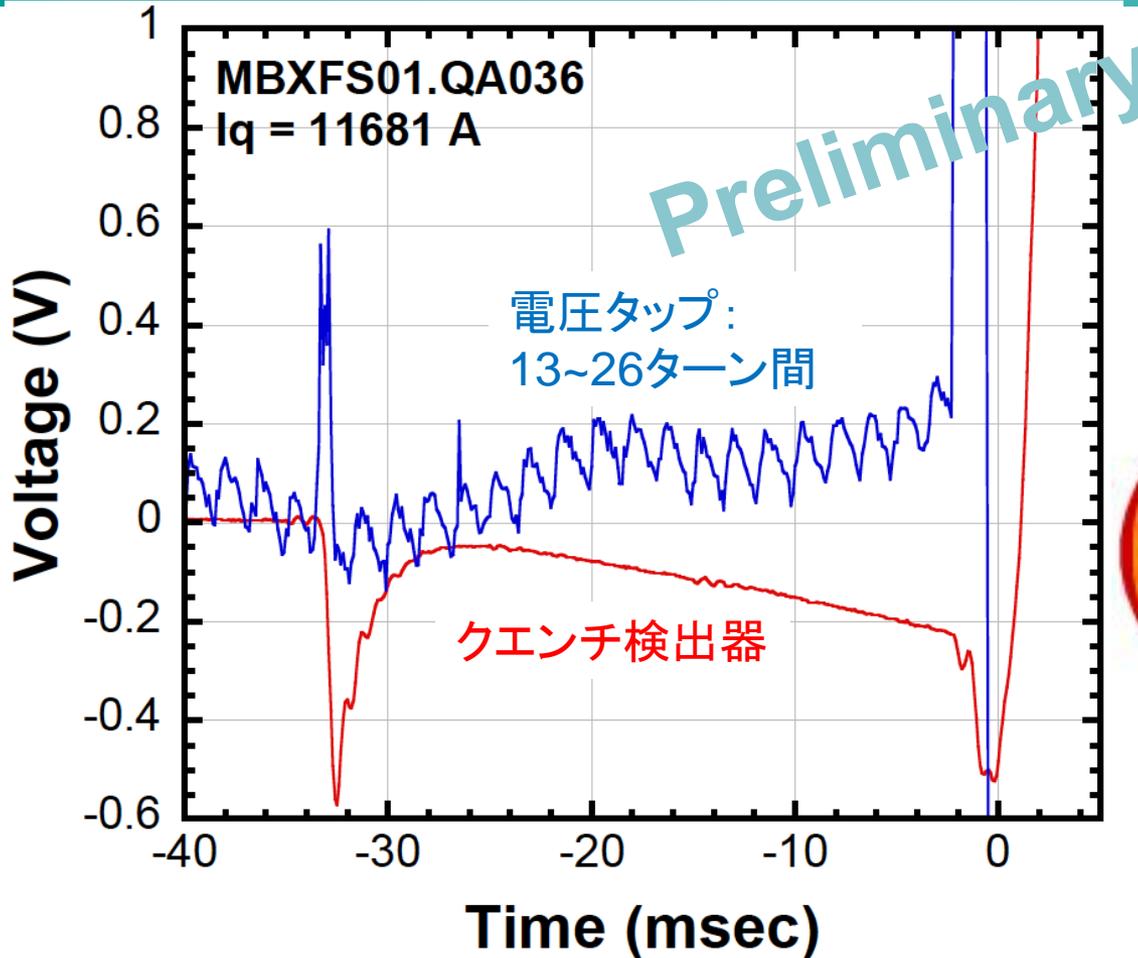
- 1.9 K:トレーニング / 4.45 K:システムコミッショニング
- 定格電流12 kA /受け入れ基準13 kAを目安にトレーニング。
- エネルギー回収: 73mΩ ダンプ抵抗
- クエンチ検出器の設定。
  - 閾値電圧:0.1 V
  - 検出時間:10msec
- ランプレート: 10 A/sec
  
- 電圧タップ
  - クエンチ発生場所の特定、クエンチ伝搬測定
- クエンチアンテナ
  - 長手方向、周方向のクエンチ発生場所の特定。間接測定
- ひずみゲージ
  - 冷却、励磁時の磁石構造体の応力変化の測定。

# クエンチトレーニング1



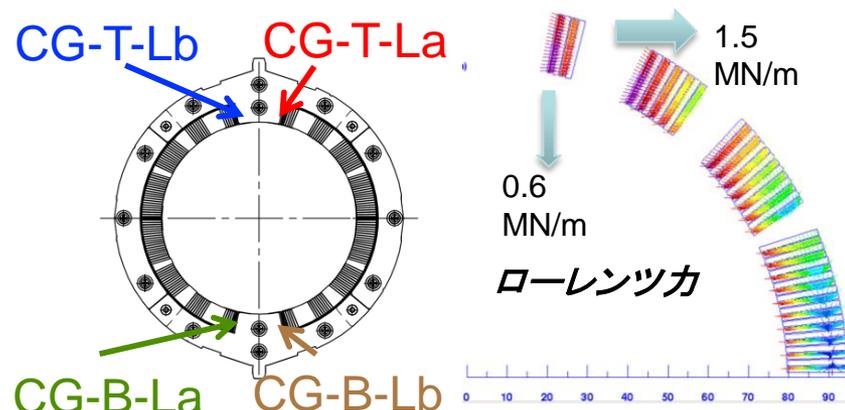
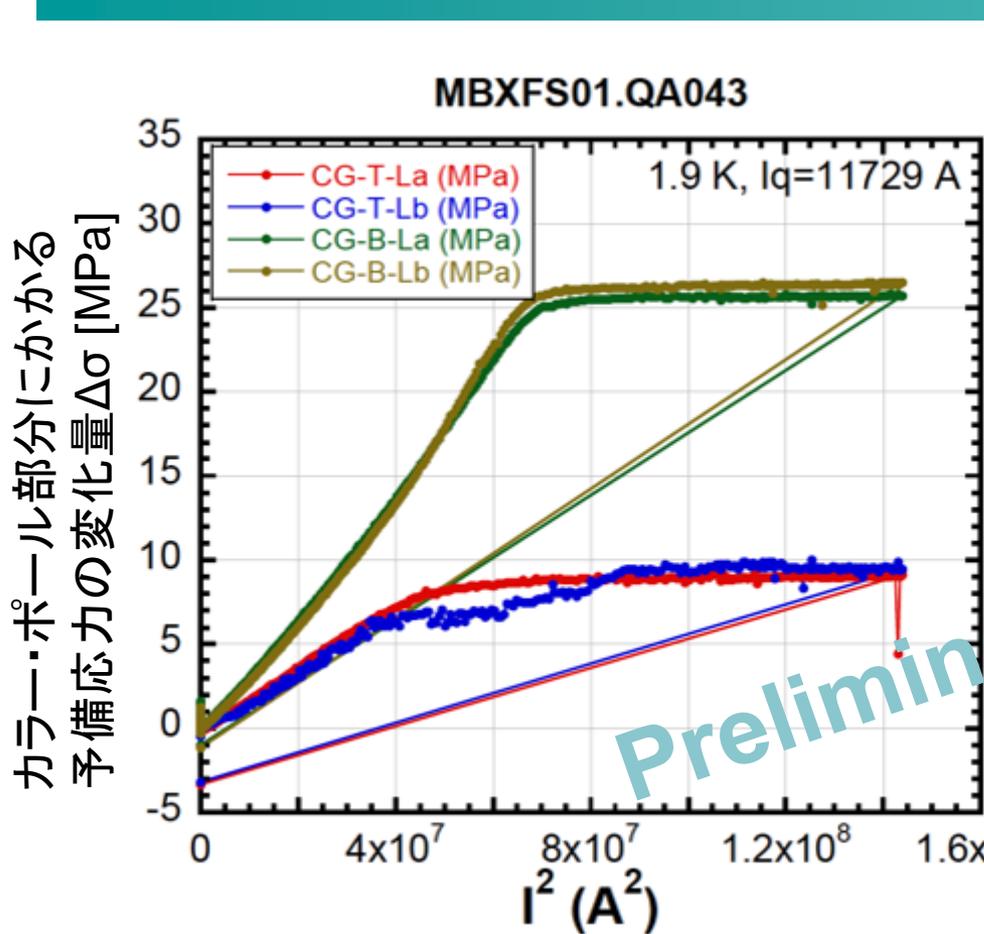
- 1.9Kで9500Aからクエンチ。徐々に上昇。
- 常温までのサーマルサイクル後のトレーニングメモリーは良好。
- 最高12602 A まで到達。(定格12 kA)しかし、その後下がる傾向。
- 一旦昇温して4.45 Kで試験。臨界電流に対して90%以上通電。→超伝導線材が損傷している可能性は低い。

# クエンチ信号

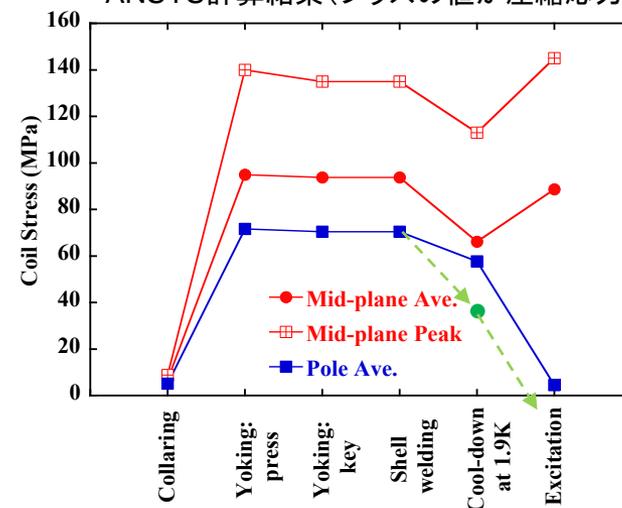


- 大きなスパイクが生じた後、徐々に電圧が上がっていく。  
→ 導体が動いたことによるクエンチ。
- クエンチ検出器: 閾値0.1 V, 検出時間10 ms を超えた時点で遮断信号が入る。

# クエンチトレーニング2 ～ポール部応力測定～



ANSYS計算結果(プラスの値が圧縮応力)



励磁とともに、カラーへの圧縮荷重が減少。8.5 kA以上で抜け切る。  
( $\Delta\sigma$  が変化しなくなる)

- 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。
- トレーニング性能に影響を与えている可能性が高い。

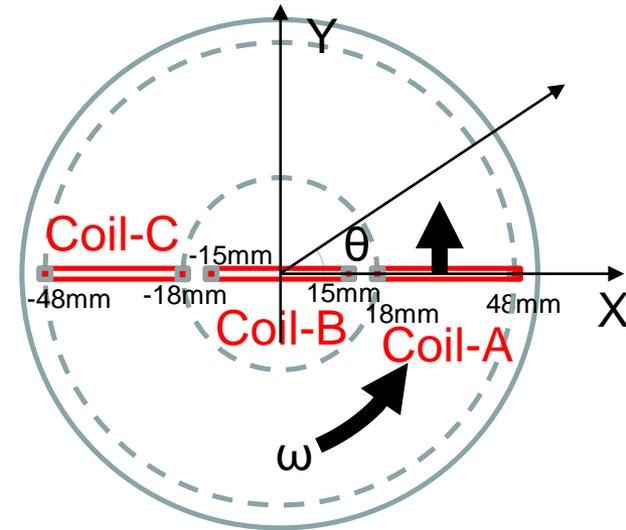
# 磁場測定方法



## Rotating coils



ウォームボア



ラジアルコイル

Coil A: ダイポール

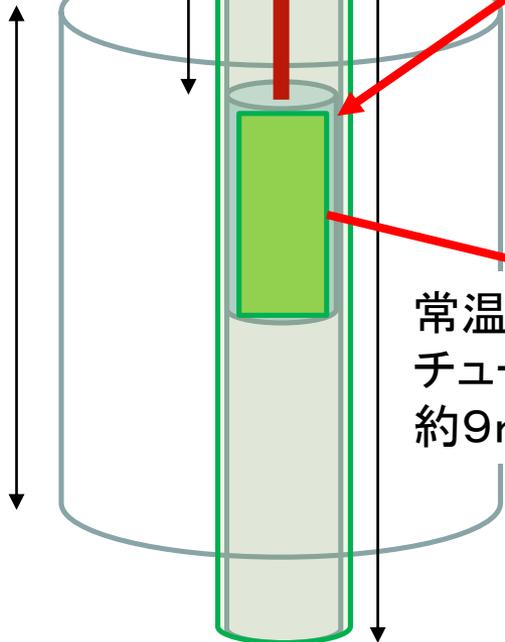
Coil A - Coil B: バックキング

Coil C: 予備

GFRP  
シャフト  
約7m



モデル磁石  
約2m



コイルサイズ:

(大) 350 mm x 30 mm (小) 80 mm x 30 mm

ターン数: 20

# データ集積

デジタルインテグレータ  
Metro Lab PDI 5025

“Main” Coil  
(Coil A)

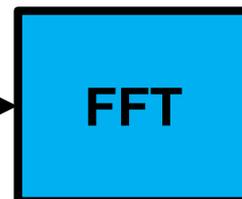
Other Coil  
(Coil B)

トリガー  
(エンコーダ)

HEIDENHAIN RON285

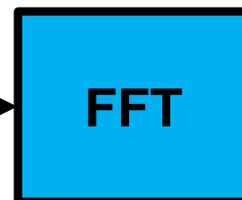
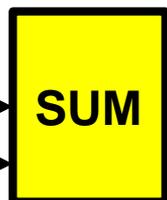
磁石電流  
(DCCT)

Z位置



メイン  
ダイポール  
( $B_1$ )

↑ Metro Lab PDI 5025



多極成分  
( $a_n, b_n$ )

アナログバッキング  
(Coil A - Coil B)

トリガー  
(エンコーダ)

HEIDENHAIN RON285

Agilent DMM 3458A

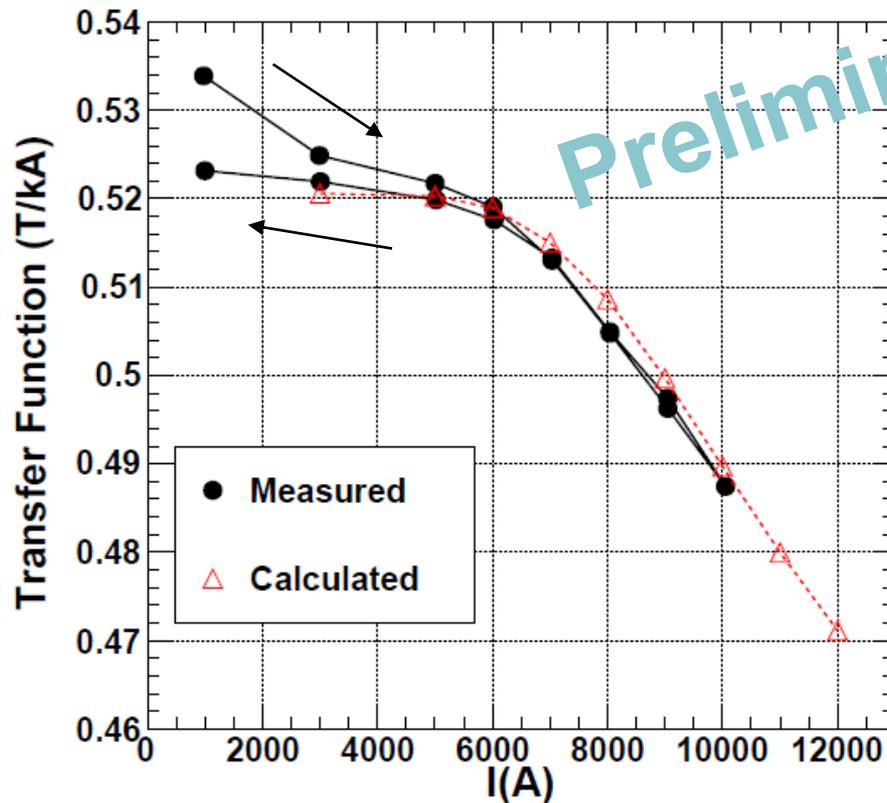


Sony PL20



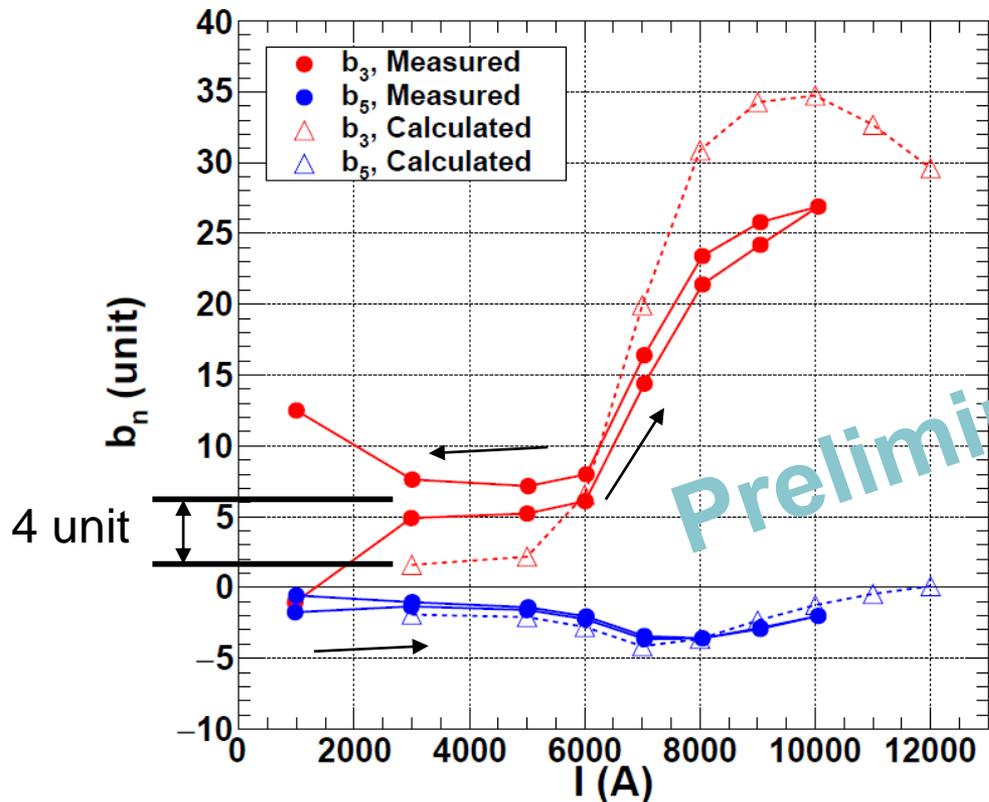
- 電流依存性(DC-loop)
  - 0-10 kA @1.9K
- Z位置依存性(Z-scan)
  - 0-10 kA
  - -1925 ~ +2275 mm

# 磁石中心での磁場測定～Transfer Function～



- 3D磁場計算(ROXIE3D)が測定結果と一致している。
- 6000A以上で鉄の飽和による影響が確認できる。

# 磁石中心での磁場測定～多極成分～

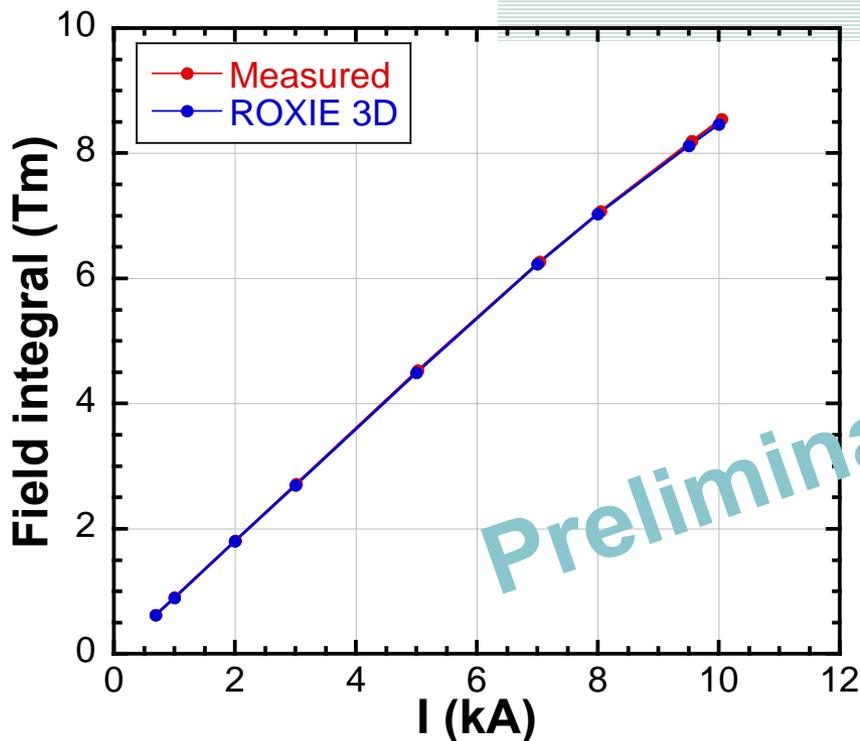
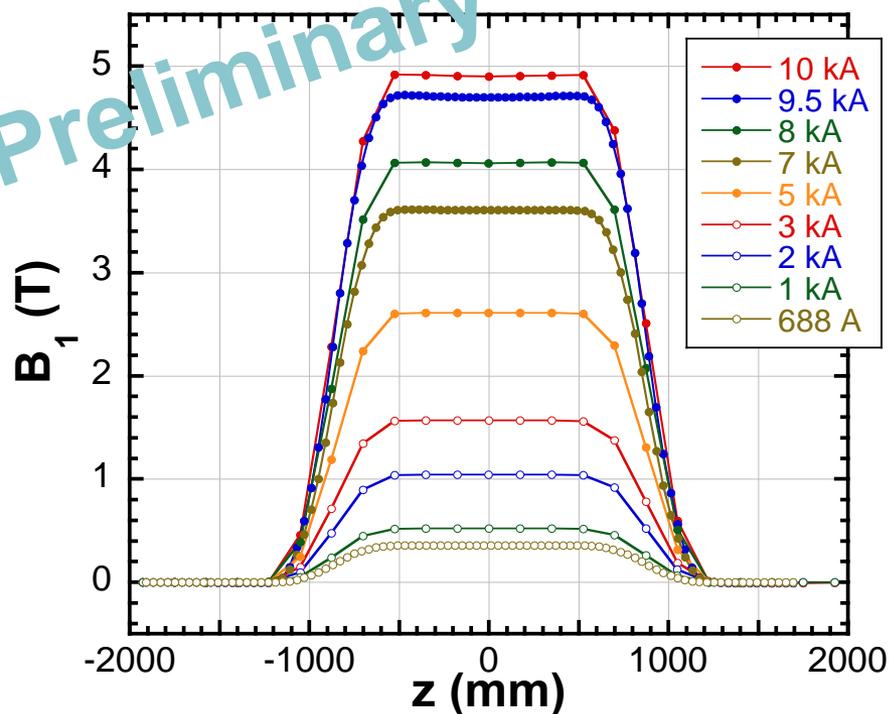


$$b_n(z = 0, I) = \frac{B_n(z = 0, I)}{B_1(z = 0, I)} \times 10^4$$

- 低電流領域(4kA以下):オフセット(4 unit)が見られる。  
→コイル形状と設計の差異が主な理由。
- 高電流領域(6kA以上):鉄ヨークの飽和の影響が顕著。計算との不一致を確認。

# z方向分布： $B_1$ の電流依存性と積分磁場

Preliminary



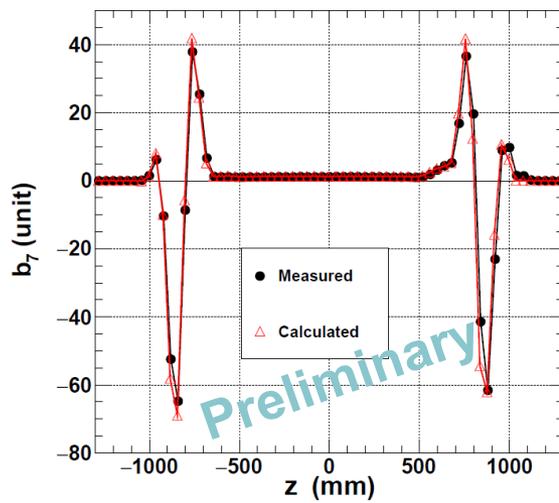
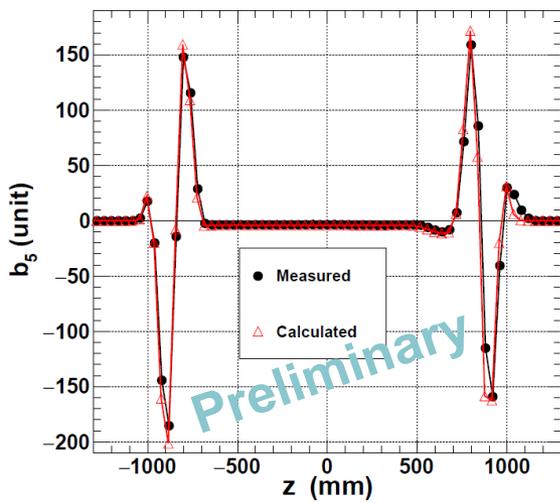
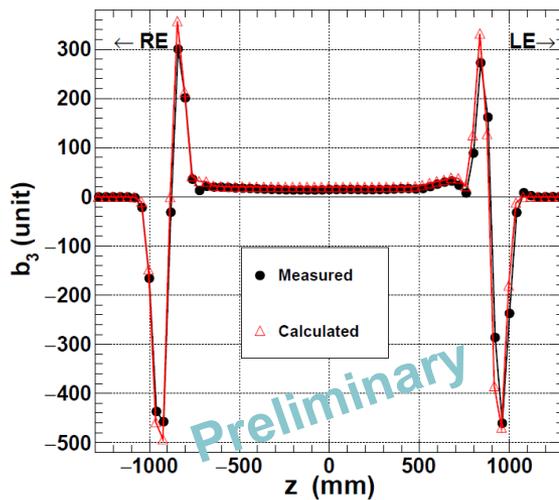
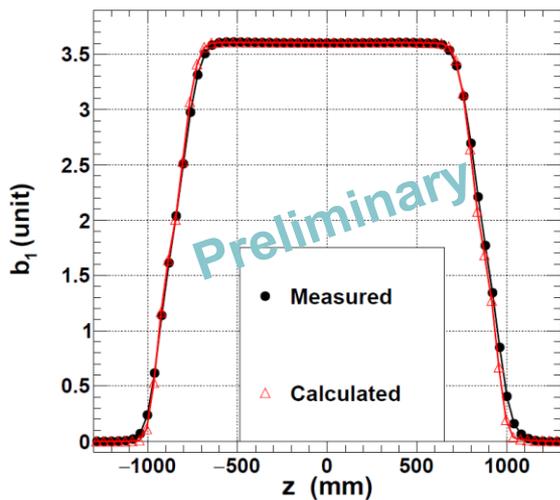
Preliminary

- "Long Coil"で測定。
- 積分磁場は計算とよく合っていることが確認できた。

# z方向分布 ～ノーマル多極成分 $b_1, b_3, b_5, b_7 \sim$



$$b_n(z, I = 7kA) = \frac{B_n(z, I = 7kA)}{B_1(z = 0, I = 7kA)} \times 10^4$$



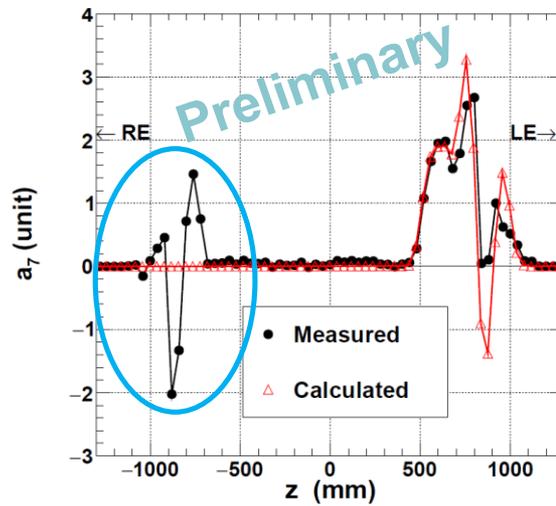
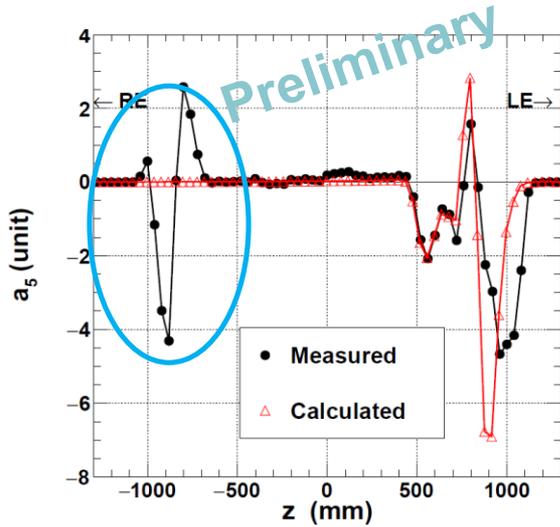
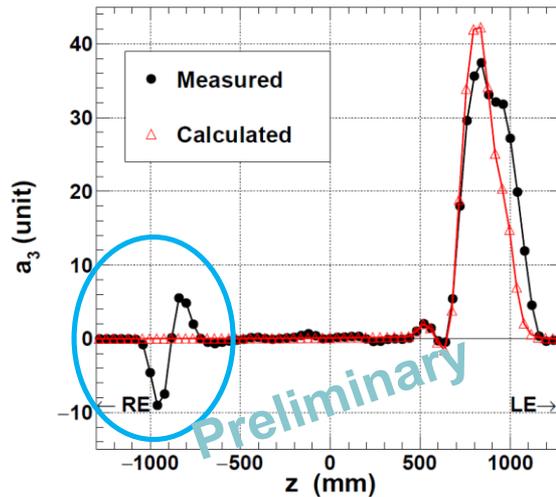
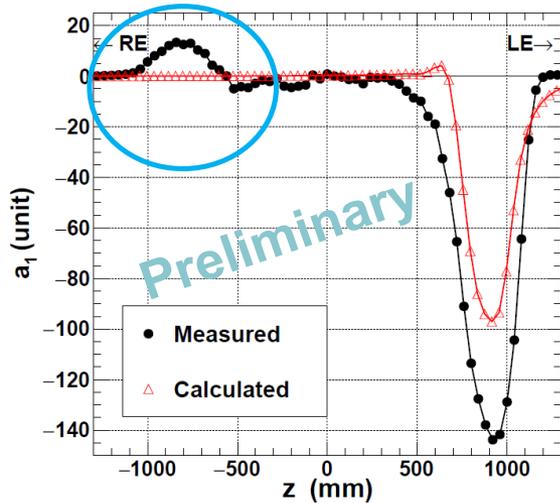
- 7 kAの測定
- ショートコイルで測定
- 2極磁石のallowed多極成分。

→3D磁場計算がプロファイルとよく一致している。

# z方向分布～スキュー多極成分 $a_1, a_3, a_5, a_7$ ～



$$a_n(z, I = 7kA) = \frac{A_n(z, I = 7kA)}{B_1(z = 0, I = 7kA)} \times 10^4$$



- 直線部  
→ 磁場計算はよく一致している。
- リードエンド (LE)  
→  $a_1$ : 大きさが大きく異なる。  
→ その他: 若干傾向が異なる。
- リータンエンド (RE)  
→ 計算結果と大きく異なる。  
→ エンド部分のコイルのツイストの影響が考えられる。

# まとめ

- LHC加速器高輝度アップグレード用D1の2mモデル磁石1号機の冷却・励磁試験を2016年4-6月に行った。
  - クエンチ試験：
    - 最高12602 Aまで到達。(定格12 kA)
    - サーマルサイクル後のトレーニングメモリーは良好。
    - クエンチ性能に課題。予備応力が原因の1つとして考えられる。
  - 磁場測定：
    - 電流依存性：
      - 2極磁場で想定した磁場が出ていることを確認。
      - 多極成分 $b_3$ でオフセットが見られるなど改善点が見つかる。
    - z方向分布測定：
      - Allowed成分: 計算結果がよく一致している。
      - Un-allowed成分: コイルエンドで差異が見られた。

現在、磁石の改造を進めており、  
2016年末に再度冷却・励磁試験を行う予定である。