

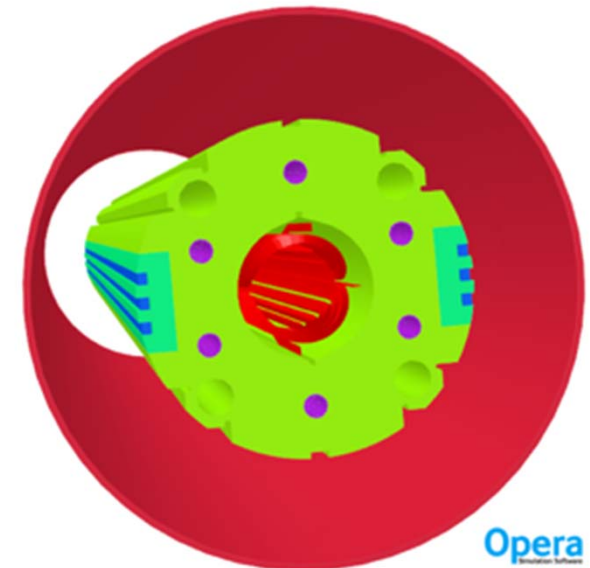
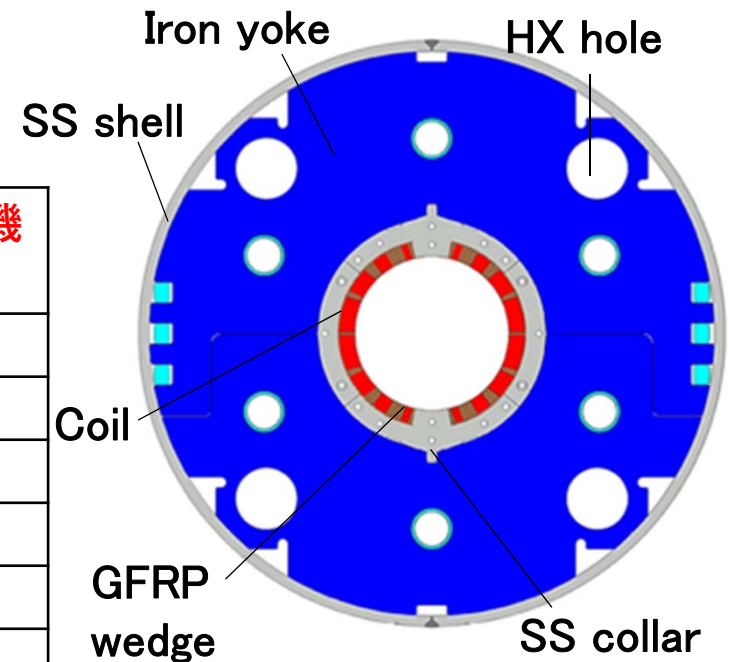


LHC高輝度アップグレード用 超伝導磁石の開発(7) - 2mモデル磁石性能評価試験結果 -

鈴木 研人, 飯田 真久, 池田 博, 池本 由希子, 大畠 洋克,
岡田 尚起, 岡田 竜太郎, 荻津 透, 川又 弘史, 木村 誠宏,
佐々木 憲一, 菅野 未知央, 高橋 直人, 田中 賢一,
寺島 昭男, 中本 建志, 東 憲男(高エネ研),
Musso Andrea, Todesco Ezio (CERN)

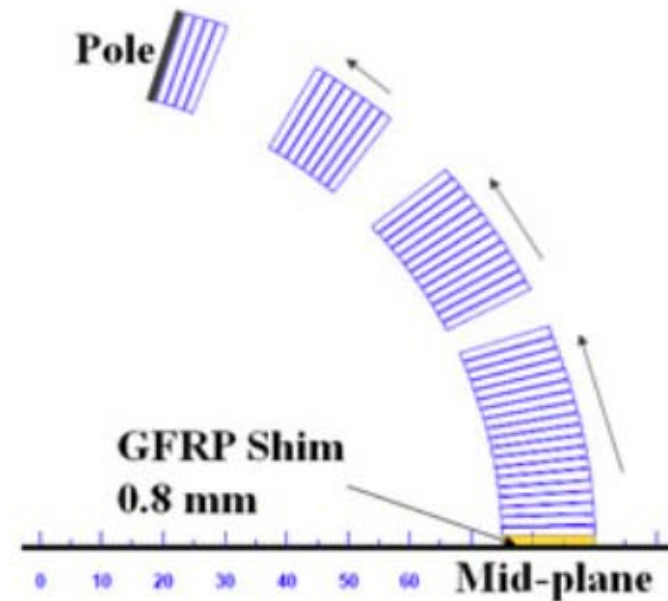
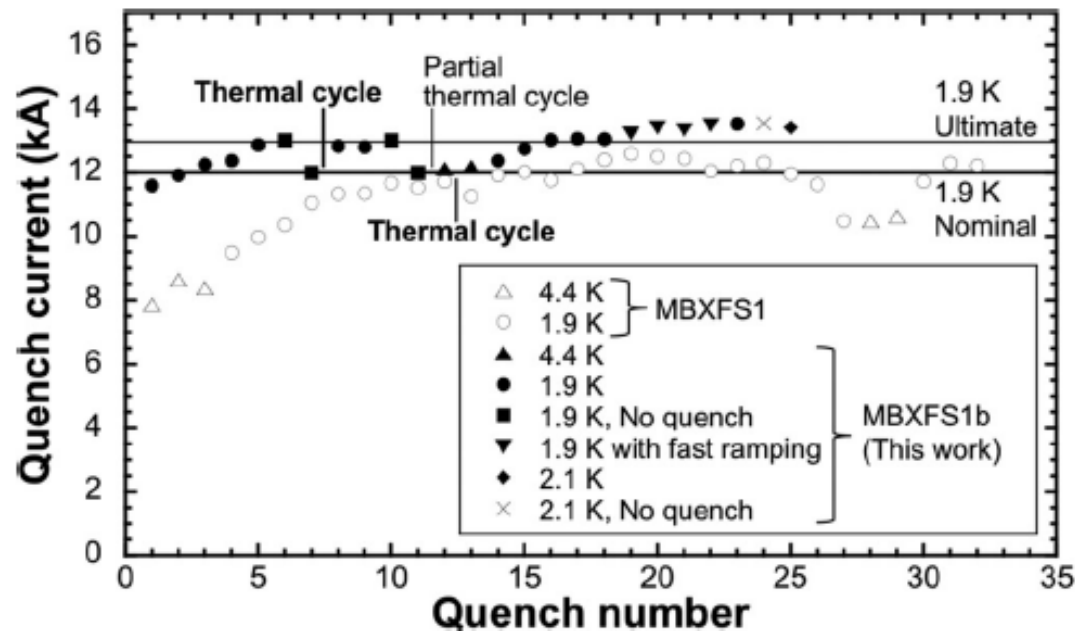
HL-LHCアップグレードのための D1磁石 設計値

	実機 (7m)	モデル2号機 (2m)
Magnetic length	6.26 m	1.67 m
Coil mech. length	6.58 m	2.00 m
Magnet mech. length	6.73 m	2.15 m
Coil aperture	150 mm	
Field integral	35 T m	9.5 T m
Field (3D)	Nominal: 5.60 T, Ultimate: 6.04 T	
Peak field (3D)	Nominal: 6.58 T, Ultimate: 7.14 T	
Current	Nominal : 12.05 kA, Ultimate 13.28 kA	
Operating temperature	1.9 K	
Load line ratio (3D)	Nominal: 76.5%, Ultimate: 83.1% at 1.9 K	
Differential inductance	Nominal: 4.0 mH/m	
Conductor	Nb-Ti: LHC-MB outer cable	
Stored energy	Nominal: 340 kJ/m	



これまでのクエンチトレーニング結果

モデル1号改造機



- モデル1号機では受け入れ条件である電流値(13 kA)に到達できなかった
- モデル1号改造機(1b)ではシミングにより予備応力を増強(65 MPa → 100 MPa)した結果、性能要求を満たすことができた
- 2号機ではさらなる予備応力の増強(100 MPa → 115 MPa)により、良好なトレーニング性能が期待される

トレーニング以外で重要な性能項目

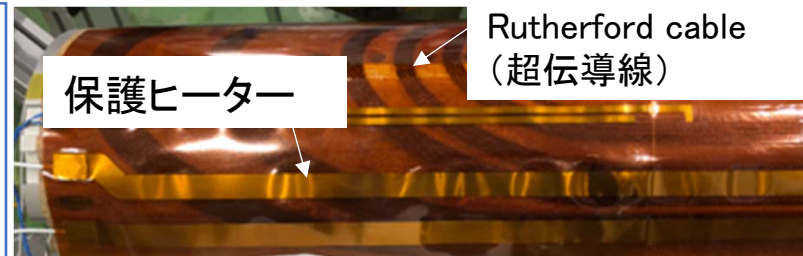
クエンチ保護

- クエンチ時における磁石蓄積エネルギー(340 kJ/m)の速やかな取り出しが必要
- ヒーターによるクエンチ(抵抗)促進を利用した保護システム

→ 最短でエネルギーダンプするためのヒーター配置の最適化が必須 ($T_{max} < 300$ K)

$$MIITs = \int_{t_0}^{\infty} \boxed{I^2(t) dt} = A^2 \int_{T_{He}}^{\boxed{T_{max}}} \frac{S(T)}{\rho E(T, B, RRR)} dT$$

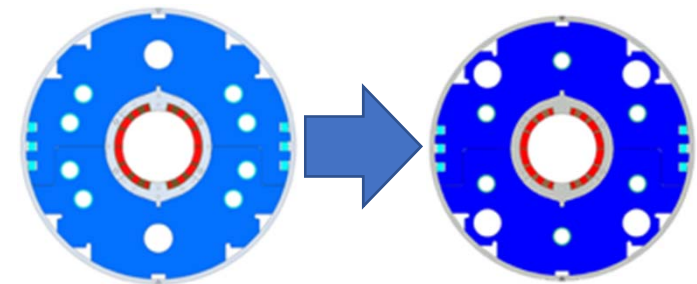
Current dump Peak temperature



磁場性能

- 1号機から鉄ヨークの断面が変更
- ケーブル配置を再度最適化

→ 多極成分の抑制するようなケーブル配置

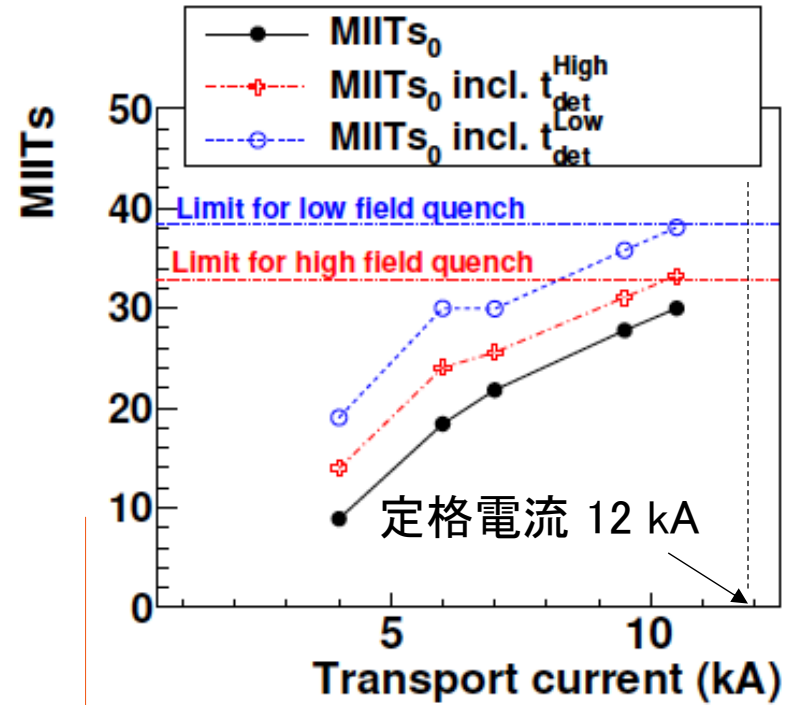
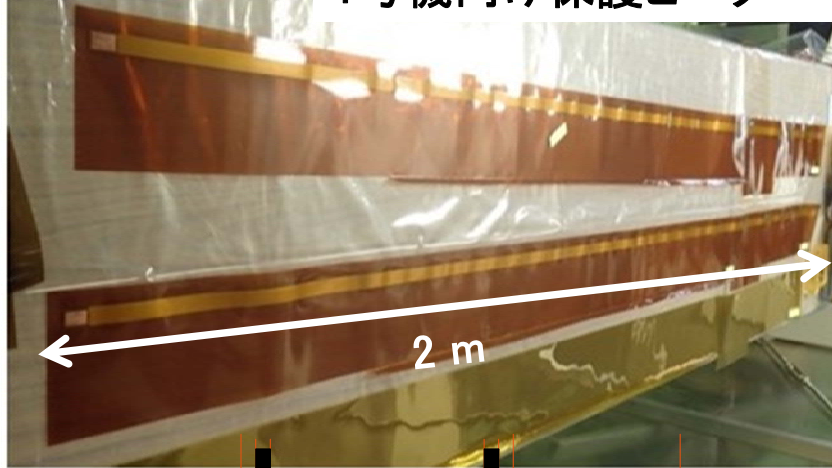


7m磁石に要求される積分磁場の上・下限値 ($\times 10^{-4}$)

n	2	3	4	5	6	7	8	9
Skew, Normal	0.80	2.90	0.50	1.50	0.24	0.66	0.11	0.26

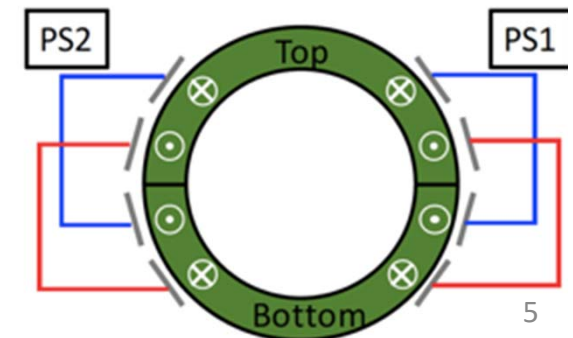
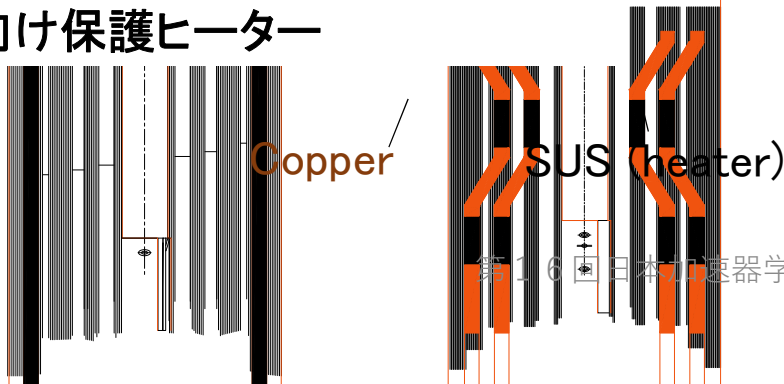
クエンチ保護ヒーター (QPH)

1号機向け保護ヒーター



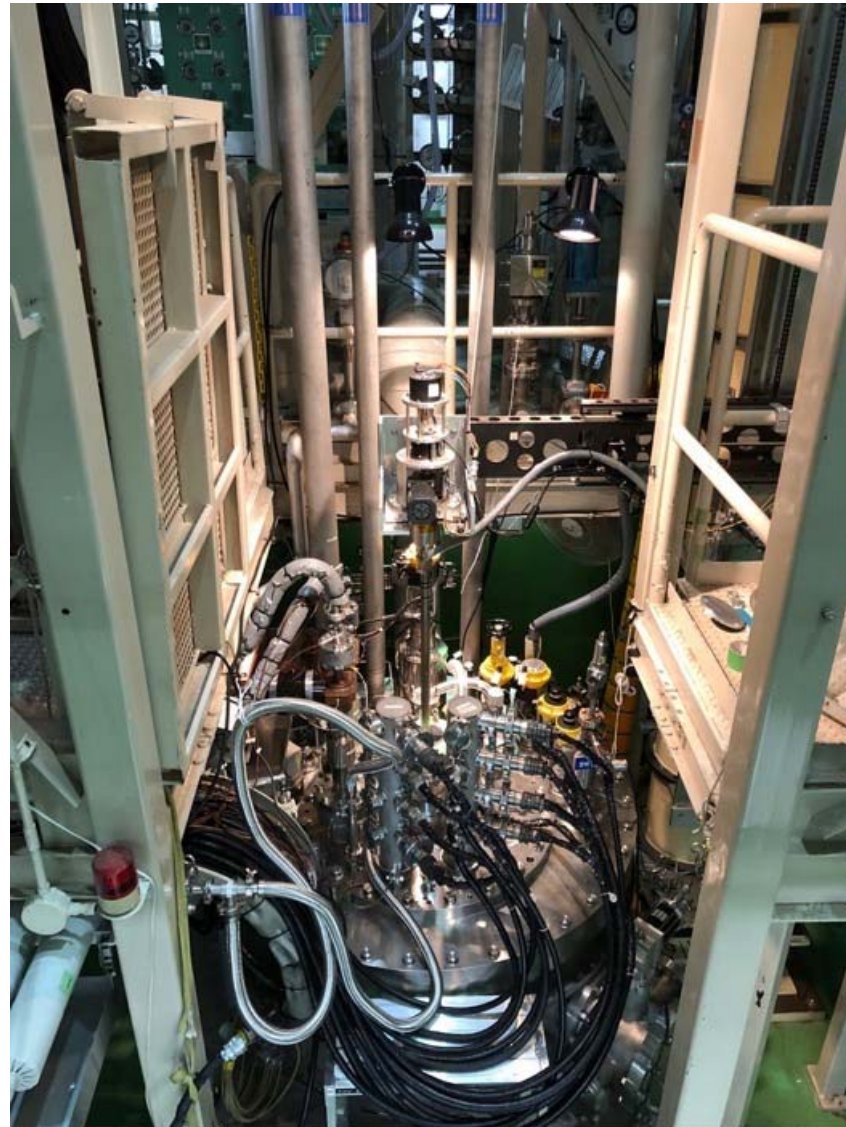
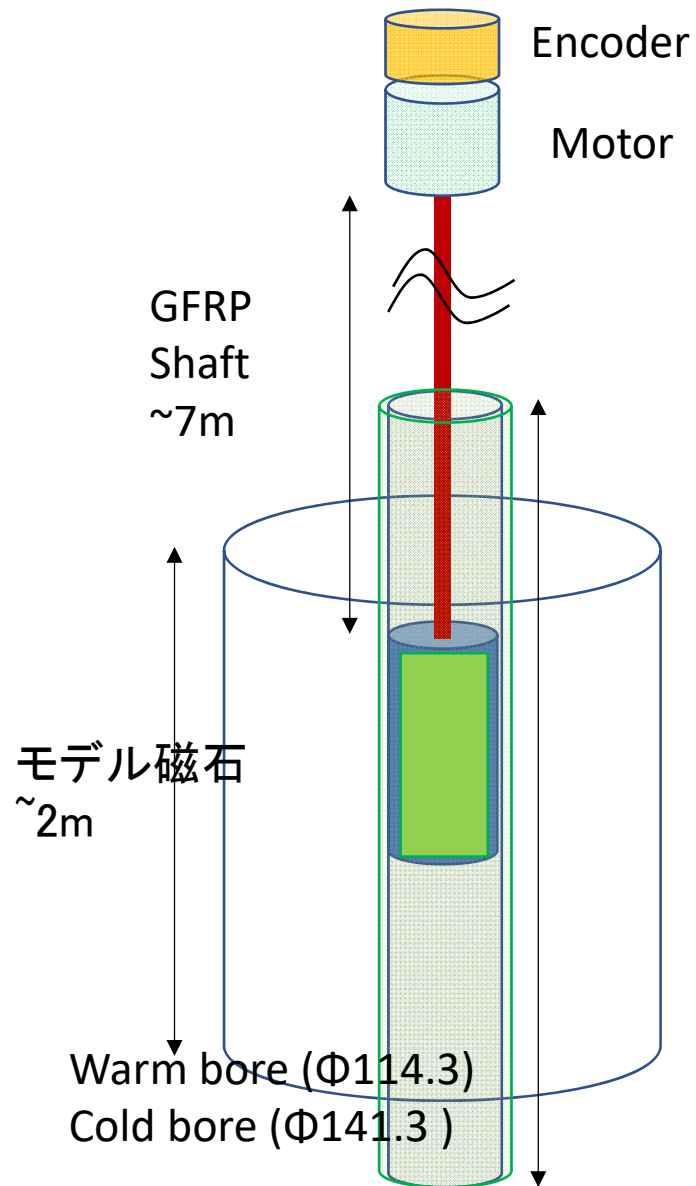
- 1号機ヒーターデザイン(1本ストリップ)では定格電流値が達する前にMIITsが上限値に達してしまった(右上図)
- 2号機からヒーターデザイン最適化を図り、ジグザグパターンを採用 → 磁石あたり合計8本のストリップを使用

2号機向け保護ヒーター

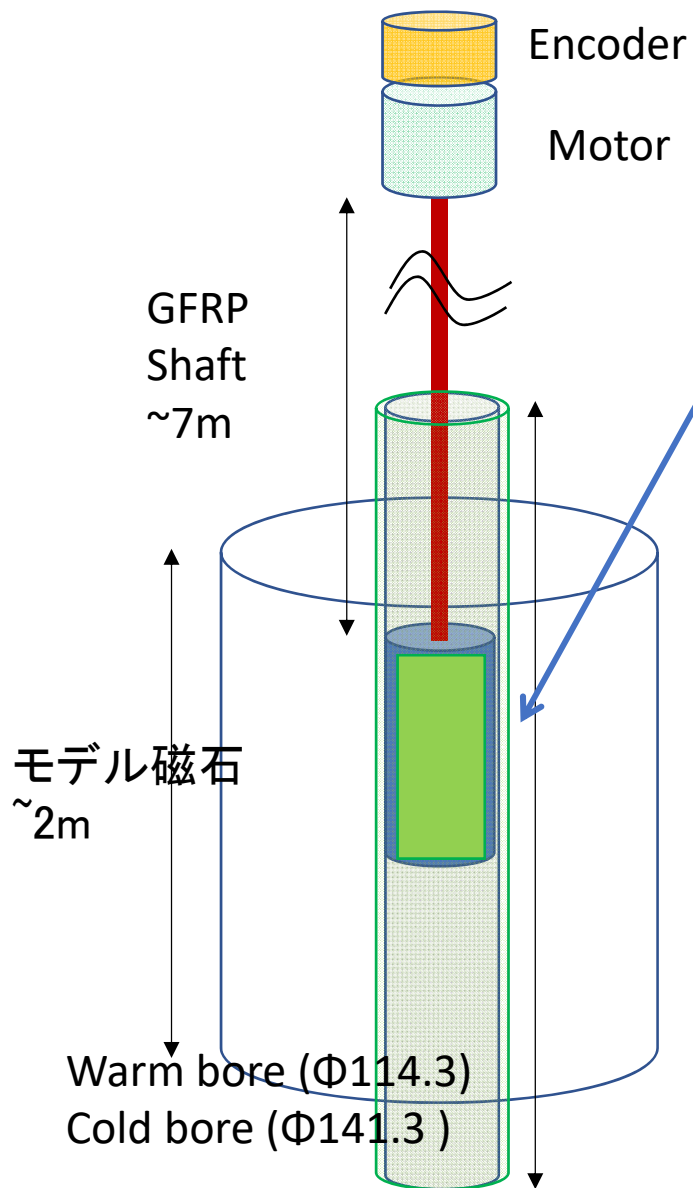


縦型磁場測定装置

深さ 9m長
縦型クライオスタット
@ KEK低温センター



縦型磁場測定装置



- 回転コイルを用いた多極展開
 - 誘起信号をインテグレータによって一定回転角度毎に積分:

$$\phi(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{NLr_{\text{ref}}}{n} K_n \{ B_n \cos n\theta + A_n \sin n\theta \}$$

N: # of turns, **L**: Coil length r_{ref} : reference rad. (**50mm**)
K_n: Sensitivity factor (コイルジオメトリ由来)

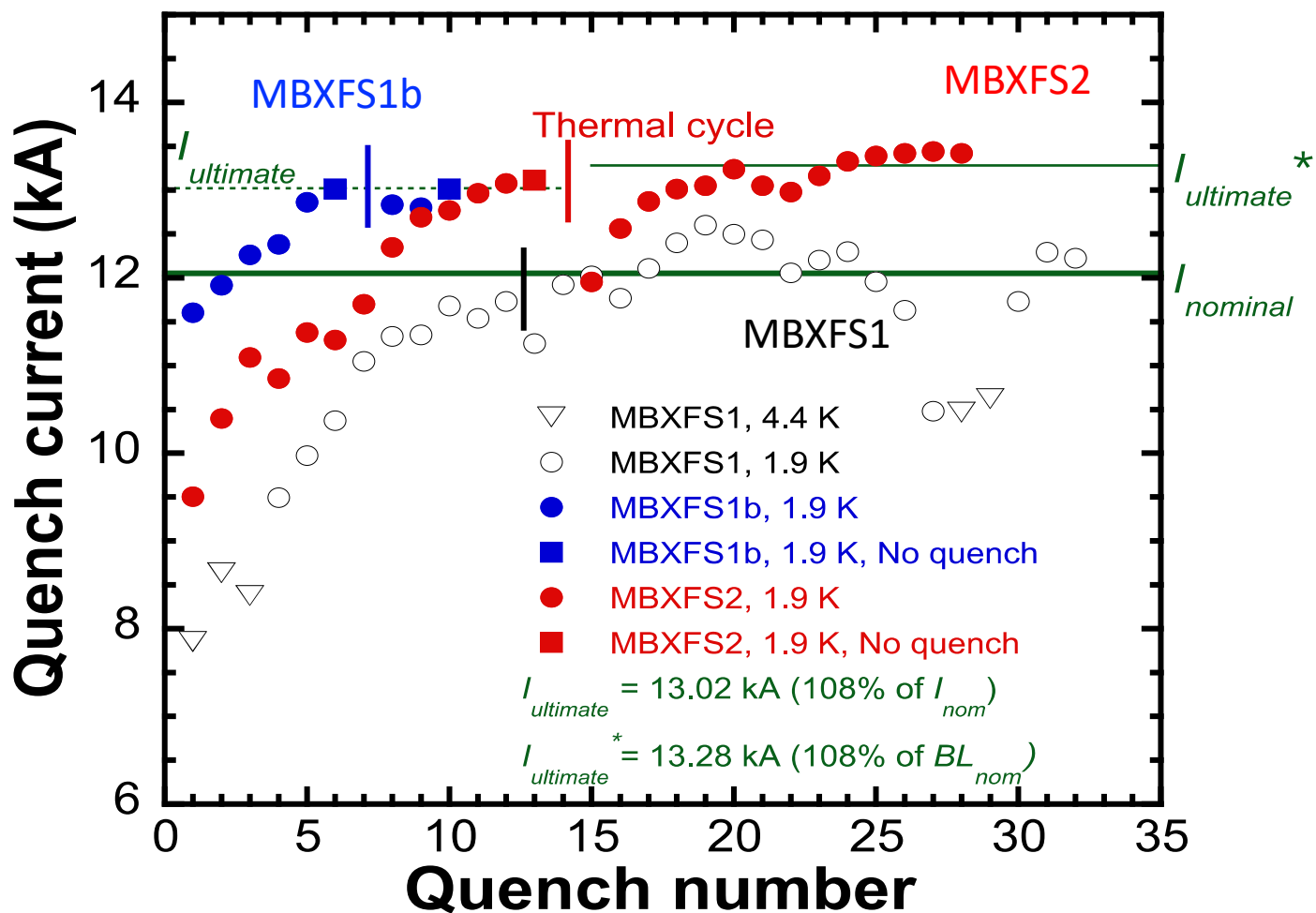
- 積分された出力信号をフーリエ変換することで係数部分 B_n (ノーマル成分)、 A_n (スキュー成分)を測定
- 大コイル: 磁石中心位置 & 積分磁場測定
- 小コイル: 長手方向磁場測定 (Fine structure)
- 回転速度: 0.2 rot/s

試験内容

- 第1回目の励磁試験: 2018.10.14 – 10. 26
 - クエンチトレーニング
 - 磁場測定

- 第2回目の励磁試験: 2018. 12.10 – 12.22
 - トレーニングメモリの確認
 - 新クエンチ保護ヒーターの性能評価
 - 磁場特性の再現性確認

クエンチトレーニング結果



- クエンチ数8回にて定格電流(12.05 kA)に到達
- 受け入れ条件(13.28 kA)まで達することができた
- Thermal Cycle後においても良好なトレーニングメモリを確認
- 十分な予備応力が与えられていることがわかった

クエンチ発生箇所まとめ



1st cycle

Quench#	Iq (kA)	Quench start location
1	9.504	Top, 1st turn, SS to LE
2	10.399	Bottom, 1st turn, SS to LE
3	11.095	Top, 26-27th turn, SS to LE
4	10.852	Top, 26-27th turn, SS to LE
5	11.376	Bottom, 2nd turn, SS to LE
6	11.292	Top, 2nd turn, SS to LE
7	11.703	Top, 13-14th turn, LE
8	12.348	Top, 26th turn, RE
9	12.69	Top, 5th turn, SS to RE
10	12.771	Top, 7-13th turn
11	12.966	Top, 5th turn, SS to RE
12	13.078	Bottom, 5th turn, SS to RE

■ Top coil

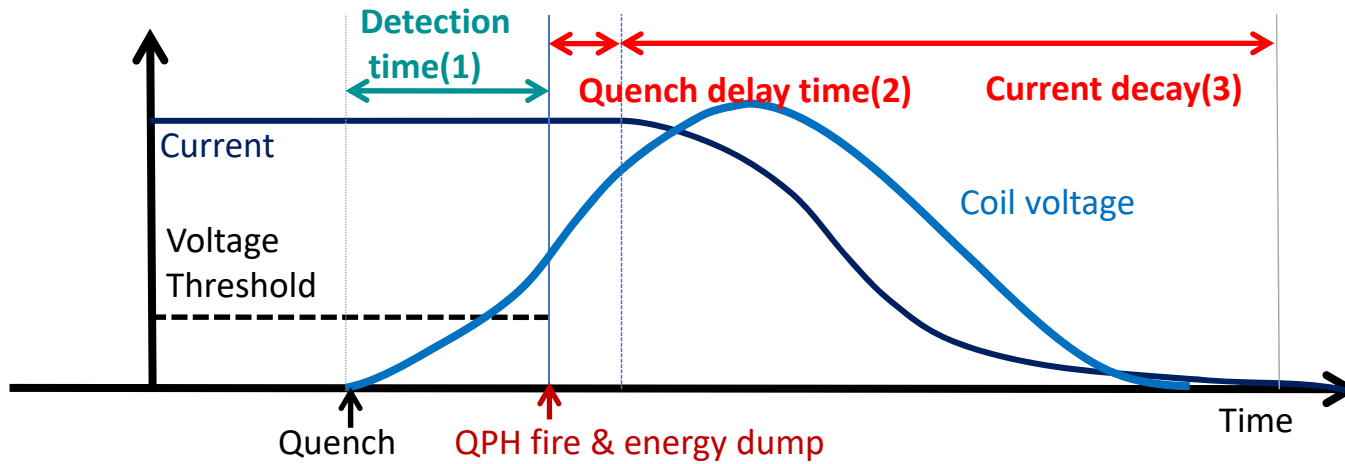
■ Bottom coil

2nd cycle

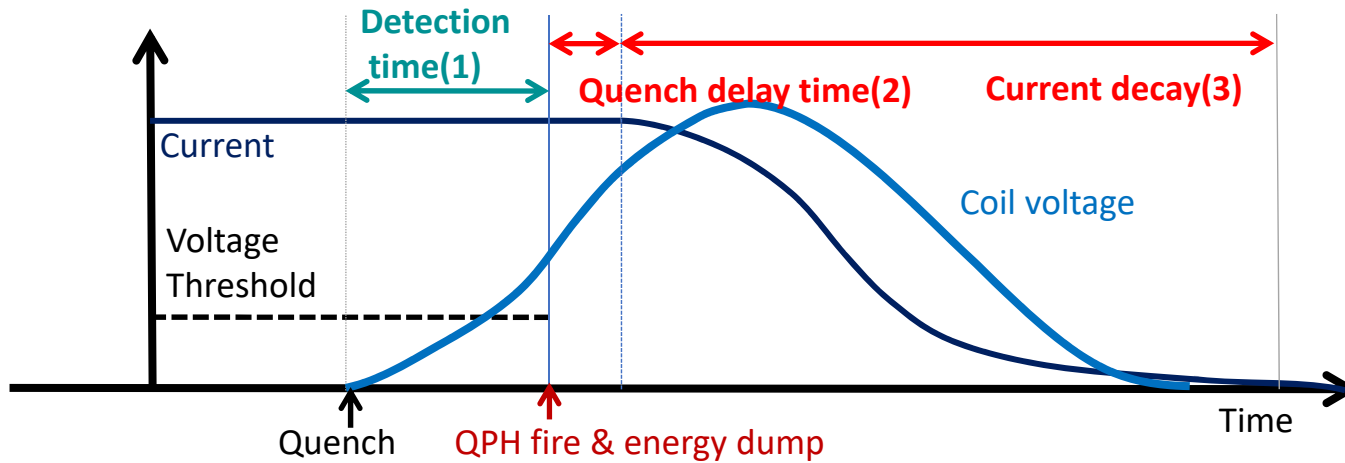
Quench#	Iq (kA)	Quench start location
13	11.956	Bottom, 2nd-4th turn, SS to LE
14	12.562	Top, 1st turn, SS
15	12.874	Bottom, 13th turn, LE
16	13.011	Bottom, 13th turn, LE
17	13.051	Top, 13th turn, LE
18	13.240	Top, 5th turn, SS
19	13.051	Bottom, 2nd turn, LE
20	12.982	Bottom, 19-26th turn
21	13.161	Bottom, 13th turn, LE
22	13.331	Top, 5th turn, LE
23	13.391	Top, 1st turn, RE
24	13.418	Top, 1st turn, RE
25	13.442	Top, 1st turn, LE
26	13.420	Bottom, Ramp lead

- コイルエンド付近にてクエンチが多く発生していることがわかった

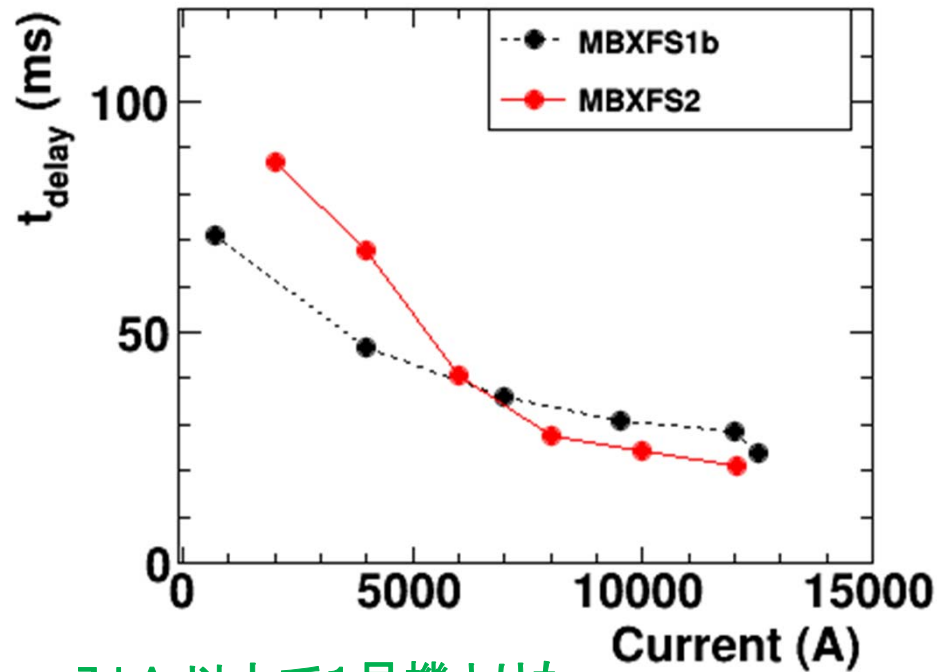
クエンチ保護ヒーター性能評価



クエンチ保護ヒーター性能評価

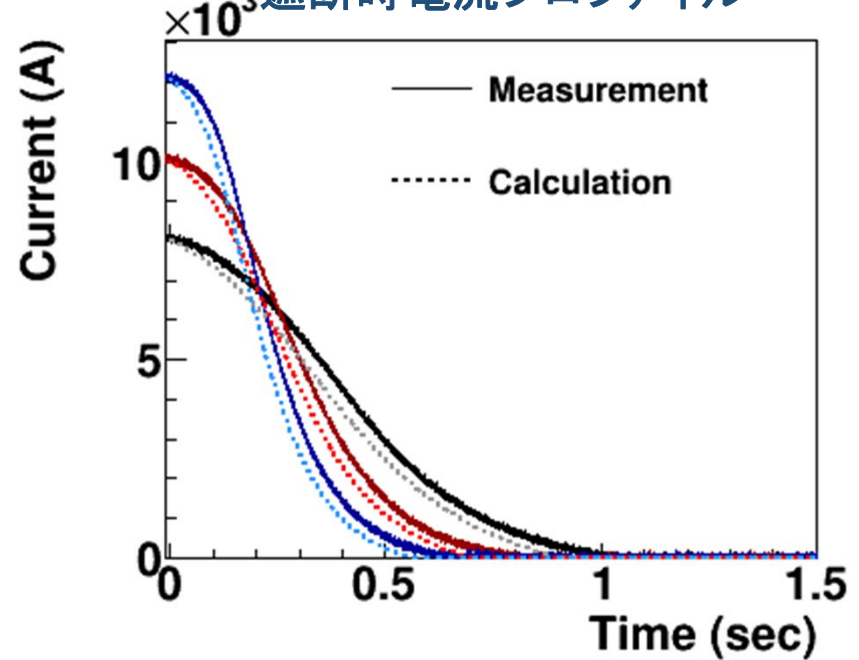


ヒーターON後のクエンチ遅延時間



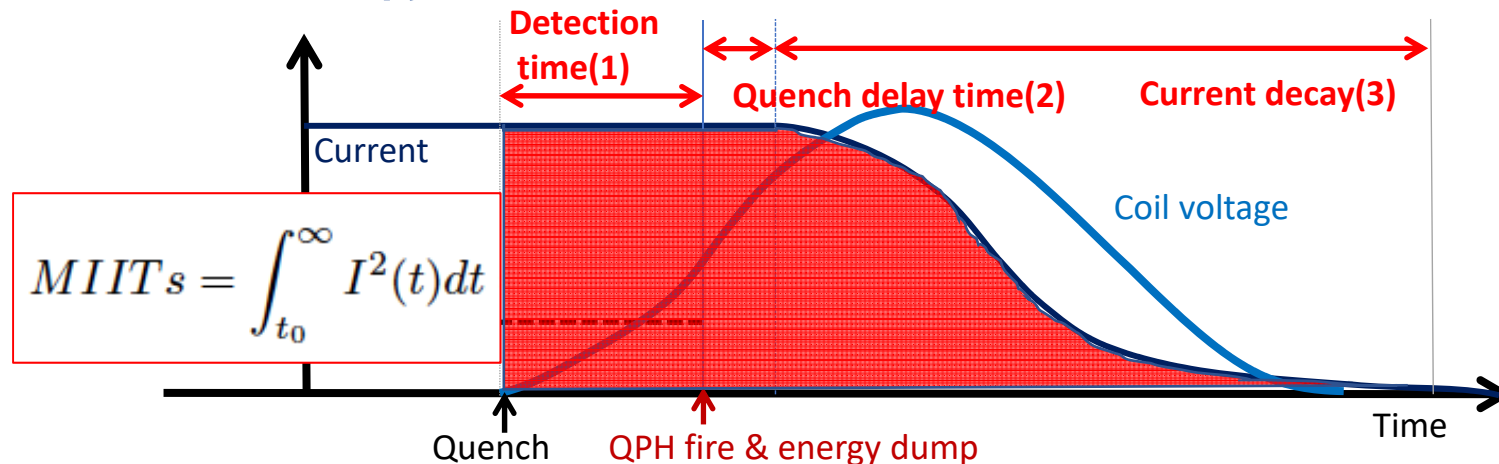
7 kA 以上で1号機よりも
速やかにクエンチがコイル全体に伝播

遮断時電流プロファイル



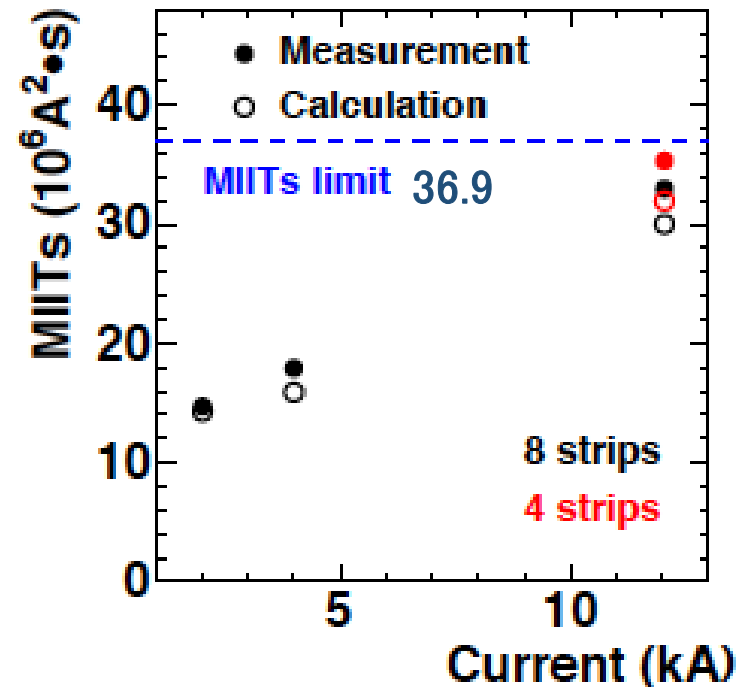
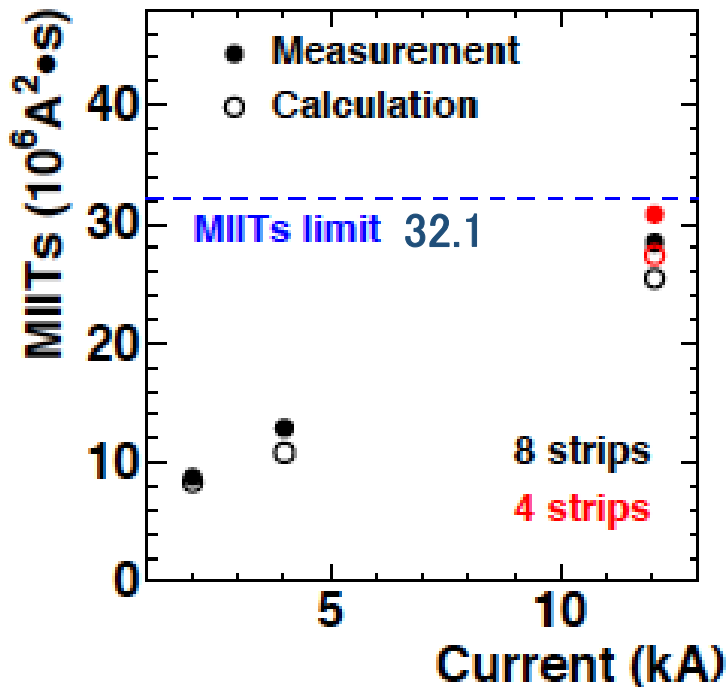
計算結果と良い一致を示している

クエンチ保護ヒーター性能評価



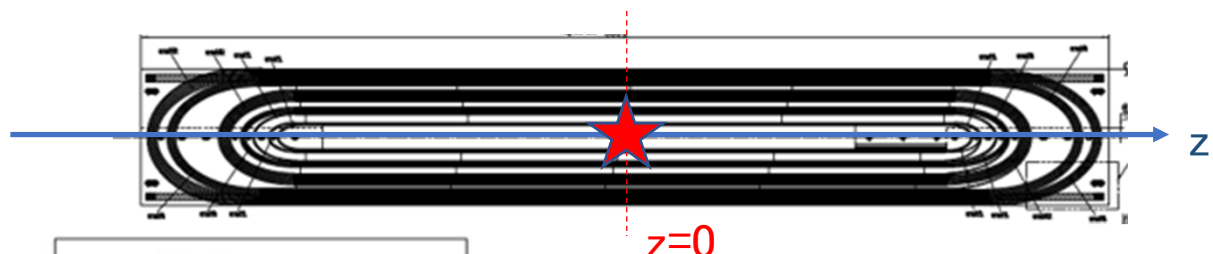
Incl. t_{det} : Quench at 5T

Incl. t_{det} : Quench at 1T

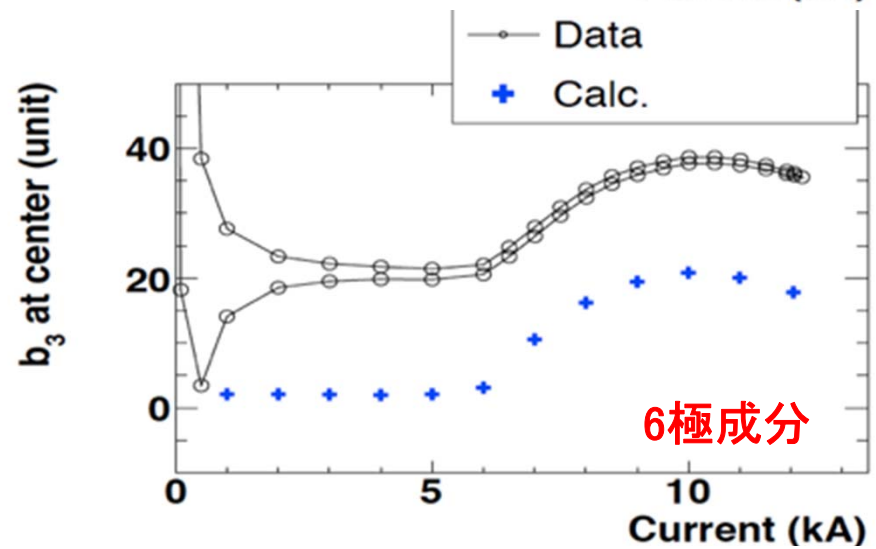
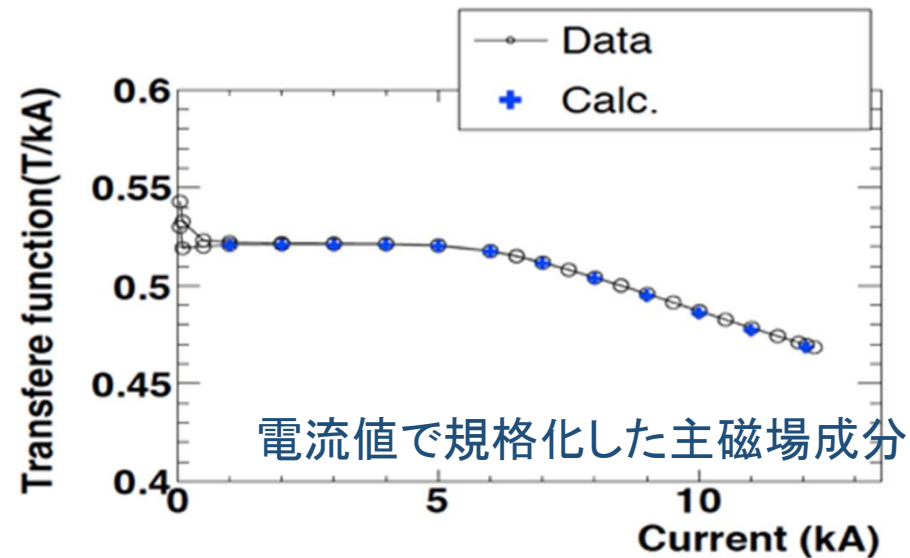


ヒーターstriップ数半分としても、MIITs@定格電流は許容値の範囲以内

磁場性能評価 - 磁石中心における磁場成分電流依存性 -



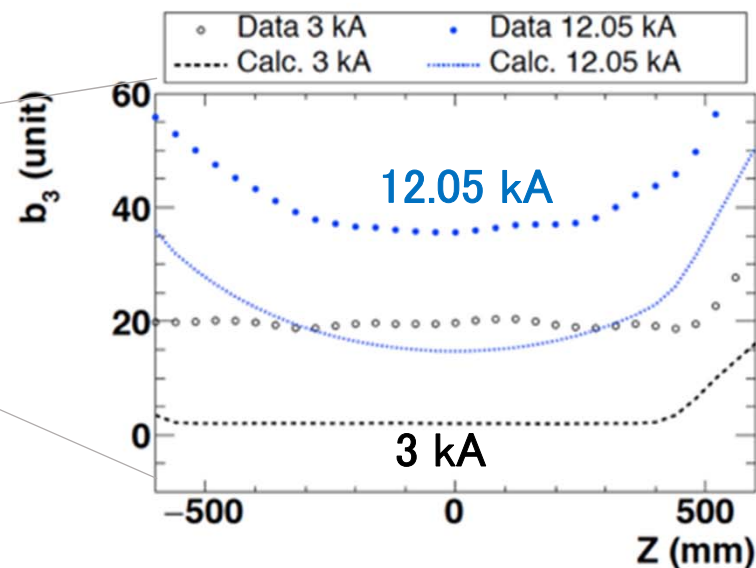
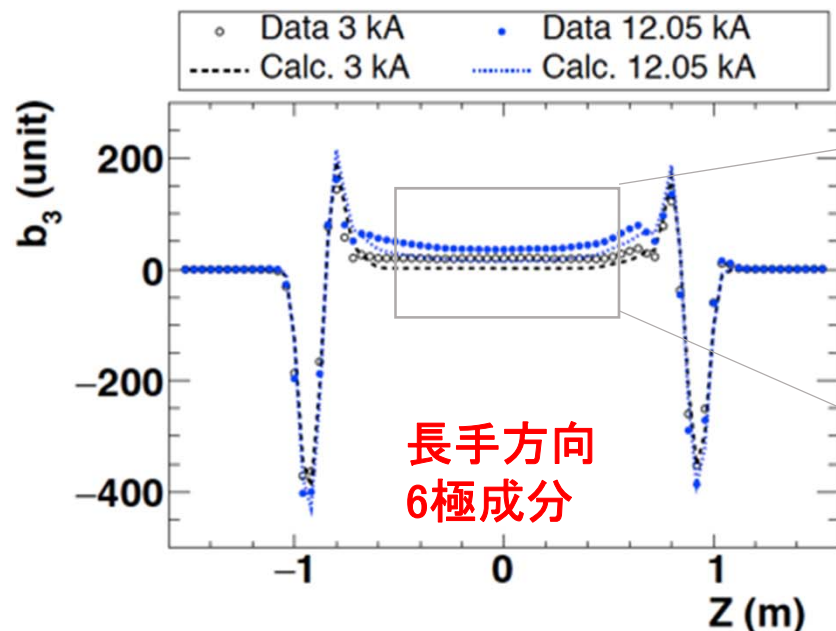
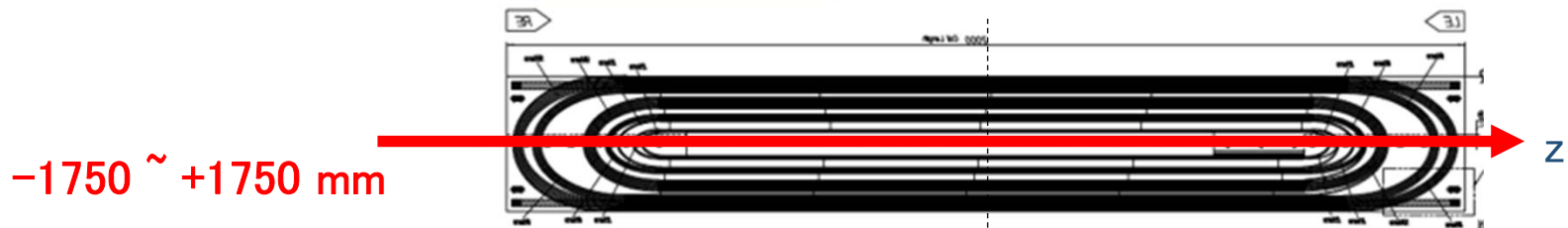
(): 設計値



	3 kA	12.05 kA
B1 (T/kA)	0.5214 (0.5207)	0.4698 (0.4675)
b3 (unit)	20.885 (2.040)	36.041 (15.169)
b5	-1.951 (-3.262)	1.610 (0.188)
b7	-0.151 (0.426)	-0.778 (-0.070)
b9	0.081 (-0.289)	0.426 (0.077)

6極成分(b_3)で20unitほどの大きな違いが見られる

磁場性能評価 - 長手方向における磁場成分 -



積分磁場 @ 定格電流	\overline{B}_1 (T · m)	\overline{b}_3 (unit)	\overline{b}_5 (unit)	\overline{b}_7 (unit)	\overline{b}_9 (unit)
設計値	9.459	-9.85	0.28	-1.34	-1.59
測定値	9.535	0.95	3.30	0.41	-1.19

コイル直線部において電流値に依存しない b_3 のずれ (~20 unit)が見られる。
 積分磁場@定格電流では設計値より~10 unit 大きく、このままでは要求を満たせない。

実証機・実機デザインに向けて

• b_3 の解明

- 計算で考慮されていない磁性体の影響
- スペーサの寸法精度の影響
- **コイル断面設計において、ウェッジ周方向寸法に問題 ←主原因**
- **コイル楕円変形による寄与 ←2次的要因**

• 対策

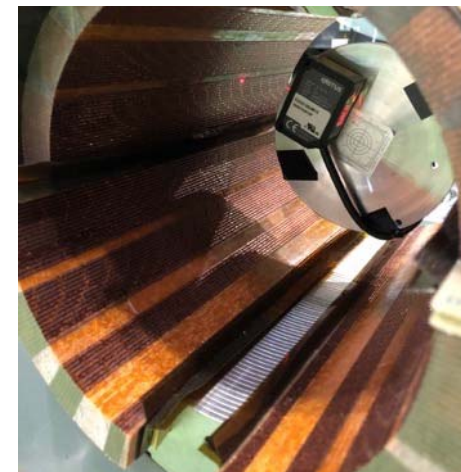
- コイル断面設計の再デザイン
- さらに、楕円変形による6極成分のずれを考慮した補正も加える
 - ✓ コイル内径測定の実施

実証機・実機デザインを8月中に
完成させる



メカニカルショートモデルを用いた実証実験

非接触変位センサを用いた
内径測定を試み

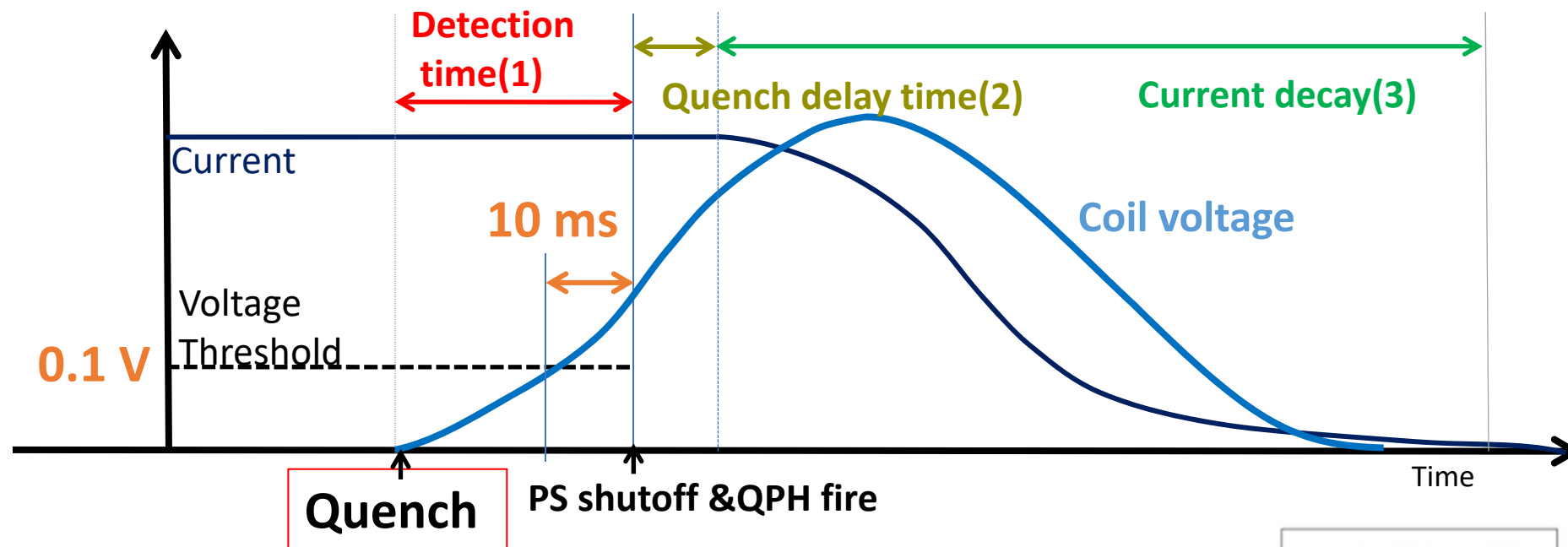


まとめ - モデル2号機性能評価結果 -

- クエンチトレーニング
 - 予備応力は十分であることが確認でき、受け入れ条件電流値(13.28 kA)に到達することができた
 - 良好なトレーニングメモリを確認
 - コイルエンドに関しては、3号機よりさらなる補強を検討中
- クエンチ保護ヒーター
 - 新しいデザインで得られたMIITsは許容値 (32.1 at 5 T, 36.9 at 1 T)の範囲内であり、性能要求は満たされている
 - 実機向けヒーターを製造中
- 磁場性能
 - 6極成分に関して設計値よりも~20 unit 大きい値を示している
 - モデル磁石2号機デザインでは性能要求を満たさないことがわかった
 - 実証機・実機の最終デザインを行なっている

Supplement

クエンチ保護の流れ

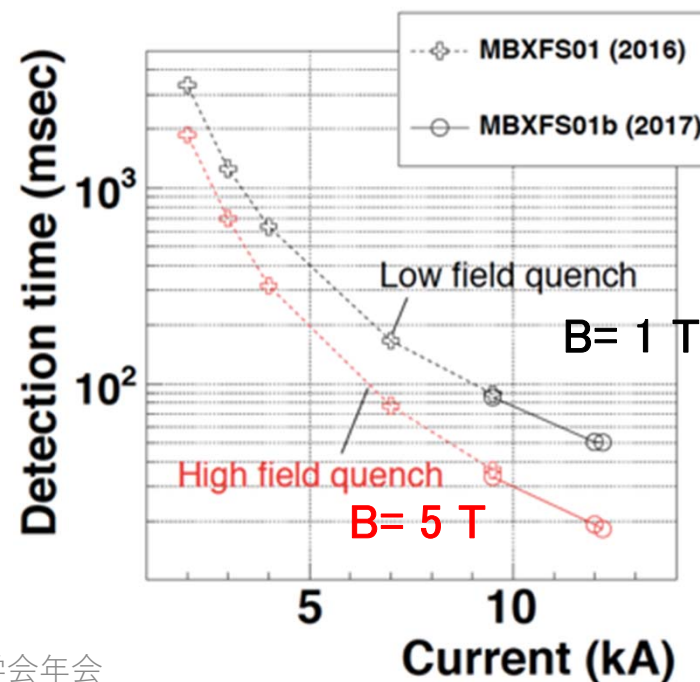


磁石運転中、以下の条件が満たされた場合にクエンチと断定：

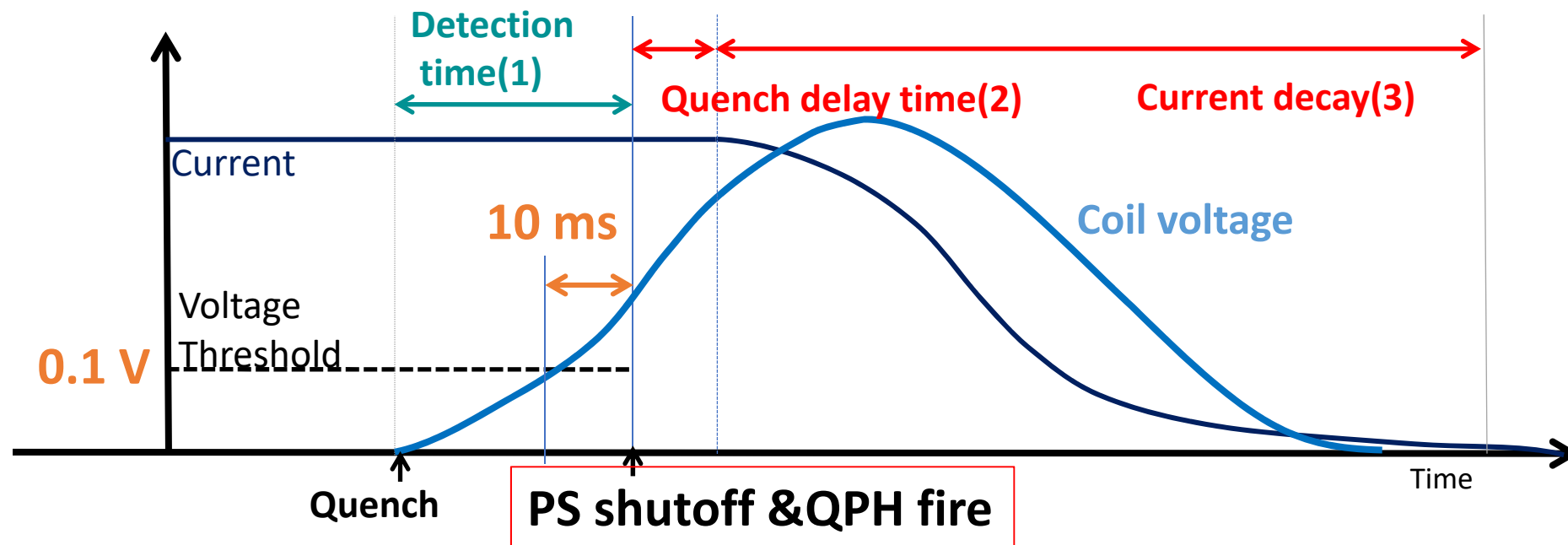
- Coil balance voltage > 0,1 V for 10 ms

実際にクエンチが発生してから断定されるまでの時間(クエンチ検出時間)

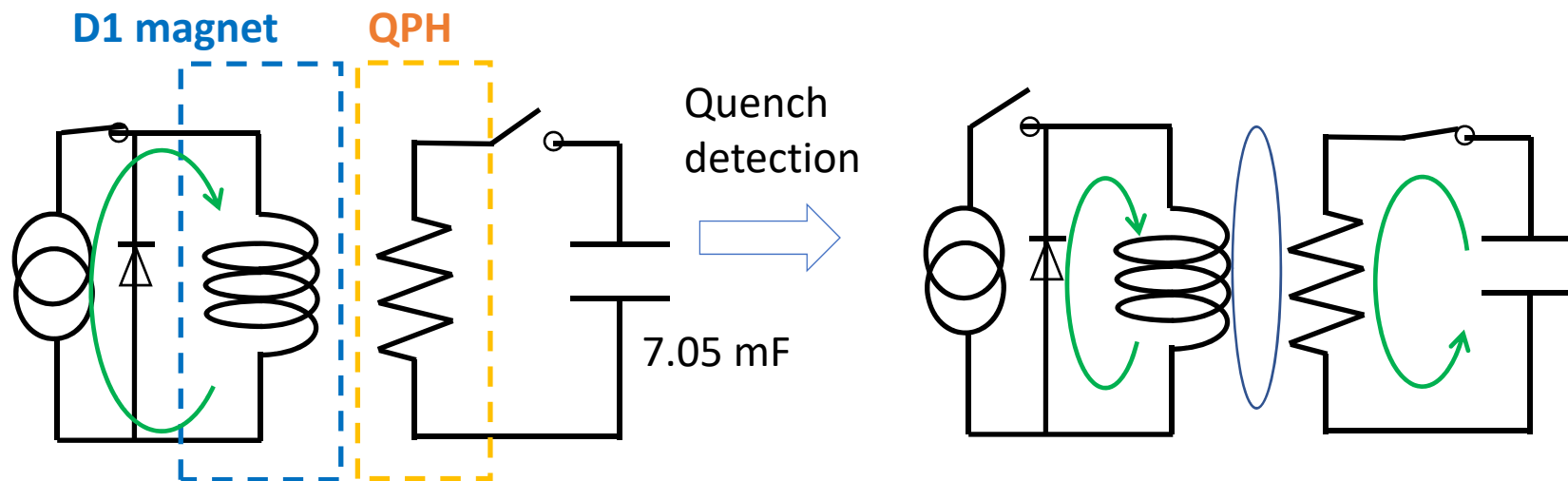
- モデル1号機の試験結果
- 定格電流値(12 kA)では20 - 50 ms要する



クエンチ保護の流れ

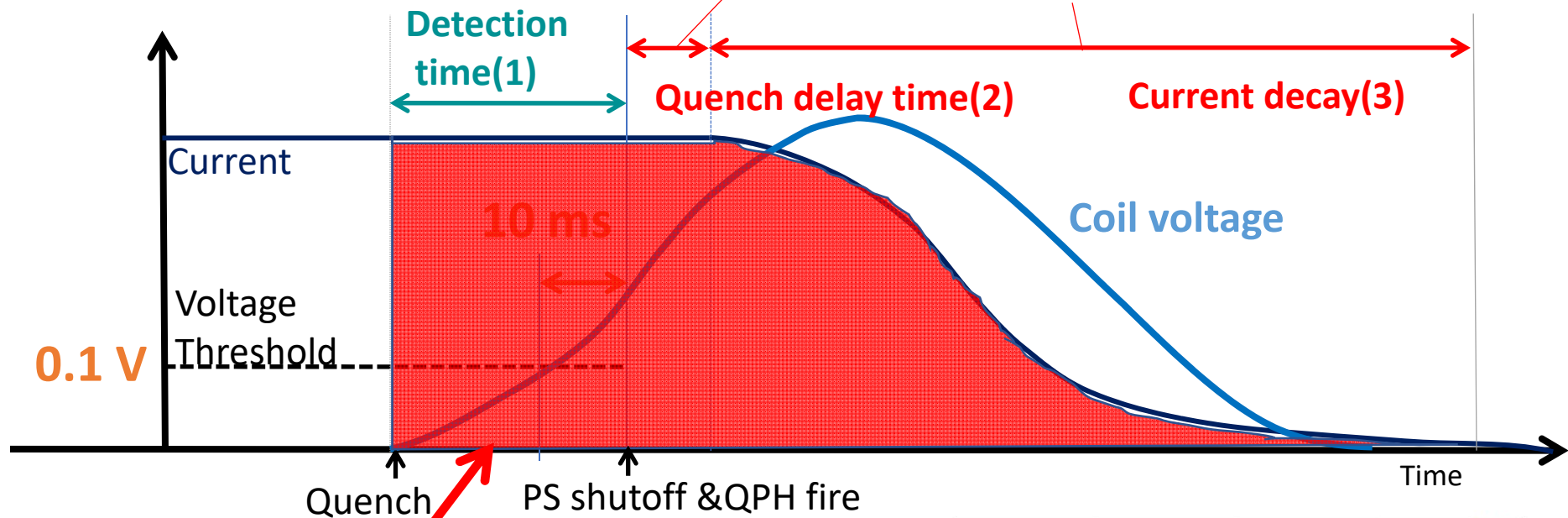


クエンチと断定された後、電源遮断とともにヒーターをON



クエンチ保護の流れ

ヒーターの性能で決まる



$$MIITs = \int_{t_0}^{\infty} I^2(t) dt = A^2 \int_{T_{He}}^{T_{max}} \frac{S(T)}{\rho E(T, B, RRR)} dT$$

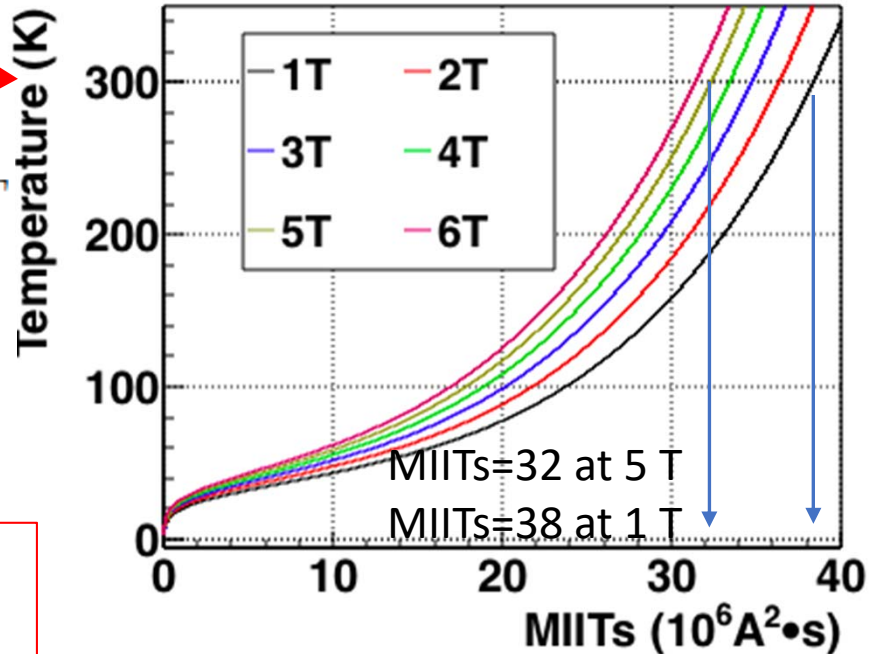
A: Conductor area

S: Volumetric heat capacity of conductor

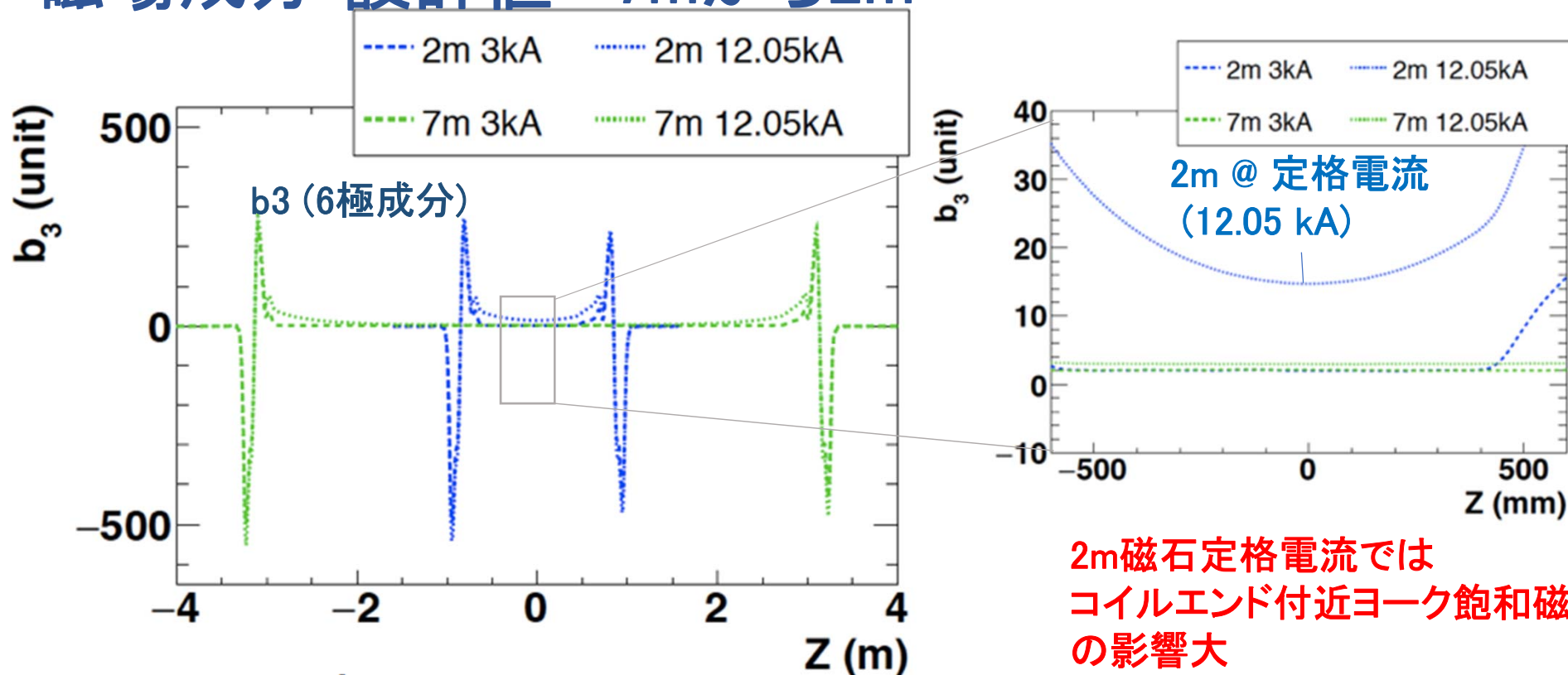
ρ_E : Electric resistivity of conductor

RRR : residual resistive ratio

保護に課される条件：
コイル最大温度 $T_{max} < 300$ K



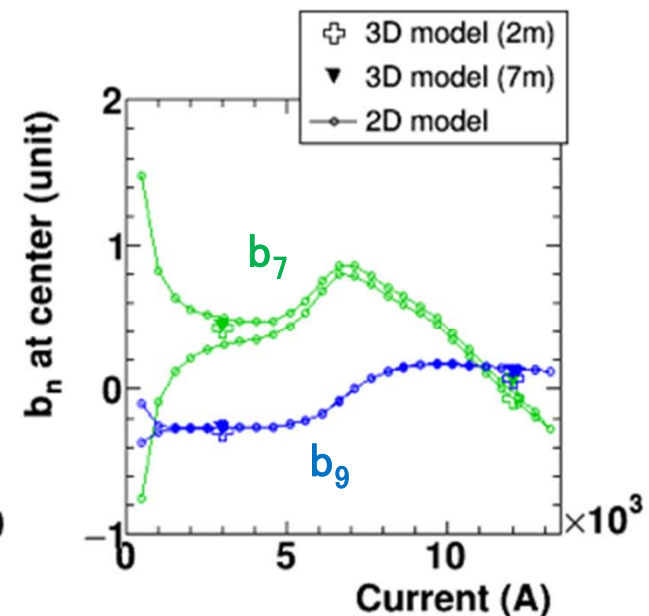
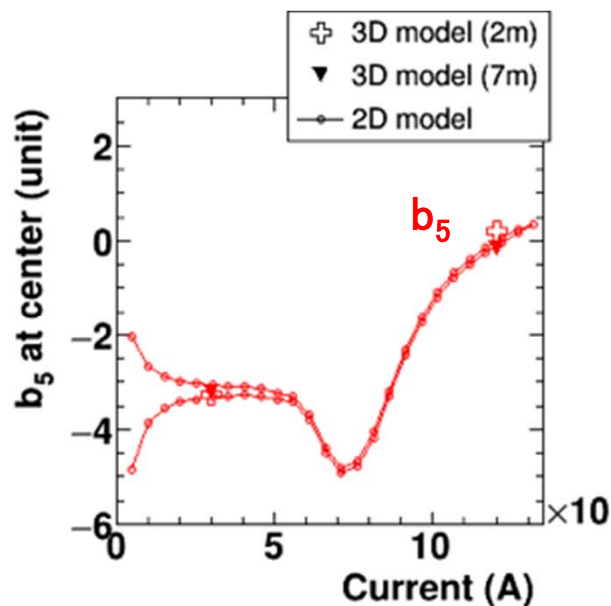
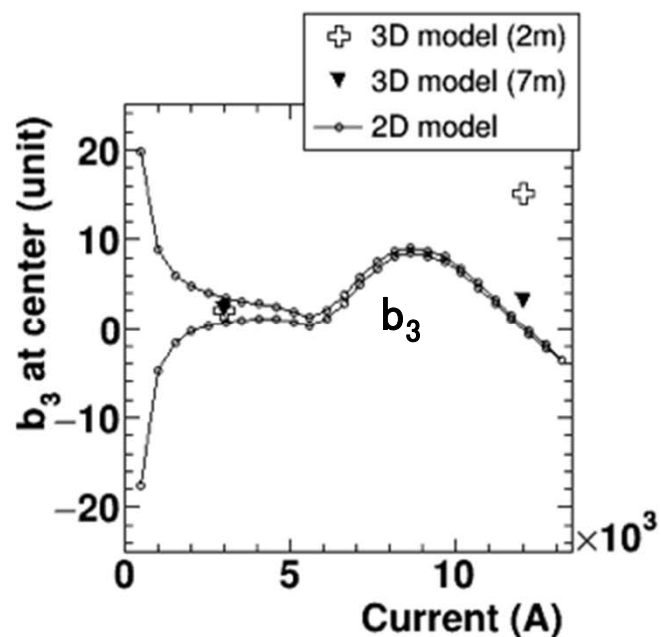
磁場成分 設計値 -7mから2mへ-



$$\bar{b}_n(I = 12.05 \text{ kA}) = \frac{\int B_n(z, I = 12.05 \text{ kA}) dz}{\int B_1(z, I = 12.05 \text{ kA}) dz} \times 10^4$$

積分磁場@定格電流		\bar{B}_1 (T · m)	\bar{b}_3 (unit)	\bar{b}_5 (unit)	\bar{b}_7 (unit)	\bar{b}_9 (unit)
要求値 (7m)	Lower	35	-2.90	-1.50	-0.66	-0.26
	Upper		2.90	1.50	0.66	0.26
設計値	7m	34.986	0.98	0.02	-0.33	-0.37
	2m	9.459	-9.85	0.28	-1.34	-1.59

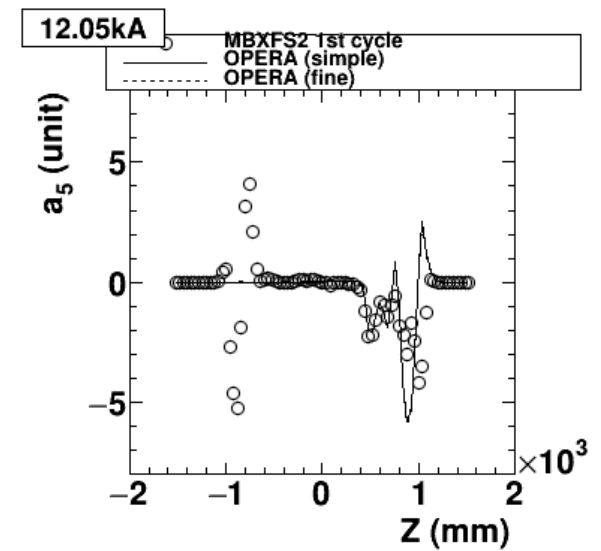
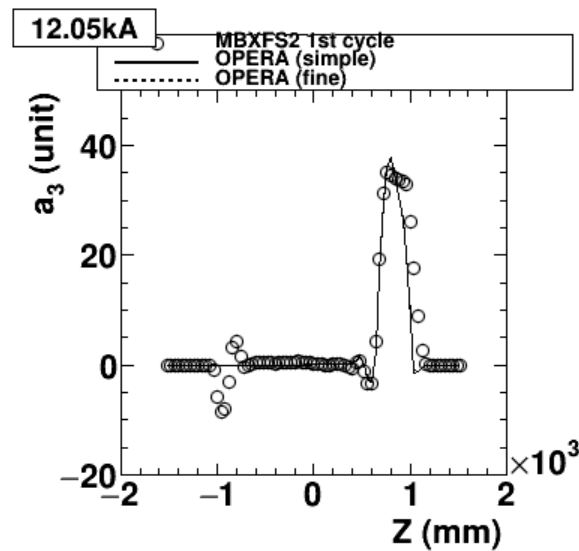
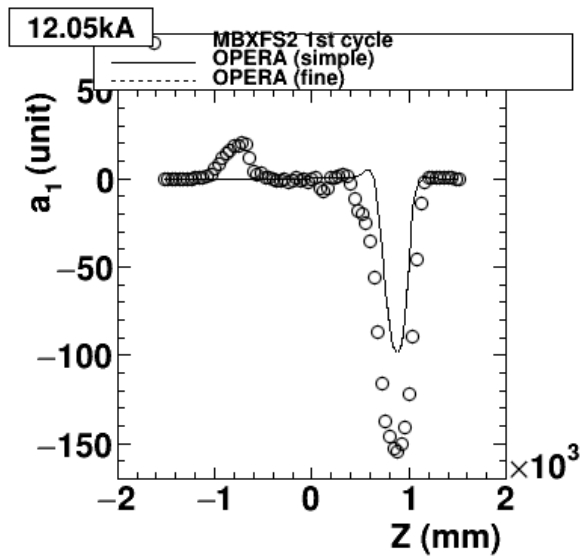
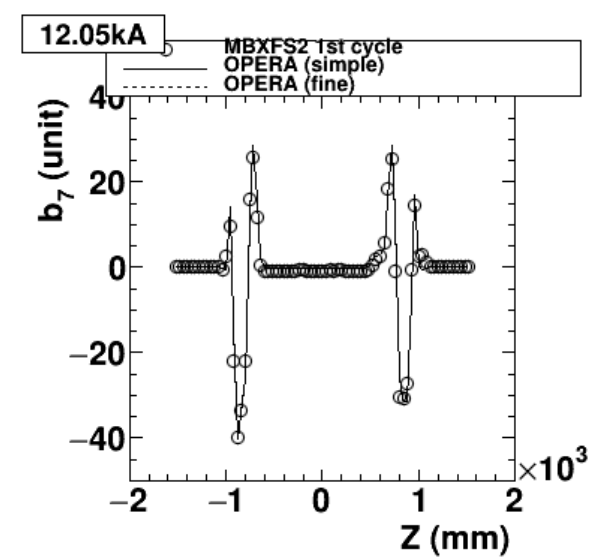
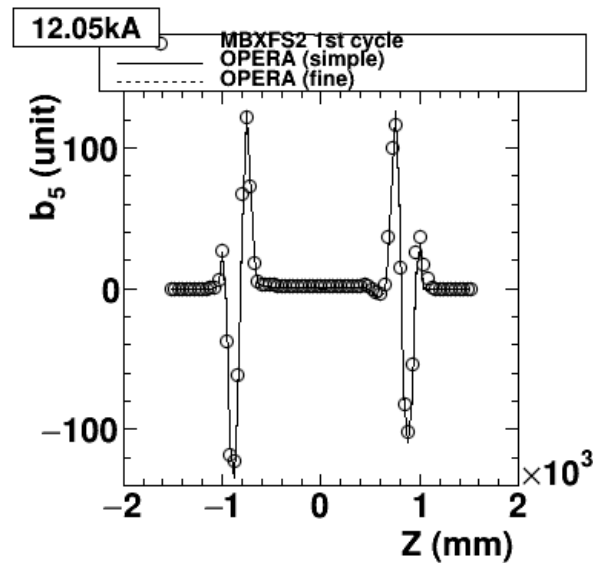
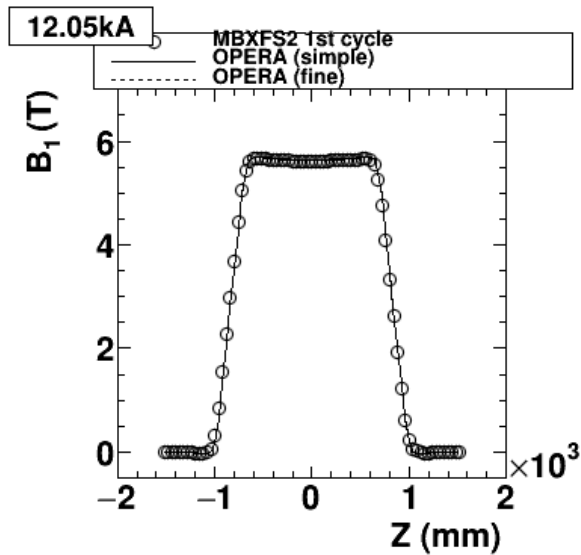
磁場成分 設計値



積分磁場: $\bar{b}_n(I = 12.05 \text{ kA}) = \frac{\int B_n(z, I = 12.05 \text{ kA}) dz}{\int B_1(z, I = 12.05 \text{ kA}) dz} \times 10^4$

実機 (7m) 積分磁場		\bar{B}_1 (T · m)	\bar{b}_3 (unit)	\bar{b}_5 (unit)	\bar{b}_7 (unit)	\bar{b}_9 (unit)
要求値	Lower	35	-2.90	-1.50	-0.66	-0.26
	Upper		2.90	1.50	0.66	0.26
設計値		34.986	0.98	0.02	-0.33	-0.37

磁場成分結果



積分磁場

	Nominal ramp up (12.047kA)			Integral
	Head CS	Straight part	Head NCS	
B1 (Tm)	1.732	6.225	1.835	9.535
b2	1.03	-2.52	1.18	-0.31
b3	-9.74	24.81	-14.11	0.95
b4	-0.63	-0.4	0.02	-1
b5	2.62	1.09	-0.4	3.3
b6	0.06	0.13	0.22	0.41
b7	-0.39	-0.5	-1.25	-2.14
b8	0.26	-0.15	0.29	0.4
b9	-0.5	0.28	-0.98	-1.19
b10	0.13	-0.05	0.14	0.21
b11	-0.29	0.06	-0.37	0.6
a2	-3.66	0.16	-1.05	-4.55
a3	7.3	0.15	-0.45	7.01
a4	-0.01	0.16	-0.3	-0.14
a5	-0.66	0.15	-0.02	-0.82
a6	-0.12	0.09	-0.02	-0.05
a7	0.42	0.02	-0.04	0.4
a8	0.02	0.07	0.05	0.14
a9	-0.04	-0.05	-0.06	-0.15
a10	0.01	0.01	0.01	0.03
a11	0.03	0.02	0.01	0.06

コイル断面

