

J-PARCニュートリノビームライン用 超伝導電磁石システム(7)

— プロトタイプ機及び実証機の4.2K励磁試験結果 —

高エネ研^A, 総研大^B, 東芝^C

佐々木憲一^A, 中本建志^A, 木村誠宏^A, 安島泰雄^A, 荻津透^A, 東憲男^A, 飯田真久^A, 大畠洋克^A, 岡村崇弘^A, 尾花哲浩^B, 折笠朝文^C, 菅原繁勝^A, 田中賢一^A, 寺島昭男^A, 都丸隆行^A, 榎田康博^A, 山本明^A

発表内容

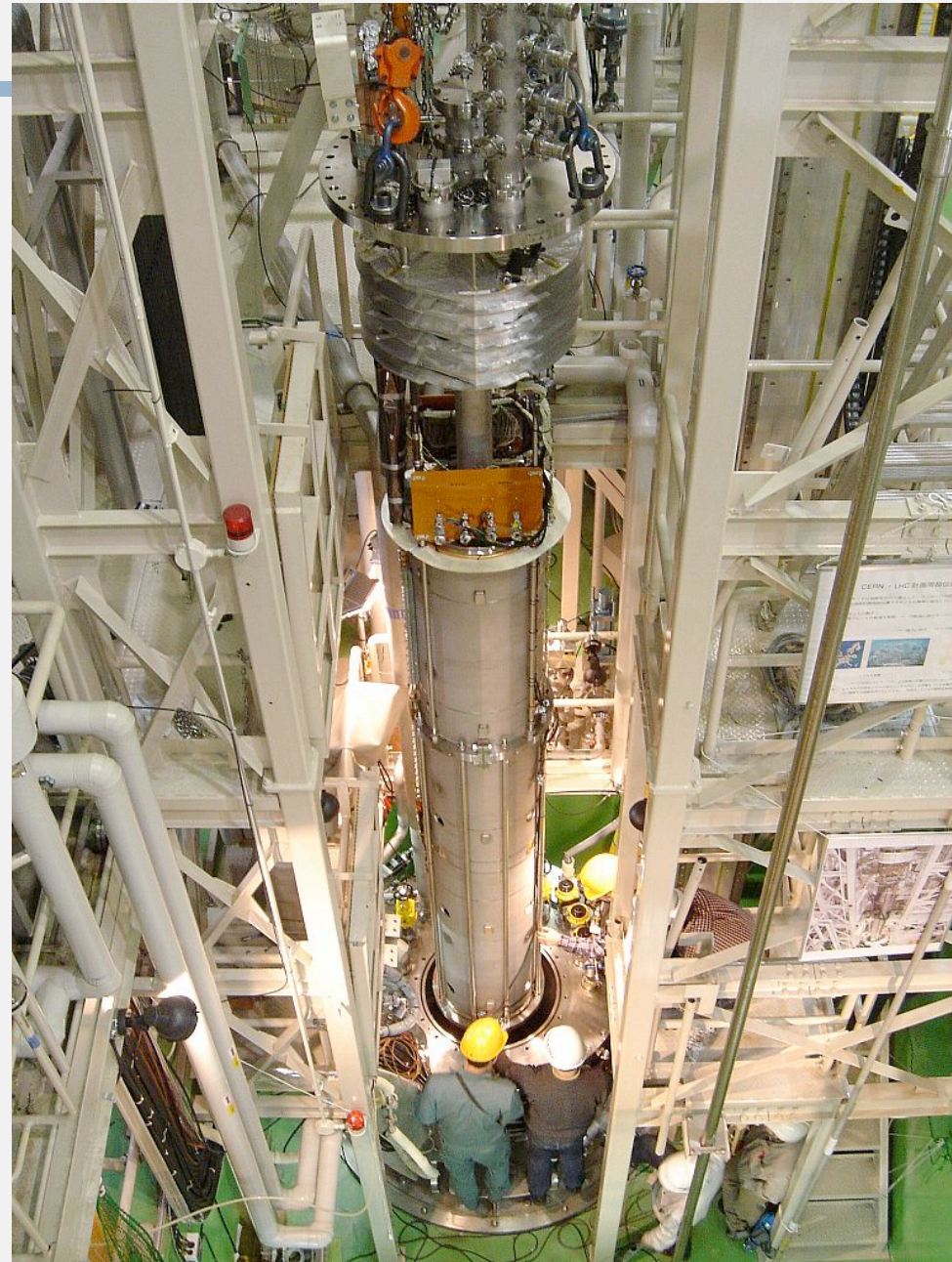
- プロト冷却試験結果
 - 励磁試験
 - 磁場測定
 - クエンチ試験
- 保護システムに関する考察
- 実証機冷却試験結果
- まとめ

プロトタイプマグネット 冷却試験

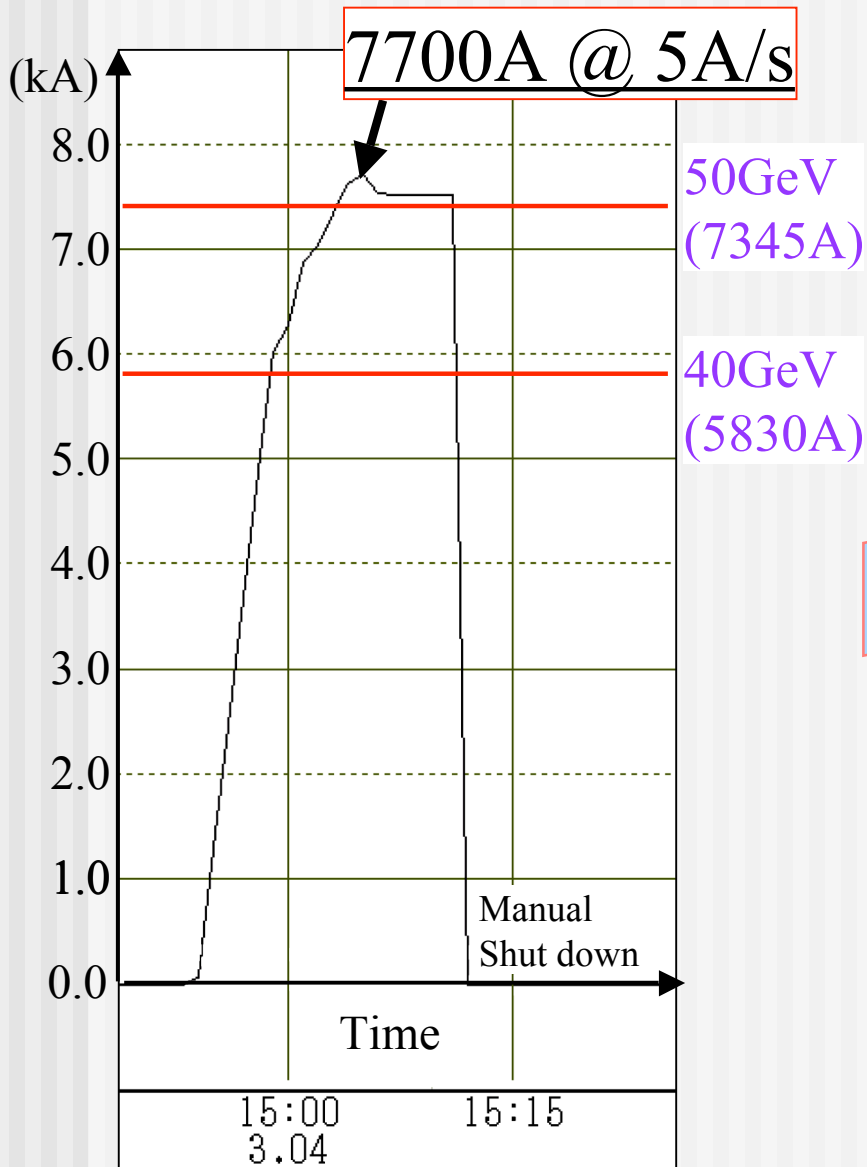
- 2極・4極複合磁場型超伝導マグネット
 - プロトタイプ:
 - 設計・製作方法の確認を目的として、KEKが製作した最初の超伝導電磁石
- マグネット性能の検証
 - 励磁試験
 - 高速励磁
 - 磁場測定
 - ローテータィングコイル、積分器
 - ヒータークエンチ試験
 - 電圧タップ、クエンチヒータ

実験装置

- 縦型クライオスタット
- 液体ヘリウム4.2K冷却
- プロトタイプ磁石冷却試験
 - 1回目:3月
 - 室温まで昇温
 - 2回目:4月

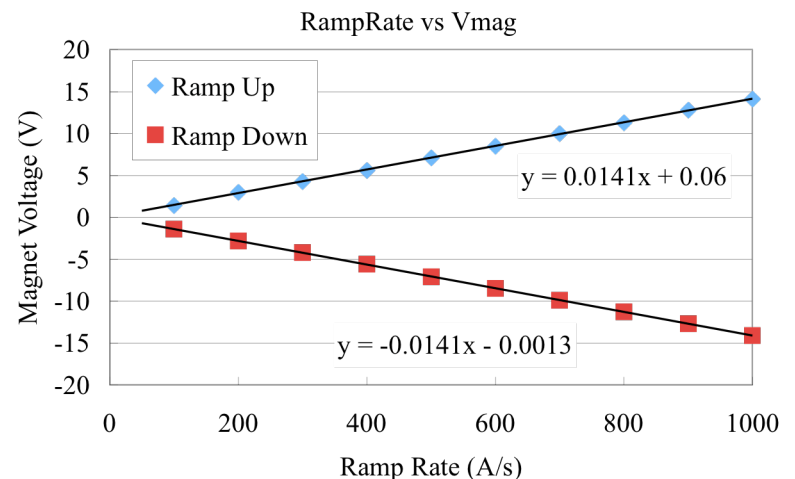


励磁試験結果



- 7700 A @ 5 A/s
トレーニング無
- 高速励磁
 - 1000 A/s : クエンチ無
- インダクタンス測定
 - 14.1mH

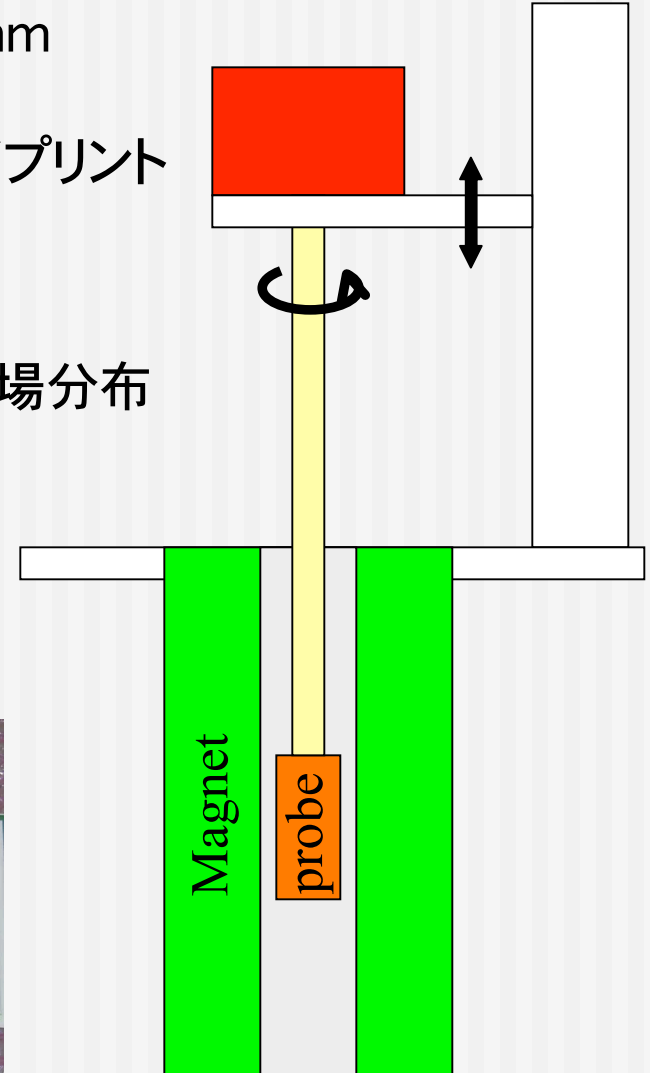
再冷却試験でも同様の結果



磁場測定

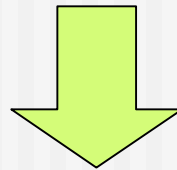


- ローテーティングコイル
 - 500mm×100mm
 - 基板上に radial coil×5がプリント
 - 20ターン
- 磁石長手方向の磁場分布を測定



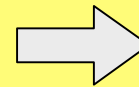
磁場解析について

- 電磁石の構造中心を基準として多極成分展開
- 縦型クライオ
 - 磁石の構造中心と測定コイル中心位置のズレを測定する事は困難



今回の測定において

4極skew成分の直線部における
平均値



0

角度方向のみ補正

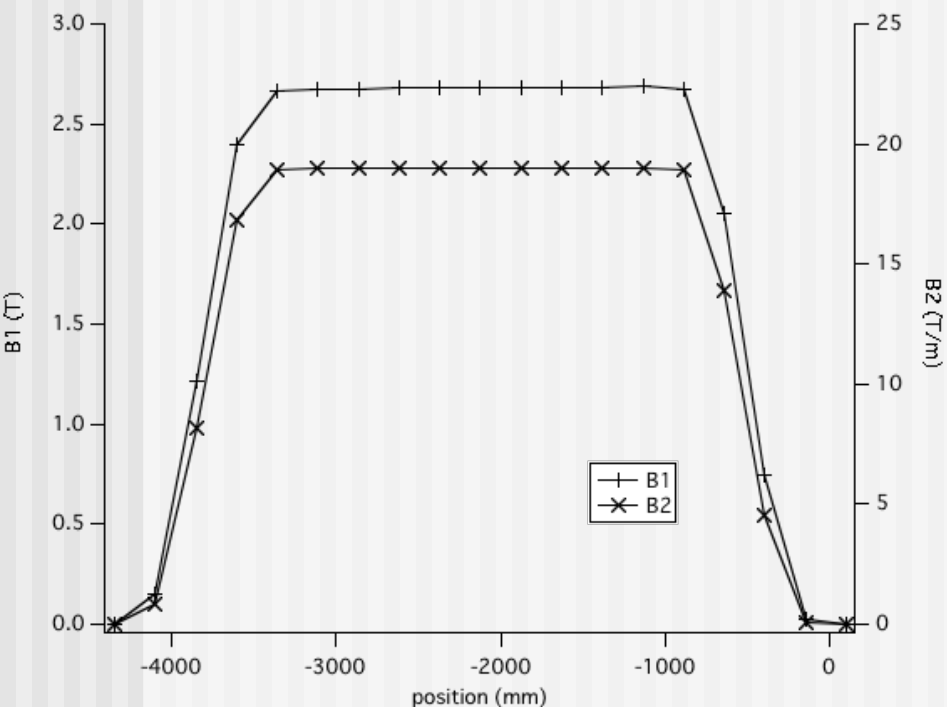
仮定: コイル中心と磁石中心は一致

2極・4極の磁場強度 @ 50&40GeV

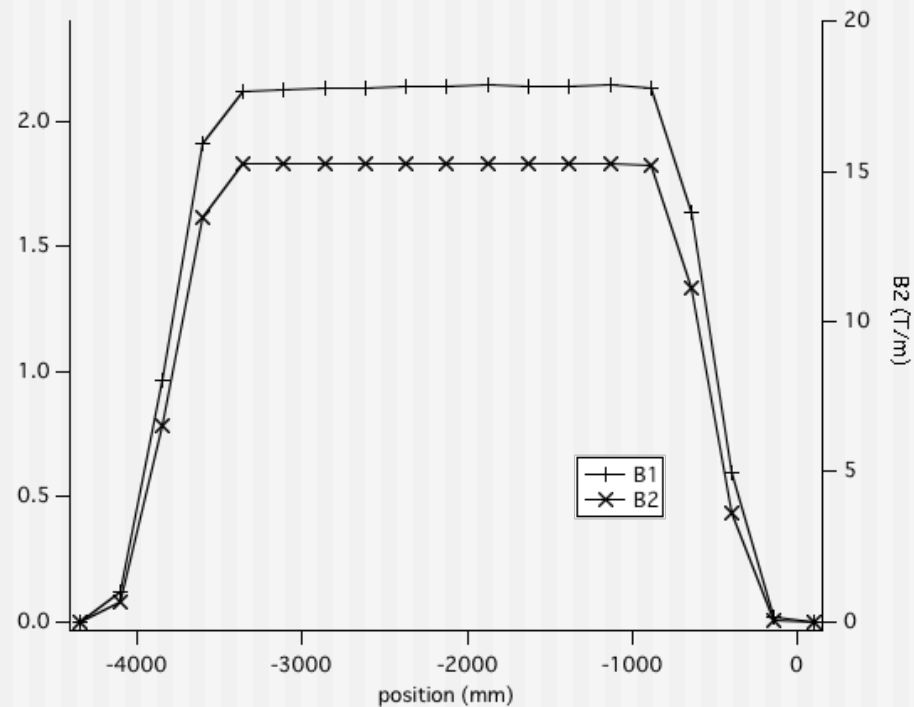
直線部平均

	Measured	Computed
電流(A)	7460(7345)	7345
B1 (T)	~2.68 (~2.64)	2.587
B2(T/m)	~19.0 (~18.7)	18.71

	Measured	Computed
電流(A)	5921(5830)	5830
B1 (T)	~2.14 (~2.11)	2.069
B2(T/m)	~15.2 (~15.0)	15.06



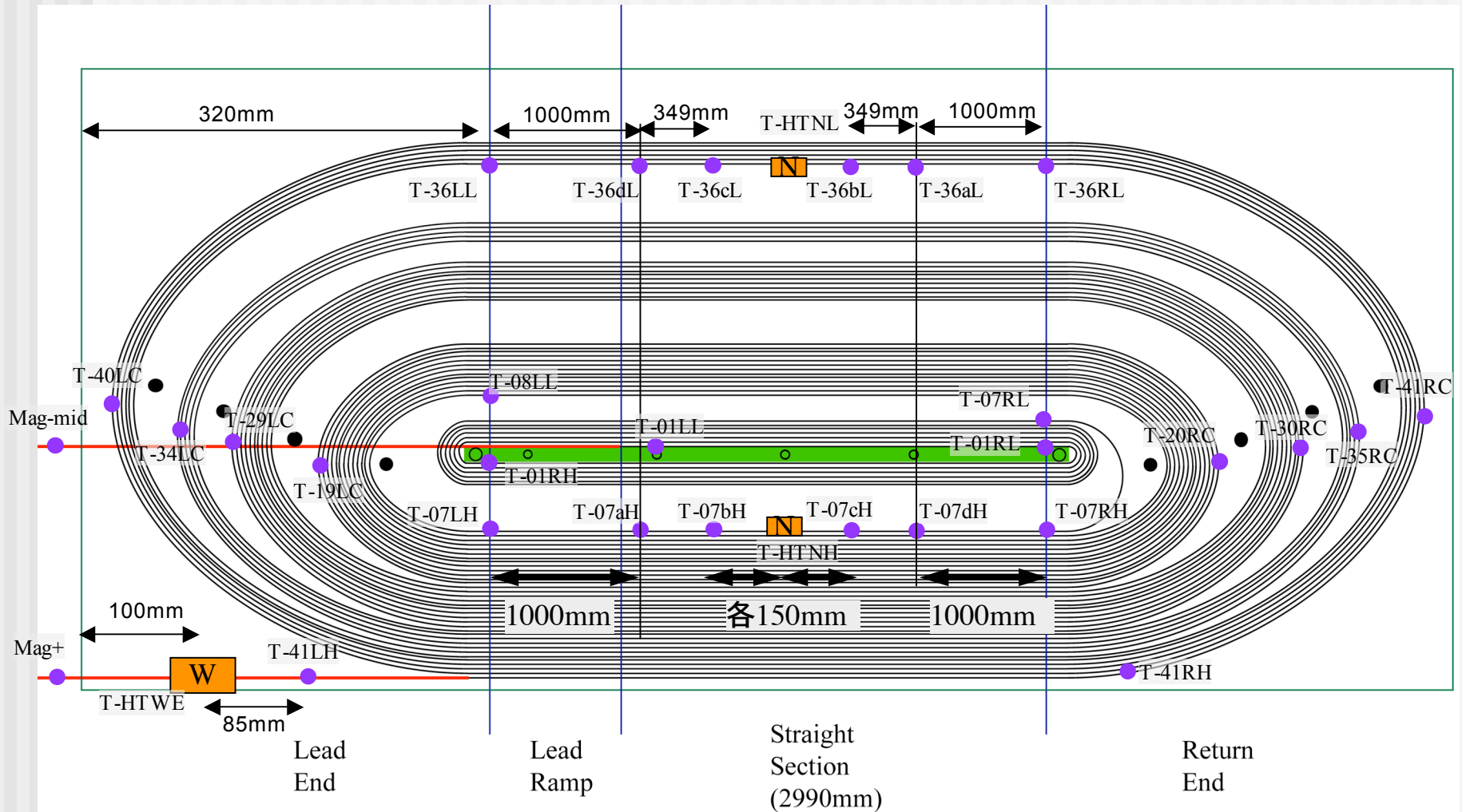
50GeV



40GeV

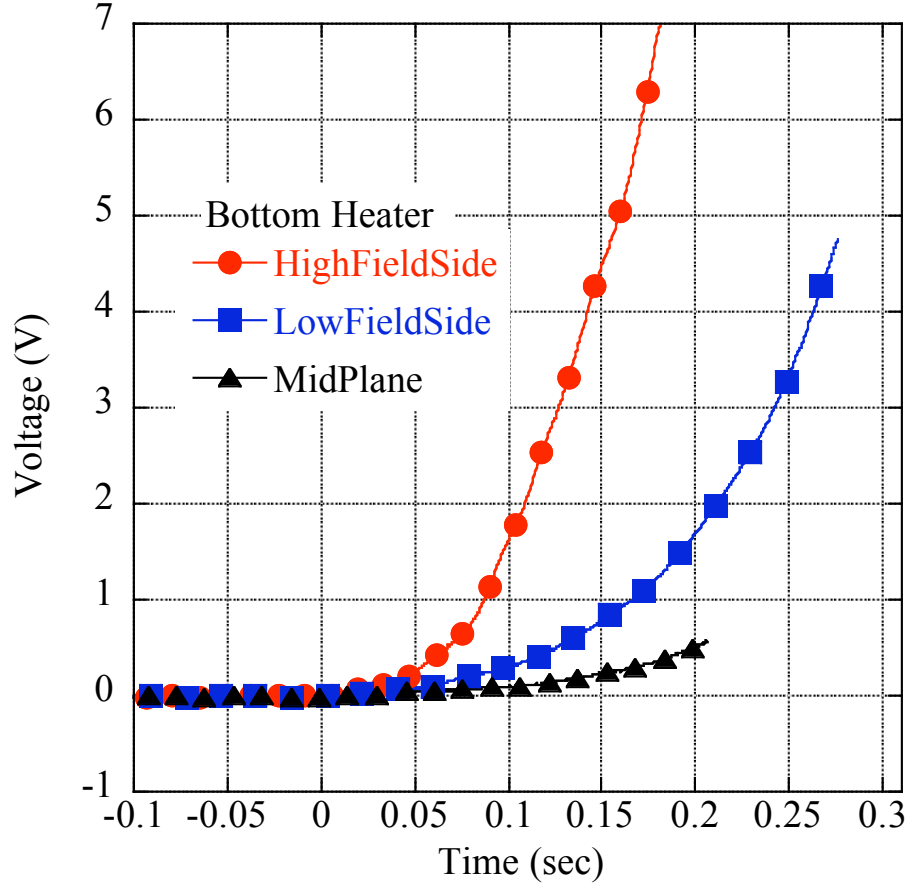
Vtap & Heater 位置 (Top Coil)

● Vtap MINCO Heater (W: Eff.Area = 9×32mm, N: Eff.Area = 2×32mm)



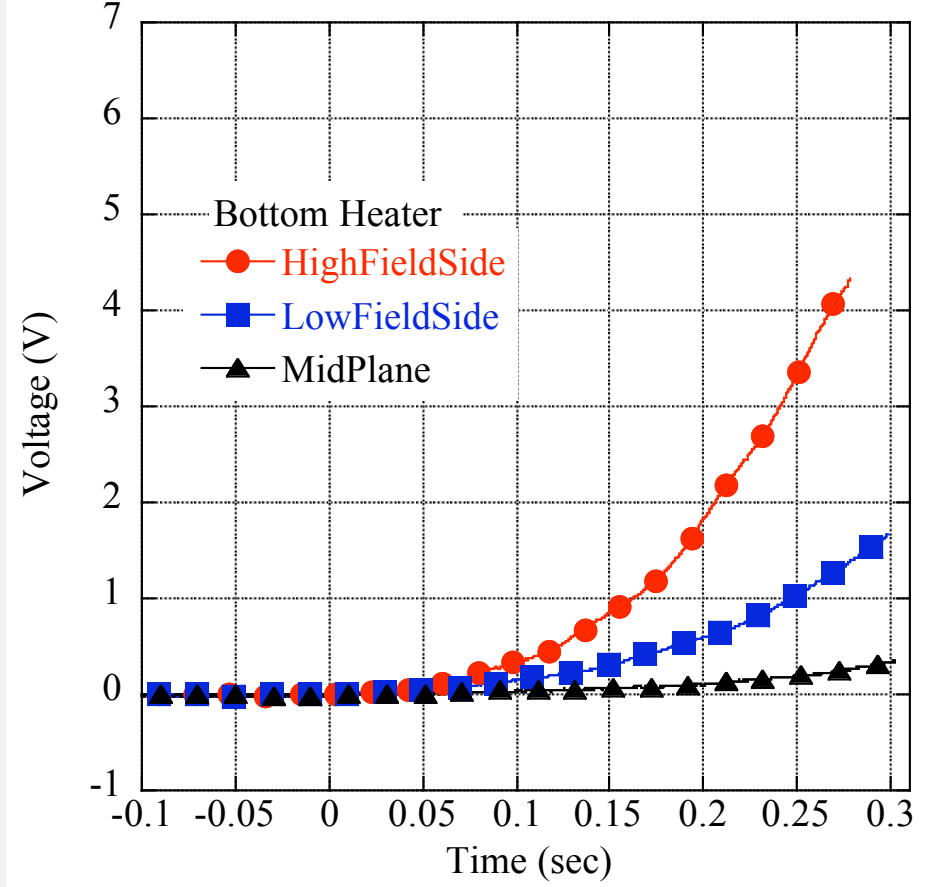
ヒータークエンチ試験結果 ~ 電圧上昇 ~

50GeV, Resistive Voltage



50GeV

40GeV, Resistive Voltage

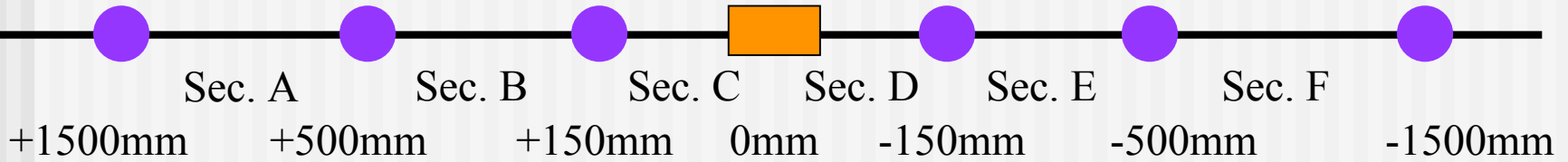


40GeV

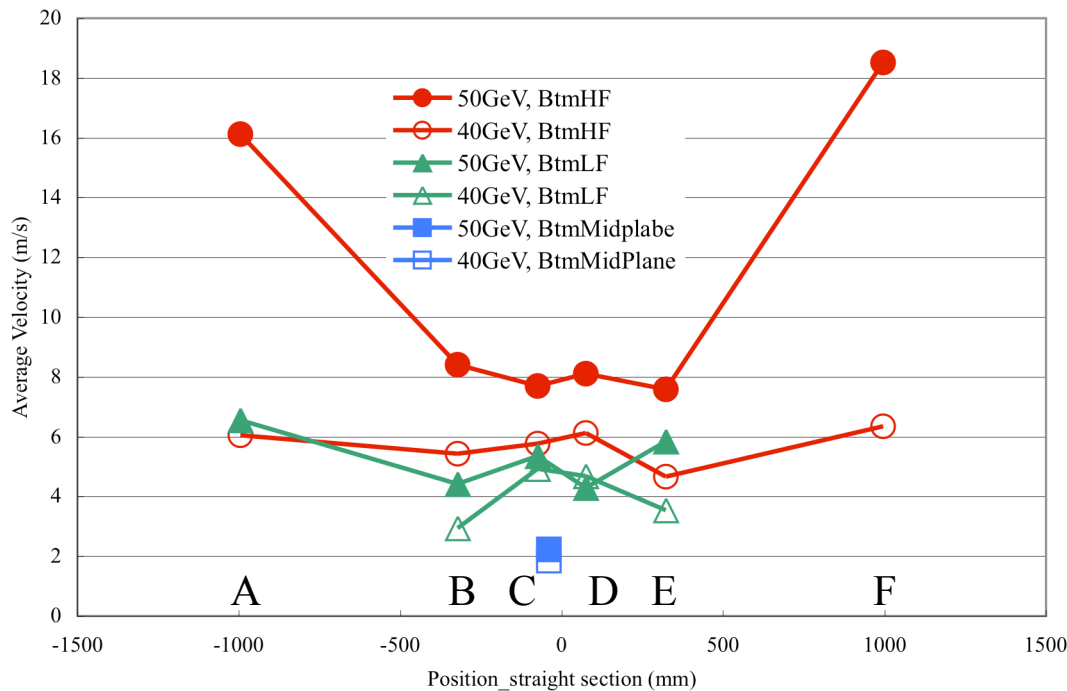
ヒータークエンチ試験結果 ~ 常伝導伝播速度~

⇒ Current

Heater



Quench Propagation Velocity #1



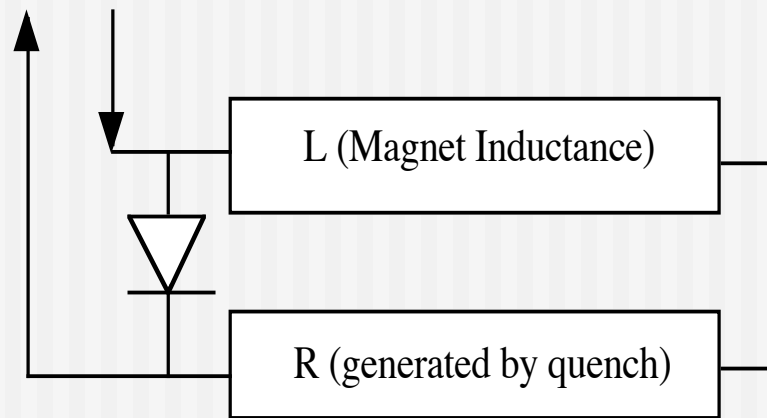
ターン間伝播速度

	HF	LF
50GeV	0.029 m/s	0.020 m/s
40GeV	0.020 m/s	0.018 m/s

■ 伝播速度
→ 非常に遅い

保護システムに関する考察

- コールドダイオードによる保護
 - 4.2K付近でのオン電圧:6V
 - 磁石電圧が6Vを超える
→ 電流がダイオードへ分流



From test results,

伝播速度が遅い → ダイオードへの分流開始が遅れる

ピーク温度が初期の想定より高くなってしまいう可能性



数値計算

- 数値計算条件
 - 断熱
 - 上下コイル間及びGFRPウェッジ部分：熱的に絶縁
 - コールドダイオード：磁石と並列に接続

$$A \frac{d}{dx} \left(k(T) \frac{dT}{dx} \right) + gA = AC_p(T) \frac{dT}{dt}$$

A : the overall cross section

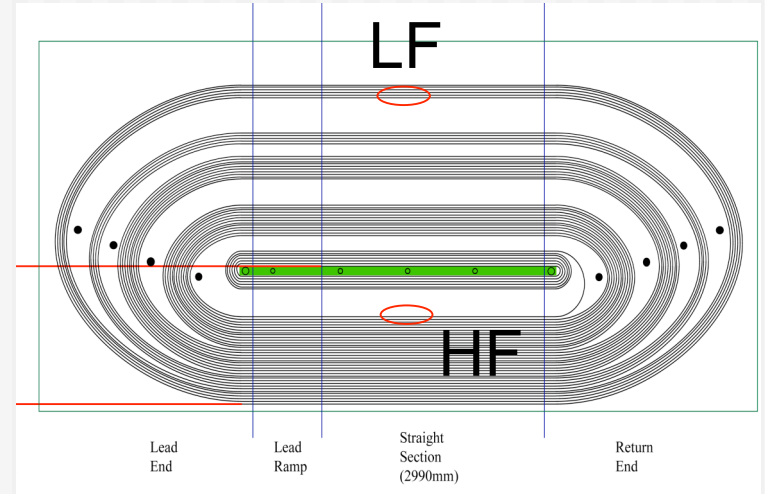
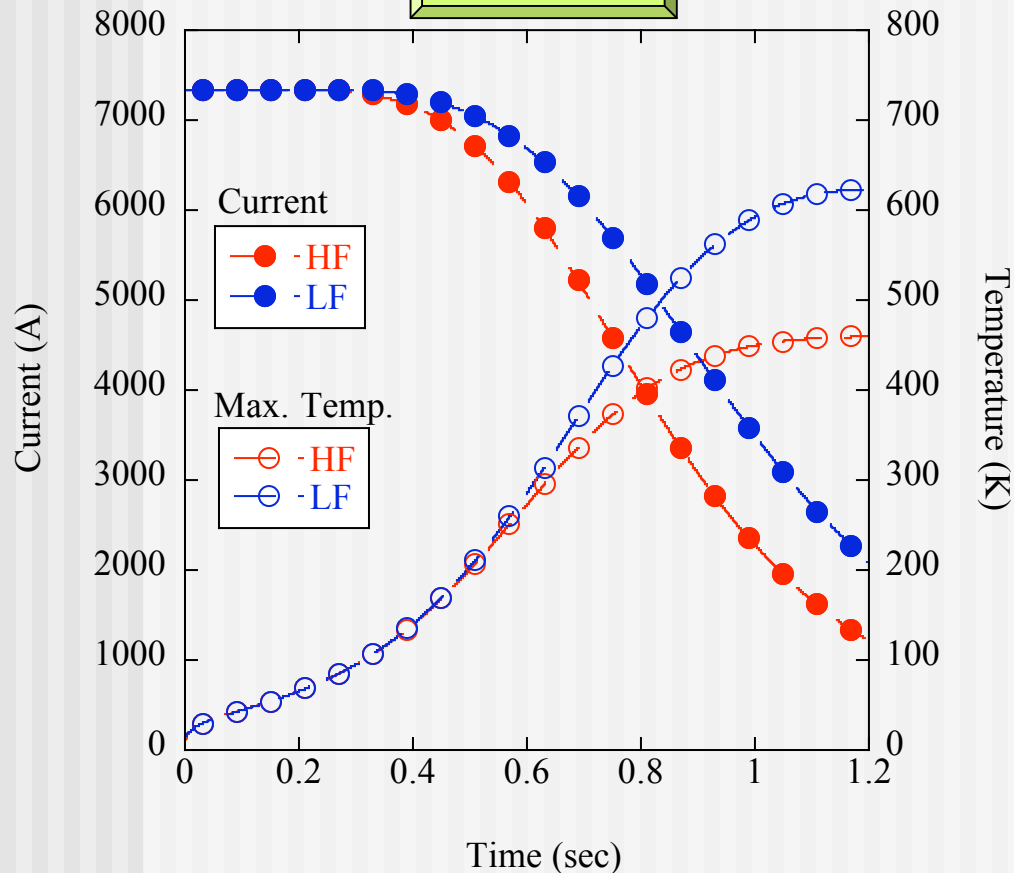
$K(T)$: thermal conductivity of conductor

g : Joule heating in conductor

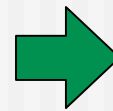
$C_p(T)$: volumetric specific heat of conductor

数値計算結果 ~ 電流減衰・ピーク温度 ~

50GeV



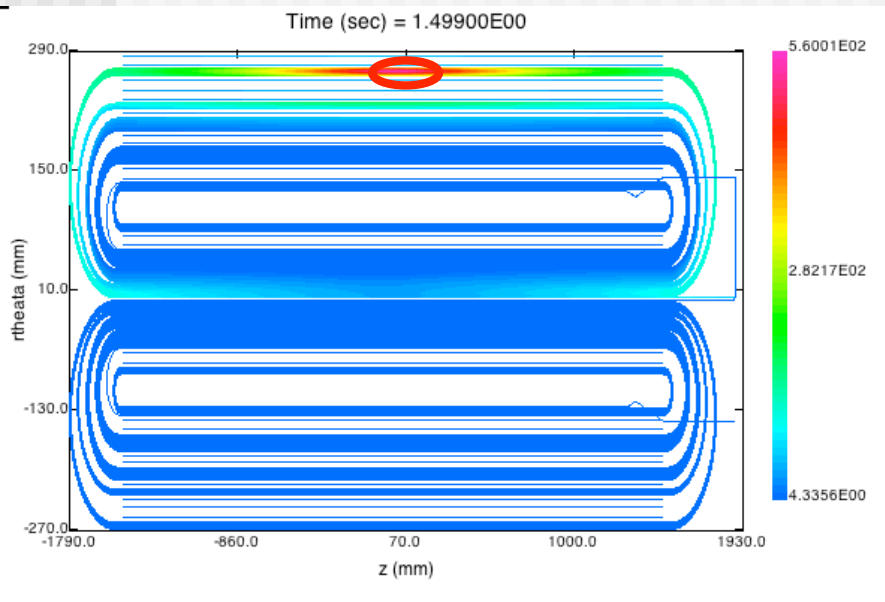
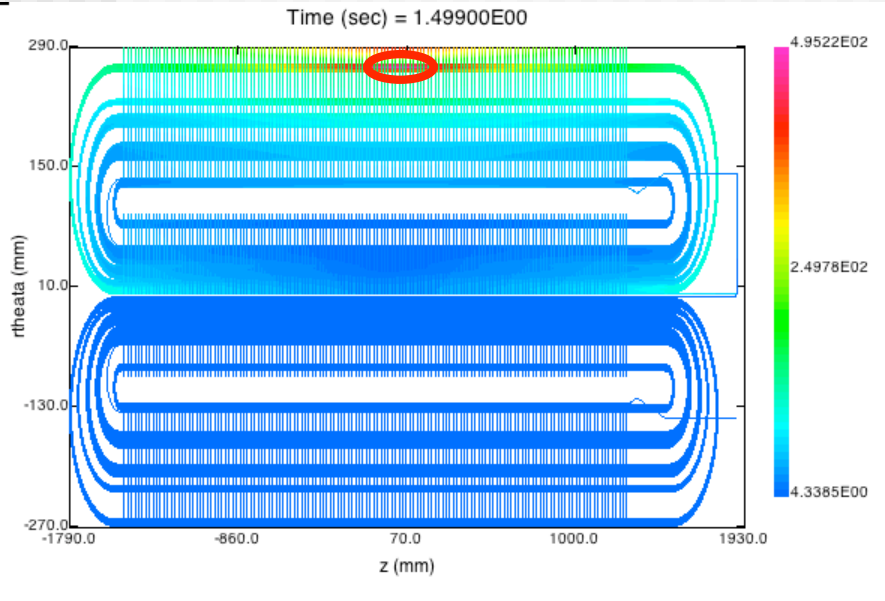
■ コールドダイオードのみでは保護できない



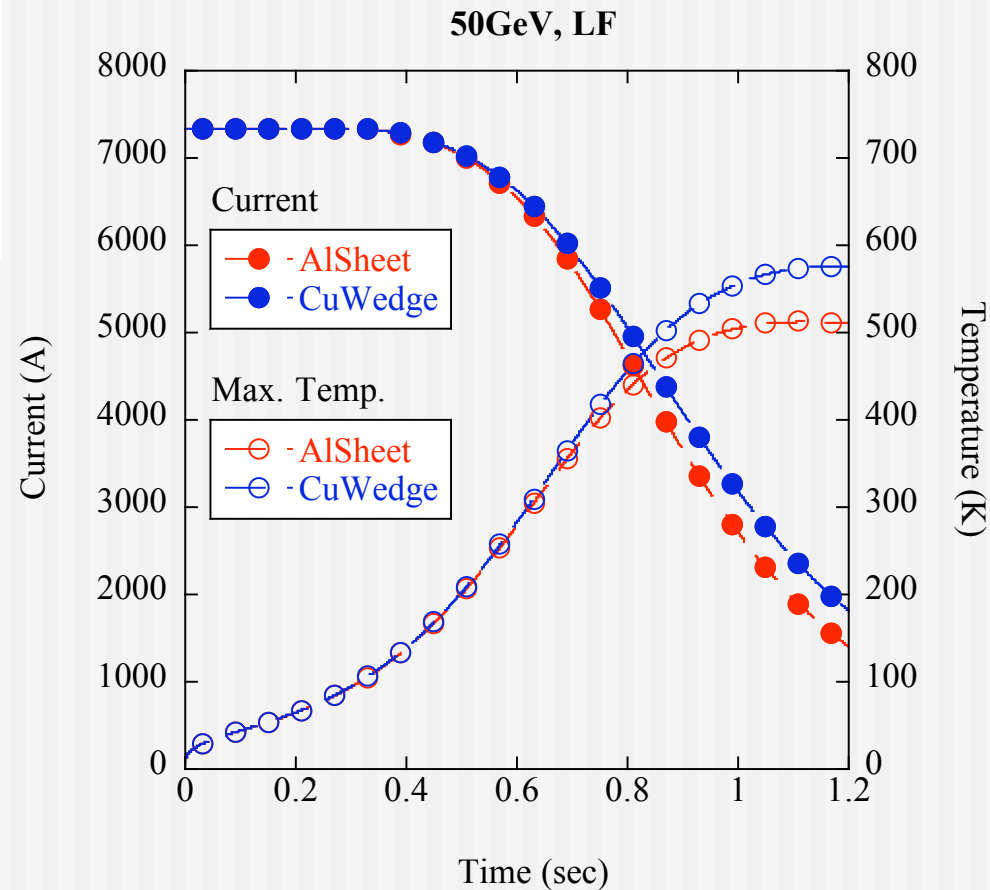
■ 保護方法

- アルミシート
- 銅ウェッジ
- 保護ヒーター

アルミシート・銅ウェッジの場合

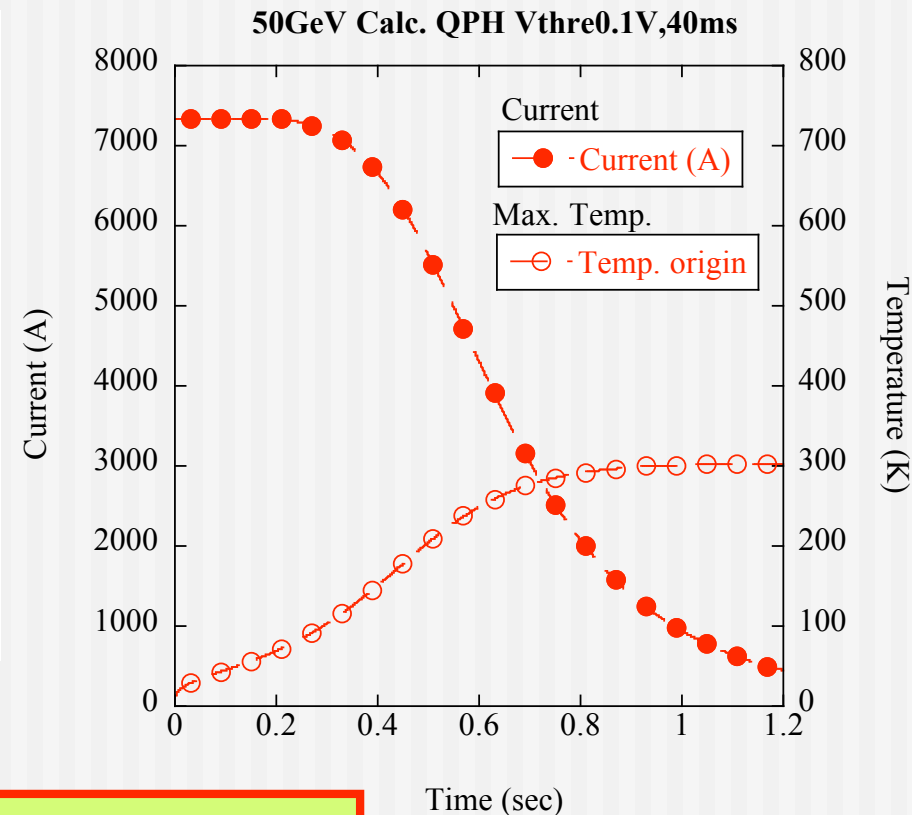
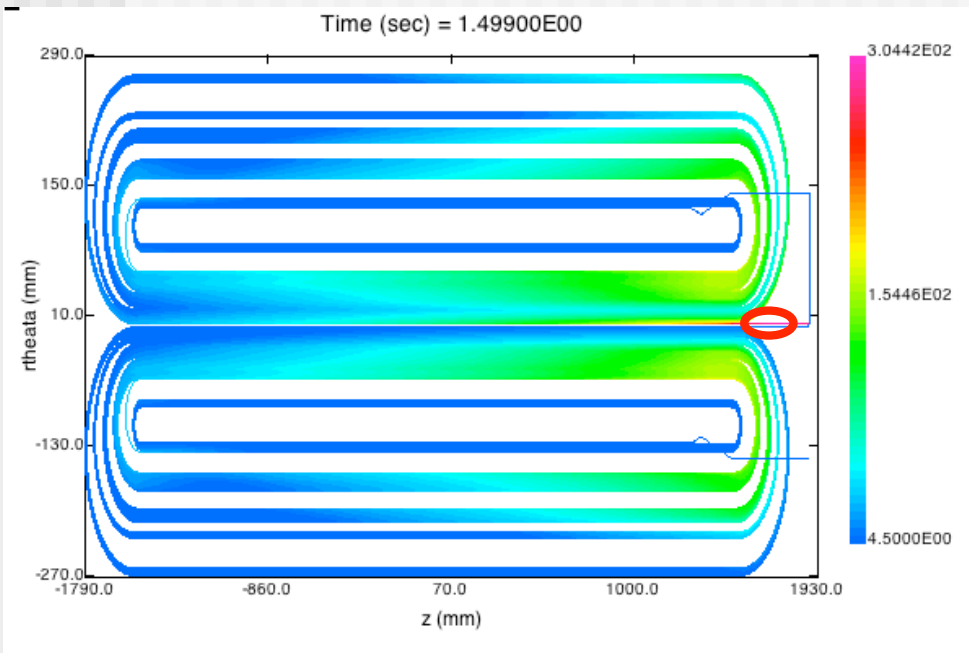


- アルミシート
 - t0.1mm; RRR : 2000
- 銅ウェッジ
 - RRR200



クエンチ保護ヒーターの場合

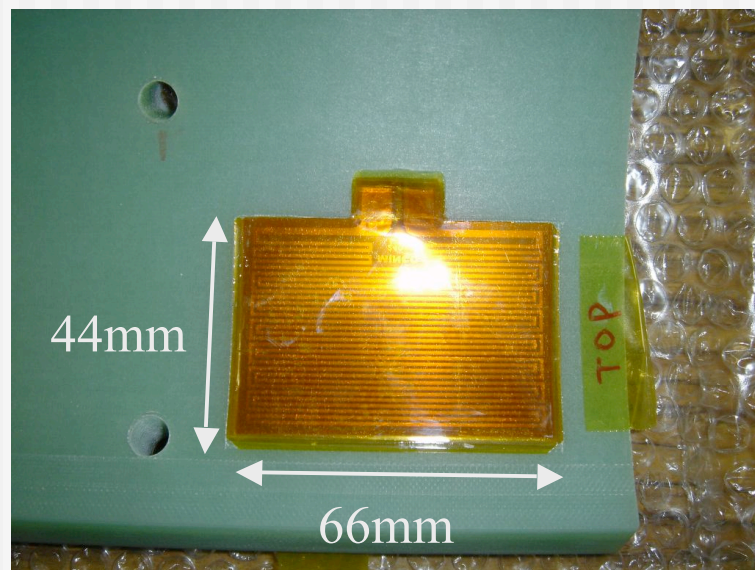
- Heater size : width 60 mm × height 61 mm
 - 高磁場側直線部
 - クエンチ検出・しきい値 : 0.1V, 40ms



保護ヒーターの採用

実証機 冷却試験

- メーカーによる製作技術の確立
- クエンチ保護ヒーターに関するデータ収集
- 磁石性能の検証
 - 励磁試験
 - 磁場測定
 - ヒータークエンチ試験
 - 保護ヒータ×2

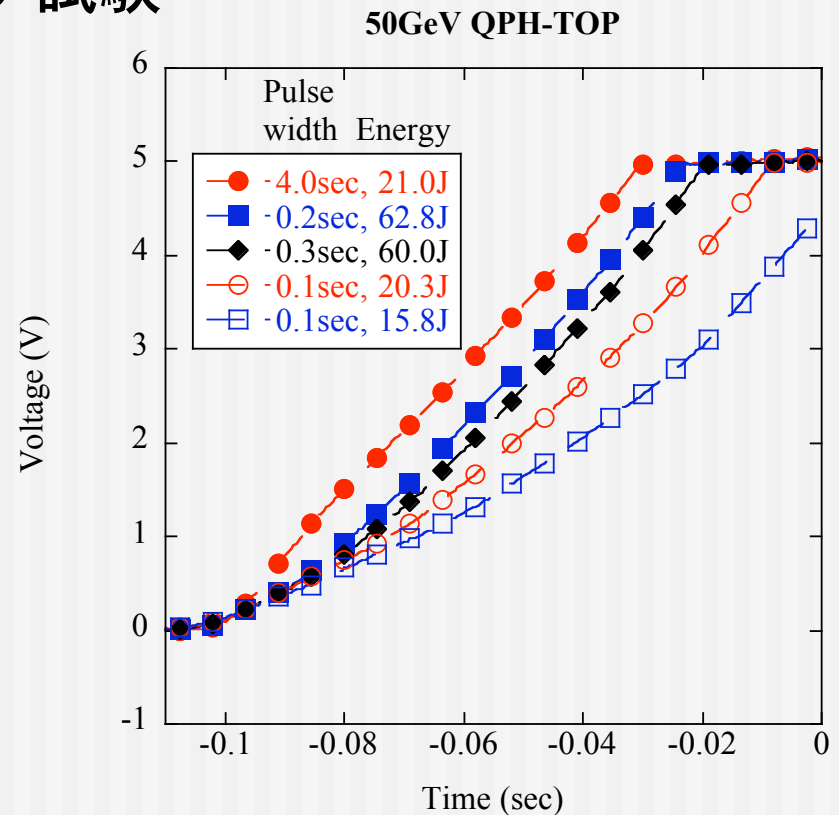


現在試験中

実証機冷却試験・結果

- 励磁試験
 - トレーニング無しで7700Aまで到達
- 保護ヒーターによるクエンチ試験

- ヒーターパルス条件を変え、適切なヒーターエネルギーを模索中



まとめ ～プロト試験結果・保護システム

- 励磁試験
 - トレーニング無しで7700Aまで到達
- 磁場測定
 - 設計値との大幅なズレは見られなかった
- クエンチ試験
 - 遅い伝播速度 → 保護システムの見直し
- 数値計算による保護システムの検討
 - アルミシート
 - 銅ウェッジ
 - 保護ヒータ } ⇒ 保護ヒータの採用

まとめ ～実証機試験結果

- 実証機・冷却試験
 - 励磁試験 → 7700A(トレーニング無)
 - ヒータークエンチ試験
 - 必要エネルギーを測定中
 - 磁場測定
 - ……測定中……

今年度試験予定

- 実証機第2回冷却試験(今月中)
 - プロトタイプ再試験(9月)
 - 保護ヒーターシステムの確立
 - 試験結果を数値計算へ反映
 - 実機2台
 - 横型クライオスタット試験
- } ⇒ 年度末