

# COMET実験におけるパイ オン捕獲ソレノイドの開発

九州大学工学府 量子線物理計測グループ

博士後期課程2年 楊 叶

- 東京大学素粒子物理国際研究センターシンポジウム@白馬

# Contents

---

- 背景
- パイオン捕獲磁石システム
- 放射線劣化
- まとめ

# Introduction

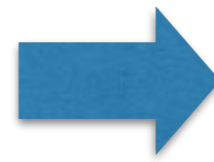


- ミューオン電子転換過程の分岐比：
  - 標準模型： $O(10^{-54})$
  - 標準模型を超える理論： $O(10^{-15})$
- ミューオン電子転換過程の発見は新しい物理の証拠となる
- COMET実験：
  - $\mu^- + (A, Z) \rightarrow e + (A, Z)$
  - 目指す実験感度： $< 6 \times 10^{-17}$

目標感度： $< 6 \times 10^{-17}$

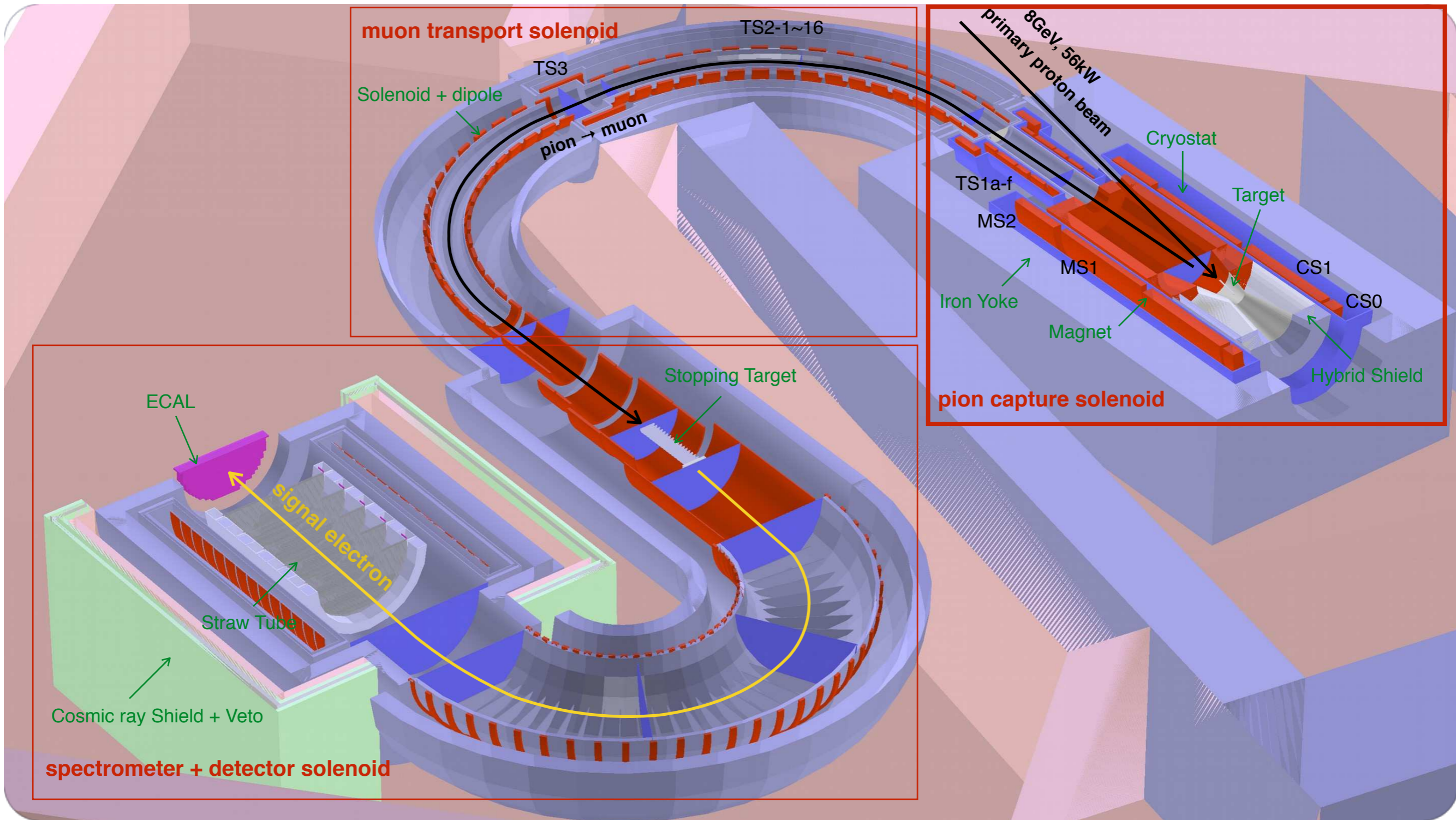


要求されるミューオン量： **$> 10^{11} \mu/\text{sec}$**   
(現世界最大強度ミューオンビーム： $10^8 \mu/\text{sec}$ )



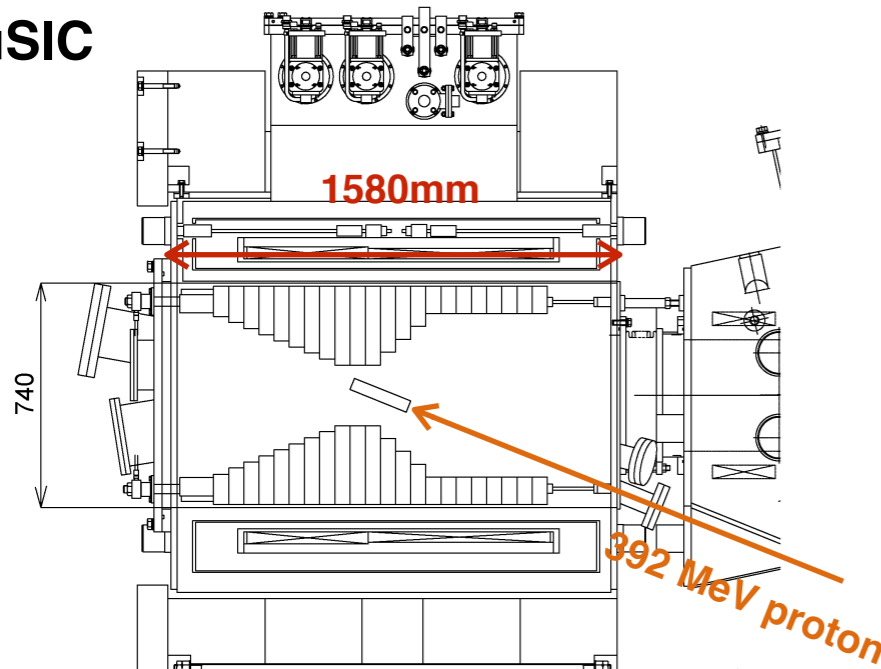
大強度ミューオンビームラインの開発が必要となる  
(現在、COMET実験のため、J-PARCで超伝導磁石を用いた大強度ミューオンビームラインを建設中である)

# COMET ミューオンビームライン



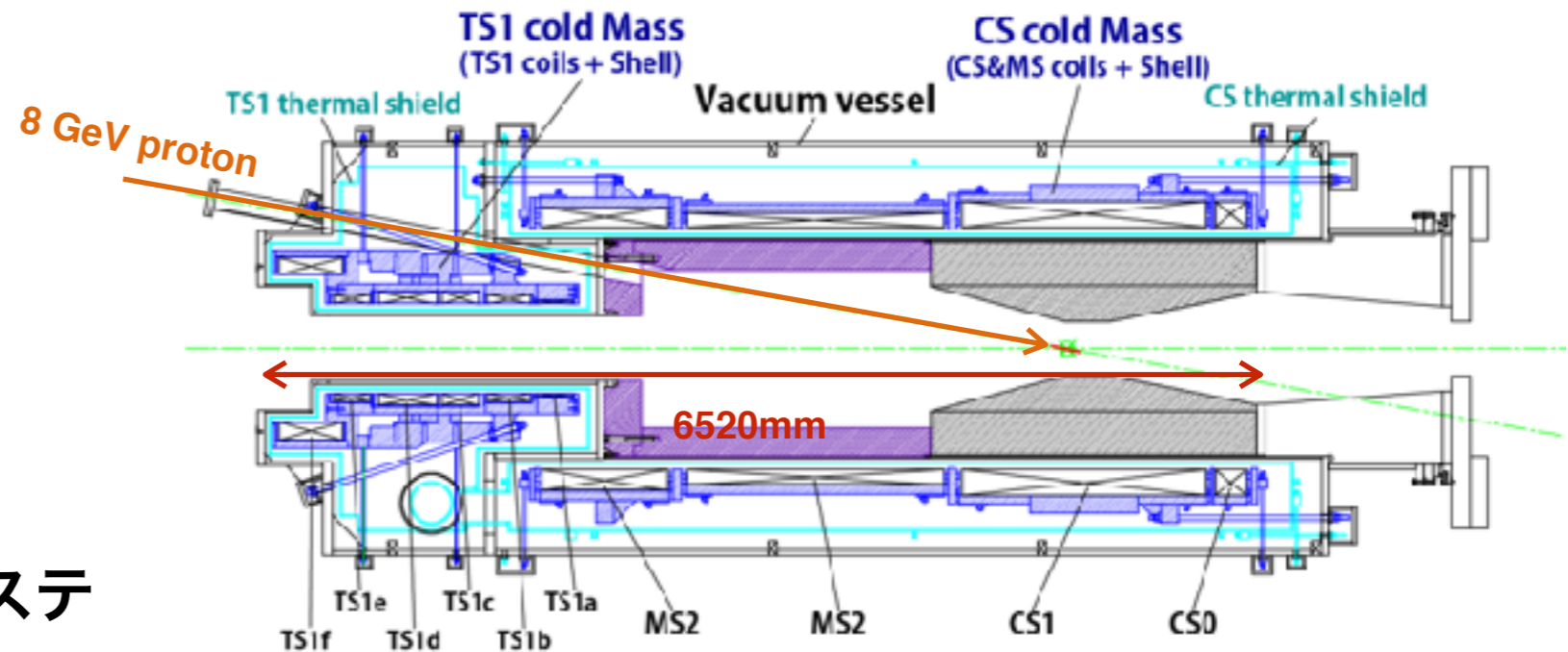
# パイオン捕獲磁石：MuSIC VS COMET

MuSIC



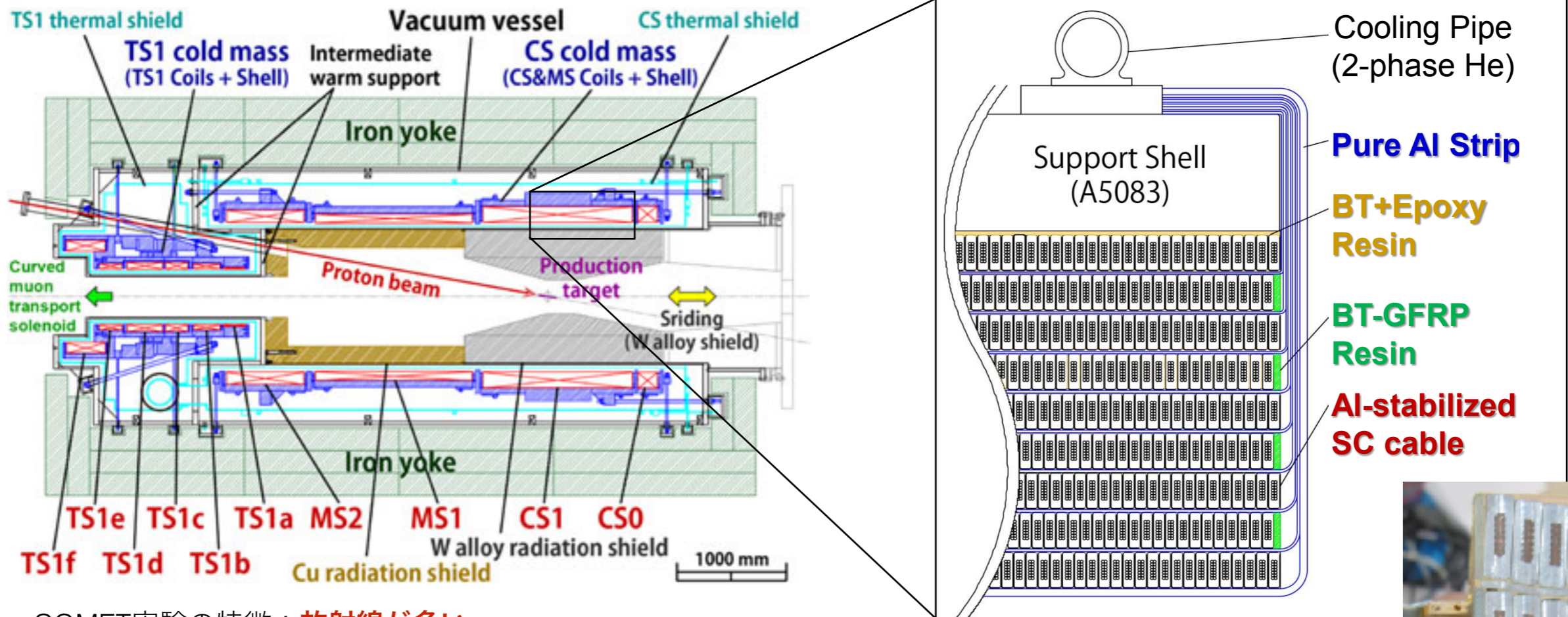
世界初めて+唯一パイオン捕獲システムを実現したミュオンビームライン

COMET



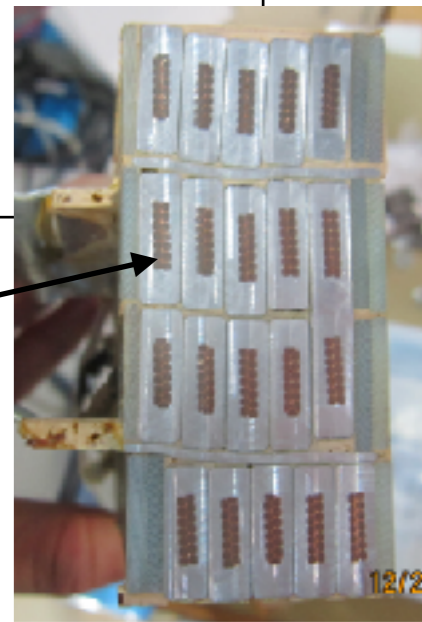
	MuSIC	COMET
ミュオン強度	$10^8 \mu/\text{sec}$ (DC)	$>10^{11} \mu/\text{sec}$ (pulsed)
一次陽子ビーム	3.9GeV, 0.4kW	8GeV, 56kW
中心磁場	3.5 Tesla	5 Tesla
直径 (捕獲磁石)	900 mm	1344 mm
長さ (捕獲磁石)	1580 mm	6520 mm

# Coil Structure



- COMET実験の特徴：**放射線が多い**
- 放射線対策：
  - 冷却方法：Heの二相流間接冷却
    - Heの放射化を低減するため
  - 冷却パス及び安定化線：
    - 冷却を改善するため、各層毎に冷却パスは1mmの高純度Al（99.999%）を使用
    - 中性子を通過させるため、Al安定化線を使用

- 接着剤：BT樹脂
  - 中性子断面積が大きいBoron抜き
- スペッサー：BT - GFRP
  - 従来のG10より放射線耐性が高い



# Radiation Issue

大強度陽子 → 大量の二次粒子が生成



パイオン捕獲磁石システム：

	MuSIC	COMET
放射線による熱侵入	0.6 W	> 200 W
エネルギー付与 (max)	<10 kGy/year	> 4 MGy/year
中性子量 (max)	$5 \times 10^{18}$ n/m <sup>2</sup> /year	> $8 \times 10^{23}$ n/m <sup>2</sup> /year



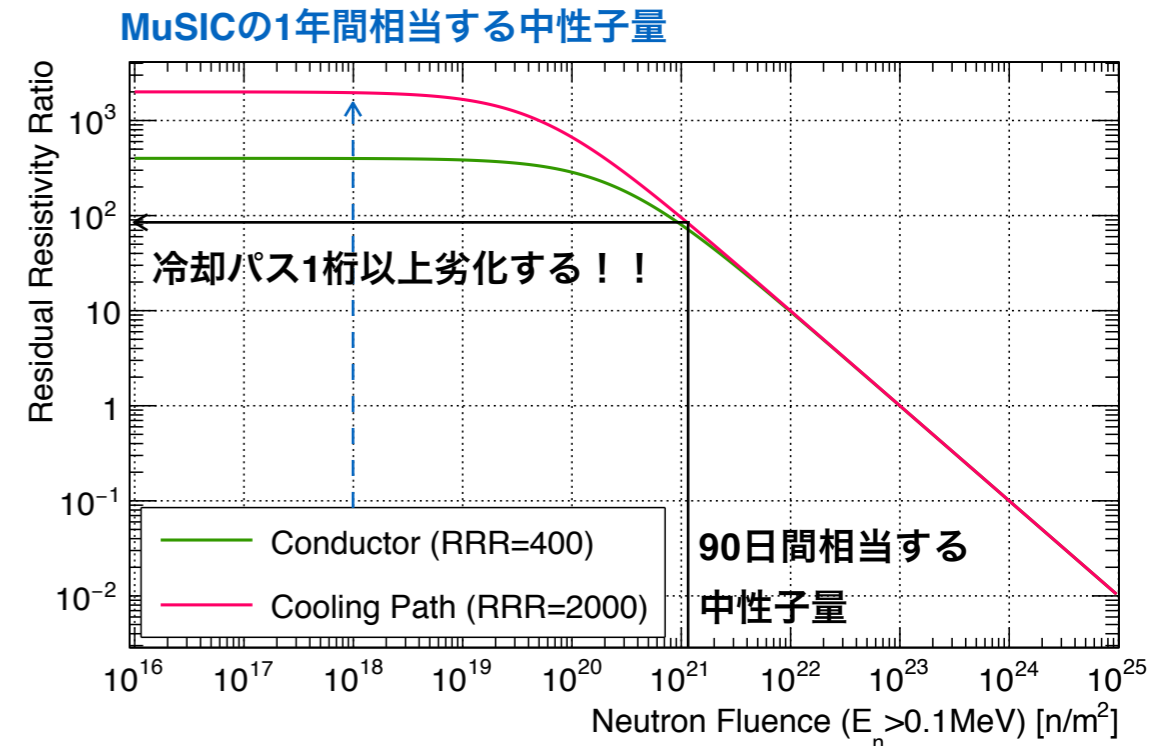
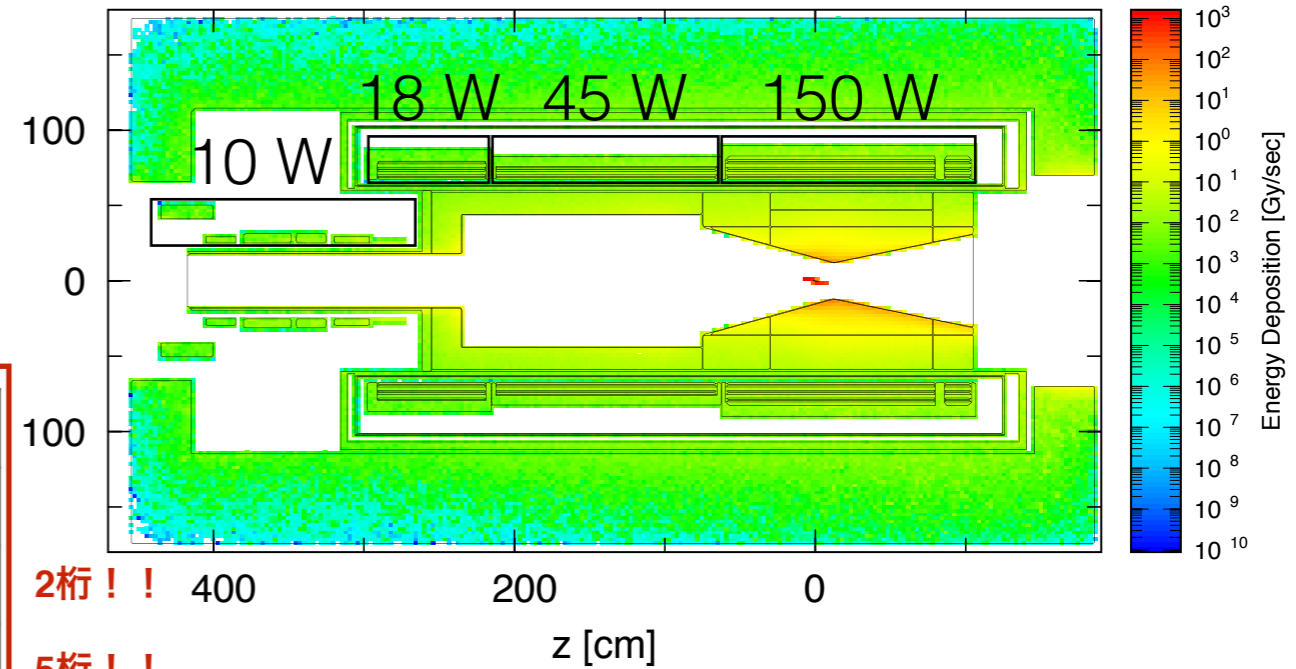
**物性値の劣化**

ex.: 残留抵抗比の劣化

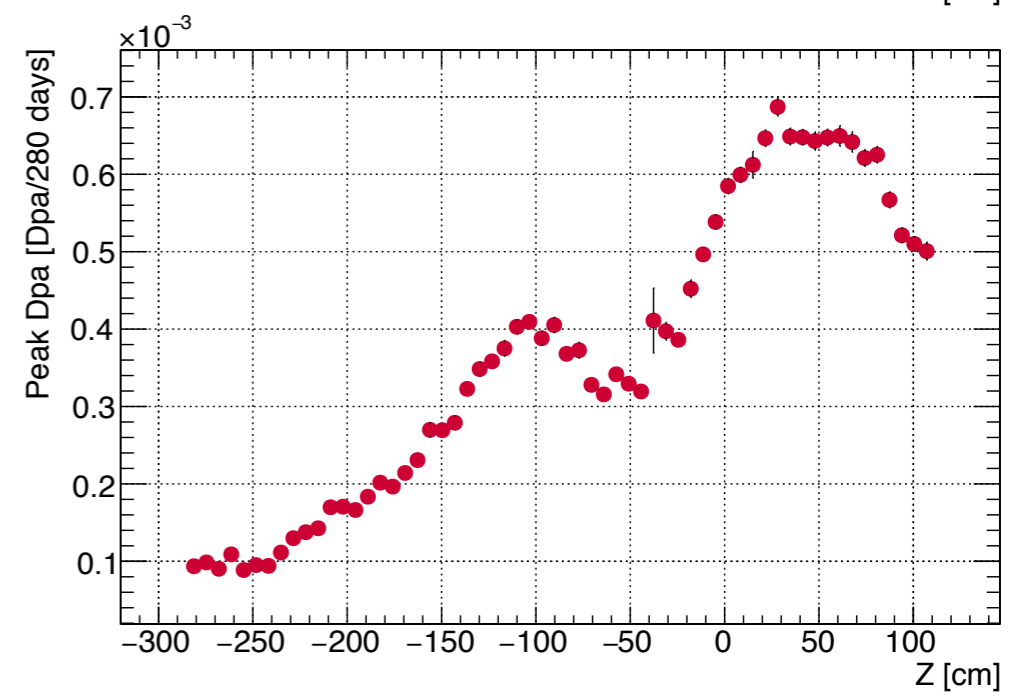
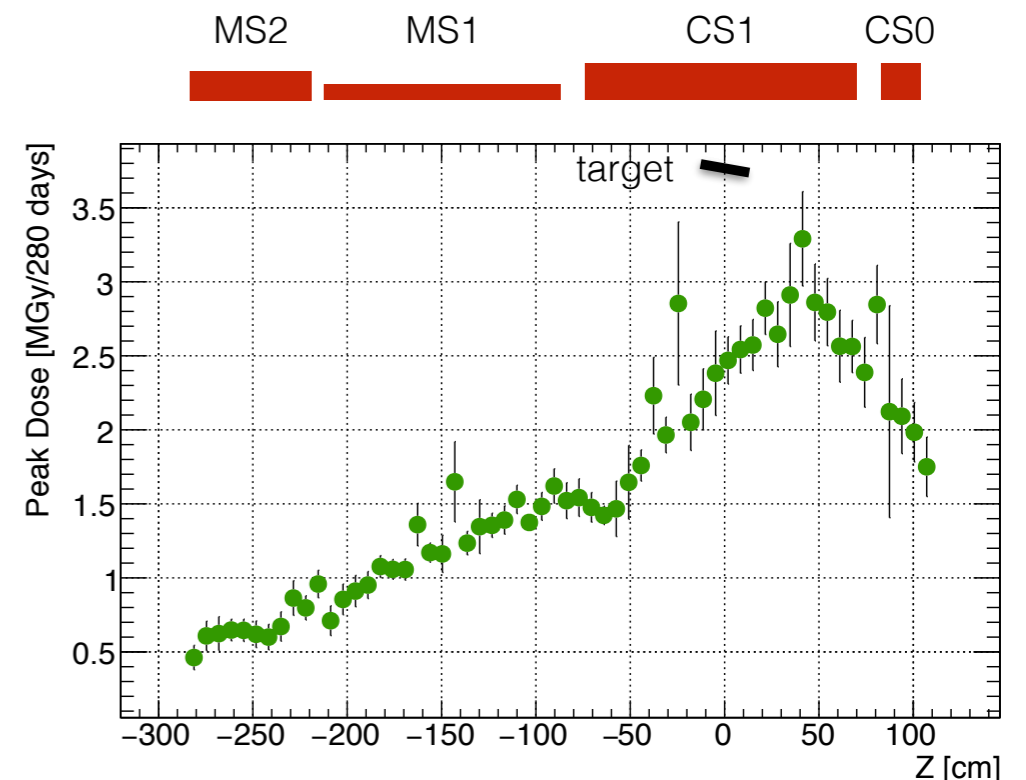
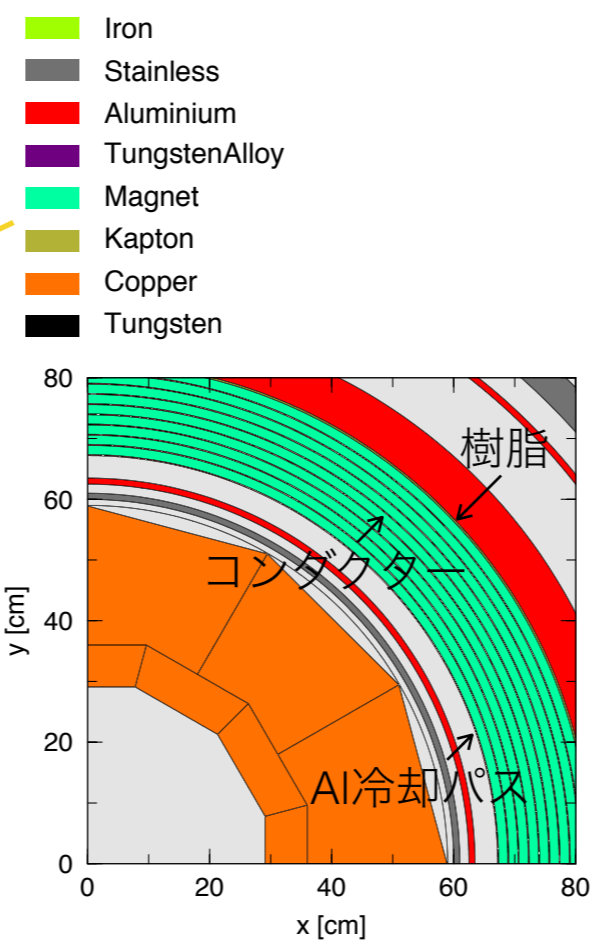
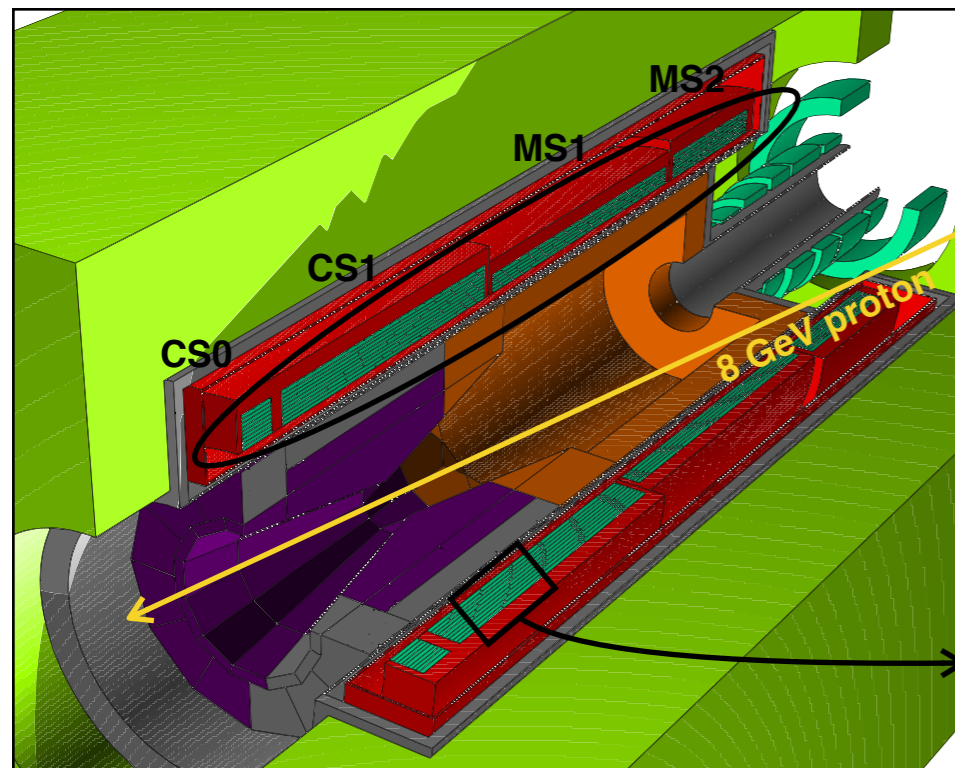


**コイルの温度が上昇 → 磁石クエンチ**

**磁石に与える熱的な影響が一番大きい！コイル温度  
上昇や磁石クエンチを調査する必要がある！！**



# Radiation Estimation



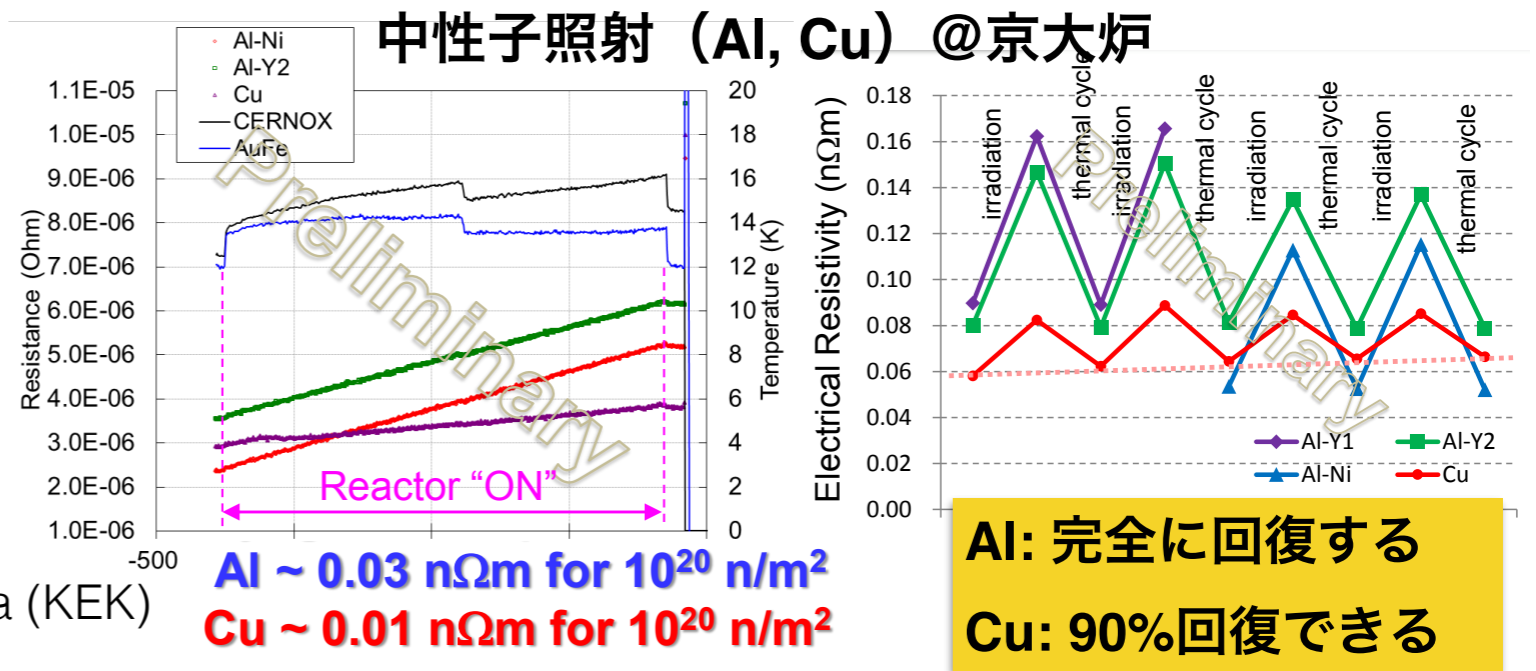
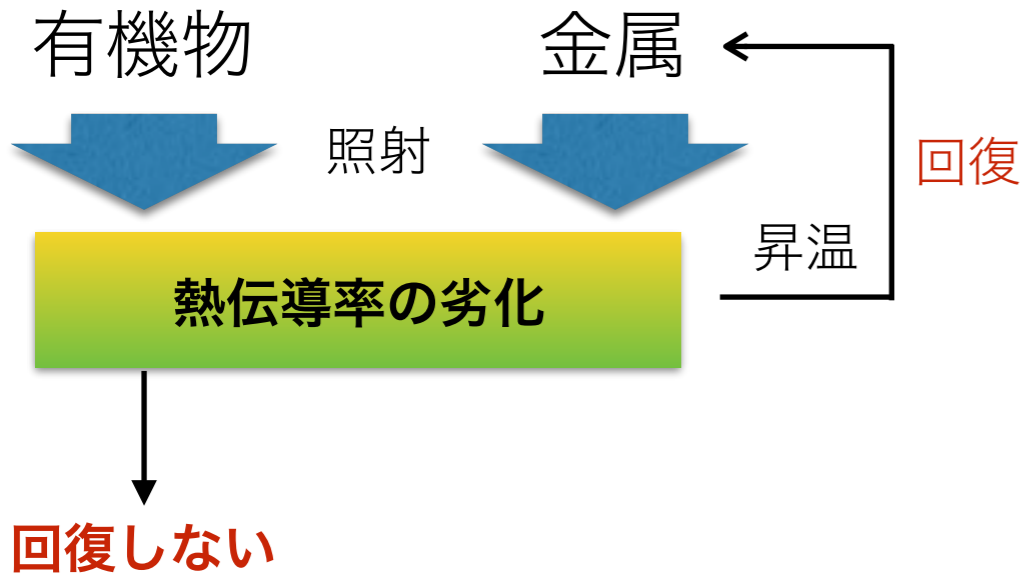
- 磁場 :
  - 3次元FEMで計算したマップを使用
- MCシミュレーションの結果 :

( $E_n > 0.1$  MeV)

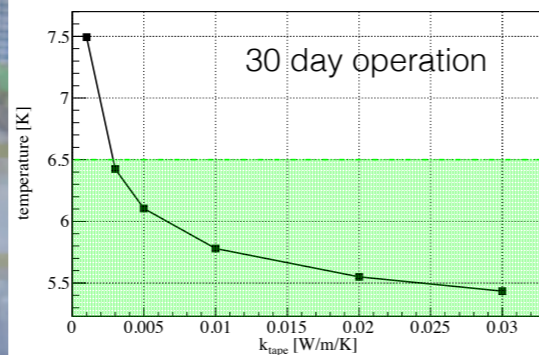
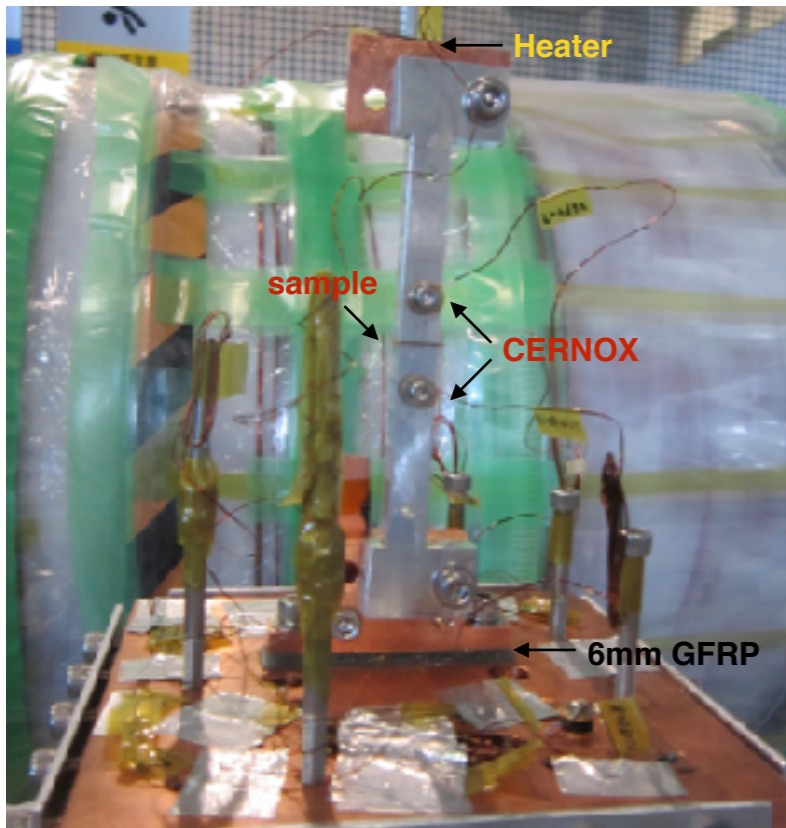
Peak	Dose [MGy/280 days]	DPA [DPA/280 days]	Neutron Flux [n/m <sup>2</sup> /280days]
CS0	2.1	5.2E-04	5.0E+23
CS1	3.2	6.9E-04	6.2E+23
MS1	1.6	4.1E-04	4.0E+23
MS2	0.6	1.0E-04	1.0E+23



# Thermal Degradation on Material



M. Yoshida (KEK)



- 絶縁テープの熱伝導率が落ちると運転中のコイル温度が上昇する
- 絶縁テープの熱伝導率の放射線劣化を調べる必要がある
- 測定：
  - 現在、J-PARCのNU1でGM冷凍機 (0.5W@4.5K)の冷却試験を実施中
  - 高崎研で10MGyまで照射する予定

# Thermal Conduction Simulation

磁石の分流温度： **6.5 K** @ 5.5 Tesla, 2700 A

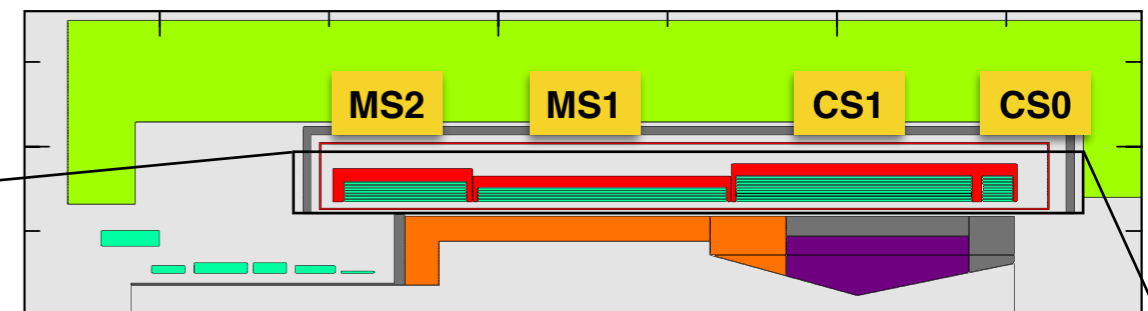
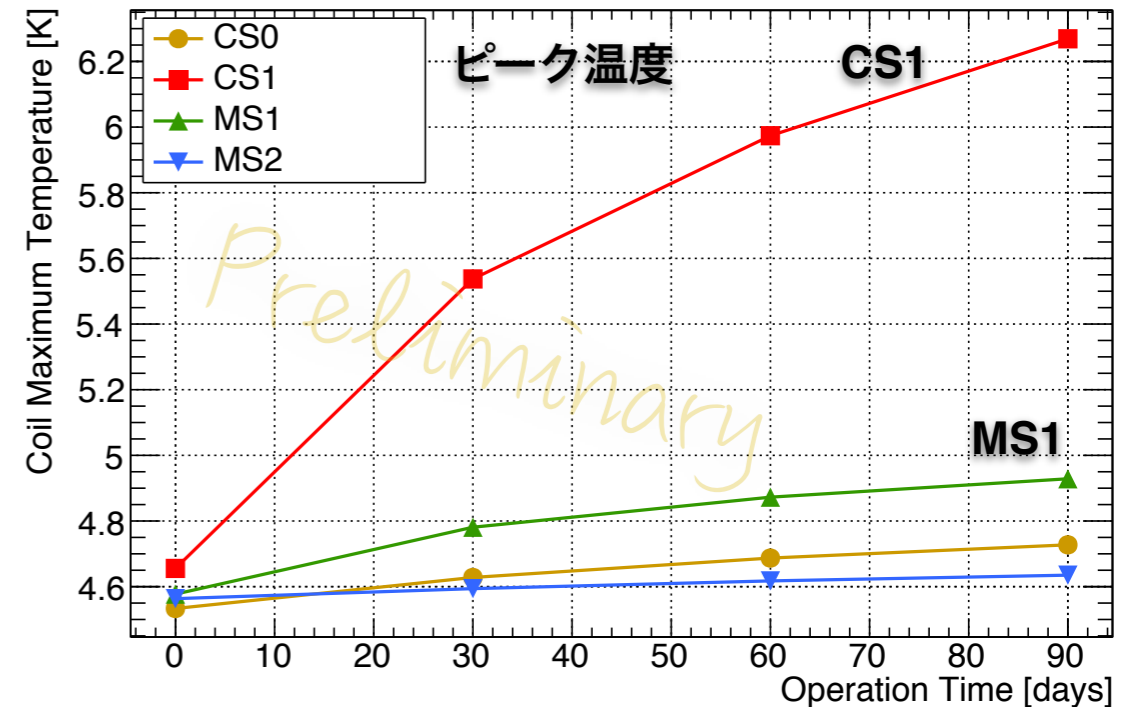
磁石温度 > 分流温度

**クエンチ**

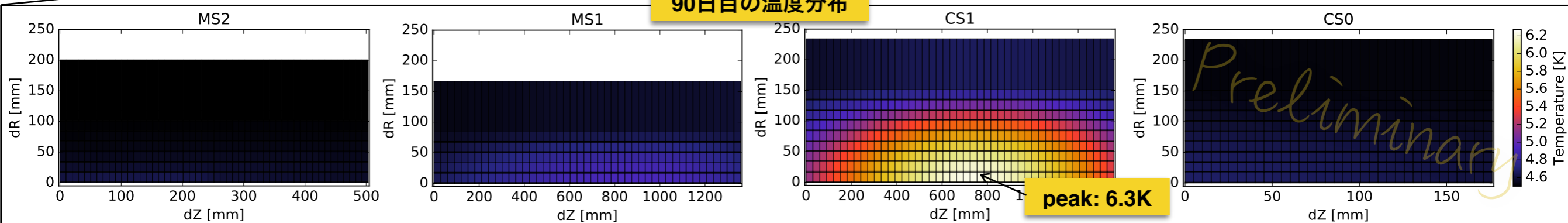
$$\gamma C \frac{dT}{dt} = k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + W$$

- 有限差分法で熱伝導方程式を解く
- MCシミュレーションから抽出した中性子フルエンスとエネルギー付与マップを使用
- 均一磁場：5.5 Tesla (CS0, CS1), 4.5 Tesla (MS1, MS2)
- 絶縁テープの熱伝導率：0.01 W/m/K @ 4.5K

**90日の連続運転が可能！！**



90日目の温度分布



# Quench Protection

磁石クエンチ → 電源遮断



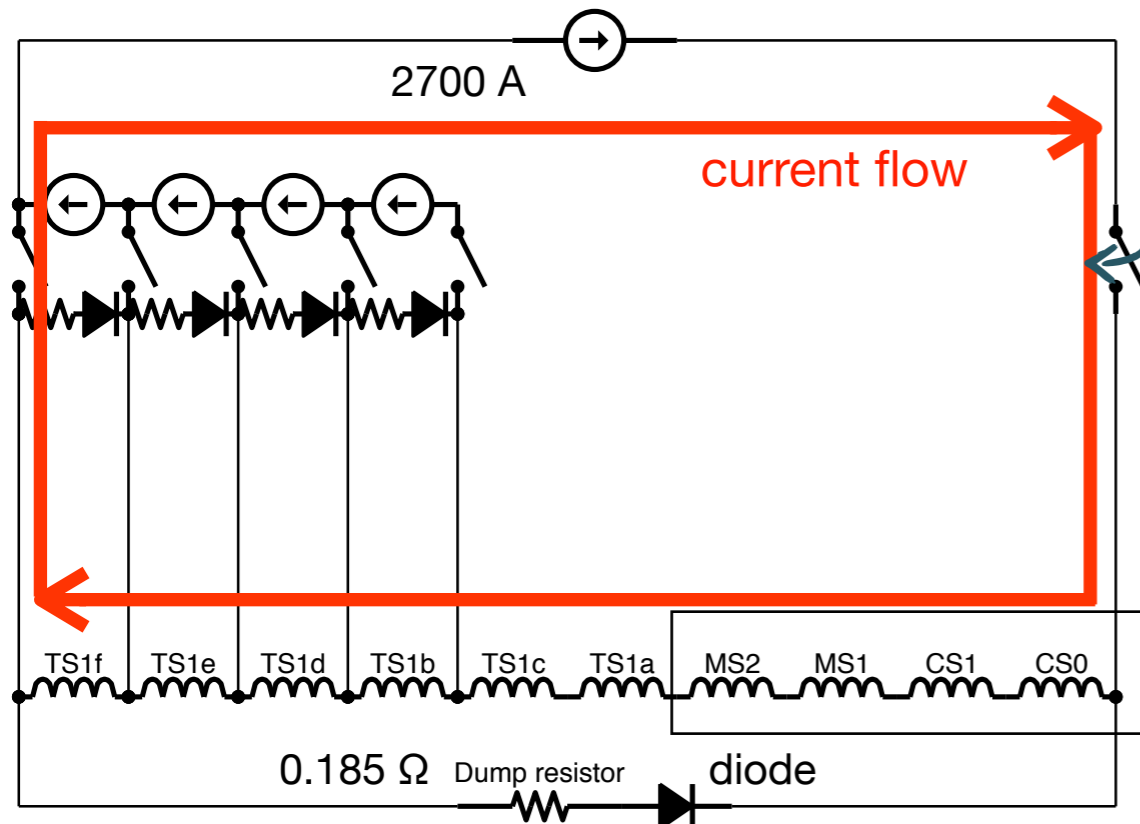
急な温度上昇と高電圧から磁石を守らないとな  
らない

電流減衰：

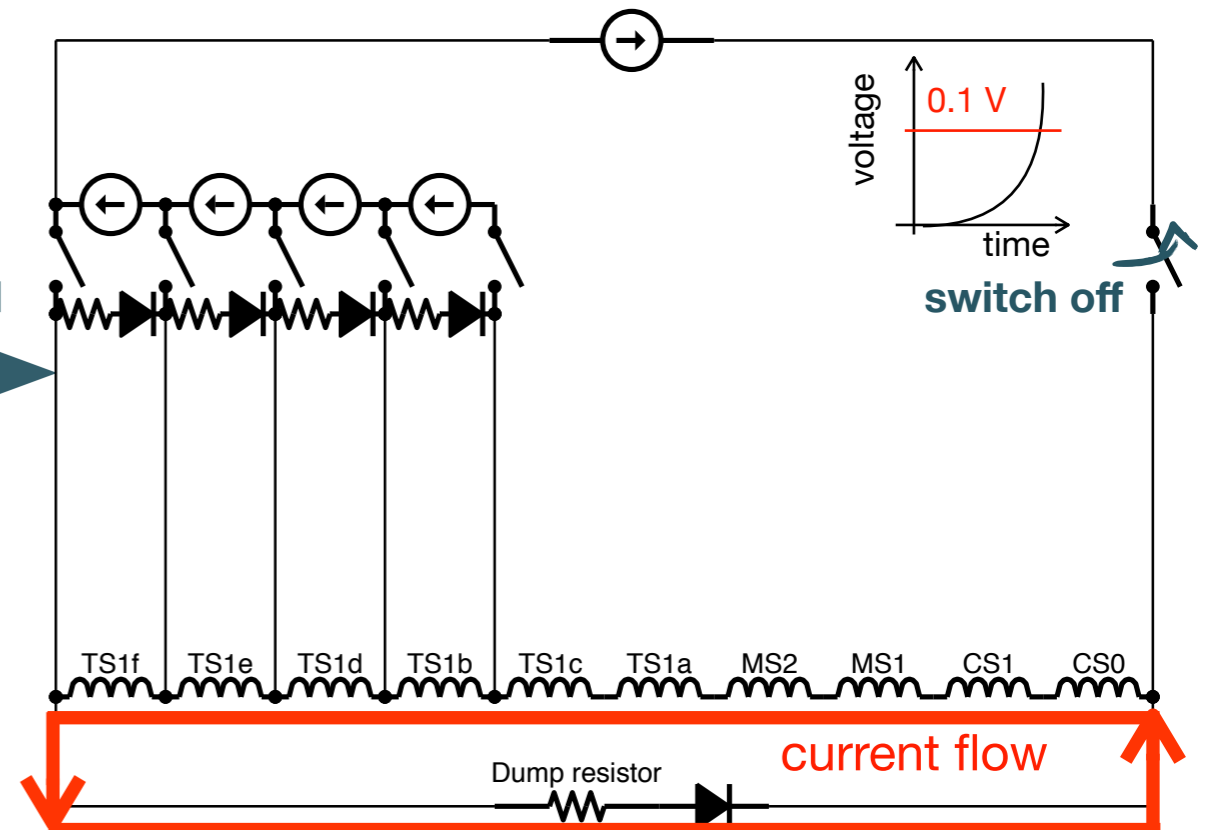
$$L \frac{dI(t)}{dt} + I(t) \{ R_{coil} + R_{dump} \} + V_d = 0$$

コイル抵抗

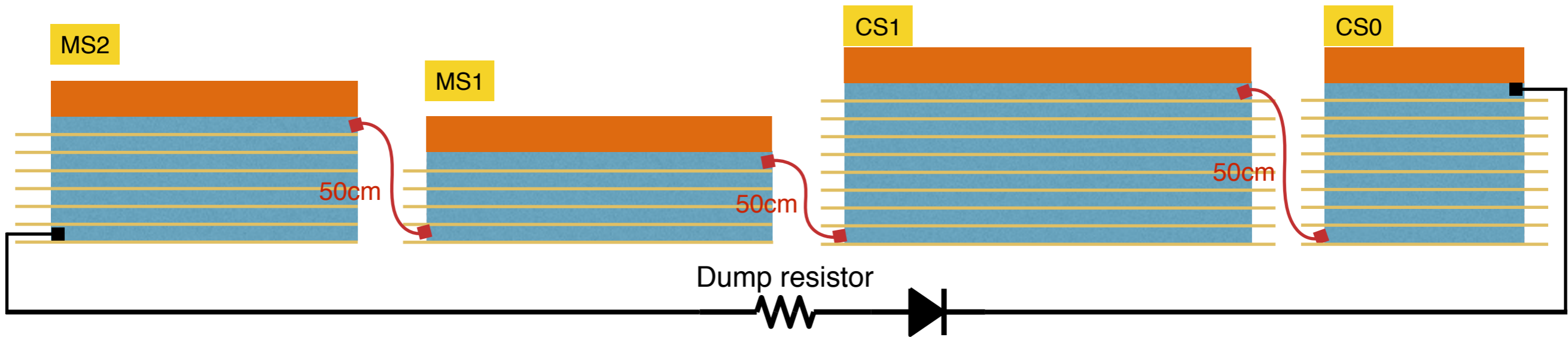
operation current	2700 [A]
dump resistor	0.185 [Ω]
diode turn-on voltage	1 [V]
time constant	68.59 [sec]
allowable voltage	500 [V]
threshold voltage	0.1 [V]
detection time	0.1 [sec]
inductance	12.69 [H]



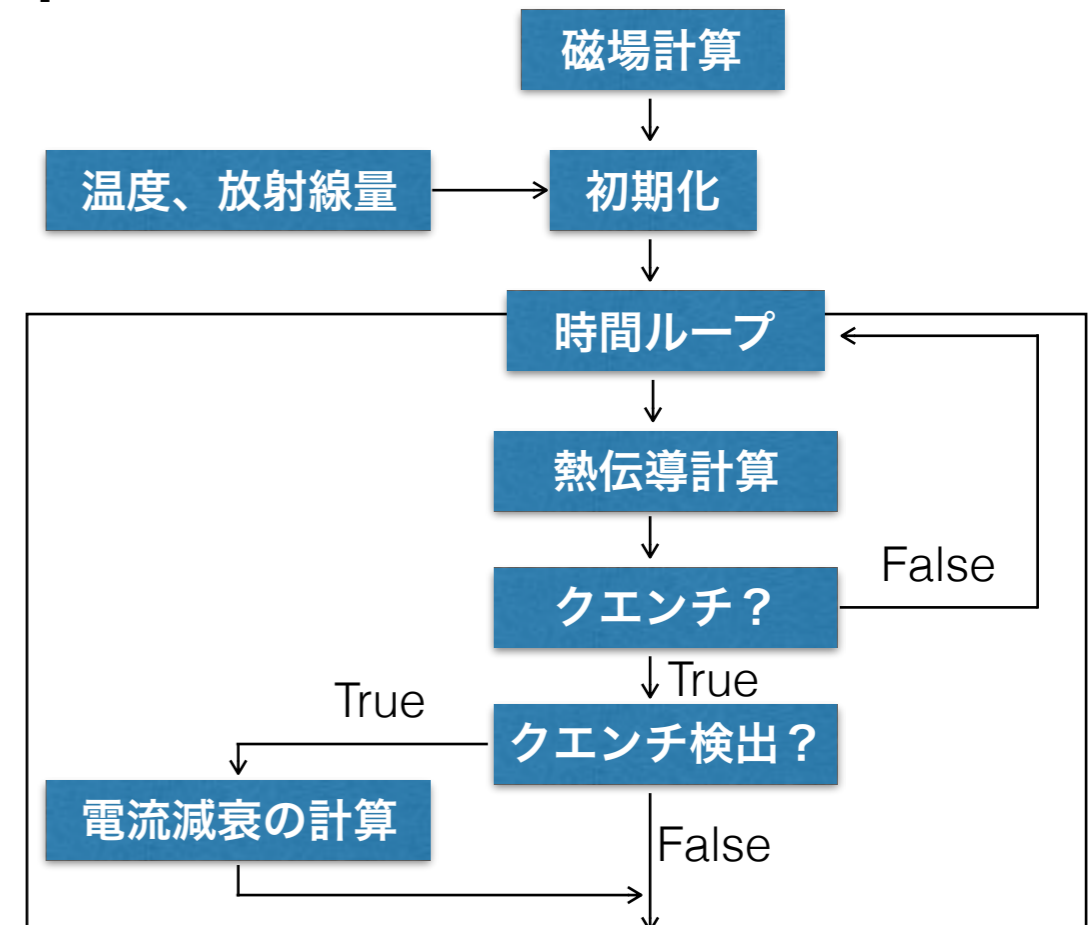
quenched



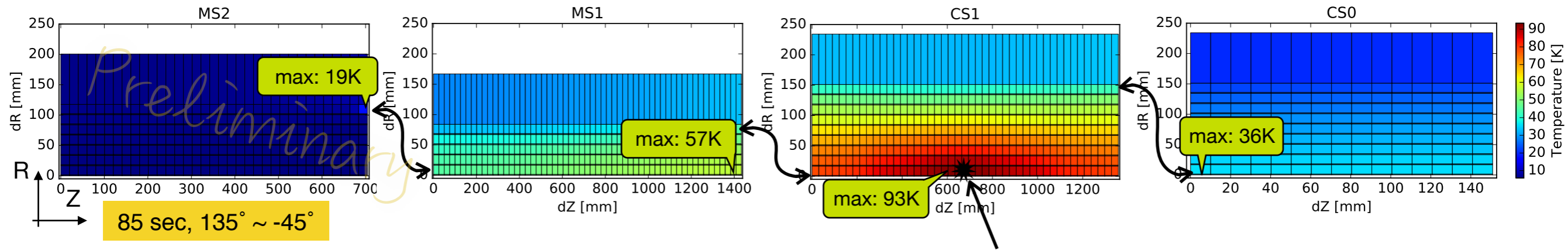
# Method for Quench Estimation



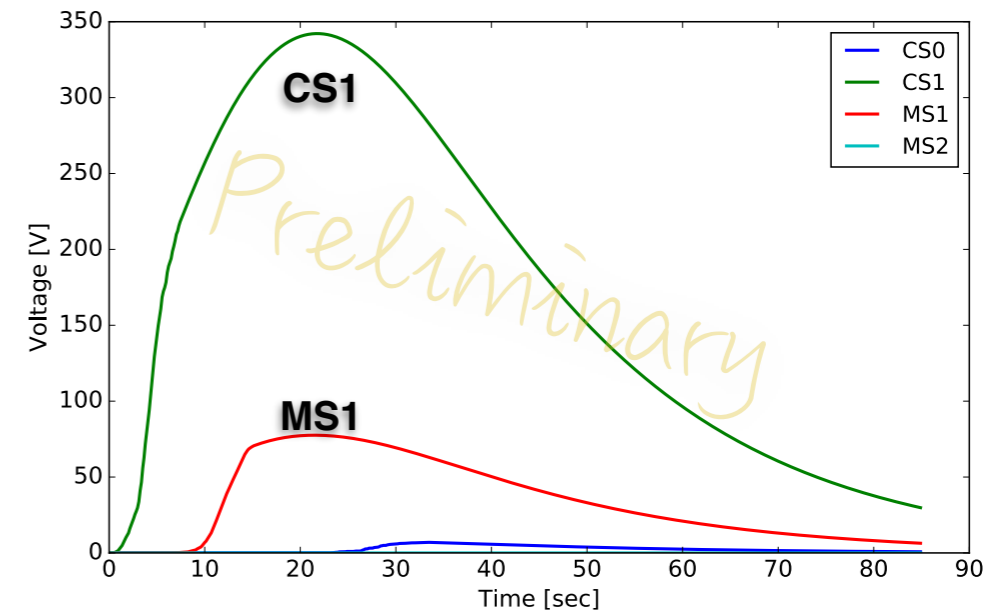
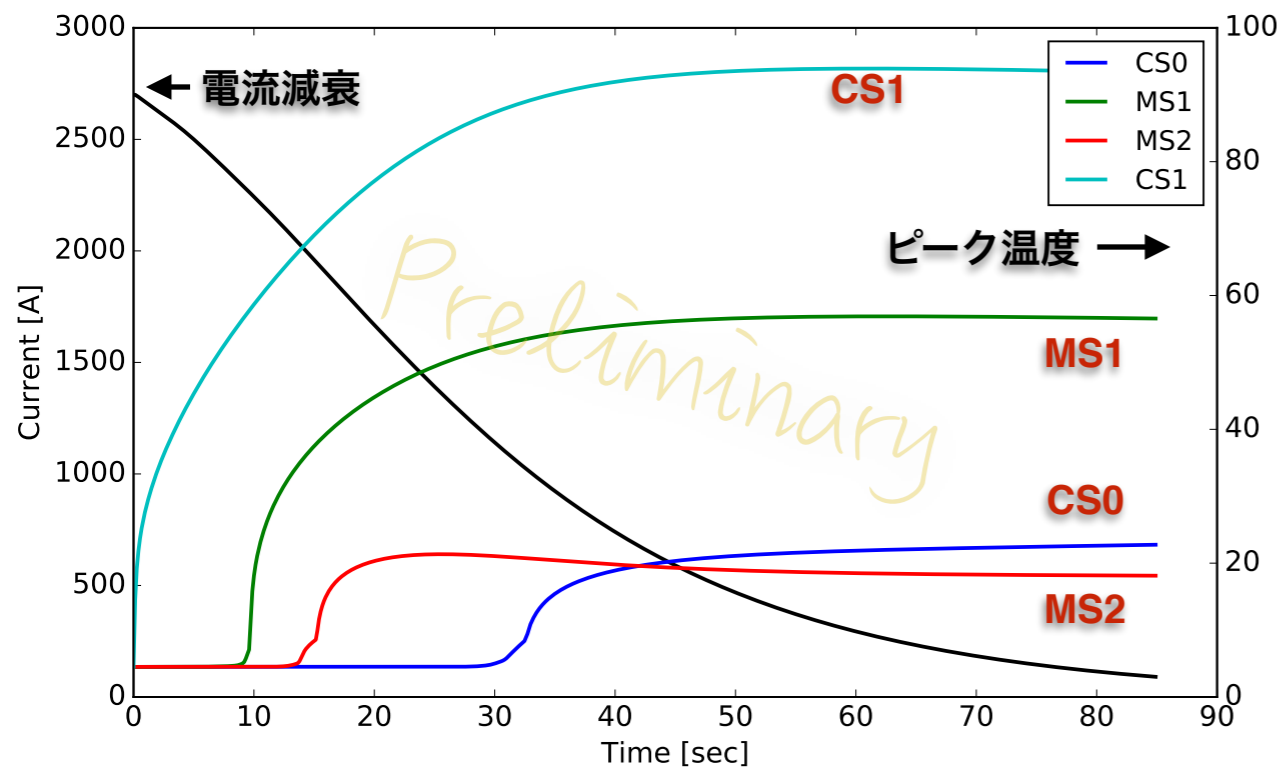
- COMET捕獲磁石システムのためにクエンチコードを開発した
- 初期化計算：
  - 磁場マップ：Boit-Savart法則の拡張式  
(H. E. Knoepfel, Magnetic Fields, Wiley, 2000)
  - 放射線マップ：Phitsから抽出した中性子フルエンスとエネルギー付与
- クエンチの判定：
  - 各メッシュでの分流温度を計算し、メッシュの温度が分流温度に超えると、クエンチと判定
- クエンチ検出条件：
  - コイル電圧 $>0.1$  V and 0.1 sec内に電圧 $>0.1$ V



# Quench Estimation



クエンチスポット (温度が一番高いメッシュ)



90日間連続運転後、捕獲磁石システムがクエンチして、電源遮断する場合：

**最高温度：93K (許容温度：200K)**

**コイル電圧上昇：< 350V (許容電圧：500V)**

# 今後の予定とまとめ

---

- **まとめ：**

- COMET実験のための超伝導磁石現在開発を進んでいる
- COMETのパイオン捕獲ソレノイドは放射線の被曝により、劣化をする
- 現在の設計は90日間の連続運転が可能
- 磁石システムのクエンチ後の最大電圧、最大温度は大丈夫です！

- **今後の予定：**

- 絶縁テープの熱伝導率の劣化の測定
- 磁石クエンチ：
  - 最高上昇する温度は熱容量に大きく依存している
  - 放射線によるアルミの熱容量の劣化を調査する
    - 実験は難しい → 固体物理の第一原理計算？
- 耐放射線磁石の開発：
  - COMETの捕獲磁石：NbTi →  $T_c(I, B) \sim 9.3 \text{ K}$
  - 高温超伝導テープ：ReBCO →  $T_c(I, B) > 77 \text{ K}$ 
    - 放射線問題の解決を期待される
    - 現在、HTSの放射線による臨界電流の劣化を調査中

身内さんに対抗や！！  
(着ぐるみ) 6千円かかって  
るから、ぜひおもしろい写真  
よろしく！



パウハラ



# Thanks



謝辞：

高エネ研の上野助教に深く感謝します

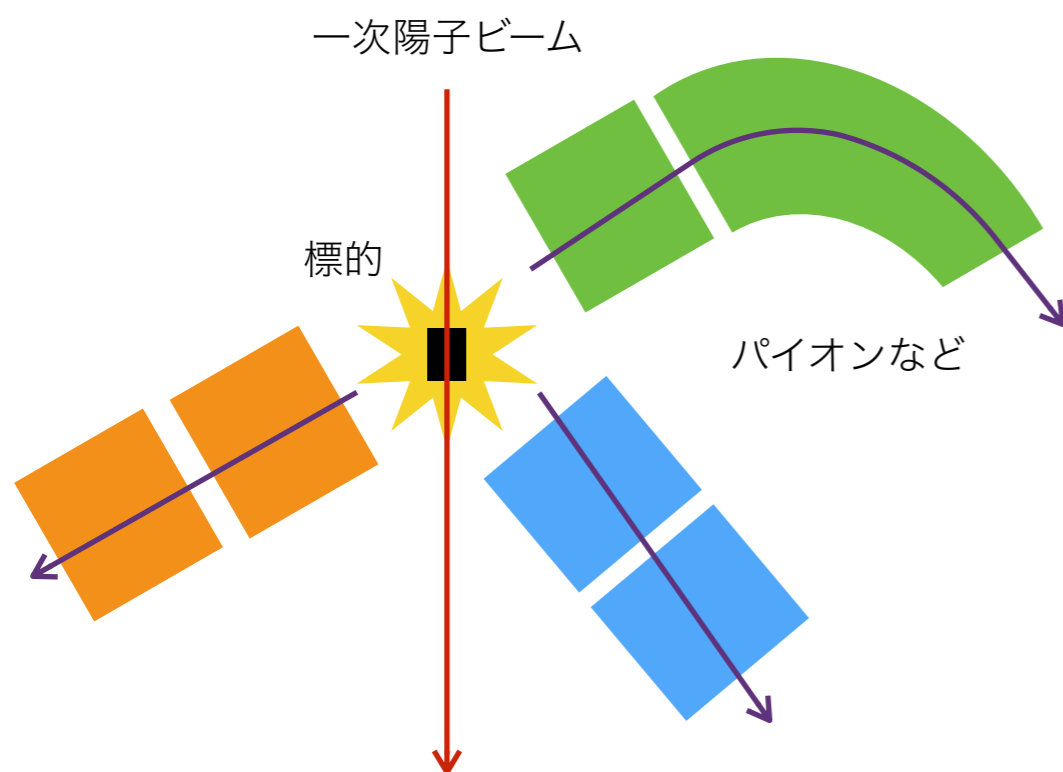
“Backup starts from here.”

– Thanks



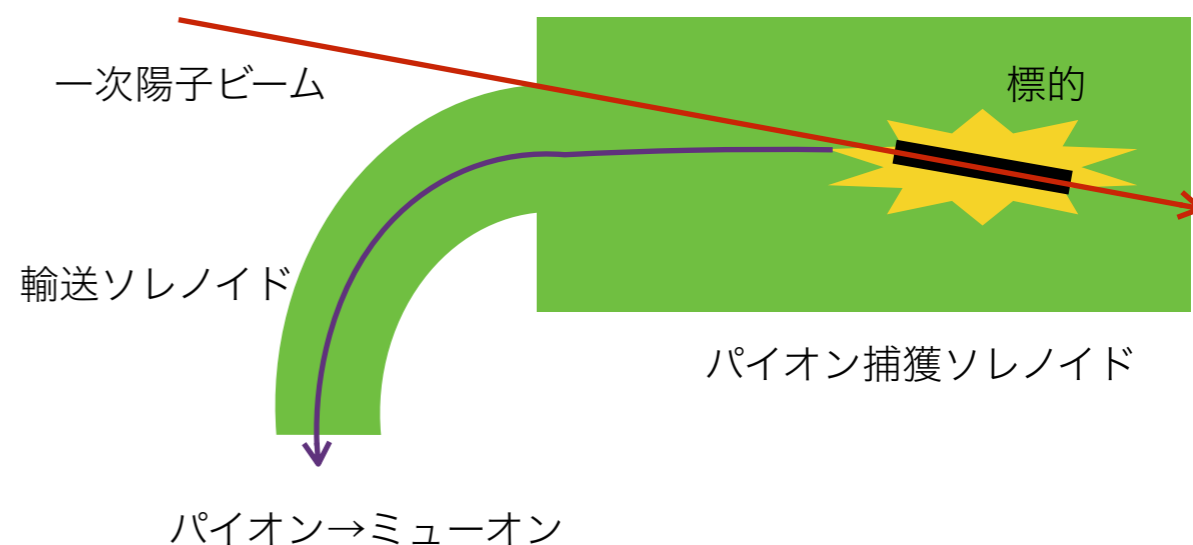
# ミューオンの生成方法

## 従来の二次粒子ビームライン



- 薄い標的
- 立体角が小さい
- ミューオン収量が少ない
- 二次粒子の効率的に使う
- 例：
  - PSIやJ-PARCのMUSE

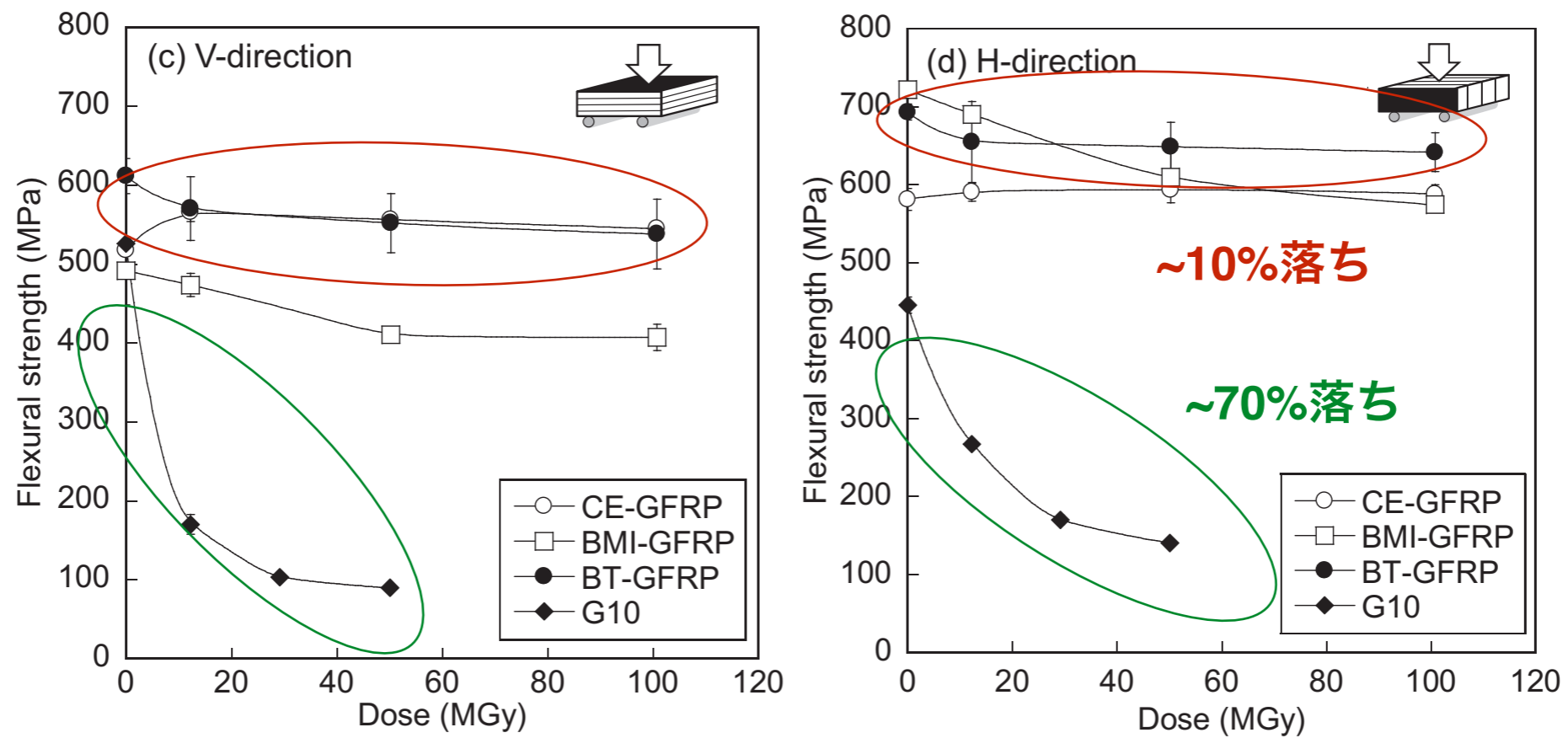
## 新たなミューオン源



- 厚い標的
- 立体角が広い
- ミューオン収量が多い
- 世界初めて実現できたビームライン：
  - RCNPのMusicビームライン
- 従来のミューオンビームラインより効率的にミューオンを作ることができる

# Irradiation for GFRP

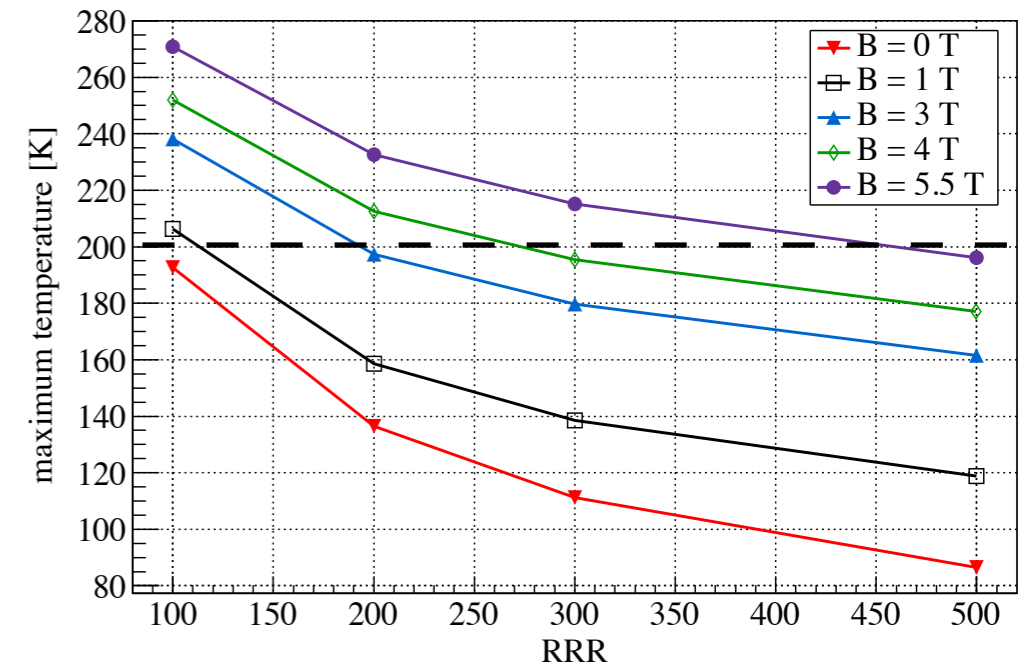
## ガンマ照射 (GFRP) @高崎研



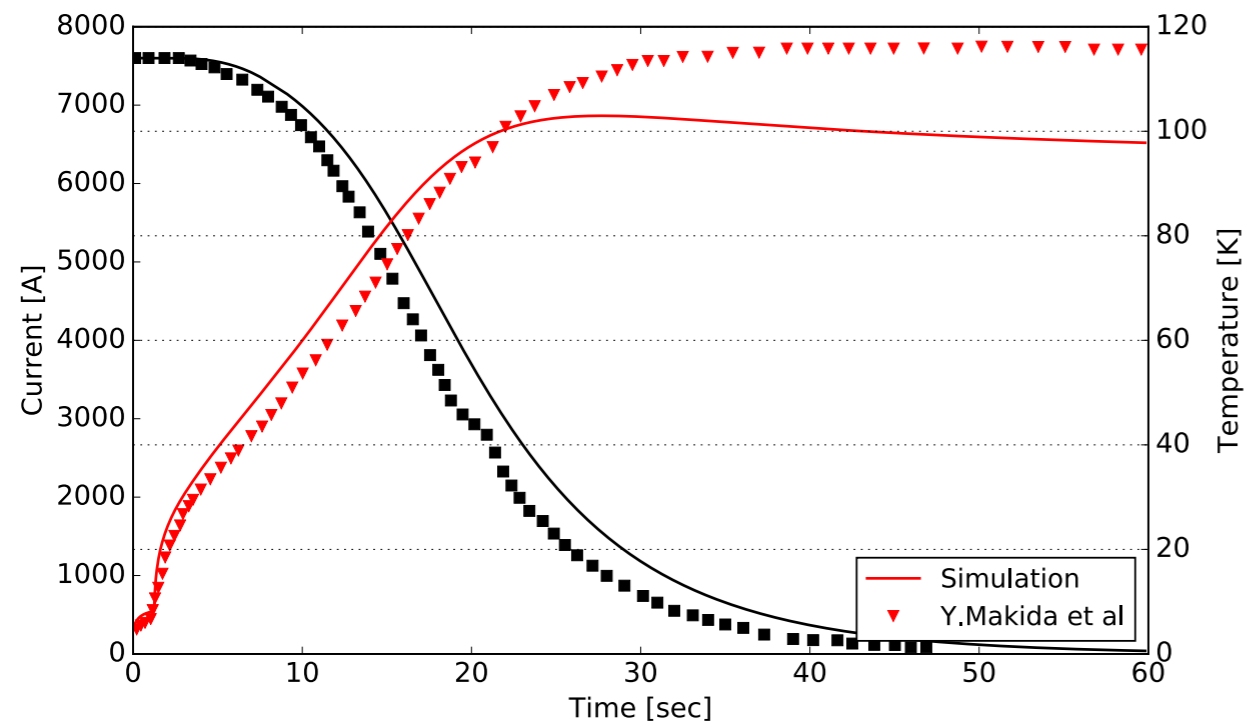
A. Isesaki et al., Fusion Eng. Des. 112(2016) 418-424

# Quench Estimation

- Requirement for Quench:
  - Allowable voltage for electronics: **< 500 V**
  - Peak temperature: **< 200 K**
- Using the adiabatic model to estimate maximum temperature of quench
  - Radiation caused the RRR degradation of conductor
  - If  $RRR < 100$ , maximum temperature  $> 200$  K
  - the quench simulation is necessary to check the capture system quench



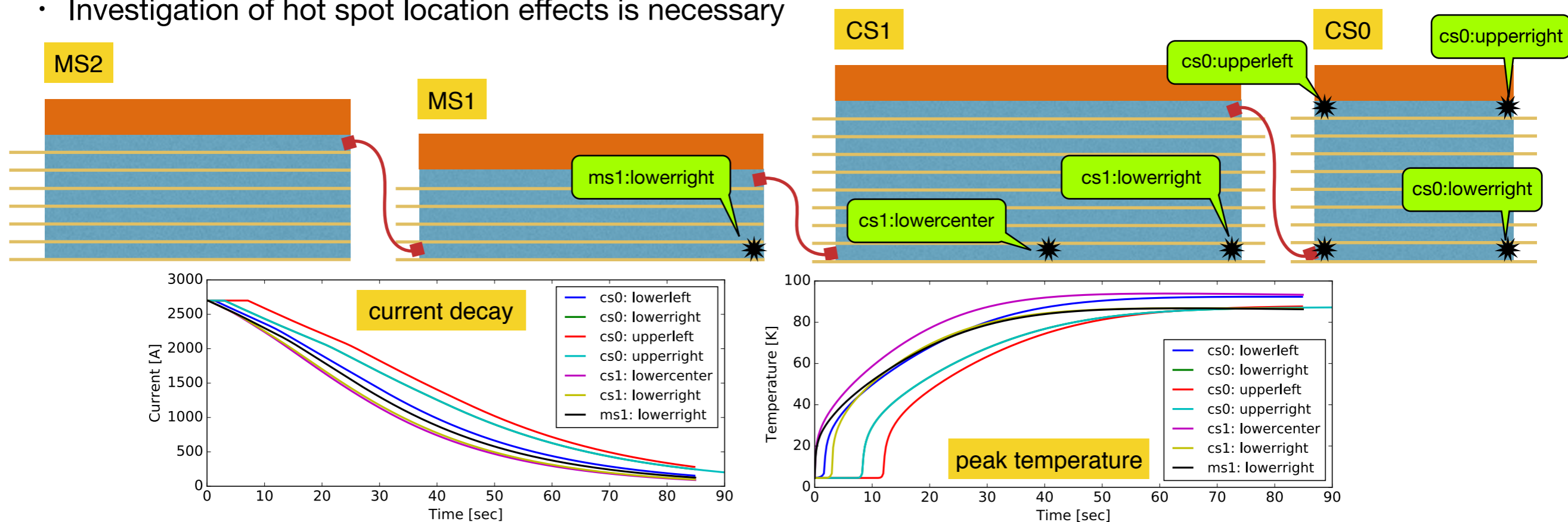
ATLAS Central solenoid



- Simulation Code for Quench:
  - Developed quench code for COMET superconducting system
  - Enable to obtain from GitHub:
    - `git clone https://github.com/kanouyou/CometQuenchCode-.git`
  - Tested the algorithm by simulating the Atlas Central solenoid
    - ~10% disagreement but no ridiculous result
    - disagreement may come from the material property

# Coil Quench at Different Location

- Unexpectable quench:
  - The hot spot may appear at some unexpected location (not only the place where the maximum temperature located)
- Investigation of hot spot location effects is necessary



- Set the hot spot in the different location of CS0, CS1 and MS1
  - CS0: lower left, lower right, upper right, upper left
  - CS1: lower center, lower right
  - MS1: lower right
- Assuming the quench starts at 90th day of operation
- Result:
  - All of these cases has no overheating issue