

COMETと耐放射線超伝導電磁石開発 (2)

2020/09/09

飯尾 雅実

J-PARC低温セクション

KEK超伝導低温工学センター



5. 実際の設計例

5. 1. パイオン捕獲ソレノイドの構造

5. 2. 有限要素法によるシミュレーション

6. さらなる大強度化に向けて

6. 1. 将来の耐放射線超伝導磁石

6. 2. REBCO線材の照射効果

6. 3. 無機絶縁コイルの開発

耐放射線超伝導磁石の特徴

□ 放射線遮蔽

- コイルサイズの増加

□ 放射線による発熱

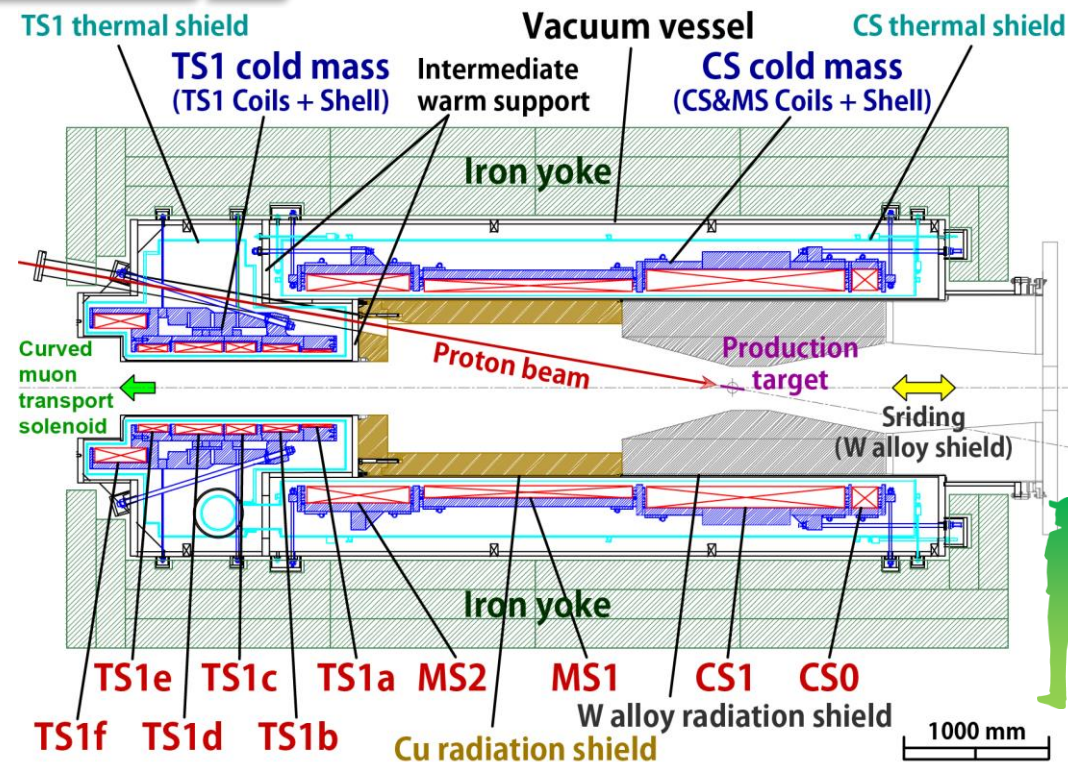
- 磁石の軽量化
- 伝導冷却方式

□ 材料特性の変化(劣化)

- 耐放射線材料
- 温度上昇とクエンチ保護性能の低下
- サイクル運転・短寿命

□ 放射化

- 難しい保守作業



- ・外径: **2.3 m**、全長: **6.5m**、重量: **45 t** (本体)
- ・コイルの最大磁場: **5.4 T**、負荷率: **0.19**
- ・蓄積エネルギー: **47 MJ**
- ・放射線シールド重量: **~40 t** (W-alloy + Cu)
- ・設計線量: **~1 MGy**、核発熱: **250 W**

耐放射線超伝導磁石の特徴

放射線遮蔽

- コイルサイズの増加

放射線による発熱

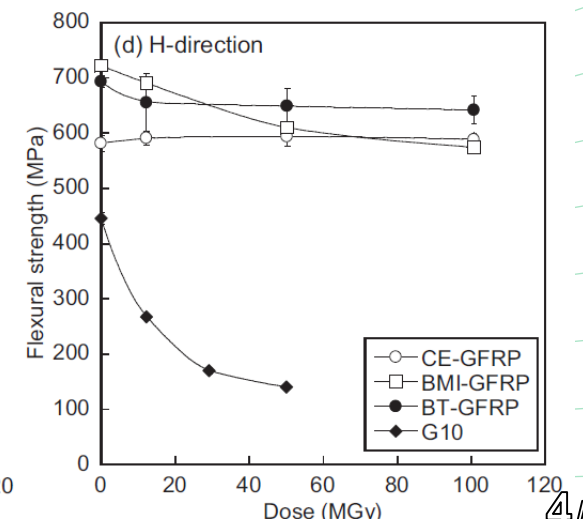
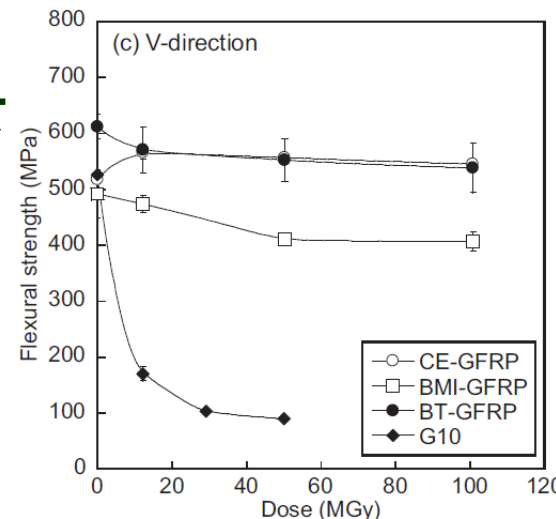
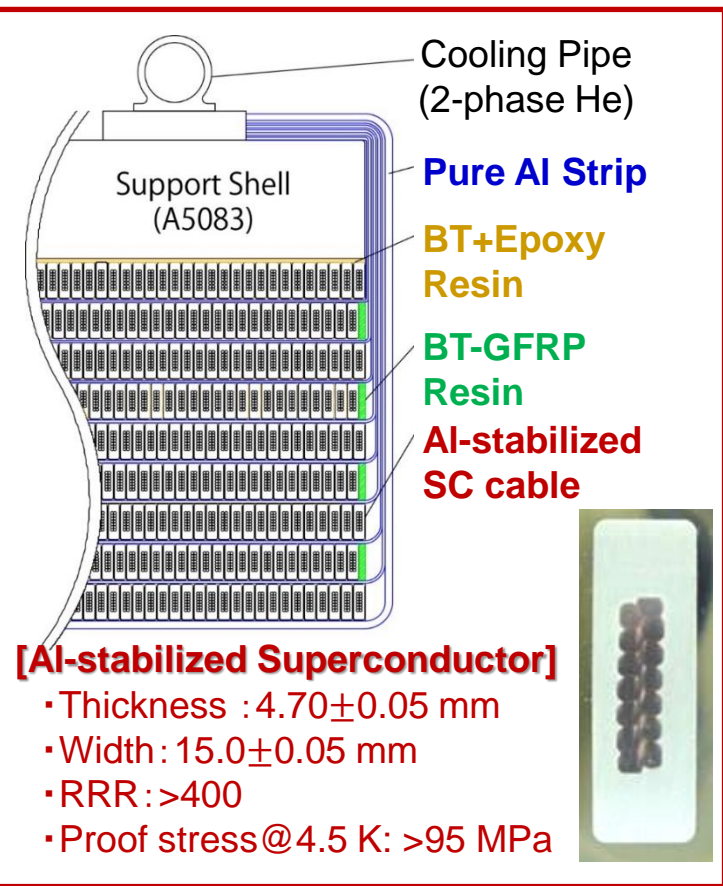
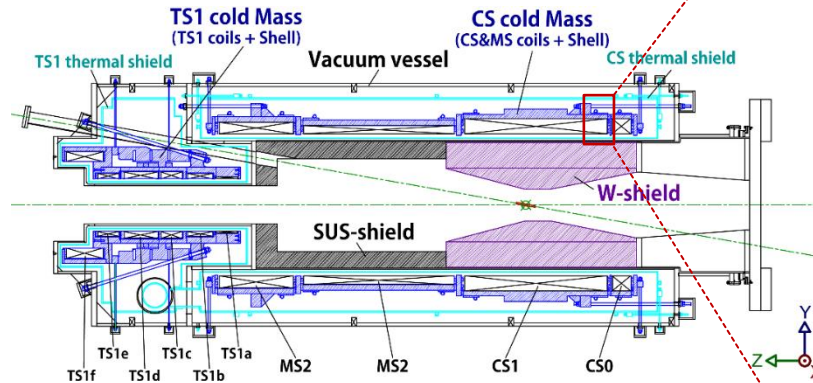
- 磁石の軽量化
- 伝導冷却方式

材料特性の変化(劣化)

- 耐放射線材料
- 温度上昇とクエンチ保護性能の低下
- サイクル運転・短寿命

放射化

- 難しい保守作業



耐放射線超伝導磁石の特徴

□ 放射線遮蔽

- コイルサイズの増加

□ 放射線による発熱

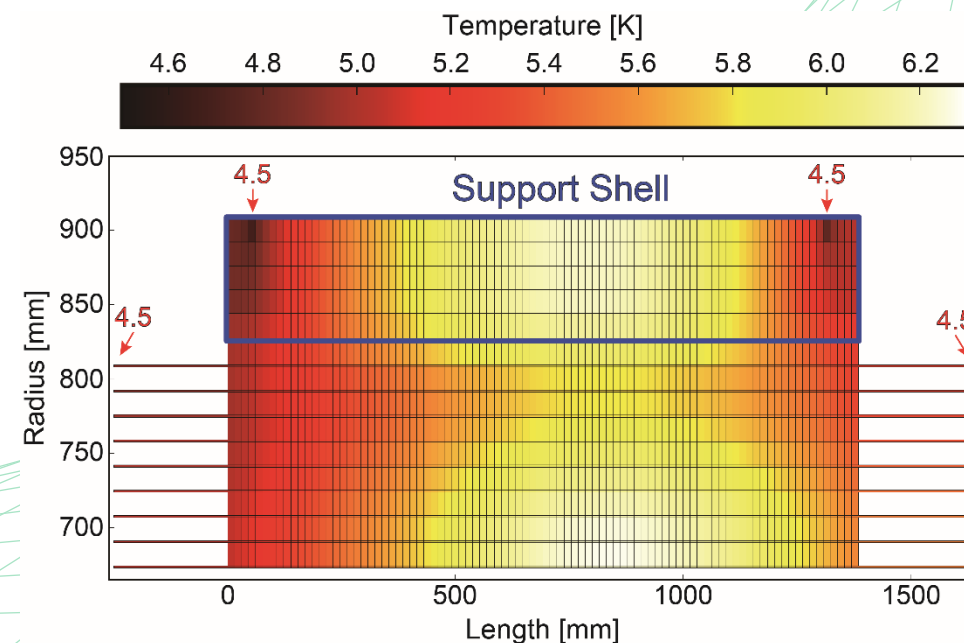
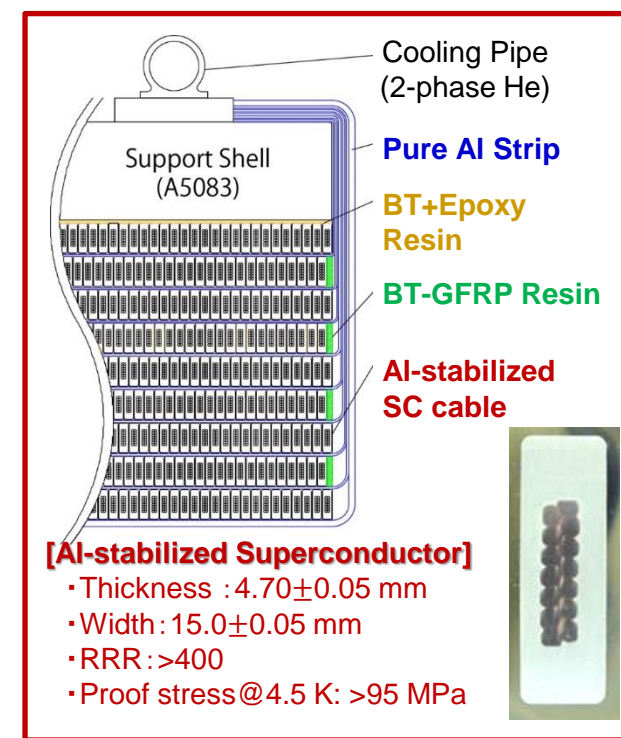
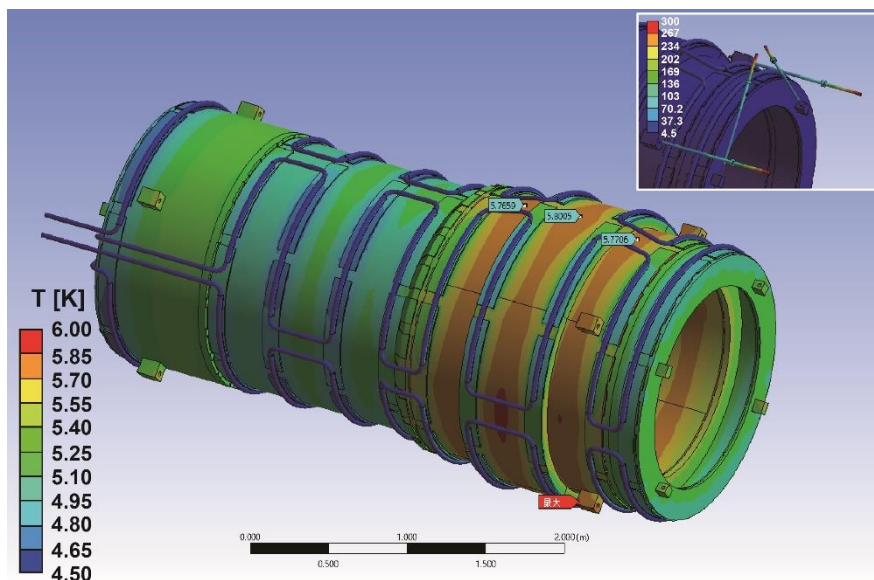
- 磁石の軽量化
- 伝導冷却方式

□ 材料特性の変化(劣化)

- 耐放射線材料
- 温度上昇とクエンチ保護性能の低下
- サイクル運転・短寿命

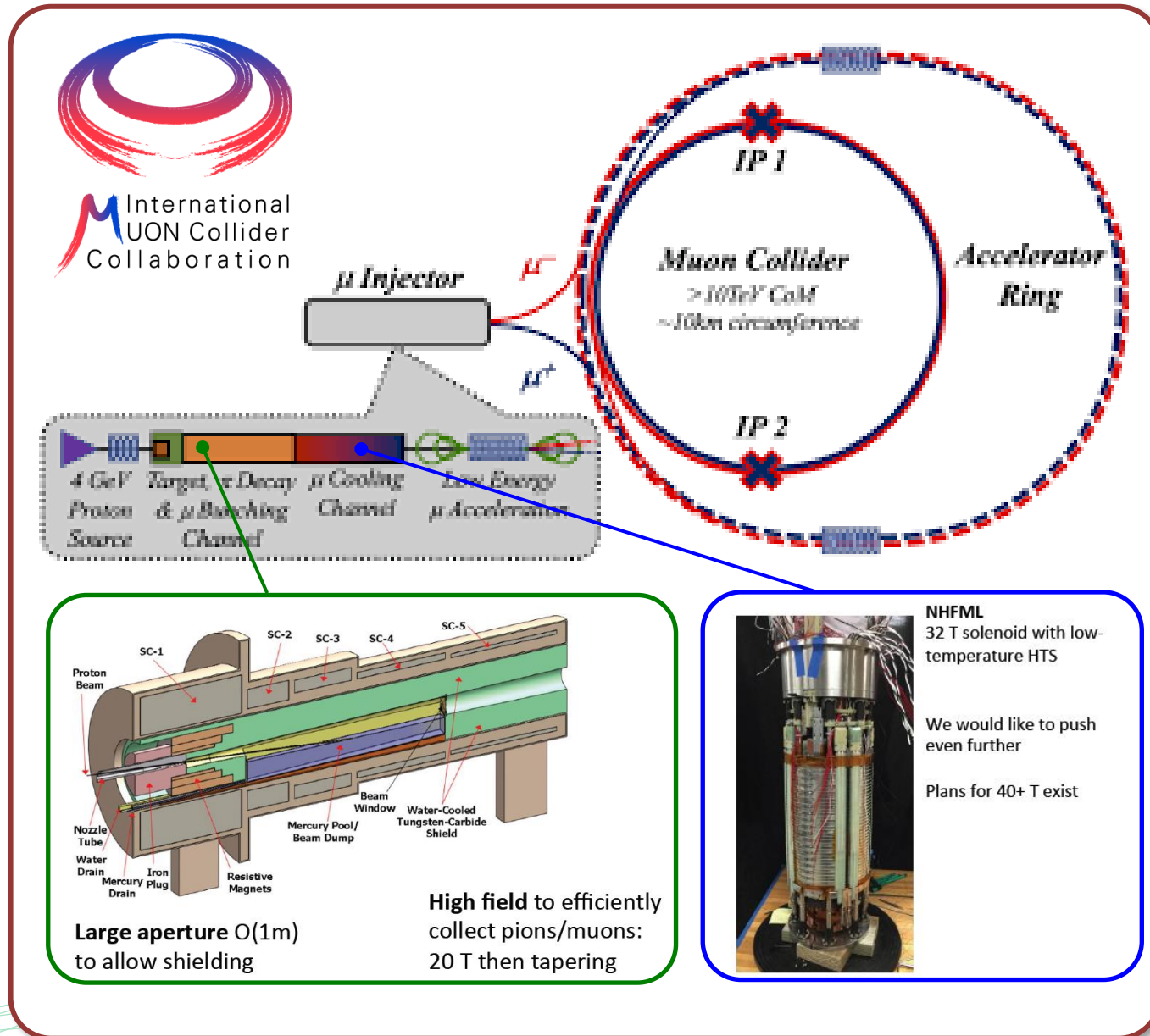
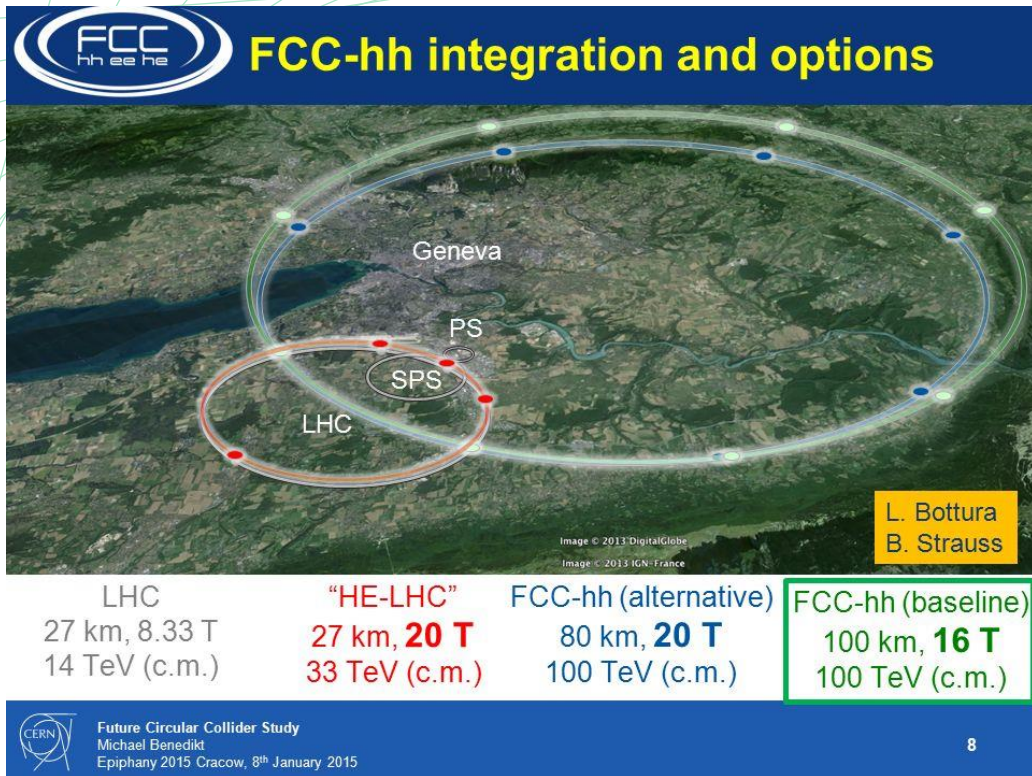
□ 放射化

- 難しい保守作業



6. 1. 将来の耐放射線超伝導磁石

将来の加速器建設計画

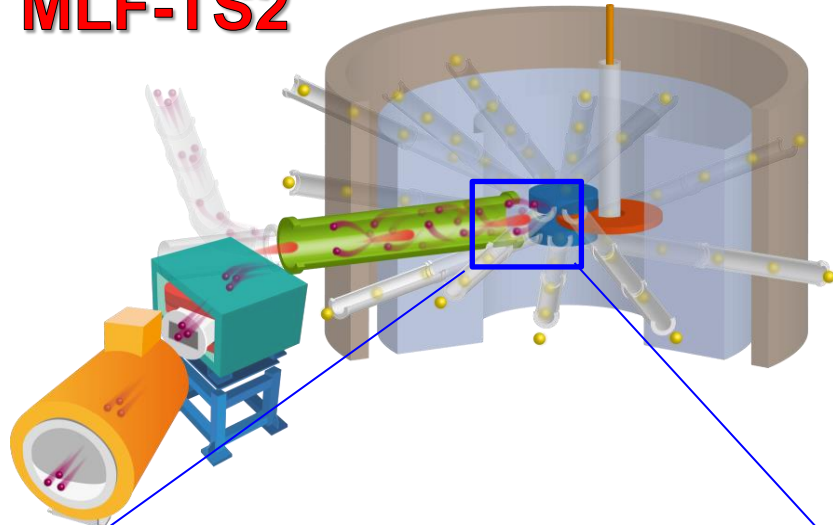


FCC magnet: 20 T, 250-350 MGy?
 - 積分ルミノシティ: 20-25 ab^{-1} (FCC) > 3-4 ab^{-1} (HL-LHC)

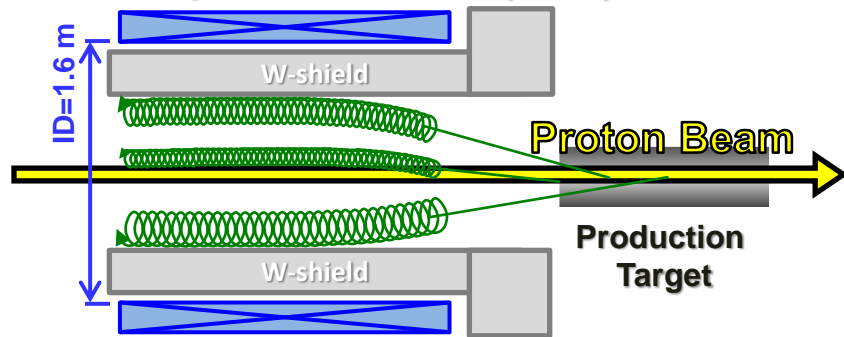
MC magnet: 20 T, 400 MGy?
 - 陽子ビーム: 3 MW

J-PARC MLF第2ターゲットステーション

MLF-TS2



Pion Capture Solenoid (PCS)



耐放射線性能: > 100 MGy?

- 陽子ビーム: 1 MW

January 22,
2016

LINAC
400 MeV



J-PARC Facility
(KEK/JAEA)

Neutrino Experimental
Facility

Rapid-Cycling
Synchrotron
(RCS) 3 GeV

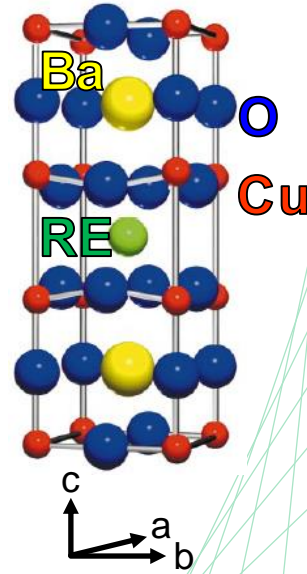
Materials and Life Science
Experimental Facility (MLF)

MR (Main Ring
Synchrotron) 30 GeV

Hadron
Experimental
Facility

South to North

REBCO (rare-earth barium copper oxide)

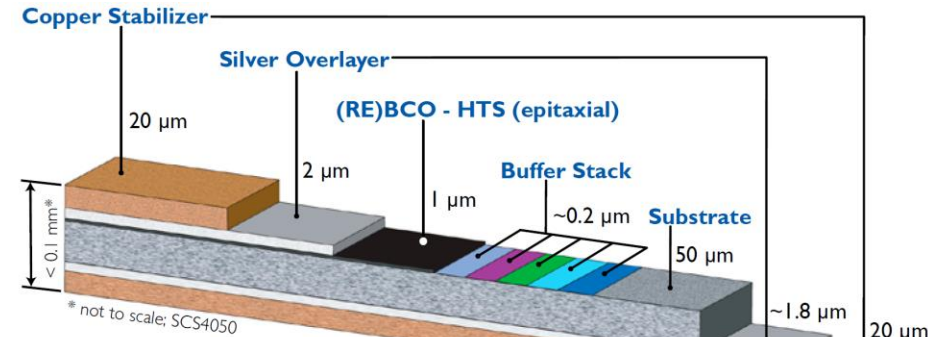


► High temperature margin ($T_c=93$ K)

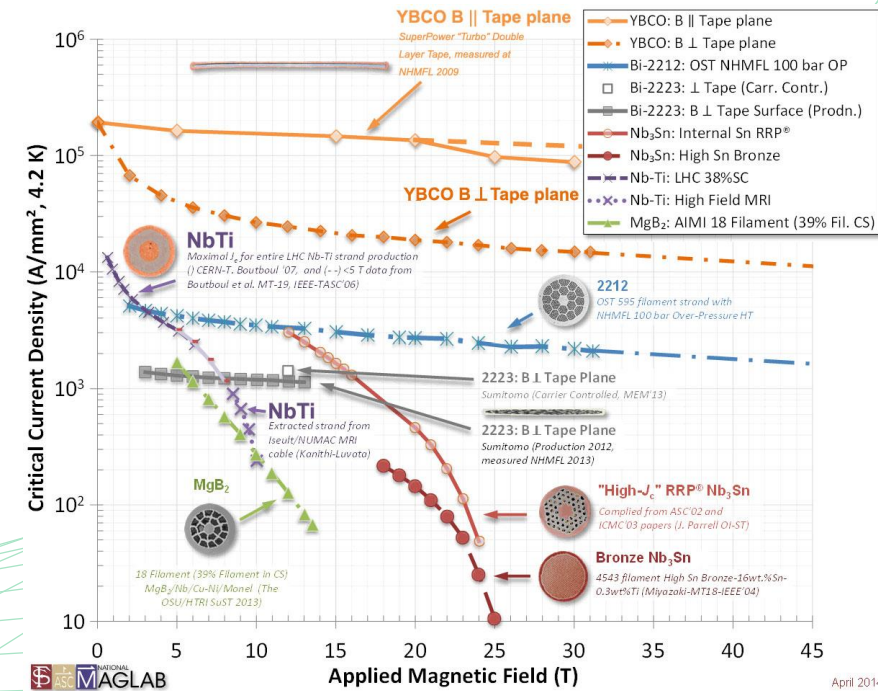
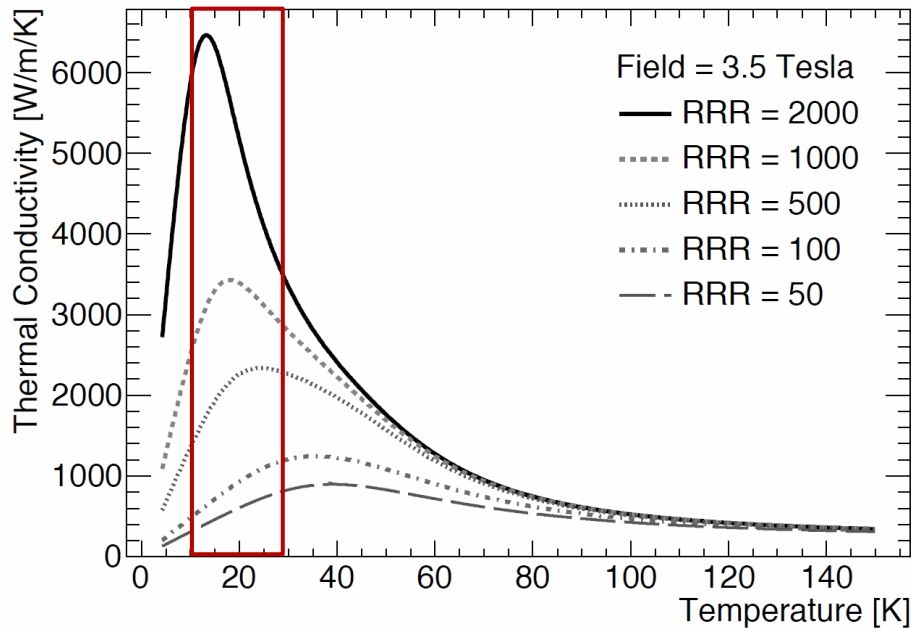
- Conduction cooling operation in the temperature range of 20 K

► High magnetic field tolerance of I_c

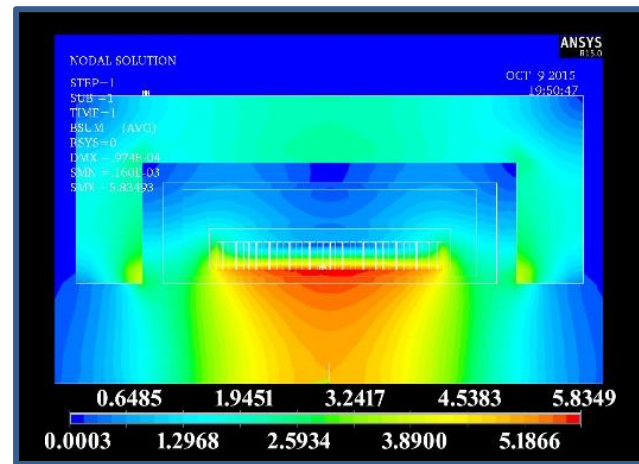
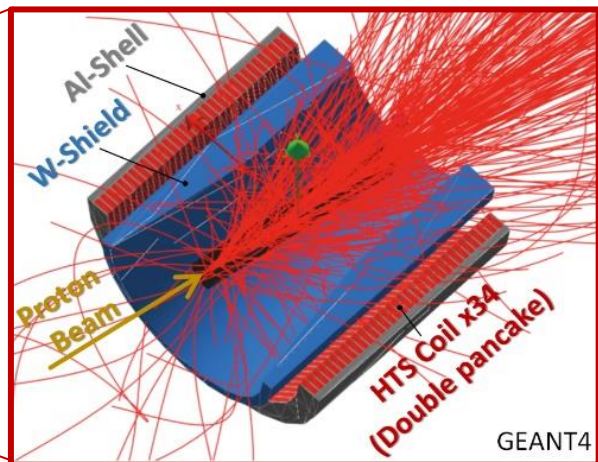
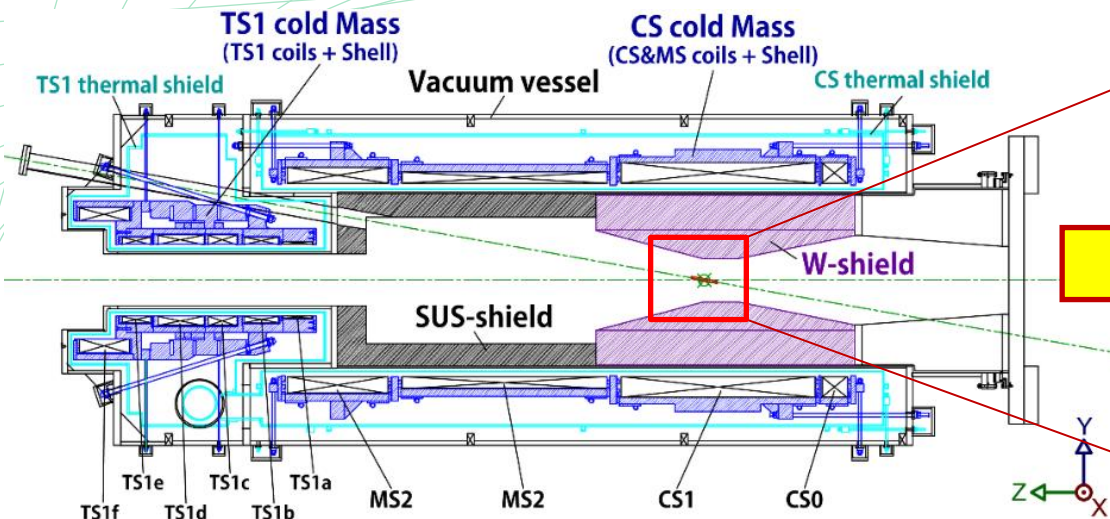
- Potential for 20T class high field magnet



Thermal Conductivity of Aluminium



設計研究 (小型ミュオン源 COMET-Phase-I)



1. サイズ縮小

- 1/100 (45 t → 0.43 t)

2. 冷却条件の改善

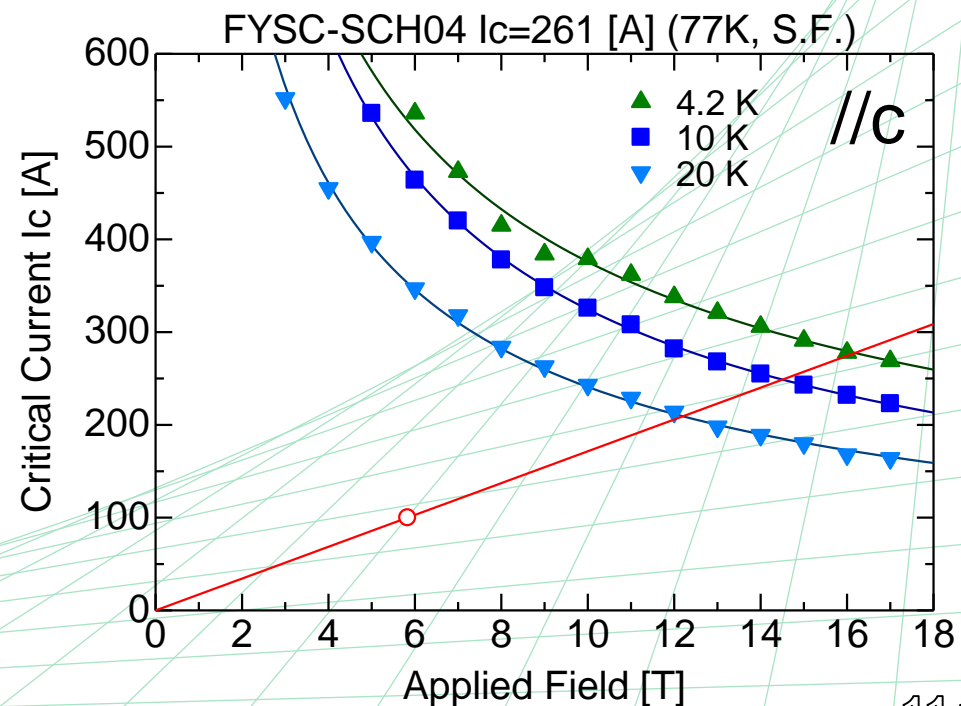
- 発熱密度: 0.43 W/kg (x10)

- 発熱量: 7.1 W (1/10)

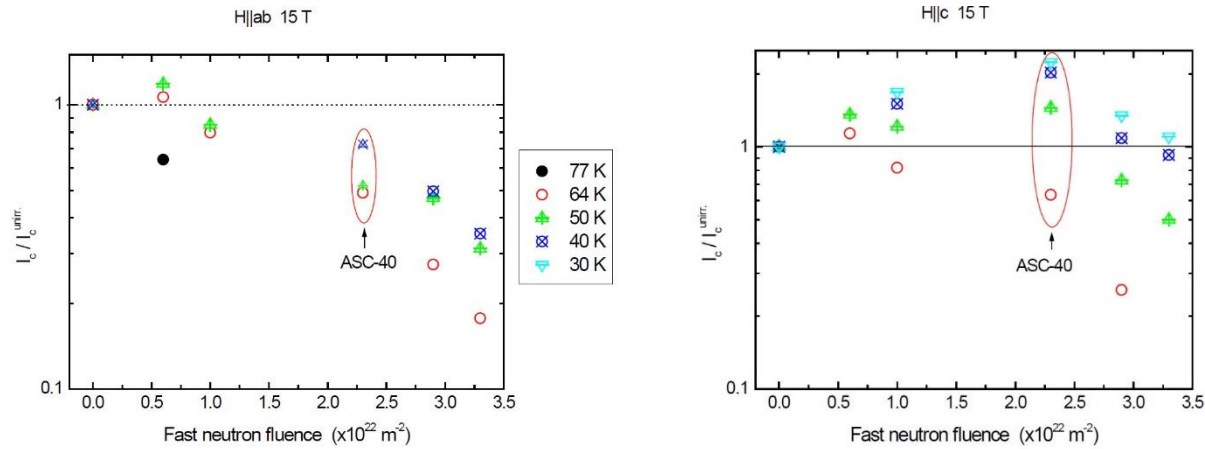
- コイル温度: 21.6 K (20K冷却)

3. 高磁場化?

- 10 T? (x2)

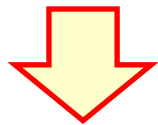


R. Fuger et al., Physica C 468 (2008) 1647., M. Eisterer, RESUMM2015.

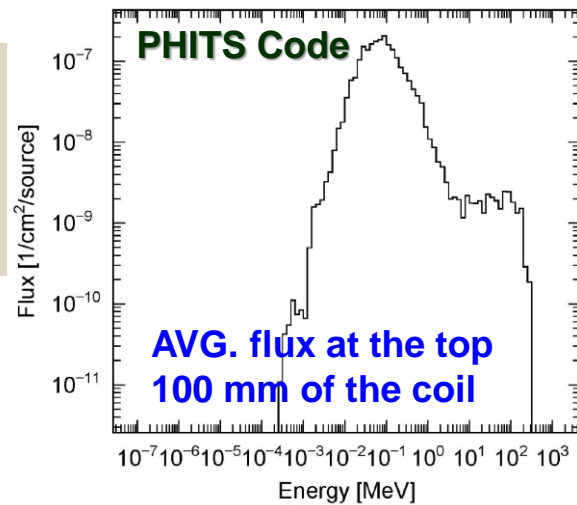


I_c of REBCO degrades from $1 \times 10^{22} \text{ n/m}^2$ ← Target fluence

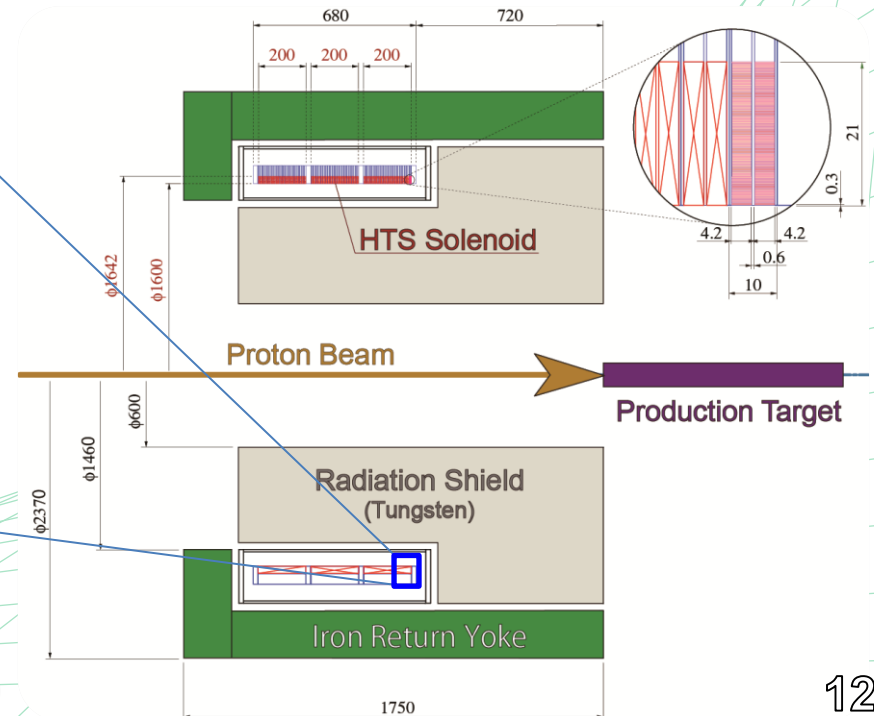
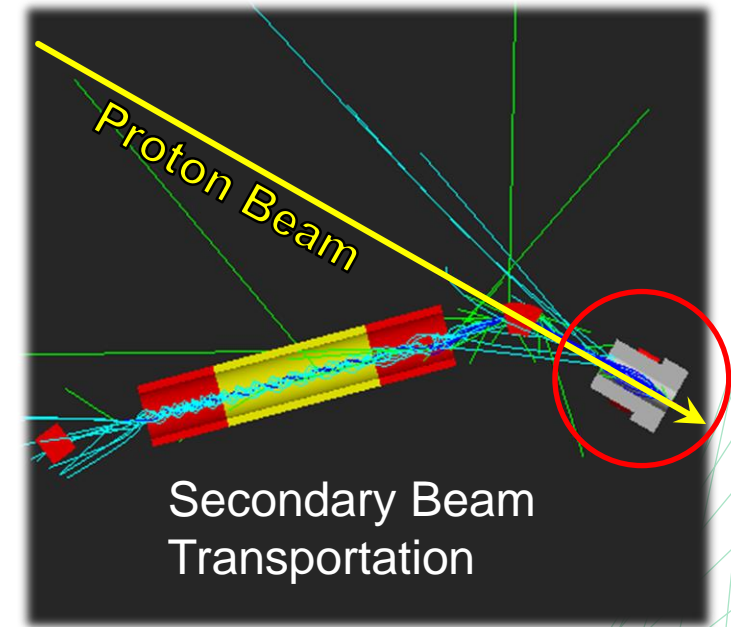
Magnet designed to reach $7.8 \times 10^{20} \text{ n/m}^2$ fluence in 10 years (~130 MGy, 650 W)



Massive tungsten alloy radiation shield is required

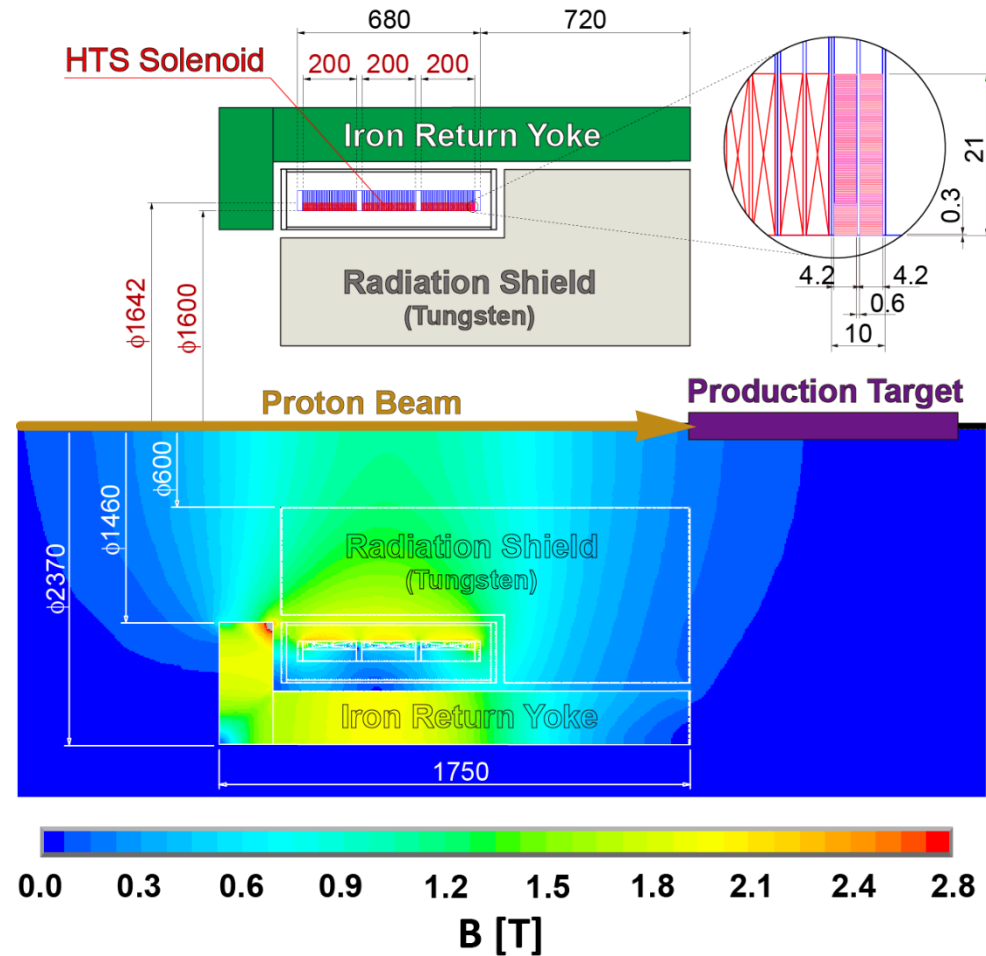


Integrated flux: $7.74 \times 10^{20} \text{ n/m}^2/\text{y} (@1 \text{ MW})$

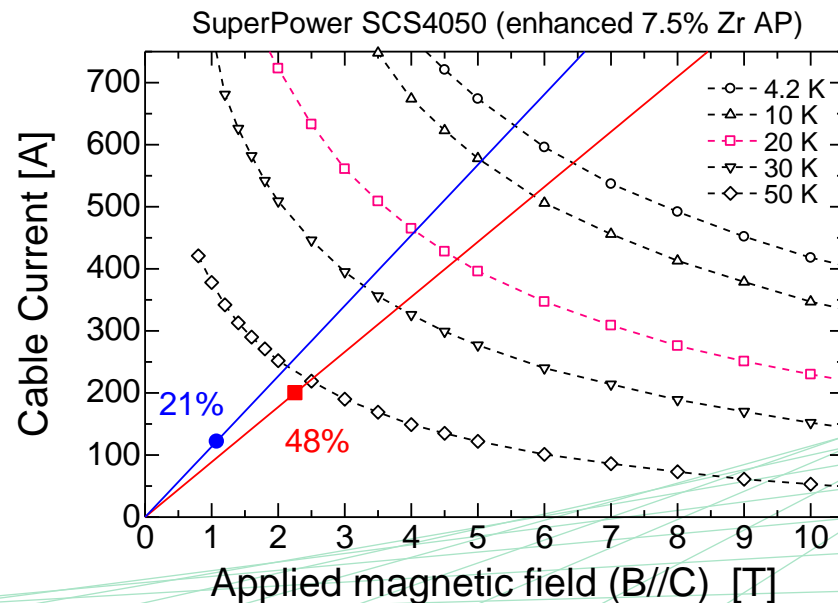


Stack of double pancake coil

- ID=1600 mm, T=21 mm, L=10 mm, 70 turns/layer
- Number of double pancake coils: 60 (20 x3)
- Conductor : REBCO, W=4 mm, T=0.1 mm
- Insulation: Mineral, t=0.1 mm
- Operation Temperature: 20 K (He gas cooling with pipe)
- Transport current: 200 A (Load line ratio: 0.48)
- Peak Field: 1.11 T at center, 2.25 T (B//c) at coil (200 A)



- Current density:
128 A/mm²
- Load line ratio:
48%



□ 磁石材料の照射効果

➤ 中性子照射

- REBCO線材, セラミックコーティング試料, BT-GFRP

➤ ガンマ線照射

- REBCO線材, セラミックコーティング試料

□ 無機絶縁超伝導磁石開発

➤ REBCOと磁石材料へのセラミックコーティング

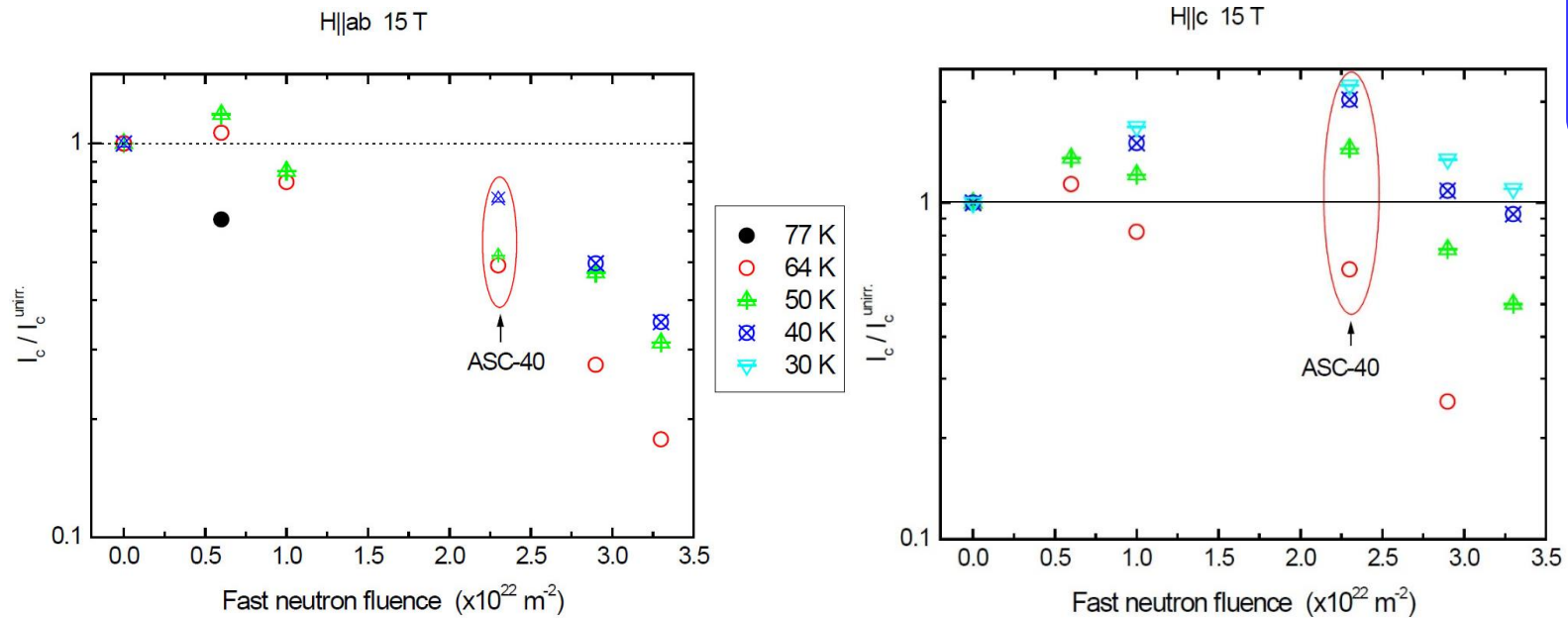
➤ 無機絶縁コイルの試作

➤ 冷却・励磁試験

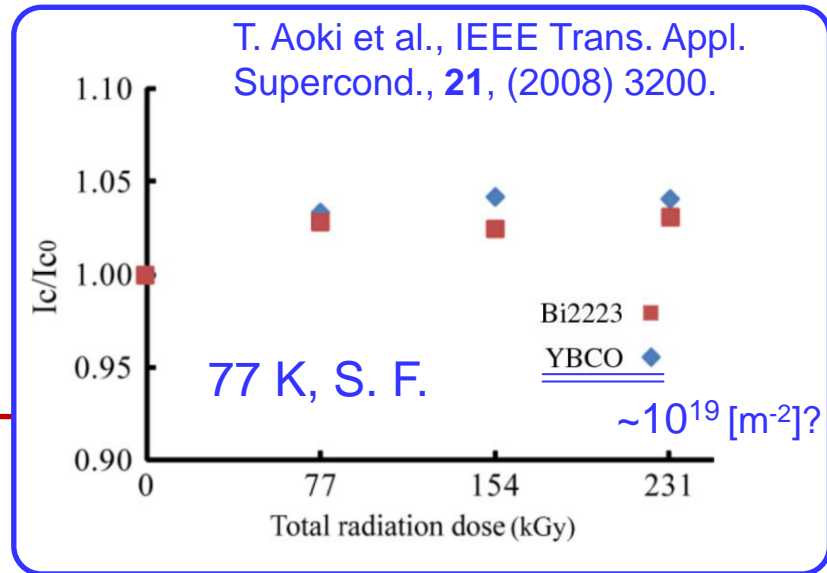
REBCO線材の中性子照射

中性子照射効果

- 人工ピン導入を目的とした低線量照射(バルク、線材)
- 核融合への応用を目指した線材への高線量照射(ウィーン工科大)



R. Fuger et al., Physica C 468 (2008) 1647., M. Eisterer, RESUMM2015.

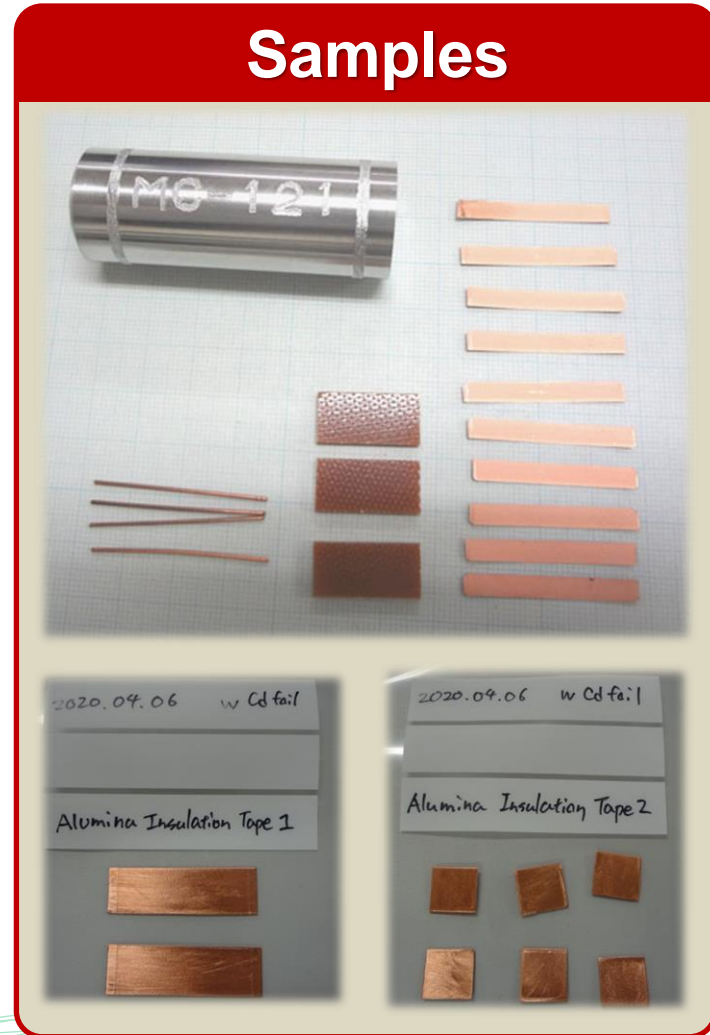


中性子照射の目的

・再現性の確認、現象の理解、データ取得(フルエンス, 温度, 磁場)

中性子照射の流れ

東北大学金属材料研究所附属 量子エネルギー材料科学国際研究センター



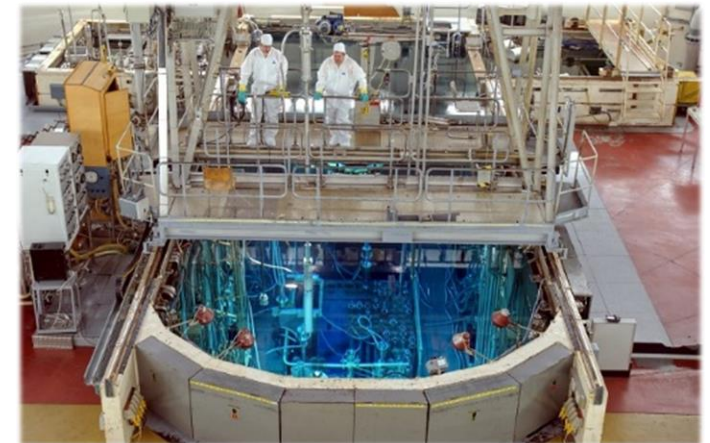
- 目標フルエンス:

$$0.1 \sim 10 \times 10^{22} \text{ n/m}^2$$

$$(E_n > 1 \text{ MeV}, T < 100^\circ\text{C})$$

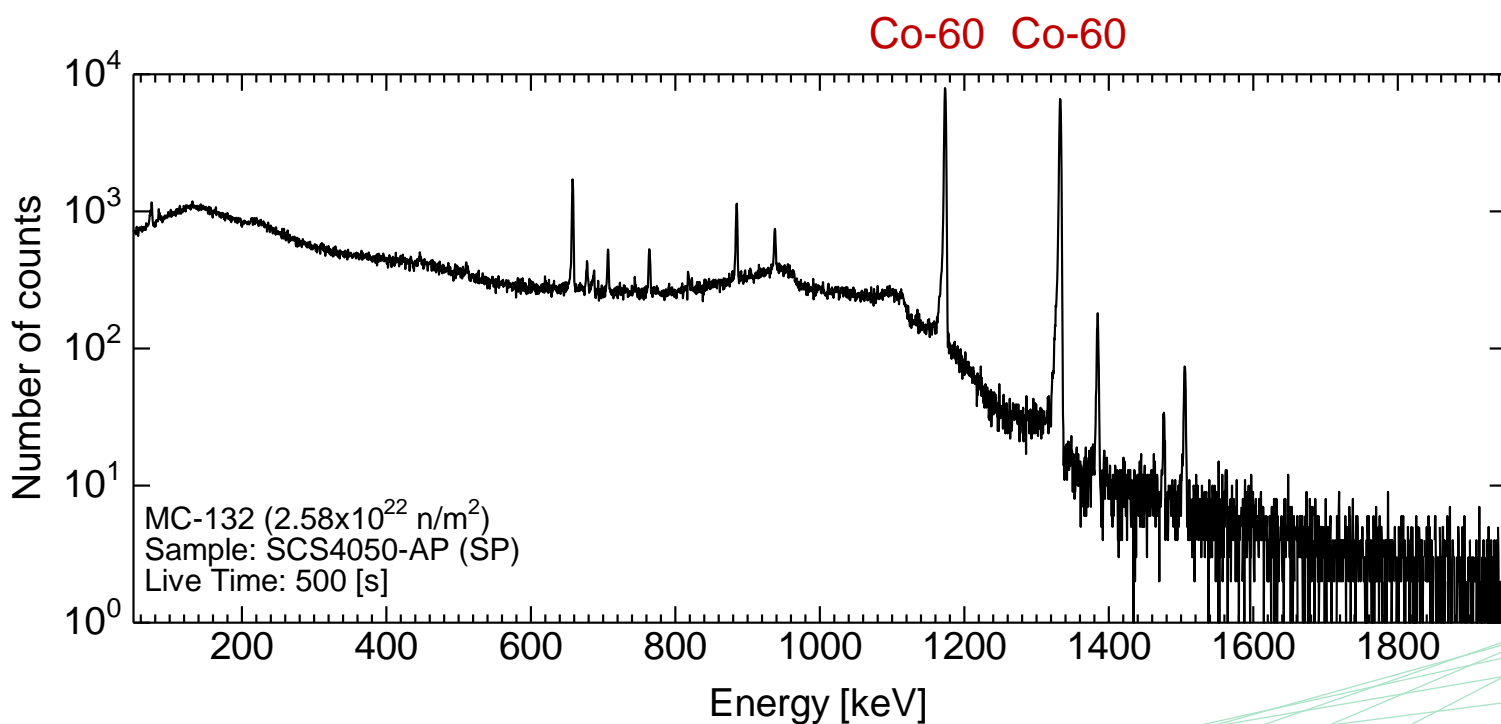
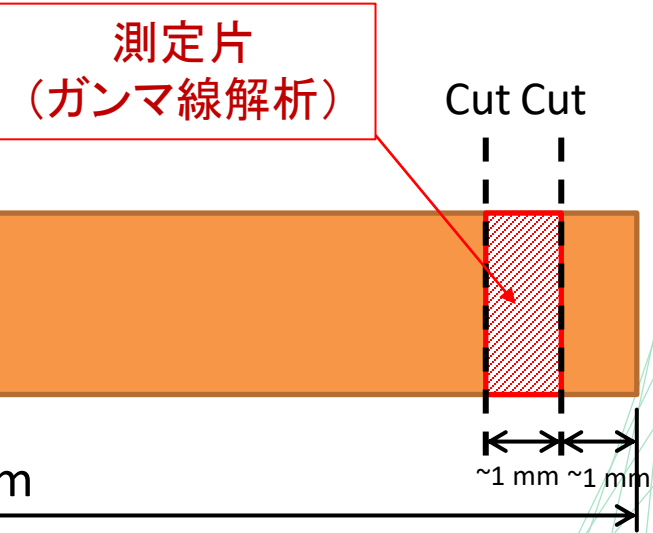
- TS2-PCS < $1 \times 10^{22} \text{ (n/m}^2)$

BR2 @Belgian nuclear
research center



REBCOの放射化

- 中性子フラックス: $7.92 \times 10^{22} \text{ n/m}^2$
- 照射終了日: 2015.05.18
- γ 線測定日: 2021.05.12
- 等価線量: 0.466 mSv/h (表面から15cm)

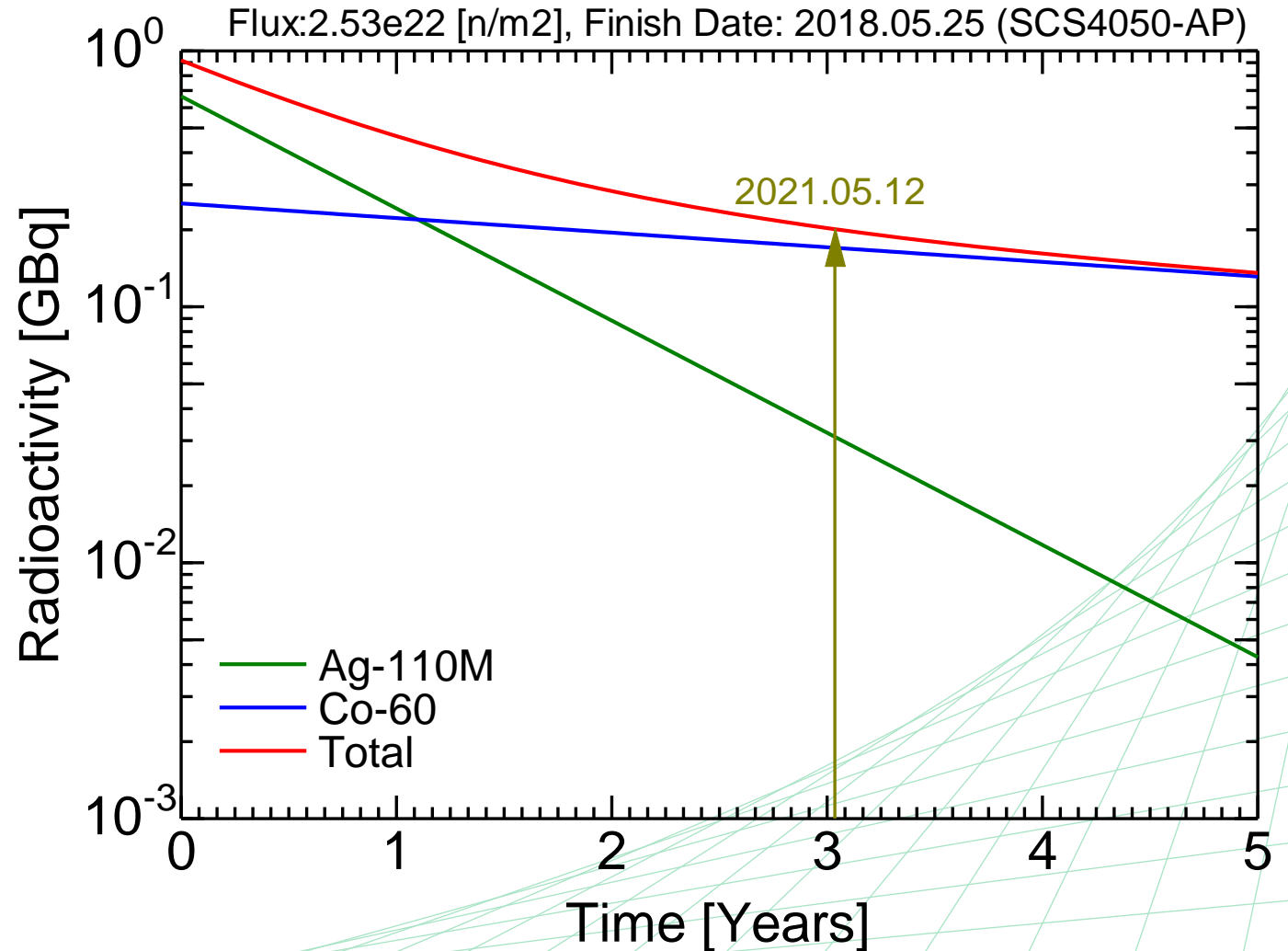


0.3 GBq/sample

| Element | Half-life | E (keV) | Counts | Retio |
|---------|-----------|---------|--------|-------|
| Ag-110M | 250.4 d | 658.15 | 4342 | 0.043 |
| Ag-110M | 250.4 d | 677.69 | 528 | 0.005 |
| Ag-110M | 250.4 d | 687.21 | 429 | 0.004 |
| Ag-110M | 250.4 d | 706.75 | 785 | 0.008 |
| Ag-110M | 250.4 d | 764.37 | 937 | 0.009 |
| Ag-110M | 250.4 d | 818.03 | 716 | 0.007 |
| Ag-110M | 250.4 d | 885.12 | 2326 | 0.023 |
| Ag-110M | 250.4 d | 937.73 | 1534 | 0.015 |
| Co-60 | 5.271 y | 1173.71 | 46856 | 0.466 |
| Co-60 | 5.271 y | 1332.54 | 41098 | 0.409 |
| Ag-110M | 250.4 d | 1384.64 | 561 | 0.006 |
| Ag-110M | 250.4 d | 1475.83 | 105 | 0.001 |
| Ag-110M | 250.4 d | 1505.39 | 280 | 0.003 |

残留放射能

- Co-60の半減期: 5.3年
 - Ag-110Mの半減期: 0.7年
- 残留放射能の減少は緩やかである...

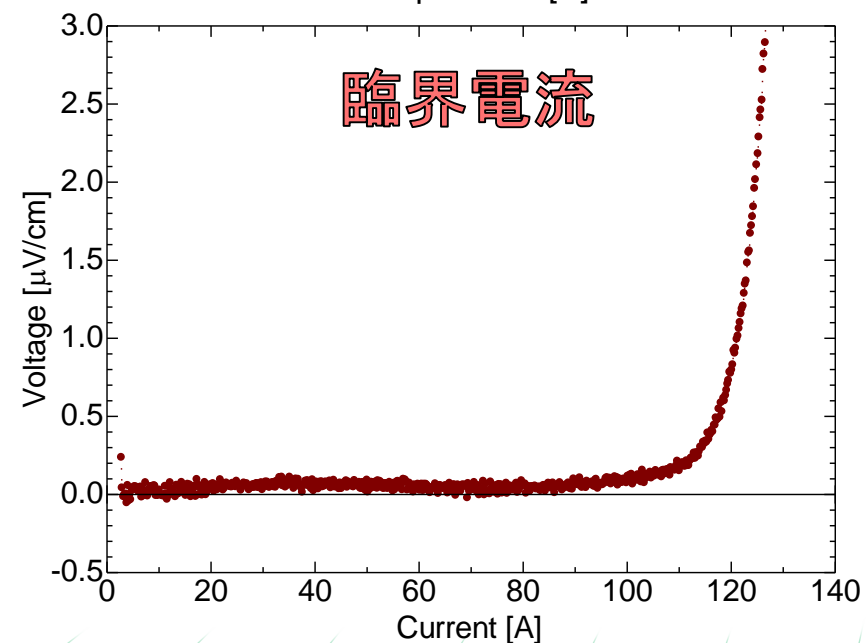
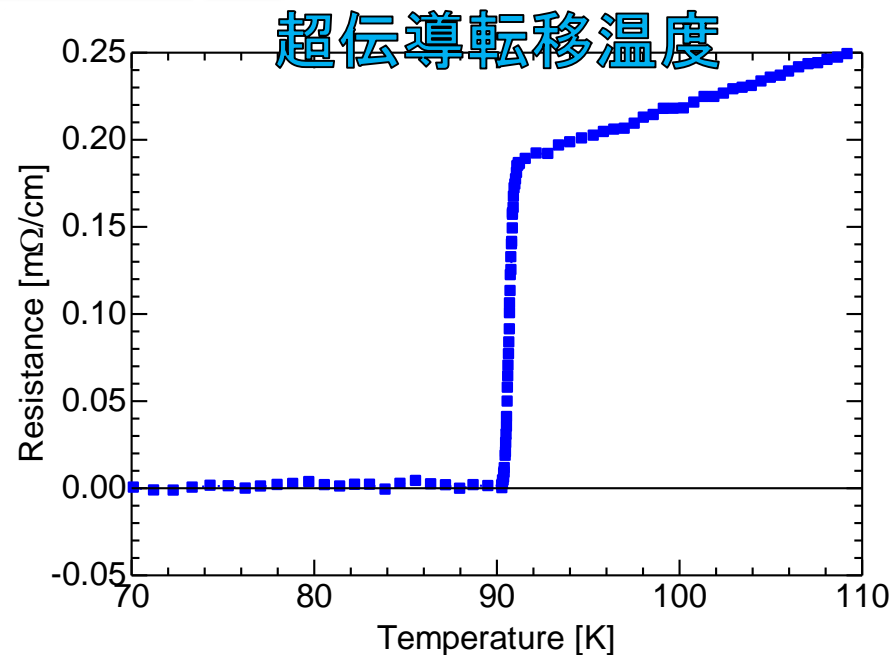


照射後の超伝導特性の評価

超伝導特性評価装置@ホット実験室

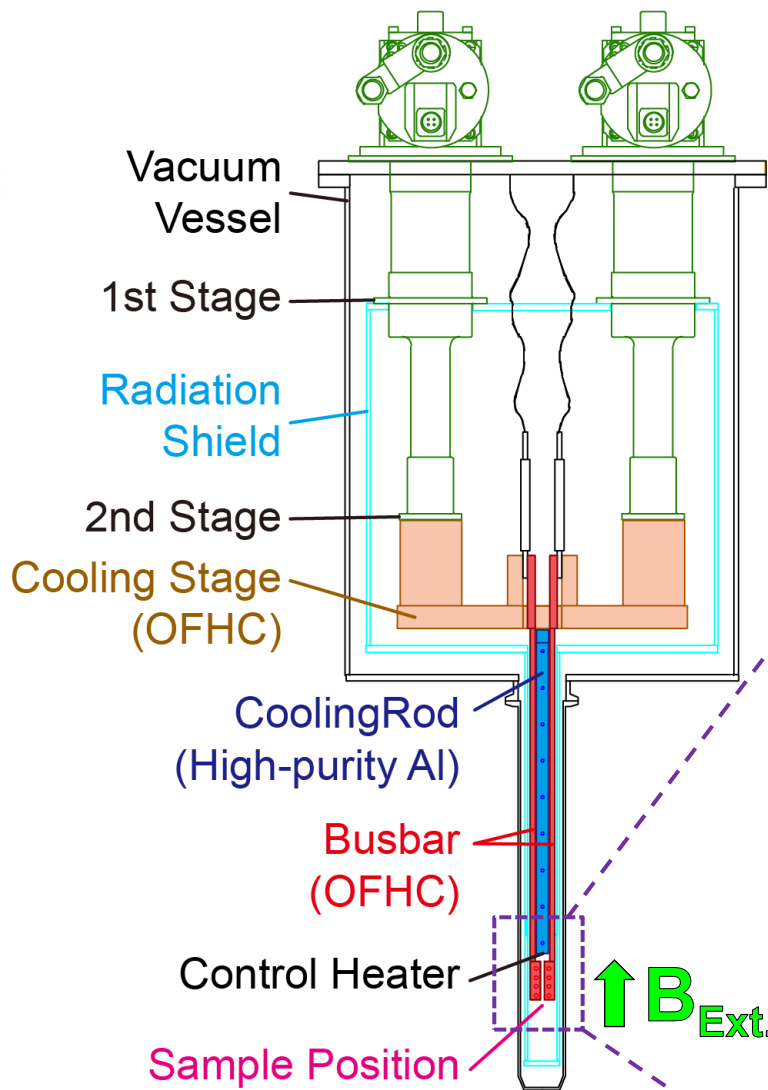
- 可変温度インサート
- 15.5 T 超伝導磁石

| | |
|---------------------|----------|
| Temperature Range | 4 ~ 80 K |
| Max. Current | 500 A |
| Max. External Field | 15.5 T |



可変温度インサート (VTI)

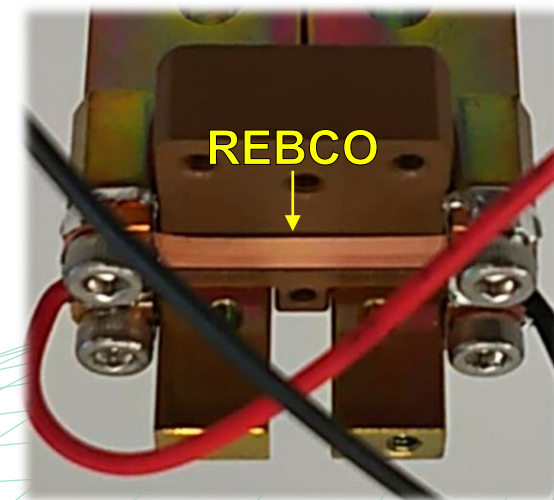
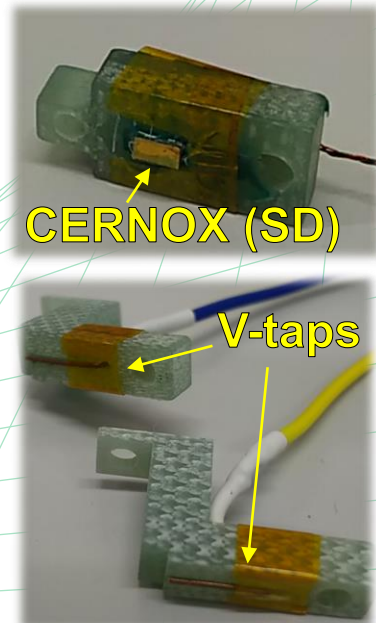
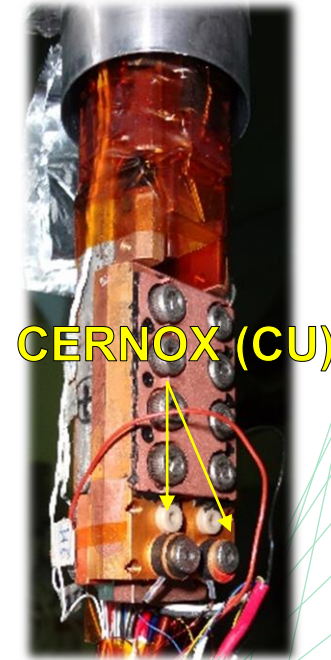
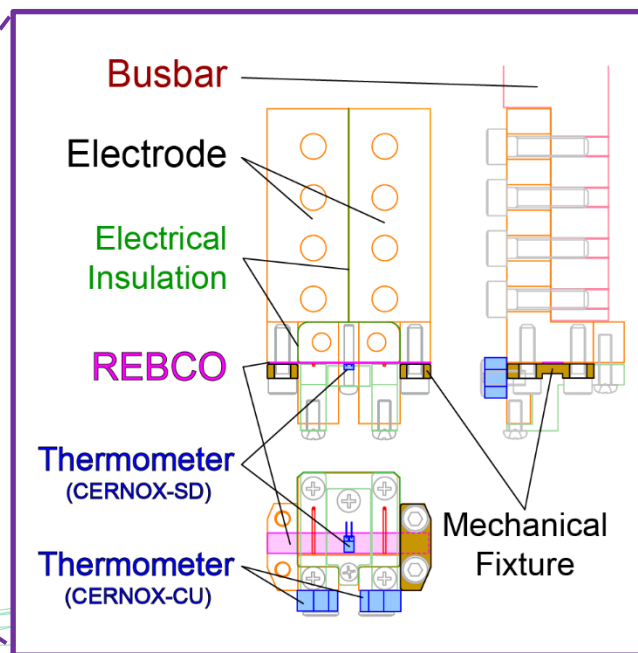
2x GM-refrigerators



伝導冷却方式

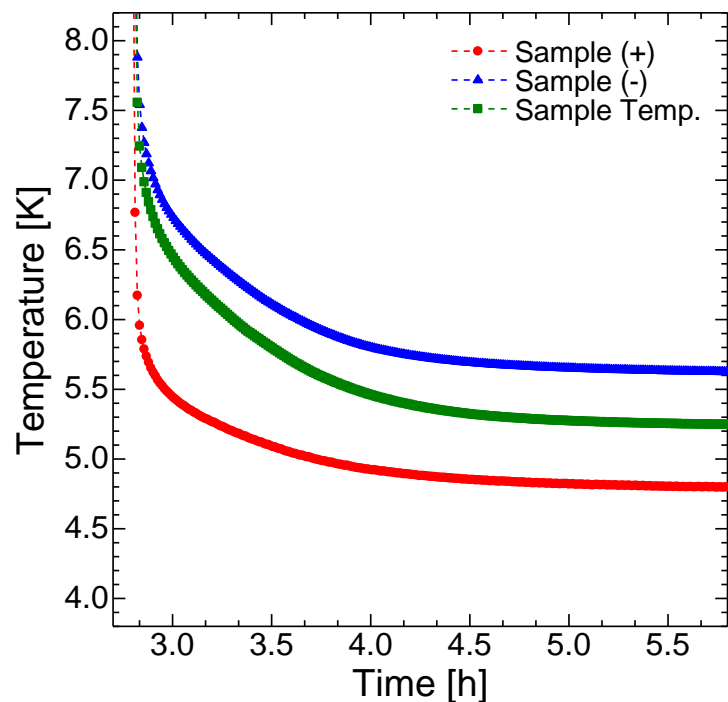
GM冷凍機 → 冷却ロッド (Pure-Al) → バスバー (OFHC)
→ 電極 (OFHC) → REBCO試料

被ばくの最小化のための単純で
素早い試料の交換方法
→ 機械的な締結 (ボルト)
ジュール発熱による温度上昇

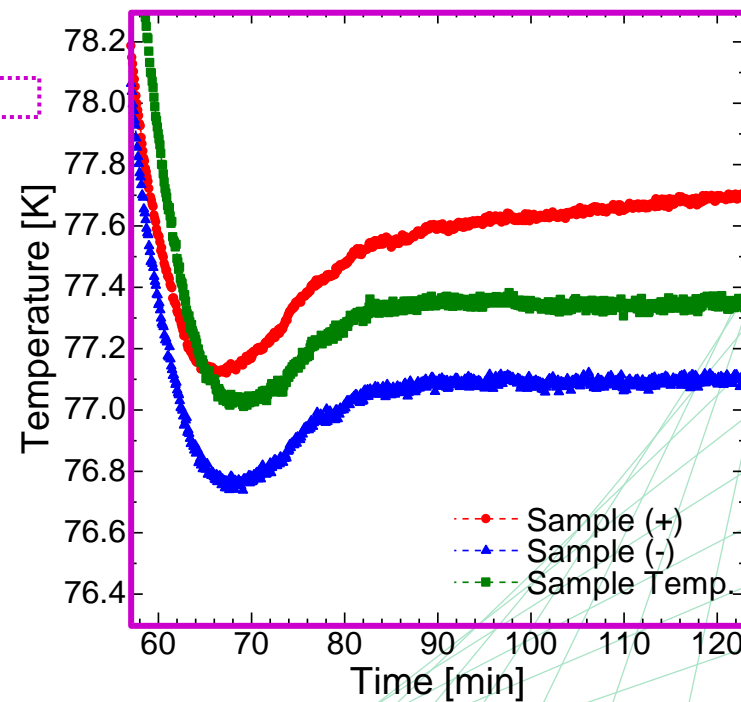
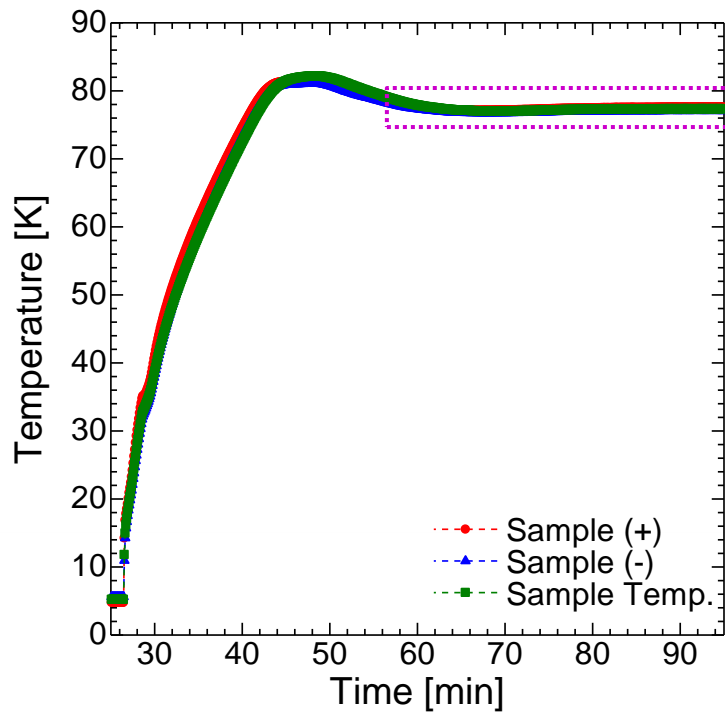


到達温度と温度制御

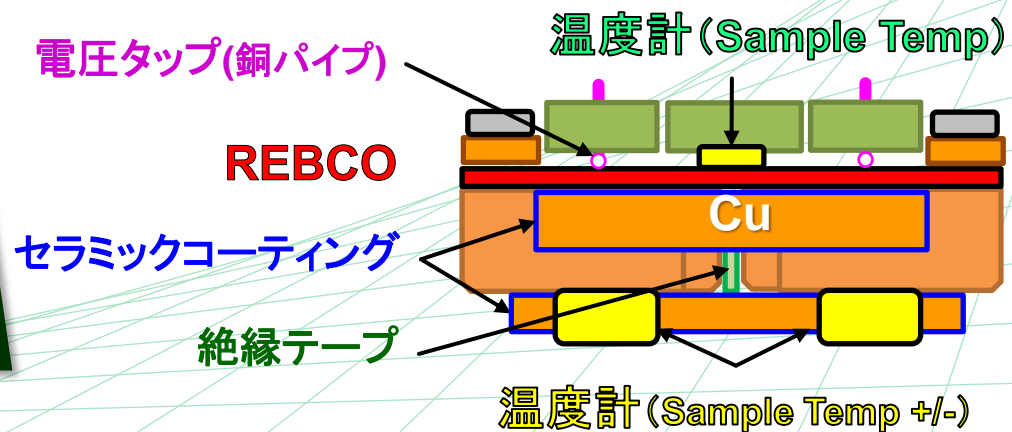
到達温度

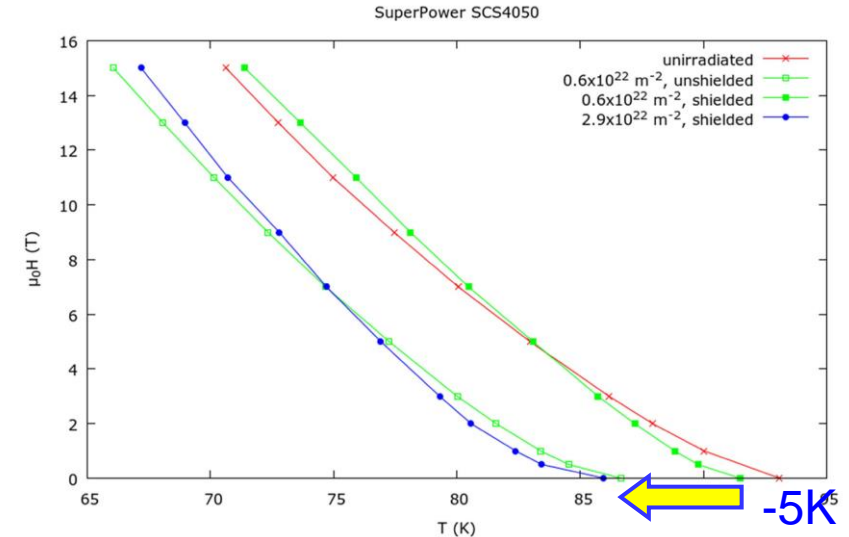
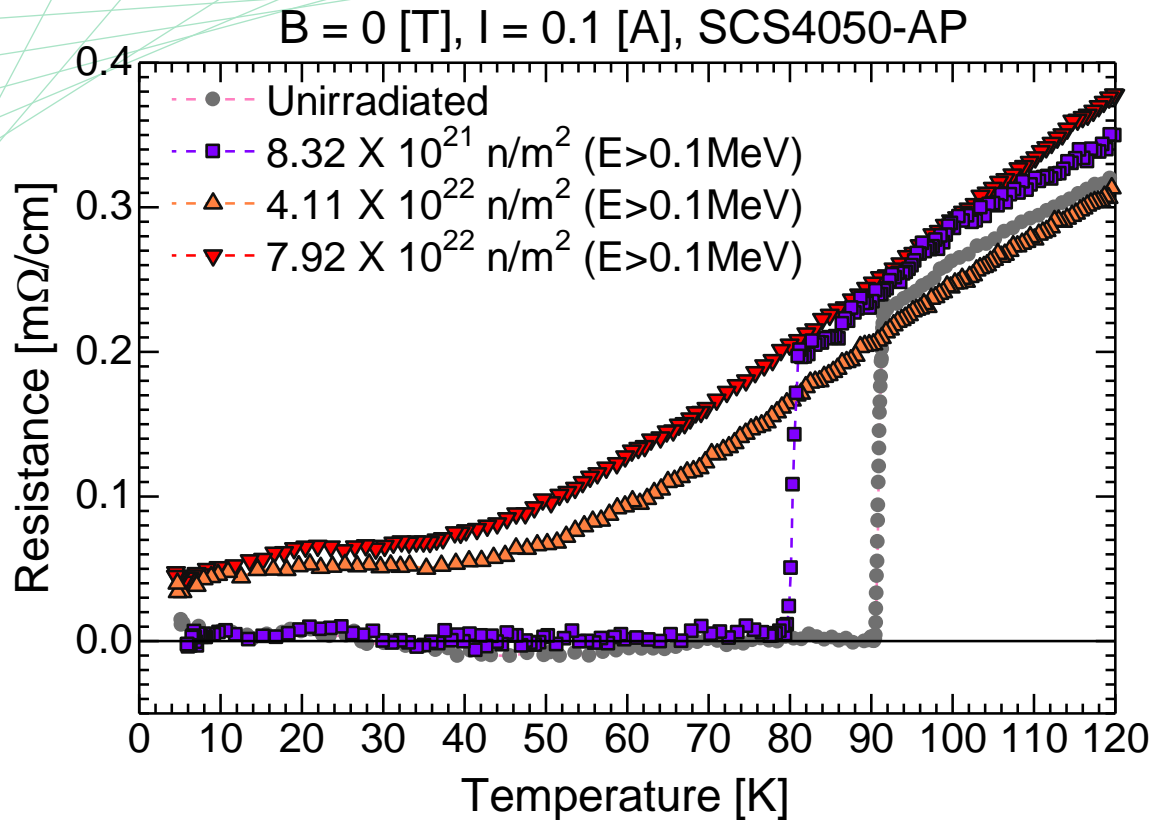


77.3 Kでの温度制御



- 電極間に温度差がある
- 温度変化に伴い温度差も変化する
- 絶縁による熱抵抗に差が生じている



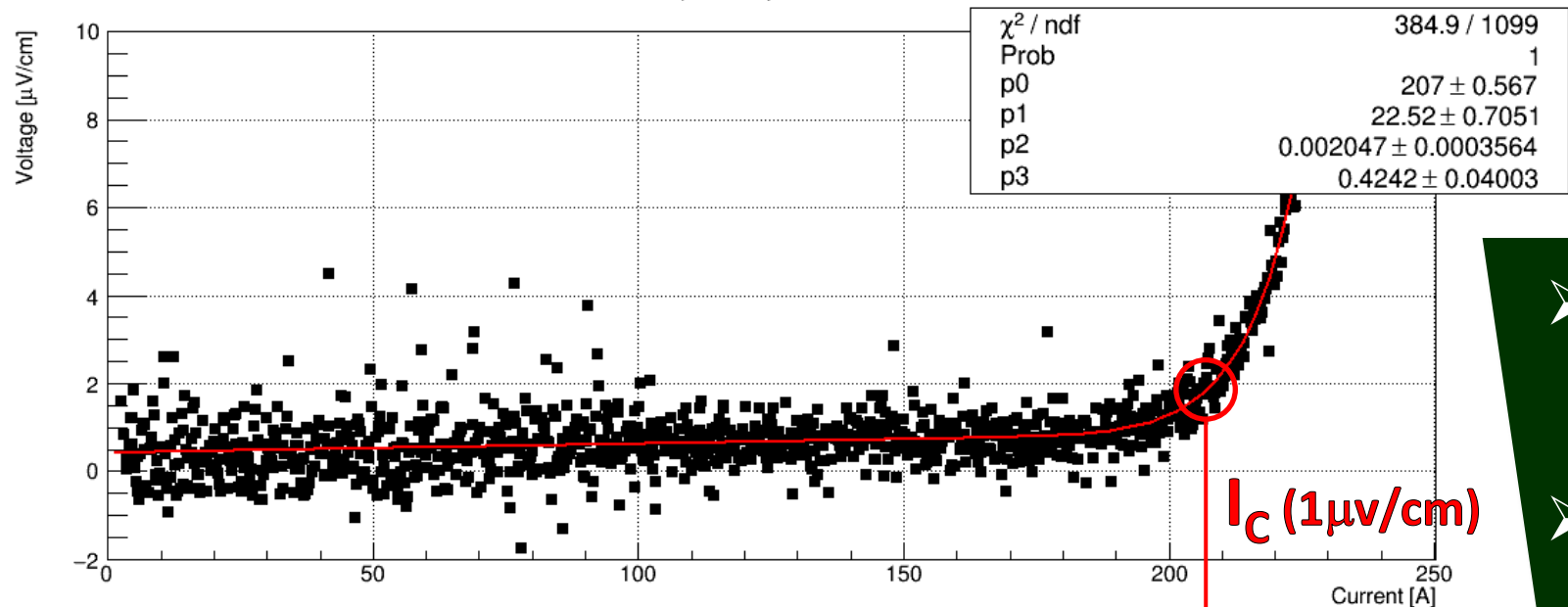


- No significant degradation in shielded HTS tape at $6 \times 10^{21} \text{ n/m}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$).
- Reduction of T_c by 5 K in unshielded sample.
- Reduction of T_c by 5 K in shielded sample at $2.9 \times 10^{22} \text{ n/m}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$).

- ▶ $4.11 \times 10^{22} \text{ n/m}^2$ 以上でGdBCOの超伝導性が消失
- ▶ $8.32 \times 10^{22} \text{ n/m}^2$ で転移温度が約10 K減少
- ▶ ウィーン工科大のデータと同じ傾向である

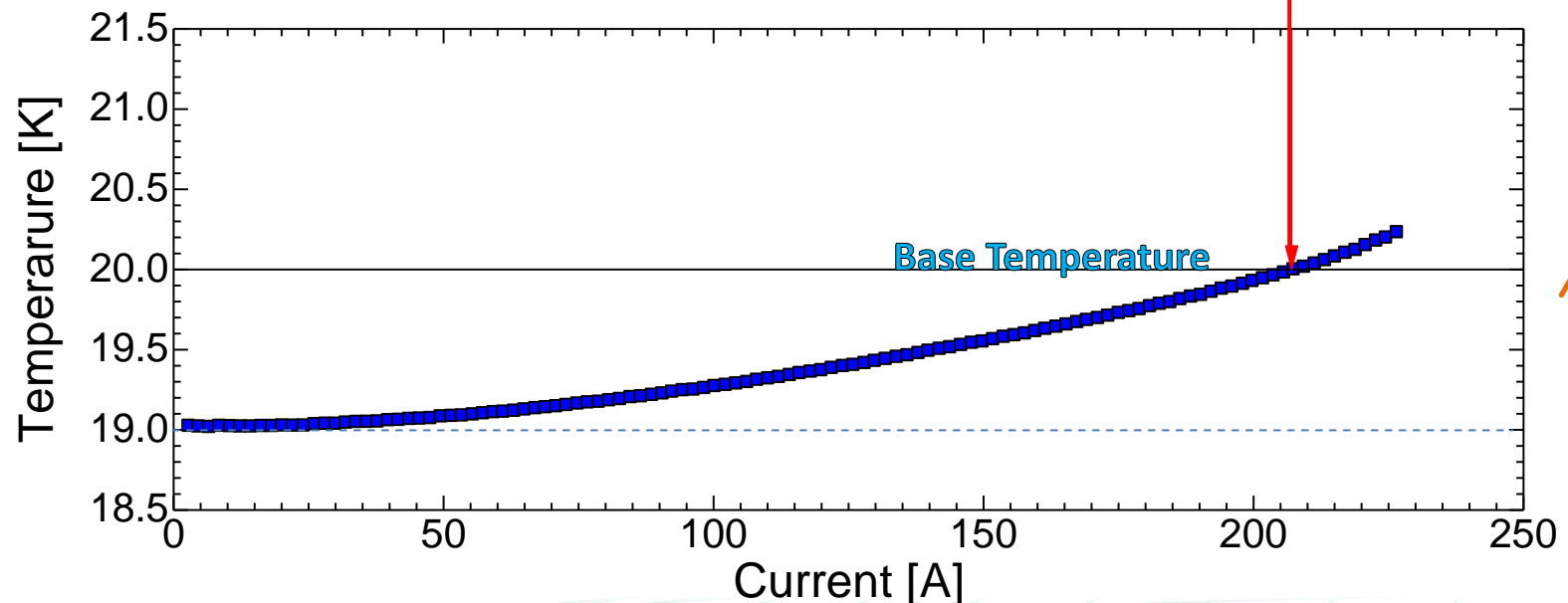
ジュール発熱による温度上昇

T=20K, B=5T, SCS4050-AP



➤ I_c の定義: **$1 \mu\text{V}/\text{cm}$**
(電圧タップ間距離: 1.4 cm)

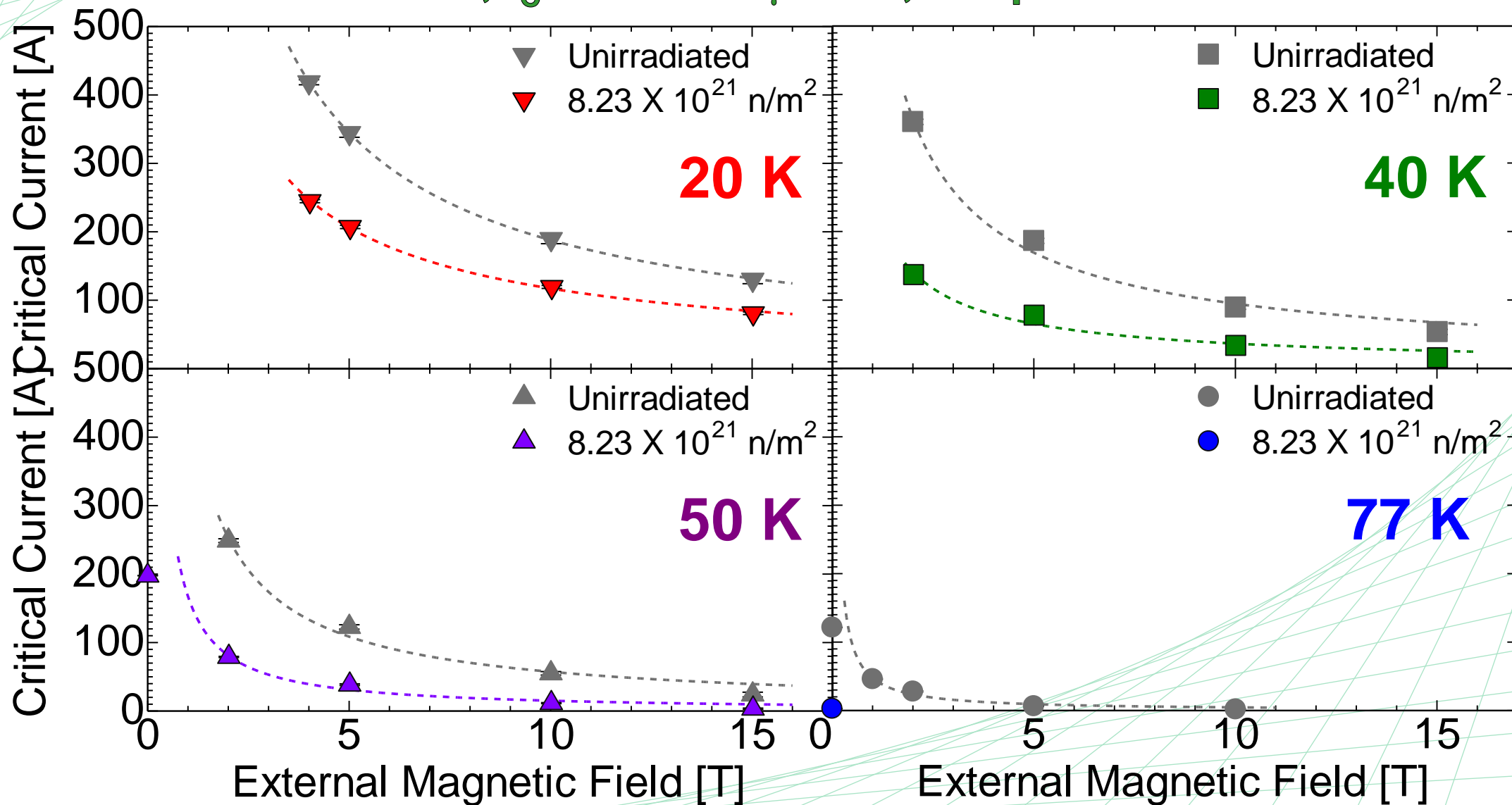
➤ 温度上昇を見込んでベース温度を調整している



↑ Temperature rise: 0.98 K

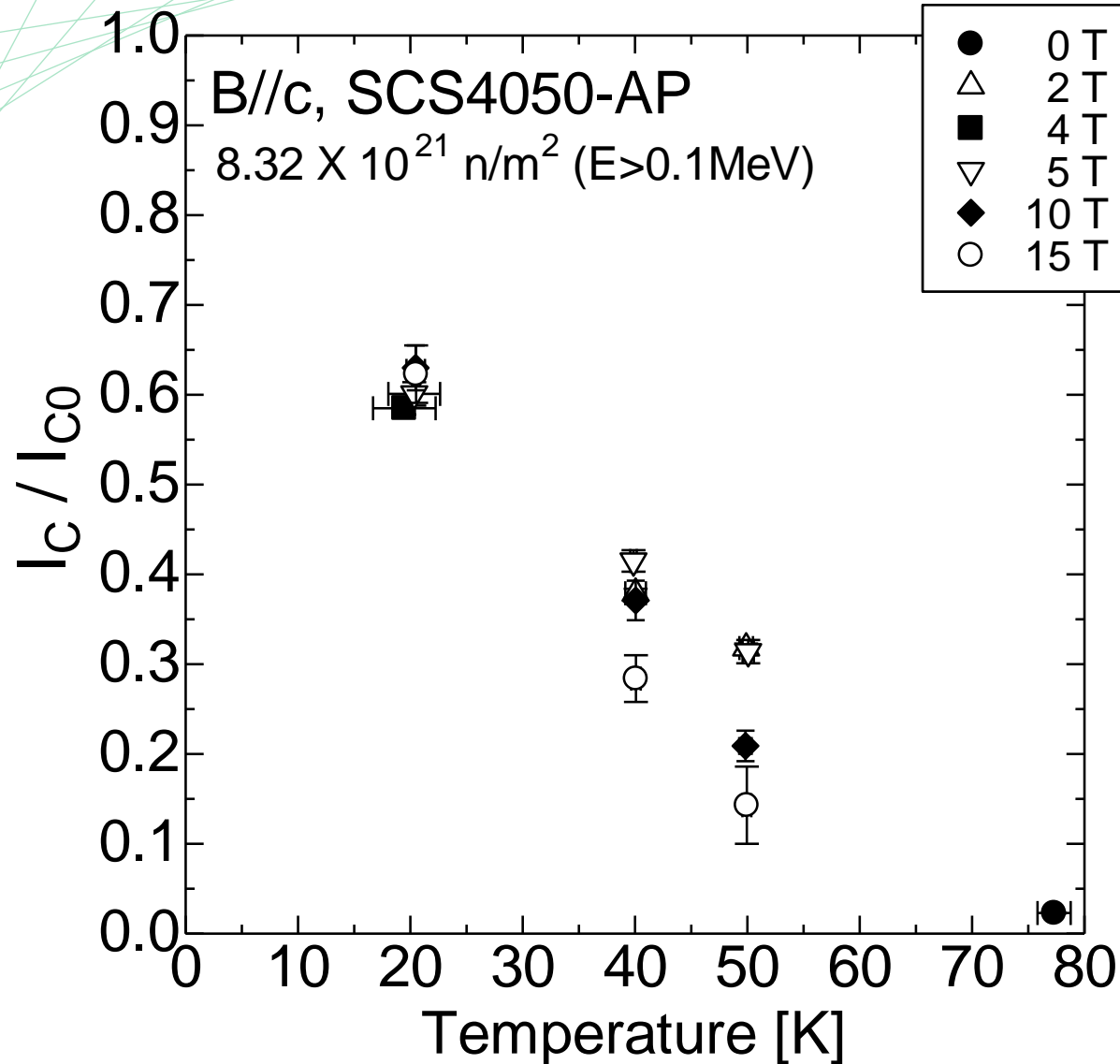
臨界電流 (I_C)の劣化

SCS4050-AP, I_C criteria: $1 \mu\text{V}/\text{cm}$, V-tap distance: 1.4 cm

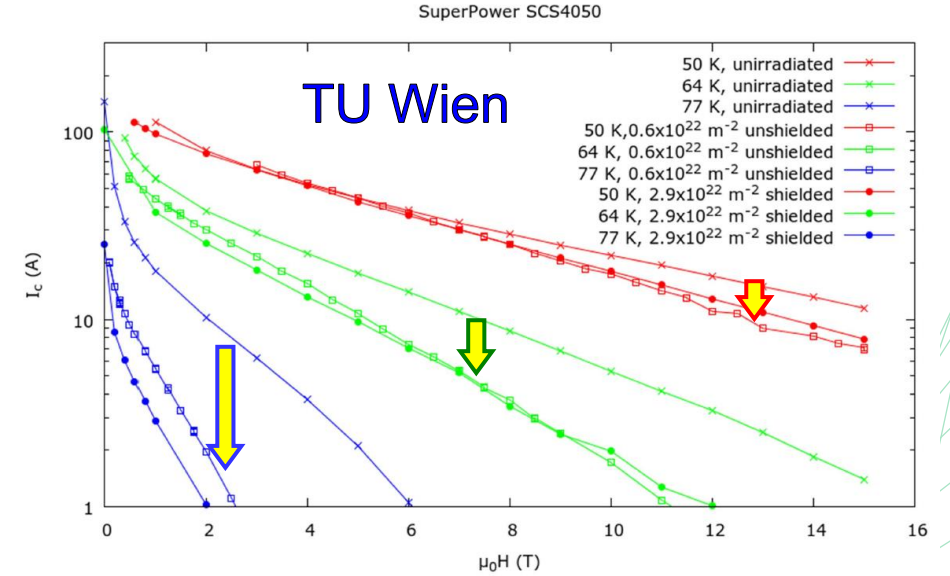


Fitting Function: C. Senatore, et al., Supercond. Sci. Technol, vol. 29, Dec. 2015, 014002.

劣化率と温度の関係



D. X. Fischer, et al., Supercond. Sci. Technol. 31 (2018) 044006

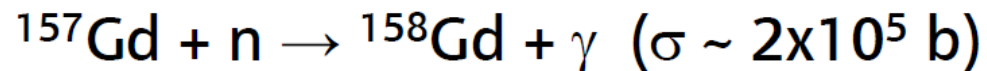


- ▶ 劣化率は温度に対して一定ではない
- ▶ 温度が低い方が影響が小さい
 (0.6@20K ⇔ 0.02@77K)
- ▶ ウィーン工科大のデータと同傾向にある

運転温度が低い方が有利？

- ▶ 中性子照射によるGdBCOの劣化は 10^{21} n/m² オーダーで起こる。
- ▶ ウィーン工科大のデータによると熱中性子の寄与が大きい。
→シールド有/無の照射
- ▶ Gdは中性子反応の断面積が極めて高いがその影響はあるのか？
→別のREBCO線材 (EuBCO、YBCO) [Gd: 49000 barn, Eu: 4600 barn, Y 8.9 barn]

Neutron capture reactions (low energy neutrons)



Recoil energy: ~ 30 eV \rightarrow single displaced atom

- ▶ 人工ピンの影響は？ →人口ピン有/無の試料

2023年度からJRR3での照射を開始予定

6. 3. 無機絶縁コイルの開発

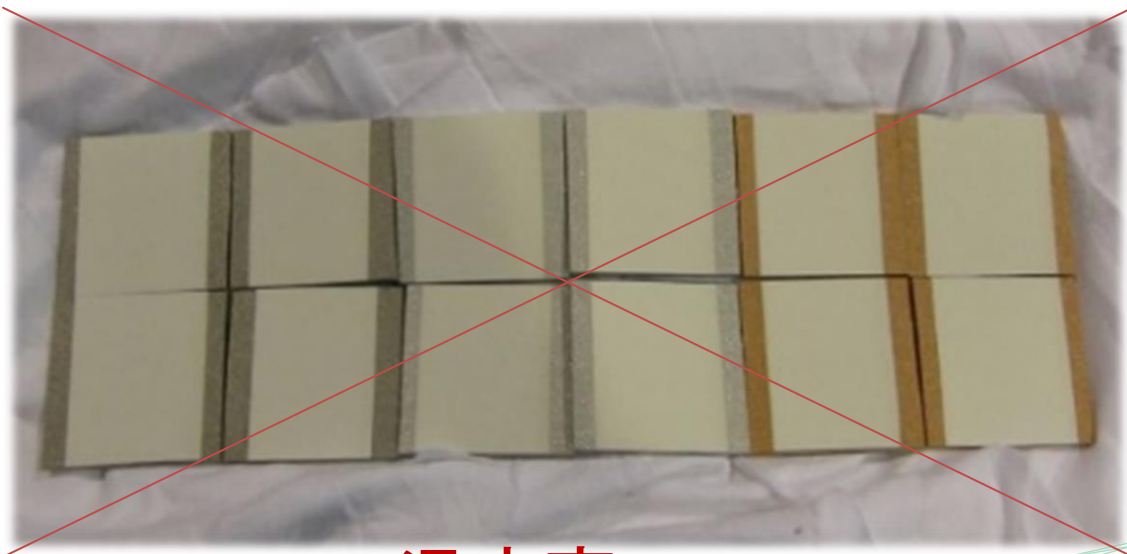
セラミックの成形

セラミック絶縁

- 樹脂材料と比較して高い放射線耐性
- 樹脂材料と比較して高い熱伝導率 ($\text{Al}_2\text{O}_3:32, \text{SiO}_2:10 \gg \text{エポキシ}:0.3$ [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ @300K])
- 線材や磁石材料と近い線膨張係数

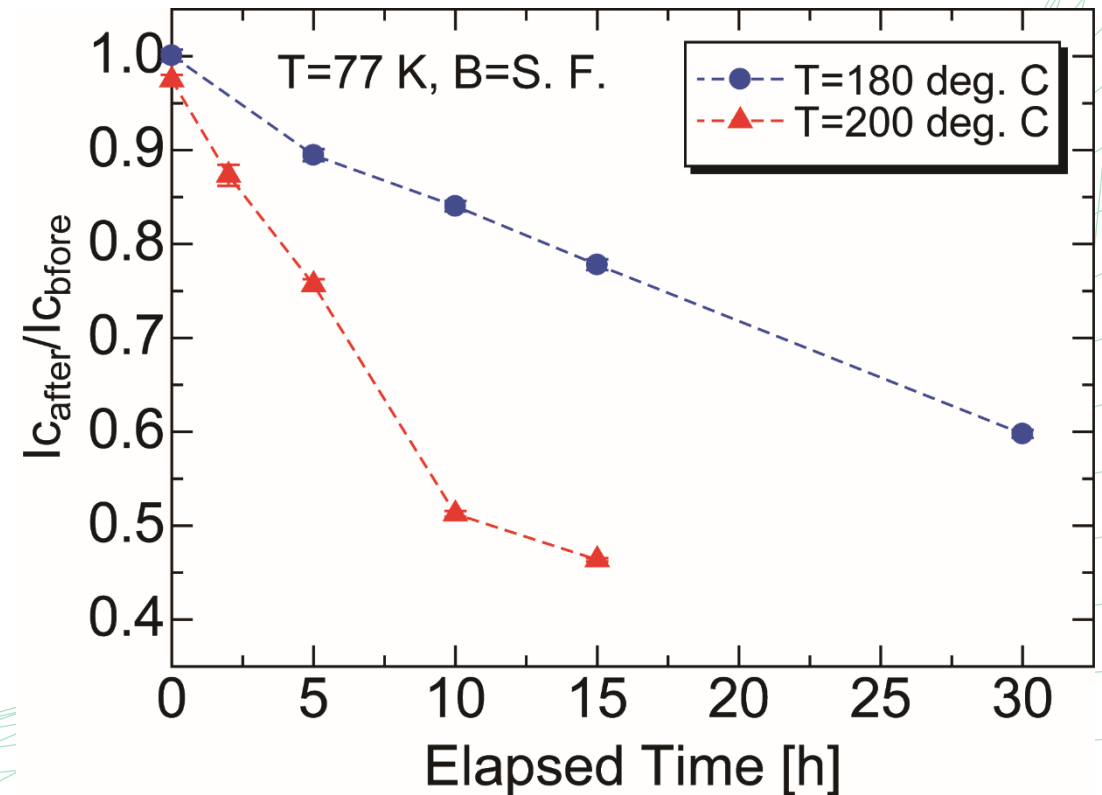
セラミックの焼成温度 $> 1000^\circ\text{C}$

→ REBCOの超伝導性が消失



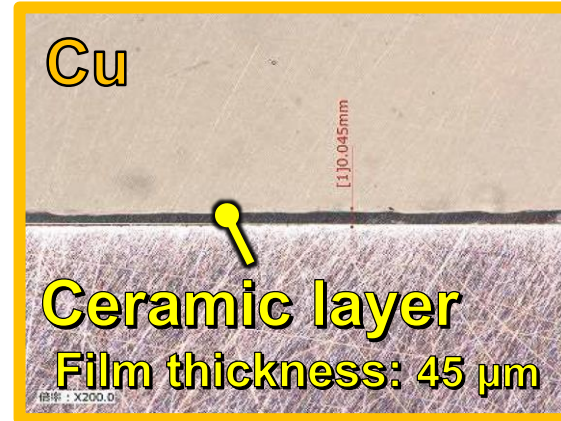
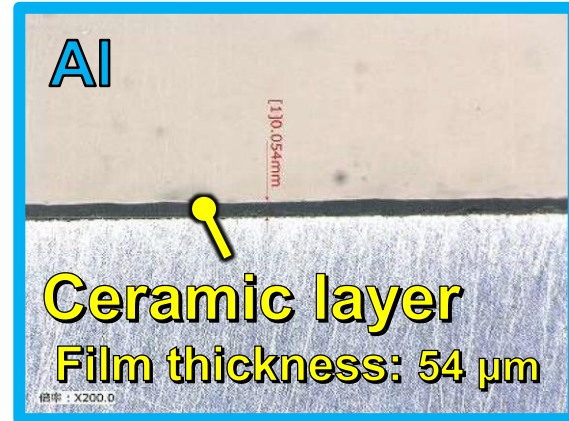
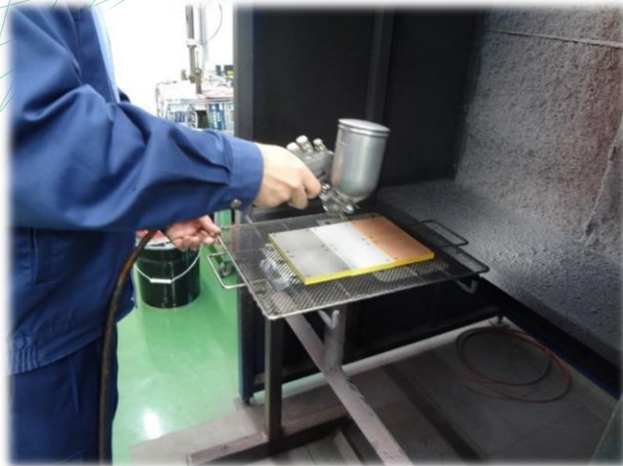
温度高い？

熱負荷による I_c の低下

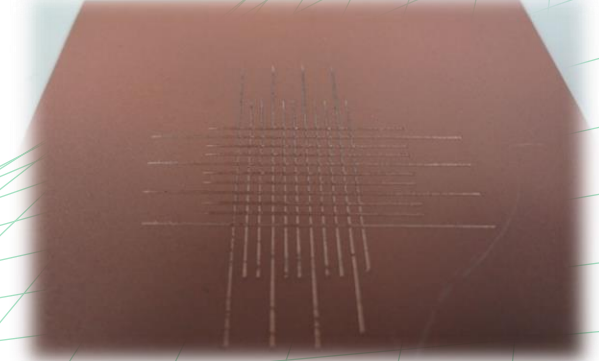


セラミックコーティング技術の応用

目標膜厚: 50 μm , 耐電圧: > 2 kV



クロスカット試験
(ISO 2409, Paints and Varnishes)



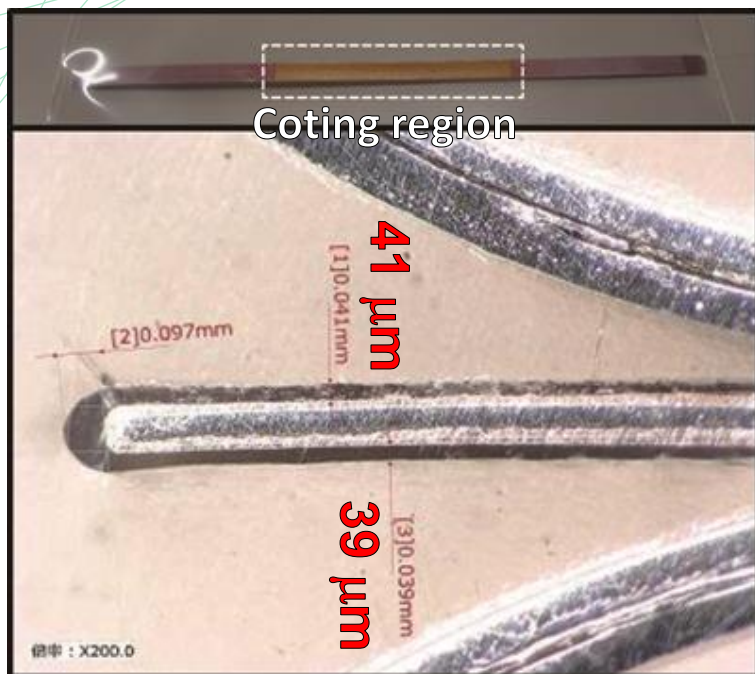
Class 0 (0/100)

セラミックコーティングの最適条件

- コーティング剤: Al_2O_3 : SiO_2 = 1 : 1 (G-92-5, NIKKEN .Ltd)
- 乾燥温度 80°C 、 $\sim 10 \mu\text{m}$ 厚の重ね塗りによる膜厚調整
- 最終熱処理: 100°C , 20 min

短尺REBCO試料によるコーティング試作

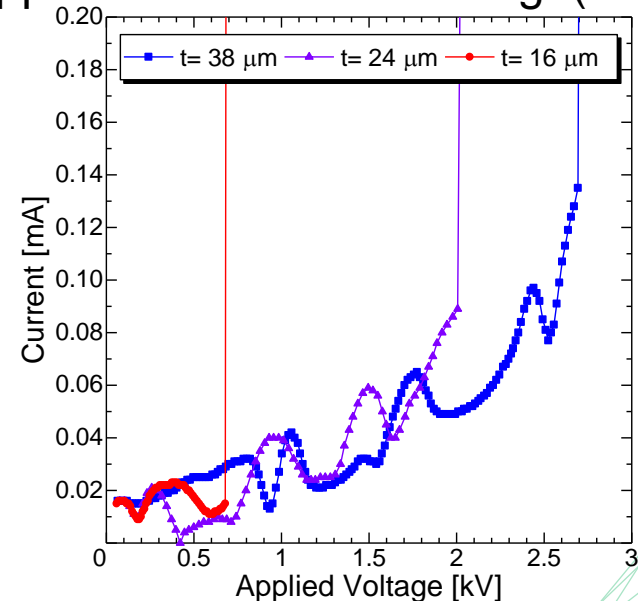
SCS4050-AP (SuperPower)



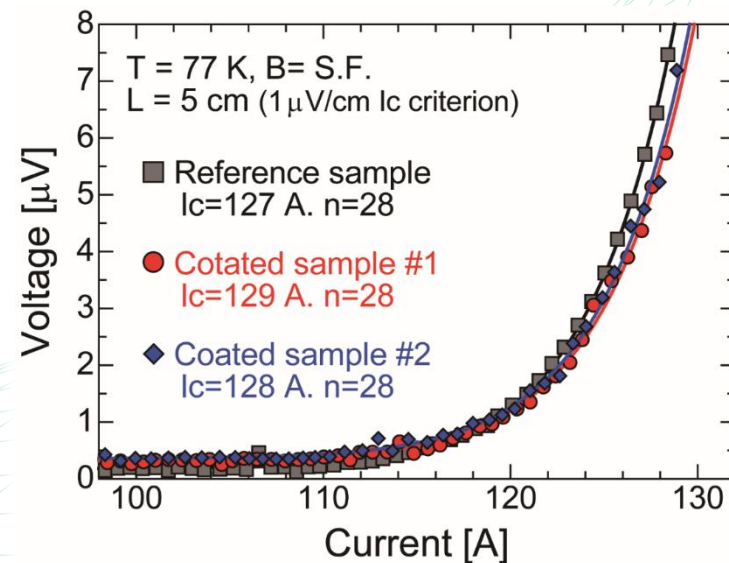
Withstand voltage

- $t=16 \mu\text{m}$: 0.679 kV
- $t=24 \mu\text{m}$: 2.006 kV
- $t=38 \mu\text{m}$: 2.693 kV

Applied load with AC voltage(50 Hz)



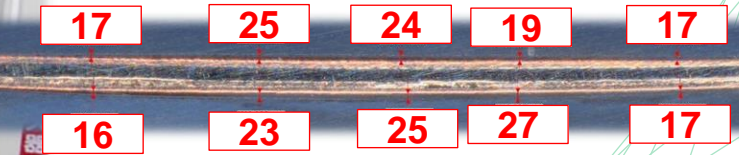
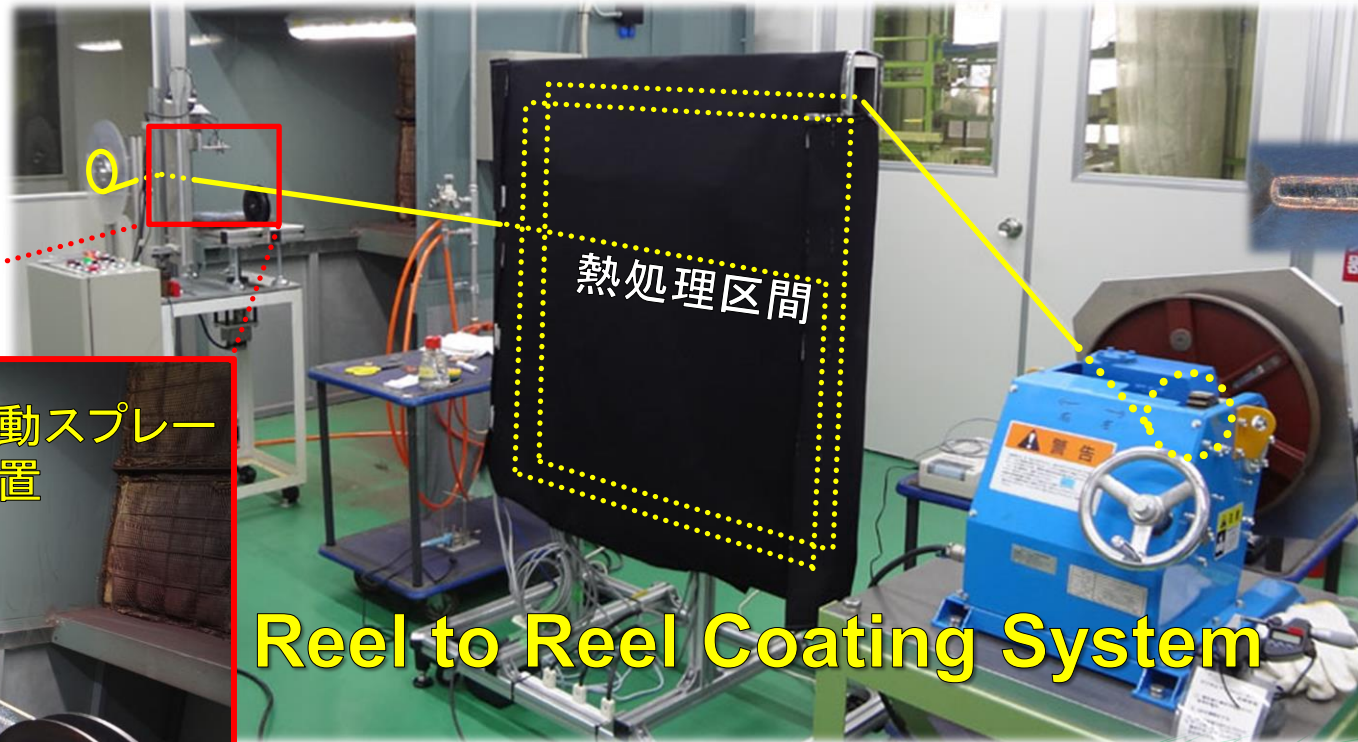
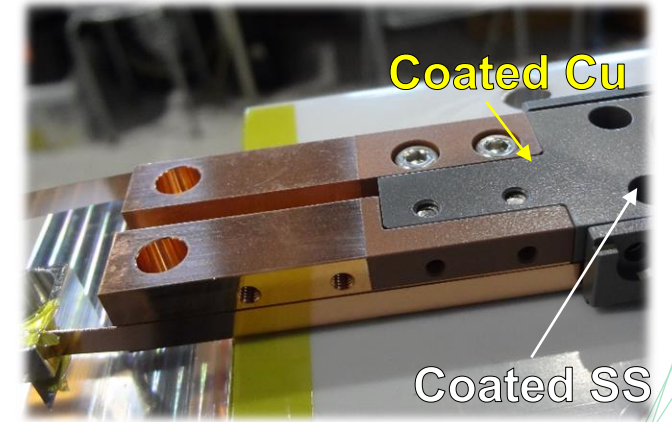
- REBCO表面にセラミック絶縁層の成形に成功
- 耐電圧は膜厚30 μm で2 kV以上
- 液体窒素を用いた熱サイクル試験で剥離は無し
- コーティングによる I_c の劣化は観測されなかった。



セラミックコーティングの現状

□ 磁石材料へのセラミックコーティング

- 線材: 長尺REBCOテープへの連続施工
- 部品: センターボビン, サポート, スペーサー、電極等の部分施行



10 m 長の連続試作の断面
(Unit: mm)

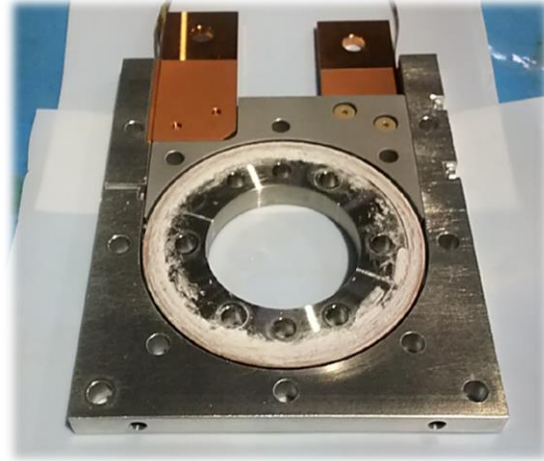
自動スプレー
装置

水平コントロール用プーリー

40m長のテープ線材の両面に厚さ $25 \pm 4.7 (\sigma) \mu\text{m}$ のセラミック絶縁膜の成形に成功している。

検証コイル

セラミック接着剤を用いたウェット方式で、小型の円形ダブルパンケーキコイルの試し巻が行われた。

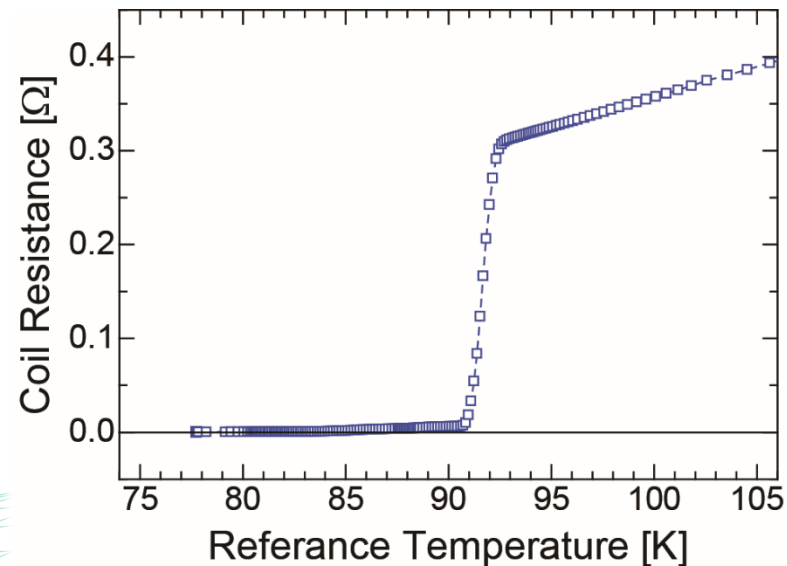


Tape: L=14 m, W= 4 mm (Full surface coating)
ID = 80 mm, 1st: 26 turns, 2nd: 24 turns

□超伝導特性の劣化はみられない。

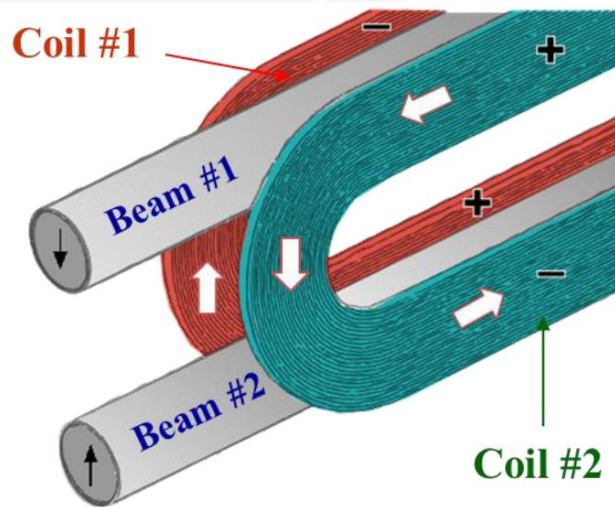
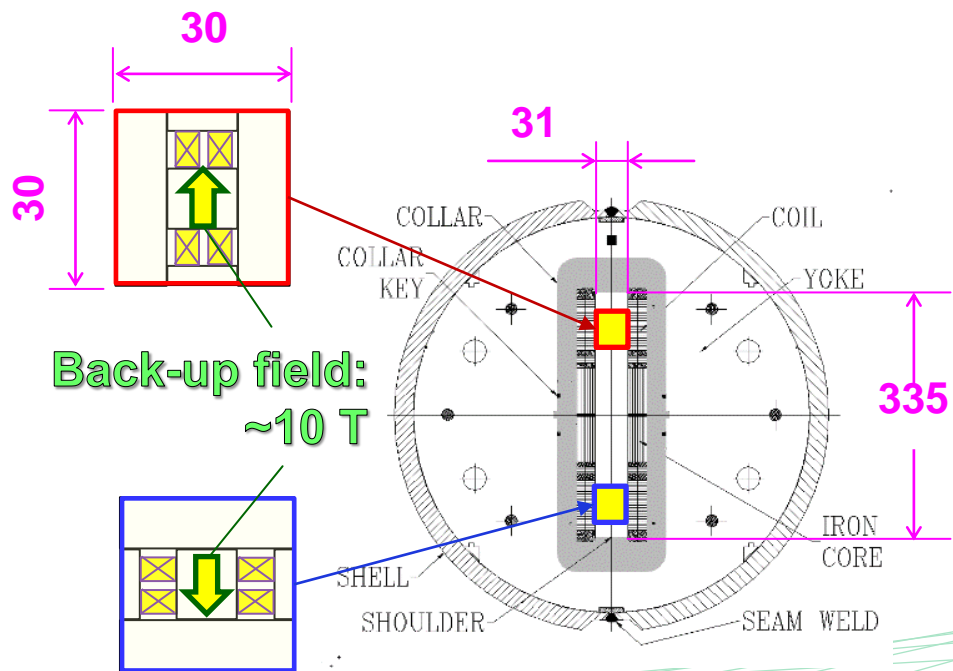
アロンセラミック タイプC (東亜合成)

| | |
|------------------|---|
| Main Ingredients | Silica (SiO ₂) |
| Viscosity | 70,000 mPa·s |
| CTE | 13 X 10 ⁻⁶ (0-600°C) |
| Heat Treatment | 16 h at R.T. →1 h at 90 °C →1 h at 150 °C |

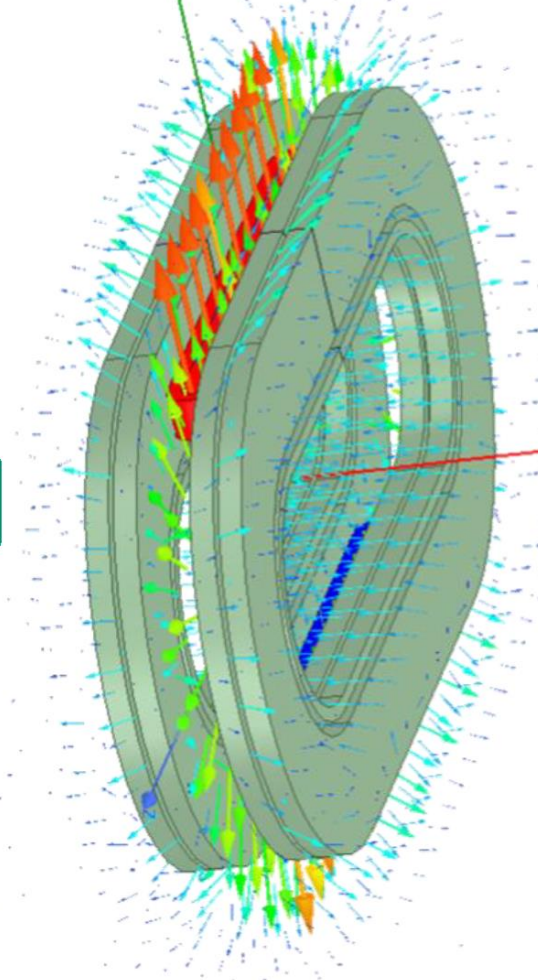


[Nb₃Snコモンコイルテストスタンド]

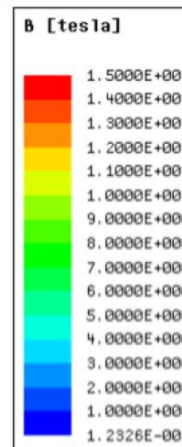
- 温度: 4.2 K (液体ヘリウムによる浸漬冷却)
- 外部磁場: ~10 T
- インサート開口部: 31 mm × 335 mm
- Nb₃Snコイルの直線部長さ: 305 mm



DCC017 (with an insert coil)



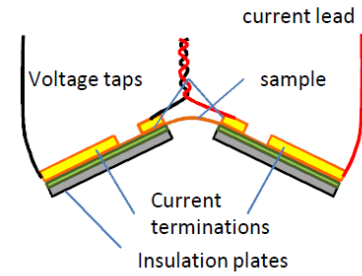
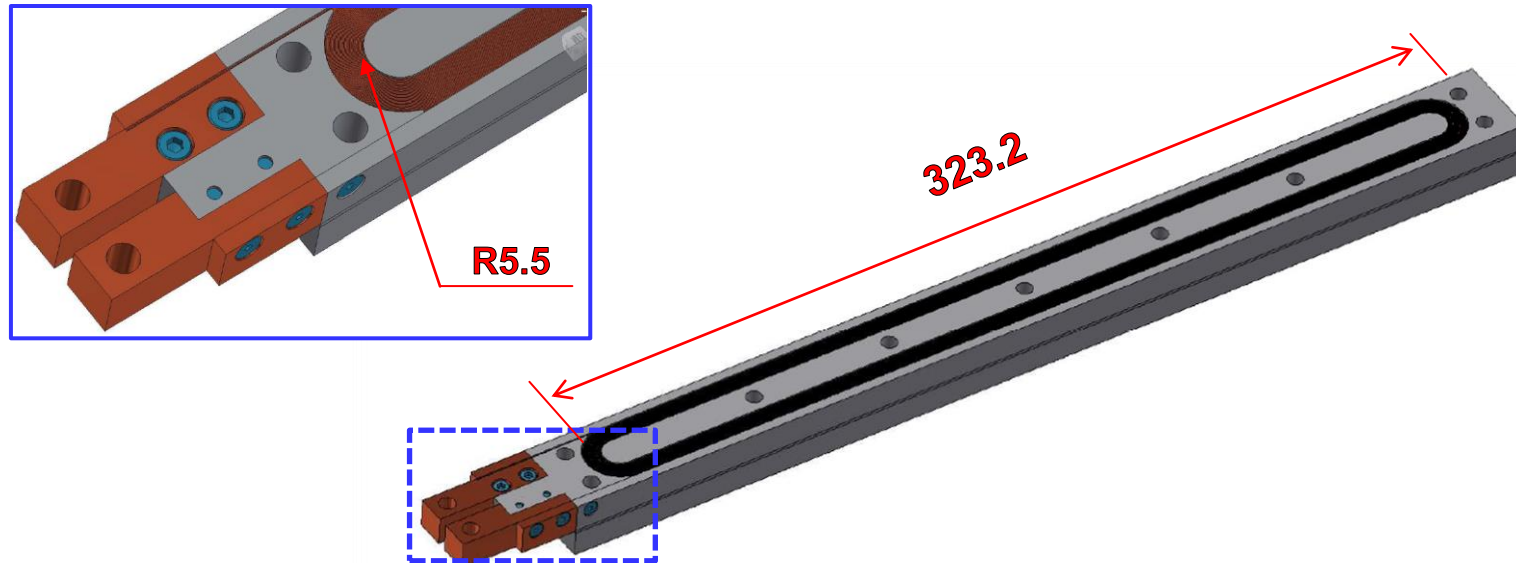
COMSOL



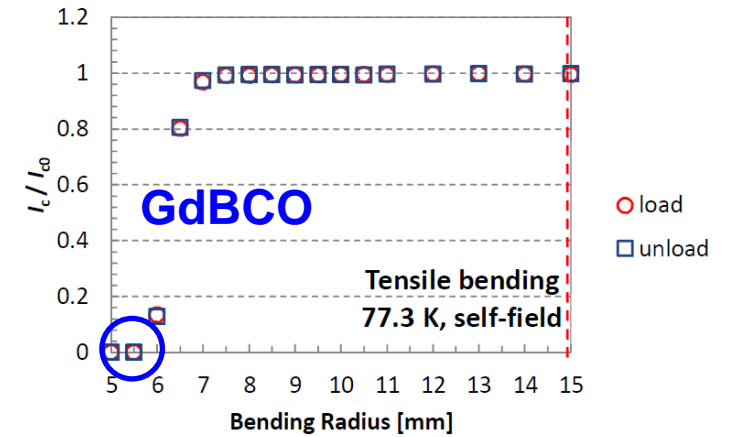
インサートコイルの設計

フジクラ FESC-SCH04(40)

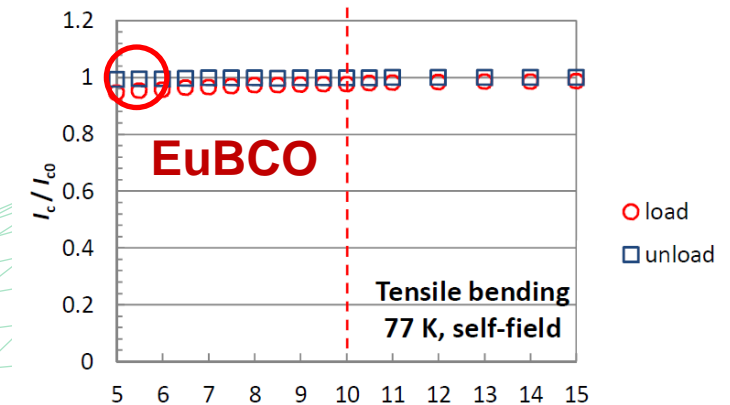
- Type: **EuBCO**, I_C (77K, S.F.): **201 A**
- Thick. of Hastelloy: 50 μm , Thick. of Cu: 40 μm (one side)
- Width (Avg. of meas.): 4.08 mm
- Thickness (Avg. of meas.): **0.16 mm**
- Thickness of coating: **0.025 mm (one side)**
- Thickness per turn: **0.25 mm (Tape + Coating+ Adhesive)**
- Number of turns per layer: **24 turns**



the HTS layer upper side in the figure



the HTS layer upper side in the figure



インサートコイルの試し巻

ロダミーケーブル(銅テープ)による試し巻

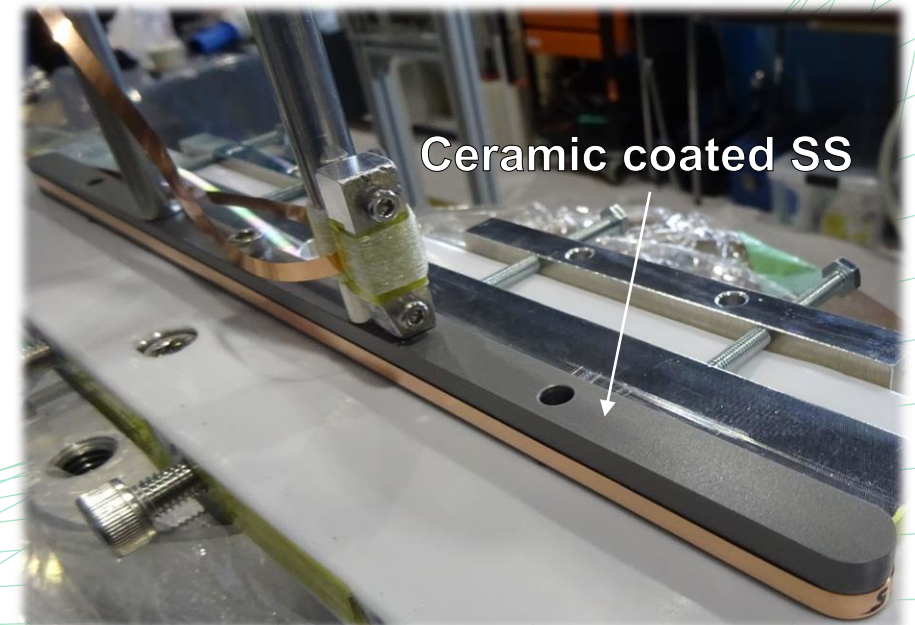
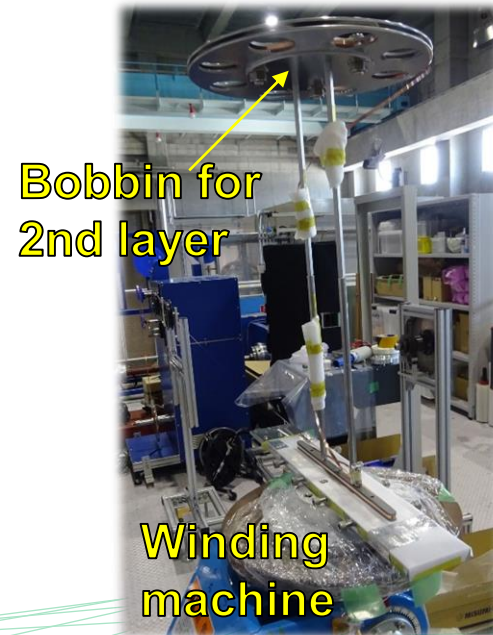
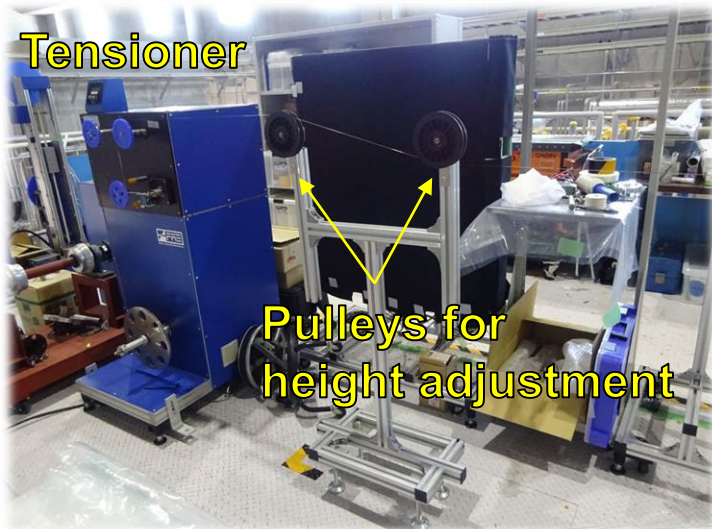
Cu tape: $t=0.1$ mm, $w=4$ mm, $L=30$ m

目的

- コイル巻き線技術の習熟
- コイル部品や巻き線治具の改良
- 実コイル設計へのフィードバック

Aron Ceramic Type C (Toagosei Co., Ltd)

| | |
|------------------|--|
| Main Ingredients | Silica (SiO ₂) |
| Viscosity | 70,000 mPa·s |
| CTE | 13 X 10 ⁻⁶ (0-600°C) |
| Heat Treatment | 16 h at R.T. → 1 h at 90 °C → 1 h at 150 °C |



試し巻の結果

□ セラミック接着剤を用いたウェットワインディング方式によって長尺レーストラックが製作された。

ターン間の接着剤の平均厚さ: 0.1 mm.

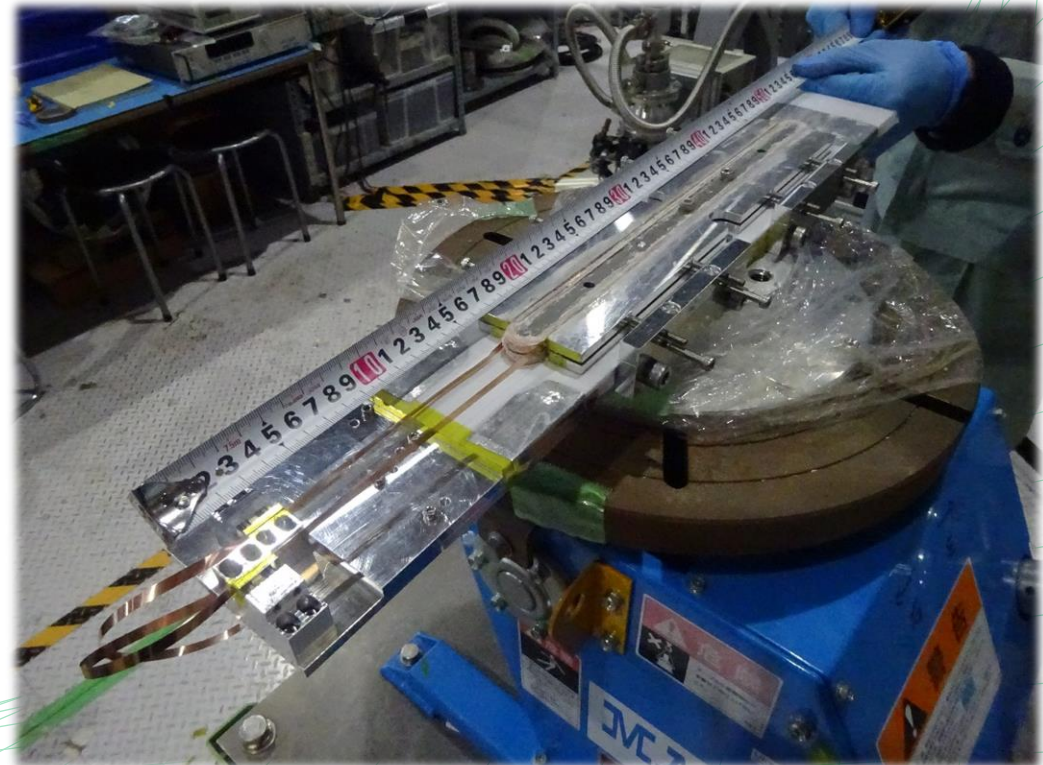
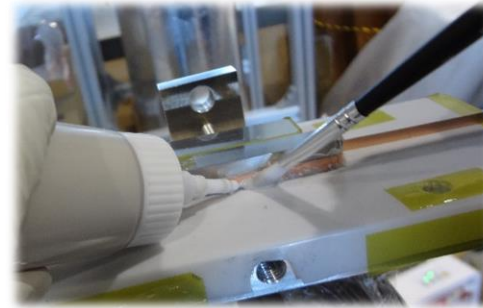


➤ 実効的な導体厚さ: 0.31 mm

(EuBCO: 0.16, coating layer: 0.05, adhesive layer: 0.1)

➤ 予想巻き数: 20 turns

コイル周回部では直線部より厚さが20% 増加する。



Summary

Summary

- ▶ アルミニウム安定化NbTiケーブルを用いた伝導冷却方式のCOMET実験用パイオン捕獲ソレノイドを具体例として、耐放射線超伝導磁石の特徴や運用方法を示した。
- ▶ 運転環境が100 MGy超えるような将来の耐放射線超伝導磁石の実現を目指し、高温超電導体(HTS)を用いた無機絶縁超伝導磁石の研究開発が進められている。
- ▶ GdBCOテープ線材への中性子照射において、中性子フルエンス 8.23×10^{21} n/m²で劣化が観測され、 4.11×10^{22} n/m²で超伝導性が消失した。照射効果の理解と磁石開発へのフィードバックのために他のREBCO線材や条件を変えて照射を行っていく。
- ▶ セラミックコーティング及び接着技術を用いた無機絶縁コイルの開発を進めており、テープ表面にSiO₂とAl₂O₃で構成される良好な絶縁膜を成形することに成功した。
- ▶ コーティングされたテープ線材を用いてセラミック接着剤による小型の円形ダブルパンケーキ検証コイルが製作され、そのコイルの超伝導特性に劣化が見られないことから、我々の手法の有効性が確認された。
- ▶ 次の目標として、低温、高磁場試験を目指したレーストラックコイルの開発が進行中である。

Thank you