

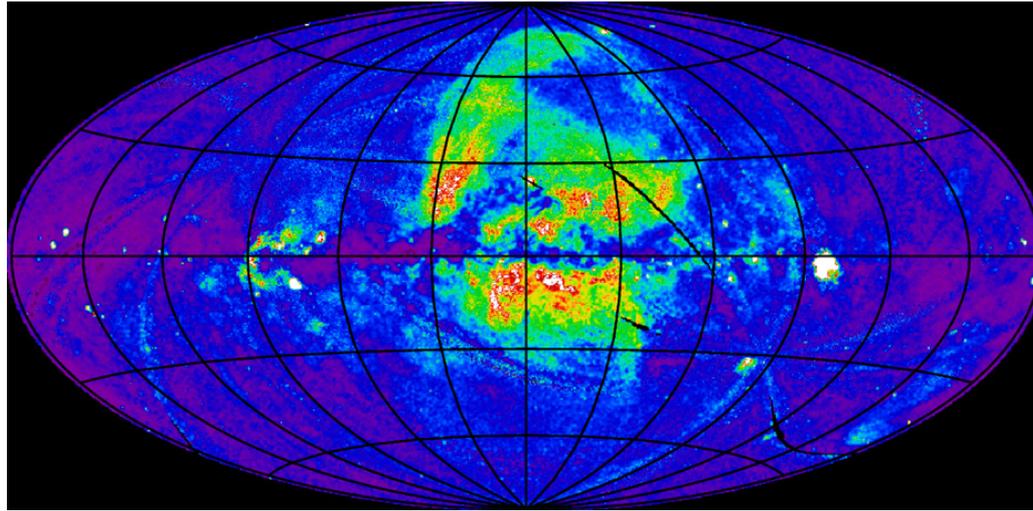
# 電荷交換X線の観測に向けた2段式断熱消磁冷凍機の開発と TES型X線マイクロカロリメータの動作環境の構築

宇宙物理実験研究室 榎崇利

1. 軟X線背景放射と電荷交換X線
2. TESカロリメータの地上応用実験の概要  
(本研究室と原子物理実験研究室との共同研究)
3. TESカロリメータ、2段式断熱消磁冷凍機の紹介
4. TESカロリメータの動作環境の構築
5. 今後の課題

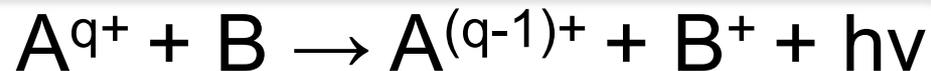
# 軟X線背景放射と電荷交換X線

軟X線背景放射に時間変動する謎の成分の発見 (ROSAT衛星)



ROSAT衛星による 3/4 keVの軟X線背景放射の全天探査  
Snowden et al. 1997

⇒ 起源の一つに電荷交換反応からの輝線



太陽風に含まれるイオン ( $C^{q+}$ ,  $N^{q+}$ ,  $O^{q+}$  等) と  
惑星間空間や高層大気の中性粒子 ( $H$ ,  $He$ ) による電荷交換反応

# 地上応用実験の概要

電荷交換反応の断面積やX線スペクトルを測定

衝突エネルギー、イオンの種類、ターゲット元素による違いを理解する

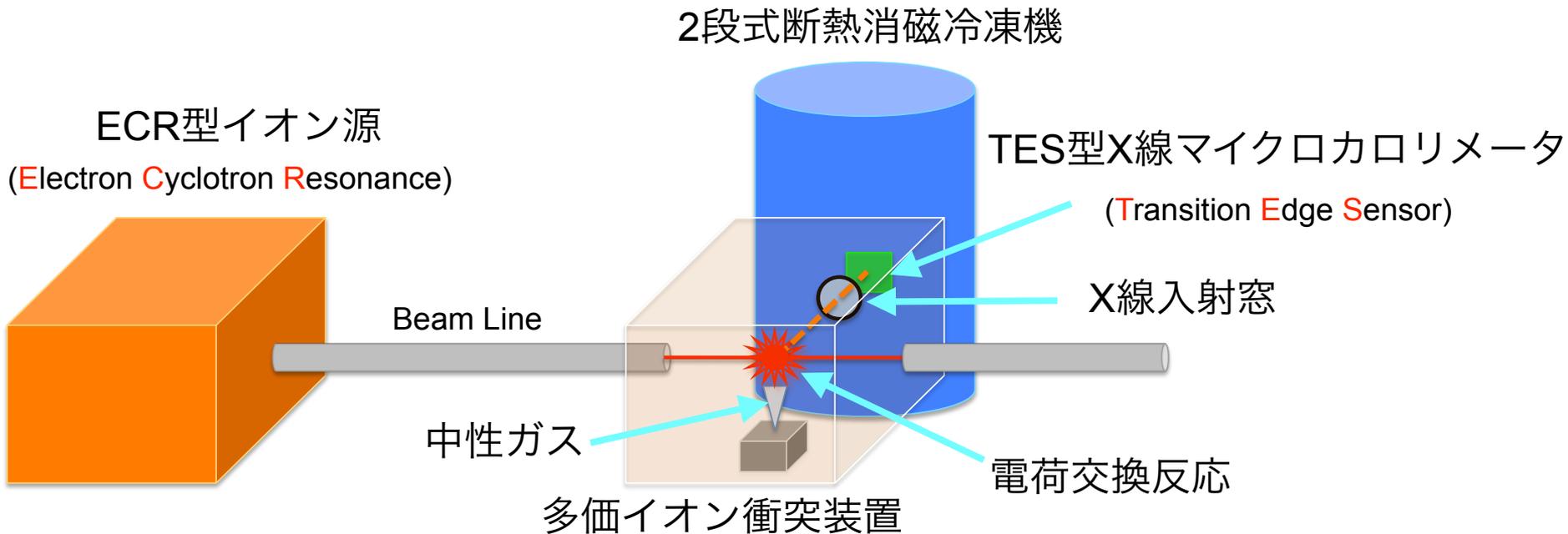
電荷交換X線の発生：首都大原子物理グループの多価イオン衝突実験



(石田発表)

X線スペクトルの測定：高分解能のTESカロリメータ

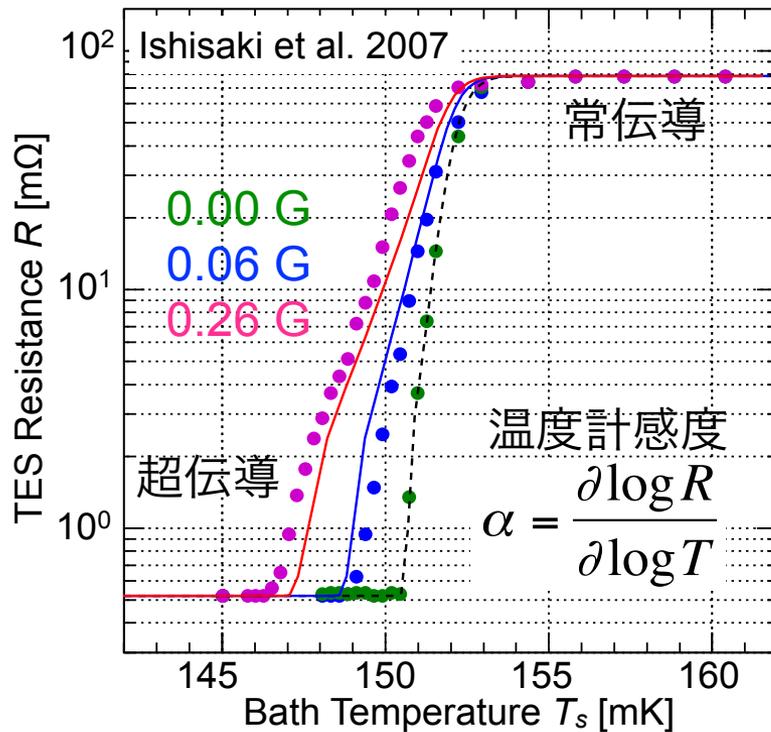
(進捗状況: 本発表)



# TESカロリメータの動作原理

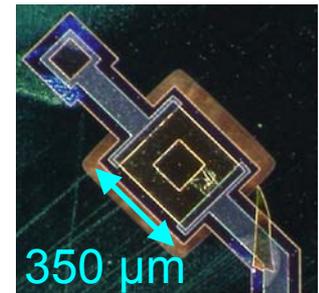
TES: 超伝導遷移端の急激な抵抗変化を利用した温度計

TES: SII14b のRT 曲線

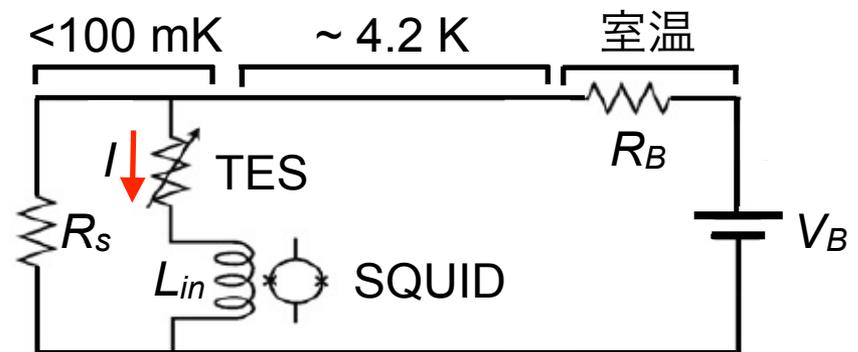


TES: SII182 (本実験で使用)

TES Ti / Au (40/100 nm)  
 吸収体 Au (0.5  $\mu\text{m}$  厚)  
 配線 Nb / Al  
 転移温度  $T_c = 147$  mK  
 常伝導抵抗  $R_n = 97$  m $\Omega$



TESの読み出し回路



磁場遮蔽の重要性：

二層薄膜の超伝導転移の特性に磁場が大きく影響

SQUID (超伝導量子干渉素子=微小電流計)は磁場に非常に敏感

# 2段式断熱消磁冷凍機(ADR)の原理

ADRは衛星環境で100mK以下を実現できる唯一の冷凍機

2段式により、**軽量**、**低磁場**で極低温を達成できる

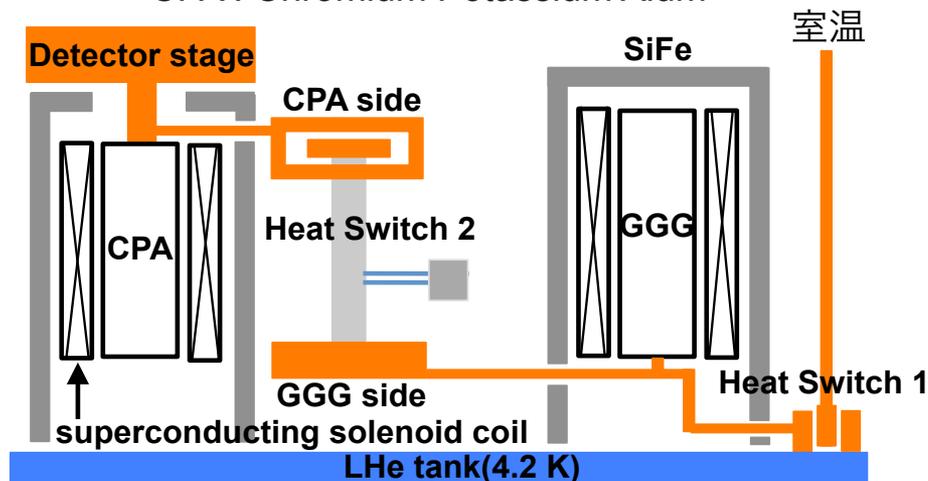
TESカロリメータ動作時は、超伝導コイルの中心で 2000 G 程度

→ TES、SQUID 位置の磁場を下げるのが必須

磁性体	GGG	CPA
最大磁場	33000G	27000G
温度範囲	1 - 4.2K	0.05 - 1K

GGG : Gadolinium Gallium Garnet

CPA : Chromium Potassium Alum



コンパクトで可搬



60cm

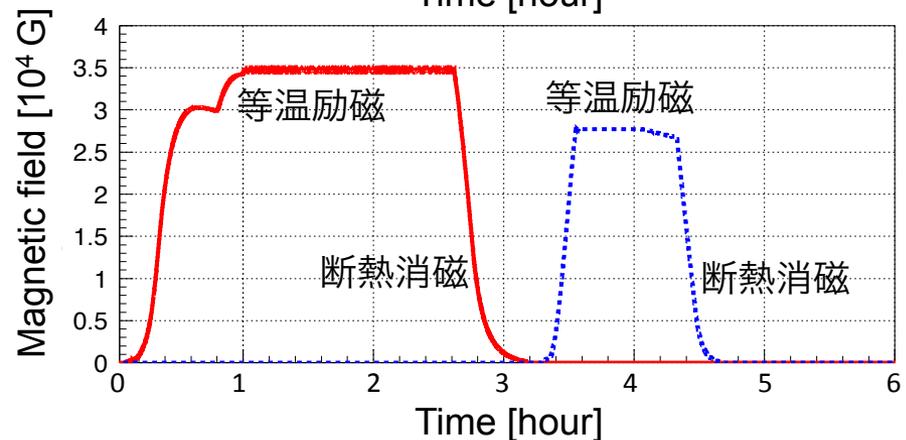
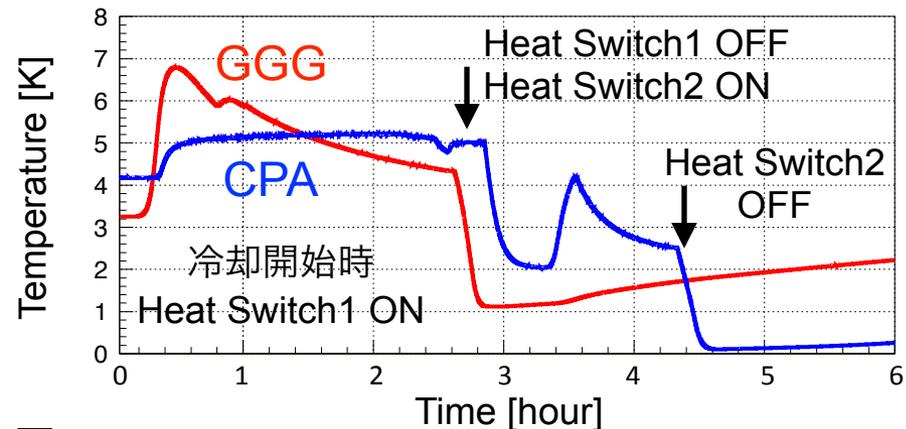
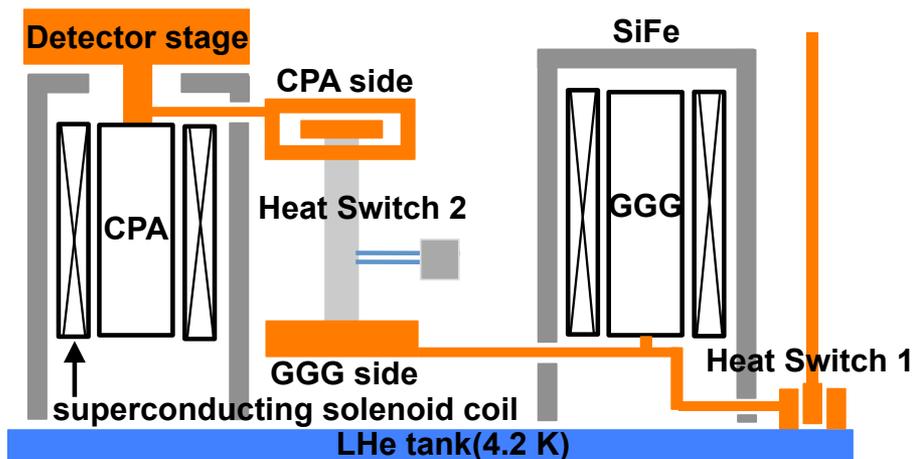
40cm

# TESカロリメータの動作環境の構築

# 2段式ADRの冷却手順と性能評価

## ● 冷却手順 1.真空引き

- 2.液体窒素予冷
- 3.液体ヘリウム予冷
- 4.等温励磁、断熱消磁
- 5.最低到達温度



## ● 現状の性能

2段式としての冷却に成功、最低到達温度45mK、100mK以下で2時間保持

# SQUIDのセットアップ

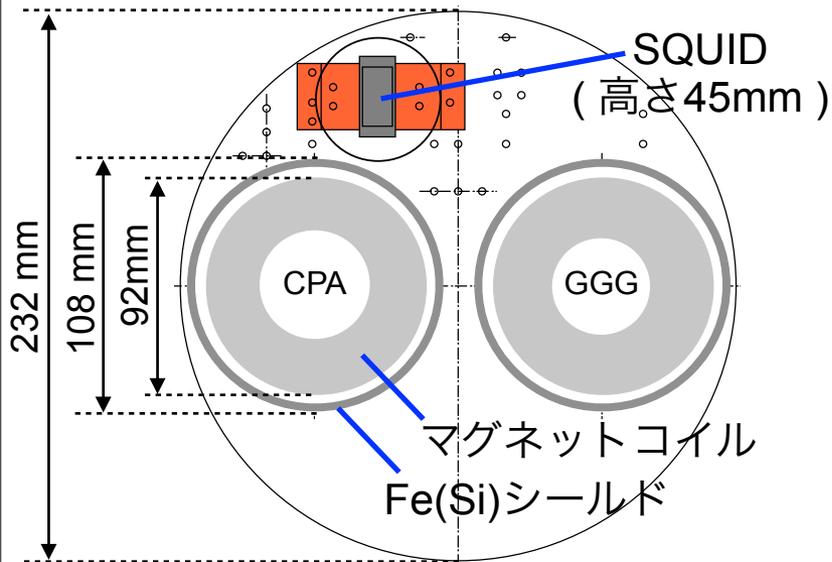
SQUID(超伝導量子干渉計):

TES を流れる電流の微小変化 (X線エネルギー)を読み出すデバイス  
磁場にきわめて敏感 (< 0.1 mG)

## ①設置位置

磁気シールド横の熱浴に設置

→温度が安定、低磁場



## ②磁気遮蔽対策

Nb、Cryo-Perm の磁気シールド導入

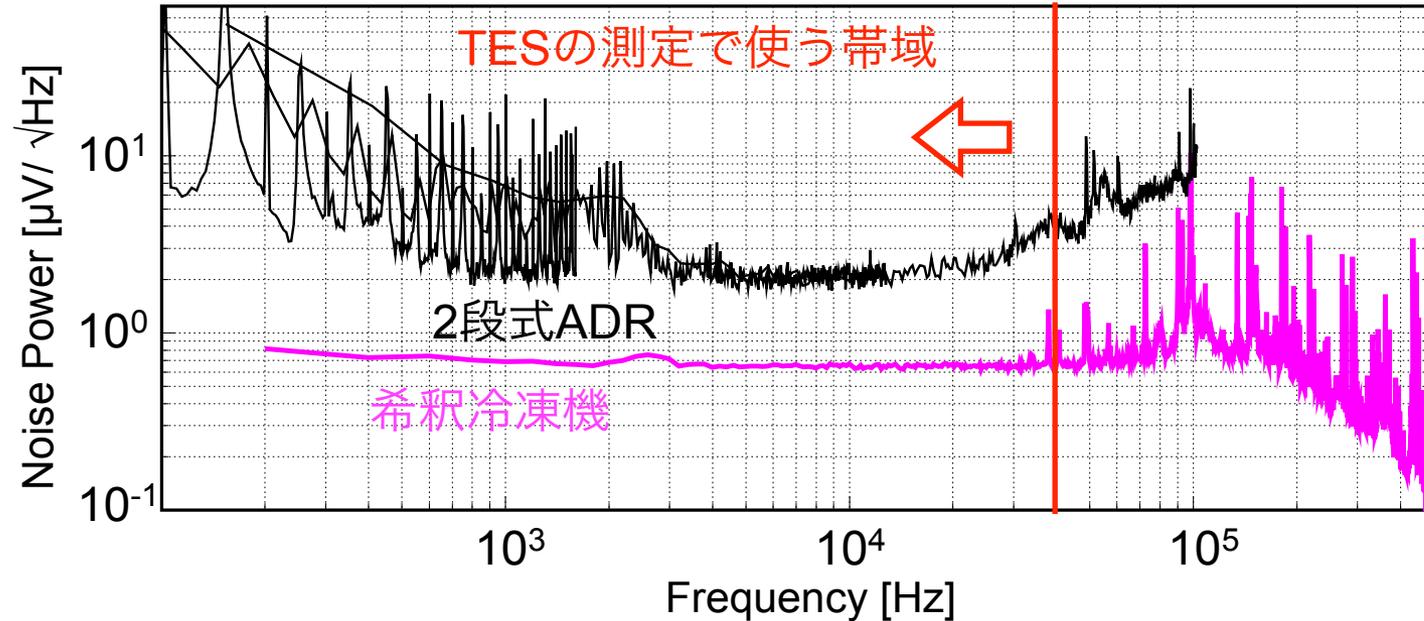
Shield	$T_c$	$H_c$	$\mu$
Nb	9.2K	1400G	-
Cryo-Perm	-	-	100000

磁気シールドが有効に機能する条件

- 1.高透磁率の物質で囲んで低磁場環境を作る
- 2.低磁場環境で Nb を超伝導にする
- 3.冷却サイクル中に臨界温度/磁場以下

# SQUIDの動作試験

## SQUIDのノイズスペクトル

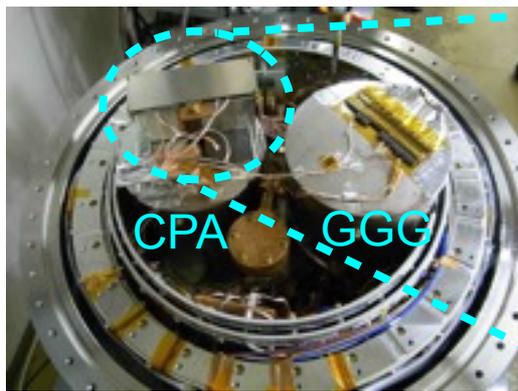


- ◆ SQUIDの正常動作を確認した→磁気シールドが有効に機能
- ◆ ノイズレベルは、希釈冷凍機(磁場使わない)の3倍程度(数eV相当)

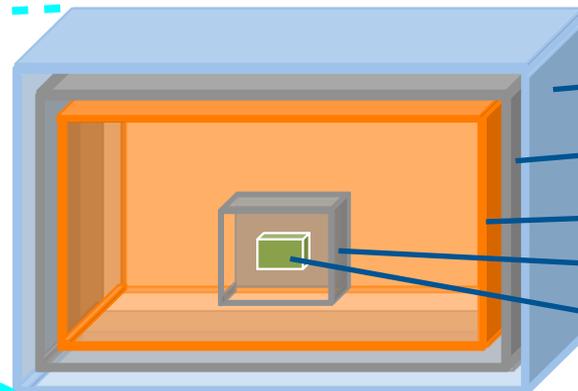
# TES周辺の磁気遮蔽

- ◆ TESで動作実績のある3 G以下に磁場を押さえるため、simulationも利用して多重遮蔽を設計した
- ◆ SQUIDで有効だった高透磁率の物質と超伝導物質を併用した磁気遮蔽を採用

Shield	thickness	$T_c$	$H_c$	$\mu$
Al	0.5 mm	1.2 K	100 G	-
Pb	1 mm	7.2 K	800 G	-
Cryo-Perm	1 mm	-	-	100000



40 cm

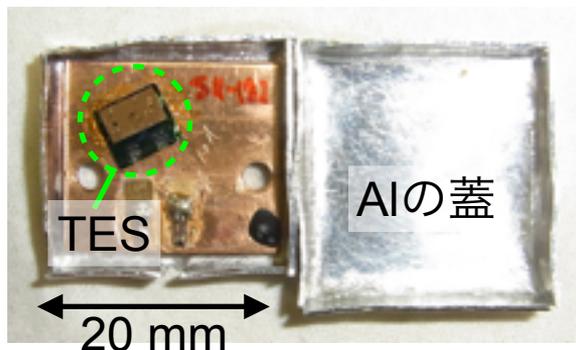


8 cm

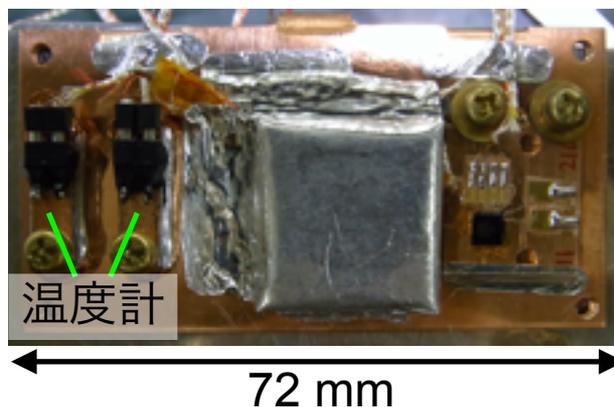
# TES周辺のセットアップの写真

RT 測定時に導入した実際の磁気シールド

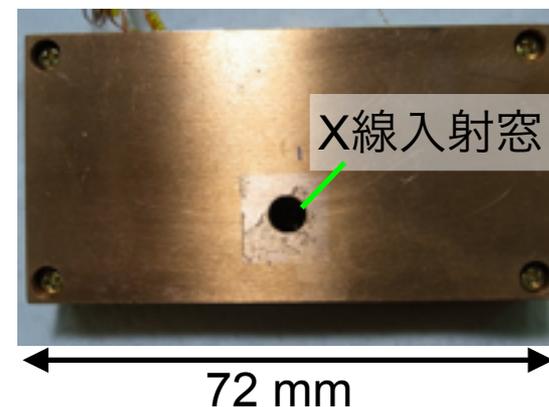
TES と Al シールド



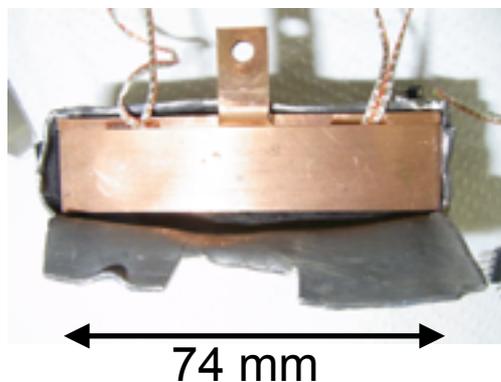
Al シールド (内側にTES)



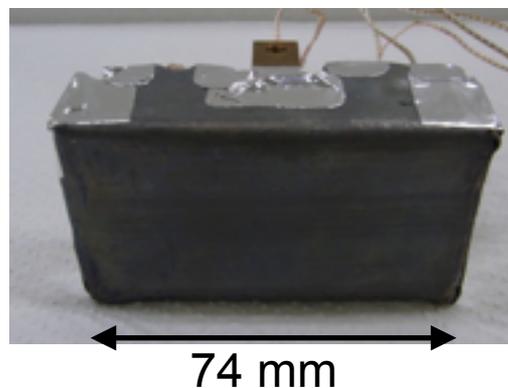
Detector box (無酸素銅)



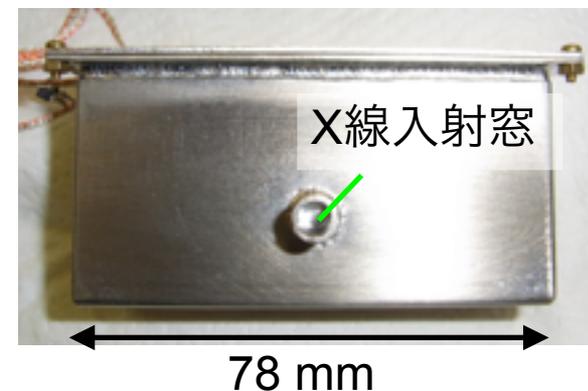
Detector box と Pbシールド



Pb シールド



Cryo-Perm シールド

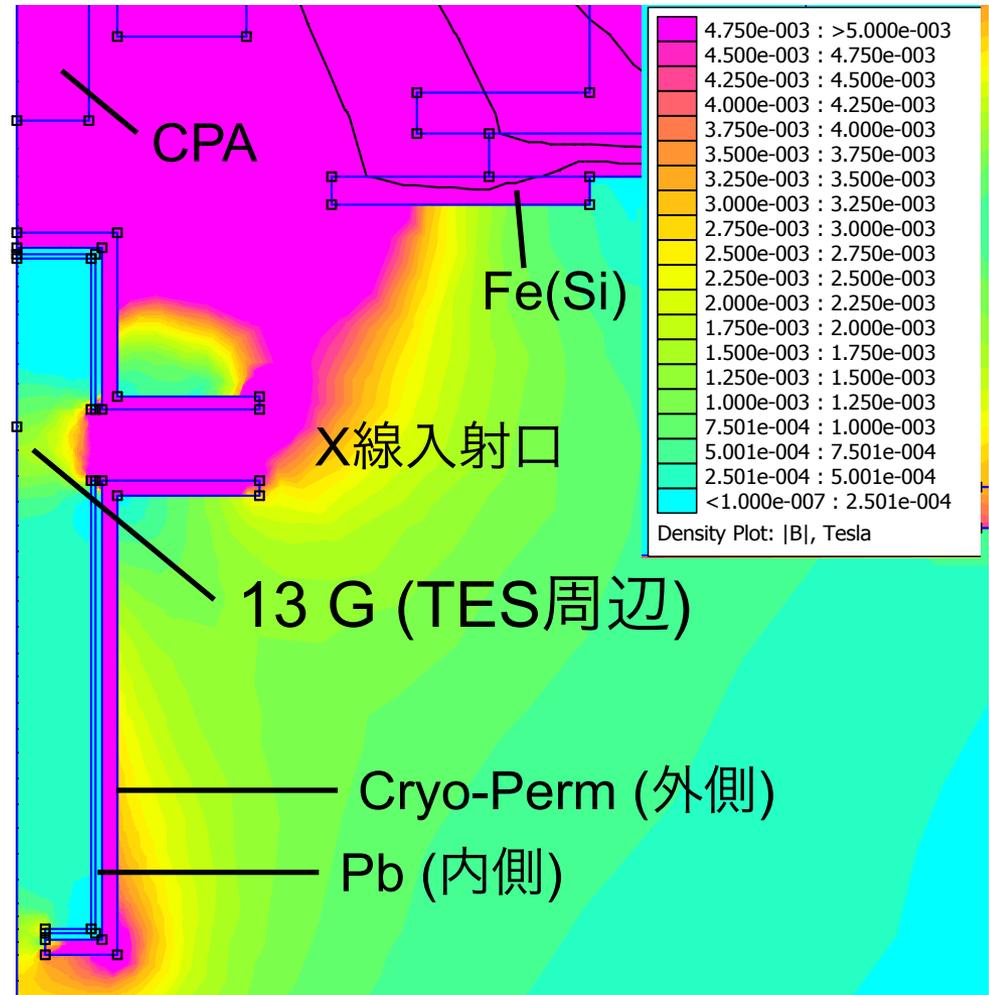
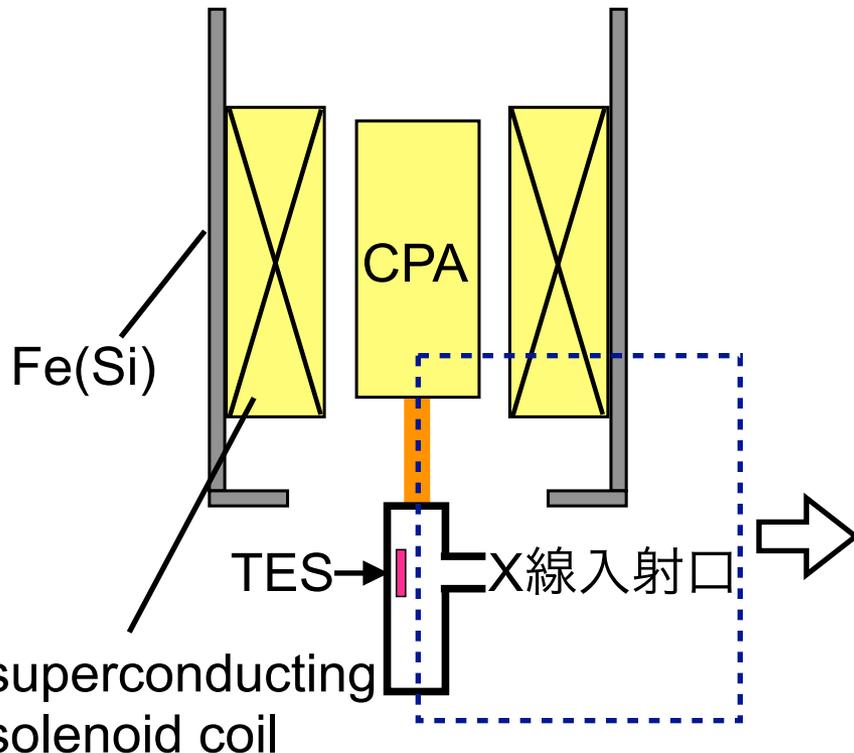


# TES周辺の磁場解析結果

磁場解析ソフトFEMM (軸対称を仮定した磁場simulation)の解析結果

磁場解析結果

(TES動作温度100 mKで温度制御時,  
磁性体の中心で2000 Gを仮定)



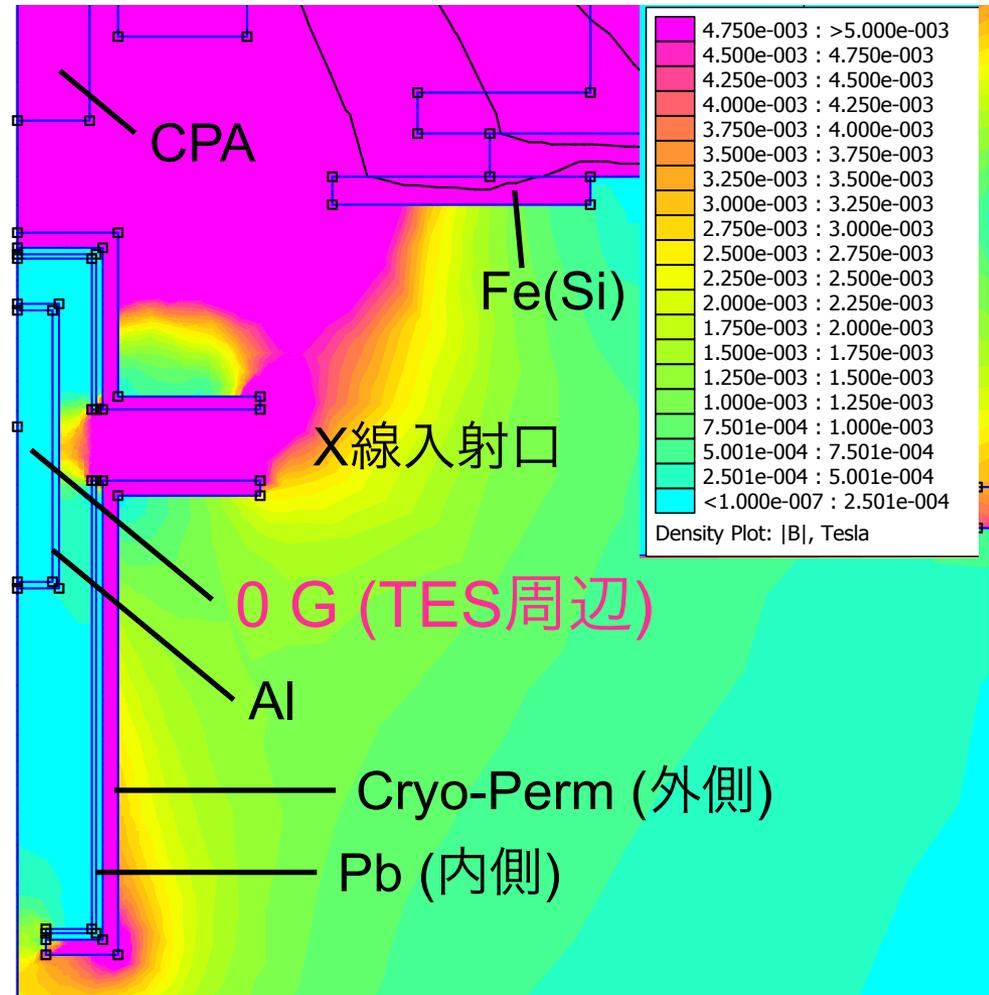
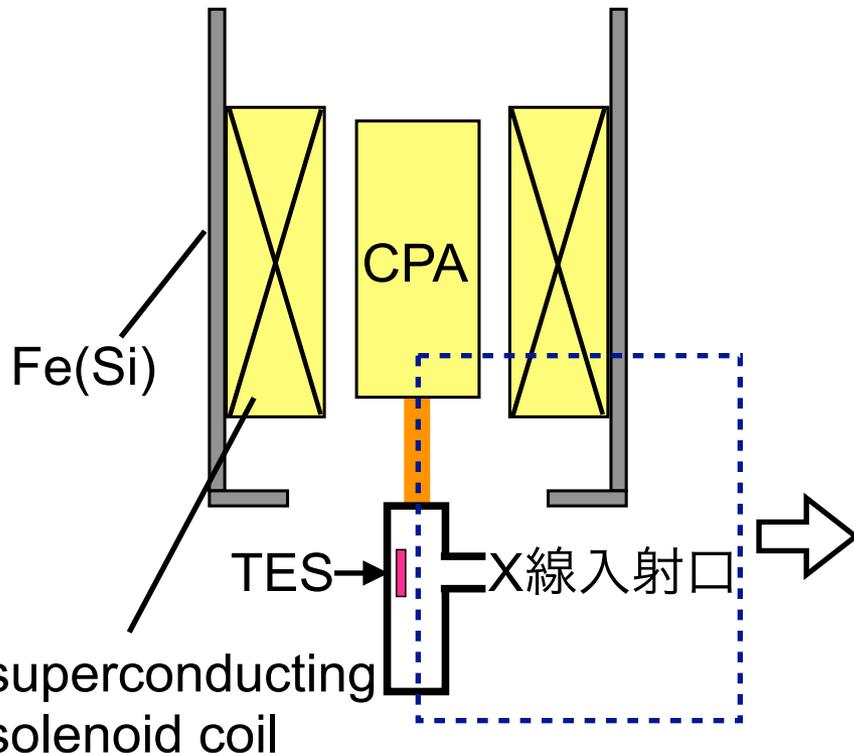
# TES周辺の磁場解析結果

磁場解析ソフトFEMM (軸対称を仮定した磁場simulation)の解析結果

→ Al シールド追加で 0 G を予想

磁場解析結果

(TES動作温度100 mKで温度制御時,  
磁性体の中心で2000 Gを仮定)



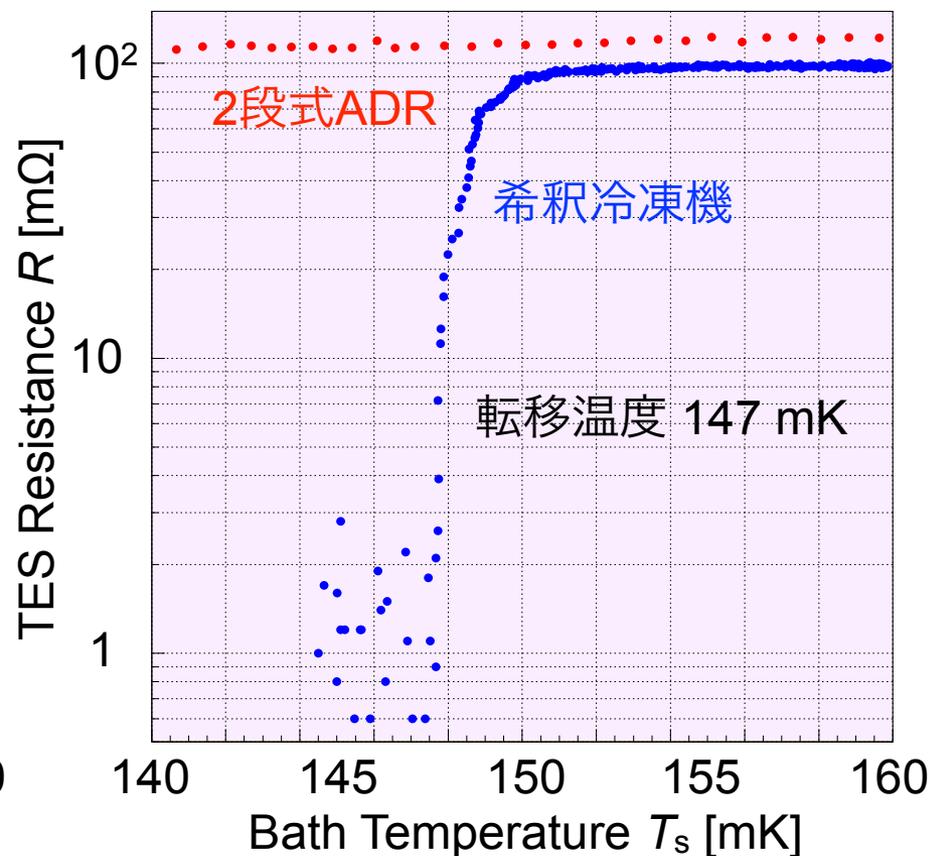
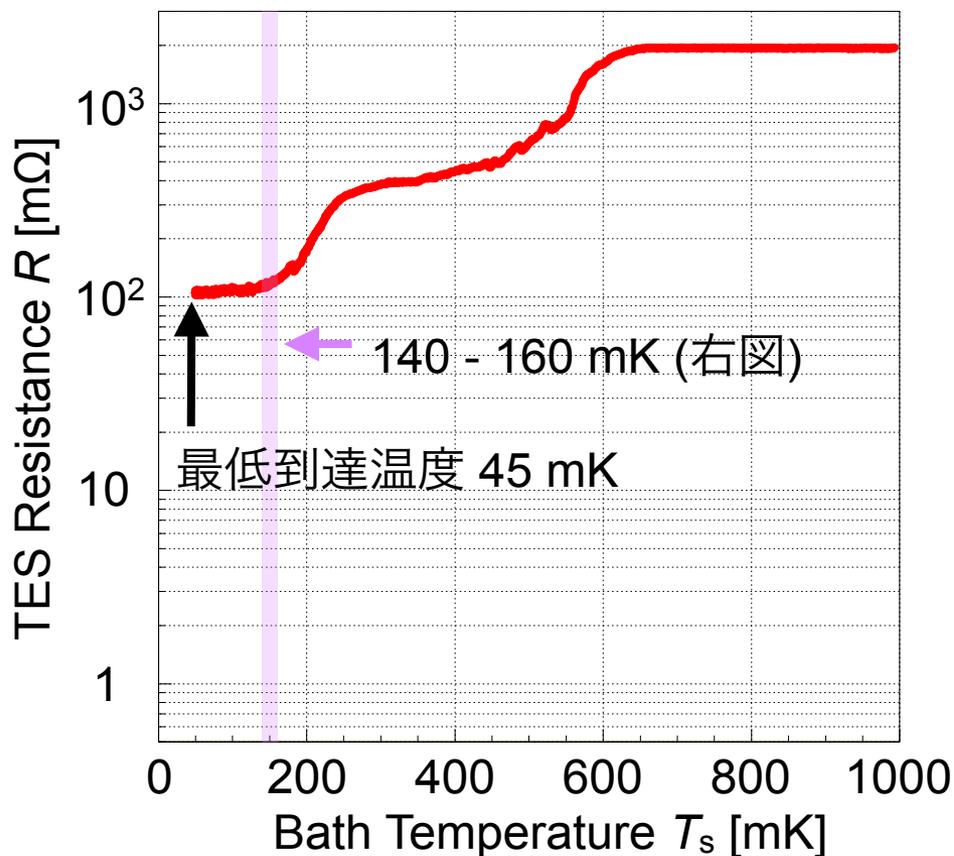
# RT 測定の結果

2段式ADR (CPA消磁後, 最低到達温度でコイル電流 0) で冷却

→  $B < 3 \text{ G}$ まで超伝導転移した実績のある素子で転移せず (残留磁場か?)

同素子を希釈冷凍機で冷却すると転移した

→ 磁気遮蔽が不十分と考えられる → ホール素子で磁場測定を試みる

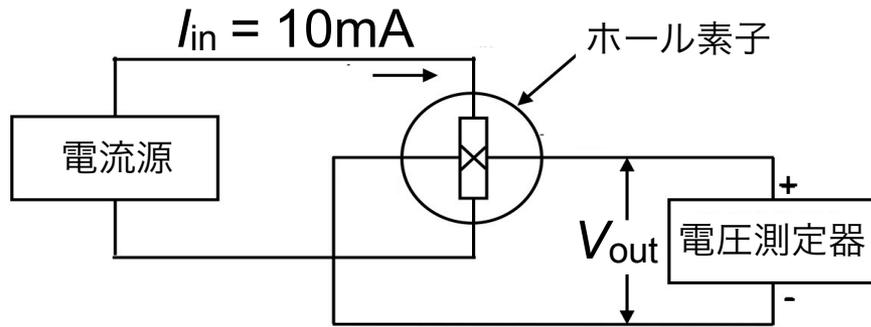


# ホール素子(磁気センサー)の較正試験

小型超伝導コイルを用いて室温、低温で較正試験

ホール素子の出力電圧と磁場の対応、磁気感度の測定、低温での動作の確認

低温下での正常動作、磁気感度に信頼性があることを確認



ホール素子の出力電圧の読み出し系

温度	磁気感度 [mV/kG]			典型的誤差
	素子A	素子B	素子C	
300 K	225	229	224	4.4 G
77 K	269	274	271	3.7 G
4.2 K	271	279	276	3.7 G



1.5 mm

ホール素子  
(旭化成, HG-106A)



20 mm

小型超伝導コイル  
(NbTi線)

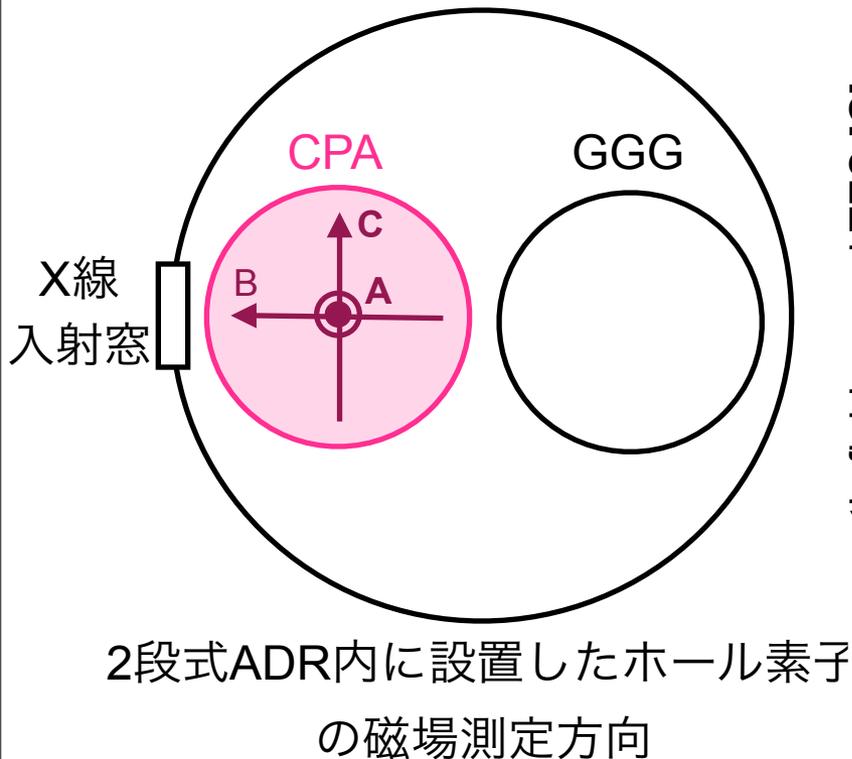
- 液体窒素温度以下では磁気感度はほぼ一定
- 個体差は少ない
- 誤差は ~4 G

# ホール素子による磁場測定試験

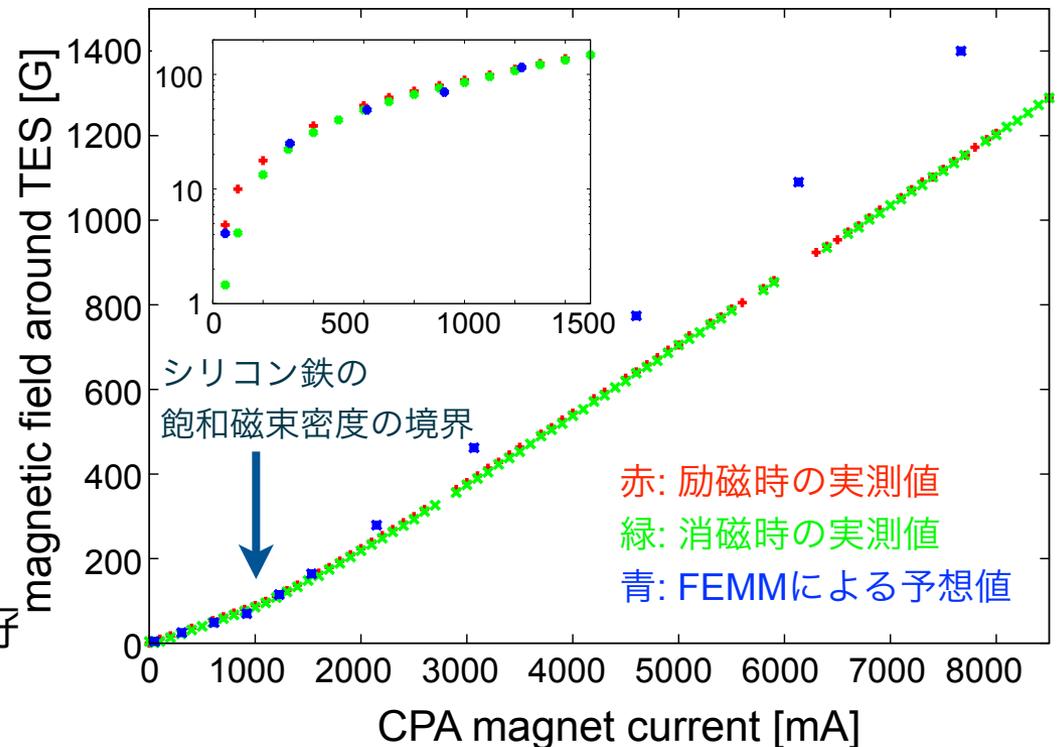
シリコン鉄磁気シールドのみで断熱消磁時の磁場測定を実施

2段式ADRでのRT測定時の残留磁場の測定、FEMMによる予想値との比較

残留磁場は~4 G、実測値と予想値で定性的に一致



CPA 励消磁時のTES周辺の磁場の絶対値



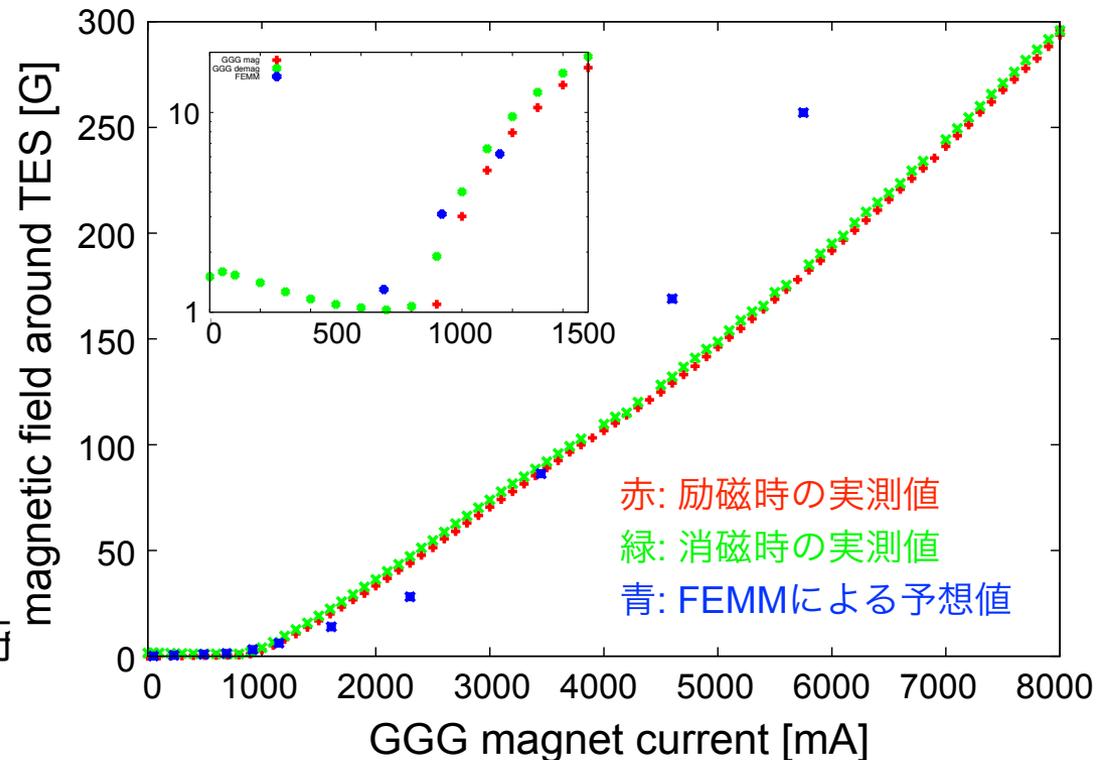
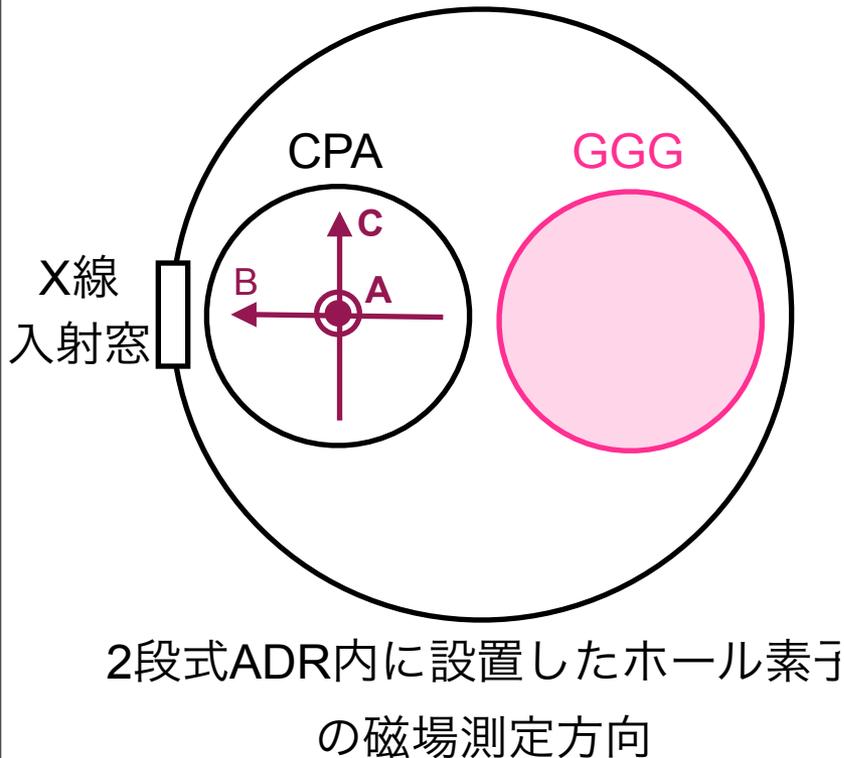
# ホール素子による磁場測定試験

シリコン鉄磁気シールドのみで断熱消磁時の磁場測定を実施

2段式ADRでのRT測定時の残留磁場の測定、FEMMによる予想値との比較

GGGの磁場もTESに影響

GGG 励消磁時のTES周辺の磁場の絶対値



# RT 測定と磁場測定の結果の考察

RT 測定よりTESが超伝導転移せず

残留磁場が ~4 G 存在する可能性は排除できない

実測値はシミュレーションでほぼ再現できた

超伝導転移しない要因の候補

- Al、Pbが超伝導状態になる時にTESへの磁場が大きい  
励消磁中に超伝導状態が破れている可能性が高い
- 磁場の漏れ込み
- TESの劣化 (希釈冷凍機で転移温度に変化がないので可能性低い)

今後の対策

- 磁気シールド内のホール素子による磁場測定
- Detector stageにコイルを設置し能動的に磁場をキャンセル
- シミュレーションを元に磁気シールド改良

# まとめ

電荷交換X線の観測を目指して、TESカロリメータの動作環境を整備した

結果

- 2段式ADRで100mKを2時間保持、最低到達温度45mK
- SQUIDの動作確認、ノイズはTESが十分動作するレベルであった
- RT* 測定よりTESが超伝導転移せず
- RT* 測定時の残留磁場が~4 G存在する事は排除できない

TESカロリメータ動作環境構築の課題

- 磁気シールド内の磁場測定
- 磁場のキャンセル機構導入
- 磁気シールド改良

電荷交換X線の観測に向けて

- TESにX線を照射してエネルギー分解能の評価
- 2段式ADRと多価イオン衝突装置の接続を確認後、電荷交換X線の観測