

X線マイクロカロリメータ動作のための断熱消磁冷凍機の開発

菱右京、高倉奏喜、神谷賢太、小竹美里、藤本龍一 (金沢大)、井上真奈、山口静哉、宮崎直人、石崎欣尚、江副祐一郎、大橋隆哉 (首都大)、星野晶夫 (立教大)、山田真也 (理研)、篠崎慶亮 (ARD/JAXA)

1. Introduction

ASTRO-HやDIOS衛星にはX線マイクロカロリメータが搭載され、0.1 K以下の極低温動作で優れたエネルギー分解能を実現する。人工衛星の微小重力下で0.1 K以下の極低温を得るには、冷却に重力を必要としない断熱消磁冷凍機(ADR)がもっとも現実的であり、ASTRO-HやDIOSでもADRが使用される。

我々のグループでは、将来の衛星搭載を念頭に置いて、X線マイクロカロリメータ動作のための断熱消磁冷凍機(ADR)の開発を進めている。我々のADRは小型軽量であり、可搬型の精密X線分光システムとして、プラズマ発生装置と組合わせた実験室プラズマ測定への応用も視野に入れている。

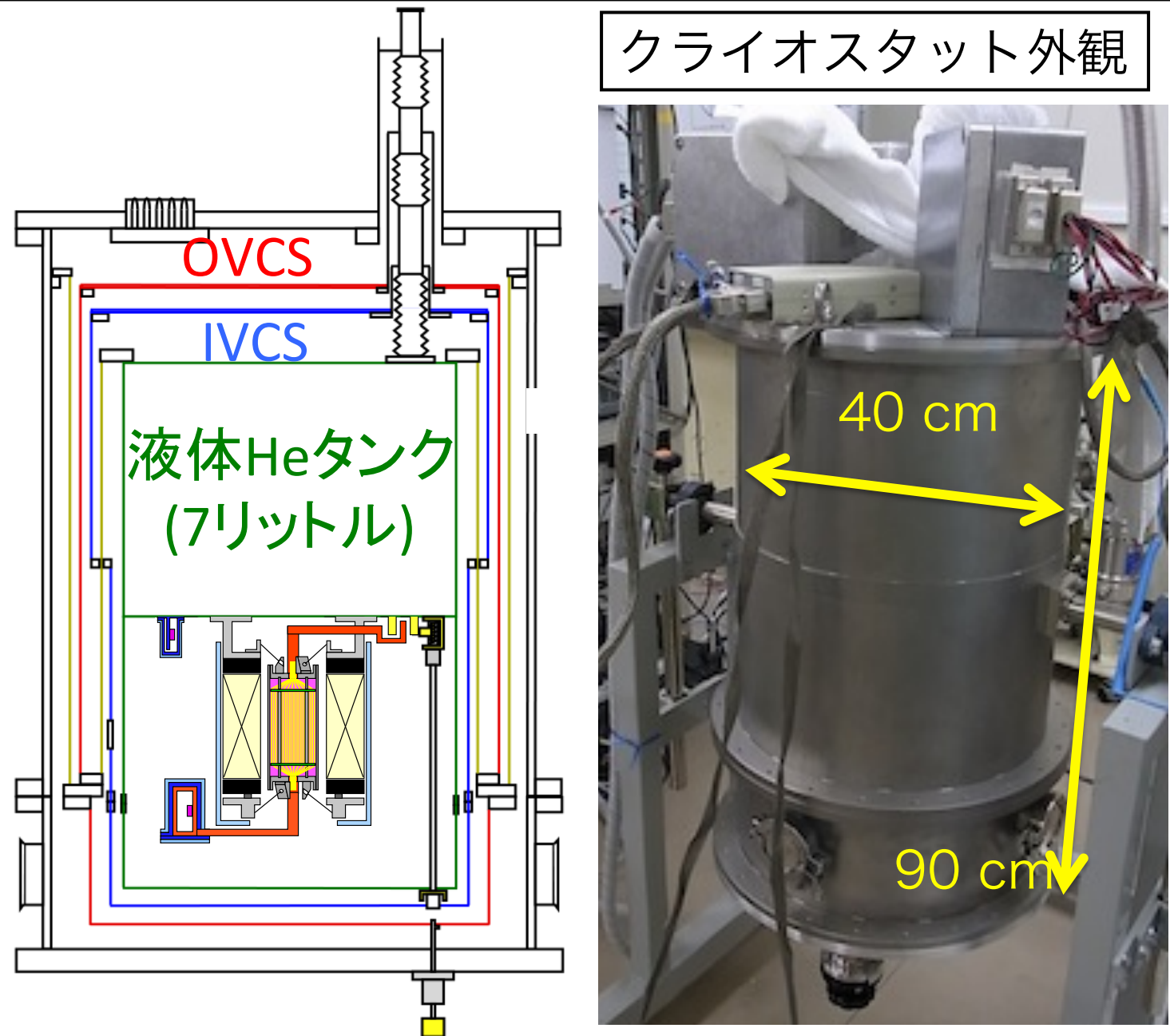
3. Heクライオスタット

専用Heクライオスタットを製作^[1,2]

- ✓ ヘリウムのvapor coolingによる2重の放射シールド(VCS)
- ✓ VCS間にMLI (多層断熱材)を挿入し断熱

無負荷時の侵入熱 (金沢大の場合)

- ❑ He tank < 100 mW
- ❑ 検出器ステージ ~ 1.8 uW



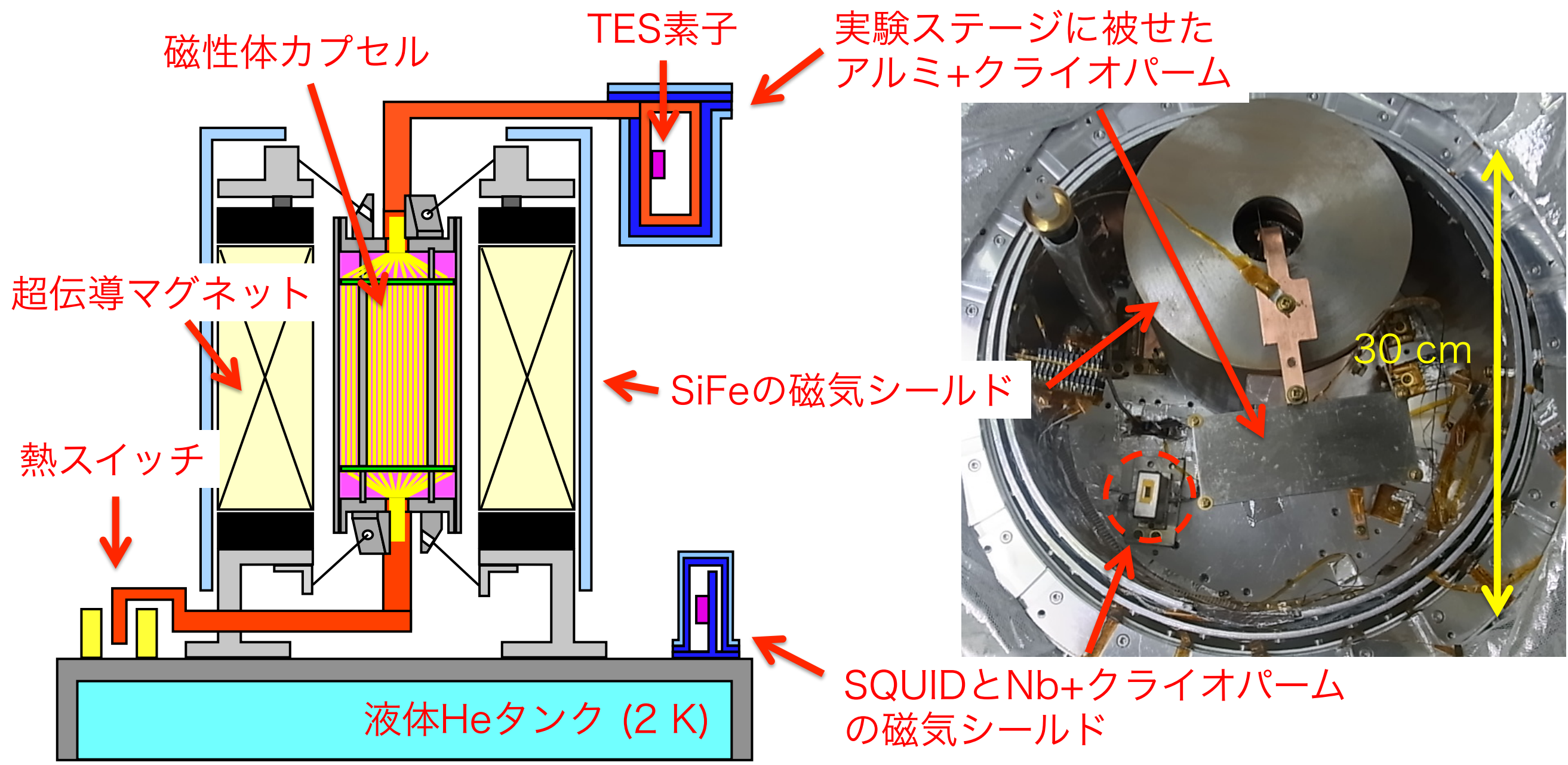
4. 1段式ADR(金沢大)^[3-6]

2 Kの熱浴 (液体Heの減圧) から1段ADRで100mK以下に冷却

➤ 磁性体：FAA (鉄ミョウバン)をインハウスで製作

性能 (無負荷時)

- ❑ 最低到達温度：40 mK以下
- ❑ 保持時間：100 mK以下で20 h以上
- ❑ 温度安定度：<10 uKrms



磁気シールド

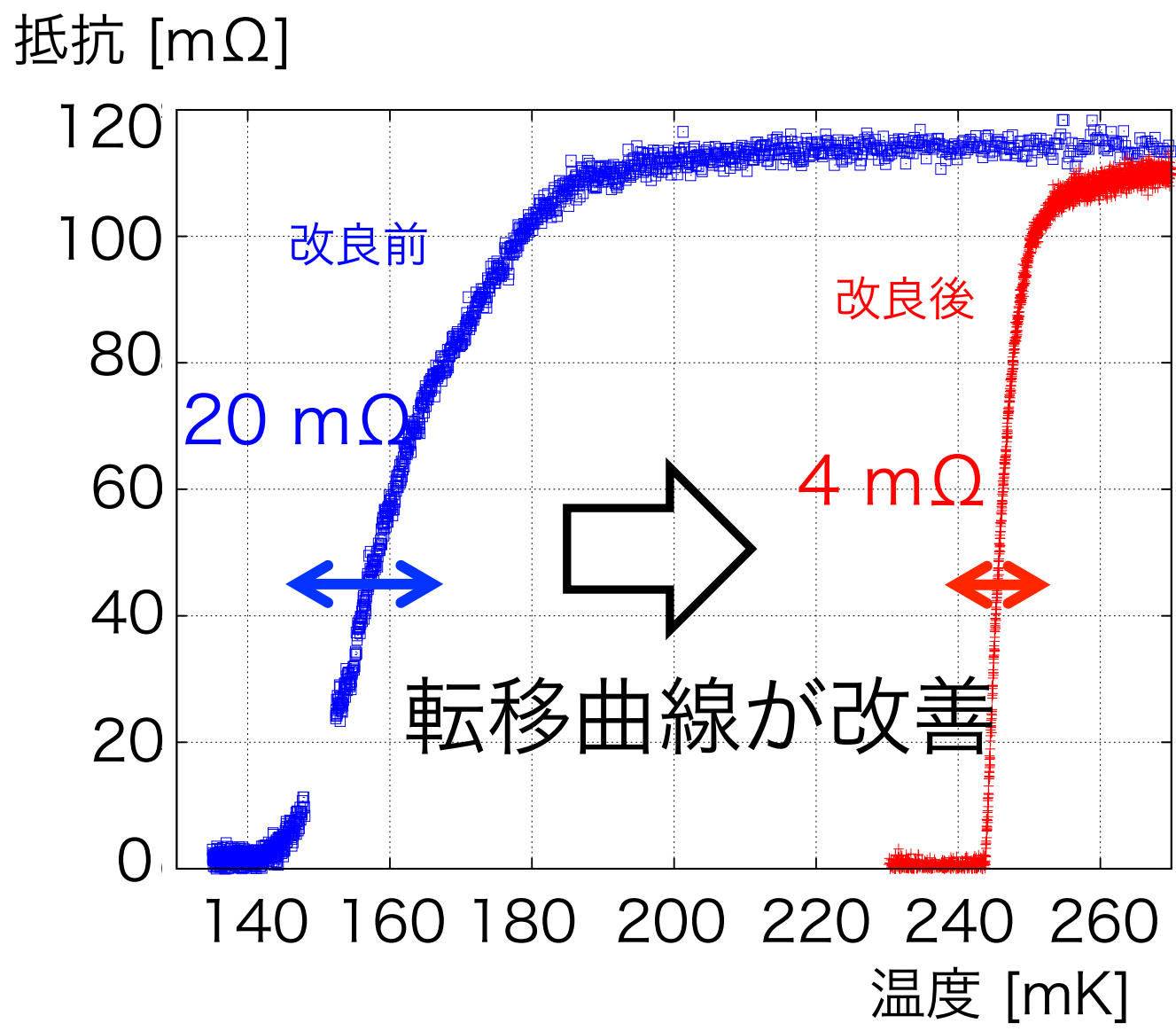
超伝導遷移端を高感度温度計として使用するTES型X線マイクロカロリメータでは磁気シールドが極めて重要→以下のような2種類のシールドを採用

- (1) 温度制御時のマグネット磁場を地磁場程度(~50 uT)に抑えるシールド
- (2) 検出器位置での地磁場を~uTに抑えるためのシールド

当初、(1)のために超伝導マグネットの周りに3 mm厚のSiFeシールドを被せたが、TESの超伝導遷移端の幅が20 mΩにまで広がってしまった。

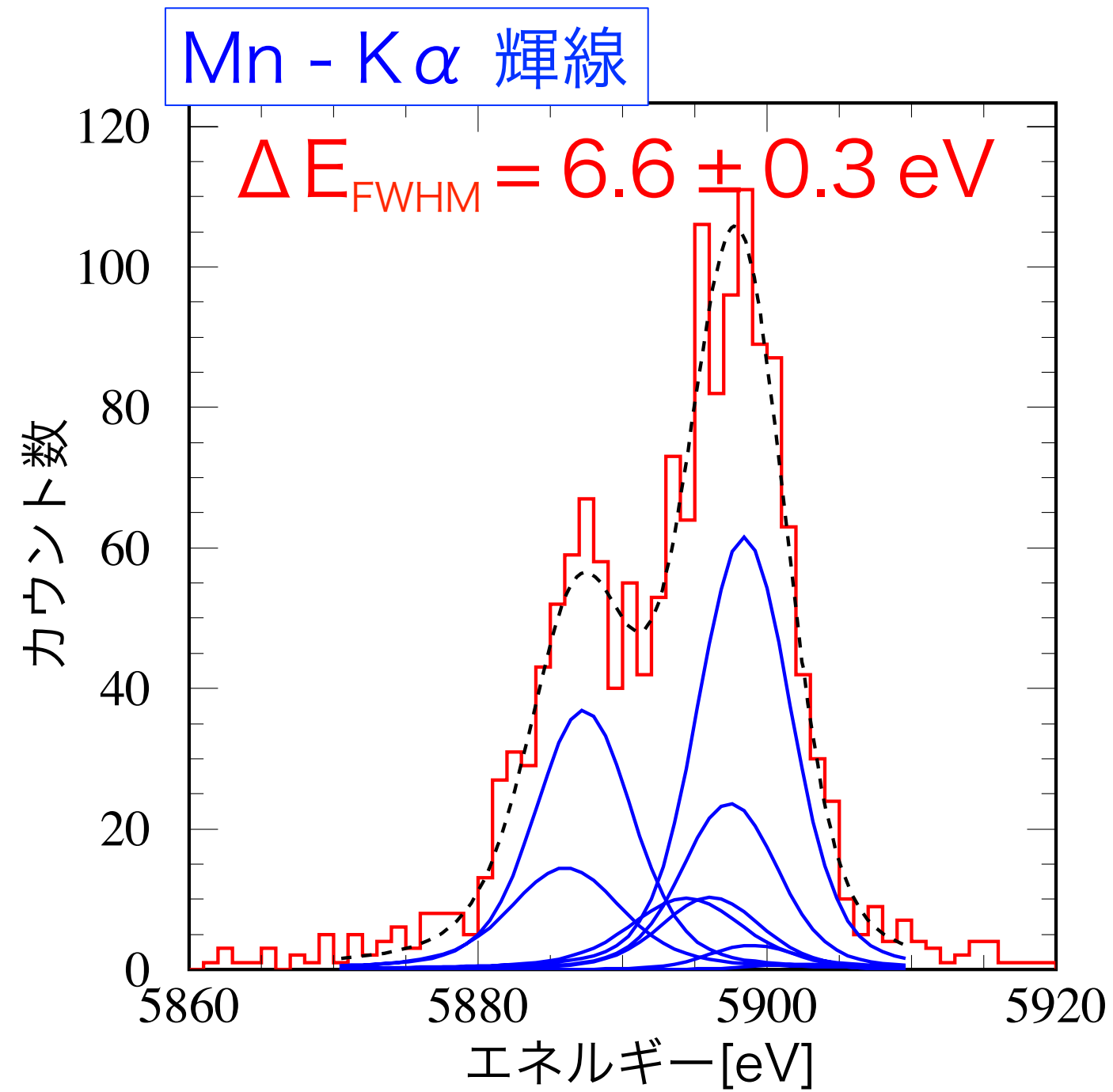
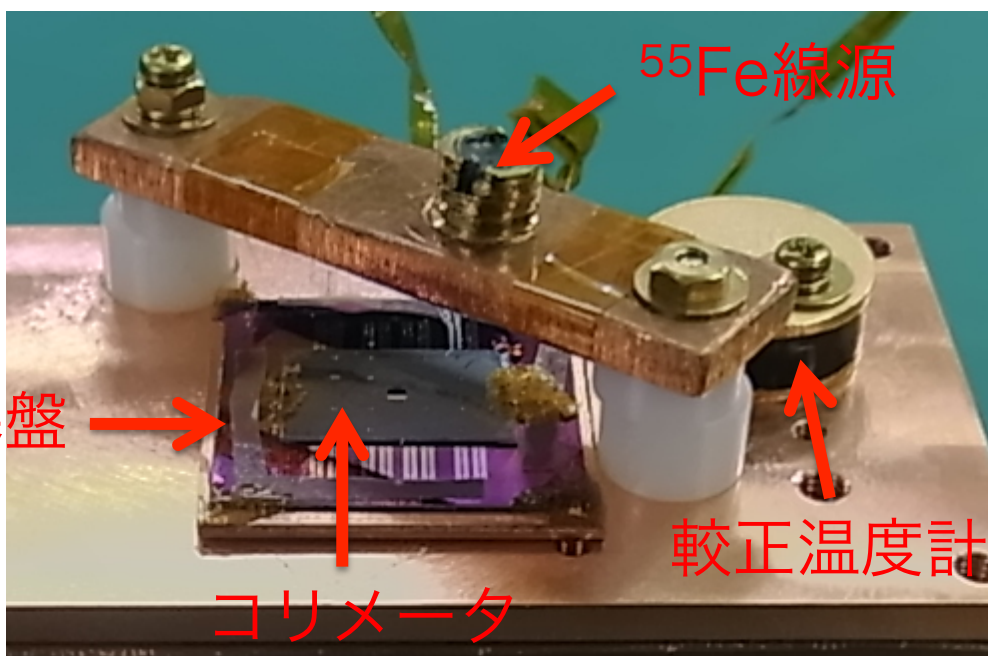
最大磁場印加時に、(2)のための超伝導シールドが磁場をトラップしたことが原因

12 mm厚のSiFeシールドにすることで、転移幅が~4 mΩに改善^[6]



分光性能

➤ 希釈冷凍機での測定で5 eVのエネルギー分解能を持つことがわかっているTES素子を使用して分光性能を評価(⁵⁵Fe線源)



自作ADR上でエネルギー分解能 **6.6 ± 0.3 eV (FWHM) @5.9 keV**を達成
希釈冷凍機と同程度の性能を実現できた。

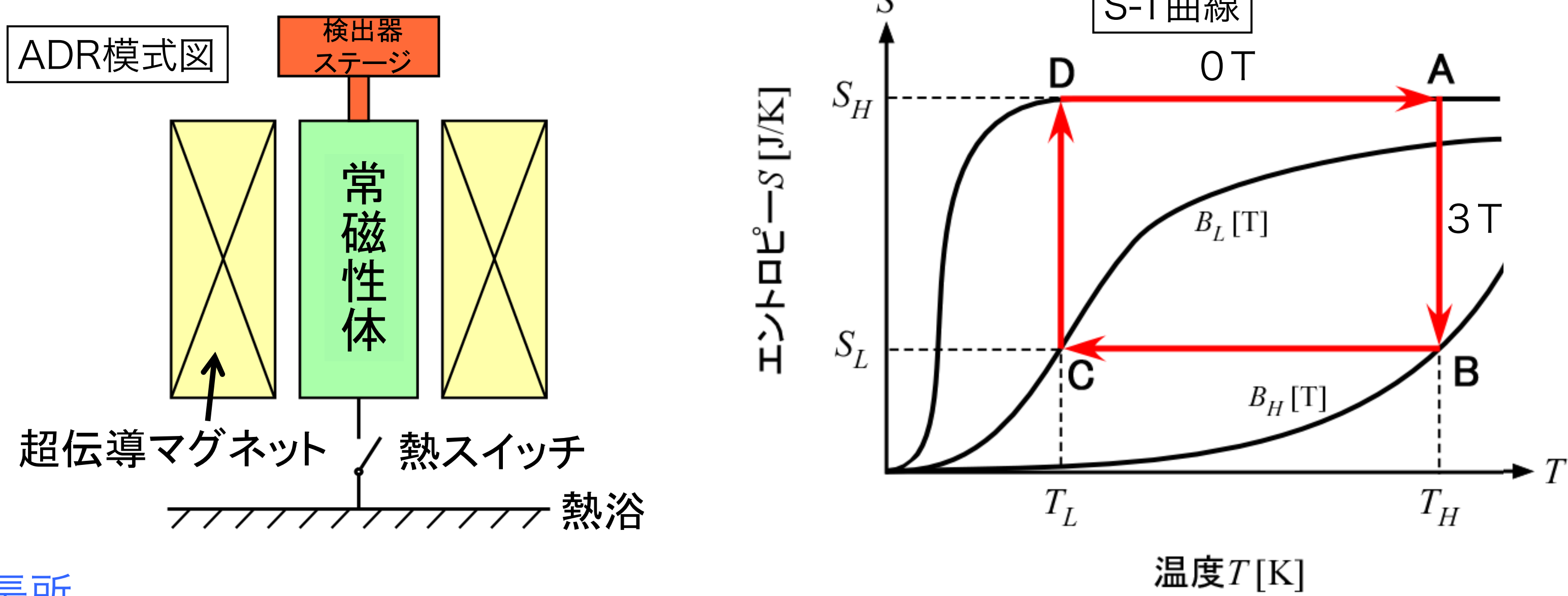
2. 断熱消磁冷凍機(ADR)

<動作原理>

A→B 等温磁化：熱浴と接した状態(熱スイッチon)で励磁、磁性体を磁化

B→C 断熱消磁：熱浴と切り離し(熱スイッチoff), 消磁 (冷却)

C→D 等温消磁：等温消磁(温度制御)



長所

- ✧ 冷却に重力は不要 ⇔ 希釈冷凍機は一般に重力を要する
- ✧ マグネット電流で温度を制御するため、温度安定度も高い

短所

- ✧ 数テスラの強い磁場を発生、磁場対策が重要
- ⇔TES型カロリメータは磁場に極めて敏感(~マイクロテスラ)

TES (Transition Edge Sensor)型カロリメータ：超伝導遷移端を超高感度の温度計として使用するX線マイクロカロリメータ

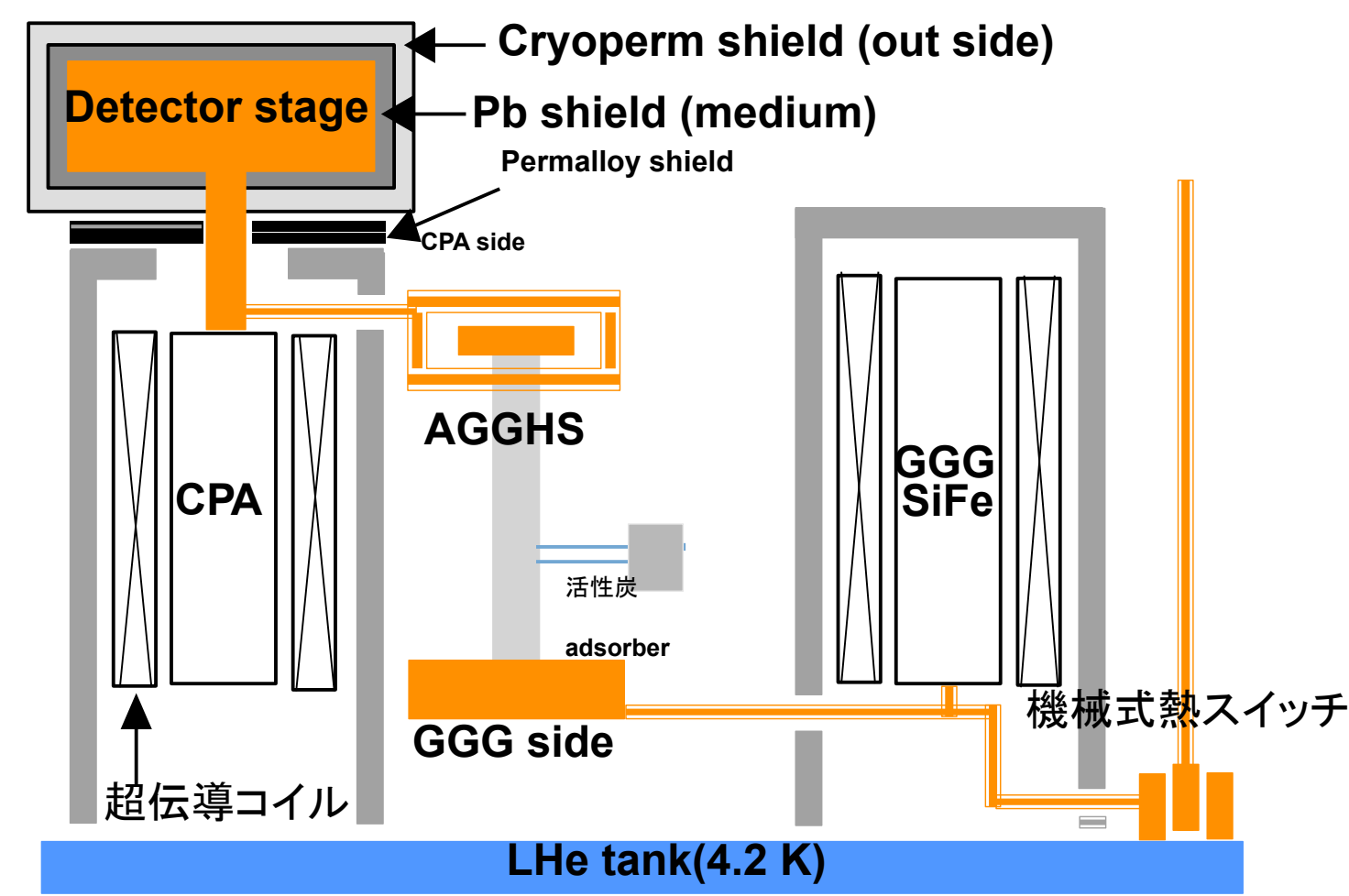
5. 2段式ADR (首都大・立教大)^[1,2,7]

2段式にすることで、より高温の熱浴(4 K)からの冷却を実現

- ✓ He減圧を必要としない
- ✓ 4.5 Kなら機械式冷凍機でも実現可能

➤ 磁性体

- ✓ 低温側：CPA (CrKミョウバン)
- ✓ 高温側：GGG (ガドリウム-ガリウム-ガーネット)



熱スイッチの開発^[8]

1-2段間の熱スイッチとして新方式のガスギャップ式熱スイッチを独自開発

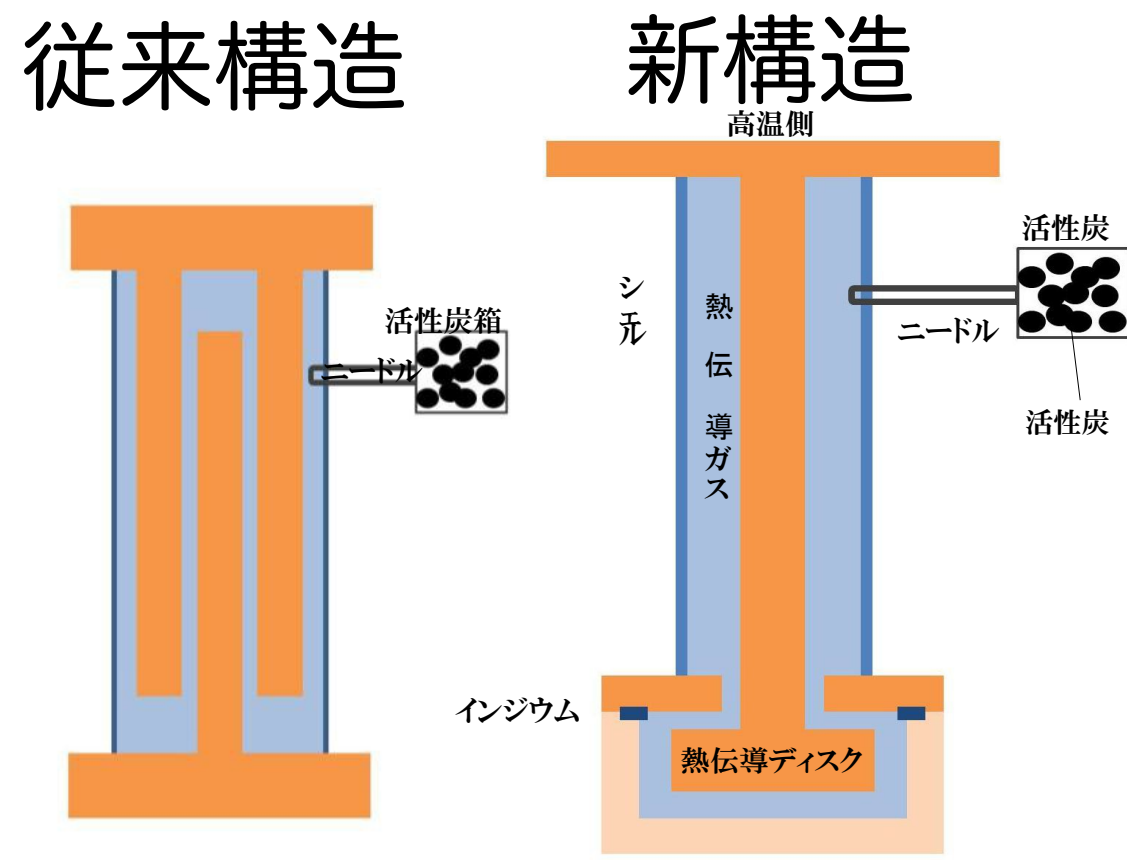
特徴：シェルを熱交換部と構造的に分離

G_{on} / G_{off} を独立して決定することが可能

設計値

- ON 時熱伝導度：~ 5 mW/K @ 2 – 0.05 K
- OFF時熱伝導度：~ 4 μW/K @ 1 – 0.05 K

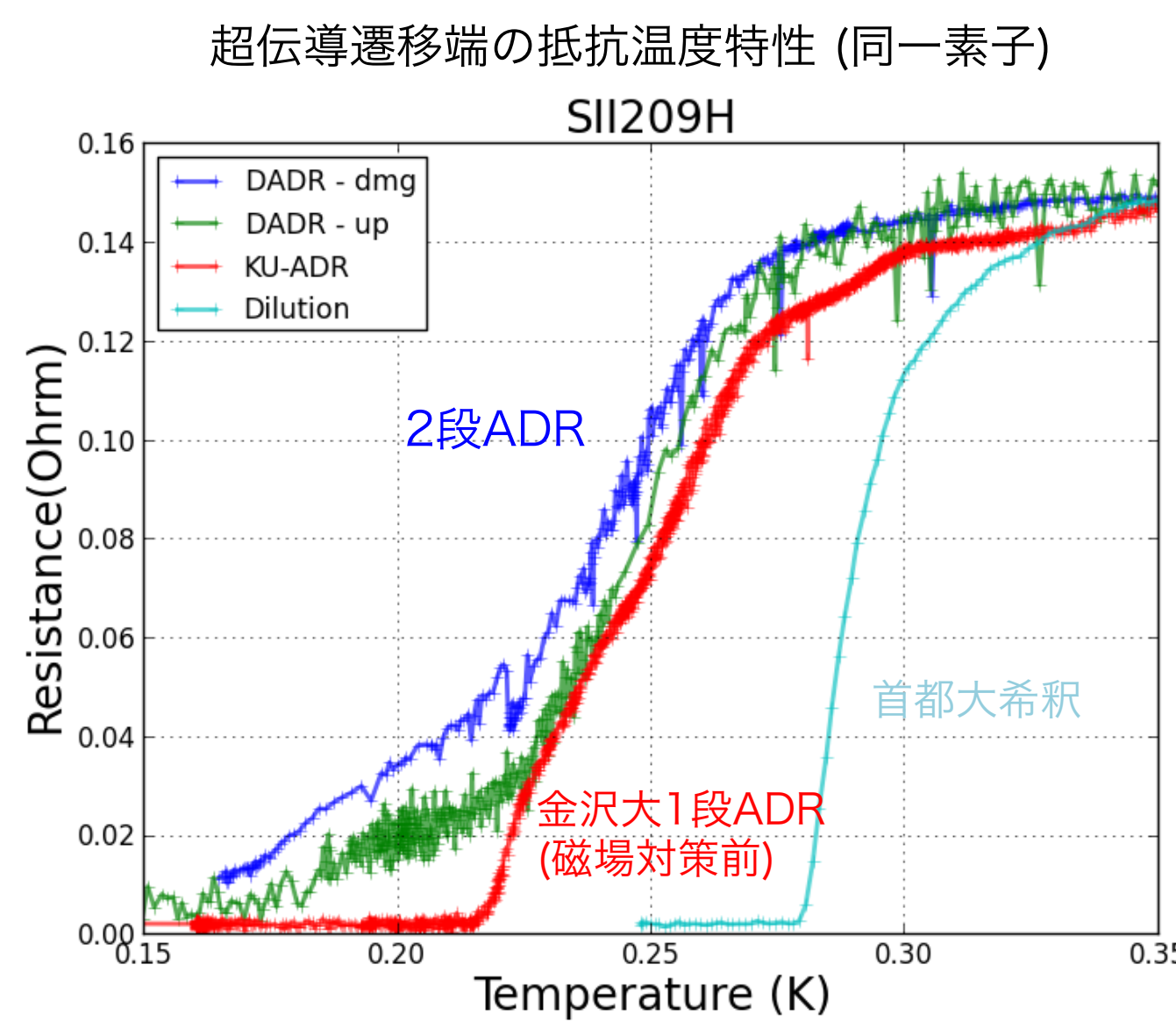
座屈加重を考慮してシェルの厚みを最適化中
半径5 mm, 厚さ60 μm



性能の現状

- ✓ 2段ADRの動作は実証、十分な冷却性能
- ✓ TESの抵抗温度(R-T)測定まで実施済み

ただし、転移カーブがなまるという現象が見られる
これは磁場対策前の金沢大ADRと同様の現象であり、超伝導マグネット磁場の影響を受けていると考えられる



6. まとめ

- ✧ 自作の1段式ADRでTESカロリメータを動作させ、エネルギー分解能 6.6±0.3 eVを達成
- ほぼ希釈冷凍機と同等の動作環境を実現できている
- ✧ 今後はさらなる性能改善と、地上実験に向けた整備を進めていく。

- ✧ 2段式ADRで冷却動作を実証し、TESカロリメータの超伝導遷移特性を測定することができた。
- ✧ 超伝導マグネットの影響を受けており、今後1段式ADRの知見を踏まえて改良を進めていく。

参考文献

- [1] Shinozaki, K., et al. 2008, SPIE 7011, 70113R
- [2] Shinozaki, K., et al. 2010, Cryogenics 50, 597
- [3] Sato, K., et al. 2009, AIP Conf. Proc. 1185, 669
- [4] Fujimoto, R., et al. 2010, AIP Conf. Proc. 1279, 309
- [5] Hoshino, A., et al. 2012, J. Low Temp. Phys. 167, 554
- [6] Hishi, U., et al. 2014, J. Low Temp. Phys. in press, DOI:10.1007/s10909-013-1005-4
- [7] Enoki, T., et al. 2012, J. Low Temp. Phys. 167, 771
- [8] Ishisaki, Y., et al. 2012, J. Low Temp. Phys. 167, 777