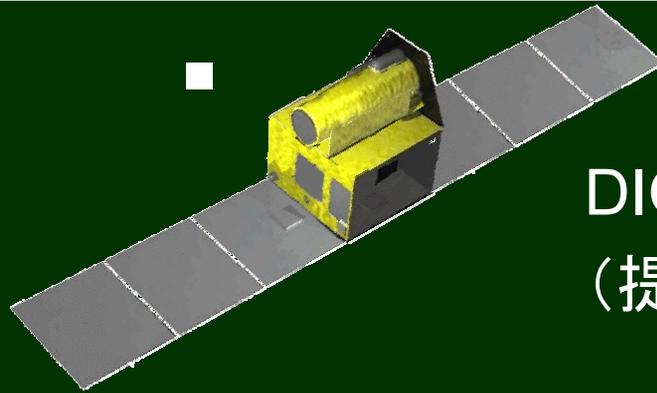


極低温X線検出器のための 断熱消磁冷凍機の開発

宇宙物理実験研究室

床井 和世



DIOS 衛星

(提案中 PI: 大橋)

宇宙の構造と進化の解明

⇒ TES型X線マイクロカロリメータ開発

- ・ 超伝導遷移端を利用した極低温検出器
- ・ 100 mK 以下で $\Delta E < 10$ eV のエネルギー分解能

断熱消磁冷凍機 (Adiabatic Demagnetization Refrigerator; ADR)

宇宙環境で動作可能、100 mK以下を実現、温度安定度10 μ K以下

目的

地上実験用、小型で可搬型

首都大ADR一号機 (これまで)

- 動作温度 100 mK で 10 時間 保持
- 温度安定度 10 μ K
- 最低到達温度 66 mK
- 液体He 保持時間 40時間



ADR一号機故障 → ADR二号機製作

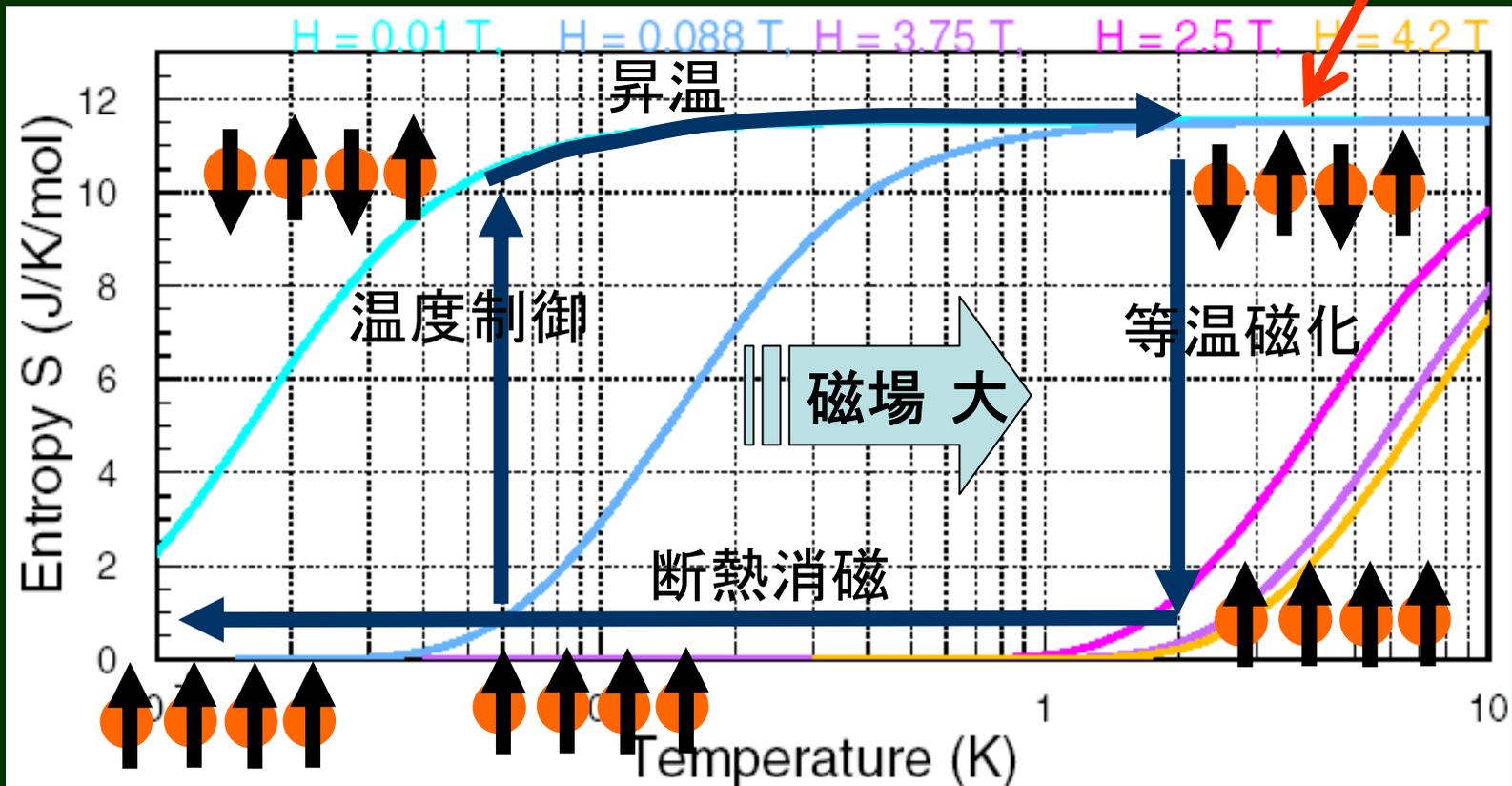
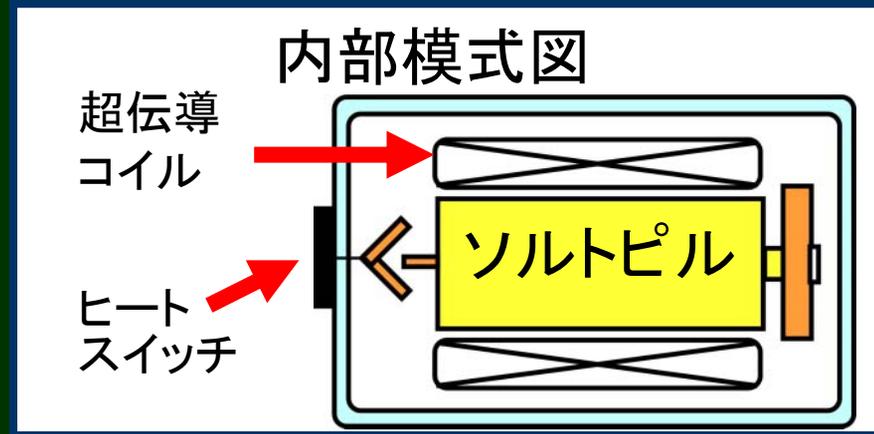
★ ADR熱設計

★ソルトピル(磁性体カプセル)の製作と評価

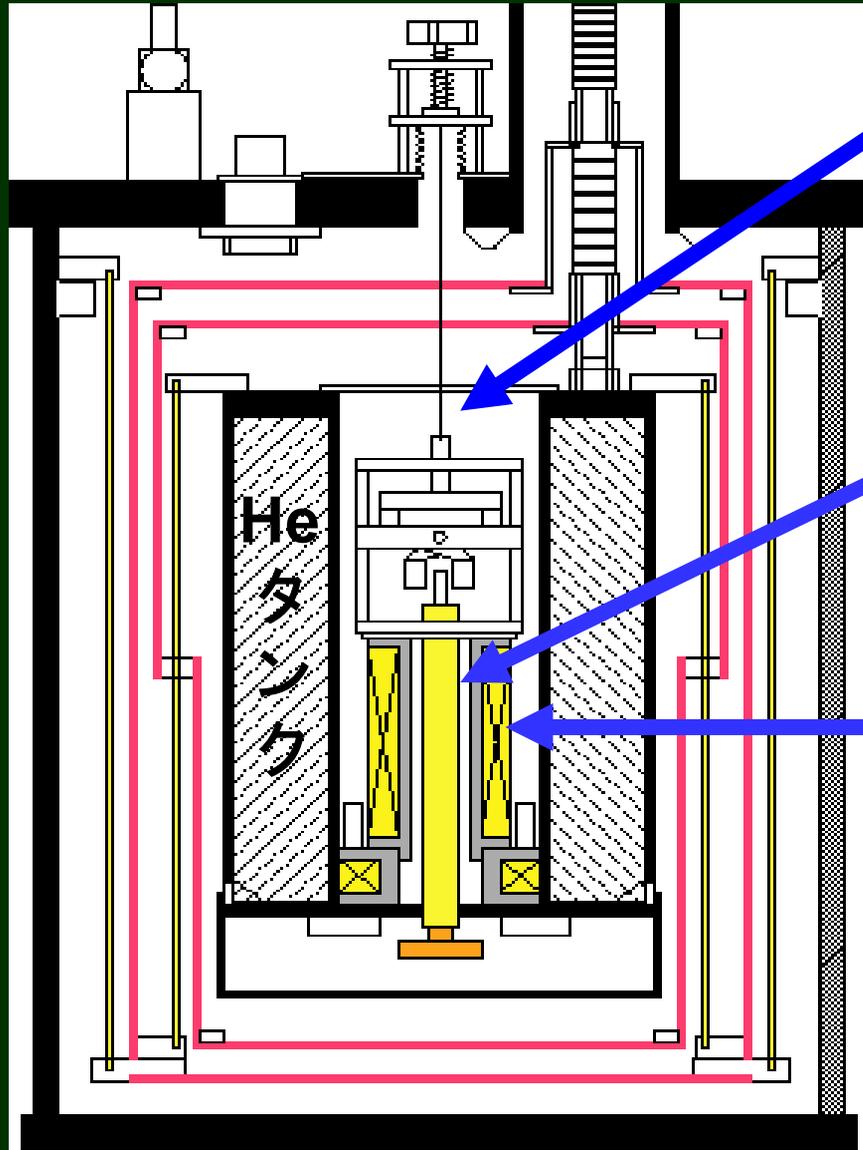
目次

- 1、 ADRの原理
- 2、 ソルトピルの製作
- 3、 冷却試験
- 4、 まとめと今後

断熱消磁の冷却原理



首都大ADRの中心部の構造



ヒートスイッチ

熱浴とのON、OFF

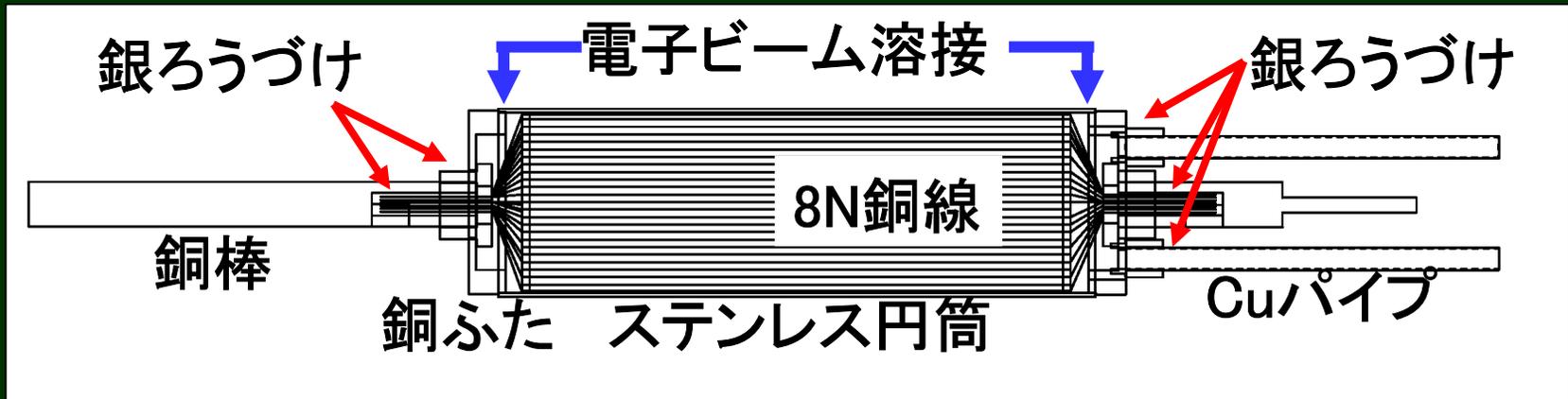
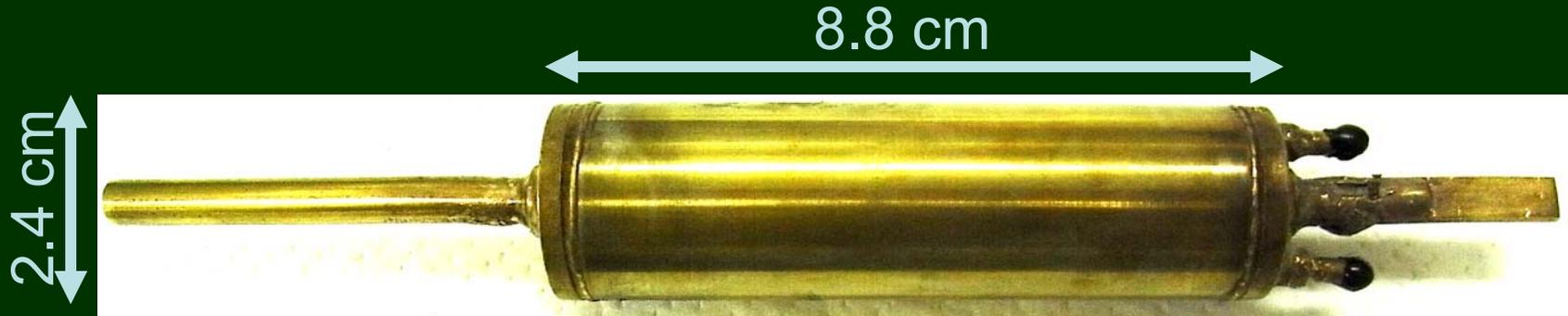
ソルトピル

エントロピー操作で磁気冷凍

超伝導コイル

ソルトピルに磁場を作る

ソルトピル容器構造



- ・ 外筒 SUS304 (厚さ0.2mm、24mm ϕ 、長さ80mm)
- ・ ふた 無酸素銅
- ・ 8N(99.99999%)銅線 (0.1mm ϕ 160本)
→ ソルトピル内部の熱伝導をよくする

ソルトピルの磁性塩の選択

磁性塩が冷凍機の最低到達温度や保持時間を決める

● ADR一号機

FAA : Feミョウバン



キュリー温度 26mK

保持時間 (流入熱1 μ Wで60 mK)

50 gで**13時間**

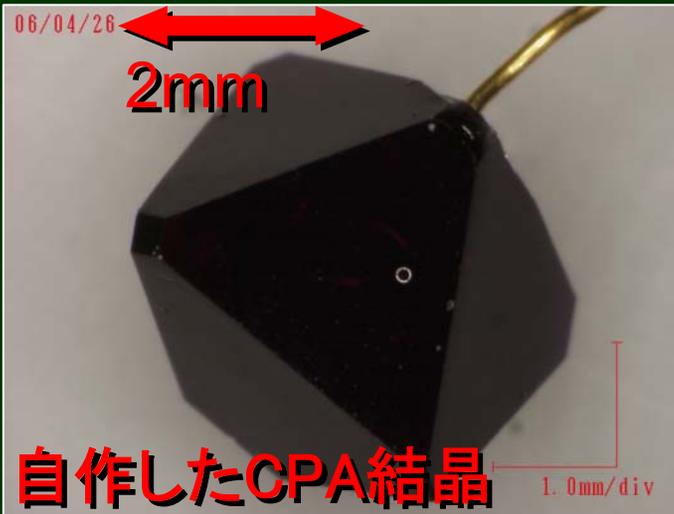
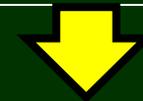
● ADR二号機

CPA : Cr K ミョウバン



4~11mK

50 gで10時間



- ・ FAAより動作温度を低くできる
- ・ NeXT衛星で使用予定

- ・ 磁化測定 (2K)
文献値の 77~108%
- ・ 質量密度測定
1.63 \pm 0.07 g/cm³ (文献値1.83 g/cm³)

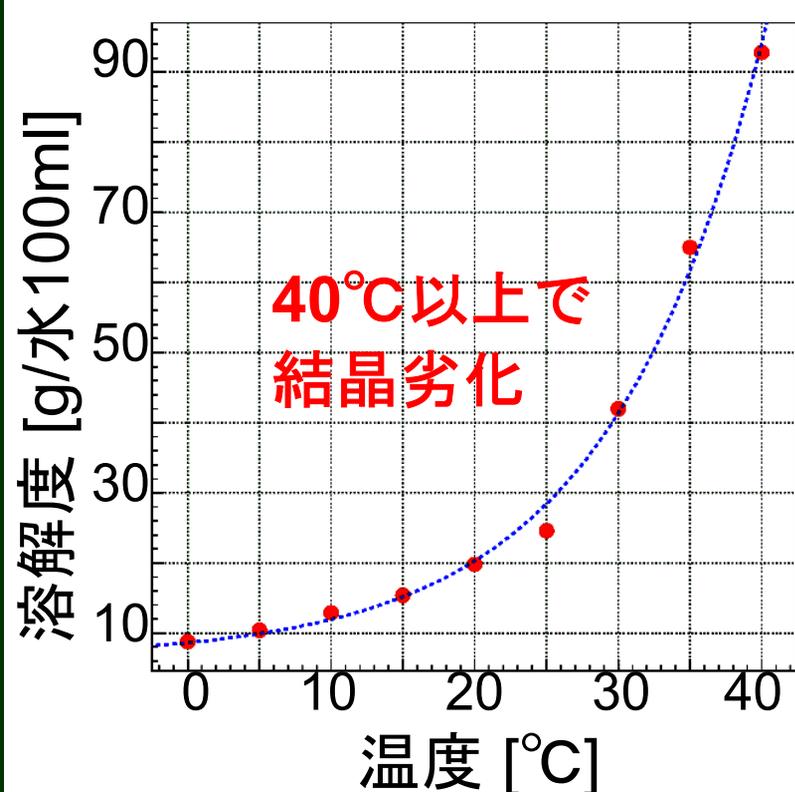
循環式結晶析出法

CPAは結晶成長が遅い
強酸を使わない

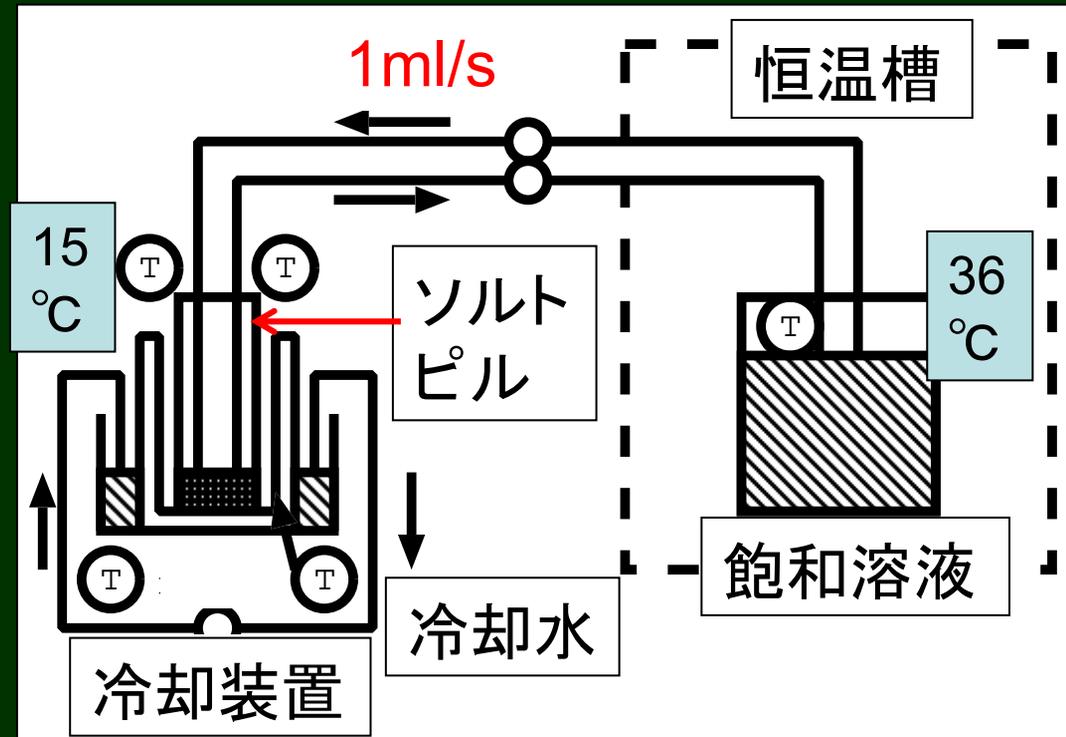


循環式を採用

実測した飽和溶解度曲線



溶液循環模式図



循環装置

ポンプ

ソルトピル



冷却装置

恒温槽



飽和溶液

析出速度 0.5 g/h (従来の10倍)
析出結晶 53 g (充填率 85%)

冷却試験

Wisconsin大

商用用ADRを用い試作ソルトピルで結晶の評価



容器構造を改善 (SUS 1/3)

首都大

ADR二号機とソルトピルの評価

宇宙科学研究本部(宇宙研)

将来的に導入見込みであり同様に評価



Wisconsin大



試作
ソルトピル



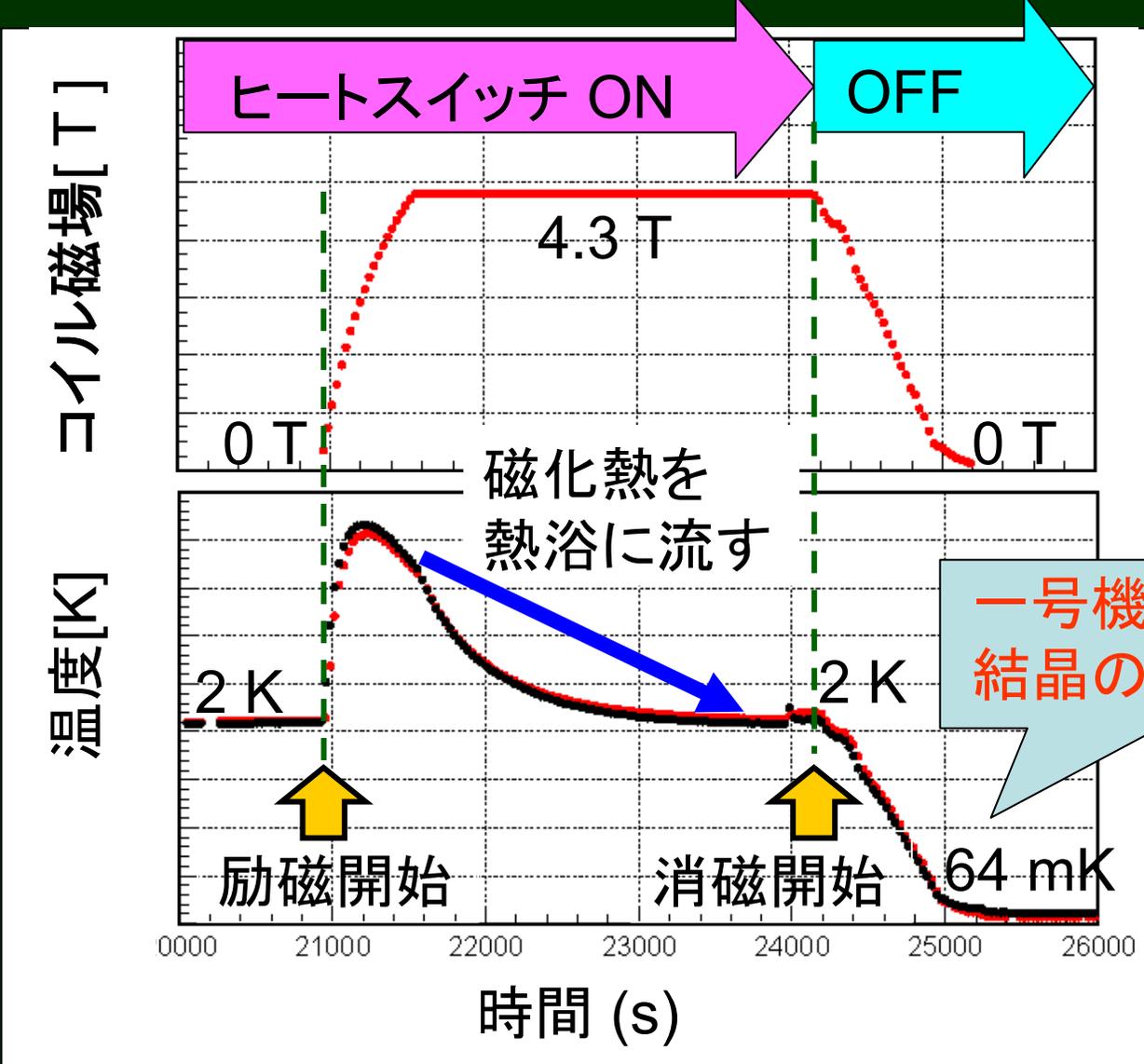
首都大



宇宙研

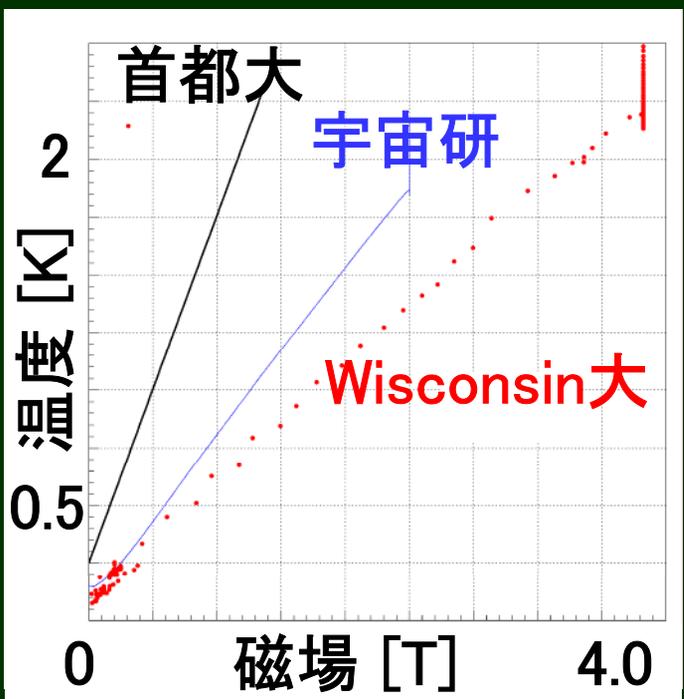
冷却サイクル

(例) Wisconsin大冷却試験結果



実験結果

| | Wisconsin大 | 首都大 | 宇宙研 |
|------------------|------------|--------|--------|
| 消磁開始温度; T_H | 2.1 K | 2.5 K | 1.86 K |
| 最大磁場 ; B_H | 4.2 T | 1.36 T | 2.5 T |
| 到達温度 ; T_L | 64 mK | 250 mK | 120 mK |
| (理想値) ; T_{L0} | 50 mK | 184 mK | 75 mK |



グラフより $B/T \sim \text{一定}$

到達温度 → 初期温度と磁場で決まる
首都大の最大磁場が弱く改善が必要

理想的な到達温度は 内部磁場 B_L で決まる
外部磁場 0 にしても残る磁化

$$T_{L0} = T_H B_L / B_H \quad (B_L = 0.1 \text{ T})$$



到達温度と理想値の違いについて考察

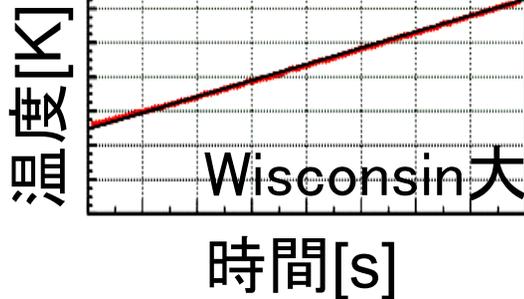
到達温度を制限している要因

- ① 熱流入（支持ワイヤー、配線、輻射）
- ② 磁場分布の不均一性
- ③ 容器に使われている SUS, Cu による冷却能力の損失
- ④ ソルトピル内部の温度勾配
- ⑤ Eddy current（渦電流）による加熱
- ⑥ CPA 結晶の内部磁場の不定性

熱流入の実測と見積もり

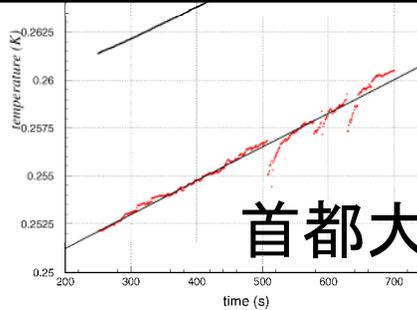
$$dT/dt = 1.9 \mu\text{K/s}$$

(220 mK)



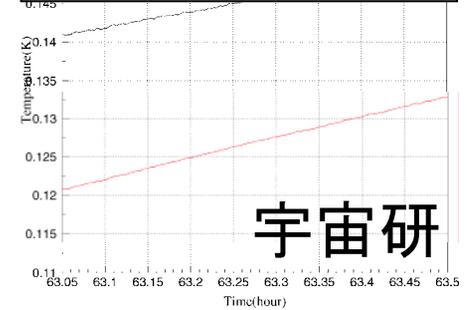
$$dT/dt = 17.6 \mu\text{K/s}$$

(255 mK)



$$dT/dt = 7 \mu\text{K/s}$$

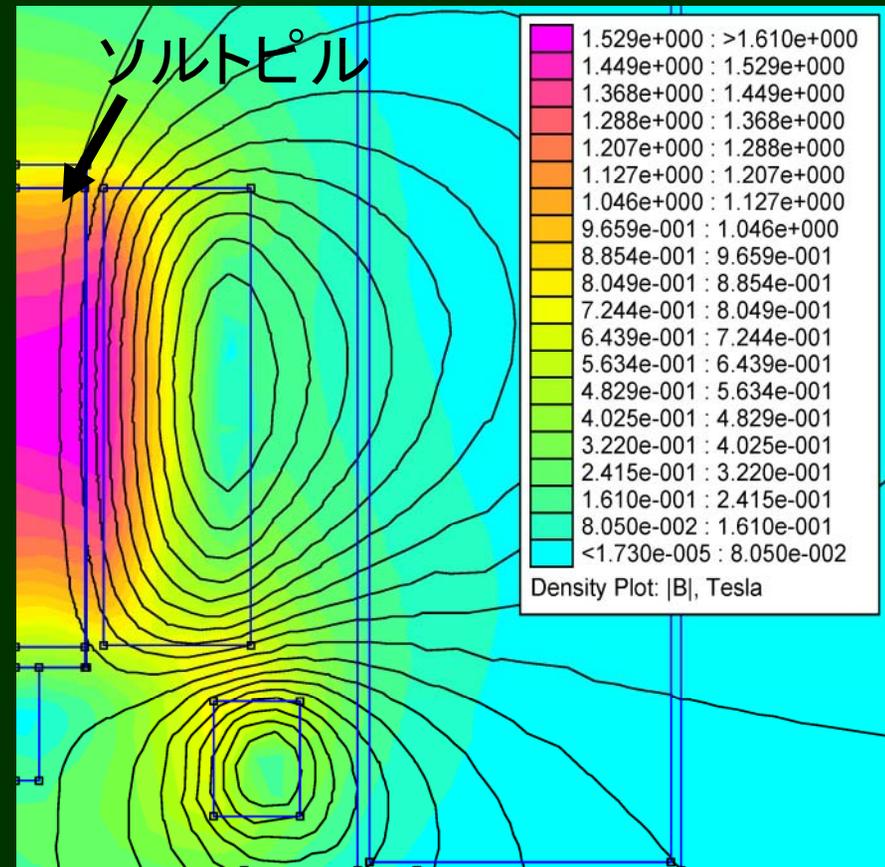
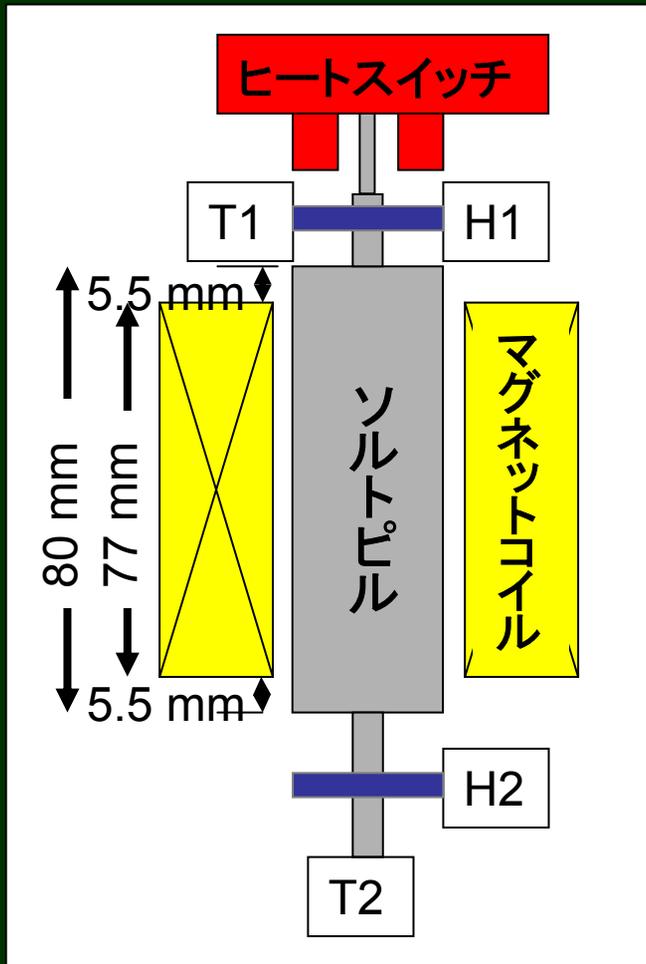
(120 mK)



| | Wisconsin大 | 首都大 | 宇宙研 |
|---------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 実測 $P = C (dT/dt)$ | 0.25 [μW] | 2.0 [μW] | 1.5 [μW] |
| 見積もり 支持ワイヤー | 0.23 | 0.1 | 1.0 |
| 配線 | 0.004 | 0.18 | 0.13 |
| 輻射 (σT^4) | 0.00007 | 0.0002 | 0.0002 |
| 超過熱流入 | | 2 (26 K) | 0.4 (17 K) |
| 断熱消磁中の温度上昇 | 1 mK | 16 mK | 6mK |

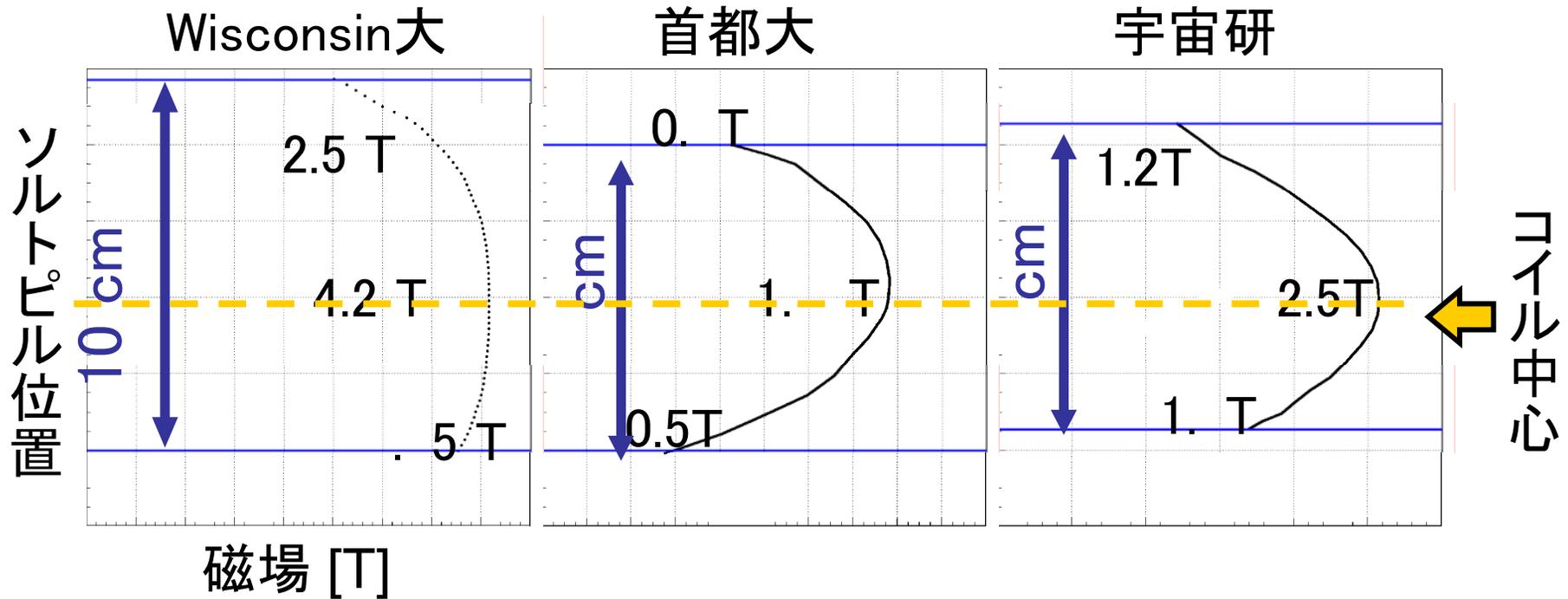
磁場分布の不均一性

磁場計算ソフトを用いて磁場分布を見積もる



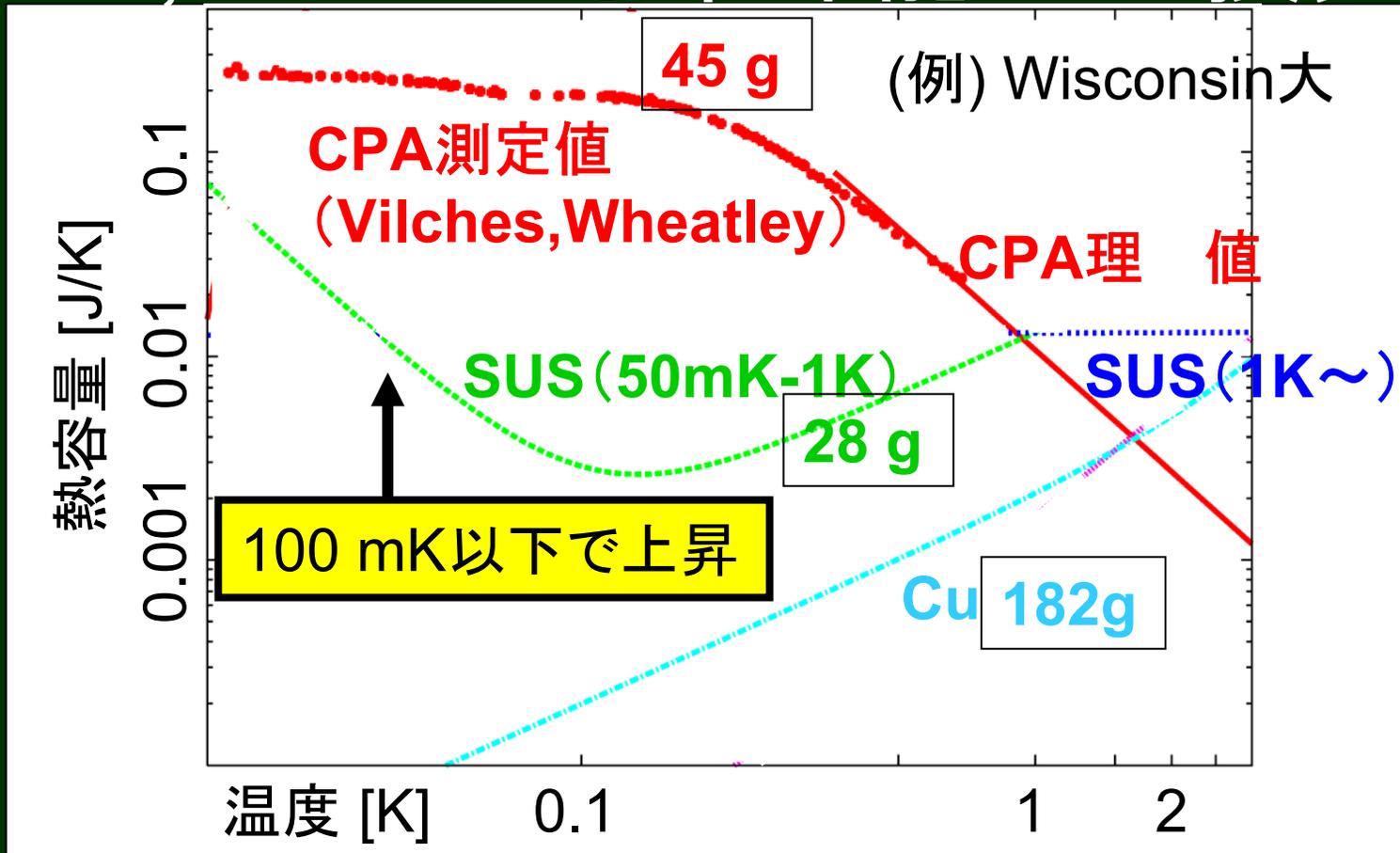
(例) 首都大

磁場分布の不均一性



| | Wisconsin大 | 首都大 | 宇宙研 |
|--------|------------|----------|---------|
| 均磁場 | 3.76 T | 1.13 T | 2.09 T |
| 均/最大 | 90% | 83% | 84% |
| 到達温度上昇 | 4~6 mK | 23~37 mK | 9~15 mK |

SUS, Cuによる冷却能力の損失



| | |
|------|----------------|
| SUS | 28 g (20 mJ) |
| Cu | 182 g (4.5 mJ) |
| 温度上昇 | ~4 mK |

首都大、宇宙研ではSUSを1/3にし、
損失は にならない

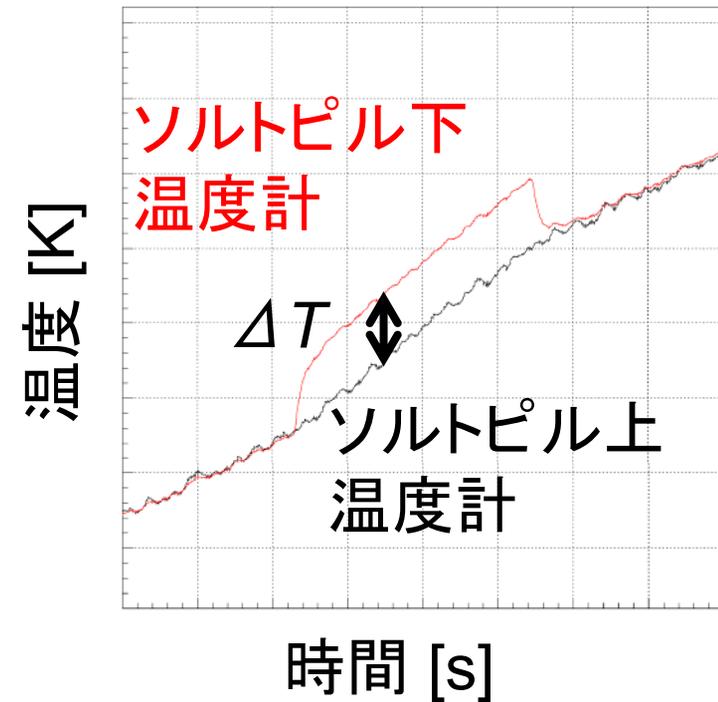
ソルトピル内部の温度勾配

(例) 宇宙研 一タ

流入熱 P 、熱伝導率 G 、
温度勾配 ΔT の

$$P = G \Delta T$$

ソルトピル上下に けたヒーターと
温度計を使い、熱伝導率 G を測定

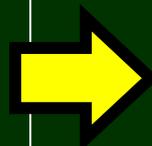


| | Wisconsin | 首都大 | 宇宙研 | |
|---------|-----------|----------|------|------------|
| G の実測 | 0.83 | 0.5~0.83 | 0.48 | [mW/K] |
| P の実測 | 0.25 | 2.0 | 1.5 | [μ W] |
| 温度勾配 | 0.3 | 2.4~4 | 3 | [mK] |

要因のまとめ(首都大)

- | | |
|------------------------------------|----------|
| ① 熱流入(支持ワイヤー、配線、輻射) | 16mK |
| ② 磁場の不均一性 | 23~37 mK |
| ③ SUS, Cu による冷却能力の損失 | ~1 mK |
| ④ ソルトピル内部の温度勾配 | 2.4~4 mK |
| ⑤ Eddy current による加熱 | ~0.4 mK |
| ⑥ CPA 結晶の内部磁化の不定性 ($B_L=0.1$ Tを定) | |

| | |
|---------|------------|
| 損失計 | 43~59 mK |
| 理想値 | 184 mK |
| 理想値+損失 | 227~243 mK |
| 実測の到達温度 | 250 mK |



見積もった損失を考慮すれば、到達温度の明がつく

Wisconsin、宇宙研の結果も同様に明可

まとめと今後の

まとめ

- ・ 熱設計によりHe保持時間 36時間を達成
- ・ 循環結晶析出法による CPA ソルトピルの製作 システムを構
- ・ ソルトピル容器を設計・製作
- ・ 冷却試験を 行い、冷却温度を制限している要因について考察

今後の

- ・ 首都大ADRの最低到達温度の改善

最大磁場を2.8 Tまで 上げる

消磁開始温度を2 Kに下 げる

熱流入を0.6~0.8 μ Wに下 げる

到達温度 86 mKが達成できる

目 50mK → マグネット、
ポンプの 改善が ほしい

■

わり

要因のまとめ(部)

| | Wisconsin大 | 首都大 | 宇宙研 |
|----------------------|------------|---------|---------|
| ① 熱流入 | 1 | 16 | 6 mK |
| ② 磁場の不均一性 | 4~6 | 23~37 | 9~15 mK |
| ③ SUS, Cu による冷却能力の損失 | 4 | 1 | ~1.5 mK |
| ④ ソルトピル内部の温度勾配 | 0.3 | 2.4~4 | 3 mK |
| ⑤ Eddy current による加熱 | 13 | 0.4 | ~0.3 mK |
| ⑥ CPA 結晶の内部磁化の不定性 | | | |
| <hr/> | | | |
| 損失 計 | 22~24 | 43~59 | 20~26 |
| 理想値 | 50 | 184 | 75 |
| 理想値+損失 | 72~74 | 227~243 | 95~101 |
| 実測の到達温度 | 64 | 250 | 120 |

- 最大磁場を2.8Tまで ける
 - 消磁開始温度を2Kに下 る
 - 熱流入をADR一号機で実現していた0.6~0.8 W以下に下 る
 - 見積もり
 - $T_L = T_H B_L / B_H = 2 \cdot 0.1 / 2.8 = 71\text{mK}$
 - 熱流入の 熱流入1/3なので16mKの1/3 → ~5mK
 - 磁場の 均磁場 2.8 83%=2.324 T → 9~15mK
 - SUS,Cuの ~1mK
 - 温度勾配 熱流入1/3なので4mKの1/3 → ~1mK
- ➡ 到達温度 86mKが達成できる

50mKを達成するには 初期温度1.5K、磁場4T → 37mK

熱流入の見積もり

流入熱と熱容量はそれぞれ時間化するの、のため温度をて
 見積もった熱流入と均した熱容量で計算

0.5K以上

| | Wisconsin大 | 首都大 | 宇宙研 |
|------------------------|------------|--------|--------|
| 支持ワイヤー ; Q1 [μ W] | 0.2 | 0.12 | 0.95 |
| 輻射 ; Q2 [μ W] | --- | ~1.8 | ~0.3 |
| 時間 ■ ; t [s] | 700 | 1000 | 600 |
| (Q1+Q2) t [mJ] | 0.14 | 1.92 | 0.75 |
| 熱容量 [mJ/K] | 200 | 150 | 200 |
| 温度上昇 | 0.7 mK | 12.8mK | 3.5 mK |

0.5-0.1K

| | | | |
|---------------|-------|-------|-------|
| 支持ワイヤー | 0.225 | 0.125 | 1.03 |
| 輻射 | --- | ~1.8 | ~0.3 |
| 時間 | 360 | 200 | 360 |
| (Q1+Q2)t [mJ] | 0.08 | 0.385 | 0.48 |
| 熱容量 [mJ/K] | 200 | 150 | 200 |
| 温度上昇 | 0.4mK | 2.6mK | 2.4mK |

1 mK 16 mK 6 mK

Eddy current

磁化を要する、部分に渦電流が誘起され、ジュール熱が発生する。渦電流は磁場が導体をくぐる積が大きいと速に増加する。

$$\dot{Q} = \left(\frac{dB}{dt}\right)^2 \frac{\gamma \cdot A \cdot V}{32\rho}$$

=4/π, A断面積, V体積, ρ電気抵抗率

| = 3.6 × 10 ⁻⁸ (4N銅線実測) | Wisconsin大 | 首都大 | 宇宙研 |
|-----------------------------------|------------|--------|--------|
| ジュール熱[mJ] | 2.65 | 0.078 | 0.68 |
| 熱容量 [mJ/K] | 200 | 150 | 200 |
| 温度上昇 | 13mK | 0.5 mK | 0.34mK |

| = 1.6~18 × 10 ⁻⁸ [cm] | Wisconsin大 | 首都大 | 宇宙研 |
|----------------------------------|------------|-------------|-----------|
| ジュール熱[mJ] | 0.53~6.05 | 0.015~0.175 | 0.14~1.57 |
| 熱容量 [mJ/K] | 200 | 150 | 200 |
| 温度上昇 [mK] | 2.6~30 | 0.01 ~1.2 | 0.7~7.85 |

磁場分布の不均一性

$B/T = \text{一定}$ の μ を使い、最大磁場と 均磁場での到達温度の違いを見積もる（内部磁場は 0.06~0.01 T にふる）

| | Wisconsin大 | 首都大 | 宇宙研 |
|-------------|------------|----------|---------|
| 消磁開始温度 | 2.1 K | 2.5 K | 1.86 K |
| 最大磁場 | 4.2 T | 1.36 T | 2.5 T |
| 見積り(0.1T) | 50 mK | 184 mK | 74 mK |
| 見積り(0.08T) | 40 mK | 147 mK | 60 mK |
| 見積り(0.06 T) | 30 mK | 110 mK | 45 mK |
| 均磁場 | 3.76 T | 1.13 T | 2.09 T |
| 見積り(0.1T) | 56 mK | 221 mK | 89 mK |
| 見積り(0.08T) | 45mK | 177 mK | 71 mK |
| 見積り(0.06 T) | 34 mK | 133 mK | 53 mK |
| 到達温度上昇 | 4~6 mK | 23~37 mK | 9~15 mK |

磁場分布の不均一性(首都大)

$B/T = \text{一定}$ の μ を使い、最大磁場と 均磁場での到達温度の違いを見積もる (内部磁場は 0.06~0.1 T にふる)

■
消磁開始温度 2 K

最大磁場 2.8 T

見積り(0.1T) 71 mK

見積り(0.08T) 57 mK

見積り(0.06 T) 43 mK

均磁場 2.324 T

見積り(0.1T) 86 mK

見積り(0.08T) 69 mK

見積り(0.06 T) 52 mK

到達温度上昇 9~15 mK

磁性体

磁性体を冷 として用いるのは、低温で強磁性体となり、エントロピーが下がるため、低温にて大きな 熱を持つため冷 として使用することができる

す くのADR

導体マイクロカロリメータが

体ネ ンを予冷用冷 ンに使用

— の断熱消磁冷凍で動作温度60 mKを36時間保持できる設計

とADR

- ・ 冷凍機

^3He と ^4He を分、 することで冷却する冷凍機

^3He と ^4He の 液は 温度 0.76K 以下で ^3He - と ^3He -
に分 し、 ^4He より い ^3He が上に

^3He のエンタルピーは で なり、これを さ ることで
冷却が こり、 ^3He の循環速度を上 ることで大きな冷却能力を
る

磁場による を と けないので実験室で使用される

ヒーターを用いて温度制御

- ・ ADR

冷 に 体を使用しているため い温度安定性

体冷 を冷凍機内に 入さ るため冷却能力劣る

磁場の が される

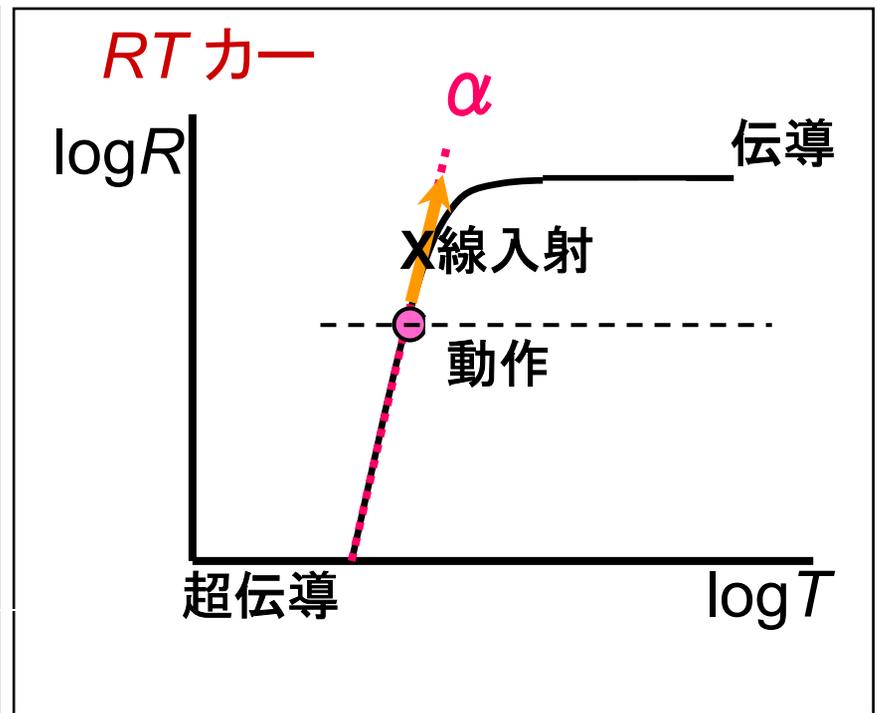
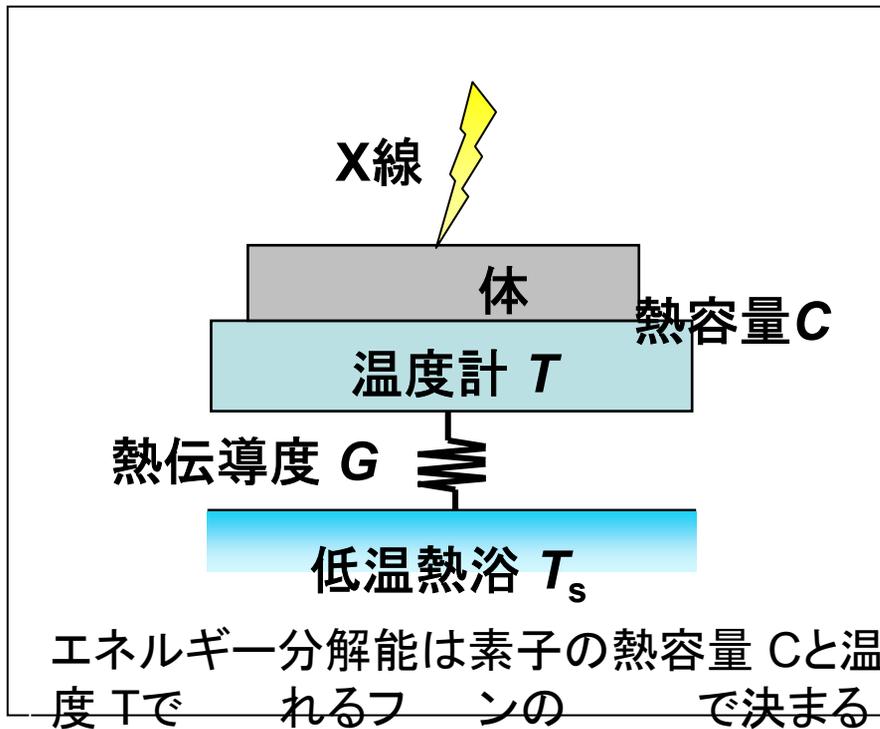
1. TESカロリメータの動作原理

・X線マイクロカロリメータ

・TES温度計 (Transition Edge Sensor)

X線光子のエネルギーを素子の温度上昇として検出

超伝導 移端を温度計として利用

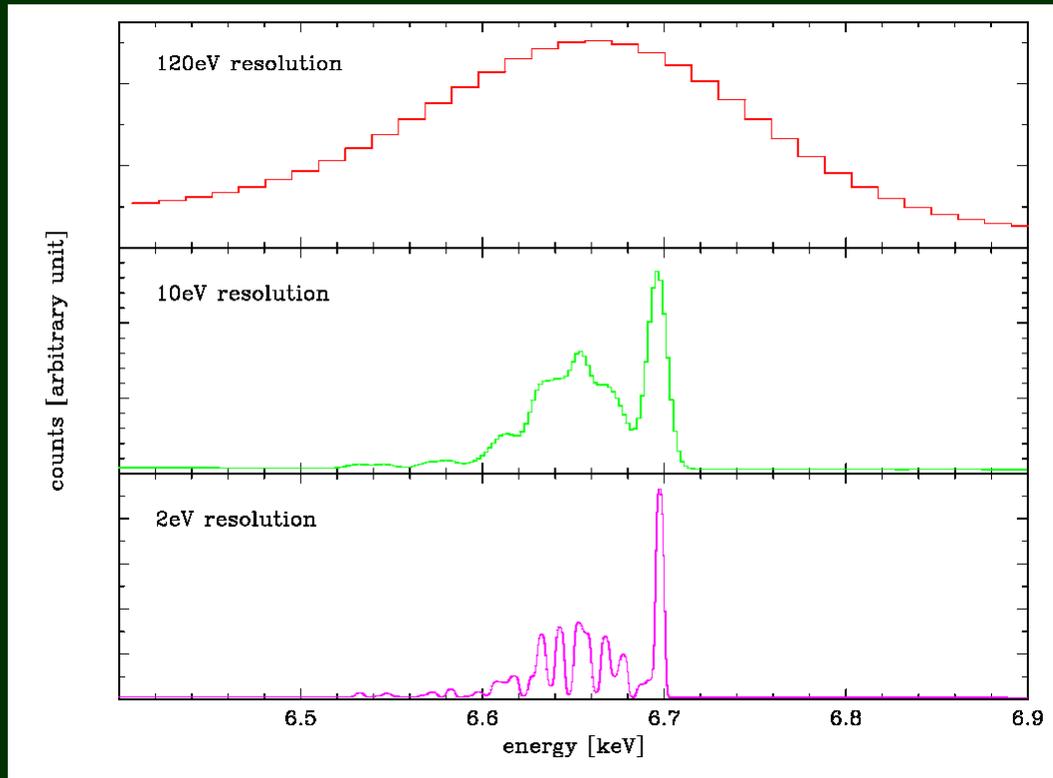


エネルギー分解能

$$\Delta E \propto \sqrt{k_B T^2 C / \alpha}$$

温度計の 度 $\alpha = \frac{d \log R}{d \log T}$

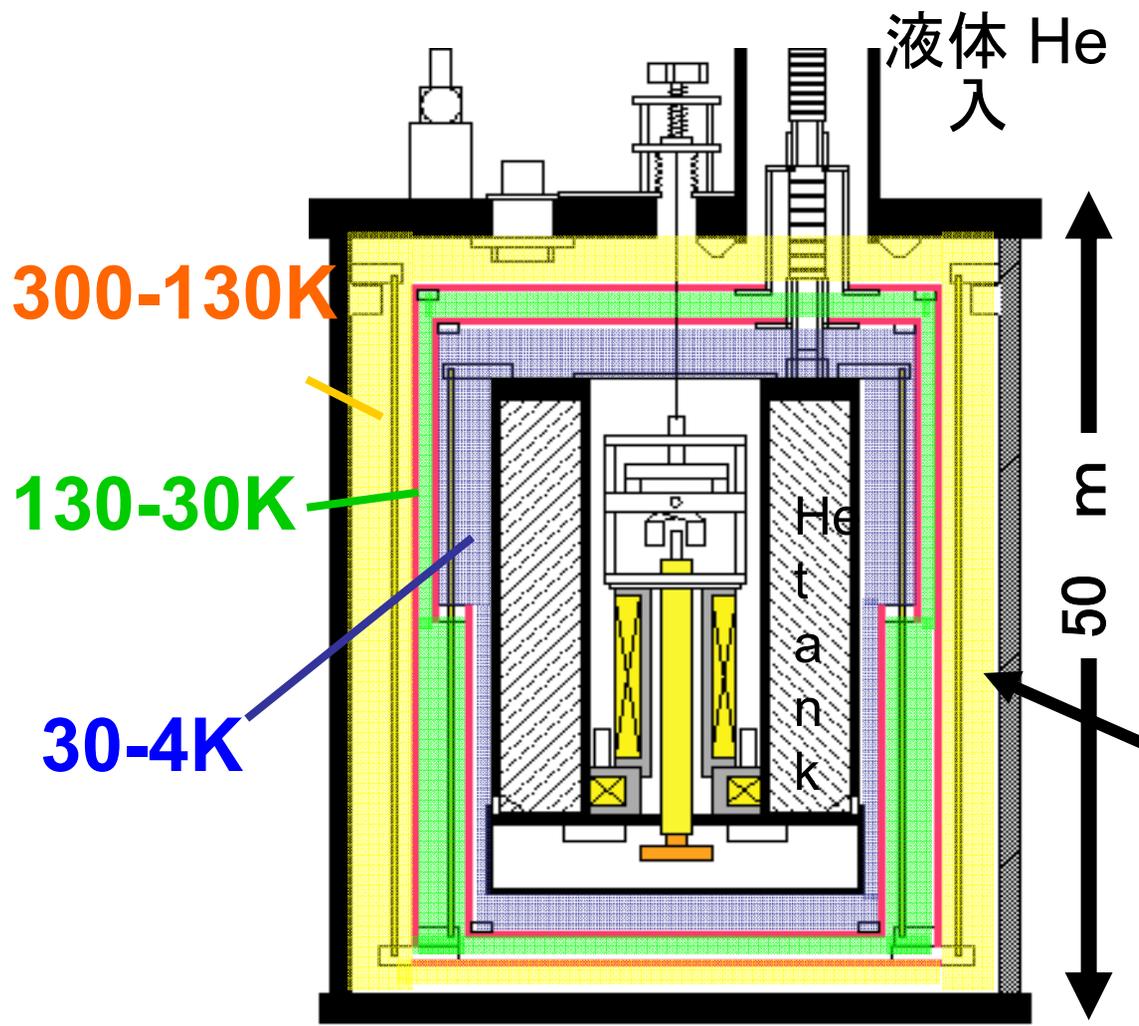
温度 $kT=2\text{keV}$ の 学的に いプラ マ 射 される 6.7keV の 線



エネルギー分解能がよくなると 線の 構造まで見える

ADRの熱設計

輻射による熱入をための断熱構造(Multi-Layer Insulation)



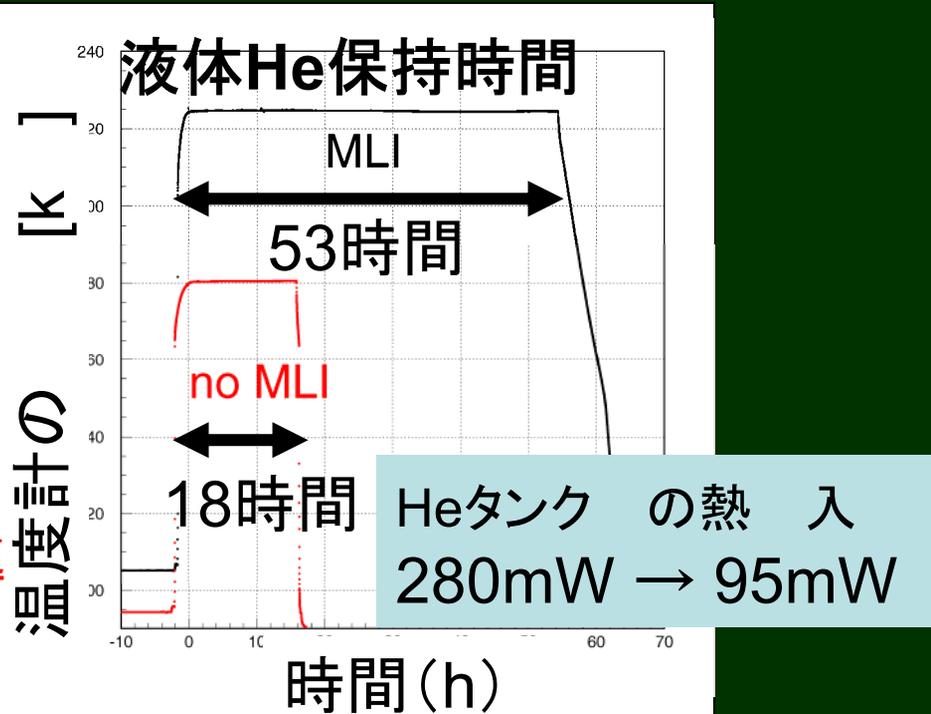
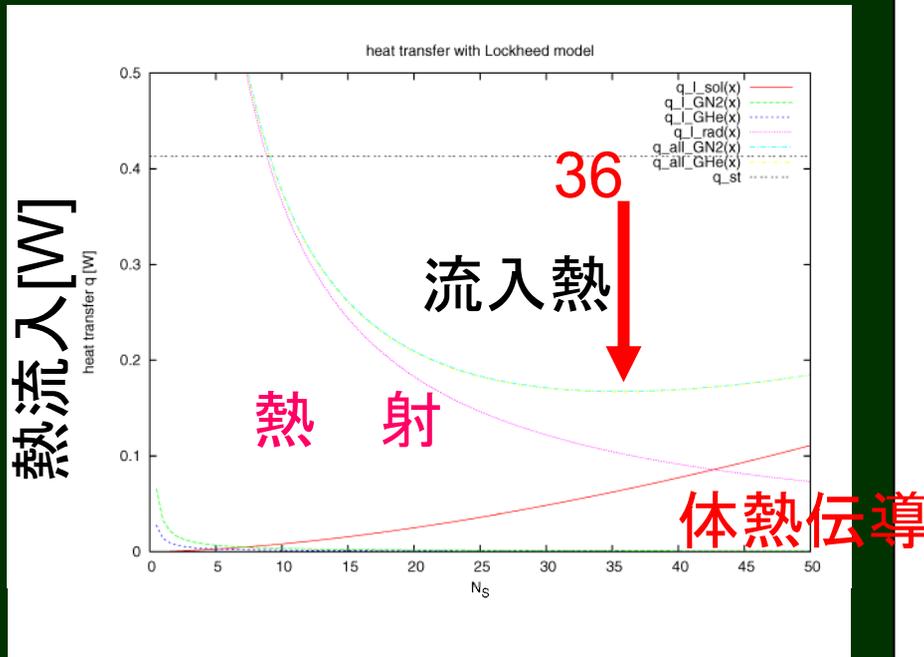
入
300-130 K

MLIの最 化

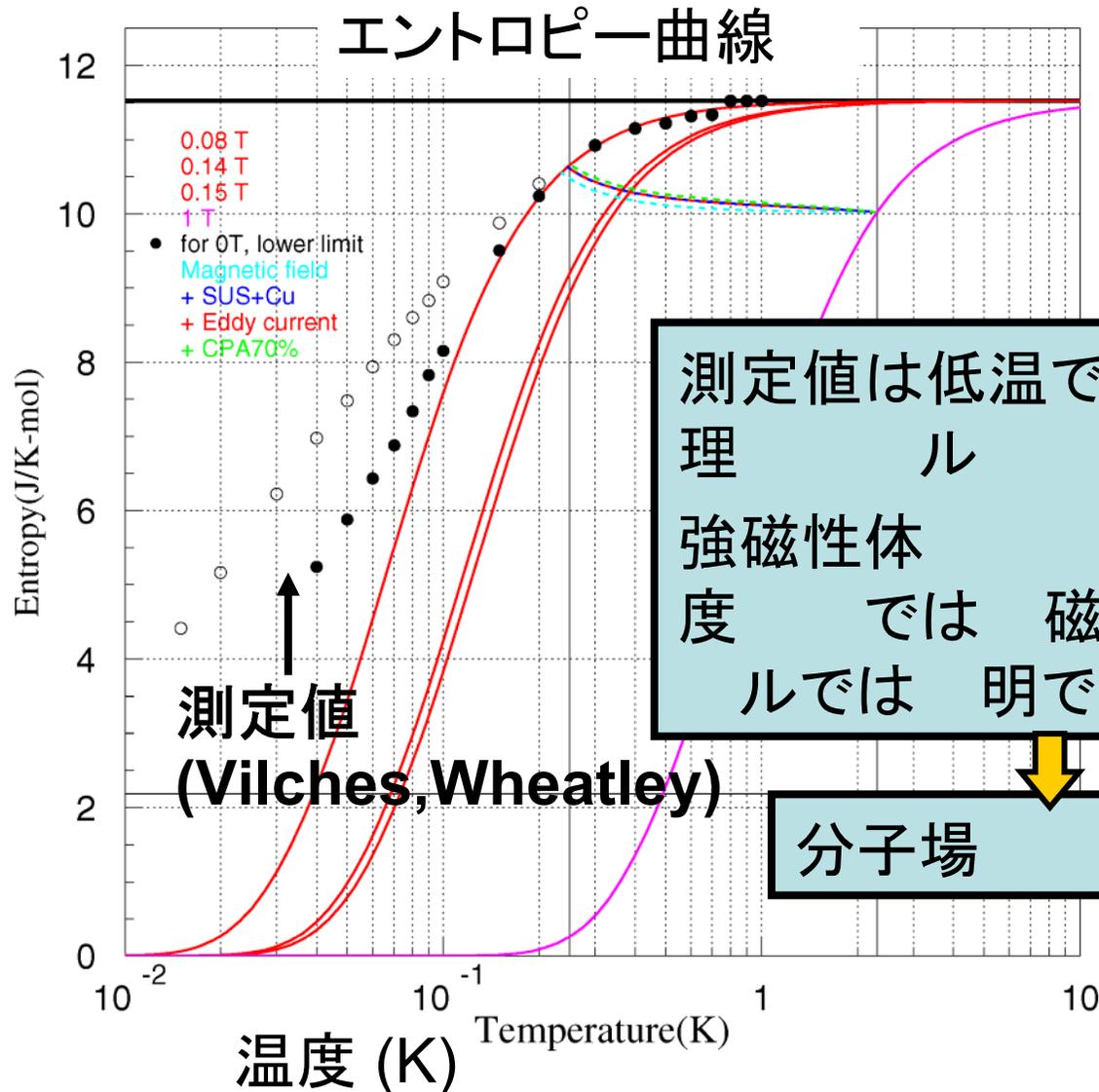
AI フルムを たもの

Lockheed ル

熱 射 スの熱伝導(度 10^{-6} Torr) 体の熱伝導



内部磁場の不定性

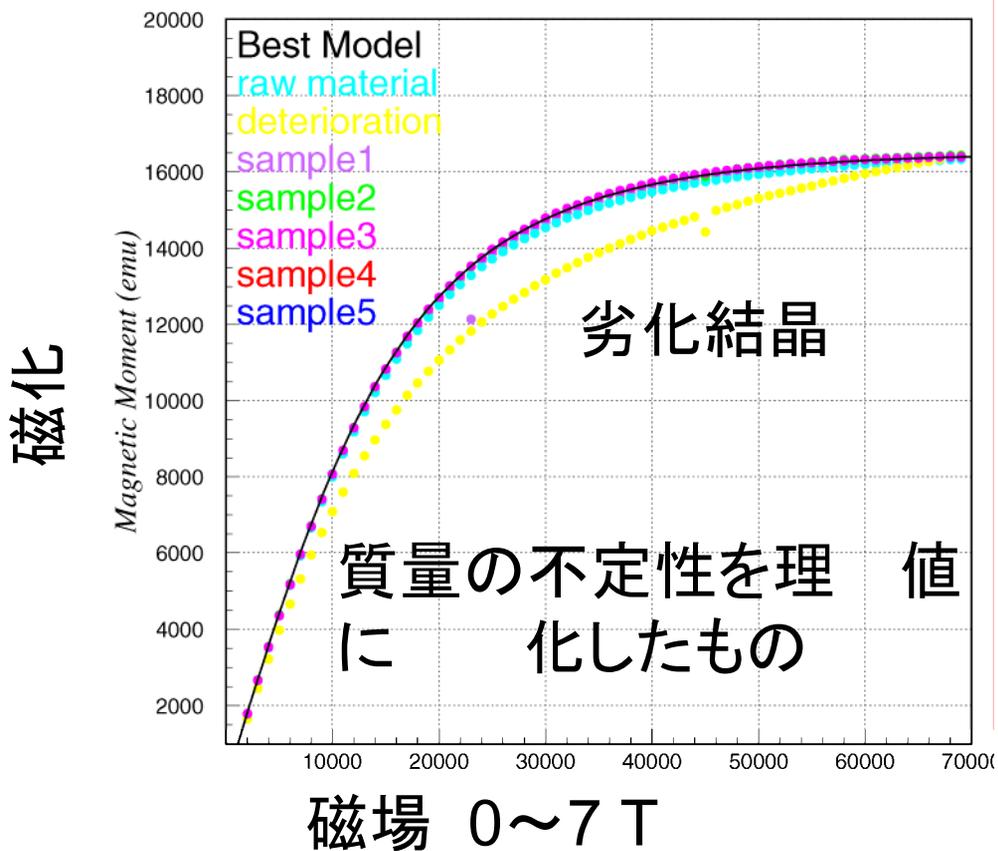


測定値は低温で磁性体の
理論値と一致する
強磁性体では磁性体の
理論値では明できない

分子場が必要

磁化測定

2 K



劣化結晶以外は結晶は磁性体の理論とする



FAA結晶



FAA (Feric Ammonium Alum)

ミョウバン : $\text{Fe}(\text{NH}_4)(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$

- ・ キュリー mK
- ・ 溶 として 酸を使うので り いが

ソルトピルの 化

結晶が劣化してしまうような温度で 置しなけれ、
本的に 化はしない見込み
実 に研究室で使用しているFAAソルトピルは 持 ている

100mK以下にする

- カロリメータを動作させる上でエネルギー分解能をよくするためには100mK以下が必要
- これはエネルギー分解能が温度に例するため温度を小さくすることで、分解能をよくできる

NeXT衛星

- CPAソルトピルの研究を進めることで、容器構造、結晶の性質について理解を深め、次世衛星に使用するさいの考となる
- あわよく、首都大で製作したソルトピルを宇宙にあることも目

機 のADRで測定した

- ・ Wisconsin では冷凍機が確 しているため、こでま 結晶 の評価を な た
→ CPAの性能として いくものが れた
- ・ 宇宙研では首都大と最大磁場、開始温度な が ているので consistent 確認するためにも ている
- ・ この つの なる冷凍機 で試験を うことで ができた

開始温度の制限

- ・ Heタンクとヒートスイッチが熱接しているが、の接がいたためヒートスイッチまで冷えていない (Heタンクは2K)



- ・ ポンプの力がりない

Heタンク自体 1.8K まりなので、ポンプを力にする必要がある

CPAを自作する

これまでFAAが流通したため、CPAソルトピル製作のためには

- ・ 容器構造の最適化
- ・ 結晶の評価
- ・ 最低到達温度を制限する要因の理解

が必要であり、これの理解と製作のノウハウは自作して得られるものである

50mKを目指すためには小さな熱損失でも致命的でありこれは地道な開発で改善されるものである

SUSの低温での 熱

$$C_{vSUS}(T) = 465T + 0.56T^{-2} \text{ } [\mu\text{J}/\text{g} \cdot \text{K}]$$

■

磁気 熱が いてくる