

磁性体カプセルの熱的構造に関する研究



東京都立大学
理学部 物理学科
宇宙物理実験研究室

横田 渉

本研究について

実験室における断熱消磁冷凍機(ADR)への要求

- より低温 (~ 100 mK)に冷却ができること。
- より長い時間 (~ 24 h)で目標温度を保持できること。

冷媒となる磁性体カプセル(ソルトピル)内部の熱伝導、
(磁場と消磁開始温度 etc.) が重要となる。

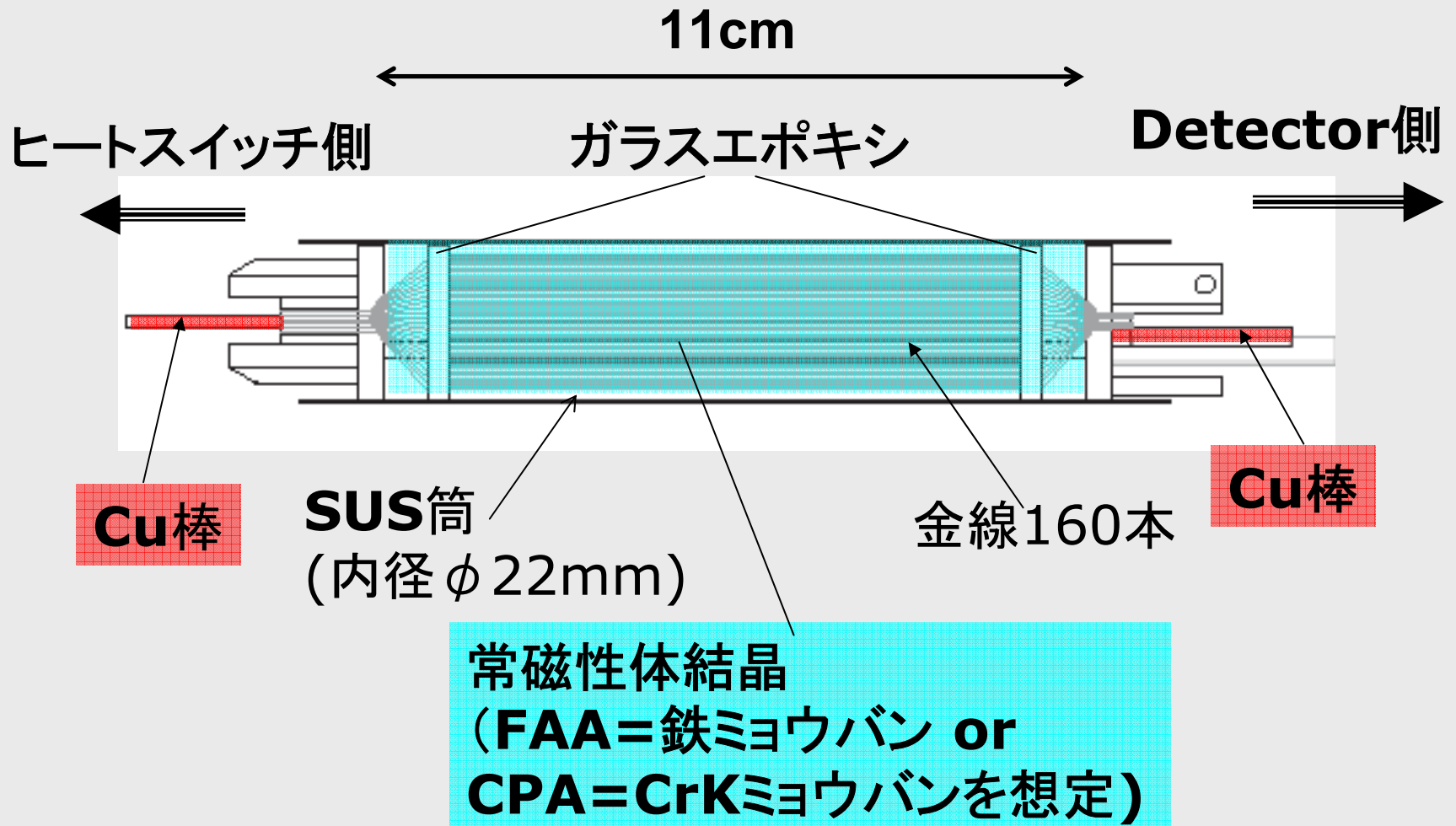
目的

ソルトピル内部構造に生じる温度差を小さくする。

取り組んだこと

- 現状での熱伝導度の見積もり
- アニーリングによる金線の熱伝導度の向上

現状のソルトピルの構造

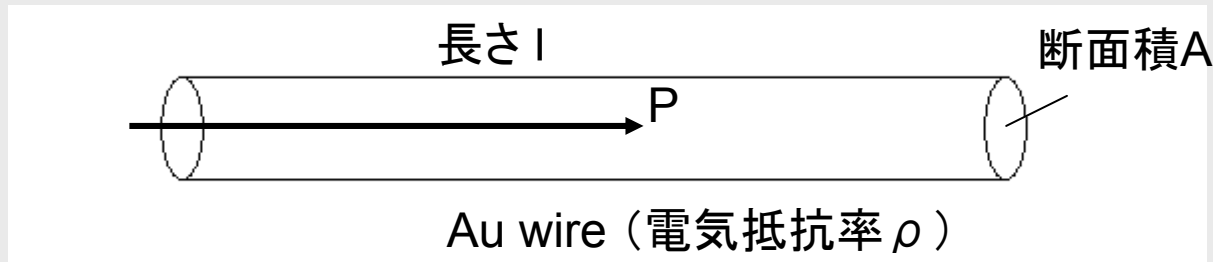


熱伝導度 G [W/K]

- 流入熱 P [W] があつた時に $\Delta T = P/G$ の温度差が発生する。

→ G 大きいほうがよい

($P = 1 \mu\text{W}$ 、 $\Delta T = 1\text{mK}$ の場合 $G = 1\text{mW/K}$)



- Wiedemann-Franz law
$$G = \frac{ALT}{l\rho}$$

A [m^2]: 断面積, T [K]: 温度, l [m]: 金線の長さ (11cmで固定)
 ρ [Ωm]: 電気抵抗率, $L = 2.45 \times 10^{-8}$ [$\text{W}\Omega\text{K}^{-2}$]: ローレンツ定数

金線の数 n [本]、直径 r [m] とすると $A = n\pi r^2$

A を固定したとき、 $G \propto 1/\rho$ なので電気抵抗率を小さくすることが重要

現状での熱伝導度

金線の本数 $n=160$ 本

金線の径 $r=0.1$ mm

金線の抵抗率 $\rho = 3$ n Ω m @ 4.2 K

熱伝導度の理論値

$$G = n \pi r^2 L T / l \rho = 0.058 \text{ mW/K (T=100 mK)}$$

熱流入の実測値 $P=9$ μ W

熱伝導度の実測 $G'=0.17$ mW/K (T=330 mK)

$$\Delta T = P/G = 155 \text{ mK (T=100 mK)}$$

⇒熱伝導度を10倍以上よくしたい
(熱流入も ~ 1 μ Wまで小さくした
い)

アニーリングの原理と方法

- 金線中の不純物(Fe等)の磁氣的干渉によって4.2 K (液体He 温度)で電気抵抗率が制限される。
⇒ 高温 (800°C ~ 1000°C) 空气中で焼きなますことにより不純物が酸化し、電気抵抗に寄与しなくなる。
- アニーリングをほどこす金線

メーカー	品名	純度	直径	Lot No.
田中貴金属工業	AU線	99.99%	Φ0.2mm	G5111610

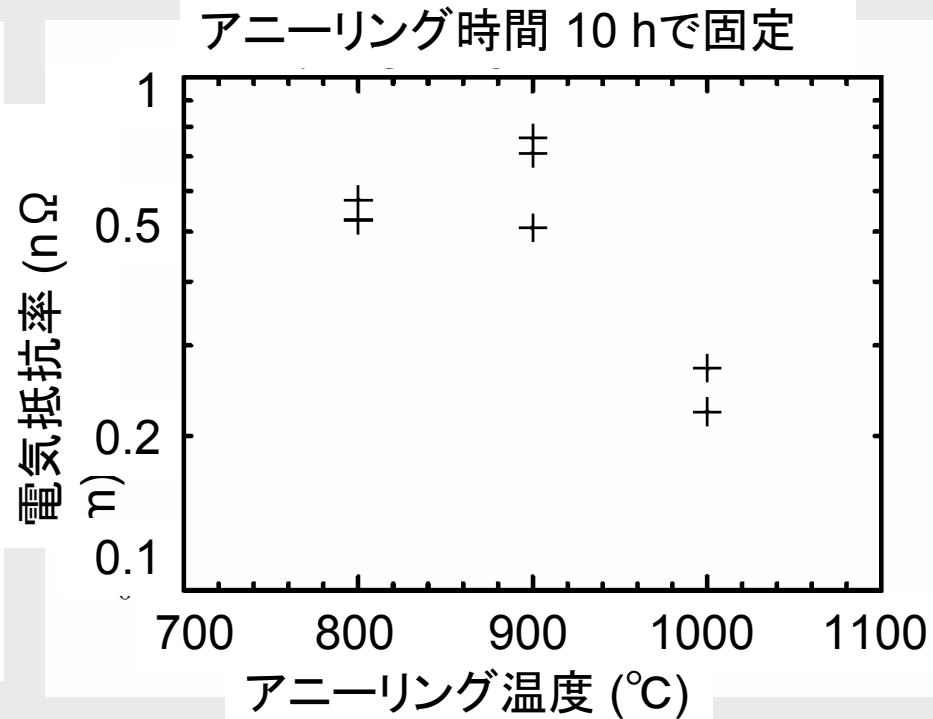
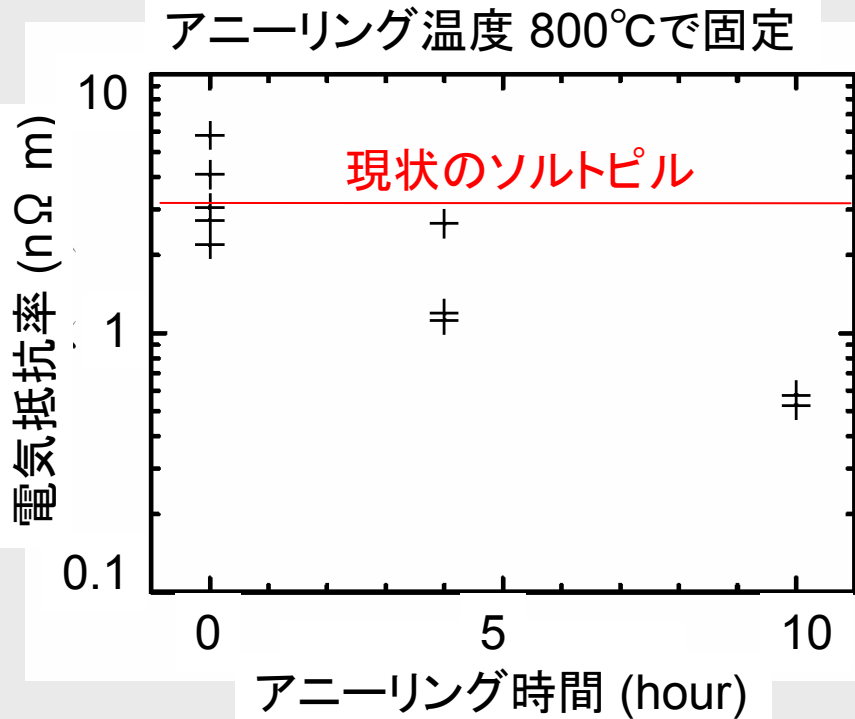


アニーリングに使用した電気炉



測定用の金線 (長さ~25 cm)

アニーリングによる電気抵抗率の改善



1000°C、10時間のアニーリングによって ρ が10倍よくなった

まとめ

- ソルトピルの熱伝導度について考察した
熱流入を下げ、熱伝導度を上げることが重要
- アニールングによって電気抵抗率を1/10にできた
 $\Delta T = 155\text{mK} \rightarrow 15\text{mK}$ にできるはず
- 今後、実際にソルトピルを作成して検証する。

本研究について

断熱消磁冷凍機(ADR)の冷媒として使用する磁性体カプセルにおいて、熱流入を結晶へと十分に伝えていないと、温度差が生じてしまうばかりでなく、カプセルを目標温度で維持できる時間を減少させてしまう。

目的

- 断熱消磁冷凍機の冷媒として使用する磁性体カプセルに生じる温度差を小さくし、目標温度を保持できる時間を長くする。

現状での熱伝導度の見積もり
アニーリングによる金線の熱伝導度の向上

金線の目標パラメータ

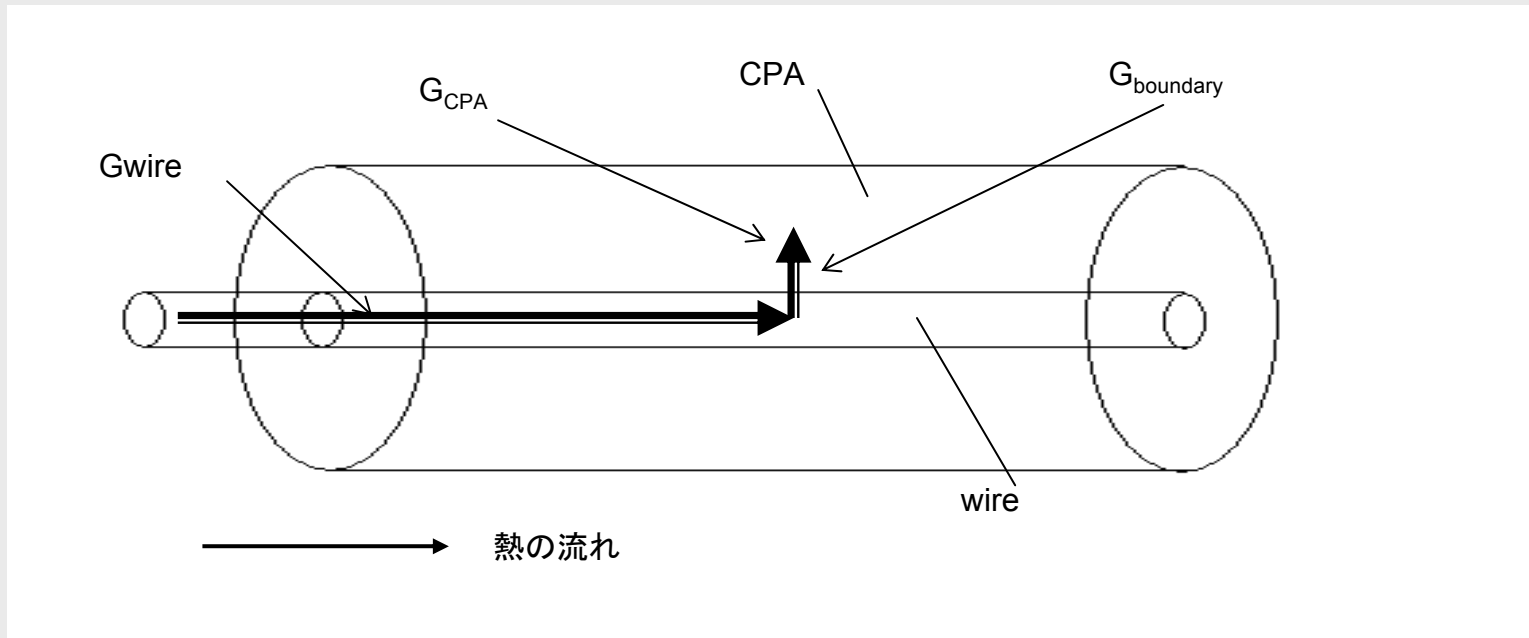
$$P = 0.006 \quad n = 300[\text{本}]$$

が金線のパラメータとして決定でき、この時の金線の半径 r_{wire}

$$r_{\text{wire}} = 4.2 \times 10^{-5} [\text{m}]$$

現在使用しているのは $r_{\text{wire}} = 1.0 \times 10^{-4} [\text{m}]$ であり、半分の半径をもつ金線が必要と考えられる。

熱の流れのモデル



金線一本の周りをCPAの結晶が円筒状にあると考える。

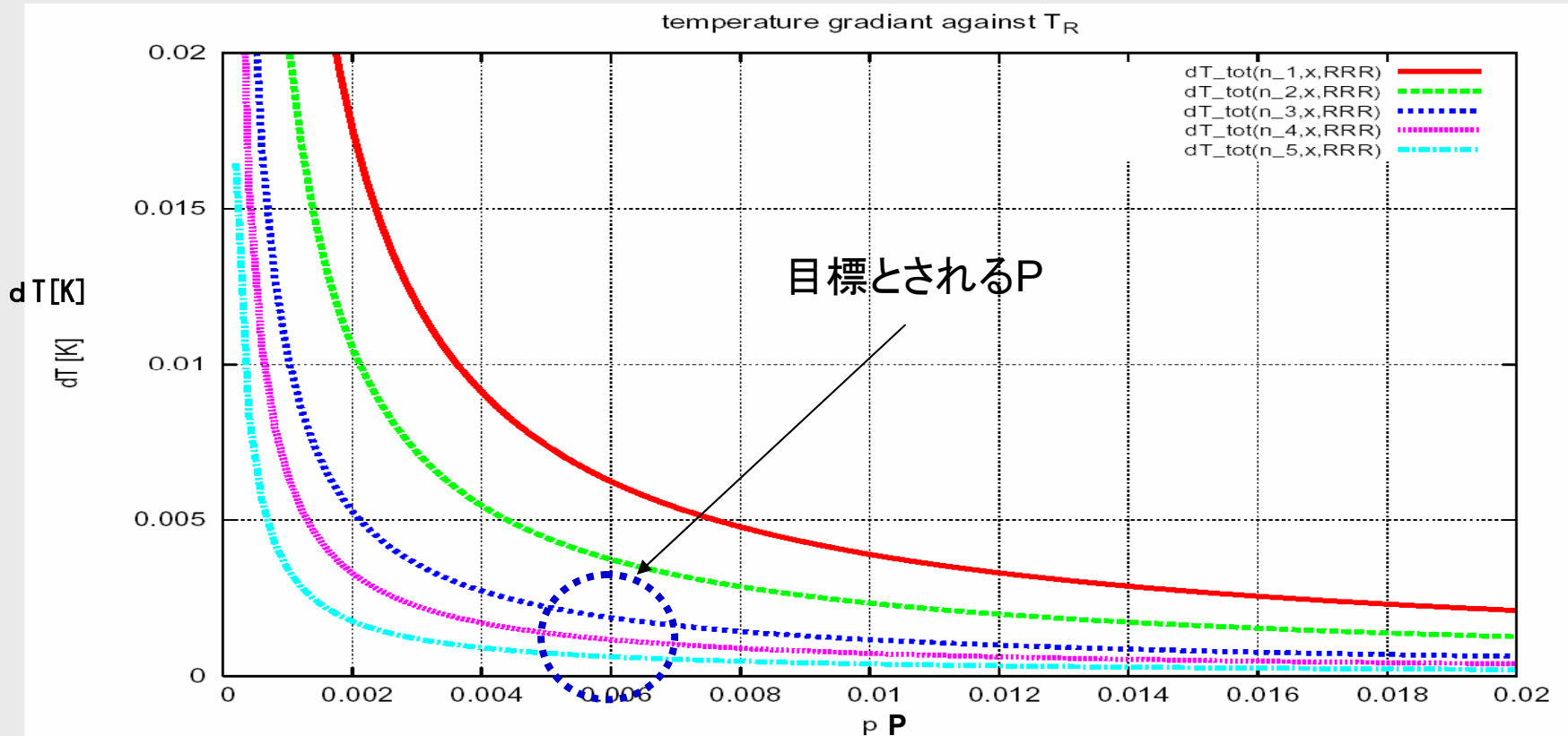
金線部分の熱伝導度 : G_{wire}

CPAの熱伝導度 : G_{CPA}

金線とCPAの境界における熱伝導度 : G_{boundary}

温度勾配(流入熱 $Q=1 \mu\text{W}$) : $\Delta T = Q (1/G_{\text{wire}} + 1/G_{\text{CPA}} + 1/G_{\text{boundary}})$

温度差 ΔT

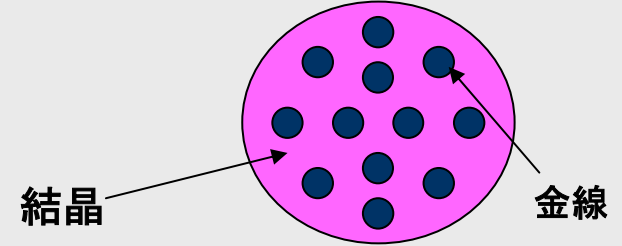


赤 : 30本 緑 : 50本 青 : 100本 ピンク : 160本 水色 : 300本

温度勾配(流入熱 $Q=1 \mu W$) : $\Delta T = Q (1/G_{wire} + 1/G_{CPA} + 1/G_{boundary})$

保持時間損失

ソルトピルの断面図



$$\kappa_{wire} = 0.125 [W/mK]$$

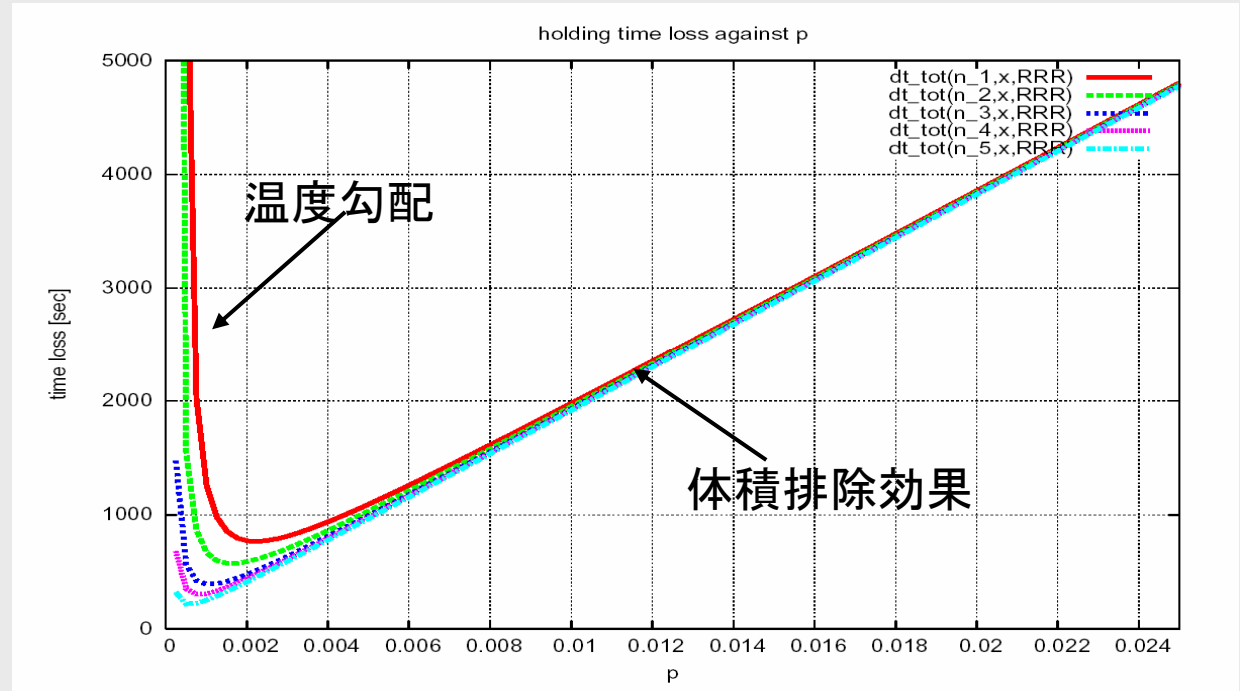
$$T = 0.1 [K]$$

$$\text{単結晶のサイズ} : 0.07 [cm]$$

$$l_{wire} = 11 [cm]$$

$$V_{total} = 45.6 [cm^3]$$

結晶としてCPAを考える。



赤 : 30本 緑 : 50本 青 : 100本 ピンク : 160本 水色 : 300本

金線と結晶の断面積比 filling factor: P

$$\Delta t = \underbrace{pV\rho \frac{T\Delta S}{Q}}_{\text{体積排除効果}} + \underbrace{\frac{mT(S_{(T_R)} - S_{(T_R - \Delta T)})}{Q}}_{\text{温度勾配による効果}}$$

体積排除効果

温度勾配による効果

ΔT

- 実現できた熱伝導度 $G_{\text{wire}} = 6.15 \times 10^{-6} [W / K]$
(1000°C-10hアニーリング後、 $r_{\text{wire}} = 4.2 \times 10^{-5} [m]$)

- 見積もられる ΔT

$T = 0.1K$ 、流入熱 $Q = 1 \mu W$ 、金線300本

$$\rightarrow \Delta T = 0.5mK$$

アニーリング前の金線 ($\rho = 3 \times 10^{-9} [\Omega m]$) を使用し
 $r_{\text{wire}} = 1.0 \times 10^{-4} [m]$ 、160本の場合、

$$G = 3.67 \times 10^{-7} [W / K]$$

となり、温度差は

$$\rightarrow \Delta T = 17mK$$

ΔT の改善がみられた

金線について

■ アニーリングをほどこす金線

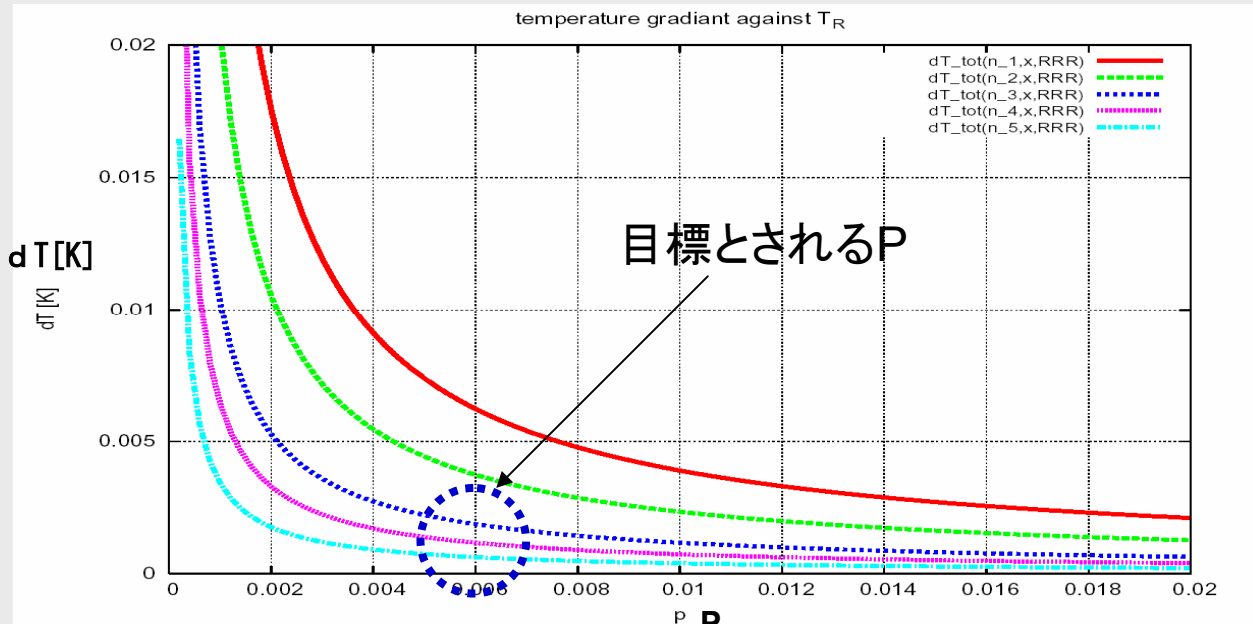
メーカー	品名	純度	測定値	Lot No.
田中貴金属工業	AU線	99.99%	Φ0.200mm	G5111610



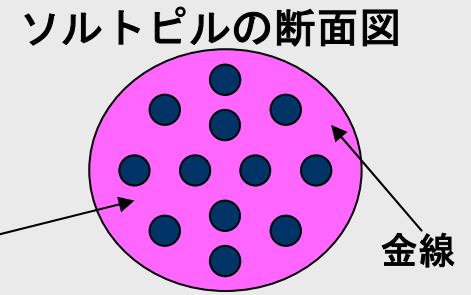
アニーリングに使用した電気炉



測定用の金線



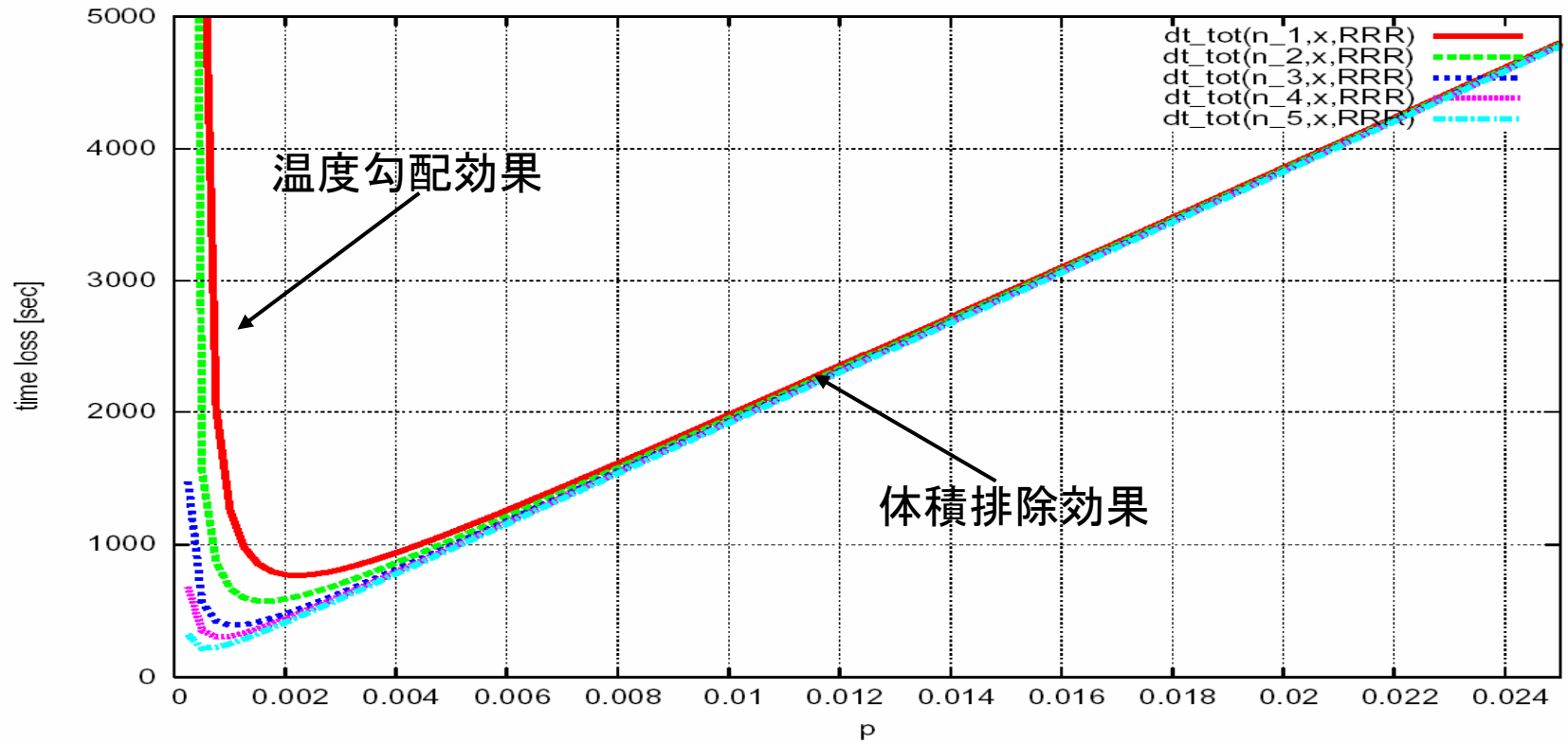
赤 : 30本 緑 : 50本 青 : 100本 ピンク : 160本 水色 : 300本



$$G_{wire}, G_{CPA}, G_{boundary}$$

温度勾配(流入熱 $Q=1 \mu W$): $\Delta T = Q(1/G_{wire} + 1/G_{CPA} + 1/G_{boundary})$

holding time loss against p



赤 : 30本 緑 : 50本 青 : 100本 ピンク : 160本 水色 : 300本