

# 小型連続核断熱消磁冷凍機の開発

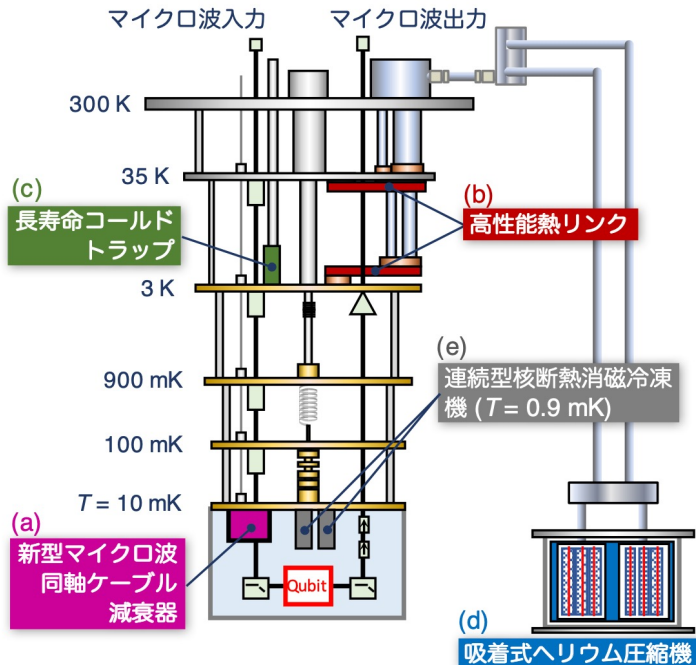
理学系研究科物理学専攻 博士2年  
低温科学研究センター 村川研究室  
瀧本 翔平

# 研究の背景



## 量子コンピュータ・量子科学研究のための 低温新技術の開発

現在、東京大学低温科学研究センターでは、量子コンピュータ・量子科学研究のための低温新技術として以下のものを開発している。



- (a) 新型マイクロ波同軸ケーブル減衰器
- (b) 高性能熱リンク
- (c) 長寿命コールドトラップ
- (d) 吸着式ヘリウム圧縮機
- (e) 連続型核断熱消磁冷凍機

図：量子科学研究のための希釈冷凍機。(a)–(d) は低温科学研究センターが開発中の新技術。

(低温科学研究センターのHPより抜粋)

# 研究の背景

近年、様々な分野において超低温環境での実験が盛んに行われている。

(例) トポロジカルな物質の研究, 量子コンピュータ, X線検出器の冷却, etc.

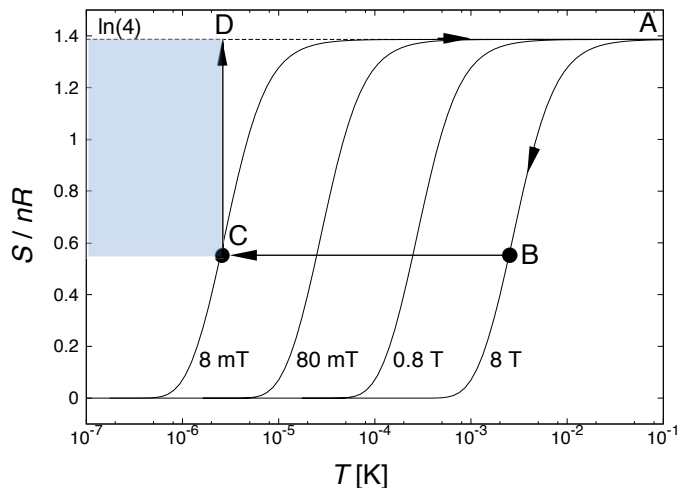
市販の希釈冷凍機は20 mK程度までの温度を発生させることができる。

数mK以下の温度を得るためには、**核断熱消磁冷凍機** (NDR: Nuclear Demagnetization Refrigerator) が必要



“核スピンのエントロピー変化を利用した冷凍機”

温度とエントロピーの関係：Cu核スピンの場合



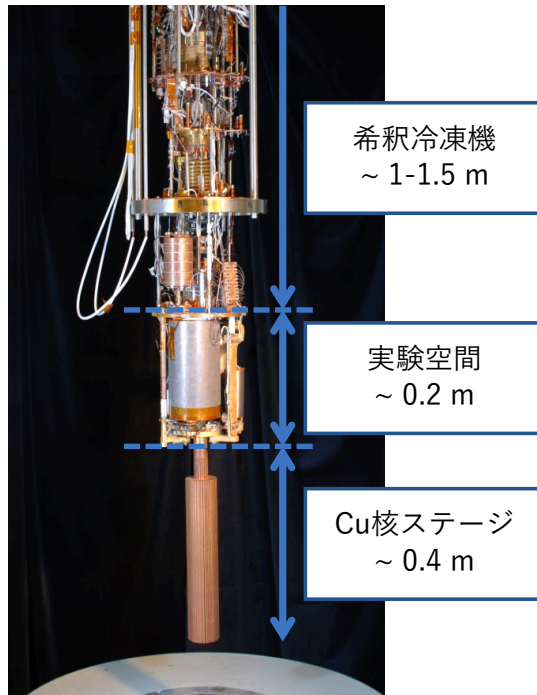
冷却サイクル

1. **A→B**：高磁場下でCu核スピンを冷却する。
2. **B→C**：断熱状態の下で消磁する。この時温度が下がる。
3. **C→D**：断熱状態を解除し、被冷却体を冷却する。

※ 冷凍機が吸収する熱量 = **網掛け**の面積

# 既存の冷凍機の問題点と解決方法

Cu核スピンを用いた一般的なNDR



問題点：

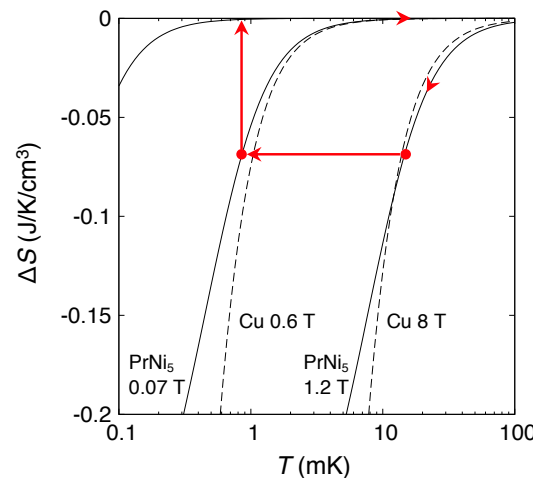
- ✓ サイズが大きく、取り回しが悪い
- ✓ 単発式の冷却システムなので、超低温を連続的に発生できない

## 小型連続核断熱消磁冷凍機 (CNDR) (Compact and Continuous Nuclear Demagnetization Refrigerator)

Cu核スピン → PrNi<sub>5</sub>核スピン

増強核磁性体 (Van Vleck常磁性)

PrNi<sub>5</sub>の $\Delta S(B = 1.2T) \approx \text{Cuの}\Delta S(B = 8T)$

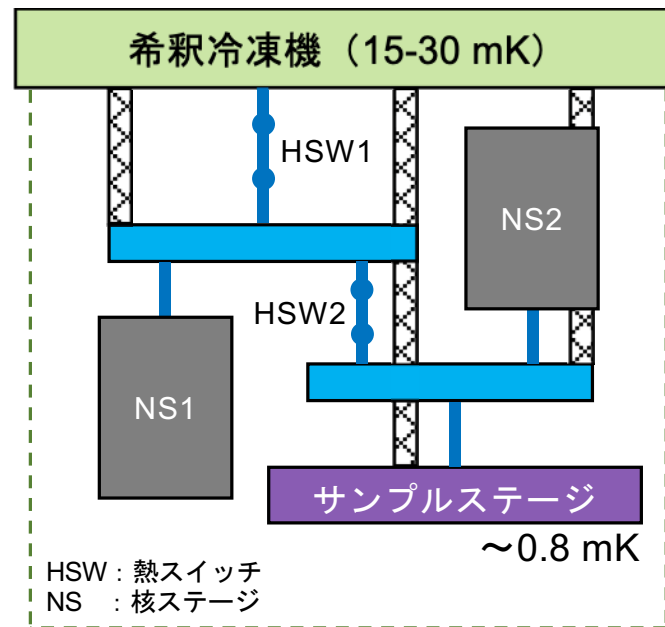
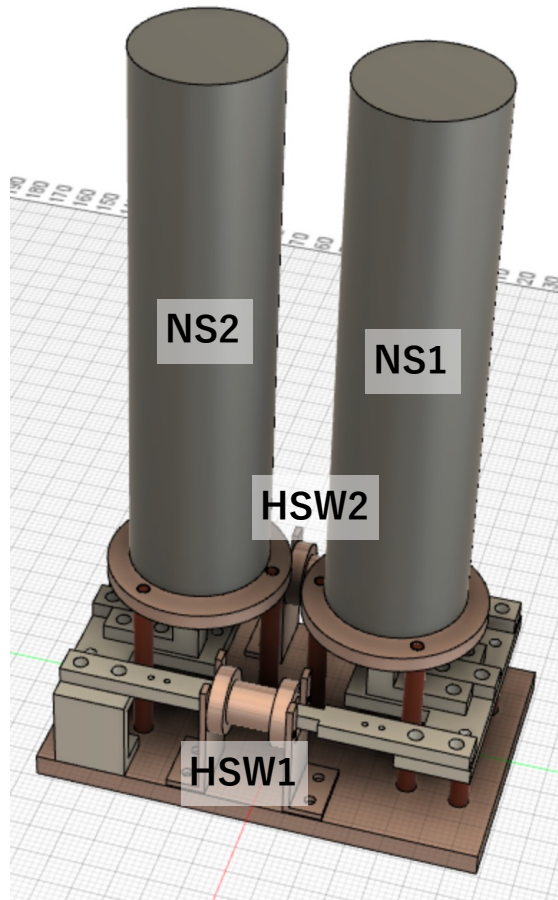


- ✓ マグネットと核ステージの小型化
- ✓ 2つの核ステージを用いた連続運転により最低温度を長時間維持
- ✓ 冷凍機の小型化により、十分な広さの実験空間を確保

# 研究の目的

## 1 mK程度以下の超低温度を手軽に実現するための冷凍機の開発

R. Toda *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **969**, 012093 (2018).



CNDRの模式図

### 構成

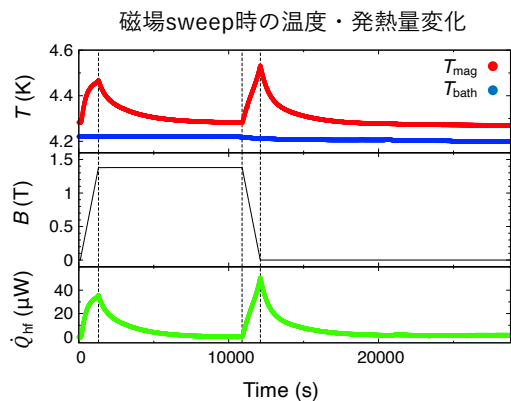
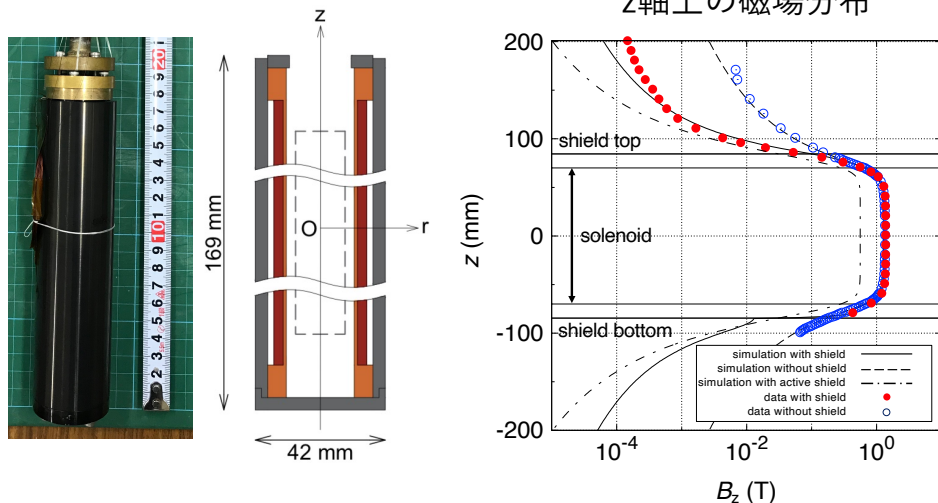
- 一般的な希釈冷凍機：  
100  $\mu$ W @ 100 mK
- PrNi<sub>5</sub>核ステージ × 2：  
 $\phi$ 20, L~40
- 小型超伝導マグネット × 2：  
 $\phi$ 40, B~1.2T  
(S. Takimoto *et al.*, J. Low Temp. Phys. **201**,  
179-186(2020).)
- 熱スイッチ × 2

# CNDRの各パーツについて

## 1. 小型超伝導マグネット

S. Takimoto *et al.*, J. Low Temp. Phys. **201**, 179-186(2020).

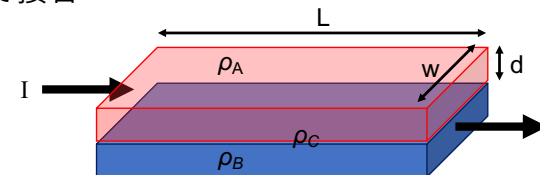
高透磁率材FeCoVで磁場遮蔽された、小型で高性能な超伝導マグネットの開発



- 磁場分布測定：  
シミュレーション結果と比較
- 超伝導線のヒステリシス損失による発熱量の測定：  
ラズベリーパイ×Pythonで測定

## 2. PrNi<sub>5</sub>核ステージ

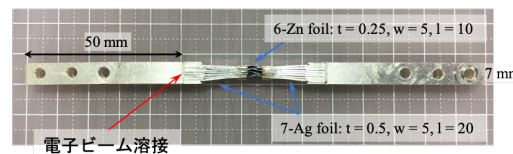
小型で接触熱抵抗が小さいPrNi<sub>5</sub>核ステージの開発  
PrNi<sub>5</sub>とAg線とをZnハンダで接合



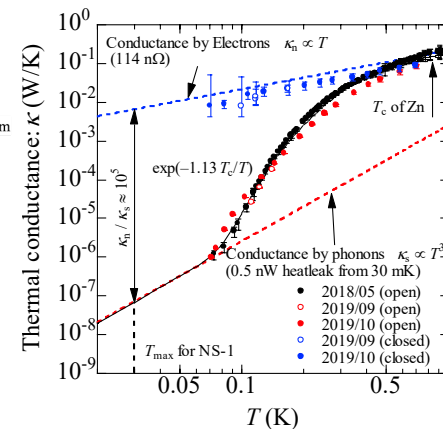
- 1次元モデルを仮定して、接触熱伝導率を評価  
 $\kappa_C \sim 2 \times 10^2 T \text{ (Wm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{)}$

## 3. 熱スイッチ

Znを用いた超伝導型熱スイッチの開発



- 超伝導/常伝導の切り替えによる熱伝導度の大きな変化を確認



# まとめ

- ▶ 超低温環境で様々な実験を行うための冷凍機の開発
- ▶ 既存の希釈冷凍機にそのまま搭載できるほど小型で、1 mK程度以下の温度を連続的に発生できる。
- ▶ 低温技術の非専門家にとっても取り扱いが容易な冷凍機システムの構築

スキル：

- ▶ プログラミング  
Python, C, C++