

希土類元素を含まない 極低温度冷凍機用蓄冷材料の開発

物質・材料研究機構

磁性・スピントロニクス材料研究センター

主席研究員 寺田 典樹

2025年11月18日

研究の背景

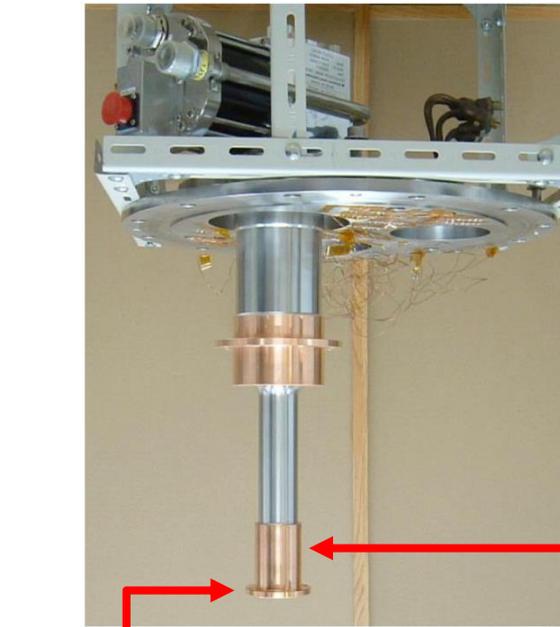
極低温度冷凍機とは？

液体ヘリウムを使わずに4 K（マイナス269℃）以下に冷却可能な冷凍機。
（GM冷凍機と呼ばれている）

蓄冷材

冷媒として用いるガスと熱交換し、極低温度において、**熱を溜めておく**材料。

先端部分が4
K以下に冷却
される



希土類蓄冷材
 HoCu_2

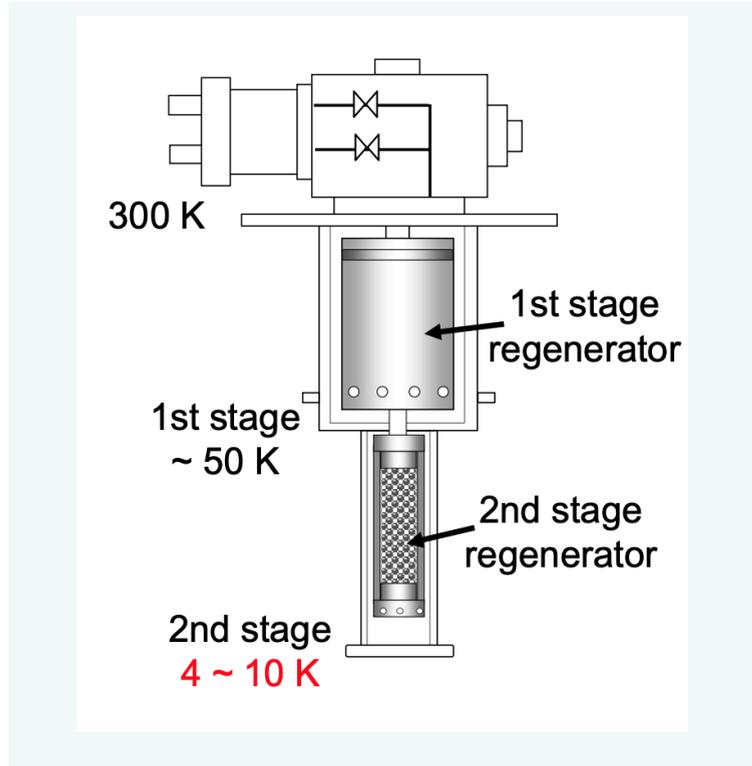
研究の背景

GM冷凍機の使用

- 超伝導マグネットの冷却
 - ◆ **磁気共鳴イメージングMRI**
 - ◆ 物性研究
- クライオポンプ
 - ◆ 半導体製造
- 希釈冷凍機の予冷
 - ◆ 量子コンピューター

研究の背景

■ Gifford-McMahon (GM) 冷凍機

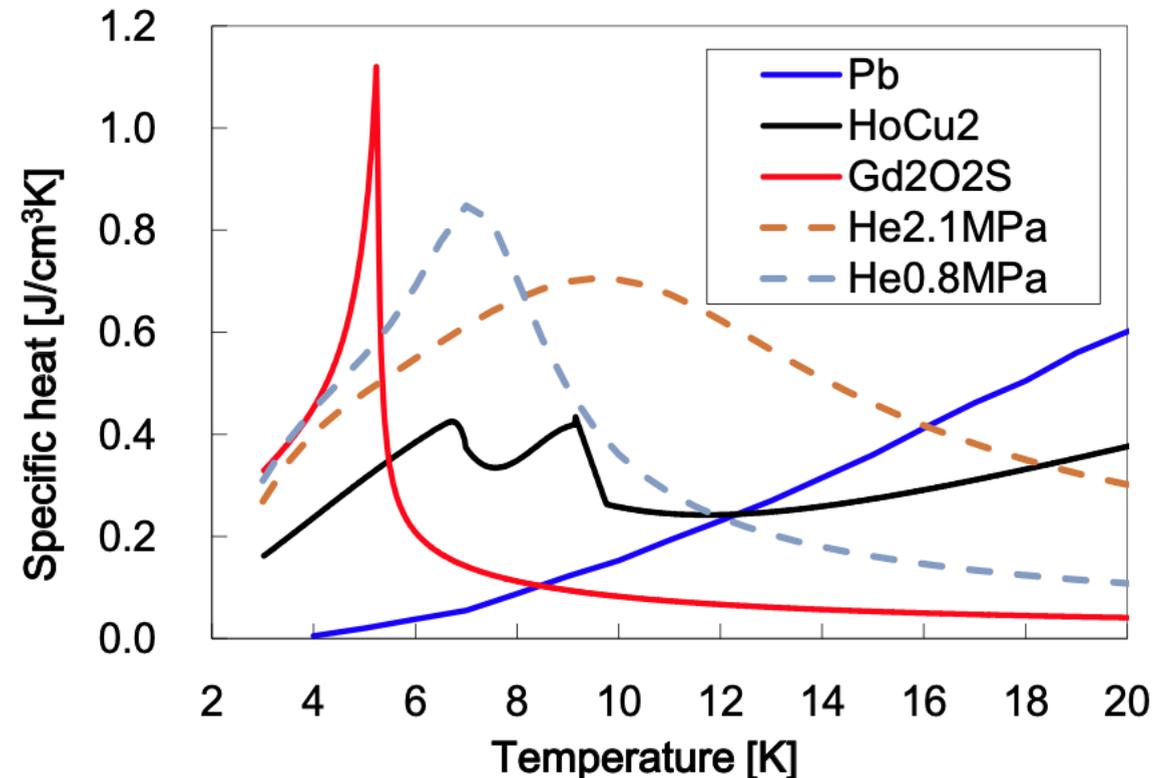


1990年代から**希土類磁性蓄冷材**が普及し、液体ヘリウムを使わなくても4 K以下の冷却が可能となった。

■ 蓄冷材に求められる性能

- **極低温度 (10 K以下) で比熱が大きい (0.1 J/K cm^3 以上)**
- **耐久性、量産性に優れる**

固体の格子比熱が極めて小さくなる極低温度では、磁性体が持つ**磁気比熱**が支配的となる。



従来技術とその問題点

社会課題:

ヘリウムガスの供給不安や資源枯渇の懸念から、**液体ヘリウムを用いない極低温冷却技術**が注目されている。特に今日の医療現場では欠かすことができない画像診断装置であるMRIでは、**GM(ギフォードマクマホン)冷凍機冷却による新しい装置の開発**が盛んに行われている。

何が問題となっているか?:

GM冷凍機のキーコンポーネントである蓄冷材には**重希土類** (HoCu_2) が使われている。世界中で稼働している MRI (約10万機) をGM冷凍機冷却にするためには、約100 tonのHo原料がとなり、これは**中国で主に生産されている年間のHo採掘量100 tonすべてに匹敵する量**であり、原料供給量が逼迫する懸念がある。

材料開発の目的:

重希土類を含まないGM冷凍機蓄冷材の開発。

新技術の特徴・従来技術との比較

従来技術

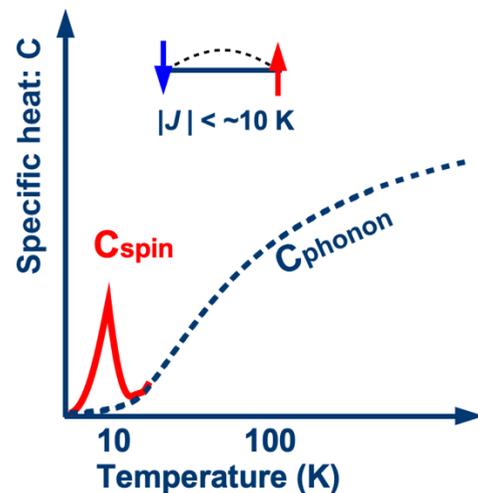
新技術

	重希土類磁性体	遷移金属磁性体
磁気エネルギー(交換相互作用)	<10 K	~100 K
磁気モーメント	7~8 μ_B	5 μ_B
磁気相転移温度 (フラストレーション無し)	<10 K	~100 K
磁気相転移温度 (フラストレーション有り)	<1 K	~ 10 K

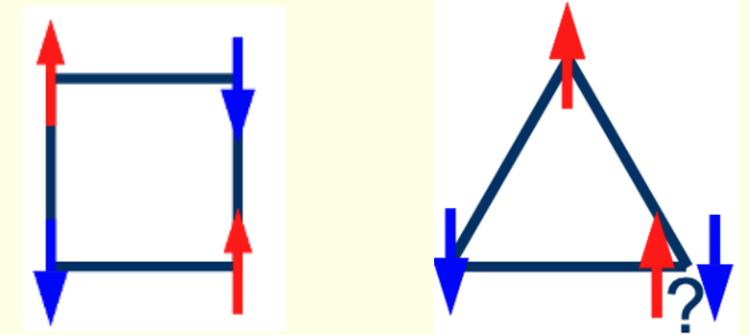
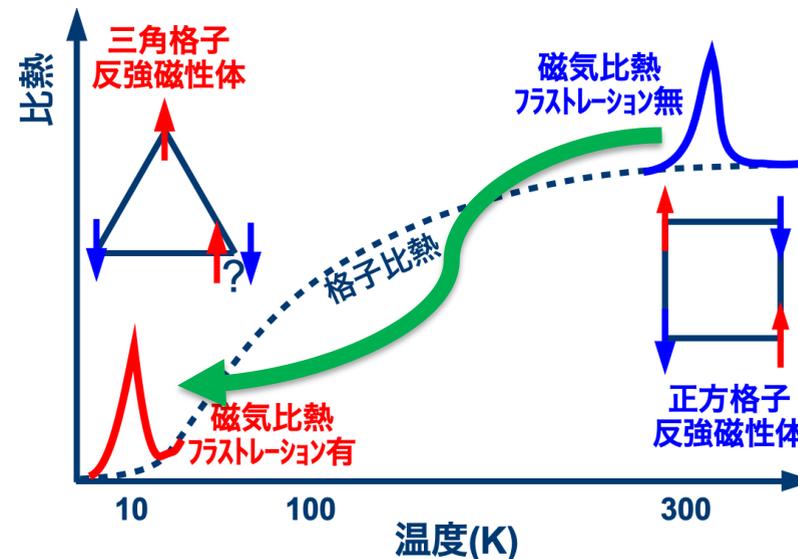
フラストレーションとは？

三角格子などの特殊な幾何学を持つ反強磁性体では、スピン対にはたらく反強磁性交換相互作用（スピンを互いに反平行にしようとする力）が競合すること。

重希土類磁性体



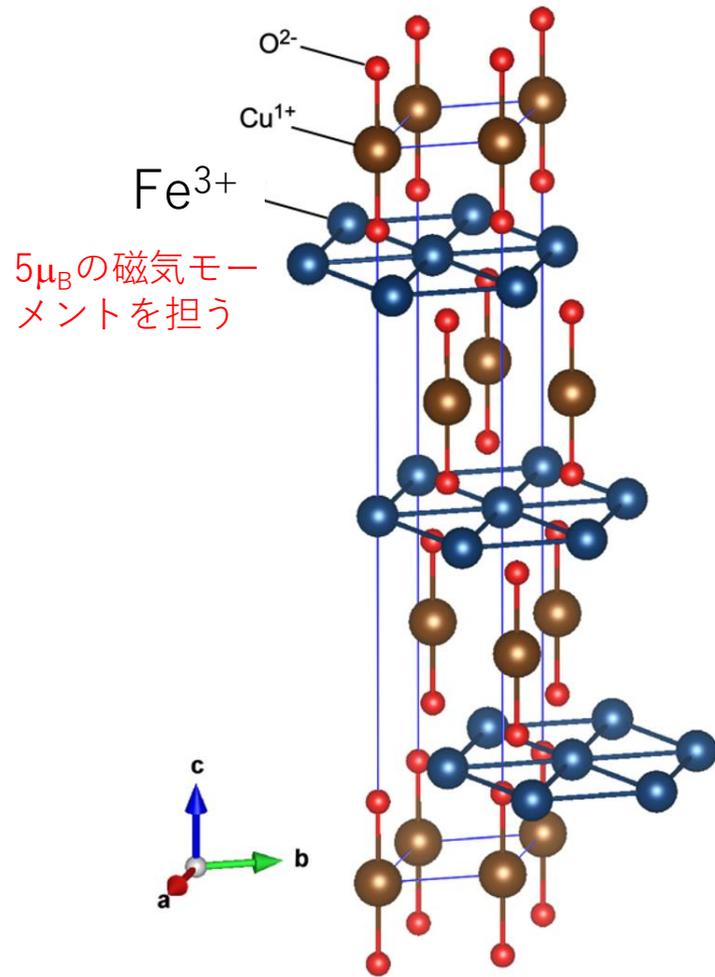
遷移金属磁性体



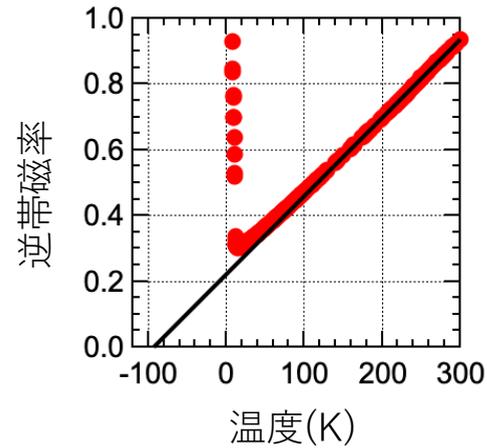
フラストレーション
なし あり

新技術の特徴・従来技術との比較

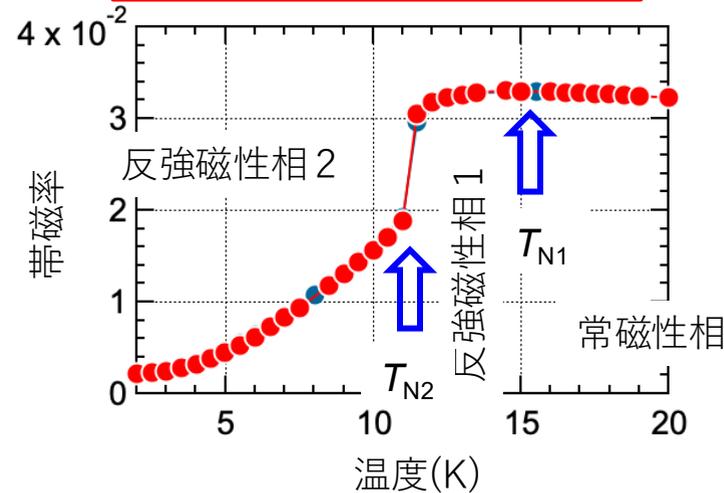
三角格子反強磁性体 CuFeO_2



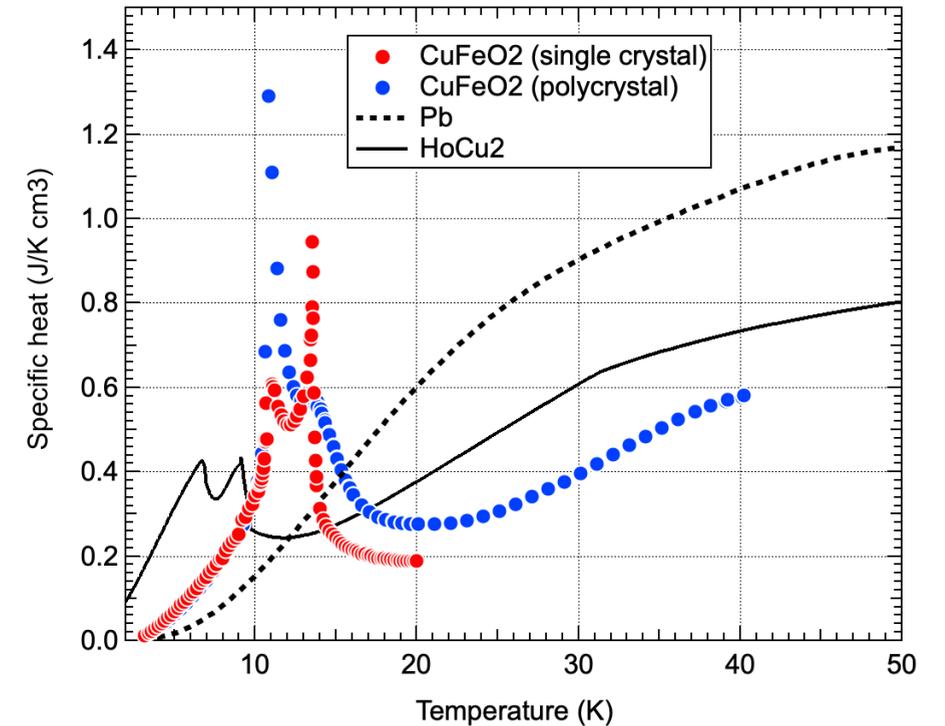
反強磁性相互作用の大きさ $\sim 100 \text{ K}$



磁気相転移温度 $\sim 10 \text{ K}$



巨大磁気比熱 $\sim 10 \text{ K}$



極低温で大きな比熱を示す。

15 K以下でPbより大きく、
10 K ~ 15 KでHoCu₂より大きい

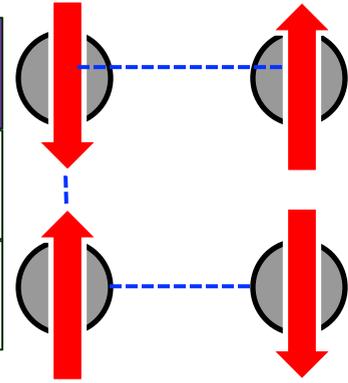
新技術の特徴・従来技術との比較

従来技術

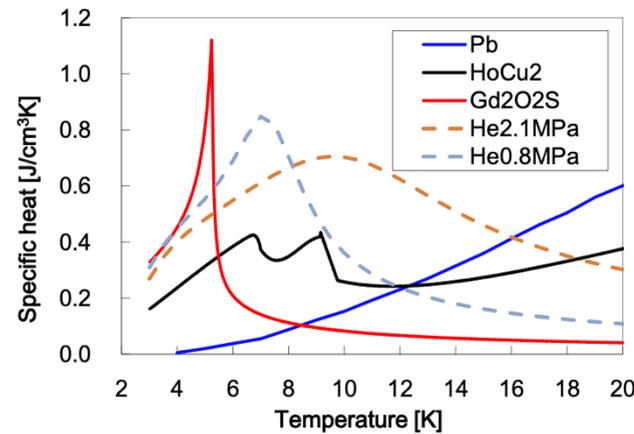
重希土類イオン
(Ho^{3+} , Er^{3+})

磁気モーメント
 $7 \sim 8 \mu_B$

弱い交換相互作用
 $< 10 \text{ K}$



HoCu_2 の比熱

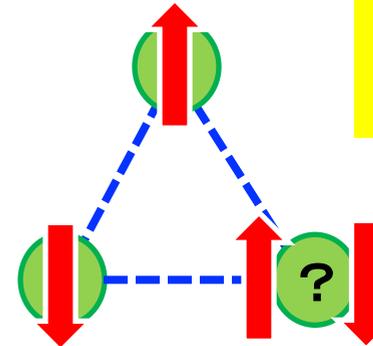


新技術

遷移金属イオン
(Fe^{3+} , Mn^{2+})

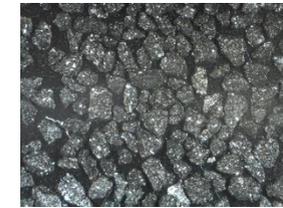
磁気モーメント $5 \mu_B$

強い交換相互作用
 $> \sim 100 \text{ K}$



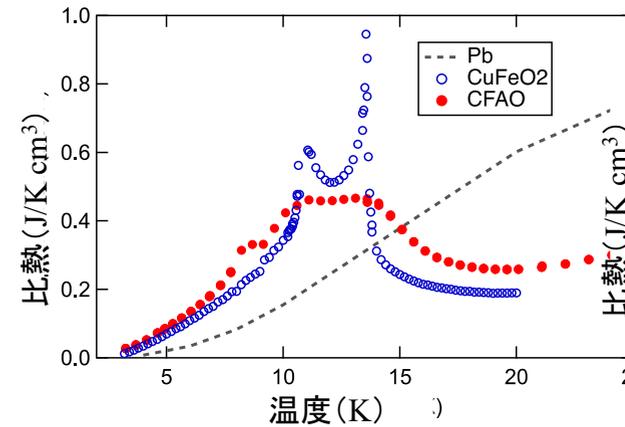
フラストレーション効果

交換相互作用エネルギーよりも遥かに低い温度で磁気相転移を起こす。



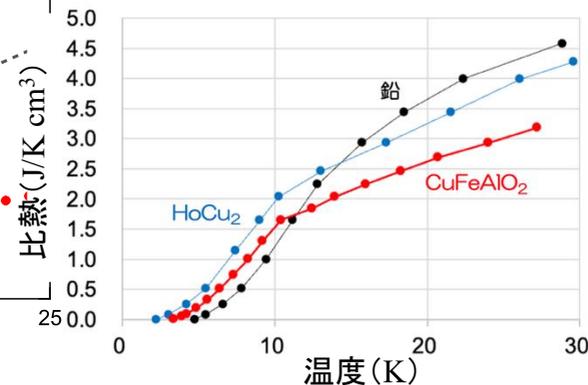
200~500 μm 径

$\text{CuFe}_{1-x}\text{Al}_x\text{O}_2$ の比熱



$\sim 0.5 \text{ J/K cm}^3 @ 10 \text{ K}$ の巨大比熱

新蓄冷材料の冷却試験結果

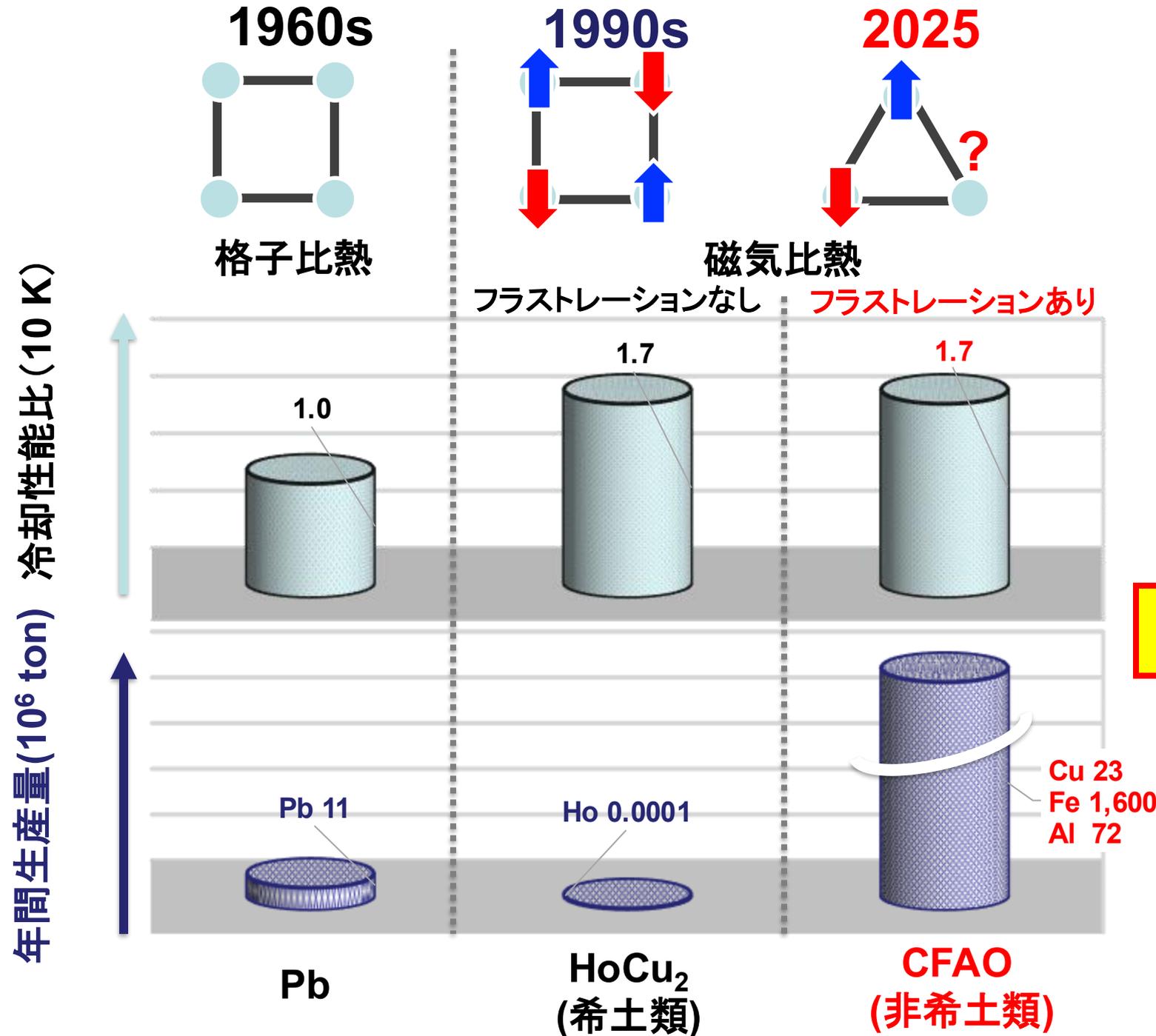


3.55 Kまでの冷却を達成
冷却能力 $\sim 0.08 \text{ W} @ 4.2 \text{ K}$

$\text{CuFe}_{1-x}\text{Al}_x\text{O}_2$ ($x=0.02$)

希土類元素を用いない磁性蓄冷材として、初めて4 K以下の冷却に成功

新技術の特徴・従来技術との比較



希少元素に頼らない
豊富な資源
銅、鉄、アルミニウム
を利用した
持続可能な極低温冷却を実現

想定される用途

- 超伝導マグネットの冷却
 - ◆ **磁気共鳴イメージングMRI**
 - ◆ 物性研究
- クライオポンプ
 - ◆ 半導体製造
- 希釈冷凍機の予冷
 - ◆ 量子コンピューター

実用化に向けた課題

- 現在、非希土類蓄冷材について粉碎粉末を用いた冷却試験により4K以下への冷却が可能となっている。しかし、冷却性能や耐久性を実用化レベルまで確保するために、**球状に造粒した高密度粒子の作成法**が未解明である。
- 今後、複数の造粒法の中から最適な方法を決定し、実用化に向けた開発を行っていく。

社会実装への道筋

時期	取り組む課題や明らかにしたい原理等	社会実装へ取り組みについて記載
基礎研究	<ul style="list-style-type: none">・材料の化学組成の同定が完了	
現在	<ul style="list-style-type: none">・非希土類蓄冷材における粉碎粉末による4K以下の冷却に成功	
2年後	<ul style="list-style-type: none">・造粒法の決定・既存の冷凍機の仕様値を超える冷却能力を達成	JSTのA-STEP(ステージII)事業へ応募、研究資金獲得 冷凍機メーカーへのサンプル提供が実現
5年後	<ul style="list-style-type: none">・量産法を確立・その他の非希土類蓄冷材開発に発展	試験的実用化の実現

企業への期待

- セラミックス製造メーカー
 - 球状造粒の技術を持つ、企業との共同研究を希望。
 - 材料の耐久性、量産性に関する評価法の提案や、技術提供。
- 極低温冷凍機製造メーカー
 - GM冷凍機実機による冷却試験、耐久試験に関する共同開発

企業への貢献、PRポイント

- 材料の合成法（特許出願在り）の共有
- 物性評価（低温比熱、磁化測定等）
- 造粒法に関する蓄冷材の共同開発

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 蓄冷材、蓄冷器、及び極低温冷凍機
- 出願番号 : WO/2025/053040
- 出願人 : 物質・材料研究機構、大島商船高等専門学校
- 発明者 : 寺田 典樹/間宮 広明/齋藤 明子/竹屋 浩幸/増山 新二

産学連携の経歴

- 2024年-2026年 JST A-STEP事業（ステージI）に採択

お問い合わせ先

国立研究開発法人物質・材料研究機構
外部連携部門企業連携室

T E L 029-859-2600

e-mail contract-administrator@nims.go.jp