

## レアアースも液体ヘリウムも不要！ ありふれた元素からなる極低温冷却材料を開発

～医療用 MRI や量子コンピューター冷却への応用に期待～

NIMS は大島商船高等専門学校と共同で、レアアース金属や液体ヘリウムを一切使用せずに極低温（約 4 K = マイナス 269℃以下）を実現できる、銅・鉄・アルミニウムといったありふれた元素のみからなる新しい蓄冷材料を開発しました。三角格子が生み出す、スピン同士が互いの向きを同時に満たせない『フラストレーション』という一部の磁性体がもつ特殊な性質を利用することで、従来レアアースに依存していた極低温冷却に代わる新たな手法を示した成果です。液体ヘリウム不足への対応に加え、今後需要が拡大する医療用 MRI や量子コンピューターの安定冷却への応用が期待されます。本成果は、12 月 22 日に英国科学誌 Scientific Reports に掲載されました。

### 研究成果の概要

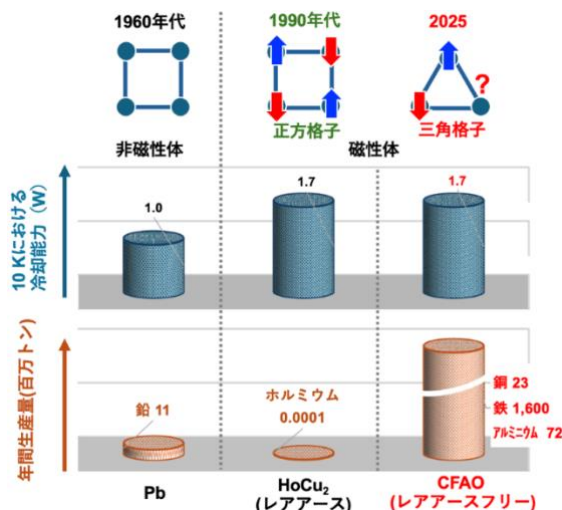
#### ■ 従来の課題

主に医療用 MRI などに広く用いられている極低温冷却技術は、供給不安や資源枯渇が懸念される液体ヘリウムやレアアース元素に強く依存しているという問題がありました。たとえば、現在の蓄冷材に使われているホルミウムは、年間採掘量が 100 トンしかなく偏在しているため、今後、極低温冷却の需要が大きくなるのびることが見込まれる中、こうした希少資源に頼らない新しい冷却技術の開発が強く望まれていました。

#### ■ 成果のポイント

今回、NIMS と大島商船高等専門学校の研究チームは、レアアース金属元素を一切含まず、銅・鉄・アルミニウムといった豊富な元素だけで構成される物質を用いた、液体ヘリウムを使わずに極低温まで冷やす機械式冷凍機（GM 冷凍機）用の蓄冷材を開発しました。三角格子と呼ばれる特殊な結晶構造をもつ磁性体に特有のスピンへの向きが極低温まで揃いにくくなる「フラストレーション」という効果を利用することで、遷移金属でありながら極低温で大きな比熱を示すことを実現したものです。従来のレアアース（ホルミウム化合物）を含む冷却材と同程度の性能を達成しています。レアアース元素を用いない冷凍機用の磁性蓄冷材が実用レベルの性能を示したのは、今回が初めてです。

図 1：1960 年代の GM 冷凍機では鉛（Pb）が蓄冷材として用いられていましたが、1990 年代にはレアアース金属化合物  $\text{HoCu}_2$  が導入され、冷却性能が大きく向上しました。今回開発したレアアースフリー蓄冷材  $\text{CuFe}_{0.98}\text{Al}_{0.02}\text{O}_2$ （CFAO）は、これらに匹敵する冷却能力を持ちながら、豊富な元素のみで構成されるため、持続可能で環境負荷の少ない極低温冷却技術につながります。



## ■将来展望

今回開発した蓄冷材料は、豊富な資源を用いているため持続可能性が高く、環境負荷が少ないという特徴があります。そのため、今後需要の拡大が予想される医療用 MRI や量子コンピューターの極低温冷却への応用が期待されます。

## ■その他

- 本研究は、NIMS 磁性・スピントロニクス材料研究センターグリーン磁性材料グループの寺田 典樹 主席研究員、間宮 広明 主席研究員、齋藤 明子 主席研究員、および大島商船高等専門学校の増山 新二 教授からなる研究チームによって、JST 研究成果最適展開支援プログラム A-STEP 事業「希土類元素を含まない極低温冷凍機用蓄冷材料の開発」（研究代表者：寺田典樹）の一環として実施されました。
- 本研究成果は、2025 年 12 月 22 日に英国科学誌 Scientific Reports にてオンライン掲載されました。

## 研究の背景

現在、極低温冷却技術（到達温度 4 K 以下）は、医療用画像診断装置 MRI に内蔵されている超伝導電磁石の冷却をはじめ、物性研究、宇宙工学、量子コンピューター用希釈冷凍機の予冷など、さまざまな分野で利用されています。これまで主に用いられてきた冷媒である液体ヘリウム（4.2 K 以下で液体）は天然ガスの副産物であり、近年は輸送基地のトラブルや中東情勢の影響を受けて供給が不安定になる事例が増えています。さらに、再生可能エネルギーの普及によって天然ガスの需要が減少すれば、ヘリウム供給そのものが大きく縮小し、価格高騰が起こる可能性も指摘されています。

このような状況を受け、液体ヘリウムに頼らない無冷媒冷凍機である Gifford-McMahon（GM）冷凍機<sup>(1)</sup>を用いた MRI 用超伝導電磁石冷却装置の開発が進められています。しかし、GM 冷凍機の冷却性能を左右するキーコンポーネントである蓄冷材には、レアアース金属元素ホルミウムを含む化合物（ $\text{HoCu}_2$ ）が使用されています。仮に、現在世界で稼働している約 10 万台の MRI がすべて GM 冷凍機方式に置き換わった場合、必要となるホルミウム原料は約 100 トンに達し、これは年間のホルミウム採掘量に匹敵します。

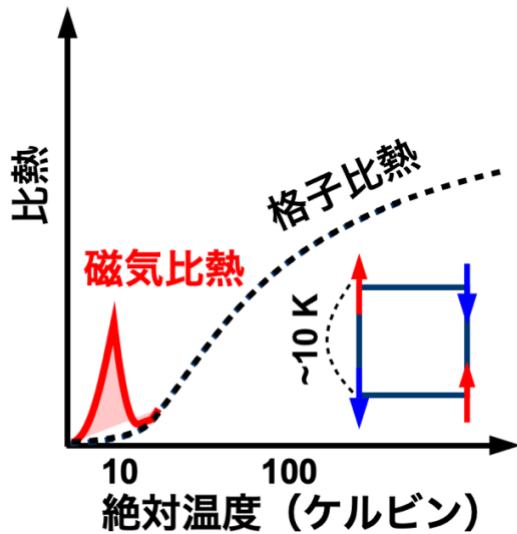
さらに、極低温冷却技術は MRI だけでなく、液化水素（20 K 以下で液体）の製造や、貯蔵中に蒸発して失われる液化水素を減らすための対策、量子コンピューターに搭載される量子デバイスの冷却などにも応用が見込まれ、GM 冷凍機の需要は今後さらに拡大すると予想されています。レアアース原料の採掘に伴う環境負荷も考慮すると、レアアースに依存しない豊富な元素からなる GM 冷凍機用蓄冷材の開発は急務となっています。

## 研究内容と成果

従来の極低温用の磁性蓄冷材の開発は、レアアース金属を含む金属間化合物が中心でした。その理由は、(i) レアアース金属イオンが非常に大きな磁気モーメント<sup>(2)</sup>を持つこと、(ii) 比熱<sup>(3)</sup>が極低温で大きく立ち上がる「磁気相転移温度」が 10 K 以下にあることの 2 点にあります。代表例である  $\text{HoCu}_2$  では、 $\text{Ho}^{3+}$  イオンが 7 ～ 8  $\mu_B$ （ $\mu_B$ ：ボーア磁子<sup>(4)</sup>）という大きな磁気モーメントを持つため、図 2(a)に示すように極低温で大きな磁気比熱を生じ、蓄冷材として優れた性能を示します。

(a) 従来技術

レアアース磁性体  
フラストレーションなし



(b) 新技術

レアアースフリー磁性体  
フラストレーションあり

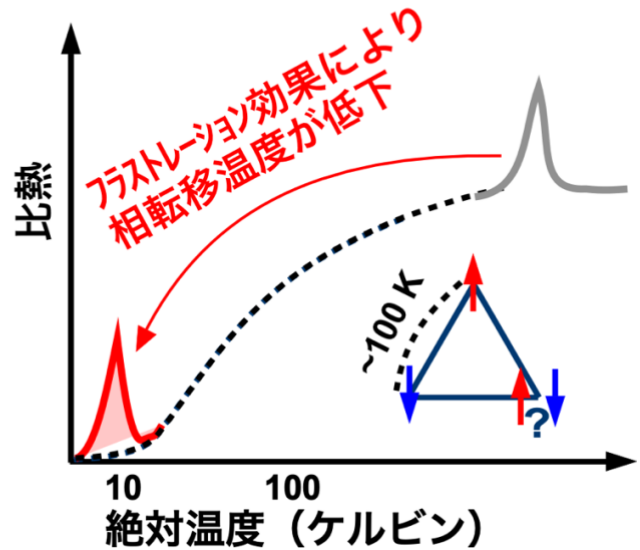


図 2：比熱を生じるメカニズムの比較の模式図 (a)従来のレアアース磁性体では、磁気エネルギーが約 10 K の領域にあり、この温度付近で相転移を起こすことで大きな比熱を発生します。(b)本研究のレアアースフリー磁性体では、磁気エネルギーは一般に 100 K 以上ですが、三角格子によるフラストレーション効果によって相転移が約 10 K まで低下し、極低温域で大きな比熱を生じます。

一方、鉄などの遷移金属も  $\text{Fe}^{3+}$  や  $\text{Mn}^{2+}$  イオンで最大  $5 \mu_B$  の磁気モーメントを持っていますが、磁気相転移温度は一般的に室温以上と高いため、極低温域で利用できる大きな磁気比熱は生じません。そのため、遷移金属磁性体はこれまで極低温蓄冷材の候補として検討されてきませんでした。

本研究では、この常識を覆す鍵として、「フラストレーション効果」と呼ばれる現象に注目しました。これは、図 2(b)に示したように、スピン同士が反強磁性的にお互いを反転させようとする一方で、結晶格子が正三角格子のような配置をとることにより、スピンのように向けばよいか“決められなくなる”状態です。この効果が強いと、たとえ交換相互作用<sup>(5)</sup>が 100 K 程度の強さであったとしても、磁気相転移は極低温まで大幅に低下します。

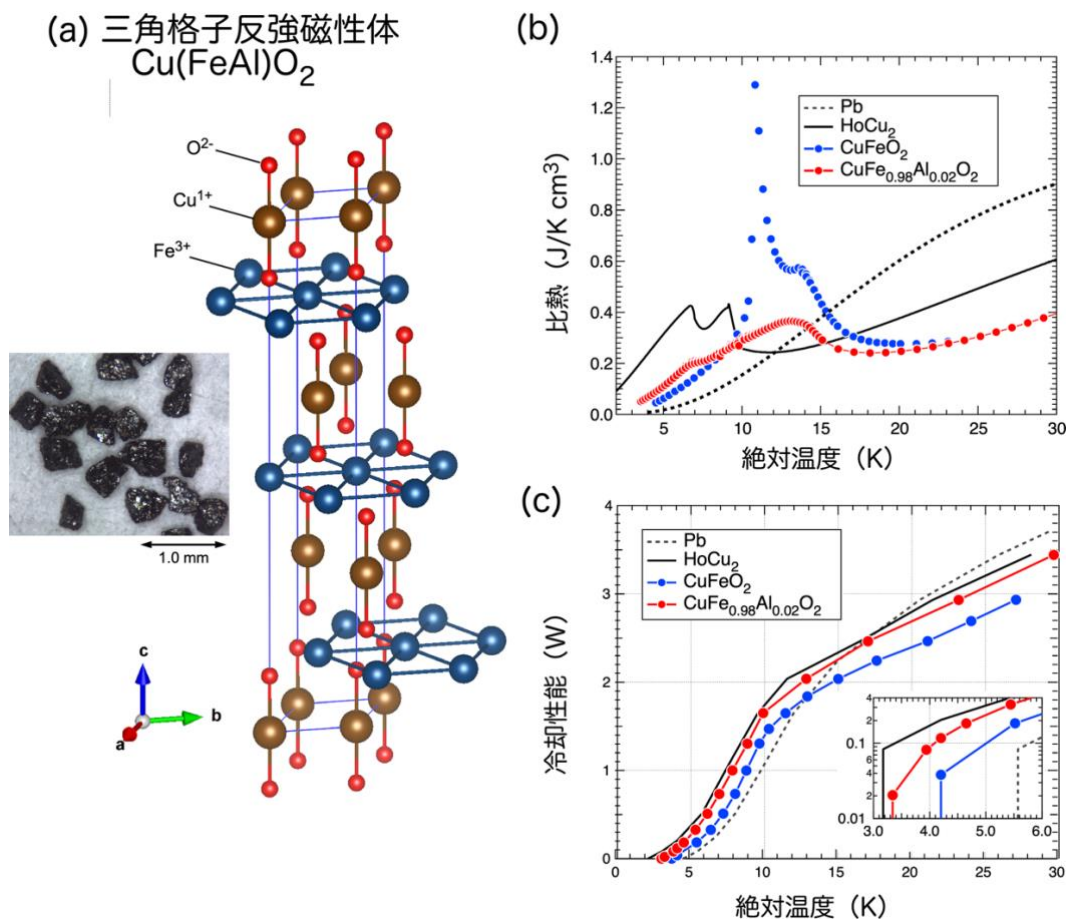


図 3 : (a)三角格子反強磁性体  $\text{Cu}(\text{FeAl})\text{O}_2$  の結晶構造と、合成した試料の写真。(b) $\text{CuFeO}_2$  および CFAO ( $\text{CuFe}_{0.98}\text{Al}_{0.02}\text{O}_2$ )、比較材 (Pb、 $\text{HoCu}_2$ ) の比熱の温度依存性。CFAO は極低温で大きな磁気比熱を示す。(c) 各蓄冷材を GM 冷凍機に充填した際の冷却性能。CFAO はレアアース蓄冷材  $\text{HoCu}_2$  に匹敵する性能を示す。

この原理解明を踏まえ、我々は三角格子反強磁性体  $\text{CuFeO}_2$  に着目しました。 $\text{CuFeO}_2$  は  $\text{Fe}^{3+}$  スピンが正三角格子に配置されており、強いフラストレーションにより磁気相転移温度が 10 K 付近まで低下します (図 3(b))。さらに、鉄サイトの約 2% をアルミニウムで置換した  $\text{CuFe}_{0.98}\text{Al}_{0.02}\text{O}_2$  (CFAO) では、相転移がより緩やかになり、極低温域での磁気比熱が一層増大することも明らかになりました。

これらの物質を GM 冷凍機に実際に充填して冷却性能を評価した結果、CFAO は 3.5 K 以下までの冷却に成功し、従来のレアアース蓄冷材  $\text{HoCu}_2$  に匹敵する性能を示しました (図 3(c))。このことから、レアアースを用いずとも、フラストレーションを活用することで実用レベルの蓄冷材を実現できることが示されました。

## 今後の展開

今回開発した蓄冷材は、銅・鉄・アルミニウムといった豊富な資源のみで構成されており、希少資源である液体ヘリウムやレアアースに依存しない、持続可能で環境負荷の少ない新しい極低温冷却技術を提供します。今後、需要拡大が見込まれる医療用 MRI に加え、世界的な普及が期待される量子コンピューターの冷却技術としての応用が期待されます。

■掲載論文

題目	Innovative Cryogenic Cooling Material Using Spin Frustration from Abundant Elements
著者	Noriki Terada, Hiroaki Mamiya, Akiko T. Saito, and Shinji Masuyama
雑誌	Scientific Reports
DOI	<a href="https://doi.org/10.1038/s41598-025-29709-5">https://doi.org/10.1038/s41598-025-29709-5</a>
掲載日	2025 年 12 月 22 日

■用語解説

(1) Gifford–McMahon（GM）冷凍機

ヘリウムガスの圧縮と膨張を繰り返すことで極低温（約 4 K 以下）を連続的に生成する冷凍機です。現在、最も普及している極低温冷凍機の一つです。

(2) 磁気モーメント

電子の自転運動によって生じる小さな磁石のことで、遷移金属イオンや希土類イオンは、不対電子の数に応じた大きさの磁気モーメントを持ちます。

(3) 比熱

ある物質 1 グラムの温度を 1 ケルビン（または 1℃）上昇させるのに必要な熱量を表し、この値が大きいほど熱を蓄える性質が強くなります。

(4) ボーア磁子

電子 1 個がもっている磁気モーメントの単位です。

(5) 交換相互作用

磁性体において、隣接するイオン間の磁気モーメントの向きを揃えようとする力のことで、互いに平行に揃えようとする力を強磁性的、反平行に揃えようとする力を反強磁性的交換相互作用と呼びます。

本件に関するお問い合わせ先

研究内容について	<b>NIMS 磁性・スピントロニクス材料研究センター 主席研究員</b> <b>寺田 典樹</b> E-mail: <a href="mailto:terada.noriki@nims.go.jp">terada.noriki@nims.go.jp</a> TEL:029-860-4627 URL: <a href="https://samurai.nims.go.jp/profiles/terada_noriki?locale=ja">https://samurai.nims.go.jp/profiles/terada_noriki?locale=ja</a>
報道・広報について	<b>NIMS 国際・広報部門 広報室</b> 〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1 E-mail: <a href="mailto:pressrelease@ml.nims.go.jp">pressrelease@ml.nims.go.jp</a> TEL: 029-859-2026, FAX: 029-859-2017



# NIMS とは？

NIMS（ニムス）は、物質・材料科学の研究に特化した国立研究開発法人です。

エネルギー、環境、医療、インフラ、モビリティ——私たちの暮らしを支えるあらゆる技術は「物質」と「材料」で成り立っています。

NIMS はそれらの基礎・基盤研究だけでなく、成果の普及とその活用の促進まで総合的に行っています。

社会の発展は常に物質・材料科学の進歩とともにあり、いま、地球規模の環境・資源問題の解決に向けたカギとして、その重要性はいっそう高まっています。

NIMS は「材料で、世界を変える」というビジョンのもと、持続可能で豊かな社会の実現を目指して、世界最先端の研究を続けています。

## 【NIMS を掴む参考ページ】

NIMS はこんな研究所！ <https://www.nims.go.jp/nims/introduction.html>

NIMS ビジョン <https://www.nims.go.jp/nims/profile.html#vision>