

磁気冷凍性能を 最大限引き出せる手法の開発

物材機構 田村亮

共同研究者：田中宗（早稲田高等研）
大野隆央，北澤英明（物材機構）



28/November/2015

発表内容

- 自己紹介
- 冷凍技術と気体冷凍
- 磁気冷凍の基礎
- 磁気冷凍機の構成と磁気冷凍材料
- 代表的な磁気冷凍材料
- 研究目的
- 磁気構造と磁気エントロピー
- 磁気構造と熱吸収能力
- まとめ

発表内容

- 自己紹介
- 冷凍技術と気体冷凍
- 磁気冷凍の基礎
- 磁気冷凍機の構成と磁気冷凍材料
- 代表的な磁気冷凍材料
- 研究目的
- 磁気構造と磁気エントロピー
- 磁気構造と熱吸収能力
- まとめ

自己紹介

- 大学：埼玉大学理学部物理学科 (2003年4月－2007年3月)

卒業研究担当教員：飛田 和男 先生

卒業論文「2次元Isingモデルの厳密解」



- 大学院：東京大学理学系研究科物理学専攻 (2007年4月－2012年3月)

担当教員：川島 直輝 先生

博士論文「Novel Magnetic Orders in Frustrated Continuous Spin Systems」



- ポスドク研究員：(独) 物質・材料研究機構 若手国際研究センター (2012年4月－2015年3月)

センター長：宮野 健次郎 先生

メンター：大野 隆央 先生, 北澤 英明 先生



研究テーマ「大規模数値計算による磁性材料の新奇現象の探求」

- 研究員：国立研究開発法人 物質・材料研究機構 理論計算科学ユニット (2015年4月－)

ユニット長：佐々木 泰造 先生

グループ長：宮崎 剛 先生



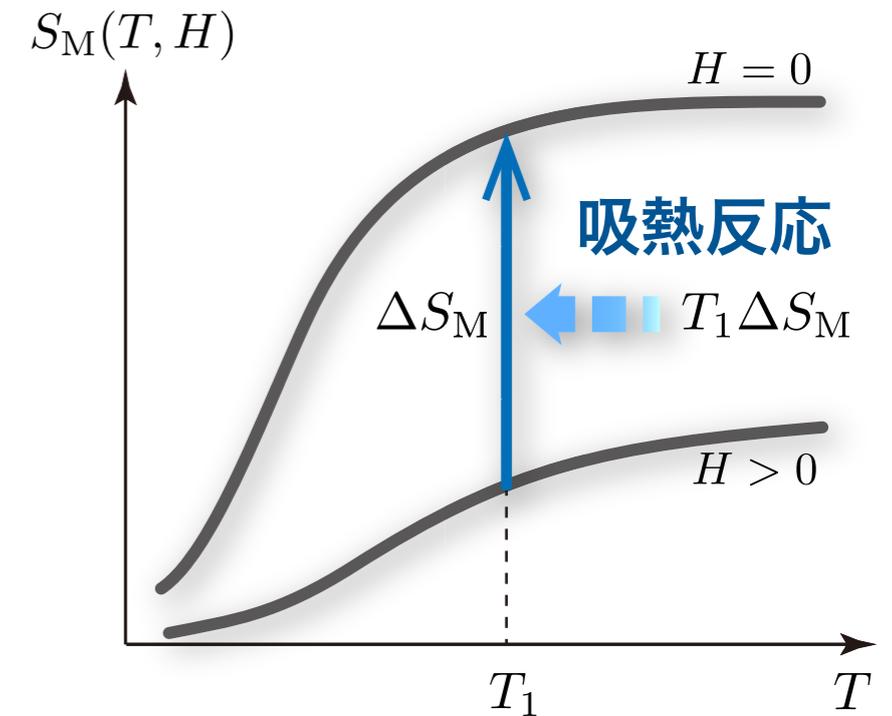
本研究ダイジェスト

磁気熱量効果

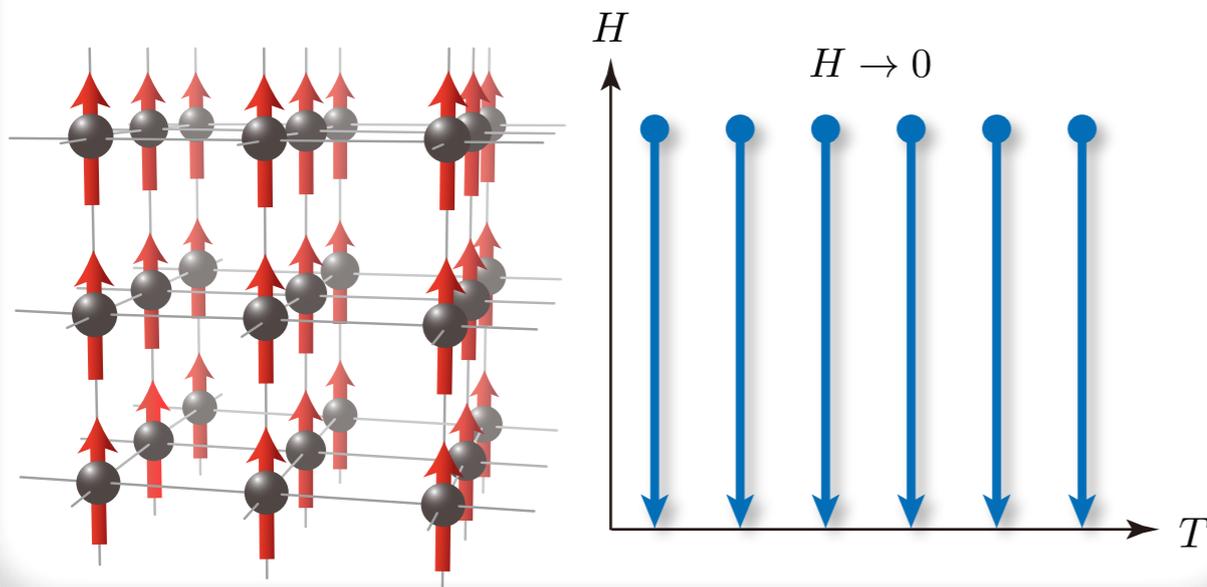
磁場変化によって磁気エントロピーが増加

→ 吸熱反応

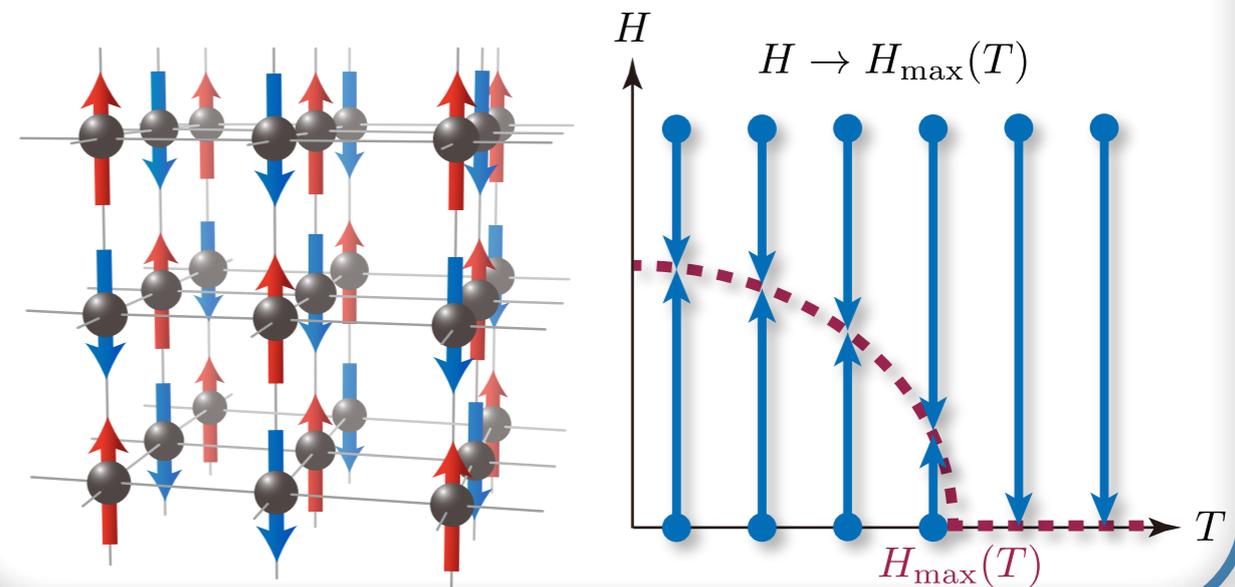
磁気冷凍性能を最大限引き出せる手法を開発



強磁性体



反強磁性体



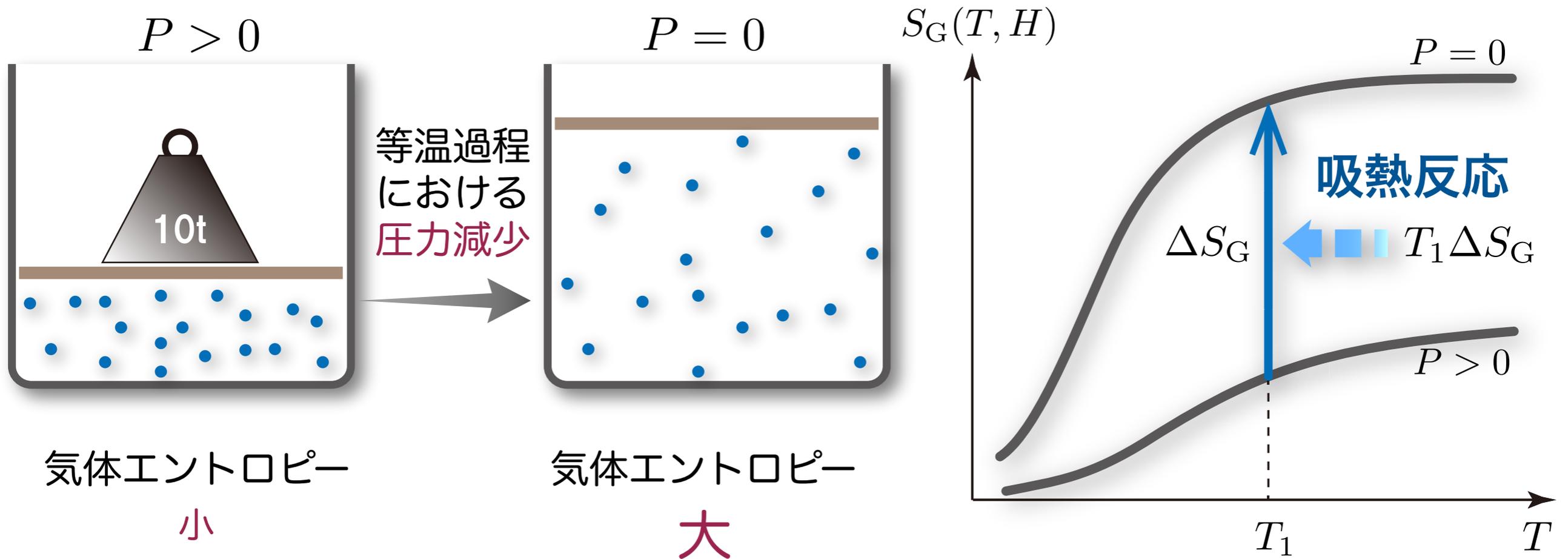
発表内容

- 自己紹介
- **冷凍技術と気体冷凍**
- 磁気冷凍の基礎
- 磁気冷凍機の構成と磁気冷凍材料
- 代表的な磁気冷凍材料
- 研究目的
- 磁気構造と磁気エントロピー
- 磁気構造と熱吸収能力
- まとめ

気体冷凍

気体のエントロピー変化を用いた冷凍技術

気体におけるエントロピー変化

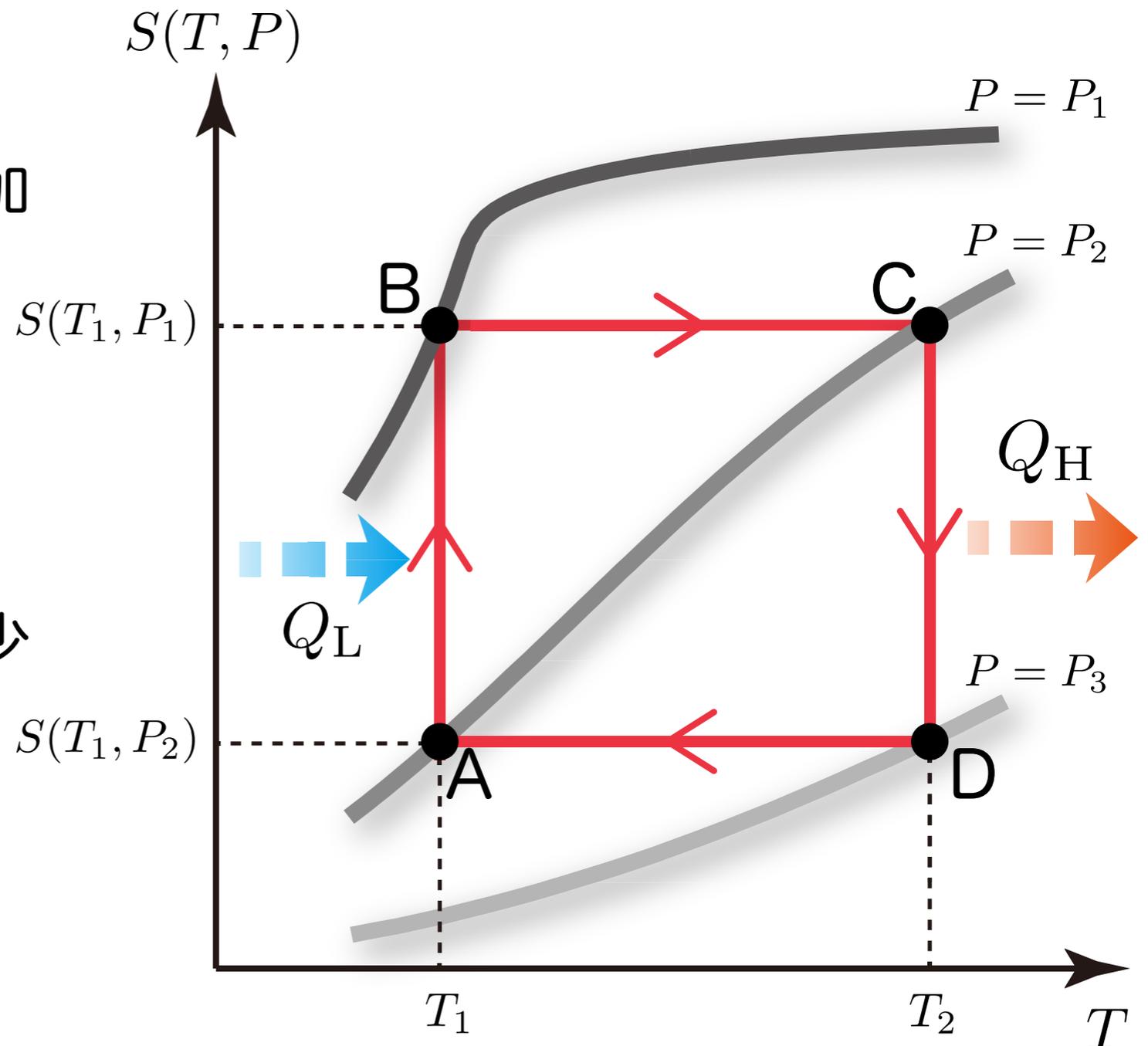


圧力変化によって気体のエントロピーが増加 → 吸熱反応

気体冷凍における逆カルノーサイクル

気体冷凍サイクルの例：逆カルノーサイクル

- A → B : 等温膨張過程
気体エントロピーの増加
- B → C : 断熱圧縮過程
気体の温度の増加
- C → D : 等温圧縮過程
気体エントロピーの減少
- D → A : 断熱膨張過程
気体の温度の減少



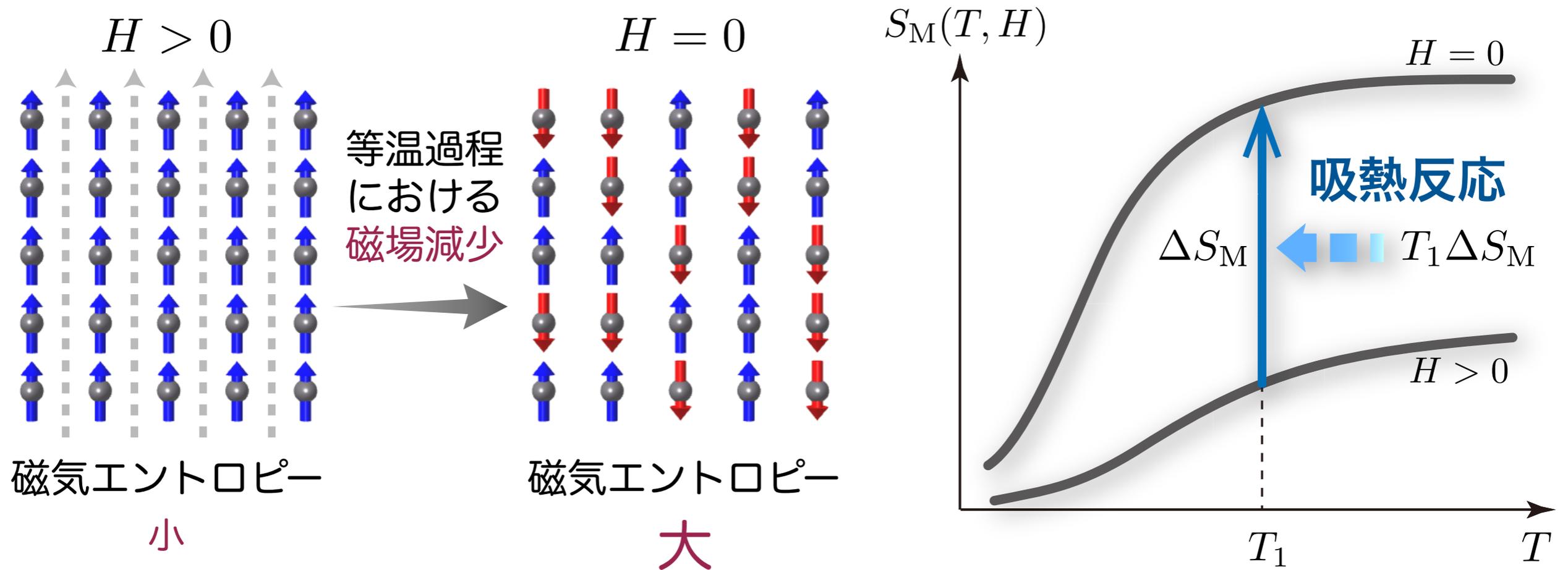
発表内容

- 自己紹介
- 冷凍技術と気体冷凍
- **磁気冷凍の基礎**
- 磁気冷凍機の構成と磁気冷凍材料
- 代表的な磁気冷凍材料
- 研究目的
- 磁気構造と磁気エントロピー
- 磁気構造と熱吸収能力
- まとめ

磁気冷凍

磁性体の磁気熱量効果を用いた冷凍技術

強磁性体におけるエントロピー変化



磁場変化によって磁気エントロピーが増加

吸熱反応

磁気冷凍における逆カルノーサイクル

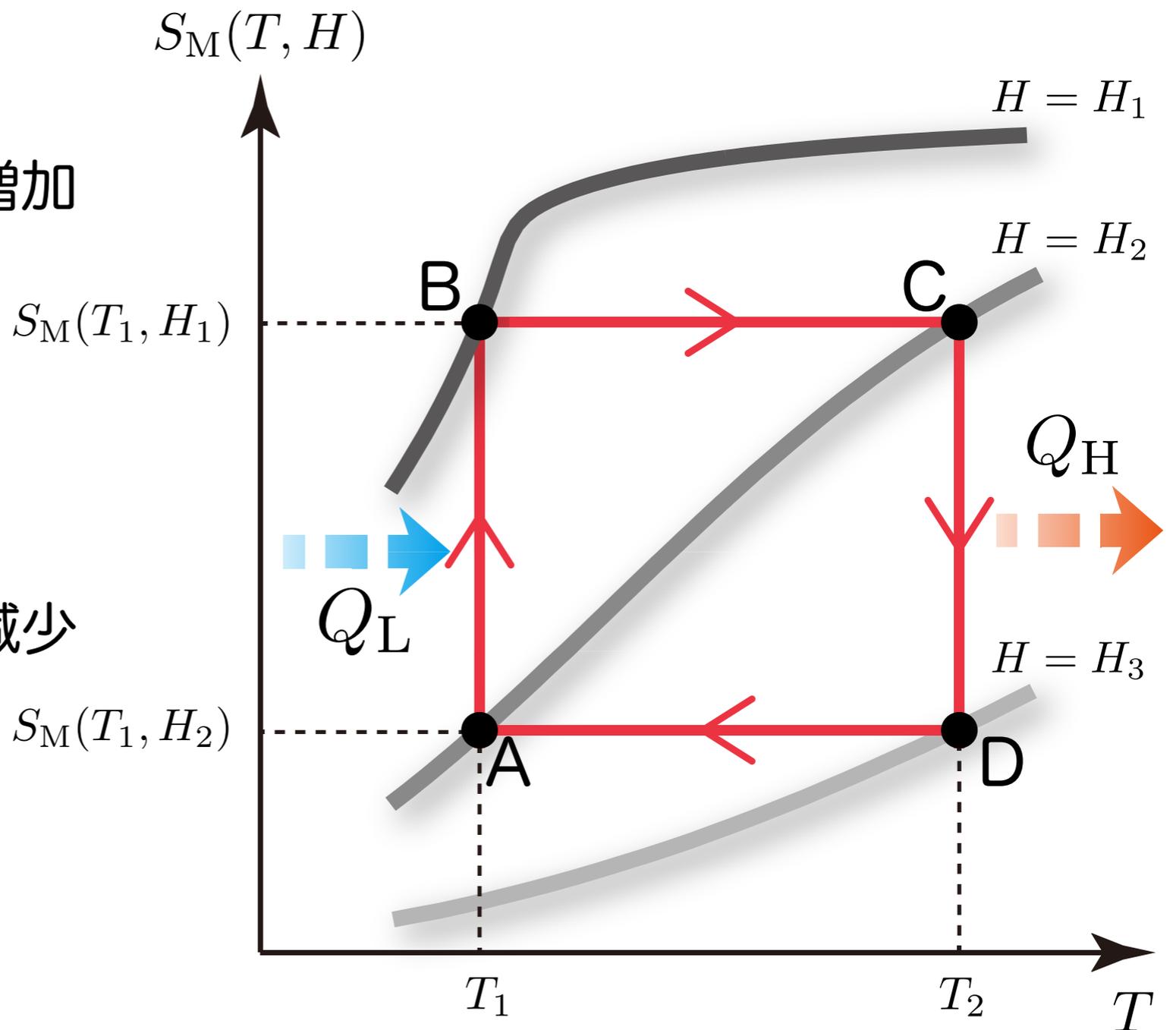
磁気冷凍サイクルの例：逆カルノーサイクル

A → B : 等温消磁過程
磁気エントロピーの増加

B → C : 断熱磁化過程
磁性体の温度の増加

C → D : 等温磁化過程
磁気エントロピーの減少

D → A : 断熱消磁過程
磁性体の温度の減少



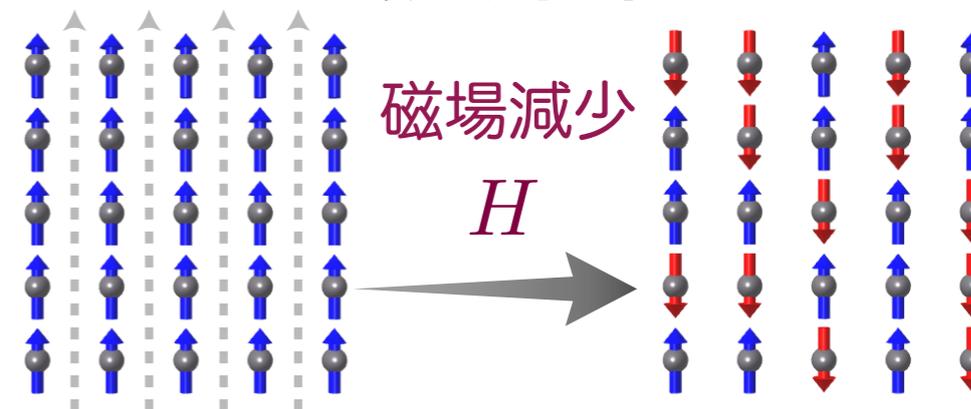
気体冷凍と磁気冷凍

気体冷凍

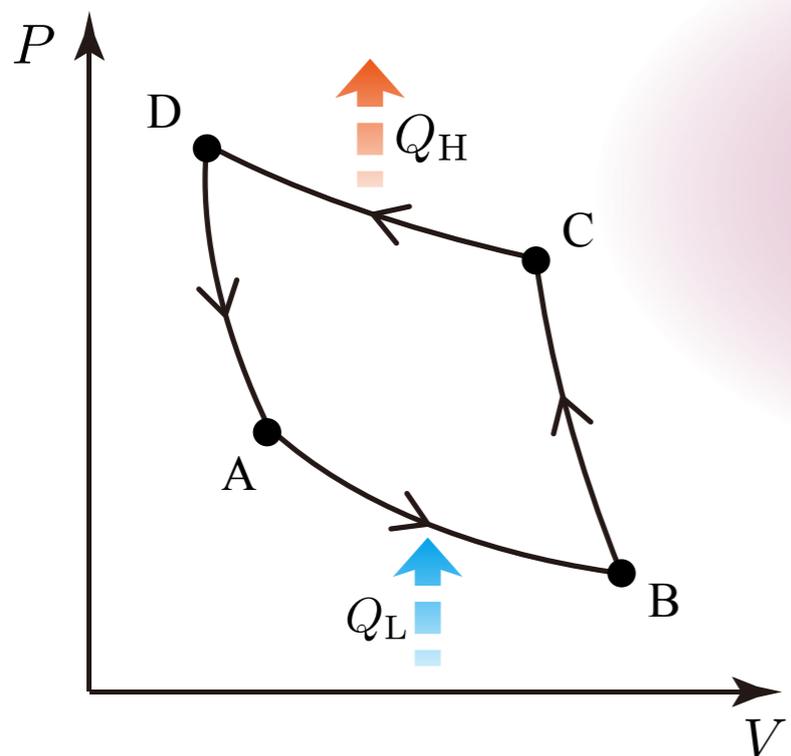


V : 体積増加
 S : エントロピー増加

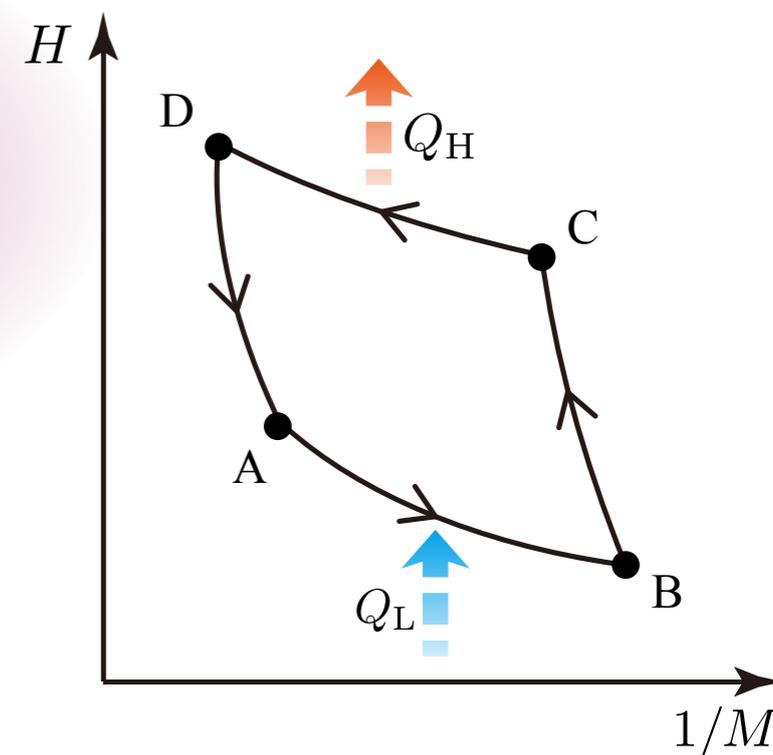
磁気冷凍



M : 磁化減少
 S_M : エントロピー増加



対応
 $P \leftrightarrow H$
 $V \leftrightarrow 1/M$



発表内容

- 自己紹介
- 冷凍技術と気体冷凍
- 磁気冷凍の基礎
- **磁気冷凍機の構成と磁気冷凍材料**
- 代表的な磁気冷凍材料
- 研究目的
- 磁気構造と磁気エントロピー
- 磁気構造と熱吸収能力
- まとめ

逆カルノーサイクル(~20K)

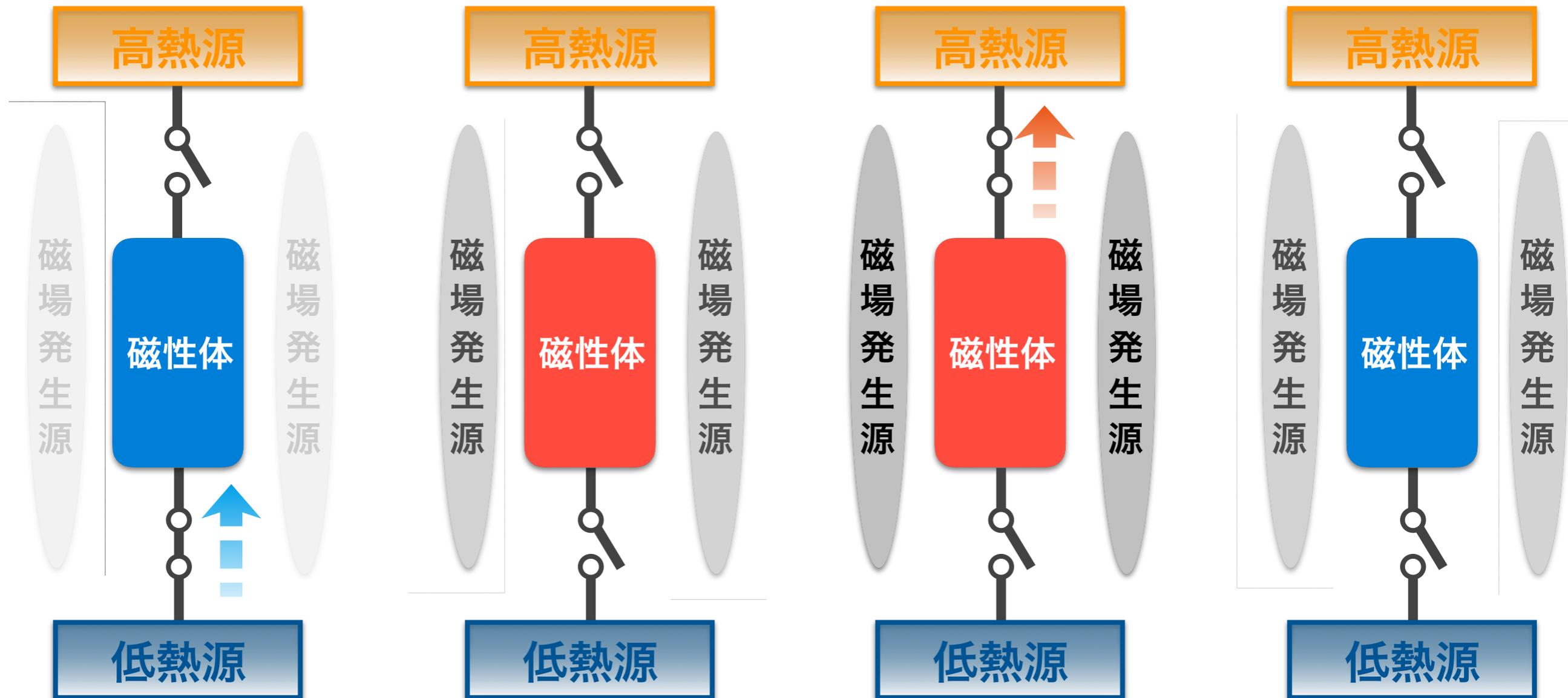
磁気エントロピー変化による吸熱反応を利用した冷凍サイクル
温度が高いと磁性体の格子振動(格子比熱)が増加し使用できない。

Step1:等温消磁過程

Step2:断熱磁化過程

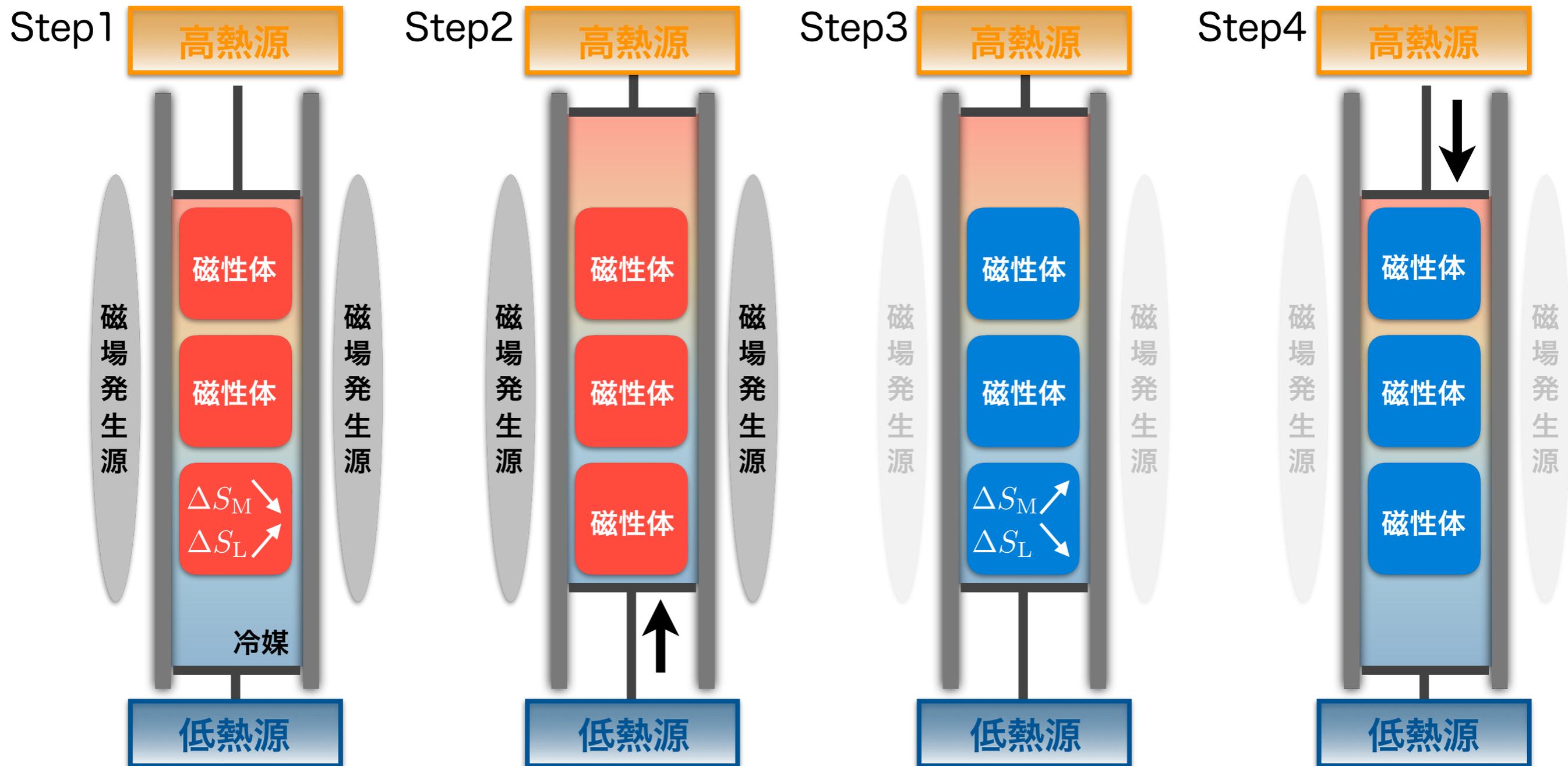
Step3:等温磁化過程

Step4:断熱消磁過程



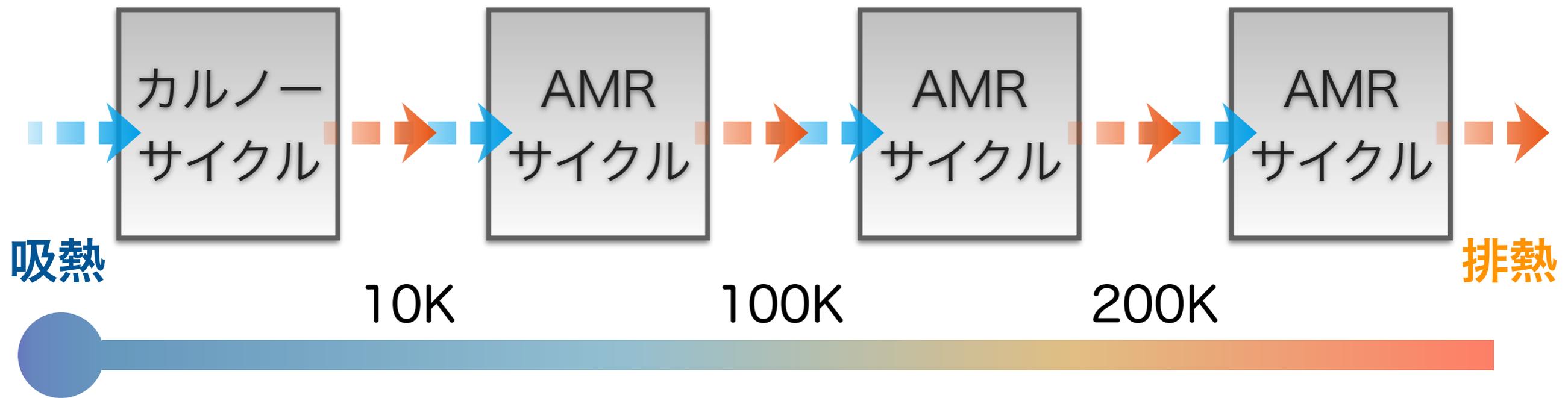
AMRサイクル(20K~300K)

格子振動(格子比熱)を利用し、**磁性体に熱を蓄え**、
磁性体の温度変化を利用した冷凍サイクル(冷凍効果+蓄冷効果)



磁気冷凍機の構成

一気に温度を下げることはできず、複数の熱サイクルを組み合わせ、
排熱温度から徐々に温度を下げていく。



目的温度

高い磁気冷凍性能を示す動作温度は、磁性材料固有である。

→ 各熱サイクルで使える磁気冷凍材料は異なる。

排熱温度

室温温度

LG温度

液体窒素温度

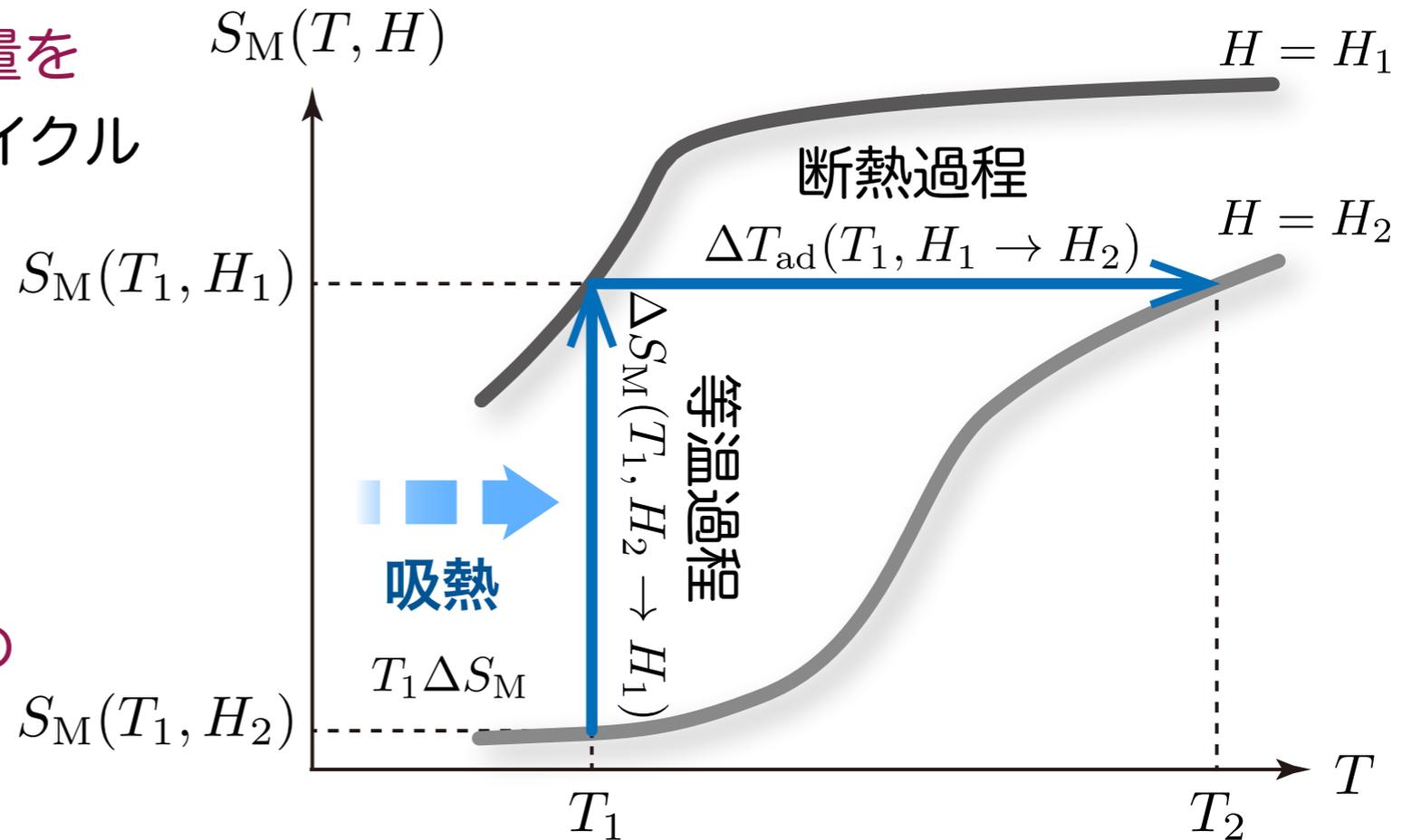
磁気冷凍性能

- ΔS_M : 磁気エントロピー変化
(等温過程)

カルノーサイクルのように、**熱量を汲み出すことで冷却する**冷凍サイクルで重要となる。
(主に低温領域で使用)

- ΔT_{ad} : 断熱温度変化
(断熱過程)

AMRサイクルのように**磁性体の温度変化を直接使用し冷却する**冷凍サイクルで重要となる。
(主に高温領域で使用)



$\Delta S_M, \Delta T_{ad}$
が大きな磁性体

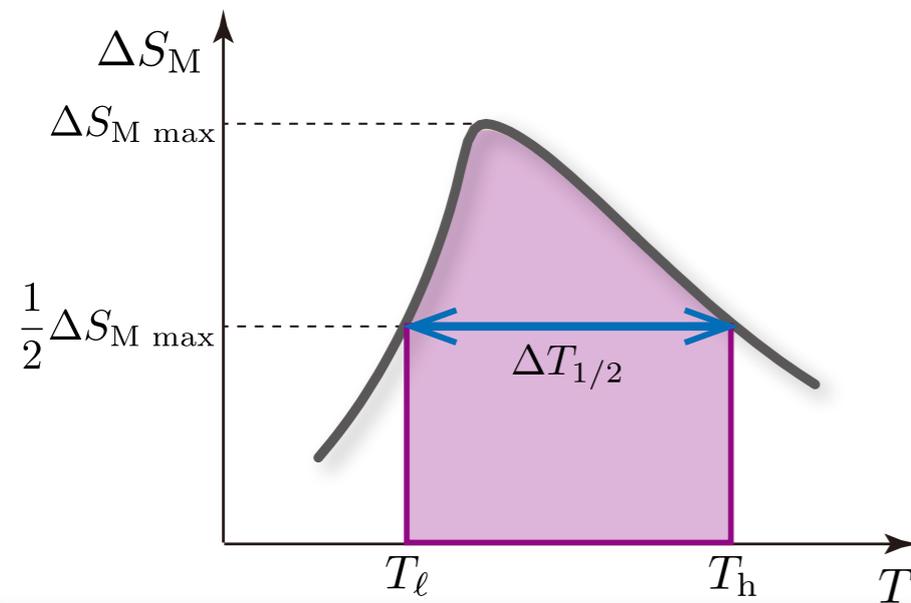
高性能な磁気冷凍材料
(動作温度も重要)

熱吸収能力

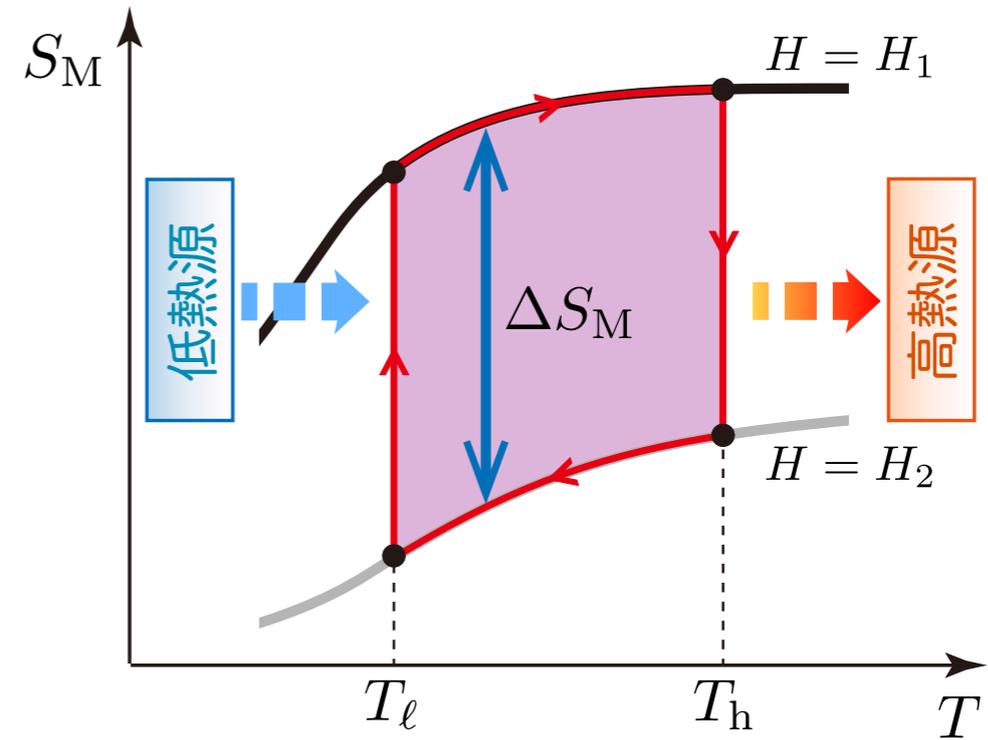
Cooling capacity

$$q = \int_{T_\ell}^{T_h} \Delta S_M(T, H_2 \rightarrow H_1) dT$$

一回の熱力学サイクルによって
 $T_\ell \rightarrow T_h$ の間で移動する熱量



例：逆エリクソンサイクル

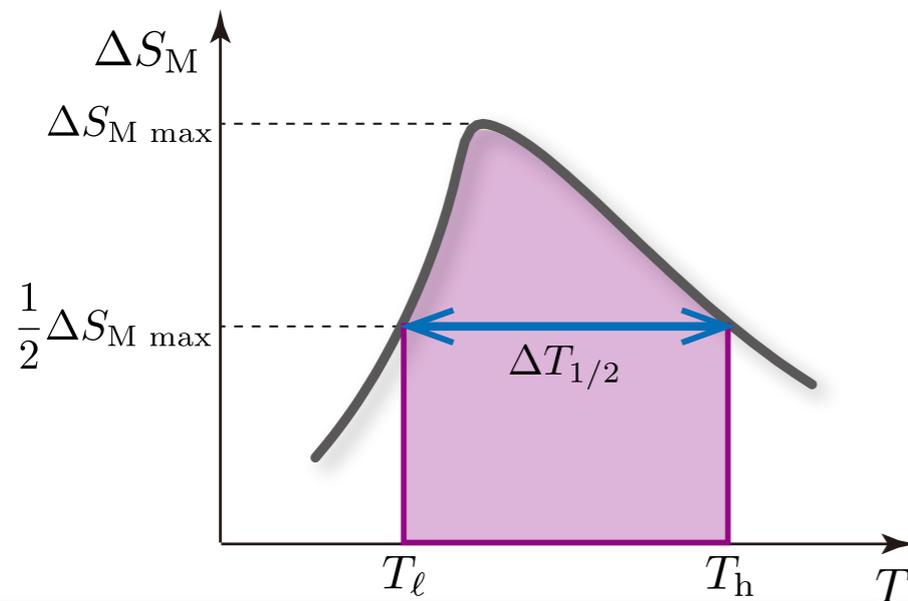


熱吸収能力

Cooling capacity

$$q = \int_{T_\ell}^{T_h} \Delta S_M(T, H_2 \rightarrow H_1) dT$$

一回の熱力学サイクルによって
 $T_\ell \rightarrow T_h$ の間で移動する熱量

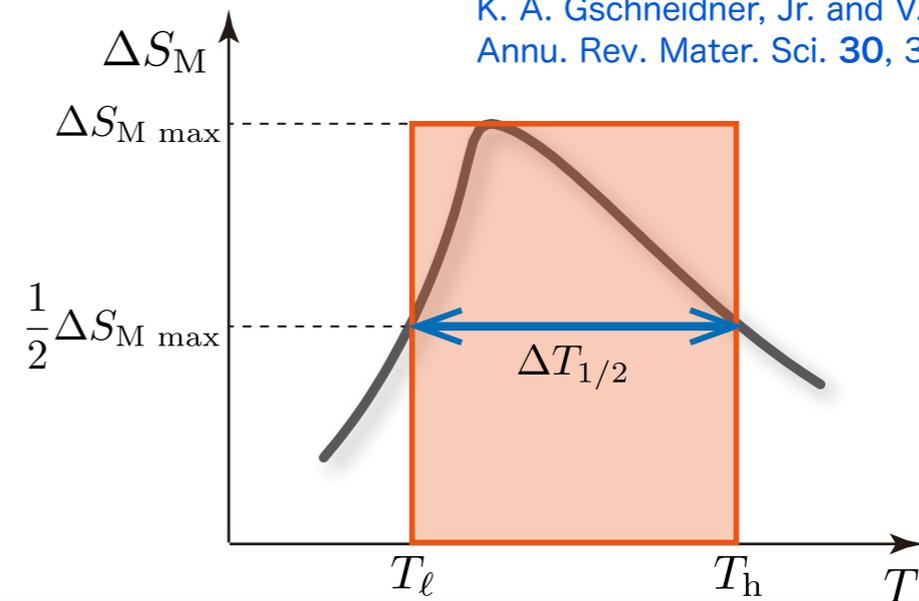


Relative cooling power (RCP)

$$\text{RCP} = \Delta S_{M \max} \times \Delta T_{1/2} \simeq \frac{4}{3} q$$

$T_h - T_\ell = \Delta T_{1/2}$ とし、
積分を三角形近似したもの

K. A. Gschneidner, Jr. and V. K. Pecharsky,
Annu. Rev. Mater. Sci. 30, 387 (2000).



$\Delta S_M, \Delta T_{ad}, \text{RCP}$
が大きな磁性体

高性能な磁気冷凍材料
(動作温度も重要)

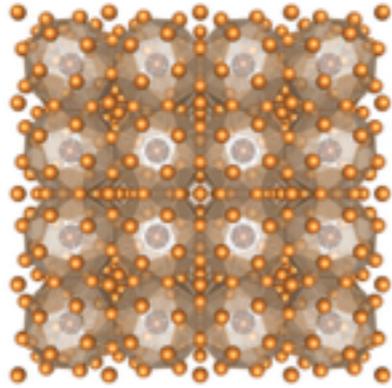
発表内容

- 自己紹介
- 冷凍技術と気体冷凍
- 磁気冷凍の基礎
- 磁気冷凍機の構成と磁気冷凍材料
- **代表的な磁気冷凍材料**
- 研究目的
- 磁気構造と磁気エントロピー
- 磁気構造と熱吸収能力
- まとめ

様々な磁気冷凍材料

希土類化合物

- ✓ $\text{La}(\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x})_{13}$
A. Fujita, S. Fujieda,
Y. Hasegawa,
and K. Fukamichi
Phys. Rev. B
67, 104416 (2003).

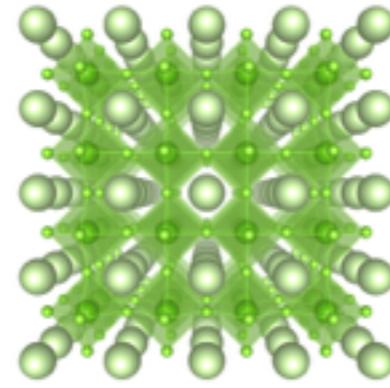


- ✓ $\text{Gd}_5\text{Si}_2\text{Ge}_2$
A. O. Pecharsky, et al.,
J. Appl. Phys. 93, 4722 (2003)

- ✓ Ho_5Pd_2
北澤英明, 豊泉沙織
日本物理学会2014年秋季大会 7pBC-1, 7pBC-2

遷移金属酸化物

- ✓ $\text{R}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$
(R=La-Gd)
H. Sakai,
Y. Taguchi,
and Y. Tokura,
J. Phys. Soc. Jpn.
78, 113708 (2009).

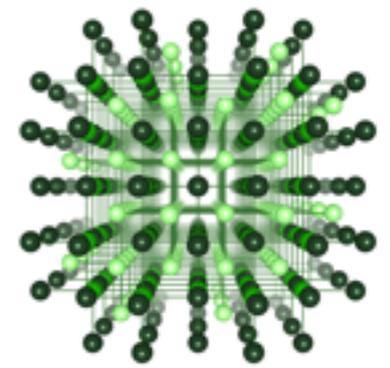


- ✓ Sr_2RuO_4
S. Yonezawa, T. Kajikawa, and Y. Maeno,
Phys. Rev. Lett. 110, 077003 (2013).

- ✓ $\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{V}_2\text{O}_4$
D. Choudhur, et al.,
Phys. Rev. B 89, 104427 (2014).

ホイスラー合金

- ✓ $\text{Ni}_{0.5}\text{Mn}_{0.5-x}\text{Sn}_x$
T. Krenke, et al.,
Nature Materials
4, 450 (2005).

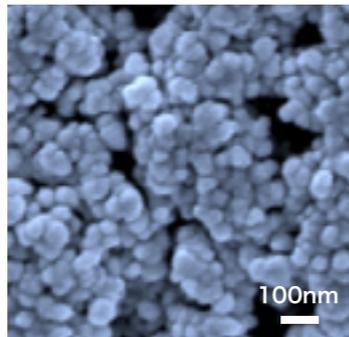


- ✓ $\text{Ni}_{0.5}\text{Mn}_{0.5-x}\text{In}_x$, NiMnGa
A. Planes, et al.,
J. Phys.: Condens. Matter 21, 233201 (2009).

- ✓ $\text{Ni}_{0.5-x}\text{Mn}_{0.39+x}\text{Sn}_{0.11}$
Z. D. Han, et al.,
Appl. Phys. Lett. 90, 042507 (2007).

ナノ微粒子

- ✓ $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$
H. Yang, Y.H. Zhu,
T. Xian, and J.L. Jiang
J. Alloys. Compd.
555, 150 (2013).

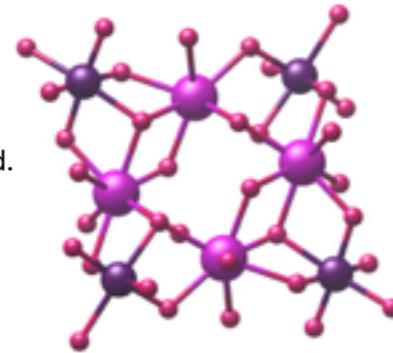


- ✓ $\text{La}_{0.125}\text{Ca}_{0.875}\text{MnO}_3$
A. Biswas, T. Samanta, S. Banerjee, and I. Das
Appl. Phys. Lett. 94, 233109 (2009).

- ✓ $\text{Pr}_{1-x}\text{A}_x\text{Mn}_{1-y}\text{Co}_y\text{O}_3$ (A=Ca, Sr)
N. Mahato, et al.,
J. Nanosci. Nanotechnol. 11, 2560 (2011).

単分子磁性体

- ✓ $[\text{Mn}^{\text{III}}_2\text{Mn}^{\text{II}}_2]$
G. Karotsis, et al.,
Angew. Chem. Int. Ed.
48, 9928 (2009).

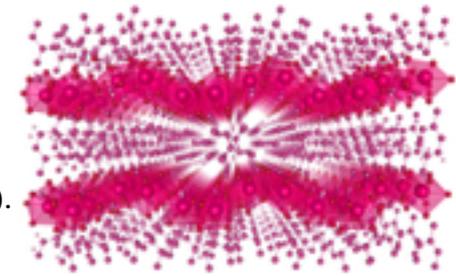


- ✓ $[\text{Mn}^{\text{III}}_4\text{Ln}^{\text{III}}_4]$ (Ln=Gd, Tb, Dy)
G. Karotsis, et al.,
J. Am. Chem. Soc. 132, 12983 (2010).

- ✓ $[\text{Ni}^{\text{III}}_6\text{Ln}^{\text{III}}_6]$ (Ln=Gd, Dy, Y)
Y.-Z. Zheng, et al.,
Angew. Chem. Int. Ed. 50, 3692 (2011).

Metal Organic Framework (MOF)

- ✓ $[\text{Gd}(\text{HCOO})_3(\text{C}_8\text{H}_4\text{O}_4)]$
R. Sibille, et al.,
Chem. Eur. J.
18, 12970 (2012).



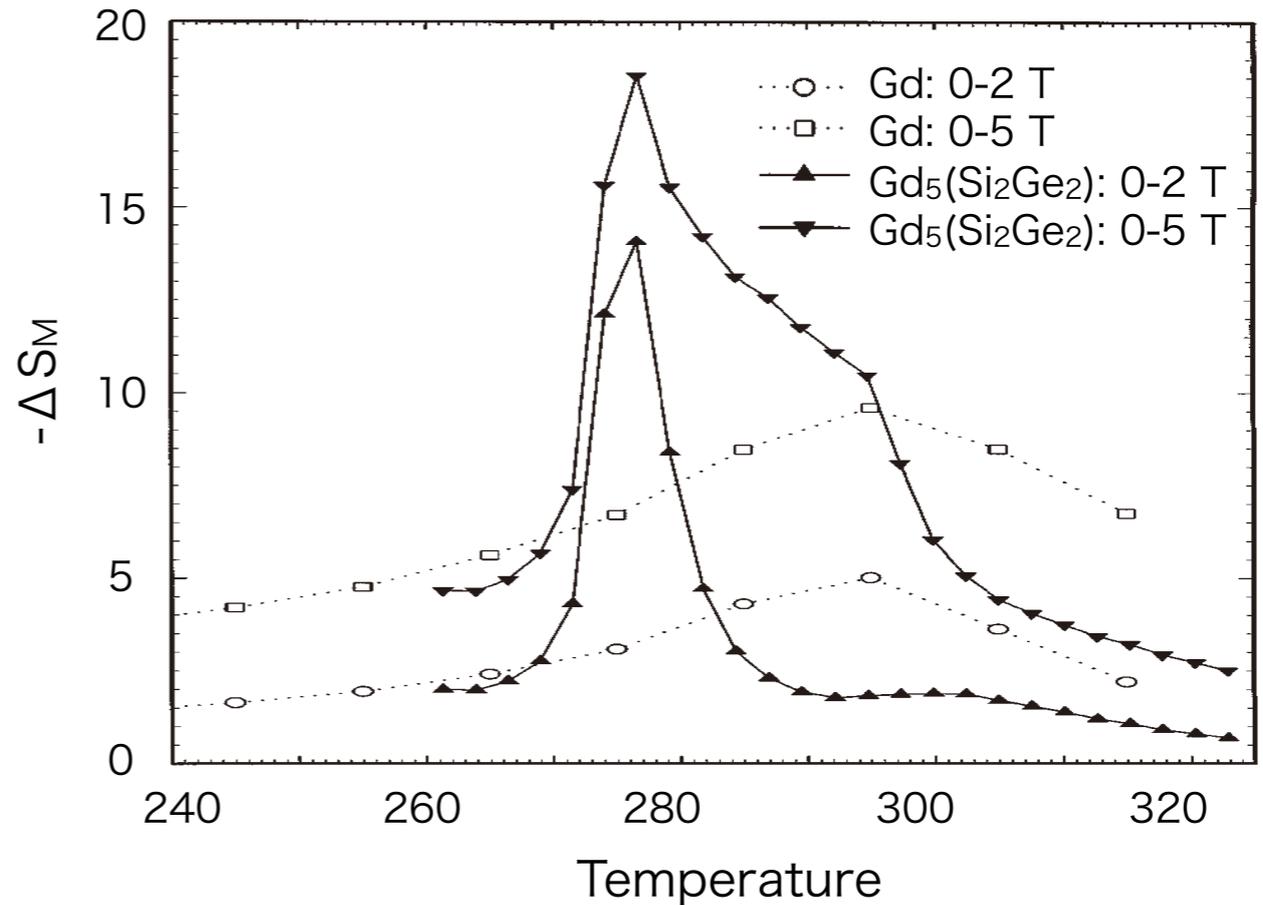
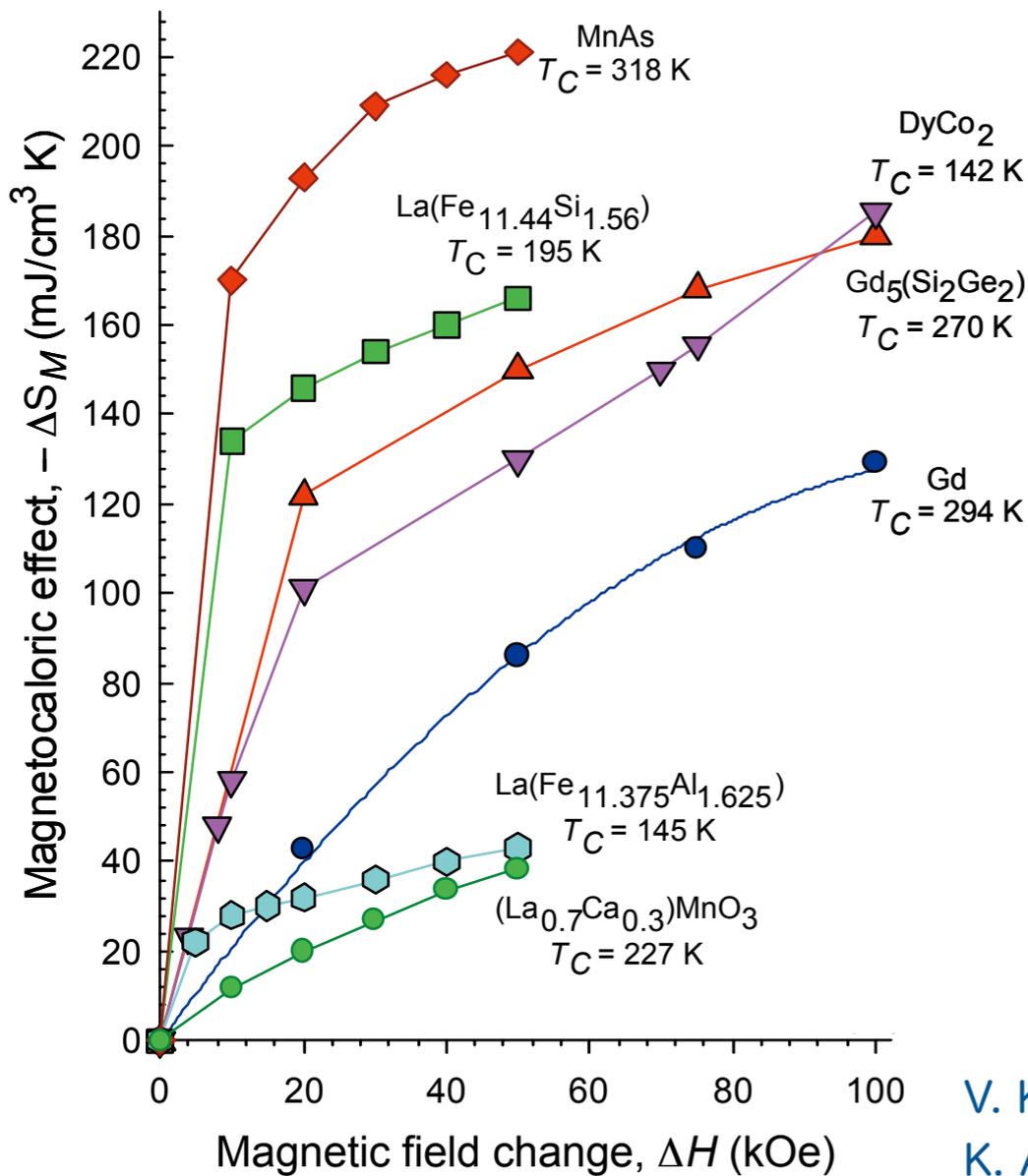
- ✓ $\text{Gd}(\text{HCOO})_3$
G. Lorusso, et al.,
Adv. Mater. 25, 4653 (2013).

- ✓ $[\text{Mn}(\text{H}_2\text{O})_6][\text{MnGd}_3]_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
F.-S. Guo, et al.,
Chem. Commun. (Camb) 48, 12219 (2012).

室温磁気冷凍材料

室温で大きなエントロピー変化

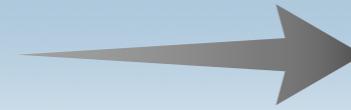
Curie温度が室温付近の
強磁性体



V. K. Pecharsky and K. A. Gschneidner Jr. Phys. Rev. Lett. **78**, 4494 (1997).
K. A. Gschneidner Jr et al., Rep. Prog. Phys. **68** 1479 (2005).

低温磁気冷凍材料

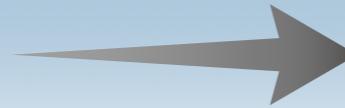
低温で大きなエントロピー変化



Curie温度が低温の
強磁性体？

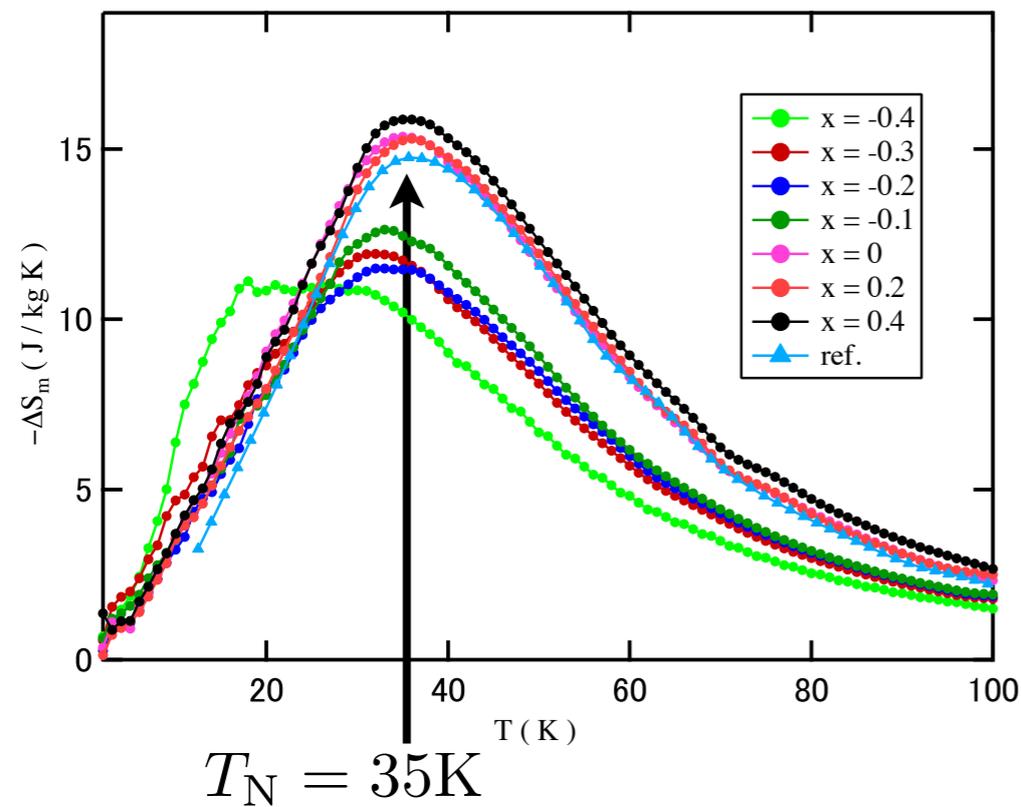
低温磁気冷凍材料

低温で大きなエントロピー変化

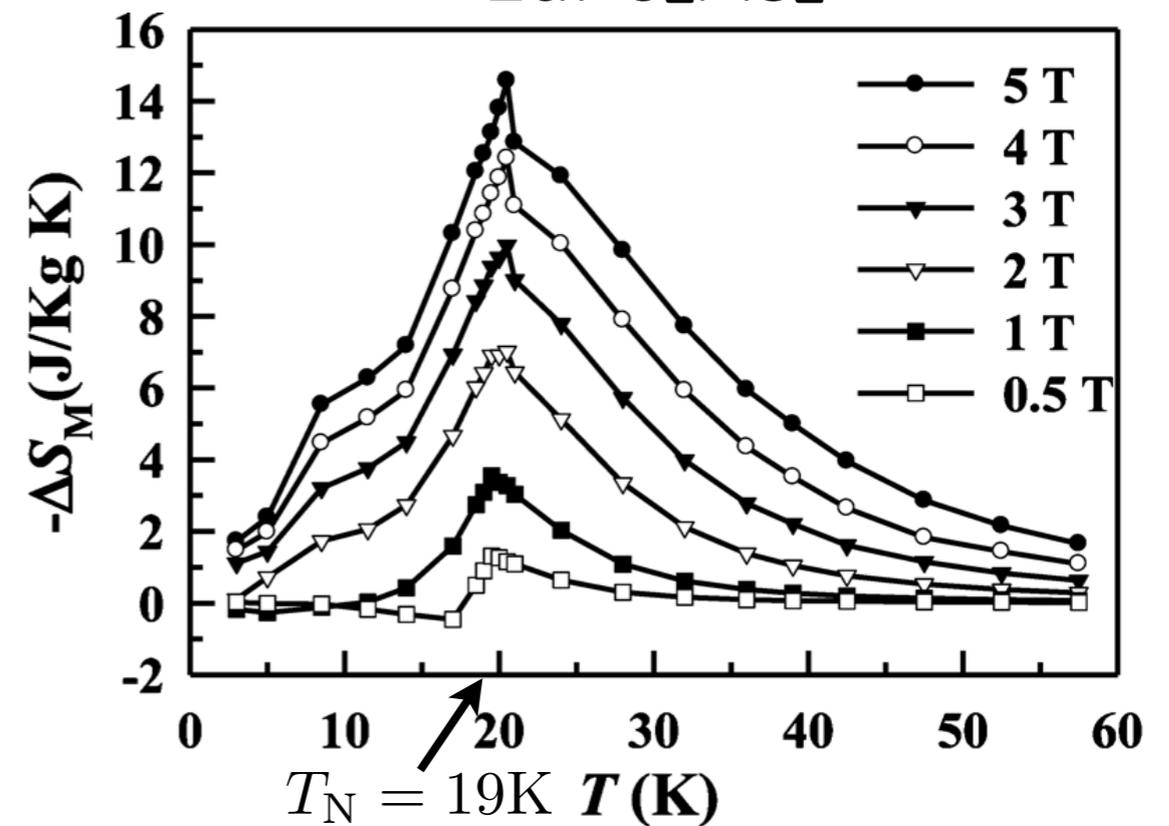


反強磁性体

$\text{Ho}_{5+x}\text{Pd}_2$



EuFe_2As_2



S. Toyoizumi, R. Tamura et al., J. Appl. Phys. 117, 17D101 (2015). M. S. Kim et al., Appl. Phys. Lett. 98, 172509 (2011).

- Néel温度以下で、逆磁気熱量効果を観測
- Néel温度で大きなエントロピー変化

発表内容

- 自己紹介
- 冷凍技術と気体冷凍
- 磁気冷凍の基礎
- 磁気冷凍機の構成と磁気冷凍材料
- 代表的な磁気冷凍材料
- **研究目的**
- 磁気構造と磁気エントロピー
- 磁気構造と熱吸収能力
- まとめ

研究目的

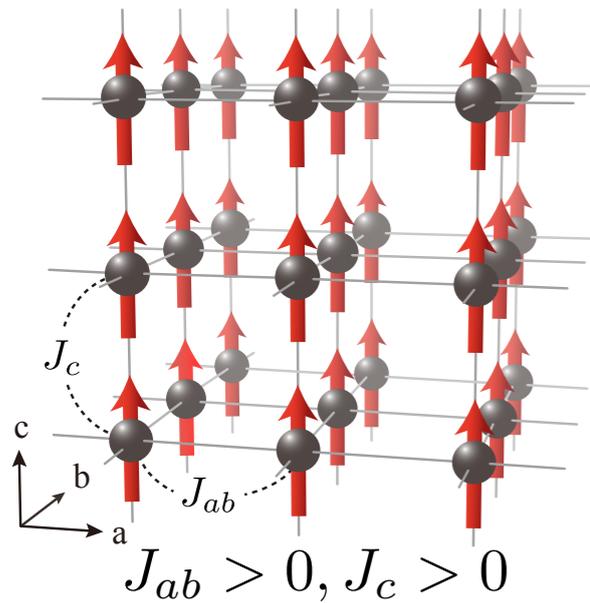
磁気構造

関係

磁気冷凍性能

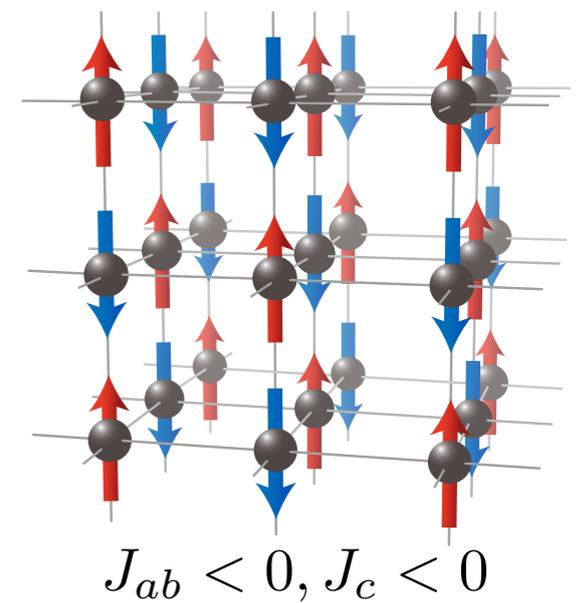
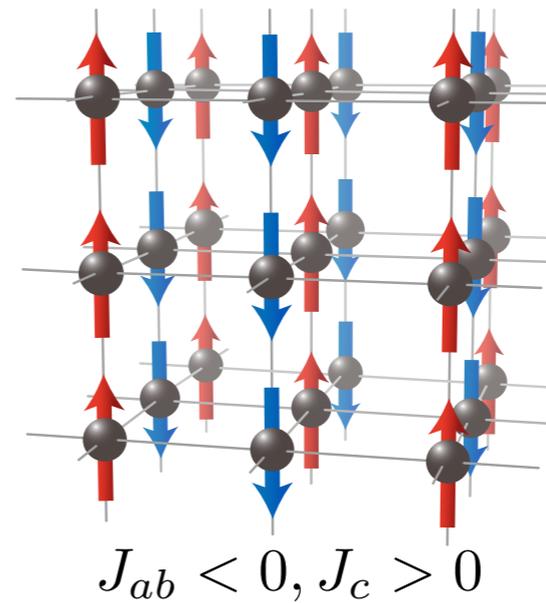
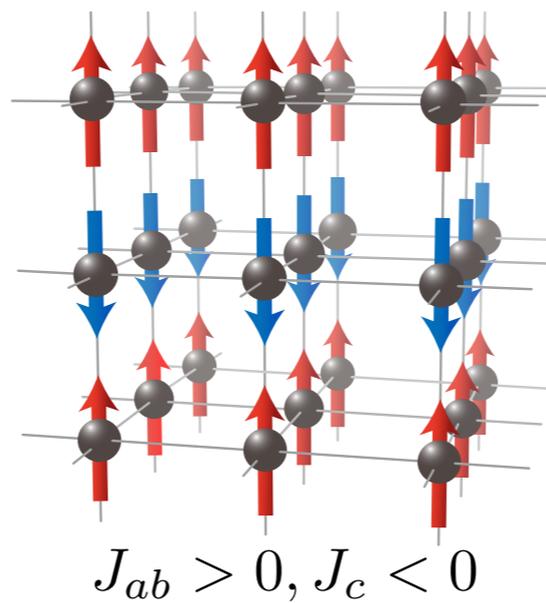
磁性模型を用いて微視的視点から探る。

強磁性秩序



VS.

反強磁性秩序



立方格子上的Ising模型

$$\mathcal{H} = -J_{ab} \sum_{\langle i,j \rangle_{ab}} s_i^z s_j^z - J_c \sum_{\langle i,j \rangle_c} s_i^z s_j^z - H \sum_i s_i^z$$

スピン変数： $s_i^z = \pm \frac{1}{2}$

立方格子サイト数： $N = L \times L \times L$

発表内容

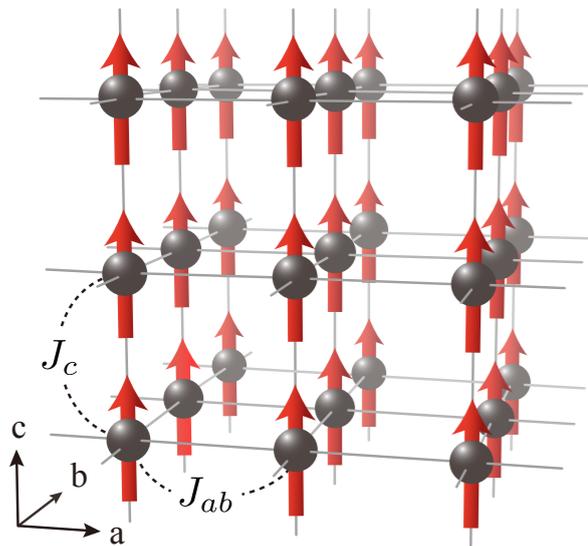
- 自己紹介
- 冷凍技術と気体冷凍
- 磁気冷凍の基礎
- 磁気冷凍機の構成と磁気冷凍材料
- 代表的な磁気冷凍材料
- 研究目的
- **磁気構造と磁気エントロピー**
- 磁気構造と熱吸収能力
- まとめ

磁気エントロピーの磁気構造依存性

$$\mathcal{H} = -J_{ab} \sum_{\langle i,j \rangle_{ab}} s_i^z s_j^z - J_c \sum_{\langle i,j \rangle_c} s_i^z s_j^z - H \sum_i s_i^z \quad s_i^z = \pm \frac{1}{2}$$

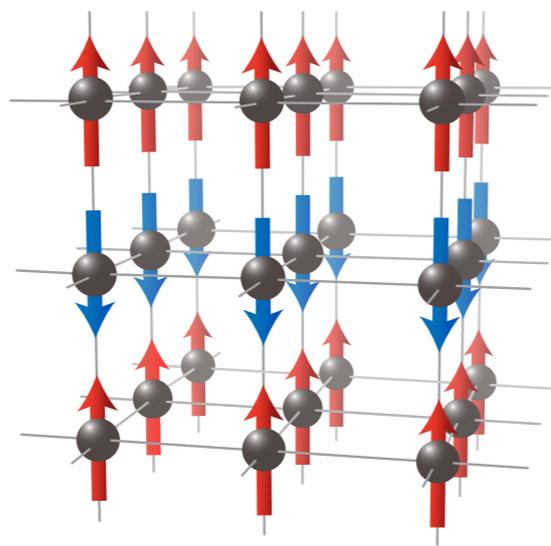
強磁性体

$$(J_{ab} > 0, J_c > 0)$$



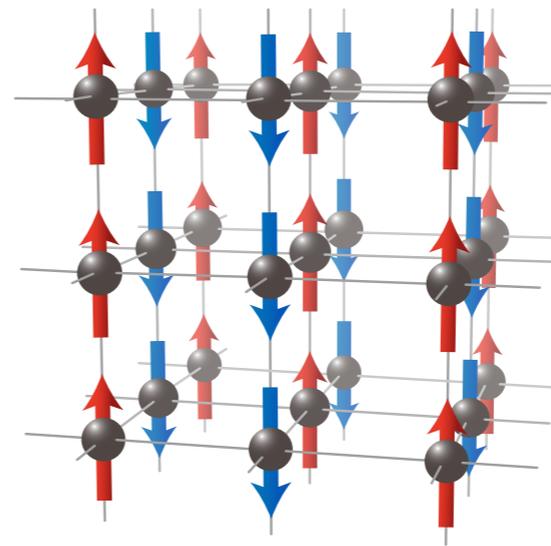
A型反強磁性体

$$(J_{ab} > 0, J_c < 0)$$



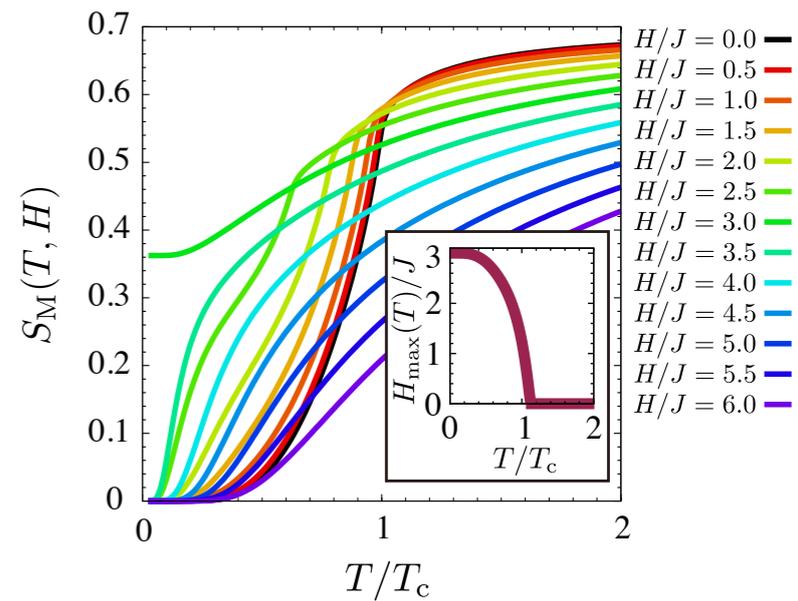
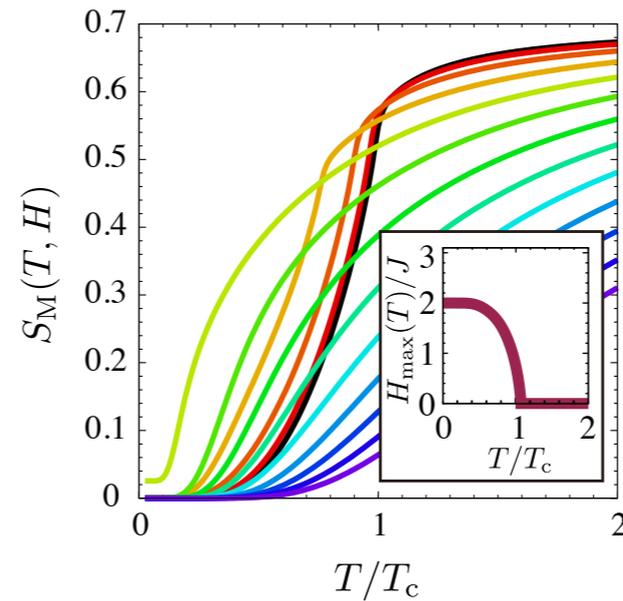
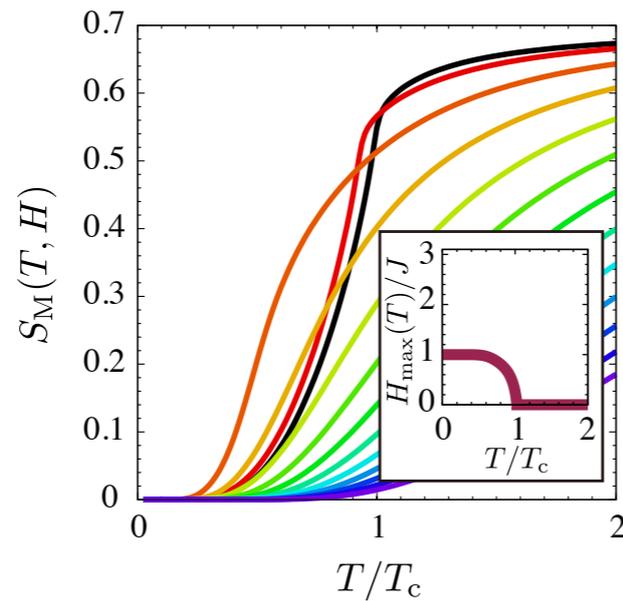
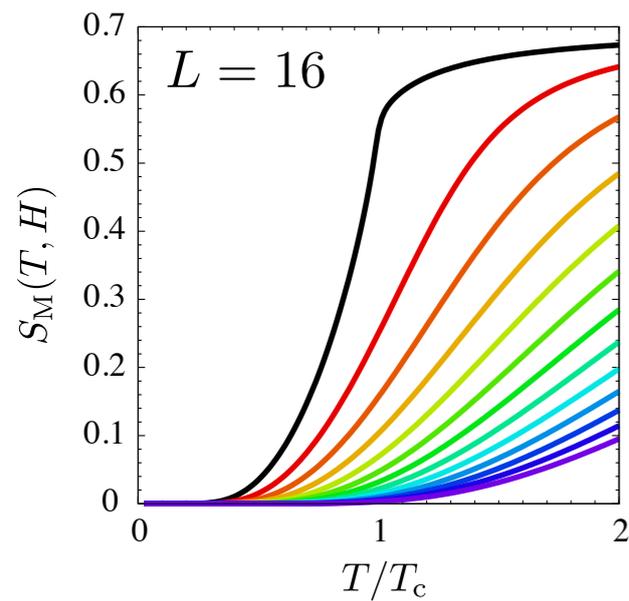
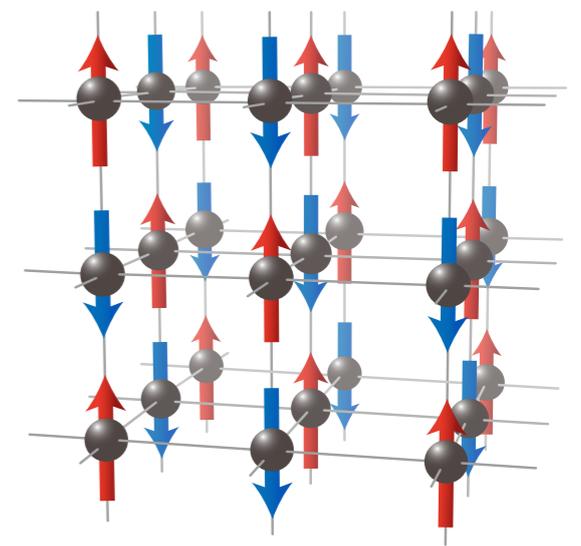
C型反強磁性体

$$(J_{ab} < 0, J_c > 0)$$



G型反強磁性体

$$(J_{ab} < 0, J_c < 0)$$

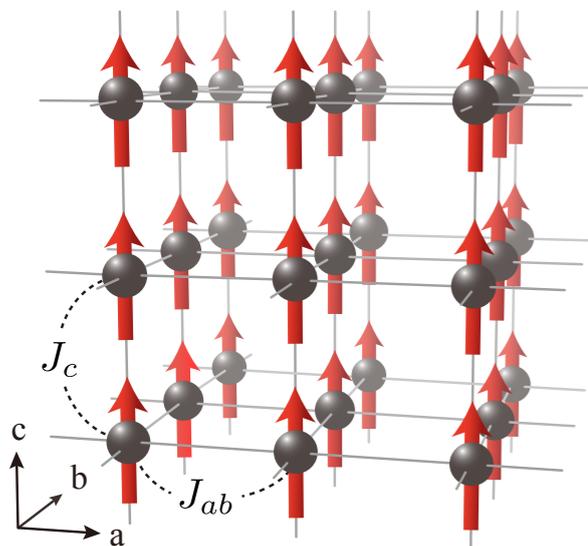


磁気エントロピーの磁気構造依存性

$$\mathcal{H} = -J_{ab} \sum_{\langle i,j \rangle_{ab}} s_i^z s_j^z - J_c \sum_{\langle i,j \rangle_c} s_i^z s_j^z - H \sum_i s_i^z \quad s_i^z = \pm \frac{1}{2}$$

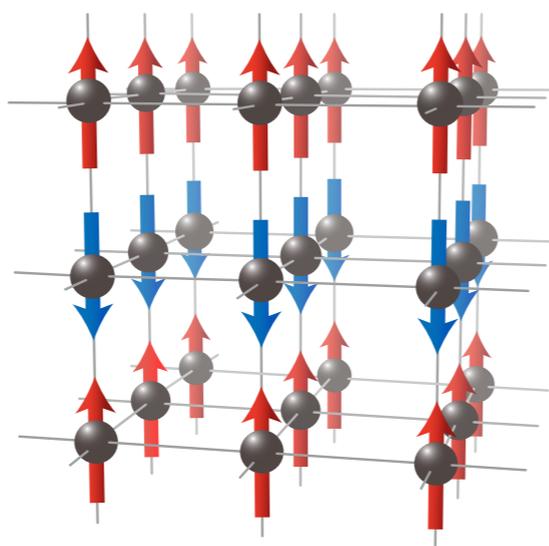
強磁性体

$$(J_{ab} > 0, J_c > 0)$$



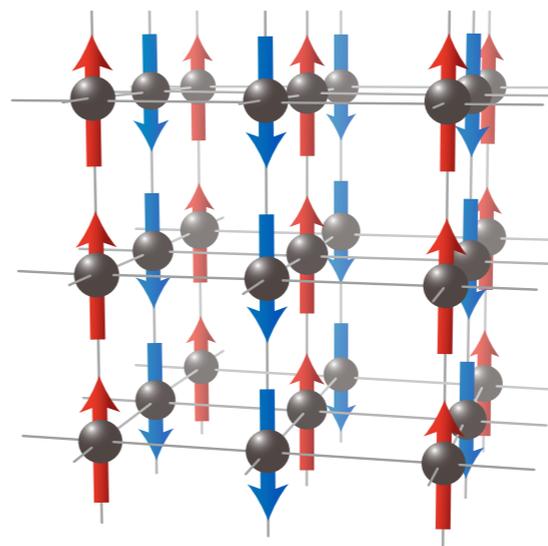
A型反強磁性体

$$(J_{ab} > 0, J_c < 0)$$



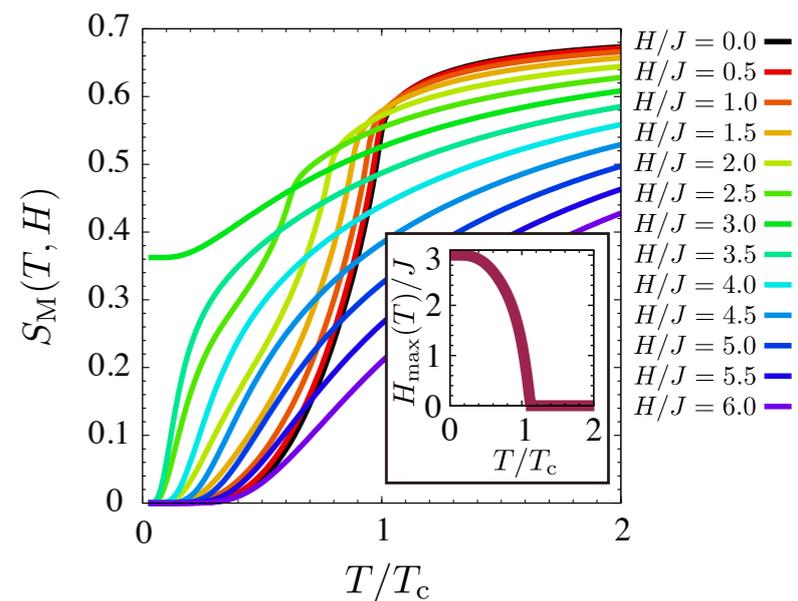
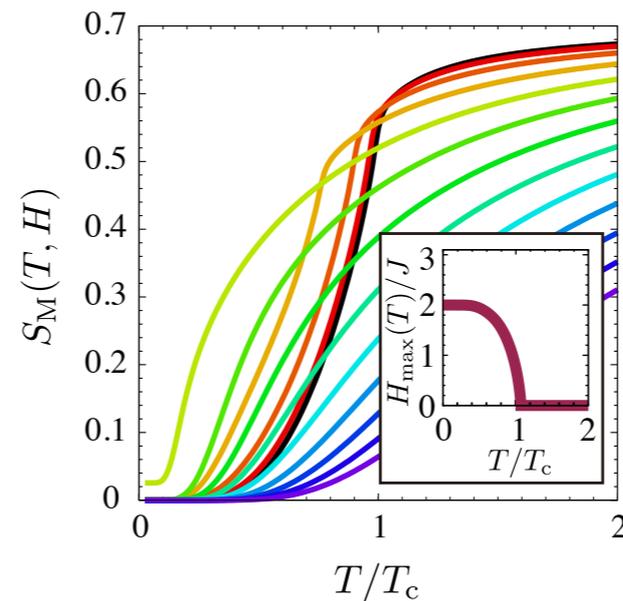
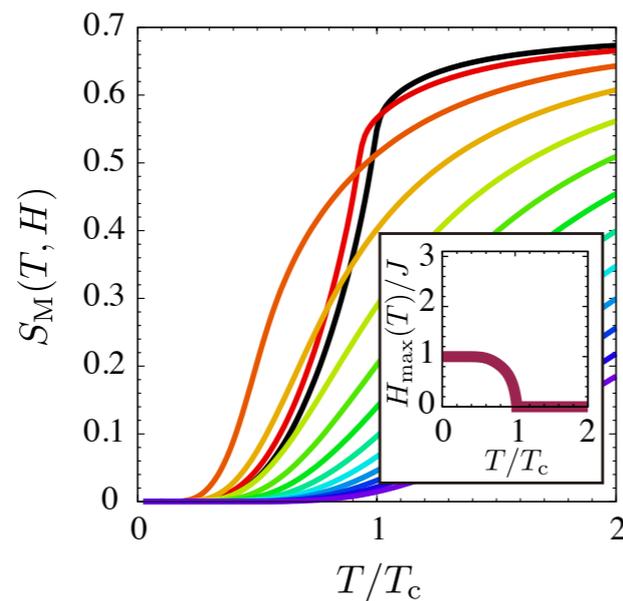
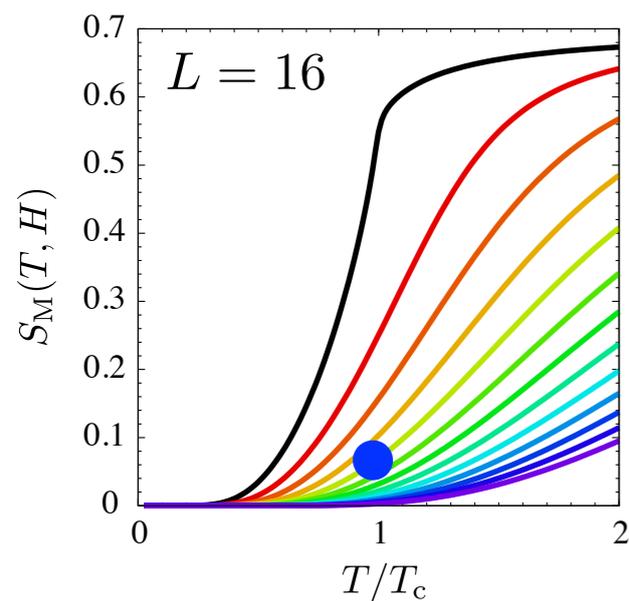
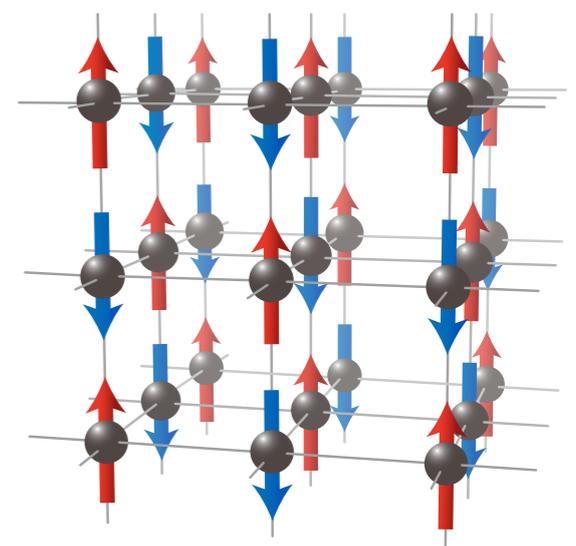
C型反強磁性体

$$(J_{ab} < 0, J_c > 0)$$



G型反強磁性体

$$(J_{ab} < 0, J_c < 0)$$

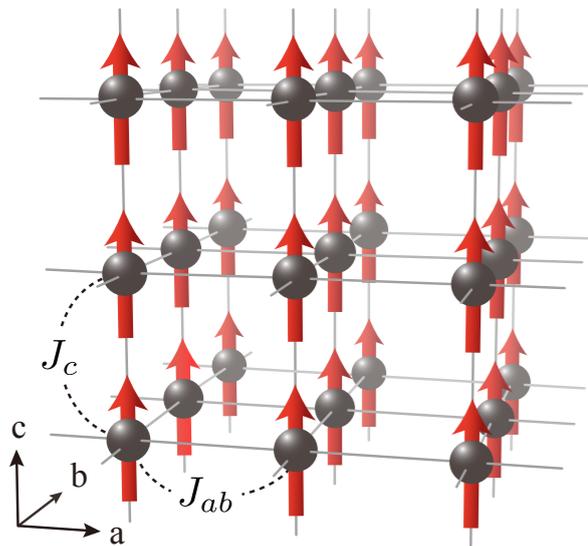


磁気エントロピーの磁気構造依存性

$$\mathcal{H} = -J_{ab} \sum_{\langle i,j \rangle_{ab}} s_i^z s_j^z - J_c \sum_{\langle i,j \rangle_c} s_i^z s_j^z - H \sum_i s_i^z \quad s_i^z = \pm \frac{1}{2}$$

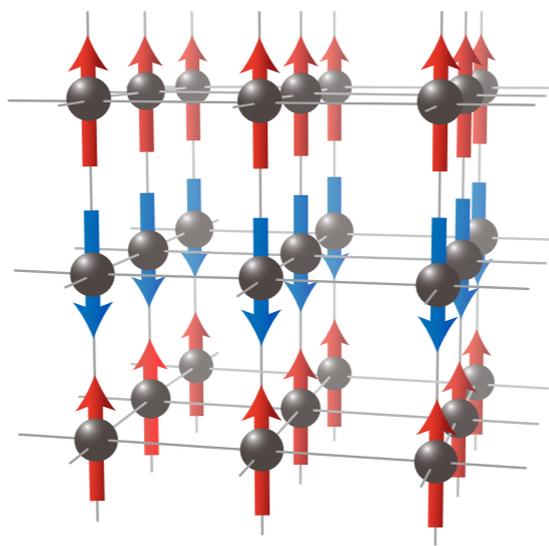
強磁性体

$$(J_{ab} > 0, J_c > 0)$$



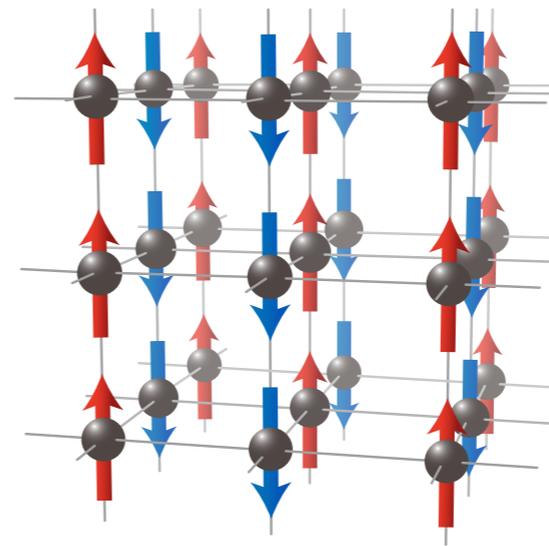
A型反強磁性体

$$(J_{ab} > 0, J_c < 0)$$



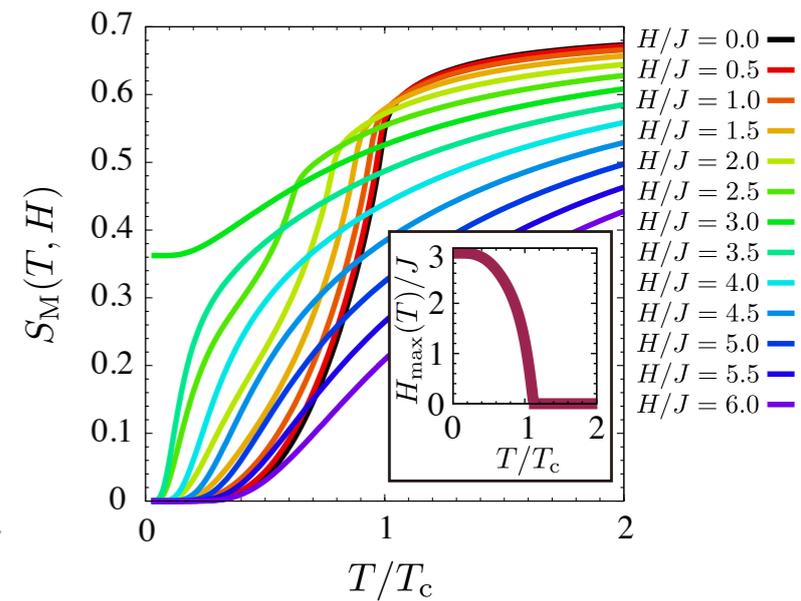
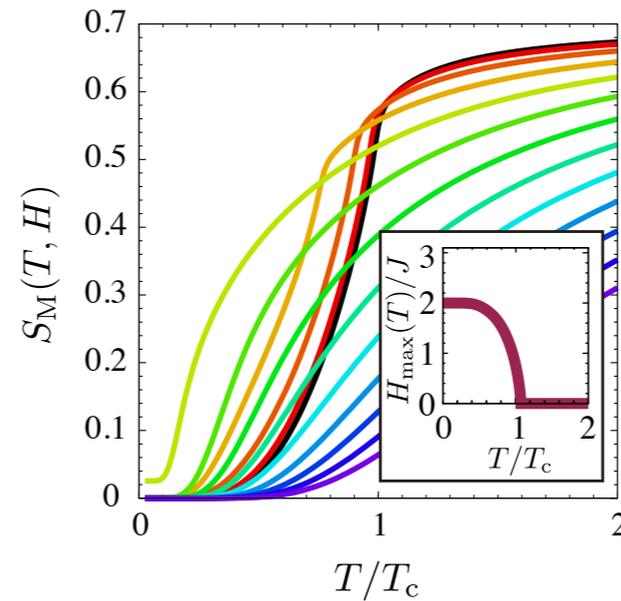
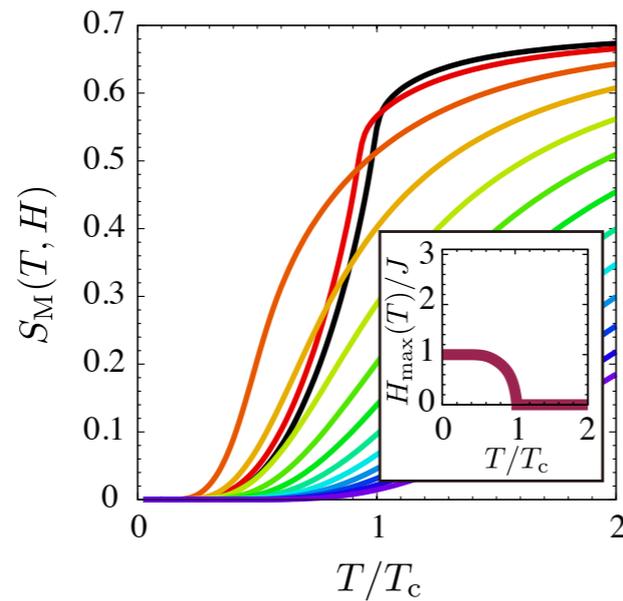
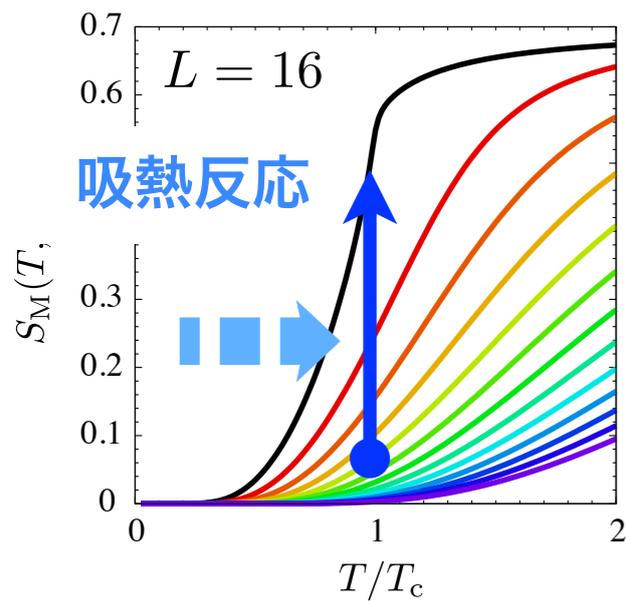
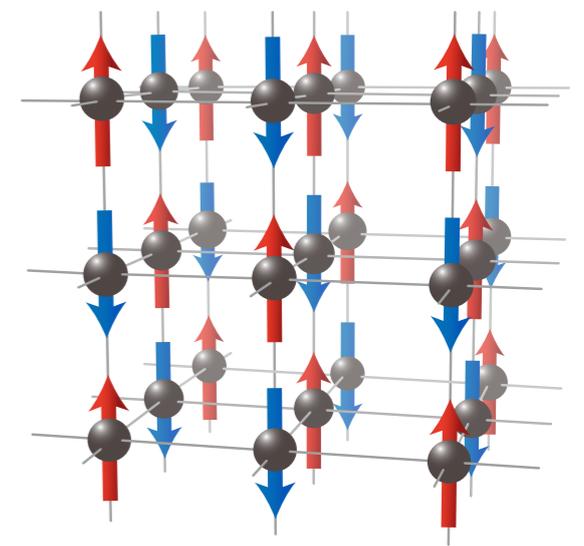
C型反強磁性体

$$(J_{ab} < 0, J_c > 0)$$



G型反強磁性体

$$(J_{ab} < 0, J_c < 0)$$

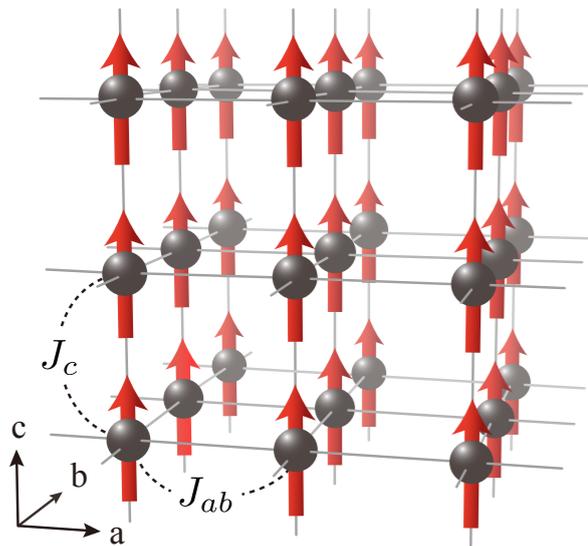


磁気エントロピーの磁気構造依存性

$$\mathcal{H} = -J_{ab} \sum_{\langle i,j \rangle_{ab}} s_i^z s_j^z - J_c \sum_{\langle i,j \rangle_c} s_i^z s_j^z - H \sum_i s_i^z \quad s_i^z = \pm \frac{1}{2}$$

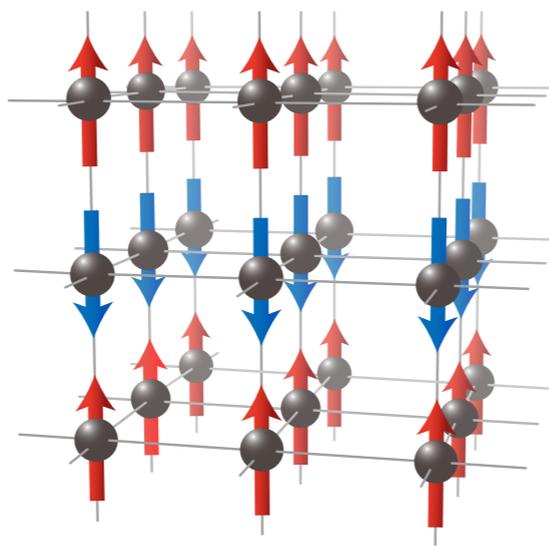
強磁性体

$$(J_{ab} > 0, J_c > 0)$$



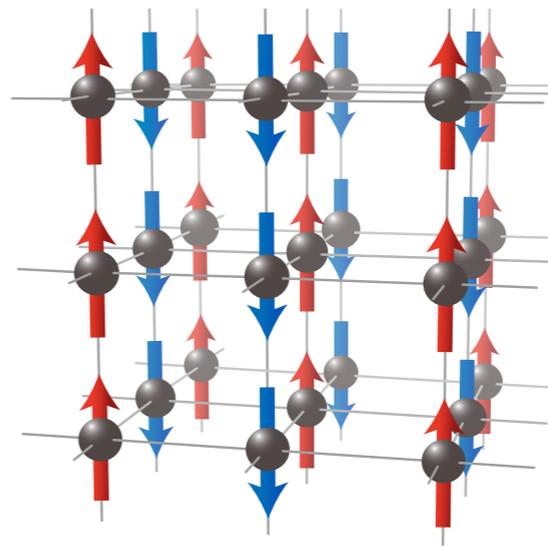
A型反強磁性体

$$(J_{ab} > 0, J_c < 0)$$



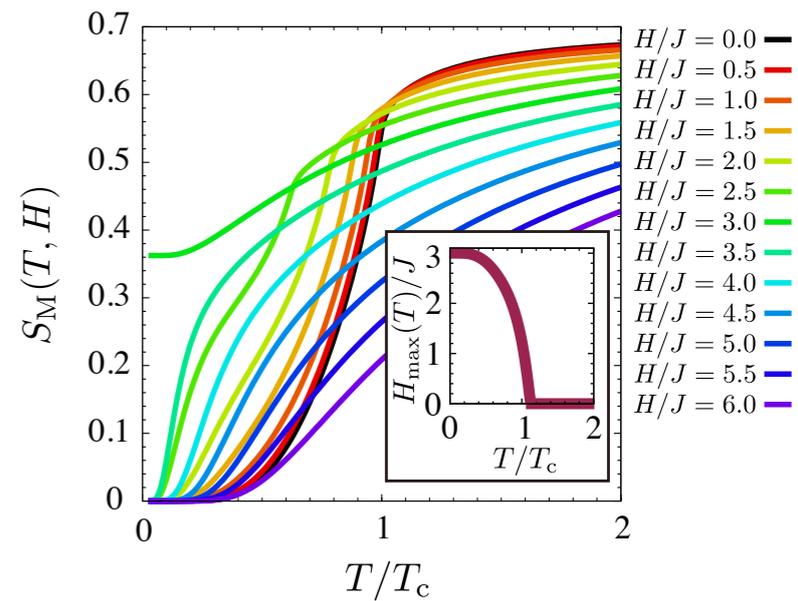
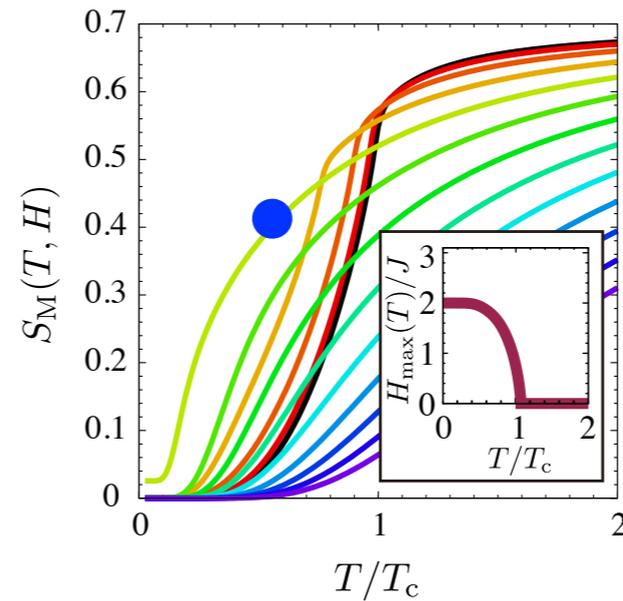
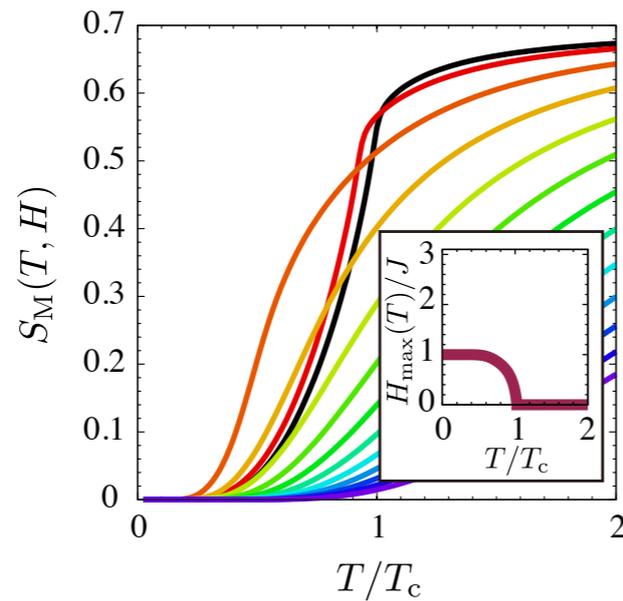
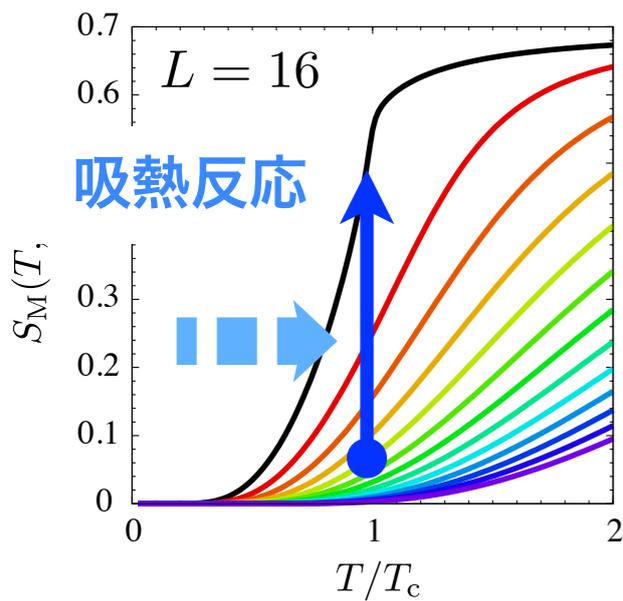
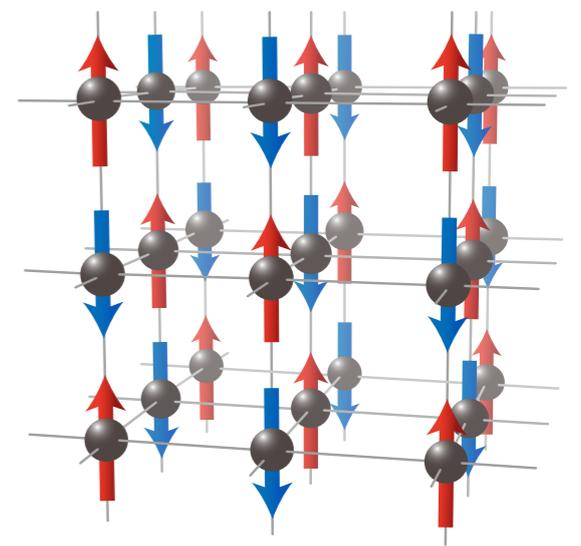
C型反強磁性体

$$(J_{ab} < 0, J_c > 0)$$



G型反強磁性体

$$(J_{ab} < 0, J_c < 0)$$

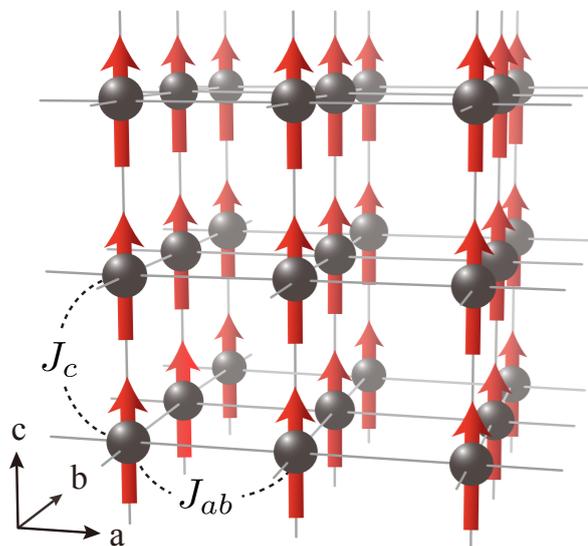


磁気エントロピーの磁気構造依存性

$$\mathcal{H} = -J_{ab} \sum_{\langle i,j \rangle_{ab}} s_i^z s_j^z - J_c \sum_{\langle i,j \rangle_c} s_i^z s_j^z - H \sum_i s_i^z \quad s_i^z = \pm \frac{1}{2}$$

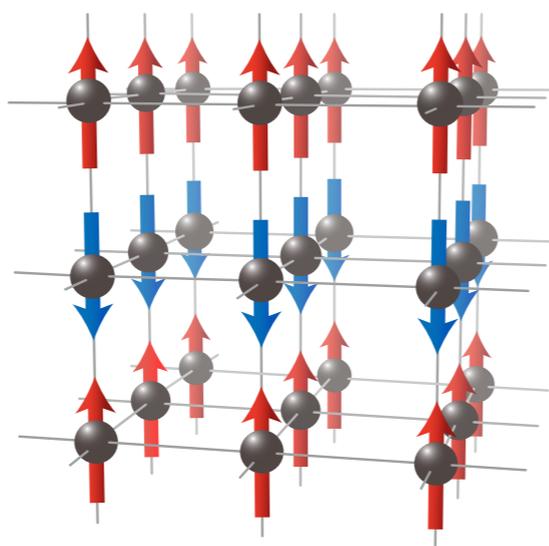
強磁性体

$$(J_{ab} > 0, J_c > 0)$$



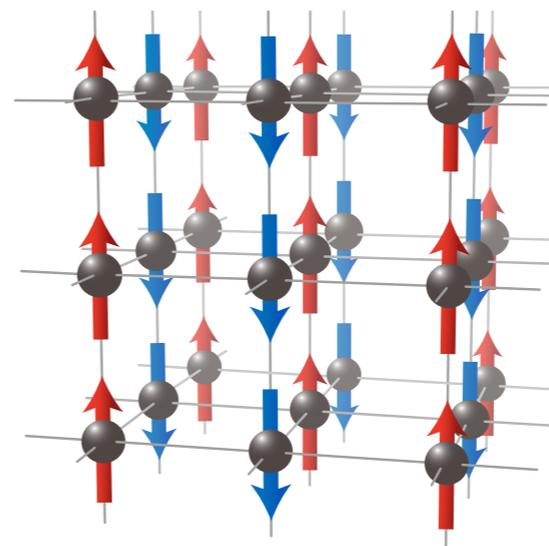
A型反強磁性体

$$(J_{ab} > 0, J_c < 0)$$



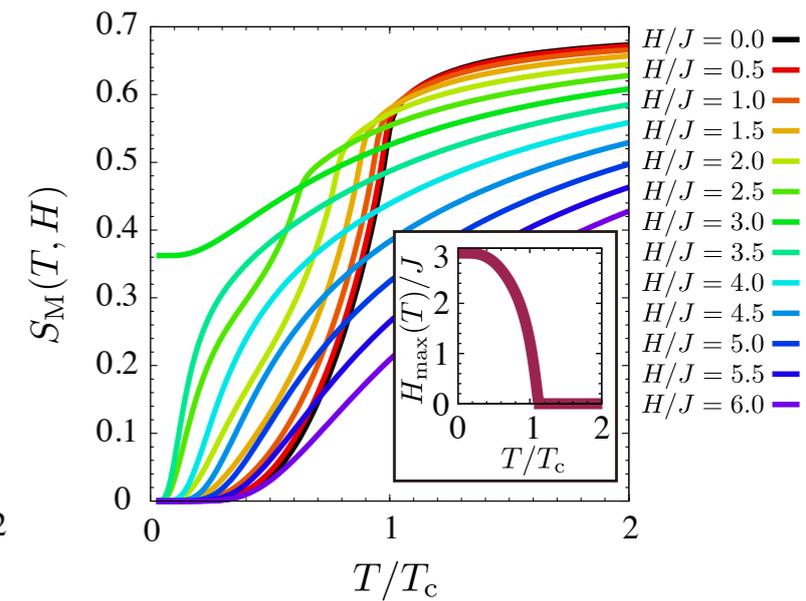
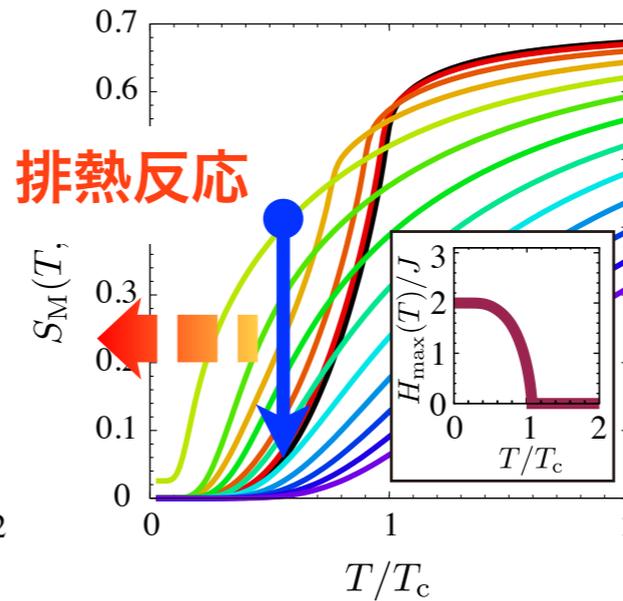
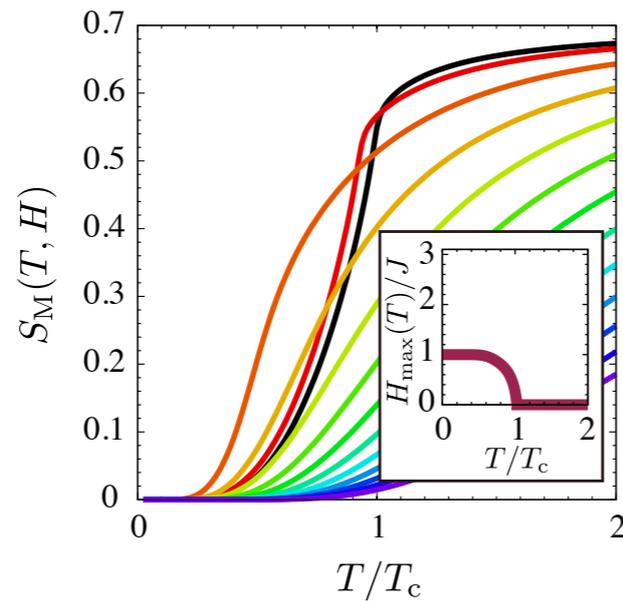
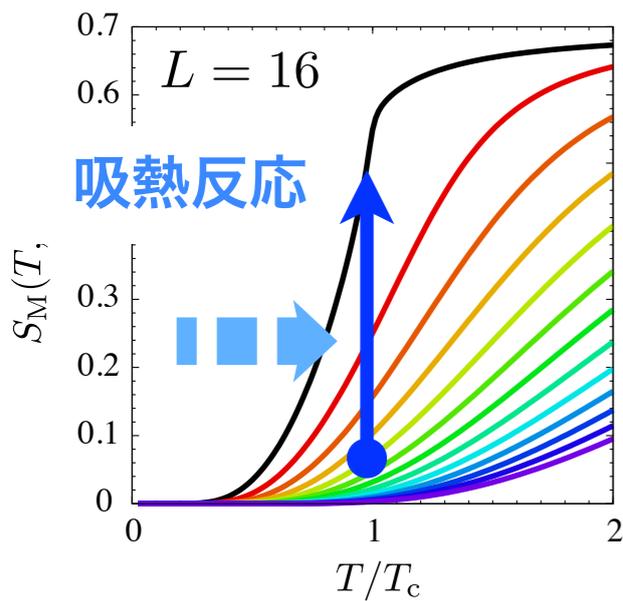
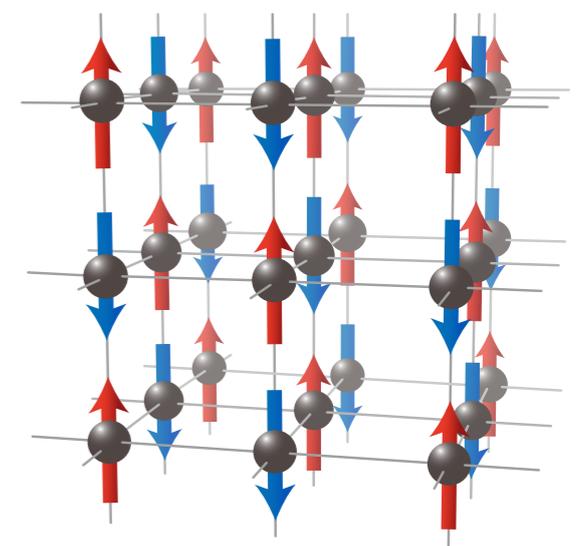
C型反強磁性体

$$(J_{ab} < 0, J_c > 0)$$



G型反強磁性体

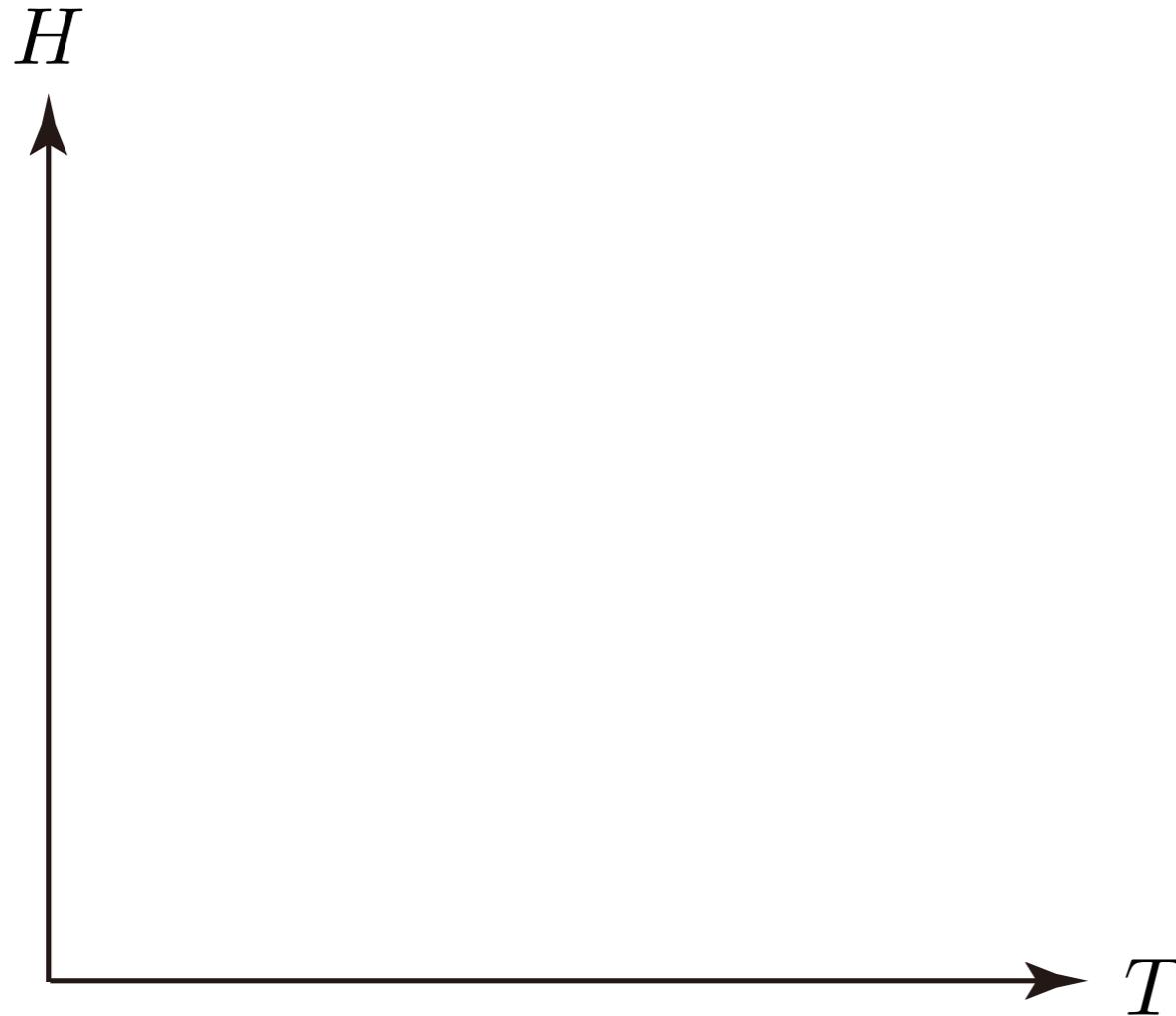
$$(J_{ab} < 0, J_c < 0)$$



磁気エントロピー変化(等温過程)の最大化

強磁性体 (従来手順)

$$H \rightarrow 0$$

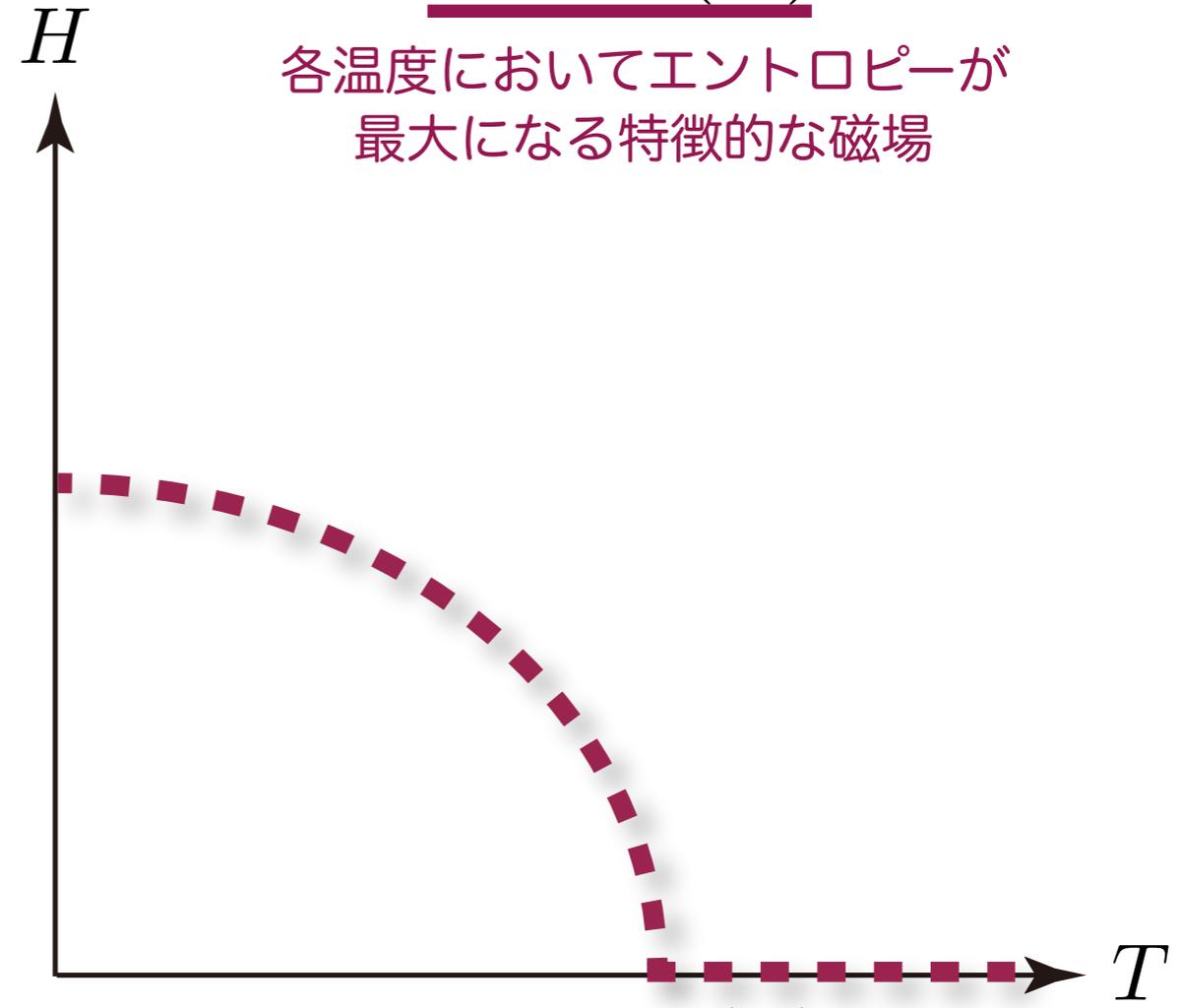


強磁性体の場合、常にゼロ磁場でエントロピーが最大

反強磁性体 (提案手順)

$$H \rightarrow \underline{H_{\max}(T)}$$

各温度においてエントロピーが最大になる特徴的な磁場



$$H_{\max}(T)$$

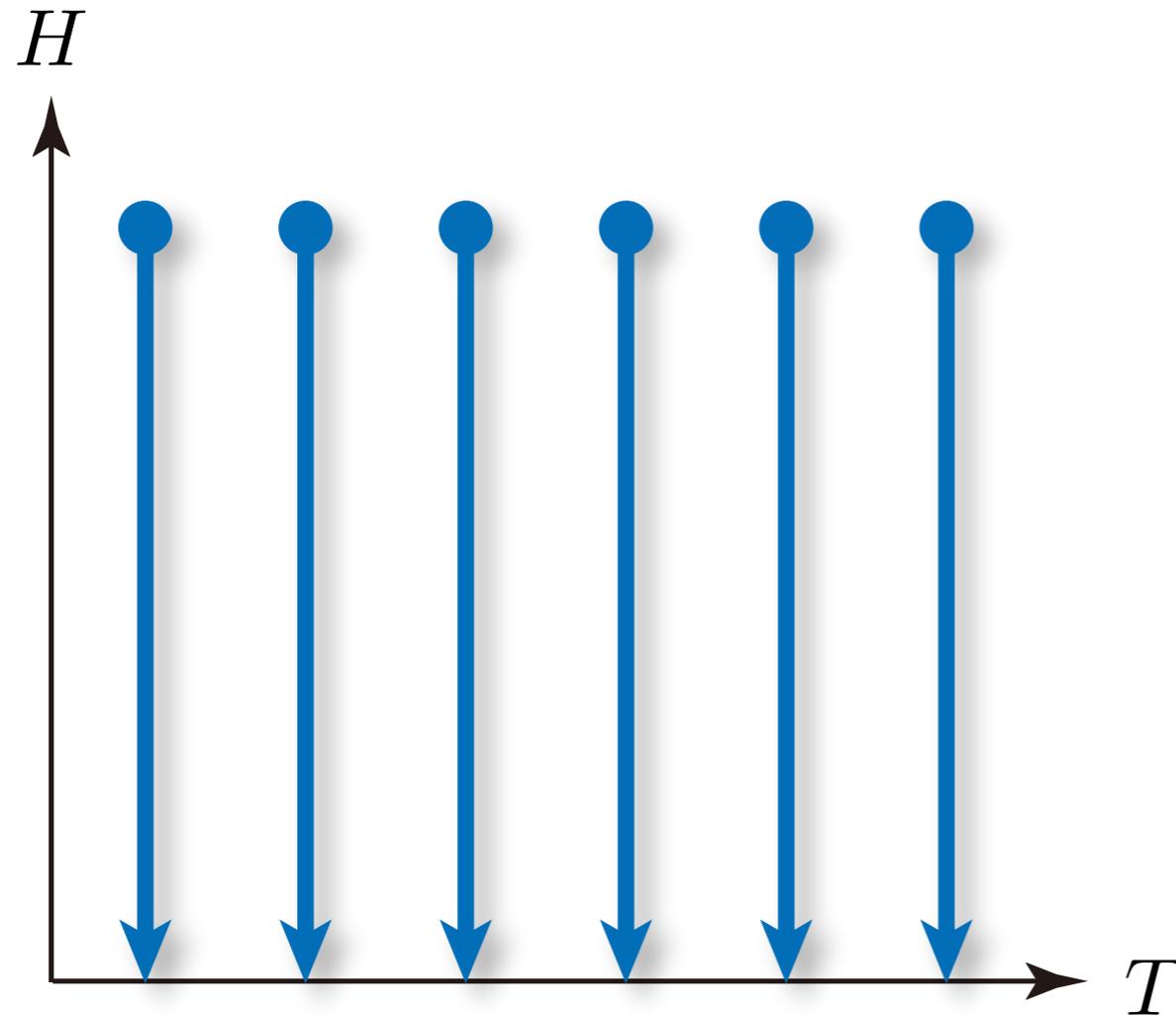
R. Tamura, T. Ohno, and H. Kitazawa,
Appl. Phys. Lett. **104**, 052415 (2014).

報道：科学新聞(2014年3月28日2面), 化学工業日報(2014年3月19日8面),
マイナビニュース, Yano E plus, NIMSプレスリリース

磁気エントロピー変化(等温過程)の最大化

強磁性体 (従来手順)

$$H \rightarrow 0$$

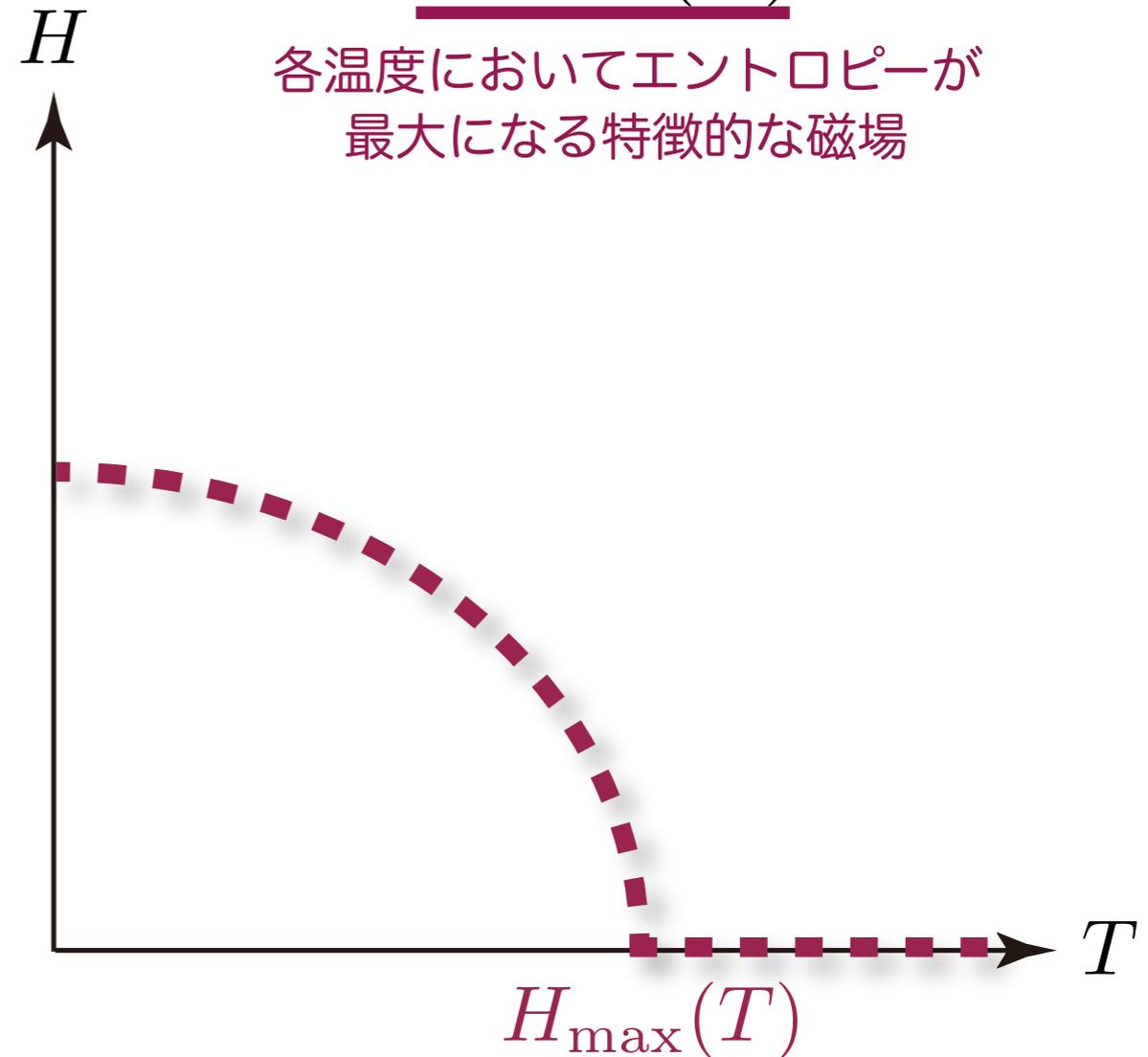


強磁性体の場合、常にゼロ磁場で
エントロピーが最大

反強磁性体 (提案手順)

$$H \rightarrow \underline{H_{\max}(T)}$$

各温度においてエントロピーが
最大になる特徴的な磁場



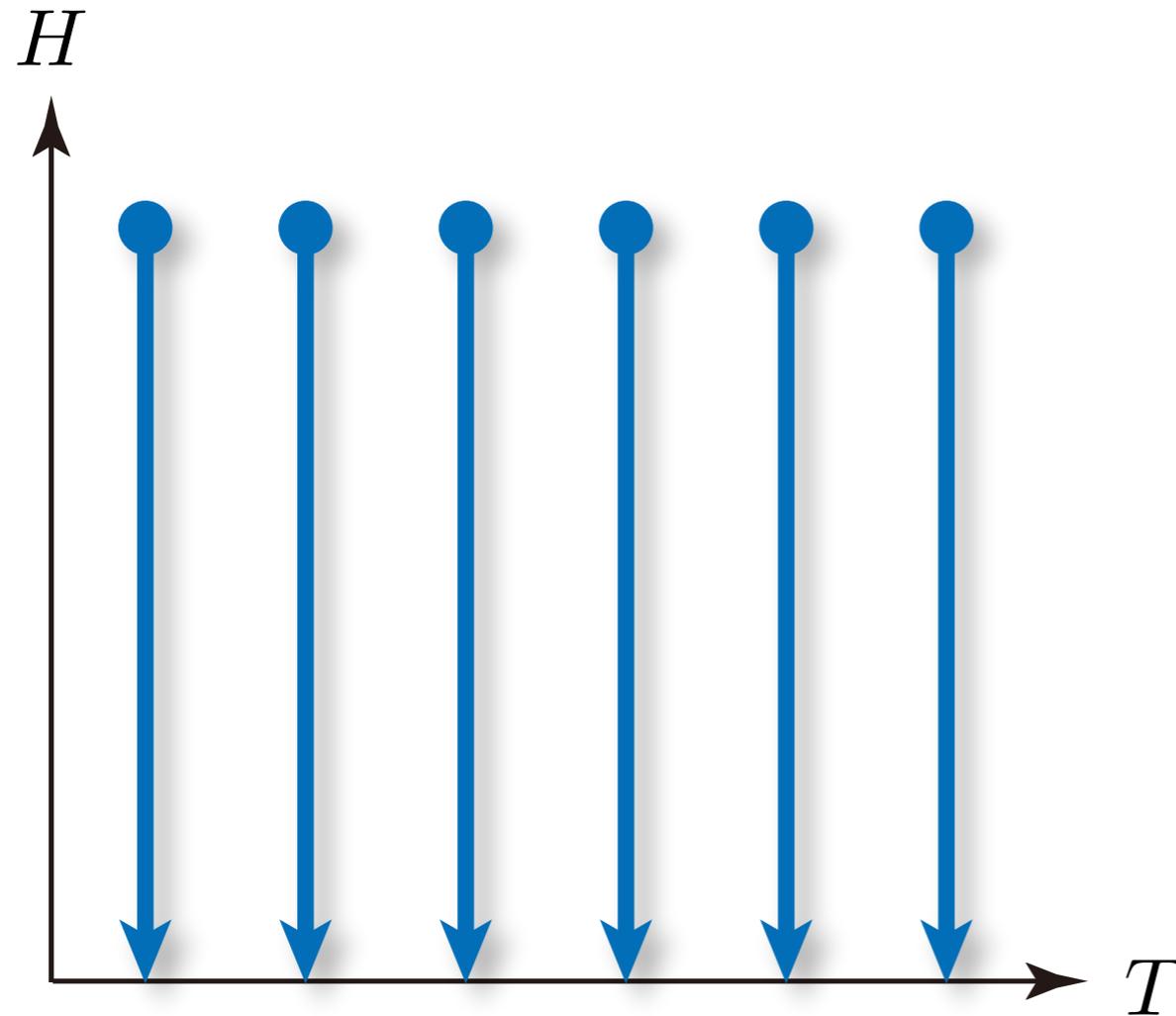
R. Tamura, T. Ohno, and H. Kitazawa,
Appl. Phys. Lett. **104**, 052415 (2014).

報道：科学新聞(2014年3月28日2面), 化学工業日報(2014年3月19日8面),
マイナビニュース, Yano E plus, NIMSプレスリリース

磁気エントロピー変化(等温過程)の最大化

強磁性体 (従来手順)

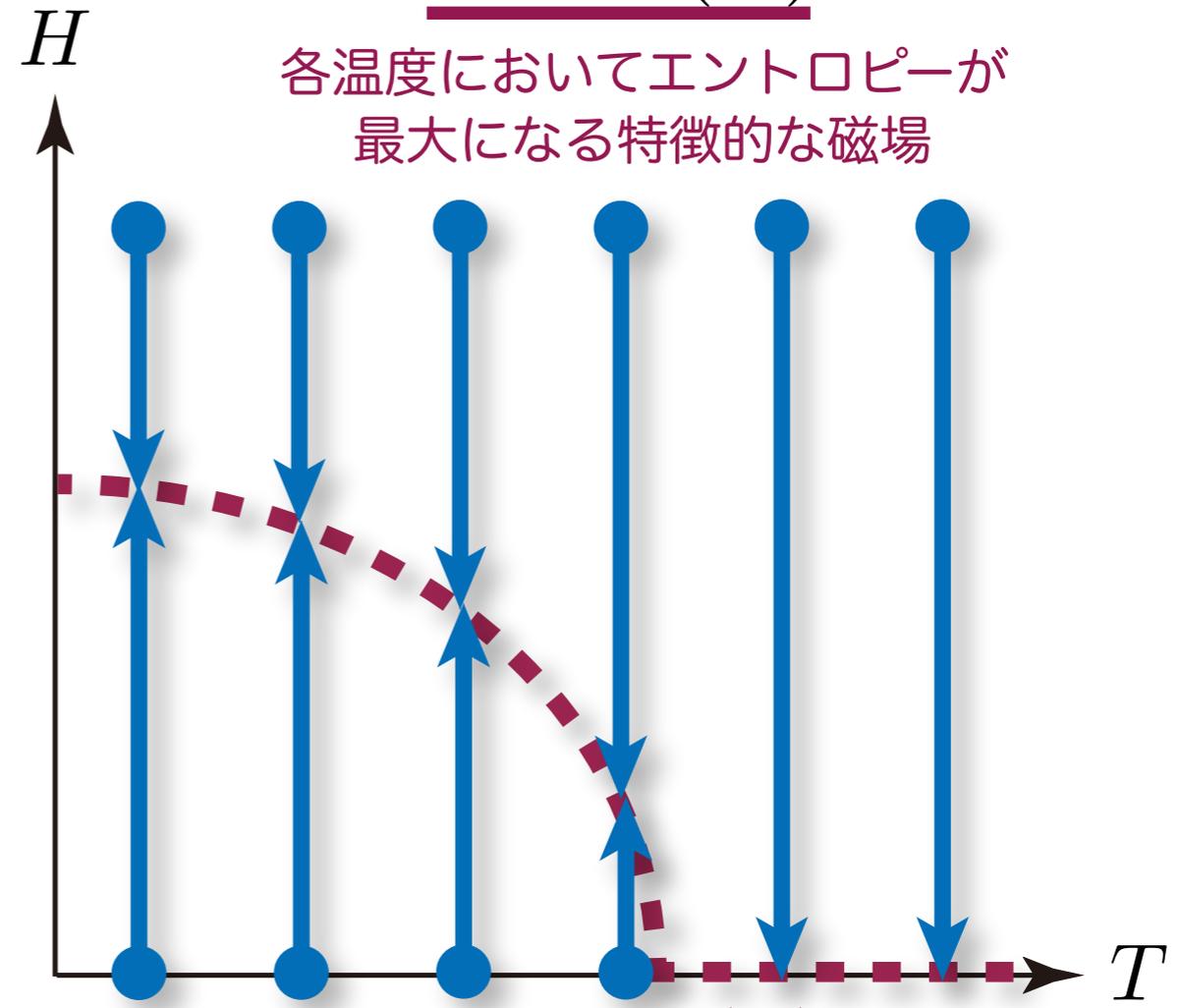
$$H \rightarrow 0$$



強磁性体の場合、常にゼロ磁場で
エントロピーが最大

反強磁性体 (提案手順)

$$H \rightarrow \underline{H_{\max}(T)}$$



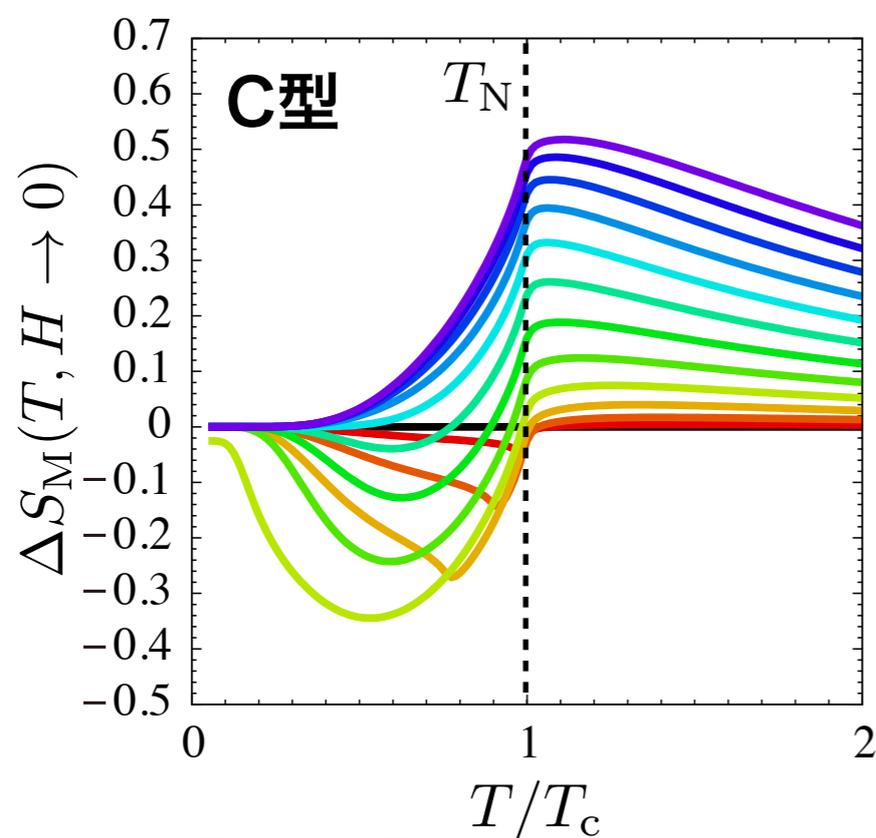
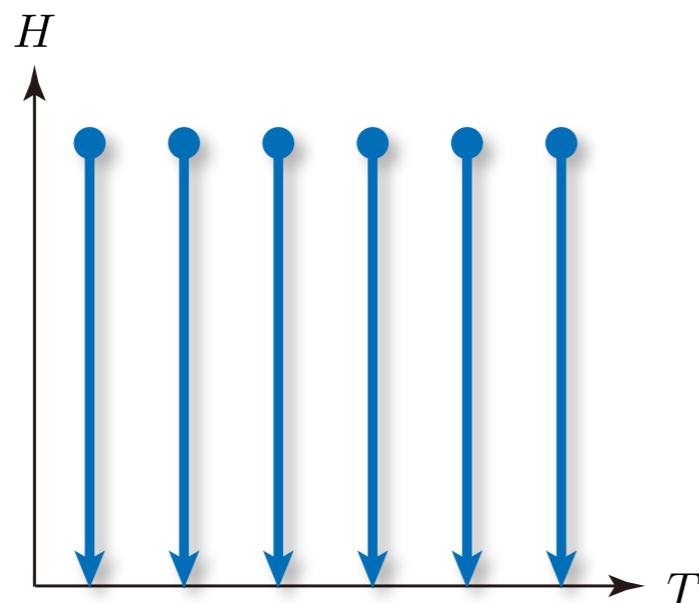
$$H_{\max}(T)$$

R. Tamura, T. Ohno, and H. Kitazawa,
Appl. Phys. Lett. **104**, 052415 (2014).

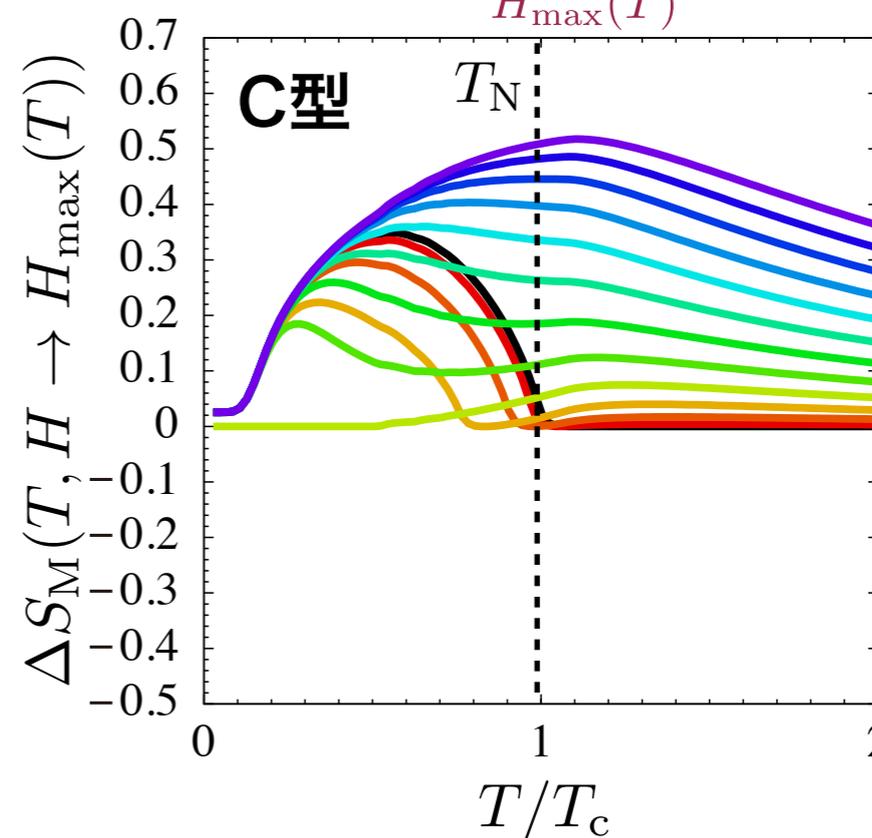
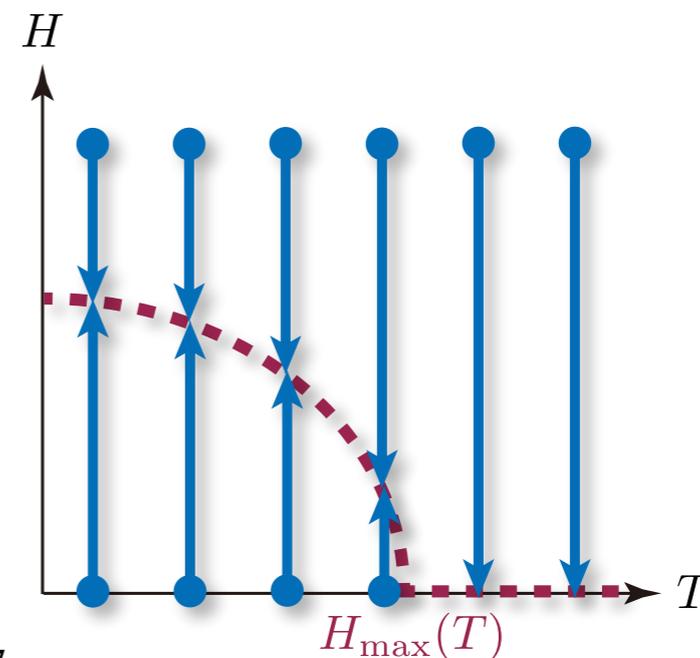
報道：科学新聞(2014年3月28日2面), 化学工業日報(2014年3月19日8面),
マイナビニュース, Yano E plus, NIMSプレスリリース

反強磁性体の磁気エントロピー変化(等温過程)

従来手順 $H \rightarrow 0$



提案手順 $H \rightarrow H_{\max}(T)$



磁気エントロピー変化 ΔS_M (等温過程)

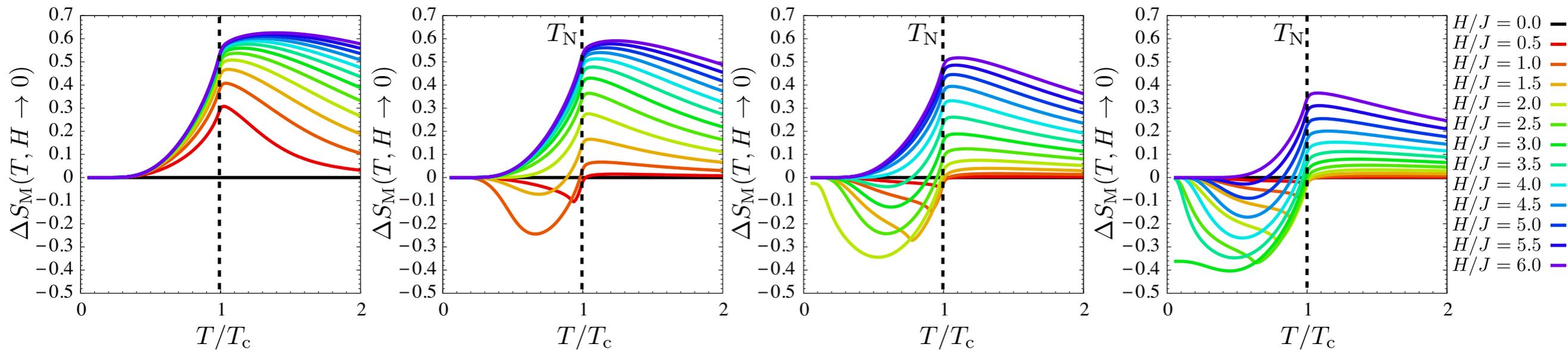
強磁性体

A型反強磁性体

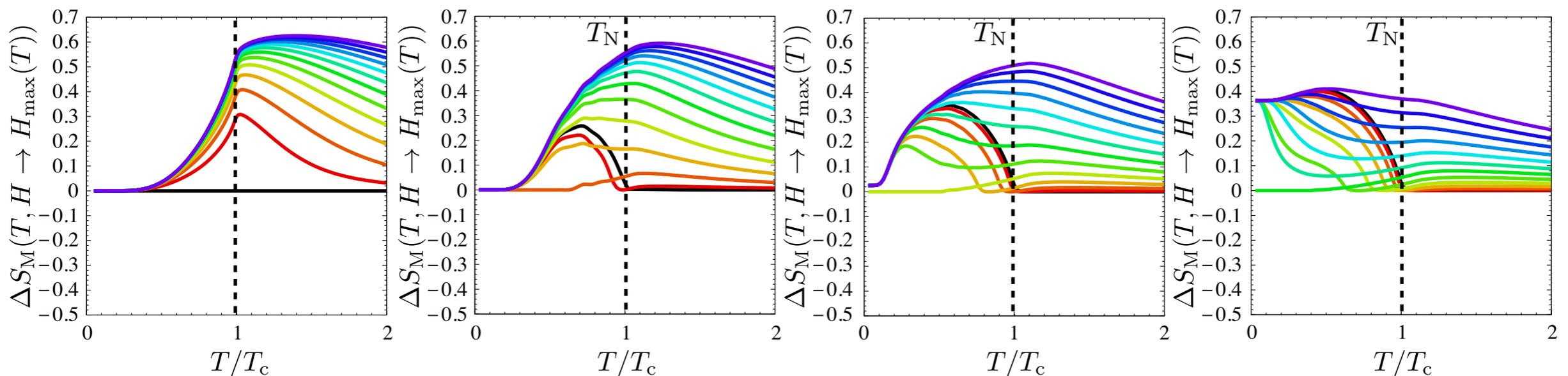
C型反強磁性体

G型反強磁性体

従来手順 ($H \rightarrow 0$)



提案手順 ($H \rightarrow H_{\max}(T)$)



提案手順を用いる事で、大きな磁気エントロピー変化(等温過程)が得られる。

断熱温度変化 ΔT_{ad} (断熱過程)

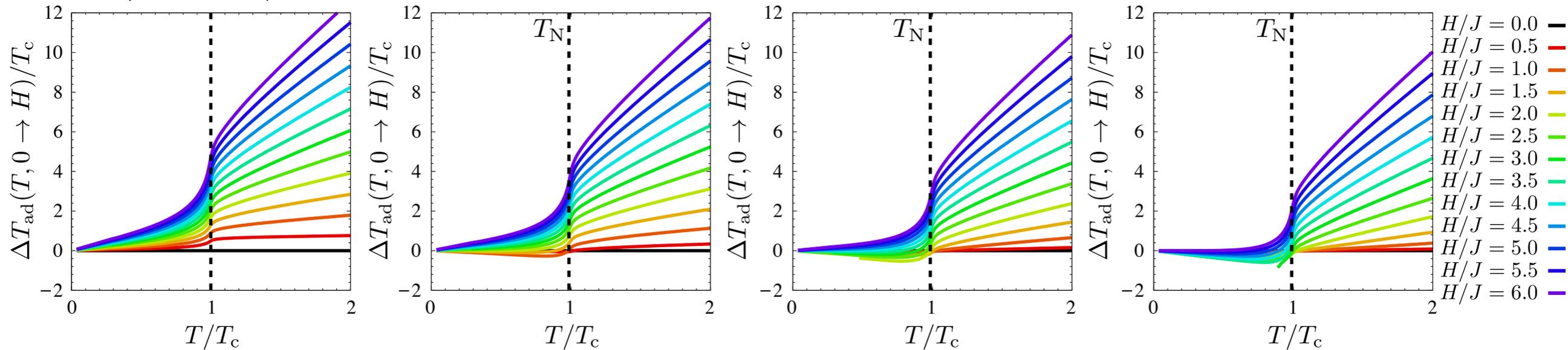
強磁性体

A型反強磁性体

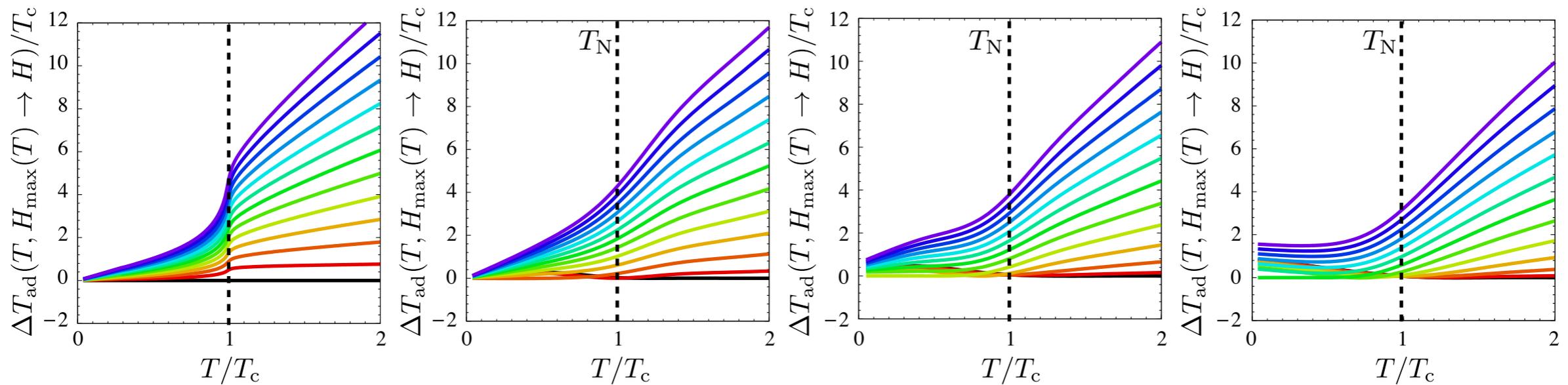
C型反強磁性体

G型反強磁性体

従来手順 ($H \rightarrow 0$)



提案手順 ($H \rightarrow H_{max}(T)$)



提案手順を用いる事で、反強磁性体ではNéel温度以下で
大きな温度変化 (断熱過程) が得られる。

発表内容

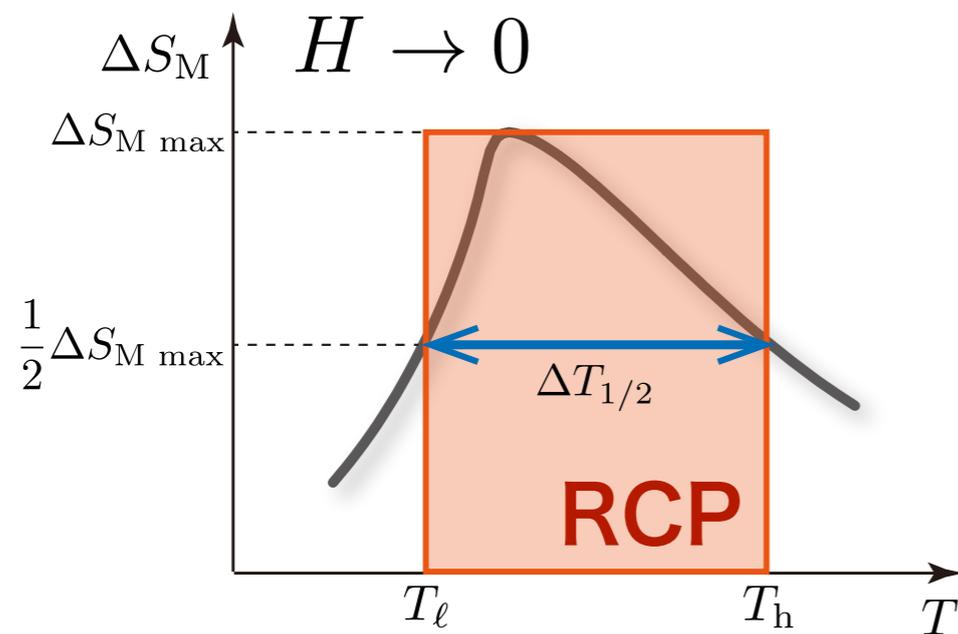
- 自己紹介
- 冷凍技術と気体冷凍
- 磁気冷凍の基礎
- 磁気冷凍機の構成と磁気冷凍材料
- 代表的な磁気冷凍材料
- 研究目的
- 磁気構造と磁気エントロピー
- **磁気構造と熱吸収能力**
- まとめ

熱吸収能力の計算(RCP)

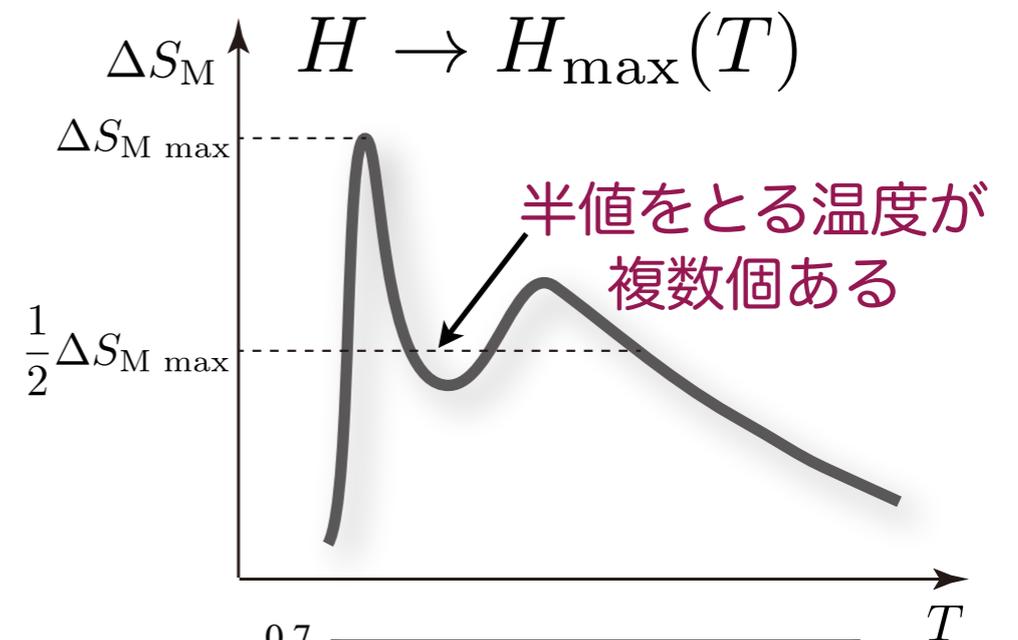
$$\text{RCP} = \Delta S_{\text{M max}} \times \Delta T_{1/2} \simeq \frac{4}{3} q$$

磁気エントロピー変化の特徴

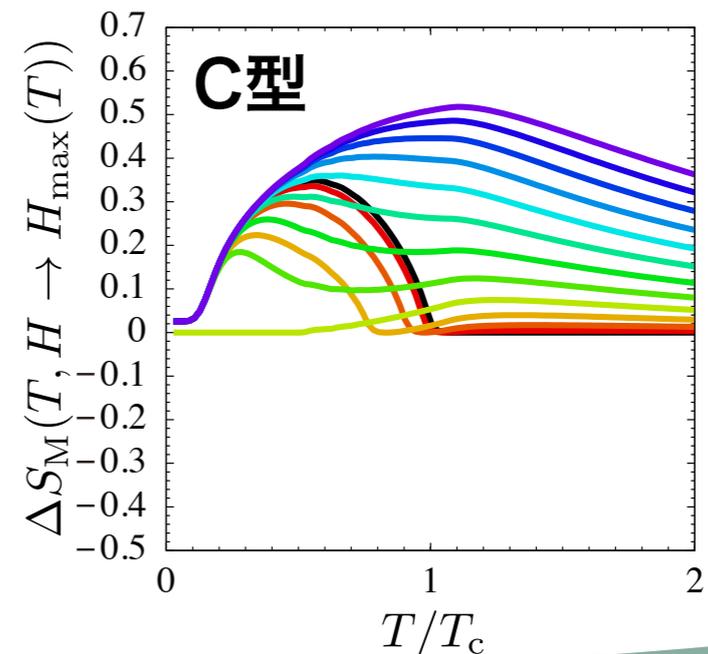
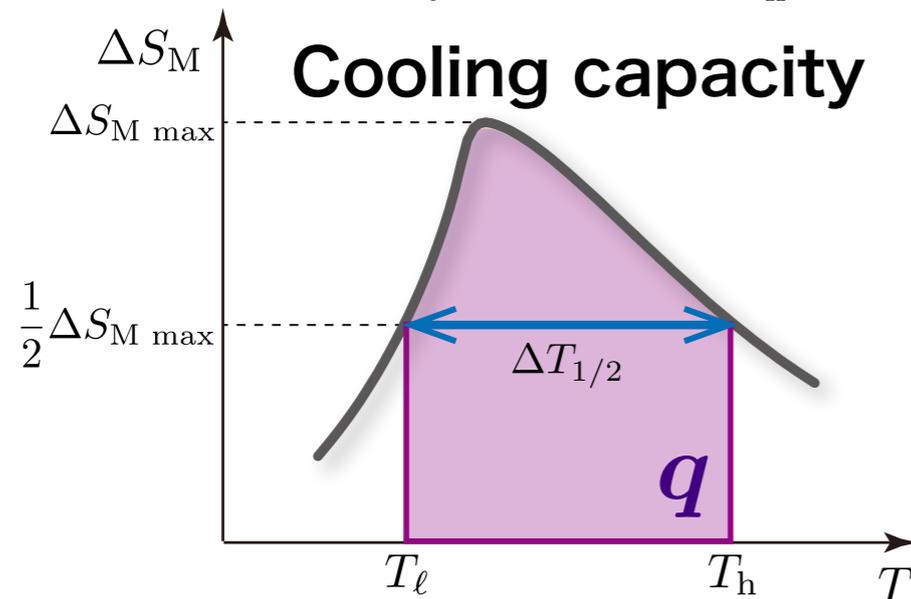
強磁性体



反強磁性体



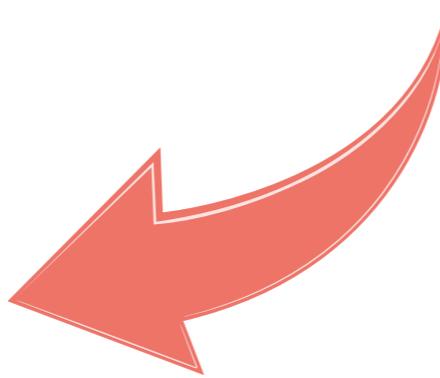
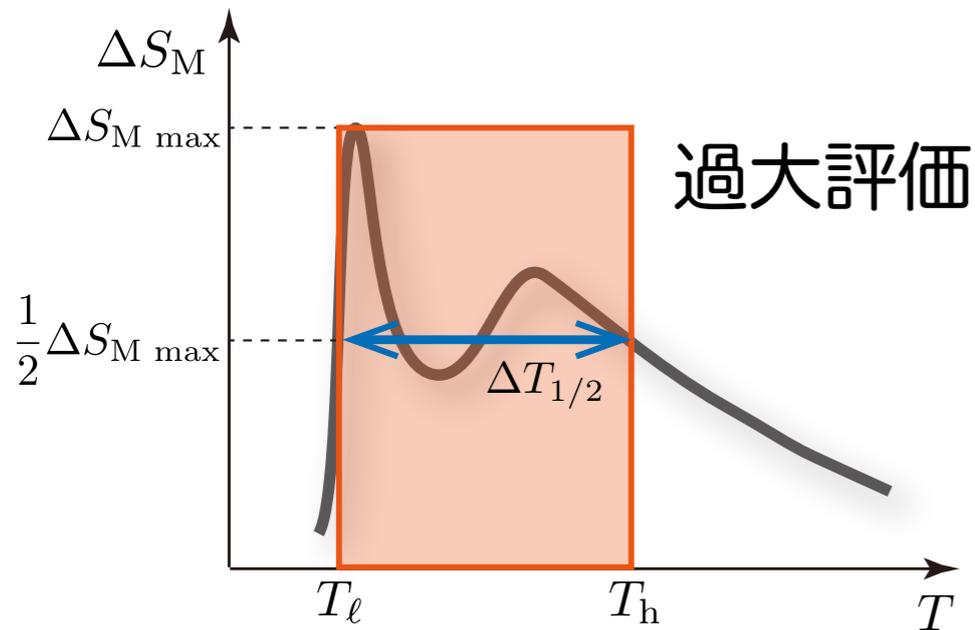
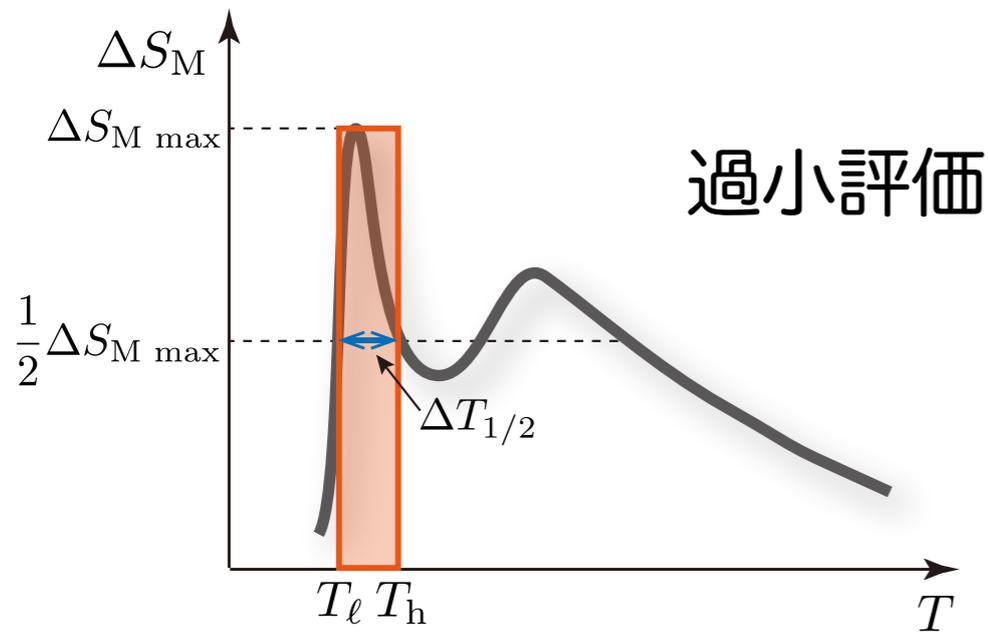
Cooling capacity



熱吸収能力の計算(RCP)

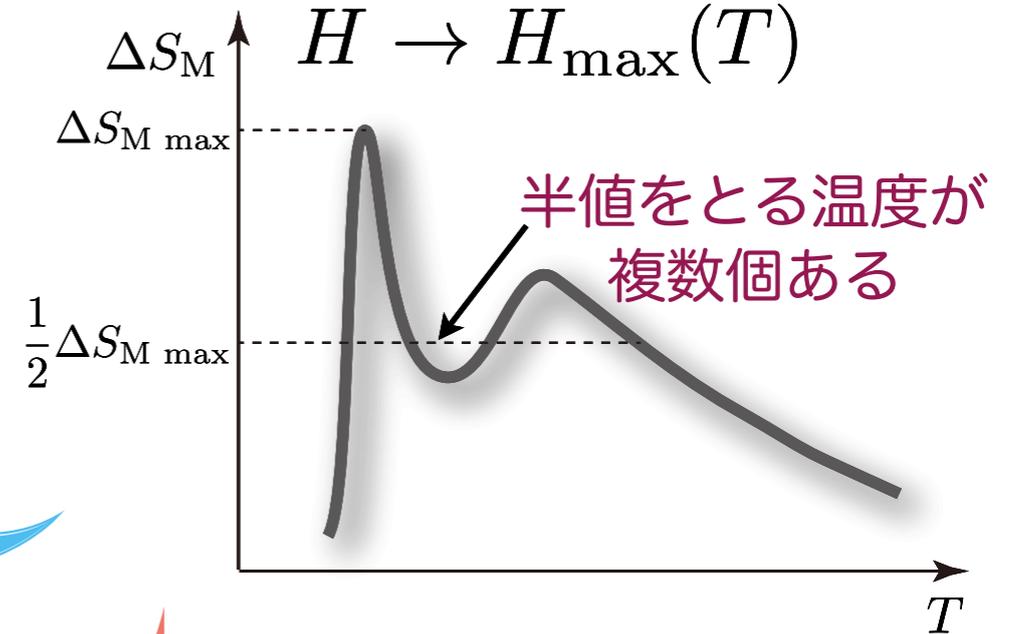
$$\text{RCP} = \Delta S_{\text{M max}} \times \Delta T_{1/2} \simeq \frac{4}{3}q$$

RCPを用いて反強磁性体の熱吸収能力を評価



反強磁性体

$H \rightarrow H_{\text{max}}(T)$



反強磁性体の熱吸収能力を評価する量として不十分

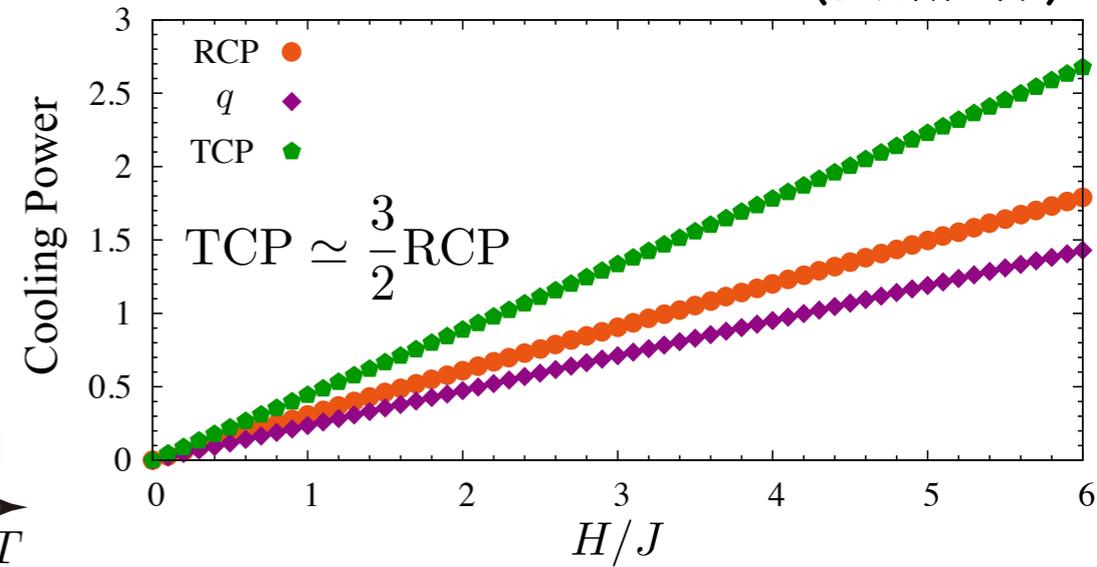
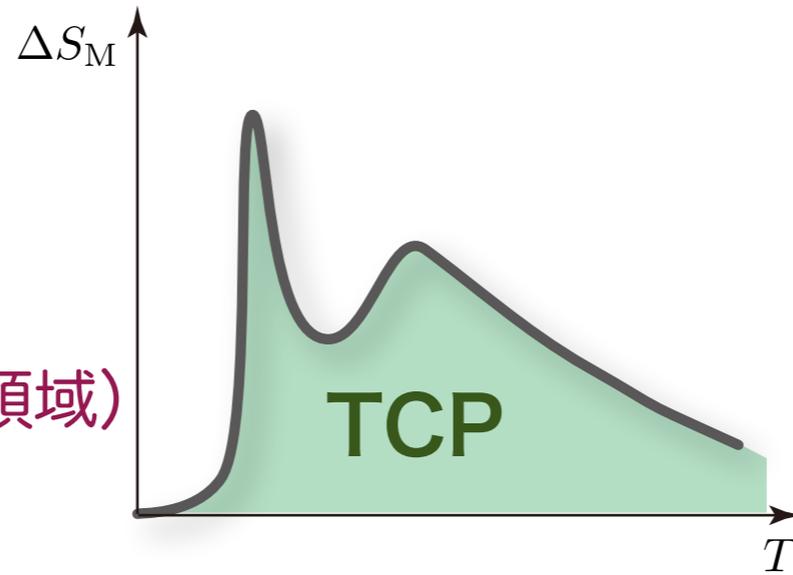
Total cooling power (TCP)

$$\text{TCP} = \int_0^{\infty} \Delta S_M(T, H_2 \rightarrow H_1) \Theta(\Delta S_M(T, H_2 \rightarrow H_1)) dT$$

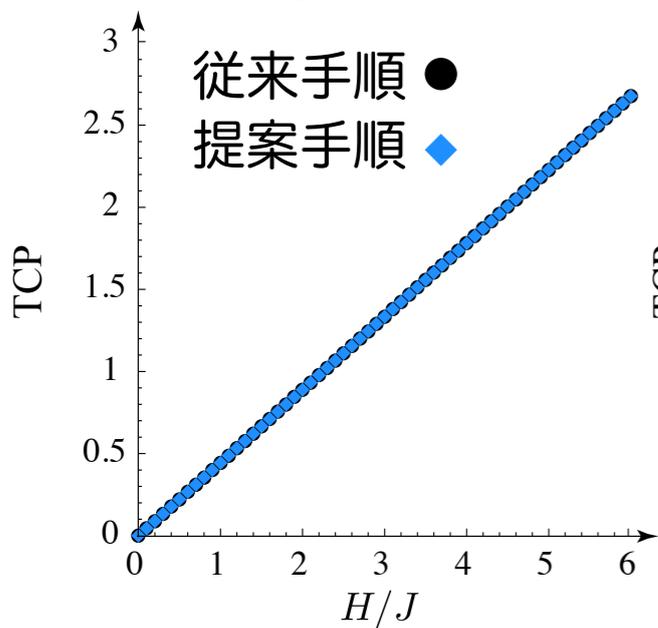
モンテカルロ計算
(強磁性体)

$$\Theta(x) = \begin{cases} 0 & (x < 0) \\ 1 & (x \geq 0) \end{cases}$$

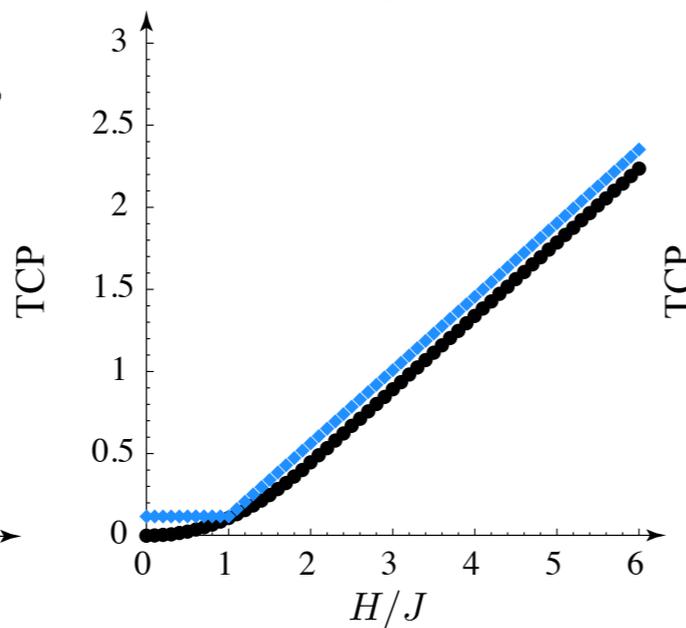
ΔS_M の正の領域 (吸熱領域)
の全温度積分



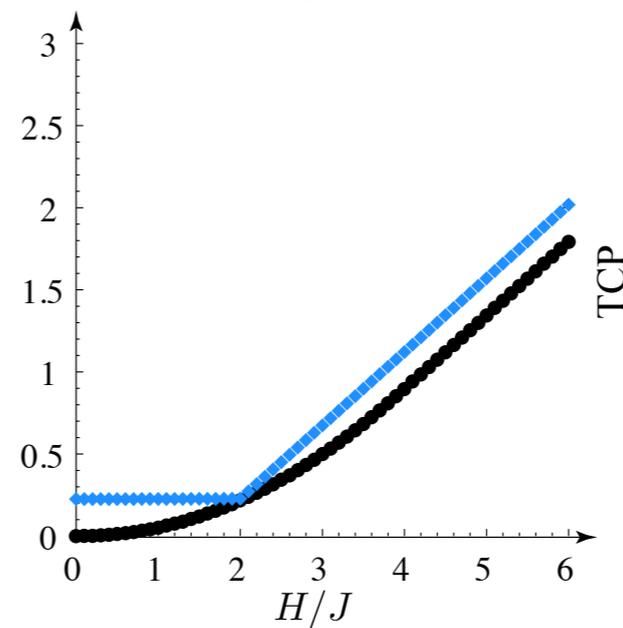
強磁性体



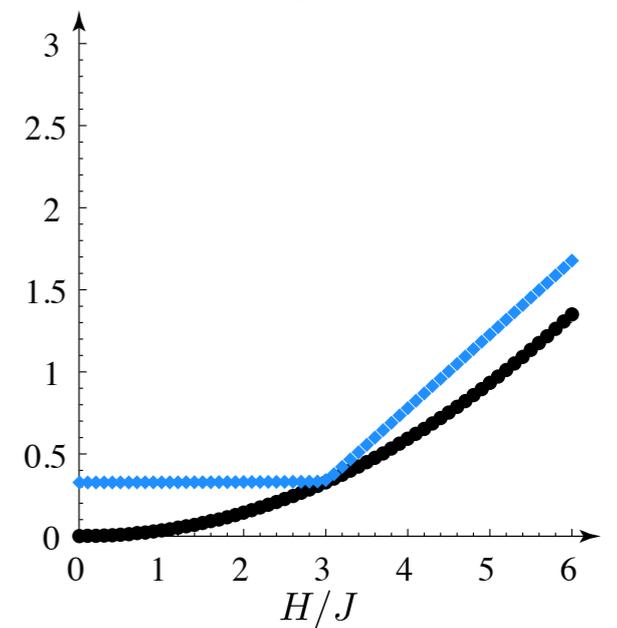
A型反強磁性体



C型反強磁性体



G型反強磁性体



提案手順を用いる事で、従来手順よりも大きな熱吸収能力が得られる。

R. Tamura, S. Tanaka, T. Ohno, and H. Kitazawa, J. Appl. Phys. 116, 053908 (2014).

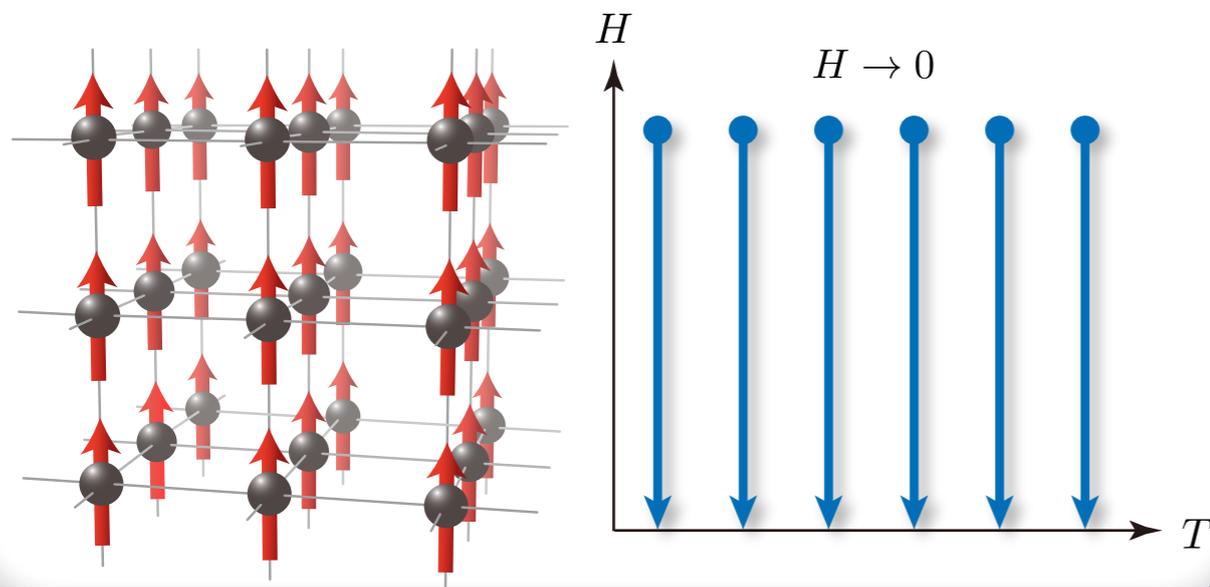
発表内容

- 自己紹介
- 冷凍技術と気体冷凍
- 磁気冷凍の基礎
- 磁気冷凍機の構成と磁気冷凍材料
- 代表的な磁気冷凍材料
- 研究目的
- 磁気構造と磁気エントロピー
- 磁気構造と熱吸収能力
- **まとめ**

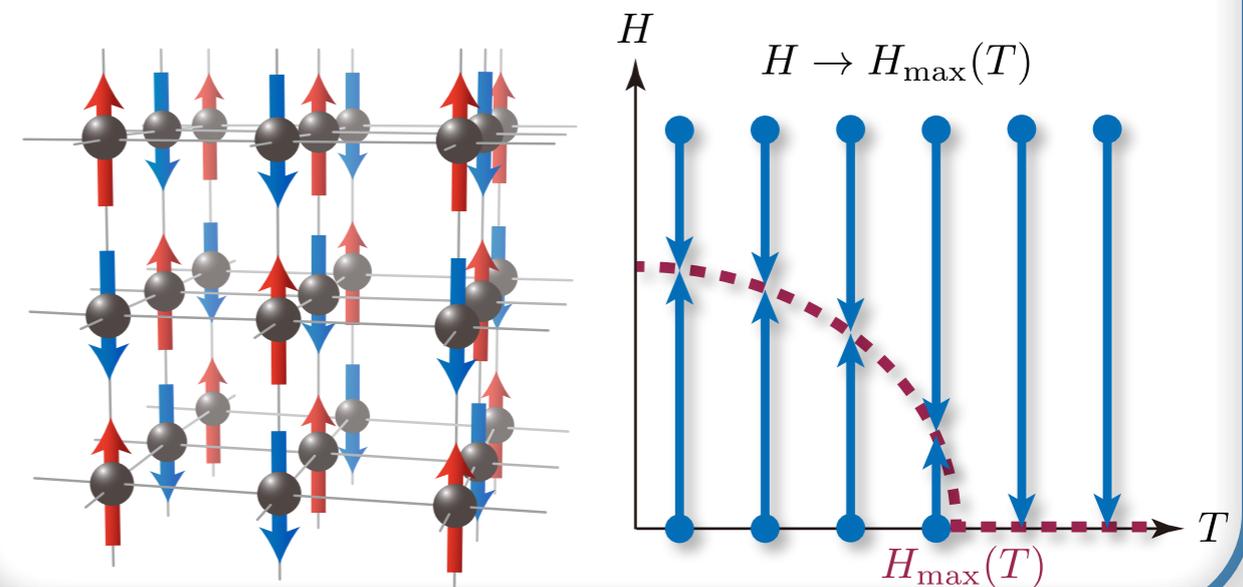
まとめ

磁気冷凍性能（磁気エントロピー変化，断熱温度変化，熱吸収能力）
を最大にする磁場印加手順

強磁性体

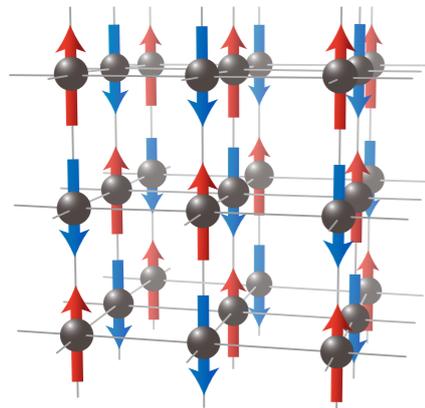


反強磁性体

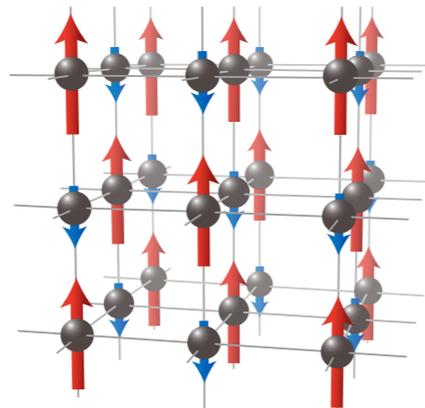


提案手順：あらゆる磁性体の磁気冷凍性能を最大にする磁場印加手順

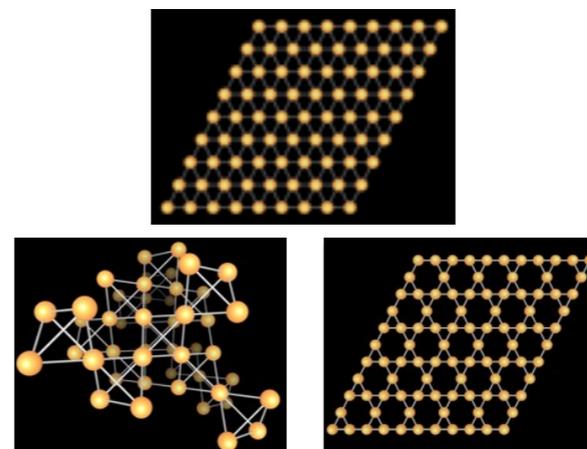
反強磁性体



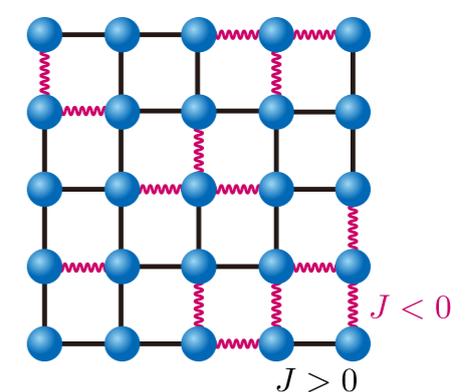
フェリ磁性体



フラストレート磁性体



ランダム磁性体



Thank you!!!

References

R. Tamura, T. Ohno, and H. Kitazawa,
Appl. Phys. Lett. **104**, 052415 (2014).

R. Tamura, S. Tanaka, T. Ohno, and H. Kitazawa,
J. Appl. Phys. **116**, 053908 (2014).