

磁気冷凍における磁場勾配設計による投入仕事低減

Reduction of Input Work through Magnetic Field Gradient Design in Magnetic Refrigeration

井上 毅, Mohamed G. Gado, 山本 春海, 内田 公, 平山 貴士, 夏目 恭平, 神谷 宏治(物材機構); 石田 政義(筑波大)
SHIRAI Tsuyoshi, Mohamed G. Gado, YAMAMOTO Harumi, UCHIDA Akira, HIRAYAMA Takashi,
NATSUME Kyohei, KAMIYA Koji (NIMS); ISHIDA Masayoshi (University of Tsukuba)
E-mail: SHIRAI.Tsuyoshi@nims.go.jp

1. はじめに

磁気冷凍は、磁気熱量効果を利用した環境調和型の冷却技術として注目されている[1]。磁性体駆動方式では、磁性体を磁場中に出し入れして大きな磁場変化を与えることで、高い冷凍能力を得ることができる。しかし、この方式では、磁場変化の際に磁性体に作用する磁気力に起因する磁気仕事が多いことが課題である。Johnson[2]は、2つの磁性体が交互に磁場中へ入るように配置し、それらを駆動軸で接続することで磁気力を打ち消し合うタンデム型を提案した。この方式での既往研究では、熱力学的な性能に主眼を置いており、磁気仕事まで踏み込んだ報告はなかった。本研究では、磁気仕事を定量的に評価することで、散逸仕事の発生要因を明らかにし、磁場勾配の最適化によって散逸仕事を低減し、理想的な磁気仕事に近づけられることを示した。

2. 磁気仕事と散逸仕事

理想的な磁気冷凍サイクルにおける磁気仕事 W_{mag} は、T-S線図で囲まれる面積として与えられる。一方、実際のタンデム方式を採用した磁気冷凍装置では、磁性体に作用する磁気力が完全には相殺されないため、散逸仕事 W_{diss} が生じる。したがって、実際の投入仕事 W_{drive} は、

$$W_{\text{drive}} = W_{\text{mag}} + W_{\text{diss}} \quad (1)$$

と表される。高効率な磁気冷凍を実現するためには、この散逸仕事を低減することが重要である。

3. 磁場勾配の非対称性と磁気力

磁性体駆動式磁気冷凍では、磁性体が磁場中を移動する。このとき磁性体に作用する磁気力は磁場勾配に依存し、

$$F = VM(T, B) \frac{\partial \mu_0 H}{\partial z} \quad (2)$$

で表される。コイル軸方向の各磁性体が受ける磁場勾配が一致しない場合、磁気力は完全には相殺されない。その結果、駆動過程の一部で一方の磁性体だけに大きな磁気力が作用し、散逸仕事が発生していた。そこで磁場勾配の対称性が磁気力のキャンセルに与える影響を数値計算により評価した。

4. 対称磁場勾配を与えた場合の磁気力解析

まず、対称な磁場勾配を有する理想化した線形磁場分布を設定し、磁性体に作用する磁気力を計算した。磁場分布はマクスウェルコイルペアをモデル化して与え、磁性体は線形磁場領域内を移動するように設定した。原理検証のため、磁性体内部の温度は一定であり、磁場変化中は等温変化すると仮定して計算を行った。計算の結果、対称な磁場勾配であっても、散逸仕事はゼロにならないことが分かった(Fig.1)。これは、高磁場領域に磁気力がゼロとなる安定点が存在しないため、磁気力のつり合いが崩れる区間が生じ、一方の磁性体が他方を上回る磁気力を受けて外部に仕事をするためである。単に磁場勾配の対称とするだけでは駆動過程の一部で磁気力の相殺が効果的に行われていないことを確認した。

5. 安定点を有する磁場分布

次に、高磁場領域に磁気力がゼロとなる安定点を形成する磁場分布を導入した。この磁場分布では、磁性体が停止し

た状態において両方の磁性体に作用する磁気力がゼロとなるため、磁気力の完全な相殺が可能となる。数値解析の結果、この磁場分布を用いることで散逸仕事はほぼゼロとなり、実際の投入仕事が理想投入仕事に近づくことを確認した(Fig.2)。

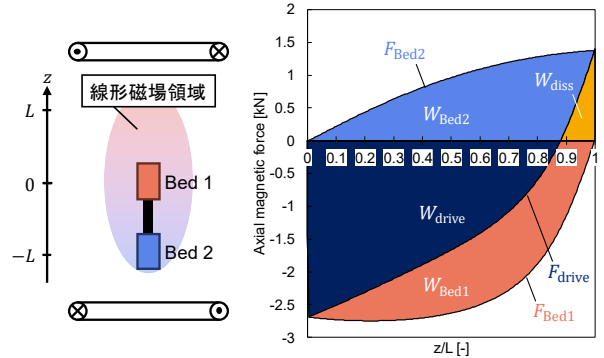


Fig. 1 線形磁場勾配内で磁性体を動作させた場合の磁気力と投入仕事および散逸仕事

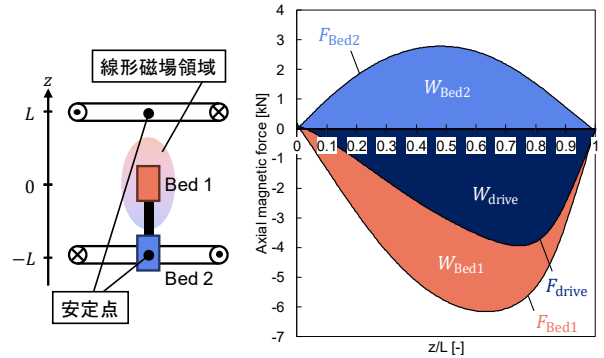


Fig. 2 線形磁場勾配と磁性体のストローク長に合わせて磁気力がゼロとなる安定点と組み合わせた磁場領域内で磁性体を動作させた場合の磁気力と投入仕事および散逸仕事

6. まとめ

本研究では、磁性体駆動型磁気冷凍における磁気仕事の低減を目的として、磁場勾配の設計について検討した。その結果、高磁場領域に磁気力ゼロの安定点を形成する対称磁場勾配とすることで、磁気力の理想的な相殺が可能となり、散逸仕事を大幅に低減できることを示した。今後は、より実際の運転に近い条件、すなわち磁性体内に温度勾配を有し、断熱変化に近い温度変化を示す条件において、磁場分布の最適化を行う。さらに、計算で得られた磁場分布を実現するため、MRIの勾配磁場設計で用いられる Target Field 法を応用し、実際のコイル設計へ展開する方法について検討する。

参考文献

1. K. Kamiya et al., Hydrogen liquefaction by active magnetic regenerative refrigeration, Cryogenics 152 (2025) 104205
2. D. L. Johnson, Reciprocating magnetic refrigerator employing tandem porous matrices within a reciprocating displacer, patent (1985), US4507928A