

月面推進液化に向けた静止型磁気冷凍機実現のための 超電導コイルの交流損失評価

Evaluation of AC Losses in a Superconducting Coil for a Static Magnetic Refrigerator toward Lunar Propellant Liquefaction

南波 寛人, 松永 信之介, 長屋 朔太郎(岐阜高専); 山本 春海, 夏目 恭平, 神谷 浩二(物質・材料研究機構); 島田 淳(宇宙航空研究開発機構)

NAMBA Hiroto, MATSUNAGA Shinnosuke, NAGAYA Sakutarō (NIT, Gifu college); YAMAMOTO Haruumi, NATSUME Kyouhei, KAMIYA Kouji (NIMS); SHIMADA Jun (JAXA)
E-mail: namba1202@outlook.jp

1. はじめに

月面における持続的な有人活動の実現に向けて、移動手段の一つとしてホッパーが考えられる。ホッパーを使用するためには液化水素及び液化酸素が推進剤として必要であり推進剤を生成する月面プラントの概念構築が進められている[1]。

月面での推進剤製造では、レゴリスから得た水を電気分解し、生成した水素を液化する必要がある。このため、20 K 以下の極低温冷凍機が求められるが、地上で用いられる装置を月面環境にそのまま適用することは難しい。特に、従来の冷凍機は機械的な駆動部が必須であるためメンテナンス面で課題が残る。そこで、本研究では駆動部を持たない「静止型」の磁気冷凍方式による冷凍機を検討している。

2. 静止型磁気冷凍方式

磁気冷凍では磁気熱量効果(Magnetocaloric Effect)を利用して冷却効果を得る。磁気冷凍は理論的に50%以上の高い効率が期待され、エネルギーが限られる月面環境における利用に向いていると考えられている[2]。また、メンテナンス性の良いシステムが望ましい。そこで、可動部を持たない静止型構造の磁気冷凍システムに着目した。従来のコンプレッサを必要とする気体式冷凍機とは異なり、磁気冷凍では磁気作業物質に対して磁場変動を与えることで熱サイクルを実現する。静止型磁気冷凍機では可動部なしに磁場変動を得るために電磁石の通電電流を変化させる。そのために、例えば、静電容量と組み合わせることでLC共振器を構成する方法が検証されている[3]。

3. 磁気結合型変動磁場方式およびコイル設計

本研究の検討は磁気結合型変動磁場方式に基づく。これは、磁気的に結合した2つの超電導コイルを用いてそれぞれの通電電流を変化させて磁場変動を得る概念である。検討の一環として、超電導コイルの寸法設計を行った。

磁場解析に Murata Software 社製 Femtet® を用いた。コイル中心および内部コイルと外部コイルの中間位置の2点における磁場強度を評価した。このとき、系の蓄積磁場エネルギーが常に一定となる運転条件および構成となるようにした。また、評価した2点の磁場強度の最大値が概ね等しくなるようにするため、上面視した際に内部コイルの円面積と、外部コイルと内部コイルの間の円環面積が等しくなるように寸法を決定した。これは、同一面積であれば磁束線が通過する本数もほぼ等しいと考えられるためである。ただし、内部コイルの内径および高さは先行研究に従って240 mmおよび300 mmとした[4]。以上の条件に従って決定したコイル寸法を Fig.1 に示す。外部コイルの形状も300 mmのソレノイドとし、内径420 mm、外径500 mmとした。内側には直径32 mm、高さ92 mmの磁性体を配置した。

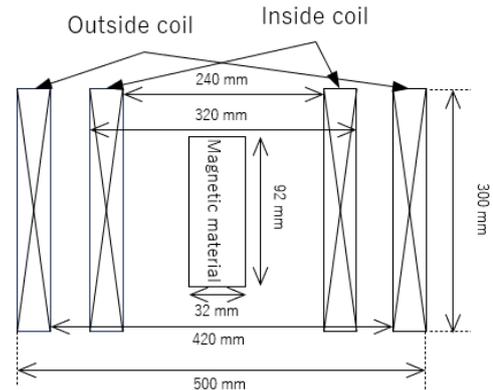


Fig.1 Schematic drawing of the designed superconducting coil magnet

4. 交流損失の課題および評価

磁気作業物質に印加する磁場を変動させる際、磁場源である超伝導コイルの巻線内にも変動磁場が生じるため、交流損失(AC loss)が発生する。交流損失は冷凍負荷となるためシステム全体のエネルギー効率の低下となる。コイル断面を複数の領域に分割し、下記の評価式に従い、それぞれの位置における代表的な磁場強度から交流損失を算出した[5]。

$$P = 2\mu_0 J_c d H_m$$

ここで、 H_m は外部印加磁界のピーク値、 J_c は臨界電流密度である。高温超伝導テープ線材を想定しているため $2dl$ はテープの厚みとした。交流損失は分布を持つが、特に2つのコイルを励磁した際の外部コイルの内側側面近傍の巻線部の損失が大きいことが確認された。その発熱密度を評価すると、219 mW/m³となった。

今後は、交流損失の評価値を実験により検証することを考えている。また、システム全体のエネルギー効率に対する交流損失の影響について精査する。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費(23K19129)および2025年度NIMS連携拠点推進制度の助成を受けました。

参考文献

1. JAXA: EZA-2021001 (2021)
2. K. Kamiya, et al.: Proc. of SSTC, Vol. 66 (2022) 1D09
3. K. Waki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 107 (2024) p.41
4. S. Matsunaga, et al.: Proc. of SSTC, Vol. 67 (2023) 2L12
5. 船木和夫 住吉文夫: 多芯線と導体 (1995)