

真空・低温環境向けモータの性能評価用テストベンチ開発

○牧 宗慶^{a)}、山野井 豊^{a)}、五十嵐 悟^{b)}、長谷川 雅也^{a)}

a) 高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

b) 株式会社 エイ・イー・エス

1. 概要

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) では真空、かつ、極低温環境に設置する装置や機器があり、モータを使用して、回転動作や直線動作をさせることがある。特に 80 K (-193 °C) を下回る環境中で使用可能な制御用モータは、非常に高価で種類も少ない。そこで汎用品のモータをベースにした、低温真空環境向けモータの開発を開始し、性能評価用のテストベンチ製作をおこなった。本件では、当該テストベンチ開発について報告する。

2. モータ性能試験

モータ性能で最も重要な項目として、回転数に対する保持トルクの関係が挙げられる。保持トルクは、モータ内部でロータとステータが引き合っており、ある位置で停止している時に、外部から力を加えても保持しようとする力を指す。性能試験は、対象となる



図1 クライオスタットと排気装置

モータを真空・低温環境のクライオスタット内で運転しておこなう。モータ回転軸からの出力をクライオスタット外に伝達し、この時の回転数と保持トルクをトルクメータによって測定する。なお、クライオスタット内温度は様々に変化させることが可能で、モータ性能の温度依存性を測定することができる。

3. クライオスタット冷却能力試験

テストベンチは、図1に示すクライオスタットと真空用排気装置に、モータトルク測定装置を取付けることで構成される。はじめにクライオスタットの冷却能力試験をおこなった。クライオスタットは、内槽と外槽で構成された真空容器で、内槽内部に、

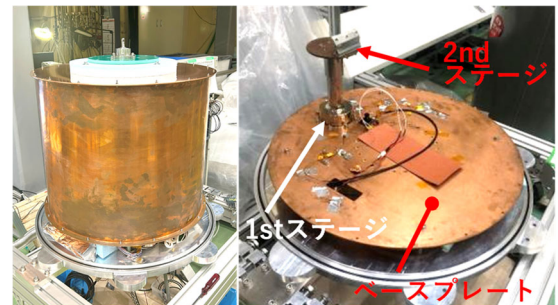


図2 クライオスタット内槽

冷凍機のコールドヘッドが設置されている。冷凍機は GM 冷凍機を使用し、図2に示すように 1st ステージと 2nd ステージが存在する。ステージによって、最低到達温度と冷却エネルギー (冷凍能力) が異なり、一般的に 2nd ステージの方が最低到達温度は低い、冷凍能力は小さい。

内槽は無酸素銅製の円筒型容器で、上下にフランジがついている。下側のフランジ (ベースプレート) は直径 615 mm、板厚 3 mm の円盤で、コールドヘッド 1st ステージと締結されており、固体熱伝導及び輻射によって内槽全体が冷却される。クライオスタットの仕様を以下に示す。

① 内槽有効寸法 ϕ 450 mm、有効高さ 400 mm

② 使用機器

冷凍機：住友重機械工業 GM 冷凍機 コールドヘッド RDK-408S

1st ステージ：30 W@45 K

2nd ステージ：5.4 W@10 K (カタログ値)

圧縮機ユニット：住友重機械工業 CNA-61

真空ポンプ：アネスト岩田 ISP-250C

真空計：ライボルト TURBOVAC350i

トルクメータ：共和電業 TPS-A-2NM

ブレーキ：小倉クラッチ HB20

4. 温度測定

温度計はLakeshore製シリコンダイオード温度センサ DT-670C-Cu (#D6024442)を使用した。1.4 K から 500 K まで測定可能で、誤差は±1 K である。温度計は 8 箇所 (記号 A から H まで) に設置した。(図 3)

20240620 温度計配置図

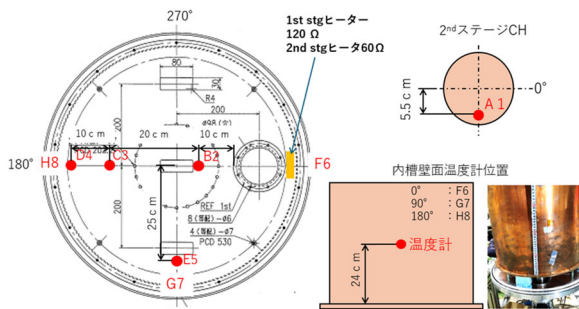


図 3 温度センサの取付け位置

5. コールドマス

コールドマス (冷却質量) は、値が大きくなるほど冷却時間を要する。今回のテストベンチで冷却対象となるコールドマスを合算すると、合計 4818 J/K となり、主に内槽の 4661 J/K が占めている。また、ステッピングモータを想定したコールドマスとして、タングステン合金ブロックを設置した。タングステン合金ブロックは重量 1.137 kg、コールドマスは 156.9 J/K である。当該ブロック上部には温度センサを取付け、内槽各部と共に連続計測した。

6. クライオスタット温度コントロール

モータの低温特性を測定するには、クライオスタット内温度のコントロールが必要となる。一定の除熱量で冷却を続けるコールドヘッドに、カプトンヒータを取付け、ヒータ発熱量を変えることによって環境温度調整をおこなう。ヒータ外観を図 4 に示す。ヒータ出力 P[W] とヒータの仕様電圧 E[V]、電流 I[A]、抵抗値 R[Ω] の関係は次式となる。

$$P [W] = EI = I^2R = \frac{E^2}{R}$$

使用したヒータの仕様は以下の通り。

1st ステージ：Minco HK913N

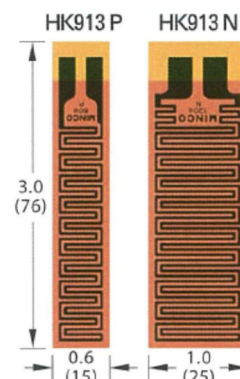


図 4 Minco 社製カプトンヒータ

25 mm×76 mm、120 Ω

2nd ステージ：Minco HK913P

15 mm×76 mm、60 Ω

メーカーカタログに記載されている発熱密度 (約 6.2 W/cm²) の上限から、各ステージのヒータ最大発熱量を計算すると、1st ステージは最大 75 W、2nd ステージは最大 35 W が使用上限となる。

7. クライオスタット冷却能力

1st ステージに取付けたヒータを使用して、ヒータ出力に対するベースプレート温度の測定をおこなった。加えて、スーパーインシュレーション (SI) 30 層で内槽を覆い (図 5)、輻射による熱侵入を減らした時の測定もおこなった。測定結果を図 6 に示す。結果から、SI の施工によって抑えられる輻射熱の侵入量は約 10 W と推定される。また SI を施工した状態で、1st ステージに取り付けたヒータを使用したクライオスタット内の設定可能な温度範囲は、23.6 K から 81.8 K であることがわかった。

次に 2nd ステージに取付けたヒータを使用して、ヒータ発熱量に対する 2nd ステージコールドヘッド温度及びベースプレート温度の測定もおこなった。結果を図 7 に示す。



図 5 内槽に SI-30 層を巻いた様子

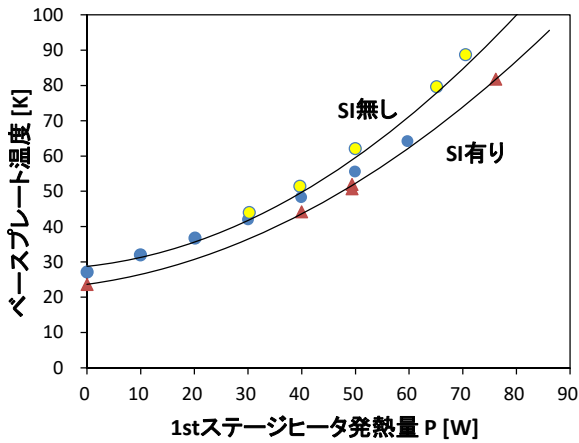


図6 1st ステージヒータ発熱量と到達温度

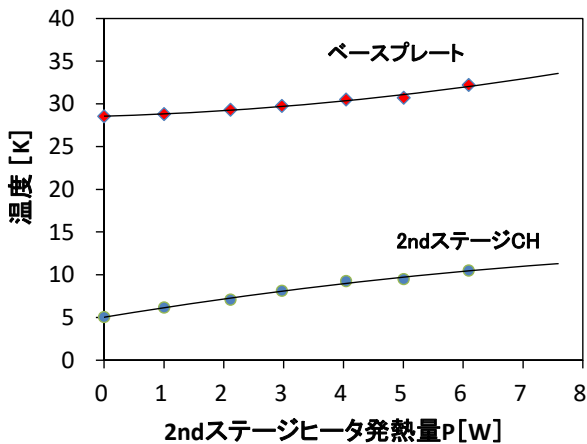


図7 2nd ステージヒータ発熱量と各部温度

8. モータ性能評価用テストベンチと測定

前項で試験したクライオスタット内に、測定対象となるモータを設置し、モータ回転数に対する保持トルクの測定をおこなった。モータトルク測定装置断面図を図8に示す。モータはモータマウントを介して、ベースプレートに締結され、固体熱伝導と、内槽壁面の輻射によって冷却される。モータの回転軸力は、ガラス繊維強化プラスチック (GFRP) 製のシャフトと回転導入機を介して、クライオスタット外に伝達したものを測定する。本試験では、AML 製 D57.1-C モータを使用し、モータドライバ (以下ドライバ) は同社製 SMD3 を使用した。カタログ仕様値は最大保持トルク 1000 mN・m (入力電圧 67 V, 入力電流 1.0 A 時)、最低使用温度 -196 °C (約 77 K) である。

測定評価は、モータが設定回転数に到達してからブレーキをかけ始め、モータの回転が停止する間に、トルクメータによって保持トルク値を測定することでおこなう。測定条件はモータ入力最大電流 0.7

A とし、クライオスタット内槽環境を、常温大気 (約 297 K)、常温真空 (約 297 K)、低温真空 (80 K) の順に設定して実施した。測定結果を図9に示す。

モータドライバに同梱されている AC アダプタ電源の都合上、ドライバ入力電圧 48 V で常温大気環境での試験を実施したが、メーカーカタログ値と比較する為に 67 V (規定の最大入力電圧) 電源を使用した試験もおこなった。

結果から、入力電圧の違いによる保持トルクの違いはほとんどみられなかった。また同電圧にて常温真空環境での比較測定もおこなった。真空環境では、摺動部の摩擦係数が大きくなることが一般に知られており、装置各部の摩擦抵抗による、保持トルクの低下を予想していたが、常温大気環境での試験との差はほとんど見られなかった。一方で 80 K 真空環境中での測定結果は、その他と比較すると 2 割程度保持トルクが落ちていた。加えて、50 rpm 付近でみられていた機械的共振現象も 60 rpm 近傍に移動していた。要因として、トルク測定装置の機械的性質とモータ本体の機械的性質及び電気的性質の変化が考えられる。トルク測定装置の一部は低温になることで部品が収縮し、外槽部品との軸ずれ起こりうる。また、隙間部分が狭くなって摩擦抵抗が大きくなっている可能性がある。結果として伝達ロスが生じ、測定する保持トルクが小さくなった可能性がある。また、材料の弾性率が変化し、装置全体の剛性が上がったことにより、共振点が移動した可能性が考えられる。モータ本体については、トルク測定装置同様、熱収縮による影響とコイル抵抗などの電気的特性の変化が保持トルクへ影響したことが考

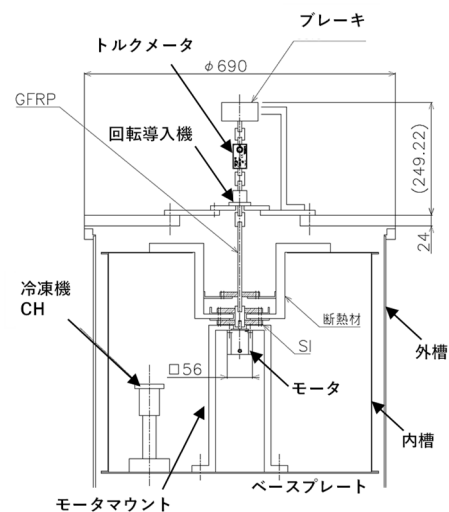


図8 モータトルク測定装置断面図

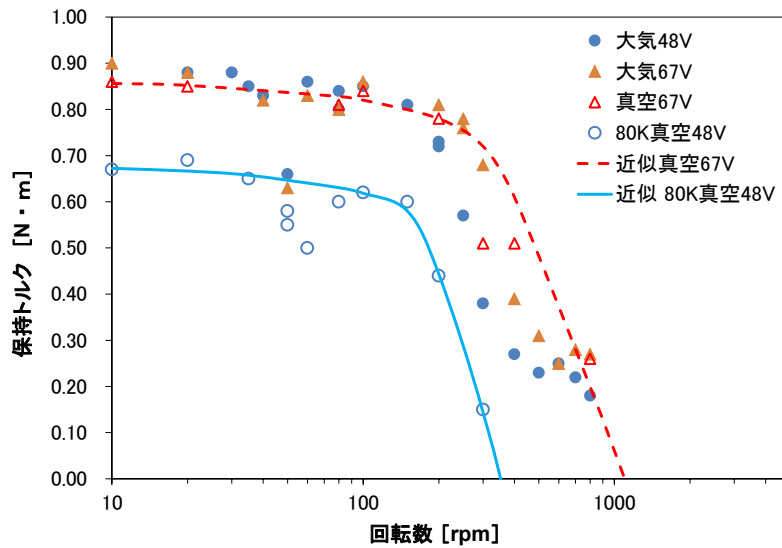


図9 AML製 D57.1-C モータ回転数と保持トルク

えられる。パルス発振電流で動かすステッピングモータは、インピーダンスの維持が重要である。そのうち、コイルの長さ、直径、巻き数、形状などに起因するインダクタンス変化は比較的小さい。一方でコイルにおける巻線抵抗の変化や、磁石の材料物性の変化、及び、ロータとステータ間のギャップの変化など、複合的な要因が影響していることが考えられる為、引き続き原因を探っていく。

最後にクライオスタット内における、モータドライバの消費電力を測定した。(図 10) モータ消費電力=発熱量ではないが、回転数に比例して消費電力も増大し、クライオスタットに対する熱負荷も大きくなっていると考えられる。予備的に、常温真空環境にしたクライオスタット内でモータの連続運転をおこなった所、約 30 分の間に室温 (約 296 K) から 51 K 上昇した。クライオスタット内温度をコン

トロールする時には、当該測定結果を考慮した上で、コールドヘッドに取付けたヒータ出力を決定する必要がある。

9. まとめ

トルク測定装置が完成し、常温大気、常温真空、80K 真空環境で、モータの性能測定をおこなうことができた。80K 真空環境でのモータ保持トルクは、他と比較して 2 割程度低くなっている為、トルク測定装置の機械的性質変化とモータ本体の機械的及び電気的性質の変化の面から、原因追及を進めている。今後は並行して開発を進めているモータを用いて、性能特性評価をおこなう予定である。

参考文献

- [1] <https://ana-dig.com/stepper-motor1/>
- [2] https://arunmicro.com/products/D57-1_UHV-Compatible_Stepper_Motor/
- [3] https://pdf.directindustry.com/ja/pdf-en/minco/flexible-heaters-design-guide/5076-21462-_18.html
- [4] https://assets.toyo.co.jp/files/user/material/catalog-broucheres/LAK_4185_1610_DT.pdf
- [5] https://www.nfcorp.co.jp/pro/mi/z/imp_stepping-motor/#

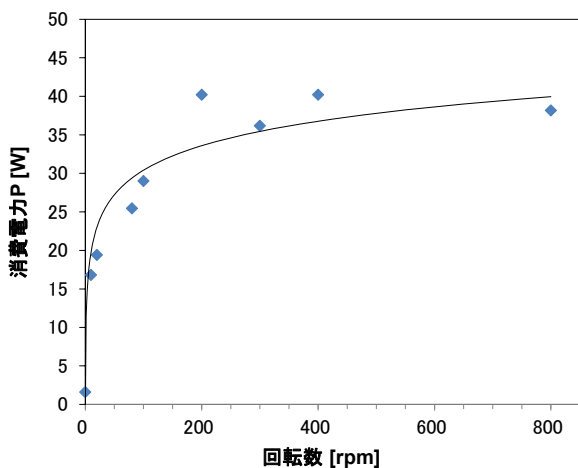


図 10 モータ回転数と消費電力