耐放射線磁気軸受形複合分子ポンプの開発*

和田 薫^{*1}・猪原 崇^{*1}・井口 昌司^{*1}荻原 徳男^{*2}・三尾 圭吾^{*3}・中山 浩範^{*3}Development of the Radiation-hardened Magnetically
Suspended Compound Molecular PumpKaoru WADA^{*1}, Takashi INOHARA^{*1}, Masashi IGUCHI^{*1},
Norio OGIWARA^{*2}, Keigo MIO^{*3} and Hironori NAKAYAMA^{*3}^{*1}Osaka Vacuum, Ltd., Hachioji Workshop, 1221 Kunugida-cho, Hachioji, Tokyo 193-0942, Japan^{*2}Japan Atomic Energy Agency 2-4, Shirane Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195, Japan^{*3}Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd., 1, Shin-Nakahara-cho, Isogo-ku, Yokohama 235-8501, Japan

(Received November 7, 2006, Accepted April 7, 2007)

The Magnetically Suspended Compound Molecule Pump is used for the vacuum pumping system in 3 GeV Rapid Cycle Synchrotron (3 GeV-RCS) of Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC). The pump is demanded a permissible radiation of 10 MGy or more because of operating under the radiation environment. The standard Magnetically Suspended Compound Molecular Pump (TG1300M) is able to operate to only 3.5 MGy under the radiation environment. Therefore, the radiation-hardened Magnetically Suspended Compound Molecular Pump (TG1300MR) was developed based on the result of gamma rays irradiation examination of TG1300M, and irradiation test was done. TG1300MR had a failure of matching error on operation at 34.3 MGy, but it satisfied 10 MGy of 3 GeV-RCS demand doses of radiation enough. As result of disassembly check, cause of the failure is the faulty operation due to the decreased insulation of a connector for magnetic suspension. And every other parts, such as the position sensor, the electromagnet and the motor are with no problem. It means that TG1300MR is able to work under the radiation environment above 34.3 MGy, if the connector for magnetically suspension is improved.

1. はじめに

大強度陽子加速器施設 (J-PARC) の 3 GeV シンクロトロン加速器 (3GeV-RCS) の真空排気系に磁気軸受形複合分子ポンプが使用される。複合分子ポンプは放射線環境下での運転となるため、10 MGy (グレイ: 吸収線量) 以上の耐放射線性が要求されている。このため、標準規格品の磁気軸受形複合分子ポンプ (TG1300M) のガンマ線照射試験を日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所で行なった。その結果をもとに耐放射線磁気軸受形複合分子ポンプ (TG1300MR) の開発を行い、耐放射線性の評価を行なった。

2. 磁気軸受形複合分子ポンプ (TG1300M)

標準規格品の磁気軸受形複合分子ポンプ (TG1300M) も従来の磁気軸受形複合分子ポンプとは違い、ポンプ内部に半導体素子を使用せず構造部材には非金属を使用しない構造となっているため、耐放射線性能は大幅に向上している。

ガンマ線照射試験結果では、累積照射線量が 3.5 MGy に達した時点で、フッ素系ゴムの真空シール用 O リングの弾性劣化により大量のリークが発生し、圧力異常でポンプが停止した。ポンプ内部部品には放射線の影響による大きな変化はなかったので、O リングを交換し照射試験を再開したが、

通算照射線量が 7 MGy で再び同じ原因による O リングからのリークが発生し、停止した。ポンプ内部部品では、照射線量が 7 MGy になると内部リード線のテフロン被覆のひび割れがひどくなり、少しの衝撃でも脱落するまでになっていた。

しかし、ポンプ主要部品となる位置センサ、電磁石、モータはモールド材の一部に変色があったものの、性能劣化は起こしていなかった。

照射試験より得られた TG1300M 用部品の許容照射線量を **Table 1** に示す。TG1300M は 3GeV-RCS 要求仕様の耐放射線線量の 10 MGy を満足できないことがわかった。

3. 耐放射線磁気軸受形複合分子ポンプ (TG1300MR)

TG1300M では要求仕様の耐放射線性を満足できなかったため、照射試験結果をもとに **Table 2** に示す部品の改良を

Table 1 Permissible radiation dose of each part

Parts name	Radiation dose
Fluorine rubber O-ring	Up to 3.5 MGy
Teflon lead	Up to 7 MGy
Rotor (Aluminum alloy)	7 MGy or more
Shaft (Carbon steel)	7 MGy or more
Electromagnet	7 MGy or more
Position sensor	7 MGy or more
Motor	7 MGy or more

* 平成18年11月8日 第47回真空に関する連合講演会で発表

^{*1} 大阪真空機器製作所 (〒193-0942 東京都八王子市柵田町1221)^{*2} 日本原子力研究開発機構 (〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4)^{*3} 石川島播磨重工業株式会社 (〒235-8501 横浜市磯子区新中原町1番地)

Table 2 Improved parts of TG1300MR

Parts name	TG1300M	TG1300MR
O-ring	Fluorine rubber	Metal
Lead wire	Teflon lead	PEEK lead
Output cable	PVC cable	PEEK cable
Number of Connector	1	2 (Magnetic Suspension and Motor)
Connector	Epoxy resin hermetic	Ceramic hermetic
Connector pin	Iron alloy with Tin plating	Cu with Gold plating

PEEK: polyetheretherketone

Fig. 1 Sectional drawing of TG1300MR

Fig. 2 Radiation dose

行なった。また、TG1300M では遮蔽ブロックにて保護していたコネクタと出力ケーブルも耐放射線仕様に変更し、同時に評価を行なった。ただし、コントローラおよび補助ポンプは照射室外に設置した。

評価方法はTG1300Mと同様で、ガンマ線照射線量としては、線源側表面の線量(11.48 kGy/h)と反対側表面の線量(1.56 kGy/h)の2ヶ所の平均値をTG1300MRの線量(6.52 kGy/h)とした。

ガンマ線照射による影響評価は、磁気軸受のキャリブレーションデータおよび伝達関数と位置センサ、電磁石およびケーブルの絶縁抵抗値、排気口圧力の変化をモニターして行なった。

4. 試験結果

ガンマ線照射線量の累積が34.3 MGyに達したところでマッチング異常によりポンプが停止した。マッチング異常とは、ポンプに対してコントローラの機種設定が一致しない場合に発生し、運転初期の接続ミスまたは設定ミスによる誤動作の安全対策として搭載されている保護機能である。

異常原因調査を行なったところ、磁気軸受用コネクタのピン間における絶縁抵抗値が、100 M Ω 以上の基準に対して、0.1 M Ω 以下となっており、この絶縁低下がマッチング異常の誤動作を引き起こしていた。

絶縁低下の原因を調べるため分解調査を行なったところ、機種判別回路には異常はなく、磁気軸受用コネクタの大気側の機種判別用ピンと電磁石用ピン間を含んだほとんどのピン間で黒いすじの放電痕が発生しており、この間で絶縁低下が起きていることがわかった。放電痕のないピン間の絶縁抵抗値は正常であった。放電痕は溶剤で簡単に除去することができ、除去後の絶縁抵抗値は正常値に回復した。磁気軸受用コネクタの構造はセラミックハーメチックシールで、ピン材質は銅に金メッキを施し銀ろうにて固定されたものである。一方、出力ケーブル側の相コネクタには放電痕はなく変化は認められなかった。

内部リード線のPEEK電線は色が灰色から黄土色に変化し若干硬化はしていたものの、十分な弾力性は保持しており、曲げて被覆がひび割れたりすることはなかった。

磁気軸受用コネクタの真空側の絶縁保護用熱収縮チューブが硬化してひび割れが発生し触ると割れて剥がれ落ちる状態になっていたが、絶縁抵抗値を確認したところ絶縁破壊は起こしていなかった。前回の照射試験の7 MGyではこのような変化は認められなかった。

出力ケーブルは一部部品にさびが発生したものの、絶縁抵抗値や抵抗値には変化はなかった。また、ポンプの主要部品である位置センサ、電磁石、モータは一部モールド材の変色はあったもののキャリブレーションデータ、伝達関数、起動/停止時間などに異常は認められなかった。

5. ガンマ線による影響

今回、耐放射線性仕様の改良のために新たに採用した部材は、メタルOリング、セラミックハーメチックコネクタ、PEEK電線(ポンプ内部リード線用)、PEEKケーブル(出力ケーブル用)である。

メタルOリングの部材はアルミ合金であり、ガンマ線の影響は受けておらず、問題なく使用できることが確認できた。

セラミックハーメチックコネクタは異常原因である絶縁劣化が起こり、大気側のピン間のほとんどに放電痕も残っていた。しかし、この放電痕は溶剤で簡単に除去することができ、除去後の絶縁抵抗値は正常に回復していることから、絶縁劣化はセラミック自体ではなくセラミックの表面で発生していると考えられる。**Fig. 3**に磁気軸受用コネクタとモータ用コネクタの絶縁抵抗値の変化を示す。モータ用コネクタにはモータ電圧が印加されるため、放電の危険性があるとしてエポキシ樹脂によるモールドをしていたため絶縁劣化は起こっていない。なお、絶縁抵抗値はDC500Vを印加して測

Fig. 3 Insulation resistance of electromagnet

Fig. 4 Resistance of cable

定した。

PEEK 電線は色の変化と若干の硬化はあったが、十分な弾力性は保持し曲げによるひび割れも起こさず絶縁劣化も起こしていなかった。**Fig. 4** にケーブルの抵抗値を示す。位置センサのリード線と出力ケーブルの抵抗値にはともに若干の変動が見られるが、これは室温の変化によるものであり、ガンマ線の影響ではない。

6. ま と め

標準規格品の磁気軸受形複合分子ポンプ (TG1300M) の照射試験結果をもとに、耐放射線磁気軸受型複合分子ポンプ (TG1300MR) の開発を行い、ガンマ線の耐放射線線量の評価を行った。その結果、TG1300MR はコネクタと出力ケーブルも含めて 34.3 MGy まで異常なく運転することができ、3GeV-RCS 要求耐放射線線量の 10 MGy を十分に満足することが確認できた。

また、ポンプ主要部品となる位置センサ、電磁石、モータさらに PEEK 電線に性能上の異常が見られなかったため、磁気軸受用コネクタのセラミック表面の放電対策を行なうことにより、さらに耐放射線線量をあげることが可能である。

〔文 献〕

- 1) K. Wada: Shinku Vol. 47, No. 3, (2004) 159.