

Estimation of Eddy Current Loss for a Radio Resistive TMP

Kenichiro Kanazawa, Yoichi Takiyama, Toru Yanagibashi, Norio Ogiwara

Japan Atomic Energy Agency, Tokai, Naka, Ibaraki 319-1195 Japan

Abstract

Magnetically suspended turbomolecular pumps (TMPs) have been widely used in nuclear fusion devices and sometimes used in particle accelerators, because it is much easier for the TMPs with dry backing pumps to achieve and maintain UHV without oil contamination. In these devices the TMPs are influenced by a quasi static magnetic field; the eddy current is induced on the rotating rotor and then forces the rotor to thermally expand. In order to use the TMPs safely we attempted to establish a standard procedure for determining the influence of magnetic fields on TMPs. First of all, this influence was investigated in detail through the experiment with a rather small TMP. As a result, the following are found. (1) The parallel magnetic field has no influence on the operation of the TMP. (2) On the other hand, the driving power and the rotor temperature are greatly affected by the vertical magnetic fields. (3) The eddy current loss is formulated and well estimated with a model where a localized magnetic field and current flow exist within the rotor into the region down to a substantial skin depth δ from the surface. This time we applied the above conclusions to radio resistive TMPs which were employed in the RCS in J-PARC. With the evaluation equation of eddy current loss established through the experiment in a uniform magnetic field, the rise of rotor temperature is estimated to be less than 100°C even in the orthogonal magnetic field of 0.035 T. Thus, we concluded that the radio resistive TMPs are safely operated in the RCS, as the leakage magnetic field at the floor where the TMPs are set is less than 0.001 T.

耐放性TMPの磁場による渦電流損の評価

1. はじめに

RCSでは耐放性TMPを使って実験中も排気している。そのため、磁場によってロータに渦電流が生じ、発熱が起こることで、ロータの熱伸びでステータに接触し、故障する危険性がある。よって、耐放性TMPの渦電流によるロータの発熱がどの程度まで許容できるか評価する必要がある。

TMPは小型でも耐放性TMP（大型）でも構造は同じである。よって、磁場によってロータに渦電流が生じ、発熱を起こすメカニズムは同じである。そこで我々は、まず、小型のTMPを用いて磁場による影響を詳細に調べることにした。小型のTMPを用いた実験より明らかになったことを踏まえて、耐放性TMPの評価を合理的に行う。そして、実際に耐放性TMPを使うRCSの環境でロータがどの程度発熱するか求め、健全性を評価する。はじめに小型のTMPを実験に用いるのは、磁場発生装置内への設置が容易にできる。また、磁場発生装置も小型化でき、扱いやすい。磁場の方向及び強さを精度良く制御できるからである。

小型のTMPを用いて磁場による影響を詳細に調べた結果、TMPロータ軸に直交する磁場が作用すると渦電流が生じ、ロータに発熱が起こる。ロータ軸に直交する磁場による渦電流損は、ロータ温度がほぼ一定である場合において磁場強度の2乗に比例し、また、回転周波数の平方根に比例することが評価式

で説明できた。

今回、小型TMPの実験結果を踏まえて、耐放性TMPについてロータ軸に直交する磁場を作用させて実験を行った。この実験結果より、ロータ軸に直交する磁場による渦電流損の評価式をつくり、RCS実験中の耐放性TMPロータ軸に直交する磁場による渦電流損を求めた。また、この渦電流損によるロータの発熱を求め、健全性を評価した。

2. 小型のTMPの渦電流損評価

小型のTMPの実験から以下のことが明らかになっている。

- 1) TMPのロータ軸に平行な磁場が作用しても実質的な影響は受けない。
- 2) TMPロータ軸に直交する磁場は、ロータに渦電流が生じ、発熱が起こり、ロータ温度が上昇する。ロータが一定回転を維持する為には、渦電流損を補填する必要があり、TMPの駆動電力が増加する。
- 3) TMPのロータ軸に任意の方向から作用する磁場は、平行な磁場成分と直交する磁場成分に分解し、直交する磁場成分だけを考慮すれば良い。

- 4) TMPロータ軸に直交する磁場による渦電流損の磁場依存性と回転数依存性は、(1)と(2)に示す一般的なTMPの渦電流損評価式を使って説明できる。

$$P_1 = \frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\mu\omega}{\sigma}} H_0^2 \{1 - \exp(-\sqrt{2\mu\omega} Z_0)\} \quad (1)$$

$$P = A \cdot P_1 \quad (2)$$

3. RCSの耐放性TMPを用いた実験結果

2章の1)、2)に示すことを耐放性TMPで確認した。結果を図1.及び図2.に示す。耐放性TMPについても、2章の1)、2)と同じ内容である。

次に、耐放性TMPロータ軸に直交する磁場による渦電流損のデータをとるために実験した。これは、耐放性TMPの渦電流損の評価式をつくるためである。結果を表1.に示す。各回転数において磁場をふったときの渦電流損を示してある。なお、単位はWである。

4. 耐放性TMPの渦電流損の評価

耐放性TMPのロータ軸に直交する方向より磁場が作用したときの渦電流損の評価式をつくる。2章の一般的なTMPの渦電流損の評価式に、耐放性TMPの Z_0 とAの値を入れると耐放性TMPの渦電流損の評価式ができる。 Z_0 の値は耐放性TMPロータ部の構造より 7.5×10^{-3} (m)とする。Aの値は、3章の表1.に示す耐放性TMPの渦電流損の実測値から、一般的なTMPの渦電流損の評価式(2)を使って計算する。結果を図3.に示す。横軸が回転数で、縦軸がAの値である。Aの値は点線で示す範囲内にそろっているので、 0.99 ± 0.15 (m²)とした。

以上より決めた Z_0 とAの値を使って、(3)に示すように耐放性TMPの渦電流損の評価式が決定される。

$$P = (0.99 \pm 0.15) \frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\mu\omega}{\sigma}} H_0^2 \{1 - \exp(-\sqrt{2\mu\omega} 7.5 \times 10^{-3})\} \quad (3)$$

図4及び図5に評価式で計算した渦電流損を実線で示す。評価式で求めた渦電流損は、プロットで示す。実測値と比較すると当然のことながらよく合っていることが分かる。

5. RCSでの耐放性TMPの健全性評価

耐放性TMPの健全性を以下のように評価した。まず、4章で示した耐放性TMPの渦電流損の評価式を使って、RCS実験中の磁場による渦電流損を求める。

渦電流損を(4)に示す式に当てはめることでロータ温度を計算する。本来ならばロータ温度からロータの熱伸びを計算するが、ロータ温度が100以下であれば、熱伸びによるステータへの接触が起きないことがメーカーより知らされている。よって、ロータ温度100を目安として耐放性TMPの健全性を評価する。Qと T_2 からロータ温度 T_1 を求める。

$$T_1 = (25Q / \sigma + T_2^4)^{1/4} \quad (4)$$

RCS環境において耐放性TMPロータ軸に直交する方向に作用する磁場の強さは、計算より最大10Gauss程度である。耐放性TMPの評価式より、ロータ軸に直交な方向から10Gaussの磁場が作用したときの渦電流損は、約3.0Wである。また、RCS内の室温は25とする。よって、 $Q=3.0$ 、 $T_2=298.15$ Kからロータ温度 T_1 は、36になる。ロータ温度が100以下であれば、熱伸びによるステータへの接触が起きないことから、RCS実験中において耐放性TMPが磁場による渦電流損でロータに熱伸びが起き、ステータに接触して故障する危険性は無いと言える。

6. まとめ

- 一般的な渦電流損の評価式を使って耐放性TMPに磁場が作用したときの渦電流損の評価式を作った。この評価式を用いて、RCS実験中の磁場による耐放性TMPのロータ温度を評価した。磁場が10Gaussのときロータ温度は36である。よって、ロータがステータへ接触する危険性は無い。
- 以上の手法は、任意のTMPに対して静的な磁場環境下での健全性を評価するのに適用できる。

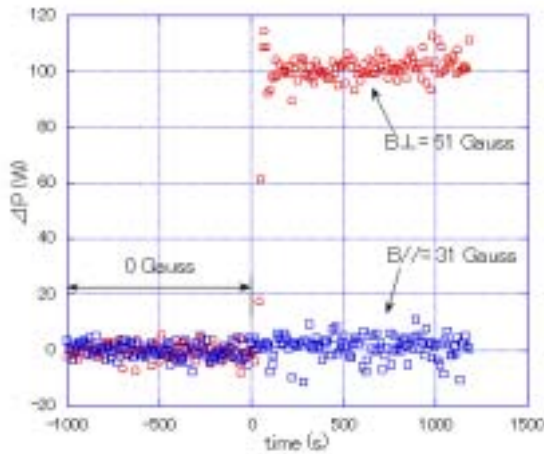


図1. 駆動電力の変化(ロータ軸平行及び直交磁場)

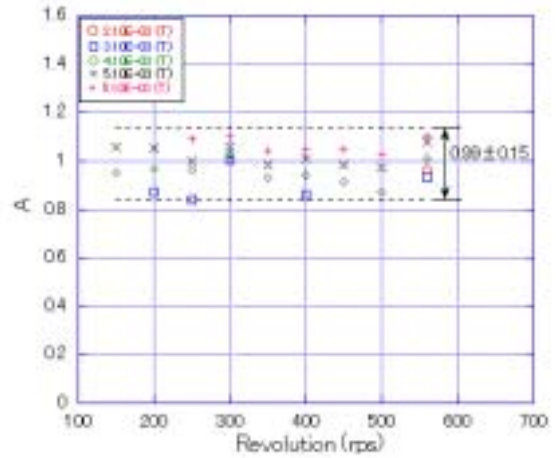


図3. 耐磁性TMPのAの値

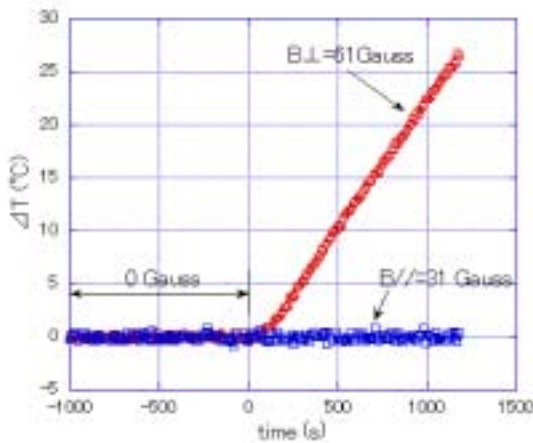


図2. ロータ軸温度の変化(ロータ軸平行及び直交磁場)

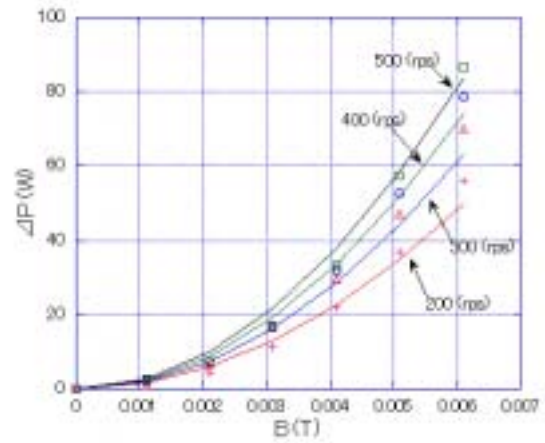


図4. 磁場による渦電流損の変化(TMP定常回転)

表1. ロータ軸直交方向磁場による渦電流損の変化

| Revolution (rps) | B (T) | | | | | |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 1.10E-03 | 2.10E-03 | 3.10E-03 | 4.10E-03 | 5.10E-03 | 6.10E-03 |
| 150 | 0.66 | 4.37 | 9.39 | 18.09 | 31.05 | 47.51 |
| 200 | 1.04 | 4.27 | 11.34 | 22.03 | 36.97 | 56.25 |
| 250 | 0.04 | 4.17 | 12.47 | 25.05 | 40.05 | 62.5 |
| 300 | 1.14 | 6.48 | 16.55 | 29.6 | 47.21 | 70.27 |
| 350 | 2.48 | 6.25 | 14.58 | 29.25 | 48.02 | 72.44 |
| 400 | 2.42 | 7.2 | 16.67 | 31.95 | 52.82 | 78.74 |
| 450 | 1.18 | 6.24 | 16.24 | 33.03 | 55.09 | 83.73 |
| 500 | 2.74 | 7.22 | 16.8 | 33.28 | 57.61 | 86.76 |

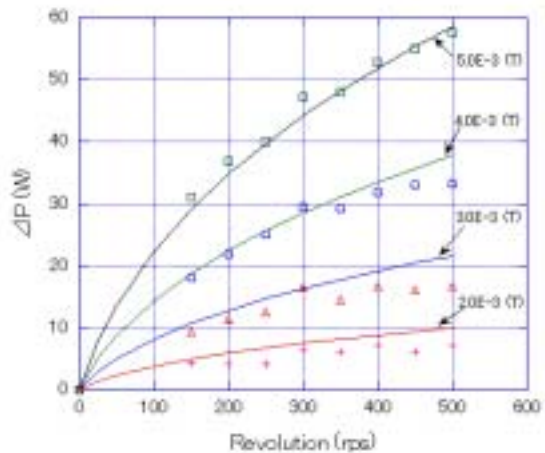


図5. 回転数による渦電流損の変化(TMP定常回転)