

## Estimation of Eddy Current in the BPM Generated by an AC-Mode Steering Magnet for J-PARC RCS Using the Code OPERA3D

Kenichirou Satou<sup>1,A)</sup>, Seiji Hiroki<sup>A)</sup>, Seishu Lee<sup>B)</sup>, Naoki Hayashi<sup>A)</sup>, Takeshi Toyama<sup>B)</sup>, and Susumu Igarashi<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> High-intensity Proton Accelerator Centre, Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI)

2-4 Toukai-mura Shirakata Shirane, Naka-gun, Ibaraki, 319-1195

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801

### Abstract

The J-PARC RCS will be operated as 25 [Hz] AC-mode, it is important to estimate the eddy current in a BPM generated by the alternating magnetic field. We estimated the power loss due to the eddy current in the BPM which will be mounted inside the steering magnet, which was designed for the J-PARC RCS, by using the calculation code OPERA3D/ELEKTRA. The calculated power loss was 86-134 [W] depending on isolation structure between the BPM, the BPM-support, and the base-plate, and the amplitude of the 25 Hz alternating magnetic fields which was assumed to be 311 [Gauss]. It was concluded that the increment of temperature will be a several degrees in average for a practical operation where the amplitude of the alternating magnetic fields is assumed to be 150 [Gauss].

### J-PARC/RCS用BPMの補正電磁石による発熱のOPERA3Dを用いた評価

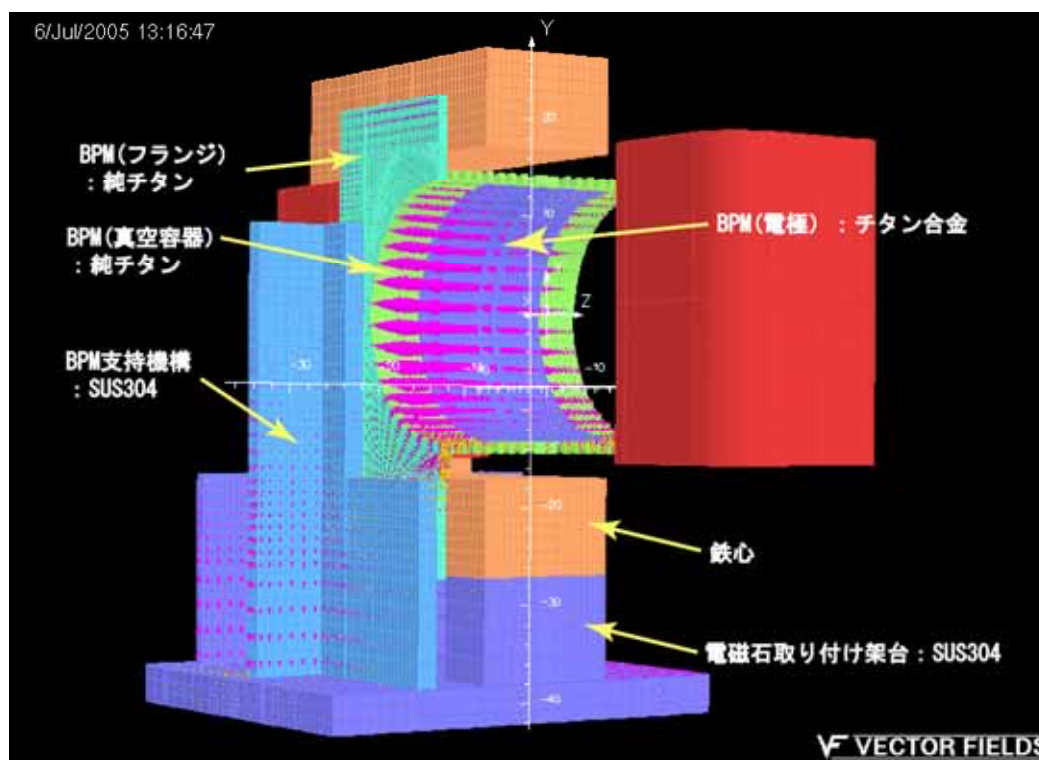


図1 1/2カット計算モデル

### 1. はじめに

現在建設が進んでいる大強度陽子加速器施設J-PARCの3GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS) は25Hzの交流で運転されるために、励磁される交流磁

場によって設置機器に発生する渦電流による発熱を評価することは必要不可欠である。このRCSには補正電磁石が設置され、その電磁石内にはビーム位置モニター (BPM) が据えられる。

本研究では補正電磁石によるBPMの発熱量を、

<sup>1</sup> E-mail: ksatou@linac.tokai.jaeri.go.jp

OPERA3D/ELEKTRAを用いた計算により評価した。発熱による温度上昇が大きい場合には熱変形を受けビーム位置測定精度に影響を与えることが懸念されるため詳細な計算が必要である。ここでBPMの発熱量は、BPM支持機構および取り付け架台に発生する渦電流にも影響されるため、BPM発熱量におけるそれら構造物の影響を調べることは特に重要である。

## 2. BPMの補正電磁石による発熱評価

補正電磁石内に設置されるBPMの発熱量を図1に示す1/2カットモデルで、OPERA3D/ELEKTRAを用いて計算した。計算ではビーム軸方向をZ軸にとり、電磁石中心が原点のCGS単位系で計算した。図中の円錐矢印は電流密度ベクトル[A/cm<sup>2</sup>]を示している。電磁石の鉄心は図2に示すBH依存性を仮定し、コイルには定格電流12175 [A]を25HzのACで通電する

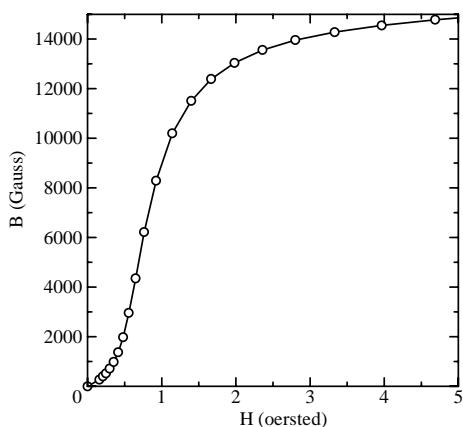


図2 鉄心のBHカーブ

とした。計算モデルではBPM真空容器および電極は厚みが0.1 [cm]で、真空容器は強度を保つためにリブ構造を持っているとした。リブは高さおよび幅がそれぞれ1 [cm]、0.6 [cm]で、0.8 [cm]間隔で並んでいるとした。このBPMは両端でセラミックスタクトに接続される。各構造物の材質および導電率<sup>1</sup>は、真空容器とフランジが純チタンで18234.2 [S/cm]、電極がチタン合金(64-Ti)で6470.2 [S/cm]、BPM支持機構および電磁石取り付け架台はオーステナイト系ステンレスSUS304で14117.6 [S/cm]であり、すべて非磁性体である。この計算で励磁される中心磁場BとBPMの発熱量の関係を図3に示す。励磁される磁場は振幅が311 [Gauss]のcosin波形で、渦電流は磁場変化を妨げる様に発生するために、sin波形の振幅強度に比例する傾向を示した。

計算の結果、各構造物の絶縁の取り方によって渦

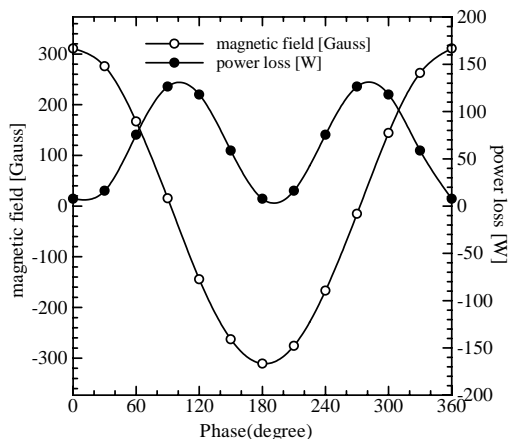


図3 磁場変化と発熱量

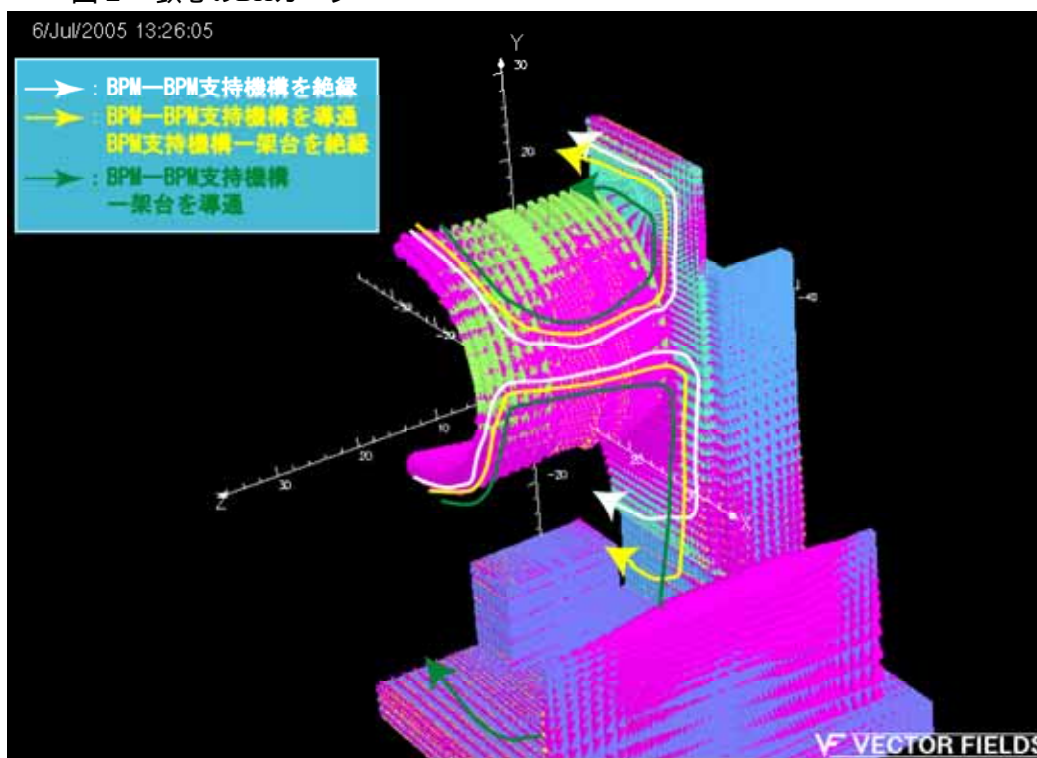


図4 渦電流ループ

電流の流れ方が変化することを確認した。すべての構造物を導通した場合の渦電流の計算結果を図4に示す。図では見やすくするために鉄心およびコイルを表示していない。BPMに流れる渦電流に注目すると、BPMフランジと支持機構間で絶縁を取るとBPMで発生する渦電流は真空容器とフランジ間でループを作る。またフランジと支持機構を導通し、支持機構と架台間を絶縁した場合と、すべて導通した場合にはそれぞれBPM - 支持機構、BPM - 支持機構 - 架台の大回りのループが確認された。図5に各部位の時間平均の発熱量を示す。BPMの発熱量に着目するとCase A (BPM - 支持機構 - 架台で導通) がもっとも発熱し134 [W]であり、Case B (BPM - 支持機構で絶縁、支持機構 - 架台で導通) が106 [W]、Case C (BPM - 支持機構 - 架台で絶縁) で86 [W]であった。これはBPMのみで渦電流ループを作る場合と比べて、支持機構、架台をループした場合はそれらの部位で発生する渦電流を受け取り、BPMに流れる渦電流が増加するためである。支持機構についてはCase Aが112 [W]、Case Bが70 [W]、Case Cが36 [W]であり、絶縁の取り方によって最大3.1倍の違いが現れる。架台に関しては絶縁の取り方にはあまり依存せず、たかだか4%程度の違いである。

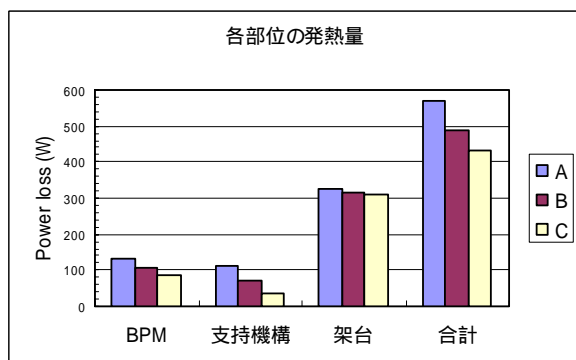


図5 絶縁の取り方による発熱の比較

### 3. 温度上昇の評価

Case Bの絶縁の取り方を採用し、交流磁場振幅が150 [Gauss]で運転した場合、熱平衡時の温度上昇を1次元で評価する。ここで、渦電流による発熱は磁場振幅の2乗に比例するので、発熱は上記計算結果の $(150/311)^2$ 倍である。計算では輻射熱伝達を無視し、BPM真空容器、BPMフランジ、支持機構について独立(真空容器 - フランジ、フランジ - 支持機構の間で伝熱がない)に評価する。

#### 1) 真空容器

純Tiの伝熱コンダクタンス $D$ 及びフィン(リップ)付壁面の伝熱コンダクタンス $D_f$ はそれぞれ式(1)、(2)のように表される<sup>2</sup>。

$$D = \frac{\lambda A}{l} \text{---(1)}$$

$$D_f = (A_0 + \eta A_f) h \text{---(2)}$$

ここで、

$A$ : フィンが付いていない面 (BPM内壁) の面積 0.20466 [m<sup>2</sup>]

$A_0$ : フィン付面 (BPM外壁) で、フィンが付いていない部分の面積 0.11695 [m<sup>2</sup>]

$A_f$ : フィン表面の面積 0.38009 [m<sup>2</sup>]

$l$ : 壁の厚さ 0.001 [m]

$\lambda$ : 壁の熱伝導率、純Tiの値 17 [W/(mK)]

$h$ : フィン付面と流体の熱伝達率 [W/(m<sup>2</sup>K)]

$\eta$ : フィン効率

ここで真空容器内は真空中で輻射熱を無視するので、容器内面いたるところで等温であり、容器内面の温度を $T$ 、外気温度を $T_g$ とすると、容器外面からの放熱量は

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{D} + \frac{1}{D_f}} (T - T_g) \text{---(3)}$$

である。 $h=14$  [W/(m<sup>2</sup>K)]<sup>3</sup>、 $\eta=0.6$ と仮定するとトータルの伝熱コンダクタンスは4.8 [W/K]である。発熱が18 [W]より、外気温度に対する容器内壁の温度上昇は3.75 [K]である。

#### 2) フランジ

フランジ表面から外気への放熱量は式(2)をフィン無しの場合の伝熱コンダクタンスで置き換えて、トータルの伝熱コンダクタンスは3.5 [W/K]となる。発熱が6.0 [W]よりフランジ内部の温度上昇は0.58 [K]である。

#### 3) 支持機構

SUS304の熱伝導率を $\lambda = 62$  [W/(mK)]とするとトータルの伝熱コンダクタンスは4.9 [W/K]であり、発熱が16.2 [W]より支持機構内部の温度上昇は3.3 [K]である。

## 4. まとめ

25 [Hz]の交流で運転される補正電磁石内部のBPMについて、渦電流による発熱量をOPERA3D/ELEKTRAを用いて評価した。発熱は、BPM、支持機構、架台間の絶縁の取り方に大きく依存し、それぞれを絶縁した場合もっとも発熱が小さくなる。特に支持機構については、すべて導通した場合はすべて絶縁した場合と比べて3倍発熱する。支持機構と架台のみ絶縁した場合についてBPMの真空容器、フランジ及び支持機構の外気温度に対する平均内部温度上昇度は、中心磁場の振幅が150 [Gauss]の25 [Hz]の交流磁場で運転した場合高々4 [K]程度であり、加速器運転上問題ないことが確認されたが、今後BPMの温度分布の評価も必要である。

## 参考文献

- [1] <http://www.kobelco.co.jp/titan/characteristic/>
- [2] 大島耕一他、「熱計算ハンドブック」ISBN:4-254-23070-2 C 305、朝倉書店(1992)
- [3] 熊谷教孝、OHO84(1984)