

## THERMAL DESIGNS FOR J-PARC MAGNETS BASED ON 3D DYNAMIC ELECTROMAGNETIC ANALYSES

Shigeki Tounosu<sup>1,A)</sup>, Mitsushi Abe<sup>A)</sup>, Takashi Watanabe<sup>B)</sup>, Kazunobu Nakamura<sup>B)</sup>  
Norio Tani<sup>C)</sup>, Toshikazu Adachi<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup> Hitachi Ltd. Power & Industrial Systems R & D Laboratory  
7-2-1 Omika-cho, Hitachi-shi, Ibaraki-ken, 318-1221

<sup>B)</sup> Hitachi Ltd. Hitachi Works  
1-1 Saiwai-cho, 3-chome, Hitachi-shi, Ibaraki-ken, 317-8511

<sup>C)</sup> Japan Atomic Energy Research Institute  
2-4 Shirone, Shirakata, Tokai-mura, Nakagun, Ibaraki-ken, 319-1195

<sup>D)</sup> High Energy Accelerator Research Organization  
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801

### Abstract

We developed 3D eddy current and thermal analysis technique and it was applied on J-PARC (Japan Proton Accelerator Complex) 3GeV synchrotron magnets. They are planned to operate at 25Hz AC mode and may become high temperature due to eddy currents. We optimized the slit structures of the magnets to reduce them, using the developed technique. The optimized structures were calculated to make it possible for magnets to operate with moderate temperature rises.

## J-PARC加速器マグネットの3次元動磁場解析に基づく熱設計

### 1. はじめに

日本原子力研究所と高エネルギー加速器研究機構では、世界最高級の陽子ビーム強度を有する大強度陽子加速器施設J-PARC<sup>[1]</sup>の建設を進めている。

J-PARCの3GeVシンクロトロンは、25Hzの交流運転であり、渦電流に基づく電磁石の温度上昇軽減が課題の一つに挙げられていた。そこで、加速器用電磁石の3次元渦電流・熱解析モデルを開発<sup>[2]</sup>し、交流運転時の渦電流損失や温度特性を評価した。

### 2. 電磁石構造

3GeVシンクロトロンは、周長約350mに沿って配置された四重極電磁石QM(Quadrupole Magnet)60台、偏向電磁石BM(Bending Magnet)24台で構成される。

QM、BMの構造概略を図1に示す。

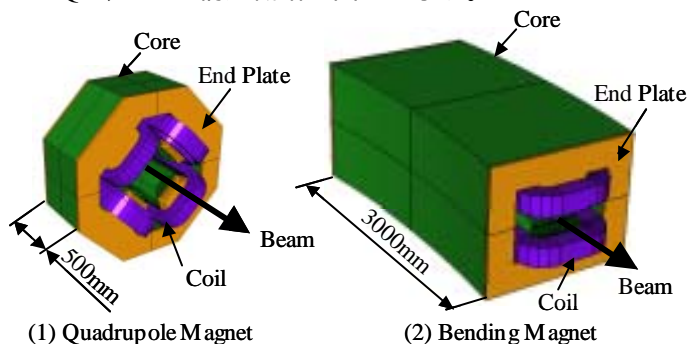


図1 電磁石の構造概略

鉄芯は、何れの電磁石も厚さ0.5mmの無方向性珪素鋼板をビーム軌道方向に積層して構成され、その両端をステンレス製端板で固定する。周囲に配置されるコイルは、アルミストランド線を用いて、渦電流による発熱を抑えた構造である。コイル電流は、交流に直流を重畳して用い、最大数千アンペアにもおよぶ励磁電流を25Hzで変化させる。

### 3. 3次元渦電流・熱解析モデル

解析システム全体は、メッシュ生成、動磁場解析、データ処理・変換および熱伝導解析から成る。ANSYSのプリプロセッサを用いて、動磁場/熱解析併用の3次元メッシュを作成する。動磁場解析には、有限要素法のEMSolutionを用い、渦電流による発熱損失の時間変化を計算する。得られた結果を処理し、時間的に平均化した渦電流損失を算出し、さらに実測結果を反映した珪素鋼板の鉄損を加え、熱伝導解析の発熱条件を算出する。最後に、ANSYSによる熱伝導解析により、電磁石の温度分布を計算する。

QMの3次元解析メッシュを図2に示す。解析領域は、対象とする電磁石の周囲に境界条件が影響しない程度の空気層を要する。要素タイプとして4面体~6面体を併用し、部位によってメッシュ分解能(渦電流の発生する鉄芯端スリット部は密、空気層最外部ほど粗)を変化させ、精度を確保しつつ現実的な時間での動磁場解析を実現させる。空気層も含めた全体のメッシュ数は、約10万である。

<sup>1</sup> E-mail: shigeki\_tounosui@pis.hitachi.co.jp

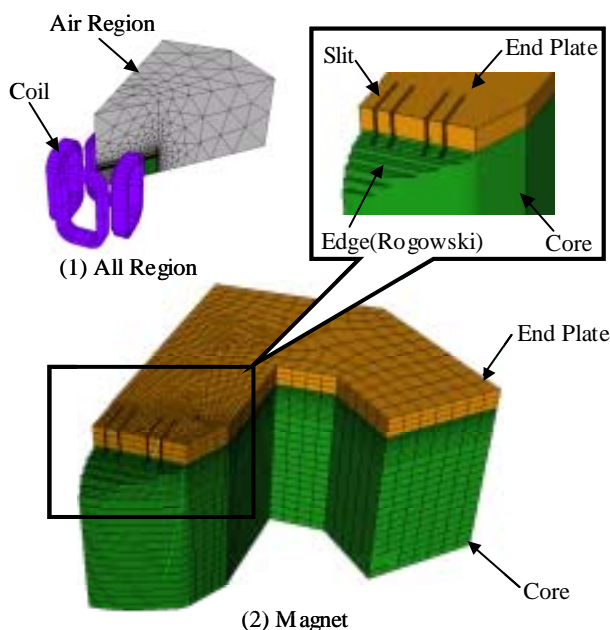


図2 QM解析メッシュ(1/16対称モデル)

電磁石周囲に配置されるコイルは、アルミストランド線を用いて渦電流の影響を抑制した構造であるため、外部電流磁場ソースとして取り扱った。メッシュ分割が不要になり、計算条件として電流値のみを与えれば良い。但し、対称性が適用できないため、全モデル化が必要となる。このように、コイルを外場として扱えるのがEMSolutionの特徴の一つである。

各材料の物性値は、カタログ値および各種ハンドブック掲載値を用いた。鉄芯部は、次の仮定を用いて、電磁・熱的な異質性を考慮した。積層方向に電流は流れない。積層構造を考慮した構成部材の等価熱伝導率を与える。鉄芯端ロゴスキー部は、接着剤固定、他は、圧着のみで製作される。そのため、積層方向の熱伝導率は、構造の違いにより補正した5.4W/(mK)、1.3W/(mK)を用いた。主な物性値を表1に示す。また、珪素鋼板のB-H特性を図3に示す。

表1 主な物性値

		Resistivity [ m]	Thermal Conductivity [W/(mK)]
Core	Laminate Direction		5.4 or 1.3
	Others Direction	$2.8 \times 10^{-7}$	36.8
End Plate		$7.0 \times 10^{-7}$	14.6

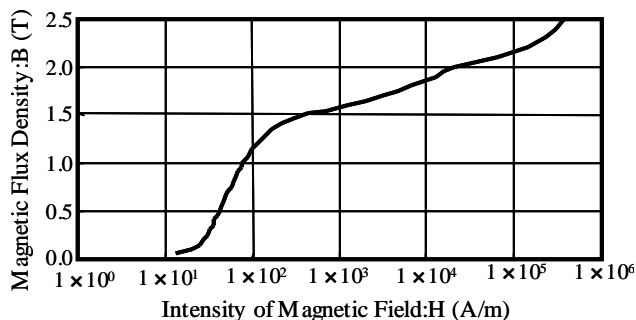


図3 珪素鋼板のB-H特性

電磁石周囲の冷却条件である熱伝達率は、自然対流伝熱と輻射伝熱から推定した14W/(m<sup>2</sup>K)一定とした。また、雰囲気温度の境界条件は、コイル隣接部位を50、それ以外を30とした。

#### 4. 解析結果

開発した解析技術を設計初期構造に適用した。コイル電流条件を、振幅515.5Aの正弦波交流に直流バイアス858.5Aとした時の渦電流ベクトル(瞬時値)の解析結果を図4に示す。(1)がコイル電流の時間微分値(dIc/dt)が正の領域である0.016Sec、(2)が負の領域である0.030Sec時の結果である。

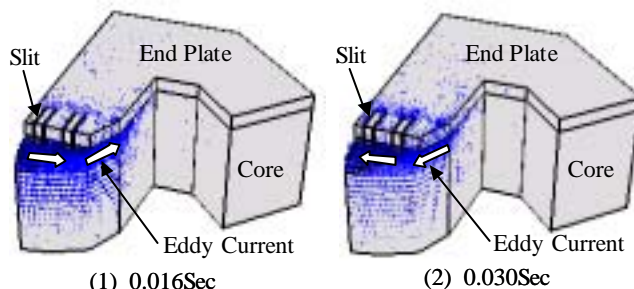


図4 初期構造QMの渦電流ベクトル図

渦電流は、磁束の時間変化を抑制する方向に発生する。25Hzで磁場が変動するため、図4に示した渦電流パターンを周期的に繰り返すことになる。初期構造では、渦電流抑制スリットが端板と鉄芯端ロゴスキー部の一部に設置されていた。しかし、ロゴスキー部に渦電流が集中して発生し、スリットによる抑制効果が小さいことが本解析により判明した。

端板および鉄芯の渦電流損失の時間変化を図5に示す。各部材全体の積分量であり、発熱量の時間変化が定常化した2周期分を示した。端板部は、(dIc/dt)の正・負の領域で同様の挙動を示した。一方鉄芯は、渦電流発生領域が広範囲に渡るため、複雑な挙動をした。端板と鉄芯を合わせた渦電流による発熱量の時間平均値は、5.0kWである。また、解析で得られた磁場特性を用いて実測値より概算した鉄損は、1.0kWであり、対象としたQMの全発熱量は、6.0kWとなる。全体の83%が渦電流損失である。

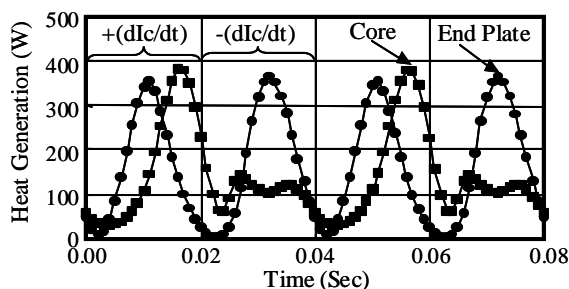


図5 初期構造QMの渦電流損失の時間変化

動磁場解析で得られた発熱条件を用いた熱伝導解析による初期構造QMの定常温度分布の結果を図6

に示す。最高温度は、常に渦電流が集中して流れた鉄芯端コーナー部に発生し、約147℃であった。制限温度は、珪素鋼板絶縁材や接着剤の健全性から150℃以下に抑えることが望ましい。解析精度を考えると、最高温度を低減させる必要がある。

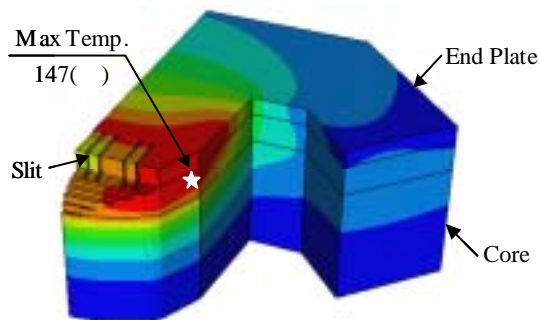


図6 初期構造QMの定常温度分布

熱伝導解析による改良構造QMの定常温度分布を図9に示す。最高温度は、渦電流軽減により101℃まで低下した。また、最高温度の発生部位も、ロゴスキー部とコーナー部スリット間へと移行した。以上により、制限温度を満足できる見通しを得た。

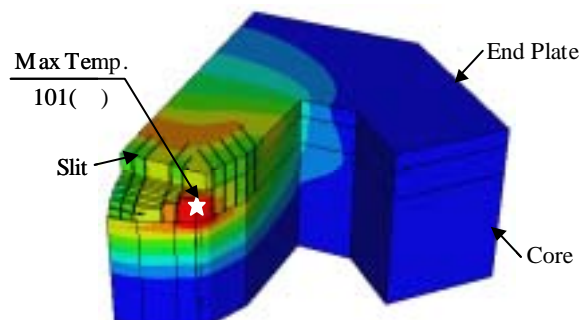


図9 改良構造QMの定常温度分布

発熱量全体の約80%が渦電流損失であり、それを軽減する必要がある。そこで、渦電流を抑制できるスリット構造を検討した。解析の結果、渦電流は、鉄芯部のロゴスキー全段およびコーナー部にも流れることが分かった。そこで、次の改良を検討した。

ロゴスキー部スリット深さを全段までとする  
鉄芯端コーナー部にもスリットを挿入する。

改良構造の渦電流ベクトル(瞬時値)の解析結果を図7に、渦電流損失の時間変化を図8に示す。スリット構造変更により、ロゴスキー部の渦電流が減少し、渦電流抑制効果が大いことが分かる。渦電流による端板と鉄芯を合わせた発熱量の時間平均値は、3.7kWであり、初期構造に比べて約25%低下した。鉄損に大きな差異は無く1.1kWであり、QMの全発熱量は、4.8kWまで低減した。

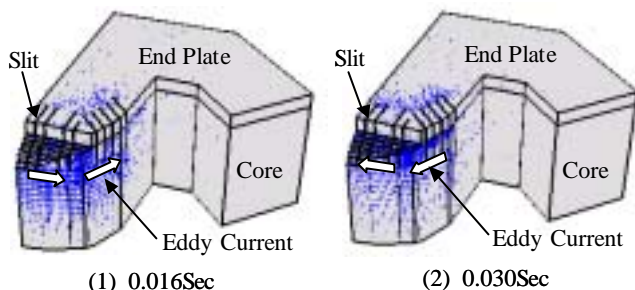


図7 改良構造QMの渦電流ベクトル図

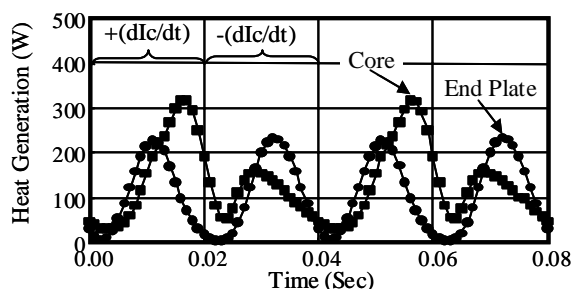
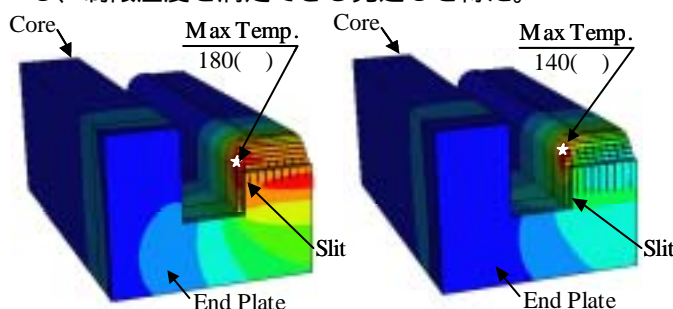


図8 改良構造QMの渦電流損失の時間変化

以上、QMの検討結果について詳細に示したが、BMも開発した解析モデルを用いて、同様に検討した。コイル電流条件を、振幅1166Aの正弦波交流に直流バイアス1562Aとした時の定常温度分布の解析結果のみを図10に示す。スリット構造を最適化して、最高温度を初期構造の180℃から140℃まで軽減し、制限温度を満足できる見通しを得た。



(1) First Design Structure (2) Modification Structure

図10 BMの定常温度分布の比較

## まとめ

加速器用電磁石の3次元渦電流・熱解析モデルを開発し、J-PARC3GeVシンクロトロン用電磁石の熱設計検討に適用した。四重極電磁石QM、偏向電磁石BM、何れの電磁石も初期設計構造では、渦電流による発熱により、制限温度を越える可能性があったが、磁極端スリット構造の最適化で改善できる見通しを得た。解析モデルの有効性が確認できた。

## 参考文献

- [1] Y.Yamazaki et al. : High-Intensity Proton Accelerators for the JAERI/KEK Joint Project : EPAC2000,Vienna,2000,pp.286-288
- [2] 阿部充志他, J-PARC加速器マグネットの渦電流・熱解析: 日本原子力学会2004年秋の大会予稿集, 第 分冊,p94