

3D ELECTROMAGNETIC AND THERMAL ANALYSIS TECHNIQUE FOR J-PARC MAGNET THERMAL DESIGN

Mitsushi Abe^{1,A)}, Shigeki Tounosu^{A)}, Norio Tani^{B)}, Toshikazu Adachi^{C)}

^{A)} Power and Industrial Systems R&D Laboratory, Hitachi Ltd., Moriyama-cho, Hitachi-shi, IBRAKI 319-1221

^{B)} Tokai Research Establishment, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195

^{C)} High Energy Accelerator Research Organization, Oho-cho, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801

Abstract

We developed a 3D Eddy current and heat analysis technique for the J-PARC 3 GeV synchrotron magnets design, and the accuracy were confirmed by the R&D magnets tests. They are planned to operate at 25Hz AC mode and may become high temperature due to eddy currents and hysteresis losses. We calculated both losses and temperature distribution on R&D magnets. The results showed that the eddy current joule losses are the major heat sources and slits are effective to reduce them. The calculated temperature rises were agreed with the test results. We have confidence the technique can be applied on the magnet design and reduction of heat generation.

J-PARC加速器マグネットの渦電流・熱解析手法の開発

1. はじめに

J-PARC[1](Japan Proton Accelerator Research Complex)の建設が、日本原子力研究所(JAERI)と高エネルギー・加速器研究機構(KEK)で進められている。3種の加速器で構成され、400MeVの線形加速器(LINAC)、3GeVおよび50GeVのシンクロトロンである。3GeVのものは25Hz運転であり、発熱・温度上昇が問題になり得る。本研究では交流運転での電磁石の発熱量と温度上昇を計算する手法の開発を行う。

電磁石のコアは薄板積層電磁鋼板である。理想的な状態では板面に並行に磁力線が流れ、発熱はヒステリシスとこの成分の磁場による渦電流であり、所謂鉄損である。しかし、実体系のビーム走行方向端部では磁力線が曲がり、板面を貫く成分がある。このため板面を大きく流れる渦電流が発熱を増大させる。この発熱を正確に見積もることが本研究では最も重要であるが、3次元(3D)の動磁場解析となり計算量の増大が問題となる。

本研究では、コイルを計算メッシュ外で外部回路として設定でき、また大メッシュと微細メッシュを共存させ易いEMSolutionを用い、メッシュ生成に大規模解析を行える工夫を加え、電磁石のフルモデルでの動磁場解析を可能とした。また、特別な仮定を導入せず、基本的な物理常数のみで温度上昇計算を行い、R&Dマグネット[2]での試験データを参考に手法の妥当性確認することで、実機設計に適用出来るマグネットの温度評価手法を確立する。

2. 計算手法

電磁石は、コイル、積層電磁鋼板、鋼板間絶縁剤および固定用端板から構成されるが、発熱には4種類の起源を考えている。それらは、(1)積層電磁鋼板の薄板面方向に流れる渦電流による発熱、(2)非

磁性の端板を流れる渦電流による発熱、(3)積層電磁鋼板のヒステリシス損失による発熱、(4)積層鋼板の薄板面方向の磁場によって誘起される渦電流による発熱、である。(1)と(2)は渦電流発熱で、それぞれの発熱量を非線形動磁場シミュレーションにより精度良く見積もる。(3)と(4)は併せて鉄損として実験的に評価した値を用いる。

非線形動磁場解析には、サイエンスソリューションズのEMSolutionを使う。この計算では電磁鋼板磁化のヒステリシスは考慮しないが、交流運転における積層電磁鋼板各領域(有限要素毎に)における磁場の振幅と平均値を把握し、実験的に求めた鉄損値表と比較して鉄損を評価する。

2.1 解析モデル

今回の手法の開発で、解析対象としたものは図1に示す2つの電磁石である。共にR&D電磁石で、四極および偏向電磁石で、それぞれQM、BM電磁石と呼ぶ。動磁場解析には対称条件を付加して、それぞれ1/16, 1/8の解析メッシュモデルを用いる(図2)。要素数はそれぞれ12万, 5万である。

電磁石を構成する鋼材の物性値は表1で、電磁鋼板はNKK50BF470である。積層電磁鋼板については次の物性値としている。

(a) 積層鋼板部分では積層方向の抵抗率を ∞ として積層状態を模擬

(b) 積層方向の熱伝導率は、パッキングファクタ(98%)で空気または樹脂と鋼板の重ね合わせで求めた等価熱伝導率を利用。鋼板間を樹脂で張り合わせた場合で5.4W/mK、樹脂を使わず鋼板間が空気ギャップの場合には1.26W/mK。

電磁石表面からの熱放出には、熱伝達率14W/Km²を用いる。この値は、一般的な垂直平板(水平円柱)自然対流の実験整理式[3]を用い、輻射率 ε は、電

¹ E-mail: mitsushi_abe@pis.hitachi.co.jp

磁石表面が塗装されていることから0.9[4]とした場合に、100[K]程度以下の温度上昇の場合に考えられる熱伝達率である。これ以上の温度上昇の場合は、熱伝達率は大きくなり、安全側の評価になる。

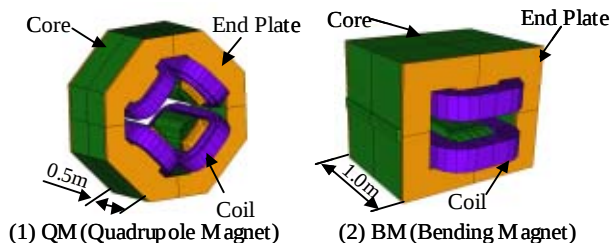


図1 R&D電磁石の構造概略

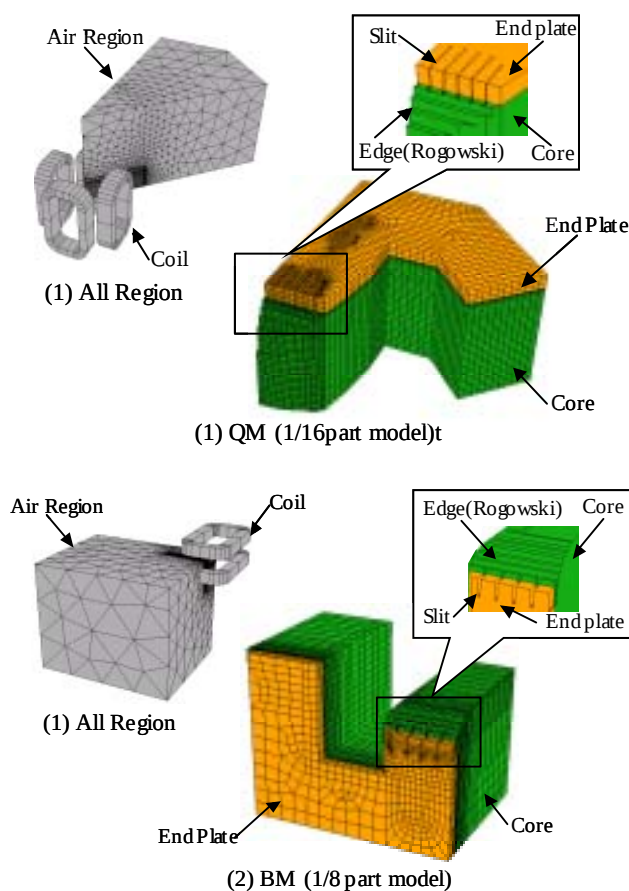


図2 R&D電磁石の解析メッシュ

表1 電磁石構成材料の物性値

		Resistivity (Ωm)	Thermal Conductivity ($\text{W}/(\text{mK})$)
Core	Laminate Direction	∞	5.4 or 1.26
	Others Direction	2.8×10^{-7}	36.8
End Plate		7.0×10^{-7}	14.6

3. 解析結果とR&D試験結果

通電は直流成分 I_{DC} と交流成分 I_{AC} の組み合わせで行われる。図3のような通電電流であるが、 I_{max} は I_{DC} と I_{AC} の和であり、 I_{min} は I_{DC} と I_{AC} の差である。試験条件は表2に示す通りである。

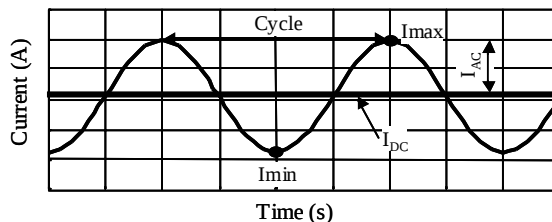


図3 コイル印加電流パターン

表2 R&D電磁石の試験条件

Magnet	Turn	$I_{DC}(\text{A})$	$I_{AC}(\text{A})$	Frequency(Hz)
QM	32	900	520	28.1
BM	36	1200	520	26.8

試験周波数は実機条件と異なっている。電源と電磁石の共振条件が差異のためである。鉄損・ヒステリシス損は25Hzで実測されているので、周波数に比例すると仮定して、それぞれの周波数に換算した。

図2に示した計算メッシュで図3の電流を入力して計算を実行した。温度上昇は十分時間が経過した後(1日オーダ)の定常状態におけるマグネットの温度を問題とする。そこで、長時間通電時の平均発熱量(W)を求め、その発熱量での温度上昇を見積もった。図4はBM(R&D機)通電開始時からの中心磁場と発熱量変化を示す。26.8Hzで共に変動しているが、磁場は数回の繰り返しで0.1秒の間にほぼ定常状態となり、発熱量も当初直流成分で大きな発熱量が観測されているが、0.7秒から後では定常状態になっている。そこで、マグネットの発熱量としては図4の最後の2周期分を時間平均した発熱量(W)を用いた。通電は26.8Hzであるが、発熱はその倍の周波数53.6Hz成分が支配している。

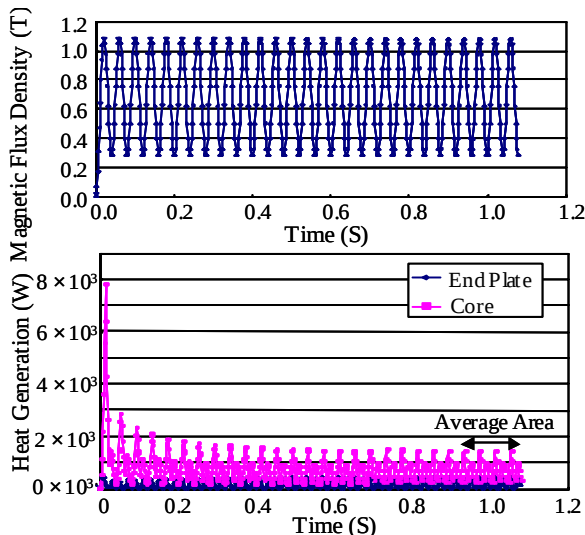


図4 BM(R&D機)の中心磁場と発熱量の時間変化

鉄芯側の発熱でピーク値が弱い時刻は、電流値が下がるタイミングである。電流が上昇する時の発熱が大きい。これは電流上昇時に発生する渦電流は鉄の大きな透磁率のために減衰時定数が大きくなっており、電流が上昇するときには渦電流が積算されて行くが、電流減衰時にはこの積算された渦電流が解

消されるためである。

解析で得られた各メッシュにおける渦電流と鉄損の発熱密度を比較すると、最大値で3桁異なるが、渦電流による発熱は非常に局在しているため、体積分していくと、表3のように同じオーダの発熱量となる。実験条件での鉄損は、全発熱量の1/4-1/2である。BMで発熱量が小さい理由は、実験が定格より小さな電流で行われたためである。

表3 R&D電磁石の試験条件での発熱量計算値(kW)

Magnet	Frequency(Hz)	Eddy current	Iron loss	Total
QM	28.1	3.49	1.12	4.61
BM	26.8	1.3	1.2	2.5

BM(R&D)電磁石の温度上昇解析結果を図5(1)に示す。雰囲気温度を7.7℃としている。また、コイルの温度は30℃と考え、コイル近傍の雰囲気は30℃とした。つまりコイル近傍では30℃の雰囲気に対して14W/Km²で放熱する。この雰囲気条件はBM,QM共に同じである。最高温度計算値は中央端板の50.7℃(上昇分は43℃)であるが、この近傍の端板先端部での計測値は41.7℃の温度上昇で、この位置での計算値は37℃の温度上昇であった。他の計測点について解析値との比較を図5(2)に示す。磁石中央部の端板から奥に向かって6点を比較している。

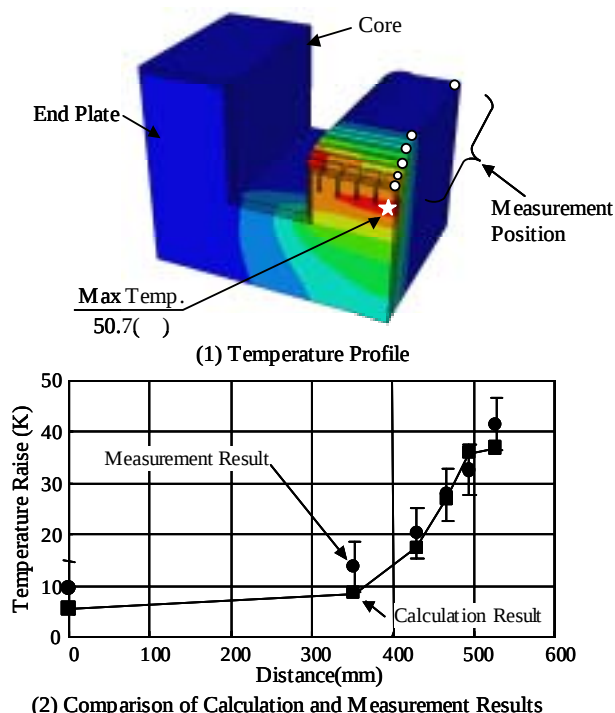


図5 BM(R&D機)の温度上昇解析結果

は端板であり、は奥行き方向(ビーム方向)の中央である。発熱部が端板付近に集中しているので、は温度が低い。端板と積層電磁鋼板の間は密着していると仮定しているが、実際には空隙が存在している可能性が高い。温度分布で間の勾配が実測で大きくなっている理由はこの原因があると考えて

いる。結論として最高温度上昇を10%程度の誤差で予測できていると言える。

QM(R&D)電磁石の定常運転時の温度分布と計測点を図6に示す。また表4に温度上昇分の計測値と解析値の比較を示す。端板の端部でコイルに近い部分ので誤差が大きくなっているが、この部分では磁石表面からの放熱を30℃に対して考えているが、実際には7.7℃に近い状態で、特に誤差が大きくなっていると考えられる。しかし、最高温度部のでは実測値と解析結果に大きな差異が無く、磁石の最高温度は本計算手法で良く検討できることが解った。

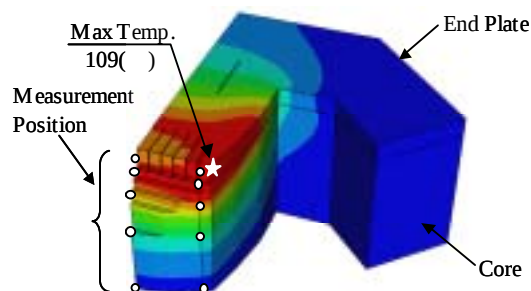


図6 QM(R&D機)の温度分布

表4 QM(R&D機)の温度上昇値(K)の比較

No.	Measurement	Calculation	No.	Measurement	Calculation
1	77.4	79.5	4	74.2	93.1
2	97.9	93.7	5	96.2	100.3
3	61.5	76.6	6	72.1	81.1
4	49.9	46.3	7	49.0	46.2
5	38.5	29.8	8	37.2	29.5

4. 結論

J-PARC加速器の電磁石において、交流運転による発熱で温度上昇が問題となり得る四極(QM)と偏向電磁石(BM)について発熱量を求める電磁解析と温度上昇を計算する熱解析を行った。その結果次のことが解った。

- (1)発熱量は積層面を通過する磁場成分により誘起される渦電流による発熱が、鉄損によるものより大きい。また、渦電流発熱が局在している部分で最高温度上昇になる。
 - (2)最高温度上昇は10%程度以内の誤差で予測できる。
- 本結果は、実機電磁石の評価に活用できることを示しており、実機設計において、発熱・温度上昇を抑えるスリット配置最適化の検討に用いている。

参考文献

- [1]Y.Yamazaki et al. : High-Intensity Proton Accelerator for the JAERI/KEK Joint Project : EPAC2000,Vienna,2000,pp.286-288
- [2]N.Tani et al. : Design of a dipole magnet for the 3-GEV proton synchrotron of the JAERI/KEK joint project :EPAC2002,Paris,2002,pp.2376-2378
- [3]日本機学会 : 伝熱工学資料
- [4]甲藤好郎 : 伝熱概論 : 養賢堂