ビーム軌道補正用四極電磁石の真空ダクトの設計*

神谷 潤一郎^{*1}・金正 倫計^{*1}・林 直樹^{*1}・發知 英明^{*1}
 荻原 徳男^{*1}・谷 教夫^{*1}・渡辺 泰広^{*1}

Design Consideration of Beam Duct for Quadrupole Correctors in J-PARC RCS

Junichiro KAMIYA^{*1}, Michikazu KINSHO^{*1}, Naoki HAYASHI^{*1}, Hideaki HOTCHI^{*1},
 Norio OGIWARA^{*1}, Norio TANI^{*1} and Yasuhiro WATANABE^{*1}

^{*1}J-PARC center, Japan Atomic Energy Agency, 2-4 Shirane Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195, Japan

(Received November 23, 2013, Accepted December 24, 2013)

In J-PARC 3GeV synchrotron (RCS), new quadrupole magnets (quadrupole correctors) are planned to be installed in order to correct the edge focusing effect and tune. In this report, we describe a deliberation flow about the design of the beam ducts, which is installed in the quadrupole corrector. The effects of eddy current were examined in the case of the titanium duct. The calculated results showed that the temperature rise was too much (up to over 350°C) and the magnetic field in the beam duct is largely distorted. Therefore we decided to employ an alumina ceramics beam duct. The stress and displacement, which are caused by the atmospheric pressure, were estimated by simulating the realistic equipments in the beam line. It was found that there was no large stress and displacement by installing the alumina ceramics duct.

1. 序 論

加速器において、ビーム軌道を制御するためにさまざまなパターン電磁石が用いられる。パターン電磁石は、時間的に一定の磁場を発生する直流電磁石とは異なり、時間的に変化する磁場を発生する電磁石である。そのようなパルス電磁石の開閉部に設置するビームダクトの設計は、直流電磁石用ビームダクトに比べて検討課題が多い。なぜなら時間的に変化する磁場により、ダクト材料には誘導起電力が発生し、ダクトの材料や構造に依存した渦電流が発生するからである。渦電流は発熱、ダクト内部の磁場の乱れを引き起こす。

J-PARC 3GeVシンクロトロン (Rapid Cycling Synchrotron: RCS) ではビームロス低減のために、ビーム軌道補正用四極電磁石の開発を進めている。この四極電磁石は2種のビーム補正機能を担っている。一つは、ビーム入射時間内におけるバンパ電磁石の入口及び出口での、不要なエッジ集束効果を補正する機能であり、もう一方は、ビーム加速期間中に変化するチューンをチューンスペースの安定領域内に維持する機能である。これらの機能を満たすために、ボア径φ290 mm、磁極長150 mmの四極電磁石6台が、RCSの各直線部の両端に設置される¹⁾。Fig. 1に磁場の時間応答を示す。磁場の繰り返し率は25Hzである。ここでGLは四極電

磁石によって発生する水平方向(x軸)の磁場勾配 $\frac{\partial B_y}{\partial x}$ をビー

ム進行方向(z軸)の距離で積分したもの $\int \frac{\partial B_y}{\partial x} dz$ の絶対値である。

このようなパターン磁場を発生する電磁石用のダクトの設計にあたっては、先に示したようにいくつかの検討課題がある。本報告は、ビーム軌道補正用四極電磁石の真空ダクトを

Fig. 1 Typical time response of the absolute magnetic field of the quadrupole corrector (solid curve), and the power, which is generated in a titanium duct of 2 mm thickness by eddy current (dotted curve).

設計するにあたっての検討課題とその検証結果を示すことを目的とする。ビームダクトの設計にあたって、次の検討手順を踏む。まずは、現在 RCS で使用している純チタン製のダクトで検討を始める。軌道補正用四極電磁石は磁場の時間変化率が多い(ダクトの位置で最大 318 T/s)ため、金属ダクトでは渦電流の影響が大きい恐れがある。そこで、渦電流による磁場の歪みと発熱を計算する。磁場の歪みと温度上昇が大きすぎる場合、真空チャンバの材料として絶縁材料であるアルミナセラミックスを選択する。アルミナセラミックスは RCS においては多数の実績がある²⁾。しかしながら、ビームラインの該当箇所にアルミナセラミックス製のダクトを設置し真空排気した際に、大気圧によって発生する応力及び変位は未知であり注意を要する。そのため、最大応力、変位が大きすぎないことを確認するために、実際のビームラインをモデル化し、大気圧に由来する応力及び変位を検証する。次項より上記検討の詳細を記す。また、実際に設計製作したビームダクトについても紹介をする。

* 平成25年11月26日 第54回真空に関する連合講演会で発表

^{*1} 日本原子力研究開発機構 J-PARC センター (〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4)

2. ビームダクトの設計検討

2.1 金属製ダクトにおける渦電流の影響の検証

ビームダクトの設計にあたり、純チタン材料を出発点とする。純チタン材は低放射化特性と低放出ガス特性を持つことから、J-PARCのビームダクトとペローズ材料として用いられている材料である^{3,4)}。渦電流を減らすためにはダクト壁の厚さをできるだけ薄くする必要がある。外圧をうける薄肉円筒の円周応力 σ_t は $\sigma_t = pr/t$ で与えられる。ここで p は圧力、 r は半径、 t は肉厚である。座屈応力 $\sigma_{t,cr}$ は $\sigma_{t,cr} = \frac{E}{4(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{r}\right)^2$ で与えられる。 E はヤング率、 ν はポアソン比である。Table 1 に薄肉の純チタン製円筒の肉厚と円周応力及び座屈応力の関係をまとめる。肉厚が2 mm よりも薄くなった場合は円周応力が座屈応力よりも大きくなり円筒は座屈する。

上述の結果から、2 mm 厚の純チタン製ダクトについて渦電流の影響を検証する。計算過程は以下のとおりである。まず、軌道補正四極用電磁石の三次元モデルを作成し、磁場解析を行う。計算は動磁場について行うので、渦電流による磁場の歪みが検証できる。また、得られた磁場分布から、ビームダクト壁内で渦電流により発生する電力容量を計算する。この結果を用いて熱解析を行い、ダクトでの温度上昇を計算

Table 1 Relation between circumferential stress and buckling load in changing the thickness of titanium cylindrical wall.

Thickness t [mm]	Circumferential stress σ_t [MPa]	Buckling load $\sigma_{t,cr}$ [MPa]	$\sigma_t < \sigma_{t,cr}$
4	3.5	24	○
3	4.7	13	○
2.1	6.7	6.7	$\sigma_t = \sigma_{t,cr}$
2	7.2	5.9	×
1	14	1.5	×

Fig. 2 Full and 1/8 model for the calculation of eddy current effects. The actual calculation was performed by the 1/8 model.

する。以下、詳細を述べる。

磁場解析及び熱解析で用いたモデルを Fig. 2 に示す。各面に対して対象性があるので、1/8モデルによって解析を行った。座標の定義も図中に示す。ビームダクトがある場合及びない場合について計算を行った。解析は有限要素法によるものであり、磁場解析、熱解析における要素数はそれぞれ約395000、237000であった。ダクトは肉厚2 mm、内径 $\phi 260$ mm、長さ600 mmである。電磁石の鉄芯は実際には打ち抜いたケイ素鋼板を積層して製作されるが、計算ではz軸方向の充填率が93%であるとして扱った。透磁率はケイ素鋼板の代表的なB-H曲線を用いた。Table 2 に計算で用いた純

Table 2 Physical properties of titanium, which are used for the calculation.

Relative permeability	1.00005
Electrical conductivity [S/m]	1.96E6
Thermal conductivity [W/(m K)]	17
Specific heat capacity [J/(kg K)]	520
Heat transfer coefficient to air [W/(m ² K)]	8.77

Fig. 3 Calculation result of time response of the magnetic flux density with and without the titanium duct at $(x, y, z) = (100, 0, 0)$ in mm unit.

チタン材の各特性をまとめる．熱解析において，ビームダクト表面から大気への熱除去は自然対流のみを考慮に入れた．

Fig. 3 は磁束密度の垂直成分 B_y の時間応答の，純チタン製ダクトがない場合とある場合についての計算結果である．磁束密度は，mm の単位で $(x, y, z) = (100, 0, 0)$ の位置のものである．純チタン製ダクトの存在により，磁束密度は有意に歪んでいることが分かる．歪みの度合いは磁束密度の時間変化率 dB_y/dt に依存するため，磁場パターンの各所で異なる．そのため，電磁石電源の設定によって補正することは非常に困難である．先の Fig. 1 に，純チタン製ダクトで発生する単位時間当たりの熱量の計算結果を破線で示す．全熱量の時間平均は 612W である．**Fig. 4** は熱平衡状態のチタン製ダクトの温度分布を示した等高線図である．磁束密度が高い電磁石のポール付近で，温度は 370℃ にもなることが分かった．以上の磁場解析・温度解析の結果から，ビームダ

Fig. 4 Calculation result of temperature distribution of a titanium duct at thermal equilibrium.

クトとして純チタンを用いることは受け入れられないと判断される．また他の金属においても，渦電流の影響は少なからず発生してしまう．そのため，我々はアルミナセラムックスをビームダクトの候補として選択することとした．

2.2 アルミナセラムックス製ダクトにおける応力の影響

アルミナセラムックス製ビームダクトに関して，J-PARC RCS では多くの実績がある^{2,5)}．本ビーム軌道補正用四極電磁石のビームダクトは構造が単純であり，偏向電磁石用ビームダクト等と比較して製作上の大きな困難はないと思われる．検証すべき課題は，ビームラインに設置し真空排気した際に，大気圧によって発生する応力及び変位が大きすぎないかということである．事実 RCS の建設当初，ビームラインを真空排気した際に，大気圧によりビームライン機器に変形・変位が発生したため，急遽電磁石からダクトを強固に支持する機構を追加した．そのため補正用四極電磁石用ビームダクトを実際インストールするビームライン領域のモデルを作成し，構造解析を行った．

Fig. 5 は RCS ビームラインにおいてビーム軌道補正用四極電磁石及びそのダクトを設置する周辺の配置図である．電磁石からの支持機構によって固定された 2 つの固定点の間をモデル化した．計算は 2 つのケースについて行った．1 つは現状の系である (Case 1)．現状の系は Fig. 5 の E の場所には純チタン製ダクトが設置されており，このダクトは隣の偏向電磁石から支持機構で固定されている．他のケースは E の場所にアルミナセラムックス製ダクトを設置する場合である (Case 2)．アルミナセラムックス製ダクトは破損の恐れがあることから，電磁石の支持機構で強固に固定することができない．そのため他のアルミナセラムックス製ダクトと同様，ガラス繊維強化エポキシ樹脂製の支持架台にのせた構造とした．本解析における要素数は Case-1 で約 43000，Case-2 で約 41000 であった．境界条件について，モデル化した範囲の両端のフランジを固定とした．また，各支持架台の最下部は固定とした．応力を発生させる外力としては，大気圧及びそれぞれの装置の重さとした．

Fig. 5 A typical region and equipments of RCS beam line, where a quadrupole corrector and the beam duct are installed.

Fig. 6 Contour figures of the stress, which is caused by atmospheric pressure. Symbols A–G correspond to the equipments in Fig. 5.

Fig. 7 Contour figures of the displacement, which is caused by atmospheric pressure. Symbols A–G correspond to the equipments in Fig. 5.

Fig. 6 は各装置に発生する応力を等高線図で示したものである。図内の記号 A–G は Fig. 5 内の各装置に対応している。装置ごとの最大応力を図内に示す。ビーム軌道補正用四極電磁石のアルミナセラムックス製ダクト (E) については、最大応力は 17.8 MPa である。この最大応力はアルミナセラムックス材ではなくチタン製スリーブ部及びペロウズの端板に発生している。アルミナセラムックス材には 0–6 MPa 程度の応力しか発生していない。Case 1 の場合より最大応力が減ったのは、強固な固定点が無くなったため隣接機器に力が分散したからである。**Fig. 7** は変位量の等高線図である。装置ごとの最大変位量を図内に示す。アルミナセラムックス製ダクト設置後の Case 2 における変位量は、現状の Case 1 の場合とほとんど変わらないことが分かった。以上のように、アルミナセラムックス製ダクトをインストールした際の応力及び変位量は十分に小さく、問題とならないことが分かった。

3. ビームダクトの製作

アルミナセラムックス製ダクトの製造にあたっては RCS で実績が多数ある偏向電磁石用、及び四極電磁石用ダクトの製造過程を踏襲した^{2,5)}。**Fig. 8** に今回のビーム軌道補正用四極電磁石に設置するビームダクトの図面を示す。四極電磁石の磁極長は 150 mm であるが、磁極長の外側まで広がる磁場を考量して、アルミナセラムックス部の長さを決める必要がある。第 2 項での磁場解析・温度解析の結果も踏まえ、アルミナセラムックス部の長さは 350 mm とした。端面をメタ

Fig. 8 Outline view of the alumina ceramics duct for the quadrupole corrector.

ライズしたアルミナセラムックスの円筒部に純チタン製スリーブをロウ付けしている構造は量産機と同じである。本ダクトは偏向電磁石用アルミナセラムックス製ダクトと隣接しているためダクト間にペロウズが必須である。しかしながら本ダクトを設置するビームラインの長さは限られているため、ペロウズ単体を設置する余裕はない。そのため、純チタン製ペロウズをスリーブに溶接する構造とした。RF シールドは肉厚 0.5 mm、幅 5 mm の銅箔をアルミナセラムックス円筒部の外側に貼り付けた。アルミナセラムックス円筒部内面には二次電子放出係数を低減するために TiN コーティングを行った。TiN コーティングの膜厚は 10–30 nm である。

フランジについて、純チタンでは機械強度が弱いため、金属製真空シールを使用した際に条痕が付く等の問題が発生した。そのため放射化特性及び真空特性が純チタンと同等でありながら、優れた機械強度を持つチタン合金 Ti-6Al-4V をフランジ材とした⁶⁾。現在、6 台のビームダクトの製作が順調に完了し、ビームラインへの設置を行っているところである。

4. ま と め

ビーム軌道補正用四極電磁石のビームダクトについて、検討課題を洗い出し、検証を行いながら設計を固めていった。まず、金属製ダクトの場合の渦電流の影響の検証を行った。結果、ダクト内部の磁束密度の歪み及びダクト材料での発熱が大きいことから、ビームダクト材料に純チタンを用いることは不可能であると判断した。次にアルミナセラミックスをダクト材の候補とし、問題となり得る大気圧による応力及び変位の検証を行った。結果、応力は材料の耐力に比べ十分に小さいこと、及び変位は現状と比べて有意な差がないことが分かった。以上を基にアルミナセラミックス製ビームダクト

の設計、製作を進め無事完成に至ることができた。

謝辞

本論文における各種解析にあたり㈱テラバイトのご協力を感謝致します。また、アルミナセラミックス製ビームダクトの製作にあたっては㈱日立パワーデバイス（旧社名：日立原町電子工業㈱）のご協力を感謝致します。

〔文 献〕

- 1) H. Hotchi, H. Harada, N. Hayashi, M. Kinsho, P.K. Saha, Y. Shobuda, F. Tamura, K. Yamamoto, M. Yamamoto and M. Yoshimoto: *Proceedings of HB2012*, Beijing (2012) p.68.
- 2) Z. Kabeya, M. Kinsho and Y. Saito: *Shinku*, 49 (2006) 343.
- 3) N. Ogiwara: *Proceedings of IPAC2011*, San Sebastián (2011) p.971.
- 4) H. Kuris, T. Muranaka, N. Wada, S. Yamamoto, M. Matsuura and M. Hesaka: *J. Vac. Sci. Technol. A*, **21** (2003) L10.
- 5) M. Kinsho, Y. Saito, Z. Kabeya and N. Ogiwara: *Vacuum*, **81** (2007) 808.
- 6) J. Kamiya, N. Ogiwara, M. Kinsho, K. Kamakura, N. Hamatani, K. Hatanaka, M. Fukuda and K. Takahisa: *J. Vac. Soc. Jpn.*, **56** (2013) 157.