

## APPLICATION OF MO-TYPE GAPLESS FLANGE TO BEAM DUCT FOR HIGH-CURRENT ACCELERATORS

Y. Suetsugu<sup>1,A)</sup>, M. Shirai<sup>A)</sup>, M. Ohtsuka<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1 Oho, Tsukuba, 305-0801

<sup>B)</sup> OHTSUKA Co.,Ltd. 607-1 Ohson, Tsukuba, 300-3253

### Abstract

The MO-type flange, which can provide a gapless connection between flanges, was studied experimentally aiming to apply it to the beam duct for high-current accelerators. The test flange showed a good vacuum sealing property, although the aperture had a complicated shape, that is, the combination of a circular beam duct and a rectangular antechamber. The structural analysis well reproduced the observed deformation of flange, and utilized to optimize the structure. The MO-type flange is a promising one for the connection flange of the beam duct for future accelerators.

## 隙間のない接続フランジ(MO型フランジ)の加速器ビームダクトへの応用

### 1. はじめに

加速器ビームダクトのフランジ接続部では、通常、その隙間を埋める、いわゆるRFブリッジが装着される。RFブリッジには次のような性能が要求される。

- (1)隙間や段差の無い、滑らかな内面：HOMの励起を防ぎ、放電・発熱・不安定性の励起を抑える。
- (2)確実なRFコンタクト：接触不良部での放電・発熱を避ける。
- (3)熱的に高い強度：壁電流による発熱、不慮の軌道変化による異常入熱に備える。

近年の数アンペアもの大電流を蓄積する加速器では、このRFブリッジの重要性はさらに高まっている<sup>[1,2]</sup>。従来のRFブリッジは、薄い金属製フィンガーや、メタルOリングが使用されて来たが<sup>[2]</sup>、将来の大電流、短パンチの加速器を考えると不十分な点が多い。さらに、大電流加速器では、ビームから発生する強力なシンクロトロン放射光に対処するため、ビームダクトの開口面は、単純な円形や矩形ではなく、アンテチェンバー部を持つものとなる。RFブリッジも同様な形状となるが、従来のものでは構造が複雑となり、信頼性に欠ける。

最近Cバンド真空導波管用に開発されたMO型フランジは、ダクト断面形状に合わせた銅ガasketを用い、内壁部で真空をシールする<sup>[3,4]</sup>。銅ガasketがRFブリッジを兼ねることができ、確実な電氣的接触が保障され、内壁面に隙間も段差もほとんどできない。厚肉の銅であるから熱的強度も高く、大電流加速器ビームダクトの接続フランジに適していると考えられる。ただし、MO型フランジはこれまで導波管用に開発されたため、円形や矩形の開口構造では実績があるが、複雑な開口面に対してはまだ未知数である。そこで本研究では、MO型フランジが、将来のアンテチェンバー部を持つビームダクトを想定した、より複雑な開口面を持つ場合にも適応可能かどうか、実験的に調べた。また、構造解析から、フランジ構造の最適化も試みた。

### 2. 試作

試作したMO型フランジ、ガasketを図1に示す。開口(すなわちビームダクト)断面は、ビームが通る円形ダクト(図右側)に、偏向電磁石で発生したシンクロトロン放射光が通るアンテチェンバー部(図左側)があるもので、鍵穴型をしている。円形部の半径は45 mm、アンテチェンバー部の高さは14 mmで、円形部中心からアンテチェンバー部奥(左端)までの距離は112 mmである。フランジの厚みは25 mmである。真空シール部とガasketの断面構造はこれまでのCバンド導波管用角型フランジのものを踏襲している<sup>[3,4]</sup>。銅ガasketの厚みは1.5 mmで、フランジ面同士が密着した場合、ガasketの潰れは全体で0.5 mmとなる。ガasketの開口部寸法は、締め付けたときに内面が一致するように、フランジ開口部よりも0.15 mm大きくなっている。フランジのボルト穴の位置は、真空シール部にできるだけ均等

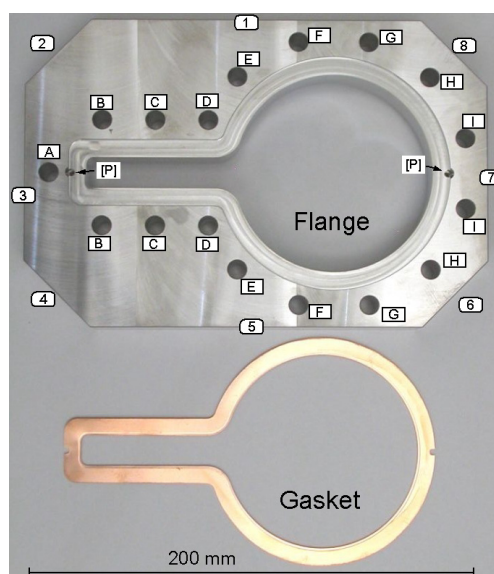


図1：試作したMO型フランジとガasket。

に圧縮力がかかるように配置したが、後で述べるように、この試作での穴位置は最適位置ではない。円形部とアンテチェンバー部の奥に、ガスケットおよびフランジ位置決め用のピン(図中[P])が設けられている。通常、フランジ間のずれ、ねじれは無い。

フランジの材質はステンレス(SUS316)で焼きなましは行っていない。ガスケットは焼きなまし純銅(C1011)である。試作品では、真空シール部表面、ガスケット表面とも鏡面加工は行っていない。

### 3. 試験結果

#### 3.1 締め付け力とリーク量

試験は、まず、各ボルトの締め付けトルクを一定に保ちながら締めていき、フランジ間の隙間とその時のリーク量をHeリークディテクターで測定した。片側フランジはブランク、もう片側フランジにはパイプ(φ60)を設け排気している。

各ボルトを均一なトルクで締め付けていった時の、フランジ縁での隙間(平均)を図2に示している。測定は3回行った。横軸の番号1-8は、図1中の番号[1]-[8]部分に相当する。[2]-[4]部で隙間が小さいのは、アンテチェンバー部分が締め付けられやすく、

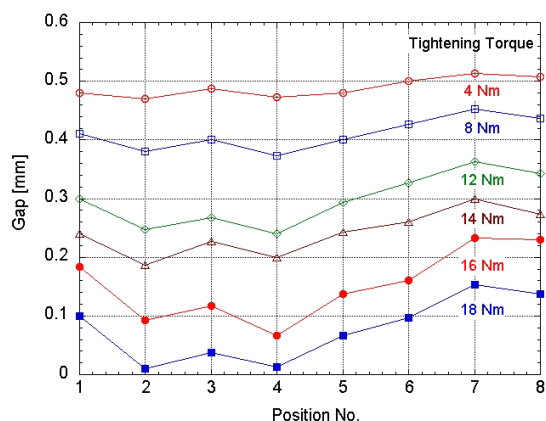


図2：均一なトルクでボルトを締め付けていった時のフランジ間の隙間。番号は図1中の番号。

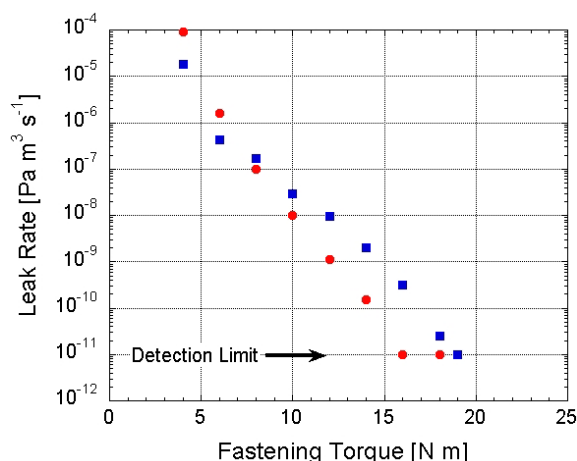


図3：均一なトルクで締め付けていった時のリーク量。

またフランジの歪みも大きいと考えられる。後述する構造解析でも同様の傾向が見られた。

締め付け力とリーク量との関係を図3に示している。測定は2回行った。16-19 N mでリークは止まった(リークディテクターの検出感度 $1 \times 10^{-11}$  Pa m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>以下となった)。この時の真空シール部に沿った線平均圧縮応力は340~380 N mm<sup>-2</sup>で、これまでの角型フランジでの真空シール試験での結果(300 N mm<sup>-2</sup>)よりやや高いが同等な値となっている<sup>[4]</sup>。

使用したガスケットの潰れ量を見ると、各ボルトを同じトルクで締め付けていった時、[A]と[I]部ではほぼ同じ潰れ量であるが(片側250 μm)、[D]部では、ガスケットを押さえる力が弱く、潰れが小さい(片側150 μm)ことがわかった。

#### 3.2 ベーキングとガスケットの再利用

上記試験において、リークが止まった後、150 24時間のベーキングを行った。別のガスケットを用い計2回行ったが、ベーキング後もリークは検知されなかった。ベーキングに対しても問題は無い。

再利用については、リークが止まった後、一旦フランジをはずし、再度締め付け力とリーク量を測定した。隙間は初回よりも小さく、約20 N mの締め付けトルクにてリークは止まった。さらに、別の試験でリークが止まった後、一旦ガスケットをはずし、表裏を入れ替えたが、同様の結果が得られた。位置決めピンの効果により、毎回ほぼ同じ位置でフランジを締め付けられることが効いていると考えられる。

#### 3.3 ずれがある場合

上記のように、フランジ間にずれが無い場合、このような複雑な断面を持つフランジでも真空シールが可能であった。しかし、実際に加速器ビームダクトを製作、またリングに設置する際には、ある程度の製作誤差、設置誤差を考慮する必要がある。そこで、フランジ間に、フランジ端で最大0.5mmのねじれ(約5 mrad)がある場合の試験も行った。ただし、ガスケット位置は片側フランジに固定されている。

フランジ開口面と同じ開口を持つガスケットを用いるとリークは止まった。フランジがずれても、真空シール部の面積が十分確保できればリークは止まると思われる。ただし、強い締め付け力が必要で(約23 N m)、現状ではフランジの歪みも大きい。また、その場合、ずれが無いときには内面に0.2 mmほど段差ができることになる。これらの点についてはより詳細な実験・検討が今後必要である。

## 4. 構造解析

#### 4.1 モデル

試作したM0フランジでは、上記のように良好な真空シール性が得られた。しかし、加速器ビームダクトへの実用を考えると下記の問題がある。

(1) すべてのボルトを均一なトルクで締め付けた場合、アンテチェンバー部フランジ([2]-[4]部)の

ひずみ大きい。リークは止まるが、その時フランジ間の隙間が一部0.1 mm以下と小さい。実用ではより余裕を持たせたほうが良い。

(2) ボルト[D]部付近でガスケットのつぶれが小さい、すなわち、この部分の圧縮力が小さく、締め付け力が一様ではない。安定した真空シールを得るためには、できるだけ様な締め付け力にしたほうが良い。

そこで、フランジ構造を最適化するために、フランジの応力、ひずみの解析を行った。フランジ材質はステンレス(ヤング率 $1.97 \times 10^5 \text{ N mm}^{-2}$ )とした。ガスケットは銅であるが、実際にはつぶれがあるので、ここでは仮想的に非常にヤング率の小さい物質(ヤング率 $1 \times 10^3 \text{ N mm}^{-2}$ )を仮定した。

#### 4.2 試作フランジの応力、ひずみ

試作フランジにおいて、各ボルトに600 Nの力を均一に加えた時のフランジ部の歪みを図4に示す。これは、締め付けトルク12 N mの場合に相当する。数字の符号が負であるのは、歪みがフランジ間隔を縮める方向であることを意味している。フランジの[2]-[4]部で歪みが大きく、実測(図2)と合っている。また、ボルト[D]部では歪みは小さく、圧縮力も小さいことがわかる。これもガスケット潰れ量の実測と定性的に合っている。ただし、ボルト[A]付近の真空シール部では、歪みも応力も[1]部付近より大きい。これは、計算モデルでは非常にヤング率が小さい物質をガスケットとして単純に仮定したが、実際にはガスケットが潰れることによって剛性が増したためと考えられる。

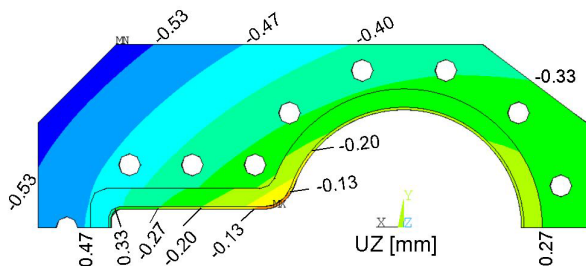


図4：均一なトルクでボルトを600 Nで締め付けた時のフランジのひずみ。

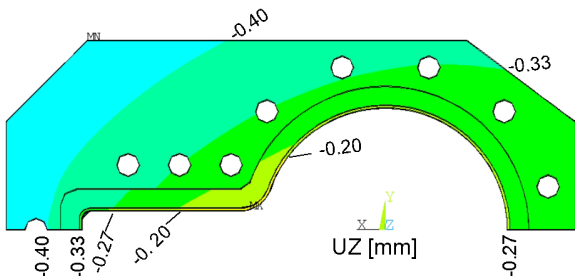


図5：図4と同じ締め付け条件で、フランジの厚みを30 mm、ボルト[B]と[C]をそれぞれ10 mm、5 mm円形部に近づけた場合のひずみ。

#### 4.3 最適化

この解析結果から、より一様な圧縮力を得るためには、ボルト[A]部の軸力を弱く、また、ボルト[D]部付近の軸力を強くすればよいと推定できる。例えば、ボルト[A]を使用せず、一方ボルト[D]の締め付け力を他の1.25倍(750N)にすると、[2]-[4]部のひずみは小さくなり、ガスケットに働く圧縮力の差も少なくなった。この条件で実際に締め付けたところ、フランジ間の隙間はより一様となり、リークが止まるトルク16 N mでの隙間もほぼ均一に0.2 mm程度となった。

しかしながら、実際の作業を考えると、ボルトは同じトルクで管理した方が間違いが少なく確実で、迅速な作業が可能となる。そのためには、ボルトの位置を変え、また、フランジの厚みを増してフランジのひずみを少なくすることが有効と考えられる。図5はフランジの厚みを30 mmとし、ボルト[B]、[C]を円形部に向けてそれぞれ10 mm、5 mm近づけた場合である。図4に比べて、歪みが小さくなっているのがわかる。

### 5. まとめ

MO型フランジを鍵穴型の複雑な断面を持つ加速器ビームダクトへ適用できるかどうか、実験的に調べた。試作フランジでは、 $340\text{-}380 \text{ N mm}^{-1}$ の線圧縮力で真空シールが可能であった。150 ベーキングでも問題なく、ガスケットの再利用も可能であった。また、約5 mradのフランジ間のねじれでも真空シールは可能であった。試作を基に、フランジの厚みを増し、またボルト位置を最適化して、より余裕を持って真空シールが可能となれば、加速器ビームダクトとして十分適用できる可能性が高い。今後は、最適なフランジ構造を追及し、実績を積むとともに、フランジ間にずれが生じた場合についてより詳細な考察を行っていく予定である。

### 6. 謝辞

本研究にあたり、高エネルギー加速器研究施設 松本浩氏、および柿原和久氏には大変貴重なご意見をいただきました。ここに深謝いたします。

### 参考文献

- [1] Y.Suetsugu, "Vacuum System for High Power Lepton Rings", Proceedings of Proc.PAC2003, Portland (OR), May 12-16, p.612, 2003.
- [2] K.Kanazawa et al., "The Vacuum System of KEKB", NIM-PR-A, Vol.499, p.66, 2003.
- [3] H.Matsumoto et al., "Development of the Vacuum Flange for the High Power RF Applications", Proceedings of the 24th Linear Accelerator Meeting in Japan, Sapporo, Jul. 7-9, p.271, 1999.
- [4] K.Kakihara et al., "C-band矩形導波管用フランジの検討", Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tokai, Jul 30 - Aug. 1, p.294, 2003.