

C-band 矩形導波管用フランジの検討

柿原 和久^{1,A)}、大越 隆夫^{A)}、池田 光男^{A)}、紙谷 琢哉^{A)}、
山口 誠哉^{A)}、杉村 高志^{A)}、大沢 哲^{A)}

^{A)} 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設
〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1

概要

KEK電子陽電子リニアック (S-band : 2856MHz, 電子 : 8GeV, 陽電子 : 3.5GeV) では、陽電子エネルギー増強を見据えた加速ユニットのC-band (5712MHz) 化について検討を進めている。8月には現在製作中の加速管をビームラインに設置し、その後加速試験を行う計画で、現在は加速管、導波管、ダミーロード等各コンポーネントの製作と評価試験が行なわれている。本報告では、このC-band加速試験の加速管及び導波管に採用することになったSLAC型矩形導波管用フランジ (メルディニアンフランジ) の設計、性能評価について述べる。

1. はじめに

現在検討が進められているSuperKEKB計画の中で、KEK電子陽電子リニアックは3.5GeV電子、8GeV陽電子の入射を求められている。すなわち現在の陽電子エネルギー3.5GeVに4.5GeVを積み上げる必要があり、その実現のために、S-band加速ユニットを約2倍の加速勾配が期待できるC-bandユニットに置き換えることが提案された。そして昨年、C-band加速ユニットを今年の夏季保守期間 (7、8月) に建設し、ビーム加速試験を行うことを決定した。

C-band加速ユニットを構成する加速管、導波管、ダミーロードの開発に先立ち、まずこれらを接続するためのフランジの仕様を決定することになった。与えられた数カ月間で、「十分な真空気密性」と「ロスの極めて少ない安定した大電力高周波伝送」という高周波対応真空フランジに要求される基本的な2つの項目を満足する新型フランジを開発することは困難であったことと、使用数量が比較的少ないことから、現在既にある高周波対応真空フランジの中で長期間の実績のあるSLAC型矩形導波管用フランジを選択し、C-band用としての設計と評価試験を行うことにした。

2. 矩形導波管用フランジの現状

S-bandシステムの大電力高周波伝送経路には2種類のフランジが使用されている。クライストロンの高周波出力部には、40年程前にSLACで開発され実績のある矩形導波管用フランジ (図1) が、それ以外の導波管と加速管にはKEK電子陽電子リニアック建設時にKEKと三菱重工(株)で開発した矩形導波管用

円形フランジ (図2) が使われている。

C-band用矩形導波管用フランジとしては、KEK松本氏が開発したMOフランジ^[1]がある。それぞれの主な特徴を以下に記す。

2.1 SLAC型矩形導波管用フランジ

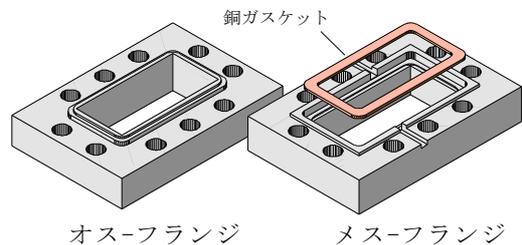


図1 : SLAC型矩形導波管用フランジ

- (1) 長期間に及び大電力高周波伝送経路に使用されてきた実績がある。
- (2) 550°Cの温度下で1週間以上保持しても真空シール性が維持できる。
- (3) オス-メス対のフランジで銅ガスケットを圧縮する構造のため、導波管としての寸法、組み合わせの管理が面倒。
- (4) オス-フランジのシール面及び角が無防備に出ているため傷付け易い。
- (5) 構造が複雑なためコスト高になる。

2.2 KEK矩形導波管用円形フランジ

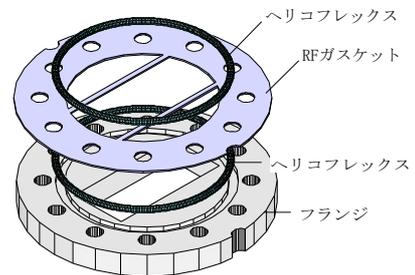


図2 : KEK矩形導波管用円形フランジ

- (1) 長期間に及び大電力高周波伝送経路に使用されてきた実績がある。
- (2) ヘリコフレックスシール (ル・カーボン・ローレンヌ社製、アルミニウム被覆、φ3.5) を使用しているため、真空シール性を維持できる温度は200°C以下まで。

¹ E-mail: kazuhisa.kakihara@kek.jp

- (3) オス-メスの無いフランジのため管理が容易。
- (4) シール面はフランジ表面より下がった構造なので傷が付き難い。
- (5) 真空シールとRFコンタクトが独立になっているため部品数が多い。フランジの接続にはRFガスケット1枚とその両側にヘリコフレックスシールを各1個使用する。

2.3 MOフランジ

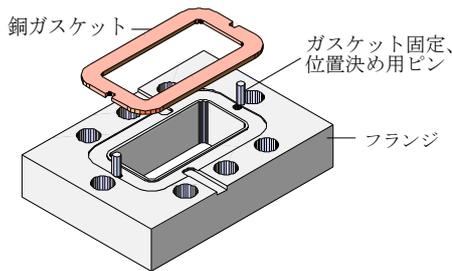


図3：MOフランジ

- (1) 大電力高周波伝送経路に使用されてきた実績は短期である。
- (2) 550℃の温度下で1週間以上保持しても真空シール性が維持できる。
- (3) オス-メスの無いフランジのため管理が容易。
- (4) シール面はフランジ表面より下がった構造なので傷が付き難い。
- (5) 真空シールとRFコンタクトが一体で、且つ導波管内表面の位置で行なわれているため、電気的接触は十分であると考えられる。

3. C-BAND SLAC型矩形導波管用フランジの設計

3.1 設計方針

C-band SLAC型矩形導波管用フランジの真空シール部及びRFコンタクト部の形状と寸法はS-bandのものと同様とし、ガスケット圧縮応力やフランジの強度が同程度となるように設計を行なうことにした。

3.2 S-bandフランジ真空シール部とガスケット圧縮応力

S-bandフランジのボルト締め付け前後におけるオス-メスフランジの位置関係とガスケット変形状態を図4に示す。オス-フランジとメス-フランジがガスケットを挟んで重なるAの部分の間隔aが1.6mmから小さくなるに従い、そこに生じる圧縮応力、剪断応力が増加し、ガスケットの変形が大きくなっていく。基本的に真空シールはA'で、RFコンタクトはBの部分で確保する構造である。

フランジのガスケット圧縮応力を求めるに当たり、使用されるステンレス鋼製M10六角穴付きボルト（鋼種区分-強度区分：A2-70）の軸力を、ボルト締

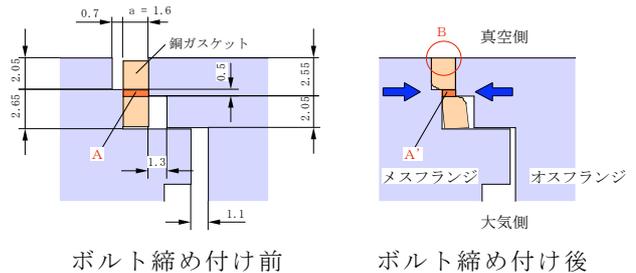


図4：真空シール部詳細

め付けトルクから14000N程度と見積もった。そしてフランジのボルト数量（10本）、真空シール部の周長（247mm）とその幅（0.5mm）からガスケット圧縮応力を1140N/mm²、線荷重を570N/mmと算出した。

3.3 ボルト

導波管がWRJ-3からWRJ-5に小型化することにより、C-bandフランジ真空シール部の周長も141mmに短くなる。ガスケット圧縮応力をS-bandフランジと同等にするには、141mm×0.5mm×1140N/mm²=80370Nのガスケット圧縮力が必要になる。ボルト数量が6本、8本、10本の場合、ボルト1本当たりの軸力は各々13395N、10046N、8037Nとなるが、仮にM8ボルトの使用を考えると、6本の場合は適正締め付け軸力の最大値（=0.7×耐力：450N×ボルトの有効断面積：36.6mm²）11529Nを超えてしまうので、8本が適当であるとした。同様にM6、M10ボルトの場合は14本、6本となる。

3.4 試験用フランジ

試験用フランジはSUS316L板材を使用し製作した、仕様の異なる3組のフランジ1～3とMOフランジである。図5に例としてフランジ1を表す。

- フランジ1 ボルト数：8、真空シール幅：0.5mm
- フランジ2 ボルト数：10、真空シール幅：0.5mm
- フランジ3 ボルト数：8、真空シール幅：0.4mm
- フランジ4 MOフランジ

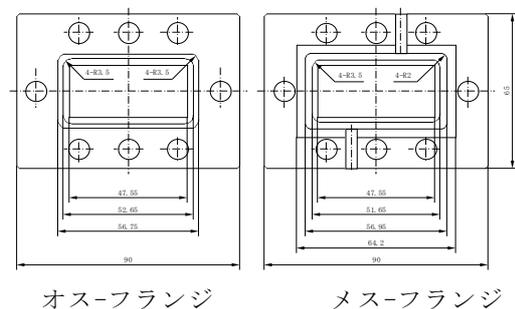


図5：C-band試験用フランジ1

4. C-BANDフランジ試験

C-band矩形導波管用フランジ試験は、まずボルトの締め付けトルクと軸力の関係を把握するために軸力測定を行なった後、真空シール試験、耐熱試験を行なった。

4.1 軸力測定

ボルト軸力計〔株〕東日製作所:1.3B-BTM〕とトルク測定器〔新日本ツール(株):MTQ-045N〕を用いて、ステンレス製六角穴付きボルト(A2-70)、平座金、バネ座金、六角ナットの組み合わせによるボルト軸力-締め付けトルクの関係性を求めた。以下の4条件で測定を行なった結果が図6である。

- (1) SUS小型六角ナット 潤滑剤なし
- (2) チタン製六角ナット 潤滑剤なし
- (3) SUS小型六角ナット MoS₂塗布
- (4) SUS小型六角ナット デフリックスプレー塗布 (株)川邑研究所

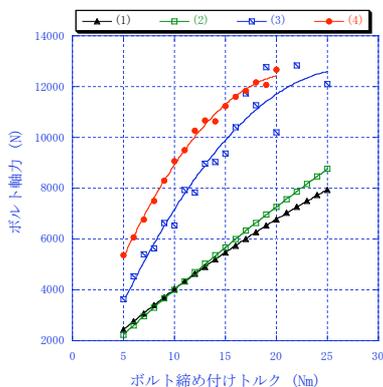


図6：ボルト軸力-ボルト締め付けトルク

ボルトの適正締め付け軸力の最大値:11529Nを得るには、潤滑剤が必要であることが分かる。

4.2 真空シール試験

試験用フランジとICF070フランジを図7のようにWRJ-5規格の導波管用にロウ付けして、ボルト締め付けトルク、ヘリウムリーク量、真空圧力の測定と銅ガスケット、フランジの表面状態、形状を観察した。

試験は次の手順で行なった。1)ガスケットをフランジ間にセットした後ボルトを通し、均等にバネ座金がつぶれる程度に締め付ける。2)軸力測定を行なったボルト軸力測定器を用いて5Nmから1Nm毎にボルト締め付けトルクを上げる。3)その都度ヘリウムリークディテクタによるリーク量の測定とノギスによるフランジ間隔の計測を行なう。4)リーク量が検知されなくなる $2 \times 10^{-12} \text{Pam}^3/\text{s}$ まで2)、3)を繰り返す。5)取り外したボルト、ナット類は毎回新品と交換する。

試験及び測定結果(図8)から分かった主な点を上げる。

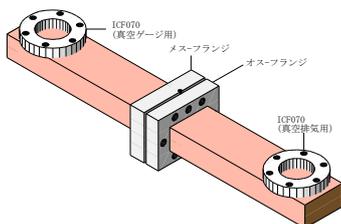


図7：真空試験用供試体

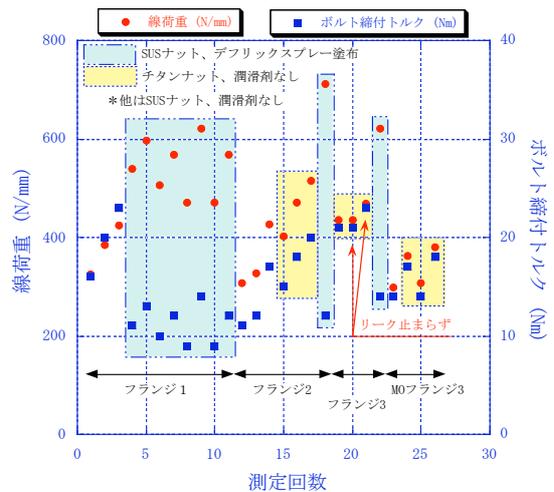


図8：真空シールに必要な線荷重

- 1) フランジ1、2、3全てで、測定回数が増える毎に真空シールの確保に要する線荷重が増えた。数回の使用で発生したオス-フランジシール部コーナーの変形と関連があると考えられる。
- 2) C-band SLAC型矩形導波管用フランジが必要とする真空シールのための線荷重は600N/mm程度であった。
- 3) 使用ボルト数が8本と10本を比較して、真空シール性に大きな違いは見られなかった。ただしボルト1本当たりの締め付けトルクを小さく、軸力に余裕が持てる。
- 4) ステンレスボルト、ナットの組み合わせでは、16Nmの締め付けトルクでもかじりが発生した。この組み合わせの場合は、十分なボルト軸力を得るためにも潤滑剤の使用が必須である。チタンナットにすると23Nmでも問題はなかった。
- 5) シール幅を0.4mmにして20%少ない線荷重での真空シールを期待したが、この結果から0.5mmの方が適していると判断した。
- 6) MOフランジは400N/mm以下の線荷重で真空シールが可能であった。

5. まとめ

C-band SLAC型矩形導波管用フランジを設計、製作、試験(200℃の加熱試験含む)を行なった結果、性能に関する根本的な問題は発生しなかった。レゾナントリングでの大電力試験では240MW、0.5μs、10pps (peak)に達している。ただし実際に使用してみてもデメリットも少なくないため、今後大量に扱う際にはMOフランジのように優れた点の多いフランジの採用が望ましい。そのための検討を今後更に進めていく予定である。

参考文献

- [1] H.Matsumoto and M.Ohtsuka, Proceedings of the 24th Linear Accelerator Meeting in Japan, Jul., 7-9, 1999