

DEVELOPMENT OF MO VACUUM SEAL FOR SUPERFLUID HELIUM

Kenji Saito ^{#,A)}, Fumio Furuta^{A)}, Taro Konomi^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Accelerator lab
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaragi-ken, Japan, 305-0801

^{B)} The Graduate University for Advanced Studies, Accelerator Science
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaragi-ken, Japan, 305-0801

Abstract

We have been used indium wire sealing for vacuum sealing in superconducting RF cavity (SRF). Indium seal is very reliable but not easy to handle. MO sealing has been developed for C-band high power waveguide as reliable vacuum sealing with RF zero impedance. This is much easier and cheaper than indium sealing. The RF zero impedance is very attractive to suppress wakefields beam induced. We have applied it for the SRF vacuum sealing. In this application, MO seal is exposed in the superfluid Helium to happen cold leak. We have finally succeeded to confirm this seal is leak tight in such the environment.

超流動ヘリウム極低温 MO シールの開発

1. はじめに

MO シール及びそのフランジ(MOF)は、C - バンド大電力導波管の接続用として KEK の松本浩氏と(株)オオツカの大塚美智夫氏によって開発された^[1]。これは、高い真空シール性と同時に RF Zero impedance 性を備えた優れたものである。我々は、このシール法を超流動ヘリウム環境に晒される超伝導空洞(SRF)の真空シールに試みた。使用材料の極低温での熱膨張係数の違い、汚染に敏感な SRF 特有な事情から元々の MOF 構造を変更した。そして、MO シールは超流動ヘリウム環境下でも優れたシール性能が得られることを実証した。また、MOF の設計思想である空洞組立の容易さをも実感することが出来た。

現在、SRF の分野ではインジウムワイヤー、DESY で開発された六角断面のアルミ合金リングやインジウムメッキした U-タイトシール等が使われているが、これらの高価なシールが MO シールに置き変わる日もそう遠くないかも知れない。

2. MO シールの特徴

MO シールの構造を図 1 に示す^[2]。ガスケットを角型エッジで噛み込み、真空シールする。外側からシール部を貫通する多少のキズがあっても、この噛み込みでそれを切るの信頼性よく真空シールができる。ガスケットは ICF と同じような板状リングである。ガスケットの構造はいたって簡単であり、コスト削減が期待される。

シールの内面は、ICF のような隙間がない。これが RF Zero impedance の重要な特徴である。ガスケットがフランジ両面でぴったり挟まれ、隙間が生じない。したがって、このフランジで締め付けられ

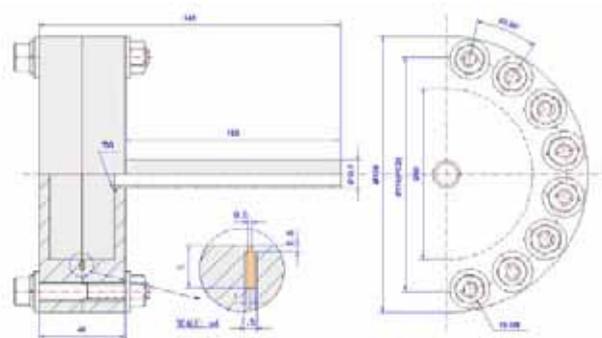


図 1 : MO フランジとシール構造(文献 2 より掲載)

たパイプの中をビームが走っても RF の高調波が励起されない。すなわち、RF Zero Impedance 構造である。

また、組立時にガスケットが動くのを防ぎ、均一に噛み込むようにロックピンで制御されている。そのために、空洞の横組立のようにフランジが垂直姿勢になった時でもガスケットは self-support されており、組立が非常に容易である。

3. SRF の他のシールとの比較

現在 SRF で使われているシールとの比較を行う。これにより、MO シールが SRF の応用に成功すれば

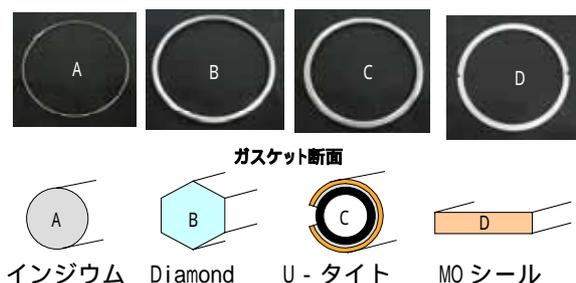


図 2 : SRF で使われているガスケット構造

kenji.saito@kek.jp

表 1 : SRF で使われているシールの特性比較

	シール法	ハンドリング性	締め付けトルク [Nm]	ガスケット材質	コスト [\$]	欠点
A	インジウム	不便	15	インジウム	24	除去が面倒。 インジウムによる汚染
B	Diamond	容易	30	アルミ合金	30	高いトルク
C	U-タイト	容易	15	インジウムメッキしたステンレス	120	非常に高価
D	MO シール	容易	15	純銅/純アルミ	5	

どれ程御利益があるかがはっきりする。図 2 に示すように、代表的な物として SRF で伝統のあるインジウムシール、TESLA-R&D の中で DESY が開発し、ILC スタンダードとなっている六角断面をしたいわゆる“Diamond”シール、KEK-STF で使われているインジウムコートした U-タイトシールなどが上げられる。これらのシールの特徴を表 1 にまとめた。インジウムはシールの信頼度が高いが、除去するのが厄介でインジウムの欠片が空洞内に入って汚染を起こす場合がある。Diamond は、トルクが高く、フランジの材質に制限がある。高価なニオブチタンなどの材質を選ぶ必要がある。U-タイトは、なんといてもコストが高すぎる。MO シールには大きなコスト削減が期待される。

4. 試験した二つの MO フランジ構造

超伝導空洞特有の理由で、図 1 の MOF 構造を図 3 に示すように変更した。空洞フランジ材質として SUS316L と純チタンの二つを試した。図 3 に示すように超伝導空洞のビームパイプは高純度ニオブであり柔らかくて (Hv=40~50)、ガスケットを噛み込めない。噛み込む位置をニオブの外のステンレスやチタンフランジ側にした。その結果、エアポケットが出来き、ガス抜き小さな溝が必要となった。

試験したガスケットは、内径 90mm、外形 100mm、厚み 1mm 程度の純アルミ (Hv=27) と純銅 (Hv=40) である。図 3 のようにパイプ内面で二つの MO フランジがぴったりくっつき合うように設計したが、ガスケットの噛み抵抗で、0.23mm の隙間が出来た。次の試験では、今回の結果をフィードバックして隙間をなくす予定である。

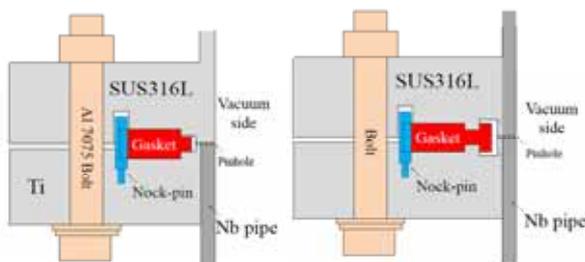


図 3 : 試験した二つの MO フランジ構造

5. 超流動ヘリウム中でのリーク試験結果

図 4 に示すように、片側に MOF をトルク 15Nm で

締め付けた L-バンドニオブ単セル空洞を真空封じして、2K 以下の超流動ヘリウムに 3 時間浸漬した後、常温に戻してリークディテクターで中に入ったヘリウム量を測定して、3 時間の間のリークレートを求めた。結果を表 2 に示す。

超伝導空洞の実機運転の時は、全てのシール部は液体ヘリウムタンク外の真空断熱内に位置する。従って、実機運転では超流動ヘリウムの空洞内へのリークは起きない。問題は、超流動ヘリウムにジャブ付けして空洞性能を正確に測る縦測定の場合である。この場合、空洞が超流動ヘリウムに浸っている時間は 3 時間程度である。そして、リークレートが $3E-8 \text{ Pam}^3/\text{s}$ 程度以下でなければならない。実際、表 2 は性能試験が出来た例で、その値より小さくなければならないことを示している。

表 2 は、どちらの MOF 構造に対しても純銅ガスケットの方が純アルミガスケットより、リークタイトであることを示している。これは、銅の弾塑性特性によるものと考えられる。銅は、応力が加わると加工硬化を起こしやすく、噛んだ時のフランジへの反力がアルミより強いと思われる。また、フランジ材質として、ニオブ合金よりも安価なチタンや SUS316L が使えることが分かった。シール締め付けボルトの材質は、アルミ合金、SUS316L の両方が使える。また、表 2 の結果は、ガスケットを多量にエッチングするとリークし易くなることを示してい



図 4 : MOF 溶接した単セル空洞

表 2 : リークタイト試験結果

MOF 構造	ガスケット	ボルト	リークレート [Pam ³ /s]	残留表面抵抗 [nΩ]	隙間 [μm]
Type-A	Al*	Al 合金	2.7E-8	18.5	0
	Cu	Al 合金	2.6E-11	19.5	230
	Cu	Al 合金	9.1E-9	27.0	230
	Cu	Al 合金	1.2E-10	23.0	230
	Cu	Al 合金	9.2E-12	19.0	230
Type-B	Al*	Al 合金	2.6E-8	18.5	150
	Cu	Al 合金	1.4E-11	19.5	230
	Cu	SUS	4.4E-11	17.9	230
	Cu**	SUS	6.6E-12	29.3	80
	Cu**	SUS	1.7E-9	24.9	0

Al*: 軽くエッチングしたアルミガスケット、
Cu**: 両面当たり 100μm 以上エッチングした銅ガスケット

る。これはエッチングによりガスケットの表面粗度が大きくなるためと考えられる。ともあれ、この実験で MO シールで、超流動ヘリウム下でリークレートが $1E-10$ ~ $1E-11$ 台の縦性能試験に十分ば真空タイト性が得られることが実証できた。

6. MOF 単セルニオブ空洞の空洞性能

表 2 の試験で測定した空洞性能結果の例を図 5、図 6 に示す。図 5 は、表 2 Type-A の 5 段目の試験である。今回の MOF の試験では、二つの空洞を使っている。どちらも既存の空洞の 80 側ビームパイプを切って EBW で MOF を再溶接した。この時、ビームパイプの長さが、我々の標準の 115mm から 105mm に 10mm 短くなった。そのために、空洞性能測定用に付けた input coupler のステンレス端版がより強い RF field の染み出しに晒され、RF ロスが増えた。その結果、Q 値が悪く見えている。表 2 に示した残留表面抵抗は、通常の $5n\Omega$ 程度より大きくなっている理由はここにある。RF 計算によれば、その残留表面抵抗の内、 $12n\Omega$ は SUS 端板からの寄与である。

もう一つ重要なことは、MOF の試験ではどちらの空洞も最初に化学研磨を施したことである。その後は、測定の度に空洞を分解して純水高圧洗浄を施した。図 5 では X 線が観察されず、化学研磨特有の純粋な Q-slope で制限されている。Type-A の MOF に対して測定された電界の範囲 (29MV/m レベル) では、空洞性能上への問題はないことが分かった。

一方、図 6 は表 2 の Type-B の 3 段目の試験結果である。個の場合、高電界の測定途中 29MV/m から X 線が発生している。しかし、これも基本的に Q-slope による制限である。Type-A と同様 Type-B の MOF は、測定された 36MV/m レベルまでは、問題などと言える。

7. Zero Impedance 実証の課題

既に述べたように、今回の設計では 1mm のガスケットを挟んだ場合、MOF の内側に 0.23mm の隙間が生じた。これでは Zero Impedance 構造ではない。4 節で述べたように表 2 の残留表面抵抗の $12n\Omega$ は、Input coupler の SUS 端板での RF ロスに起因する。

通常の我々の標準のビームパイプ長さ 115mm を持つ空洞の残留表面抵抗は $7 \pm 2n\Omega$ 程度である。115mm の 80 の場合の SUS 端板のロスによる残留表面抵抗の寄与は、計算で $5.3n\Omega$ (インジウムシールによる (0.2mm の隙間からの寄与を含む) と見積もられる。従って、空洞自身の表面からの残留抵抗は $1.7 \pm 2n\Omega$ 程度と見積もられる。これらのことから、80 の 105mm のビームパイプ付きの空洞の場合、ベースライン (インジウムシール) の残留表面抵抗 R^B_{res} は、

$$R^B_{res} = 12 + 1.7 = 13.7 (\pm 2) n\Omega$$

と計算される。

図 7 は、表 2 の残留表面抵抗と MOF の空洞ビームパイプ内面の隙間の大きさとの相関を示している。ガスケットを大量にエッチングしない場合、残留表面抵抗の値は、ベースラインに比べ $5n\Omega$ 程度大きい。

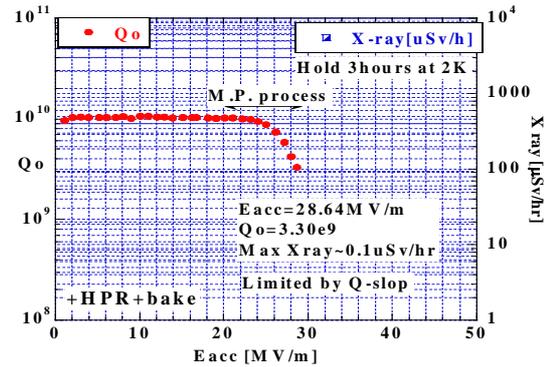


図 5 : Type-A の MOF を付けた空洞の性能

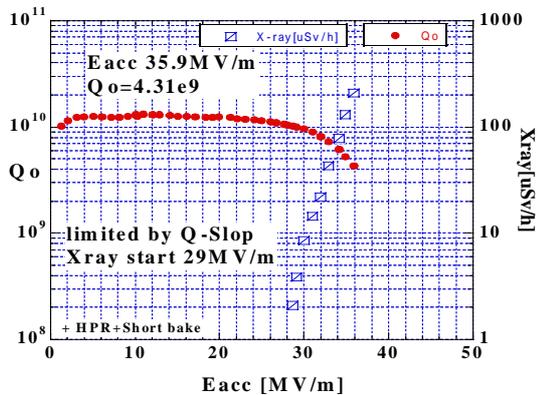


図 6 : Type-B の MOF を付けた空洞の性能

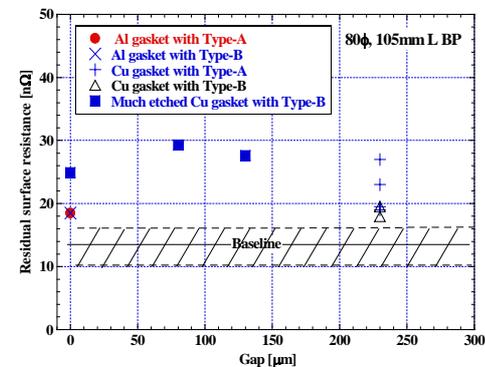


図 7 : MOF の空洞ビームパイプ内面のギャップの大きさと残留表面抵抗

また、多量にエッチングした場合、著しく増えている。これらの理由はわからず、今後の課題である。

8. まとめ

本実験で、MO シールは超流動ヘリウム環境で $1E-10$ ~ $1E-11$ Pam^3/s のリークレートであり、超伝導空洞の縦測定に要求される十分なシール性があることが実証できた。Zero Impedance 性の実証が今後の課題である。

参考文献

- [1] H.Matsomoto et al., PAC97, Proc. pp.530-532.
- [2] H.Matsumoto et al., EPAC06 proc., pp.753-755, MOPLS085