

超流動液体ヘリウム環境での Nb/SUS 異材接合およびシール法

青 寛幸^{1,A)}、井上 均^{B)}、斎藤健治^{A)}、佐藤伸彦^{B)}

^{A)}日本原子力研究所東海研究所 中性子科学研究センター

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

^{B)}高エネルギー加速器研究機構 工作センター

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

2K 超流動ヘリウム環境下で運転される超伝導空洞の製作においては、スーパーリークを起こさない接合およびシール方法を確立する必要がある。具体的には、ニオブ空洞本体と SUS フランジ材やヘリウムジャケットへの異材接合部、また、ヘリウム配管に用いるシール材などに十分な信頼性を確保しなくてはならない。これら異材接合の方法とシール材の利用について、各種 2K でのリーク試験の結果を踏まえて報告する。

1. はじめに

大強度陽子加速器計画では線形加速器の第二期計画として 400MeV から 600MeV の区間で超伝導加速空洞を用いることが予定されている。現在、統合計画向け超伝導空洞の R & D として、KEK では 2001 年はじめから 972MHz 単セル空洞 ($\beta=0.725$) の空洞製作を開始し、空洞測定を行うと共に、現在 972MHz 9-cell 空洞の製作¹⁾が進んでいる。

実機における空洞ではヘリウムジャケットで加速空洞の周囲を包む形で検討している。ジャケット材料としては SUS、チタンなどが有力な候補である。SUS の場合、ニオブとでは熱膨張係数が倍近く異なるため、接合面に生じる応力に耐える接合方法が必要である。さらにその後の空洞の処理では、750°C の真空熱処理が前提となるため、接合後も 750°C から 2K の範囲でヒートサイクルに耐えうるものでなくてはならない。我々は SUS の異材接合に関しては、以前から継続して HIP(Hot Isostatic Pressing) を用いた方法を試みてきており²⁾、強度、リークタイト性からも有用な方法として見通しがたちつつある。

クライオモジュールの内部構造として、組立の都合上リザーバタンクとの接続など、ヘリウム配管をフランジで接続する箇所が生じる。これらフランジ接合箇所には、インジウムより簡便なヘリコフレックス (U-TIGHTSEAL)、細い配管には VCR ガasket などの可能性を実際の試験を行って確認を進めることとし、2K 環境下でのシール性の確認をおこなった。

現在製作中の 972MHz 9-cell 空洞のビームパイプ部分には、シール材として、やはり従来のインジウムの代わりにアルミリングを用いる方向で検討を進め

ている。フランジには HIP 接合した SUS のフランジを採用し、アルミリングの使用に対応している。

これら HIP による異材接合、インジウムに代わるシール材は、実機に取り入れるべく信頼性の向上を計っているところである。

2. Nb/SUS HIP 接合の応用

2.1 ジャケットベース試験体の作成と試験

ジャケットベースとはヘリウムジャケット (SUS) とビームパイプ(Nb)の接合部分である。

これまでの試験においては、ニオブと SUS を直接 HIP した場合、マクロには熱膨張係数の違いによる応力の影響は見られず、また引っ張り試験においても 280~290MPa の十分な接合強度が得られていた。しかし接合面を SEM 観察でミクロに見たところ 5~10 μ m の穴が観察された。(図 1 参照) このような微小穴はスーパーリークの危険性を非常に増すことになる。このため今回はニオブと SUS の間に銅を挟み込んで HIP を行った。これは銅により双方の材料への濡れ性を改善し、微小穴の低減を試みたものである。(図 2 参照)

挟み込む銅の肉厚として 50 μ m の銅メッキを施したものと、1mm 厚の銅パイプを用いたものの、二種類を製作した。材料のカプセル化、真空封じ等を KEK で行った後、金属技研で HIP 処理を行い、三菱電機で HIP パイプ材からフランジ部分を実機よりも大きめに切り出し、二枚一組に溶接した試験体を構成した。

試験手順は以下のとおりである。

1. 試験体を 750°C 3 時間アニール。
2. 液体窒素温度と常温の間を 10 回ヒートサイクル。

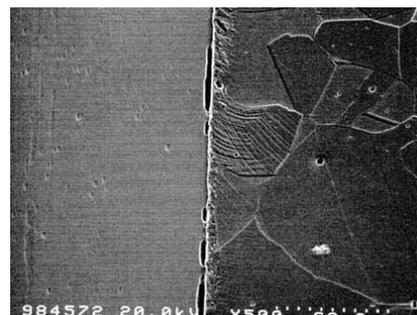


図 1 : Nb/SUS の接合面における微小穴

¹ E-mail: aohi@linac.tokai.jaeri.go.jp

3. 2K リークテスト。
各工程の間に適宜リークチェックを行っている。

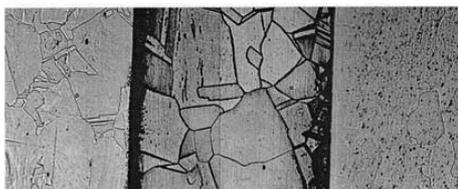


図2：(左から) SUS/Cu/Nb の HIP 接合面

2.2 試験結果

二種類の試験体は、それぞれ製作完了後まず常温でリークが無いことを確認した。次に750℃のアニールを行ったところ、銅メッキを用いたものはこの段階で常温リークが発生した。この厚みでは材料間に発生する応力^[4]に追従できず、リークの原因となったのではないかと推測している。一方、1mm厚の銅パイプを用いたものは、アニール後もリークは無く、以降の試験はこの試験体のみを用いることにした。

次に常温から液体窒素温度の間を10回、ヒートサイクルを実施。新たなリークが生じていないことから、2Kでのリーク試験に進み、リークタイトであることを確認した。

その後、この2Kを経験した試験体に対してもう一度750℃アニールからの手順(1~3)を繰り返し、通算3回の2K試験に耐えることが確認された。

3. VCR FITTING

VCR fitting は Swagelok 社のフランジで、ICFのようなエッジ部分でガスケットを挟み込むことでシールを行っている。試験では1/2インチのものを用いた。シールの材質として、SUS(表面はなめらかに処理されている)、SUS+銀メッキ、銅の三種類を準備し、今回は各種二回ずつの試験を行った。



図3：VCR fitting

試験手順はジャケットベースと同様である。液体窒素温度と常温の間のヒートサイクルを10回行った後、2Kリーク試験を行った。ただし最初のアニールは省略している。

試験の結果、当初銅シールを用いたものにリークらしき様子があったが、再試験の結果リークは見られなかった。またSUS、SUS+銀メッキのシールについても各々リークは見られなかった。いずれも2K環境下での使用に問題ないと考えている。

4. ヘリコフレックス

ヘリコフレックスは CEFILAC(仏)社の製品で、金属被覆の塑性変形とシール面に対して弾性復元力を

与えるコイルスプリングによるものである。今回はこれと同様の構造をもつ臼井国際産業(株)のU-TIGHTSEALを使用した。被覆の材質としてアルミのものと銅にインジウムメッキを施したものの二種類の試験を行った。

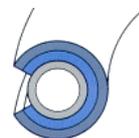


図4：ヘリコフレックス断面。

U-TIGHTSEAL ではフランジ面に対して被覆部の曲面が接して圧縮されていき、シール材自身が弾性を持つため比較的低い力でもシール可能とされている。

今回は断面φ4.5、内径φ63.7のリング状シールを用いた。試験用フランジはM8、12本をそれぞれ150kgfcmで締め込んだ。このセットアップで各々試験を実施し、いずれも2Kでもリークが無いことを確認した。

5. アルミリングシール

5.1 アルミリングとNb/(Cu)/SUSフランジの製作

本報告でも述べてきたように、2K領域でインジウムに代わるシール材の選択肢は増えつつある。しかし、いずれもコスト面でまだ安価とは言えず、特にフランジを短期間で付け外しする縦測定などの用途には手軽でない。そこで以前から板材から切り出したアルミリングの可能性について試験^[3]を行ってきた。アルミリングは空洞周囲の部品取り外し時に問題となるインジウム自身のゴミの問題を減らす改善点の一つでもある。またインジウムワイヤーと異なり、リングのような自立性のある材料を用いることは作業性からも望ましい。

アルミリングは1mm厚の純アルミ(1050)板材から切り出した。シール材として板材表面に傷がつくことを防ぐため、工作センターに納入される前の業者の段階からビニールで表面を保護し、加工を行っている。加工作業ではワイヤーカッターの流水によるアルミの腐食を考慮し、水分に触れる時間をなるべく短くするよう配慮した。

空洞にアルミリングを用いるためにはフランジ面の強度を確保する必要がある。従来のアルミリングシールの試験ではSUSフランジを用いてきた。実際の空洞で用いるためにはニオブのビームパイプとこのSUSフランジを接合しなくてはならない。

現在製作中の972MHz 9-cell空洞にアルミリングシールを用いることを視野に入れ、空洞製作に合わせてNb/SUS異材接合フランジの製作を行った。接合にはジャケットベースと同様にHIPを用いている。先に述べたように、ニオブとSUSの間に銅を挟むことで、以前に問題となった境界面における微小穴を低

減することができた。さらに今回のフランジ製作においては、従来通り銅部分を1mmのパイプ材としたものに加えて、0.2mmの板材を2回巻きにしたものも合わせて製作し銅パイプの代用を試みた。これは銅パイプ製作を省略し工程面での容易化を計るためである。



図5：Nb/(Cu)/SUSのパイプ材とフランジ

5.2 試験結果と表面の考察

フランジ材については素材をHIPした後、フランジの形状に切削加工を行った。これまで同様、リークチェックの前段階としてアニールを行ったところ、銅の部分に0.2mmの板材を用いたものが、銅同士の境界面で剥離し脱落してしまった。同種材でHIPに最も問題ないと思われていた部分がほとんど接合されていなかったということで、どのような原因か今後調べていく必要がある。従来通り1mm厚のパイプ材を用いたものについては窒素温度のヒートサイクルを行った後、2Kリーク試験を行って問題ないことが確認された。

アルミリングは切り出した後、表面に微小化学研磨を施した。その後2Kリーク試験を行い、リークが起らないことを確認している。



図6：剥離したフランジの銅・ニオブ境界面

試験の前後でアルミリングの表面観察を行った。製作した10本のアルミリングは、使用前にリークの可能性となるような大きな傷が無いことを確認した。大きな傷が無いものであっても、使用前のアルミリング表面には材料をロールした段階のものと思われる模様がある。この模様は軽いCPでは除去されない。このようなロール模様と同程度の深さの傷はどのアルミリングにおいても普通に認められた。一般的に入手した材料をビニール保護した程度の管理では通常起こりうる傷と思われる。実際の試験ではこの中から任意の2本を選定し試験に用いた。

今回アルミリングはフランジの締め付けで元の1mm厚から0.5mm厚まで圧縮した。フランジのボル

トはM8-24本とし、最大面厚と締め付けの均一性を確保するように配慮している。使用後の表面を観察するとロール模様はフランジ圧によりほぼ見えなくなり、フランジ表面のバイト切削加工跡が溝模様として確認された。また圧縮後アルミリングのつぶれ幅には、片締めによるばらつきが見られた。これは締め付け時の作業をより正確に管理することで改善できる。



図7：リングの表面（左：使用後、右：使用前）

今回のように厚みを約半分にまで圧縮しシールする場合には、使用前のアルミリング表面はロール模様程度までの傷に抑えることで、十分使用可能と考えられる。また1mm幅の細いリングを用いているため、フランジの締め付けには片締めにならないよう注意する必要がある。

6. まとめ

HIPによる異種材の接合方法はNb/Cu/SUSの構成で機械的な強度の面、スーパーリークについても問題ない。ただし実際のヘリウムジャケットとして用いる場合には高圧ガス関連の法規対応も大きな課題の一つである。これらの許認可に関して必要な異材接合部分の試験も継続して進めていく必要がある。

各種シール材については、まだ数回の試験を行って利用の見通しがついたのみであり、統計的にはまだ不十分である。アルミリングシールに関しても、まだ試験段階であり、将来的に空洞測定などに取り入れて、現場での信頼性を向上していく必要がある。

7. 謝辞

ジャケットベース素材、HIP後の加工、VCR、U-TIGHTSEAL等は日本原子力研究所より協力、支給いただきました。あらためてここに感謝いたします。

参考文献

- [1] K. Saito, et al., “陽子加速用 972MHz 9-セルプロトタイプ超伝導空洞の製作” in this Meeting.
- [2] H. Inoue, et al., “HIP Bonding for the Different Material between Niobium and Stainless Steel” Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, Himeji, Jul. 12-14, 2000
- [3] K. Abe, et al., “Vacuum Sealing Aluminum Wire for Superconducting RF cavities” Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, Himeji, Jul. 12-14, 2000
- [4] K. Mukugi, et al., “Mechanical Evaluation of Nb-SUS HIP-bounded Structure” Proceedings of the 3rd Superconducting Linear Accelerator Meeting in Japan, KEK, May. 25-26, 2000