

摩擦攪拌接合法によるSバンド導波管の組み立て FABRICATION OF WAVEGUIDE BY FRICTION STIR WELDING

松本修二, 舟橋 義聖, 恵郷 博文

Shuji Matsumoto^{A) B) #}, Yoshisato Funahashi^{A)}, Hiroyasu Ego^{A) B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

^{B)} SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies)

Abstract

The waveguides in the injector linac of KEK are WR-284 (WRJ-3) made of a few parts, i.e., rectangular copper pipes, stainless steel flanges and sometimes cooling pipes. The Electron Beam Welding (EBW) is a well-established way to assemble these parts into a waveguide. EBW is costly therefore it may be suitable for the mass production. For a small amount production case, Friction Stir Welding (FSW) can be used and suitable instead of EBW. A test waveguide by FSW shows fairly good performance. FSW is expected to be another good way to fabricate the waveguides.

1. はじめに

KEK 入射器で使用している標準的な導波管は、素管とよばれる規格化された無酸素銅の矩形管(WR-284、WRJ-3、内寸 34×72.1mm、厚み 5mm)と、その両端に気密構造を維持するためのフランジが取り付けられている。入射器で使用されている主要な導波管は、フランジに銅短管がろう付けされた部品 2 個を、矩形素管に接合することで組み立てられている(Fig. 1)。

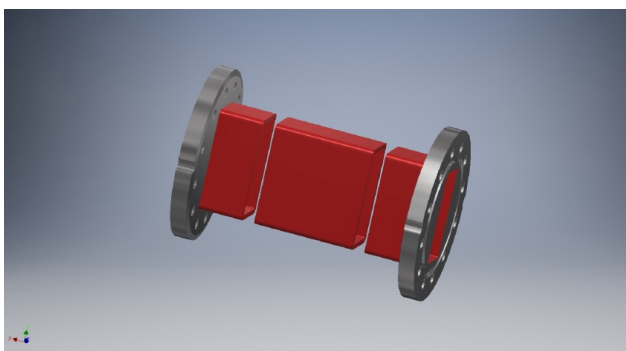


Figure 1: Assembling of the waveguide.

これらの箇所への接合には、これまで電子ビーム溶接 (Electron Beam Welding: EBW) が用いられている。KEK 入射器の導波管の場合、10 種類程度の比較的少品種が量産されている。これは、KEK 入射器のような高エネルギー電子線形加速器の場合、大部分が同一の加速ユニットの繰り返し構造になっている事情による (KEK 入射器のユニット数は 60)。EBW による導波管組立施工の際には、同種類の導波管を一気に溶接処理することが可能になり、コストや作業時間を抑えることができる。

2014 年度より開始した KEKB 増強計画では、陽電子源直下流の加速ユニットの再配置や damping ring の入射出射路に組み込まれた加速管への導波管路を新設した。このようなそれぞれがいわば一点ものの立体回路では、多種類の導波管を製造する必要が生じた。それらの

shuji.matsumoto@kek.jp

導波管も、これまで実績のある EBW およびろう付けによる接合により製作されたが、少数ロット品を数多く真空炉内で接合を行うためコスト高になった。この経験から、我々はこれまでの導波管の性能は保証しつつ、少量生産に向いている接合方法がないか考えるようになった。

摩擦攪拌接合法 (Friction Stir Welding: FSW) は 1980 年代に確立された溶接法で現在広く応用されている手法である。我々の導波管製造の接合工程にも適用可能であると判明したので、導波管の組み立て精度、真空特性等々を満足できるかどうか、導波管サンプルを実際に組み立ててみて評価することにした。以下に報告するように、接合部分は十分な機械的強度を有し、接合部からの真空もれは起こらなかった。また大電力マイクロ波の透過試験を行ない、この方法で組み立てた導波管でも KEK 入射器で性能上問題なく実用的に使用できることが分かった。入射器導波管の主要な仕様を Table 1 に与える。

Table 1: Waveguide Specifications

導波管規格	WRJ-3(72.05×34.00mm)
矩形管厚み	5 mm
使用周波数	2856 MHz
電圧定在波比	1.05 以下
許容電力	300 MW peak
平均電力	10 kW
使用フランジ	MKH 規格
許容真空漏れ	1.3×10^{-10} Pa m ³ /sec 以下

2. 摩擦攪拌接合

攪拌接合は英国接合溶接研究所が発明し国際特許を取得している技術である。先端に突起物のあるプローブと呼ばれる工具を回転させながら接合部に押し込み、摩擦熱によって軟化した材料を塑性流動化して接合す

る (Fig. 2)。溶融接合とは異なり固相での接合のため金属組織が微細化して機械的性質に優れている。

攪拌接合は材料を溶解せずに固相接合が可能で、残留応力や変形が小さい。このため、アルミ合金、銅合金を融点以下の温度で接合することが可能である。また、攪拌接合は大気中で実施可能なため、真空炉に入れて真空引きをするなどの手間がなく、またスパッタやヒュームの発生が無い。さらに工法の性質上エネルギー消費が非常に少ない。電子ビーム溶接・ロウ付けと比較し設備が安価である。接合方法の比較表を Table 2 に与える。

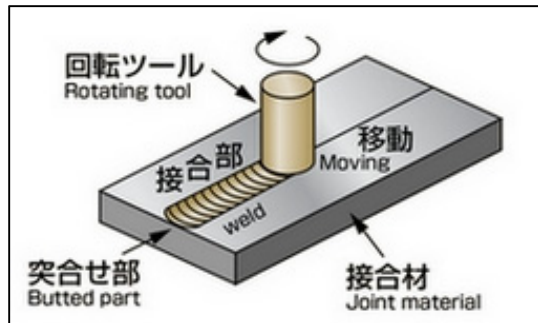


Figure 2: Principle of FSW [1].

Table 2: Comparison of Bonding Methods

項目	FSW	EBW	ロウ付け
コスト	優	可	良
容易さ	良	可	良
真空シール性	良	良	良
接合機械強度	良	良	可
作業時間	優	可	良
適用範囲	可	良	優

3. 接合試験

3.1 断面観察

入射器導波管の板厚は 5mm で、EBW の接合溶け込み深さは表面より 3mm に指定されている。FSW の場合もこれに倣い、プローブの挿入深さを調節して、接合部は深さ 3mm とした。導波管内面までは接合部分の突き抜けはない。この条件で接合サンプルを作り、接合部分の切断、研磨し、断面観察を行った。接合部の一様性と、攪拌によるバブルの取り込みがない事を確認した。Figure 3 に切断面の写真を示す。

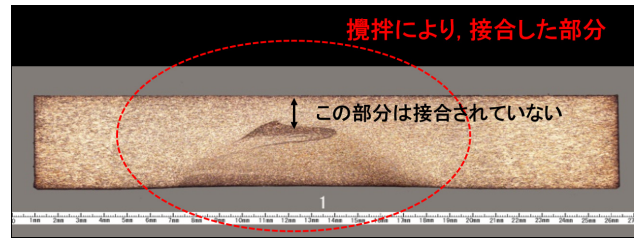


Figure 3: Cut away view of welded test sample.

3.2 引っ張り強度試験

導波管の製作の前に、無酸素銅材の板状のサンプルを攪拌接合し、その最大点応力を測定した (Fig.4)。5mm 厚板を深さ 3mm で攪拌接合したサンプルと、比較対照のための無垢 3mm 厚板 (=銅素材そのもの) を用意し、それぞれの引っ張り強度を計測した。

その結果、3mm 厚無垢板の最大点応力が 212.9 MPa であるのに対し、接合サンプルの強度は 207.9 MPa であった。FSW では、ほぼ素材と同様の十分な機械的強度が確保できていることが確認された。

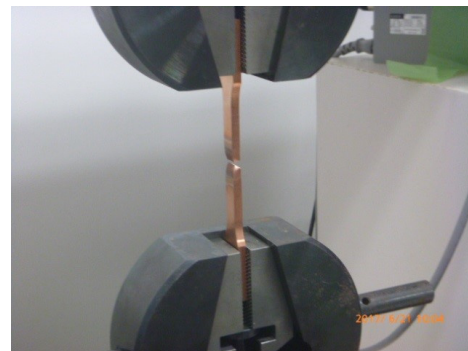


Figure 4: Sample under tensile test.

4. 試作導波管組立と試験結果

4.1 導波管組み立て

摩擦攪拌接合の国際特許は英国の TWI 社が保持しており、今回の導波管製作は 2005 年に TWI 社とライセンス国際契約を締結した株式会社千田精密工業に依頼した。事前の打ち合わせで、組み立て精度を保証する加工時の治具の設計と製造を同社に依頼した。部品となる導波管のフランジ部の部品 2 点、および素管 1 点は KEK より支給し、FSW により導波管を組立施工した。なお、素管部分には、あらかじめ冷却管がロウ付けされているものを使用した。

接合作業は、矩形管の溶接で通常行う様に、門型の MC 上に取り付けたマシンバイスで溶接される部品を固定し、一面ずつ溶接を行なっていった。溶接の始終点は、素管部にタブを固定しタブ上で処理し、矩形管の角部分でも十分な接合ができるように工夫した。溶接ビード部の整形は、同じ MC 上で処理加工した。Figure 5 に接合を完了した溶接ビード形状を示す。

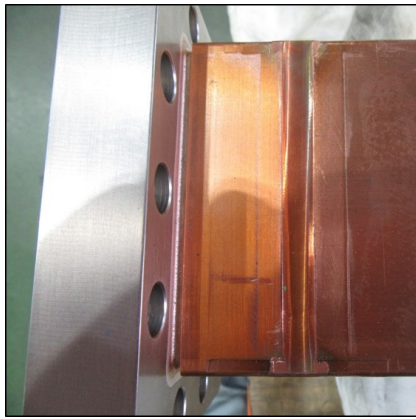


Figure 5: Joint of a test waveguide. Welded by FSW.

接合後、He リーク試験機により接合部分のリークレートが漏れ許容仕様の 0.4×10^{-10} Pa m³/sec 以下であることを確認した。完成した試作導波管を Fig. 6 に示す。

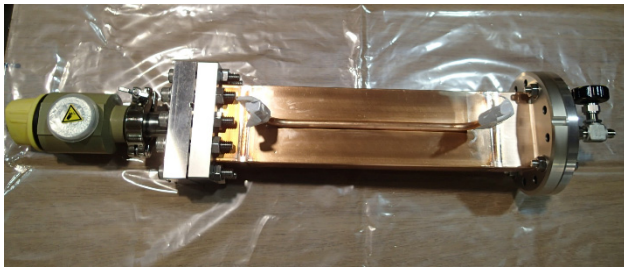


Figure 6: Test waveguide fabrication completed.

4.2 高電力試験

試作導波管に対し引き続き大電力試験をおこなった(2019.1.16~2019.2.8)。導波管の仕様(Table 1)では最大 300MW まで許容とあるが、入射器の実用上はこれの半分、150MW 程度の性能でひとまず十分である。入射器の試験施設の一つ、レゾナントリング(定格最大周回パワー300MW)に試作導波管を設置して大電力試験を行なった(Fig. 7)。この試験に割り当てられた時間内で最大ピーク電力 140MW まで到達した。このときパルス幅 1 μ 秒、繰り返しは 50pps であった。なお、これ以上のパワーテストは時間の制約でできなかった。

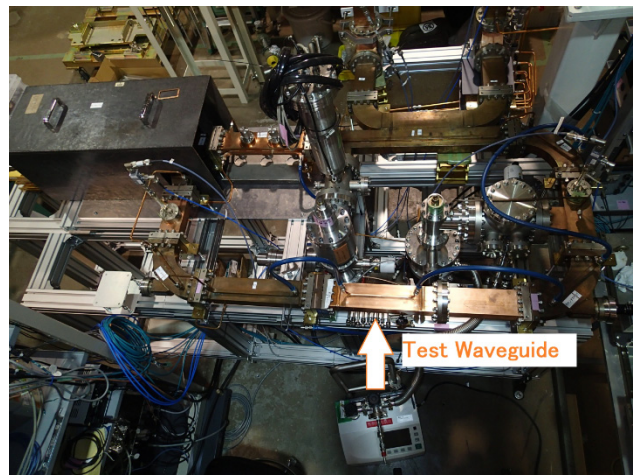


Figure 7: Waveguide under test at the resonant ring.

5. 議論とまとめ

FSW では、我々の要求する組み立て精度は少なくとも EBW と同程度に達成できていると考えられる。精度を出すためには、溶接施工の際に溶接中の位置決めをする治具を導波管内に挿入する必要がある。その出し入れの際には導波管内面に多少なりとも傷がつくはずだが、今回その影響は見えなかった。

溶接施工時には摩擦による熱の影響でワークの温度はかなり高くなるが、その影響は今回未解明である。施工中の温度データを取り、必要であれば、内面の酸化を防止する措置が必要かもしれない。この点は、通常真空容器を溶接で組み立てるのと同じ事情であろう。

今回の FSW の Sバンド無酸素銅導波管の組み立ての良好な試験結果から、今後様々なケースでこれの適用が期待できる。接合可能な金属は、アルミニウム、マグネシウム合金などである。たとえば門型マシニングセンター(東芝機械製;MPF3140DS)を使用した場合、接合可能なワークサイズは、X=7500 mm, Y=4900 mm, Z=800 mm、可能な接合深さはアルミ合金の場合 25 mm とのことである。

参考文献

- [1] 日立パワーソリューションズ, “摩擦攪拌接合 (FSW) 装置”; http://www.hitachi-power-solutions.com/products/products02/p02_78_01.html