



# 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  
高エネルギー加速器研究機構

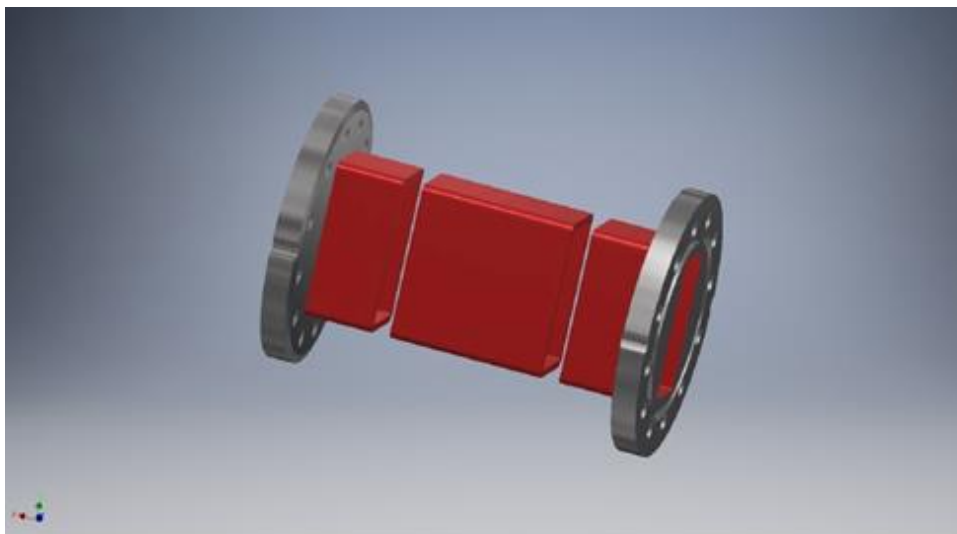
## Abstract

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.

# KEK 入射器の導波管

KEK入射器で使用している標準的な導波管は、

1. 素管とよばれる規格化された矩形管 (WRJ-3、内寸34 × 72.1mm、厚み5mm)と、
2. 両端に気密構造を維持するためのフランジから構成される。



これらの箇所への接合には、

電子ビーム溶接 (Electron Beam Welding: EBW) が用いられている。

Table 1: Waveguide Specification

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	$1.3 \times 10^{-10}$ Pa m <sup>3</sup> /sec 以下

# 摩擦攪拌接合 FSW

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。

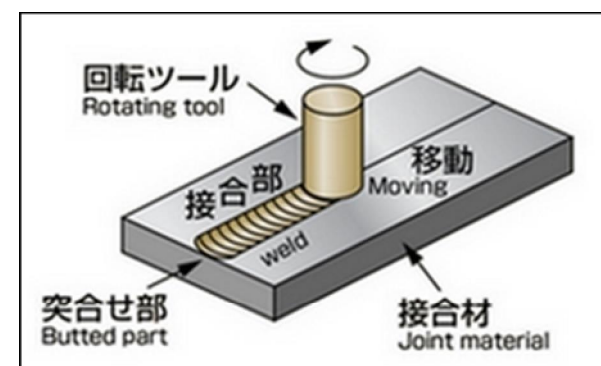
先端に突起物のあるプローブと呼ばれる工具を回転させながら接合部に押し込み、摩擦熱によって軟化した材料を塑性流動化して接合する。溶融接合とは異なり固相での接合のため

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。

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。

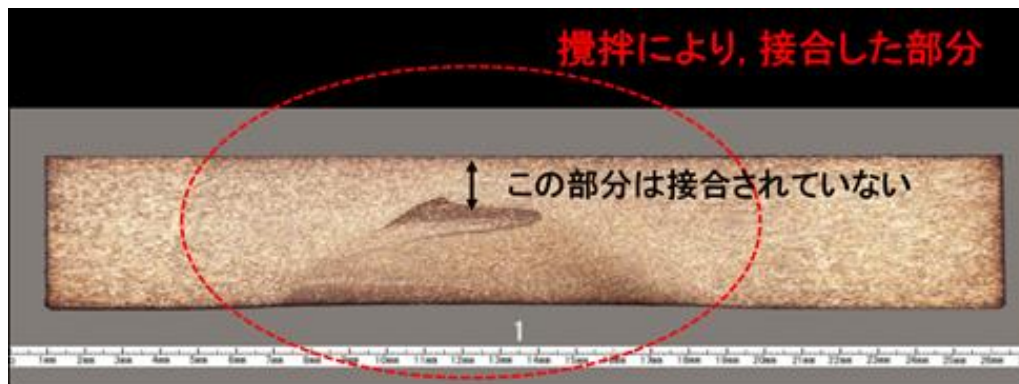
電子ビーム溶接・ろう付けと比較し設備が安価である。

	コスト	容易さ	達成真空度	機械強度	作業時間	適用範囲
攪拌接合	◎	○	○	○	◎	△
電子ビーム溶接	△	△	○	○	△	○
ろう付け	○	○	○	△	○	◎



# 接合試験

断面観察



EBW: 板厚は5mmで、接合溶け込み深さは表面より3mmに指定。導波管内面までは接合部分の突き抜けはない。



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。

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。

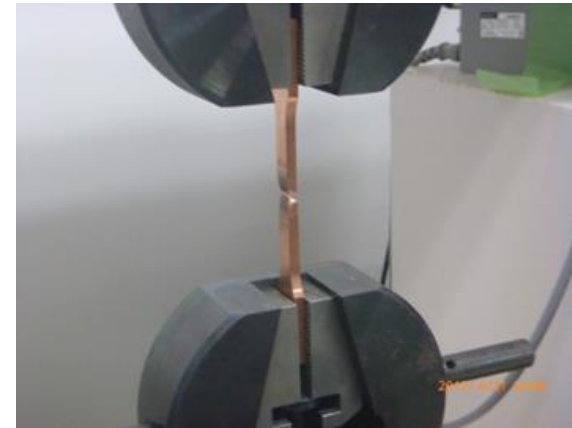
# 引っ張り試験

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。

比較対照のため、

- ・ 無垢3mm厚板 (=銅素材そのもの)
- ・ 5mm厚板を深さ3mmで攪拌接合したサンプルを用意

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。

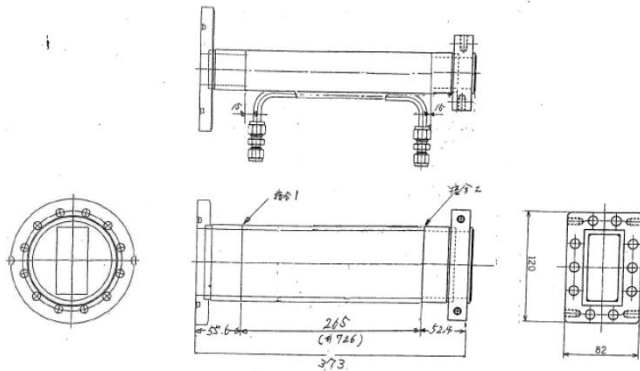


引張強度試験の様子。



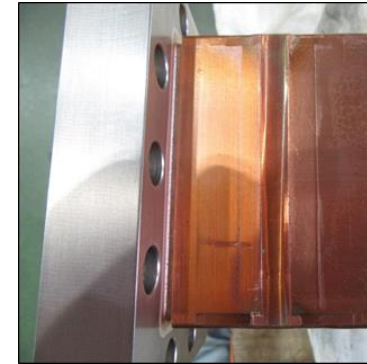
**FSWでは、ほぼ素材と同様の十分な機械的強度が確保できていることが確認された。**

# 導波管組み立て



## 接合作業

- ・ 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。



Joint of the 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 $0.4 \times 10^{-10}$  Pa m<sup>3</sup>/sec 以下であることを確認、漏れ許容仕様を満たしていることがわかった。



完成した試作導波管

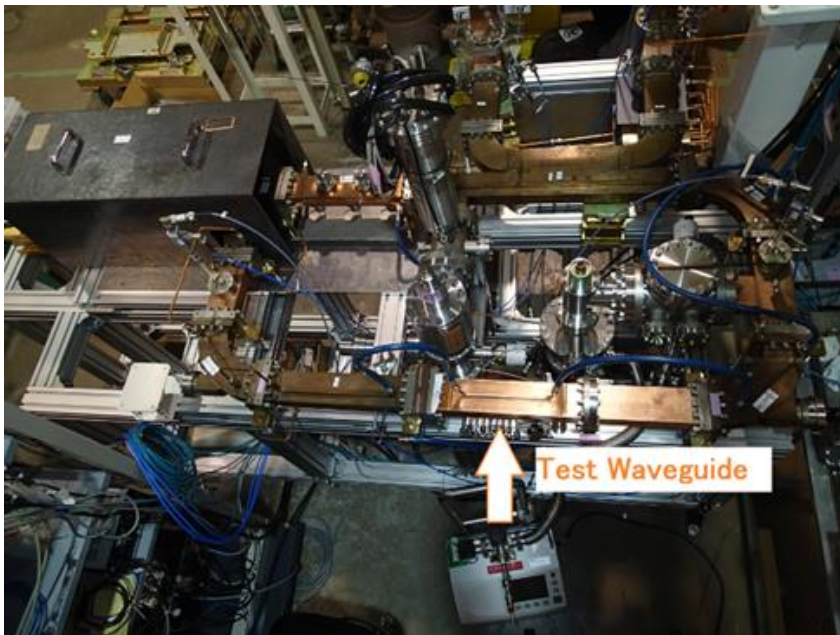
# 大電力試験

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。

ピーク電力140MWまですんなり到達。

パルス幅1 $\mu$ 秒、繰り返しは50pps。

大電力透過時に最も起こりうるトラブルは、接合部分での放電等の発生による搬送パワーの制限、あるいは真空の悪化であるが、試験の際にこのような事象は観測されなかった。



Waveguide under test at the Resonant Ring.

# まとめ

導波管のマイクロ波搬送の性能上の問題は全く見られなかった。  
KEK入射器用導波管を製造できる組立方法としてかなり有望であることがわかった。

1. 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た(と思われる)。  
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、今のところその影響は見えない。
2. 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、通常の真空容器を溶接で組み立てるのと同じ事情であろう。
3. 今回はSバンド無酸素銅導波管の接合をFSWで実施したが、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。