

超伝導スポーク空洞製作のための電子ビーム溶接試験

ELECTRON BEAM WELDING TEST FOR SUPERCONDUCTING SPOKE CAVITY FABRICATION

沢村 勝^{#, A)}, 羽島良一^{A)}, 佐伯学行^{B)}, 岩下芳久^{C)}, 頓宮 拓^{C)}, 中村哲朗^{D)}, 渡邊直久^{D)}
Masaru Sawamura^{#, A)}, Ryoichi Hajima^{A)}, Takayuki Saeki^{B)}, Yoshihisa Iwashita^{C)}, Hiromu Tongu^{C)},
Tetsuro Nakamura^{D)}, Naohisa Watanabe^{D)}

^{A)} National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization/SOKENDAI

^{C)} Kyoto University

^{D)} Mirapro Co., Ltd

Abstract

We are fabricating the superconducting spoke cavity for electron beam drivers to realize a wide use of LCS X-ray and γ -ray sources in academic and industrial applications. After press forming, trimming to fabricate the half spokes and the electron beam welding (EBW) test to estimate the welding condition, the EBW was performed to fabricate the full spoke shape. While the good welding beads could be gotten for the sides, the bad results of some holes and no penetration occurred for edges. The improvement plan for EBW was considered.

1. はじめに

エネルギー回収型リニアック(ERL)とレーザーコンプトン散乱(LCS)を用いた LCS- γ /X 線源を産業・学術分野で利用するためには、ERL の小型化が課題となる。スポーク空洞は、周波数が同じなら楕円空洞よりコンパクトにできることや、カップラーなどをタンク側面に設置できるためパッキングファクターに優れ実効加速電界の減少を抑えられる。これらの長所を生かせば、スポーク空洞を用いた超伝導加速器の小型化が期待できる。

運転の利便性を考慮すると4K での運転が望ましく、我々は 325MHz のスポーク空洞を提案しているが、限られた資産の中で空洞製作技術を獲得するためハーフスケールである 650MHz のスポーク空洞モデルの製作を進めている。これまでにハーフスポークの金型の設計[1]、製作、プレス成型試験[2]、さらにフルスポークにするための電子ビーム溶接(EBW)条件出し試験[3]や EBW用の治具設計・製作を行ってきた。今回フルスポーク化のためのEBWを行ったので、その現状について報告する。

2. EBWによるフルスポーク化

2.1 側面 EBW(ビームパイプなし)

フルスポークにするための EBW 手順としては、最初にビームパイプを EBW し、その後側面、端部と EBW することになっている。側面、端部の EBW は溶接条件等も複雑であるため、最初にビームパイプなしの状態 EBW を行った。

電子ビーム溶接機として用いた(株)ミラプロの1号機は、電子ビームを天井面から鉛直方向に照射し、照射物を4軸で駆動できる。移動軸は水平面内で直交する2軸の直線移動、水平面内での回転移動、治具を作れば任

意の傾斜角度になる回転移動の4軸である。ただし、駆動制御の1ステップで直線移動は2軸を同時に動かすことができるが、回転は1軸しか動かすことができない。さらに直線移動と回転移動を同時に行うことはできない。

EBW 条件出し試験の結果、焦点位置のずれが ± 5 mm、入射角度が 20 度以内であれば、溶接部分に大きな違いはないことが分かった[3]。1回で溶接する範囲を細かく分割すると焦点位置ずれや入射角度を小さくすることができるが、作業工程が増え、重なり部分も多くなるので、好ましくない。そのため、それぞれの溶接区画は出来るだけ大きくなるようにした。EBW 装置の回転軸からスポークのビーム軸をオフセットさせ、回転角度をパラメータとして、焦点位置ずれや入射角度を小さくする条件を探し、側面部分は Fig. 1 のようにスポーク側面形状で直線や円弧などある程度の大きさの区画に分割することにより、焦点位置ずれは 3.8 mm 以下に、入射角度は 17.3 度以下にすることができる。また端部は Fig. 2 のように 2 分割することにより、焦点位置ずれは 2.6 mm 以下に、入射角度は 19.1 度以下にすることができるので、この手順で EBW を行った。

最初に側面部分をスポット溶接し、片側の治具を取り外した。この状態で側面の中央部、中間部2ヶ所の EBW を行った。中央部分を EBW したとき穴が空いてしまったので、中央部の EBW のビーム電流を 57 mA から 54 mA に下げることとした。2 番目の側面 EBW の結果を Fig. 3 に示す。側面全長において穴が空くこともなく、ほぼ均一な溶接をすることができた。

2.2 端部 EBW(ビームパイプなし)

端部の EBW は溶接区域を 2 つに分けて行った。端部はプレス成型による板厚の変化も大きく、曲線状になっている。2つの溶接区間に分けることで焦点位置ずれや入射角度を小さくすることができるが、各区間の前後に溶接の重なり部分が必要で、Fig. 4 のように、その

[#] sawamura.masaru@qst.go.jp

PASJ2020 WEPP33

近辺で溶接が貫通しなかったり、穴が空いてしまう結果となった。また溶接区間が短いために溶接幅もあまり均一にならなかった。



Figure 1: Schematic view of EBW procedure for the spoke side. Red bands indicate EBW range.

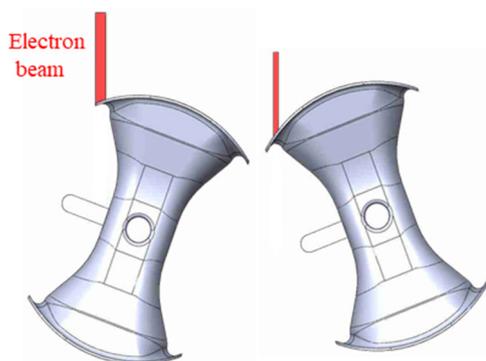


Figure 2: Schematic view of EBW procedure for the spoke edge. Red bands indicate EBW range.

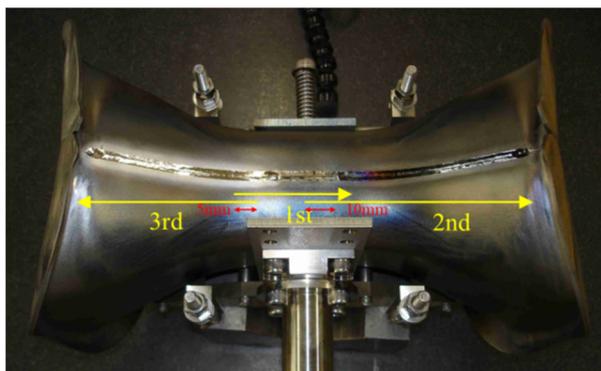


Figure 3: EBW beads for the spoke side. The yellow arrows indicate the direction of electron beam trace. The red arrows indicate the overlap of electron beam.

2.3 ビームパイプ EBW

ビームパイプの EBW はビームパイプを 2 つのハーフスポークで挟んだ状態で、Fig. 5 のようにビーム軸方向の回転ステージを傾け、溶接個所を回転させながら行った。ビームパイプの溶接部分は軸対称で、厚さも均一であるため、溶接部分の結果は良好なものとなった。溶接縮みがあるため、側面部分には溶接前に隙間を持たせ、

ビームパイプの溶接縮みにより側面が接触するように設計した。しかし、Fig. 6 のように端の一部が先に接触したため、側面部に少し隙間が残る結果となった。この状態で今後側面の EBW を行い、隙間の影響を調べる予定である。

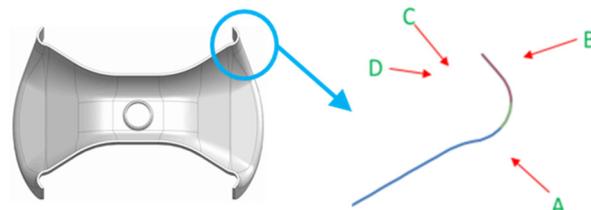
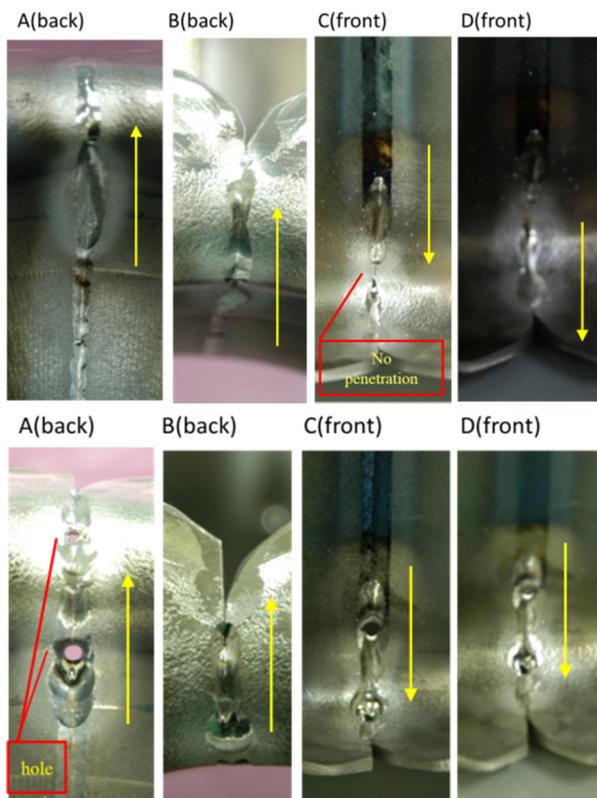


Figure 4: (Top, Middle) EBW beads for the spoke edges. The yellow arrows indicate the direction of electron beam trace. (Bottom) Photographic directions of top and middle pictures.



Figure 5: (Left) Setup for the beam-pipe EBW. (Right) EBW bead of beam-pipe.

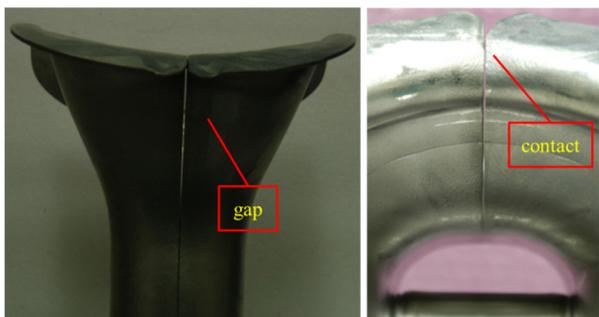


Figure 6: (Left) Gap between two half spokes after beam-pipe EBW. (Right) Contact of two half spokes near the edges.

3. EBW 手順改善案

フルスポークを製作するための EBW を行ったが、以下のような問題点があることが分かった。

- EBW 工程数が多いため、作業時間がかかりすぎる。
- 端部の溶接区間が細かすぎるため、均一な溶接面になりにくい。

溶接に用いた EBW 装置はステップ内では直線移動か回転移動しかできないが、ステップ内で焦点位置とビーム電流を変えることは可能である。そこでステップ内で焦点位置、ビーム電流を変えることにより、できるだけ広い範囲を 1 回の工程で溶接できる手順を検討した。

Figure 7 のように側面は中央部を傾けて、できるだけ端まで溶接できるようにする。また端部も 1 回で溶接する。

このようにするとこれまで 14 工程必要だったものが、8 工程に減らすことができる。

このときの溶接方向での板厚の変化を Fig. 8 に示す。板厚は側面で 0.20mm、端部で 0.68 mm の差が生じる。また、溶接位置高さは、側面で 17.3 mm、端部で 5.2mm の差が生じる。溶接高さ位置は焦点位置を、板厚変化にはビーム電流を変えて対応していく予定である。

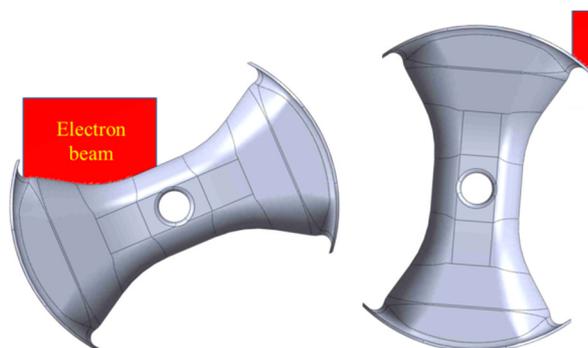


Figure 7: Schematic view of EBW procedure for center part (left) and edge part (right) of improvement plan. Red bands indicate EBW range.

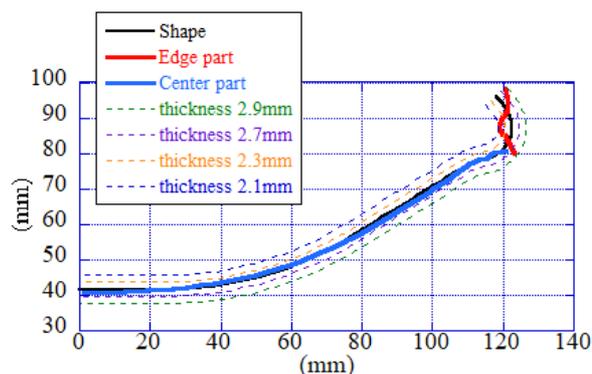


Figure 8: Thickness of center and edge parts in the direction of electron beam.

4. まとめ

フルスポーク化のための EBW 試験を行い、側面部では良好な溶接結果を得ることができた。しかし端部では板厚の変化が大きかったこと、さらに溶接区間が細かすぎたことから溶接が貫通しなかったり、穴が空いたりした。この結果をもとに溶接手順の再検討を行い、溶接工程の 1 ステップ内で焦点位置およびビーム電流を変えながら、できるだけ広い範囲を溶接する手順を考えた。次回の EBW 試験では、この手順で行う予定である。

参考文献

- [1] M. Sawamura *et al.*, “ERL超伝導スポーク空洞製作の現状”, Proc. of 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, 2015, pp.583-586.
- [2] M. Sawamura *et al.*, “超伝導スポーク空洞開発の現状”, Proc. of 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, 2017, pp.949-952.
- [3] M. Sawamura *et al.*, “超伝導スポーク空洞の電子ビーム溶接試験”, Proc. of 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, 2019, pp.709-711.