

超伝導スポーク空洞の電子ビーム溶接試験

ELECTRON BEAM WELDING TEST OF SUPERCONDUCTING SPOKE CAVITY

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. Press forming and trimming were performed to fabricate the half spokes. We have been preparing the electron beam welding (EBW) to fabricate the full spoke shape. The EBW machine control system restricts motion of stages to one axis of linear motion or rotation during welding procedure. We performed EBW test to evaluate injection angle and focus aberration to get good welding beads in this condition. The measured results and EBW procedure will be presented.

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 線源の産業・学術分野への利用を考えたとき、ERL の小型化が重要になってくる。楕円空洞に比べてスポーク空洞は、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などの利点がある。これらの長所を生かして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 325 MHz 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 650 MHz のスポーク空洞モデルの製作を進め、これまでにハーフスポークの金型の設計[1]、製作、さらにプレス成型試験[2]を行ってきた。さらに現在、フルスポークにするための電子ビーム溶接(EBW)のための条件出し試験や EBW 用の治具設計を行っているので、その現状について報告する。

2. EBW条件出し試験

現在電子ビーム溶接機として検討しているのは(株)ミラプロの1号機で、電子ビームは天井面から鉛直方向に照射され、照射物を4軸で駆動が可能である。移動軸は水平面での垂直な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軸の4軸である。ただし、駆動制御の1ステップでは1軸しか動かすことができない。さらに電子ビームの焦点位置も1ステップ中では変更することができない。

そこでスポーク側面形状をEBWするとき1軸駆動での溶接手順の検討を行った。溶接時の駆動として主に

使用するのは、直線移動1軸と垂直平面内の回転移動1軸であり、溶接時はそのどちらか一方での駆動になるため、ある区間を直線または回転で移動させると焦点位置のずれや入射角度の変化が想定される。そこで EBW 装置を用いて溶接条件を変えたときの溶接部分の様子を調べた。EBW 装置の設定値を Table 1 に示す。

Table 1: Condition of EBW Machine

Acceleration Voltage	60 kV
Beam Current	62 mA
Move Velocity	500 mm/min
Beam Up Slope	0.1 s
Beam Down Slope	0.1 s

まず焦点位置が変わった時の溶接の様子を Fig. 1 に示す。試料として厚さ 2.5 mm のニオブ板を用いた。電子ビームの焦点位置を変えずに、試料板に傾斜を持たせて水平移動させることにより、試料表面からの焦点位置を変えながら連続的に照射することができる。垂直回転軸の高さを基準として、試料表面の高さを-4.5 mm から+7.1 mm まで変えることができる。表面側には焦点位置の変化による差はほとんど見られないが、裏面側では溶接ビード幅の変化が見られる。この変化が焦点位置の変化によるものなのか、試料の温度上昇によるもののかはさらに調べる必要がある。

入射角度が変わった時の溶接の様子を Fig. 2 に示す。試料を垂直回転軸に沿って取り付け、垂直回転することにより入射角度を変えられるようにした。回転と水平移動は同時には駆動できないので、水平移動で 40 mm の溶接後、試料を少しずつ回転させた。表面側には大きな違いは見られないが、裏面側は入射角度が 30 度以上になると溶接ビード幅にうねりが現れる。

また今回の EBW 試験に用いたニオブ材は 3.5 mm のニオブ板を 2.5 mm に再圧延しなおした板材の端材を用いたため、板厚が均一でなかった。そのため Fig. 3 の

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

ように同じような条件で EBW を行っても穴が空いてしまうところがあった。ハーフスポークの側面はプレス加工のため、厚さが場所により薄くなっている部分がある。そのため電子ビームの条件を細かく検討する必要がある。

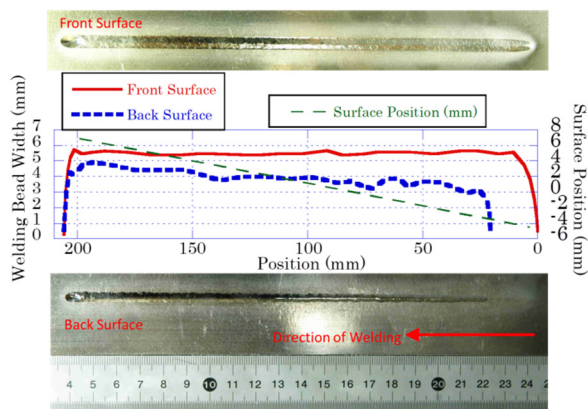


Figure 1: Welding bead width when the focus position from the surface changed.

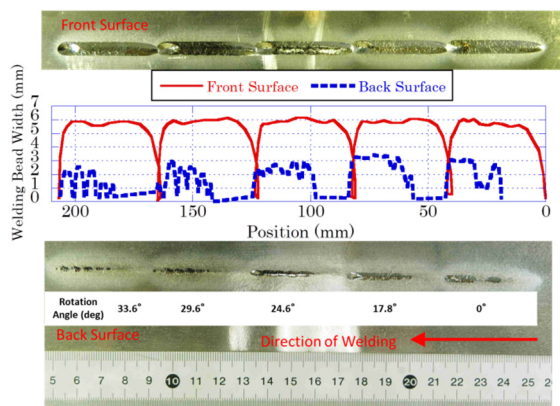


Figure 2: Welding bead width when the injection angle changed.

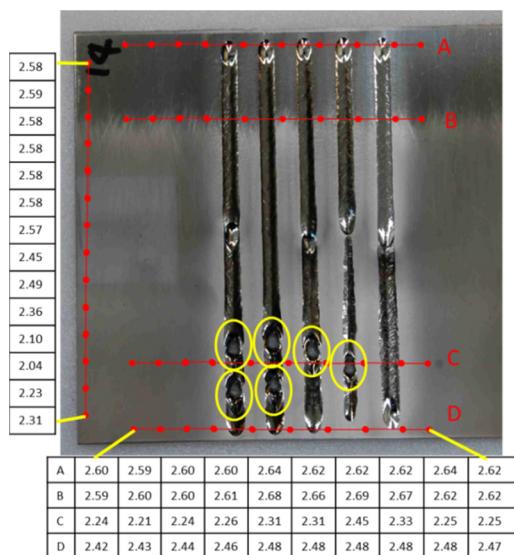


Figure 3: Welding hole due to dispersion of Nb plate thickness. The tables in this figure correspond to the thickness (unit: mm) of the plate at the red circles.

3. EBW 手順

EBW 条件出し試験の結果、焦点位置ずれとして、 ± 5 mm、入射角度 20 度以内であれば、溶接部分に大きな違いは見られない。スポーク空洞を EBW する手順としてこのような条件の範囲内での手順を検討した。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とのオフセット、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た。結果を Fig. 4, 5 に示す。側面部分は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。また根元部分は 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。

これらの結果をもとにフルスポーク溶接のための治具の設計を行った。スプリングバックの影響で少し広がっているハーフスポークの形状を矯正し、スポット溶接するための治具と EBW 装置内にセットした時の概略を Fig. 6 に示す。スポーク側面を 8 本の棒で矯正している。側面全体を溶接するためにはこの矯正用の棒は邪魔になるので、Fig. 7 (top)のように片側を取り除いた状態で側面溶接を行う。スポークの根元部分を溶接するときは、Fig. 7 (bottom)のようにオフセットの長さを変えて溶接を行う。

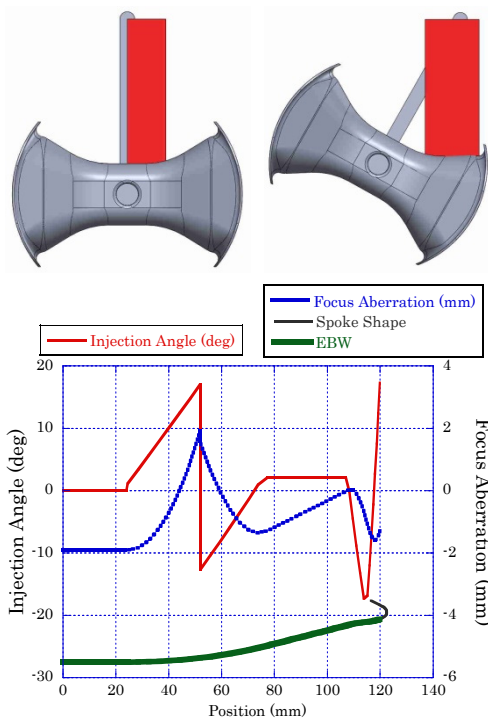


Figure 4: (Top) Schematic view of EBW procedure for the spoke side. Red bands indicate EBW range. (Bottom) calculated injection angle and focus aberration during these procedures.

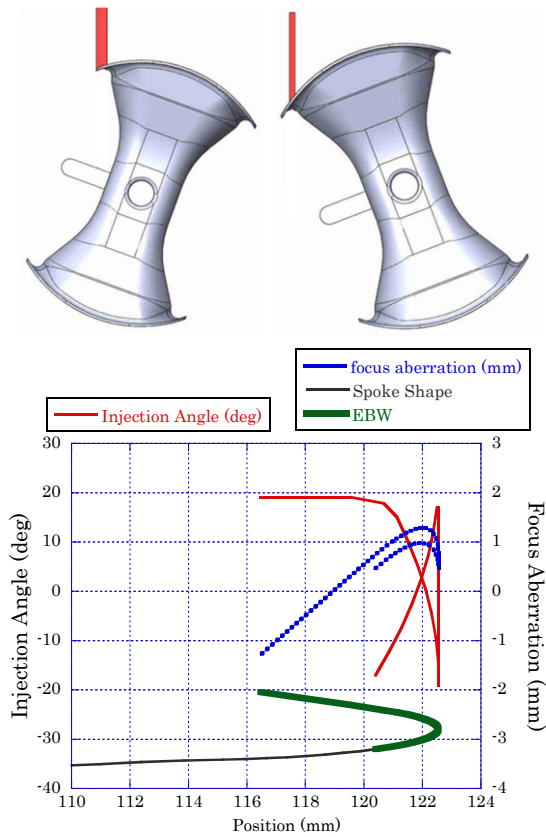


Figure 5: (Top) Schematic view of EBW procedure for the spoke base. Red bands indicate EBW range. (Bottom) calculated injection angle and focus aberration during these procedures.

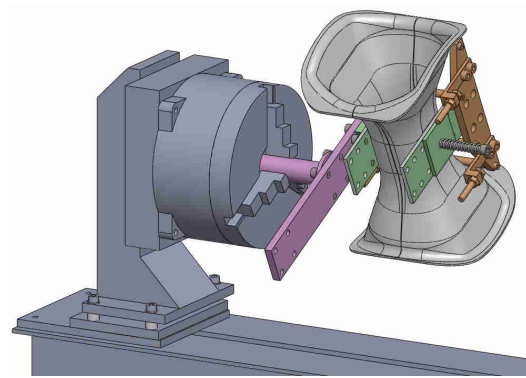
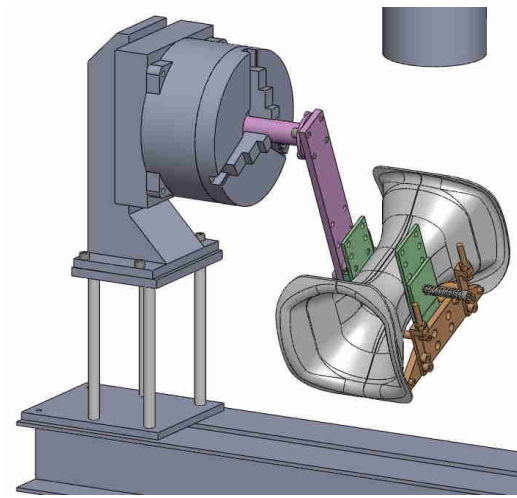


Figure 7: Schematic view of installation to EBW machine to weld the spoke side (top) and base (bottom).

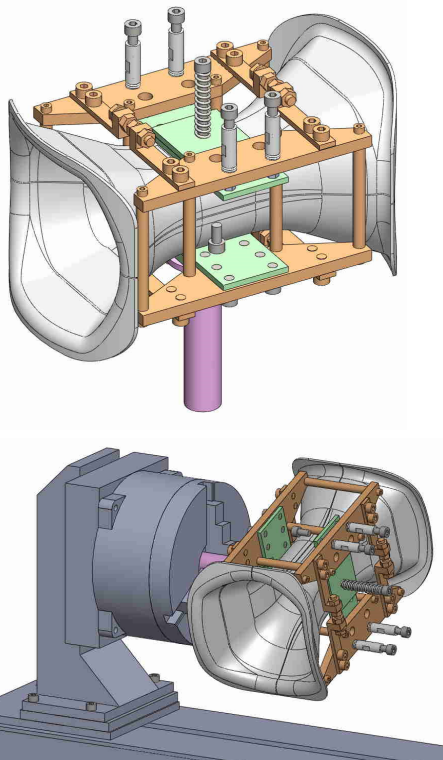


Figure 6: EBW jig for welding spoke side and base.

4. まとめ

スポーク空洞を EBW するための条件出し試験を行った。焦点位置ずれに関しては ± 5 mm、入射角度は 20 度以内であれば、溶接部分に大きな違いは見られない。スポークの側面部分、根元部分を EBW するための手順を検討し、これらの条件を満たす手順を決めた。この手順に基づき EBW のための治具の設計、製作を行い、今後スポークの EBW を行っていく予定である。

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.