

[F17p18]

## R&D of Welding Method for The Nb/Cu Clad Material

K.SAITO, Y.HIGASHI, H.INOUE, T.FUJINO, T.HITOMI,  
M.SAKAKIDA\*, T.UENO\*, T.YOKOI\*, K.YAMANO\*

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801, Japan

\* : Tosei Electron Beam Co. Ltd.

651-6, Takane, Mizuho-machi, Nishitama-gun, Tokyo-to, 190-12, Japan

### Abstract

For a future advanced application of superconducting rf cavities, the seamless cavities made of niobium/copper clad material is now developed, because it has no welding seams on cells and its fabrication cost should be low. We need ports on the beam pipes to put a input coupler or HOM couplers, however, present technology can not make seamless cavities with such ports. It is necessary to join beam pipes with ports to the end cells of the seamless cavity. Thus it needs to develop a new welding method for the Nb/Cu clad seamless cavities. Here, we present some ideas of welding methods and some initial trial results.

### ニオブ・銅クラッド材の溶接法の開発研究

#### 1. はじめに

KEKでは、従来からのニオブ製バルク超伝導加速空洞の性能をより向上させることやその製作コスト削減のために、薄肉ニオブ(0.5mm)と厚肉銅(2mm)のクラッド材を使って溶接を省いたシームレス超伝導加速空洞を製作する開発研究を進めている[1]。しかしながら、将来それが実用化に至っても、そのビームパイプには高周波大電力入力結合器(Input coupler)や高調波取り出し結合器(HOM coupler)を取り付けるための突き出しポートが必要であるが、現在の技術ではそれらの突き出しポートまで付いたシームレス空洞を一体成型することは困難と考えられる。そのために、ポート付きビームパイプをシームレス空洞に溶接する必要性が生まれる。本論文では、ニオブと銅のように著しく融点の異なる複合材の接合技術への挑戦として、電子ビーム溶接、レーザービーム溶接、拡散接合あるいはそれらの組合せ接合法などを用いて、そのような複合材料の接合技術に関する検討を行う。

#### 2. 電子ビーム溶接

まず、電子ビーム溶接を考えよう。電子ビーム溶接は、電子ビームが深く被溶接金属中に入った状態で溶接されるので他の熔融溶接法に比べてエネルギーの集中性が良い。例えばTIG溶接と比較すると電子ビーム溶接での溶接投入エネルギーは1/10~1/15で済む。このエネルギー

の高集中性のために、電子ビーム溶接では入熱量を低く抑えることができ、熔融領域や熱影響部が狭くできる。その結果、溶接部でのゆがみや歪、好ましくない結晶粒成長、変態、強度やねばりを減少させる物理変化、残留応力の発生などを少なくできる。また、真空チェンバーの中で溶接が行われ、熱と真空の両方の効果が結び付いてガス成分を除去し、前処理課程で生じた大部分の不純物を除去し、溶接部に介在物や気孔を発生しにくい。電子ビーム溶接は、このような特徴を有するために、その機械的あるいは物理化学的性質が雰囲気中の微量の不純物(主として酸素や窒素)によって著しく損なわれる金属の溶接に適している。そのためにニオブ製超伝導空洞の製作ではもっぱら電子ビーム溶接が使われている。

しかしながら今回、試行しよとするニオブ・銅クラッド材では、銅とニオブでは融点が各々1081℃、2467℃であり、その温度差が1400度近くもあり、電子ビーム溶接が難しい組合せである。しかし、文献[2]によれば、アルミニウムとステンレ鋼のように融点が大きく異なる(Al: 660℃、SUS: 1450℃)組合せでも、ビーム照射位置を溶接突き合わせ部よりわずかにステンレス側(高融点側)にずらし、さらに適当な角度を持たせてビームを照射することで溶接に成功した例が報告されている。ニオブ・銅クラッド材の場合、融点差がさらに大きく、より困難であることが予想されるが、例えば図1に示すように、溶接部の開先加工を行い、図2(左)のように

ビームを傾けて照射し、かつ照射位置をニオブ側の突合せ部に集中させ、銅側の突合せ部がビームから少しはずれるようにすれば、溶接できるのではないかと期待される。もちろん、ニオブ側は、薄肉溶接になるのでビーム電圧をできるだけ低くして、電子ビームが銅側に貫通して銅の蒸気やスパッターが起きないようにビーム条件の最適化が必要であろう。また、銅は熱伝導率が大きいのので過剰な熱を旨く除去するために溶接治具を工夫する必要があるだろう。熱の逃げがアンバランスになると片方が熱く成り過ぎ、バイメタル効果による変形が発生する可能性がある。

もう一つの新しい考え方は、図2（右）に示すように溶接中に溶接突合せ部に適当な圧力を加えることにより、銅と銅の接合に後で述べる拡散接合作用を発現させることである。また、この時、銅とニオブは濡れ性が良いのでニオブ背面の銅表面が溶ける程度に熱を加えることで

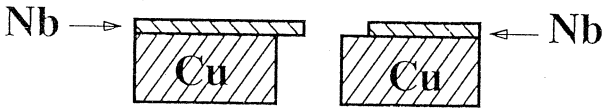


図1. クラッド材接合のための開先加工

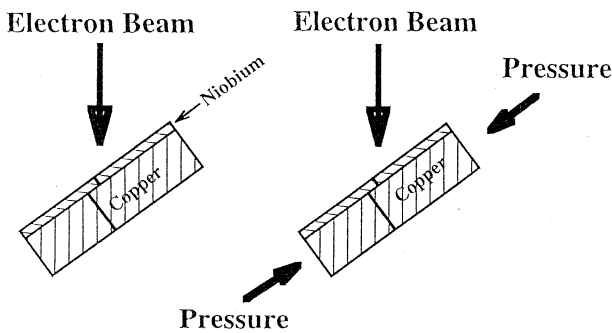


図2. 斜めビーム打ち電子ビーム溶接（左）、  
拡散接合との併用溶接法（右）

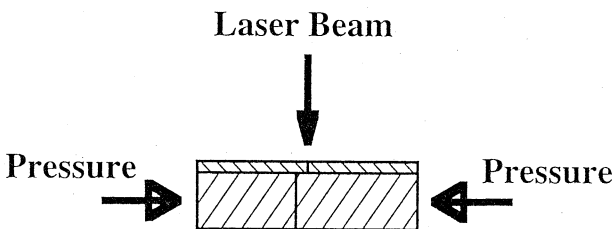


図3. レーザー溶接と拡散接合作用の  
複合溶接法

ニオブ背面と銅の間には、ろう付け作用を発生させることが可能であろう。ニオブとニオブの突合せ部に照射した電子ビームの入熱がニオブを熔融させると同時に拡散接合、ろう付け接合のドライビングヒートとなり、複合的接合が発生するような条件を探すことはそれ程困難ではないと思われる。

### 3. レーザー溶接

レーザービームは、その平行ビームを収束することにより高いエネルギー密度( $10^5 \sim 10^8 \text{ W/cm}^2$ )を被溶接金属の表面に集中させることができる。したがって、電子ビームと同様に高密度の熱源を発生させるので溶接法として利用できる。

現在、市販されているレーザー溶接機としてはCO<sub>2</sub>レーザー（波長10.6 μm）とYAGレーザー（波長1.06 μm）である。CO<sub>2</sub>レーザーは効率が10～20%、YAGレーザーでは3～4%である。YAGレーザーはCO<sub>2</sub>レーザーに比して効率が悪いが光ファイバーによる伝送が可能であり、我々の用途にはYAGレーザーの方が便利である。しかし、YAGレーザー溶接では厚肉の溶接が困難である。すなわち、溶接部の熔融部の温度はその金属の沸点であるが、熱が金属内部に伝達する率はこの沸点によって制限され、より深部に熱が伝達されにくい。表面での沸点は、一般の金属では約  $10^5 \sim 10^6 \text{ W/cm}^2$  のエネルギー密度で起こる。その強度はレーザーのエネルギー密度よりもはるかに小さいが、もし、それ以上のエネルギーを供給しようとすると金属を蒸発させてしまう。そして、その蒸発作用に伴う力によって、熔融金属を押し出して溶接シームに穴があく。したがって、YAGレーザー溶接の肉厚はレーザーで得られる熱出力によらないので、かなり薄肉の物に制限される。現在、YAGレーザー溶接で可能な肉厚は、0.5～0.75mmと言われている。一方、CO<sub>2</sub>レーザーでは逆に金属が一度熔融状態になるとレーザーの吸収率が上がるために厚肉の溶接が可能である。4.3 kWのCO<sub>2</sub>レーザー（シングルモード）で10m/mimの溶接速度では、SUS304で2.5mm以上の溶け込みが得られたとの報告がある[3]。

YAGレーザーを用いる限り、レーザー溶接では2.5mmの肉厚のニオブ銅クラッド溶接には期待が持てない。しかし、レーザービームは、基本的には熱伝導による溶接であり、電子ビーム溶接よりもマイルドな溶接法であると言える。我々のようなクラッド構造では、図3に示すようにレーザーの入熱により薄肉のニオブを溶解させ、その余熱で銅に拡散接合を作用させる、電子ビームのところ述べたような複合的接合に期待が持てる。

図4は、平均出力400WのYAGレーザー（パルスピーク出力5kW）を使って、10Hzの周波数で突き合わせ溶接を試みた結果である。最初に真空中でニオブ側からレーザー

ビームを当てニオブ側を溶接した後、大気中で銅側にビームを当てた結果である。ニオブ突き合わせ部はほとんど接合されているが銅との界面近くで一部非接合部分が観察される。また、銅側でのニオブの界面近くで接合していない部分が観察される。しかしながら、今後の溶接条件出し、治具の改良如何でその成功に期待が持たれる結果である。

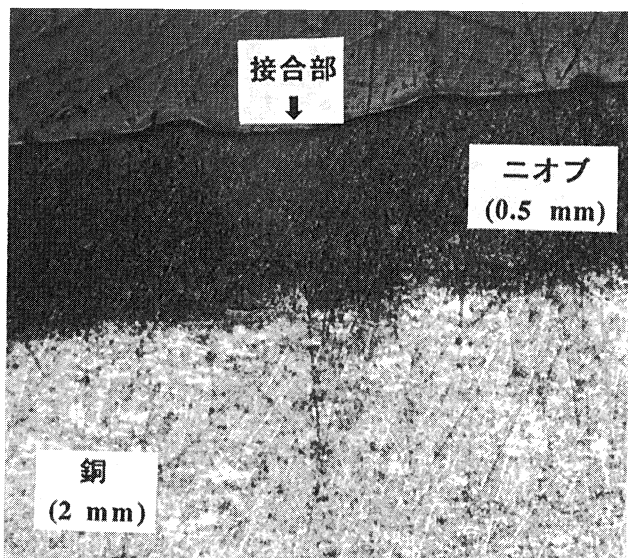


図4. YAGレーザーによるNb/Cuクラッド材の試行溶接結果 (写真倍率: 45倍)

#### 4. 拡散接合

それ自体は、全く新しい溶接法ではないが、最近固相溶接法として多くの応用面において注目されている。例えば、本機構・工作センターではリニアコライダ用Xバンド常伝導加速空洞(銅)の接合法としてこの方法を応用し、注目すべき成果を上げている[4]。この接合メカニズムは、二段階からなると説明されている。すなわち、塑性流動が界面の密な接触を作り出し酸化膜を破壊する第一ステップと、その後、元の界面を通しての拡散と結晶粒の成長により冶金的接合が完了する第二ステップである。この溶接法を作用する主なパラメータとしては、溶接温度、時間、溶接中溶接部に付加する圧力、被溶接部の表面状態(表面加工度、表面酸化膜、清浄度など)、およびその表面粗さなどであり、それぞれ相関関係を持っている。例えば、溶接温度を上げれば拡散が起こり易くなるので、時間を短縮できるし、圧力を小さくもできる。あるいはまた、表面粗さが粗くてよい。また、力を大きくすれば、表面粗度が粗くてよい。これらのパラメータは製品の材質や特製(製作精度など)に応じて設定しなければならない。

文献[2]によれば、純ニオブにつて既にこの方法を適用して接合部の組織、機械的および物理的特性が母材と同等な良好な結果が得られている。その時の条件は、温度が1150~1316℃で圧力は7kg/mm<sup>2</sup>、接合時間は3時間である。この温度は、今回試行しようとするニオブ・銅クラッド材では高すぎるが、これまでニオブバルク空洞の真空熱処理時に850℃程度の温度ではニオブ材の自重だけでニオブがくっつき合っていることを経験しており、圧力や表面粗さによっては銅の融点よりもかなり低い温度で接合ができると期待される。この方法の場合、図5に示すように特に複雑な開先加工は不要で、面と面の突合せでよいと考えられる。

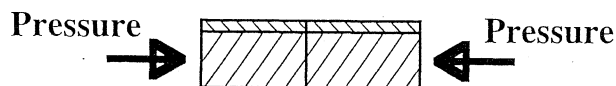


図5. クラッド材の拡散接合法

#### 5. まとめ

装置の故障で当初予定していた色々な溶接法の試行実験が出来ず、殆どアイデアを示すのみとなってしまった。しかし、YAGレーザー溶接での試行結果に見られるようにニオブと銅のように融点が大きく異なる組合せでも溶接可能性が十分あるように思われる。色々提案した溶接法の中で特に、拡散接合に期待が持てる。今後、上記のアイデアを実証すべく、早期に試行実験に取りかかる予定である。

#### 参考文献

- [1] T.Fujino et al., in this meeting.
- [2] Mel M.Schwartz著、寺井清 訳、“新しい金属接合法<溶接とろう付>”、産報、1974年。
- [3] 横井哲郎(東成エレクトロニウム株式会社)、“レーザーによる各種加工技術の実際”、日本工業出版「光アライアンス」第8巻第1号、日工No.97.09.08.50。
- [4] 東 保男他、“超精密加工された銅板の拡散接合”、溶接学会論文集、第15巻第3号、1997年3月、P.467-475。