

STUDY ON PROCESSING OF Nb/Cu CLAD SHEET FOR SUPERCONDUCTING ACCELERATOR CAVITIES

Nobuteru Hitomi^{1,A)}, Saburou Tsubokawa^{B)}, Tsunemoto Kuriyagawa^{A)}, Kenji Ueno^{C)}

^{A)}Tohoku University

6-6-01 Aramaki aza Aoba, Aoba-ku, Sendai, Miyagai, 980-8579

^{B)}ST Planning

572-314 Magechi, Kumagai, Saitama, 360-0161

^{C)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

In order to reduce the cost of blank material for seamless superconducting accelerator cavities, clad of Niobium and Copper processes have been developed. In this paper, newly proposed process that is composed with a pre-junction formed by high pressure in room temperature and an all-out bonding by heating with pulsating electric current is described. Moreover, preliminary tests for both processes were practiced. Consequently, it is observed that cladding of Nb/Cu is attained and welding spots are germinated at interface through the pulsating electricity bonding process, though the strength of bonding is not yet sufficient.

超伝導加速空洞用の銅・ニオブクラッド材製作に関する研究

1. はじめに

ILC計画では電子・陽電子衝突直線加速器として超伝導加速器の開発が鋭意おこなわれている。これに用いる加速空洞にはニオブウム（以下Nb）材が用いられ、現時点では板材をプレス成形した部材を電子ビーム溶接にて接合する方式が取られている。

これに対して上野らは液圧成形法にてシームレス9連空洞成形の研究をし、これが可能であるという結果を得ている^[1]。さらに、Nb材は大変高額であることから、斎藤らはかねてよりこの原価低減のために無酸素銅（以下Cu）とNbとをクラッドして用いて空洞をシームレス化する方法を提案し実用化の可能性の高いことを示している^[2]。

一方、石川らはXバンド加速管の接合のためにパルス通電法を適用しCuディスク60枚の接合に成功し接合効率向上の手段として提案している^[3]。

本報告はNb/Cuのクラッド化を図るための新しい工法の可能性について検討する。

2. クラッド化工程

2.1 背景

斎藤らのクラッド素管は超伝導対応のため内面をNbとし、外面を厚めのCuとして強度を分担させるようにし、熱間静水圧加圧法（以下HIP）や爆着法により、これを実現した。

本研究はHIPに比べて原価をより低減させるため、小型で省エネルギーの設備を想定した工法を提案す

る。すなわち上記のNbとCuの機能分担の考え方を継承し、工程としてHIPがCuとNbの圧着と接合の工程が同時進行するのに対し、本研究はこれらの工程を分離することによる改善の可能性を見出そうとするものである。

2.2 提案する工法

クラッド化工程では藤野らはHIP実験に図1に示すような管寸法を用いたので、ここでの検討はこれを踏襲する^[4]。新しい工程は室温ではこれらを高圧で

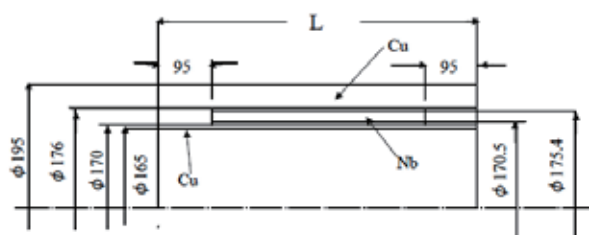


図1：クラッド接合前素管

圧着して仮接合し、さらにこれを拡散炉で本接合するという工法を提案する。圧着は非圧縮性流体の油圧利用の設備を用いるためにガス圧によるHIPに比べ安全性が格段に上がることが期待される。

以下それぞれの工程について述べる。

(1) 仮接合工程 図1で示すようにNb円筒の内外にCu円筒を配置し、その両端を電子ビーム溶接で封止する。この溶接は真空雰囲気でおこなわれるため円筒間の空間は真空となり、圧着時に空気の巻き込みが防止できる。なお内側のCu管部は引抜き工程や

¹ E-mail: hitomi@pm.mech.tohoku.ac.jp

成形加工時のNb管内面の保護用に配されたもので空洞成形完了後にエッチング等により除去される。

仮接合としては図2に示すような油圧加圧装置を用いる。素材管外周は離型処理をして外径型内に置き、内周部にゴム製の軟質型を挿入し内部に油圧をかけることにより外周の円筒型に内側から押し付けてCuとNb同士を圧着する。この際外径型内も真空引きをする。

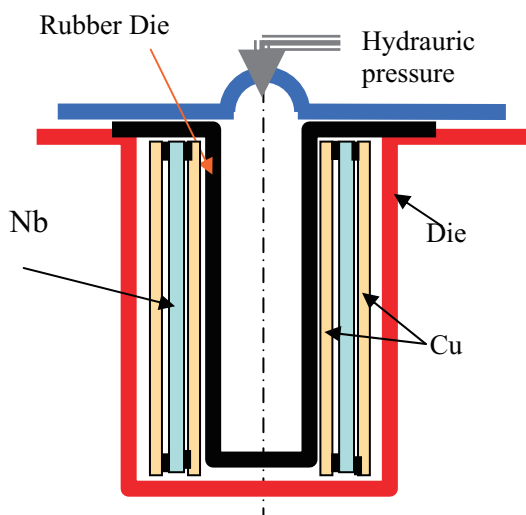


図2：仮接合工程概念図

- (2) 本接合工程 本接合工程では確実に界面での接合を実現するためにパルス通電接合法を適用する。仮接合された素管の接触界面にパルス状電流を加えると通電衝撃による界面に発生する発熱によりスポット的に熔融点が発生し、これを基点として熱雰囲気中で拡散接合が進行するというプロセスである。
- (3) その後の工程 この接合済み素管に対し引抜きを実施し所定の管径と肉厚に製管する。その後、これを所定の長さに裁断して液圧成形に供する。

2.3 課題

以上で提案した方式は仮接合工程、本接合工程ともに条件出しが必要であるが、本研究では見通しを得るために、それぞれの工程において以下のような点について評価する。

仮接合工程では、(1) 内圧による圧縮の効果の接合強度への影響、(2) 長尺管の組合せになるので加工面粗さの接合強度への影響である。本接合工程ではパルス通電法による接合の可能性評価である。

3. 実験内容

3.1 仮接合実験

図1の接合前素管の場合のNb管の周方向伸び率は内周基準で1.3%である。これは許容伸び35%に対して十分低い値であるため余裕を持った伸び量に収まっている。

管材を内圧によって拡張する工程を予備的に評価するために、内圧相当の軸方向推力をかけて円筒材を圧着する方法をとることとする。すなわち2個のCu中実円筒 ($\phi 48$ 、長さ39) の端面 (面の粗さ $1.2Ra < \text{目標} 1.6 >$) でNb円板 ($\phi 48$ 、厚さ6、粗さ $22Ra < \text{目標} 12.5 >$) をはさみ両端から加圧して圧着する。なお、粗さの選定は、実際の管材の仮接合の場合、後工程の引抜きのため長さ2,000程度になるのでCuは引抜き素管、Nbは旋削品を想定し比較的荒めな値を設定した。加圧は三起精工 (株) 製のSTR-121-200型200トンプレスを用いた。

Nb管の内周半径と板厚の比率は2.9%であるため薄肉円筒として考える。Cuの応力歪曲線から200 ~ 250 MPaの応力を受けると塑性域に入るので、この周方向応力となるときの内圧はたかだか7.3MPaである。この圧力でCu管の外周は外壁に突き当てられ、これ以降は塑性変形をより確実にするための加圧領域となる。今回の実験は予備的なものとして藤野らがHIPで実施した196MPa ($2,000\text{kg/cm}^2$)^[4]の圧力に相当する軸方向推力362.7kN (37ton) 前後の値をとることにした。すなわちプレス押圧力としては275、363、431、490kNとした。

3.2 本接合実験

本接合実験は (株) 日本テクノ製のパルス通電拡散接合炉を用いた。この炉は真空中で試験片にパルス通電をすると同時に、軸方向に負荷をかけられる機能をもっている。試験片のCu部両端に炭素電極を付

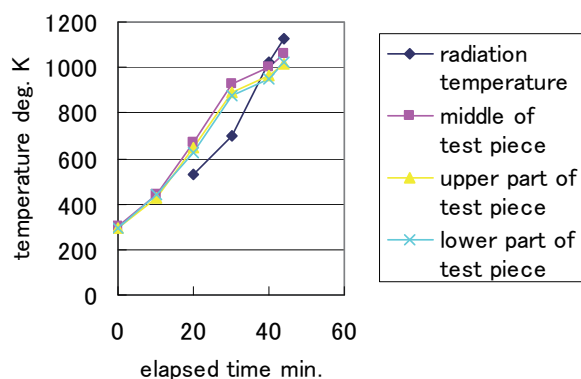


図3：本接合実験温度変化

け、475Hzのパルス電流をデューティ比86%でかけ、軸推力は20kNとした。また試験片の上、中、下部に、各部の温度モニタ用の熱電対を取り付けた。温度変化は図3の363kN仮接合品の温度経過グラフに示すように10分毎に電流値を上げ、40分経過後に3,500Aになった直後 (この例では4分後、最高放射温度1,127K) の界面の熔融濡れを確認してから電流を遮断して炉内放冷を40分おこなった。さらに真空炉内で773K、4時間のアニールをした。

3.3 引張試験

接合完了の接合試験片から引張直線部長さ40、φ8の引張試験片を切り出した。これらをオリエンテック（株）製のテンシロン万能試験機RTC-1325Aにより引張試験をおこなった。

4. 実験結果

仮接合実験では軸推力275kNのときにプレス機の負荷を除去した瞬間にスプリングバックと共にCuとNbとの界面で剥がれが発生した。それ以上の負荷では剥がれはなく接合状態が維持された。本接合完

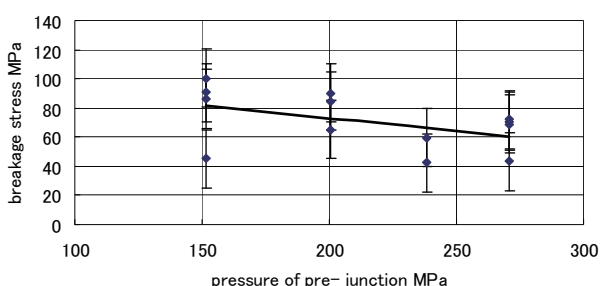


図4：引張試験結果

了後の引張試験の結果を仮接合面圧と破断応力で整理すると図4のようになる。破断は接合面で発生し、その破断応力はバルクのCuの破断応力の1/3程度であり、そのばらつきも大きい。また仮接合面圧が低い方の破断応力が若干大きめである。

図5はNb側の破断面の三次元表示を示し、Nb陵部から斜部ではCuの一部がNb部に付着したまま破断し、Nb谷部では剥がれが生じているように観察される。相手材のCuの表面ではほぼ全面にわたってむしれのような状態が観察される。

図6は接合界面のSEM画像を示し、界面は右上から左下に走り、下側がNbである。この画像からNb/Cuの接合がなされていることが観察される。

5. おわりに

圧着による仮接合後にパルス通電接合法を適用しNb/Cuのクラッド化に成功した。まだ接合強度は十分ではないが今後の可能性を見出した。実験結果の考察と今後の課題は以下のとおりである。

- (1) Nb陵部から斜部でのCuの付着状況からパルス電流による熔融スポットの形成は存在したものと判断され、本法の実現可能性を確認した。
- (2) Nb谷部に十分Cuが充填されず剥離の起点になった可能性があり、Cuの塑性流動性、異物混入や空気の巻き込みなどの要因が考えられる。
- (3) これより界面の面粗さが接合強度の悪化に寄与したと考えられるので、面粗さの適正化と接合面の洗浄が課題である。
- (4) 仮接合時の加圧力のチューニングが必要でこの

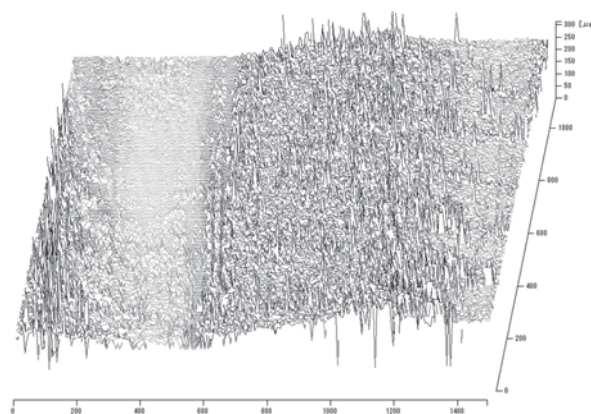


図5：Nb面における破断面3次元表示

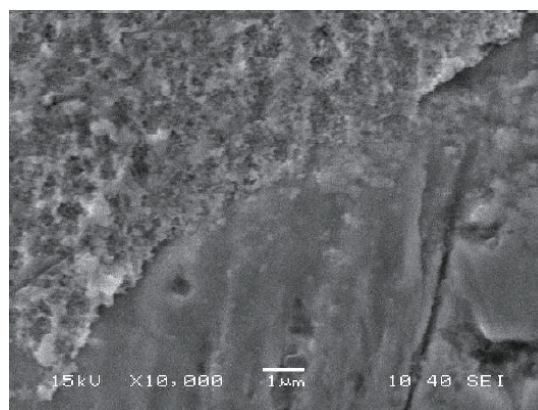


図6：接合界面のSEM画像

値と保持時間の適正化も重要である。

- (5) 本接合の最高温度付近での保持時間、あるいは昇・降温時間の適正化も必要である。

なお、本研究はKEK加速器研究施設斎藤健治准教授のご指導、3D AUTO PROTECH（株）および中部高周波工業（株）の支援を得て実現できた。ここに深甚の謝意を表する次第である。

参考文献

- [1] K. Ueno, et al., “Development of Machine Tool for Seamless Cavity of Super Conductivity”, Proceedings of 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan And 31th Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, Aug. 2-4, 2001
- [2] 斎藤健治, “ニオブ・銅クラッド材を用いたシームレス超伝導高周波加速空洞の開発”, 文部科学省科学研究費補助金成果報告書, 平成14年7月
- [3] 石川政幸他, “パルス通電による加速管用無酸素銅ディスクブランクの60枚接合”, 溶接学会論文集, 23巻2号, 平成17年5月
- [4] 藤野武夫, “ニオブ・銅クラッドシームレス超伝導高周波加速空洞の研究”, 総研大学位論文, 平成14年度