(Nb,Ti)₃Sn 超電導線突き合わせ接続部の抵抗特性

佐藤 知絵, 鴨志田陸男, 後藤 純孝, 高橋 龍吉
和田山芳英, 高力 勝男, 浅野 克彦*, 重 中 顕*

日立製作所日立研究所 日立市幸町3丁目 1-1

*日立製作所日立工場 日立市幸町3丁目 1-1

(1995年4月18日受理)

Contact Resistance Characteristics of Butt-Weld Joints
of (Nb,Ti)₃Sn Superconducting Wires

Chie SATO, Rikuo KAMOSHIDA, Yoshitaka GOTOH, Ryukichi TAKAHASHI,
Yoshihide WADAYAMA, Katsuo KOORIKI, Katsuhiko ASANO* and Akira SHIGENAKA*

Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd., 1-1, 3-chome, Saiwai-cho, Hitachi 317

*Hitachi Works, Hitachi Ltd., 1-1, 3-chome, Saiwai-cho, Hitachi 317

(Received April 18, 1995)

Synopsis :

Applicability of resistance butt welding to (Nb,Ti)₃Sn multifilamentary superconducting wires was studied in both single- and seven-strand conductors, and the dominant factors for the contact resistance of those joints were investigated. Superconducting joint characteristics were partially attained in the case of welding after reaction (react & weld) and that of reaction after welding (weld & react). For react & weld joints, damaging effects on the superconducting filaments in the welding process were dominant, while for weld & react joints the degree of filament-to-filament alignment was found to be the dominant factor. In the seven-strand conductor joint case, the degree of strand-to-strand alignment at the bonding interface was found to become the dominant factor.

Keywords : resistance butt welding, (Nb,Ti)₃Sn superconductor, contact resistance, interface

1. 緒 言

超電導導体接続技術の開発は、超電導機器の性能向上と応用分野の拡大につながる重要な課題である。

化合物超電導線の接続法としては、従来、重ね合わせ半田接続が主に用いられてきた¹⁾。最近、核融合炉用マグネットをはじめ、強磁場大型マグネットの導体接続法として、低交流損失、コンパクト化等の点で優れた突き合わせ接続法²⁾の実用化が期待されている³⁾。また、突き合わせ接続ではフィラメントどうしの直接接続が可能であり、化合物超電導線どうしの超電導的接続の実現可能性も有している。しかし、接続面積が限られることから、信頼性の高い低抵抗接続の実現に

は、接続部の抵抗発生因子を把握した上での接続法の最適化が必須といえる。

本研究では、突き合わせ接続法のうち、優れた機械的特性の期待できる抵抗溶接法に着目した。ここでは、(Nb, Ti)₃Sn 導体接続部への抵抗溶接法の適用を目標に、より単純な素線および7本組導体を用いて、接続部の抵抗支配因子を検討した結果について述べる。なお、接続法として、超電導体生成のための熱処理を施した線材どうしの溶接、および生成熱処理前の線材どうしを溶接後熱処理を施す、2方式について比較検討した。

2. 実験方法

2.1 超電導線材および導体

使用した超電導素線は、ブロンズ法により作製された、径2~3 μm の $(\text{Nb}, \text{Ti})_3\text{Sn}$ フィラメントよりなる再マルチ構造を有する、最終線径0.9 mmの多芯線である。Fig. 1に素線の断面写真を示す。また、7本組導体は、超電導体生成熟処理（以後、生成熟処理と記す）前の上記素線を、7本束ねて無酸素銅管に組み込み、線引き後、生成熟処理を施して試験に供した。Fig. 2に7本組導体の断面を示す。

2.2 接続方法

素線および導体の突き合わせ接続は抵抗溶接法により行った。前述のとおり、基本的には、生成熟処理線を溶接する場合（以下、react & weld と記す）と、生成熟処理前の線どうしを溶接後、熱処理する場合（以下、weld & react と記す）の2方式により接続体を作製した。また、これらの接続体の他に、溶接時の

Fig. 1 Cross-sectional view of $(\text{Nb}, \text{Ti})_3\text{Sn}$ wire.

Fig. 2 Cross-sectional view of conductor.

Table 1 Major parameters of resistance welding.

	Wire	Conductor
Terminal distance (mm)	2.0	3.0
Welding pressure (MPa)	74	33
Welding current (r. m. s.) (kA)	React & weld 0.45~0.70 Weld & react 0.63~0.75	4.7~5.2 4.7~4.9
Welding time (s)		0.3

加圧・加熱によるフィラメントの変形および超電導特性劣化効果の検討のため、生成熟処理線材に軸方向加圧下で通電加熱した接続部のない試料（以下、react & “weld” 試料と記す）を作製した。各接続工程を以下に示す。

(a) react & weld: 生成熟処理を施した長さ約50 mmの素線（または導体）を軸線方向に対し垂直に切断し、端面を60 μm の最終表面粗さに機械研磨した。Fig. 3に示すように、接続する超電導線の端面を互いに突き合わせて電極に取り付け、電極間隔2 mm（素線）、または3 mm（導体）として、軸線方向に加圧しながら50 Hzの交流電流を通電し、溶接した。接続部の軸方向圧縮量（以下、圧縮量）の制御は溶接電流の調節により、実規模導体の接続条件を考慮し、60~900 μm の広範囲に変化させ試料を作製した。

(b) weld & react: 生成熟処理前の素線（または導体）を上記熱処理線と同様に溶接した後、生成熟処理を施した。

(c) react & “weld”: 接合部のない生成熟処理後の

Fig. 3 Schematic of resistance welding.

Fig. 4 Resistance welded butt joint of (Nb, Ti)₃Sn wire.

線材に、react & weld 接合体とほぼ同条件で、加圧・通電加熱処理し、試料とした。

7本組導体については、接続特性に及ぼす突き合わせ面における素線位置対応性の影響を調べるために、接続面における対向素線間の位置を一致させた場合 ($\theta=0^\circ$)、 15° および 30° ずらした場合の3種類の接合体を作製した。Fig. 2の断面模式図からわかるように、 30° 回転させた場合に素線位置対応度が最も低くなる。

Table 1に、素線および7本組導体の各溶接条件を示す。また、Fig. 4に素線の突き合わせ接続部の代表的な外観写真を示す。圧縮量が同じ場合、react & weld 接合体と weld & react 接合体でほぼ同じ外観形状を示した。

2.3 接続部の評価

接続特性評価指標として、接続抵抗、および臨界電流 (I_c) を測定した。接続抵抗値は、四端子抵抗法により電圧-電流特性を測定し、発生電圧をその時の通電電流値で除して求めた。測定条件は、液体ヘリウム温度 (4.2 K)、試料への通電電流に対し直交方向の外部磁場ゼロ、および1~5 T、通電電流0~2,000 A、電流掃引速度7~17 A/sとし、電圧は、接続面を中心に間隔10 mmの位置に設けた端子間で測定した。なお、react & “weld” 試料については、ひずみを与えた位置を中心に間隔10 mmの端子間で測定した。臨界電流値 I_c は $0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$ の電圧発生時の通電電流値とした。

接続界面近傍の観察には、光学顕微鏡、走査電子顕微鏡 (SEM)、および透過型電子顕微鏡 (TEM) を用いた。

また、機械的特性評価として、常温における引張試

験を行った。試験条件は、試料長さ100 mm、チャック間距離60 mm (つかみしろ片側20 mm)、引張速度 $3.3 \times 10^{-2} \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ とした。つかみの部分は、素線の場合外径1 mmの銅線を、7本組導体の場合には同じ導体を両側に添えて、半田付けした。

3. 実験結果および考察

3.1 (Nb, Ti)₃Sn 超電導素線の抵抗溶接特性

3.1.1 接続抵抗特性

Fig. 5は、線材自体、および圧縮量を変えた react & weld, および weld & react 接合体の、4.2 K、外部磁場5 Tにおける代表的な抵抗-電流特性を示す。ここで、図中の網かけ部は、使用した測定機器の検出限界以下の領域を示す。この領域の上部境界線は、各試料での $0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$ の発生電圧に対応し、境界線と抵抗曲線の交点が各試料の臨界電流値 I_c を示す。

線材自体の I_c は約400 Aであり、通電電流が I_c を越えるとともに抵抗値は急激に上昇しクエンチに至った。これに対し、接合体ではいずれも特性劣化を示し、特に react & weld 接合体では、 I_c は25 A以下と大幅に低下し、抵抗-電流曲線にも変化が認められた。抵抗値は、通電電流が I_c 値を越えると同時に急激に上昇し、その後緩やかな増大過程を経て、300 A付近で $1 \times 10^{-6} \Omega$ 近くに達した後、再び急激に上昇し、クエンチに至った。緩やかな抵抗上昇は、ジュール発熱量の増大に伴う試料の温度上昇による超電導体領域における常伝導化領域の拡大、およびマトリックスの比抵抗の増大によると考えられる。接続抵抗値は、50 Aにおいて $7 \times 10^{-8} \sim 4 \times 10^{-7} \Omega$ 、また100 A

Fig. 5 Transport current dependences of resistance of (Nb, Ti)₃Sn wires (a) without joint, (b) react & weld joint, and (c) weld & react joint.

では $1 \times 10^{-7} \sim 6 \times 10^{-7} \Omega$ であった。なお、圧縮量が大きいほど、 I_c は低く、接続抵抗は高くなる傾向を示した。

weld & react 接続体においても、 I_c は約 50 A に低下しているが、react & weld 接続体に比べて低下の程度は小さい。また、接続抵抗は、圧縮量にかかわらずほとんどの試料でほぼ同程度の値を示し、50 A 通電時に $2 \times 10^{-9} \Omega$ 、100 A で $1 \times 10^{-8} \Omega$ と、react & weld 接続体の場合より約 1 桁低い値を示した。測定試料の中には、 I_c が 100 A を越え、接続抵抗は $10^{-8} \Omega$ 以下の極めて低い値を示すものが見いだされた。これは接合面におけるサブマルチ線どうしの対応性が高く、従ってフィラメントどうしの接合率が高かったためと推測される。

次に、接続部の圧縮量と接続抵抗の関係を検討し

Fig. 6 Longitudinal deformation dependences of contact resistance for react & weld joint (□) and weld & react joint (●).

Fig. 7 Transport current dependences of resistance or contact resistance, for react & weld (□), weld & react (○) and react & "weld" joints (■).

た。Fig. 6 は接続抵抗の圧縮量依存性を示す。react & weld 接続体では、明らかな圧縮量依存性が認められ、接続抵抗は、圧縮量 100~200 μm において極小値を示した。圧縮量 200 μm 以上では、接続抵抗は圧縮量とともに増大し、フィラメントが受ける損傷効果に支配されていることを示唆している。一方、圧縮量 100 μm 以下の領域では、接合界面に多数のボイドが観察され、未接合領域の存在により、界面抵抗が高くなったと考えられる。

一方、weld & react 接続体では、接続抵抗は小さく、圧縮量との明確な比例関係は認められない。

次に、接続界面を持たない react & "weld" 試料により、溶接時のフィラメントの損傷効果のみの評価を試みた。Fig. 7 は、圧縮量 215 μm の react & "weld" 試料の抵抗-電流曲線を、ほぼ同じ圧縮量の react & weld 接続体と比較して示す。react & "weld" 試料は接合界面を有しないにもかかわらず、 I_c は線材自体の値に比べ大幅な低下を示した。特性曲線の形状および抵抗値は、ともに react & weld 接続体に近く、特に低電流領域ではほぼ一致した。しかし、通電電流の増大とともに接続抵抗の増加率が高くなり、両者の抵抗差は拡大する傾向を示す。

Fig. 8 は、圧縮量 200 μm の react & weld, weld & react および react & "weld" 試料の接続抵抗の磁場依存性を比較して示す。いずれの場合も、磁場の増大とともに抵抗値は増大し、react & weld 接続体と react & "weld" 試料は、0~3 T まではほぼ同様の磁場依存性を示す。しかし 4 T 以上では react & weld 接続体の抵抗の増加率が react & "weld" 試料の値を

Fig. 8 Magnetic field dependences of resistance for react & weld (□), weld & react (○), and react & "weld" joints (■).

Fig. 9 Longitudinal cross-section of react & weld joint.

上回る傾向を示した。

次に、接続抵抗特性と接合界面近傍のフィラメント組織の関係を検討する。

3.1.2 接合界面近傍の観察

まず、接合界面近傍のフィラメント形状の観察結果を示す。Fig. 9は react & weld 接続体の接続部断面を示す。圧縮量が100~200 μmの場合にはフィラメントの形状変化はほとんど認められないが、圧縮量200 μm以上では、フィラメントは線材の径方向に屈曲しており、圧縮量が大いほど屈曲の角度は鋭く、変形範囲は広がっている。react & “weld” 試料でも同様の傾向が認められ、圧縮量にほぼ等しい長さ領域でフィラメントの屈曲が観察された。また、weld & react 接続体においても同様の組織が観察された。Fig. 10は react & weld 接続体のマトリックスを化学的に除去した後のフィラメントのSEM像を示す。フィラメント屈曲部近傍で多数のクラックの発生が認められた。また react & “weld” 試料の加圧加熱領域においても、同様のクラックの発生が認められた。

次に、接合界面におけるフィラメントどうしの結合状態について調べるため、圧縮量の小さい試料の接合界面を電子顕微鏡で観察した。

Fig. 11は接合界面近傍の断面SEM像である。Fig. 11(a)に示すように、react & weld 接続体では、接合界面において直線状のフィラメント端面が明瞭に認められた。対向するフィラメントどうしの先端が一部重なり合っている箇所も見られるが、これは溶接時にフィラメントが、軟化した対向するマトリックス中にくい込んだ結果と判断できる。

一方、Fig. 11(b)に示される weld & react 接続体

では、像中に、暗く見えるNbコアと明るく見える反応層が観察され、そのうち反応層は端面および界面をまたがって存在しているのが認められた。通常、フィラメントの端部では、Nbと反応しうるSnの供給源となるマトリックスが存在しないと考えられるため、 $(\text{Nb}, \text{Ti})_3\text{Sn}$ は形成されない。しかし、この接合界面では、対向するマトリックスからのSnの拡散により化合物が界面をまたがって生成しており、weld &

Fig. 10 SEM image of superconducting filament at the jointed region of the react & weld joint.

Fig. 11 SEM images of longitudinal cross-section of (a) a react & weld joint and (b) a weld & react joint.

react のフィラメントどうしの突き合わせ面では、超電導的接合部が形成されていることを示している。

Fig. 12 は接合界面近傍の断面 TEM 像である。react & weld 接合体(a)では、SEM 観察結果と同様、接合界面が明瞭に観察された。接合界面に沿って、写真上で明るく見えるナノメートルオーダーの非晶質組織の存在が連続的に認められ、接合界面における酸化物等の不純物層の介在を示唆している。なお、Cu 合金マトリックス部は、 $(\text{Nb}, \text{Ti})_3\text{Sn}$ に比べてミリング速度が高いため、消失している。

weld & react 接合体(b)では、写真上部はマトリックス領域であり、熱処理前は Nb フィラメント（界面の右側）と Cu-Sn（界面の左側）の接統界面であったと推測できる。ここでは、不純物相を介さずに、連続的に結晶粒が存在しており、熱処理によって、界面をまたがって $(\text{Nb}, \text{Ti})_3\text{Sn}$ 結晶粒が成長したと考えられる。

以上の結果から、react & weld 接合体では接合界面が明瞭に存在し、一方、weld & react 接合体ではフィラメントどうしが接した部分において、原子レベルで清浄な接合が実現されていると結論できる。

3.1.3 引張特性

接統体の破断応力は、無接統試料の 205 MPa に対し、圧縮量 90~430 μm の react & weld, weld & react 接統体ともに 190~195 MPa であり、母材破断

を示した。一方、圧縮量 68 μm の weld & react 接統体では、187 MPa の破断応力で界面破断した。以上の結果から、圧縮量が 90 μm 以上の接統体では、母材同等の破断応力が得られることが明らかになった。

3.1.4 接統抵抗発生要因の検討

上記の結果から、接統部における抵抗発生原因として以下のことが考えられる。

- 1) クラック発生等のフィラメントの損傷による常伝導マトリックス側への電流分流
- 2) 隣接フィラメント間の接触による電流経路の乱れ、あるいはフラックスクリープ等
- 3) フィラメントどうしの接合界面の酸化物層等の介在物による接合界面抵抗
- 4) フィラメントと対向マトリックス間の接合部における電流の不連続性（フィラメントどうしの対応性）

接統抵抗の支配的因子をより明確にするために、いくつかの考察を試みる。

(1) react & weld 接統部の抵抗支配因子

3.1.1 項で述べたように、react & weld 接統体の抵抗特性は、圧縮量が同程度の react & “weld” 試料の結果とほぼ一致することから生成熱処理後溶接試料の抵抗は、接統部近傍のフィラメントの損傷状態に支配されると考えられる。すなわち、溶接過程での変形

Fig. 12 TEM images at longitudinal cross-section of (a) a react & weld joint and (b) a weld & react joint.

に伴うフィラメントの損傷の広がり、電流がマトリックスを経由して流れる常伝導領域長を決定し、抵抗発生過程を支配していると考えられる。また、通電電流の増大と共に react & weld 接続体の抵抗値は react & “weld” 試料の値を上回る傾向を示すが、これは、接続界面抵抗の寄与によると考えられる。

Fig. 13 は、react & weld 接続体および react & “weld” 試料の抵抗増加率 $(R(H)-R(0))/R(0)$ の外部磁場依存性を示す。ここで、 $R(0)$ は外部磁場ゼロにおける抵抗値、 $R(H)$ は磁場強度 H における抵抗値である。react & “weld” 試料ではほぼ直線関係を示すのに対し、react & weld 接続体では指数関数的な増大傾向を示す。Cu の磁気抵抗効果については、多結晶体では $d\rho/\rho$ は磁場に比例することが知られており⁴⁾、一方、常伝導領域長は溶接時のフィラメント損傷領域で決まり、磁場強さによらないとすると、react & “weld” 試料の抵抗値は基本的に常伝導マトリックス相の比抵抗値に支配されと考えられる。接合部を有する react & weld 接続体では、これに接続界面に起因し、磁場に依存する抵抗分が加わる

と考えられる。Fig. 5 において、通電電流が I_c を越え、抵抗値が緩やかな上昇領域に入る点の抵抗値は、フィラメント損傷領域のマトリックス部の 4 T, 4.2 K における抵抗値にほぼ等しいと推測される。4 T, 4.2 K におけるマトリックス部の比抵抗は、実測値はないが、マトリックス中に数%の未反応 Sn の残存することを考慮すると、 $(1\sim4)\times 10^{-9} \Omega\cdot\text{m}$ の範囲が妥当と判断される。常伝導領域長が接続部の圧縮量に等しいとし、マトリックス部の断面積とから抵抗値を計算すると、圧縮量 100 μm , 235 μm , 450 μm の各 react & weld 接続体で、それぞれ、 $(0.6\sim2)\times 10^{-8}$, $(1\sim5)\times 10^{-8}$, $(0.3\sim1)\times 10^{-7} \Omega$ となり、実測値 1×10^{-8} , 2.4×10^{-8} , $4.8\times 10^{-8} \Omega$ と同程度の値となる。このことから、超伝導特性の劣化は圧縮量と同程度の領域で起こっている可能性が高いと判断される。また、react & weld 接続体における界面抵抗の寄与を react & weld 接続体と react & “weld” 試料の抵抗差から見積もると、温度 4.2 K, 磁場 4 T, 100 A 以下の通電時でおよそ $5\times 10^{-8} \Omega$ 程度となる。

Fig. 13 Magnetic field dependence of $R(H) - R(0)/R(0)$ for react & weld ($\blacksquare$), weld & react ($\circ$) and react & "weld" joints ($\square$).

(2) weld & react 接続部の抵抗支配因子

weld & react 接続部においては、Fig. 6 で見られたように、接続抵抗の圧縮量依存性が明確に認められないことから、生成熱処理前の Nb フィラメントの変形による損傷効果は極めて小さいと判断できる。また、同じ理由から、生成熱処理前のフィラメントの変形により予想される線材特性低下、例えばフィラメントマトリックス界面剝離による化合物生成反応の抑制、または電流経路の乱れによる磁気的不安定化効果等も小さいと言える。従って、weld & react 接続体の接続抵抗の支配的因子は前記項目 3) および 4) の界面抵抗であるといえる。しかし、weld & react 接続体の接続抵抗は、4 T, 100 A 以下で、 $(2 \sim 5) \times 10^{-9} \Omega$ 程度であり、react & weld 接続体で見積もった界面抵抗値に比較して低い。これは、3.1.2 で述べたように、weld & react 接続体ではフィラメントどうしの接合界面に不純物介在相がなく、 $(\text{Nb}, \text{Ti})_3\text{Sn}$ 結晶粒が連続的に成長しているため、react & weld 接続体に比べ、フィラメントどうしの超伝導的接合性に優れているためと考えられる。

さらに、上述のミクロな界面介在物の有無よりも、突き合わせ接合面におけるフィラメントどうしの位置対応性がより支配的であると推測される。weld & react 接続体の中には、平均値よりさらに 1 桁低い接続抵抗を示すものもあり (Fig. 5)、圧縮量などの接続条件は同じであることを考慮すると、サブマルチ線どうしの対応度が高く、フィラメントどうしの接合率が高くなったためと考えられる。フィラメントどうしの接合面積率を高くするには、素線レベルではサブマル

チ間の対応性を高めることが必要と考えられる。

3.2 7 本組導体接続部の検討

7 本組導体同士の突き合わせ接続体を用い、素線位置対応性など導体に特有な接続抵抗因子について検討した。

3.2.1 接続抵抗の電流特性

Fig. 14 (a) は、素線一対一対応試料の、温度 4.2 K、直交外部磁場 4 T における代表的な接続抵抗 - 電流特性を、react & weld および weld & react 試料について比較して示す。ここで接続部の圧縮量は 200 μm とした。react & weld 接続体の I_c は最大でも約 200 A と低く、接続抵抗は、通電電流 700 A で $1.5 \times 10^{-8} \Omega$ を示した。一方、weld & react 接続体では、約 1,000 A まで電圧発生は認められず、接続抵抗は、2,000 A で $8 \times$

Fig. 14 Transport current dependence of contact resistance for react & weld and weld & react joints. At interface between conductors, (a) alignment angle of each wire $\theta = 0^\circ$, and (b) $\theta = 30^\circ$.

Fig. 15 Longitudinal deformation dependence of contact resistance of react & weld joint.

$10^{-10} \Omega$ と極めて低い値を示した。電流が各素線に均等に分配されると仮定し、素線当りの抵抗値 (100 A 通電時) に換算すると、それぞれ $1 \times 10^{-7} \Omega$ 、および $< 1 \times 10^{-9} \Omega$ となる。これらの値は素線の場合の値と同オーダーであるが、7本組導体の方がより低い。この理由としては、試料径、銅比等が異なる、素線と7本組導体では、圧縮量が同じでも、フィラメント損傷効果に差が生じることが考えられる。

Fig. 14(b)は、素線位置を 30° ずらして接続した場合の特性を示す。react & weld 接続体の I_c 値は 100 A 以下、接続抵抗は $8 \times 10^{-9} \sim 2 \times 10^{-8} \Omega$ と、 0° の場合に比べて高い値を示した。また、weld & react 接続体においても、臨界電流値は約 400 A と、 0° の場合に比べて大幅に低い値を示し、接続抵抗は通電電流 1,000 A で約 1桁高い $3 \times 10^{-9} \Omega$ を示した。なお、 $\theta = 15^\circ$ の試料では、 0° の場合とばらつき範囲内でほぼ一致する結果が得られた。

Fig. 15 は、素線位置対応性の異なる react & weld 接続体の接続抵抗の圧縮量依存性を比較して示す。いずれも、接続抵抗は圧縮量に依存し、150~250 μm 領域で極小値を示すが、 $\theta = 30^\circ$ に比べ、 $\theta = 0^\circ$ および 15° の位置対応性の高い試料の方が、極小値は小さい。一方、300 μm 以上では、抵抗値の素線位置対応度依存性は小さくなる。これは、圧縮量が 300 μm を越えると、フィラメント損傷がより支配的になるためと考えられる。

一方、weld & react 接続体では、顕著な素線位置対応度依存性は認められなかった。これらの結果は、素線に関する実験結果にほぼ符合している (Fig. 6)。

react & weld 接続体の引張特性は、 $\theta = 0^\circ$ の場合には圧縮量 60 μm 以上の接続体で、 $\theta = 30^\circ$ では 150 μm 以上の接続体で、母材の破断応力 163 MPa と同等の値 (母材破断) が得られた。

3.2.2 突き合わせ面の素線位置対応性

前項において、各接続体の接続抵抗特性について述べたが、いずれも、圧縮量 200 μm 付近では、素線位置対応性の低い、すなわちフィラメントどうしの接合率が低い接続体の I_c は、素線一対一対応接続体に比べ、約 1/2 と低く、接続抵抗は 2 倍以上高い。

react & weld では、weld & react に比べ、接続抵抗の圧縮量依存性がより顕著であり、さらに、圧縮量の増大につれ素線位置対応度依存性が小さくなる傾向を示すことから、フィラメントどうしの接合率より溶接時のフィラメント損傷効果が重要であると言える。

一方、weld & react 接続体では、接続抵抗に対する圧縮量、すなわち溶接時のフィラメント損傷の影響が明らかに小さく、素線位置対応性、すなわち、接合界面における常伝導マトリックスを渡る電流パスの長さ、あるいはフィラメントどうしの接合率が、より重要度を増してくると思われる。

4. 結 言

抵抗溶接法による $(\text{Nb}, \text{Ti})_3\text{Sn}$ 超電導素線およびその7本組導体の突き合わせ接続体について、4.2 K、外部直交磁場 0~5 T における接続抵抗支配因子を検討し、以下の結論を得た。

1) 突き合わせ溶接接続体では、超電導体生成熱処理後溶接 (react & weld)、および溶接後熱処理 (weld & react) のいずれにおいても、部分的に超電導的接合性を示す接続特性を得ることができる。

2) 素線接続部の接続抵抗 (4.2 K, 5 T) は、線材の I_c より十分に低い 100 A 以下の通電時において、react & weld 接続部では $10^{-7} \Omega$ オーダー、weld & react 接続部では $1.5 \times 10^{-8} \Omega$ 以下である。

3) 接続抵抗の支配的因子は、react & weld 接続では溶接時のフィラメント損傷効果、また weld & react 接続では、界面抵抗とくに接合面におけるフィラメント位置対応度である。

4) 7本組導体接続部において、フィラメントの損傷効果が小さい接続条件下では、接続抵抗特性に対する突き合わせ面の素線位置対応性の効果が明らかであり、素線どうしを一対一に対応させた接続により、対

応度の低い場合に比べ、臨界電流値の大幅な向上が可能である。

参 考 文 献

- 1) 渋谷純市：ジョイテック，4月号（1989）19
- 2) C. J. Heyne, D. T. Hackworth, S. K. Singh,

J. L. Young and P. A. Sanger : Eighth Symposium on Engineering Problems of Fusion Research, San Francisco (1979) 1148

- 3) 佐々木崇ら：第48回低温工学・超電導学会講演概要集（1992）214
- 4) 日本金属学会編：金属便覧（改訂5版），丸善，東京（1990）154