

真空遮断器用低コストろう材

Low-Cost Brazing Metal for Vacuum Circuit Breakers

草野 貴史 長部 清 奥富 功

■ KUSANO Takashi ■ OSABE Kiyoshi ■ OKUTOMI Tsutomu

真空遮断器は、小型・軽量、メンテナンス省力化、環境調和などの観点から、他の遮断器（油、空気、磁気、ガス）に比較して、社会的ニーズにもっともマッチした機器として、その適用範囲が飛躍的に拡大してきた。

真空遮断器の主要機器である真空バルブの製造には、真空ろう付けは不可欠な製造プロセスである。これらの構成部品は無酸素銅や銅-クロム (Cu-Cr) 合金などの極めてガス含有量の少ない特殊材料によって構成されており、これら部品間の接合に真空ろう付けを用いている。このプロセスで使用するろう材には、従来、第1ステップとして高価なパラジウムろう、第2ステップとして汎用性のある銀銅共晶ろう（以下、共晶銀ろうと言う）を使用し、組立て温度に応じてこの種のろう材料を使い分けている。

しかし、パラジウムろうは、パラジウム (Pd) の価格高騰、ステンレスろう付け面へのニッケル (Ni) メッキ処理の必要性などから、真空バルブの低価格化を阻害していた。そこで東芝は、パラジウムレスろう材料を開発し、製品適用の拡大に取り組んでいる。

Vacuum circuit breakers have various advantages such as compactness and light weight, and they are also maintenance-free as well as environmentally friendly compared with other types of circuit breakers. As a result, their applications have rapidly expanded.

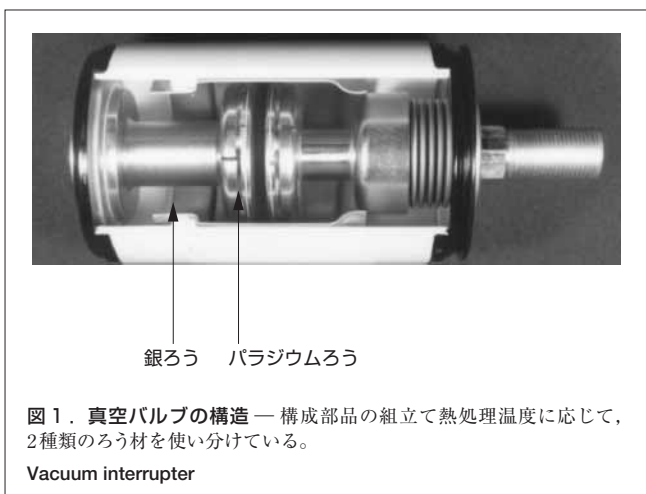
Brazing in a vacuum is a necessary process for manufacturing of the vacuum interrupter, which is the main component of a vacuum circuit breaker. The parts of vacuum interrupters are made from special materials of extremely low gas content, such as oxygen-free Cu or Cu-Cr alloys. Brazing processes in a vacuum are applied to weld the parts of vacuum interrupters. In these processes, first an expensive Pd-containing brazing material is applied followed by the commonly used Ag-Cu eutectic brazing material. These brazing materials are used according to the assembly temperature. The Pd-containing brazing material has a melting and welding performance suited to the existing manufacturing process for vacuum interrupters. However, it has prevented the cost reduction of vacuum interrupters because its price has risen with the rise in price of Pd, and also because an Ni-plating process is necessary on the surface of stainless steel to be brazed.

Toshiba has been making efforts to develop Pd-free brazing materials and to apply these materials to actual processes while enlarging the areas of application.

1 まえがき

複雑な構成部材をろう付けにより製造する際には、熔融温度が異なる2種類以上のろう材を使用するステップろう付けが利用される。例えば、真空遮断器の構成機器である真空バルブ（図1）の製造では、一般的な共晶銀ろうである Ag-28 mass%Cu (28質量%のCuを含有したAg-Cu合金、以下Ag-28Cuと略記)と、それよりも熔融温度が高いパラジウムろう、例えば、Ag-58.5Cu-10Pd (JIS記号：BPd-2)の2種類のろう材を熱処理温度に応じて使い分けている。すなわち、部分的な組立ては熔融温度が高いパラジウムろうで行い、最終組立ては熔融温度が低い共晶銀ろうで行っている。

パラジウムろうには、真空バルブの製造工程に適した熔融温度と優れたぬれ性、特にニッケル (Ni) メッキ部品に対しては優れたぬれ性を持つという利点がある。しかし、構成元素として、高価なパラジウム (Pd) を約10 mass%も含有してい



るために、共晶銀ろうよりも貴金属相場に大きく左右されて価格の変動が大きく、10倍以上高いときもある。

真空雰囲気で使用でき、更に、真空バルブ部品の接合に適するというこの既存のパラジウムろうに代替可能なろう材は、一般ろう材メーカーでは製造していない。そこで東芝は、環境負荷低減の観点からも、一般に廃液処理が必要となるメッキ工程を削減するため、被接合材のNiメッキレス化を目的とした、安価な新ろう材の開発に取り組んだ。

2 真空遮断器用新ろう材に必要な特性と組成

この新ろう材には、次の各項目が要求される。

- (1) 熔融温度は現行のパラジウムろうと同等であること
- (2) 真空(又は水素(H₂))雰囲気中でのぬれ性に優れ、特にNiなどのメッキなしでも接合可能なこと
- (3) 構成元素として、次のような元素を含有しないこと
 - (a) 貴金属元素(Pd, 金(Au)など)
 - (b) 有害元素(カドミウム(Cd), 鉛(Pb)など)
 - (c) 高蒸気圧元素(亜鉛(Zn), アンチモン(Sb), ビスマス(Bi)など)
- (4) そのほか、線材や板材への加工性、接合強度などを備えていること

(1)と(2)は現在の作業工程面からの要求特性であり、更に(2)ではメッキレスという環境面からの要求特性も含んでいる。また、(3)はコスト面、環境面、真空機器の製造面からの要求特性である。

3 熔融温度の制御

これらの要求特性を満足する新ろう材として、銀ろう(Ag-Cu系)にぬれ性改善元素であるNiなどを添加したAg-Cu-Ni系ろう材の適用を検討した。このろう材は前記の要求特性のうちの(2)~(4)をほぼ満足することが確認できたので、(1)の熔融温度の制御に重点を置いて開発を行った。

新ろう材の熔融温度は、共晶銀ろうとの組合せによるステップろう付けを行うことから、固相線温度^(注1)を825℃以上、液相線温度^(注1)を870℃以下にする必要がある。そのために、銀ろうの主成分であるAgとCuの組成比の大幅変更と、Niなどの添加元素量の調整を実施した。

3.1 銀ろうの主成分比の変更

代表的な銀ろうの組成はAg-28Cu(共晶組成)で、熔融温度は固相線温度、液相線温度ともに779℃(共晶温度)である(図2)が、新ろう材では熔融温度を上昇させるために、Agに対するCuの比率を大幅に減少させた。具体的には、Ag

(注1) 固相線温度と液相線温度

ろう材では、固相から固相線を横切るときの温度を固相線温度といい、更に温度を上昇させると固相と液相が共存する状態を経過して液相線を横切るときの温度を液相線温度という。

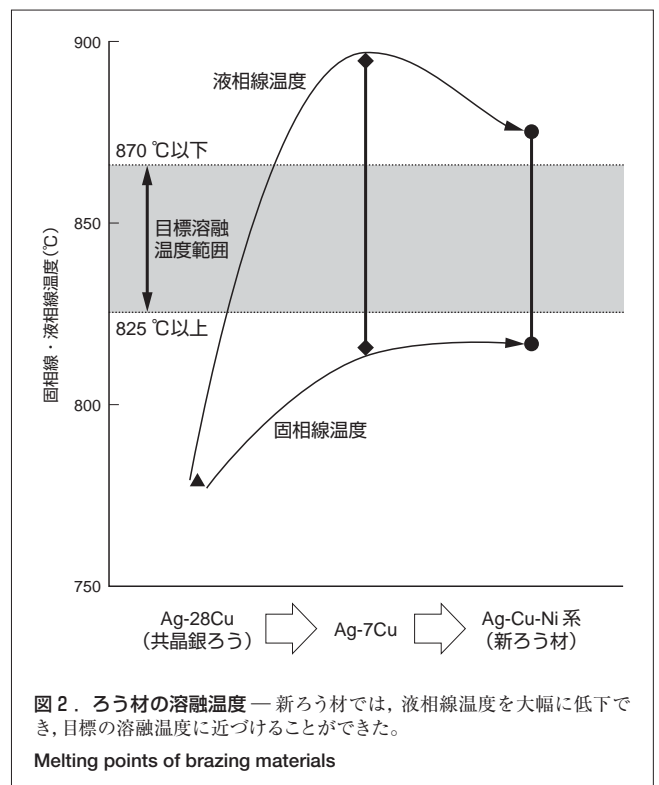


図2. ろう材の熔融温度—新ろう材では、液相線温度を大幅に低下でき、目標の熔融温度に近づけることができた。

Melting points of brazing materials

に対するCuの固溶限である8mass%⁽¹⁾以下とした。

例えば、Ag-7Cuでは、固相線温度と液相線温度はそれぞれ約825℃と約890℃になる(図2)。しかし、AgとCuの主成分比の変更だけでは、固相線温度と液相線温度の両方を、目的温度範囲に制御することはできない。

3.2 添加元素の選定

次に、主成分比の変更の後に、熔融温度の制御と被接合材とのぬれ性改善のために、添加元素の検討が必要である。Ag-7Cuでは、固相線温度をあまり変化させずに液相線温度だけを低下させるために、ぬれ性改善元素であるNiを含めた添加元素の検討を行った。

一般的傾向として、銀ろうの熔融温度を低下させる元素としてはスズ(Sn)、インジウム(In)、Cd、Znなどがあり、また熔融温度を上昇させる元素としてはNi、マンガン(Mn)、Pdなどがある⁽²⁾。ただし、InとPdは高価格、Cdは有害物質、Znは高蒸気圧元素、という理由で、添加元素の対象外とした。したがって、添加元素としてはNi、Sn、Mnの3種類を選定した。

3種類の各元素の期待した役割は、次のとおりである。

- (1) Ni ぬれ性改善(特に鉄(Fe)基合金に対し)と熔融温度上昇
- (2) Sn 熔融温度低下とぬれ性改善
- (3) Mn 熔融温度上昇とぬれ性改善(特にFe基合金に対し)

Sn, Ni, Mnの各元素を0.5~8mass%の範囲で添加した

Ag-Cu-Ni系の溶融温度の測定結果は、固相線温度は820℃、液相線温度は875℃であった(図2)。Ag-7Cuに比べて、固相線温度をほとんど低下させずに液相線温度を大幅に低下させることができ、目標の溶融温度(固相線温度:825℃以上、液相線温度:870℃以下)に近づく傾向が確認できた。

3.3 添加元素の量の調整

最後に、溶融温度を目標範囲内とするために、各元素の添加量の最適化を試みた。溶融温度へ影響を与える因子(添加元素)の割り出しと、その因子の影響度を重回帰法によって解析した。重回帰法とは、測定値との誤差が最小となる多因子の線形方程式を求める方法であり、有意な因子の割り出しができる解析手法である。

文献及びこれまでに試作した銀ろうのなかで、Agが85 mass%以上の試料について、Cu, Ni, Sn, Mnの含有率を独立因子とし、固相線温度と液相線温度を従属因子として重回帰分析をした。その結果、次の線形式を得た。[]で示す各元素の前の数値は含有率(mass%)を表す。

$$\text{固相線温度 (}^\circ\text{C)} = 918 - 9.2[\text{Cu}] - 8.2[\text{Sn}] + 0.0[\text{Ni}] + 0.0[\text{Mn}]$$

$$\text{液相線温度 (}^\circ\text{C)} = 954 - 9.7[\text{Cu}] - 7.0[\text{Sn}] + 6.5[\text{Ni}] + 0.0[\text{Mn}]$$

これらの式から、CuとSnの含有率増大は固相線温度と液相線温度を低下させ、Niの含有率増大は液相線温度のみ

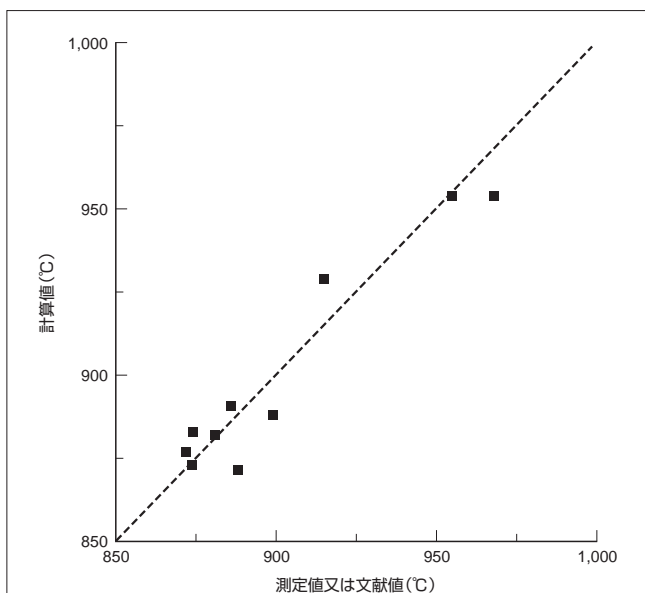


図3. 液相線温度の測定値と計算値 — 銀ろうの液相線温度の測定結果は、計算値とほぼ一致している。

Comparison of measured and calculated melting points

を上昇させることがわかり、前記の定性的な傾向と一致した。また、Mnの含有率は、今回の組成範囲では溶融温度にほとんど影響しないことがわかった。更に、図3に示したように、Ag:85 mass%以上、Cu:5~10 mass%、Sn:1~8 mass%、Ni:0.5~8 mass%、Mn:1~3 mass%の範囲で試作し、銀ろうの液相線温度の測定結果は、上式による算出結果とほぼ一致した。この検討から、液相線温度を825℃以上、固相線温度を870℃以下にする組成範囲は、Ag:85 mass%以上、Cu:6~9 mass%、Sn:1~4 mass%、Ni:2 mass%以下、

表1. 従来材と新ろう材の比較

Comparison of conventional brazing metal and new brazing metal

項目	従来材 (Ag-Cu-Pd系)	新ろう材 (Ag-Cu-Ni系)	目標値
固相線温度 (°C)	825	826	825以上
液相線温度 (°C)	850	870	870以下

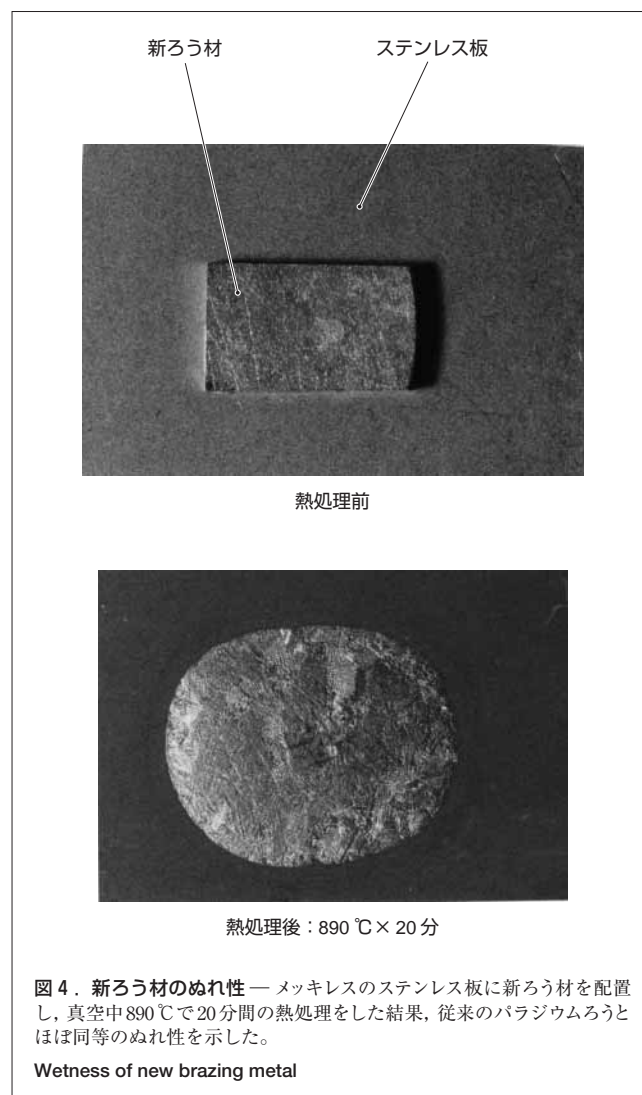


図4. 新ろう材のぬれ性 — メッキレスのステンレス板に新ろう材を配置し、真空中890℃で20分間の熱処理をした結果、従来のパラジウムろうとほぼ同等のぬれ性を示した。

Wetness of new brazing metal

Mn：3 mass%以下，Cu + Sn：8～12 mass%にあることがわかった。

実際に，Ag-7.5Cu-4.0Sn-0.5Ni-1.5Mnという組成の新銀ろうを試作し，熔融温度を評価した結果，目標どおりの熔融温度となることが確認できた(表1)。

またこの新銀ろうには，NiやMnを含有させたため，被接合材であるステンレスの表面にメッキを施すことなく十分なぬれ性を確保することができた。例えば図4に示したように，メッキレスのステンレス板に新ろう材を配置し，真空中890℃で20分間保持した結果，ぬれ広がり面積は2.5倍となり，パラジウムろうとほぼ同等のぬれ性を示した。

4 実機の適用と波及効果

熔融温度の制御とぬれ性の改善ができた新ろう材を，真空バルブに適用して試験を行った結果，熔融温度やぬれ性に加え，接合強度などの要求特性も満足できた。これにより，当社製真空バルブへの適用が決定し，既に製造に使用されている。また，この新ろう材の開発により，メッキレスという環境負荷低減と製造コスト削減に貢献できた。

5 あとがき

真空バルブのステップろう付けには，最適な熔融温度と信頼性重視の観点から，これまで高価なパラジウムろう(BPd-2)を使用していた。今回，パラジウムろうの代替材として，構成元素の制約条件下で各元素の役割に着目し，重回帰分析という統計的手法を使用することにより，Ag-Cu-Ni系の低コストかつ環境低負荷の新ろう材を開発した。更に，この新ろう材が真空バルブに適用可能なことを実証した。

今後，そのほかの真空関連機器についても，最適なろう材組成を見いだし，適用拡大を図っていく。

謝 辞

この研究を進めるにあたり，ろう材の試作などご協力をいただいたナイス(株)の関係各位に深く感謝の意を表します。

文 献

- (1) M. Hansen, et al. Constitution of Binary Alloys, McGRAW-HILL (1958), 18p.
- (2) 柏木孝三, ほか. 貴金属ろうの選び方. 溶接技術. 1997-5, p.76-84.



草野 貴史 KUSANO Takashi

電力・社会システム社 電力・社会システム技術開発センター 電機応用システム開発部主務。真空バルブの接点材料や接合材料の開発に従事。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



長部 清 OSABE Kiyoshi

電力・社会システム社 府中電力・社会システム工場 スイッチギヤ部主査。真空バルブの開発・設計に従事。

Fuchu Operations - Social Infrastructure Systems



奥富 功 OKUTOMI Tsutomu

芝府エンジニアリング(株) 電機応用システム開発部。真空バルブの接点材料や接合材料の開発に従事。

Sibafu Engineering Corp.