

超高圧架空送電線用 高強度インバー合金線の開発

西川 太一郎*・高木 義幸・佐内 正雄
北村 真一・中間 一夫・仮屋 哲朗

Development of High Strength Invar Alloy Wire for Ultra-high Voltage Power Cable — by Taichiro Nishikawa, Yoshiyuki Takaki, Masao Sanai, Shinichi Kitamura, Kazuo Nakama and Tetsuro Kariya — Aluminum Conductor Invar alloy Reinforced (ACIR) can double the capacity of overhead power transmission line by simply changing the electrical conductor without the installation of a new power transmission line or the reinforcement of a steel tower.

Recent years have seen a worldwide increase in the demand for electric conductors which have a large transmission capacity to meet rapidly growing electricity consumption. Meanwhile, there has been a strong need for the aluminum clad invar alloy wire that has high corrosion resistance, reduces transmission loss, and produces less CO₂ emissions.

To this end, the authors have enhanced the durability of conventional invar alloy wire so that it can be used as the core wire of ultra-high voltage overhead transmission line instead of steel wire.

This paper features the characteristics of the developed invar alloy wire.

Keywords: invar alloy, low thermal expansion, high strength

1. 緒言

インバー電線は、超高圧の架空送電線分野において、電力需要の増加に対応した張り替え型の増容量対策電線として、当社で開発し1980年から実用化されてきた。この電線の構造は、図1に示すように、送電線の鋼線部を熱膨張係数の小さいFe-Ni系の合金であるインバー合金線に置き換えるととともに、アルミ線部を超耐熱アルミ合金線に置き換えた構造である。

このように熱に対して伸びにくいインバー合金線と耐熱性の高いアルミ合金線を組み合わせることで、電流量を2倍として電線が発熱しても、熱膨張による電線の垂れ下がりを同一サイズの送電線と同じにすることができる。そのため、送電線路を増容量化する場合、新たな送電線路の建設や、電線の太径化のための鉄塔の増強などと比較して、

インバー電線は張り替えのみで2倍の増容量化が可能となるため、総合的に低コストであるとの利点がある。

このインバー電線に用いられる従来のインバー合金線では、超高圧架空送電線のコア芯に用いられる鋼線と比較して強度が低いため、鋼線と同等レベルの強度とするためには耐食層の皮膜厚の薄い亜鉛めっきインバー線が必要となっていた。

近年、海外市場においても、電力需要の急増対策としての増容量電線への要求が強く、既設線と同等の強度に加えて、高い耐食性能とCO₂削減に向けた送電ロス低減を目的に、コア芯として耐食層の被覆厚が厚く、導電性のあるアルミ被覆インバー線が強く望まれるようになってきた。

そこで、鋼芯と同等の強度を有するアルミ被覆インバー合金芯を実現するために、鋼線に匹敵する強度を有する高強度インバー合金線の開発に取り組み、バナジウムを添加した新たな高強度インバー合金線を開発した。本報告では、開発の概要ならびに開発材の特性について報告する。

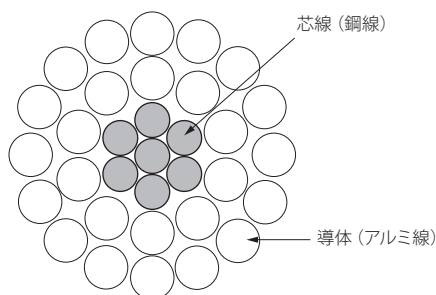


図1 送電線の断面例

2. 課題と開発の方向性

本開発のターゲットであるアルミ被覆インバー合金線については、図2に開発目標の位置付けを示すように、鋼線と同等の強度を有し、かつインバー電線の特徴である2倍の増容量化を達成するために従来のインバー合金線と同等の低熱膨張係数を有することを開発の目標とした。

一方で、インバー合金線には、前述の高強度・低熱膨張とともに、製造時における曲げや捻りに耐える延性も必要である。電線材料では、この延性を表す代表的な指標として、捻回特性（線材の両端を固定して捻り、破断までの回数で評価するもの）があり、この特性が従来インバー合金線と同程度である必要がある。しかしながら、従来のインバー合金線では、前述のように鋼線と比較して強度が低い。これは、インバー合金であるFe-Ni系合金では、Cなどの強化元素の添加による強化や伸線加工度の増加による強化では、捻回特性などの延性が低下してしまうためであり、高強度と延性の両立が困難であった。

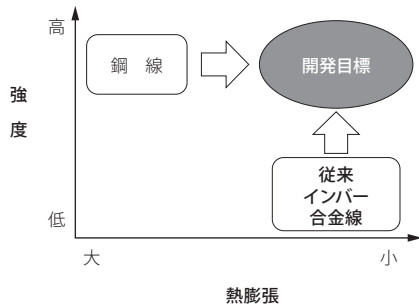


図2 従来材料と開発目標の位置付け

以上のことから、本開発のインバー合金線では、従来のインバー合金線と同等の低熱膨張を有しつつ、強度については鋼線と同等の強度を有する亜鉛めっきインバー線の引張強さ（1078N/mm²）以上の強度を、さらに捻回特性については従来材と同等レベルのものを目指すこととした。表1に本開発インバー合金線の開発目標を示す。

表1 開発目標

	引張強さ N/mm ²	熱膨張係数 × 10 ⁻⁶ /°C	捻回値 回/100D
開発目標	≥ 1078	< 3.7	≥ 20
従来インバー線 (アルミ被覆)	1029~1078	< 3.7	≥ 20
鋼線	1225~1325	11.5	≥ 20

2-2 合金設計 送電線の実用温度域での低熱膨張規格を満足させるため、まずベースとなる合金成分を検討した。よく知られているFe-36% Niのインバー合金は、キュリー温度Tc以下の低温域では強磁性体であり低熱膨張特性を示すが、Tcを超えると常磁性体となりインバー効果である低熱膨張性が消失するため、通常のFCC合金と同じく高い熱膨張を示すようになる。

本開発のインバー合金線では、アルミ被覆インバー電線の許容温度（連続）である240°Cにおいても低熱膨張であることが要求されるが、Fe-36% Ni合金のTcは約200°Cであり、高温域での熱膨張が大きくなる。図3にFe-36% Ni合金とFe-38% Ni合金の熱膨張特性を示す。この図では、Tc以下の温度域では、低熱膨張特性を有するが、Tcを超える温度域では、高い熱膨張特性を有することが確認できる。アルミ被覆インバー電線の許容温度である240°Cでも低熱膨張特性を維持するためには、Tcが240°C近傍にあるFe-38% Ni合金が必要となる。

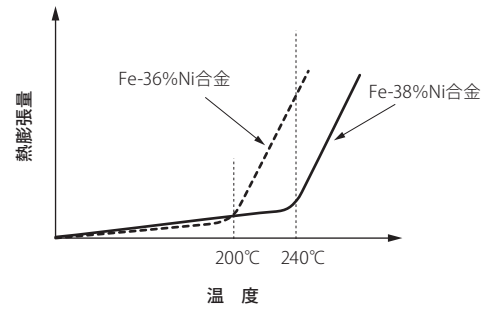


図3 Fe-36% Ni合金とFe-38% Ni合金の熱膨張特性

次に、インバー合金の高強度化の方策を検討した。従来のインバー合金線では、単純な固溶強化や加工強化による高強度化のみでは電線材料に必要な延性である捻回値が得られなかった。これは、強化元素として含有しているCが、製造工程中で結晶粒界に炭化物として析出し、結晶粒界の強度を低下させるためであることが分かってきた。そのため、本開発のインバー合金線の強化手法として、強化元素の添加による固溶強化ならびに伸線加工による加工強化とともに、捻回値を確保しつつ、より高強度化が可能な合金炭化物の結晶粒内への微細析出による析出強化を併用する強化の検討を行った。

Fe-Ni系インバー合金は、格子定数約0.36nmのFCC合金であり、結晶粒内に炭化物を整合析出させるためには、結晶構造や格子定数が近い合金炭化物が適切であると考えられる。各種炭化物を検討した結果、構造がFCCに近い構造を持つ金属炭化物の中で、最も格子定数が近い関係にある炭化物としてバナジウム炭化物を選定した。バナジウム炭化物では、B1構造（NaCl型）でありFCCに近い構造を持ち、また格子定数が0.416nmでありマトリクスの格子定数とも近い関係にある。図4に、V、Cを添加したインバー合金について時効熱処理を施したときに析出したバナジウム炭化物の電子顕微鏡写真（抽出レプリカ試料）と、マトリクス及びバナジウム炭化物の電子線回折像（薄膜試料）を示す。バナジウム炭化物のサイズは20~30nmで

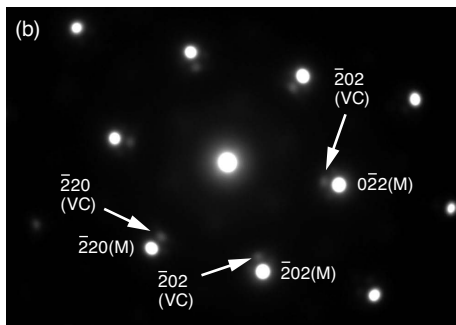
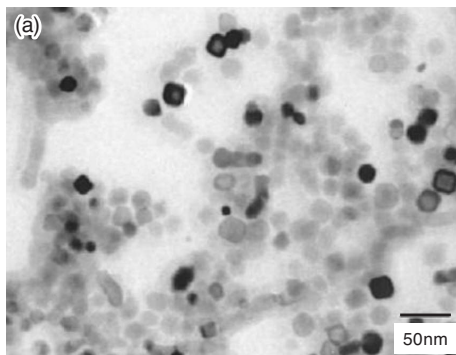


図4 V、Cを添加したインバー合金中に析出したVC (a) 及びマトリクス-VCを含む領域からの電子線解析像 (b)

あり、結晶粒内に分散析出していることが確認できる。また、マトリクスとバナジウム炭化物の両方を含む領域に電子線を絞って得られた回折像は、zone axis [111] のパターンであり、マトリクスからの回折像のやや内側にバナジウム炭化物からの回折スポットが存在しており、両者の回折像は相似形で方位が完全に一致している。これは、バナジウム炭化物 (VC) がマトリクス (M) に対して整合に析出していることを示しており、計算によると約15%のミスフィットを有しており、強度向上に有効であることが判った。

また、V及びCの添加量比も重要である。Vが過剰になると、バナジウム炭化物として析出しない固溶状態のVが残存することから熱膨張係数の増大を招き、逆にCが過剰な場合、Fe炭化物等の炭化物が粒界に析出して捻回特性等を悪化させる。そのため、V、Cの添加量については濃度範囲の最適化を行った。

2-3 プロセス開発 高強度と高延性を両立させるためには、バナジウム炭化物を微細に粒内に析出させる必要がある、そのためには合金成分の最適化だけではなく、製造プロセスの最適化も必要である。図5に、本開発のインバー合金線の概略製造工程を示す。炭化物の析出による強化を最大限に活用するためには、熱間工程でバナジウム炭化物を完全に固溶させた後、適切な加工率で伸線を行って加工歪みを導入し、時効熱処理によりバナジウム炭化物を結晶粒内に微細析出させる必要がある。図5のいずれの

工程も最終製品の特性及び品質に影響を及ぼす重要な工程であるが、特にバナジウム炭化物の析出状態に大きく影響を及ぼす工程として、熱間圧延及び熱処理を例に挙げ、それぞれの工程条件による特性への影響について述べる。

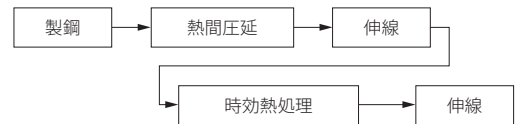


図5 送電線用インバー合金線の製造工程

まず、熱間圧延においては、前述のようにVCを完全固溶させることがポイントとなる。このためには、圧延加熱炉内でピレットを十分高温にまで加熱するとともに、熱間圧延後には、VCの析出を抑制するために速やかに冷却する必要がある。図6に、中間製品の時効硬さに及ぼすピレット加熱温度の影響を示す。加熱温度の上昇に伴い、VC固溶量が増大し時効硬さは上昇することが確認できる。なお、加熱温度が高すぎると、ピレット表面が過度に酸化して肌荒れを生じやすいので、加熱時間を過度に長く取るとはできないため、最適な加熱条件を選定する必要がある。

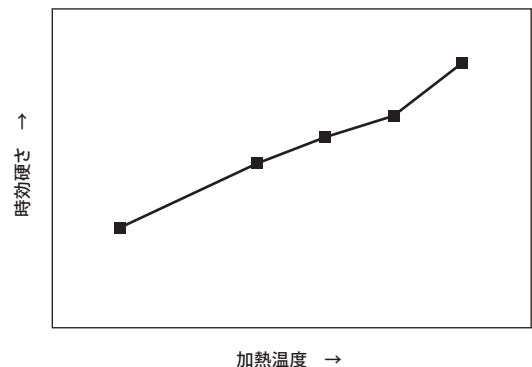


図6 V、C添加インバー合金線の時効硬さに及ぼす圧延加熱温度の影響

次に、時効熱処理について述べる。伸線後の時効熱処理温度が、最終製品の強度と捻回値に及ぼす影響を図7に示す。熱処理温度の上昇に伴い、引張強さは増加するが、ピークを迎えた後で急激に低下する。また、捻回値については、引張強さのピーク温度付近より高温側で増加する。低温側で引張強さが増加しているのは、VCが結晶粒内に微細析出することによる強化であり、熱処理温度が高くな

り過ぎると、加工歪みの解放が進むとともに、これら析出物の粗大化によって強化能も小さくなっていくためであると考えられる。一方、捻回値については、熱処理による加工歪みの解放が充分であると高くなるものと考えられる。図7から、引張強さ及び捻回値を高位に両立させるためには、一定の温度域で熱処理を行う必要があるが、この温度域については、合金成分のみならずその他のプロセス要因によっても変化するため、時効熱処理の管理が重要である。

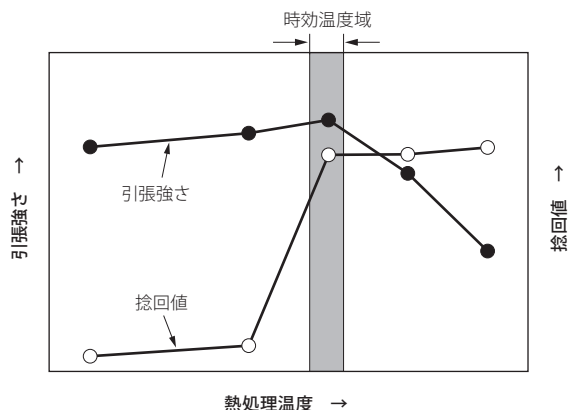


図7 V、C添加インバー合金線の引張強さ及び捻回値に及ぼす熱処理温度の影響

3. 開発したインバー合金線の特性

表2に、今回開発したインバー合金を用いたアルミ被覆インバー線の特性例を示す。この表から本開発のアルミ被覆インバー合金線では、従来用いられている鋼線に匹敵する強度を有し、熱膨張についても、従来のインバー合金線と同等の低い値となっている。同時に、捻回値については、電線としての規格値を満足していることが確認できる。

このようにして開発したインバー合金線については、長期信頼性実証試験に合格し、国内外で広く使用されており、インバー電線として約80%の世界シェアを有している。また、環境面へのメリットとしては、送電線路新設の場合、鉄塔高さを低くかつ鉄塔基礎を小さくできるため、特に山間地等の自然地域へ建設する場合、自然環境への影響度が小さく自然破壊を抑制できる点が挙げられる。また、電線の張り替え等の設備更新時には、廃棄電線を解体すること

表2 開発材の特性例

	引張強さ N/mm ²	熱膨張係数 × 10 ⁻⁶ /°C	捻回値 回/100D
開発材 アルミ被覆インバー合金線	1175~1225	2.3~3.0	≥ 20
開発目標	≥ 1078	< 3.7	≥ 20

で100%リサイクルが可能となっており、産業廃棄物の発生がほとんどない。なお、当合金線は、PRTR制度、RoHS規制、REACH規制等に抵触する有害化学物質は使用しておらず、環境に優しい製品でもある。

4. 結 言

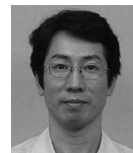
- 1) 合金設計および製造条件の最適化により、世界最高の強度を有すると共に、延性、熱膨張特性を高度にバランスさせた架空送電線用高強度インバー合金線を開発し、高品質の合金線を安定的に製造する量産プロセスを構築した。
- 2) 本開発のインバー合金線は、従来の鋼線に匹敵する強度を有するため、アルミ被覆インバー合金芯として、特に海外市場での増容量対策電線として広く採用されてきている。

参 考 文 献

- (1) 佐々木進ら、住友電気、125 (1984)、54
- (2) 送電用新種電線専門委員会、電気共同研究、43 (1988)

執 筆 者

西川太一郎*：エレクトロニクス・材料研究所
金属無機材料技術研究部 グループ長
電線などの金属材料の研究開発に従事



高木 義幸：エレクトロニクス・材料研究所 金属無機材料技術研究部
主査

佐内 正雄：導電製品事業部 主席

北村 真一：富山住友電工(株) 技術部 課長

中間 一夫：山陽特殊製鋼(株)

飯屋 哲朗：山陽特殊製鋼(株)

*主執筆