

第3回ものづくり日本大賞優秀賞 「高圧架空送電線用高強度インバー合金線の 開発と実用化」

当社と住友電気工業株式会社殿は、経済産業省より、「高圧架空送電線用高強度インバー合金線の開発と実用化」に対して、第3回ものづくり日本大賞優秀賞を受賞した。本賞は、我が国の産業・文化の発展を支え、豊かな国民生活の形成に大きく貢献してきた「ものづくり」を着実に継承し、さらに発展させていくため、製造・生産現場の中核を担っている中堅人材や、伝統的・文化的な「技」を支えてきた熟練人材、今後を担う若年人材など、「ものづくり」に携わっている各世代の人材のうち、特に優秀と認められる人材等に対して授与されるもの¹⁾である。以下に、このたびの受賞技術について紹介する。

1. 開発の背景

超高圧の架空送電線は、大電流を送電するために、電導率の高いアルミ合金導体と、電線を鉄塔間に張る強度を確保するために中心部に高強度の芯線を配置した構造となっている（図1）。芯線には、上記の高強度とともに、使用時の強風・積雪・振動等に耐える延性（捻回特性、巻付け巻戻し特性、伸び）が要求される。従来、芯線としてアルミ被覆鋼線や亜鉛メッキ鋼線が主に使用されてきたが、近年の電力需要増加に伴う送電量の増加に対応するために、既設線を大サイズの電線に張替える場合は、この重量増に応じた鉄塔補強が必要となっていた。また一方で、同一サイズの電線に大電流を流した場合、電線温度上昇に伴う熱膨張のため送電線の垂下りが大きくなり、必要な地上高さを確保できない問題があった。この問題を解決するため、低熱膨張合金であるインバー合金を芯線として用いる方法が採られてきた²⁾が、従来のインバー合金は、鋼線と比較して強度が低いため、使用に当たっては、適用場所や鉄塔及び送電線設計の検討を必要としていた。このような背景の下、鋼線並の高強度を有し、低熱膨張である芯線用インバー合金線が求められていた。

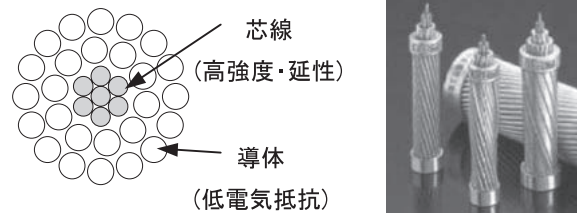


図1 架空送電線断面図（左）とインバー合金線を用いた送電線（右）

2. 課題と開発の方向性

2.1 開発の方向性

高強度、高延性で、且つ低熱膨張である芯線のニーズに対して、合金設計及び製造プロセス開発の組合せにより、高強度インバー合金線の開発を目指した。図2に、新開発インバー合金線の特徴的位置付けを示す。従来インバー合金線並の低熱膨張特性を有しつつ、高強度・高延性化の達成を目標とした。

本開発に際してキーテクノロジーとなったのは、合金炭化物による析出硬化と伸線による加工硬化を併用し、結晶粒界への炭化物析出を抑制して延性低下を最小限としつつ高強度化したこと、及び送電線実用温度域での低熱膨張特性を満足するために、主要合金元素であるNi及びCo量を調整したことである。特に、強度と延性の両立に際しては、合金設計のみならず、圧延、熱処理及び伸線等の各工程の製造条件を最適化することが重要であり、これらに細心の注意を払って制御、管理することが、安定した品質を確保するために極めて大切であった。

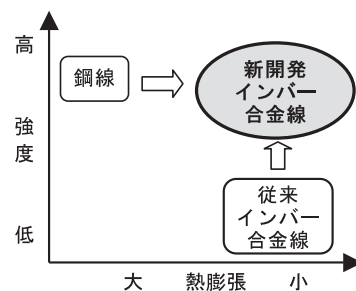


図2 新開発インバー合金線的位置付け

2.2 合金設計

送電線実用温度域での低熱膨張規格³⁾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-36Niインバー合金は、キュリー温度 T_c 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、 T_c を超えるとインバー効果が消失し通常のFCC合金と同じく高い熱膨張を示すようになる。例えば、アルミ被覆インバー電線の許容温度（連続）は240℃であり、Fe-36%Ni合金の T_c （約200℃）を超えることから、実用温度域の低熱膨張特性を確保するためには合金成分の調整が必要である。図3に、 T_c に及ぼすC、V添加Fe合金中のNi+Co量の影響を示す。送電線許容温度域でインバー効果を確保するため、Ni+Co量を38%以上に設定する必要があることが分かる。逆に、Ni+Co量が多くなりすぎると、低温域での熱膨張係数が大きくなること及びコスト高となることから、上限値を定め最適化した。

次に、インバー合金の高強度化方策を検討した。強化法としては、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、靱性を確保しつつ、より高強度化が可能な合金炭化物の粒内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、バナジウム炭化物（VC）を選定した。VCは、B1構造（NaCl型）でありFCCに近い構造を持ち、格子定数は0.416nmでありマトリックスとも近い。図4に、V、C添加インバー合金を、熱間圧延後に伸線-時効熱処理したときに析出したVCの電子顕微鏡写真（抽出レプリカ試料）と、マトリックス及びVCの電子線回折像（薄膜試料）を示す。VCのサイズは20~30nmであり、結晶粒内に分散析出していた。また、マトリックスとVCを両方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、マトリックスからの回折像のやや内側にVC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、VCがマトリックス（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いることが分かる。

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、VC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延性が低下する。

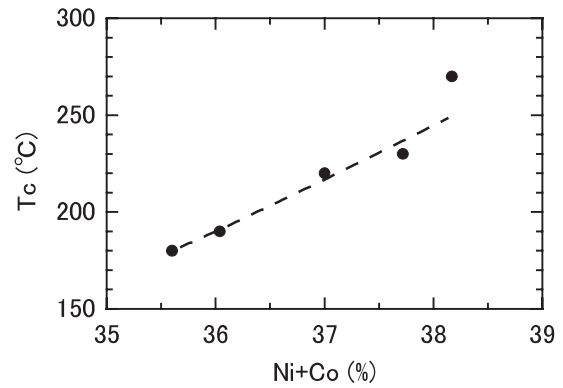


図3 V、C添加Fe合金の T_c に及ぼすNi+Co量の影響

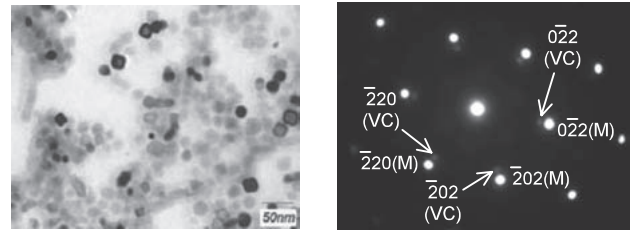


図4 V、C添加インバー合金中に析出したVC（左）及びマトリックス-VCを含む領域からの電子線回折像（右）

2.3 プロセス開発

高強度と高延性を高次にバランスさせるためには、製造プロセスの最適化がかかせない。図5に、インバー合金線の概略製造工程を示す。析出硬化を最大限に活用するためには、熱間工程でVC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てから、時効処理によりVC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だが、例として、熱間圧延及び熱処理が特性に及ぼす影響を挙げる。

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。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ため、加熱時間を過度に長く取ることはできない。さらに、熱間工程後は、VCの析出を抑制するため、速やかに冷却する必要がある。

次に、伸線後の熱処理温度が、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、これら析出物の粗大化によって強化能が小さくなる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、総合的な最適化が重要である。



図5 送電線用インバー合金線の製造工程

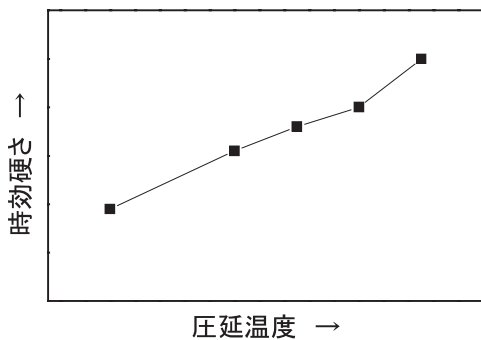


図6 V、C添加インバー合金線の時効硬さに及ぼす圧延加熱温度の影響（模式図）

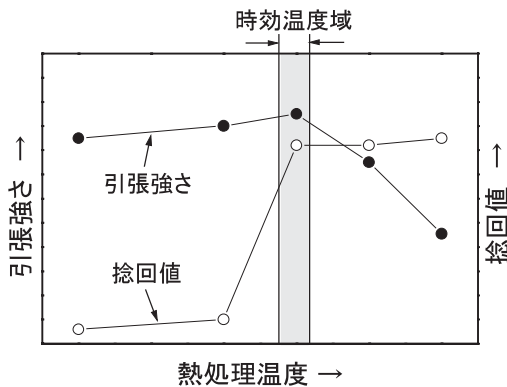


図7 V、C添加インバー合金線の時効強度及び捻回値に及ぼす熱処理温度の影響（模式図）

3. 新開発インバー合金線とその使用状況

表1に、新開発インバー合金線の特性例を示す。新開発インバー合金線は、従来用いられている鋼線並の強度を有し、熱膨張は三分の一程度と低い値となっている。同時に、捻回値、巻付け巻戻し特性及び伸びも、電線としての各規格値を満足している。

このようにして開発されたインバー合金線は、長期信頼性実証試験に合格し、国内外で広く使用されている（イン

バー電線として約80%の世界シェア）。環境面へのメリットとして、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、設備更新（電線張替え）時には、廃棄電線を解体することで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。

表1 新開発インバー合金線の特性例

	引張強さ N/mm ²	熱膨張係数 × 10 ⁻⁶ /°C
アルミ被覆インバー線	1175~1225	3.7
亜鉛メッキ鋼線	1225~1325	11.5

4. まとめ

- 1) 合金設計および製造条件の最適化により、世界最高クラス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) 送電線の垂下りを抑えられるため、既設送電線路で2倍の送電が可能となり、電力需要の増加に対応ができた。

参考文献

- 1) 第3回ものづくり日本大賞 [近畿ブロック] ,近畿経済産業局,(2009),1.
- 2) 佐々木進ら：住友電気, 125 (1984), 54.
- 3) 送電用新種電線専門委員会：電気共同研究, 43 (1988).