



導電率を向上させた高力耐熱アルミ合金と電線設計

High-Strength Thermal-Resistant Aluminum Alloy Wire with Improved Conductivity and New Conductor Design

小川 寿春*
Toshiharu Ogawa

渡部 雅人
Masato Watabe

中川 博之
Hiroyuki Nakagawa

岩山 功
Isao Iwayama

赤祖父 保広
Yasuhiro Akasofu

海峡横断部に使用する架空送電線の径間長は1000mを超えるケースがあり、電線の弛みを抑制するために、陸上部の電線よりも高張力の電線が求められる。このような径間に架線する電線の導体部には導電率55%IACSの高力耐熱アルミ合金線が使用される場合があるが、通常の60%IACSの耐熱アルミ合金線よりも導電率が低いことから、陸上部で使用される電線に対して送電容量が制限される。今回、電源開発送変電ネットワーク(株)との共同研究で、導電率を58%IACSに向上させた新規高力耐熱アルミ合金線を開発した。本稿では、開発技術および電線設計事例を報告する。

The span length of an overhead transmission line crossing a strait can exceed 1000 m. In order to suppress the sag of the line, higher strength conductors are required than those used for the wland part. High-strength thermal-resistant aluminum alloy wires with a conductivity of 55% IACS are used for conductors passing through such spans, but their conductivity is lower than that of the wires used in the land part (60% IACS), which limits the transmission capacity. This time, in collaboration with J-Power Transmission Network Co., Ltd., we have developed a new type of high-strength thermal-resistant aluminum wire with an improved conductivity of 58% IACS. This paper reports on the development of technology and examples of new conductor design.

キーワード：架空送電線、海峡横断、高力耐熱アルミ合金線、高導電率化

1. 緒言

架空送電線路における海峡横断部などの径間では、鉄塔建設場所の制約から、径間長が1000mを超えるケースがあり、一般的な陸上部の径間に対して長径間となる。長径間線路では、電線の弛み（以下、弛度）が大きくなることから、電気的な安全性が確保できるように、電線と海上構造物間の離隔を十分に検討する必要がある。

その一つの手段として、鉄塔を高くする方法があるが、この方法は建設費の高騰につながる。そのため、電線を高張力で架線し、弛度を小さくする方法がとられている。高張力で電線を架線する場合、標準的な電線を使用すると、破断荷重に対する安全率が不足することから、破断荷重が大きい高張力電線が使用されることが多い。

高張力電線の導体部に使用されるアルミ合金線のひとつに高力耐熱アルミ合金線（以下、55KTAL）があり、通常の耐熱アルミ合金線に対して引張強さが高い特長を有する。しかし、55KTALの導電率^{*1}は、各種元素が添加されている影響により、耐熱アルミ合金線の導電率60%IACSに対して5%IACS低下する。導電率の低下は、送電容量の低下につながり、系統全体のボトルネックとなる。

今回、電源開発送変電ネットワーク(株)との共同研究で、55KTALの引張強さなどの機械的特性を維持しつつ、導電率を58%IACSに改善した新規高力耐熱アルミ合金線を開発したので、その特長と電線設計例を紹介する。

2. 現行の高力耐熱アルミ合金線

55KTALの連続許容温度は150℃、短時間許容温度は180℃であり、耐熱アルミ合金線（以下、60TAL）と同一である。引張強さは、60TALの約1.5倍である。55KTALは1970年代に日本で開発され⁽¹⁾、海峡横断部、河川横断部などに適用されてきた。φ4.8mmの55KTALおよび60TALの性能を表1に示す。

表1 55KTALと60TALの性能比較

| 項目 | 性能 | |
|-----------------------|--------|-------|
| | 55KTAL | 60TAL |
| 種類 | 55KTAL | 60TAL |
| 線径 (mm) | 4.8 | 4.8 |
| 導電率 (%IACS) | 55以上 | 60以上 |
| 引張強さ (MPa) | 225以上 | 159以上 |
| 伸び (%) | 2.0以上 | 2.0以上 |
| 耐熱性 (%) ^{*1} | 90以上 | 90以上 |

*1：電線温度150℃の状態、36年間の熱履歴を与えた後の引張強さ残存率(230℃×1時間の熱履歴と等価)

3. 新規高力耐熱アルミ合金線の開発⁽²⁾

3-1 開発目標

今回対象とする電線サイズでは、導電率が3%IACS向上すると、送電容量は3~5%向上し、増容量化に寄与するこ

とができる。そこで、新規高力耐熱アルミ合金線の導電率の目標値を58%IACSに設定した（以下、58KTAL）。

55KTALは、溶解した電気用アルミニウム地金に、ジルコニウム（Zr）、珪素（Si）、銅（Cu）、鉄（Fe）などの元素を添加し、プロペルチ式連続鋳造圧延機^{*2}にてワイヤロッドを製造し、その後一次伸線、時効処理^{*3}、二次伸線することで製造される。図1に製造工程の概略図を示す。

55KTALの基本性能に影響を及ぼす主要因子は、1) 合金組成（添加元素の種類や濃度）、2) 時効処理条件（加熱温度と時間）、3) 伸線加工工程（時効前加工度・時効後加工度）に大別され、これら3項目の最適化を図ることで、高導電率化を達成することとした。

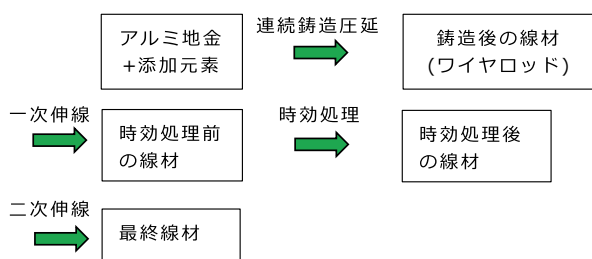


図1 55KTALの製造工程

3-2 合金組成の適正化

アルミ合金は一般的に、添加元素が多くなると導電率が低下する傾向にある。58KTALの開発では、まず、小規模鋳造実験により、55KTALに対して添加元素を減らしたサンプルを製作し評価を行った。表2に主な添加元素とその作用を示す。

表2 55KTALの主な添加元素と作用

| 添加元素 | 作用 |
|------|------------|
| Zr | 耐熱性・引張強さ向上 |
| Si | 時効促進 |
| Cu | 引張強さ向上 |
| Fe | 引張強さ向上 |

サンプルはφ30mm鋳造材を製作後、切削加工・冷間鍛造・伸線加工により、素線径をφ9.3mmとした。その後、時効処理を施し、伸線加工によりφ3.8mmとした。55KTALに添加される主な元素（Zr、Si、Cu、Fe）濃度を低減したサンプルを製作し、導電率・引張強さ・耐熱性を測定した結果の一部を表3に示す。

その結果、添加元素の濃度低下により、導電率が向上することを確認した。一方、Zr濃度の低下に伴い引張強さや

耐熱性の大幅低下、CuおよびFeの濃度低下に伴い引張強さの低下が生じることも確認した。また、各々の添加元素の低減量には制約があることが判明した。

その他、主な添加元素（Zr、Si、Cu、Fe）以外の微量な元素が基本的特性に及ぼす影響についても評価し、引張強さと耐熱性を極力低下させない範囲で、導電率を低下させる元素の低濃度化を図り、合金組成の適正化を行った。

表3 合金組成の影響評価

| 評価サンプル | 添加元素の濃度低減率 | φ3.8mmの性能変化 | | |
|----------|----------------------------|-------------|-----------|----------|
| | | 導電率(%IACS) | 引張強さ(MPa) | 耐熱性*1(%) |
| Zr低減 | -0.06% | +0.6 | -22 | -5.0 |
| Si、Cu低減① | -0.04% (Si) -0.06% (Cu) | +0.3 | -8 | -1.4 |
| Si、Cu低減② | -0.04% (Si) -0.09% (Cu) | +0.5 | -14 | +2.7 |
| Fe低減 | -0.14% | +0.3 | -7 | +0.7 |

*1：230℃×1時間加熱後の引張強さ残存率。

3-3 時効処理条件の適正化

55KTALの基本性能は、ワイヤロッド製造後の時効処理の加熱温度と時間に大きな影響を受ける。そこで、プロペルチ式連続鋳造圧延機で製作したφ15mmのサンプルをφ11.7mmまで冷間伸線加工し、小型実験加熱炉にて、時効処理の加熱温度と時間をパラメータとした実験を行った。サンプルは伸線加工後のφ11.7mmを使用して、加熱温度と時間をパラメータとした時効処理を行い、その後伸線加工してφ4.8mmのサンプルとした。

その結果、導電率を向上させるためには、アルミニウム地金中に固溶する元素を析出させて低減させる必要があり、そのために55KTALよりも高温もしくは長時間の時効処理が必要であることが明らかとなった。一方で、時効処理の温度が高過ぎたり時間が長過ぎると、引張強さや耐熱性が低下することを確認した。

以上の実験より、55KTALの引張強さや耐熱性を確保しつつ、導電率を向上させる条件を把握した。

3-4 伸線加工工程の適正化

55KTALの基本性能は、伸線加工や時効処理時の線径の影響を受けることから、プロペルチ式連続鋳造圧延機にて、複数サイズのワイヤロッドを製作し、時効処理前後の一次伸線および二次伸線の加工度をパラメータとしたサンプルを製作し評価を行った。生産性を考慮し、55KTALの加工工程を極力踏襲できることを前提に検討した。

時効処理は小型実験加熱炉を使用し、二次伸線加工後の最終線径はφ4.8mmとしたサンプルで性能評価を行った。その結果、図1に示す一次伸線の加工度を大きくすると、Zr等の析出が促進され導電率が高くなること、二次伸線の加工度を大きくすると、引張強さが高くなることが確認できた。

以上の実験より、目標とする性能に対し、一定の裕度を確保できる最適な伸線加工工程を確立した。

3-5 量産製造ラインでの試作・評価

上記した1) 合金組成の適正化、2) 時効処理条件の適正化、3) 伸線加工工程の適正化の3点における検討結果を基に、プロペルチ式連続鋳造圧延機にてワイヤロッドを製造後、量産加熱炉による時効処理、量産伸線機による連続伸線を行った。連続伸線後の線径はφ4.8mmとし、導電率・引張強さ・伸び・耐熱性を評価した結果を表4に示す。

開発材である58KTALは、目標とした導電率58%IACS以上を達成すると共に、引張強さ・伸び・耐熱性は55KTALの規格値を満足していることがわかる。

表4 量産設備での58KTALの性能 (φ4.8mm)

| 性能 | 測定値*1 | 目標値 |
|-------------|---------------------|----------------------|
| 導電率 (%IACS) | 58.6 (58.6~58.7) | 58.0以上 |
| 引張強さ (MPa) | 230 (230~231) | 225以上 (55KTAL規格値) |
| 伸び (%) | 3.6 (3.4~3.8) | 2.0以上 (同上) |
| 耐熱性 (%) | 95.3 (94.9~95.7) | 90以上 (同上) |

*1：評価数N=10の平均値、()内は最小・最大値。

4. 58KTALによる電線設計

4-1 海峡横断部の設計

電源開発送変電ネットワーク(株)が保有する220kV送電線路の海峡横断部既設電線を張り替えることを目的のひとつに58KTALを開発したことから、その電線設計例について紹介する。二箇所の海峡横断部は、国内最大級の高張力電線が使用されており、径間長は1000mを超える。図2に海峡横断部の縦断面図を示す。

本送電線路の陸上部には、導体部に60TALを使用した鋼

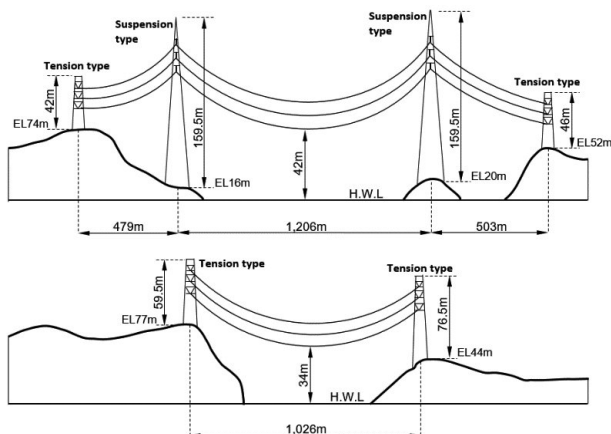


図2 海峡横断部の縦断面図

心耐熱アルミ合金より線610mm² (TACSR610mm²) の複導体が採用されているのに対して、海峡横断部では、導体部に55KTALを使用した単導体の特強鋼心高力耐熱アルミ合金より線1300mm² (KTACSR/EST1300mm²) が採用されている。また、長径間の海峡横断部であることから、電線の弛度を抑制する必要があり、高張力架線に耐えるため、鋼心部には高強度の特別強力亜鉛めっき鋼線 (EST) が使用されている。さらに、海塩による腐食対策のため、電線の内外層に防食グリスを充填した構造である。

増容量を目的に、海峡横断部の電線導体部に開発材である58KTALを適用した設計例を表5に示す。電線温度150℃で使用したときの連続送電容量は1060MW、180℃で使用したときの短時間送電容量は1230MWであり、55KTALの既設電線に対して5%程度の増容量化が可能となった。

なお、開発電線の鋼心部には、特別強力耐食アルミ覆鋼線*4 (EHRAC) を採用し、電線の内外層で防食グリスを使用しない構成とした。

表5 海峡横断部の電線設計例 (電圧220kV)

| 適用箇所 | 海峡横断部 | | |
|------------------------|--------------|-----------------------------------|------------------------|
| | 陸上部 | 既設電線 | 開発電線 |
| 区分 | 既設電線 | 既設電線 | 開発電線 |
| 名称 | 鋼心耐熱アルミ合金より線 | 特強鋼心高力耐熱アルミ合金より線 (内外層に防食グリス塗布) | 特強耐食アルミ覆鋼心高力耐熱アルミ合金より線 |
| 記号 | TACSR | 55KTACSR/EST | 58KTACSR/EHRAC |
| サイズ (mm ²) | 610 | 1300 | 1300 |
| 導体数 | 2 | 1 | 1 |
| 最大使用張力 (kN) | 54 | 255 | 255 |
| 送電容量 (MW)*1 | 連続*3 | 1220 | 1060 |
| | 短時間*4 | 1390 | 1230 |
| 弛度 (m)*2 | 連続 | - | 65.5 |
| | 短時間 | - | 67.0 |
| 断面 | | | |

*1：架空送電線の一般的な計算手法で算出した送電容量。

*2：連続3径間 (479m-1206m-503m) の中央径間1206mの弛度を表す。

*3：2回線運用時の最大送電容量であり、電線温度は150℃。

*4：片回線故障時の1回線運用において短時間のみ許容される送電容量であり、電線温度は180℃。

4-2 標準構成の設計

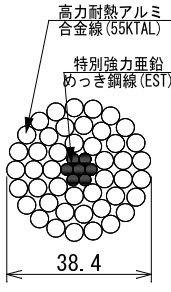
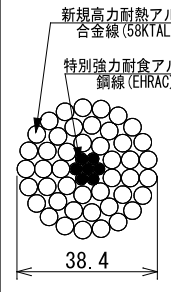
標準的な電線構成である810mm²サイズについて、導体部に58KTAL、鋼心部に特別強力耐食アルミ覆鋼線を使用した電線設計例を表6に示す。現行設計として、55KTALを使用した例も併記した。58KTALによる連続電流容量は

2057Aであり、55KTALの1991Aに対して3%程度の増容量化が可能となる。なお、送電容量は、電流容量に電圧を乗じた値であり、本ケースでは対象線路が未定であることから、送電容量の記載はなしとした。弛度に注目すると、現行設計と新設計でほぼ同一である。

このように、58KTALによる新設計は、1) 弛度を同一としながら増容量化が可能、2) 現行設計と外径が同一であることから引留クランプなどの付属品や架線工具の変更が不要などの利点を有する。

今後、再生可能エネルギーが送電系統に接続されることが想定され、ボトルネックとなる海峡・河川横断線路の増容量化として、58KTAL適用は有効な手段と考えられる。

表6 開発した58KTALの電線設計例

| 項目 | 現行設計 | 新設計 |
|----------------------------------|---|---|
| 名称 | 特強亜鉛めっき鋼心高力耐熱アルミ合金より線 | 特強耐食アルミ覆鋼心高力耐熱アルミ合金より線 |
| 記号 | 55KTACSR/EST | 58KTACSR/EHRAC |
| サイズ(mm ²) | 810 | 810 |
| より線構成(本/mm) | 55KTAL-45/4.8 EST-7/3.2 | 58KTAL-45/4.8 EHRAC-7/3.2 |
| 引張荷重(kN) | 254.6 | 254.6 |
| 質量(kg/km) | 2700 | 2662 |
| 電気抵抗(Ω/km) | 0.0395 | 0.0369 |
| 弾性係数(GPa) | 72.9 | 70.6 |
| 線膨張係数(×10 ⁻⁶ /°C) | 20.9 | 21.3 |
| 電流容量(A)* ¹ 連続150°C | 1991 | 2057 |
| 弛度(m)* ² | 46.0 | 45.9 |
| 断面 |  |  |

*1：架空送電線の一般的な計算手法で算定した電流容量。

*2：径間長600m、最大使用張力49.0kNにて算出。

5. 結 言

海峡横断部などに使用される高張力電線導体部として、導電率を現行の55%IACSから58%IACSに向上させた新規高力耐熱アルミ合金線を開発した。

海峡横断部電線は、陸上部電線に対して送電容量が制限され、系統全体のボトルネックとなっていたが、開発合金を適用することで、3~5%程度の送電容量改善につながり、ボトルネック解消に貢献できる。

今後、開発電線の実線路適用を進めると共に、電力会社

の更新ニーズに対応した様々な電線設計および開発に応えていく。

6. 謝 辞

3章以降の開発成果は、電源開発送変電ネットワーク(株)との共同研究により得られたものであり、関係者の皆様にお礼を申し上げる。

用語集

※1 導電率

電気の流れやすさを示す指標。国際的に採択された焼鈍標準軟銅 (International Annealed Copper Standard) の導電率を100とした時の比率で示され、単位は%IACS。

※2 プロペルチ式連続製造圧延機

鑄造・圧延・巻取り工程を連続的に行う、アルミニウム等の線材の製造装置。急冷凝固により耐熱性に優れるほか、圧延時の再加熱が不要なため、生産性と省エネ性にも優れる。

※3 時効処理

金属マトリクスに過飽和に固溶した溶質成分を、nmオーダーの異相として析出させ、強度や耐熱性などの特性を改善する処理。KTALのようなAl-Zr系の合金では、熱処理によって析出反応を生じさせる

※4 耐食アルミ覆鋼線

ACSRの鋼心部に使用される耐腐食性に優れた鋼線。鋼心に電気用アルミニウムを被覆したアルミ覆鋼線に対し、アルミ被覆部に微量のMnを添加したものが耐食アルミ覆鋼線で、アルミ覆鋼線のおおよそ1.6倍の耐腐食性を有する⁽³⁾。

参 考 文 献

- (1) 送電用新種電線専門委員会、「新種電線」、電気協同研究、第43巻第3号、pp.150 (昭和63年1月)
- (2) 加藤厚志、大谷和也、長野宏治、小川寿春、渡部雅人、岩山功、大高和良、中川博之、「高張力・高耐食新種電線および付属品の開発」、電気学会論文誌B、Vol.140、No.4、pp.253~260 (2020年4月)
- (3) 渡部雅人、伊藤英人、長野宏治、辻俊伸、菅伸明、「耐海塩腐食性に優れた合金型架空送電線」、SEIテクニカルレビュー第190号、pp39-44 (2017)

執 筆 者

小川 寿春* : 架空線事業部 主席



渡部 雅人 : 架空線事業部 主席



中川 博之 : 架空線事業部



岩山 功 : エネルギー・電子材料研究所 主席



赤祖父保広 : 富山住友電工(株) 主査

Portrait of Akazuma Hirohiro, a man with short dark hair and glasses, wearing a dark suit jacket and white shirt, against a blue background.

* 主執筆者

導電率を向上させた高力耐熱アルミ合金と電線設計

57 (5)