



# 架空線の脱炭素に貢献する高導電率耐熱アルミ合金電線

High-Conductivity, Thermal-Resistant Aluminum Alloy Conductor That Reduces CO<sub>2</sub> Emissions in Overhead Lines

岡本 紳哉\*  
Shinya Okamoto

岩山 功  
Isao Iwayama

渡部 雅人  
Masato Watabe

中川 博之  
Hiroyuki Nakagawa

赤祖父 保広  
Yasuhiro Akasofu

小島 啓  
Hirosi Kojima

近年、環境負荷低減に向けた要求が益々高まっており、送電時の電力損失低減が可能な架空送電線が求められている。この要求に応えるため、当社は架空送電線の導体材料である耐熱アルミ合金線の高導電率化に取り組んできた。今回、合金成分、加工プロセスの改良により、連続許容温度150℃の耐熱性と61%IACS以上の高い導電率を両立した新規耐熱アルミ合金線を開発した。本稿では、アルミ合金線の開発技術、本開発合金を利用した架空送電線の特長を紹介する。

With the ever-increasing demand for reducing the environmental impact, there is a need for overhead transmission lines that can reduce transmission loss. We have been working to improve the conductivity of aluminum alloys for overhead transmission lines. This time, by improving the alloy composition and processing methods, we have developed a new thermal-resistant aluminum alloy wire with an allowable continuous operating temperature of 150°C and high conductivity of 61% IACS. In this paper, we introduce the development of the aluminum alloy conductor and the characteristics of overhead transmission lines using the new conductor.

キーワード：架空送電線、送電ロス低減、耐熱アルミ合金線、高導電率化、脱炭素

## 1. 緒言

近年、あらゆる分野においてCO<sub>2</sub>排出量削減が求められている。電力分野においては送電ロス低減のニーズが更に高まっており、1%IACSレベルの導電率\*1の差が無視できなくなりつつある。そこで当社のエネルギー・電子材料研究所、架空線事業部及び当社グループ会社の富山住友電工(株)では、架空送電線(以下、架空線)に用いられるアルミ合金線の導電率向上に取り組んでいる。

今回、架空線用アルミ合金線の1種である、耐熱アルミ合金線(60TAI)の導電率向上に取り組み、導電率を1%IACS向上した新規合金線(61TAI)の開発に成功した。本稿では新規合金線の開発技術、及びその電線を利用した架空線の特長を紹介する。

る必要があり、そのためには、1)アルミ合金線の断面積を大きくする、2)アルミ合金線の導電率を高める、といった

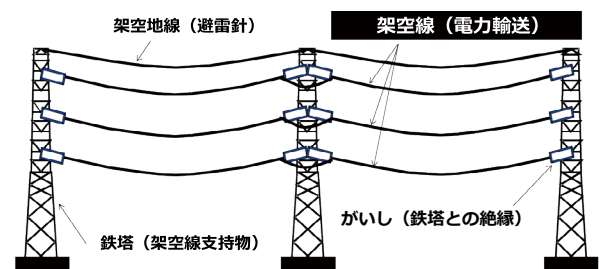


図1 架空送電設備(模式図)

## 2. 開発背景

### 2-1 架空線の構造

架空線は発電所から都市部への大電力の送電に用いられ、図1のように鉄塔間に架線して使用される。電線の強度や重量、電気抵抗のバランスを考慮し、電線構造としては、写真1のように外周部にアルミ合金線、中心部にアルミ覆鋼線等のテンションメンバを配置したより線構造が採用されており、主にアルミ合金線が電力輸送を担う。

### 2-2 アルミ合金線の高導電率化ニーズ

送電ロスを低減するためには、架空線の電気抵抗を下げ



写真1 架空線(アルミ2層構造)

手法が有効である。1) を追求した架空線として、当社の低損失電線 (図2) が挙げられる。

本レビューでは、2) アルミ合金線の導電率向上について紹介する。本アプローチでは電線重量が増加しないため、重量や張力に関する鉄塔強度の制約を受けず、既存電線の張替えを含めた、幅広い線路への適用が可能という特長があり、ニーズが高まっている。

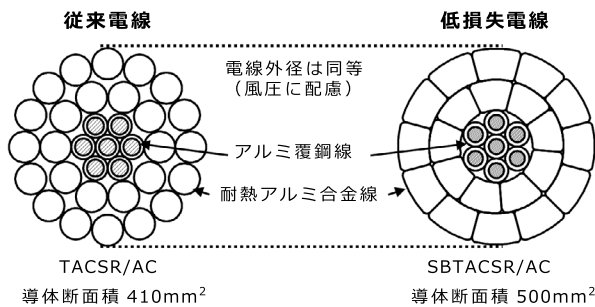


図2 低損失電線

### 2-3 アルミ合金線の要求特性とラインナップ

架空線用のアルミ合金線には、送電ロスを低減するための 1) 高い導電率のほか、距離の離れた鉄塔間に、張力を印加して架線するための 2) 引張強さ、電流通電時の発熱に耐え、引張強さを維持するための 3) 耐熱性が求められる。

一般に、引張強さや耐熱性を高めるにはアルミ以外の元素を添加するが、これにより導電率は不可避免的に低下する。つまり引張強さや耐熱性と導電率はトレードオフの関係にあり、架空線の使用環境に応じて、最適な合金線種が選択される。表1に、当社の架空線用アルミ合金線のラインナップを示す。汎用のアルミ線は HAL (硬アルミ線) で

表1 当社の架空線向けアルミ合金線ラインナップ

合金種	略称	要求特性				
		引張強さ*1 (MPa)		最小伸び*1 (%)	連続許容温度*2 (°C)	最小導電率 (%IACS)
		最小	平均			
硬アルミ線	HAL			2.0	90	61
耐熱アルミ合金線	TAL	159	165		150	60
超耐熱アルミ合金線	ZTAL			2.0	210	60
特別耐熱アルミ合金線	XTAL	159	-		230	58
高力耐熱アルミ合金線	KTAL	225	-		150	55
イ号アルミ合金線	IAL	309	-	4.0	90	52
SIアルミ合金線	SI-33	309	-	3.0		54
	SI-26	235	-	3.0		58.5

\*1: 線径により要求特性が異なるため、代表として線径φ4.5mmの特性を記載。  
 \*2: 36年間 (電線の法定耐用年数) 一定温度に昇温した際、引張強さが10%低下する温度。

あるが、例えば最大電流量が要求される場合は、やや導電率が低い耐熱性 (連続許容温度) が高い、TAL (耐熱アルミ合金線) を選択する。

## 3. 新規耐熱アルミ合金線の開発

### 3-1 開発目標

現行の耐熱アルミ合金線 (以下、60TAL) は、硬アルミ線 (HAL) に微量のジルコニウム (Zr) を添加した線種で、導電率の1%低下と引き換えに連続許容温度を90→150°Cと大幅に高めており、その優れた特性から、国内外に広く普及している<sup>(1)</sup>。

我々は、この広く普及した60TALの導電率を改善すれば、世界の送電ロスを大きく削減できると考え、新規耐熱アルミ合金線 (以下、61TAL) の開発に着手した。開発合金の目標特性を表2に記載する。導電率は60TALから1%IACS向上させ、HALと同等の61%IACS以上と設定した。普及を加速するため、引張強さ、伸びや耐熱性については60TALと同等を目標と設定し、架空線の構造や鉄塔の設計変更なしでの張替えを可能とした。

表2 開発合金の目標特性

	60TAL (現行合金)	61TAL (開発合金)
導電率	60.0%IACS以上	61.0%IACS以上
引張強さ*1	最小 159MPa以上 平均 165MPa以上	最小 159MPa以上 平均 165MPa以上
伸び*1	2.0%以上	2.0%以上
耐熱性*2	90.0%以上	90%以上

\*1: 線径により目標値が異なるため代表として線径φ4.5mmの値を記載。  
 \*2: 230°C×1h (150°C×36年相当) 熱処理した際の引張強さの残存率。

### 3-2 開発方針

本項では、まず架空線向けアルミ合金線における引張強さの向上機構、熱による引張強さの低下メカニズムと、既存の60TALにおける耐熱性向上のメカニズムを説明し、その後に61TALの開発方針について述べる。

#### (1) 引張強さの向上機構

アルミのような金属材料に一定以上の外力を加えると、特定の結晶面に沿って原子がすべることで、変形する。この際のすべりは、「転位」と呼ばれる、原子配列が乱れた領域が移動することより生じている (図3)。

変形を進めると、変形量に応じて材料中の転位が増加することで、しだいに転位と転位が絡み合い、転位が移動しにくくなる。その結果、結晶面に沿ったすべりが起こりづらくなり、金属が変形しにくくなる。この現象は“加工硬化”と呼ばれ、架空線向けアルミ合金線では、これを利用して引張強さを高めている。

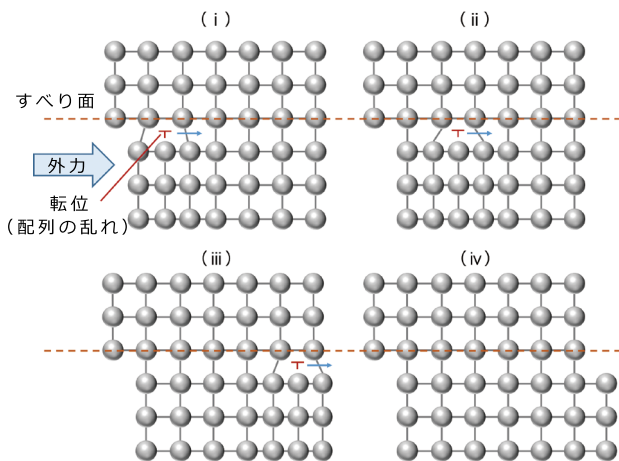


図3 転位の移動による金属の変形

### (2) 60TAlにおける耐熱性向上のメカニズム

加工硬化はアルミへの元素添加を必要としないため、導電率の低下が少ない強化方法である。一方で、転位は熱によって移動し消滅しやすい性質がある。つまり加工硬化のみで引張強さを高めたアルミ合金線は、高温下で引張強さが低下しやすい。

この欠点を改良するため、HAlに微量のZrを添加した合金線が60TAlである。60TAl中のZrはアルミ母相に固溶<sup>※2</sup>し、図4のようにアルミ原子とのZr原子の半径差により、結晶格子にひずみ場を生じさせる。このひずみ場は、転位と相互作用し引き寄せるため、転位は固溶Zrの周辺では移動を阻害される。その結果、60TAlでは、熱が加わっても転位の移動・消滅が起こりにくく、引張強さが減少しにくいいため、高温での使用に耐えることができる。

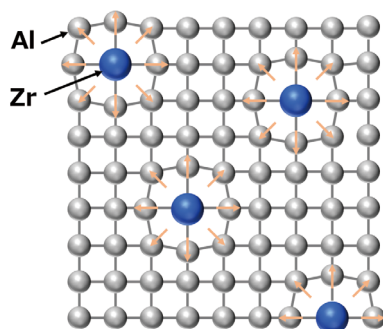


図4 固溶元素によるひずみ場

### (3) 61TAlの開発方針

導電率を高めるためには添加元素の量を減じることが有効であるが、これは耐熱性や引張強さの低下を招くため、

補償する対策と併せての実施が必要となる。

そこで61TAlでは、元素の添加量を減じて導電率を高めつつ、1) 不純物として混入する鉄 (Fe) を耐熱性向上に利用して耐熱性を補償し、2) 加工硬化を促進して引張強さを補償することで、61TAlの実現を目指した。

本レビューの次章以降では主に、成分濃度低減に伴って生じた耐熱性低下への対策と、引張強さ低下への対策の詳細について説明する。

### 3-3 耐熱性の改善

#### (1) 耐熱性の改善指針

工業的な純度のアルミ原料には、Feが不可避免的に混入する。一般には、このFeはアルミやその他の添加元素と化合物を形成し、晶析出<sup>※3</sup>した状態で存在しやすく、特性面での影響は少ない元素とみなされている。一方で我々は、固溶Feの格子ひずみの大きさに着目した。

前項で解説した固溶元素による転位の移動を阻害する効果の大小は、固溶元素による格子ひずみの大きさと正の相関を示すと考えられた。表3に、第一原理計算によって見積もられた、アルミに各元素を添加した際の格子ひずみの大きさと、各元素の熱力学上のアルミへの最大固溶量の例を記載する<sup>(2)</sup>。Feは格子ひずみが極めて大きい元素であり、Feをアルミに固溶させることができれば、高い耐熱性向上効果を発現し、元素低減による耐熱性低下を補償できると考えた。

表3 各元素の格子ひずみと最大固溶量

元素	格子ひずみ (%)	最大固溶量 (at%)	元素	格子ひずみ (%)	最大固溶量 (at%)
Li	0.7	14	Fe	3.9	0.03
Mg	1.0	18.6	Ni	2.9	0.11
Si	0.6	1.5	Cu	1.6	2.48
Sc	1.0	0.2	Zn	0.4	67
Ti	1.0	0.7	Ga	0.6	9
V	2.5	0.3	Ge	0.2	2
Cr	3.2	0.37	Se	1.8	0.003
Mn	3.5	0.62	Zr	1.0	0.09

しかしFeは、アルミへの平衡固溶量が極端に小さい、言い換えると、固溶させることが難しい元素である。また、固溶割合を評価する簡便で再現性の良い方法が確立されておらず、これらがFe固溶工程確立の障壁となっていた。

そこで我々は、このようなFeを十分に固溶させたアルミ合金線を製造するため、固溶状態の評価方法の開発と、製造工程の改良を実施した。

#### (2) Feの固溶割合の評価方法の開発

アルミ中の添加元素の固溶量を評価する方法としては、電気抵抗法、フェノール法がよく利用されてきた<sup>(3)</sup>。前者は、固溶⇄晶析出の変化に際して、材料の電気抵抗が変わ

ることを利用するものだが、抵抗値は目的とする元素以外にも、第三種元素や転位量の影響を受けるため、これらが同時に変化する場合は判断が難しくなる。後者は、母相アルミのみを選択的に溶解し、溶け残った晶析出物をフィルターで分離することで固溶分のみを抽出する方法であるが、微細な析出物がフィルターを通過することで、測定誤差が生じる難点があった。

そこで我々は当社が佐賀県立九州シンクロトン光研究センター内に専用のビームライン<sup>\*4</sup>を有している強みを生かし、放射光<sup>\*5</sup>を活用したFe固溶量の評価を検討した<sup>(4)</sup>。

放射光を利用した解析手法の一種であるX線吸収分光(XAFS)では、エネルギーを走査しながら試料にX線を照射した際の吸収率を測定し、着目する元素の吸収端<sup>\*6</sup>近傍でのX線吸収スペクトルから、その元素の電子状態や周辺構造に関する情報を得る。特殊な前処理なしに測定が可能なることから、微細な析出物の影響を含めて、高い精度での固溶量評価が期待される。

実験室にて、Fe固溶量の異なるAl-Fe合金線を作製し、当社硬X線ビームラインBL16で蛍光法を用いてX線吸収スペクトルを測定した結果を図5に記載する。Fe固溶量の異なる、2種の試料のスペクトルの違いが明瞭に確認できることが分かる。未知試料のスペクトルをこれらの標準スペクトルと比較することで、Feの固溶量を評価することに成功した。

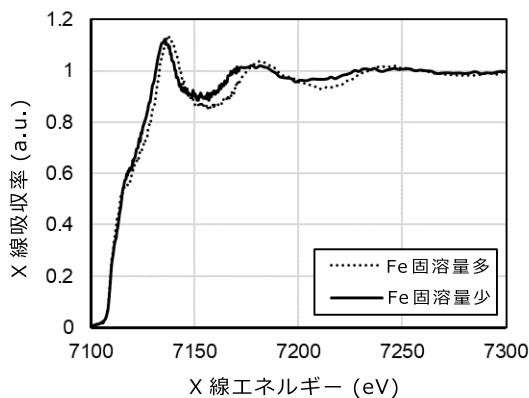


図5 Al-Fe合金のXAFSスペクトル

### (3) 铸造圧延条件の改良

平衡固溶量が小さいFeを多く固溶させるには、1) 急冷凝固により過飽和に固溶させる、2) 熱処理や加工工程における析出を極力抑制する、という工程設計が重要である。当社グループの富山住友電工で採用しているプロペルチ方式の連続铸造圧延機(図6)は、1) 5000mm<sup>2</sup>以下の比較的小さい断面積で铸造し、溶湯を水冷銅で急冷する、2) 铸造時の余熱を利用して熱間加工するため、再加熱の必要がない、という理由から、上記の固溶条件を満たしやすい。

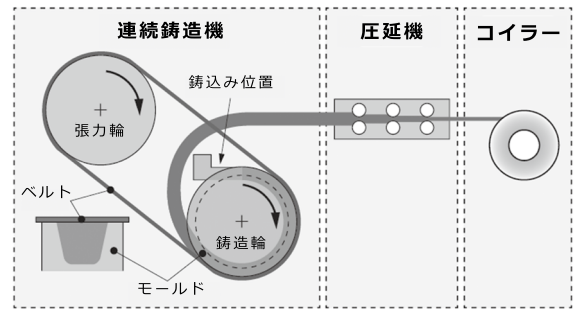


図6 プロペルチ法の概略

我々は、前項で開発したFe固溶割合の評価を指標としながら、プロペルチ式連続铸造圧延機の諸条件を最適化することでFeの固溶割合を一層高め、合金成分の低濃度化で低下した耐熱性を改善することに成功した。なお最適化項目の一例としては、鑄型形状や注湯方法、冷却水の噴射方法の改良による凝固の高速化、熱間圧延時条件の調整などがあげられる。

### 3-4 引張強さの改善

加工硬化量を増やす最も単純な方法は、最終線径を細くして加工量そのものを増やすことである。しかし61TAlは60TAlに準じた素線径での製品化を目指すため、細径化ではなく、加工時の転位導入を効率化することで、引張強さの改善を目指した。そして熱間圧延～伸線における加工温度の低減やシミュレーション等も活用しつつパススケジュールを最適化することで、合金成分の低濃度化で低下した引張強さを改善することに成功した。

### 3-5 開発合金の特性

上述した合金成分、製造プロセスに基づいて、量産機で試作したアルミ合金線の特性を表4に示す。開発材は、61%以上の導電率を有しつつ、その他の機械特性や耐熱性については、60TAlの規格を満足していることがわかる。

表4 開発合金の基本特性<sup>\*1</sup>

	開発結果	開発目標
導電率	61.4%IACS	61.0%IACS
引張強さ <sup>*2</sup>	最小 171MPa 平均 173MPa	最小 159MPa 平均 165MPa
伸び <sup>*2</sup>	2.6%	2.0%以上
耐熱性 <sup>*3</sup>	93.7%	90.0%以上

<sup>\*1</sup>：試作した線材からサンプルを抜き取り、測定数n=10で評価した値。

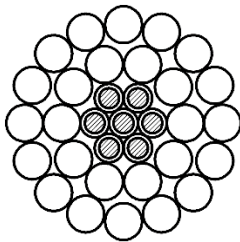
<sup>\*2</sup>：線径により特性が異なるため代表として線径Φ4.5mmの値を記載。

<sup>\*3</sup>：230℃×1h(150℃×36年相当)熱処理した際の引張強さの残存率。

## 4. 61TAIを使用した架空線のCO<sub>2</sub>低減効果の試算

開発合金を実際に送電線に採用した場合の、送電ロスおよびCO<sub>2</sub>の低減効果を試算した(表5)。なお試算にあたり電線構造は、汎用的なTACSR/AC(アルミ覆鋼心耐熱アルミ合金より線)とした。導体断面積410mm<sup>2</sup>、巨長50km、2回線3相で使用する場合で、10年間当たりでCO<sub>2</sub>排出量を4千ton以上と大きな削減効果が期待できることが明らかになった。

表5 開発合金を適用した架空線の送電損失量及びCO<sub>2</sub>排出量試算結果

電線構造		 TACSR/AC 導体断面積 410mm <sup>2</sup>	
		従来合金 (60%IACS)	開発合金 (61%IACS)
最大電流容量*1	A	1,391	1,391
平均交流抵抗*2	Ω/km	0.0794	0.0782
年間損失電力量*3	MWh	61,772	60,838
損失電力による 10年間CO <sub>2</sub> 排出量*4	ton-CO <sub>2</sub>	290,329	285,939
<b>10年間CO<sub>2</sub>排出低減量 (開発合金-従来合金)</b>	ton-CO <sub>2</sub>	<b>4,390</b>	

- \*1: 従来合金で導体温度が150℃となる電流値。  
 \*2: 年間平均負荷率f(=平均電流容量/最大電流容量)を30%とした。  
 [計算条件: 周囲温度40℃, 風速0.5m/s, 風向角45°, 日射量0.1w/cm<sup>2</sup>, 周波数60Hz]  
 \*3: 巨長50km、単導体、2回線3相式、損失係数F=0.153(=0.3f+0.7f<sup>2</sup>)とした。  
 \*4: CO<sub>2</sub>排出係数を0.000470(t-CO<sub>2</sub>/kWh)とした<sup>(5)</sup>。

## 5. 結 言

電力送電時の送電ロス低減ニーズの高まりを受け、連続許容温度150℃の耐熱性と61%IACS以上の高い導電率を両立した新規耐熱アルミ合金線を開発した。

開発合金を架空線に適用することで、送電コストの低減、CO<sub>2</sub>の排出量低減に大きく貢献できる。

今後は各種送電線用のアルミ合金線において、本開発で得られた知見を展開しながら導電率の向上に取り組み、架空線への適用・拡販を進める。

## 6. 謝 辞

放射光による評価は佐賀県立九州シンクロトロン光研究センターのBL16(課題番号SEI2018B-005)にて実施した。

## 用語集

### ※1 導電率

電気の流れやすさを示す指標。電気抵抗率 $1.7241 \times 10^{-2} \mu\Omega\text{m}$ の軟銅を100とした時の比率で示され、単位は%IACS。

### ※2 固溶

母相金属中に添加元素が原子レベルで均一に溶け込んでいる状態。

### ※3 晶析出

溶解した金属、あるいは固体の金属に原子状態で溶け込んでいた添加元素が、母相の金属と異なる化合物を形成して、現れ出る現象。

### ※4 ビームライン

放射光を利用するための実験施設。

### ※5 放射光

光速に近い速さで運動する電子の軌道を曲げると、その接線方向に生じる、極めて強い電磁波。一般のX線源に比べ強度が強い、エネルギーが可変である等の特長がある。

### ※6 吸収端

X線吸収分光(XAFS)において、X線の吸収率が不連続に大きく変わるエネルギー。原子核の周囲にある原子が、X線から一定のエネルギーを受け取り、外殻の軌道に遷移することに対応する。

## 参 考 文 献

- (1) 奥村哲郎、「高導電率新耐熱アルミ合金」、住友電気第121号、pp.1-5 (September 1982)
- (2) 東健司、「第一原理計算で夢みる錬金術の新世界」、軽金属、第60巻、9号、pp.458-466 (September 2011)
- (3) 松尾守、「フェノール溶解液法によるアルミニウム合金中の固溶FeおよびMnの分析」、軽金属、第47巻、1号、pp.15-20 (1997)
- (4) 山口浩司、「放射光分析用住友電工ビームライン」、SEIテクニカルレビュー第192号、pp.143-148 (January 2018)
- (5) 環境省\_算定方法・排出係数一覧、「温室効果ガス排出量 算定・報告・公表制度」ウェブサイト、<https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/calc> (参照 2006-06-18)

執 筆 者

岡本 紳哉\* : エネルギー・電子材料研究所



岩山 功 : エネルギー・電子材料研究所 主席



渡部 雅人 : 架空線事業部 主席



中川 博之 : 架空線事業部



赤祖父保広 : 富山住友電工(株) 主査



小島 啓 : 富山住友電工(株)



\* 主執筆者