

# 大電流化可能なリードスイッチ用 コバルト合金線

## Cobalt Alloy Wire for High-Current Reed Switches

太田 肇\*  
Hajime Ota

桑原 鉄也  
Tetsuya Kuwabara

中井 由弘  
Yoshihiro Nakai

河野 功尚  
Norimasa Kawano

杉原 直樹  
Naoki Sugihara

山崎 和郎  
Kazuo Yamazaki

近年、電子制御方式の機器が増加し、電流容量も増加傾向にあることから、それらの制御用スイッチにも大電流化のニーズが高まっている。これまで大電流スイッチには水銀リードスイッチが使用されてきたが、環境負荷物質である水銀の全廃にともない、水銀を用いないリードスイッチへ変更されている。しかしながらリードスイッチには、通電によるリード線の発熱が大きくなると、リード線の磁気特性が失われ、スイッチとしての機能を果たさなくなるという問題があり、大電流化が制限されてきた。当社は、リード線用の従来合金線と同様の優れた特性を有しつつ、通電による発熱を抑制し、温度が上昇しても磁気特性を失わない（高キュリー温度）コバルト-ニッケル-鉄合金線を開発した。本合金線を用いたリードスイッチは、大電流化が可能であり、自動車LED向けの制御用リードスイッチ等への適用が期待できる。本レビューでは、開発した合金線の優れた特性を紹介する。

Recent years have seen increases in electronically controlled system equipment and electric current capacity. Therefore the demand for switches capable of handling high current is rising. Mercury reed switches have been used for high-current switch until now. Since mercury is a substance of concern, mercury reed switches have been changed to reed switches in which mercury is not used. However, when a temperature rises largely as energization progresses by Joule heat effect, lead wires lose their ability to carry magnetic flux, and reed switches become less sensitive. Due to these problems, reed switches were not used for high-current switches. We have developed cobalt-nickel-iron alloy wire for high-current switches which demonstrate excellent characteristics similar to the conventional alloy lead wire. The new alloy wire suppresses heating due to energization and has high Curie temperature, i.e. no susceptibility to lose magnetic characteristics. The reed switch using the new alloy wire is expected to be applied to LEDs in automobile stop lamps.

キーワード：リードスイッチ、コバルト合金、キュリー温度、ガラス封着性

## 1. 緒言

近年の産業機器の大電流化、高集積化から、導体に求められる耐熱性はますます厳しいものとなっている。高温での耐酸化性、耐腐食性などの耐熱性に優れたニッケル合金や鉄合金、コバルト合金やその複合材料は、耐熱導体用合金線（以下、耐熱合金線）として通常の導体で使用できない高温下で利用されている。

当社は、自動車点火プラグやダイオードのリード線などの耐熱合金線を開発、販売している。

このたび、リードスイッチにおける大電流化ニーズに応えるため、大電流化とガラス封着性を両立させた耐熱合金線としてコバルト合金を開発した。本報告では、その優れた特性について紹介する。

## 2. 耐熱合金線

当社の耐熱合金線の主なラインナップを表1に示す。当社では、銅や銀などの導体材料やコバルト、ニッケル、鉄などの耐熱導体材料を組み合わせ、最終製品に必要な機能を満足

表1 耐熱合金線の主なラインナップ

| 合金系    |                     | 特徴  | 断面構造 |
|--------|---------------------|---|------|
| ニッケル合金 | 高ニッケル               | 耐高温酸化性と耐火花消耗性を両立<br>結晶粒粗大化抑制                |      |
|        | ニッケル-マンガン           | ニッケルに比べて軟化温度高く耐熱性良好                         |      |
|        | コバルト                | 硬質ガラスとの熱膨張マッチング良好                           |      |
| 鉄合金    | 鉄-ニッケル              | 軟質ガラスとの熱膨張マッチング良好                           |      |
| コバルト合金 | コバルト-ニッケル-鉄         | 耐熱・高強度                                      |      |
| 複合線    | ジュメット（鉄-ニッケル芯材、銅被覆） | ガラスとの熱膨張マッチングと導電率を両立                        |      |
| めっき線   | ニッケルめっき<br>ジュメット    | ジュメット線にニッケルめっき施した製品。亜酸化銅がないため、外部リード部の表面処理不要 |      |
|        | 錫めっき<br>黄銅角線（TPBS）  | 黄銅角線に錫めっき施した製品。鉛フリー                         |      |

させる耐熱合金線の開発を行っている。

自動車点火プラグ用電極材の開発では、プラグを長寿命化するために、合金線の耐高温酸化性と耐火花消耗性<sup>\*1</sup>をともに向上させる必要がある。耐高温酸化性を向上させるためには酸化膜剥離を抑制する元素の添加が有効であるが、添加元素量を増加させると放熱性が低下し、耐火花消耗性が低下する。当社が開発した点火プラグ用イットリウム分散型ニッケル合金線は、ニッケル中に微細分散するイットリウムを添加することで、放熱性や電気特性を純ニッケルと同等に維持して良好な耐火花消耗性を有するとともに、酸化膜剥離を抑制して優れた耐高温酸化性をあわせ持つ、画期的な合金線である<sup>(1)</sup>。

ダイオードやコンデンサー、リードスイッチのリード線の開発では、ガラスとの気密封止が重要であり、封着するガラスと熱膨張率をあわせることとガラスとの拡散接合性が必要である<sup>(2)</sup>。当社の鉄-ニッケル合金線はガラスとの熱膨張率が近く、ガラス封着性に優れた合金線である。

グロープラグ用抵抗線の開発では、グロープラグを長寿命化、小型化するために、抵抗特性や耐高温酸化性を向上させる必要がある。純コバルトは使用温度域で最適な抵抗値を示し、耐酸化性も良好であるが、結晶構造が六方晶<sup>\*2</sup>であり一般的に加工が難しい材料である。当社が開発したコバルト-ニッケル-鉄合金は、組成を最適化することで結晶構造を立方晶とし、加工性を改善するとともに、抵抗特性と耐酸化性を両立させた合金線である<sup>(3)</sup>。

### 3. リードスイッチ向け耐熱合金線

#### 3-1 リードスイッチの大電流化ニーズの高まり

リードスイッチは図1に示すように、2本の強磁性材料<sup>\*3</sup>からなるリード線が、ある接点間隔を持って対向配置され、不活性ガスが封入されたガラス管で密封、固定されている。リードスイッチの周囲に配置された励磁コイルからリード線接点部の軸方向に磁界を加えると、リード線が磁化され、接点部が磁気吸引力によって互いに引き合い、接触して通電し、スイッチがオンの状態となる。また、外部磁界を除去するとリード線のばね性によって接点部が離され、スイッチがオフの状態となる。

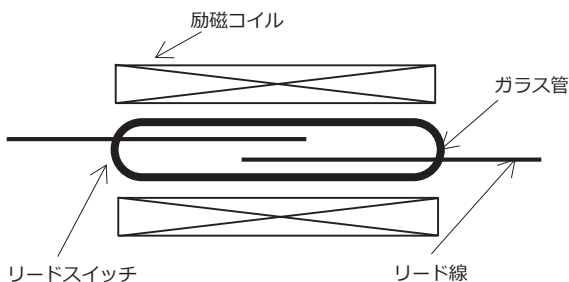


図1 リードスイッチの構造

リードスイッチは、自動車用途や産業用途などの液面レベル検出器の中に組み込まれ、厳しい環境下で使用されることが多い。また、近年ではリードスイッチが適用される機器の制御電流が大きくなっており、通電によるリード線のジュール発熱<sup>\*4</sup>が大きく、リード線が高温に達する状態でスイッチが使用される機会が増えてきた。このため、リードスイッチには、リード線が高温になってもスイッチ特性が劣化しないことが求められる。

スイッチ特性の劣化要因として、リード線の接点部の表面汚染と、リード線の温度上昇による磁気特性消失がある。接点部の表面汚染に対しては、ガラス管内に不活性ガスを封入し、接点部が外部環境の汚染物質によって変質しないようにしている。一方、リード線の磁気特性消失に対しては、リード線の放熱性を高めることでジュール発熱による温度上昇を防ぐ対策を行ってきた。

従来の大電流スイッチである水銀リードスイッチでは、接点部が水銀で覆われているため、リード線の放熱性が高く、リード線が低温に保たれて磁気特性の消失を回避でき、通電電流5A以上が対応可能である。しかし、環境負荷物質である水銀を全廃する必要性から、接点部に水銀のないリードスイッチへの変更が行われている。このタイプのスイッチでは、リード線の放熱性を高めるためにスイッチ自体のサイズを大きくする必要があり、スイッチを小型化して機器の高集積化を図りたい用途において、サイズを変えずに通電電流5A以上といった大電流化が可能でリードスイッチへのニーズが高まってきている。

#### 3-2 大電流リードスイッチ向け耐熱合金線の要求特性と目標値

##### (1) 要求特性

リードスイッチ向け耐熱合金線には、低い固有抵抗、高いキュリー温度<sup>\*5</sup>、良好なガラス封着性、優れた加工性が求められる。

低い固有抵抗は、通電によるジュール発熱を抑制し、リード線自身が高温とならないようにするために必要であり、高いキュリー温度は、リード線自身が高温となっても磁気特性が消失せず、リード線の使用上限温度を高めるために必要である。また、良好なガラス封着性については、リード線の接点表面の汚染を防ぐため必要であり、ガラスとの熱膨張マッキングを合わせることによって封着後のガラスにクラックが発生することを防いだり、ガラスとの拡散接合性を良くしたりして気密封止することで、外部環境からガラス管内に汚染物質の侵入を防止する。さらに、加工性については、リード線の接点部はプレス加工によってばね性を有する形状に加工するため、良好な加工性が求められる。

##### (2) 従来耐熱合金線の特長

表2に従来の小電流用途リードスイッチに採用された鉄-ニッケル合金線の特長を示す。表中のガラスとの熱膨張率マッキングは、ガラスの熱膨張率/線材の熱膨張率で定義し、マッキング率の数値が100%に近いほど両者の熱膨張率

の差が小さくガラス封着性が良い。

鉄-ニッケル合金線は接点部形成の加工性が優れ、ガラスとの熱膨張マッチングやガラスとの拡散接合性が良い。これら特性に加えて、キュリー温度が520℃、固有抵抗が34μΩcmであることから、この合金線をリード線としたリードスイッチは5A未満の小電流通電でスイッチ機能を十分に果たしている。

表2 小電流リードスイッチ向け鉄-ニッケル合金線の特性

| 合金線                    | 従来材<br>鉄-ニッケル |
|------------------------|---------------|
| 結晶構造                   | 立方晶           |
| キュリー温度<br>(℃)          | 520           |
| 固有抵抗<br>(μΩcm)         | 34            |
| ガラスとの熱膨張マッチング率<br>(%)  | 94            |
| ガラスとの拡散接合性             | 良好            |
| リードスイッチでの推定通電電流<br>(A) | 2~4           |

(3) 大電流化に向けた目標設定指針

開発するリード線は、製造に関する熱膨張マッチングやガラスとの拡散接合性、加工性は従来材の特性を維持させつつ、キュリー温度と固有抵抗を調整してリードスイッチの通電電流値を現行比2.5倍以上とすることを目指した。具体的な設定方法は後述するが、新規に開発する耐熱合金線の目標設定値一覧を表3に示す。

表3 新規に開発する耐熱合金線の目標設定値一覧

| 合金線                    | 開発材   |
|------------------------|-------|
| 結晶構造                   | 立方晶   |
| キュリー温度<br>(℃)          | 930以上 |
| 固有抵抗<br>(μΩcm)         | 9.5以下 |
| ガラスとの熱膨張マッチング率<br>(%)  | 85以上  |
| ガラスとの拡散接合性             | 良好    |
| リードスイッチでの推定通電電流<br>(A) | 5~10  |

(4) キュリー温度と固有抵抗の目標設定

固有抵抗やキュリー温度を変えることでリード線の最大通電電流がどの程度変えられるかを試算し、開発材の目標値とすることとした。

合金線の固有抵抗をρとし、電流iの通電によるジュール発熱と雰囲気への放熱が平衡した時の合金線の温度をTとする

と、使用上限温度T<sub>max</sub>はキュリー温度T<sub>c</sub>と等しく、最大通電電流i<sub>max</sub>や固有抵抗ρとの間に、式(1)の関係が成り立つ<sup>(4)</sup>。

$$i_{\max}^2 \propto T_c / \rho \quad \dots\dots\dots (1)$$

式(1)から、例えば、キュリー温度を従来材の2倍、固有抵抗が従来材の1/4倍とすると、最大通電電流は現行比2.8倍級となり、リードスイッチの大電流化が達成できると考えられ、開発材の目標値とした。

しかしながら、上記の目標値は従来材の鉄-ニッケル合金線では実現することができないため、新規耐熱合金線の適用が必要と考えた。

(5) 加工性とガラス封着性の目標設定

合金を変更すると加工性と熱膨張率も変化する。加工性については、従来材と同じ結晶構造とすることで必要な加工性を維持できると考えた。一方、熱膨張率については、熱膨張率が異なるリード線にガラス封着する時のガラス側に残る応力の分布をシミュレーションで推定し、ガラスにクラックが発生することを抑制できるリード線とガラスとの熱膨張マッチング率を目標値とすることとした。

リード線にガラス封着する時は、リード線の表面で高温に溶融させたガラスを所定の形状に成形し、冷却して封止部とする。リード線とガラスとの熱膨張率の差が大き過ぎると、冷却後の封止部のガラスに残留する応力がガラスの破断応力を超え、ガラスにクラックが生じる。

ガラスとの熱膨張マッチング率が良くないリード線にガラス封着した時の、ガラスに残留する応力の分布をシミュレーションで推定した結果を図2に示す。ガラス側の特定の箇所には大きな応力が残留することが推定できた。

ガラスのクラック発生を抑制するには最大残留応力がガラスの破断応力を下回るように、リード線とガラスの熱膨張をマッチングさせる必要がある。上記のシミュレーションを用いて、熱膨張マッチング率と最大残留応力の関係を調査した

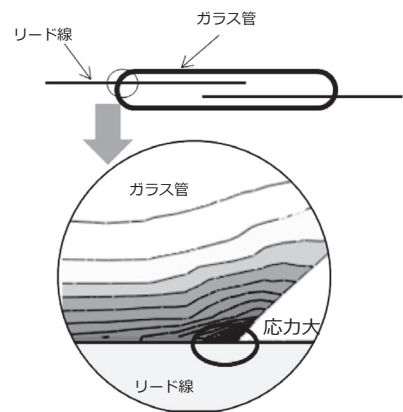


図2 封止部のガラス側に残留する応力分布のシミュレーション結果

結果を図3に示す。最大残留応力がガラスの破断応力を下回るようにするために、開発材の熱膨張マッチング率を85%以上に設定した。

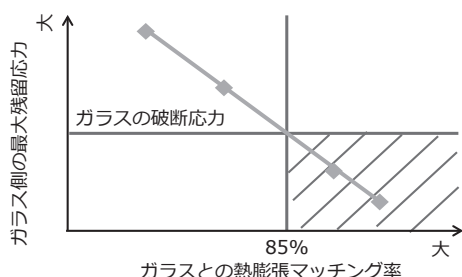


図3 熱膨張マッチング率と封止部のガラス側に残留する応力の関係

ガラスとの拡散接合性については、強磁性材料はガラスとの拡散接合性が良好であることから従来材同等の特性を得られると考えた<sup>(2)</sup>。

## 4. リードスイッチ向け耐熱合金線の開発

### 4-1 合金の選定

キュリー温度や固有抵抗、熱膨張率は合金を構成する原子によって変化する。表4に強磁性を示す純金属や合金の諸特性を示す。

従来材の鉄-ニッケル合金と比較して、純コバルトやコバルト-ニッケル-鉄合金は、キュリー温度が高く固有抵抗も低いため、リードスイッチの大電流化に有利である。この中で、純コバルトはキュリー温度が1,100℃と高い反面、ガラスとの熱膨張マッチング率が鉄-ニッケル合金よりも低いことから、ガラス封着性が低下すると考えられる。また、結晶構造が六方晶であり大きな変形が伴う接点部成形は困難と考

表4 強磁性材料の諸特性

| 純金属もしくは合金         | 純コバルト | コバルト-ニッケル-鉄 | 純鉄  | 鉄-ニッケル  | 純ニッケル |
|-------------------|-------|-------------|-----|---------|-------|
| 結晶構造              | 六方晶   | 立方晶         | 立方晶 | 立方晶     | 立方晶   |
| キュリー温度(℃)         | 1,115 | 950~1,050   | 770 | 450~550 | 354   |
| 固有抵抗(μΩcm)        | 6.2   | 7.6~9.0     | 9.6 | 34~58   | 6.9   |
| ガラスとの熱膨張マッチング率(%) | 75    | 80~91       | 92  | 94~99   | 85    |
| ガラスとの拡散接合性        | 良好    | 良好          | 良好  | 良好      | 良好    |

えられる。一方、コバルト-ニッケル-鉄合金は、結晶構造が立方晶で加工性が良く、ガラスとの熱膨張マッチング率や拡散接合性が良好であり、キュリー温度が高く、さらに固有抵抗も低いことから、従来材のガラス封着性や加工性を維持しつつリードスイッチの大電流化により有利と考えられる。そこで、この合金系をリードスイッチ向けの耐熱合金線に選定し、熱膨張率を調整するため組成の検討を実施した。

### 4-2 ガラスとの熱膨張マッチング

コバルト-ニッケル-鉄合金は組成によって熱膨張率が変化することから、ガラスとの熱膨張マッチング率が85%以上となる組成を調査した。

その結果、図4に示すように、ニッケルと鉄の添加量を適正範囲とすることで、熱膨張マッチング率が目標を上回ることがわかり、この組成範囲を開発材の成分とすることに決定した。

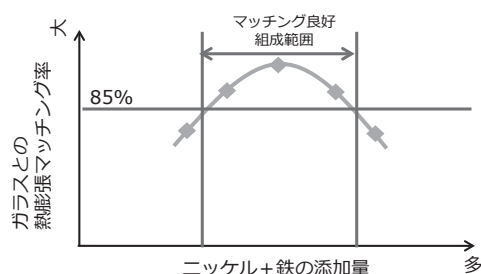


図4 コバルト-ニッケル-鉄合金線のニッケルと鉄の添加量と熱膨張マッチング率の関係

### 4-3 開発材の特性

表5に開発したコバルト-ニッケル-鉄合金線と従来材の特性を示す。従来材に比べ、キュリー温度が約2倍、固有抵抗は約1/4に低減することが確認できた。また、ガラスとの熱膨張マッチング率や拡散接合性についても狙い通りであることが確認できた。通電電流については、式(1)を用いて、

表5 開発したコバルト-ニッケル-鉄合金線の特性

| 合金線                | 従来材<br>鉄-ニッケル | 開発材<br>コバルト-ニッケル-鉄 |
|--------------------|---------------|--------------------|
| キュリー温度(℃)          | 520           | 980                |
| 固有抵抗(μΩcm)         | 34            | 8.5                |
| ガラスとの熱膨張マッチング率(%)  | 94            | 88                 |
| リードスイッチでの推定通電電流(A) | 2~4           | 6~12               |
| ガラスとの拡散接合性         | 良好            | 良好                 |



開発材をリード線にした時に通電できる最大電流を試算したところ、開発材のリード線は従来材と比較して約3倍の電流を通電できるとの結果が得られた。これらの特性から、開発材をリード線とするリードスイッチは、大電流化への対応が可能と考えられる。

## 5. 結 言

当社は、リードスイッチにおける大電流化ニーズに応えるため、リードスイッチ向け耐熱合金線として、従来合金線と同様の優れた加工性とガラス封着性を有しつつ、キュリー温度が980℃と高く、固有抵抗が8.5 $\mu\Omega$ cmと低い良好な特性を有することから、従来合金線に比べて約3倍相当の大電流化が期待できるコバルト-ニッケル-鉄合金線を開発した。これらの特性から、開発材をリード線とするリードスイッチは、大電流化への対応が可能と考えられる。

今後、市場拡大が期待される自動車LED向けの制御用リードスイッチ等への適用が期待できる。

なお、開発材については特許登録済みである。

## 用語集

### ※1 火花消耗

点火プラグの電極部で発生する火花のエネルギーによって、電極材料が溶融、飛散し、消耗する現象。

### ※2 六方晶

一般的に変形しにくく割れやすいとされる結晶構造であり、大きな変形が伴う部品成形は困難とされている。ニッケルや鉄等の立方晶は加工性に優れる。

### ※3 強磁性材料

材料を構成する原子が持つ磁気モーメントが同一の方向に向いて整列し、全体として大きな磁気モーメントを持つ材料。

### ※4 ジュール発熱

導体に電流が流れた際に導体の抵抗によって熱が発生する現象。発熱量は、電流の2乗と抵抗の積に比例する。

### ※5 キュリー温度

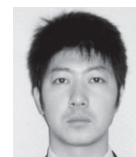
強磁性材料を構成する原子が持つ磁気モーメントが、温度の上昇とともに熱の影響で方向が揺らぎ、その方向が完全に乱れて磁性がなくなる温度。

## 参 考 文 献

- (1) 丹治亮 他、「高性能ニッケル基電極材料の開発」、SEIテクニカルレビュー 第171号、pp.31-35 (2007年)
- (2) 山崎和郎、「鉄ニッケル系リード材料の基本特性と応用」、住友電気第125号、pp.125-133 (1984年)
- (3) 住友電気工業株式会社、日本特殊陶業株式会社、グロープラグ、特許第4854459号 (2012-01-18)
- (4) 虎澤裕康、「大電流スイッチの開発」、OKIテクニカルレビュー、p38、第216号 Vol.77 No.1 (2010年4月)

## 執 筆 者

太田 肇\* : エネルギー・電子材料研究所 主査



桑原 鉄也 : エネルギー・電子材料研究所  
グループ長  
博士 (工学)



中井 由弘 : エネルギー・電子材料研究所 部長



河野 功尚 : 住電ファインコンダクタ㈱



杉原 直樹 : 住電ファインコンダクタ㈱ 課長



山崎 和郎 : 住電ファインコンダクタ㈱ (取) 部長



\*主執筆者