Fe-Nb-Co-W 系および Fe-Ta-Co-W 系半硬質磁性合金
「Recalloy」の特性について*

増 本 量** 中村直司** 村上雄悦**

J. Japan Inst. Metals, Vol. 45, No. 12 (1981), pp. 1271~1278

On the Properties of Semihard Magnetic Alloys "Recalloy" in the Fe-Nb-Co-W
and Fe-Ta-Co-W Systems

Hakaru Masumoto**, Naoji Nakamura** and Yuetsu Murakami**

The magnetic properties, the thermal expansion coefficient α , the electrical resistivity ρ and the hardness H_v have been studied for the Fe- $\leq$ about 3 mass%Nb-20 mass%Co- $\leq$ 10 mass%W alloys and Fe- $\leq$ about 5 mass%Ta-20 mass%Co- $\leq$ 10 mass%W alloys. All the alloys used in this study were water quenched from 1323 K, cold drawn by 97.2% reduction in area and subsequently reheated at 673-1273 K for the period less than 18 ks. The magnetic properties of the Fe-Nb-Co-W and Fe-Ta-Co-W alloys depend remarkably on the tungsten content, the reheating temperature and the reheating time. Among these properties, both B_r/B_s and H_c increase particularly with increasing W content. The thermal expansion coefficient α shows a minimum at the composition of 3 mass%W in the former alloys and a maximum at 7 mass%W in the latter alloys, respectively, and these values are less than $10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. With increasing W content in both of these alloy systems, ρ and H_v increase monotonically for the most part. When water quenched, cold drawn and subsequently reheated at 973 K for 18 ks, an Fe-about 2 mass%Nb-20 mass%Co-5 mass%W alloy exhibits the following values: $B_s=1.97 \text{ T}$ at $8 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$, $B_r=1.85 \text{ T}$, $B_r/B_s=0.94$, $H_c=1.84 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$, $\sqrt{(BH)_{\text{max}}/B_r H_c}=0.94$, $\alpha=9.8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ at 273-313 K, $\rho=0.263 \mu\Omega \cdot \text{m}$ and $H_v=404$. Also, an Fe-about 3 mass%Ta-20 mass%Co-5 mass%W alloy exhibits: $B_s=2.02 \text{ T}$, $B_r=1.89 \text{ T}$, $B_r/B_s=0.94$, $H_c=2.03 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$, $\sqrt{(BH)_{\text{max}}/B_r H_c}=0.94$, $\alpha=9.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\rho=0.234 \mu\Omega \cdot \text{m}$ and $H_v=446$.

(Received April 30, 1981)

I. 緒 言

著者らは先に、Fe-Nb 系⁽¹⁾、Fe-Ta 系⁽²⁾、Fe-Nb-Co 系⁽³⁾および Fe-Ta-Co 系⁽³⁾の Fe 側の合金について、 γ 相から急冷しついで強冷間加工を施した後、さらに α - γ 変態点以下の温度で適当時間再加熱することにより、角形性の良好な半硬質磁性合金 Recalloy が得られることを報告した。つづいて Fe-Mo 系および Fe-W 系合金について研究を行ない、それらの磁気的硬化は Fe-Nb 系および Fe-Ta 系合金に比して非常に顕著で、例えば H_c に関しては約 3 倍以上の効果があることも既に報告しておいた⁽⁴⁾。電子交換機におけるリマネントリードスイッチ⁽⁵⁾のリード片への応用を考える場合、上記の Fe-Nb-Co 系および Fe-Ta-Co 系合金はリード片に必要な諸特性をほぼ備えている。しかしその保磁力 H_c は一般に要求されていると考えられる値 $1.6 \sim 3.2 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ ⁽⁵⁾ よりやや低い欠点を有している。その

ため著者の一人中村はこれら 3 元系合金に磁気的硬化の大きな Mo を添加した Fe-Nb-Co-Mo 系および Fe-Ta-Co-Mo 系合金についてさらに研究を進めた結果、角形比 B_r/B_{16} [†] および H_c が特に向上するばかりでなく、熱膨張係数 α も改善されるなど従来の材料にみられない多くの利点があることが明らかとなった⁽⁶⁾。なお Fe-Co-W 3 元系合金については、熊坂らの研究がある⁽⁷⁾。それによると W の添加は H_c 増加に対する効果の大きいことが報告されている。そこで著者らは Mo と同じ VIa 族元素である W を Fe-Nb-Co 系および Fe-Ta-Co 系に添加した 4 元合金の諸特性について研究を行なった。

II. 試料ならびに実験方法

合金の原料は 2 元系合金⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁴⁾ならびに 3 元系合金⁽³⁾で用いたのと同じ純度の電解 Fe、金属 Nb、金属 Ta、金属 W および電解 Co を用いた。試料の製造法および測定法は以前報告した Fe-Nb 系合金⁽¹⁾の場合と同様である。なお著者らが以前報告した Fe-Nb-Co 系⁽³⁾および Fe-Ta-Co 系⁽³⁾合金の研究において、Co 20% の場合が加工性と角張

** 財団法人電気磁気材料研究所 (The Research Institute of Electric and Magnetic Alloys, Yagiyama-minami 2, Sendai)

* 1978 年 10 月 日本金属学会富山大会および 1979 年 4 月 日本金属学会東京大会に発表; 財団法人電気磁気材料研究所研究報告第 126 号

† B_{16} は有効磁界 $16 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ における磁束密度。

性の両面において特に優れていたもので、この研究においても Co 量を 20% に限定して試料は Fe- $\sim$ 約 3%Nb-20% Co- $\sim$ 10%W 合金[†]について 16 種、Fe- $\sim$ 約 5%Ta-20% Co- $\sim$ 10%W 合金[†]について 14 種とした。両系合金はいずれも強冷間加工が容易であった。熱処理および加工についても以前報告した^{(1)~(4)(6)}方法と同様で、合金を真空中溶解および鍛造により丸棒とし、ついで α - γ 変態点以上の温度 1323 K で 3.6 ks 溶体化処理後水焼入れし、ついで減面率 97.2% の冷間線引を施して直径 0.5 mm の細線試料を造った。これを 673~1273 K で 18 ks 以下再加熱して実験を行なった。

つぎにそのうち重要と思われる結果のみについて述べる。

III. 実験結果および考察

1. Fe-Nb-Co-W 系合金

Fig.1 は 1323 K で 3.6 ks 溶体化処理後水焼入れし、ついで減面率 97.2% 冷間線引をした Nb 約 3% 以下、Co 20% および W 10% 以下を含む種々な Fe-Nb-Co-W 合金について 973 K で 1.8 ks 再加熱した場合の磁気特性を示す。 B_{16} および残留磁束密度 B_r は Nb 量および W 量の増加とともに減少する。それらの値は Fe-Nb-Co-Mo 系合金⁽⁶⁾の場合より小さいが、Nb 約 2% を含む合金の B_r は 1.8 T 以上の値を示す。角形比 B_r/B_{16} は Nb を含む合金においては W 量とともに始め減少するが、1~2% の極少を経た後は漸次増大し、W 5% 以上では 0.9 以上の高い値を示す。また角張率 $\sqrt{(BH)_{\max}/B_r H_c}$ は W 量に対して大きな変化はないが、Nb を含んだ合金の場合が Nb を含まない合金の場合に比して高い値を示している。つぎに H_c は Fe-Nb-Co-Mo 系合金⁽⁶⁾の場合と同様に W 量が増すとともに増大するが、その増加の度合は Nb を含む合金の場合が小さい。Fe-Nb-Co 系合金の $\sqrt{(BH)_{\max}/B_r H_c}$ に対する W 添加の効果は、Mo 添加の場合⁽⁶⁾ Mo 5% 以下でないと 0.9 以上の $\sqrt{(BH)_{\max}/B_r H_c}$ が得られないのに比べて、W 量 9% までの広い組成にわたって 0.9 以上の高い値を示すので、組成依存性が少なく安定しているといえる。

なお Fe-20%Co-W 合金に関しては熊坂らによる研究がある⁽⁷⁾。Fig.1 にみるように、熊坂らが得た H_c は著者らの値と極めてよく一致しているが、その他の磁気特性はかなり異なっている。それは多分、熊坂らが用いた試料がスエーディング加工を施したものであるため、著者らによる線引加工状態の繊維組織に比べて結晶の集積度が十分でないことによるものであろう。

Fig.2 は Fig.1 の合金のうち Nb 約 2% および Co 20% を一定量として、W 0, 3, 5, 7 あるいは 9% を含む 5 種類の Fe-Nb-Co-W 合金について、Fig.1 と同じ水焼入れおよび冷間線引を施した後、種々の温度で 1.8 ks 再加熱し

[†] 合金組成はすべて mass% で示す。

Fig.1 Magnetic properties of Fe-Nb-20%Co-W alloys containing about 0, 2, or 3%Nb reheated at 973 K for 1.8 ks after water-quenching from 1323 K and subsequent cold-drawing by 97.2% reduction in area. — : K. Kumasaka et al.

た場合の磁気特性を示す。各合金の B_{16} , B_r , B_r/B_{16} および H_c の再加熱温度に対する変化はおおむね Fe-Nb-Co-Mo 系合金⁽⁶⁾の場合と類似しており、 B_{16} を除いた各磁気特性は 973 K の再加熱温度において極大を示している。そして H_c の極大は Fe-Nb-Co-Mo 系合金⁽⁶⁾の約半分の値 3.2 kA·m⁻¹ であるが、この値は Fe-Nb-Co 系合金⁽³⁾の場合の約 2 倍である。

Fig.3 は Fig.2 と同じ Nb 約 2%, Co 20% および W 0, 3, 5, 7 あるいは 9% を含む Fe-Nb-Co-W 合金について、973 K で再加熱した場合の磁気特性と再加熱時間との関係を示す。 B_{16} , B_r , B_r/B_{16} は Fe-Nb-Co-Mo 系合金⁽⁶⁾の場合と同様に、一般に再加熱時間とともにはじめ急激に後ゆ

るやかに増大するが、再加熱時間が 0.12 ks 以上ではあまり大きな変化はみられない。 H_c は再加熱時間に対して一

Fig. 2 Magnetic properties of Fe-about 2%Nb-20%Co-W alloys containing 0, 3, 5, 7 or 9%W reheated at different temperatures for 1.8ks after water-quenching from 1323 K and subsequent cold-drawing by 97.2% reduction.

Fig. 3 Magnetic properties of Fe-about 2%Nb-20%Co-W alloys containing 0, 3, 5, 7 or 9%W reheated at 973 K for different times after water-quenching from 1323 K and subsequent cold-drawing by 97.2% reduction.

般に大きな極大を示すが、その極大値は Mo 添加⁽⁶⁾の場合と同様に W 量の増加とともに増大する。

つぎに H_c に対する再加熱の温度と時間の影響をみるために Fig. 3 の合金のうちから Fe-約 2%Nb-20%Co-5%W 合金を選び、873, 973, 1073 あるいは 1173 K で再加熱した場合の測定結果が Fig. 4 に示してある。図にみるように、まず 973 K の温度で再加熱した場合、 H_c は再加熱時間の経過とともに、はじめは主として加工歪の減少による影響で減少する。つづいて過飽和な α 相から非磁性相が析出するとともに H_c は増して極大に達し、その後は析出相の凝集化によって漸次減少するものと考えられる。再加熱温度 873 K の場合における H_c は温度が低いために組織の変化がおそく、18 ks 経過後もなお極大値に達し得ない。 B_r の変化も 0.12 ks 以後は H_c と同様の傾向がみられる。また再加熱温度が 1073 K および 1173 K の場合における H_c , B_r および B_r/B_{16} は、逆に温度が高いために組織の変化が早過ぎて曲線上に極大が現われないのであろう。つまりこの合金を $1.6 \sim 3.2 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ の H_c を必要とするリマネントリッドスイッチのリード片として用いるときには 973 K の再加熱温度が最適であることがわかる。

Fig. 5 には Fe-約 2%Nb-20%Co-5%W 合金について、1323 K から水焼入れした後 97.2% の冷間線引を施した場合 (a) と、これをさらに 973 K で 1.8 ks 再加熱した場合 (b) の最大磁界 $8 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ で測定した磁気履歴曲線が示してある。すなわち線引したままの状態では B_r は非常に小さいが、これを 1.8 ks 再加熱すると非常に大きくなり、角形性も著しく向上して、 $B_8=1.97 \text{ T}$, $B_r=1.85 \text{ T}$, $B_r/B_8=0.94$, $H_c=1.84 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ および $\sqrt{(BH)_{\max}/B_r H_c}=0.94$ の優れた特性となる。

Fig. 4 Magnetic properties of Fe-about 2%Nb-20%Co-5%W alloys reheated at 873, 973, 1073 or 1173 K for different times after water-quenching from 1323 K and subsequent cold-drawing by 97.2% reduction.

Fig.6 には 1323 K から溶体化後水焼入れし、ついで 97.2% 冷間加工した後、973 K で 1.8 ks 再加熱した Nb 約 2% および Co 20% を含む Fe-Nb-Co-W 合金について、W 量に対する 273~313 K における平均熱膨張係数 α 、比電気抵抗 ρ およびピッカース硬さ H_v の値が示してある。図にみるように、 α は W 3% において極小を示すが、W 5~9% の範囲では $10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 以下の一定値となる。そしてそれらの値はすべて $10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 以下である。 ρ および H_v (W=0% の場合を除く) は W 量とともに単調に増大する。

Fig.5 Hysteresis loops of Fe-about 2%Nb-20%Co-5%W alloy.

(a) As cold-drawn by 97.2% reduction after water-quenching from 1323 K.

(b) subsequently reheated at 973 K for 1.8 ks after the cold-drawing.

Fig.6 Thermal expansion coefficient, electrical resistivity and Vickers hardness for Fe-about 2%Nb-20%Co-0~9%W alloys reheated at 973 K for 1.8 ks after water-quenching from 1323 K and subsequent cold-drawing by 97.2% reduction.

2. Fe-Ta-Co-W 系合金

Fig.7 は 1323 K で 3.6 ks 溶体化処理後水焼入れし、ついで減面率 97.2% の冷間線引をした Ta 約 5% 以下、Co 20% および W 10% 以下を含む種々な Fe-Ta-Co-W 合金について、973 K で 1.8 ks 再加熱した場合の磁気特性を示す。図にみるように、 B_{16} および B_r は Ta を含まない合金の場合には W 量に対してかなり複雑な変化を示すが、Ta 量が増すとともにその変化はしだいに小さく単調となる。この現象は特に B_r において著しい。 B_r/B_{16} は W が 1~4% の組成においては Ta 量によってあまり変化しないが、W 量が 4% 以上では Ta 量によってかなり複雑に変化する。そして Ta 3% を含む合金では W 5% 以上の組成において 0.9 以上の値を示す。つぎに Ta 3% を含む合金の $\sqrt{(BH)_{\max}}/B_r H_c$ は W 量に対してかなり複雑に変化するが、それ以外の合金では W 量にはあまり関係がない。そして Ta 約 5% および W 7% を含む合金ではその値は 0.96 に達する。また H_c は一般に Fe-Nb-Co-W 系合金 (Fig.1 参照) の場合と同様に W 量が増すにしたがい増大し、Ta を含む合金の H_c の増加の度合は Ta を含まない合金の場合に比して小さい。しかし W 量が約 5~6% 以下の合金の H_c は Ta を含んだ場合が含まない場合に比しおむね値が高い。したがって Fe-Ta-Co-W 系合金は Ta

Fig.7 Magnetic properties of Fe-Ta-20%Co-W alloys containing about 0.3 or 5% Ta reheated at 973 K for 1.8 ks after water-quenching from 1323 K and subsequent cold-drawing by 97.2% reduction.

を含まない Fe-Co-W 系合金に比し、良好な角張性を有する半硬質磁性合金であることがわかる。

Fig. 8 は Fig. 7 の合金のうち Ta 約 3% および Co 20% を一定とし、W 0, 5 あるいは 9% を含む 3 種類の Fe-Ta-Co-W 合金について、種々の温度で 1.8 ks 再加熱した場合の磁気特性を示す。図にみるように磁気特性の変化はおおむね Fe-Nb-Co-W 系合金 (Fig. 2 参照) の場合と類似している。すなわち各合金の B_{16} , B_r , B_r/B_{16} および H_c は再加熱温度に対して 1 つの極大を示す。特に B_r/B_{16} の極大値はいずれの W 量の場合にもほぼ 0.9 以上で角形性が優れている。 H_c は 973 K の再加熱温度で極大を示し、その極大値は W 量が増すとともに急に増大する。 H_c の最大値は $2.8 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ で、Fe-Ta-Co-Mo 系合金⁽⁶⁾の約半分であるが、Fe-Ta-Co 系合金⁽³⁾に比べると大きく約 2 倍である。

Fig. 9 には Ta 約 3% および Co 20% と一定にし、W 0, 5 あるいは 9% からなる Fe-Ta-Co-W 合金について、973 K で再加熱した場合の磁気特性と再加熱時間との関係が示してある。 B_{16} , B_r , B_r/B_{16} および H_c の再加熱時間による変化はいずれも Fe-Nb-Co-W 系合金 (Fig. 3 参照) の場合とよく類似している。

Fig. 10 は Fig. 9 の合金のうち、 $1.6 \sim 3.2 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ の H_c を有する Fe-約 3%Ta-20%Co-5%W 合金について、873, 973 あるいは 1073 K で再加熱した場合の磁気特性と再加

熱時間との関係を示す。その関係は Fe-Nb-Co-W 系合金 (Fig. 4 参照) の場合と非常に類似しており、その最適な再加熱温度は 973 K である。

Fig. 11 には Fe-約 3%Ta-20%Co-5%W 合金について、1323 K から溶体化処理後水焼入れした後 97.2% 冷間線引を施した場合 (a) と、これをさらに 973 K で 1.8 ks 再加熱した場合 (b) の磁気履歴曲線が示してある。すなわち線引

Fig. 9 Magnetic properties of Fe-about 3%Ta-20%Co-W alloys containing 0.5 or 9%W reheated at 973 K for different times after water-quenching from 1323 K and subsequent cold-drawing by 97.2% reduction.

Fig. 8 Magnetic properties of Fe-about 3%Ta-20%Co-W alloys containing 0, 5 or 9%W reheated at different temperatures for 1.8 ks after water-quenching from 1323 K and subsequent cold-drawing by 97.2% reduction.

Fig. 10 Magnetic properties of Fe-3%Ta-20%Co-5%W alloy reheated at 873, 973 or 1073 K for different times after water-quenching from 1323 K and subsequent cold-drawing by 97.2% reduction.

したままの状態では B_r が非常に小さいが、これを 973 K で 1.8 ks 再加熱すると B_r が非常に大きくなり角形性も著しく向上し、 $B_8=2.02\text{T}$, $B_r=1.89\text{T}$, $B_r/B_8=0.94$, $H_c=2.03\text{ kA}\cdot\text{m}^{-1}$ および $\sqrt{(BH)_{\max}/B_r H_c}=0.94$ の優れた特性が得られる。

Fig.12 には水焼入れおよび冷間加工後 973 K で 1.8 ks 再加熱した W 9% 以下を含む Fe-約 3%Ta-20%Co-W 合金について、W 量に対する α , ρ および H_v の変化が示してある。図にみるように、 α は W 7% の組成に小さい極大がみられるが、すべて $10\times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ 以下である。 ρ およ

Fig.11 Hysteresis loops of Fe-about 3%Ta-20%Co-5%W alloy.

(a) As cold-drawn by 97.2% reduction after water-quenching from 1323 K.

(b) subsequently reheated at 973 K for 1.8 ks after the cold-drawing.

Fig.12 Thermal expansion coefficient, electrical resistivity and Vickers hardness for Fe-about 3%Ta-20%Co-0~9%W alloys reheated at 973 K for 1.8 ks after water-quenching from 1323 K and subsequent cold-drawing by 97.2% reduction.

び H_v は W 量に対して Fe-Nb-Co-W 系合金 (Fig.6 参照) の場合とほとんど同じ変化を示している。

つぎに磁気特性の良好な Fe-Nb-Co-W 系合金および Fe-Ta-Co-W 系合金について、顕微鏡による組織観察および X 線解析を行なった。

Photo.1 および **Photo.2** は磁気特性の良好な Fe-20%Co-約 2%Nb-5%W 合金について、それぞれ顕微鏡組織および X 線回折写真を示す。ここで Photo.1(a), (b) および (c) はそれぞれ線引状態、973 K で 1.8 ks および 1273 K で 1.8 ks 再加熱状態の試料の縦断面の組織である。Photo.1 および Photo.2 から得られた結果は Fe-Ta-Co-W 系合金の場合についてもほぼ類似しており、これら両系合金のい

Photo.1 Microstructures on the longitudinal section of Fe-about 2%Nb-20%Co-5%W alloy wire. ($\times 1500$) (a) cold-drawn by 97.2% reduction after water-quenching from 1323 K.

(b) reheated at 973 K for 1.8 ks after the same treating as (a).

(c) reheated at 1273 K for 1.8 ks after the same treating as (a).

Photo.2 X-ray diffraction pattern (Mo $K\alpha$ source) of Fe-about 2%Nb-20%Co-5%W alloy, which was water-quenched from 1323 K, cold-drawn by 97.2% reduction and subsequent reheated at 973 K for 1.8 ks.

近くなるために得られたものと考えられる。良好な角張性は繊維組織と析出物の分布状態に強く依存しており、析出物にピン止めされた支配的に多い 180° 磁壁が H_c 近傍の極く狭い磁界内において一瞬の内に解放され、一斉に磁化反転が行われるために得られたものと考えられる。なお、Fig.2 および Fig.8 における再加熱温度 1173~1273 K の範囲において B_{16} , B_r および B_r/B_{16} の急激な減少, H_c の増加は前報^{(1)~(4)(6)}の場合と同様に α - γ 変態に起因するものと考えられる。

最後に 1323 K から水焼入れし、ついで 97.2% の冷間線引を施した後、さらに 973 K で 1.8 ks 再加熱した Fe-Nb-Co-W 系および Fe-Ta-Co-W 系の代表的な合金について、室温で得られた特性を Remendur および Nibcolloy の特性と比較して示すと Table 1 のとおりである。Recalloy 番号 1~6 の B_8 と B_r および B_r/B_8 は Remendur および Nibcolloy のそれぞれの値と同程度の高い値を、また $\sqrt{(BH)_{\max}/B_r H_c}$ は Remendur の 0.85 に比し 0.9 以上の高い値を示す。これらの磁気特性は、いずれも高性

Table 1 Properties of Fe-Nb-Co-W alloys, Fe-Ta-Co-W alloys, Remendur and Nibcolloy after the treatments.

Sample	Composition (Rest Fe)					B_8	B_{100}	B_r		B_r/B_8 or B_r/B_{100}	H_c		$\sqrt{\frac{(BH)_{\max}}{B_r H_c}}$	α' 273~ 313 K	ρ Room temp.	H_v Load= 1.96 N	References	
	Nb	Ta	Co	Mo	W	(T)	(kG)	(T)	(kG)	(kA· m ⁻¹)	(Oe)	(10 ⁻⁶ K ⁻¹)		($\mu\Omega\cdot$ m)				
	(mass%)																	
Recalloy	1	~3	—	20	—	—	1.95	19.5	1.80	18.0	0.92	1.10	13.7	0.94	11.0	0.206	345	(3)
"	2	—	~3	25	—	—	2.10	21.0	1.94	19.4	0.92	1.29	16.2	0.91	11.5	0.169	381	(3)
"	3	~2	—	20	3	—	2.01	20.1	1.91	19.1	0.95	2.08	26.1	0.91	9.5	0.274	394	(6)
"	4	—	~3	20	3	—	2.05	20.5	1.95	19.5	0.95	2.13	26.8	0.93	10.1	0.234	429	(6)
"	5	~2	—	20	—	5	1.97	19.7	1.85	18.5	0.94	1.84	23.1	0.94	9.8	0.263	404	Presented
"	6	—	~3	20	—	5	2.02	20.2	1.89	18.9	0.94	2.03	25.5	0.94	9.3	0.234	446	Presented
Remendur	V 2~4	—	49	—	—	2.10	21.0	1.83	18.3	0.87	2.0	25	0.85 ^(a)	10.3 ^(b)	0.421 ^(a)	481 ^(a)	(13) , (14)	
						1.92	19.2	1.84	18.4	0.96	3.6	44						
Nibcolloy	Nb 3~5	—	rest	Fe 12~15	—	1.56	15.6	1.45	14.5	0.93	1.6	20	0.91 ^(a)	12.5 ^(c)	0.14 ~ 0.16	340 ~ 440	(15) , (16)	
						1.50	15.0	1.43	14.3	0.95	2.6	33						

(a) presented, (b) 303~823 K, (c) 303~653 K

ずれにおいても前報⁽⁶⁾の結果と大きな違いは見い出せなかった。すなわち Fig.2~Fig.4 および Fig.8~Fig.10 にみられるような、再加熱による H_c の増加の原因は、Fe-Nb 系, Fe-Ta 系および Fe-W 系の平衡状態図^{(8)~(11)}から推察して、過飽和な α 相マトリックスから非磁性金属間化合物と考えられる $Fe_2(Nb, W)$ あるいは $Fe_2(Ta, W)$ の球状微粒子が微細に発達した α 相マトリックス中に分散析出してその磁壁をピン止めし、その移動を困難にするためであると推定される[†]。またその良好な角形磁気履歴曲線は強度の冷間加工後の再加熱により、線引方向を $\langle 110 \rangle$ とする繊維組織が微細に発達し、容易磁化方向が線引方向に

能なリマネントリードスイッチのリード片の要求条件を十分に満たしており、特に角形性については Recalloy 3 および 4、また角張性については Recalloy 5 および 6 が優れている。Recalloy 1~6 の α は $11.5 \times 10^{-6} K^{-1} \sim 9.3 \times 10^{-6} K^{-1}$ の範囲にあるので、Remendur あるいは Nibcolloy などで通常用いられている封着用ガラスが使用できると考えられる。特に Recalloy 5 および 6 は α が Remendur のそれに近いので、リマネントリードスイッチの製造工程の一部を変更することによって、直ちに生産にのせることができるものと考えられる。 ρ は Remendur および Nibcolloy の中間の値で、 H_v は 400 以上の比較的高い値を示し、リード片のばね性を得るためには十分である。なお Recalloy の特長は Co 含有量が少いので、比較的安価であることである。

[†] 組織と H_c の関連性については、例えば文献 (12) にも述べられている。

IV. 総 括

Nb 約 3% 以下, Co 20% および W 10% 以下を含む Fe-Nb-Co-W 合金および Ta 約 5% 以下, Co 20% および W 10% 以下を含む Fe-Ta-Co-W 合金について, 真空中溶解および鍛造により丸棒とし, ついで α - γ 変態点以上の温度 1323 K で加熱し溶体化した後水焼入れした. そして減面率 97.2% の冷間線引を施して直径 0.5 mm の細線試料を造った. これを 673~1273 K で 18 ks 以下再加熱した後, 磁気特性, 熱膨張係数, 比電気抵抗およびビッカース硬さを測定してつぎの結果を得た.

(1) Fe-Nb-Co-W 系および Fe-Ta-Co-W 系合金の磁気特性は W 量, 再加熱の温度および時間に強く依存する. 特に H_c に対する W 添加の効果は著しい.

(2) Fe-Nb-Co-W 系および Fe-Ta-Co-W 系合金の α はそれぞれ W 3% で極小および W 7% で小さな極大を示し, 両系とも $10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ の比較的小さい値を示す. また ρ および H_v は W 量の増加とともにほぼ単調な増加を示す.

(3) 1323 K から水焼入れし, ついで 97.2% の冷間線引を施した後, 973 K で 1.8 ks 再加熱した場合, Fe-約 2%Nb-20%Co-5%W 合金においては, $B_8=1.97\text{T}$, $B_r=1.85\text{T}$, $B_r/B_8=0.94$, $H_c=1.84 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$, $\sqrt{(BH)_{\max}/B_r H_c}=0.94$, 273~313 K における $\alpha=9.8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\rho=0.263 \mu\Omega \cdot \text{m}$ および $H_v=404$ で, また Fe-約 3%Ta-20%Co-5%W 合金においては, $B_8=2.02\text{T}$, $B_r=1.89\text{T}$, $B_r/B_8=0.94$, $H_c=2.03 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$, $\sqrt{(BH)_{\max}/B_r H_c}=0.94$, $\alpha=9.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\rho=0.234 \mu\Omega \cdot \text{m}$ および $H_v=446$ であった.

(4) Fe-Nb-Co-W 系および Fe-Ta-Co-W 系合金 (Rec-alloy) は従来の実用合金である Remendur の高い B_r と Nibcolloy の良好な角形性および角張性を兼ね備えているので, リマネントリッドスイッチのリード片として好適で

あると考えられる. さらに Recalloy はその α の測定値から判断して Remendur や Nibcolloy など通常用いられている封着用ガラスが使用できるものと考えられる. また含有されている高価な Co 量が従来実用されている高 Co を含む材料に比較して $1/2 \sim 1/4$ と非常に少ないので, 実用上優れた材料であるといえる. なお, 本系合金の諸特性は Mo 添加の場合に比べて H_c が若干小さい以外は大きな差異はみられない.

文 献

- (1) 増本 量, 村上雄悦, 中村直司: 日本金属学会誌, **41** (1977), 1014; Trans. JIM, **19** (1978), 191.
- (2) 増本 量, 村上雄悦, 中村直司: 日本金属学会誌, **42** (1978), 280.
- (3) 増本 量, 中村直司, 村上雄悦: 日本金属学会誌, **42** (1978), 960.
- (4) 増本 量, 村上雄悦, 中村直司: 日本金属学会誌, **43** (1979), 506.
- (5) 川口寅之輔, 山元 洋: 金属, **44** (1974), 30.
- (6) 中村直司: 日本金属学会誌, **44** (1980), 461.
- (7) 熊坂一裕, 小野堅一: 日本金属学会誌, **44** (1980), 1267.
- (8) R. Genders and R. Harrison: J. Iron Steel Inst., **140** (1939), 29.
- (9) H. Eggers and W. Peter: Mitteilungen aus dem Kaiser-Wilhelm-Institut für Eisenforschung, **20** (1938), 199.
- (10) A. K. Sinha and W. Hume-Rothery: J. Iron Steel Inst., **205** (1967), 671.
- (11) A. K. Sinha and W. Hume-Rothery: J. Iron Steel Inst., **205** (1967), 1145.
- (12) J. W. Shilling and W. A. Soffa: Acta Met., **26** (1978), 413.
- (13) 飯田三郎, 味岡恒夫: 沖電気研究開発, **41** (1975), 73.
- (14) 日本国特許 特公昭 43-25818.
- (15) 岡田正法, 葛西 誠, 鈴木悠一, 佐々木達治, 辺見善三: 日本金属学会誌, **35** (1971), 942; Trans. JIM, **13** (1972), 391.
- (16) 辺見善三: 金属, **48** (1978), 4.