

MT 磁石の工業化に関する実験 (III)[†]

(磁気的特性および工業的応用について)

三島 徳七*・牧野 昇**

STUDIES ON INDUSTRIALIZATION OF MT PERMANENT MAGNET (III)

(On the Magnetic Properties and the Industrial Applications)

Tokushichi Mishima and Noboru Makino

Synopsis:

Fe-Al-C permanent magnet alloy, the products of which have been produced since 1947 under the commercial name of MT magnets, is the unique magnet alloy which possesses comparatively high coercive force of 200 Oersteds containing none of rare metals. In this report, there will be dealt with the results of experiments relative to industrial aspects which are believed necessary to be known by customers, with special emphasis on those basic magnetic properties and experimental data on demagnetization in additions to industrial applications.

The essential magnetic properties are listed in Table 1. The residual induction of MT magnet is nearly equal to one of MK or NKS magnet and the coercive force is nearly equal to one of high Co steel. The stability of magnetic induction over extended period of time is very important in case of electrical instruments or meters. The magnetic aging may be due either to structural change and thermal fluctuation or to external demagnetizing influences such as stray field, mechanical shock, heating or change of reluctance. Effects of various demagnetizing factors on the magnetic stability were investigated accordingly.

In all cases this magnetic change can be related to time and external actions in a logarithmic form. Magnetic aging will be stabilized by means of the previous demagnetizing of alternative field and heating. Thermal coefficient of this alloy for the watt-hour meter is $-4.0 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ and is considerably larger than one of chrome steel.

The application of this magnet to industrial field is now being expanded. Among its applications, some are now developed to commercial production with great success. The representative examples of industrial uses are mentioned. By the performance tests of MT and Cr steel for watt-hour meters, it was proved that MT is more stable against demagnetization and maintains higher magnetic flux even with its less weight.

I. 緒 言

MT磁石はNi, Coなどの稀少元素を含まない高抗磁力鋳造磁石として注目され、中級磁石の代表的なものとして、積算電力計、小型モーター、発電機、コンパスをはじめとして、多くの用途が開拓されており、昭和26年度の通産省の工業化助成金をうけて工業化され、現在大量に生産が行われている。

この磁石の特徴をのべると、つぎの通りである。

(1) あらゆる磁石の中で有効磁気エネルギー当りのコストが最も低廉である。(2) この合金はFe-C-Al 3元素合金であるので、組成金属に対する原料的な懸念は全くない。(3) Alを含んでいるために軽量で、耐蝕、耐熱性がすぐれている。(4) 製造上の点からみて、鋳造に適し溶接性もすぐれ、孔明などの機械加工も可能である。

本報告においては、まずこの合金の代表的な磁性を説明し、つぎに磁性の安定性すなわち減磁作用によるエージングをのべ、最後に工業的応用と使用成績について検討する。

II. 実験方法

磁性および減磁率の測定に使用した試料は、C 2.0%, Al 8.0%, Fe 残部の標準成分を有し、熱処理は1200~1250°Cより油焼入し、300°Cに焼戻している。試料の溶製は高周波電気炉を使用し、試片の寸法は10×10×65 mmである。磁石の減磁率の測定は、安定化した標準

† 昭和27年秋期講演大会にて発表

* 東京大学名誉教授 工博

** 株式会社東京計器製造所、磁鋼製造部、工博

磁石と被測定磁石とをブリッジとし、弾動電流計の電流を零に調節した場合の抵抗比から求めた。減磁率の測定は、とくに断りなき場合、着磁後ただちに減磁試験を行った。

II. 磁 気 的 性 質

減磁曲線 代表的なMT磁石の減磁曲線を Fig. 1 に示す。また磁気的性質の測定値をまとめると、Table 1 に示す通りである。MT磁石の残留磁束密度は、6,000 ガウス前後であつて、MK または NKS に匹敵し、KS 鋼または Cr 鋼と比較すると 30~40% 低い。保磁力は 200 エルステッド前後であつて、Cr 鋼の 3 倍強、KS 鋼にはほぼ匹敵し、MK または NKS にくらべると、2 分の 1 または 3 分の 1 であり、有効磁気エネルギーは中 Co 鋼に匹敵している。

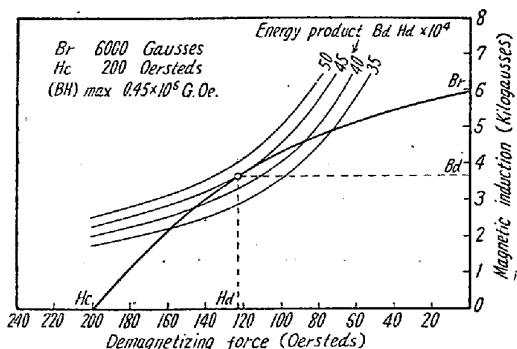


Fig. 1. Demagnetizing curve of MT magnets.

寸法比との関係 磁石の寸法比(磁石の長さとの直径の比)と見掛けの残留磁束密度(remanence)との関係は、磁石の設計および検査にしばしば必要となる。MT磁石におけるこの関係を Fig. 2 に示す。なおエネルギー積およびパーミアンス係数を併記する。エネルギー積は、減磁曲線上の一点(D)における磁束密度(Bd)と減磁場(Hd)との積であり、この最大値(BdHd)maxを8πで割つた値が、最も有効に外部に利用できる単位体積当りの磁気エネルギーを示す。またパーミアンス係

数はD点と座標の原点Oとを結んだOD線とH軸とのなす角の正切を示し、空隙線ということもあり、磁石の外部の全パーミアンスと磁石によつてしめられる空間のパーミアンスとの比になる。

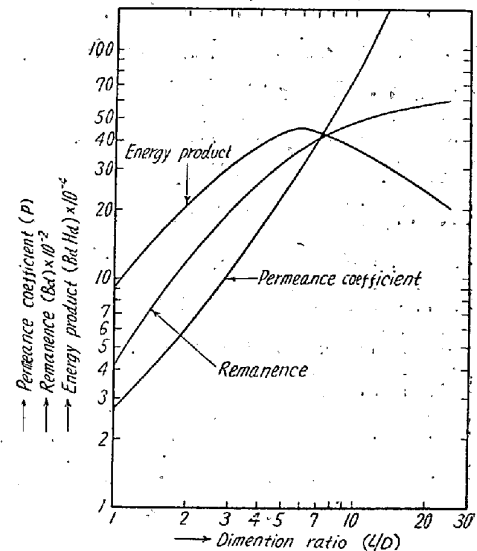


Fig. 2. Relations between dimension ratio and magnetic properties or permeance coefficient.

この図より寸法比が 10 以上になると、ほとんど飽和に近くなること、(BH)max の点は寸法比で 5.8、パーミアンス係数で 29 に対応し、その際の磁束密度は 3650 ガウスであることがわかる。

可逆導磁率 磁石の使用状態における安定性を示す一つの目安となる可逆導磁率を求めると、8~10 となる。他の磁石の例をみると、KS 鋼 11~13, MK 3~4 である。

IV. 減 磁 特 性

永久磁石の磁束は、使用中に時間の経過とともに次第に磁束を減少しエージングすなわち経時変化を起す。そのため計器の指度が狂つたり、機械の出力が低下したりして、実用上しばしば問題を起し、永久磁石を使用する

Table 1. The magnetic properties of MT magnets.

Magnetic properties	Measured value
Saturation induction Bs (Gauss)	9,000
Residual flux density Br (Gauss)	6,000
Coercive force Hc (Oersteds)	200
Flux density, corresponding to the (BH)max point Bd (Gauss)	3650
Magnetizing force, ditto Hd (Oersteds)	123
Energy product (BH)max (G.Oe)	0.45 x 10 ⁶
Fullness factor (BH)max / BrHc (%)	37
Reversible permeability μr	8~10
Specific gravity (g/cm ³)	6.9

場合、とくに考慮を払う必要がある。

永久磁石のエイジングの原因としては、(1) 原子の位置移動による減磁、(2) 外部からうける減磁作用、(3) 熱擾乱による自己減磁の3つの項目に大別される。

永久磁石の内部において析出、変態、酸化などの現象のように原子の移動が起こると、磁化ベクトルが乱され、エイジングを起す。この変化の特徴は、温度依存性が大きいので、使用温度よりやや高温で加熱すれば安定化する。高温で時効処理を行い、組織の安定している磁石では、この影響による減磁はほとんど認められない。つぎに永久磁石の使用中にしばしば外部から機械的振動、擾乱磁場、強磁性体の接着などのような外部減磁因子の作用をうける。この影響は磁石のエイジングの中の最も大きな原因であり、設計に充分注意しなければならない点である。この変化の特徴は、前の場合と異なり再着磁すればほぼ完全に最初の磁束に回復する。また減磁率は作用回数の対数にほぼ比例する。最後に外部からの減磁の影響を遮断した上、組織を安定化した状態においても、磁性のエイジングが進行する。これは内部の各磁区が反磁場の作用をうけ、熱擾乱により磁化ベクトルの方向の変化が促進されるためと考えられる。この変化は温度依存性が少なく、減磁率は温度とほぼ比例関係にあるが、加熱時間に対してはその対数とほぼ比例関係にある。つぎに主要な減磁因子の作用をうけた場合のMT磁石の減磁特性に関する実験結果をのべる。

1. 交流磁場による減磁 永久磁石の磁化方向に対し逆磁場がかかると、磁束は減少する。この現象は減磁曲線の上から考察することが可能である。減磁曲線の勾配のたち上つている線上の作用点に対しては、おなじ磁場の作用をうけても減磁が大きくなる。交流減磁の強さと減磁率の関係は、Fig. 3 に示す通りである。交流減磁率は保磁力の高い磁石ほど少ないことが予想されるが、しかしその減磁の割合は、保磁力と一次的な関係にはない。

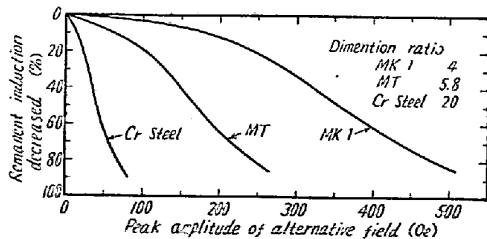


Fig. 3. Decrease of remanent induction when subjected to alternative field.

2. 機械的衝撃による減磁 永久磁石に機械的衝撃ま

たは振動を与えると、減磁が促進されるが、その作用は他の減磁因子に比較するとわずかである。衝撃によつて磁化ベクトルが一部分方向を変えると同時に、組織変化を促進することも考えられる。この減磁は合金の磁歪に密接な関係をもっているといわれる。MT磁石の試験片を1mの高さから真鍮のガイドを通して、煉瓦の床の上に縦方向に落下せしめて、残留している磁束密度と落下回数との関係をしらべた。その実験結果を Fig. 4 に示す。着磁直後の試験では500回にて約1.3%の減磁であるが、着磁後安定減磁したものは、かなり減磁が少なくなる。

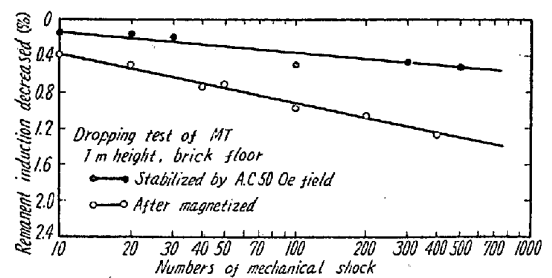


Fig. 4. Effect of repeated impact on the remanent induction.

3. 鉄と接着の影響 永久磁石に鉄を接着すると、磁極の位置が移動したり、回路のレラクタンスが変化するため、磁束密度の低下が起る。Fig. 5 に実験結果の1例を示す。接着した鉄片は、 $9 \times 20 \times 30$ mm および $9 \times 30 \times 80$ mm である。減磁は作用回数の対数とほぼ直線関係にあることがわかる。磁石に接着する鉄の位置によつて減磁する割合はいちじるしく異なり、図 (a) に示すように磁石の磁極の突端に附着する場合は、減磁は割合に小さいが、図 (b) に示すようにNS極を側面で短絡するように接着した場合は、減磁は大きくなっている。この接着による減磁は、おなじような実験条件で行つても、鉄片を引き離す方法によつても異なり、ずらせると平行に引離すと、磁極が移動して、減磁率はいちじるしく増加する。

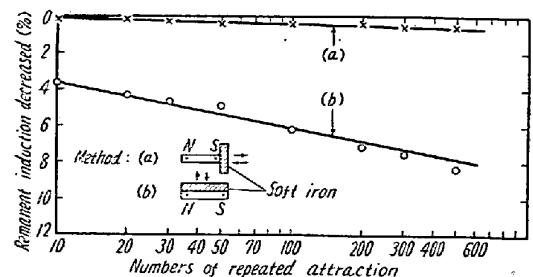


Fig. 5. Effect of attraction and abstraction by ferromagnetic material.

4. 加熱による減磁 永久磁石を加熱すると、減磁がおこる。これは上にのべたように熱擾乱によるものであるが、ある温度範囲を超すと原子移動をとともなう組織変化が加わってくる。MT磁石の減磁率と加熱温度の関係は、Fig. 6 に示す通りである。加熱時間はおのこの1時間である。250°Cまでは、減磁率と加熱温度の間に直線関係があるが、この温度を超すと組織変化がおこり減磁は相乗されて、直線関係より偏つてくる。

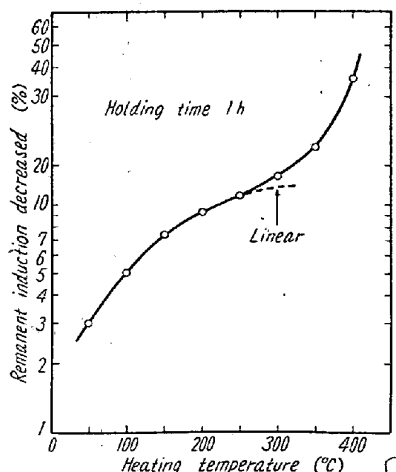


Fig. 6. Effect of heating temperature on the remanent induction.

5. 常温における磁束の経時変化 常温における永久磁石の経時変化は、熱減磁とおなじように原子の熱擾乱のためにおこる。しかし常温における自然減磁はわずかなものであつて、通常磁束の低下がいちじるしくなるのは外部からの減磁因子すなわち擾乱磁場、衝撃、鉄の接着、温度上昇などの影響をうけるためである。常温の経時変化について発表しているデータが、それぞれ測定者によつていちじるしく相異しているのはこの理由による。

MT磁石の実験室内に放置して測定した常温エージングの結果は、Fig. 7 に示す通りである。磁束密度の減少率は、ほぼ放置時間の対数と直線関係になつている。他の減磁因子の影響をしらべる場合、測定時間が長くかかると、この常温エージングが重なつてくるので、注意しなければならない。

永久磁石はこのように種々の減磁作用をうけて、経時変化を生ずる。磁石の磁束密度を安定に保つためには、

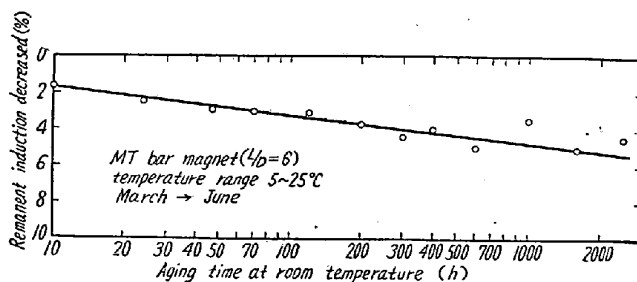


Fig. 7. Natural aging at room temperature.

あらかじめ安定減磁を行つておけばよい。多くの場合交流減磁を行つて後、組織を安定化するため適当な温度で熱減磁する方法がとられている。1例をあげると積算電力計用MT磁石に対しては、4~7%の交流減磁の後100°Cに数時間加熱しておけば、磁束は安定となり、経時変化はほとんど認められない。交流減磁を加えすぎるとかえつて放置中に磁束が増磁することがあるから注意しなければならない。

6. 温度係数 永久磁石を常温からある一定温度まで繰り返し加熱するか、またはその温度に長時間加熱すると、温度に対する磁束の変化は可逆的となる。組織変化の進行しない温度では、数回の繰り返しで可逆的になり、常温における磁束密度は、その後何回加熱をくり返しても同一の値に戻る。この場合ある温度 $t^{\circ}\text{C}$ における磁束密度 B_t は次式で表わされる。

$$B_t = B_0(1 + \alpha t)$$

ただし B_0 : $t=0^{\circ}\text{C}$ における磁束密度, α : 温度係数

MT磁石の温度係数の測定結果は、Table 2 に示す通りである。MT磁石の温度係数は、等方性MK磁石にほぼ匹敵し、Cr鋼に比し約50%大きい。

V. 工業的応用

MT磁石は新しい合金であるが、工業的にいろいろ有利な性質をもつているので、その用途は漸次拡大している。現在工業的に多量生産されているもの、または試作品の成績がすぐれ実用化に成功したものとしては、積算電力計用磁石、磁石発電機またはマグネト用磁石、スピーカー用磁石、磁気コンパス、ピックアップ、小型モーター用磁石、電流・電圧計用磁石、マグネチックストッパーなどがあげられる。代表的な製品の写真を Fig. 8

Table 2. Temperature coefficient (α) of MT magnets.

	Specimens	Temperature range ($^{\circ}\text{C}$)	α ($1/^{\circ}\text{C}$)
1	Magnet bars (L/D=6)	0~100	-6.8×10^{-4}
2	Magnets for watt-hour meters(stabilized)	0~30	-4.1×10^{-4}

に示す。これらの中の二、三の応用例について、磁石の特性、使用成績、設計などをのべる。

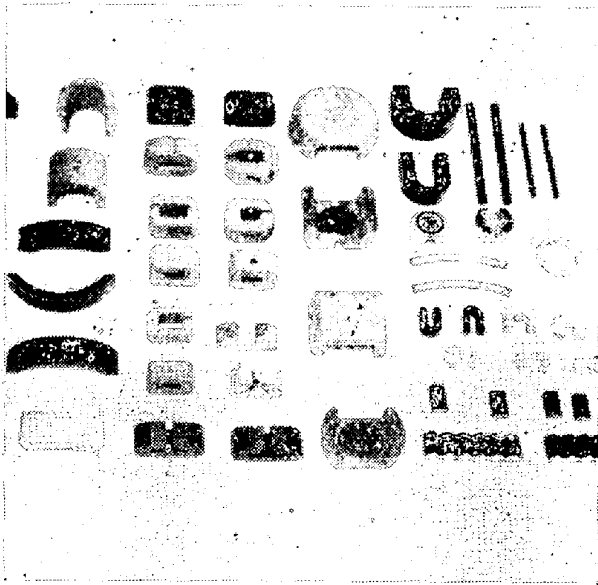


Fig. 8. Various magnets for industrial uses.

1. MT磁石を使用する際の注意 この磁石は他の鑄造磁石と異なり、焼鈍状態ではロックウェルC硬度25~30となり、孔明加工その他の機械加工が可能である。しかし熱処理後の硬化状態ではロックウェルC硬度60~65となりグラインダー加工以外にて加工することは難かしいので、仕上加工面はなるべくなくすることがのぞましい。この合金は炭素を多く含んでいるので、他の鑄造磁石と比較すると、鑄造性は良好であるが、肉厚の余り薄いものは避けなければならない。巾30mm以上の製品では、肉厚3mm以下は難かしい。

この磁石を組立てる場合、ボルト止め、溶接、接着、鑄込み、非磁性材料による締め付けなどが考えられる。磁石に孔明を行いボルト止めする方法は、積算電力計用磁石などにしばしば使用されている。溶接は小型磁石を継鉄に取り付ける場合に使用したが、温度上昇による磁性低下の危険がある。最近合成樹脂接着剤の進歩によりこれを利用する方法が好成績をえており、機械的強度もすぐれている。この方法に併用し、非磁性材料で締め付け

て補強する方法は適当である。磁石の一部に金具を鑄込み、その部分を機械加工して取付ける方法は、焼割れの原因となつて好ましくない。磁石と継鉄またはシャフトを外部からAlまたはPb合金などで鑄包んで組立てる方法も、しばしば実用されている。

2. 積算電力計用磁石 積算電力計の制動作用に用いられる磁石は、MT磁石の出現まではCr鋼が多く用いられていた。Cr鋼は磁氣的性能が低い許りでなく、減磁し易いという欠点をもっている。この制動磁石にMT磁石を用いると、減磁が少なく、メーターの経時変化の誤差がない上に、磁石も小さくなり価格も低廉となる。

Cr鋼とMT磁石の寸法および性能を比較すると、Table 3の通りであつて、MT磁石は寸法が小型であるにかかわらず、磁束が高いため、制動能力がはるかにすぐれ減磁に対しても安定である。最も一般的な形式の積算電力計に使用されているMT磁石の形状の1例を示すとFig. 9の通りである。

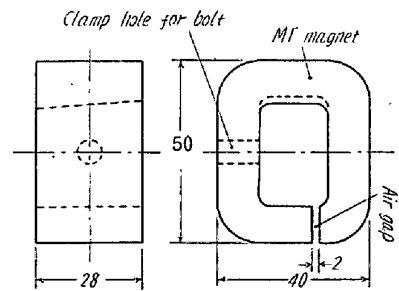


Fig. 9. MT magnets used in a representative watt-hour meter.

積算電力計の数年にわたる経時変化の傾向を試験するために、強制減磁による減磁率より推定する方法が取られている。わが国における電気試験所の減磁特性試験およびその規準値とMT磁石に対して測定された減磁率とを示すと、Table 4の通りである。MT磁石はきわめて優秀な減磁特性を有していることが認められる。

3. マグネーター用磁石 エンジンの着火に使用されるマグネーターの磁気回路には、現在Fe-Ni-Al系磁石が

Table 3. Comparison of Cr steel and MT steel for watt-hour meters.

	Dimension of magnets		Weight (g)	Magnetic properties after stabilization		Demagnetization percentage by alternative field of 100 Oe.
	Area (cm ²)	Length (cm)		Total flux in air gap (maxwells)	Braking factor (relative value)	
Cr Steel	1.8	17.5	230	10,500	14	28
MT magnet	3.2	12.9	265	14,000	29	8

Table 4. Comparison of demagnetizing properties tested by standard method of electric laboratory.

Order of demagnetizing test		Test by mechanical impacts	Test by heating	Test in an alternative field
Method of testing		Dropping 30 times on wooden floor from the height of 2 m	Heating for 4 hours at 100°C	Subjecting to alternative field of 50 Oe.
Standard of Electric Laboratory		0.15%	0.75%	2.5
MT	A	0.06%	0.40%	0.14
	B	0.06%	0.24%	0.01

Table 5. Performance test of MT magnets used in fly wheel magnets.

Material	Dimension of magnets		Air-gap length for sparking (mm)		
	Area (cm ²)	Length (cm)	200 rpm	500 rpm	1000 rpm
MT magnets	2.52	11.8	3.8	5.2	6.4
Fe-Ni-Al alloy	2.52	9.5	4.0	6.0	7.0

広く用いられている。この磁石を MT 磁石におき換える可能性について種々実験を行い、その実用化に成功した。MT 磁石は MK または NKS 磁石にくらべて、その面積はおなじでよいが、長さを 2 ないし 2.5 倍に取る必要があるため、外磁型のフライホイールマグネトー形式のもののがのぞましく、これではおなじ設計で十分な長さを取りうるため、そのまま代用することが可能である。マグネトーに MT 磁石を使用した場合の実例を Table 5 に示す。

このマグネトーの必要とする性能は、500rpm にて火花間隙 2mm 以上というのであるから、MT 磁石は十分な安全度をもって使用可能であることが判り、大量に使用されて、原価の低減に貢献した。

4. スピーカー用磁石 スピーカーの磁石回路には巻線型に代つてパーマネント磁石型が多く使用されるようになった。これに使用される磁石は、性能のすぐれた高 Co 永久磁石である。ラジオのような家庭電気器具にはなるべく稀少元素を用いないことがのぞましく、MT 磁石の試作を検討した。

MT 磁石を用いて従来の磁石に匹敵する磁性をもたせるには、適当な設計を必要とする。その 1 例を示すと Fig. 10 のごとくで、従来の磁気回路の継鉄部分を磁石におき換えることにより、磁石の長さを充分に取れるよ

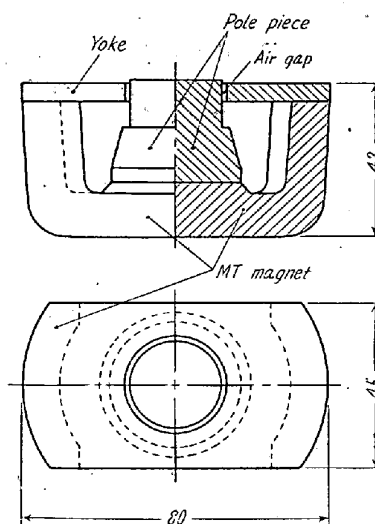


Fig. 10. Magnetic circuit of speaker.

Table 6. Comparison of MT and MK magnets used in magnetic circuit for radio.

Dimension of magnetic circuit			MT magnets		Anisotropic MK magnets	
Thickness of plate (mm)	Diameter of pole piece (mm)	Length of air gap (mm)	Weight of circuit (g)	Flux density in air gap (Gausses)	Weight of circuit (g)	Flux density in air gap (Gausses)
4.5	14	0.9	610	6,600	300	6,200
5.0	25.4	1.1	930	5,500	430	5,400

うにした。MT磁石と異方性MK磁石とのスピーカー用磁気回路を比較すると、Table 6 に示す通りである。MT磁石の磁気回路は、重量は重くなるが、性能的にはほとんど遜色は認められない。

V. 総 括

MT磁石の磁氣的性質および減磁特性についての実験結果をのべ、工業的応用について実例をあげて説明した。この磁石の磁留磁束密度は 6,000 ガウス、保磁力は 200 エルステッド、 $(BH)_{max}$ は 0.45×10^6 ガウス・エルステッドであり、MKまたはNKS磁石とCr鋼磁石の中間的な磁性を有し、中Co鋼に匹敵する。

2. MT磁石の減磁特性はすぐれており、1例をあげると、 $(BH)_{max}$ 作動点のパーミアンス係数をもつ試験片の磁化直後の測定の場合、交流減磁は 50 エルステッ

ドで 8%、落下衝撃による減磁は 500 回で 1.3%、熱減磁は 200°C で 9% である。使用前に安定減磁を行えば、経時変化はほとんどなくなる。計器用のMT磁石では 4~7% の交流減磁後 100°C 数時間の熱減磁を行えば安定化する。

3. この磁石は積算電力計、マグネッソー、モーター、スピーカーをはじめ多くの用途に実用化され、すぐれた成績をえており、価格の低減、稀少元素の節約などにも大きな役割を果たしている。

終りに本論文の第1報より第3報にいたる基礎的実験に対しては木村康夫、三島通雄、田代昭の諸氏の御協力をえており、またこの合金の応用に関する実験については当社橋井社長、宮田部長、遠藤課長をはじめ磁鋼製造部の諸氏に御指導、御援助を受けた。ここに厚く感謝の意を表する次第であります。(昭和 31 年 12 月寄稿)

耐酸高珪素鉄に関する研究 (II)*

(機械的性質、耐蝕性および凝固収縮率におよぼす添加元素の影響—その 2)

沢村 宏**・田島 治***・赤松経一†・村中啓人†

INVESTIGATION ON ACID-RESISTANT HIGH-SILICON IRON (II)

(Effects of Alloying Elements on Mechanical Properties, Corrosion Resistance and Shrinkage-Part 2.)

Hiroshi Sawamura Dr. Eng., Osamu Tajima,
Kyoichi Akumatsu and Hirohito Muranaka

Synopsis:

Already described in the previous report with the same title, Part. 1.

(Refer to p. 652, June 1957 issue of Tetsu-to-Hagané)

6月号p. 657 よりつづく

(H) Mn の影響

抗折力におよぼす Mn の影響は Fig. 4 に示すごとく Mn 約 0.5% までは普通高珪素鉄と変らぬが、さらに Mn 量増加すると Mn 量とともに抗折力は低下する。撻み量は Mn 0.8~2% の範囲では 0.45~0.49 mm で普通高珪素鉄よりわずかと大であるが、Mn 3~6% では 0.42~0.36 mm となり撻み量を減ずる。

H_{RC} は Mn の添加により普通高珪素鉄より高くなり、Mn 0.8~5.6% の範囲で $H_{RC}=50\sim52$ とほぼ一定値を示し、 α 地の H_{MV} は Mn 約 2% までは $H_{MV}=580\sim620$ で普通高珪素鉄と大差ないが、Mn 3% 以上では $H_{MV}=670\sim700$ を示し普通高珪素鉄より

高くなる。

1:10 H_2SO_4 に対する耐蝕性は Fig. 5 に示す通り Mn 5% までの添加により改善せられ Mn 1~2% の添加が最も良好である。1:1 HCl に対する耐蝕性は Fig. 6 に示す通り Mn の添加の影響は認められない。

凝固収縮率は Mn 2% までは普通高珪素鉄と変らぬが、さらに Mn 量増加すると減少し Mn 5.6% で -4 である。

Mn を添加せる高珪素鉄の顕微鏡組織は α 地および

* 昭和30年4月及び昭和31年4月本会講演大会にて発表

** 京大教授、工博 *** 共同機械製作所

† 京大工学部冶金学教室