MT 磁石の製造における最適成分について*

宮 田 進** 牧 野 昇**

Susumu Miyata and Noboru Makino: The Most Appropriate Composition of MT Permanent Magnet for Industrialization. The Fe-Al-C permanent-magnet alloy—the MT Magnet steel—is well adapted to a country like Japan limited in natural resources. As this alloy owns coercive force of more than 200 Oe; it can be applied to such equipments as watt-hour meter, hysteresis or small DC motors in place of Co or Cr magnet steel. The results of fundamental researches on MT magnet were already reported in the author's previous papers. Accordingly, this report covers a part of later experiments conducted in the course of industrialization. In melting procedure, it is necessary to take care of segregation and oxidation of the alloying Al. In view of yielding rate of magnetic properties and heat treatment, it was discovered that the most appropriate composition of MT magnet was within the region of $8.15 \pm 0.25\%$ Al and $1.99 \pm 0.03\%$ C. Addition of Si is harmful for magnetic properties and Si must be kept below 0.20% . Casting has been made in green sand. The design of the pattern, the “as-cast” tolerance and the defects in casting were reexamined in the light of daily practices.

(Received July 3, 1959)

I. 緒 言

永久磁石は各種の電気計器, エレクトロニックス, 発電機などの主要部品として, その応用範囲が極めて広くなっている。その磁気的性能も僅か 20 年余の間に約 40 倍以上も進歩した。しかしこのような高性能磁石は Ni, Co を多量に含んだ MK 磁石の系列のことが多い。国内資源の見地

からこれら稀少元素を含まないで高抗磁力をもつ優れた磁石の出現は, 工業界の常に待望しているところである。この要望をみたす磁石の一つとして考えられるのが MT 磁石である。

MT 磁石はすでに報告されているように⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾ Al 約 8%, C 約 2% を含む鉄合金である。その磁性は $(BH)_{\max}$

(1) 三島, 牧野: 鉄と鋼, 43(1957), 556.

(2) 三島, 牧野: 鉄と鋼, 43(1957), 647.

(3) 三島, 牧野: 鉄と鋼, 43(1957), 726.

** 株式会社東京計器製造所

* 1958 年 10 月本会名古屋大会に発表

0.45×10⁶ ガウス・エルステッドであつて、中 Co 鋼に匹敵するものであり、抗磁力は 200 エルステッドであつて高 Co 鋼に近い。残留磁束密度は約 6,000 ガウスである。この磁石は工業的にみて、種々の特徴をもっているの、とくにわが国のような資源の状態の下においてはその工業化が望まれていた。昭和 25 年頃よりこの合金の工業化が計画され、通産省の工業化助成金をうけて、新しい磁石工場が建設された。

この磁石の工業化の初期においてはいろいろの困難と障害に遭遇したが、まもなく電気計器その他に採用されて好評をえてより、JIS 永久磁石第 2 種甲一号磁石として次第にその応用範囲も拡がり、現在順調に生産量も伸び、積算電力計器その他多くの製品が量産化されている。

本報告では MT 磁石の工場生産の製造工程中における種々の問題点について実験した結果をとりまとめて述べる。第 1 報は熔解条件、最適合金組成および不純物の影響、鋳物の均一性などについて報告する。

II. 製造方式

MT 磁石の製造工程は製品の種類によつて若干こととなるが、その順序は大略次の通りである。

熔解→鋳造→焼鈍→粗加工→機械加工→
焼入→二次加工→焼戻→仕上加工→表面
処理→製品

熔解原料は電解鉄または低炭素鋼屑、白鉄、純 Al を使用し、熔解炉は 300KVA 高周波電気炉である。1 回の熔解量は約 400 kg、熔解時間は 50～70 分で、出湯温度は 1,550～1,600° である。鋳型は生砂型とシェル型とを併用している。鋳物はショットブラストで砂をおとして検査を行つた後 800° で焼鈍される。焼鈍された鋳物は、湯口やばりを取り除いた後孔明などの機械加工を施し、続いて焼入および焼戻の熱処理を行う。焼入には 40 KVA のシリコン坩堝炉、焼戻には 55 KVA の流気式ニクロム加熱炉を使用した。熱処理後の硬度は RC 50～60 であるので、仕上げは研削加工による。

III. 製品歩留りに対する熔解条件の影響

まず永久磁石の熔解作業において製品の歩留りに関係する事項、すなわち熔解による湯の減耗、成分不良の原因となる熔湯中の偏析、熔落ち後の熔湯成分の変化、不純物の影響について検討した。

1. 熔解による減耗

MT 磁石の熔解に際して酸化による減耗、炉壁や取鍋への附着、湯こぼれなどで熔湯が減耗する。積算電力計用磁石の製造における熔解減耗を調べた結果は、Table 1 に示す通りであつて、4.0～4.5% の減耗がみこまれる。湯道と鋳物との重量比は 70～75% である。

2. 熔湯中の成分の不均一

高周波炉で熔解する場合、交番磁界による熔湯の渦流によつて攪拌作用が行われるので、熔湯中の成分の偏析は殆

んどないことが知られている。この熔湯の均一化が熔落ち後の時間の経過とともにどのように進むかを検討した。

Table 1 Weight loss in the melting of MT magnet by induction furnace.

	Weight (kg)	
	No. of heat	
	1	2
Castings of watt-hour meter	202.0	206.0
miscellaneous castings	17.0	—
gate, runner and others	165.0	176.0
Total	384.0	382.0
Weight of raw materials	400.0	400.0
Weight loss ratio in the melting practices	4.0%	4.5%

熔解炉より数回にわけて出鋼するが、その各々のタップの成分の分析を行つた結果は Table 2 に示す通りである。C は処女材または返り材に関係なく、熔湯中の偏析は殆んどみとめられない。これに反して Al は偏析の危険性が大きく、特に処女材熔解において、攪拌が不充分であるかまたは熔け落ち後の放置時間が短かいと、Al が上部に多く偏析して著しく不均一になる。したがつて Al 投入後は何

Table 2 Segregation in the molten bath of MT magnet alloy.

		C (%)			Al (%)		
		No.77	No.89	No.99	No.85	No.89	No.99
Raw materials		Virgin metal	Return scrap	Return scrap	Virgin metal	Virgin metal	Return scrap
Lapse of time after melt down		4 min	12 min	15 min	7 min	12 min	15 min
No.	1	1.93	1.99	1.95	0.09	8.36	7.62
of	2	1.92	1.99	1.95	13.80	7.98	7.55
	3	1.90	1.99	1.95	7.11	8.15	7.48
tap	4	1.89	1.99	1.96	—	7.72	7.50
	5	1.90	2.01	—	—	6.93	—

等かの方法で攪拌を促進してやることが望ましい。

3. 熔け落ち後の熔湯の成分の変化

装入した原料が熔け落ちた後で、熔湯中の成分が合金成分の酸化や炉壁の還元によつて変化する傾向を調べた。

(1) 黒鉛坩堝の場合

この場合の黒鉛坩堝は 40 番坩堝で熔解量は 30 kg である。熔落後の経過時間と成分の変動は、Table 3 に示す通りである。これより黒鉛坩堝を使用する場合、熔湯は時間の経過に伴つて C % は増加し、Al % は著しく低下する。また不純物として Si がシリカの還元によつて熔湯中に増加してくる傾向がある。熔解時間の経過にともなう成分の変動の著しいのは、熔解量の少ないことも一つの原因と考えられる。

(2) 酸性ライニングの場合

400 kg 熔解炉で酸性ライニングによつて熔解した場合、熔け落ち後の成分の変化を調べた。返り材および処女材熔解の代表的なヒートについての測定結果を Table 4 に示す。

この結果より約 15 分の経過によつても、C 量の低下は

僅かであつて、1~2%の低下率に過ぎないが、Alはやや大きく2~3%である。なお処女材においてAl投入後のAl分析値が異常に高いのは、上部にAlが偏析していたためと考えられる。

Table 3 Change of chemical composition in the molten bath of MT magnet alloy melted by induction furnace of graphite lining.

No. of heat		Chemical composition (wt %)			
		C	Al	Si	Mn
	Chemical composition aimed	2.2	7.8	—	1.0
NAC-1	3 minutes after melt down	2.26	8.19	0.21	0.91
	21 " "	2.39	7.41	0.36	1.18
	39 " "	2.21	6.92	0.36	1.08
	Chemical composition aimed	2.2	7.8	—	—
NAC-2	3 minutes after melt down	2.03	8.48	0.13	—
	13 " "	2.29	7.95	0.18	—
	24 " "	2.51	7.01	0.29	—

Table 4 Change of chemical composition in the molten bath of MT magnet alloy melted by induction acid furnace.

Raw materials		Return scrap			Virgine scrap			
State of molten bath		Temp.of molten bath (°C)	C (%)	Al (%)	State of molten bath		C (%)	Al (%)
Immediately after melt down			2.01	7.76	Immediately after melt down		2.24	0
3 minutes after melt down (Al add.)		1420	2.00	8.18	Al add.		2.08	11.48
6 minutes after melt down		1470	1.99	8.13	4 minutes after melt down		2.06	8.27
9	“ “	1500	1.98	8.07	9	“ “	2.05	8.18
12	“ “	1530	1.98	8.02	13	“ “	2.03	8.13
15	“ “	1560	1.98	7.97	in ladle		2.00	8.10

IVII. 製品歩留りに対する成分の影響

MT 磁石の最適成分範囲について、実験室的に Al および C の含有量と磁性との関係を求めた結果はすでに報告されている⁽¹⁾。工業的な生産の場合、原料、熔解炉、熱処理装置がことなり、また経済的な諸条件の考慮が必要となるため、各工程における歩留り、作業の難易などの点からみて工業的生産における最適成分を確めておく必要がある。そのため工業的製品の磁性におよぼす主成分の含有量の影響を検討すると共に、磁性以外の歩留りすなわち焼割れ、鋳造性なども検討して製品の総歩留りに対する最適成分範囲を決定した。

1. 磁性におよぼす Al および C の影響

実際のヒートから取ったテストピースの中で、Al および C の含有量のことなる数十ヒートについて、磁気的性質と主成分の関係を調べた。保磁力と残留磁束密度の積 ($BrHc$) と成分の関係を求めると、Fig. 1 に示す通りである。等高線の添字は $BrHc$ に 10^{-4} をかけた数字をガウス・エルステッドの単位であらわしたものであり、黒く打点した位置は測定した試験片の成分を示している。

この結果より MT 磁性の磁気的性質の最適成分は、Al $8.05 \pm 0.15\%$ 、C $1.99 \pm 0.02\%$ であることがわかる。

2. 製品歩留りと成分との関係

MT 磁石の製品の歩留りに対して重要な因子の一つと考

Fig. 1 Relations between magnetic properties and composition in daily practice.

えられるものは、焼割れの発生である。

焼割れ率の等高線を Al および C の座標の上に画くと、その範囲が Fe-C 二元系状態図の共析点と複炭化物 K とを結ぶ線上に沿っている。

製品の歩留り率として磁性の合格率と

焼割れ試験の合格率との積を総歩留り率とし、これと成分との関係を示すと Fig. 2 の通りになる。製品は特に磁性

Fig. 2 Total yielding rate in relation with alloy composition.

および焼割れに対して厳しい規格をもつフライホイールマグネト用磁石 (SD-6 型磁石 断面積 2.8cm^2 、重量 230g 半円型) について調べた。この結果より工業的に生産した場合の MT 磁石の成分規格は、工場生産の立場から成分許容差をやや広くとつて次の通りにきめられる。

Al $8.15 \pm 0.25\%$ C $1.99 \pm 0.03\%$

3. 熔湯中の不純物の影響

Al および C が基準成分範囲に入つていても、磁性が所

縮み代ではない。小型の鋳物においては合金の収縮率以外に型を抜くときのゆりみや注湯によるおされのために、鋳物の各部における鋳型と製品寸法との関係は著しく異なり、両者の間にはたとえば伸尺であらわされるような簡単な通則的關係はみとめられない。

Fig.7 Relations between dimensions of patterns and castings (dimension of h_2 in Fig.6).

鋳物の寸法精度を検討した結果の一例として、上記鋳物の中の最も寸法のきまり難い空隙面と底面との間の寸法 (h_1) について測定した。空隙部は鉄板をはさんで鋳込み、鋳物になってから取り外している。50個の測定値の平均は 25.82mm、標準偏差は 0.22mm であつた。このことより約 98% の鋳物がおさまる公差は ± 0.5 mm 程度であることがわかる。

次に同じ鋳物について重量の分散を測定した結果は、Fig.8 に示す通りである。これより工業的に大量生産される生砂型の鋳造磁石の重量の分散は、標準偏差と平均値の比 ($\sigma/\bar{X}$) で 15% である。

3. 鋳物の不良類別

鋳物検査における鋳物不良を原因別に分類して調べた。積算電力計用磁石の約 50,000 個の鋳物について求めた結果によると、最も著しい不良は外観不良、例えば外形の変形や凹凸の過大などによる不良で 5.4% である。これは砂落ちや湯のおされによるもので、型込における搗き固めおよび鋳物砂の調整が最も大切な要因となる。次に多い不

良が湯口不良、例えば湯口の引渠や折れ込みなどによる不良で 1.9% である。これは堰や湯道の設計、注湯温度などの管理を必要とする。その他は湯廻不良、割れなどの不良で、上記以外のものを合計すると 2.7% となる。これは熔解、鋳造、鋳物処理の諸作業の熟練度と作業方法に依存している。

VI. 結 言

新しい MT 磁石について、その製造方式、製品歩留り

Fig.8 Histogram of weight in green sand mold castings.

に対する熔解条件および成分の影響、鋳物の均一性などについて工場生産の立場から研究した結果を述べた。

この磁石の主成分の中で熔解における偏析および減耗に対し注意すべき元素は Al であり、特に処女材使用の熔解では高周波の電磁的攪拌の

みで均一化することは難しい。製品の歩留りに対する最適成分は Al 8.15% $\pm$ 0.25%, C 1.99% $\pm$ 0.03% である。不純物の中で磁性に最も悪影響を与えるのは Si である。代表的な製品である計器用磁石の鋳物のバラツキおよび不良の原因を検討し、その許容限度を明らかにした。

終りに本研究を御指導頂いた東京大学三島徳七名誉教授に心から感謝の意を表すると共に、実験に協力された遠藤太郎氏、木村康夫氏に感謝の意を表する。