

純鉄系電磁軟鉄板「EFE」の特性^{*1}

篠崎 正利^{*2} 小野 高司^{*3} 藤野 博^{*4} 佐伯 真事^{*5} 谷川 治^{*6} 間野 純一^{*7}

Properties of Pure Iron Plate and Sheet for Magnetic Shield Use, "EFE"

Masatoshi Shinozaki, Takashi Ono, Hiroshi Hujino, Makoto Saeki, Osamu Tanigawa, Jun-ichi Mano

1 はじめに

鉄の持つ特性の中で他の材料より優れた特性を三つ挙げれば、それは磁気特性が良いこと、ヤング率が高いことおよび高強度が安価に得られることであろう。本報告は鉄の磁気特性を最大限に生かした純鉄系電磁軟鉄板に関するものである。

先端技術分野の拡大にともない、電磁用材料の需要が増加しているが、このうち、直流用電磁機器の鉄心部材として飽和磁束密度の高い純鉄の用途が増大している。例えば素粒子加速器や磁気共鳴断層撮影装置(MRI)関係などに純鉄が使われている。一方、われわれ一般大衆の生活でも家電製品などを通じて磁気との付き合いがますます多くなってきており、磁気によってひき起こされる種々の障害の対策が求められてきている。

これらのニーズに応えるため、高品質の電磁軟鉄板を開発し、「EFEシリーズ」の品揃えを行った。ここにその規格内容、製造方法および特性を紹介する。

2 EFE の特長

磁気シールド材に求められる磁気特性上の主な因子は、

- (1) 磁束を所定の磁路に制御、誘導するのに必要な「十分高い透磁率」
- (2) シールド材の使用量を定めるのに必要な「非飽和状態での高い最大磁束密度」
- (3) 磁気シールド施工によって期待される磁束密度の目安を与える「低い保磁力」

である。

EFEシリーズの電磁特性は、Table 1 に示すように、これらの要求を満足している。それぞれの特長は次のとおりである。

- (1) 焼鈍材はいずれも JIS C 2504 の電磁軟鉄板における最高級特性 SUYP 0 の磁気特性を有する。
- (2) その最大透磁率 μ_{max} は約 10 000 と高いので、磁束を意図する磁路へ誘導、制御することが容易である。
- (3) 最大磁束密度 B_{max} が高いので、磁気遮蔽に要する材料を少なくすることができる。
- (4) HC が 1.0 Oe 未満と低いので、磁気遮蔽によって得られる空間の磁場あるいは磁束密度を小さくすることができる。
- (5) 圧延材の磁気特性は SUYP 3 程度であるが、部材への加工後に適切な焼鈍を施せば、SUYP 0 の磁気特性が得られる。
- (6) EFE は PB パーマロイの磁気特性に比べ、 μ_{max} は低いが B_{max} が高い優れた電磁材料であり、しかも、パーマロイより安価な材料である。
- (7) EFE シリーズの板厚は、パーマロイが 2 mm 以下の板厚しかないのに対し、約 1 mm の薄板から約 300 mm の極厚板まであり、各用途に応じて広い範囲での使い分けが可能である。

3 製造工程

製造工程の概略を Fig. 1 にフローチャートで示す。素材は Table 2 に示すように純鉄を用いており、上底吹転炉(K-BOP)およびRH脱ガス装置により製鋼段階で脱炭し、 $C \leq 0.005$ wt. % の実績を得ている。C, Cu, Cr, Mo, Al および N などの不純物は減磁率が大きいので、極力少なくしている。ここで減磁率 $\Delta B(T)$ とは

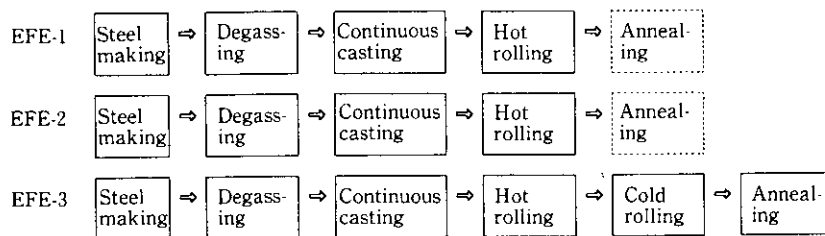


Fig. 1 Manufacturing processes of EFE plate and sheet

*1 平成2年9月20日原稿受付

*2 千葉製鉄所 管理部薄板管理室 主査(課長)

*3 千葉製鉄所 管理部薄板管理室

*4 鉄鋼技術本部 鋼材技術部 主査(課長)

*5 鉄鋼研究所 薄板研究部薄板研究室 主任研究員(課長補)

*6 水島製鉄所 管理部厚板鍛造管理室 主査(課長)

*7 千葉製鉄所 管理部技術サービス室 主査(課長)

Table 1 Typical examples of magnetic properties of EFE plates and sheets

Classification	Grade	Specimen	Thickness (mm)	Magnetic flux density (T)* ¹					μ_{max}	Hc* ² (Oe)	Test method* ³
				B ₁	B ₂	B ₃	B ₅	B ₂₅			
Hot-rolled plate	EFE-1R	as rolled	100	0.25	0.58	0.78	1.06	1.63	3 400	2.50	①
			13	1.15	1.38	1.45	1.51	1.63	12 500	0.45	①
	EFE-1A	as annealed	26	1.13	1.38	1.45	1.50	1.61	12 300	0.48	①
			78	0.98	1.40	1.47	1.53	1.66	11 500	0.53	①
Hot-rolled sheet	EFE-2R	as rolled	4.0	0.08	0.29	0.54	0.89	1.58	—	—	③
			6.4	0.07	0.18	0.34	0.62	1.56	—	—	③
			8.0	0.07	0.17	0.29	0.43	1.55	—	—	③
	EFE-2A	as annealed	4.0	0.64	1.06	1.29	1.42	1.58	6 900	0.23	③
			4.0	1.16	1.33	1.38	1.43	1.57	12 900	0.38	①
			6.4	1.40	1.47	1.50	1.54	1.68	15 700	0.13	①
			8.0	1.38	1.45	1.48	1.54	1.65	15 500	0.14	①
			8.0	1.08	1.35	1.45	1.53	1.67	15 100	0.37	②
Cold-rolled sheet	EFE-3A	as annealed	1.2	0.69	1.27	1.42	1.50	1.61	7 400	0.77	③
			1.6	0.86	1.31	1.42	1.50	1.63	8 560	0.70	③
Reference	JIS C 2504	SUYP 0	≥0.80	≥1.10	≥1.25	≥1.35	≥1.55	—	≤0.80	①	
			≥0.50	≥1.00	≥1.20	≥1.35	≥1.55	—	≤1.00	①	
			≥0.20	≥0.75	≥1.10	≥1.30	≥1.55	—	≤1.30	①	
			≥0.10	≥0.40	≥0.80	≥1.10	≥1.50	—	≤1.80	①	
	JIS C 2531	PB Permalloy	—	—	—	≥1.40 (B12.5)	—	≥30 000	≤0.2		

*¹ B₁, B₂, B₃, B₅ and B₂₅ mean the symbols showing the magnetic flux densities at the magnetic field intensity of 1 Oe (79.6 A/m), 2 Oe (159.2 A/m), 3 Oe (238.8 A/m), 5 Oe (398 A/m) and 25 Oe (1,990 A/m), respectively.

*² B=1.5(T) (PB: H=12.5 Oe)

*³ ①: Ring method I JIS C 2504 (45^D×33^d×t)

②: Ring method II (100^D×50^d×t)

③: Epstein method JIS C 2550 (30^w×280^L×t)

(Method ③ leads to lower values than methods ① and ②.)

Table 2 Typical examples for chemical composition of EFE (wt. %)

Grade	C	Si	Mn	P	S
EFE-1	0.004	tr	0.05	0.003	0.003
EFE-2	0.003	tr	0.17	0.006	0.004
EFE-3	0.002	tr	0.18	0.013	0.008

H=10 000 A/m の磁場における、不純物の混入による磁束密度の減少を示すもので、各成分 (wt. %) の係数は次式で表される。すなわち、 $\Sigma \Delta B$ が小さいほど高い磁束密度が期待できることになり、EFE はそれを十分に満足している。

$$\Sigma \Delta B = 0.3C + 0.032Si + 0.075Mn + 0.033Cr + 0.075Mo + 0.016Cu + 0.068Al + 0.7N \dots\dots\dots (1)$$

製鋼段階で高純度化された溶鋼は連続铸造され、その後、熱間圧延や冷間圧延を経て製品となる。

4 特 性

4.1 機械的性質

テレビの磁気シールド枠など、成形性が要求される EFE-2 および 3 の機械的性質の例を Table 3 に示す。

EFE-2R および EFE-3AD は軟鋼、EFE-2A は極軟鋼の強度を有し、いずれも破断伸び El が高い。また密着曲げが可能である。

Table 3 Typical examples for mechanical properties in EFE 1~3

Grade	Thickness (mm)	YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	El (%)
EFE-1A* ¹	25	137	245	53
	75	157	265	52
EFE-2R* ²	4.0	186	294	52
	6.4	167	284	54
	8.0	176	274	53
EFE-2A* ²	4.0	137	235	44
	6.4	137	216	54
	8.0	137	235	63
EFE-3AD* ²	1.2	157	284	45
	1.5	186	284	44
	1.6	127	245	46

*¹ Test piece: JIS No. 4. (transverse direction)

*² Test piece: JIS No. 5. (transverse direction)

なお、EFE-3AD のランクフォード値 r は 1.0 程度しかないが、ある程度の深絞りが可能である。

加速器用電磁石のような積層磁石の鉄心などの場合、打抜性が問題となる可能性があるが、クリアランスを小さくすれば、Photo 1 に示すように、バリの方がダレより小さくなり、問題は生じない。



Photo 1 Microstructure and metal flow at the punched hole in EFE-3AD

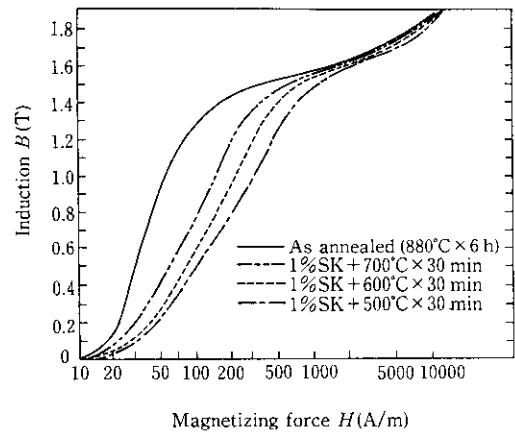


Fig. 3 Effect of stress-relief-annealing temperature on DC magnetization in EFE-2A

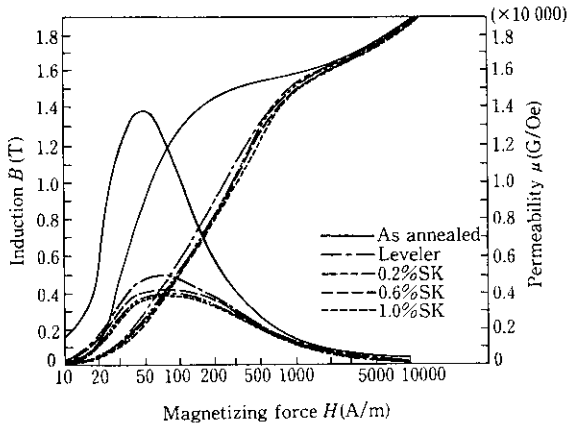


Fig. 2 Effect of flattening on DC magnetization in EFE-2A

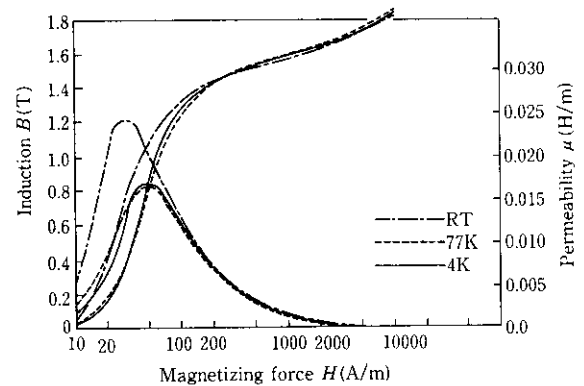


Fig. 4 Magnetizing property ultra-low temperature in EFE-2A

4.2 磁気特性に及ぼす加工の影響

Fig. 2 に示すように、レベラー通板、スキンパスなどの加工により磁気特性が低下するが、Fig. 3 に示すように、歪取焼鈍により回復する。このほかショットブラスト、曲げ加工、プレス成形、ドリル加工、溶接、溶断などの加工により劣化するが、いずれも歪取焼鈍により回復する。劣化の理由は転位の導入や応力の存在によって磁壁移動が起きにくくなるためである。

4.3 極低温下での磁気特性

超電導磁石のヨーク材は液体 He などに浸漬され、極低温で使用されることがあるが、このような場合にでも、Fig. 4 に示すように磁気特性はあまり低下せず、SUYP 0 の値を示す。低温における磁気特性の若干の低下は磁壁移動が固溶原子などにより妨げられやすくなるためである。

5 おわりに

EFE の適用例としては、鉄心部材として磁気共鳴断層撮影装置 (MRI)、米国 SSC (Superconducting Super Collider) 計画に代表される高エネルギー物理学研究のための加速器用電磁石、あるいはリアモーターカーや家電などの民生機器における磁気シールド材としてのニーズがあり、その適用範囲はますます広がっていくと考えられる。EFE シリーズがそれらのニーズに応えられるよう、今後品質の改善に取り組んでいく所存である。

なお、当社エンジニアリング事業所では EFE シリーズを用いた MRI シールド室などの施工も行っており、今後シールド施工技術の向上にも取り組んでいく所存である。

<問い合わせ先>

鋼材技術部 東京 TEL 03 (3597) 3537, 3524
薄板技術部 東京 TEL 03 (3597) 3491