

純鉄系磁気シールド材料の高透磁率化とその磁気シールド性能

Improvement on Permeability and Magnetic Shielding Effect of Pure Iron Sheets for Magnetic Shield

藤田耕一郎 FUJITA Koichiro JFE スチール スチール研究所 薄板研究部 主任研究員(副課長)
井上 正 INOUE Tadashi JFE スチール スチール研究所 薄板研究部 主任研究員(課長)
江本 秀樹 EMOTO Hideki JFE スチール 東日本製鉄所 第2冷延部 冷延工場長

要旨

JFE スチールでは、純鉄系の磁気シールド用鋼板の透磁率に及ぼす微量不純物元素の影響を調査し、数 10 ppm レベルの Al, S が透磁率を著しく劣化させることを見出した。さらに、高純度化および析出物の形態制御により高透磁率化した純鉄薄鋼板を用いて、磁気シールド性能を評価した結果、一般加工用 SPCC と比較して、3 dB 以上優れた磁気シールド性能を有することを確認した。

Abstract:

The influence of the trace element on the permeability of the pure iron sheet used for magnetic shield has been studied. Depending upon concentration, The Al or S significantly deteriorates its permeability. It is confirmed that the pure iron sheet of improved permeability by its higher purity and the morphology control of precipitates has an excellent magnetic shield effect of more than 3 dB compared to SPCC.

1. 緒言

多種多様な電子機器の普及にともなって、電磁環境問題の重要性が広く認識されるようになってきており、良好な磁界環境の要求を満たすためのさまざまな検討が行われている¹⁾。このような背景から、磁気シールド用材料は従来から使用されている医療機関、粒子線加速器分野²⁾などに限らず、今後、需要と用途が広がっていくと考えられる。磁気シールド用材料に求められる特性は、対象とする磁界レベルでの透磁率が高いこと、および飽和磁束密度が高いことである。パーマロイや方向性けい素鋼板に比べて純鉄系の材料は、透磁率の点で劣るものの、飽和磁束密度の高さや製造コストの観点で有利である³⁾。また、最近の製鋼技術の発展により、高純度化が可能となっており、高透磁率化が進んでいる。

JFE スチールでは、上記のような磁気シールドニーズに対応し、さらに経済性を合わせ持つ材料として、純鉄系磁気シールド用鋼板「EFE[®]」を商品化している⁴⁾。EFE の製

造工程の概略を Fig. 1 に示す。EFE は、製鋼段階での高純度化および熱間圧延段階での析出物形態制御により高透磁率化を達成している。不純物の低減は、飽和磁束密度の向上に有効であることに加え、熱間圧延段階での析出物制御技術と合わせることで、低い磁界での透磁率を向上させることが可能となる。本稿では、EFE の高透磁率化のための材料設計ポイント、およびその磁気シールド性能について評価した結果について報告する。

2. 実験方法

2.1 直流磁気特性に及ぼす Al 量, S 量の影響

微量不純物元素が、地磁気($H = 28 \text{ A/m}$)レベルの低い磁界での透磁率に与える影響について検討するため、供試材は以下のように作製した。電解鉄を用いた実験室真空溶解により Al, S 量を変化させた 50 kg 鋼塊を出鋼し、実験室にて 2.5 mm まで熱間圧延、酸洗、0.9 mm まで冷間圧延した後に、750°C で 60 s の再結晶・粒成長焼鈍を施した。供試材の化学成分を Table 1 に示す。磁気特性は、

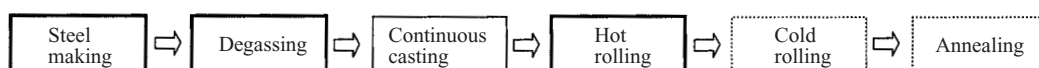


Fig. 1 Manufacturing processes of EFE steel sheet

Table 1 Chemical composition of specimen

Mark	(mass%)						
	C	Si	Mn	P	S	solute Al	N
Al-1	0.002 3	0.01	0.17	0.010	0.003 5	<0.000 5	0.002 6
Al-2	0.002 4	0.01	0.17	0.010	0.003 6	0.003 1	0.002 4
Al-3	0.002 1	0.01	0.17	0.011	0.003 5	0.039	0.002 5
S-1	0.002 0	0.01	0.16	0.010	0.001 8	<0.000 5	0.003 5
S-2	0.002 1	0.01	0.15	0.010	0.004 1	<0.000 5	0.003 0
S-3	0.002 1	0.01	0.15	0.010	0.012	0.000 5	0.003 1
S-4	0.002 1	0.01	0.15	0.011	0.018	0.001 3	0.002 6

JIS C 2531 に準じて内径 33 mm, 外径 45 mm のリング形状試験片を焼鈍板から採取した後、励磁および検出コイルをそれぞれ 100 ターン施し、メトロン技研(株)製自動エプスタイン測定装置を用いて測定した。

2.2 磁気シールド性能評価

EFE は前述のように、高純度化技術と析出物形態制御技術を駆使して良好な磁気シールド性を有するように設計された鋼種である。EFE および比較として一般加工用 SPCC を用いて、シールドボックスの模型を作製し、そのシールド性能を評価した。

供試材は、純鉄系磁気シールド用鋼板 EFE の 0.8 mm 厚材と、SPCC の 0.8 mm 厚材および 1.2 mm 厚材を用いた。素材の磁気特性は、JIS C 2531 に準じて内径 33 mm, 外径 45 mm のリング形状試験片を採取し、励磁および検出コイルをそれぞれ 100 ターン施し、メトロン技研(株)製自動エプスタイン測定装置を用いて測定した。磁気シールド性能の評価は以下のようにして行った。3 種の供試材を用いて、一辺が 200 mm の直方体形状をしたシールドボックスを作成した。次に、Fig. 2 に示すように磁気シールドルーム内に置かれたヘルムホルツコイル内にシールドボックスを設置し、ヘルムホルツコイルから発生させた外部磁界およびシールドボックス中央位置での内部磁界を測定して、磁気シールド性能(S)を(1)式にて評価した。

$$S = 20 \log((\text{外部磁界}) / (\text{内部磁界})) \dots\dots (1)$$

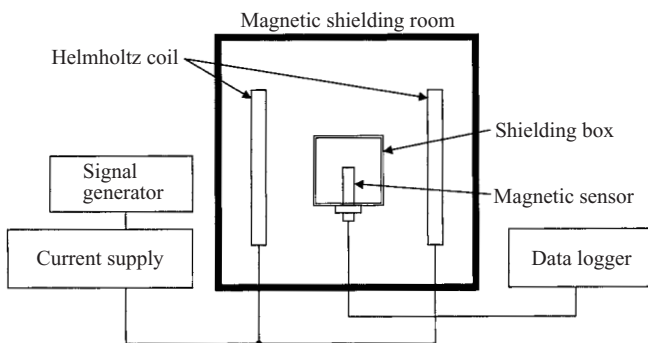


Fig. 2 The measurement method of the magnetic shielding effect

この時、磁気センサは Bartington Instruments Ltd. 製 MAG-03MC を用い、シールドボックスの一面に設けた φ25 mm の穴から挿入した。

3. 実験結果

3.1 直流磁気特性に及ぼす Al 量, S 量の影響

純鉄の地磁気相当磁界レベルでの透磁率に及ぼす Al 量, S 量の影響を Fig. 3, 4 に示す。Al 量, S 量ともに、その含有量が低減するにしたがって透磁率の向上が認められる。Al の場合、Al フリー鋼と比較して、その含有量が 30 ppm 程度であっても著しく透磁率を低下させることが明らかになった。一方、S は 35~180 ppm の成分範囲では、含有量の増加にともなってほぼ直線的に透磁率が低下するという報告もあり⁵⁾、35 ppm よりもさらに低減することに

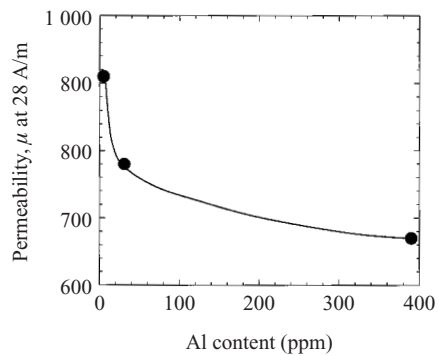


Fig. 3 Effect of Al content on permeability (S: 35 ppm)

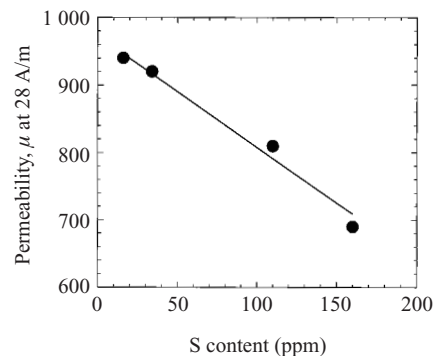


Fig. 4 Effect of S content on permeability (Al: <5 to 13 ppm)

よって透磁率の向上が期待される。

本検討の結果、Al, Sの低減を図ることにより、地磁気レベルでの透磁率が800以上の高性能材が得られることが明らかとなった。

3.2 磁気シールド性能評価

Table 2に実機供試材の直流磁気特性を示す。EFEは調質圧延の影響で若干透磁率が低下しているが、SPCCと比較して優れた特性を有する。

Fig. 5に直流の磁気シールド性能を、またFig. 6に50 Hzでの磁気シールド性能を示す。直流、50 HzともにEFEはSPCCと比較して良好な磁気シールド性能を示す。同板厚である0.8 mm厚SPCCと比較して、3~6 dB良好な磁気シールド性能を有しており、また、1.2 mm厚のSPCCと比較しても同等以上の磁気シールド性能を有することが認められる。以上より、SPCCから磁気特性の良好なEFEに材質を変更することによって、同板厚の場合には優れた磁気シールド効果が得られる。また、SPCCで磁気シールド効果が満足している場合には、より薄いEFEを用

いても十分な磁気シールド効果が得られ、薄肉化によるコスト削減も期待される。

4. 考察

4.1 直流磁気特性に及ぼすAl量, S量の影響

微量AlおよびSにより透磁率が低下する原因を検討するため、TEMによる析出物観察を行った。結果をPhoto 1に示す。AlやSを含有した場合、微細な析出物が結晶粒界をピンニングすることによって粒成長性が低下し、細粒組織となるため磁気特性が低下する。したがって、良好な磁気特性を得るためには、高純度化がもっとも有効である。また、高純度化とともに析出物の形態制御も高磁気特性化のために重要である。

4.2 磁気シールド性能に及ぼす透磁率, 板厚の影響

一般に、磁気シールド性能は板厚と透磁率の積によって評価される⁶⁾。直流のシールド性能について、外部磁界の強さが8.0~79.6 A/mの時のシールド性能を、 $\mu \times t$ で整理した結果をFig. 7に示す。また、シールドボックスの形状因子を考慮した(2)式で表わされる近似式⁷⁾の計算結果を図中に破線で示す。

$$S = 20 \log(1 + 0.8 \mu t/a) \dots\dots\dots (2)$$

Table 2 Magnetic properties of the test samples

Mark	Thickness (mm)	$H_m = 796 \text{ A/m}$				
		B_m (T)	B_r (T)	H_c (A/m)	μm	μ (at 28A/m)
EFE-0.8	0.8	1.48	0.88	99	3 500	640
SPCC-0.8	0.8	0.72	0.50	420	730	140
SPCC-1.2	1.2	1.34	0.99	210	1 900	210

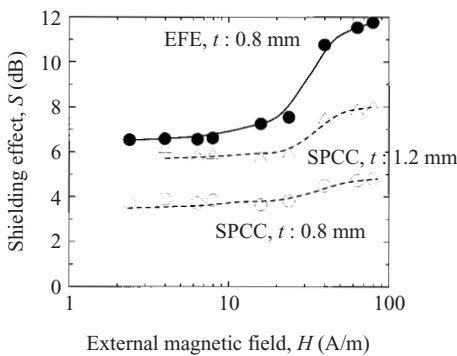


Fig.5 Magnetic shielding effect (DC)

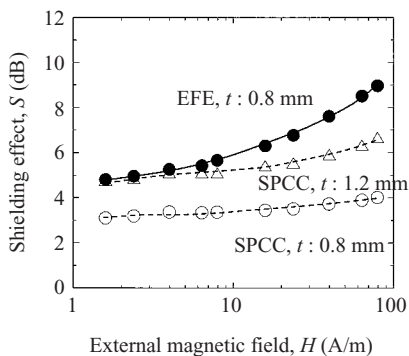


Fig.6 Magnetic shielding effect (50 Hz)

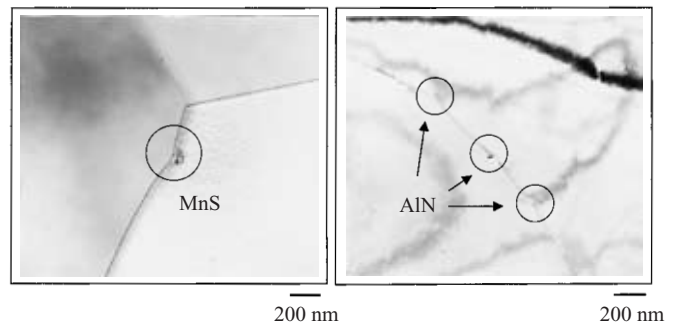


Photo 1 The precipitates on grain boundary

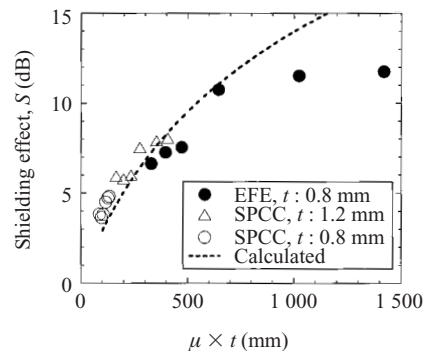


Fig.7 Relationship between the magnetic shielding effect (DC) and $\mu \times t$

ここで、 t は供試材の板厚(mm)、 μ はシールド性能測定時の外部磁界の強さと同じ励磁磁界にて測定した供試材の比透磁率、 a はシールドボックスの一辺の長さ(mm)である。

EFE, SPCC といった鋼種や板厚によらず、シールド性能は $\mu \times t$ と良い相関があり、(2)式で与えられる近似式でほぼ議論できる。 $\mu \times t$ の大きな領域で、(2)式から若干外れてくるデータは、磁性体の励磁された磁束量の大きな領域であり、ボックス角の接合部における漏洩磁束の影響が大きいと推測される。

以上により、磁気シールド性能を高めるためには、シールドすべき磁界の強さにおける透磁率を高めることが重要であり、EFE は SPCC に比べて低い磁界レベルから良好なシールド性能を発揮することが明らかとなった。

5. 結言

純鉄系磁気シールド材料の磁気特性に及ぼす微量不純物の影響、および模型シールドボックスを用いた磁気シールド性能について検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) Al は Al フリー鋼と比較して、その含有量が 30 ppm 程度であっても著しく透磁率を低下させる。また、S は 35~180 ppm の成分範囲では、含有量の増加にともなってほぼ直線的に透磁率が低下する。
- (2) EFE は同板厚である 0.8 mm 厚 SPCC と比較して、3~6 dB 良好な磁気シールド性能を有しており、また、1.2 mm 厚の SPCC と比較しても同等以上の磁気シールド性能を有する。

高純度化および析出物形態制御に裏付けられた高透磁率化技術によって製造されている EFE 鋼種は、一般加工用 SPCC と比較して、磁気シールド性能の向上や、シールド材料の薄肉化による低コスト化にもっとも適した材料である。本鋼板の選択によって、設計の自由度が拡大し、高性能化、低コスト化、軽量化といったさまざまなニーズへの対応が可能になると考えられる。

参考文献

- 1) たとえば、谷口和彦、森田祐司、久保直也. IEEJ Trans. PE. vol. 123, no. 6, 2003, p. 734.
- 2) たとえば、山田進、松澤大樹、山田健嗣、吉岡清郎、小野修一、川島隆太、菱沼隆. 日本臨床. vol. 45, no. 1, 1987, p. 39.
- 3) 屋鋪裕義. 第 155・156 回西山記念技術講座. 日本鉄鋼協会. 1995, p. 237.
- 4) 篠崎正利、小野高司、藤野博、佐伯真実、谷川治、間野純一、川崎製鉄技報. vol. 23, no. 1, 1991, p. 82.
- 5) 尾田善彦、田中靖、千野淳、山上伸夫、岡見雄二. あたりあ. vol. 341, no. 2, 2002, p. 114.
- 6) 石塚一男. EMC. no. 186, 2003, p. 42.
- 7) Mager, J. J. of Magnetism and Magnetic Material. vol. 2, 1976, p. 245.



藤田 耕一郎



井上 正



江本 秀樹