

松村 治^{*2} 福田 文二郎^{*3} 木下 勝雄^{*4} 今井 卓雄^{*5} 小畑 良夫^{*6} 宮崎 重紀^{*7}

Non-oriented Silicon Steel Sheet “RM7” Newly Developed with Extremely Low Core Loss

Koh Matsumura, Bunjiro Fukuda, Katsuo Kinoshita, Takuo Imai, Yoshio Obata, Shigeki Miyazaki

要旨

無方向性珪素鋼板は回転機や中・小型の各種静止誘電器の鉄心に用いられるが、その最も重要な特性は鉄損が低いことである。当社においては、超清浄度鋼の溶製技術確立し、その技術が無方向性珪素鋼板に応用した結果、従来になく低鉄損の新製品 RM 7 (0.50 mm) の開発に成功した。鋼の高純度化により、①結晶粒成長性が良く、容易に適正粒径が得られること、②磁壁の移動を妨げる非金属介在物が減少したこと、および③ (111) 面の発達を助長する介在物が減少したために、集合組織が改善されたことによる履歴損の著しい減少が実現した。諸因子の影響と製品の特性について説明した。

Synopsis:

In recent years, techniques of producing clean steel have progressed remarkably. As a result, development of non-oriented silicon steel sheet with low core loss has been achieved in KSC, and the manufacture of RM7 (0.50 mm, $W_{15/50} \leq 2.50$ W/kg) has become possible. RM7 is suitable to core materials for large rotating machines, such as generators, and for various static induction apparatus, and meets the needs of energy-saving. Qualitative effects on core loss are also presented of such factors as size and texture of crystal grains and amount of non-metallic inclusions.

1. まえがき

日本の珪素鋼板製造技術は世界のトップレベルにあり、無方向性珪素鋼板の日本工業規格 (JIS) の S09 (0.50 mm, $W_{15/50} \leq 2.90$ W/kg) は世界で最も厳しい規格である。当社ではそれを上回る RM8 (0.50 mm, $W_{15/50} \leq 2.70$ W/kg) クラスの特性の鋼板を製造している。近年、高純度鋼溶製技術が非常に進歩し、その結果、当社においては、さらに低鉄損の RM7 (0.50 mm, $W_{15/50} \leq 2.50$ W/kg) の製造が可能となった。RM7は、発電機等の大型回転機や各種静止誘電器の鉄芯材料として適しており、省エネルギーの要請に応えるものである。このような低鉄損の無方向性珪素鋼板が製造されるに至った技術的背景について、以下に説明する。

2. 鉄損値に影響を与える因子

電磁鋼板は主として鉄損値により規格が決められる。鉄損は渦流損と履歴損に大別される。鋼板の電気抵抗が大きい程渦流損が減少するため、無方向性珪素鋼板は規格に応じて Si や Al が添加され、高級品種になる程添加量が多い。しかし、添加しすぎると鋼板が脆くなるので、Si と Al の和で 4% 程度が限度である。結晶粒径は大きい程渦流損が増大するが履歴損は減少する。したがって、両者の和である鉄損を最小とする最適な結晶粒径が存在する。履歴損はその他介在物の存在や集合組織等

により影響を受ける。これらのおおのの要因について以下に述べる。

2-1 結晶粒径

無方向性珪素鋼板は、直径 50~100 μm 程度の比較的小さい結晶で構成されている。この結晶粒はさらに同一方向の磁化を持った領域により分割されている。この領域を磁区と呼び、領域間の境界を磁壁と呼ぶ。鋼板を磁化すると、磁化は主として磁壁の移動でおこる。この磁壁移動は非可逆的なものが多く、履歴損を発生させる。また、磁壁が移動した部分は、磁化が急激に変化するので渦電流が流れ、それに伴う渦流損が発生する。

結晶粒径が大きくなると、一般に磁壁の数が減少する。磁壁の数の減少は前述のように鉄損のうちの履歴損を減少させるが、磁壁の移動速度が増すので渦流損が増大する。この様子を Fig. 1 に示すが、履歴損と渦流損の和である鉄損は最適結晶粒径において極小値を示す。この最適結晶粒径は、鋼板の成分や集合組織等変るが、高級無方向性珪素鋼ではほぼ 150 μm 程である。

工業的には、短時間の連続焼鈍によりこの最適結晶粒径にまで結晶粒を成長させる必要がある。そのためには、結晶粒成長を妨げる S, O, N 等の微細析出物や介在物を低減する必要がある。例えば、Fig. 2 に示すように、鋼中の S 含有量を大幅に低減することにより、試料 A のように最適結晶粒径に到達するこ

*1 昭和58年2月17日原稿受付

*2 技術研究所第3研究部神戸研究室主任研究員 (課長)

*3 技術研究所第3研究部珪素鋼研究室主任研究員 (課長)

*4 技術研究所第1研究部製鋼研究室主任研究員 (課長)

*5 千葉製鉄所製鋼部製鋼技術室主任 (部長補)

*6 阪神製造所管理部技術管理室主任 (課長)

*7 千葉製鉄所管理部熱延管理室主任 (部長補)

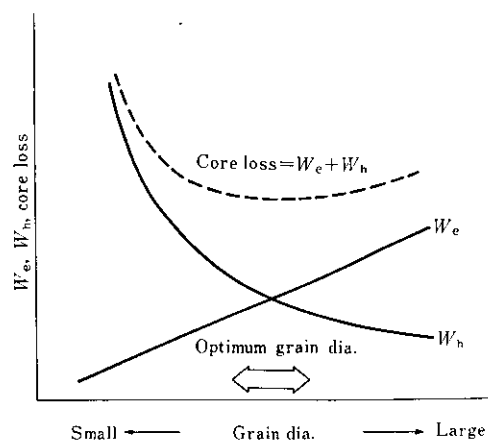


Fig. 1 Grain diameter dependence of hysteresis loss (W_h), eddy current loss (W_e) and core loss

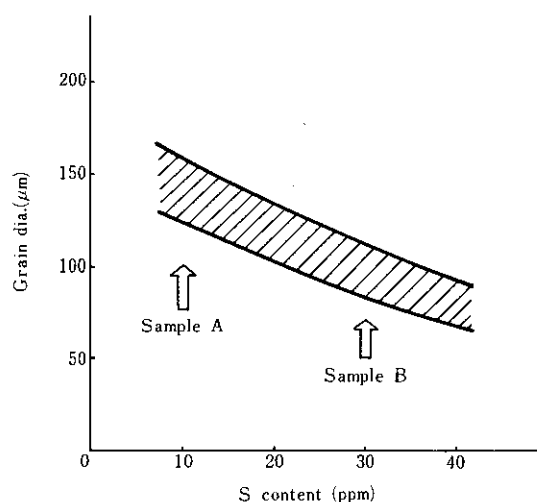


Fig. 2 Effect of sulfur content on grain diameter

とが可能になる。この試料 A と結晶粒径の小さい試料 B の透過電顕写真と析出物の分析(エネルギー分散型 X 線分析, EDX A)の結果を **Photo. 1** に示す。試料 A ではほとんど析出物, 介在物が見られないのに比べ, 試料 B では数多くの微細な MnS が存在している。

S, O, N 等の不純物の低減により, 粒成長性が改善され, 短時間連続焼鈍により工業的に最適結晶粒径に到達させることが可能になり, 鉄損低減が達成された。

2.2 介在物

無方向性珪素鋼には, 硫化物, 酸化物, 窒化物等の析出物や介在物が鋼中に存在する。介在物の大きさは, だいたい $0.1 \mu\text{m}$ から数十 μm である。これらの不純物は前節で述べたように結晶粒の成長も阻害するが, その他, 直接的に磁気特性も劣化させる。これは介在物が磁壁の移動を妨げたり, その周辺の静磁エネルギーを減少させるために新しい磁区が生じるためである。したがって, 介在物の量が多くなると鉄損は増加する。介在物が磁壁の移動を妨げている例として **Photo. 2, 3** に走査型電顕 (SEM) により観察した磁区写真を示す。これは 1 つの結晶粒 ($\{110\}$ 面が板面に平行な粒) の内の 180° 磁壁の一つが介在物によりその移動を妨げられている様子を, 直流および交流で磁化

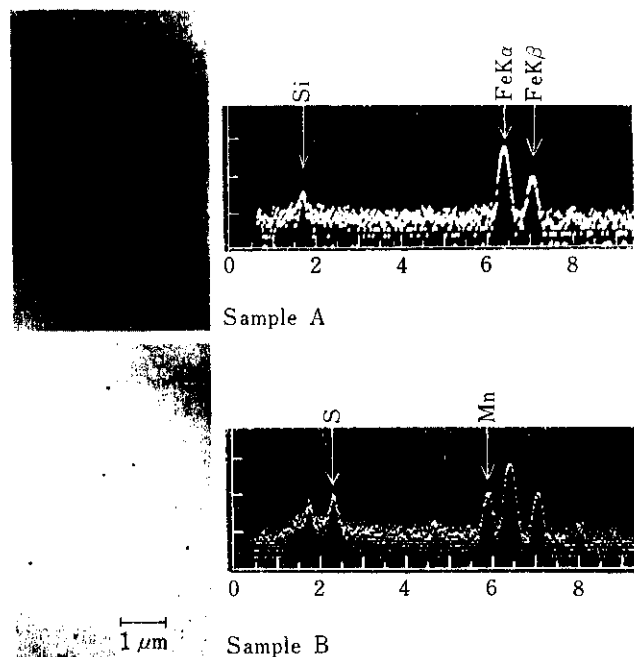


Photo. 1 Fine precipitates observed with a TEM and its chemical composition analyzed by EDXA

した場合について示している。交流の場合は, 電子ビームの走査と励磁磁界を同期させることにより磁壁の時間に対する正弦波状の移動を, 場所に対する正弦波状の変化として見ている。写真で正弦波状にうねっている磁壁は, それが時間に対して正弦波的に移動していることを示している。**Fig. 3** に鋼中の介在物の個数と鉄損の関係を示すが, 介在物の個数が減少するに従い鉄損は減少している。

2.3 集合組織

結晶粒が特定の方向に配列した, いわゆる優先方位を持った状態を集合組織と呼ぶが, 珪素鋼の磁気特性はこれら集合組織に強く依存する。

良く知られているように, 珪素鋼は体心立方構造を有し, その単結晶は稜の方向 $\langle 001 \rangle$ が最も磁化されやすく, 次いで面対角線の方向 $\langle 011 \rangle$ が磁化されやすい。体対角線方向 $\langle 111 \rangle$ は最も磁化困難な方向である。したがって, 最も $\langle 001 \rangle$ 軸を多く含む $\{100\}$ 面が圧延面に平行な, いわゆる面内無方向性が理想的である。次いで $\{110\}$ 面も $\langle 001 \rangle$ 軸を比較的多く含み, かつ, $\langle 110 \rangle$ 軸を持つので磁気特性上好ましい。 $\langle 100 \rangle$ 軸を含まない $\{111\}$ 面や $\langle 111 \rangle$ 軸を持つ $\{112\}$ 面は好ましくない。

Fig. 4 に $\{100\}$, $\{110\}$, $\{111\}$, $\{211\}$ 各面のインバース反射強度と鉄損 $W_{15/50}$ (板厚 0.50 mm) の関係を示す。インバース反射強度とは全くランダムな集合組織に対する各結晶面の反射強度であり, ランダムな組織の場合 1 となる。**Fig. 4** より $\{100\}$ 面が増す程鉄損が減少し, $\{112\}$ 面と $\{111\}$ 面が強くなると鉄損が増加していることがわかる。実際の鋼板では $\{111\}$ 面が発達しやすく, $\{111\}$ 面を減少させることが重要である。

これら集合組織は冷間圧下率等に大きく影響されるが, 鋼中の介在物の量によっても影響される。**Photo. 4** に示す介在物の少ない試料 A と多い試料 B の Facet pit を **Photo. 5** に示す。Facet pit の形は各結晶面によって異なり, この場合 $\{100\}$ 面は白い正方形, $\{111\}$ 面は不鮮明な形で黒く見えている。介在物の少ない試料 A は $\{100\}$ 面を持つ結晶粒が多く, 介在物量の

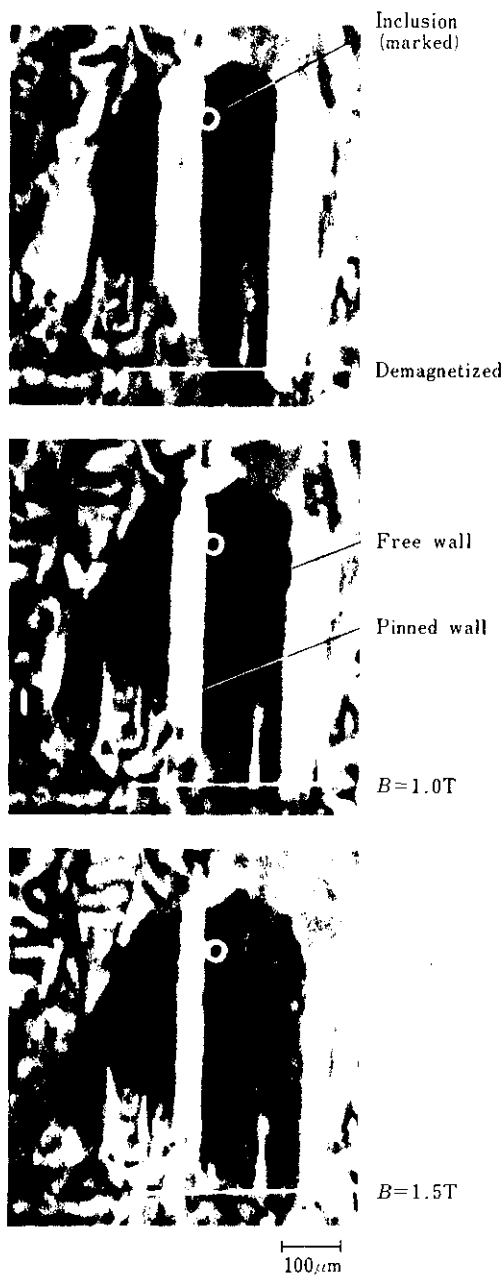


Photo. 2 Domain wall pinned by inclusion during DC magnetization

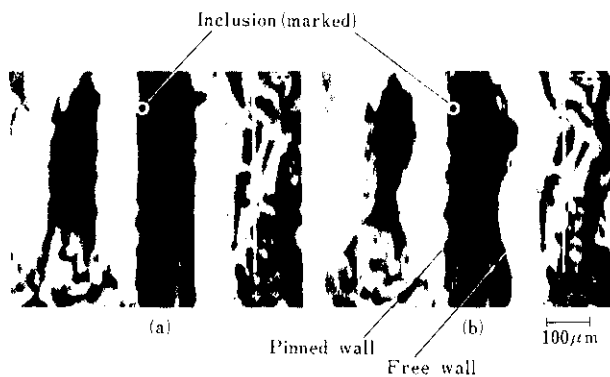


Photo. 3 Domain wall pinned by inclusion during AC magnetization (a) demagnetized, (b) $B=1.0\text{ T}$, 50 Hz

多い試料 B では $\{111\}$ 面の結晶粒が多いことがわかる。この原因は鋼中の介在物が $\{111\}$ 面を持つ結晶粒の核の発生源となる

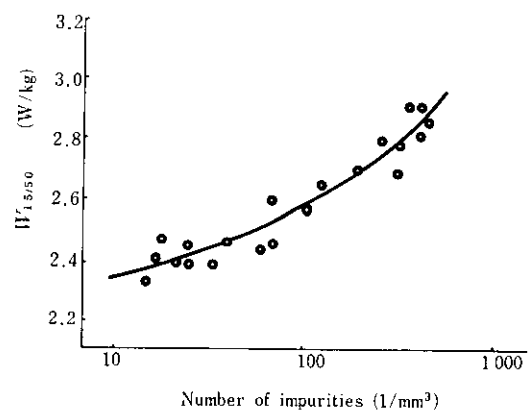


Fig. 3 Effect of impurities on core loss ($W_{15/50}, 0.50\text{ mm}$)

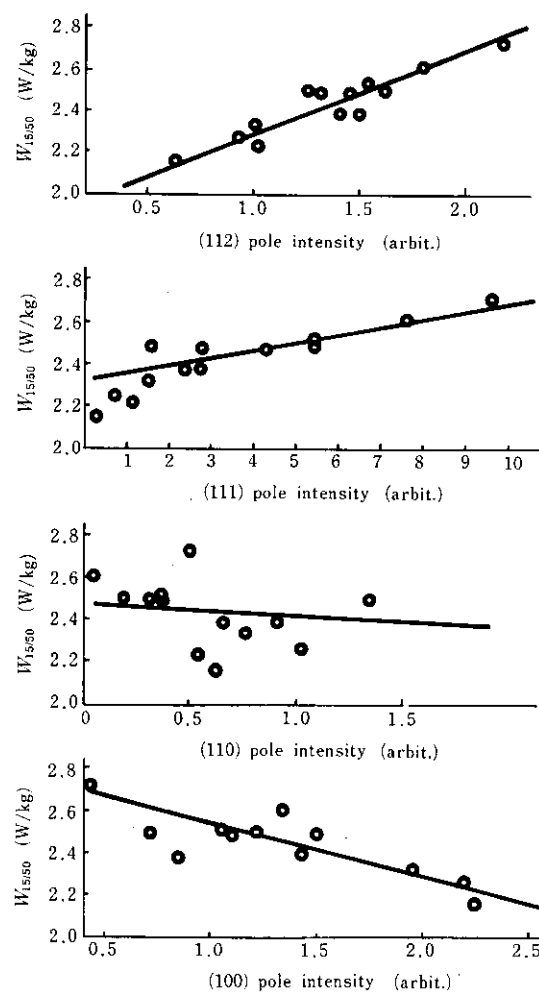


Fig. 4 Relationship between pole intensity and core loss ($W_{15/50}, 0.50\text{ mm}$)

ためと考えられる。このように鋼中の介在物を減少させることは $\{111\}$ 面の結晶粒を減少させ、 $\{100\}$ 面の結晶粒を増加させるので磁気特性を向上させる。

3. 高純度鋼の溶製

前章で述べたように、S, O, N 等の鋼中の不純物を低減させ

技術の著しい進歩に負うところが大きい。

当社における無方向性珪素鋼の溶製プロセスについて述べる。

まず、高炉より出銑された溶銑は、転炉で酸素ガスや石灰等のフラックスで脱炭、脱磷処理される。次に真空脱ガス処理等の取鍋精錬で脱酸、脱炭、脱硫が行われると同時に、Si、Al、Mn等の合金鉄を添加して目標成分の調整を行う。その後この溶鋼は連続鋳造機によってスラブとするか、鋳型に鋳込んだ後、分塊圧延されスラブとする。

鋼の成分はこの段階まででほぼ決定されるので、成分上からは転炉と取鍋での精錬が特に重要である。

転炉に関しては、酸素底吹きQ-BOPをはじめ、底吹き法を応用した酸素上底吹きのK-BOPや、酸素上吹きアルゴン底吹き LD-KGなど、炉内溶鋼の攪拌力が従来のLD転炉より強い転炉製鋼法を採用している。その結果、C、O、Sの低い溶鋼が安定して得られる。

取鍋精錬では特殊なフラックス等を使用し、脱硫、酸化物の浮上除去の効果を大幅に向上させている。また、取鍋精錬を終了した溶鋼を鋳込む際には、アルゴンシールで大気からの汚染を防止している。これらの方法により、S、O、Nの極めて低い、清浄な溶鋼が得られる。その分析値の一例をTable 1に示す。

4. 電磁特性

前章で述べた方法で得られた高純度成分のスラブを熱延、冷延、焼鈍して得た0.5mm厚さの製品の電磁特性の一例をTable 2に示す。この値は、JIS規格の最高グレードS09よりかなり鉄損が低い。当社ではJIS規格よりさらに低鉄損の規格を決めており、その値をTable 3に示す。前述の特性例は、当社規格RM7に相当する。このような低鉄損材料は、各種電気機器の鉄芯材料として省エネルギーに役立つであろう。

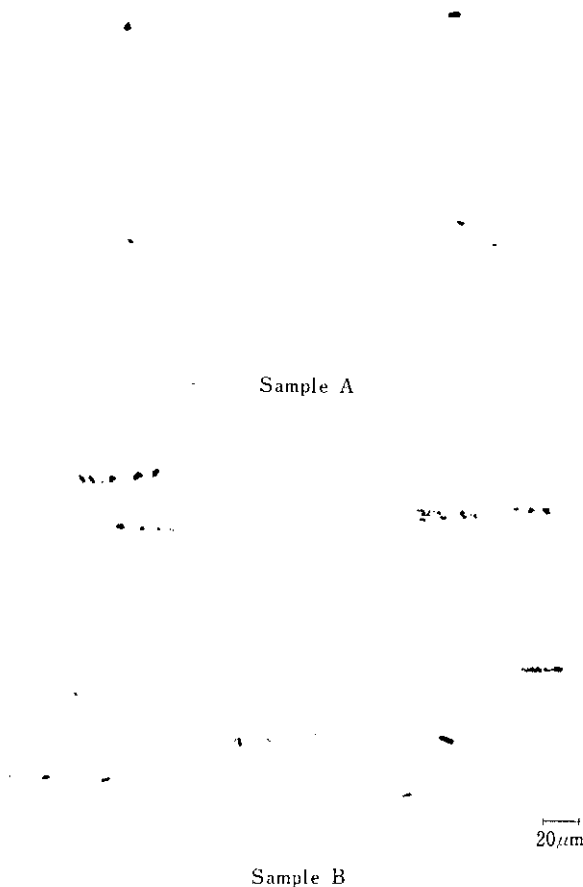


Photo. 4 Inclusions in the specimen observed with an optical microscope

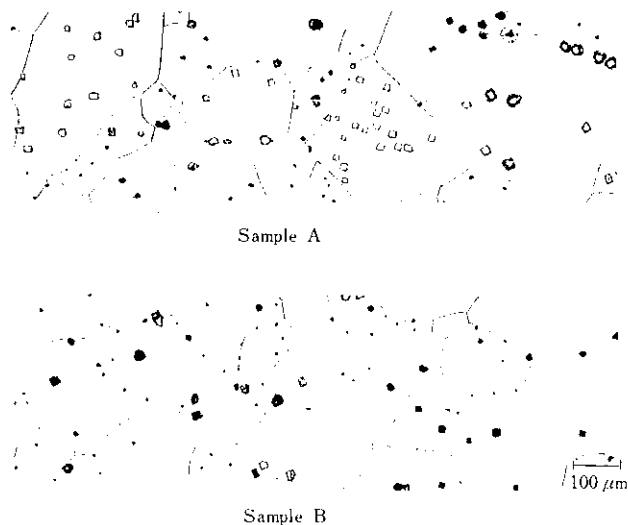


Photo. 5 Facet pit of the specimen surface

ることにより、不純物の磁気特性への直接的な悪影響が無くなると同時に、結晶粒成長性、集合組織の改善が見られ磁気特性が大幅に向上する。このような高純度鋼の溶製は、最近の製鋼

Table 1 An example of chemical composition

(%)						
C	Si	Mn	S	Al	O	N
0.002	3.28	0.23	0.0003	0.608	0.0007	0.0014

Table 2 Typical magnetic properties

Grade	Thickness (mm)	Assumed density (g/cm ³)	Core loss (W/kg)		Magnetic induction (T)	
			$W_{10/50}$	$W_{15/50}$	B_{25}	B_{50}
RM7	0.50	7.65	1.03	2.43	1.59	1.68

Table 3 Specifications of RM high grade

Grade	Thickness (mm)	Assumed density (g/cm ³)	Max. core loss at 50 Hz (W/kg)		Min. induction at 5 000A/m (T)	Min. lamination factor (%)
			1.0 T	1.5 T		
RM7	0.50	7.65	1.05	2.50	1.58	95
RM8	0.50	7.65	1.10	2.70	1.58	95
RM9	0.50	7.65	1.15	2.90	1.58	95

5. ま と め

近年の製鋼技術の発達により、超清浄度鋼溶製技術を無方向性珪素鋼板に適用した結果、次のことがわかった。

- (1) 無方向性珪素鋼板には、その鉄損を最低にする適正結晶粒径があるが、S, O, N 等の微細析出物や介在物を低減することにより、工業的に容易に適正結晶粒径が得られる。
- (2) 介在物が磁壁の移動を防げることを、走査型電顕により直

接観察し、介在物を減少させることにより、鉄損が減少することを明らかにした。

- (3) また介在物が多いと、磁気特性上好ましくない (111) 集合組織が発達しやすいことを Facet pit により示した。介在物は、集合組織を通して、間接的に磁気特性を劣化させる。
- (4) 超清浄度鋼溶製技術により、不純物を低減した結果、鉄損値は大幅に下り、JIS 規格をはるかに上廻る、低鉄損高級無方向性珪素鋼板 RM7 (0.50 mm: $W_{15/50} \leq 2.5$ W/kg) が得られた。