

ソフトライト用精密雰囲気制御 ローラーハース炉の開発*

川崎製鉄技報
29 (1997) 4, 215-219

Development of the Atmosphere Controlled Roller Hearth Type Kiln for High Performance MnZn Ferrites



来島 慎
Shin-ichi Kijima

川鉄フェライト(株)
水島工場 生産技術室
課長



有江 清詩
Kiyoshi Arie

川鉄フェライト(株)
水島工場 生産技術室
(現川鉄フェライト・
タイランド(株))



後藤 国宏
Kunihiro Gotoh

川鉄フェライト(株)
営業部 掛長

要旨

高特性 MnZn フェライトを高い生産性で製造できるローラーハース炉を開発した。焼成時間は従来のプッシャー式連続炉に比べて約 1/2 の 11 h で、生産能力は 100 t/month である。焼成中の温度と酸素雰囲気を精密に制御できるようにした結果、電源用低損失材と高透磁率材が同一条件で焼成可能となった。新材質の低損失材 MB4 と高透磁率材 MA100 は量産連続炉としては最高レベルの特性を実現している。

Synopsis:

A new roller hearth kiln (RHK) has been developed, resulting in both the highest quality and productivity for MnZn ferrites. Using the RHK, the total sintering time is reduced to less than 11 h, that is, a half of the case of the pusher type kiln. The productive capacity of the RHK achieved 100 t/month. Moreover, two different types of MnZn ferrite, i.e., high-permeability and low-power-loss materials, can be sintered simultaneously in the RHK, because the control of oxygen content during the sintering and the subsequent cooling zone is performed precisely. The electromagnetic properties of these materials reach the highest level in mass production. The initial permeability (μ_i) of the high-permeability material, MA100, reaches 10 000 at 100 kHz, and the power loss (P_{ex}) of the low-power-loss material, MB4, is reduced to 270 kW · m⁻³ at 100 kHz, 200 mT and 95°C.

1 緒 言

川崎製鉄の新事業展開の一環として MnZn フェライトの生産を水島製鉄所内の川鉄マグネックス(株)(現川鉄フェライト(株))水島工場にて、1990 年 10 月より開始した。川鉄フェライト(株)では製鉄所内で製造される高純度酸化鉄を主原料としてフェライトコア製品までを一貫生産している。MnZn フェライトは電子機器の電源トランスやノイズフィルターなどの部品材料であるが、電子機器の小型薄型化や高周波化にともない、市場が急成長した。川鉄フェライト(株)も順調に操業を続け、現在 240 t/month の生産体制を確立している。

MnZn フェライトは酸化物系セラミックス材料であり、フェライト材料の中でも優れた磁気特性を有し、高い初透磁率をもつ高透磁率材と鉄損の小さい電源用低損失材が主流を占める。これらの特性は酸化度に依存するため、製造工程の中では、酸素分圧の雰囲気調

整によって製品の特性を決定する焼成工程が重要である。一方、MnZn フェライト工場の製造能力は焼成炉の能力によって決まるため、焼成工程の生産性向上が課題である。高特性と高生産性を両立する技術が望まれる。

MnZn フェライトの焼成炉には、主として、バッチ式箱型炉(batch type box kiln: BK)と連続式トンネル炉の2種類に分類され¹⁾、連続式トンネル炉には2つのタイプ、すなわち、プッシャー式(pusher type kiln: PK)、ローラーハース炉(roller hearth type kiln: RHK)がある。BKは一定容積の空間に製品を入れ、所定の温度と雰囲気条件で焼成し、冷却後取り出すバッチ式である。製品ごとに条件を変えることができ、精密な雰囲気制御が可能である。PKとRHKはトンネル式加熱炉の中を、被焼成物であるフェライトコアとそれを載せる耐火物台板が、一定の速度で通過することによって、所定の温度・雰囲気条件で焼成される連続炉である。PKは搬送方式が高強度の台板を並べて入り口から油圧シリンダーで押し込むプッシャー式である。押し込む圧力に耐える台板の強度に限界があるため、炉の長さは30 mが最大とされている。精密な雰囲気制御を目的とするため、入口と出口の両方を密閉式にし、加熱を電気ヒー

* 平成9年7月31日原稿受付

ターで行う。RHK の搬送は回転するセラミックスローラー上を製品を載せた軽量台板が進む方式で、生産能力が高く、陶磁器などの焼成に使用される。ガスによる直接加熱であり、出入口は開放式が多いため、焼成条件である温度、酸素濃度の制御を必要とする MnZn フェライトの焼成には不向きであると言われていた。そこで従来、高性能 MnZn フェライトの製造には BK、または PK が使用されてきた⁴⁾。しかし、これらの炉は 1 基あたりの生産能力が最大約 70 t/month であり、限界に達している。

川鉄フェライト(株) および川崎製鉄では、精密な雰囲気制御が可能な RHK を開発し^{2,3)}、これまでに 3 基を水島工場内に建設した。これによって、MnZn フェライトの高特性と高生産性を満す焼成が可能となった⁴⁾。本報では当社の開発した RHK の特徴とこの炉を使用して生産される製品の特性について述べる。

2 精密雰囲気制御ローラーハース炉

2.1 開発経緯

川鉄フェライト(株) および川崎製鉄では、すでに述べたように、これまでに 3 基の RHK を建設してきた。Table 1 にその仕様と能力を示す。1 号炉は RHK の可能性を探るためテスト炉として 1989 年 12 月に導入した。1 号炉を用いて基礎データの蓄積と温度・雰囲気制御方法を開発した。その間に 2 号炉として PK を導入し生産を開始した。これらの技術を基に 1991 年 5 月に 3 号炉として RHK を建設し、RHK での量産を開始した。3 号炉は (1) 比較的単純な構造で構成されたトンネル炉であり、機械やシステム上のトラブルが少ない。(2) フェライトコアを積載する耐火物の台板は 350 mm × 350 mm の大きさで 2 列である。(3) 1 号炉と比べると、

列が 2 倍、炉長が 2 倍で、トータルの生産能力は約 4 倍の 70 t/month である。(4) MnZn フェライトコアの磁気特性に関しては、低損失材との同時焼成では、比透磁率が 7000 を越える材質の特性が PK を凌ぐことができないと判明した。そこで、4 号炉としてこれらの点を改良した RHK を開発し、1994 年 5 月から量産を開始した。4 号炉によって、(1) 比透磁率 (μ_r/μ_0) が 7000 を越える高透磁率材と低損失材の 2 種類の材質が同一の炉で同時焼成可能となり、(2) 11 h という短時間焼成で 100 t/month の生産能力を達成したり。

2.2 構造と特徴

4 号炉の構成は Fig. 1 に示すとおり、予備加熱帯、昇温帯、安定帯、冷却帯の 4 ゾーンに分割されている。主な改良点は 5 ヶ所である。第 1 ゾーンは長さ 10 m の予備加熱帯であり、本焼成炉の前に分離して設置されている。この予備加熱の間にフェライト成形体中に含まれるバインダーなどの有機成分を完全に分解、燃焼させて、残炭量をほぼゼロにすることができる。あらかじめ有機成分を除去することによって、本焼成炉にて昇温速度を大きくすることが可能となり、また、比較的大きなコアの焼成も可能である。4 号炉では、大型リングコア R128 (外径 128 mm、内径 96 mm、高さ 30 mm、重量 850g) が生産できる。第 2 ゾーンは昇温帯であり、第 3 ゾーンの前半を含め LPG バーナーによる直接加熱方式を採用している。この直接加熱方式の採用により特に加熱初期に昇温速度を大きくすることが可能となった。試験運転時に最大 1800°C/h を記録している。Fig. 2 に 4 号炉 (RHK) と 2 号炉 (PK) との昇温速度の比較を示す。RHK は昇温時間を 1/2 以下の 3 h にすることができる。第 3 ゾーンは安定帯と呼ばれ、最高温度保持領域である。4 号炉では、全焼成サイクルの内 24% を安定帯とし、PK の 2 号炉の 13% に比べて安定帯の割合が大きい。これは、第 2 ゾーンの昇温速度と第 4

Table 1 Main specifications of the three RHKs and the RK in Kawatetsu Ferrite Corp.

RHK	Start	Length of kiln (m)	Pre-sintering furnace (m)	Kiln time (h)	Productive capacity (t/month)	Loading plate (mm × mm)
No. 1 (Prototype)	Dec., 1989	20	—	10	15	350 × 350 (1 line)
No. 3	May, 1991	40	—	11	70	350 × 350 (2 lines)
No. 4	May, 1994	40	10	11 (With pre-sintering)	100	350 × 350 (2 lines)
PK No. 2	Mar., 1990	30	10	22 (With pre-sintering)	65	340 × 340 (2 lines)

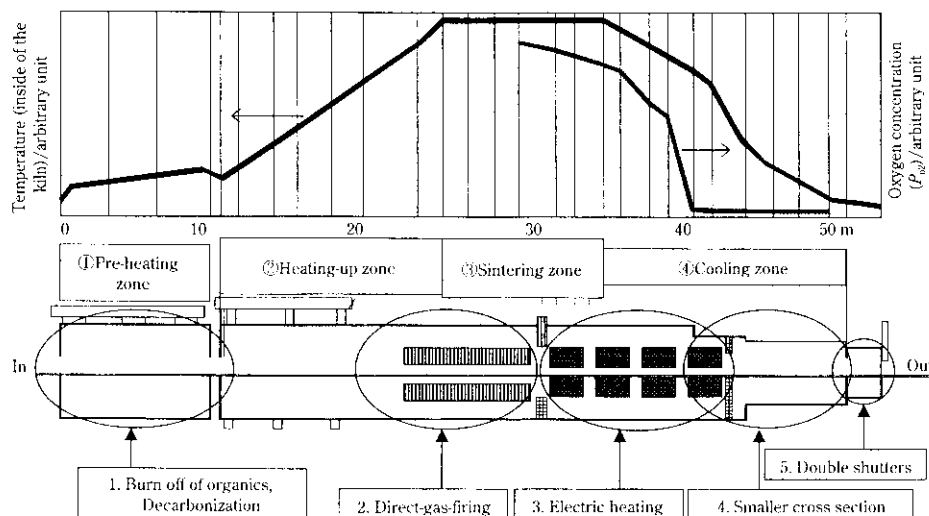


Fig. 1 The schematic view of the new RHK and the sintering conditions

ゾーンの冷却速度を大きくできるためであり、短時間焼成でありながら、充分な最高温度保持時間を得ることができる。Fig. 3 に最高温度保持時間とフェライトの磁気特性との関係を示す。高透磁率材の比透磁率 (μ_i/μ_0) は保持時間に比例して単調に増加し、低損失材

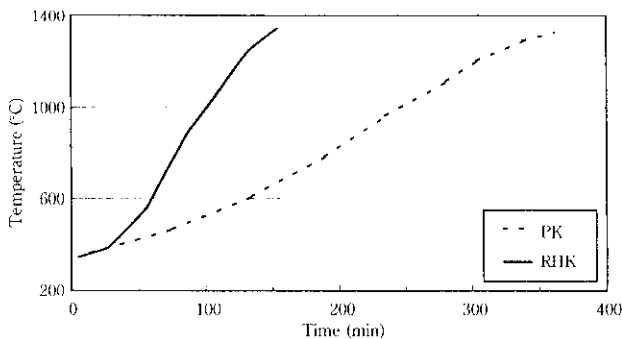


Fig. 2 The difference of the heating step between PK and RHK

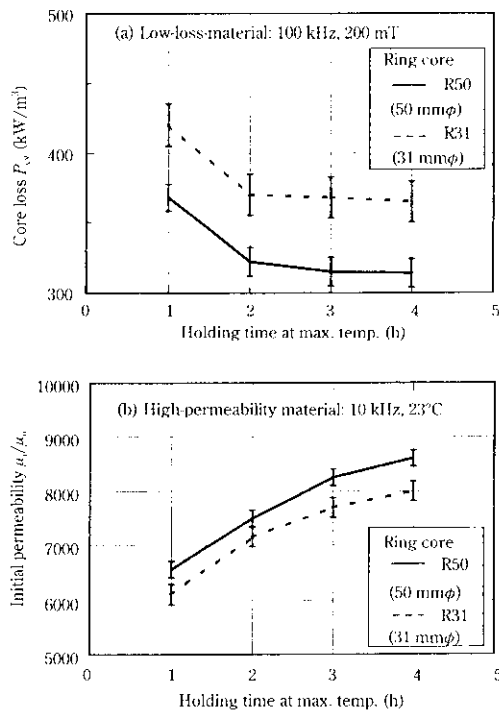


Fig. 3 Holding time dependence of the magnetic properties

の鉄損 (P_{cv}) はほぼ 2h で飽和する。いずれの材質も充分な特性が確保できる 2h を保持時間としたより第 4 ゾーンは冷却帯である。MnZn フェライトはスピネル単相になる相平衡を保つため、冷却途中で温度と酸素濃度を同時に変化させなければならない¹⁰⁾。すなわち温度が低下するにつれて酸素濃度を下げなければならないが、それぞれの温度でスピネル相が安定に存在する酸素濃度の上限を超えると酸化過剰となりヘマタイト相が析出し、下限を下回ると還元されてウスタイト相が析出する。この上下限の範囲内であっても、酸化還元程度によって MnZn フェライト中の 2 価鉄の量が増減し、フェライトの磁気特性に大きく影響する。高透磁率材と低損失材とは、最適な 2 価鉄の量が異なると考えられており、両材質を同時に焼成して高い磁気特性を得るには、温度と酸素濃度を精密に制御し、かつ、冷却帯後半では 100 ppm 以下の酸素濃度雰囲気を実現する必要がある。この Fig. 1 に示すように、安定帯後半から加熱方式を電気ヒーターとし、しかも 3 号がと比べて、冷却帯後半から炉体の断面積を縮小し、さらに、出口に 2 重扉による置換室を設け、温度と酸素雰囲気の精密制御を可能にした。冷却帯酸素濃度 (P_{O_2}) の時間推移を Fig. 4 に示す。改善後は 100 ppm レベルの酸素濃度が安定して得られる。また、炉体断面積を縮小することにより、冷却速度を加速する効果も得られた。Fig. 5 に 4 号が (RHK) と 2 号が (PK) の冷却速度の比較を示す。約 40% の冷却時間短縮を実現している。

2.3 RHK 焼成 MnZn フェライトコアの磁気特性

低損失材の P_{cv} の温度特性を Fig. 6 に示す。MB4 は、4 号が (RHK) で量産した製品の特長として $P_{cv} = 270 \text{ kW/m}^3$ (100 kHz, 200 mT, 95°C) を実現している。また、Fig. 7 に各種高透磁率材の μ_i/μ_0

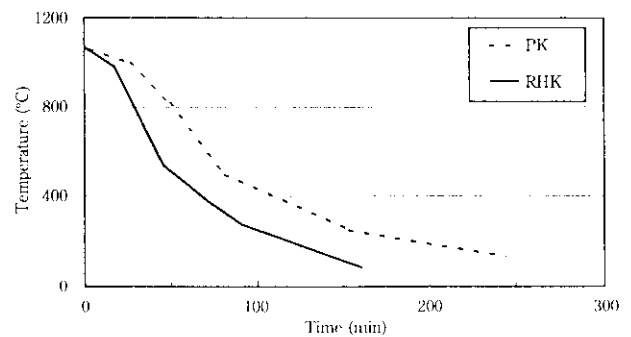


Fig. 5 The difference of the cooling step between PK and RHK

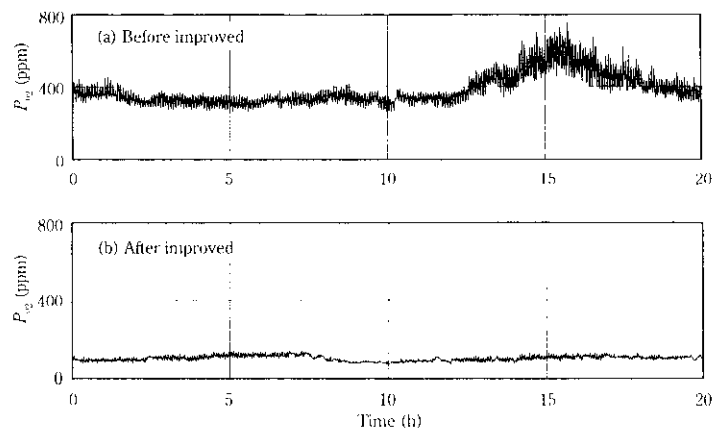


Fig. 4 Time dependence of P_{O_2} in the cooling zone before and after improved

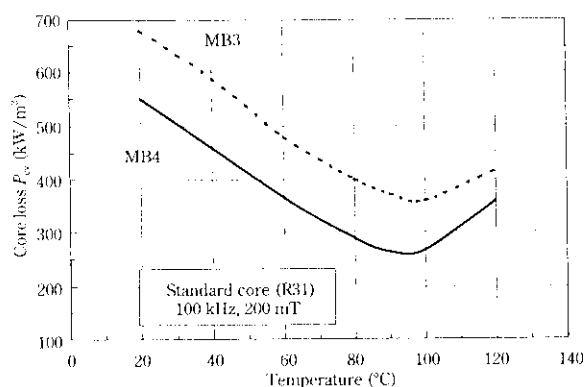


Fig. 6 Temperature dependence of the core loss, P_{cv} , for MB3 and MB4

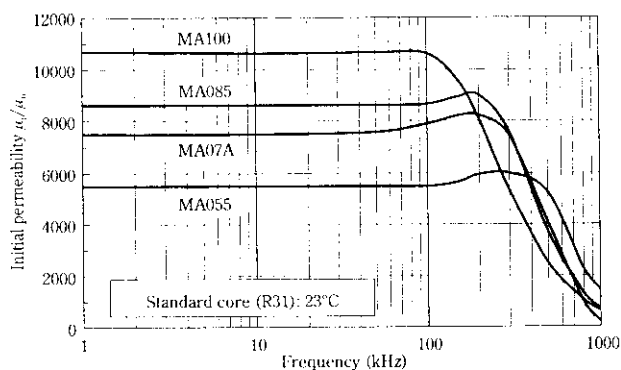


Fig. 7 Frequency dependence of the initial permeability, μ_i/μ_o , for various high-permeability materials

の周波数特性を示す。MA100では、100 kHzの高周波まで $\mu_i/\mu_o = 10000$ (23°C) を維持している。低損失材、高透磁率材とも連続的な量産製品として最高の特性が得られた。両材質は目的とする磁気特性が異なるため、組成や添加物を変えるだけでなく、従来は温度雰囲気が大きく異なる焼成条件で製造されていた。したがって、材質ごとに焼成炉や焼成条件の切替が必要であった。しかしながら、4号炉を使用することにより、焼成条件の切替なしでこの両材質を同時に焼成することが可能となり、本焼成が開発の最大の成果となった。

3 プッシャー炉との比較

3.1 生産性と製品特性

新しく開発した RHK (4号炉) のメリットを PK との比較によって、考察する。一般に、RHK と PK の最も重要な差異は昇温と冷却速度の差であり、これらが MnZn フェライトの磁気特性と生産性に大きな影響を及ぼす。この違いは2つの要因がある。まず、(1) RHK と PK の搬送される耐火物の台板の熱容量の差であり、PK の台板一式は RHK の約5倍の重量を持つ。また、(2) PK の場合、搬送が油圧シリンダーによるプッシャー方式のため、炉内にある全台板と製品を押すための巨大なシリンダーが必要となる。その圧力に耐えうる搬送台板の強度に限界がある。この限界は炉長の制限となり、各ゾーンの長さの設計制約となる。(1)、(2)の要因から、Fig. 2, 5 に示す昇温速度と冷却速度の差が現れる。この中で、昇温速度の差は磁気特性に大きな影響を及ぼしている。Table 2 に高特性フ

Table 2 Magnetic properties of MA100 and MB4 compared between RHK and PK

	MA100		MB4	
	μ_i/μ_o^*	Sintered density (kg/m³)	Core loss P_{cv}^{**} (kW/m³)	Sintered density (kg/m³)
RHK	11 020	5.04	253	4.91
PK	9 640	5.00	273	4.88

*10 kHz **100 kHz, 200 mT, 90–100°C

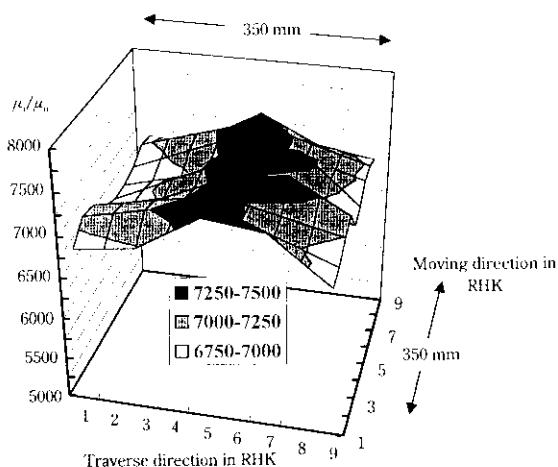


Fig. 8 Distribution of μ_i/μ_o of MA070 on a moving refractory plate in the RHK (The dispersion of μ_i/μ_o of cores is obtained within 5%)

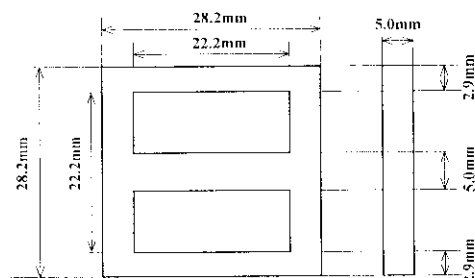


Fig. 9 The dimensions of an ET28A core

ェライト MA100 と MB4 の磁気特性について、RHK と PK の比較を示すとおり、焼結密度の高い RHK の焼成コアの方が特性が高い。焼結密度は透磁率や鉄損に影響する要因の一つであり、昇温速度に大きく依存する^{4,9)}。昇温速度が高いほど焼結密度が高いため RHK が PK に比べて有利である。

次に、製品特性のばらつきに及ぼす影響について述べる。Fig. 8 に、RHK における1台板内の磁気特性の分布を示す。製品は高透磁率材 MA070 の H の字コア ET28A (Fig. 9) であり、350 mm × 350 mm の耐火物台板上に450個の製品を並べて焼成している。この450個の製品の透磁率の分布が+5%の範囲内であることがわかる。PK ではこのような均一性を得ることが困難で、通常+15%である。この原因は2つあり、一つは昇温時の直接ガス加熱方式により、台板内の各コア間のガスの流れによる強制対流伝熱と雰囲気気の置換効果によって焼結を均一に進めることができるためである。他方は、耐火物の台板などの熱容量の差による。すなわち、昇温冷却時における非定常伝熱の際の台板の中央と端部での温度差が大きいことである。温度の追従性の差が製品コアの磁気特性のばらつきの原因

となっていると考えられる。

3.2 搬送設備改善

RHK はローラー上を製品を載せた台板が走行する方式のため、従来から、ローラー破損による落下トラブルが発生しやすく、一度発生すると復旧に 1 週間程度要し、大きな損害を受けていた。川鉄フェライト(株)は高温部のローラーに高温強度の高い SiC ローターを使用し、また、ローラー破損検出システムの導入によって、ローラーの折れを 1 本ごとに検出することができるようにしている。

また、製品を載せる耐火物台板を改良することによって、急速加熱冷却に耐えられるようにし、台板破損落下によるトラブルを防止している。

4 結 言

MnZn フェライトの高特性と高生産性を満たすローラーハース炉の開発を行い、新しく建設した 4 号炉で以下のような性能と製品特性を達成した。

- (1) 新しく開発した精密雰囲気制御ローラーハース炉³⁾の焼成時間は 11 h であり、従来のプッシュャー炉⁴⁾で要した焼成時間を半減した。
- (2) 1 基の炉で生産能力が従来の 70 t/month から 100 t/month に増加した。
- (3) 2 つの異なる MnZn フェライト材質、すなわち高透磁率材と低損失材を焼成条件の切替なしに同時に焼成することが可能となった。
- (4) 高透磁率材 MA100 では、量産で、100 kHz まで比透磁率 $\mu_r/\mu_0 = 10\,000$ を達成した。
- (5) 低損失材 MB4 では、量産で鉄損 $P_{\text{Fe}} = 270 \text{ kW/cm}^3$ (100 kHz, 200 mT, 95°C) を達成した。

5 謝 辞

本 RHK の開発に関し、(株)ノリタケカンパニー 大島 博氏に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) E. Roess: "Modern Technology for Modern Ferrites", Proceedings of the ICF-5 India, (1989), 129-136
- 2) 川崎製鉄(株): 特公平 4-77234
- 3) 川崎製鉄(株): 特公平 6-76257
- 4) S. Kijima, K. Arie, K. Gotoh, S. Nakashima, H. Kobiki, T. Kawano, N. Soga, and S. Gotoh: J. PHYS. IV FRANCE, (1997) Colloque C1, 65-66 (ICF-7 Bordeaux, September (1996))
- 5) 平賀貞太郎, 奥谷克伸, 尾島輝彦: 「フェライト」, (1988), 56-63, [丸善]
- 6) 奥谷克伸: 粉体および粉末冶金, **34**(1987)5, 189-197