

介在物除去用セラミックフィルター 技術の進歩

梅 沢 一 誠*・塗 嘉 夫*²

Progress of Filtration Technologies for Inclusion Removal

Kazushige UMEZAWA and Yoshio NURI

1. はじめに

製鋼技術の中で、非金属介在物に関わる問題は、古くから常に新しい課題として取り組まれ、今もその重要性に変わりはない。

溶湯中の介在物のような異物を除去する単位操作としては、A. 比重差を利用する重力分離、すなわち沈降あるいは浮上分離操作、B. 吸着・ろ過分離操作に大別できる¹⁾。原理的にはガス集塵や、水処理などと同じ技術の範疇に入り、これら二つの単位操作は常用されているものの、金属精錬においては最近までBの単位操作は、あまり適用されてこなかった。特に鉄鋼精錬の分野では、処理温度が高いこともあって、介在物の分離除去技術はAの操作をベースに構築されてきた。

本稿で解説するフィルター技術は、吸着・ろ過操作の代表的な技術であり、1960年代より融点の低いアルミニウムの精錬分野で適用が開始された²⁾³⁾。近年の高温用セラミックス技術の急速な発展に支えられ、各種非鉄金属⁴⁾⁵⁾、鋳鉄⁶⁾⁷⁾、鋳鋼^{8)~10)}、鉄系高合金^{11)~15)}へとより高い融点の金属への適用が促進されつつあり、最近では鋼の世界への適用技術が開発されつつある^{16)~21)}。

これらフィルター技術の発展の歴史を概括することにより、今後の製鋼分野での発展の可能性につき述べる。

2. 熔融金属用フィルターの種類

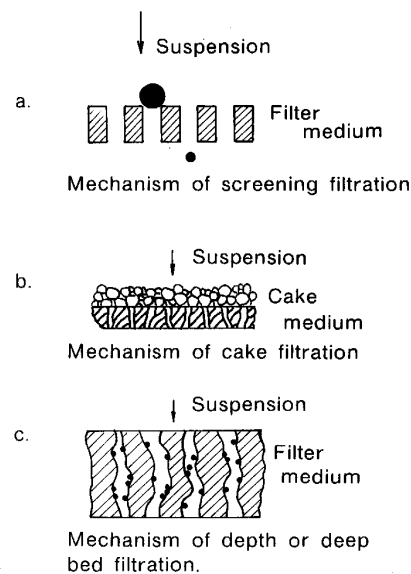
介在物のろ過方式は Fig. 1 のように3種類に大別される¹⁹⁾。a はフィルター孔径が介在物径に比し小さい場合で、耐熱繊維やスチールウール製のフィルターがある¹⁾。b 方式は a または c 方式の処理後半に相当し、捕捉された介在物層（ケーキ）自身がフィルターの役割をする。介在物径に比しフィルター孔径が小さい場合は、除去効率は高いが処理途中で目づまりを起こすので、大

量の溶湯を処理するためには、c のような吸着面積が大きいフィルターを使用する必要がある。

一般に高温域で使用される熔融金属用フィルターは、次のような特性を具備する必要がある¹³⁾。

- ①高い介在物の除去効率
- ②高い生産性
- ③熱的、化学的に安定
- ④低コスト

①と②、②と③あるいは③と④は一般的には相反する特性であり、この両立のため多くの努力が払われてきた。例えばアルミニウム工業では、初期には繊維状の生産性の低いフィルターが使用されていたが、粒状あるいは球



a. screening or medium filtration b. cake filtration c. depth or deep-bed filtration
 Fig. 1. Schematic illustration of the three types of filtration process¹⁹⁾.

平成元年1月13日受付 (Received Jan. 13, 1989) (依頼解説)

* 新日本製鉄(株)広畑技術研究部主任研究員 工博 (Hirohata R & D Lab., Nippon Steel Corp., 1 Fuji-cho Hirohata-ku Himeji 671-11)

*² 新日本製鉄(株)広畑技術研究部研究員 (Hirohata R & D Lab., Nippon Steel Corp.)

Key words : ceramic filter ; non-metallic inclusion.

状の耐火物充填層フィルターの開発により適用が拡大し²³⁾²²⁾, その後セル状セラミックフィルターや, セラミックフォームフィルターが開発されるにおよんで²³⁾²⁴⁾ 飛躍的に発展し, 現在では精練の必須技術になっている。

セル状セラミックフィルターおよびセラミックフォームフィルターが代表的なものであるが, その他にも径の大きい貫通孔を有する衝突穴多孔堰とか³⁵⁾, 積層ルーブ型フィルター等²⁵⁾ も試用されている。

2.1 セル状セラミックフィルター

Photo. 1 a に示すような直管型の孔 (セル) を有するフィルターであり, もとは自動車の触媒コンバーターに使用されるために製造されたものであるが⁴⁾, 介在物フィルターとしてはアルミニウムに最初に適用され

た²³⁾. 押出成型により形が造られ, 乾燥, 焼成されたものである. フィルターの孔の粗さを示す指標としては, 1 インチ平方当たりのセルの数が用いられ, 10~400 cells/in² のものが製造されている. 材質としてはコーディライト, ムライト, ジルコニア, 高温焼成アルミナのものがある。

2.2 セラミックフォームフィルター

このフィルターは, ポリウレタンフォーム中にセラミックスラリーを含浸させ, ウレタン表面にスラリーをコーティングさせた後乾燥, 焼成して造られる²⁴⁾. 焼成時ポリウレタンは分解し, いわばセラミックスのポリウレタンレプリカのフィルターである. Photo. 1 b にその外観を示すが, 複雑な貫通孔を有しているのが特徴である。

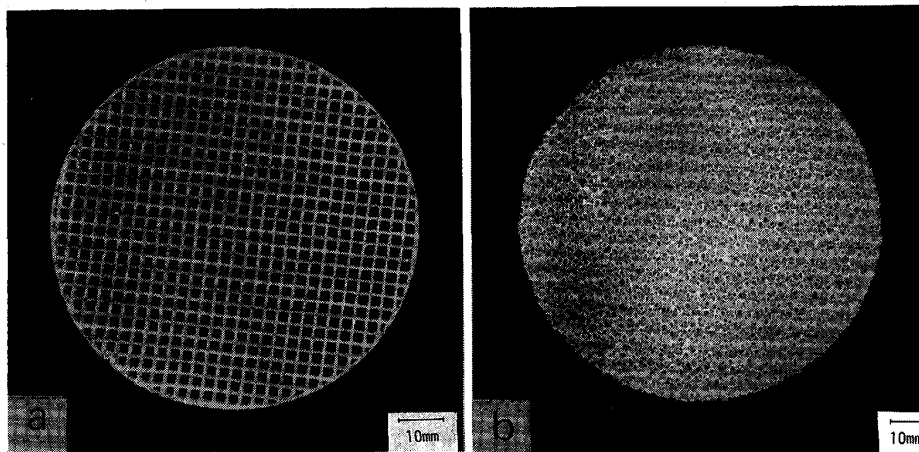


Photo. 1. Topview of monolithic (a) and ceramic form (b) filter.

Table 1. Physical, mechanical and thermal properties of ceramic foam materials¹³⁾.

Material	Temperature capability (°C)	Pore size (ppi)	Avg. pore dia. μm (.001")	Peak pore dia. ⁽²⁾ μm (.001")	Web thck. μm (.001")	Unit bulk density (g/cc)	Unit porosity (%)	Ther. shock (gm) ⁽³⁾	Modulus of rupture ⁽⁴⁾ MPa (psi)	Compress. strength MPa (psi)	Creep def (%) ⁽⁵⁾
NCL Mullite (65Al ₂ O ₃ -35SiO ₂)	1 650	10 ⁽¹⁾	1 194 47	1 287 51	686 27	0.46	78	4.5	1.40 203	2.29 333	0.205
		20	737 29	678 27	508 20	0.47	77	10.5	1.57 228	3.06 445	0.136
		30	610 24	591 23	279 11	0.45	81	2.4	1.16 160	0.74 108	0.595
98Al ₂ O ₃ (98Al ₂ O ₃ -2SiO ₂)	1 750	10	1 321 52	1 521 60	508 20	0.51	82	4.1	1.50 217	2.23 323	0.226
		20	838 33	800 32	356 14	0.61	80	8.1	3.25 472	2.83 411	0.074
		30	559 22	564 22	254 10	0.66	77	6.0	2.88 418	—	—
ZTA Al ₂ O ₃ (79Al ₂ O ₃ -21ZrO ₂)	1 750	10	1 143 45	1 193 47	432 17	0.57	85	0.3	1.16 169	2.45 356	0.151
		20	838 33	813 32	330 13	0.61	83	0.3	1.78 258	2.18 317	0.375
		30	533 21	500 20	229 9	0.69	80	1.0	1.03 150	1.25 181	0.749
PSZ ZrO ₂ LD* (97ZrO ₂ -3MgO) PSZ ZrO ₂ HD*	1 800	10	1 346 53	1 411 56	508 20	0.72	85	1.2	1.10 160	1.40 203	0.185
		20	737 29	690 27	356 14	0.74	84	2.1	1.48 215	1.37 199	0.262
		30	610 24	600 24	254 10	0.84	82	0.2	—	—	0.276
		10	1 397 55	1 237 49	457 18	0.93	81	1.0	2.23 324	2.51 365	0.114
		20	838 33	622 24	356 14	1.18	77	2.2	3.37 489	1.96 285	0.249
		30	584 23	616 24	254 10	1.12	76	0.3	—	—	—

* LD=Low Density HD=High Density

(1) Pore size; ppi=No. of pores per linear inch

(2) Peak pore diameter; determined from pore size distribution curve

(3) Thermal shock resistance; wt. loss after sample was rapidly heated to 1 150°C (2 100°F) and cooled to RT

(4) MOR, 3 point bend test

(5) Percent compressive deformation, %/h for 3h under 5 psi (0.034 MPa) loading at 1 500°C (2 732°F)

このフィルターの孔の粗さを示す指標としては、1インチ長さ当たりのセルの数が用いられ、例えば 30 ppi (porous/in) と表示される。現在最大孔径のもので 3 ppi, 最小で 100 ppi のものまで製造可能である¹⁾。

Table 1 に代表的な材質と諸特性値を示す。内部の空隙率は 80% と高いので、フィルター内表面積は 24 ppi のもので、 $1.5 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 以上にもおよぶ。Table 1 に示すように現在では使用可能温度の高いものまで開発されており、製鋼工程でも材質上は十分使用に耐えられる。

3. フィルター技術の用途と使用法の発展

1980 年代に入ってフィルターは多くの金属の清浄化技術として採用されている。Table 2 に代表的な用途を示す。このように溶湯全体を溶解炉の後ろまたは連続鋳造機直前の流路中で処理する方法と、1個1個の鋳造品を得るために湯道等にフィルターを設置して処理する方法に大別できる。

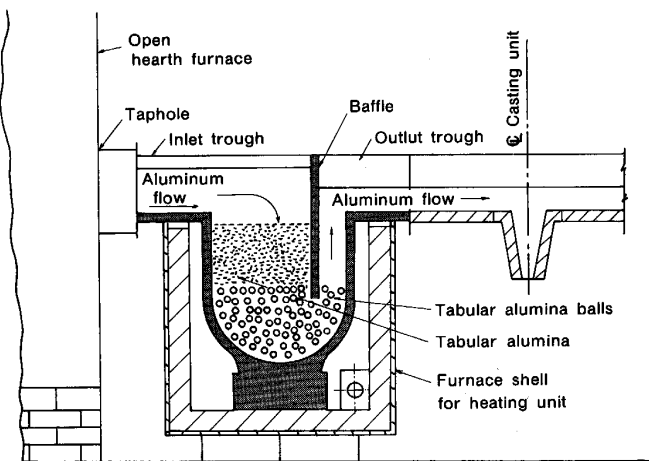


Fig. 2. Deep bed filter type process²⁾.

3.1 非鉄金属溶湯の連続処理

非鉄業界、特にアルミニウム工業では、精錬ドロスの除去のために繊維状フィルターを使用することは、古くからの技術であった。多量の溶湯の高度な処理技術としては、1960 年代に Fig. 2 のような粒状セラミックスを充填したベッドフィルターにより、溶解炉から保持炉あるいは鋳造機の間で、連続的にインライン処理ができるプロセスが開発された²⁾³⁷⁾。アルミニウム溶湯中の不純物はドロスの他に Al_2O_3 , MgO , MgAl_2O_4 , SiO_2 等の酸化物粒子、塩化物、ふっ化物、炭化物、窒化物やガス成分が²⁹⁾³²⁾³⁶⁾あり、これら一連の精錬を行うために、フィルターと回転ノズルからの不活性ガス吹込み装置、SNIF³⁹⁾との組合せや、ガスバブリングとの組合せプロセス³⁸⁾が開発されてきた。MINT プロセスと称せられる一例を Fig. 3 に示す。

これらのプロセスが 1980 年代に入って飛躍的に発展したのは、フィルターとしてセラミックフォームやセル状タイプのもので開発されたことによる。セラミックフォームフィルターは 1961 年 GE 社で最初に使用されたといわれているが³²⁾、実用的なものは 1978 年頃 SELEE 社により製造された⁴⁰⁾。またセル状フィルターは 1963 年に米国特許が出されている⁵⁾²³⁾。

フィルターは Fig. 4 のようにタンディッシュ等の中

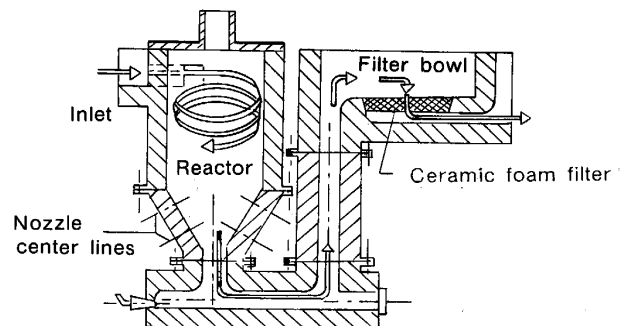
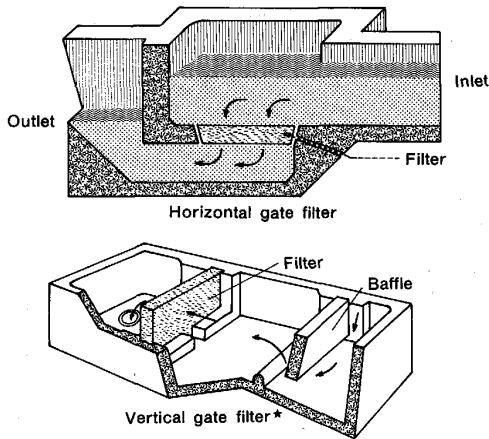


Fig. 3. Schematic of MINT system³⁸⁾.

Table 2. Various uses of filtration.

System	Kind of applied metal	Setting of filter	Reference	Remark
Continuous in-line system	Aluminum	Between melting furnace and holding furnace	2) 29) 30) 34)	
		Between melting furnace and caster or casting pit	24)	
	Super alloy	In the tundish of caster	11)	
	Stainless steel		14) 15)	Trial
	Carbon steel		20) 25)	Laboratory-Trial
Batch system	Aluminum	In the runner for bottom pouring	31) 32) 34)	
	Copper alloy		5) 32)	
	Zinc alloy		4) 34)	
	Cast iron		28) 33)	
	Cast steel		9) 8)	
	Super alloy	In the tundish over the ingot	12) 13)	



★ : Bridgestone catalog S-023
Fig. 4. Types of filter setting⁴¹⁾.

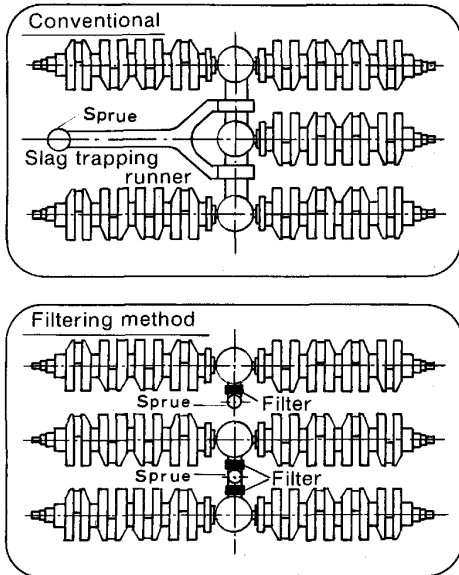


Fig. 5. Example of re-designed runner system which uses 3 ceramic foam filters to allow an extra casting to be produced³²⁾.

央部に水平または垂直に設置される。現在では処理速度として 5~15 t/h の範囲で使用されている²⁶⁾²⁹⁾。

アルミニウムでの使用目的は、光沢仕上材の表面性状改善、フォイル用素材、細線用素材中の硬質介在物の低減はもとより²⁴⁾、特にビール缶用素材への適用により深絞り性の著しい改善効果を上げ、製缶時のリジェクト率が 20 ppm あるいはそれ以下になったのが特筆される²⁶⁾³²⁾。

3.2 鋳物への適用

鋳物業界においても介在物は製品の表面、内部欠陥、機械的性質や切削性に影響し、フィルター技術の導入により著しい改善が計られている³²⁾。

フィルターは Fig. 5 の使用例に示すように、下注湯

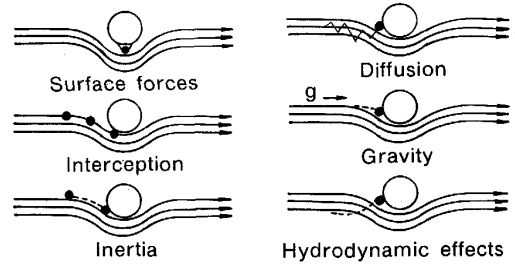


Fig. 6. Models of inclusion particle transport in deep-bed filtration¹⁾.

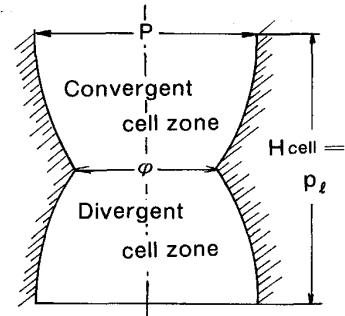


Fig. 7. Model of dimensionless unit cell²⁶⁾.

道の途中に設置され、鋳型直前で介在物が除去される。またこの部分で溶湯の流れが整流化される副次効果もある。これを利用している例としては、ダイカスト鋳造へのフィルターの使用がある³²⁾。非鉄金属でフィルターが多く用いられているものとしては、70/30 真鍮、リン青銅、鉛入り砲金、アルミ青銅やマグネシウム合金、亜鉛合金など多岐にわたる⁴⁾⁵⁾³²⁾³⁴⁾。

鋳鉄への適用は 1982 年に Voros ら⁴²⁾ により発表されて以来適用が拡大した。ダクタイル鋳鉄への適用により、疲労強度や切削性の向上に効果が期待できる⁶⁾³³⁾。鋳鋼についても使用されており、大量の鋳鋼を鋳込む場合はフィルターを設置したタンディッシュを介して鋳型に注入されることもあるが、再酸化や鋳型内での湯の激しい流動により効果が半減することがあるので、湯道に設置した方が望ましいといわれている⁸⁾。

このように高温の金属への適用が拡大しているが、鉄系金属への適用に際しては、フィルターの低コスト化、強度の向上、除去効率の改善、湯道構造の検討等がさらに必要である⁹⁾。

4. フィルターによる介在物除去機構

4.1 低流速域での介在物除去モデル

介在物がフィルター中の骨材表面にトラップされるメカニズムは、Fig. 6 の六つの種類に大別できると考えられる。CONTI らは⁴³⁾ Navier-Stokes の式を解いて各介在物粒子の軌跡を求め、主としてさえぎり効果による骨材への衝突確率から層流条件(低流速域)での除去モデル

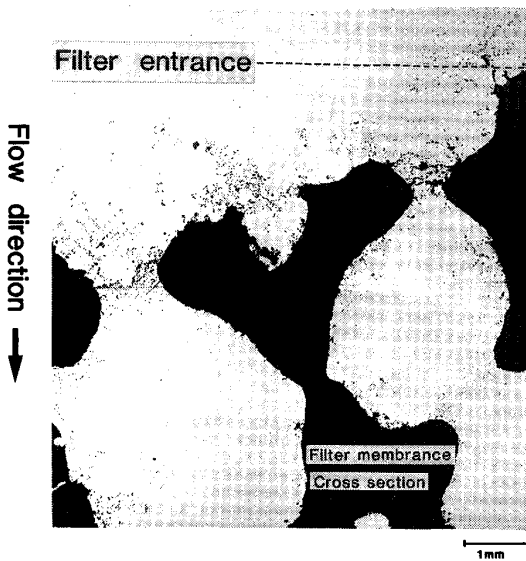


Photo. 2. Optical microscopy view of alumina inclusions captured at the filter entrance and inside the filter.

を以下のように提案している。

フィルターによる介在物の除去率 η は、フィルター表面での除去率 η_M 、フィルター内面への付着率 η_C 、付着した介在物の残存率 p とすると (1) 式のようになる。

$$\eta = \eta_M + \eta_C \cdot p \dots\dots\dots (1)$$

フィルター孔径より介在物径が小さい場合 $\eta_M = 0$ 、また付着した介在物のはがれがないとすると $p = 1$ となる。1個のセルを Fig. 7 のようにモデル化し、おのおのの介在物粒子の軌跡の計算より各セルでの捕捉率 η_i を求め、フィルター全体での除去率 η を (2) 式のように求めた。 λ_i はフィルターパラメーターで、(3) 式で定義される。

$$\eta = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \cong \eta_c = 1 - \exp(-\lambda_i H) \dots\dots (2)$$

$$\lambda_i = \frac{2}{H_{cell}} \ln \left(\frac{1}{1 - \eta_i} \right) \dots\dots\dots (3)$$

ここで H_{cell} : 1個のセルの長さ, H : フィルター厚み
 C_{in} , C_{out} : フィルター前後の介在物濃度
 介在物は Fig. 6 中の主としてさえぎり (Interception), 重力 (Gravity), 流れ (Hydro-dynamic) 効果の三つのメカニズムでフィルター内面にトラップされる。Photo. 2 は実験室規模のアルミキルド鋼を用いたテストにおけるフィルター中の介在物トラップの様子を示すが、介在物はセルの径の縮小部側にトラップされている。

(2) 式による除去効率 η と処理条件の関係は Fig. 8 のようになり、流速が大なるほど η は低下し、小さい介在物ほど除去しにくい。あるいはフィルター孔径が大きいほど効率が悪いことになる。

APELIAN ら⁴²⁾⁴⁴⁾ はフィルター内への介在物の吸着速度

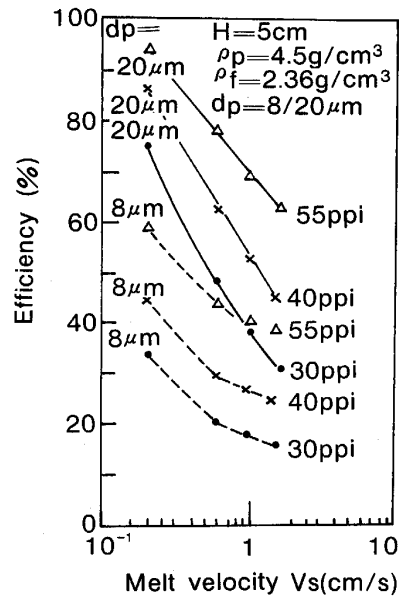


Fig. 8. Calculated initial filter efficiencies as a function of melt velocity²⁶⁾.
 ρ_p : Particle density ρ_f : Filter density

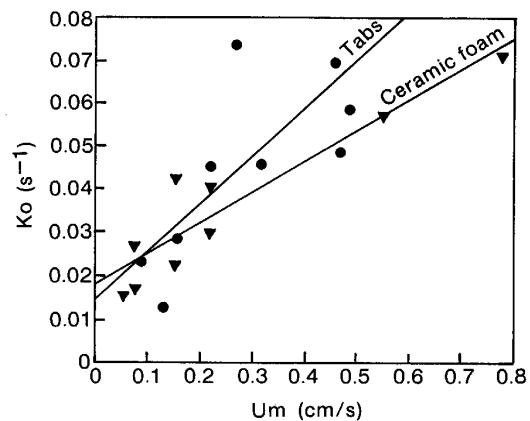


Fig. 9. The kinetic parameter K_o as a function of melt velocity for a 5-cm bed of tabular alumina (●) and for the ceramic foam filter (▼)⁴⁴⁾.

($\partial\sigma/\partial\tau$) が、(4) 式のように介在物濃度 C に比例すると仮定して、モデル式を提案している。

$$\partial\sigma / d\tau = KC \dots\dots\dots (4)$$

$$K = K_o(1 - \sigma / \sigma_m) \dots\dots\dots (5)$$

$$\eta = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} = 1 - \exp\left(-\frac{K_o H}{U_m}\right) \dots\dots\dots (6)$$

$K_o = f(\sigma, U_m, d_i)$, σ_m : 介在物の最大吸着量, U_m : 流速, d_i : 介在物径

K_o はこのように定数ではないので、 $K_o/U_m = \lambda_i$ とすると (5) 式は (2) 式とまったく同一になる。彼らは各種実験を行い K_o におよぼす操作条件の影響を検討した。Fig. 9 に K_o と流速 U_m の関係を示すが、 U_m が大きいほど吸着係数に相当する K_o は大きくなる。これは

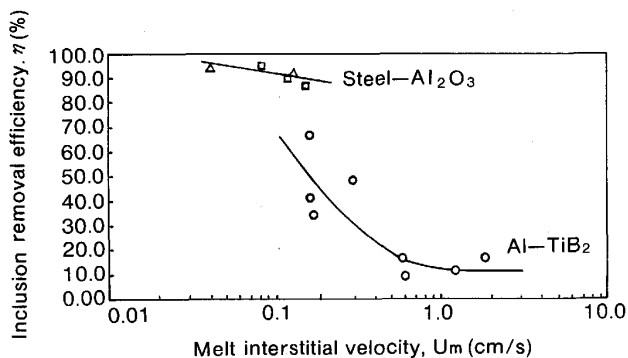


Fig. 10. Effect of melt interstitial velocity, U_m , on inclusion removal efficiency, η . 10 cm long cordierite filters were used for the Al-TiB₂ system and both 5-cm (\square) and 10-cm (\triangle) long alumina filters were used for the steel-Al₂O₃ system⁴²⁾.

低流速域ではさえぎり効果が主体であるのに対し、流速が大きくなると慣性衝突効果がきいてくるためと考えた。ただし η は U_m/U_m の関数であり、 η と U_m の関係は式の上からは明確でないので、実験により求める必要がある。彼らはアルミニウムと溶鋼を用いた実験を行い⁴²⁾、Fig. 10 のようにアルミニウムの場合は流速の増加によって除去率は低下するが、溶鋼の場合は除去率も高く、流速の影響は必ずしも明確でない結果を得ている。溶鋼の方が除去率が高いのは、処理温度が高いので一度付着した介在物の残存率が高い、すなわち (1) 式でいえば p が大きく、アルミニウムの場合は p が小さいと考えた。

(2) ないし (6) 式はアルミニウムのような $U_m \leq 1$ cm/s の世界では、これまで比較的現象をよく説明するモデルであったが、溶鋼の場合にはその生産性より、少なくとも 10 cm/s 以上の流速域で使用されることになり、これらのモデルが必ずしも適用できるとは限らない。Fig. 10 をはじめ、市橋ら²⁷⁾ の溶鋼の実験では流速が大なるほど、またフィルター孔径が大なるほど除去率が向上するという報告もあり、実験をもとにした新たなモデル化が必要である。

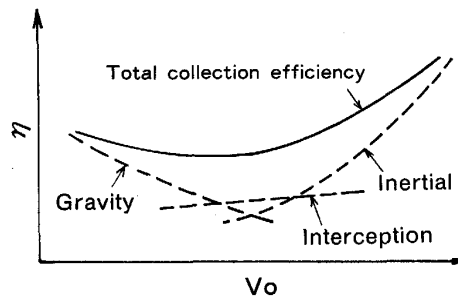
4.2 高流速域での介在物除去モデルの提案

ガス集塵あるいは水のろ過技術においても、フィルターによる粒子の除去理論が検討されており、高流速域ではこの方面での研究が参考になるものと考えられる。この場合 Fig. 6 に示したメカニズムの中で、さえぎり効果、重力効果（浮上分離）の他に慣性衝突効果が大きなウエイトを占めてくる。

単骨材層による浮上分離効率 η_g は、藤田ら⁴⁵⁾ により (7) 式で与えられる。

$$\eta_g = \frac{\epsilon_0(1-\epsilon_0)(\rho_p-\rho_f)d_p^2 \cdot g}{6\mu u} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 ϵ_0 : フィルターの空隙率 [-]



η : Collection efficiency V_0 : Velocity of fluid
Fig. 11. Qualitative expression of particle capture mechanism⁴⁶⁾.

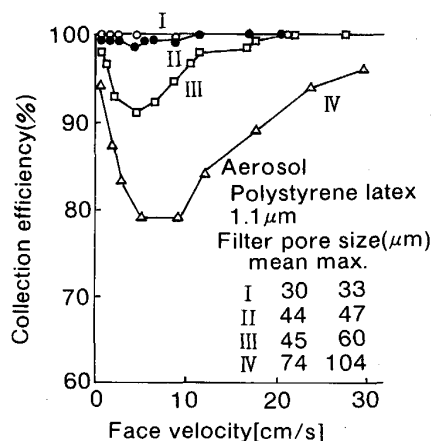


Fig. 12. Dust collection efficiencies of the ceramic filters⁴⁸⁾.

- ρ_p, ρ_f : 粒子および流体の密度 [g/cm³]
- d_p : 粒子の直径 [cm]
- g : 重力加速度 [cm/s²]
- μ : 流体の粘性 [g/cm·s]
- u : 流体の速度 [cm/s]

またさえぎり分離効率 η_i 、慣性衝突分離効率 η_t は、吉岡ら⁴⁶⁾⁴⁷⁾ により (8) 式、(9) 式で与えられている。

$$\eta_i = \frac{1}{3} Re^{1/2} R^2 \dots\dots\dots (8)$$

$$\eta_t = f(Re, \phi) \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 Re : レイノルズ数 = $d_f \cdot \rho_f \cdot u / \mu$

R : さえぎりパラメーター = d_p / d_f

d_f : フィルター孔径

ϕ : 慣性パラメーター = $C_m \rho_f u d_p^2 / 18 \mu d_f$

C_m : カニングガムの補正係数

フィルター全体としての除去率 η は、(7), (8), (9) 式と (10) 式より (11) 式のように表される。

$$\eta^* = \eta_g + \eta_i + \eta_t \dots\dots\dots (10)$$

$$\eta = 1 - \exp \left\{ - \frac{4(1-\epsilon_0)}{\pi d_f} \eta^* \right\} \dots\dots\dots (11)$$

これら三つのおおのこの効果を模式的に表示すると

Fig. 11 のようになり、流速の増加に従って除去率は最初は低下するが、高流速側で慣性衝突効果が大きくなり、除去率は再び増加する可能性があることを示している。ダスト集塵へのセラミックフィルターの適用例の中にも、Fig. 12 のように 10 cm/s 以上の流速域において、除去率が增大する結果も報告されている。

いずれにしても流速の大きい場合や、溶鋼の場合のメカニズムについては、現時点では十分研究が進んでいるとは言いきく、今後共実験と解析を通じて、新しい理論の構築と適用法の検討を行う必要がある。

5. 製鋼工程におけるフィルター技術

5.1 鋼へのフィルター技術の適用

ここでは、Al より融点がおよそ 700°C 以上も高いスーパーアロイ、ステンレス鋼および普通炭素鋼へのフィルターの適用例を紹介する。

航空宇宙用などに用いられる超合金 (IN-713LC, IN-718, IN-738, MarM200 + Hf など) の使用条件の苛酷化に伴い、欠陥の許容範囲は著しく減少された¹¹⁾。この要求に応えるため、1980 年代に入ってから特に米国において、各種のフィルターの適用が試みられ、製品の飛躍的な品質向上が達成された¹²⁾¹³⁾⁴⁹⁾。我が国においては、超合金とほぼ融点の似たステンレス鋼の、連続鋳造タンディッシュへの試みが 1985 年に開始され、その有効性が確認されている¹⁴⁾¹⁵⁾⁵⁰⁾。この年代に入ってから、介在物のフィルター骨材への衝突や吸着による捕捉作用に有利と考えられるフォームタイプの適用が主流になるとともに、処理量も kg オーダーから t オーダーへとアップしてきている。このように高融点金属へのフィルター技術の研究が盛んになった背景にはアルミナやジルコニアのような高温用セラミックスの開発努力も見逃せない¹²⁾。

他方、超合金やステンレス鋼より融点がさらに 100~200°C 高い普通炭素鋼 (低炭アルミキルド鋼) へのフィルターの適用が超合金よりやや遅れ 1983 年に実験室規模の研究が開始され¹⁸⁾⁴⁹⁾ 現在に至っている。フィルターの普通炭素鋼への適用は 1500°C を超えるセラミックスにとっては極めて苛酷な条件下での使用であるため処理量もただか 1.5~200 kg どまりであり、生産性は低い^{17)~19)21)27)51)~54)}。

著者らはぶりき用低炭アルミキルド鋼 (C ≒ 0.05, Si ≒ 0.01, Mn ≒ 0.2, Al ≒ 0.050%) を用い過去にはほとんど実験例のないと思われる 50 t 規模で、かつ、溶鋼流速が 10 cm/s を超える領域までフォームタイプフィルターの適用を試みた²⁰⁾。この試験で得た知見は現状の製鋼プロセスにおける大量処理時のフィルターの課題にも触れることになるので以下にその概要を紹介する。

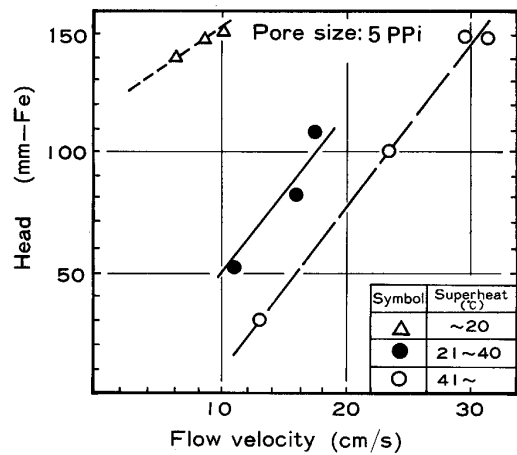


Fig. 13. Influence of temperature and head of liquid steel on flow velocity of liquid steel through filters.

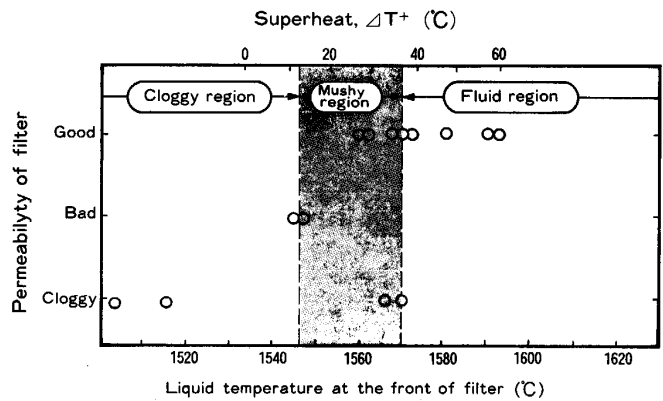


Fig. 14. Influence of temperature of liquid steel at the front of filter on permeability of filter.

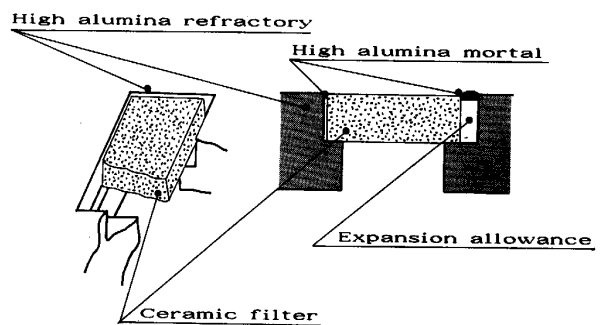


Fig. 15. Schematic drawing of the ceramic filter installation.

5.2 連鑄工程への適用時の留意点とタンディッシュへの設置

5.2.1 溶鋼ヘッド、過熱度と溶鋼流速

溶鋼流速は介在物除去ならびに実機での鑄造可能量を推定する上から重要である。また、溶鋼の過熱度は注入初期の溶湯の通湯性を確保する意味から重要な要因である。Fig. 13 は 30 kg の真空溶解炉を用いて溶鋼流速、

溶鋼ヘッド、溶鋼過熱度の関係を求めたものであり、これを実機のフィルター設計の指針とした。

また、Fig. 14 に示したように溶鋼の通過性を十分に確保するにはフィルター前面の溶鋼過熱度は 38°C 以上が望ましい。この高い過熱度は実機製造時の一つの大きな問題点として指摘できよう。

5・2・2 フィルターの予熱方法と施工

注入初期の溶鋼の通過を容易にするには過熱度の確保はもちろんのこと、フィルターの予熱が重要である。フィルターは加熱時若干、熱膨張することから¹³⁾ 急激な予熱速度は望ましくなく、スポーリングテストを行った結果、100°C/min 以下が良好であった。また、ガスバーナーによる局所的な加熱やフィルターへの炎の直接加熱も望ましくなかった。また、熱膨張代を吸収する施工法の工夫が必要であった。Fig. 15 に施工法の一例を示す。

5・2・3 鑄造初期の留意点

実機の鑄造初期は取鍋底部の詰め物の一部がタンディッシュ内に流出し溶鋼通過前のフィルターの表面を覆い、フィルター気孔部を目詰まりさせることがある。このことを防止するために、フィルターの上流側にタンディッシュに注入された溶鋼が所定の高さになるまで溶解せずにくい止める働きをする鉄板を用いる方法を考案し、この鉄板の厚みと挿入方法を検討した。これにより鑄造初期のフィルターの目詰まりの原因となる大型外来

系在物をフィルターの上流側で浮上分離させることができる。著者らの試験ではおよそ 2~3 mm の鉄板厚みが適切であった。

5・2・4 タンディッシュへの設置方法

連続鑄造時のタンディッシュにセラミックフィルターを利用する場合、タンディッシュの縦断面方向と水平断面方向の二通りの設置方法が考えられる。前者の場合、鋼浴高さ方向でフィルターにかかる溶鋼静圧が一定とならないため、フィルター高さ方向の流速が異なることになる。

著者ら²⁰⁾ はフィルターにかかる溶鋼ヘッドを一定とし、フィルターの溶鋼通過に必要な有効面積に自由度を持たせるため、水平大断面フィルター堰を採用した。実機タンディッシュへの設置例は Fig. 16 に示したとおりである。これと溶鋼ヘッド、鑄造速度によりフィルターを通過する溶鋼流速の制御を可能とした。用いたフィルターはフォームタイプであり、材質はアルミナ質とジルコニア質である。フィルターのサイズは孔径が 5 ppi、フィルター一枚当たりの大きさは 102 mm × 178 mm、厚みは 25 mm である。これを 10 枚使用した。溶鋼通過の有効全面積は $8 \times 10^4 \text{ mm}^2$ 強である。5 ppi のフィルターを用いた理由は、これより小孔径になると溶鋼通過性に難があるためである。なお用いたフィルターの物理的、機械的、化学的性質は W. H. SUTTON ら¹³⁾ の値と基本的に類似している。

5・3 連鑄工程への適用結果

Fig. 17 に介在物除去率(η)におよぼす溶鋼流速とフィルター材質の関係を示した。同図には著者らの実験室規模の結果ならびに、1 cm/s 以下の低流速側の η の一例として D. APELIAN⁴⁹⁾ の結果も併示した。

これよりフィルター材質の影響は明らかでなく、むしろ溶鋼流速の影響の大きいことがわかる。溶鋼流速を 25 cm/s より 0.1 cm/s まで変化させると、速度の低下によって η はいったん低下するが 1~2 cm/s 以下にな

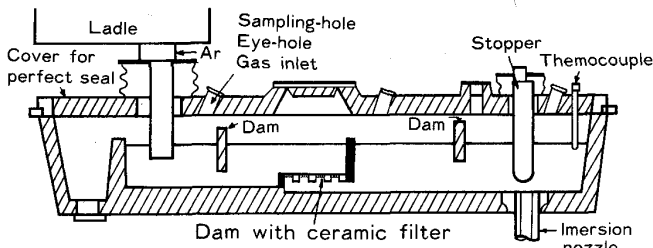


Fig. 16. Schematic diagram of the apparatus for filtration experiments.

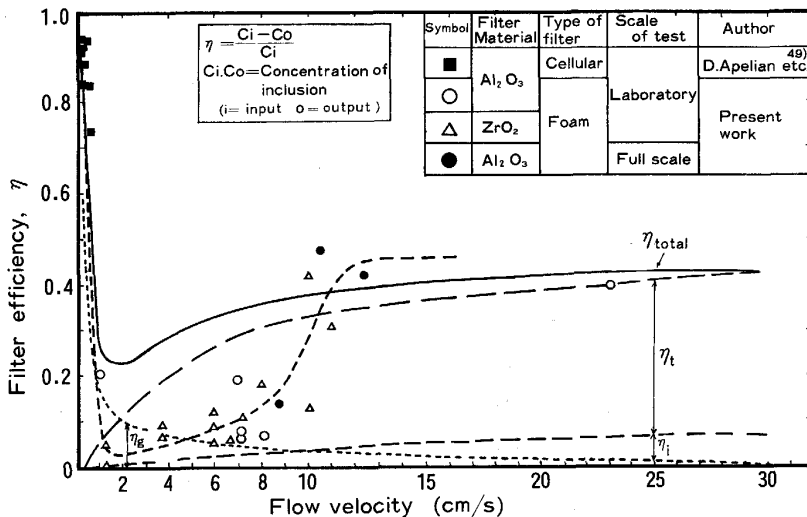


Fig. 17. Effect of flow velocity on filter particle removal efficiency.

ると上昇する。最も除去率の悪い領域は 2~8 cm/s であることが知れる。

前述した (11) 式の除去理論に基づいて溶鋼中の懸濁アルミナ粒子の除去率を沢田²⁰⁾ が計算した結果の一例を Fig. 17 中に示した。本計算結果は骨材間の干渉効果や介在物同士の凝集体現象については考慮されていないものの、1 cm/s 以下の低流速下で除去効率が增加するのは η_g 効果によるものであり、数 cm/s 以上の速度で除去率の上昇を示すのは η_i , η_j 効果によるものと理解できる。したがって Fig. 17 に示した実験結果の傾向も計算結果と類似することから低流速下では η_g 効果が表れたことを示し、10 cm/s 以上の速度で除去率の上昇を示しているのは η_i , η_j 効果が表れたものと考えられる。また Fig. 17 の実験結果の傾向は懸⁴⁸⁾ により微細なダストをろ過する場合のガス流速と捕集効率が調査され確認されている。

試験後のフィルターは顕著な溶損や脱落は認められなかった。また、フィルター内の介在物捕捉状況は低流速の世界で確認されているフィルターのウェブへの付着が認められるものの、フィルターの入口近傍のケーキフォーメンション²¹⁾ は認められなかった。本試験に用いたフィルターは 2000 cm³ 以上の体積の気孔を有している。このフィルターは、気孔内に介在物が完全に充満するまで捕捉できるとし、捕捉される介在物の組成をアルミナとすると約 8 kg の介在物が捕捉できることになる。フィルターリング前の全酸素量を 20 ppm、除去率を 40%、溶鋼処理量を 50 t とすると約 0.8 kg のアルミナ介在物が捕捉されたことになる。したがって、この値はフィルターの捕捉能力内であり、ケーキフォーメンションがろ過の後半で起こると考えると²¹⁾ ケーキフォーメンションの認められなかったことも理解できる。しかし、溶鋼通過量がさらに増加するとフィルター上面と孔内部を覆う形で付着介在物が成長し、この付着介在物がある厚さ以上となると溶鋼がフィルターを通過できなくなる¹⁸⁾ と考えられることから、さらなる溶鋼通過量試験が望まれる。

5.4 実用化のための問題点と課題

まず数 10 t 規模の実機試験で得た現象から問題点を掘り下げて見る。

第一は η の向上方法である。3 t/min 以上の生産性を確保しながら η を向上させるには、さえずりパラメーターを大きくすることである。具体的にはフィルター孔径 (d_f) を小さくし、フィルターを通過する介在物サイズ (d_p) を大きくすることである。フィルター孔の小径化は溶鋼の通過性確保に難があるとともに注入の早期にフィルター目詰まりをひき起こす懸念があり、大量処理方策としては採用しがたい。したがって η を向上させるには d_p を大とする必要のあることから、今後これらの要素技術の開発が望まれる。

第二は大量連続処理の問題である。介在物の全捕捉量はフィルターの空孔部面積あるいは体積に比例すると考えると、これを大きくすることが有効であるが、設置場所やコストの増大の問題からおのずと限界があろう。これを解決するにはフィルターに供給する溶鋼の清浄性をいっそう向上させる以外に道はないと考えられる。他方、フィルターの目詰まりが発生すれば、何らかの手段で交換できれば大量処理への適用も可能であるが、コスト面からの問題も生じてこよう。低コストかつ迅速交換方式が開発されれば定常域だけでなく連続製造時の慢性的問題である継目域の品位向上の新たな清浄化手段としての発展も残されている。

つぎに介在物の除去メカニズムについて述べる。三次元的な複雑な構造からなるセラミックフィルターによる介在物除去メカニズムは気孔と骨材の構造、介在物および流体の運動が密接に影響するであろう。

しかし、これらについての実験や解析情報が不足しているように思われる。最近、グラフィックシステムを使った乱流シミュレーションによる流動現象の可視化技術が急速に進歩している⁵⁵⁾。これらの活用により介在物除去メカニズムがさらに理解され、また介在物除去に最適なフィルター構造が明らかになれば、フィルターの新しい利用法も開けてくる可能性もあろう。

以上にフィルター技術の問題点と課題について概括的に述べた。最後に製鋼分野におけるフィルター技術は前工程の二次精錬技術の発展に負うところも大きく、フェインセラミック技術のさらなる向上とあいまって次世代を担う重要な要素技術となることを期待したいと思う。

6. おわりに

溶湯中の介在物を除去するためのフィルター技術について、発展の歴史をふりかえりながら、製鋼工程への適用の可能性と課題につき述べた。

非鉄金属工業や少量の高級金属に対しては、フィルター技術は既に完全な実用化技術となっているが、溶鋼のように高温で大量処理を前提とすると、まだ開発が緒についたばかりであり、残された課題も多い。今後使用目的、使用方法、高効率化、低コスト化に対して、多くの試みがなされることが望まれる。

文 献

- 1) J. W. BROCKMEYER and D. S. AUBREY: *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, **8** (1987), p. 63
- 2) K. J. BRONDYKE and P. H. HESS: *Trans. TMS*, **230** (1964), p. 1553
- 3) M. V. BRANT, D. C. BONE and E. F. FMLEY: *J. Met.*, **23** (1971), p. 48
- 4) J. D. RUTHERFORD, G. P. WALKER and C. A. LOONG: *Trans. SDCE, 13th Int. Die Cast Congr., Expo* (1985)
- 5) M. SAHOO, J. R. BARRY and K. KLEINSCHMIDT: *Trans. AFS*, **89** (1981), p. 611
- 6) J. BRIGGS and W. SIMMONS: *2nd Int. Conf. Austempered*

- Ductile Iron (1986), p. 385
- 7) 提 信久, 長堀宏昭, 山口俊彦: 早大鋳物研報告, **43** (1988), p. 77
 - 8) J. M. STAMPER: Trans. AFS, **93** (1985), p. 867
 - 9) P. KANICKI: Mod. Cast., **75** (1985), p. 22
 - 10) C. BATES and R. MONROE: Steel Founder's Soc. America (1987), p. 75
 - 11) W. H. SUTTON: Proc. 7th ICVM (1982), p. 916
 - 12) D. APELIAN and W. H. SUTTON: Superalloys (1984), p. 421
 - 13) W. H. SUTTON, J. C. PALMER and J. R. MORRIS: Proc. 6th World Conf. Investm. Cast (1984), p. 15
 - 14) 山田桂三, 渡辺十四雄, 河原木武志, 田代時男: 鉄と鋼, **71** (1985), S992, **72** (1986), S1071
 - 15) 中尾隆二, 竹内英磨, 鈴木康夫: 鉄と鋼, **71** (1985), S991
 - 16) J. HAPP and M. G. FROBERG: Giessereiforschung, **23** (1971), p. 1
 - 17) P. F. WIESER: AIME TMS Paper, No. F84-4 (1984)
 - 18) 市橋弘行, 川島康弘, 池田隆果: 鉄と鋼, **69** (1983), S207
 - 19) L. S. AUBREY, J. W. BROCHMEYER and M. A. MAUHAR: Steelmak. Proc., **69** (1986), p. 977
 - 20) 塗 嘉夫, 梅沢一誠, 野村文夫, 今若 寛, 沢田郁夫, 大橋徹郎: 鉄と鋼, **72** (1986), S205
 - 21) J. LIU and P. F. WIESER: Trans. AFS, **95** (1987), p. 629
 - 22) L. C. BLAYDEN and K. J. BRONDYKE: Light Metals (1973), p. 493 [AIME]
 - 23) U. S. Patent, No 3090094 (1963)
 - 24) J. E. DORE and J. C. YARWOOD: Light Metals (1977), p. 171 [AIME]
 - 25) 植村健一郎, 高橋正光, 小山伸二, 吉田紳吾, 小南孝教, 尾上善則: 材料とプロセス, **1** (1988), p. 306
 - 26) L. J. GAUCKLER, M. M. WAEBER, C. CONTI and M. JACOB: J. Met., **37** (1985), p. 47
 - 27) 市橋弘行, 川島康弘, 池田隆果: 鉄と鋼, **71** (1985), p. 705
 - 28) R. R. METTMANN: Giesserei, **72** (1985), p. 571
 - 29) J. A. CLUMPNER, J. E. DORE and W. L. HOFFMANN: Light Metals (1986), p. 847 [AIME]
 - 30) J. A. EADY, D. M. SMITH and J. F. GRANDFIELD: Alum. Tech., **86** (1986), p. 93
 - 31) F. R. MOLLARD and N. DAVIDSON: Trans. AFS, **86** (1978), p. 479
 - 32) A. J. BROOME: Castings (1985), p. 26
 - 33) W. SIMMONS: Founding Weld. Proc. Eng., **26-1** (1986), p. 7
 - 34) S. K. MILLER: Die Cast. Eng., **28** (1984), p. 54
 - 35) 田口喜代美, 半明正之, 山上 諄, 鈴木克紀, 松尾和彦, 山田末広: 鉄と鋼, **71** (1985), S993
 - 36) L. J. GAUCKLER, M. M. WAEBER, C. CONTI and M. JACOB: Light Metals (1985), p. 1261 [AIME]
 - 37) H. E. MILLER: Aluminium, **48** (1972), p. 368
 - 38) J. E. DORE and B. R. MILLIGAN: Alum. Tech., **86** (1986), p. 101
 - 39) A. G. SZEKELY: Metall. Trans. B, **7** (1976), p. 259
 - 40) T. PEDERSEN, R. C. BALHISER, D. A. BATES and J. E. DORE: Wire Journal, **12** (1979), p. 74
 - 41) A. VOROS and G. GYOROK: BISIS Trans. 21434, **53** (1982)
 - 42) S. ALI, D. APELIAN and R. MUTHARASAN: Can. Met. Q., **24** (1985), p. 311
 - 43) P. NETTER and C. CONTI: Light Metals (1985), p. 1261 [AIME]
 - 44) R. MUTHARAHAN, D. APELIAN and C. ROMONOWSKI: J. Met., **33** (1981), p. 12
 - 45) 藤田賢二: 水道協会誌, **510** (1977), p. 12
 - 46) 吉岡直哉, 江見 準: 化学工学, **31** (1967), p. 632
 - 47) 吉岡直哉, 江見 準, 松村秀樹, 安並正雄: 化学工学, **33** (1969), p. 381
 - 48) 懸 欣司: 化学装置, (1983) Mar., p. 87
 - 49) D. APELIAN: Japan-U. S. Cooperative Science Program Seminar on Solidification Processing, Massachusetts (1983)
 - 50) K. YAMADA, T. WATANABE, K. FUKUDA, T. KAWARAGI and T. TASHIRO: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., **27** (1987), p. 873
 - 51) 市橋弘行, 川島康弘, 池田隆果: 鉄と鋼, **71** (1985), S990
 - 52) 市橋弘行, 川島康弘: 鉄と鋼, **72** (1986), S204
 - 53) D. APELIAN, R. MUTHARASAN and S. ALI: J. Mater. Sci., **20** (1985), p. 3501
 - 54) D. APELIAN, S. LUK, T. PICCONE and R. MUTHARASAN: Steelmak. Proc., **69** (1986), p. 957
 - 55) 桑原邦郎: 日本物理学会誌, **40** (1985), p. 877