

耐熱セラミックスとしての耐火物： 現状とこれから

木村 守弘*

The Present Status and Future Outlook of Refractories as a Ceramic Material

Morihiko KIMURA

耐火物はセラミックスの一分野を占めると共に鉄鋼製造の重要部材となっている。

今回、本講演では「耐熱セラミックスとしての耐火物：現状とこれから」という演題で、次の三つの切り口から述べる。

(1)最近 10 年間の日本の耐火物産業の推移と昨今の国際比較について、統計データを基にマクロ的に把握する。

(2)最近 10 年間の耐火物技術の変遷について日本を中心に、外側（鉄鋼技術との対応）と内側（耐火物技術

の変化）とから見る。

(3)耐火物技術について、これからの予測と希望を、外側と内側の立場から述べる。

以上について概説的に展望を試みたい。

1. 耐火物産業の推移

1.1 日本の状況

耐火物を耐熱セラミックスとして扱え、その 1988 年での産業規模を販売金額から見ると、セメント・陶磁器・ガラス等セラミックス産業の約 2.5 兆円（またはファインセラミックスを含む場合 3.6 兆円）の中で耐火物は 2416 億円で約 7~10% を占める。また、鉄鋼の約 10 兆円に対しては、その 2~3% ほどの規模で 2 桁小さい。

耐火物産業の内部から見る（図 1）と、粗鋼と耐火物生産量の推移では粗鋼生産量は 1986 年の 96 百万 t から 1988 年の 106 百万 t と増加しているが、耐火物生産量は 1986 年 173 万 t、1988 年 174 万 t で、粗鋼生産増に伴うだけの増加が見られず横這いである。つまり 1979 年の 113 百万 t と比べ 1988 年の粗鋼生産量は 94% まで回復しているが耐火物生産量は 1979 年の 254 万 t と比べ 1988 年は 68% にとどまっている。その内訳を見ると耐火れんがは 168 万 t から 94 万 t (56%) と減少が大きい。不定形耐火物は 87 万 t から 79 万 t (91%) と変動が少ない。詳細な内訳を見てみると、生産量の減少が大きいものは、粘土質、珪石、クロム・マグネシア系、ドロマイト等の耐火れんがと、ラミング材、スリング材の不定形耐火物である。増加したのはマグネシア・カーボン、アルミナ・カーボン等のカーボン（黒鉛）含有れんがと、キャストブル、吹付材、パッチング材・コーティング材の不定形耐火物が挙げられる。

更に最近の目立った動きとして図 2 に示すような特徴

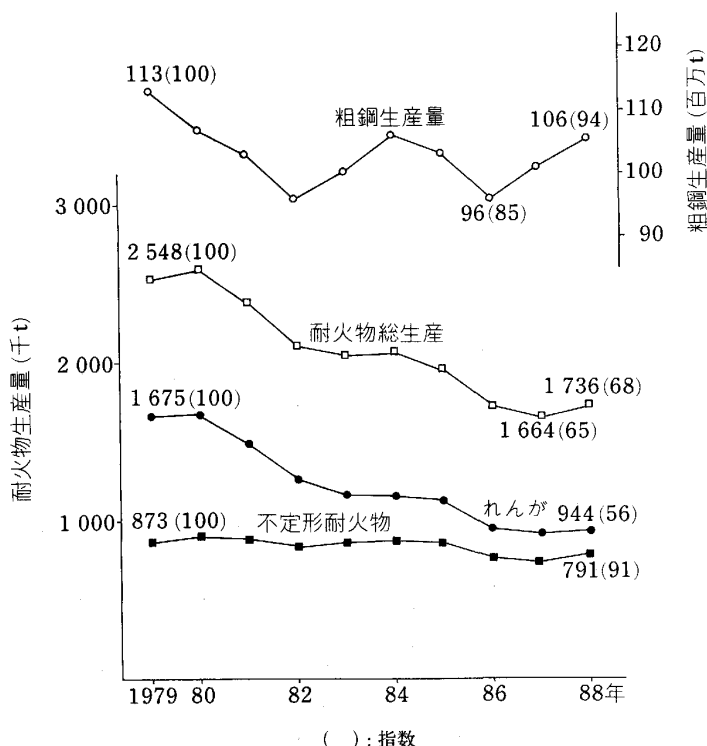


図 1 粗鋼と耐火物生産量の推移（日本）^{1)~3)}

平成元年 9 月本会講演大会における浅田賞受賞記念特別講演 平成元年 11 月 8 日受付 (Received Nov. 8, 1989)

* 品川白煉瓦(株)専務取締役(現:顧問) 理博 (Senior Managing Director, Now Advisor, Shinagawa Refractories Co., Ltd., 2-2-1 Otemachi Chiyoda-ku, Tokyo 100)

Key words : refractories industry ; transition ; international comparison ; technology progress ; future.

が看取される。耐火物の不定形化率（不定形耐火物生産量/総生産量：％）は1979年34％から1988年46％と伸びている。その中で鉄鋼向け耐火物の不定形化率は

1979年の36％台から1988年は50％に達し、耐火物全体の不定形化率46％と比較して、鉄鋼における不定形化がより進んでいる。一方1983年頃からの伸びは少々鈍化している。鉄鋼向け耐火物の出荷比率は64～70％で推移し耐火物の鉄鋼への依存は大きい。その中で、鉄鋼1t製造に要する耐火物消費量としての耐火物原単位は1979年の14.9kg/s.t (kg/steel.t)から年々減少し1988年11.8kg/s.t (対'79年比79％)にまで下がっている。特に耐火れんがの原単位低下が1979年9.5kg/s.tに比べ5.9kg/s.t (62％)と大きい。逆に不定形耐火物は若干増となっている。

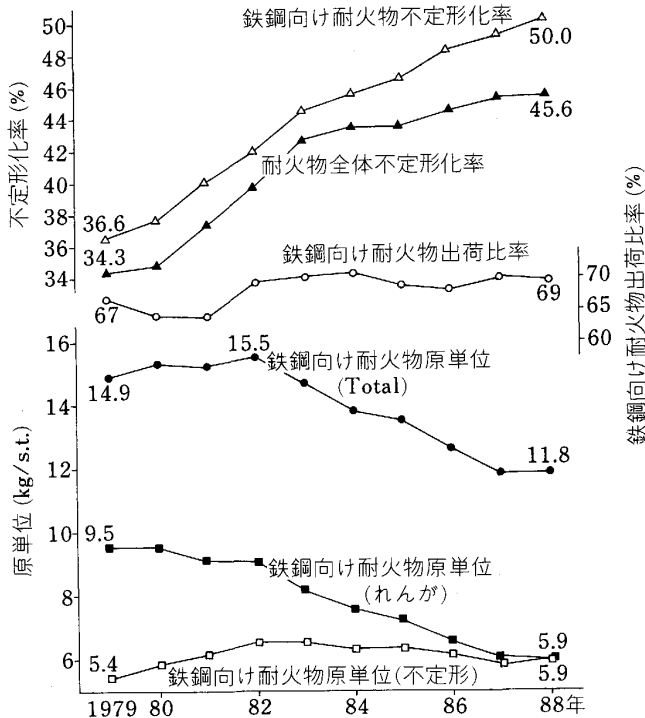


図 2 耐火物・不定形化率と鉄鋼向け耐火物・使用原単位の推移 (日本)²⁾

以上まとめると、次のようになる。

(1)耐火物技術の進歩によって鉄鋼向け耐火物原単位が大幅に低減し、鉄鋼業に貢献している。一方、耐火物生産量は鉄鋼生産量に追従できていない。

(2)質的中味を見ると、耐火れんがは高アルミナ・塩基性・カーボン(黒鉛)含有等の高級れんがが増え、粘土質等の低級品は減っている。一方、不定形耐火物の変化はなだらかであるが、総体的使用比率(不定形化率)は一段と上がり、流し込み材(キャストブル)や補修材(吹付材等)が増えている。

1.2 国際比較

日本の耐火物産業を先進諸国あるいは近隣諸国のそれと比較考察していると以下のごとくになる。

1.2.1 日本・USA・W. Germany (以下WGとする)-Europe の比較⁵⁾⁶⁾⁹⁾¹⁰⁾¹⁹⁾

表 1 日本・USA・W. Germany (WG)-Europe の耐火物販売量比較²⁾⁴⁾⁷⁾⁸⁾

(単位:千t/年)

	日 本	USA	W G		PRE Countries
			耐協メンバー	全体* ^D	
耐火れんが	967	1 100	610	1 070	3 197
1. 粘土質	351	374	239	289	902
2. 高アルミナ質	155	297	140	150	503
3. 珪石	5	28	22	22	52
4. 塩基性 (マグ・クロ、クロ・マグ、マグ、ドロ、マグ・カーボン)	221	202	134* ^A	465	1 157
5. 炭素、黒鉛	54	16	19		
6. 炭化珪素	33	9	8		
7. 耐火断熱	35	29	21		
8. ジルコン	79	5			
9. その他	33	140* ^B	26	144	583
不定形耐火物 (対総生産量)	851 (47)	1 076 (49)	525 (46)	730 (41)	1 797 (36)
1. 耐火モルタル	85	93			
2. キャスタブル	339	246			
3. プラスチック	52	265* ^C			
4. その他	375	472			
総 計	1 818	2 176	1 135	1 800	4 994
指数 (対前年比)	(106)	(107)	(102)		
粗鋼生産 (百万t/年)	105.7	81.0	41.0		148.3
耐火物原単位 (kg/s.t.)	11.8	16.0* ^E		16.9	
耐火れんが	5.9		4.8	10.4	
不定形耐火物	5.9			6.5	

註) USA 1988 Data 未入手 (表 1, 2)

*^A: ドロマイトを含まない (ドロマイト概略 180 万 t/年) *^B: 61 年以前に不明のドロマイト, ろう石等を含む *^C: ラミング材を含む

*^D: PRE Data による *^E: 原単価/平均単価

PRE Countries: EC 諸国 (除 Ireland), Austria, Swiss, Sweden, Norway (15 か国)

まず日本と USA, WG あるいは Europe を比較 (表 1) すると、耐火物販売量を表に示すように、日本に比べて USA の粗鋼生産量は 1987 年 81 百万 t と少ないが耐火物販売量は 217 万 t と多く、WG の粗鋼生産量は 1988 年 41 百万 t と日本の 40% くらいであるが耐火物販売量は 180 万 t で日本と変わらない。これは出荷先内容の違いによるところが大きいものと思われる。鉄鋼向け耐火物原単位をみると、欧米の 16~17 kg/s.t に比べ日本は 11.8 kg/s.t と 30% ほど差があり、日本がいかに少ないかがわかる。また、WG は自国 (自社) 原料の活用でドロマイトレンガの販売量が概略 18 万 t と多い。WG のドロマイト専門メーカーは WG 耐火物協

会に未加盟のため、全耐火物を見るには PRE (欧州耐火物連盟) のデータが有効で、これには Ireland を除く EC 11 か国と Austria, Norway, Sweden, Swiss の 15 か国の耐火物メーカーが加盟している。

生産品種の面からは地域別に若干の特徴がある。原料事情を反映して USA は高アルミナ質レンガが多く、Europe は塩基性レンガが相当多い。また、両地域共に珪石レンガを相当量生産している。不定形化率については USA (49%) が最も高いが若干低下の兆しが見えている。一方 Europe はまだ低い。

耐火物の出荷先別比率 (表 2) では鉄鋼向けは日本 70%, USA 50%, WG 32% (輸出を含めた推定では 50~55%) と日本の鉄鋼依存度が高い。地域的な差として USA では非鉄 (銅, アルミニウム等), ガラス, 化学 (石油) 等へ、WG ではガラスあるいは輸出への比率が大きい。WG の輸出は EC 内を中心としたものである。また、日本の区分にないものとして、USA のエンジニアリング・コントラクター 1987 年 6.3%, WG の家庭暖房 1988 年 5.2% が目につく。

日本の耐火物工業・技術を欧米のそれと大づかみに比較してみると、それぞれ例外もあり独断と私見の入ることは免れないが、表 3 のごとくだろうか。日本の耐火物工業・技術は先にも述べたように鉄鋼依存度が高く客先要求に合わせた製品供給、ゾンドライニング (炉の部位別損傷状況に合わせて最適の耐火物を当てる: Zoned lining) の徹底、更に補修技術の進歩・普及、不定形耐火物の進展等により耐火物の耐用性を向上させている。これらによって耐火物の活発な開発進歩が進み、ユーザー・鉄鋼側においては耐火物使用原単位の大幅な低減となっ

表 2 日本・USA・W. Germany (WG) の耐火物出荷比率²⁾⁴⁾⁷⁾

(単位: 千 t/年)

	日 本		USA(出荷金額)		WG(耐火レンガ)	
	1988	(%)	1987	(%)	1988	(%)
鉄 鋼	1247	69.7	808	50.1	196	32.0 (50~55)
非鉄金属	37	2.1	143	8.9	11	1.7
機 械	78	4.4				
セメント・石灰・ ドロマイト	65	3.7	61	3.8	8	1.3
ガラス	47	2.6	115	7.1	19	3.1
その他窯業	69	3.9	138	8.6	29	4.8
化 学	11	0.6	51	3.1	9	1.5
コークス・ガス・電気	7	0.4	12	0.7	27	4.4
焼却炉	53	3.0				
エンジニアリング・ コントラクター			102	6.3		
家庭暖房					32	5.2
その他	86	4.8	71	4.4	20	3.3
輸 出	87	4.9	112	6.9	261	42.7
合 計	1788		1612		610	

* () 内数値: 輸出分を含めた推定値

表 3 日本・USA・Europe の耐火物工業、技術の比較

項 目	日 本	U S A	Europe
実 態			
鉄鋼依存度	大 (65~70%)	少々低い (約 50%)	大きい方 (約 60%)
動 き	M & A? (Merge & Acquisition)	A 多し	M 主体
メーカーの考え方	* 客先要求に合わせた製品の供給	* 既製品販売 * 利益品選択生産	* 既製品販売 * 独立性強い
炉材使用の考え方 (Application)	* ゾンドライニング (Zoned lining) * 補修技術の進歩 * 不定形化の進展	* ライニング単純化指向 * 原単価請負方式指向 * 不定形化の進展	* ライニング単純化指向
生産体制	* (対客先ニーズ) 少量多種生産 * 高圧成形 * 設備合理化意欲大	* 単純形状, 大量生産方式 * 設備投資意欲減退	* 単純形状, 大量生産方式 * 合理化設備進展
生産性	少々悪い	良い	良い
品質管理	* 総合的水準は最高	* QC システム 寸法外観管理緩い	* QC には熱心
技術開発・改良	* 総合力は欧米に比し高い * 主要技術を欧米に輸出 * Daily 改良と対応力に優れる	* 開発意欲減退, 技術導入指向 * 日本からの技術輸出盛ん * 細かい改良はしない	* 地道な開発力あり, 独自技術を有する * 日本からの技術輸出盛ん * 比較的細かい改良はしない
原 料	* 輸入 30~40% で範囲が広い	* 自国 (自社) 原料の活用度高いが範囲が少々狭い	* 一般的に: 自国 (自社) 原料の活用度高いが範囲が少々狭い (WG: 少々異なる)

て大きく貢献した。一方、れんが形状数が増えること等から少量多種生産となり更に高压成形・高付加価値指向のため耐火物生産性の低下が現れている。

欧米はどうかというと、既製品販売により単純形状化して大量生産方式をとり設備の合理化とあいまって生産性を上げている。この相違が耐火物の製品価格に影響していることは明らかである。技術開発力については、最近の USA は開発意欲減退し技術導入指向と一部連続製造用耐火物の輸入依存が強いが、Europe は独自の開発力を有する。日本は総合的开发力で欧米に比し高く、主要技術を欧米にも輸出している。具体的には、高炉炉前材(マッド材、樋材)、マグネシア・カーボンれんが、浸漬ノズル、スライドバルブ用耐火物等がある。また、原料についても日本は輸入品が 30~40% (人工合成原料も加えると半分以上が輸入) と多いが、USA は高アルミナ質、粘土・シャモット、Europe ではマグネサイト・ドロマイト等、自国原料の活用度が高い。

以上まとめてみると、USA の場合はそれぞれの利益優先による価格競争から低価格競争へと走り、開発力の低下・減退から業界の活気が失われていったようだ。そこに異業種からの企業買収 (Acquisition) と売却劇が繰り広げられて、現在は混沌の状態にあるのではないかと。我々にとって考えさせられるところである。

Europe も USA に似た要素を多く持っており、人材も集まらない状況となり困っているようである。しかし、Europe の場合は主として、耐火物企業間の合併・吸収 (Merge) によって体質の強化が図られている。最近 WG では、ティッセン (Thyssen) グループ系耐火物メー

カーであるドロミット (Dolomit) 社、マルチン (Martin und Pagenstecher) 社、マグネジタール (Magnesital) 社が合併し、現在一方の大メーカー、ディディア (Didier) 社と並び、二大メーカー並立状況になろうとしている。

日本では現在のところ M & A (企業の合併・買収) はあまり行われていない。個々の企業で努力している。しかし先行き長い目で見れば販売面から規模の伸びは陰しかつ難しいので、それぞれサバイバルの峠にさしかかっていると思われる。

1.2.2 韓国・台湾・中国の比較¹²⁾

近隣の韓国、台湾、中国の耐火物生産状況 (表 4) を見ると、様子かなり異なる。日本に比べて粘土質れんが等の低級品が多い。また、中国は珪石れんがの生産量が桁違いに多く、これはまだ平炉が多く残っている他、電気炉、ガス・レトルト等、珪石れんがを多く使用する炉があるためと思われる。これらの国の不定形化率についてはまだ低く、中国は特に低い。また、鉄鋼向け耐火物原単位も韓国、台湾、中国の順に高く 18~50 kg/s. t と日本よりかなり高いが韓国、台湾は欧米に追い付きつつある。中国は日本の 3~4 倍の耐火物原単位であり日本の 30 年前くらいの水準にあたる。業界については、韓国は耐火物会社数が 1987 年に約 55 社だが、事実上 1 社による半独占状態にあり、この会社が業界をリードして欧米並みの水準に近づき耐火物の供給をしている。台湾は耐火物会社数が約 15 社といわれるが、3 大会社で生産の約 80% を占めている。一方、自由市場であり耐火物の輸入量も大きい。特に高級品の輸入が多い。中

表 4 韓国・台湾・中国の耐火物生産状況¹¹⁾

(単位: 千 t/年)

	韓 国		台 湾	中 国
	1987	1988 年度	1988 (推定)	1987
耐火れんが 粘土質れんが 高アルミナ質れんが 塩基性れんが SiC・C系れんが ジルコン質れんが 断熱れんが その他	282	[310] 192 26 53 9 17 8 4	86 52 10 6 — 10 6 2	(%) ^{*A} 粘土質れんが 2835(47) 珪石質れんが 1417(24) 高アルミナ質れんが 614(10) マグネシアれんが 283(5) タールボンド 236(4) その他 189(3)
不定形耐火物 (対総生産量) 耐火モルタル キャストブル プラスチック 吹付材 その他	161 (36)	[196] [(39)] 27 63 9 55 42	42 (33)	不定形 425(7)
耐火物合計 (千 t)	445	[506] 488	128	約 6000
推定鉄鋼向け出荷量 (千 t)	307	337	—	約 3000
粗鋼生産量 (百万 t/年)	16.8	19.1	8.3	59.0
推定耐火物原単位 (kg/t)	18.3	17.6	—	50.8(37 ^{*B})

Data source : 韓国 : 大韓耐火物工業協同組合資料及び朝鮮耐火化学工業資料 [] 内より 台湾 : 光和耐火工業より

*A 原資料値を 100% に換算 *B 中国発表資料に示された原単位

表 5 鉄鋼業における技術進歩の歩み¹³⁾

*原表を一部省略または変更
アンダーライン部分は耐火物に関連深いもの

工 程	設 備	40 年 代	50 年 代	60 年 代	今 後 の 方 向
製 鉄 <溶銑予備処理>	コークス炉		CDQ	長寿命化 熱間溶射補修 成形コークス	溶融還元製鉄法 F. M. S.
	焼 結 炉 ペレット焼成炉 高 炉	大型化 高压操業 ステーブクーリング 重油吹込み	ペレット製造法 TRT スラグの資源化 脱りん 鑄床脱珪	排熱回収 オイルレス操業 微粉炭吹込み 長寿命化 ベルレス装入	
製 鋼 <二 次 精 錬>	転 炉 電 気 炉	大型化 OG 法 高電力操業 大型化	底吹き転炉 Q-BOP	上底吹き転炉 炉底出鋼式	スクラップ多量溶解法 ニアネットシェイブ 高速連鑄+直送圧延 半凝固加工プロセス 高度表面改質
	連 続 鑄 造 (連統鑄造)	各種二次精錬法		直流電気炉	
圧 延		ステンレス圧延 高速化・自動化・直結化	ホットチャージ	直送圧延 制御圧延 6段圧延機 冷延プロセスの連続・直結化	真空蒸着亜鉛めっき

(註) 各技術が最初に導入または実用化された時期を示す

国は粗鋼生産量が 59 百万 t と日本の約半分だが耐火物生産量は約 600 万 t と日本の 3 倍以上、鉄鋼向けにしても約 300 万 t で日本の倍以上あり、耐火物製造プラント数も 450~500 と言われ、日本の 4 倍くらいある。各国の原料面での特徴は、中国が全般に豊富であり、マグネサイト、高アルミナ質(ばん土頁岩等)、りん状黒鉛等の天然原料と並んで、電融マグネシア、炭化珪素等の人工合成原料の生産も盛んであり大量に輸出している。一方、韓国はろう石が豊富で輸出している他、海水マグネシアクリンカーの自国生産をしているが、台湾には有力な資源がない。これらの資源を基に中国及び韓国は耐火物輸出の力を持っており東南アジアへの輸出を行っているが、中~高級品については技術力あるいは使用先での迅速な対応には問題があると思われる。

2. 耐火物の技術的変遷

最近の日本の耐火物技術の変遷を外側と内側からみると以下のようなものである。

2.1 外側・鉄鋼技術との対応¹⁴⁾²⁴⁾

耐火物は高炉、転炉、連続鑄造等、鉄鋼業における技術進歩(表 5)に対応して改良・開発を行ってきており、今後も鉄鋼依存度からみて大きな状態の変化はないと思われる。表 5 のアンダーライン部は耐火物に特に大きな

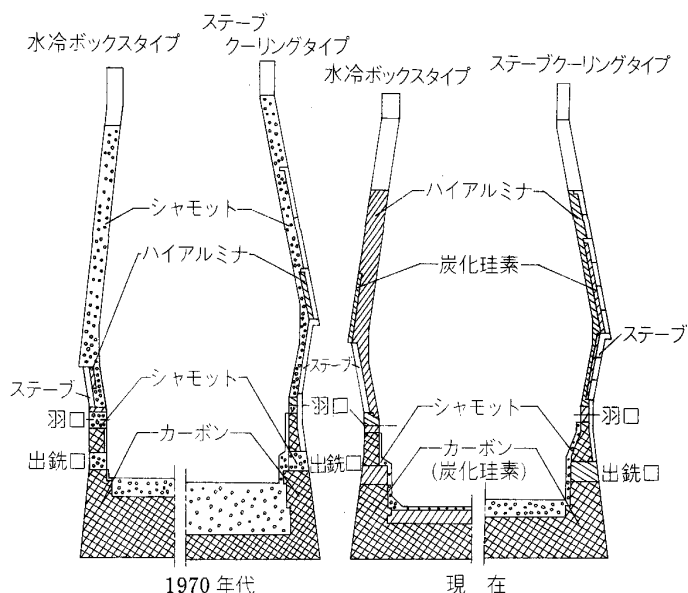


図 3 高炉の変化と耐火物の変遷(日本)

影響を与えたと見られるものである。

以下に主要鉄鋼設備について、最近約 10 年間における鉄鋼技術と耐火物変遷をいかつままで簡単に述べる。

2.1.1 高炉(図 3)

高炉は大型化により上・中部はシャモットレンガが

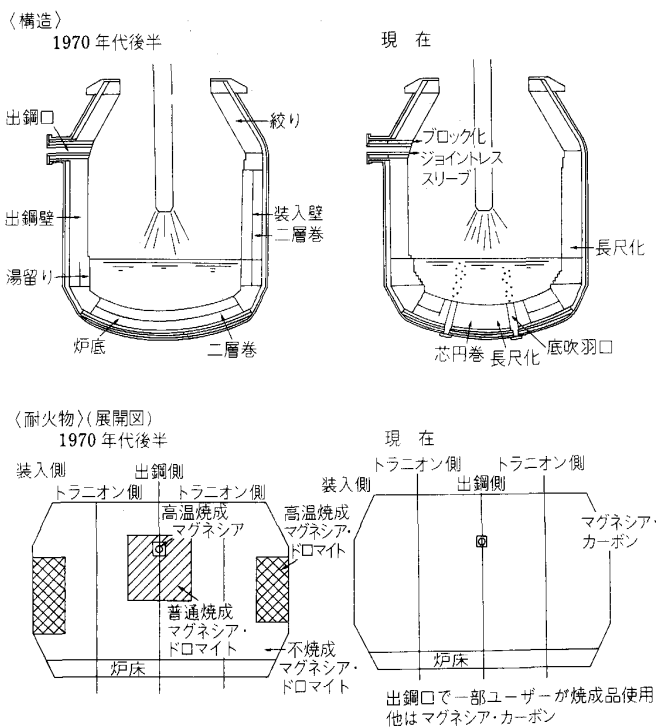


図 4 転炉の変化と耐火物の変遷 (日本)

ら昭和 40 年代の高アルミナ質れんが導入を経てステーブ・クーリング並びにカーボン (黒鉛)・炭化珪素 [C·SiC] 及び炭化珪素 (SiC) 質の使用拡大等へ変わり、下部へのカーボンの拡大、底部へのマイクロポーア

(Micro pore) 黒鉛れんがの導入により、高炉寿命は一昔前の 4~5 年から 8 年が最近 12 年となり更に 15 年目標にまで達しようとしている。しかし、長寿命化と共に耐火物使用量の減少も顕著であり、1970 年代に比べ約 30% 減少している。

2.1.2 転炉 (図 4)

転炉については、1970 年代後半の純酸素上吹き転炉より、その大型化、現在の上下吹き転炉に変わるにつれ、耐火物はマグネシア・ドロマイト質れんがからマグネシア・カーボンれんがに移り使用範囲も拡大してきた。それにより羽口れんがの開発とともに一方では長尺れんがの採用等構造改善もあって転炉用耐火物の寿命延長が大幅になされ、耐火物原単位も半減した。

2.1.3 電気炉

電気炉では、大型化、水冷化の範囲拡大・徹底に伴い耐火物も炉蓋の不定形化が進展し、炉壁用耐火物はマグネシア及びマグネシア・クロムからマグネシア・カーボンへと変わった。また、炉底出鋼、直流、底吹き等の電気炉新技術の進歩に対応して羽口及び出鋼口のスリーブ、陽極のブロック等の耐火物が開発されてきて、耐火物原単位は 2/3 まで減少した。

2.1.4 連続 casting (CC)¹⁶⁾ (図 5)

日本は CC 化率 93% でトップレベルにある。それに伴い、連続 casting に対する炉材については、取鍋ではろう石れんがからスリングマス更に流し込み材 (キャストブル) へ、タンディッシュではボードから吹付材へ、流量制御はストッパー方式からスライドバルブ方式へと変わ

* 概略 左: 旧 右: 新

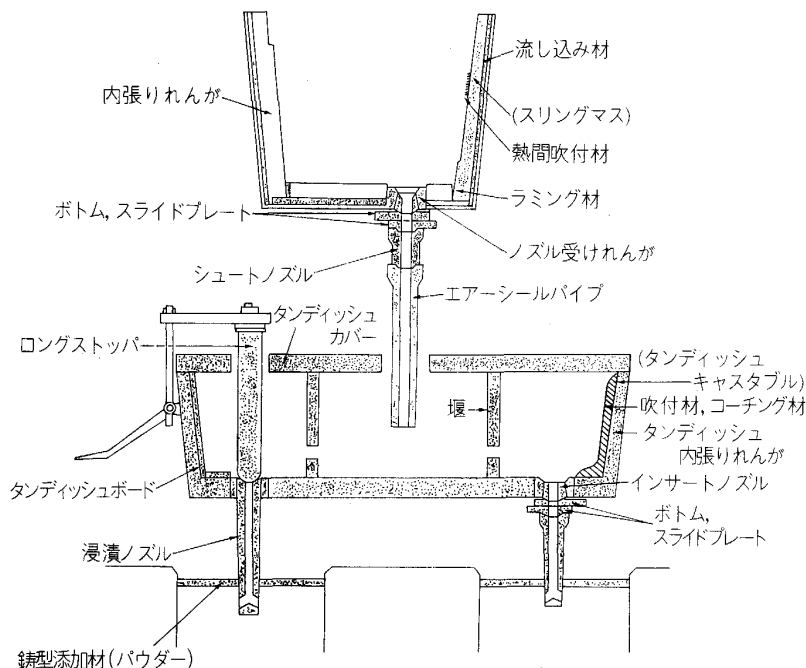


図 5 連続 casting と耐火物 (日本)

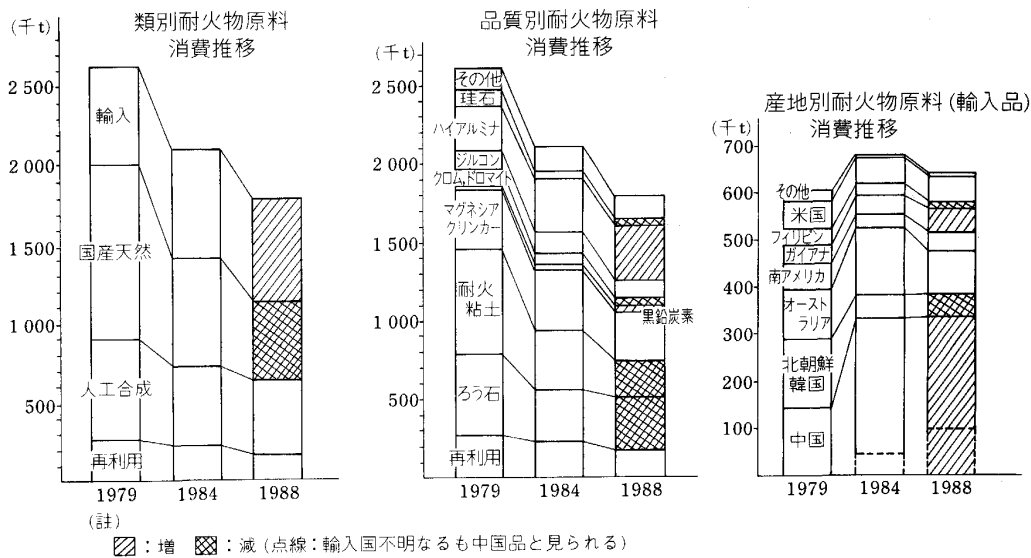


図 6 耐火物原料消費の推移²⁾

り、その材質についても、高アルミナ質からアルミナ・カーボン質へ主流が移っている。鑄型添加材（CC パウダー）については高速鑄造、低炭素鋼への対応等について、パウダー融点、粘性等組成改良を中心に対策が得られている。

2・1・5 要約

以上、最近の鉄鋼技術の変遷に対する耐火物の対応について主要なものは次の4点に集約される。

- (1)ゾンドライニングの徹底
- (2)カーボン（黒鉛）含有耐火物の使用拡大
- (3)不定形耐火物の適切な使用
- (4)補修（吹付け、パッチング等）技術の進歩、普及

2・2 内側・耐火物側技術の変化¹⁸⁾

2・2・1 製品・材質の変化

耐火物生産量の推移を図1に示し、その変化について1・1項で述べた。

製品・材質として酸化物主体は変わらないが、その内での消長があり、珪石（ SiO_2 ）、ドロマイト（ $\text{MgO} \cdot \text{CaO}$ ）、クロム鉍〔 $(\text{Mg}, \text{Fe}) \text{O} \cdot (\text{Al}, \text{Fe}, \text{Cr})_2\text{O}_3$ 〕からアルミナ（ Al_2O_3 ）、マグネシア（ MgO ）、ジルコニア（ ZrO_2 ）、スピネル（ $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ）等へ主流は変わった。非酸化物でカーボン（黒鉛）含有耐火物が主流に登場してきたが、炭化珪素（ SiC ）系は伸び悩み、窒化珪素（ Si_3N_4 ）系はまだしの感がある。

特にカーボン（黒鉛）は溶鉄、スラグに濡れにくくかつ低膨張であること等から優れた耐火材料であったが高温空気中では酸化、燃焼するので使用が限られていた。最近、非酸化物・金属等の添加による酸化防止技術が進みマグネシアあるいはアルミナ等の酸化物との組み合わせたものが製鋼炉、連続鑄造（スライドバルブ等）において好成績を上げ急速に伸びてきた。最近の最も大きな

開発・進歩の一つである。

2・2・2 原料事情の変遷

前述材質の変化は耐火物原料の変遷にそのまま反映している。

図6に示す耐火物原料消費量の推移を見ると、類別では輸入品が増え国産天然原料（珪石、粘土-シャモット、ドロマイト等）の減少が大きい。人工合成原料は価格高のため期待に反し伸び悩みとなっている。一方、カーボン（黒鉛）、高アルミナ質等の日本国内にほとんど産出しない原料の需要増と円高・ドル安による低価格化もあって輸入原料が増加した。

品質別では前述のごとく珪石、ろう石、耐火粘土、クロム鉍、ドロマイトが大きく減少し、カーボン・黒鉛、高アルミナ質が増えている。

輸入品を産地別に見ると、1979年に比べて増加しているのは中国のマグネシアクリンカー、りん状黒鉛、高アルミナ質（ばん土頁岩等）等が倍増以上と顕著であり、また、Guyana（南米）からのポーキサイト系高アルミナ質原料も増えている。一方、Philippine（クロム鉍）、北朝鮮（マグネシア）・韓国（ろう石）は減少している。

2・2・3 製造技術の進歩

耐火物の製造工程（原料-粉碎-混練-成形-焼成-検査）を見ると、基本的流れに大きな変化はないが、工程別には、粉碎は微粉碎の要求増、混練は高速化、成形は高圧化・自動化・真空化・CIP（Cold Isostatic Press）の増加、焼成は省エネルギー・雰囲気調整、検査は非破壊検査・自動化の導入等が挙げられる。れんがについてはその主たる力点は耐火物に対する均一な組織と高密度要求により焼成工程から成形工程（成形プレス）に移っているといえる。一方、成形と焼成工程を省いた不定形耐火物が著しく増加した。

製造技術の進歩, 変化に関連したいろいろな問題が出てきているが, ここでは次の2点, すなわち不定形耐火物の再検討とれんが成形の生産性について触れてみたい。

(1) 不定形耐火物について¹⁵⁾¹⁷⁾

逆説的であり全部というわけではないが, 耐火物の不定形化については再検討する時期にきているのではないだろうか。不定形耐火物のメリットとは何か, 施工の簡便さ, 一体構造, 継足し施工, 省エネ等と言われるが, まずエネルギー的に見てみよう。

製品技術に要するエネルギーは原料メーカーと耐火物製造工場での消費エネルギーの和になる。不定形耐火物の場合, 製造工場では成形, 焼成工程がないので消費エネルギーは低い。しかし, 一般的に言って不定形耐火物は同系原料を使用した耐火れんがに比べ, 使用時の耐食性, 耐用性は劣る。そこで耐火れんがに対抗するため高級原料を使用することになり高温焼成あるいは電融した原料の使用が多くなる。その結果, 不定形耐火物は全体として高エネルギー使用型となり価格も上がることになる。製品 t 当たり消費エネルギー比較の一例として取鍋用耐火物の場合でみると, ろう石れんが: 110 万 kcal に対し, 不定形・キャストブル・スピネル質流し込み材: 850 万 kcal となっている。不定形耐火物の中には電融原料等を使用した高炉樋材, キャスタブル等に消費エネルギー: 約 1200~1700 万 kcal (比較: れんが, 高温焼成・塩基性; 約 900~1000 万, 高アルミナ質; 約 400

万, シャモット質; 約 200~300 万 kcal) に達するものがある。不定形耐火物, 即, 省エネ型耐火物とは言えない。施工後の乾燥時間の長さ等を考慮すると不定形耐火物の使用エネルギーは更に大きくなる。また, れんがに比べ施工後早く使用に入ることができない。更に補修にしても不定形耐火物による継足しはノロ取り等の労力及び時間を考慮するとメリットが更に減少すると言える。これに対して, れんがでは, れんが積み機の導入, 積み方法の改良等により施工は容易になり得る。以上, 不定形耐火物の高級化に対し個々にはれんがとのメリットを総合的に再検討する時期にきているのではないか。

(2) れんが成形と生産性

れんがには形状があり, そのため, れんがのプレス成形には金型(枠)を必要とし, 形状が変われば枠替えが行われ, この枠替えが生産の流れを止める。枠替え作業を無人, 自動化しても事情は変わらない。つまり, 形状数増は枠替え増となり生産性低下を招くことになる。近年, 年を追ってれんが形状が増加し, それに伴ってか枠替えが多くなっている。

一例を挙げると, A 社 250 t 上吹き転炉において昭和 55 年には 51 形状で 14.9 t/枠の生産であったものが, 現在の上下吹き転炉では 129 形状となり 5.6 t/枠の生産に低下し, 対比で 38% と大きく低下している。

参考までに WG の類似転炉でのれんが形状数は約 25 前後である。このような傾向は他の炉においても同様である。形状増加原因の一つはゾーンドライニングである。

表 6 鉄鋼へのファインセラミックスの応用²¹⁾²²⁾

- ・ファインセラミックスに期待される特性
耐摩耗性, 耐食性, 耐熱性, 機能特性
- ・応用例

設 備	FC 適用パーツ	FC 材質	備考*
製 鉄 ・高炉羽口 ・高炉集塵機 ・出鉄口 ・原料ホッパー ・出鉄口	熱風制御用バルブ フローア (集塵機等) マッドガンノズル 耐摩耗ランニング 出鉄口開孔ビット	SiC, Si ₃ N ₄ セラミック被覆材 セラミック溶射 Al ₂ O ₃ Si ₃ N ₄	
製 鋼 ・水平連铸 ・タンディッシュ等 ・熱電対保護管 ・転炉他全般	ブレードリング 介在物除去フィルター 酸素センサー	Si ₃ N ₄ -BN 系 ZrO ₂ , Al ₂ O ₃ 等 ZrB ₂ , Al ₂ O ₃ -C 等 ZrO ₂	◎ ○ ◎
圧 延 ・熱処理炉 ・加熱炉等 ・圧 延	ハースロール バーナー部品 ラジアントチューブ レキュベレーターチューブ スキッドボタン 高温ファン (ブロワー) 搬送ロール 圧延ロール	FS 系 Si ₃ N ₄ 系 SiC, Al ₂ O ₃ 系 SiC 系 SiC, Si ₃ N ₄ 系 Si ₃ N ₄ 系 Si ₃ N ₄ 系 Si ₃ N ₄ 系	 ○
その他 ・センサー ・切削工具	ガス, 温度, 溶鋼成分 (Al, Si, S, H, etc.)	β-Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ etc. Al ₂ O ₃ , SiC, Si ₃ N ₄ etc.	◎ ◎

* ○: 普及 ◎: より普及

ゾンドライニングの徹底を図るほど、品種と形状が増加し結局形状数が増えることになりれんが生産性の低下を招来することになる。一方、ゾンドライニングは前述のごとく耐火物原単位低減の立役者であるだけに、両刃の剣になっていると言える。

これに対する耐火物製造側での対策は大きな課題であり、後述するような CIP 導入等もその一つとなり得ると思われるが早急の妙案とはなり得ない。一方ユーザーとの協調的話し合いも必要である。

3. 耐火物のこれから

耐火物の目標は、鉄鋼業に対しては耐用性と価格の最適バランスすなわちコストパフォーマンスの追求にあり、内部的にはより高度の技術開発と合理化にある。これを踏まえて耐火物技術と産業の将来予測あるいは希望について内側：セラミックスの立場からと、外側：鉄鋼の将来技術との係り合いから考えてみたい。

3.1 耐火物：セラミックスの側から

3.1.1 ファインセラミックス (Fine ceramics) の姿から²⁰⁾

耐火物技術のこれからを考えるのに、耐火物を広くセラミックスの立場から見ると、多くの人が関心をもち注目する先行技術としてファインセラミックスがある。ファインセラミックスは使用分野が耐火物と異なるが両者には共通の材質が多くあり、アルミナ (Al_2O_3)、スピネル ($\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)、ムライト ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)、ジルコニア (ZrO_2)、炭化珪素 (SiC)、窒化珪素 (Si_3N_4)、黒鉛 (C) 等々である。両者の境界は漸移的である。

ファインセラミックスは 2000 年に向けて大きな伸びが期待されている。しかし、その主体は電磁気・光関連機能材であって、高度技術を求めて高温耐食材としての構造材への期待も大きい伸びについては疑問視する向きがある。鉄鋼へのファインセラミックスの応用例を表 6 に示す。しかし現在、全般的にはまだトライアルの段階といった方がよく、高温条件下での耐スポール (耐急熱・急冷：温度変化) 性等の厳しい使用条件に対して克服すべき課題が多い。つまり、ファインセラミックス製品が微粉を原料とした緻密な成形・焼成体であるとすれば化学的侵食に強いものとなるが、高温使用における昇降温下での熱衝撃による割れ防止には弱いわけでむしろいろいろな大きさの粉粒体を組み合わせて多孔体になっている耐火物製品の方が強い。従ってファインセラミックス製品について組成その他で参考とすべき点も多いが、耐熱セラミックスとして両者はそれぞれ組織に見合った得失をもっていると思えるべきであろう。また、コスト、価格面で鉄、耐火物に比較してかなり高いのも難点となっている。ファインセラミックス素材としてはむしろセンサー等の機能特性に着目した適用の方が、その本領を発揮できる方向として期待できる。

以上から耐火物技術の将来に対し内側からの推進に力を入れなければいけない。詳細に述べる余裕がないので将来の発展に対し示唆となるような考え方を 2, 3 ピックアップして取り上げてみたい。

3.1.2 材質・材料面から

炭素 (C)、炭化物 (SiC , B_4C)、窒化物 (Si_3N_4 , サイアロン, BN), ほう化物 (ZrB_2) などの非酸化物の優れた特性から使用面での拡大が図られるべきである。そのためには耐酸化性向上及び組織面のよりいっそうの研究が必要である。

一方、成型体の補強にセラミックファイバー (Ceramic fiber) を使用する技術も注目される。

3.1.3 原料面から

天然原料よりも調整しやすい人工合成原料の使用を拡大する。これにより技術的にも幅が広がる。しかし、従来のように高純度、高性能を追うのでは高価格となって使用の壁となる。いたずらにそのような方向を追わず、むしろ不純物が入っても純度とコストの最適バランスを求めコストパフォーマンス第一に考えて進めることである。

また、人工合成品として、ゾル・ゲル (Sol-gel) 材料は大きな将来性・可能性を持っている。

3.1.4 製造技術面から

主眼はワーカレス (Workerless), AI 化推進である。一方、製造の要となる成形 (プレス) については現在の一軸方向の成形プレスに代わって将来 CIP の普及が望まれる。CIP では、高圧を得ることが容易、均一成形成、枠替え不要等の利点がある一方、自動化、簡易バック開発、ニアネットシェイプ (Near net shape) 技術の開発が必要である。

また、レーザーの応用は更に活発化するであろう。レーザーは超高温がたやすく得られること、音が静かでしかもエネルギー転送が容易である特性を活かして耐火物の加工 (切断、穿孔他)、吹付け、あるいは製品テスト (膨張計等) に範囲を広げている。

3.1.5 製品面から

現在も活発に製品開発が進められているが、力点は性能のバランスに置かれているように思われる。すなわち、どの性状も良くしようという方向である。これに対し一つの性状を際立って良くする代わり、他の性状は耐えられる最低限度に押さえた製品、例えば多能に対して“単能・天才耐火物”といったものももっと考えられてもよい。単能耐火物の指向する方向はいろいろあるが一例として、考えられる温度域で無膨張の耐火物ができれば築炉・炉構造上膨張代あるいはせり合い応力が無くなり耐用性は大きく上がる。現在これに近いものはあるが組成と組織の面からより広い温度域で膨張率 0 のものを開発するのも一つの方向であろう。例えば $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 系に一つの可能性があるように思わ

れる²³⁾。また、このような指向は今後の耐火物開発に別の視点・光を与えることにもなる。

更に基礎的な面からの掘り下げも今後の開発にとって必要である。これについても多角的な視点がある。一例を挙げると、耐火物の高温使用時における損傷変質機構解明については化学組成のみでなく構成相(主として鉱物・結晶相)の徹底的解析が望まれるが、これに関連して、耐火物の高温固溶体組成の追求を取り上げてみたい。常温における耐火物の化学組成と鉱物(結晶)組成あるいはその固溶体組成との関係はひろく研究されている。しかし耐火物が使用される高温域での、しかも多成分系での固溶状態については、なお不明の点が多い。例えばマグネシアクリンカーについて MgO に対する $SiO_2 + Fe_2O_3 + Al_2O_3 + CaO$ の高温固溶率について個々のあるいは数成分系のものについての研究はあるが多成分系に関してはよく分かっていない。マグネシアれんがの主鉱物相であるペリクレーズ(Periclase)について、ペリクレーズ 100% 品即 MgO 100% 品ではない。耐火物として必要かつ十分なのはペリクレーズ 100% 品なのか、 MgO 100% なのかを含めて多成分系の高温固溶の研究が必要である。他の材質全般にわたる問題として重要である。

3.2 ユーザー: 鉄鋼の将来技術との係り合いから

次に耐火物の外側から見ると、耐火物の将来は独自に決められるものではなくユーザーである鉄鋼の将来技術との係り合いから、その動向によって耐火物の対応が決まる。

代表的な炉について触れてみたい。

3.2.1 高炉・コークス炉^{25)~27)}

将来、高炉にとって代わる代表格と見られている溶融還元炉の動向は、2000年目標に鉄連共同研究とされているが、耐火物にとってより厳しい使用条件であり、操業条件によって耐火物の選択動向が決まる。

コークス炉は溶融還元炉が普及すれば不要となる。しかし、代わるのは一部であって高炉法が続くことになれば依然としてコークス炉は必要である。また、コークスが必要として、例えば鉄連共同研究のシャフト炉等のコークス新製造法が中心になるとすれば、炉材は変わる。それでも現タイプのコークス炉が不可欠で、今後も残るとするならば、珪石れんががまだ必要である。一方、珪石れんが製造プラントは窯など独立した製造工程が必要でこれを簡単に他工程に入れて造ることは難しく、21世紀まで珪石れんがの需要がなく現状のような少ない生産量ではプラント維持は難しい。また、その時築炉工の散失は大きな問題となる。

3.2.2 連続 casting

連続 casting に代わる半凝固 casting, 急速凝固 casting 等の新技術の開発が進められている。例えば半凝固法(粘 casting, レオキャスト法)は鉄鋼大手中心(19社)としたレオ

テック社により1997年実用化目標に開発が進められている。耐火物は例えば誘導加熱炉等に高級耐火物が必要となろうが相当厳しい使用条件のようである。いずれにしても、操業状況、条件によって炉材状況は大きく左右され変わっていくであろう。また、炉材が操業の壁となることもあるかも知れない。

4. 結 言

耐火物は今後も高熱産業である鉄鋼業の続く限り無くならないと信じる。日本の耐火物技術はユーザーである鉄鋼業との良い関係を得て、世界的に高い水準に達した。そして、耐火物原単位の低減により鉄鋼業の要求に応えた。しかし、耐火物業界の規模は伸び悩み、サバイバルの峠にさしかかっている。

将来とも鉄鋼は耐火物産業の第一の依存先であることに変わりはなく、鉄鋼技術発展のためにも耐火物技術の高度で、迅速な対応が可能な国内技術が必要であり、それが柱になると信じてやまない。

最後に、話が広汎に渡りすぎて各要点が薄くかつ断片的になった点については意のあるところをお汲みとり願ひ御寛恕いただきたい。

浅田賞受賞講演並びに本稿の起草にあたって、格別のご配慮をいただいた日本鉄鋼協会関係者、そして各種データのご提供をいただいた内外の関係各位に対し深く感謝の意を表します。

文 献

- 1) 窯業統計年報(通商産業大臣官房調査統計部編)(1988)
- 2) 耐火物協会会報(耐火物協会編)(1989) 469
- 3) 鉄鋼統計要覧(日本鉄鋼連盟編)(1988)
- 4) Report of U. S. Department of Commerce (1987) [Bureau of the Census]
- 5) C. G. MARVIN: Cer. Ind., **131** (1988) Oct., p. 31
- 6) Anon: Cer. Ind., **131** (1988) Aug., p. 35
- 7) WG 耐火物協会 Data
- 8) PRE* 統計 Data
* Federation Europeenne des Fabricants de Produits Refractaires
- 9) 大槻彰一: 耐火物, **39** (1987), p. 588
- 10) H. LONGIN: Cer. Bull., **67** (1988), p. 1161
- 11) Lu JIA-QUAN: National Symposium on Refractories (The Chinese Society of Metals), Hangzhou (1988)
- 12) K. C. PARK: Cer. Bull., **67** (1988), p. 1521
- 13) 鉄鋼界報(1988) 1399, p. 4, 1438, p. 1, 1460, p. 8
- 14) 杉田 清: 耐火材料(1986) 134, p. 4
- 15) 品川技報(不定形耐火物特集)(1989) 32
- 16) 品川技報(連続 casting 特集)(1988) 31
- 17) 遠藤容弘: 品川技報(1980) 24, p. 115
- 18) W. H. McCracken: ALAFAR Meeting Lec. (1986)
- 19) 田中邦三: 耐火物, **39** (1987), p. 568
- 20) ファインセラミックス市場規模の長期予測(日本ファインセラミックス協会編)(1988)
- 21) 池田順一: セラミックデータブック '87 (1987), p. 282
- 22) 福岡弘美: F C Report, **3** (1985) 6, p. 1
- 23) 井川博行: セラミックデータブック '88 (1988), p. 249
- 24) 木村守弘: 鉱物工学(1976), p. 275 [朝倉書店]

-
- 25) 木村成人: 鉄鋼界, **39** (1989), p. 42
26) 山本英樹: 第 116 回・117 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1987), p. 39
27) 西田礼次郎: 第 116 回・117 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1987), p. 279
-