

特別講演

UDC 666.763 : 666.764



耐火物技術における新しい動向

林 武 志*

Recent Trends in Japanese Refractories Technology

Takeshi HAYASHI

1. 緒 言

日本鉄鋼協会第100回講演大会に当たりまして、たいへん名誉ある浅田賞をいただきました。ただ長い間耐火物の製造、研究に携つてきただけの私にとりましては、身に余る光栄であります。この間鉄鋼技術のダイナミックな発展期に遭遇し、創造意欲に溢れた多くの方々から御指導をいただきましたことは、周辺産業に従事する技術者として冥利に尽きる想いが致しております。ここに深甚の謝意を表します。

わが国における耐火物技術の最近の発展は目覚ましいものがあり、海外からも非常に注目されるようになってきている。このことは日本の鉄鋼技術の発展に主導された以外のなものでもなく、今後この傾向はさらに強まってくるものと考えられる。しかしながら今日の耐火物業界は技術的問題のみならず山積する課題に当面しいまだかつてない転機を迎えている。原料については資源問題、消費エネルギー低減対策など、製造面では生産性の向上、各種機能的耐火物と不定形耐火物の二分極化への対応、材料技術としては新しい製鉄、製鋼技術に伴う操業条件の苛酷化、あるいは省エネルギー化への対応、炉前技術としては施工、解体技術のみでなく、作業環境改善、粉塵対策、合理化、廃棄物処理、炉の構造体としての研究、さらには休炉、操炉時の対策などがあり、すべてこれからの重要な課題である。これらの問題のほとんどは耐火物メーカーとユーザーとの共同の課題であるところに特徴があり、従来にも増して相互の取り組み方が非常に重要なものとなつてきている。

耐火物の各炉別における最近の発展経過ならびに動向については既に詳述^{1)~5)}されているので、今更これに加えるものもないと思う。したがってここでは耐火物技術の特色、最近の動向など今日的な問題に焦点を絞つて若干の所感を述べさせていただきたい。

2. 耐火物発展の経緯

耐火物はその約70%が鉄鋼用に使用されており、図1に示すように粗鋼の生産と軌を一にして、昭和35年以降48年までに顕著な量的発展を遂げてきた。しかしオイルショックを契機として生産は急減し、内容的にも高炉をはじめとする建設用が減少し、作業用が主体となつた。この間連続鑄造法の発展、AOD、RH、DH、VOD、LFなどの各種炉外精錬炉、さらには底吹転炉の採用などの新技術の登場あるいは原単位低減への限りない要求に応じて、耐火物技術も内容的に大きな変革を遂げて今日にいたつている。特にここ数年、炉の延命対策、合理化、作業環境改善、省エネルギー、高品位鋼への要求から塩基性内張材、流し込み材、吹付材、断熱ボード、流量制御用耐火物、インジェクション用耐火物など各製鉄所において材料と施工を含めた個有のシステム技術が数多く誕生し、それぞれの発展が促されているのが特徴である。

図2には、わが国の鉄鋼用耐火物の原単位の推移を欧米と比較して示している^{6)~8)}。昭和49年以降急激に低減され、アメリカ、西ドイツに比べてかなり低い値を示している。すなわち昭和54年には、定形れんがで9.5 kg/t. steel 不定形耐火物を含めると14.9 kg/t. steel の耐火物原単位が達成されている。

一方耐火物生産の一つの指標となる生産性 (t/month) の推移は表1⁹⁾に示すごとくであり、昭和35年から45年にいたる10年間に著しく向上した。これは製造設備の改善、不焼成化、不定形材の増加に加えて増産期にあつたことが理由としてあげられる。しかしそれ以降最近の10年間は、不定形材の進展にもかかわらず生産性が伸びていないところに大きな問題を抱えていると言えよう。

3. 耐火物技術の構造と変化

ここで耐火物技術の特色ならびに構造的な変化につい

昭和55年10月18日日本会講演大会における浅田賞受賞記念特別講演

* 品川白煉瓦(株)専務取締役 理博 (Shinagawa Fire Brick Co., Ltd., 2-2-1 Otemachi Chiyoda-ku 100)

表 I 耐火物の生産性推移

		1960年 (昭和35年)	1970年 (昭和45年)	1975年 (昭和50年)	1979年 (昭和54年)
耐火物 生産量 ($\times 10^3$ t/年)	れんが形	1 522 26	2 969 679	1 998 892	1 657 865
	合計	1 548	3 648	2 890	2 552
従業員数		23 000	25 500	22 100	17 300
生産性 (t/人, 月)	れんが形	5.5 —	9.7 —	9.5 29.4	8.5 27.2
	平均	5.6	11.9	10.9	12.1

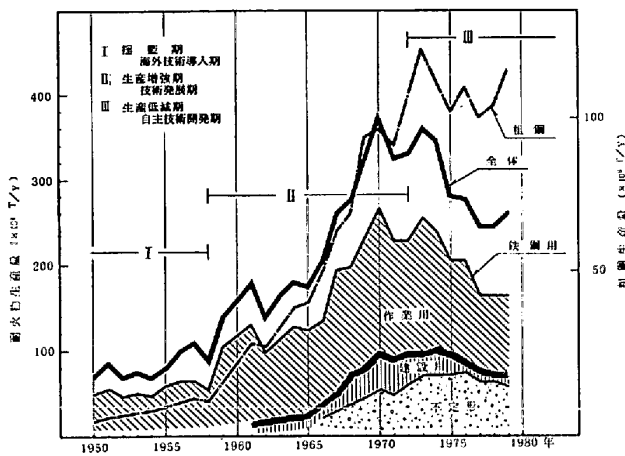


図 1 耐火物生産量の推移

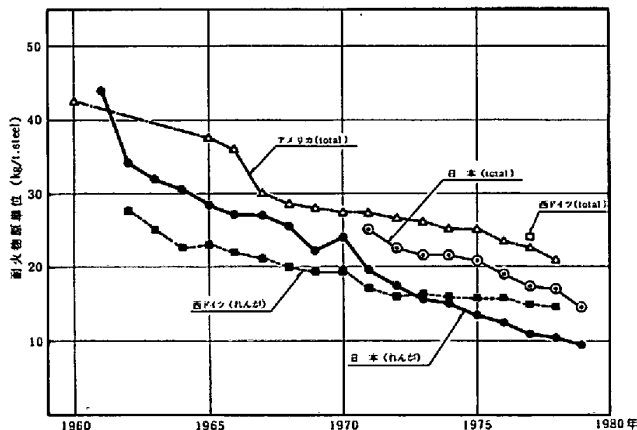


図 2 耐火物原単位の推移

て述べてみたい。戦後の耐火物技術の変遷を省みると、図3に示すように大別して三つの方向、すなわち海外技術、国内製鉄製鋼技術、社会環境などからインパクトを受けて進歩してきたといえる。

昭和 25 年鉄鋼技術の代表者からなるミッションが訪米され、日本の耐火物技術の遅れが指摘された。これを端緒として高炉用緻密質粘土質れんが、平炉用塩基性れんが、大型取鍋用ノズル、黒鉛質ストッパーなどを始め

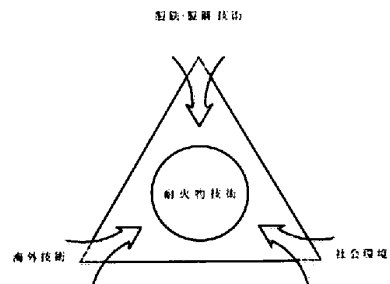


図 3 耐火物技術へのインパクト

として優れた材質が積極的に輸入され、耐火物メーカーに対して刺激を与えると同時に、国産化が重要なテーマとしてとりあげられた。その後昭和 35 年ころより国内鉄鋼技術の急速な進展期に入り、強烈な刺激を受けながら各種用途に適応した新しい耐火物、あるいは合理的な多くの使用技術が確立されてきた。しかしながらその大部分は海外技術に依存したものであり、ダイレクトボンドマグ・クロレんが、熔融石英質ノズル、プラスチック、キャストブルなどの材質的なものからシステムとしてのスライディングノズル、スリンガー、吹付技術などにこの例をみることができる。しかし、一方において高純度マグネシアクリンカー、合成マグ・ドロクリンカー、マグ・カーボン、出鉄樋あるいは取鍋における流し込み材、振動成形法、自動スタンプ機、連鑄用特殊機能材など、わが国独自の技術も出現してきている。

そして最近では社会環境問題としてのインパクト、たとえば省エネルギー、省力化、粉塵対策、省資源、廃棄物処理(リサイクル)、天然原料の見直しなど、広い意味での社会的要請に根ざすものがきわめて重要なものとなつてきている。

耐火物技術の歴史は使用条件の苛酷化に対処した改善改良の集積であるといつても過言ではない。操業条件の苛酷化と損耗速度の関係については、既に杉田氏⁴⁾も指摘しているように一例として図4にその模式的パターンを示した。ある操業条件まではA材質というグループの中での改良により耐久性の向上、原単位の低減が計られ

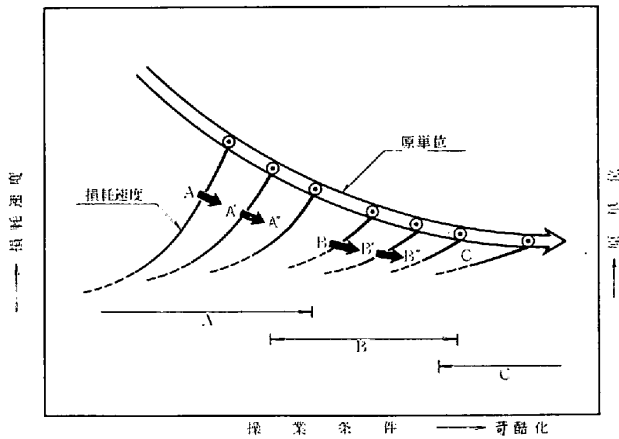


図4 耐火物の改良と原単位低減のパターン

る。しかしさらに作業条件が苛酷となると、A材質ではもはや限界となり、B材質あるいはC材質の開発が進められてくる。この改良パターンは材質のみならず、施工技术、使用技術、補修技術を含めたシステムとして捉えることができ、漸次原単位の低減がなされるとともに新技術が開発されてきた。しかし今後耐久性や原単位低減のみならず、エネルギーコスト、鋼品質への影響など総合的な評価が問われることになってくるであろう。

耐火物の技術的内容の区分には、いろいろの表現がある。ここでは図5に示すような原料技術、生産技術、研究開発技術、炉前技術の4つの分野に分類して考えてみた。かつて耐火物技術は原料技術であると言われて、優れた耐火物を作るためには、よい天然原料を確保することが第一条件であった。良質の原料資源の確保は当時もつとも重要な施策の一つであり、メーカー独自の特色がそこに発揮されていた。いわば図中A領域に示す原料主導型技術ということができた。しかしながら近時耐火物技術の性格は一変し、図中B領域の炉前技術主導型に移行してきた。わが国には優れた原料資源に乏しいことから、原料メーカーと耐火物メーカーが一体となつて合成原料の開発に努力してきた。その結果天然原料に代わつて海水マグネシア、合成マグ・ドロクリンカー、マグ・クロクリンカー、合成スピネル、合成ムライト、焼結アルミナ、電融アルミナ、炭化珪素、熔融石英、ジルコニアなど耐火物にとって望ましい純度、密度の合成原料が得られるようになり、その使用比率も増大した。合成原料の製造が軌道に乗るとともに原料技術は、むしろ原料専門メーカーに移行された。したがって各メーカーにとっては使用する原料は画一化され原料技術における特異性も稀薄となつてきた。

最近の特徴として、各種機能性耐火物および不定形耐火物が増加している。これに伴つて耐火物固有の製造、研究技術に加えて「炉前技術」、「使用技術」と言われているユーザーと直結する作業が極めて重要なものとなつてきた。炉の設計、施工、補修、解体、更には使用実績

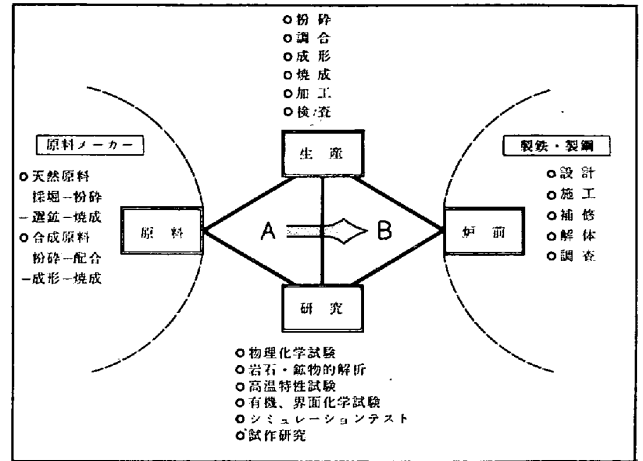


図5 耐火物技術の構成

調査、炉内調査、監視、損耗機構の究明、損耗速度、損耗律速条件の把握等一連のものが含まれる。ここにユーザーとの接点があり、ここにおいて耐火物の真の評価が可能であり、また新たな技術の源泉があるといえる。

最近、海外から日本の耐火物技術が注目されている理由の一つに、炉前技術を中心としたユーザーとの連携のよさがあげられている。そしてこれらの共同成果を迅速かつ忌憚なく発表し相互に切磋琢磨し合う姿勢が、今日までの耐火物技術の発展に大きく貢献したものと考える。

耐火物技術の内容ならびに原料、製造、研究、炉前等の各領域の重要度は時と共に変わつてきた。しかし耐火物の発展にとってはそれぞれが重要な柱であることには変わりはない。今後の多様化する情勢に対して常にバランスのとれた考え方や運営が望まれる。

4. 非酸化物系耐火物の展開

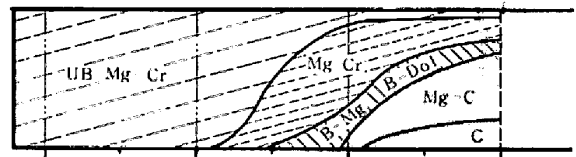
現在、耐火物技術が大きな転換期にきていると考えられる理由の一つとして、材質面における最近の動向がある。図6は主たる製鉄、製鋼用炉の材質変遷の概略を表したもので、いずれの炉においても使用される耐火物は十数年前にくらべて多種多様化してきている。これらの中で今後注目すべき点は、高炉における炭化珪素系、転炉、電気炉におけるマグ・カーボン系など今まで主流を占めてきた酸化物系耐火物に代わつて、非酸化物系耐火物が多用されるようになり、それぞれ主要な役割を演ずるようになったことである。このことは耐火物の組織や特性を論ずる上で大きな変革を余儀なくされるものでありその意義は大きい。しかし酸化物での構成が限界にいたつたと判断すべきかどうかについてはこれからの課題である。代表的な例について以下に述べてみたい。

高炉シャフト下部の損傷は炉命を決定するものとして重要視され、その損傷機構についての研究の歴史は古

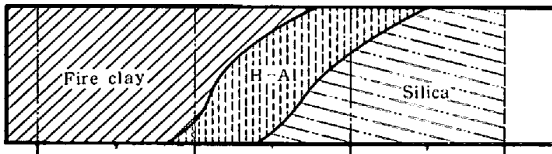
高炉 (シャフト下部)



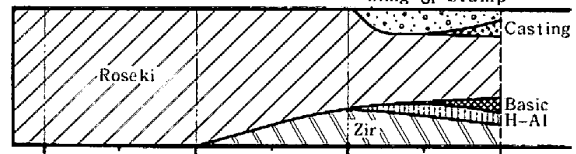
電気炉 (側壁)



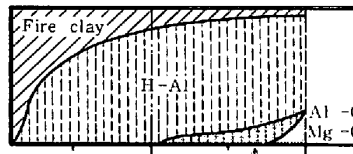
熱風炉 (上部)



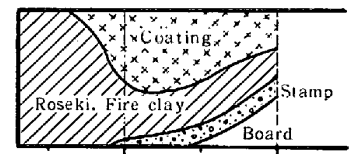
取鍋



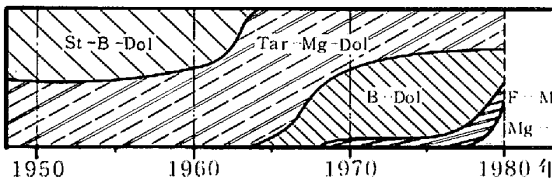
混鉄車 (スラグライン)



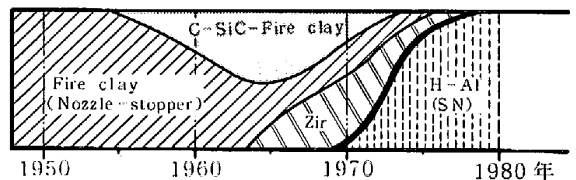
タンディッシュ



転炉



流量制御



Imp. 輸入粘土質
H-Al. ハイアルミナ質
St-B-Dol. 安定化ドロマイト質

B-Dol. 焼成ドロマイト
UB-Mg-Cr 不焼成マグクロ質
Zir ジルコン質

図 6 製鉄・製鋼用耐火物の変遷

い. 1923 年ころより一酸化炭素の分解に基づくカーボンが、耐火物の組織内に沈積し崩壊に導くという考え方が支配的であった^{9)~11)}. カーボンの沈積はれんが中の酸化鉄が触媒となり成長するものと考えられ、れんが中の酸化鉄をできるだけ少なくすると同時に、高密度で低通気性の緻密質シャモットれんがが一般的に適用されるようになった. しかしながら高炉の内張りとして使用された多くの実績から、シャフト下部の損傷防止に顕著な効果はみられなかった. そこで十数年前からの大型高炉の建設ラッシュ時にその損傷のメカニズムが再び盛んに論議されることとなり、使用後の調査解析と実験室での研究結果から、その損傷はカーボンの沈積よりも、むしろ高炉内を循環するアルカリ蒸気との反応によって影響されることがわかってきた^{12)~15)}. そこで耐アルカリ性に優れた Al_2O_3 95~98% の高純度で高密度のアルミナ質れんがが開発された. しかしアルミナ質れんがはその使用結果からある程度の効果は認められたけれども、熱膨張率並に弾性率が高く割れによる損傷が発生し根本的な解決策とはなりえなかった. 最近ではアルカリ蒸気に対してさらに抵抗性が高く、冷却効果のより高い高熱伝導性の炭化珪素質れんがが開発、実用され、その効果が認められつつある.

図 7 は各種耐火物の熱間曲げ強度を、アルカリ蒸気雰

囲気内で測定した結果をまとめて示している. シャモット質、高アルミナ質、アルミナ質、炭化珪素質の順に抵抗性が高く、特に自己結合ならびに窒化珪素結合の炭化珪素れんがが強度劣化の程度が小さく優れている. これらの実験結果と使用実績との対比は新日本製鉄・室蘭の高炉でパネルテストが実施されるにおよび明らかとなり炭化珪素質の優位性が実証された¹⁶⁾.

これらの研究は期せずしてオランダ¹⁶⁾、アメリカ¹⁷⁾、フランス¹⁸⁾においても同様の結論が得られ、永年にわたって研究されてきたシャフト下部対策も炭化珪素質の登場によって大きく前進した訳である. これらの各種高炉用れんがの特徴を材質別に比較してみると、表 2 に示すごとく炭化珪素質れんがの優れた特性が浮き彫りにされる.

炭化珪素質れんがは結合組織が従来と異なる. 図 8 に示すように気孔も微細となっており、溶鉄浸透抵抗性において優れ、熱膨張率の小さいこととあいまつて、シャフト下部のみならず炉床あるいは湯溜り部へも適用しうる可能性がでてきた. これらの材質は図 9 に示すように熱伝導率も高く、今後さらに冷却効果を高めるために黒鉛あるいは黒鉛-炭化珪素系れんがとの組み合わせ構成が課題になってくるであろう.

次に製鋼炉における塩基性れんがについて述べてみた

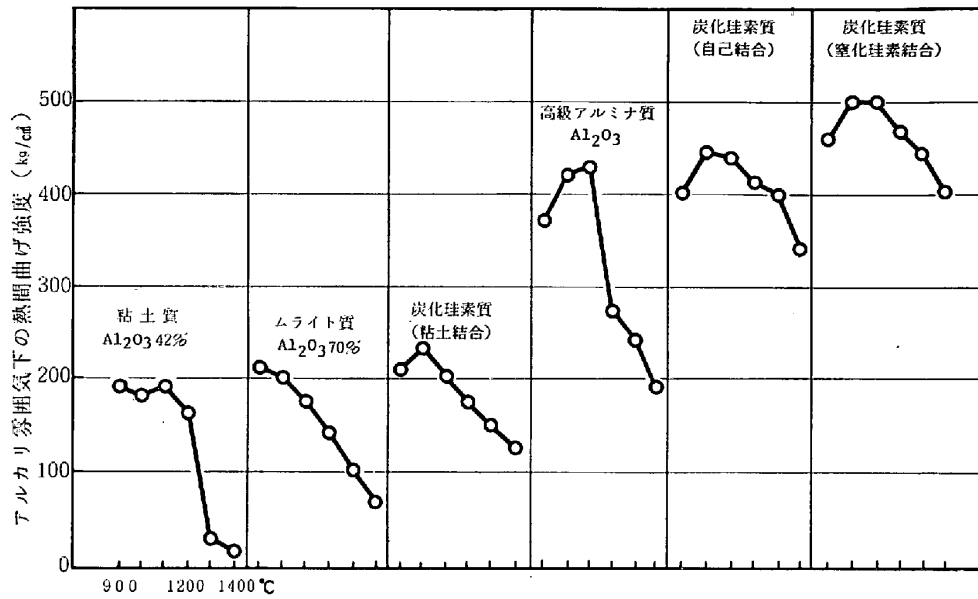


図 7 高炉用れんがのアルカリ抵抗性

表 2 高炉用耐火物の特性比較

	炭化珪素質	黒鉛-炭化珪素質	カーボン質	ハイアルミナ質	シャモット質
熱応力破壊抵抗性、冷却効果	◎	◎	○	△	×
耐アルカリ性	◎	◎	○	△	×
耐溶鉄浸透性	◎	△	△	○	×
耐食性 FeO	◎	◎	×	○	△
耐食性 CaO	◎	◎	△	△	△
耐摩耗性	◎	◎	◎	◎	△
耐酸化性	◎	△	△	◎	◎

◎：優れる，○：良好，△：普通，×劣る

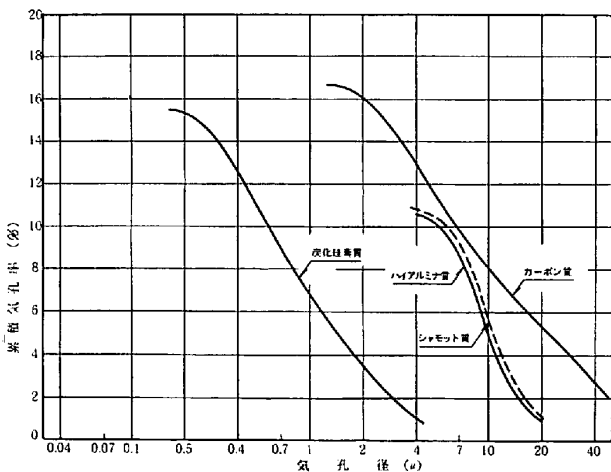


図 8 高炉用耐火物の気孔径分布

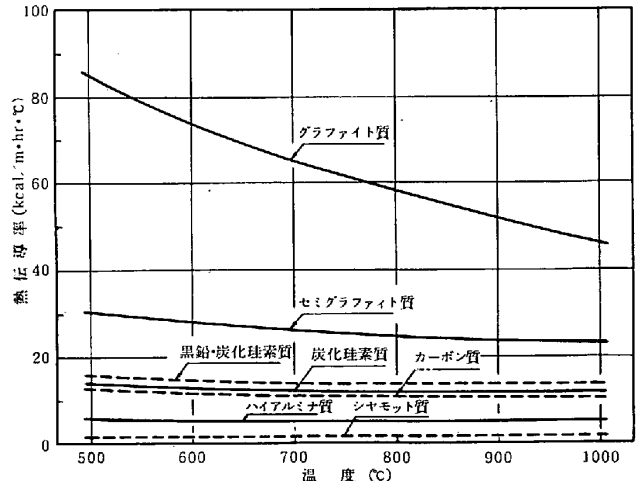


図 9 高炉用耐火物の熱伝導率

い、昭和 27 年ころより平炉の天井は珪石れんがに代わつて塩基性れんがが登場し耐火物史上エポックを画した。これによつて酸素製鋼法を可能とした功績は大きい。しかし耐火物の損傷の面からみると決して満足するものではなく、塩基性れんが特有の剝離損傷（ピーリ

ング）の解決に当面したわけである。その後の塩基性耐火物の研究はほとんどの問題に集中したといつても過言ではない。代表的な塩基性れんがの損傷形態を写真 1 に比較して示した。

不焼成マグ・クロれんがは加熱面から奥深くまでスラ

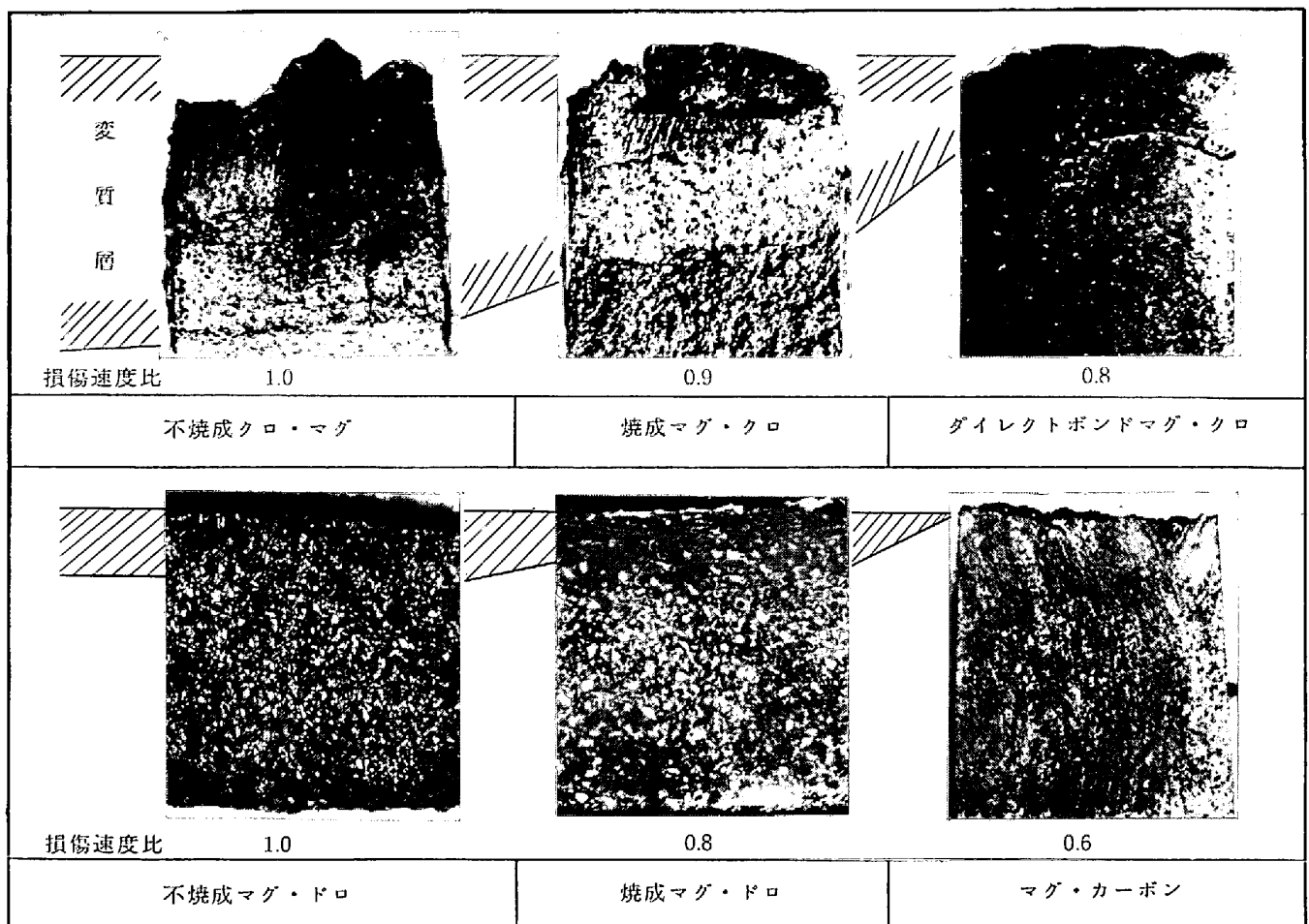


写真 1 塩基性れんがの損傷特徴

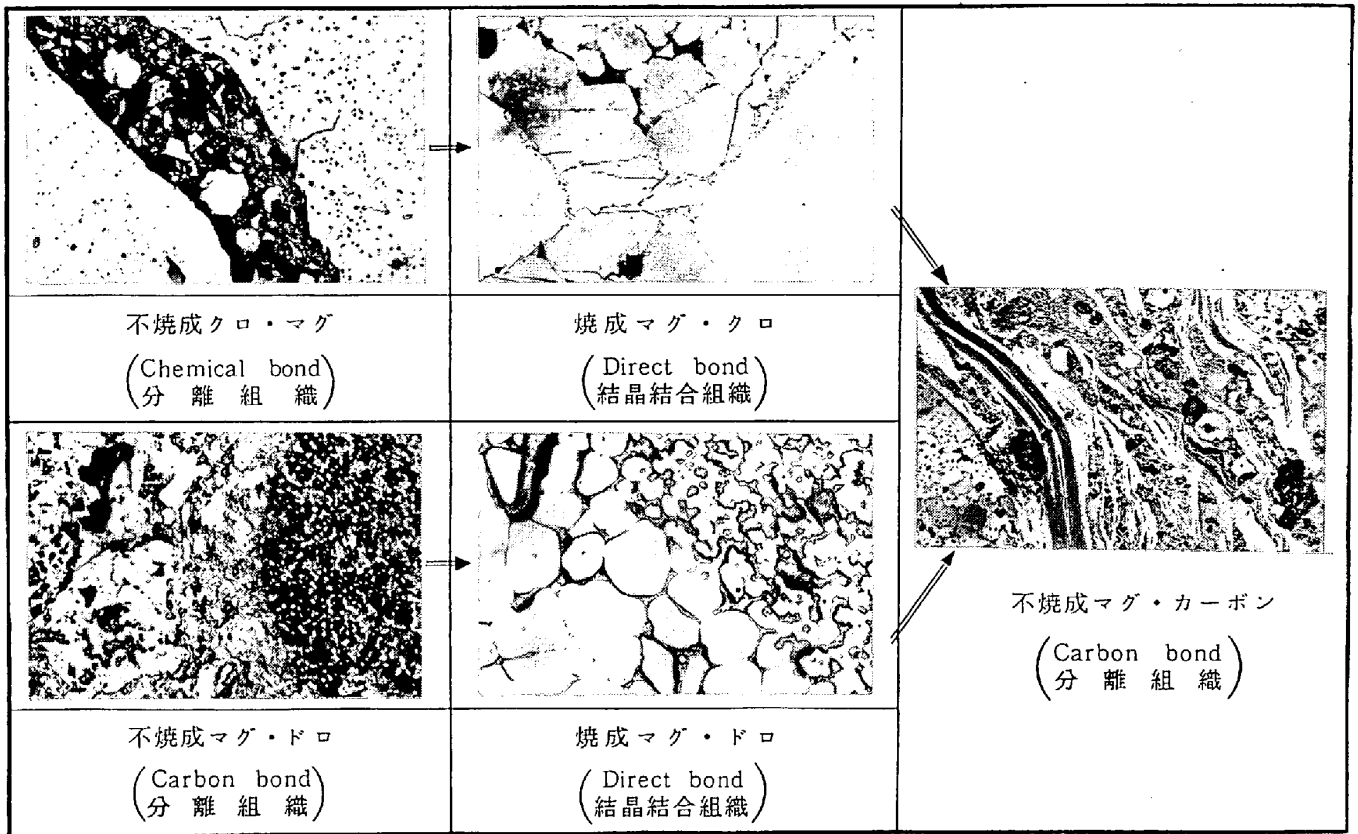
グが浸透し、変質層が厚く生成される。この変質層の生成により境界にきれつが生じ、れんがが剝落していく損傷が支配的であった。そこでこの変質層の生成を抑制するためにマグネシアとクロムスピネルを高温焼成し、原料の高純度化とあいまつて強固で緻密な結晶結合組織を特徴とするダイレクトボンドマグ・クロれんがが開発された。これはかなりの成果を収め、現在も電気炉や取鍋精錬炉の内張りに使用されている。しかしながら剝離損傷に対して根本的な解決策とはなり得ず、むしろダイレクトボンドによつてれんが自身の靱性を失い、割れやすい欠点の一部に表れ一つの限界点に達したわけである。これを克服しえたのが電気炉用に開発されたマグ・カーボンれんがであるといえることができる¹⁹⁾。

一方、転炉の内張りれんがには当初より不焼成ターボボンドドロマイトれんがが採用されてきた。しかし耐用性において限界が生じ、耐摩耗性および耐酸化性を向上させるために漸次焼成れんがに移行した。品質的にも高純度、高温焼成マグ・ドロれんがへと展開された。その結果吹付技術、スラグコントロールなどの操業技術の向上とあいまつて 10 000 回を超す転炉寿命が達成された¹⁹⁾。しかしこれらの焼成れんがの損傷は上記マグ・ク

ロれんがと同様、剝離損傷が主因となり根本的な解決にはなり得なかつた。この対策として転炉内張りにおいてもマグ・カーボンれんがが注目され、一部適応されずでにかなりの成果が収められている。マグ・カーボンれんがにおいては、従来から塩基性れんがの欠陥と考えられていたスラグの浸潤ときれつの発生という本質的な問題が、見事に解決されたことは画期的なことといえる。また不焼成れんがであることも省エネルギーの観点から評価されている。

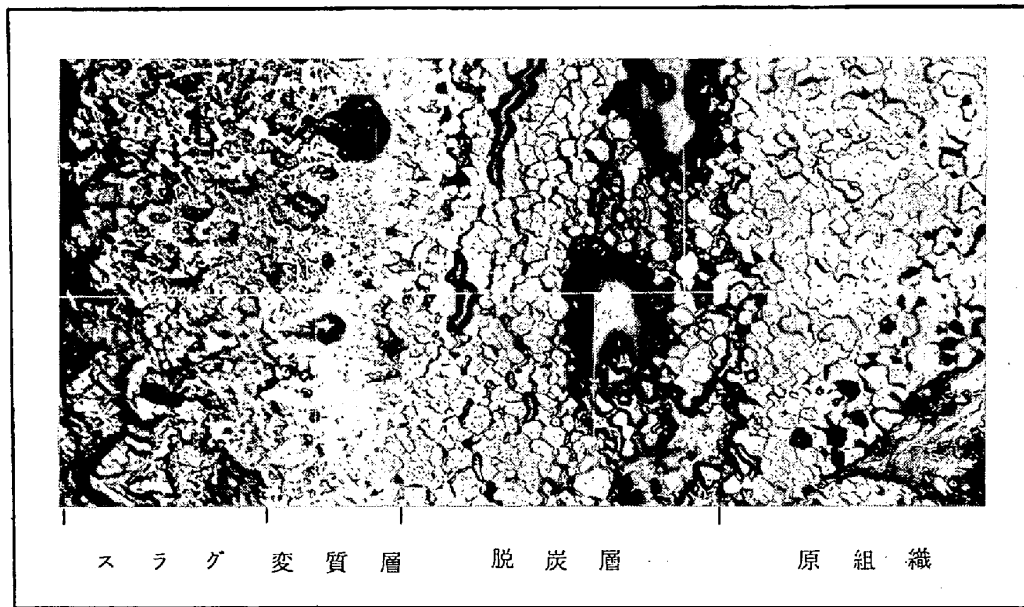
写真 2 にはこれらの塩基性れんがの典型的な微構造組織を示している。そしてマグ・カーボンにおける黒鉛量と弾性率、熱伝導率、スラグ浸透深さの関係を図 10 に示した。黒鉛の添加効果はスラグの浸透を防ぎ、また粒子間の結合は従来の思想と異なり逆に結合の発達を抑制分断することによつて弾性率を低減して、耐スポール性と耐食性を両立させるところに特徴がある。一例として転炉の内張りに使用されたマグ・カーボンれんがの稼働面のマイクロ組織を写真 3 に示した。スラグの浸透が少なく、その変質層が表層部に限られている。

しかしながらここに登場したマグ・カーボンれんがにおいて全く問題がない訳ではなく、使用中のカーボンの



200 μ

写真 2 塩基性耐火物の結合組織



200 μ

写真 3 MgO-C れんがの使用後組織

酸化、マグネシアの分解、高熱伝導性からくる缶体保護のための断熱、あるいは冷却の問題、黒鉛の資源問題など新たな問題をかかえることになった。特に資源問題についてはかつてジルコン原料において苦い経験をしてお

り、資源の少ない輸入原料に依存しているだけに今後の取り組みが重要である。

以上、高炉および転炉の内張り材料の変遷を通して、永年の間酸化物領域では解決し得なかつた問題が、非酸

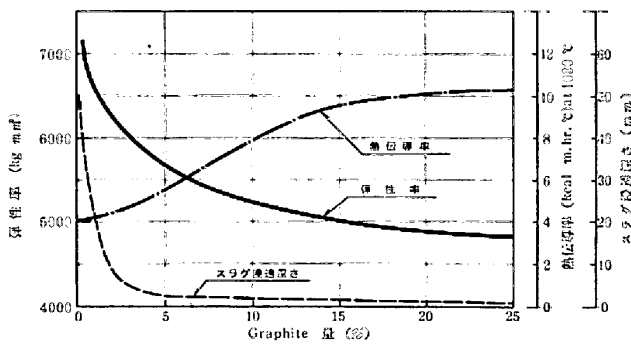


図10 MgO-C 系における Graphite の効果

化物系耐火物の登場で一挙に解決しうる見通しが得られてきた例を示した。耐火物の構成も今や酸化物の領域だけでは論じ得ず、Si, SiC, C などの非酸化物を座標に織り込まなければならなくなつたといえる。

図 11 には耐火物を構成する主要酸化物成分と炭素との系を模式的に示している。今まで塩基性れんがにおいては MgO の高い領域、または一部 CaO 領域に、更に SiO₂-Al₂O₃ 系においては高珪酸、高アルミナ領域に分極化しそれぞれ高純度化、低フラックス化を指向した。これに伴つて耐火物の組織は高压成形、高温焼成により緻密化への追求がなされた。その結果、耐食性およびスラグの浸透抑制にはかなりの効果がみられてきた。しかし特性面においては弾性率は高く、熱膨張率も大きく、結果的に熱衝撃抵抗性に劣ることになり、高耐食性化と割れというジレンマに逢着せざるをえなかつた。この打開策として現れたのが、耐食性と靱性を兼ね備えた炭化珪素系並にマグ・カーボン系あるいはアルミナ・カーボン系れんがなどの非酸化物系耐火物であるといえることができる。

このような考え方に基づく材質は、前述した高炉や転炉外精錬炉や混銑車の内張り、スライディングプレート、浸漬ノズルなどのアルミナ・カーボン材質として最近では広く展開されてきている。

しかしながら、このような考え方に対して珪酸質れんがは一つの例外と考えるべきであろう。この代表であるろう石れんがは取鍋内張材として古くから使用され今日なお多用されている。この数十年の経過は使用条件の苛酷化に対処しつつ、漸次 SiO₂ は富化され、低アルカリ化してきたことを物語っている。この理由は使用時加熱面に高粘性の液相を生成し、これによつて熱応力を緩和し、同時にスラグの侵入を抑制する優れた特徴がある。そしてきれつや目地が存在してもブローチング特性により融着し、内張りを一体化させる効果があり、特に取鍋の敷については塩基性、高アルミナ質、ジルコン質などの挑戦をしりぞけ今なお依然としてその優位性を保っている。ろう石れんがは本邦特有の耐火物として珪酸の特徴を最も効果的に発揮してきた材料と言うべきであり、製鋼造塊用耐火物の歴史上特筆されるべき天然の配材で

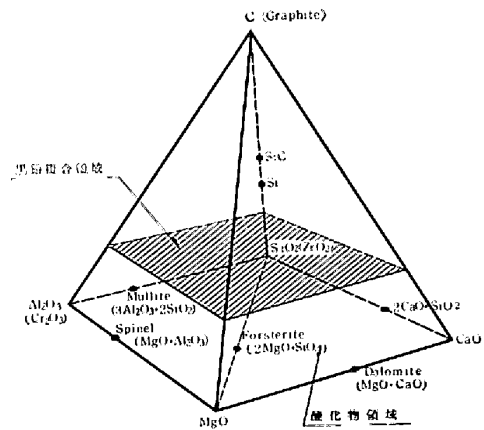


図11 非酸化物系耐火物への展開

ある^{20)~22)}。しかし操業条件の苛酷化する取鍋内張材としていつまで適用しうるかどうか、鋼品質への影響を含めて今後の注目点である。

5. 耐火物の高級化

耐火物の一分極を不定形化とすれば、ほかの極として定形れんがの高級化(機能化)があげられる。特にスライディングノズルをはじめとする各種流量制御系耐火物、浸漬ノズル、ポーラスプラグ、ランスパイプなど製鋼技術によつて重要な機能と役割を担う耐火物が増えてきている。このような機能(性)耐火物は製鋼における安定操業および鋼品質に多大の影響をおよぼすために耐スポール性、耐食性、通気性、気密性、機械的特性など従来の耐火物以上に高い精度と安定性が要求される。材質的には表3にまとめて示したように熔融石英質、アルミナ・カーボン質、ジルコニア質、窒化珪素・窒化硼素質などが開発されている。

これらの機能材は特定の具備特性を強調するためにミクロ組織の制御が必要となり、従来の耐火物の範ちゆうよりはむしろファインセラミックスに近づいてきている。

写真4に一例としてジルコニアノズルの微構造を示しており、右側の均質な組織に比べて、左側の組織は安定化ジルコニア結晶の粒界に単斜系ジルコニア結晶を介在させることによつて、熱衝撃抵抗性を向上させたものである。

同様の手法により窒化珪素質ノズルにおいても図12に示すように窒化珪素の結晶粒界に窒化硼素を介在させることによつて、耐火物としての耐スポール性が著しく改善されるようになった。

元来、耐火物は天然原料を主体として結晶相、粒界相、マトリックス、粒形、大きさ、分布など不均一な組織から成り立ち、これが一つの特徴ともなつていたわけである。しかし最近では合成原料を多く使用することにより均質で緻密な組織への追求がなされてきたけれど

表 3 耐火物の高級化

要求される性質	材 質	用 途
耐熱衝撃抵抗性	溶 融 石 英	浸 漬 ノ ズ ル 断 気 パ イ プ
耐 食 性 耐 熱 衝 撃 性	アルミナ・カーボン ジルコニア・カーボン 特殊不定形材	浸 漬 ノ ズ ル 断 気 パ イ プ ラ シ ス パ イ プ
耐 食 性	ア ル ミ ナ 質 ジ ル コ ニ ア 質 マ グ ネ シ ア 質	スライディングノズル ポーラスプラグ 羽 口 れ ん が
耐溶鋼濡れ性 高温強度 機械的性質	炭 化 珪 素 質 窒 化 珪 素 質 炭 化 珪 素 質	特 殊 ノ ズ ル

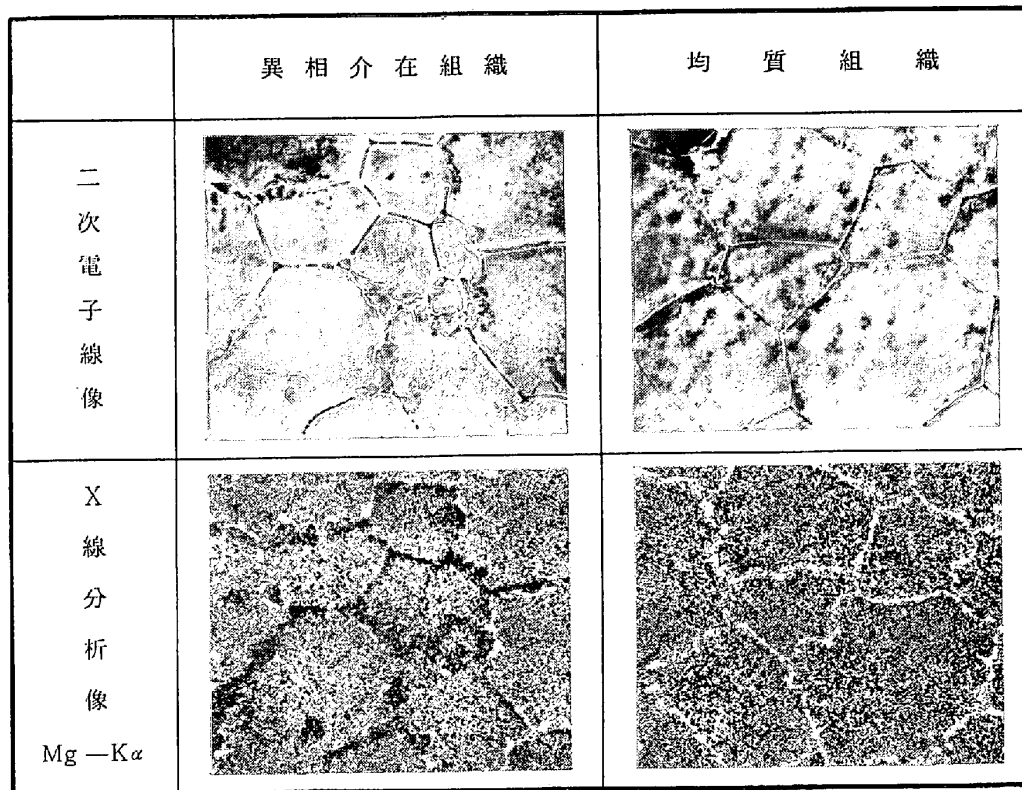
100 μ

写真 4 安定化ジルコニアの微構造

も、これは必ずしも熱衝撃抵抗性を満足するものではなかった。上述のように意図的に不均一組織を形成することによってセラミックスの耐熱衝撃性を改善する方向が見出された意義は大きいと言えよう。結合形態、結晶粒子の大きさ、分布、マトリックスなどマイクロ組織の制御をさらに追求する必要がある。このような観点から不均質な天然原料の見直しをすることも今後の重要な研究課題である。また従来質耐火物からファインセラミックスへのアプローチの一つが見出されたと考えられる。

6. 耐火物の評価と試験法

耐火物は事前評価の難しい経験工学的な材料と言われ、使ってみないとわからないとよくいわれてきた。この原因は耐火物が高温、高圧下で溶鋼やスラグと接触して、しかも温度変化を伴って使用されるためにその損傷機構が複雑多岐にわたり、明確に把握することが難しいことにある。過去転炉や取鍋において耐火物の品質特性と使用条件から、損耗速度を数式化する試みがなされたけれども、そのほとんどが普偏性のないものとなつてい

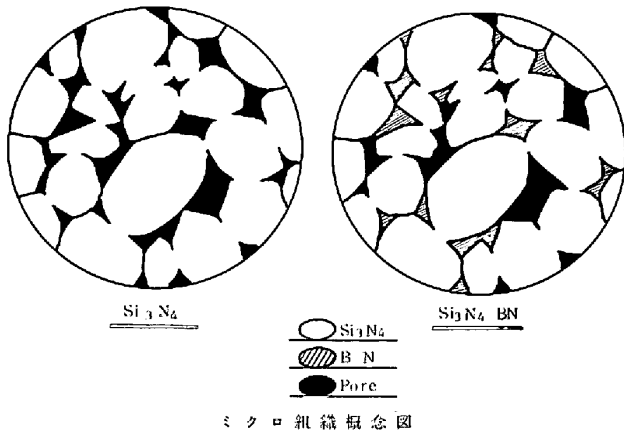
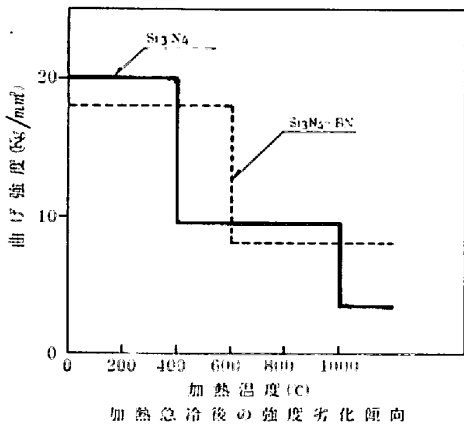


図12 窒化珪素焼結体の熱衝撃抵抗性とミクロ組織

る。

図13は耐火物の損耗パターンを概念的に3つに分類したものである。パターンIは構造体としての機械的応力、熱応力によつてれんがが破壊される不規則背面きれつ(熱的、機械的スポーリング)、パターンIIはスラグ

の浸潤や加熱面に温度、組織変化を生じ特有の変質組織を形成し、その境界にきれつを生ずる加熱面平行きれつ(構造的スポーリング)およびパターンIIIは溶鋼やスラグと反応して溶解あるいは摩耗される、主として液相化による表層侵食(溶損)などである。

上記区分の中、IとIIのパターンが耐火物の損傷形態を複雑にし、かつ損耗速度を大ならしめる原因となっていることが多い。これらの損傷要因を除去することが、耐火物研究の当面の課題といえることができる。Iに対しては熱応力によるきれつの研究、炉体の構造的解析、炉体実験など主として鉄鋼ユーザー側の研究^{23)~25)}並に耐火物の靱性の研究、非酸化物系耐火物の採用などが損傷の機構の解明と対策に貢献し大幅に改善される兆しが表れてきている。IIについては塩基性れんがを始め高耐火性耐火物共通の致命的欠陥であつたが、前述のようにマグ・カーボンをはじめとする非酸化物系材料の出現により、やはり大幅な改善が可能となり損耗を表層部に限定しうらうようになってきた意義は大きい。

このように不規則な割れによる損耗を除去することによつて耐火物の事前評価がより容易となり、代表特性値の意義ならびに実験室における侵食試験結果と実績との相関性が、より確かなものになることが期待される。さらに炉体実験シミュレーションテストなどのダイナミックな試験を通して耐火物の事前評価を実際的なものとし、さらには特定条件についての損耗速度を数式化することが可能になるであろう。ここにユーザー、メーカーにとつて耐火物研究の究極的な目標の一つがあるといえることができる。

パターン	現象	損傷形態	概念図
I	不規則背面きれつ 炉体熱応力歪 温度変化	○きれつの発達・脱落 (spalling) ○溶銹・溶鋼の侵入 ○ガスリーク	
II	加熱面平行きれつ 変質組織の形成 fluxの侵入	○きれつの拡大 ○剥離・剥落 (peeling) [損耗速度大]	
III	表層侵食 結合組織の分解 (disintegration) fluxの浸潤	○溶流 (liquidus flow) ○離脱 erosion [損耗速度小]	

図13 耐火物の損傷パターン

7. 結 び

耐火物技術の最近の動向について、非酸化物系耐火物を中心にその一断面を述べさせていただいた。今回紙面の都合で各炉別にわたつての技術動向、耐火物製造上の問題ならびに不定形耐火物の最近の傾向などの記述は省かざるを得なかつた。耐火物技術は申すまでもなく広範な工学領域から成り立ち、難しい課題が多い。また製鉄製鋼技術の限りない発展に伴つて今後も進展していくものと考えられる。耐火物の使命もより厳しい命題が課せられると思う。これからの課題は炉前技術を中心としてユーザーと耐火物メーカーが一体となつて開発する姿勢が、ますます重要になつてくることは確実である。最後に私は本日のまとめとして次の二つのポイントを指摘させていただきたい。

その一つは耐火物の新しい動向として、従来の耐火物の主成分である酸化物の領域がある程度限界に達したと思われることである。炭化珪素、窒化珪素、黒鉛などの非酸化物系耐火物に席を譲らねばならない傾向が随所に現れてきたことがその証拠である。果たして酸化物が限界にいたつたと考えるべきであろうか。これから対処する大きな課題である。非酸化物系耐火物もすでに幾つかの問題に逢着していることに気づくのである。すなわち資源上の問題、エネルギー高消費型への懸念である。一方、酸化物系耐火物の原料資源は地球上に豊富に産出し、耐火物としても本質的に安定で優れている点を考えるときなお見捨てるべきでなく、これらの活用こそこれからの重要な課題であると信ずる。また両者の適切な複合使用が今後の技術であろう。

もう一つのポイントは炉体冷却の問題である。フランスのある耐火物技術者がいつているごとく『水は最良の耐火物である』ということは確かに真実である。事実、高炉電気炉などに水冷却が効果的に実施されている。非酸化物系耐火物をはじめとして耐火物の高級化の方向は、すべて熱伝導率の高い方向への展開であり、冷却は耐火物の一つの究極点ではないかとさえ考えられる。果たして今後冷却がどこまで可能となるか、耐火物とのバランスはどうあるべきか、これもやはり今後の課題である。しかしわれわれは『最良の耐火物は水である』という結論を出す前に、耐火物にはまだまだ成し遂げるべき技術上の課題を多く残していることを識らなければなら

ない。これに挑戦していくのがユーザーならびにメーカーのこれからの仕事でもあろう。

文 献

- 1) 林 武志: 鉄と鋼, 56 (1970) 8, p. 1089
- 2) 片田 中, 杉田 清, 水谷吉蔵: 鉄鉄研究, (1975) 283, p. 1
- 3) 水谷吉蔵, 野村高照, 柴田英俊, 大崎 保: セラミックデータブック, (1976) 56, p. 145
- 4) 杉田 清: 鉄と鋼, 65 (1979) 9, p. 1462
- 5) 片田 中, 杉田 清, 柴田英俊: 金属, 49 (1979) 7, p. 2
- 6) 耐火物協会: 耐火物協会会報, 361 (1980) 5
- 7) L. A. LEONARD: Ref. Jour., (1978) 5, p. 12
- 8) M. KOLTERMANN: Radex-Rundschau, (1979) 4, p. 1120
- 9) T. F. BERRY, R. N. AMES, and R. B. SNOW: J. Amer. Ceram. Soc., 39 (1956) 9, p. 308
- 10) W. R. DAVIS, R. J. SLAWSON, and G. R. RIGBY: Trans. Brit. Ceram. Soc., 56 (1957) 2, p. 67
- 11) 林 武志: 鉄と鋼, 53 (1967) 11, p. 22
- 12) 林 武志, 洪野正雄: 鉄と鋼, 56 (1970) 14, S 379
- 13) 林 武志, 洪野正雄, 藤原禎一, 沢木長恵: 鉄と鋼, 67 (1976), S 451
- 14) 平櫛敬資: 第 48, 49 回西山記念技術講座 (1977), p. 31
- 15) 平櫛敬資: 耐火物, 29 (1977) 235, p. 403
- 16) J. T. Vau KONGNENBURG and J. Van LAAR: Iron & Steel Eng., 53 (1976) 6, p. 57
- 17) R. H. HERRON and K. A. BAAB: Amer. Ceram. Soc. Bull., 54 (1975) 7, p. 654
- 18) L. HALM: Rev. Met., 77 (1980) 2, p. 121
- 19) 西川泰男, 渡辺 明, 草下幸雄: 耐火物, 25 (1973) 1, p. 42
- 20) 林 武志: 鋳物, 30 (1958) 10, p. 1
- 21) 林 武志: 日本鉄鋼協会第 48, 49 回西山記念技術講座 (1977), p. 113
- 22) 林 武志, 京田 洋, 南波安利: 耐火物, 22 (1970) 5, p. 211
- 23) 内山昭一: 耐火物, 32 (1980) 10, p. 539
- 24) 熊谷正人, 内村良治: 耐火物, (1980) 11, p. 601
- 25) 加藤一郎, 森田喜保, 植上文範: 耐火物, 32 (1980) 12, p. 661