

SHINAGAWA TECHNICAL REPORT

日本における過去半世紀の耐火物の
開発動向の推移

Change in Development Trends of Refractories
in Japan in the Past Half Century

小 形 昌 徳
Masanori OGATA

品川技報

日本における過去半世紀の耐火物の開発動向の推移

Change in Development Trends of Refractories in Japan in the Past Half Century

小 形 昌 徳*
Masanori OGATA

要 旨

本報は日本における過去半世紀の耐火物の開発動向の推移を解説する。その開発動向は大きく3つの時期に分けられ、第1期は耐火物の品質改良であり、第2期は製鋼プロセスの変化に対応するための品質そのものの転換であり、第3期は付加価値の追求であった。そして、研究開発のキーワードは原単位から環境へと変化した。現在、日本の耐火物業界が直面している課題として、労働生産性、原料リスク、耐火物原料の製造エネルギーがある。

Abstract

This paper presents the change in development trends of refractories in Japan in the past half century. The development trend is roughly divided into three period. The 1st period was “quality improvement”, while the 2nd period was characterized by “change in quality” to cope with the change in the steelmaking process. In the 3rd stage, some new characteristics were added to products in order to differentiate them from imported refractories. And, the keyword for refractory development has shifted from “unit consumption” to “environment”. Currently, labor productivity, raw material risks, and production energy for raw materials are pointed out as challenges faced by the Japanese refractory industry.

1. はじめに

昨年、南米の耐火物技術協会が開催するALAFAR 2018において、「日本の耐火物の開発動向：過去、現在、未来」と題して講演する機会を得た。その講演内容を基に内容を再構成したのが本報である。

日本の耐火物技術の歴史は1850年代、幕末における反射炉用煉瓦の製造にまで遡る¹⁾。しかし、現在の耐火物技術の多くは、戦後の1950年代、60年代に欧米の耐火物技術を導入することから再出発している。その後、1970年代から80年代にかけて

1. Introduction

Last year, I had an opportunity to deliver the keynote speech titled “Development Trend of Refractories in Japan: Past, Today & Future” at ALAFAR 2018, organized by the Association of Latin American Fabricators on Refractories. This report is based on the keynote speech.

In Japan, the history of the refractory industry goes back to the 1850s, when some reflection-furnaces were constructed at the end of the Edo period¹⁾. However, most of the

* 取締役常務執行役員 Director, Managing Executive Officer

日本の耐火物技術は劇的に進歩した。この時代の技術革新に関しては、1980年代から90年代にかけて日本で開催された耐火物国際会議の基調講演で詳しく紹介されている²⁻⁴⁾。現在の鉄鋼向け作業用耐火物の多くはこの時代に開発されたと言ってもよい。これらの製品は現在も改良が続けられているが、1990年代以降の開発動向⁵⁻⁷⁾はそれ以前に比べて次第に変化してきたように思われる。

そこで本論では、日本における過去半世紀の耐火物技術の開発動向の変遷を振り返るとともに、現在の課題についても言及する。

2. 耐火物生産量と原単位の推移

過去半世紀にわたる日本の耐火物生産量の推移をFig.1に示す。耐火物の約8割が鉄鋼業で使用されているため、粗鋼生産量の推移も同じ図に示した。

日本の経済史において1973年のオイルショックは極めて重要な出来事であった。オイルショックまでの高度経済成長期においては、鉄鋼業界も耐火物業界も生産量が増え続けてきた。オイルショックを契機に生産量の増加は止まったが、鉄鋼業界は省エネのために新しい製鉄プロセスを導入し、これが多くの耐火物イノベーションを導いた。

current refractory technology restarted in the 1950s and 60s after World War II by introducing advanced technologies in the West. After that, refractory technology made impressive progress in the 1970s and 80s. Details of the progress were shown in the keynote speeches at the international conference of refractories held in Japan in the 1980s and 1990s²⁻⁴⁾. It could be argued that most of the current refractory products used in the working lining of steel-making furnaces were developed in this period. Product improvement is still ongoing at present. But there are some difference between the improvement trends from the 1990s⁵⁻⁷⁾ and the trends seen before then.

For this reason, the purpose of this paper is to show the change in the development trends of Japanese refractory technology in the past half century and to discuss some of today's challenges.

2. Change in Refractory Production and Unit Consumption

Changes in Japan's refractory production in the past half century are shown in Fig. 1. Crude

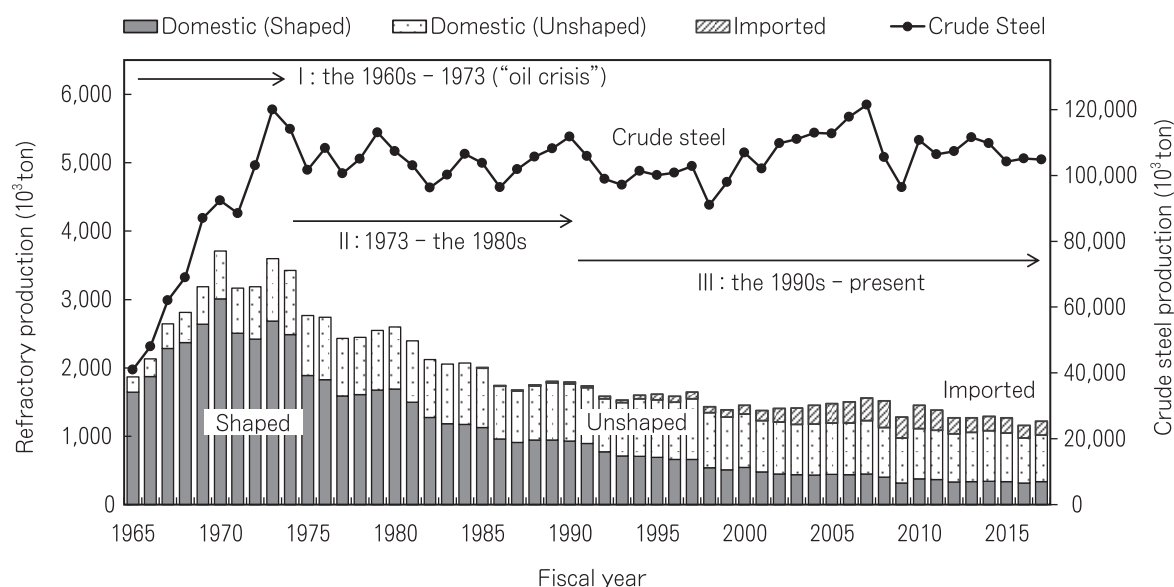


Fig. 1 Change in refractory and steel production in Japan.

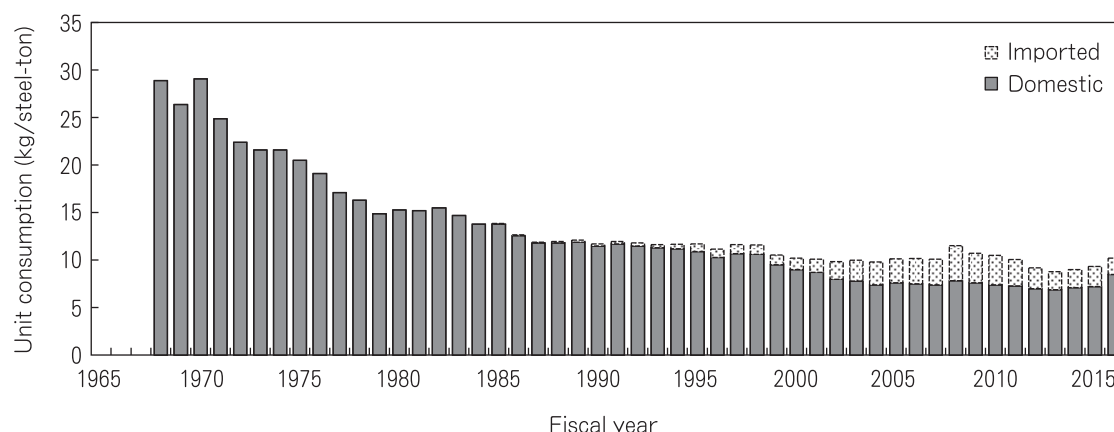


Fig. 2 Change in refractory unit consumption for steel in Japan.

日本の耐火物業界にとってもうひとつの重大な衝撃は、グローバル経済の影響による安価な輸入耐火物の増加であった。耐火物輸入量の増加は1990年代から顕著となった。

したがって、本論では過去半世紀の日本の耐火物史を、オイルショック以前、オイルショック以後、1990年代以降の3つの時期に区分する。

Fig.2には鉄鋼用耐火物の原単位の推移を示す。耐火物原単位は粗鋼生産量に対する鉄鋼向け耐火物販売重量から計算される。鉄鋼用耐火物原単位は1970年代から80年代にかけて急激に低下しているが、耐火物輸入量が増加した1990年代以降は変化が少ない。

3. 開発動向の推移

3.1 キーワード検索による調査

日本における耐火物の開発動向の推移は「耐火物」誌に掲載された報文・記事の数の推移から知ることができる。耐火物誌の報文・記事はCD-ROMにまとめられているため、キーワードを使って検索し、年度毎の件数を集計した⁸⁾。

一例として、「原単位」というキーワードで検索された記事の件数を年毎に頻度分布でまとめた結果をFig.3に示す。「原単位」に言及した記事は1990年代以降、減少している。上述のように、この時期から安価な輸入耐火物の量が増加しており、ユーザーが耐火物原単位以上に直接的に原単価を重視するようになったことを示唆している。

steel production is also shown in the same figure because about 80 % of the refractories are consumed by the iron-and steelmaking industry.

In the Japanese economic history, the “oil crisis” in 1973 was a very important event. Until the oil crisis, both the steel and also refractory industries continued to increase their production under the high economic growth. After the oil crisis, however, production growth stopped. The steel industry introduced new steelmaking processes in order to conserve energy, which resulted in many refractory innovations.

Another important impact on the Japanese refractory industry was the increase in the import of low-priced refractories due to the effect of the global economy. This trend became clear from the 1990s.

Therefore, the Japanese refractory history is divided into three periods in this paper ; before the oil crisis, after the oil crisis, and after the 1990s.

Fig.2 shows the change in refractory unit consumption for steel. The unit consumption can be determined by dividing refractory sales (weight) for the steel industry by crude steel production. The unit consumption has been drastically reduced from the 1970s to the 1980s. However, after the 1990s, when imported

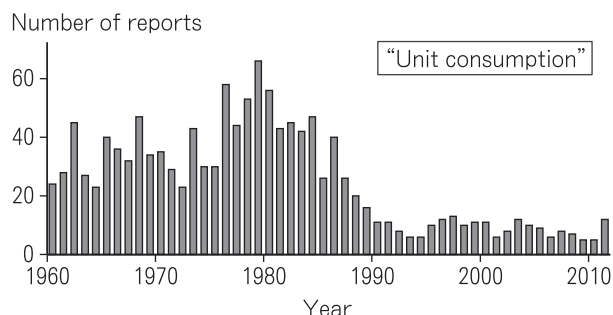


Fig. 3 Change in number of reports listed by keyword of “unit consumption” in TAIKABUTSU CD-ROM.

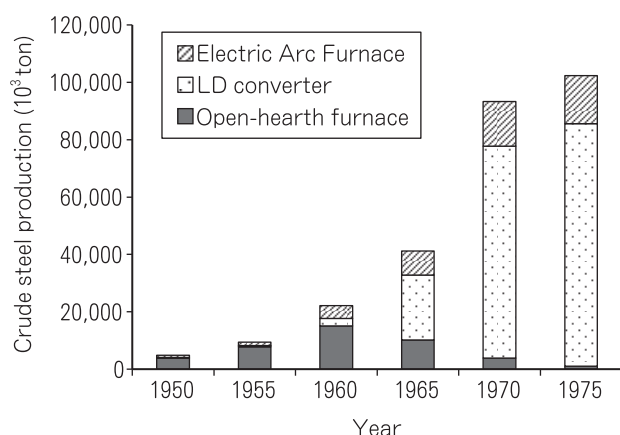


Fig. 4 Change in steelmaking process in Japan during the 1st period.

したがって以下では、「1960年代から80年代にかけて耐火物原単位を低減させたイノベーションは何であったか?」,そして「1990年代以降のR&Dのキーワードは何か?」に注目する。

3. 2 第1期：1960年代からオイルショックまで

1960年代からオイルショックまでの高度経済成長期には、粗鋼の生産量が増加すると同時に、製鋼法が平炉から転炉に変化した (Fig.4)。平炉は「耐火物の城」と呼ばれるほど多量の耐火煉瓦を使用していたため、転炉への転換は耐火物原単位の低減に大きく貢献した⁹⁾。

一方、キーワード検索の結果に基づくと、1960年代後半から「高純度」と「高温焼成」が耐火物の改良手段として注目されたことが分かる (Fig.5)。高純度化は、特に製鋼用塩基性耐火物の品質を高めるために、塩基性原料において必要であった。高温焼成は欧米においてダイレクトボンド・マグクロ質れんがが発明されたことが契機になった。

refractories increased, the unit consumption, including the imported ones, did not change much.

3. Change in Development Trend

3. 1 Keyword searching

The changes in the refractory development trends can be known from the change in the number of articles in the journal of the Technical Association of Refractories, Japan (“Taikabutsu”). As the reports in this journal have been compiled into a CD-ROM, the number of reports can be counted from the results of keyword searching on the CD-ROM⁸⁾.

As an example, Fig. 3 shows the annual frequency distribution of the number of reports searched with the keyword “unit consumption”. The number has been decreasing since the 1990s. As indicated earlier, the import of low-priced refractories has been increasing from the 1990s. Therefore, these facts suggest that customers came to emphasize the refractory unit cost directly rather than unit consumption.

The following discussion will therefore focus on “What innovation reduced the refractory unit consumption from the 1960s to the 1980s?” and “What is the keyword for development from the 1990s?”

3. 2 First period: from the 1960s to the oil crisis

The first period is from the 1960s to the oil crisis. This period is referred to as the “high economic growth” period. Crude steel production increased year by year. And the steelmaking process changed from open-hearth furnace to LD converter (Fig. 4). The open-hearth furnace was constructed with a large amount of refractory bricks, so it deserves to be called a “refractory castle”. Hence, the change from open-hearth furnace to LD converter largely

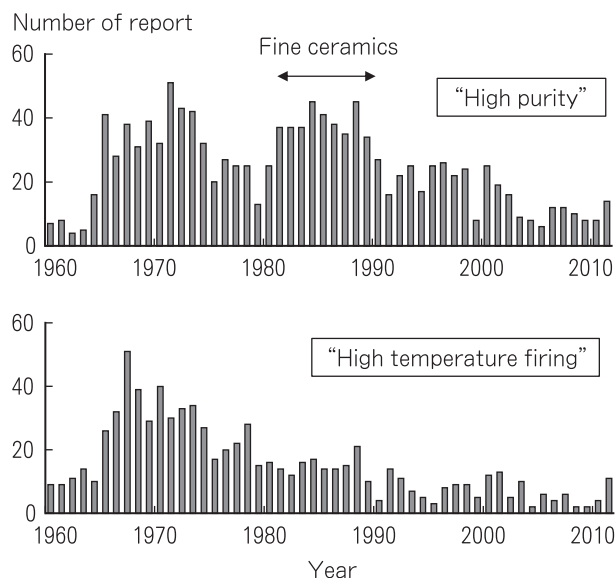


Fig. 5 Change in number of reports listed by keyword of “High purity” and “High temperature firing” in *TAIKABUTSU* CD-ROM.

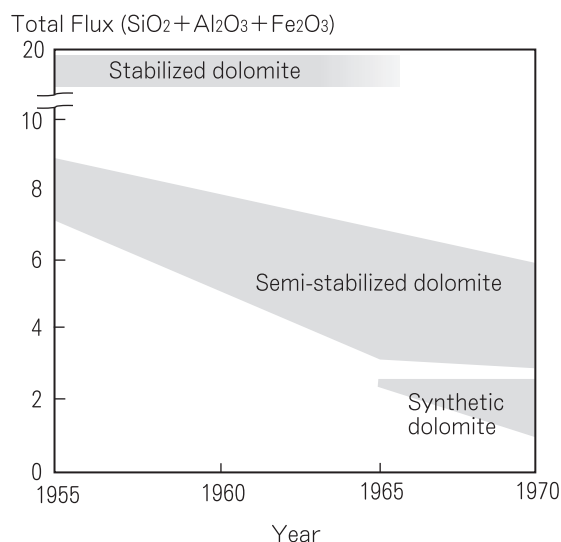


Fig. 7 Change in total flux content of dolomite clinker in Japan.

日本は天然のマグネサイト資源には乏しいため、1950年代より海水マグネシアの開発が開始された。海水マグネシアクリンカーの品質の推移をFig.6に示す。1950年当時、日本の海水マグネシアは純度86%であった。しかし、国家プロジェクトとして、原料メーカー、耐火物メーカーとユー

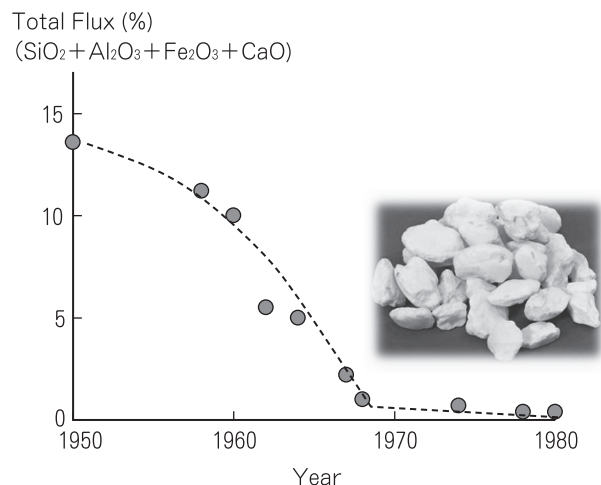


Fig. 6 Change in total flux content of sea-water magnesia clinker in Japan.

contributed to the reduction in refractory unit consumption⁹⁾.

On the other hands, results from keyword searching show that both “high purity” and “high-temperature firing” were important refractory improvement approaches from the late 1960s (Fig. 5). High-purity was particularly necessary for basic raw materials to improve the basic bricks for steelmaking. High-temperature firing was triggered by the invention of direct-bonded magnesia-chrome brick in Europe and the United States.

As Japan is poor in natural magnesite resource, development of sea-water magnesia was started from the 1950s. Fig. 6 shows the change in quality of sea-water MgO clinker¹⁰⁾. In 1950, the Japanese sea-water MgO was 86% grade in purity. However, as a national project, purity improvement of sea-water magnesia was vigorously pursued by collaboration among raw material producers, refractory producers and customers, and academia. As a result, high-purity MgO clinker was achieved in the late 1960s.

Similarly, dolomite clinker was also improved to high purity during this period¹⁰⁾. Fig. 7 shows change in the total flux content of dolomite

ザー、さらに大学の共同によって、海水マグネシアの高純度化が研究された結果、1960年代後半には高純度マグネシアが開発された。

この時期、マグネシアと同様にドロマイトクリンカーも高純度化が進められた¹⁰⁾。Fig.7にドロマイトクリンカーのトータル・フラックス量の変化を示す。製造技術の発展とあわせて、ドロマイト質煉瓦は安定化ドロマイト質煉瓦、タールボンド・ドロマイト質煉瓦、ピッチ含浸焼成ドロマイト質煉瓦と改良され、LD転炉の寿命延長に大きく貢献した。

3. 3 第2期：オイルショック後から1980年代

この時期はオイルショック対策として省エネが最大の課題となり、鉄鋼業ではエネルギー効率に優れた新しい生産プロセスを次々と導入された。それに対応するために、新しい耐火物が開発された。

その典型的な例が鑄造用耐火物である。それまでは造塊用煉瓦として多量の粘土質煉瓦が生産されていたが、造塊が連続鑄造に変わると、造塊用粘土質煉瓦は Al_2O_3 -C質のスライドプレートやCIP製のノズルへと変化した。その結果、粘土質煉瓦の生産量が劇的に減少し (Fig.8), 耐火物原単位の低減をもたらした¹¹⁾。これは、「顧客の生産プロセスの変化が耐火物のイノベーションに極めて大きな影響を与える」という事実の典型例である。

転炉においてもドロマイト煉瓦から MgO -C煉瓦への変化という材料面でのイノベーションが起こった。 MgO -C煉瓦についての技術報告の件数の推移をFig.9に示す。1980年代以降、転炉用 MgO -C煉瓦の改良は重要な開発テーマであり続けている。注目されるのは、1970年代の初頭、 MgO -C煉瓦は当初、電気炉のホットスポット用として開発されたことである。 MgO -C煉瓦をライニングした底吹き転炉は製鋼の歴史におけるイノベーションであることは間違いないが、耐火物技術の視点からは MgO -C煉瓦の発明ではなく応用であった。なお、 MgO -C煉瓦の開発者は「 MgO -C煉瓦は、ドロマイト質煉瓦の耐水和性を比較するために偶然、試料がつけ加えられたことがきっかけであった」と語っている¹²⁾。

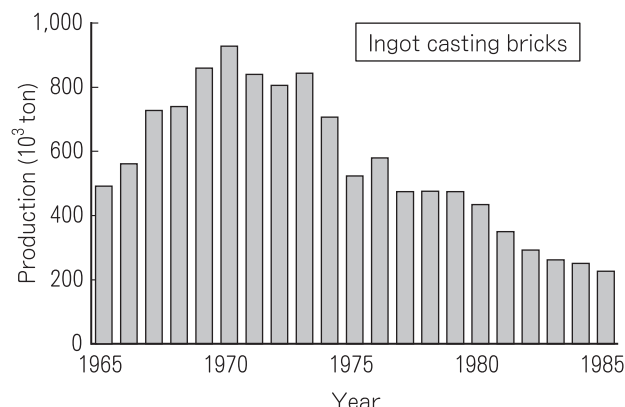


Fig. 8 Change in production of ingot casting bricks in Japan.

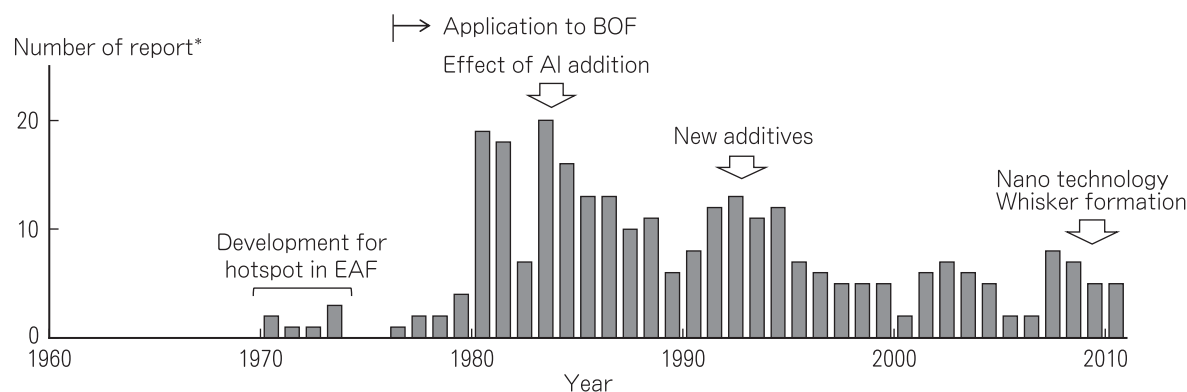
clinkers. Together with the advance in the manufacturing method, dolomite bricks was improved from the stabilized dolomite brick to tar-bonded dolomite brick to pitch-impregnated burned dolomite brick, which greatly contributed to the life extension of the LD converter.

3. 3 Second period : after the oil crisis and until the 1980s

The second period is after the oil crisis and until the 1980s. As a measure for the oil crisis, the steel industry introduced many new production processes that reduced energy consumption. In order to cope with these new process change, new refractory products were developed.

A typical example is cast refractories. In the past, a large amount of fire-clay bricks were produced for ingot casting of molten steel. However, due to the change from ingot casting to continuous casting, fire-clay bricks have changed to sliding-gate plate or CIP-molded nozzles, both of which are made of Al_2O_3 -C materials. As a result, production of fire-clay bricks drastically declined (Fig. 8), resulting in reduction of the unit consumption¹¹⁾. This is a typical example of the fact that “change in customer’s production process has the biggest impact on refractory innovation”.

In the steelmaking process, there was the



*Note : The number of reports is counted by not the keyword searching on CD-ROM but manual counting on the technical papers.

Fig. 9 Change in number of technical reports on MgO-C bricks in TAIKABUTSU.

MgO-C煉瓦は酸化物、カーボン、金属添加物から構成される複雑な微構造を持ち、その改良は現在も続けられている。添加物として開発当初は金属アルミウムが注目された。その後、ホウ化物、炭化物、窒化物など様々な添加物が研究された。最近のMgO-C煉瓦の研究では、ナノテクノロジーやウィスカー生成など、より微細な微構造に焦点が当てられている。

この時期における耐火物技術のもう一つの重要なイノベーションは、耐火煉瓦の不定形化の拡大である。Fig.10の上段に日本の耐火物生産量に占める不定形耐火物の比率を示す。また中段の図は「不定形化」をキーワードとした記事の数の推移を示す。一見すると、耐火物の不定形比率は1960年代から順調に増加してきたように見える。しかし実際には、1970年代後半に不定形化の増加がいったん停滞していた。1982年には「不定形耐火物の需要は今後増大するのか？」という座談会が耐火物技術協会で開催されたほどである。これは、当時のキャストブルは溶鋼と接する精錬炉の内張り材に使うには品質的に不十分であり、主に精錬炉の裏張りや加熱炉などの後工程で使用されていたためである。この状況を打ち破ったのが低セメント・キャストブルの開発であった。

断熱キャストブルを除く製鋼用のキャストブルについて、施工水分量の推移を耐火物誌の技術報告から集計した結果をFig.11に示す。低セメント・キャストブルが開発されるまで、キャストブルの

innovation that dolomite brick changed to MgO-C brick. Fig. 9 shows the change in the number of technical reports on MgO-C bricks. It is noteworthy that MgO-C brick was initially invented for the hot spot area of the electric arc furnace in the early 1970s. Lining the BOF with MgO-C brick was an innovation in the steelmaking history without doubt, but from the viewpoint of refractory technology, it was not an invention but application of MgO-C brick. What was the trigger for the invention of MgO-C brick? The refractory engineer who invented MgO-C brick says that “a MgO-C specimen was added to dolomite bricks by chance to compare their hydration resistance in test production.”¹²⁾

MgO-C brick has a complex micro-texture composed of oxide, carbon and metal additives, and its improvement is still ongoing. In the beginning, aluminum additive received attention, and then, various metallic additives including boride, carbide or nitride, were studied. Improvements continue to be made in MgO-C brick. Recent R&D is focusing on finer microstructure such as nano-technology or whisker formation.

Another important innovation concerning refractory technology in this period is extended application of unshaped refractories. The upper

Proportion of unshaped refractories (%)

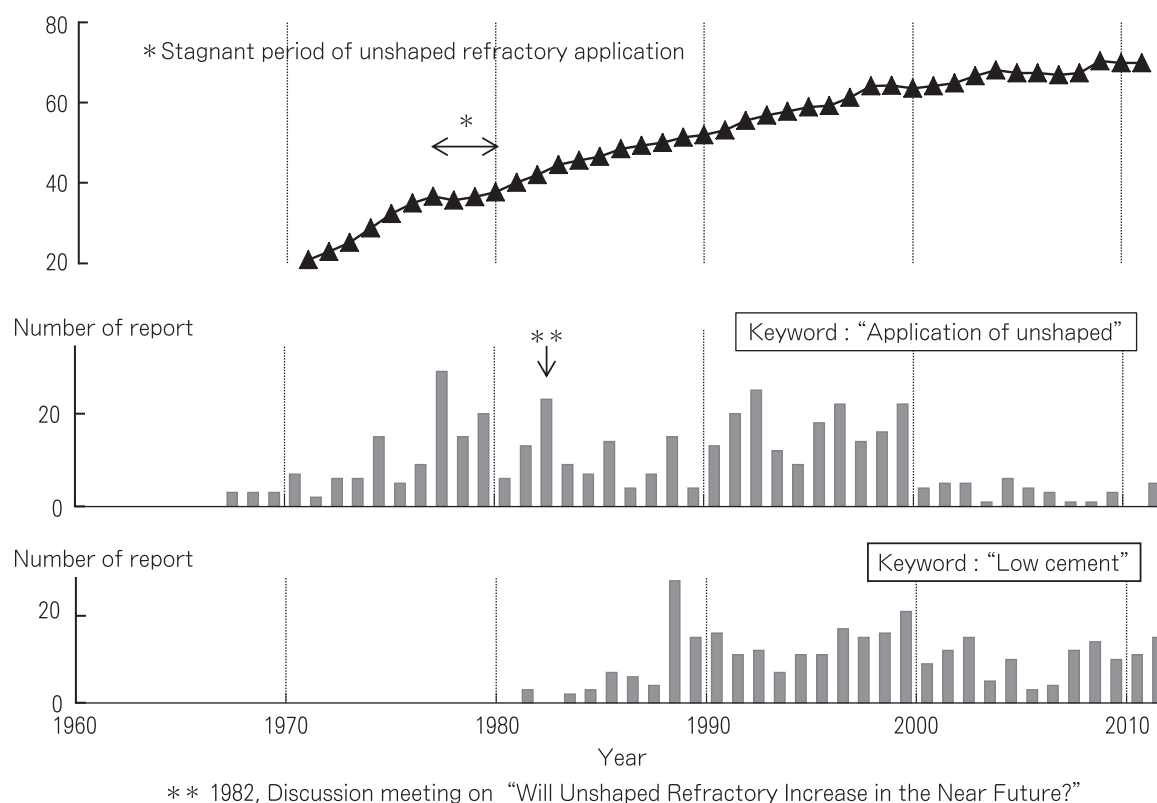


Fig. 10 Change in the proportion of unshaped refractories and the number of reports concerning unshaped refractories by keyword searching of *TAIKABUTSU* CD-ROM.

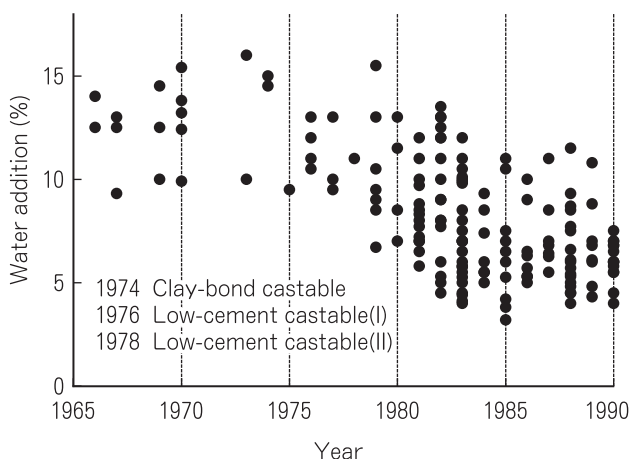


Fig. 11 Change in water addition content of castables for steelmaking working lining.

施工には10%以上の水分量が必要であり、その施工体は緻密ではないため、溶鋼と直接接する部位には適用が困難であった。低セメント質キャストابلはフランスで最初に開発されたが、日本で第2世代の低セメント・キャストابلが開発され

graph in Fig. 10 shows the change in the proportion of unshaped refractories in the total refractory production in Japan. The middle graph shows the number of reports searched by the keyword of "application of unshaped". At first glance, the proportion of unshaped refractories seems to be steadily increased from the 1960s. However, the increase in the unshaped proportion once stopped in the late 1970s. The Technical Association of Refractories Japan held a discussion meeting titled "Will Unshaped Refractories Increase in the Near Future?" in 1982. This is because the quality of the castables of that time were insufficient for working-lining use in steelmaking vessels, and mainly used for the backup lining or heating furnaces. A breakthrough for such a situation was brought by invention of low-cement castables.

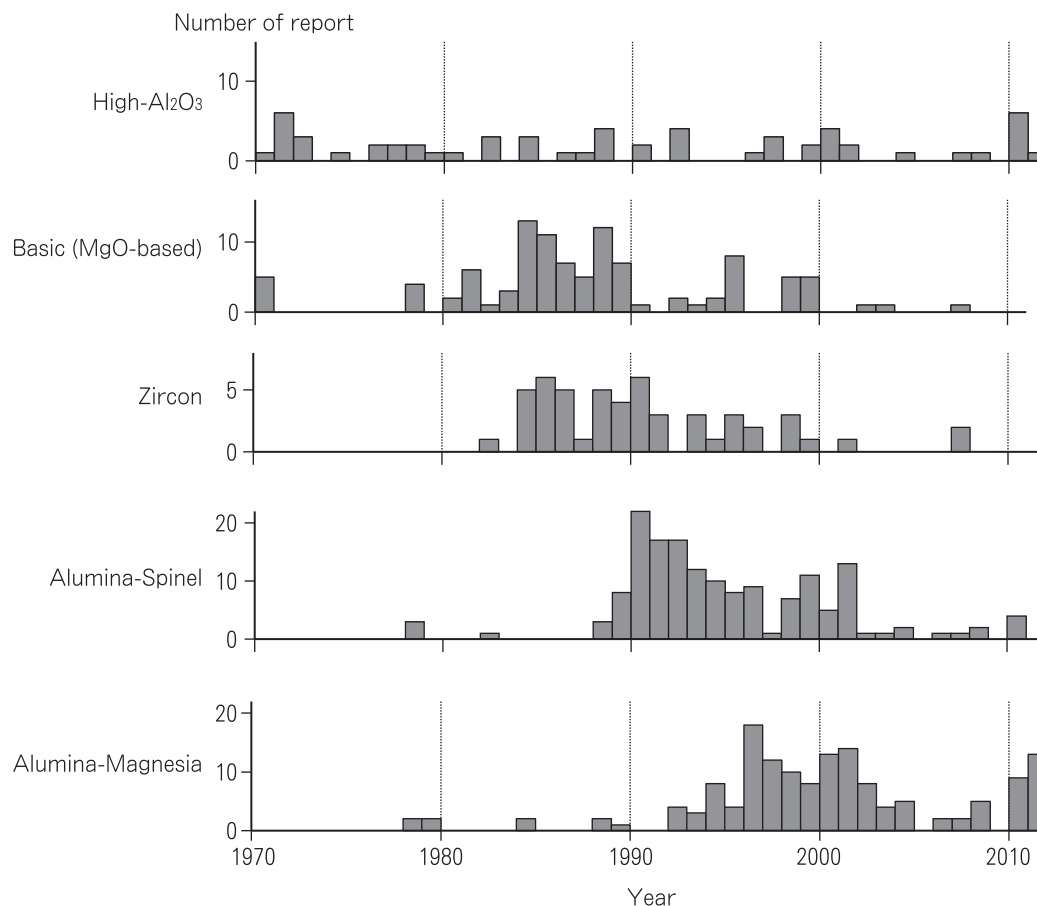


Fig. 12 Number of reports on castable materials for steel ladle by keyword searching in *TAIKABUTSU* CD-ROM.

た結果、取鍋の内張材をキャストابل・ライニングに変えることに成功した。第2世代の低セメントキャストابلの開発者は「超微粉と分散剤の最適な組合せを見つけたことがブレイクスルーとなった。これは試行錯誤の過程で偶然見出された」と回想している¹³⁾。

キャストابلは材料の点でも変化してきた。取鍋用キャストابل材料の技術報告の件数の推移をFig.12に示す。取鍋用キャストابل材料は当初の高アルミナ質から、塩基性材料、ジルコン質と変化した後、ジルコン原料の高騰のために合成スピネルを使った材料へと置換された。その後、1990年代には、使用中に反応してスピネルを生成するアルミナ・マグネシア質材料が開発され、広く使用されるようになった。

キャストابلをライニングした溶鋼鍋の寿命推移の例⁶⁾をFig.13に示す。当初のジルコン質キャストابلに比べて、アルミナ・スピネル質、アル

Fig.11 shows the change in the amount of water added for casting installation of the castables except for light-weight castables. The data was taken from technical reports in the Journals. Until low-cement castable was developed, over 10% water addition was required. As a result, the cast product did not have a dense texture, so it could not be used for areas directly exposed to molten steel. Low-cement castable was first invented in France. Then, the 2nd generation of low-cement type castable was developed in Japan, which led to success in use for the castable lining of steel ladles. The engineer who developed 2nd generation of low-cement castable reflected on the discovery at that time as “The breakthrough was the finding of suitable combination of ultra-fine powder and dispersant. This was found by chance during

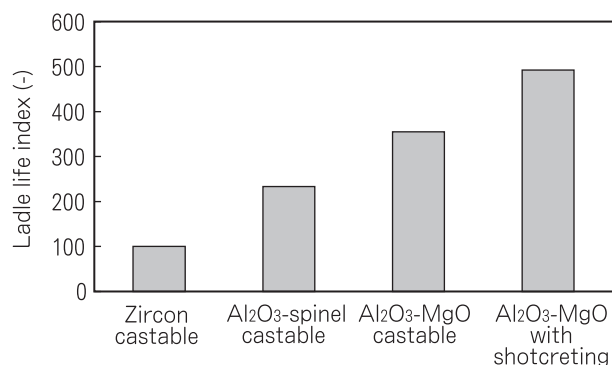


Fig. 13 Change in castable lining life of steel ladle.

ミナ・マグネシア質と材料の改善によって取鍋の寿命は2～3倍に延びた。その後、ショット・クリート工法と呼ばれる湿式吹き付けで施工することで継ぎ足し補修を行い、さらに寿命が延びた。しかし湿式吹き付けは施工後の設備の清掃に手間がかかるため、最近では流し込み施工に戻ったユーザーが多い。

3. 4 第3期：1990年代から現在まで

上述のように、第2期に開発された耐火物製品の改良は現在も続けられている。一方、安価な輸入品に対抗するため、日本の耐火物技術者は国内製品に新たな付加価値をつけることに取り組んだ。環境対策、熱ロス低減、顧客製品の品質向上などが代表的な付加価値である⁵⁾。

環境面での高付加価値製品の例として、“環境にやさしいMgO-C煉瓦；ECONOS”がある¹⁴⁾。これはフェノール樹脂を使用しないMgO-C煉瓦であり、加熱時の臭気レベルが大きく低減されている。同時に熱伝導率も同じ黒鉛量のMgO-C煉瓦よりも30%低い特徴があり、熱ロス低減（省エネ）にも貢献している。

顧客製品の品質向上につながる高付加価値製品の例として段差型浸漬ノズルがある¹⁵⁾。このノズルは内管に環状の段差を設けることで、ノズル内を通過する溶鋼流の偏流を防止し、鋼製品の品質向上に貢献している。なお、段差型ノズルの開発者は「何か新しいことをやってみたかったからで、後から水モデル実験によってその効果が検証された」と語っている¹⁶⁾。

trial-and-error.”¹³⁾

The material composition of the castables was also improved. Fig. 12 shows the change in the number of reports about steel ladle castables according to materials. At first, high-alumina castables were examined, and then, MgO-based castables were focused on. Then, zircon castables were established for the steel ladle lining. However, due to the rapid rise in the price of zircon raw material, zircon castables were replaced by alumina-spinel castables. After that, in the 1990s, alumina-magnesia castables, which form spinel during use, have been developed and come to be widely used.

Fig. 13 shows examples of the changes in the lives of steel ladles with castable linings⁶⁾. As compared with the initial zircon castable, the life of the ladles more than doubled by applying alumina-spinel castable, and more than tripled with alumina-magnesia castable. After that, the installation method changed from casting to wet gunning, which is called “shotcreting”. Shotcreting is advantageous for veneering repair of ladles, which has increased the life further. But recently, most customers returned to casting installation because wet gunning requires the burdensome cleaning of equipment after installation.

3. 4 Third period : from the 1990s to present

The third period is from the 1990s to present. As mentioned above, further improvement of the refractory products developed in the second period is still continuing today. But Japanese refractory engineers have come to add some new characteristics to the refractory products in order to differentiate the domestic refractories from low-priced imported products. Environmental measures, heat-loss reduction, and quality improvement of customer's product are the representative characteristics added

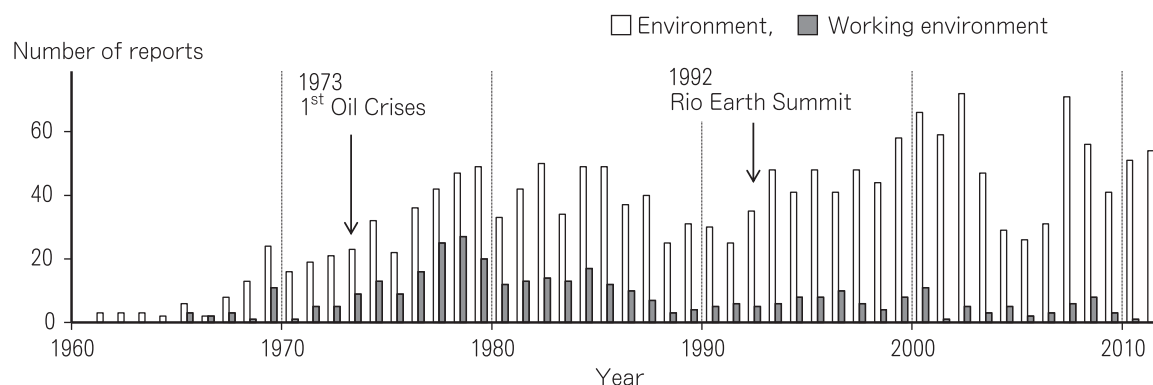


Fig. 14 Change in number of reports listed by keyword of “Environment” and “Working environment” in TAIKABUTSU CD-ROM.

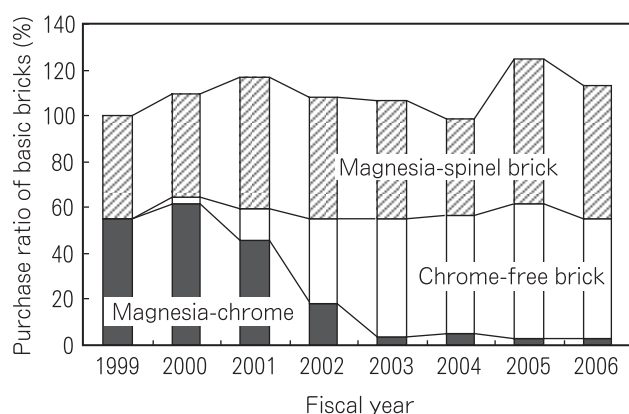


Fig. 15 Purchase proportion of basic bricks for rotary cement kilns in Taiheiyo Cement Corp.¹⁷⁾

耐火物の付加価値の中でも、特に注目されるキーワードは「環境」と思われる。Fig.14は「環境」で検索された記事の数を示す。環境に関する記事は1990年代以降、増加している。もちろん、それ以前でも環境は重要なキーワードであった。特に“省エネ”とはオイルショックから生まれたキーワードである。また、図中に表示したように、1970年代から80年代において「作業環境」も注目を集めた。一方、1992年に地球環境サミットがリオで開催されたことに象徴されるように、最近では「地球環境」が耐火物業界において重要なテーマになっている。

耐火物の環境対策の中には顧客主導で進められたものがある。一例としてマグクロ質煉瓦のクロムフリー化がある。Fig.15は太平洋セメント社において購入したロータリーキルン用煉瓦の材質別

to enhance the value of domestic refractory products⁵⁾.

An example of a value-added product from the view of environment is “environment-friendly MgO-C bricks ; ECONOS”¹⁴⁾. This MgO-C brick is free from phenolic resin and characterized by low fume level during heating. In addition, this brick has a lower thermal-conductivity than conventional MgO-C brick with the same graphite content, which contributes reducing molten steel heat-loss.

An example of a value-added product in view of the customer’s product quality is the annular-step submerged entry nozzle¹⁵⁾. This nozzle prevents the molten steel flow from flowing in a biased condition, resulting in steel quality improvement. The engineer who invented the annular-step nozzle reminisced “I wanted to try something new. Its effect was confirmed by water modeling only later.”¹⁶⁾

Among the above-mentioned new characteristics for the value-added refractory, the most noticeable one seems to be “environment”. Fig. 14 shows the number of articles listed with the keyword “environment”. The number of articles referring to “environment” has been increasing from the 1990s. Of course, “environment” was important even before the 1990s. In particular, “energy conservation” was the

比率を示す¹⁷⁾。従来、ロータリーキルンの焼成帯にはマグクロ煉瓦が使用されていたが、使用後煉瓦には有害な6価クロムが生成する問題があった。そこで同社では、全社的なクロムフリー化の方針に基づき、数年間で材質の転換を実現させた。マグクロ煉瓦よりもクロムフリー煉瓦の方が高価であることを考慮すると、耐火物購買費用よりも環境対策を重視した材質転換の例として画期的であった。

顧客主導による環境対応に関しては、使用後耐火物のリサイクルも重要である。耐火物のリサイクルに関する報告は最近20年間で大きく増加した (Fig.16)。Fig.17は新日本製鐵における使用後耐火物の処理方法の変化である¹⁸⁾。2001年では使用後耐火物のうち耐火物にリサイクルされるのは11%に過ぎず、40%は埋め立て処分されていた。

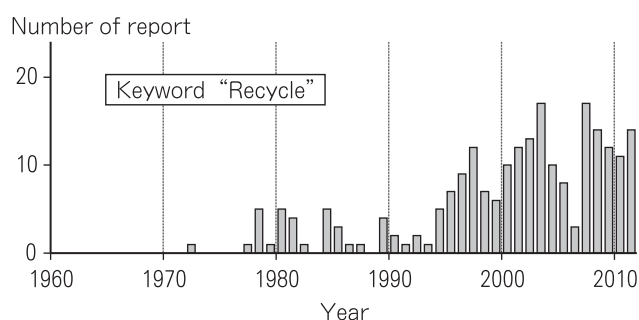


Fig. 16 Change in number of reports listed by keyword of "Recycle" in TAIKABUTSU CR-ROM.

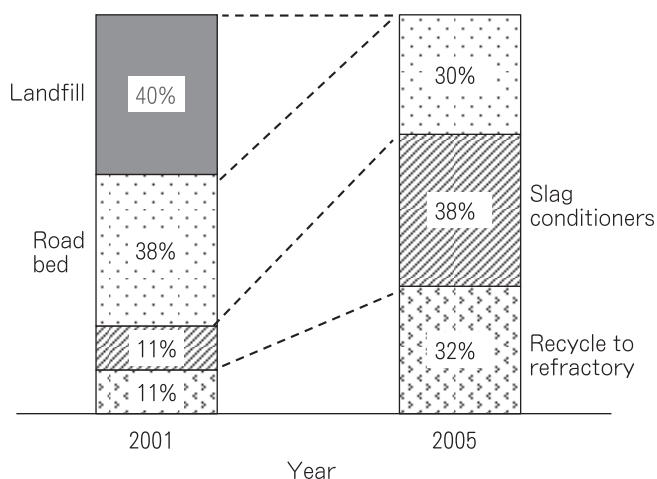


Fig. 17 Proportion of usage of used refractories in Nippon Steel Corp.¹⁸⁾

keyword generated by the oil crisis. And as shown in the shaded bar graph, the importance of the working environment also attracted attention during 1970s and 1980s. In contrast, as symbolized by the "Rio Earth Summit 1992", the earth's environment has become important from the 1990s.

Some environmental measures for refractories were propelled under the initiative of refractory customer. An example is the change from magnesia-chrome bricks to chrome-free bricks. Fig. 15 shows the change in the bricks purchased for the rotary kilns in Taiheiyo Cement Corporation¹⁷⁾. Previously, magnesia-chrome bricks were used for the burning zone of the kilns, but there was a problem: toxic hexavalent chromium was generated in the used bricks. For this reason, a shift to non-chrome materials was realized in several years under a company-wide policy. The non-chrome bricks are more expensive than the magnesia-chrome bricks. Therefore, this was an epoch-making material change in which environmental measures were given priority over refractory purchasing cost.

Another important example of an environmental approach by the customers is the recycling of used refractories. Recycling of refractories has shown marked progress in the past 20 years (Fig. 16). Fig. 17 shows the changes in the disposal method of used refractories at Nippon Steel¹⁸⁾. In 2001, only 11% of the used refractories were recycled into refractories, while 40% were disposed of in landfills. However, after refractory recycling plants were built in the steelworks, the proportion of recycling into refractories has increased to 32% and disposal by landfill has been eliminated.

3. 5 Comparison of development trends among the three period

A comparison of the refractory development trends among the three periods is summarized

Table 1 Change in development trend of refractories in Japan

Period	Keyword	Trend of Refractory R&D
1 st : 1960s — 1973 • High economic growth • Before “oil crisis”	• Unit consumption (High performance)	Quality improvement • High purity • High temp. firing • High pressure molding
2 nd : 1973 — 1980s • After “oil crisis”	• Unit consumption • Change in steelmaking process • Energy-conservation	Change of quality • Carbon-containing bricks • Low-cement castables • CIP products
3 rd : 1990s — present • Collapse of “bubble economy” • Global economy	• Imported refractories • Unit cost • Earth’s environment • Raw material risk	Value-added product • Heat-loss reduction • For clean steel • Labor-saving • Recycle system

しかし、製鉄所構内に耐火物リサイクル工場が建設された結果、使用後耐火物のリサイクル比率が32%に増加し、埋め立て処分は無くなった。

3.5 3つの時代区分の比較

3つの時代区分における耐火物の開発動向の比較をTable 1にまとめた。本論で議論した3つの時代区分より以前、1950年代前半において、粘土質煉瓦と珪石煉瓦の合計は全耐火物の約90%を占めていたが、特殊耐火物として様々な耐火物が既に開発されていた¹⁹⁾。そのため、各時代の開発動向を簡潔に表現すれば、第1期は耐火物の品質改良であり、第2期は製鋼プロセスの変化に対応するための品質そのものの転換であり、第3期は付加価値の追求であったように思われる。そして、研究開発のキーワードは原単位から環境へと変化した。

4. 耐火物のイノベーション

鉄鋼用耐火物の変遷は鉄鋼プロセスの変遷に沿って整理すると理解しやすい。また、顧客の生産プロセスの変化が耐火物技術に極めて大きな影響を与えることもよく知られた事実である。そのため耐火物の歴史的な解説を読むと、耐火物のイノベーションは市場からの要求、すなわちニーズ主導（マーケット・イン）でもたらされたという印象を受ける。

しかし耐火物のイノベーションを詳しく調べる

in Table 1. In the early 1950s, which is before the three periods defined in this paper, the sum of fire-clay bricks and silica bricks occupied about 90 % of the total refractories in Japan. But as special refractories, various kinds of refractories had already been developed at this time¹⁹⁾. Hence, looking back at the history of refractory improvement, it seems that the approach in the 1st period was “quality improvement”, while the 2nd period was characterized by “change in quality” to cope with the change in the steelmaking process. And in the 3rd stage, value-added products with new characteristics were focused on in order to differentiate them from imported refractories. And, the keyword for refractory development has changed from “unit consumption” to “environment”.

4. Innovation in Refractories

It is easily comprehensible to summarize the refractory history along with the change in the steelmaking process. Also, as is well known, the change in the customer’s process has the biggest impact on refractory technology. Therefore, historical review of refractory innovation gives the impression that the innovation was brought by market demand (the needs-oriented

と、イノベーションを可能にした新しい耐火物技術は、しばしば偶然がきっかけで市場からのニーズに先立って発明されている。新しい耐火物が偶然から生まれることが多いという事実は海外の事例でも同様である²⁰⁾。つまり、耐火物のイノベーションの多くは、顧客のニーズが製造側のシーズと結合した時に実現されてきたと思われる。最近のイノベーション論においても、シーズ主導説(プロダクト・アウト)やニーズ主導説(マーケット・イン)よりも、シーズ=ニーズ協働説の方が注目されている²¹⁾。

したがって、耐火物の歴史から学ぶべきことは、“耐火物技術者は市場の要望に応えるだけでなく、常に新しいことに取り組む必要がある”という点にある。

イノベーションとは技術に限らない。日本の耐火物の開発動向は経済動向を反映して変化してきたが、半世紀以上にわたって共通した基盤がある。それは1948年に設立された耐火物技術協会である。耐火物技術協会は耐火物ユーザー、耐火物メーカー、大学関係者の間の協力関係を促し、このことが日本の耐火物産業に特有の性格をもたらした²²⁾。耐火物技術協会の設立は日本の耐火物産業を力強く支える社会的イノベーションであった。

5. 現在の課題

現在、日本の耐火物業界が直面している課題として、労働生産性、原料リスク、原料の製造エネルギーの3点を指摘したい。

日本における耐火物の労働生産性 (ton/person・year) の推移をFig.18に示す。耐火物協会の統計によれば、労働生産性は1980年代から増加してきたが、この生産性の増加は不定形耐火物の比率の増加に大きく依存している。したがって耐火物の不定形化は、施工においてだけでなく製造においても省力化を達成した重要なイノベーションであった。しかし最近では、不定形耐火物の比率も労働生産性も共に変化していない。今、日本では、出生率の低下に伴う労働人口減少のため生産性向上が国家的な課題であり、耐火物製造プロセスにおけるイノベーションが求められている。

innovation)。

However, when we explore the innovation in depth, the new refractory technology, which enabled the innovation, has often been invented by chance before the market demand. It is common to refractory innovation overseas that it was often invented by accidental findings²⁰⁾. That is to say, most of refractory innovation seems to be germinated by linkage between customer's needs and manufacture's technology seeds. Also, recent studies on product innovation focus on the seeds- and needs-cooperation theory rather than the seeds-oriented (product-out) theory or the needs-oriented (market-in) theory²¹⁾.

Therefore, it is a historical lesson that refractory engineers should try something new at all times instead of merely coping with customer's needs.

Innovation is not just about technology. Although the refractory development trend has changed depending on Japanese economic environment and societal demand, there is a common ground that has strongly supported refractory development. That common ground is the TARJ (Technical Association of Refractories, Japan) established in 1948. The TARJ has been promoting the collaboration among customers, manufactures and academia, which is a unique characteristic in the Japanese refractory industry²²⁾. TARJ is a social innovation that strongly supports the growth of the Japanese refractory industry.

5. Current Problem

Labor productivity, raw material risks (rising prices derived from environmental regulations or resource depletion), and production energy for raw materials are pointed out as current challenges faced by the Japanese refractory industry.

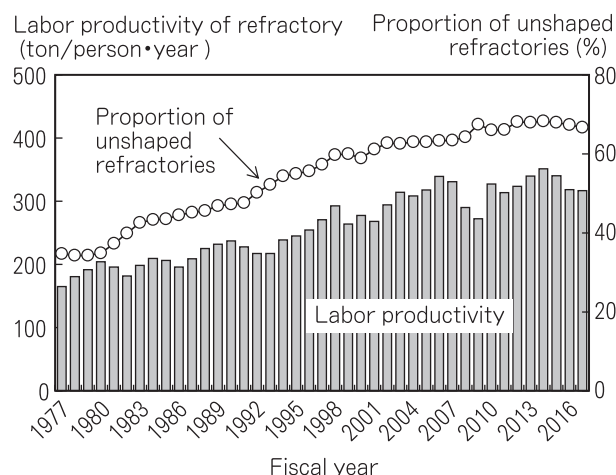


Fig. 18 Change in refractory labor productivity in Japan.

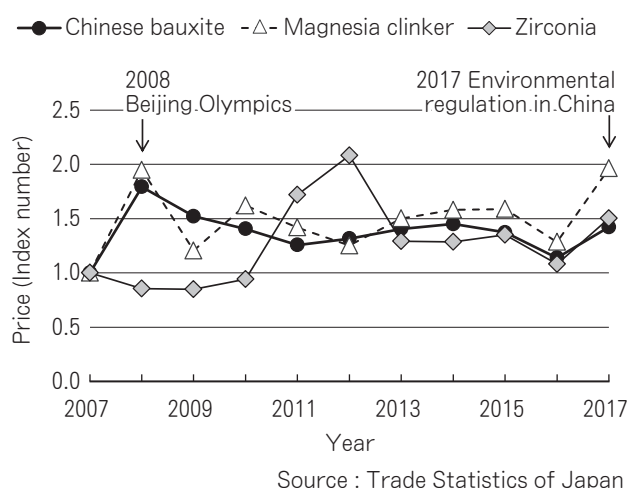


Fig. 19 Change in price of imported raw materials.

Fig.19は貿易統計に基づいた日本に輸入される耐火物原料の購入価格の推移である。中国からの輸入原料は、2008年には北京オリンピックの開催に伴う環境規制によって、また昨年から中国産マグネシア原料が環境規制の強化によって、価格が高騰している。これは世界中の耐火物産業が直面している問題である。

原料価格の高騰は、耐火物メーカーにとって大きなリスクである反面、新しい材料への変化や耐火物リサイクルの拡大の機会になる可能性がある。例えば、かつて日本ではシリマナイト原料を活用した高アルミナ質煉瓦が良好に使用されていたが、原料枯渇の問題から1960年代から1970年代

Fig.18 shows the labor productivity (ton/person·year) of refractory manufacturing in Japan. According to the statistics from The Japan Refractories Association, the labor productivity had been increasing from the 1980's. The increase in the productivity depended largely on the increased proportion of unshaped refractories shown by the line graph. That is, application of the unshaped refractory was an important innovation that achieved reduction in labor not only in installation but also in manufacturing. But recently, both the proportion of unshaped products and labor productivity are not making any progress. Now, in Japan, “productivity improvement” is a national issue due to workforce shortage caused by declining birthrate. Therefore, innovation in the refractory manufacturing process is required.

Fig.19 shows the change in purchase price of imported raw materials basing on Trade Statistics of Japan. The price of Chinese raw materials rapidly increased in 2008 due to the environmental regulations accompanying the Beijing Olympics. And from last year, the price of Chinese magnesite has been increased due to environmental regulations. Of course, not only the Japanese refractory industry, but all of the global refractory industries are facing these challenges now.

The rising price of raw materials is a risk for refractory manufactures, but it may become an opportunity for change of refractory materials or progress in the recycling system. Japanese refractory industry experienced the raw material risk in the past. In previous times, “sillimanite” was widely used as a good raw material for high-alumina bricks. However, due to depletion of sillimanite resources, use of “andalusite” and development of synthetic mullite was started²³⁾. And in the 1980's, due to rising of zircon price, zircon castable changed to alumina-spinel

にかけて、アンダルサイトへの置換に加え、合成ムライト原料の開発に繋がった²³⁾。また1980年代には、ジルコンの価格高騰を機会に、ジルコン質キャストابلからアルミナ・スピネル質キャストابلへの変更が進んだ²⁴⁾。

最後に耐火物原料の製造エネルギーをFig.20に示す²⁵⁾。天然原料や焼結原料に比べて、SiCや電融原料はその製造に際してはるかに多量のエネルギーを消費する。日本の耐火物は焼成煉瓦から不焼成煉瓦へ、さらに不定形耐火物へと転換が進み、耐火物製造時のCO₂排出量は減少した。しかし、カーボン含有不焼成煉瓦や不定形耐火物ではエネルギー消費型原料が多量に使用されている。すなわち、耐火物の製造工程は省エネ型になったが、その耐火物原料の製造はエネルギー消費型となった。現在の耐火物原料はトータル・エネルギー消費量の視点から見直されるべきと思われる。

またエネルギー消費の視点から見ると、使用後耐火物は多量のエネルギーを消費して得られた貴重な資源である。廃棄の問題だけでなく、省エネルギーの視点、また国内に所有する資源という視点からも、使用後耐火物のリサイクルは今後ますます重要になる。

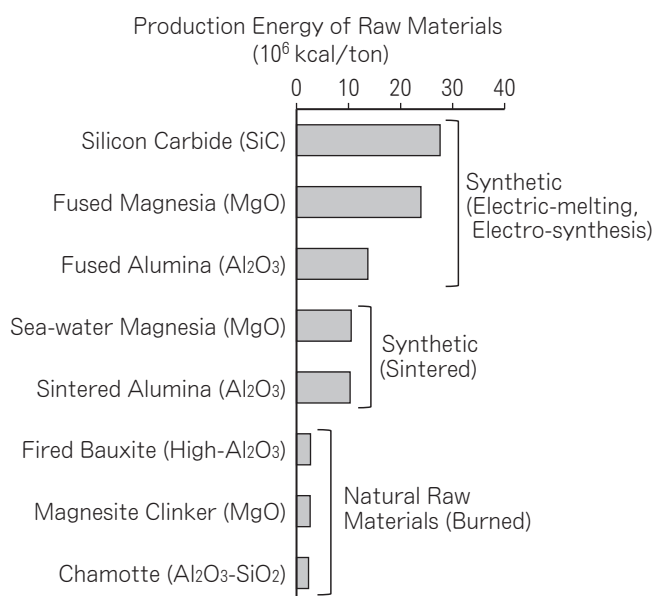


Fig. 20 Production energy for raw materials.

castables²⁴⁾.

Fig. 20 shows the production energy required for refractory raw materials²⁵⁾. Compared with natural raw materials or sintered clinkers, silicon carbide and fused minerals consume far more energy for their production. As mentioned, the Japanese refractory industry had shifted from burned bricks to carbon-containing unburned bricks, and shifted from shaped bricks to unshaped refractories. As a result, carbon dioxide emissions from the refractory manufacturing process were reduced to a significantly low level. However, both unburned bricks and unshaped refractories contain large amounts of energy-intensive raw materials. That is to say, the manufacturing process of refractories has become energy-conserving, but the manufacturing process of their raw materials has become energy-intensive. The current refractory materials should be reviewed from the perspective of total energy consumption.

In view of energy consumption, used refractories can be seen as a precious resource obtained by consuming a lot of energy. Therefore, the recycling of the used refractories will become increasingly important from not only the perspective of waste, but also the perspective of energy conservation and also from the perspective of a domestic resource.

6. Conclusion

The development trend of the refractory industry in Japan was roughly divided into three period. The 1st period was “quality improvement”, while the 2nd period was characterized by “change in quality” to cope with the change in the steelmaking process. In the 3rd stage, some new characteristics were added to products in order to differentiate them from imported refractories. And, the keyword for refractory development has shifted from “unit

6. 最後に

日本における耐火物の開発動向を3つの時期に分けて振り返った。第1期は耐火物の品質改良であり、第2期は製鋼プロセスの変化に対応するための品質そのものの転換であり、第3期は付加価値の追求であったように思われる。そして、研究開発のキーワードは原単位から環境へと変化した。そして現在、日本の耐火物業界が直面している課題として、労働生産性、原料リスク、耐火物原料の製造エネルギーが挙げられる。

耐火物のイノベーションに関しては、その多くは顧客のニーズと製造側のシーズと結合した時に実現されてきた。したがって、耐火物の歴史から学ぶべきことは、“耐火物技術者は市場の要望に応えるだけでなく、常に新しいことに取り組む必要がある”という点にある。

consumption” to “environment”. Currently, labor productivity, raw material risks, and production energy for raw materials are pointed out as challenges faced by the Japanese refractory industry.

As for the process of refractory innovations, most of them are germinated by linkage between customer's needs and manufacture's technology seeds. Therefore, it is a historical lesson that refractory engineers should try something new at all times instead of merely coping with customer's needs.

References

- 1) E. Yorita : Shinagawa Technical Report, [42] 1 (1999).
- 2) T. Hayashi : Proceedings of 1st International Symposium on Refractories, 5 (1983) ; Taikabutsu, **36** [3] 130 (1984).
- 3) Y. Naruse : Proceedings of 2nd International Symposium on Refractories, 3 (1987) ; Taikabutsu, **40** [1] 2 (1988).
- 4) S. Kataoka : Proceedings of UNITECR 1995, 1 (1995) ; Taikabutsu, **48** [5] 201 (1996).
- 5) O. Nomura : Materials Integration, 13, [4] 23 (2000).
- 6) H. Nishio : Proceedings of UNITECR 2003, 1 (2003) ; Taikabutsu, **56** [1] 2 (2004).
- 7) T. Matsui, Y. Nakamura : Nippon Steel Technical Report, [388] 41 (2008).
- 8) M. Ogata : Preprints of 1st Technical Committee on Refractories for Steel Making, 7 (2013).
- 9) K. Sugita : “Refractories for Iron and Steelmaking – A History of Battles over High Temperatures”, Chijin Shokan, Japan (1995).
- 10) T. Tani : Tetsu-to-Hagané, **58** [14] 2089 (1972).
- 11) E. Yorita : Taikabutsu, **57** [8] 439 (2005).
- 12) S. Takanaga : Ceramics Japan, **35** [8] 613 (2000).
- 13) J. Yoshitomi : Ceramics Japan, **35** [8] 622 (2000).
- 14) O. Nomura, Y. Hoshiyama, A. Torigoe : Shinagawa Technical Report, [45] 45 (2002).
- 15) O. Nomura, M. Takai, M. Ogata, S. Inoue : Shinagawa Technical Report, [46] 95 (2003).
- 16) K. Kanamaru : Private Letter (2015).
- 17) Y. Kitabayashi, S. Maekawa : Taikabutsu, **60** [6] 279 (2008).
- 18) S. Hanagiri et al. : Nippon Steel Technical Report, [388] 93 (2008).
- 19) S. Nagai : Journal of the Ceramic Association, Japan, **62**, [698] 491 (1954).
- 20) K. Sugita : Nippon Steel Technical Report, [388] 8 (2008).
- 21) M. Sano : Memoirs of the Institute of Social Sciences, Meiji University., **54**, [2] 55 (2016).
- 22) K. Ichikawa : “Ceramics 100th”, The Ceramic Society of Japan, 99 (1991).
- 23) T. Yamato : Taikabutsu, **63**, [9] 426 (2011).
- 24) B. Nagai : Tetsu-to-Hagané, **81**, [6] N283 (1995).
- 25) T. Ohta : NMS-ISIJ **48**•48, 1 (1977).