

## 鉄鋼業における耐火物技術の歴史的概観

## Historical Overview of Refractory Technology in the Steel Industry

杉 田 清\*  
Kiyoshi SUGITA

## 抄 録

古代から現代までの鉄鋼用耐火物技術の変遷，進歩を概説する。各時代区分ごとの重要史実とその特色を紹介すると共に，原料資源，エネルギー，環境問題，製造体制，研究開発の方法論など，個別の視点からの歴史解説とその考察を試みる。現代の鉄鋼用耐火物の技術は，単なる材料技術に留まらず，熱技術，計測監視，炉構造設計施工，操炉など関連技術を包含した技術システムに成長している。その技術進展に最も影響を与えてきたものは，鉄鋼製造プロセスの技術革新であったことを，歴史が立証している。

## Abstract

The historical transitions and progress since the ancient times in refractory technology for iron and steelmaking is briefly reviewed. In addition to describing the core historical facts for each era and their features, some discussions on the history from specified viewpoints such as raw material resources, energy, ecological aspects, refractory-manufacturing, and R&D methodology are attempted. Modern refractory technology is not simply based on materials technology any more. It has grown into an integrated system technology including heat engineering, monitoring techniques, furnace design, lining installation, and furnace operation. The history proves that the most contributory factor to the development of refractory technology is the technological innovations of iron and steelmaking processes.

## 1. 緒 言

世界最古の採鉱冶金技術書の一つといわれる“デ・レ・メタリカ”(Agricola, G. 著, 1556)には，金属精錬の3大必須物質は鉱石，燃料，そして炉材，すなわち断熱材も含めた耐火物であると書かれている。耐火物は，古代から今日までアイアン・エイジを鉄鋼と共に歩み，人類文明に貢献してきた。

耐火物技術を歴史の流れとして研究することは，現在の技術の背景と本質のより正確な理解，研究に役立つのみでなく，これからの技術推進のための“温故知新”効果にも繋がるのが期待できる。以下に，いくつかの視点から鉄鋼用耐火物技術の過去の歩みを振り返ってみたい。

なお，全般的な史実の詳細，より具体的なデータ，個別の文献などについては，既刊の参考書類<sup>1-12)</sup>に譲ることとした。

## 2. 各時代の特徴

## 2.1 古代，中世，ルネサンス期

人類が耐火物という“火に強い炉材料”の存在を意識するようになったのは，土器焼成窯炉の始祖ともいえる穴窯あるいは原始的たて窯での焼成温度が，粘土鉱物分解温度の上限(800 付近)に達した頃(BC4000-3000)と推定され，それは青銅器時代の初期にあたる。穴窯の場合，“火に強い土”のある場所が選ばれた筈である。当時，その“土”に期待された機能は，熱を逃さないこと(断熱性)と火に溶けないこと(耐火性)であった。

鉄器時代(BC2000 頃以降)に入り，炉内で鉄鉱石を木炭で還元して鉄をつくる原始的製鉄炉では，さらに温度が高くなり，内張り炉内物質との反応にも耐えること(耐食性)も重視されるようになった。したがって，断熱性，耐火性，耐食性の3特性を備えた炉内張り材としての本格的耐火物は，製鉄技術とともに生まれたともいえよう。

\* 工学博士 元新日本製鐵(株)フェロー 耐火物技術協会名誉会員 日本工学アカデミー会員

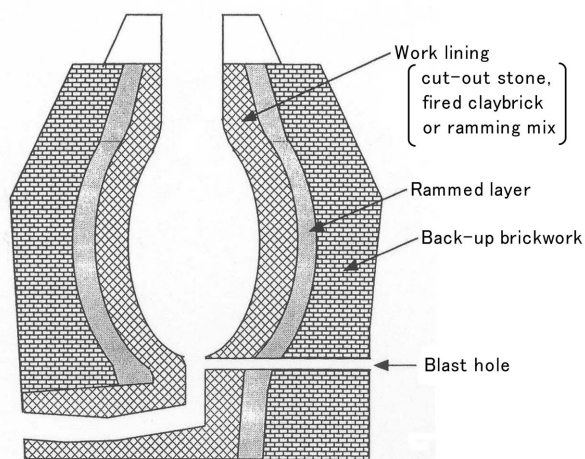


図1 木炭高炉の代表的内張り構造 (16~17世紀)  
Typical lining design of charcoal-fired blast furnace (16th-17th century)

古代製鉄炉のための耐火物の特徴は：

不定形耐火物が主体で、一部天然石切り出しれんがや土器れんがが使われた。

主要材質は、珪岩質 (SiO<sub>2</sub>系) あるいは粘土質 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>系) である。ただし、不純物が多い。

炭素-酸化物系 (木炭・粘土混合粉) 炉材が考案され多用された。それは、ヨーロッパのみならず、日本 (たたら炉)、中国でも使用された。

鉄鋼用耐火物の歴史は、今日主流をなしている不定形耐火物、そして炭素複合系材質から始まったともいえる。

14世紀頃の中世ヨーロッパに熔融状態の鉄が製造できる製鉄炉 (木炭高炉：図1) が出現したが、耐火物技術面での進歩は遅々としていた。ヨーロッパよりも遥かに早く高炉が出現していた中国では、耐火物もそれなりに進歩していたが、材質系としては類似している。

## 2.2 産業革命期

近代耐火物技術の出発点は、産業革命 (18, 19世紀) であったといえよう。蒸気機関、石炭、鉄鋼を3本柱として、英国を起点に欧米先進国に広がった産業革命は、“煙突産業”と俗称される炉主体の各種産業を輩出させ、多種多彩な工業炉が出現し、耐火物の進歩を促した。

その中核となったのはいうまでもなく鉄鋼業で、一貫製鉄所での炉の組み合わせの原型 (図2) はこの時期後半に完成した。コークス高炉に始まりアーク炉に至るまで、多様な鉄鋼用炉が出現し、耐火物も各種新材質が開発された (表1)。

この時代に開発された代表的な鉄鋼用炉とその特徴を例示すると以下のようなものである。

コークス高炉：還元剤、熱源に木炭に替わりコークス

熱風炉：蓄熱式熱交換方式での高炉への熱風供給

コークス炉：石炭を乾留してコークスを製造

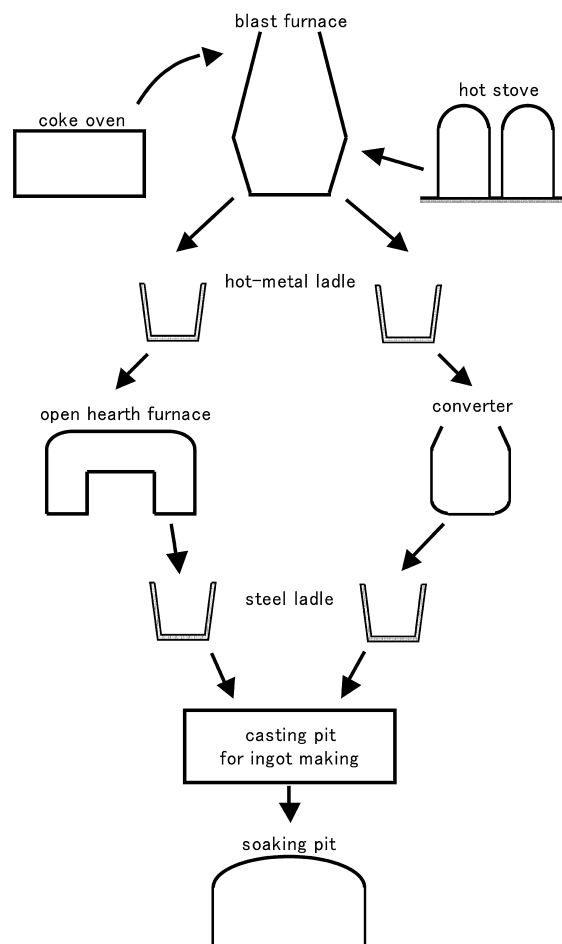


図2 産業革命期後半の一貫製鉄所での代表的炉構成  
Furnace make-up of typical integrated steelworks in the latter Industrial Revolution Era

表1 鉄鋼用耐火物技術年表 (I) (産業革命期)  
Chronological table for steelworks refractories (I)  
(the Industrial Revolution Era)

14-15th century	Charcoal-fed blast furnace	
1709	Coke-fed blast furnace	
1735	Crucible steelmaking	
1784	Paddle furnace	
1806	Magnesia crucible	
1810	Beehive coke oven	
1820	Silica brick (invented)	
1834	Graphite crucible	
1850	Saga paddle furnace	
1853	Water-cooled blast furnace	
1856	Bessemer converter	Silica brick (produced)
1857	Cowper hot stove Kamaishi blast furnace	
1858	Siemens open hearth furnace	
1863	Carbon block	
1864	Martin open hearth furnace	
1868	Silica brick for OH furnace	
1879	Thomas converter	Tar dolomite brick
1880	Magnesia bottom (OHF)	
1881	Magnesia brick	
1885	Chrome brick	
1899	Héroult electric arc furnace	

OH: open hearth, OHF: open hearth furnace

平炉：蓄熱式熱交換方式での廃熱回収による反射炉での溶鋼製造（図3）

転炉：溶銑中の不純物を熱源として、炉底から空気を吹き込み溶鋼を製造（図4）

産業革命以前は、古代土器れんがの進化した材質と考えられる粘土れんが（シャモットれんが、 $Al_2O_3$ - $SiO_2$ 系）が耐火物の主体であったが、この時代に各種の新材質が開発された。しかしながら、炉の種類、機能の急激な多様化に比べれば、耐火物の種類の増加は十分ではなかった。

耐火物技術の状況を要約すると以下のものである。

粘土れんがの品質向上に加え、有力な新材質れんがとして、珪石質、タールドロマイト質、マグネシア質が

登場した。

耐火物は、伝統的用途である内張り材料に加えて、新しい機能に用途が拡大された：蓄熱材、送風羽口、溶湯流制御材（ストッパー、ノズル）など。

トーマス転炉（塩基性）は、タールドロマイトレんがの発明により出現した。ベッセマー転炉（酸性）や平炉も、珪石れんがの登場で円滑な実用化に成功した。築炉技術、内張り冷却技術、保温断熱技術も本格化し、耐火物技術の基幹要素に加わった。

珪藻土れんがの発明（英国特許、1893年）で、断熱機能専用材料が生まれた。

### 2.3 明治開国期

欧米より半世紀以上遅れて始まった日本での産業革命は、反射炉（パドル製鋼炉）建設を先頭に、幕末から明治にかけて急速に進行した。わが国最初の反射炉が佐賀藩築地で操業を開始した1851年（嘉永4年）を、日本の近代耐火物技術元年と呼ぶことができよう。

多彩な海外の耐火物技術を、短期間に消化・吸収し、古来の伝統技術と融合させた実績は、欧米を驚かした。

特記すべき諸点としては：

日本古来の技術として、たたら製鉄での炉築造、登り窯などによる陶磁器製造の技術が活用された。

日本独自開発の高珪酸質粘土れんが（ろう石れんが）は、取鍋内張りなどで後年まで重用された。

多数の傑出した指導者の技術者が活躍した：

江川太郎左衛門（葦山反射炉）、大島高任（釜石洋式高炉）、宇都宮三郎（れんが製造法）、高山甚太郎（耐火物試験法）など

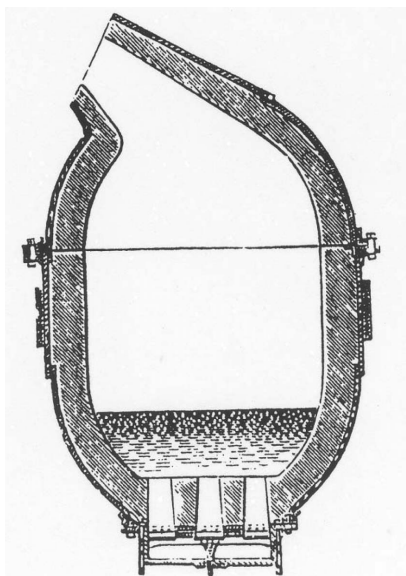


図4 底吹き転炉の構造（ベッセマーの1860年特許）  
Bottom-blown converter patented by Bessemer in 1860

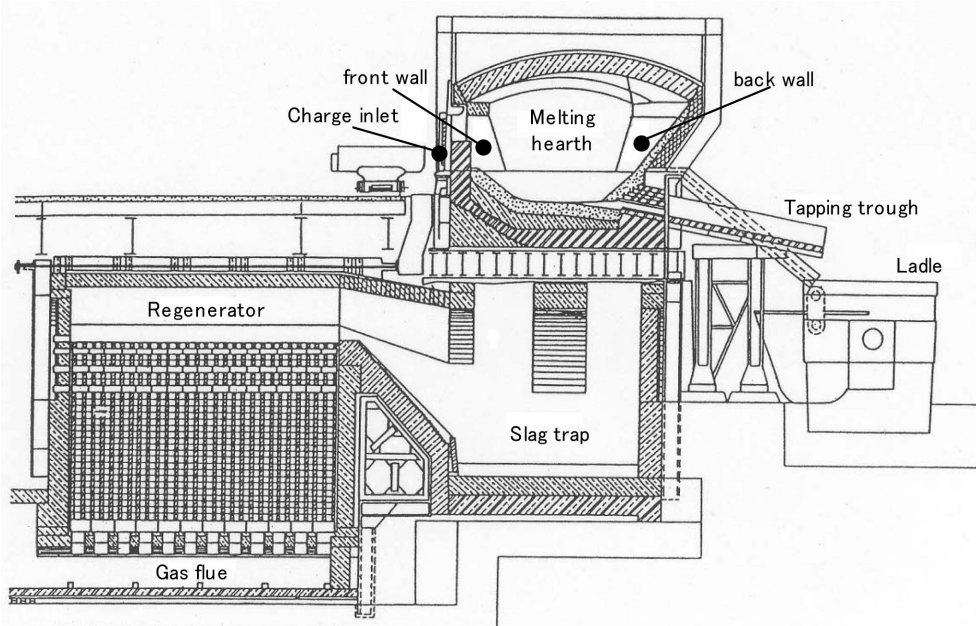


図3 固定式平炉の構造（1960年代）  
Structural illustration of the stationary-type open hearth furnace in the 1960's

官営八幡製鐵所の創業（1901年）により、鉄鋼用耐火物の製造、使用、研究の国家的推進拠点が完成した。

#### 2.4 20世紀前半

世界最大の鉄鋼会社：U.S.Steel社（1901年）、同じく耐火物メーカー：Harbison Walker Refractories社（1902年）の発足で幕を開けた20世紀の前半は、鉄鋼、耐火物の世界の重心が米国へ移動し始めた時代で、日本の技術にもクロマゲレンがの発明などその独自性が注目されるようになった。2回にわたる世界大戦で、鉄鋼生産は各国で急増したが、鉄鋼技術の進歩は、電気炉製鋼の本格化や圧延工程の連続化を除けば、むしろ緩やかであった。

一方、耐火物をめぐる諸環境については、次のように多彩な発展の半世紀であった。

不定形、非酸化物系を含めて実に多種類の新規耐火物が開発された（表2）。

電鑄れんが（ガラス炉用）、炭化珪素れんが（陶磁器炉用）などのように、他分野用途に新材質耐火物が開発され、鉄鋼用に応用されたものが少なくない。

各国で天然原料資源の開発が進行した。わが国では、珪石鉱床（津久見、丹波など）、マグネサイト鉱床（当時の満州・大石橋）などが注目された。

合成原料（海水マグネシア、電融アルミナ、炭化珪素など）の実用化が始まった。

耐火物の標準試験法設定、技術専門書の刊行、関連学協会の設立が先進各国で相次ぎ、耐火物工学を中心とする“技術領域”が社会的に認知された。

表2 鉄鋼用耐火物技術年表(II)(20世紀前半)  
Chronological table for steelworks refractories (II)  
(the first half of the 20th century)

1901	Yawata Steelworks	
1910		SiC brick (US)
1913		Alumina cement (Frn) Unfired magnesia brick (US)
1914		Plastic refractories (US)
1917	Induction-heating furnace	
1920	Silica-bricked coke oven	
1924		Forsterite brick (Ger)
1925		Chrome-magnesia brick (Jpn)
1926		Fused-cast mullite brick (US)
1930	Basic-roofed OH furnace	
1931		“Sinter Korund” brick (Ger)
1932		Castable refractories (US)
1933	Renn-ironmaking process	Zircon brick (US)
1934	Basset-ironmaking process	Cr-Mag brick (UK, US, Ast)
1935		Stabilized dolomite brick (UK)
1936		Fused-cast alumina brick (US)
1938		Unfired Cr-Mag brick (Jpn)
1939	Steel-continuous casting pilot plant	
1940		Unfired Cr-Mag brick (US) Calcina crucible (US)

OH: open hearth

#### 2.5 戦後技術革新、高度成長期

第二次世界大戦後の先進国鉄鋼業では、敗戦国の日本、ドイツを含めて、産業革命以来の大技術革新が進行した。わが国の場合、その殆どが欧米からの技術導入であったが、明治開国期と同様に円滑な消化吸収と改良がみられ、高度経済成長に大きく貢献した。

しかも、高温送風高圧高炉、平炉、電気炉での酸素製鋼、純酸素上吹き転炉、真空脱ガス法、連続鑄造など、主要な革新技術はいずれも耐火物と密接に関連しており、それら導入技術の成功に耐火物が果たした役割は極めて大きい。

耐火物の品質と使用条件の関連が次第に明らかになり、使用条件を考慮した材料設計や新規材質開発の方法論が定着し始めた。また、炉容の大型化、築炉・補修作業の省力化、生産性向上のための炉寿命延長ニーズなど耐火物をとりまく情勢も多様化した。

この時代の日本での状況を要約すると以下のような。

総合耐火物原単位（kg/t-steel）は、以下のように減少し続けた（一部数値は平炉補修材などを補正）。

1950年（昭和25年）	127.0	kg/t-steel
1960	35	77.0
1970	45	29.1
1980	55	15.3

この原単位低減の最大要因は、平炉から転炉、造塊法から連続鑄造法などのプロセス変更である。

耐火物の形態では、ポーラスプラグ（図5）、スライディング・ノズル、浸漬ノズルなどの本格的機能性耐火物の使用が日常化した。

耐火物材質の注目傾向は高性能化で、塩基性化、高純度化、炭素複合化に代表される。製造面では高温焼成が普及した。転炉用ドロマイトれんが、取鍋用ジルコンれんがなどは、国際的にも注目された（表3）。

高炉へのステーブ冷却法（ソビエト連邦方式）の導入は、その後の高炉耐火物技術を一変させることとなる。

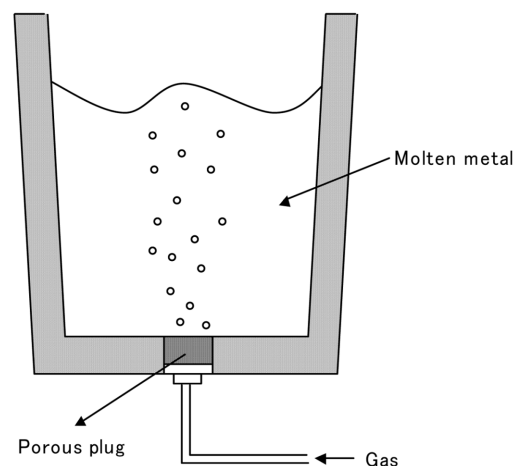


図5 ポーラスプラグによる溶湯攪拌  
Gas-bubbling into molten metal by a porous-plug

表3 鉄鋼用耐火物技術年表(Ⅲ)(1945~1970年,日本)  
Chronological table for steelworks refractories (III) (1945-1970, Japan)

1945	Only 3 BFs in operation out of 37	
1949	Oxygen applied to OHF (trials)	Seawater MgO (Ube Chem. Ind.)
1950		"Ritex" introduced (Shinagawa Ref.)
1951	Oxygen applied to EAF (Yawata)	Carbon block for BF bottom
1952	Test LD converter (NKK)	Zebra-type OHF roof US-made fireclay brick for BF Tar-bonded taphole mix for BF Stabilized dolomite brick (Kyuushu Ref.)
1955	Steel continuous-casting (Sumitomo Metal Ind.)	
1957	LD converter (Yawata)	Baked tar dolomite brick (Kurosaki Ref.) All basic roof- OHF
1960		Basic ladle lining (trials)
1961	Torpedo car (Wakayama) DH vacuum degassing (Yawata)	Hot gunning repair for OHF
1962	High pressure BF	Zircon brick for ladle-lining
1963	RH vacuum degassing (Hirohata) External combustion chamber for hot stove (NKK)	
1964	Large-sized coke oven	
1965		Direct-bonded Cr-Mag brick
1966		Slide-gate valve
1967	Stave-cooled BF (Wakayama)	Porous plug (hot metal de-sulfurizing)
1968	Russian-type stave (Nagoya)	Immersion nozzle (fused silica)
1969	UHP-EAF (Kobe Steel)	
1970		MgO-carbon brick (EAF) Immersion nozzle (CIP 'ed alumina-graphite)

BF: blast furnace, OHF: open hearth furnace, EAF: electric arc furnace,  
UHP-EAF: ultra high power electric arc furnace, CIP 'ed: formed by cold isostatic pressing

## 2.6 オイルショック以降の20世紀

1970年代の2回にわたるオイルショックが、耐火物技術に直接、間接に及ぼした影響は極めて大きい。また、六価クロム、コールドタールなどに起因する環境問題が顕在化した。1970年代以降の耐火物技術には、鉄鋼技術の場合と同様に、省資源、省エネルギー、環境保護という新たな評価軸が加わった。

他方、新しい時代を迎えての鉄鋼製造のコスト低減、生産性向上とともに、鉄鋼製品の品質向上、高付加価値化への活発な動きにも、耐火物技術は敏感に対応した。

耐火物技術の内容も、材質技術主体から拡大されて、施工技術(溶射補修など)、炉構造設計(断熱、冷却など)、計測(内張り監視システムなど)、操炉技術(スラグコントロールなど)を包含する総合システムに成長し始めた。

1981年耐火物技術協会が、海外への技術情報発信のための英文誌“Taikabutsu Overseas”を発刊し、1983年第一回耐火物国際会議を開催した。明治開国以来目指してきた世界の頂点に、わが国の耐火物技術が登り詰めたものと理解された。

多彩な状況(図6,表4)の中から、注目事項を選べば以下のようなものである。

炉寿命の延長と耐火物原単位の低減が、確実に推進さ

れた。特に、高炉寿命の15年以上計画可能、転炉寿命の2000~7000heatsの日常化、水冷強化による製鋼用電気アーク炉での耐火物原単位の激減は、歴史的実績である。

取鍋内張りを中心とする不定形施工技術(材料、装置、施工条件)が定着した。わが国での鉄鋼用耐火物の不定形化率は、下記のように著しく上昇した。

1970年: 18.9%

1980年: 37.7%

1990年: 51.9%

高炉でのステーブ冷却技術の改良進歩により、高炉内張りの最重要箇所は炉床部に集束された。そして、高耐久性カーボンブロックが開発実用化された。

転炉用マグネシア・カーボンレンガをはじめとする炭素複合系材質の使用実績が評価され、基幹材質の一つとして定着した。

スライディング・ノズルなどの機能性耐火物を中心に、海外への輸出が本格化した。中国からの耐火物製品の大量輸入も1980年代半ばから開始された。

使用後耐火物のリサイクル処理の検討、実施が本格化し、廃棄耐火物への環境対応が強化された。

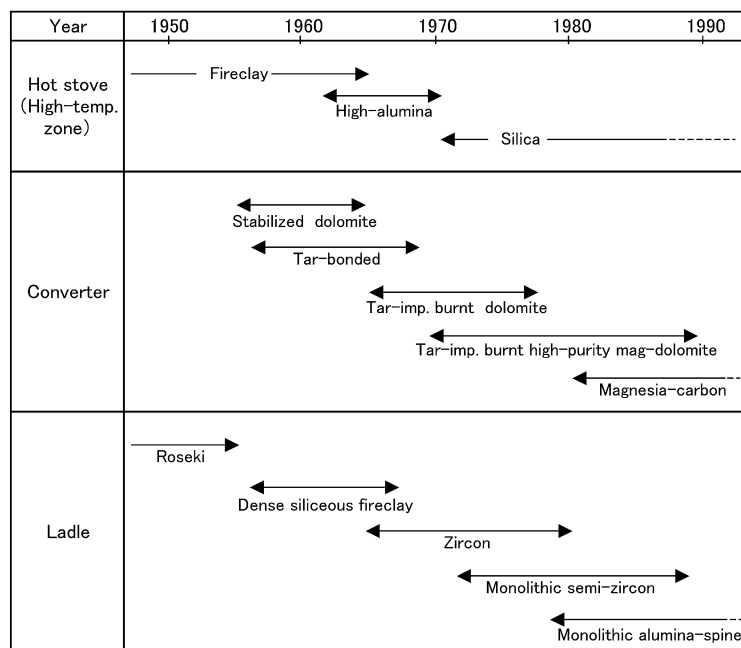


図6 耐火物材質の変遷(代表例 20世紀後半)  
Typical life-cycles of refractory qualities in the 20th century latter half

表4 鉄鋼用耐火物技術年表(IV) (1971~1994年,日本)  
Chronological table for steelworks refractories (IV) (1971-1994, Japan)

1971	De-sulfurizing inside torpedo (Sakai) LF process (Daido Steel)	Slinger process for relining ladles
1972	Entirely CC steelworks (Oita)	Slag control for converter lining
1974		Trial use of SiC brick (Muroran BF)
1975		Hexa-valent Cr pollution (Cr-Mag brick waste) Strengthened regulations on coal tar application Converter lining life world record (10, 110 heats, Kimitsu)
1976	Coke dry quench process (Hirohata, Keihin)	
1977	Q-BOP (Kawasaki Steel) Japan's last OHF gone (Tokyo Steel)	MgO-C converter brick (Oita) Cementless castable
1978		Nippon Steel flame-spray repair (coke oven) Nippon Steel cast-relining process (ladle)
1980	Top-bottom-blown converter Wider application of water-cooling to EAF	
1981	Big progress in BF lining-repair	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiC-C brick (torpedo)
1983		Alumina-spinel castable (ladle)
1985	EBT-type EAF (Topy Ind.)	Fourth-generation stove developed All ceramic-fiber lined RF (Kimitsu) Refractories imported from China
1988	DC-EAF (Topy Ind.)	
1989		Automatic bricklaying machine (converter)
1990		Lining-monitoring sensor (ladle)
1992		Selfflowing-type castable
1993	DIOS pilot plant	Gigantic flame spray-gun (6t/h, Oita)

LF: ladle furnace, CC: continuous casting, BF: blast furnace, OHF: open hearth furnace, EAF: electric arc furnace, EBT: eccentric bottom tapping, RF: reheat furnace, DC-EAF: direct current-electric arc furnace, DIOS: direct iron ore smelting

### 3. 耐火物技術の発展に関連した主要背景の歴史

#### 3.1 鉄鋼製造技術の変革, 進歩

材料の進歩には, その用途(市場)からの要求が圧倒的な推進力をもっている。市場は, 材料進化の母であり, 鉄

鋼用耐火物も例外ではない。耐火物が, その使用条件に格別敏感な材料であることを考えると, 鉄鋼製造技術の変革, 進歩の影響は格別に大きい。

ここでいう“変革, 進歩”には, 新規プロセスの出現は

当然含まれるが、操業温度の上昇、使用熱源の変更、炉の形状変更や大型化、コスト低減要請なども含まれる。

古代製鉄炉での粘土-木炭複合系内張り材料の考案に始まり、産業革命期に続出した多様な耐火物技術、さらに近年にいたるまで、日常的改善も含めれば、その実例は無数ともいえる。

この“市場の要求”という推進力が、技術進歩に的確、迅速に活用されるためには、それなりの方法論が必要である。しかし、20世紀前半までは、試行錯誤の繰り返しに期待せざるをえない場合が多かった。満足な方法論が実用されるようになったのは、耐火物の損耗メカニズムや操業条件の耐火物への影響の解明など、後述するように耐火物の使用技術がある程度成熟した1960年代以降である。

### 3.2 資源・エネルギー問題

鉄鋼用耐火物のように消耗性の格別大きい材料では、その原料資源不足は致命的である。かつての50 kg/t-steelを超える原単位の時代では、耐火物は生産設備資材というよりは、鉄鋼製造副原料として位置づけてよい、とさえいわれた。各国とも原料確保に注力してきたといえる。

資源に格別乏しいわが国の特殊事情のなかで、歴史上特にその貢献が評価されてきた具体例としては、

天然原料：ろう石、珪石、ドロマイト

合成原料：マグネシア、アルミナ、ムライト、スピネル、アルミナセメント

廃棄物活用：ばたシャモット（炭鋳副生粘土より製造）

輸入原料：粘土（中国、米国）、マグネシア（特に大石橋）、クロム鋳（比）、ジルコン（豪州）、黒鉛（中国）

特に、ろう石とばたシャモットは、日本独自の原料利用技術である。

溶損などによる耐火物の実質消耗率は、かつて70%程度（図7）であった。次第に向上はしているが、リユース、リサイクルなど使用後残留耐火物の問題は、今後も追求すべき課題である。

鉄鋼用耐火物は、古代炉の時代から今日まで、クラーク数（資源存在豊富性の順位）の上位元素O、Si、Al、Ca、Mgなど、いわゆるユビキタス元素による構成を主体とし

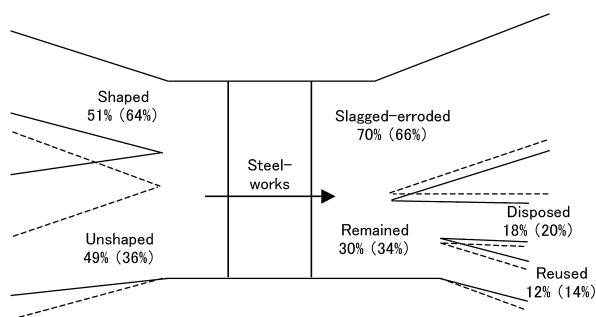


図7 一貫製鉄所での耐火物の物質収支  
Material balance of refractories at an integrated steelworks in 1981 (1974)

てきたが、今後一層この方向性は重視されよう。

エネルギーの見地からは、耐火物には二つの側面がある。一つは省エネルギーに貢献する材料として、もう一つはその製造に格別多量のエネルギーを消費する材料としてである。その省エネルギー効果は、熱設備の長寿命・安定操業への貢献、断熱保温機能、蓄熱・熱回収機能などによる。一方、その製造所要エネルギー原単位は、原料製造エネルギーを含めると、鉄鋼材料の製造エネルギー（約500万 kcal/t-steel）を上回る場合が多い。

この問題は、鉄鋼製造系全体への耐火物の省エネルギー効果が、耐火物製造のエネルギーを遥かに上回ることで理解されている。しかし、耐火物が“エネルギーの塊”であることは、その使用後資源活用の意義を一層高めている。

### 3.3 主要な環境問題の経緯

耐火物に関連する主な環境問題は、職場内作業環境と工場外での環境負荷に大別される。

作業環境問題としては、先ず20世紀前半から各国で指摘されていた粉塵問題で、製造、築炉・補修、使用後解体の各職場が対象となる。特に、珪肺の原因となるSiO<sub>2</sub>含有系の粉塵が注目されたが、日本では1950年代に対策は一応終了した。さらに、1970年代にはコールトール（結合剤、含浸剤）が特定化学物質に指定され、各種の対策がとられた。

工場外での環境負荷が問題となったのは、発電火炉など他の窯炉と同様に、先ず耐火物焼成炉からの排ガスによる大気汚染であった。1960年代から80年代にかけて、ばい煙、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>の順で規制され、対策が採られた。特に、高温焼成れんが（ダイレクト・マグクロ、高純度マグドロなど）全盛の1960年代から70年代にかけてのNO<sub>x</sub>問題は深刻であったが、れんが材質の変遷にも救われた。

特異な汚染種として、粘土系耐火物焼成での排ガス中のふっ素系物質がある。わが国では、1970年前後に岡山県備前地区で発生したぶどうの葉枯れ被害が報告されている。これは近隣工場でのシャモットや粘土れんが焼成によるもので、原料粘土中の雲母鋳物に起因することが判った。対策として排ガスの脱ふっ素処理で解決された。

現在も対策検討が継続されている課題として六価クロム問題がある。日本での耐火物起因の六価クロム問題は、1975年頃の中部地区でのセメントキルン使用後クロマグれんが廃棄場の樹木枯れ現象で顕在化した。クロムフリー材質による代替、使用後廃材の無害化処理などが研究されている。

### 3.4 耐火物の製造体制

産業革命以前の木炭高炉時代の製鉄工場では、耐火物の製造・施工・解体はすべて製鉄作業の一環として製鉄工場内で処理されていたと伝えられている。わが国のたたら製

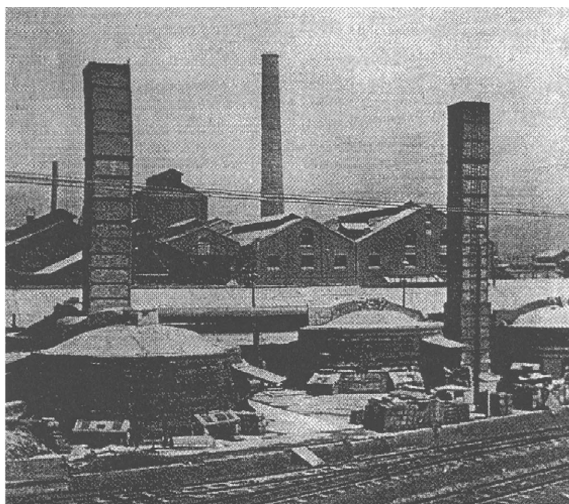


図8 1930年代の八幡製鐵所炉材工場  
Refractory plant of Yawata Steelworks in the 1930's

鉄工場も、また中国の工場でも同様であった。

19世紀の初頭には、各種の粉碎機、混練機、成形機などの窯業機械が開発され、土木建築用れんがや陶磁器の製造に使用され始めており、耐火物の製造が窯業メーカーの手に移行し始めたのは、この頃からであろう。

W.W. ヤングが珪石れんがを発明し、Neath 陶磁器工場で、生産を開始した1856年を、近代耐火物工業元年とする欧米の説は、十分理解できる。珪石れんがは、古代土器れんがの進化した粘土れんがとは異なり、新商品の高性能耐火物であり、しかも窯業専門工場で製造されたからである。

日本では、明治開国後1884年西村勝三が伊勢勝白煉瓦製造所（現品川白煉瓦）を民営企業として設立したのが、耐火物専門メーカーの最初で、さらに現ヨータイ、現日本坩堝などへと広がった。以来、一世紀近くの間、耐火物の製鉄所付属工場での自製方式と専門メーカーからの外部調達方式が併存することとなる。欧米でも、20世紀半ばまで類似の状況が残った。

八幡製鐵所炉材自製工場（図8）は、1930年代の耐火物全国生産量の約30%を占める実績があったが、1956年に企業提携により黒崎窯業へ移管分離された。つづいて日本鋼管の自製工場が、品川白煉瓦と旭硝子に移管された。そして1967年、富士製鐵室蘭製鐵所炉材工場が日本最後の自製工場として、播磨耐火煉瓦に移された。

この両方式の比較の歴史的検証は、必ずしも完了していない。自製方式では耐火物の使用技術と製造技術の相互交流が容易である。外部調達方式では市場原理が効果的に機能し、他分野（例えば、ガラス炉、非鉄製錬炉）の情報も活用しやすい、と考えられる。現状では、外部調達方式での課題である使用技術と製造技術の連携、融合をどのように促進するかが最重要課題であろう。

なお、耐火物製造技術の進歩による貢献の大きさが、計り知れぬものであることはいまでもない。その具体的詳

細は省略するが、特に20世紀半ば以降の粉碎、混合から焼成、欠陥検査に至る装置・設備類の高度化の恩恵は周知のとおりである。例えば、現在の製鋼鑄造プロセスに不可欠のスライドゲート・バルブなどの各種高性能機能性耐火物の製造は、CIP（Cold isostatic press）成形技術の進歩ぬきでは語れないであろう。

### 3.5 耐火物損耗メカニズムと使用条件影響度の解明

過去の耐火物技術進歩は、状態図からの基礎科学的アプローチ、材料諸特性の測定評価から構造体特性測定、実炉での比較試用に至る実に多彩な方法論による研究開発に支えられてきた。

耐火物使用技術領域での歴史のなかでは、その格別の意義と貢献が認められるものに、炉内損耗機構の解明と使用条件の影響度の調査がある。

損耗機構研究には水モデル法なども使われたが、最も活用されてきたのは使用後耐火物の変質調査で、世界最初の試みは、1917年発表のル・シャテリエによる平炉天井での使用後珪石れんがの調査<sup>13)</sup>である。以来、各国で多くの研究が行われ、特に1950年代から70年代にかけては、高炉、コークス炉を始め各種製鋼炉、さらに鑄造用ノズル（閉塞現象を含む）に至るまで、その対象は広がった。

損耗機構の研究成果は、耐火物品質の改良、新規材質の開発などに進展し、あるいは製鉄所での操業条件の改善な

表5 転炉寿命への操業条件の影響(1960年代)  
Effects of operational conditions on converter lining life in the 1960's

Operational factors	Effects on life	Degree of influence
Hot metal		
[ Si ]	-	B
[ Mn ]	+	C
[ Ti ]	-	C
Slag		
Total Fe content	-	A
Basicity (CaO/SiO <sub>2</sub> )	+	B
CaF <sub>2</sub> addition	-	B
MgO content	+	A
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> content	-	C
Lime addition	+	B
Blowing		
End point temperature	-	A
Blowing duration	-	B
Production rate (heats/day)	+	B
Slag volume	-	C
Atmosphere (CO/CO <sub>2</sub> )	+	B
Delay in charging lime	-	B
Converter design		
Vessel volume	+	C
Cone angle	+	C
Blow lance	Longer life with multi-holed lance than single-holed	

Notes: Mark " + " means longer life and " - " shorter with increased factor value. Mark " A " shows the highest, " B " medium and " C " lower degree of influence on lining life.



どに反映された。高炉れんがの耐アルカリ試験法や製鋼炉用塩基性れんがのスラグ吸収軟化試験法のように、損耗機構に基づいて考案された試験法もある。

使用後耐火物の調査は、かつて医学の研究に喩えて“post-mortem examination(遺体解剖)”(Chesters, J.H. 1957)とも呼ばれ、今や古典的方法となっている。しかし、近年進歩の著しい各種の解析技術の応用も含めて、今後とも有力な研究の方法論であり続けよう。

耐火物への使用条件の影響については、すでに19世紀から、製鉄所の多くの現場での暗黙的経験則として蓄積・伝承されてきたといわれている。

それらが、データの統計的処理や理論的考察とともに公表されるようになったのは、1950年代からと思われる。例えば、取鍋の粘土質れんが内張りの寿命と溶鋼条件(温度, [Mn]/[Si]比など)の関係などは、貴重な指針となった。ドロマイ系転炉内張り寿命への操業条件の影響度の集約調査結果(表5)<sup>14)</sup>は、当時の新技術MgO富化型スラグコントロールの有用性を示唆するものでもあった。

操業条件や内張り状況についての計測技術、IT活用によるデータ処理法、基盤となる理論の構築などの進歩を考えると、これら研究法の今後の発展は十分に期待できる。

### 3.6 新技術の開発に貢献した注目すべき特殊背景

技術の創出には、周知のとおり、理論的根拠に基づく仮説の組み立てとその検証作業のような、定石とも言うべき方法論があり、耐火物技術も例外ではない。

例えば、1930年代に八幡製鐵所炉材課の加藤孝治技師により発明されたクロマグれんがは、クロム鉬中の低融点シリケートをマグネシアの添加により高耐火性鉬物に転換するアイデアに基づくもので、理論的に手堅い発想によるものである。この他にも多くの耐火物技術が論理的アプローチによって開発されてきた。しかし、一方では極めて特殊な背景やきっかけから生まれた大技術も少なくない。

以下に、各種史実の調査結果<sup>15)</sup>の中から、新技術誕生の発端となった興味ある特殊事例をいくつか紹介する。

単なる好奇心：ダイレクトボンド・クロマグれんが

1950年代、Sheffield大学のJ.Lamingらは“耐火煉瓦製造時の焼成温度は、炉で使用する温度より高くなければならない”という伝説的経験則に関心はなかったが、“兎に角可能な限りの高温で焼いてみよう”と、実験炉破壊を覚悟でクロマグれんがを1760℃で焼成し、ダイレクトボンド組織を発見した。その商業化は1961年である。

大戦の緊急事態：プラスチック、安定ドロマイトれんが

第一次世界大戦中、頻繁に大西洋を横断する輸送船のボイラー用れんがの製造が追いつかない。W.A.L.Shaferは成形・焼成工程を省略した、緊急用“練り土”型耐火物“プラスチック”を提案した。1914年Plibrico Co.が設立

された。

英国では第二次大戦時、ドイツ潜水艦の海上封鎖で、クロム鉬の輸入が途絶えた。製鋼用耐火物の最重要材質であるクロマグれんがの代替品が要請された。すでに1935年に基本技術は完成しながら、商業化が難渋していた安定化ドロマイトれんがの実用化が、政府の至上命令で一挙に進捗した。

異分野技術の流用：ターロドロマイトれんが、  
スライドゲート・バルブ

仮焼ドロマイト粉かられんがを造るには、疎水性のバインダーでないと水和が起る。当時、建築材料などの防水塗料にコールタールが使われていることに着目し、1879年G.Thomasは転炉用ターロドロマイとれんがを発明した。

教会のパイプオルガンや蒸気機関に使われている摺動バルブと同じ機構を耐火物で作ることで、1884年D.D.Lewisは最初の鑄造用スライドゲート・バルブの特許を取得した。ただし、実用化されたのは1960年代である。

自社製品拡販の商魂：ポーラスプラグ、  
スラグ・スブラッシング

ポーラスプラグによる溶融金属のガス攪拌は、E.Spireのアイデアで、フランス鉄鋼研究所が開発を計画した。自社製品ガス(特にAr, N<sub>2</sub>)の市場拡大に躍起であったL'Air Liquide社がこの計画に積極的に関与し、1955年溶銑脱硫法(GAZAL法)を商業化した。

転炉寿命延長に各国で活用されているスラグ・スブラッシング(特許：1983年)は、米国のガス製造企業Praxair Co.が鉄鋼メーカーの協力を得て開発した。旺盛な営業努力の成果でもある。

セレンディピティ(発明の手掛かりを見逃さない):  
電鑄ムライトれんが

ガラス製品中のストーン(不溶性介在物粒子:砂疵)を検査していたCorning Glass Works社の研究者H.Hoodは、頻りに検出される“頑固なガラス難溶性介在物”に注目し、それがムライト鉬物であることを突き止めた。“この物資をガラス溶解炉の内張りに使えば...”と、友人G.S.Fulcherと共同して、1926年頃電鑄れんが“コルハート”を発明した。電鑄れんがは、その後鉄鋼業でも重用された。

## 4. 歴史の教訓が示唆すること

歴史には無限の教訓が凝縮されている。それらについての若干の考察結果も含め、今後の鉄鋼用耐火物技術の進展にとって特に重視すべき事項を、あくまで筆者の現時点での見解として以下に列挙する。

“歴史は繰り返す”ことがある。常に歴史に学ぶ謙虚さのある技術活動でありたい。古代製鉄炉材の特徴“不定形と炭素複合系耐火物”の進化スパイラル的回帰が、近年進行しているのではないか。

新しい難問こそ進歩，飛躍への跳躍台である。難問を避けては，発展はない。資源，エネルギー，環境に関連する諸課題は，特に多くの可能性を秘めている。広く他分野の科学，技術に触覚を働かせよう。進歩が加速されている今日，他分野との交流は益々必要である。

地味ながら，常に追求されるべき技術課題がどの分野にもある。鉄鋼用耐火物技術にとって，“溶鉄・溶鋼と耐火物の相互反応”は，その一つであろう。

鉄鋼用耐火物は使用条件に格別敏感な材料であり，その相互関係も多彩，複雑である。したがって，使用技術と製造技術の領域間の連携は不可欠であり，両者を結ぶ“通訳”機能は格別重要である。

## 5. 結 言

鉄鋼業での耐火物技術は，古代から弛みない進歩を続けてきたが，特に産業革命期，戦後技術革新期には飛躍的な進歩を遂げた。耐火物の種類，形態も多様化し，耐火物技術も，単なる材料技術から冷却，断熱やスラグ制御までも包含した総合システムに成長した。

耐火物技術の進展に影響をもつ要因は多いが，やはり鉄鋼製造プロセスの変遷の影響が最も大きいことを，歴史は証明している。21世紀に予感される鉄鋼業の技術革新における耐火物技術の進展と貢献に期待したい。

## 参考文献

- 1) Searle, A.B.: Refractory Materials - The Manufacture and Uses. J.B.Lippencott Co. 1923
- 2) Norton, F.H.: Refractories. McGraw Hill Book Co. 1931
- 3) 永井彰一郎: 珪酸塩工業要覧 内田老鶴圃, 1933
- 4) Chesters, J.H.: Steelplant Refractories. United Steel Co. 1944
- 5) Green, A.T., Stewart, G.H., (ed.): Ceramics - A Symposium. Brit. Ceram. Soc. 1953
- 6) Konopicky, K.: Feuerfeste Baustoffe. Verlag Stahleisen, 1957
- 7) 吉木文平: 耐火物工学 技報堂, 1962
- 8) 耐火物技術協会: 耐火物工学の展開 1977
- 9) 竹内清和: 耐火煉瓦の歴史 内田老鶴圃, 1990
- 10) 杉田清: 製鉄・製鋼用耐火物 - 高温への挑戦の記録 地人書館, 1995
- 11) 杉田清: 耐火物技術史物語(連載I-XVI) 耐火物 49(2), 54 (1997)-50(11), 559(1998)
- 12) 杉田清: 炉の歴史物語 - 省エネルギー・環境対策の発展に学ぶ 成山堂書店, 2007
- 13) LeChatelier, H.: Bull. Soc. Franc. Min. 40, 44(1917)
- 14) 大庭宏 杉田清: 製鉄研究 (266) 8959(1969)
- 15) Sugita, K.: How Have Refractory-Technological Innovations Been Made? A Case Study of Some Historic Inventions. 4th Int'l Symp. Ref's, Proc. Dalian, 2003, p. 15



杉田 清 Kiyoshi SUGITA  
工学博士 元新日本製鐵(株)フェロー  
耐火物技術協会名誉会員  
日本工学アカデミー会員