

SHINAGAWA TECHNICAL REPORT

コークス炉用耐火物の損傷

Damage of Coke Oven Refractories

細 原 聖 司

Seiji HOSOHARA

品川技報

コークス炉用耐火物の損傷*

Damage of Coke Oven Refractories

細 原 聖 司**
Seiji HOSOHARA

要 旨

我が国では1960年代から1970年代にかけて多くのコークス炉が建設された。当時、コークス炉の寿命は25年～30年と言われていたが、診断や補修技術の発達により、多くの炉が40年を超えて稼働している。本報では我が国におけるコークス炉耐火物の損傷機構、炉内状況の観察技術、補修技術の研究を概観した。

Abstract

While the service life of coke oven was expected to be 25 to 30 years in 1960s to 1970s when coke ovens were actively constructed in Japan, many coke ovens over 40 years old are still under operation according to the development of diagnosis and repair technology. In this article, studies about coke oven refractories damage mechanisms, the observation techniques of the in-chamber status and repair technologies in Japan are reviewed.

1. 緒言

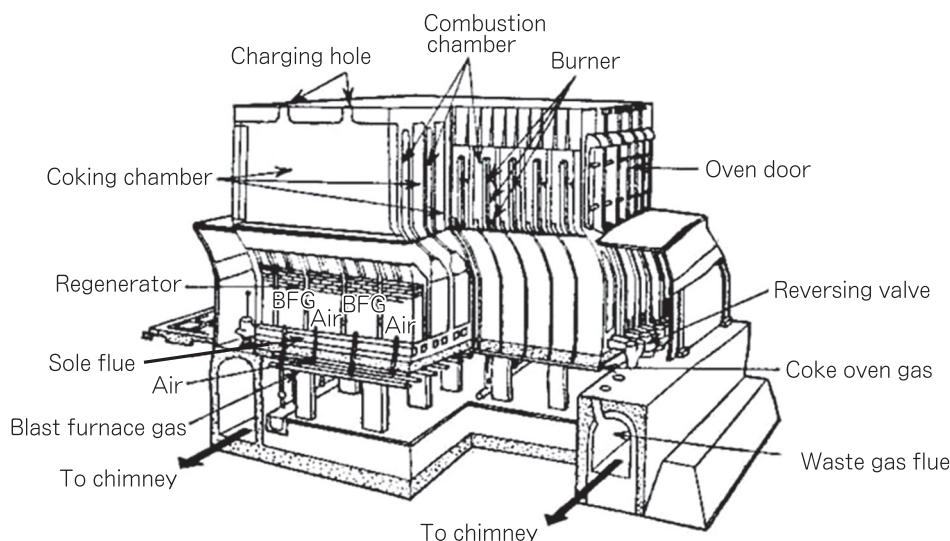
室炉式コークス炉は、石炭を高温で乾留しコークスを製造する窯炉である。Fig.1にコークス炉の構造を概略で示す¹⁾。コークス炉の炉体は炉頂から石炭を受け入れ乾留する炭化室と、燃焼により高温ガスを作り出す燃焼室が交互に配列されている上部構造体と、排熱回収のための蓄熱室のある下部炉体とで構成されている。コークス炉には、日鉄式、コッパース式、カールスチール式、オートー式、ウイルプット式、D.K.H（デイデア・カールスチール）式など種々の形式がある²⁾が、炭化室、燃焼室と蓄熱室の配置は同じであり、異なるところは燃焼方式と蓄熱方式である。高温の燃焼室の熱は壁煉瓦を介して炭化室側の石炭に伝えられ、石炭を乾留する。乾留終了後に、炭化

1. Introduction

The chamber type coke oven is a facility to manufacture coke by coal coking, i.e., carbonization, at a high temperature. Fig.1 schematically shows the coke oven structure¹⁾. The body of the oven consists of an upper part for coal coking and lower part for exhaust heat recovery. On the upper part, coking chambers, in which coal is charged through a charging hole installed on the roof carbonized, and combustion chambers, which generate high temperature gas, are arranged alternately. There are several kinds of chamber type coke ovens such as the Nippon steel type oven, Koppers type oven, Carl Still type oven, Otto type oven, Willpute type oven, D.K.H (Didier Carl Still) type oven, and so on²⁾. In spite of the difference in combustion and heat

* 細原聖司：耐火物 66 [9] 422-426(2014)より転載 Reprint from S. Hosohara: Taikabutsu 66 [9] 422-426(2014).

** JFEスチール株式会社 スチール研究所 主任研究員 Senior Researcher, Steel Research Laboratory, JFE Steel Corporation

Fig.1 Structure of coke oven¹⁾.

室の片端（P/S：押し出しサイド）から設置された炉内のコークスを排出するためのラムを備えた押し出し機により、コークスを他端（C/S：コークスサイド）のガイド車を介して消火車へ排出する。わが国における最初のコークス製造は、記録に残るものでは貨幣製造用で、1871年までさかのぼる²⁾。その後、さまざまな燃焼方式や大きさのコークス炉が建設され、2011年時点では国内の炉室数は約4500室である³⁾。その多くが1960年代後半から1970年代の建設⁴⁾で、稼動後30年以上経過し、炉体損傷が見られる。本報告では、コークス炉用耐火物の損傷と補修について概説する。

2. コークス炉用珪石煉瓦の変遷

コークス炉で使用されている耐火物は、大まかには炉頂部は粘土質煉瓦、炭化室、燃焼室、蓄熱室上部壁は珪石煉瓦、蓄熱室下部壁・ソールフリユーは粘土質煉瓦、チェッカー煉瓦上部は珪石煉瓦あるいは高アルミナ質煉瓦、チェッカー煉瓦下部は粘土質煉瓦、炉蓋は粘土質煉瓦または粘土質プレキャストブロック、上昇管ライニングは粘土質キャストブル耐火物または粘土質煉瓦である。このうち、珪石煉瓦は、その熱膨張率の温度

recovery system among these coke ovens, the positions of the coking chamber, combustion chamber and regenerator are exactly the same. Heat generated in the high temperature combustion chamber transmits through the chamber wall to the coking chamber and carbonizes the coal. Subsequent to coking completion, the pusher inserts a pushing ram from one end (P/S; Pusher side) in order to discharge the coke for the other end (C/S; Coke side). The discharged coke falls through a guide vehicle followed by temporary storage in a quenching car.

According to the literature, the first coke in Japan, which was used for coinage, was manufactured in 1871²⁾. After that, many coke ovens with a wide variety of combustion-heat recovery systems and sizes have been constructed. In Japan, as a consequence, approximately 4500 chambers were operating in 2011³⁾. Since most of the coke ovens were constructed between the late 1960's and 1970's⁴⁾, the oven bodies are damaged. In this report, damage and repair of coke oven refractories are reviewed.

2. History of Silica Bricks for Coke Ovens

The different refractories used in various sections are roughly outlined as follows; roof-fire

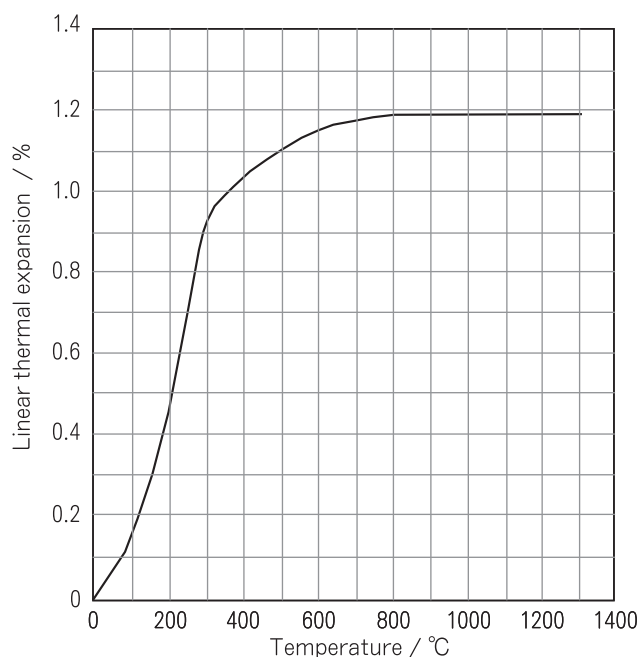


Fig.2 Thermal expansion of silica brick⁵⁾.

依存性がFig.2に示す⁵⁾とおり、低温域では大きいですが、1073K以上ではほぼ一定で、高温域での寸法安定性に優れている。さらに高温強度が大きく、耐摩耗特性に優れており、前述のとおり高温部に使用されている。

1820年英国のW. W. Youngは珪砂に石灰を加えて焼成すると焼結しやすいことを発見し、珪石煉瓦製造の端緒を開いた⁶⁾。以後、欧州での珪石煉瓦に関する研究は進められ、発展した。国内では、1894年にコークス炉を設置し²⁾、以降、建設されていくが、明治中期から大正前半までは、コークス炉には輸入した煉瓦が使用されていた⁷⁾。この煉瓦は、SiO₂が65～83%、Al₂O₃が11～30%の半珪石煉瓦で、長期間使用中に組織が脆化する欠点があった。そこで、低温部には粘土質煉瓦、高温部には珪石煉瓦が使用されるようになり⁸⁾、輸入珪石煉瓦が使用されていた。珪石煉瓦は平炉でも使用されており、調達の観点から国産化を志向した結果、原料として赤白珪石（組成⁹⁾：SiO₂/97.0%、Al₂O₃/0.5%、Fe₂O₃/2.0%）を使用することで良好な珪石煉瓦を得ることができ、以後国産化された。その後、コークス炉用珪石煉瓦は大型化と炭化時間短縮の要求から、原料の選定、粒度の最適化等

clay bricks, coking chamber, combustion chamber and upper part of regenerator-silica bricks, wall of lower part regenerator and sole flue-fire clay brick, upper part of checker-silica brick or high alumina brick, lower part of checker-fire clay brick, oven door-fire clay brick or fire clay precast block and ascension pipe-fire clay castable or fire clay brick. Among those, silica brick is applied to the high temperature area because of its excellent volume stability and abrasion resistance, i.e. high strength, at high temperature range. As shown in Fig.2⁵⁾, silica brick exhibits almost no thermal expansion above 1073K in spite of a large thermal expansion coefficient at lower temperature.

In 1820, English engineer W. W. Young discovered that the silica sand with a lime addition exhibits superior sinterability⁶⁾. This discovery opened the door for silica brick production and subsequent further research that promoted the improvements of silica bricks. The first modern coke oven in Japan was instituted in 1894²⁾ followed by several additional constructions. In order to build these coke ovens, silica brick was imported until the early 1910's⁷⁾. Since the bricks were semi-silica brick, which contained 65 to 83% SiO₂ and 11 to 30% Al₂O₃, the brick structure tended to embrittle during long term operation. Therefore, silica brick and fire clay brick were simultaneously applied for the high temperature part and low temperature part, respectively⁸⁾.

Silica bricks were used for open-hearth furnace as well, thus, domestic production of silica brick was carried out in order to ensure a stable supply. As a result, good silica bricks were obtained by using red and white-speckled silica, which contained 97.0% SiO₂, 0.5% Al₂O₃ and 2.0% Fe₂O₃⁹⁾, as a raw material. These bricks were subsequently replaced with imported bricks. After that, according to the requirements for chamber enlargement and coking time reduction, silica brick had been substantially improved so as to achieve high density and high strength bricks by optimizing raw material application and grain size distribution as shown in Figs.3⁷⁾ and 4⁷⁾. Consequentially, the so-called dense

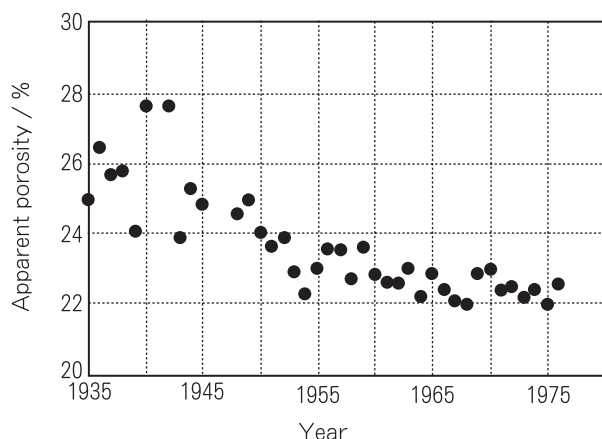


Fig.3 Apparent porosity of silica brick for coke oven⁷⁾.

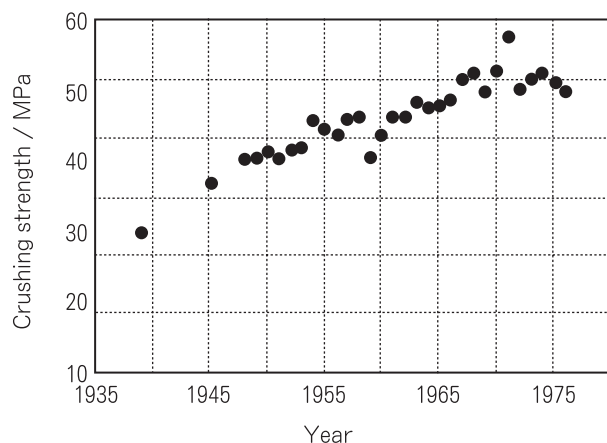


Fig.4 Crushing strength of silica brick for coke oven⁷⁾.

によりFig.3⁷⁾, 4⁷⁾に示すとおり, 年々緻密化, 高強度化が図られており, いわゆるDense silica brick, Super-dense silica brickと呼ばれる珪石煉瓦が使用されるようになった。大正から昭和初期にかけて, コークス炉の炉高は4mが標準的であったが, 生産量増大の要求ともあいまって, 1961年新日鐵・室蘭で4.6m炉, 1964年川鉄化学・千葉で6m炉, 1967年川鉄化学・水島で6.5m炉, 1971年住金化工・鹿島で7.125m炉, 1976年NKK・京浜で7.55m炉と順次大型化が進展した²⁾。しかし, 1970年代までのコークス炉建設が終わると, 後述する補修技術の進歩もあり, 国内でのコークス炉新設は途絶え, 国内での珪石煉瓦製造はほとんどなくなった。最近になり, 新設や後述するパドアップによる炉の建て替えが行われるようになってきたが, 中国等

silica brick and super-dense silica brick have been created.

Although the standard height of chambers had been 4m in the era between the 1910's and 1940's, chamber height became taller and taller in accordance with the increase in coke production as follows; 4.6m for Nippon Steel Muroran works in 1961, 6m for Kawasaki Steel Chemical Chiba works in 1964, 6.5m for Kawasaki Steel Chemical Mizushima works in 1967, 7.125m for Sumitomo Metal Chemical Kashima Works, 7.55m for NKK Keihin Works, and so on²⁾. After the late 1970's, however, no coke ovens were newly built in Japan, resulting in the stoppage of domestic silica brick production. Instead, repair technology has been improved drastically as described later. Recently, for new construction or renovation by the pad-up method (described later), silica bricks are imported mainly from China.

3. Damage of Coke Oven Refractories

Figs.5¹⁰⁾ and 6¹⁰⁾ show the classification system and typical examples of coke oven damage, respectively. According to the approximately 24 hour coke production cycle, i.e., from coal charging through the charging hole to coke discharging into the quenching car, the temperature of coking chamber wall repeatedly changes. Fig.7 is an examples of the measured change in temperature in one cycle¹¹⁾. While silica bricks for the coke oven exhibit superior volume stability due to an extremely small thermal expansion coefficient at high temperatures of over 1073K, it shows a large thermal expansion coefficient at the lower temperature range as mentioned above. Hence, cracking, surface peeling-off and joint opening occur during the earlier stages of oven operation around the chamber end which tends to be cooled by fresh air during coke discharging. In addition, after long term operation, cracking, peeling-off and joint defects caused by thermal shock corresponding to coking cycles are recognized even at the central area of the coking chamber. In interstices induced by cracking and/or joint defects, carbon tends to deposit, resulting in crack propagation during coking

で製造された珪石煉瓦が使用されている。

3. コークス炉の損傷について

境田ら¹⁰⁾によるコークス炉の損傷形態の分類をFig.5に、典型例をFig.6に示す。炉頂の装炭孔より装入した石炭を乾留・コークス化し、それをP/Sより押出しでC/Sの消火車へ排出する一連のサイクルは、約24時間ピッチで繰り返される。この時の炭化室壁の温度変化の一例をFig.7に示す¹¹⁾。珪石煉瓦は、前述のとおり、1073K以上の高温域では

cycle due to the difference between the thermal expansion coefficient of the carbon and bricks¹¹⁾. Carbon is deposited and its growth is induced by the thermal decomposition of hydro carbonaceous gas under high temperature conditions. The growth rate of carbon deposits, which is estimated to be 0.2mm/day¹²⁾, is accelerated by brick defection. In order to remove the carbon deposits, carbon burning, which is the heating of empty chambers by a natural draft for certain time duration, is generally performed. However,

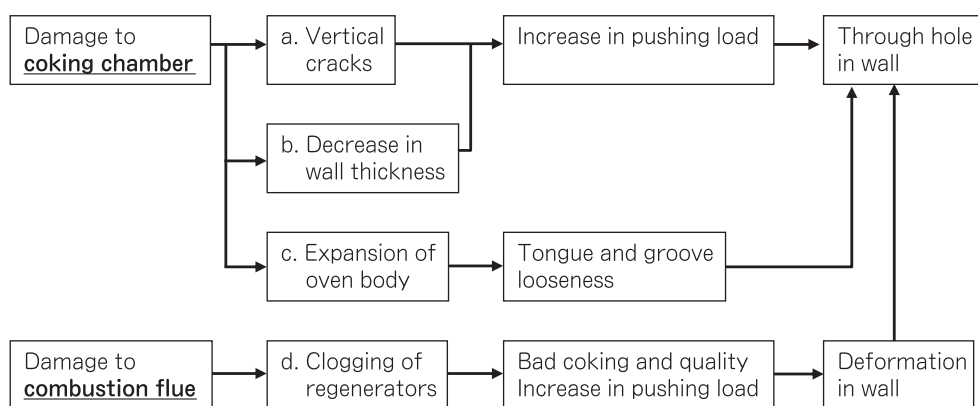


Fig.5 Schematic flow of coke oven deterioration¹⁰⁾.

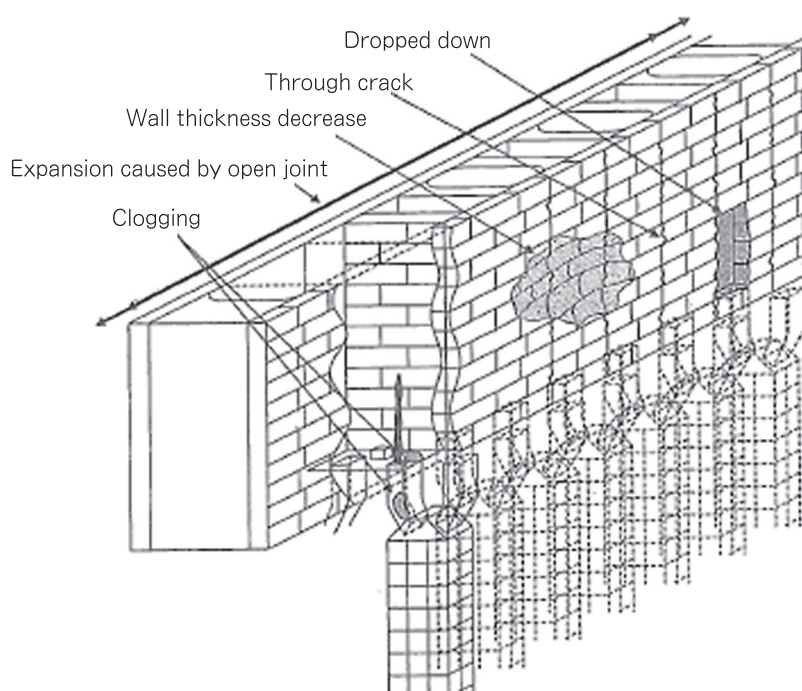


Fig.6 Typical damage pattern of chamber brick¹⁰⁾.

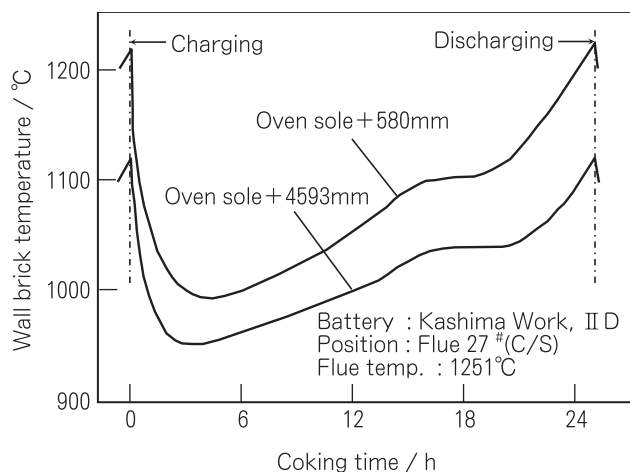


Fig.7 Change of wall brick temperature with coking time¹¹⁾.

寸法変化がほとんどなく、体積安定性に優れているが、低温域では寸法変化が大きい。窯口は、押出しのたびに外気にさらされやすく、最も温度変化が大きいため、比較的早い時期から亀裂、表面剥離、目地開きが見られる。さらに時間が経過すると、窯奥でも、前述の乾留サイクルでの熱衝撃による亀裂、剥離、目地開きが見られる。亀裂や目地部の間隙には、カーボンが沈積し、乾留サイクルを重ねるごとに煉瓦とカーボンの膨張差で亀裂が伸展する¹¹⁾。カーボン付着は、石炭の乾留過程で生成する炭化水素系のガスが高温下で熱分解され生成する。この付着カーボンの成長速度は、実験室レベルの研究では0.2mm/日と推定されており¹²⁾、煉瓦に欠損があればさらに加速される。この付着したカーボンを除去するために、一般に空窯焼きが行われる。これは炭化室を空の状態とし、一定時間自然通風でカーボンを燃焼・除去するものである。しかし、カーボン付着のない煉瓦部の温度低下が大きく、目地切れや損傷を助長するという欠点がある。そもそもカーボンが付着しないように壁煉瓦表面にガラスをコーティングする技術も報告されている¹³⁾が、決定的な解決策とはなっていない。

また、装炭孔下部では装入石炭による摩耗で凹みが見られるようになる。亀裂進展や、剥離、カーボン付着により表面の平滑性が失われると、コー

that procedure promotes joint and/or brick deterioration due to excessive temperature decrease in the areas without carbon deposit. Glaze coating technology for preventing carbon from depositing has been reported on¹³⁾, but there are still some issues remaining for further study.

In addition, recessed areas, which were worn away by charged coal, are also recognized under the charging holes. The increase in surface roughness caused by crack propagation, peeling-off and carbon deposits promotes an increase in coke pushing load, and it eventually causes pushing clogging which lowers productivity. Furthermore, a decrease in sealability between the coking chamber and combustion chamber causes a reduction of heat efficiency and black smoke emission which harms the environment. On the other hand, Yamada et al¹⁴⁾, who observed the in-chamber status by employing observation equipment, identified the refractory defects as being; cracks in joints and bricks at the connected part of the chamber wall and binder bricks, and cracks and joint openings in the ceiling bricks. Those results indicate that the refractory defects possibly occur in the combustion chamber and/or ceiling even if no obvious wear was observed in the coking chamber wall. Since enlargement of defects can induce brick falling and/or collapse of the coking chamber wall, refractory repair is necessary in order to continue chamber operation.

Changes in physical properties of silica bricks which have been used in the coke oven for many years such as porosity decrease and the formation of CaO and Al₂O₃ concentrated layers^{15)–18)} have been recognized. The CaO and Al₂O₃ are considered to be derived from coal. Furthermore, a lot of fine cracks were observed around the surface area of the coking chamber side. These sort of changes increase Young's modulus of the brick, resulting in deterioration of thermal shock resistance¹⁷⁾.

4. Observation and Repair Technology

At the era when coke ovens were actively constructed in Japan, the service life was

クス押出し時の炭化室壁への圧力が大きくなり、さらに損傷が進行する。コークス炉炭化室壁の損傷は、炭化室壁の平滑性を損ない、押出し時の負荷増大、ひいては押詰りを発生させ、生産性の低減を招く。加えて、燃焼室とのシール性欠如による熱効率の低下や黒煙の発生による環境の悪化を招く。一方、山田ら¹⁴⁾は、観察装置によりビンダー煉瓦と壁煉瓦の接合部に目地亀裂や煉瓦の亀裂、天井部煉瓦の亀裂や目地開きを確認している。このように壁煉瓦に大きな異常がなくても燃焼室や天井部に損傷がある場合もある。損傷が進行すると、煉瓦の脱落や炭化室壁の倒れ込みが発生し、補修しなければその窯は操業できなくなる。

永年稼動したコークス炉から回収した珪石煉瓦には、気孔率の低下等の物性の変化が見られたり、石炭由来と考えられるCaOやAl₂O₃の濃化層が存在する^{15)~18)}。また、炭化室稼動面表層には、微細な亀裂が多数存在することも観察されている、これらの物性変化により、炉齢が進むと、煉瓦自体の弾性率が大きくなり、熱衝撃に弱くなっていくとの報告もある¹⁷⁾。

4. 観察、補修技術について

コークス炉は建設当初寿命が25～30年といわれていたが、診断技術と補修技術により延命化をはかり、前述のとおり40年を超えた炉が多く稼動中である。コークス炉の状況を診断する方法には、まず、日常の押出し後の窯内の観察、コークス押出し時にかかる負荷のモニタリングがある。壁煉瓦に凹凸があると、押出す時の負荷が増大し、表面凹凸が大きくなると急激に負荷が増大する¹¹⁾。押出し時の負荷をモニタリングすることで、ある程度炭化室内の耐火物の損傷の状態を把握できる。さらに、通常では観察が難しい炭化室や燃焼室の亀裂の状況を観察する装置の開発も進められている。水冷ランスや耐熱ケーブルの先端につけた小型カメラを炉頂や窯口より装入し、亀裂発生状況を観察するもの^{19), 20)}、炉上装炭孔から光三角法を利用した距離計を内蔵した測定ヘッドを下ろし、炭化室の窯幅を測定するもの²¹⁾、ラムビームに距離計を常設し窯幅を測定する装置²²⁾、装入した診

expected to be 25 to 30 years. However, thanks to the development of diagnosis and repair technology, many coke ovens over 40 years old are still under operation. The primary diagnosis methods are daily-based observations of the coking chamber after coke is pushed out and ongoing monitoring of the pushed out load. Uneven chamber surface results in a higher push out load. The push out load rises abruptly as surface roughness increases¹¹⁾, therefore, it is possible to evaluate the refractory wear status in the coking chamber by monitoring the push out load. Furthermore, devices for accurate evaluation of the unobservable area in the coking chamber and combustion chamber are developing as follows; a small camera in the insulated cable in the water cooling system that can be inserted into the chamber through the oven roof or from the chamber end for direct observation of brick cracking^{19), 20)}, a light triangulation distance meter that can be inserted through the charging hole for chamber width measurement²¹⁾, a distance meter that can be installed in the ram beam which measures the chamber width²²⁾, a diagnosis system based on image data captured with the inserted diagnosis camera²³⁾. Moreover, a moving cart on the pusher rail which is equipped with diagnosis equipment containing a CCD camera, laser distance meter, descaling equipment and thermal spraying equipment was developed⁹⁾.

Roughly, repair technology is classified into three kinds in terms of scale, i.e. repair scope. The smallest one is thermal spraying, which repairs partial joint openings or partially thinned areas of bricks. With this method, molten refractory fine particles are sprayed onto the hot wall followed by solidification and sedimentation. There are three types of thermal spraying process; flame gunning, in which particles are melted in a flame generated from oxygen and propane²⁴⁾, the thermite method, in which a mixture of refractory particles and metallic powder are sprayed using oxygen as a carrier gas²⁵⁾, and a method, in which a mixture of refractory particles and metallic powder are sprayed utilizing oxygen and propane gas^{26), 27)}.

断カメラの画像データをもとに損傷診断を行うシステムの開発²³⁾等がある。また、押出し軌条上にCCDカメラ、レーザー距離計を備えた診断装置とデスケリング装置、溶射装置を備えた補修装置の両方を持った台車も開発されている⁹⁾。

補修技術は、その規模（補修範囲）から3種類に大別できる。最も小規模のものは、溶射による補修で、部分的な目地切れや煉瓦の減肉部のみを補修するものである。これは、微粒子材を熔融状態で壁煉瓦に衝突させ、凝固・堆積させる補修方法である。主な溶射方法は、酸素とプロパンによる火炎により溶射材を熔融させる火炎溶射法²⁴⁾、金属粉と耐火材料の混合物を酸素で吹付けるテルミット式溶射法²⁵⁾、金属粉を含む溶射材を酸素とプロパンを用いて溶射する方法^{26), 27)}である。溶射補修用耐火材としては、珪石粉を主体としたものが使用されている。溶射体の損傷原因の一つは、母材である珪石煉瓦と溶射体の熱膨張が一致していないため、作業時の熱サイクルにより剥離するためである²⁸⁾。そのため、母材との接着性に加えて熱膨張の一致が良好な溶射材の条件の一つである。この他にプラズマ溶射法²⁹⁾や熔融状態でなく冷間で吹付ける方法³⁰⁾も報告されている。溶射は、オペレータが溶射用ランスを持ち所望の位置へ溶射する手溶射が主であるため、操作性や溶射位置の視認性なども重要である。また、機械化の検討も行われており、補修の効率化のための大容量化を図ったもの³¹⁾や窯中央部の補修を目的としたもの³²⁾などがある。

溶射よりも補修範囲が広いものが、積み替え補修である。積み替え補修は、対象部分の煉瓦を解体し、新しい煉瓦を積み直すもので、窯口から2～3mの比較的小さい領域のもの³³⁾から、窯全長に渡って積み替える大規模なもの³⁴⁾まである。積み替えは人の手で行う場合が多いが、欧米を中心として大きなブロックを重機等を用いて積み替えるモジュール工法³⁵⁾⁻³⁷⁾も行われている。また、新炉建設時には常温から1073K程度まで2～3ヶ月かけて昇温する³⁸⁾のに対し、積み替え補修ではできるだけ早く昇温する必要がある。このため煉瓦として熱衝撃に強い積み替え専用の

The refractory particles mainly consist of silica. One of the dominant factors of thermal spraying repair layer wear is the peeling-off of the repaired layer, which is induced by the thermal cycles of the chamber. Since that type of wear can be attributed to the difference in the thermal expansion coefficients between the brick and thermal spraying repaired layer²⁸⁾, coincidence of the thermal expansion coefficient of silica brick is one of the important factors required of thermal spraying material as well as good adhesion. Additionally, the plasma method²⁹⁾ or cold method, in which refractory particles are not melted³⁰⁾, has been reported as a kind of thermal spraying technique. In most cases, the repair operator manually controls the spraying lance so as to repair the target area, thus, good usability and good spraying spot visibility are also important. In addition, automated systems are also being developed to manage the large amount thermal spraying material discharge³¹⁾ or repair the central area of the chamber³²⁾.

Brick exchange is applied for larger area repair. Exchange repair, where new bricks are installed subsequent to old brick removal, is applied in various scales as follows; small scale repair, used in the area 2 to 3m from end flue³³⁾, and large scale repair for the through wall³⁴⁾. While brick exchanges are performed manually in general, the module block method of which large blocks are installed utilizing heavy machines is applied in the United States and Europe³⁵⁾⁻³⁷⁾. For newly constructed coke ovens, heating-up from room temperature to approximately 1073K requires 2 to 3 months³⁸⁾. In the case of exchange repair, however, quick heating up is necessary. Hence, high thermal shock resistance brick specialized for exchange repair was developed and applied³⁹⁾. In addition, retention of the temperature of the silica bricks which are not exchanged is also important. Therefore, application of a thermal insulation box during repair has reported on⁴⁰⁾.

As coke oven deterioration progresses, the number of inoperable chambers increases. Since excessive increase in inoperable chambers in the coke oven battery makes it impossible to

煉瓦も開発され、使用されている³⁹⁾。加えて、補修中は、積み替えずに残存させる珪石煉瓦部分の温度を極力下げず保温することが重要である。そのため、補修時に断熱ボックスを使用する例も報告されている⁴⁰⁾。

損傷が進行し、炉団のなかで操業できない窯が多数見られるようになると、積み替え補修では対応できないため、炉団全体を築炉しなおすパドアップと呼ばれる大規模補修を行う⁴¹⁾。これは窯の部分は新炉建設と同じであるが、炉の基礎や付帯設備は再利用するものであり、新炉建設より安価に行える。その他の補修として、主として端フリーの温度低下対策として、バーナー孔の詰りの除去や蓄熱室煉瓦の解体・補修が行われたり⁴²⁾、炭化室と燃焼室に差圧を与えることで微細な貫通亀裂を耐火物微粉末で埋め、封止するダスティング補修⁴³⁾、その貫通亀裂をCVDで補修する技術^{44)~45)}などの報告例がある。

5. まとめと課題

コークス炉耐火物のうち、主として珪石煉瓦の変遷を述べ、損傷についてこれまでの知見をまとめた。また、観察技術、補修技術について概説した。冒頭でも述べたように、国内のコークス炉は建設後30年以上経過した窯が多い。上述のようにさまざまな診断・補修技術が検討されてきているが、延命には更なる補修技術の発展とともに操業技術の改善が必要である。例えば、非微粘結炭比率拡大や生産性向上を目指した次世代コークス製造技術(SCOPE21)^{46)~47)}が検討され、その成果がJFEスチール福山第5コークス炉D炉団(2005年12月稼動)³⁸⁾、新日鐵大分第5コークス炉(2008年5月稼動)⁴⁷⁾、新日鐵名古屋第5コークス炉(2013年6月稼動)で導入された。また、いずれはコークス炉の改修が必要となるが、コークス炉建設の最盛期に培われた高度な耐火物の品質、寸法精度および築炉技術は国内では今や失われようとしている。現在、珪石煉瓦は国内で作らなくなっているが、一部のメーカーでは中国に技術移転し、従来の日本の品質に負けない品質の煉瓦を製造し対応しているところもある⁴⁸⁾。加えて、コークス

repair by the exchange method, the large scale repair method, the so-called pad-up method, is carried out⁴¹⁾. In this method, while all parts of chambers are replaced, foundation and auxiliary equipment is reused. Thus, it is cheaper than new construction. Adding to the above mentioned three repair methods, various kinds of repair technologies were reported as follows; removal of clogging matter in the burner hole and deconstruction-reconstruction of the regenerator as countermeasures for the decrease in end flue temperature⁴²⁾, dusting repair in which floating refractory fine particles fill the cracks according to the forced pressure difference between coking chamber and combustion chamber⁴³⁾, and the repair technique utilizing the CVD method^{44), 45)}.

5. Summary and Future Subjects

In this report, the historical change in silica brick in Japan was described and information on coke oven damages was reviewed. Additionally, an overview of techniques for the observation of the in-chamber status and repair technologies was given. As mentioned at the beginning, many coke ovens in Japan have been operating for over 30 years. While various kinds of diagnosis and repair technology have been developed as described in this article, further improvement of repair technology but also oven operation technology are necessary. For instance, next-generation coke manufacturing technology aiming at the increase in the non-slightly-caking coal rate and productivity (SCOPE 21)^{46), 47)} had been developed and the successive results were introduced to JFE Steel Fukuyama No. 5 coke oven D-battery (Started in December 2005)³⁸⁾, Nippon Steel Oita No. 5 coke oven (Started in May 2008)⁴⁷⁾, and Nippon Steel Nagoya No. 5 coke oven (Started in June 2013). Sooner or later, coke ovens will be revamped. However, in Japan, high quality refractories with accurate geometrical dimensions and sophisticated masonry cultivated in the era when coke ovens were actively instituted are disappearing. In these days, no domestic silica brick is produced. It was reported that a domestic maker transferred the

クス炉に限らないが、煉瓦を積む築炉工の高齢化や後継者不足が顕在化しており、何らかの対策が必要である⁴⁹⁾⁻⁵⁰⁾。一方、コークス炉を改修するためには巨額の投資が必要となるため、コークスを必要としない溶融還元法⁵¹⁾などの新製鉄法の開発やフェロコークス法⁵²⁾など新しいコークス製造法の研究開発も行われている。

technology to a Chinese maker so as to provide high quality brick with specifications equivalent to domestic ones⁴⁸⁾. In addition, the obvious fact that the lack of bricklayer successors has become a common issue and requires some countermeasures^{49), 50)}. On the other hand, since a huge investment is necessary to revamp coke ovens, novel iron making processes, such as the coke-free smelting reduction method⁵¹⁾ and the novel coke manufacturing process known as ferro-coke⁵²⁾ are being researched.

References

- 1) The Iron and Steel Institute of Japan : Tekko Binran (Dai 3 pan) II, Maruzen (1979) p.174.
- 2) The Iron and Steel Institute of Japan : Wagakuni niokeru Seisenn Gijutsu no Shinpo, ISIJ (1977), pp.108-124.
- 3) The Japan Institute of Energy : Journal of the Japan Institute of Energy, **91** [8] 674-675 (2012).
- 4) Tekko Shimbun : Tekko Nenkan Heisei24nendoban, Tekko Shimbun (2012) p.72.
- 5) The Technical Association of Refractories, Japan : Taikabutsu Techou '99, The Technical Association of Refractories, Japan (1999) p.586.
- 6) B. Yoshiki : Taikabutsu Kougaku, Gihodo Shuppan (1974) p.237.
- 7) The Iron and Steel Institute of Japan : Wagakuni niokeru Seiren Gijutsu no Shinpo ISIJ (1977), pp.142-147.
- 8) Kouza : Taikabutsu, **21** [6] 437 (1954).
- 9) K. Kato : Dainippon Yogyokyokwai Zasshi, **33** [395] 511-513 (1925).
- 10) M. Sakaida, Y. Awa, M. Sugiura, J. Nakashima, I. Nakamura, K. Kasai, T. Noguchi and Y. Tsukamoto : Nippon Steel Technical Report, [94] (2006) p.69-74.
- 11) K. Nishioka, H. Ueda, M. Ogawa and S. Yoshida : Coke circular, **1** [35] 21-28 (1986).
- 12) M. Nagata, K. Nishioka and S. Yoshida : Tetsu-to-Hagané, **69** [4] S42 (1983).
- 13) T. Takahira, T. Ando, S. Kasaoka and Y. Yamauchi : Ironmaking Conference Proceedings, **56** 127-130 (1997).
- 14) T. Yamada, M. Honma and Y. Fukushima : CAMP-ISIJ, **26** [2] 773 (2013).
- 15) Y. Narita and H. Ueda : Taikabutsu, **51** [8] 459-466 (1999).
- 16) M. A. Camerucci, A. G. Tomba Martinez, A. L. Cavalieri, M. de Cordova and R. Topolevsky : Journal of the Technical Association of Refractories, Japan **25** [3] 189-194 (2005).
- 17) K. Kasai and Y. Tsutsui : Nippon Steel Technical Report, [98] 55-62 (2008).
- 18) S. Hosohara, H. Matsunaga and Y. Fukushima : Taikabutsu, **65** [1] 8-9 (2013).
- 19) S. Takase, K. Ashida, N. Sato, T. Saji and M. Miyamoto : CAMP-ISIJ, **11** [1] 154 (1998).
- 20) T. Takahashi and K. Kawano : Taikabutsu, **40** [8] 490-492 (1988).
- 21) T. Sakai, M. Kinizuka, T. Kondo and H. Toyama : Tetsu-to-Hagané, **73** [12] S806 (1987).
- 22) H. Kinoshita, H. Inamasu, H. Matsushita and H. Yamashita, N. Takayama : CAMP-ISIJ, **21** [2] 973 (2008).
- 23) Y. Tsukihara, K. Hashimoto and T. Shirokane : CAMP-ISIJ, **6** [4] 944 (1993).
- 24) K. Hiragushi, H. Hukuoka, M. Matsuo, S. Murakami and H. Yamamoto : Seitetsu Kenkyu, [305] 128-138 (1981).
- 25) K. Honda, K. Matsunobu, S. Yamamoto and H. Itoh : Taikabutsu, **65** [9] 439-442 (2013).
- 26) S. Watanabe, M. Saitou, T. Fujii, I. Ohishi, M. Tanino and T. Goto : CAMP-ISIJ, **2** [1] 41 (1989).
- 27) S. Shimizu, N. Tamura, H. Suginohe, K. Sato, Y. Fukushima and M. Kumagai : CAMP-ISIJ, **8** [4] 974 (1995).
- 28) Y. Fukushima, H. Matsunaga, Y. Kiyota, M. Takagi, T. Shiozawa and H. Tanaka : CAMP-ISIJ, **15** [1] 179 (2002).
- 29) Y. Narita, T. Suzuki, T. Kondo and H. Nishinaka : Taikabutsu, **41** [11] 588 (1989).
- 30) S. Baba, M. Honma and T. Andou : CAMP-ISIJ, **12** [1] 231 (1999).

- 31) T. Nakada, T. Nagamine and T. Takahashi, Y. Takahashi, T. Uchida, K. Sato, H. Matsunaga, T. Ushizima : CAMP-ISIJ, **12** [1] 232 (1999).
- 32) D. Sasaki, S. Baba and Y. Tsukihara : CAMP-ISIJ, **20** [1] 108 (2007).
- 33) S. Shigeki and M. Sakuma : CAMP-ISIJ, **20** [1] 109 (2007).
- 34) H. Umehashi, S. Sameshima, H. Takada, M. Ueda, R. Kishida, Y. Sugie, H. Oda, H. Katada and S. Ninomiya : Nakayama Steel Technical Report, [26] 22-32 (1987).
- 35) T. Ozawa, N. Tamura, T. Nakada, T. Uchida and M. Takeshita : CAMP-ISIJ, **12** [4] 762 (1999).
- 36) P. H. Lauzon, J. Boville, P. Shuttleworth and J. Burt : Ironmaking Conference Proceedings, **49** 135-138 (1990).
- 37) Robert A. Bloom and Paul A. Saffrin : Iron & Steel Technology, [3] 61-64 (2007).
- 38) H. Kato, M. Yamamoto and T. Nagaoka : JFE Technical Report, [22] 6-10 (2008).
- 39) H. Umehashi, S. Sameshima, M. Ueda, T. Nishina, T. Fujiwara, S. Akahori, K. Imada and S. Nishiyama : Shinagawa Technical Report, [30] 69-78 (1986).
- 40) M. Honma and T. Andou : CAMP-ISIJ, **14** [1] 103 (2001).
- 41) T. Motoyama, K. Okanishi, M. Fukunaga, H. Egawa, T. Kudo and I. Sugiyama : CAMP-ISIJ, **25** [2] 895 (2012).
- 42) M. Takigawa, M. Honma and Y. Tsukihara : CAMP-ISIJ, **19** [4] 755 (2006).
- 43) Y. Fukushima, Y. Kiyota, H. Tozawa, S. Watanabe : CAMP-ISIJ, **18** [1] 120 (2005).
- 44) M. Maruoka, A. Sakai, Y. Tani, H. Ishiguro, N. Isoo and H. Nishio : CAMP-ISIJ, **16** [1] 129 (2003).
- 45) M. Maruoka, A. Sakai, Y. Tani, H. Ishiguro, N. Isoo and H. Nishio : CAMP-ISIJ, **16** [1] 130 (2003).
- 46) K. Nishioka, H. Oshima, I. Sugiyama and H. Fujikawa : Tetsu-to-Hagané, **90** [9] 614-619 (2004).
- 47) K. Kato : Tetsu-to-Hagané, **96** [5] 196-200 (2010).
- 48) Y. Li, H. Wang, T. Kato and S. Taniguchi : Shinagawa Technical Report, [49] 25-28 (2006).
- 49) H. Ishimatsu, M. Kobuchi, M. Nagasaka, T. Asayama, Y. Uwatoko and T. Fujiwara : Taikabutsu, **61** [2] 60-65 (2009).
- 50) T. Nagasaka, M. Nakao and K. Ishii : Shinagawa Technical Report, [49] 13-16 (2006).
- 51) T. Kitagawa : Tetsu-to-Hagané, **88** [8] 430-443 (2002).
- 52) T. Anyashiki, H. Fujimoto, T. Yamamoto, I. Shimoyama and K. Takeda : CAMP-ISIJ, **21** [1] 122 (2008).