

最近のコークス炉用耐火物技術について

Recent Technology for Coke Oven Refractories

笠井 清 人*
Kiyoto KASAI

筒井 康 志
Yasusi TSUTSUI

抄 録

新日本製鐵で現在稼働中のコークス炉の炉齢は最高43年に達し、炉体の老朽化は確実に進行している。この状況に対応するため、吹付け、溶射といった簡易補修はもちろん、窯口を主とした部分積み替え補修や、窯単位にわたる大規模積み替えに至るさまざまな方式の補修が行われている。従来コークス炉で使用されてきたコークス炉用珪石れんがの損傷実態と損傷原因に関する最近の報告を述べ、近年開発したコークス炉診断補修装置を紹介すると共に、名古屋No.1A炉や室蘭No.6炉の大規模積み替え工事を通して判明した新設工事でのコークス炉用耐火物技術上の課題に関して述べた。

Abstract

The age of oldest coke oven batteries have become 43 years and become gradually decrepit in Nippon Steel Corporation. So many kinds of methods are used to repair jumb bricks, oven wall and rebuild for oven batteries, not to mention of convenient repairs, for example spray-gunning or flame-gunning. In this paper, we described the actual wear condition and damage mechanism of silica bricks for three coke oven batteries out of operation, the recent development of diagnosis/repair apparatus for chamber wall, and some refractory problems for the large scale rebuilding repair of Nagoya No.1A and Muroran No.6 batteries.

1. 緒 言

新日本製鐵はコークス炉で国産珪石れんがを使用し始めて約100年になる。表1には現在まで行われてきた珪石れんがを主とするコークス炉用耐火物技術開発の歴史を示す¹⁾。多くの先人たちの努力により、新日本製鐵のコークス炉の炉齢は延び続け、表2に示すように最高43年、その他の炉もほとんど30年以上となっている。しかし、炉体の老朽化は確実に進行しており、最近では、吹付け、溶射といった簡易補修はもちろん、窯口を主とした部分積み替え補修や、窯単位での損傷に対しての大規模積み替えといったさまざまな方式の補修を行っている。

本報告では、新日本製鐵のコークス炉用耐火物に関するトピックスとして、炉齢の異なる休止炉の使用後珪石れんが調査で判明した損傷実態と損傷原因、最近開発されたコークス炉診断補修装置の主な機能と使用状況を紹介しますと共に、大規模積み替え工事や新設工事でのコークス炉用耐火物技術上の課題に関して述べることにする。

2. コークス炉の損傷実態

(1) 損傷のプロセス

コークス炉の模式図と、各部位の使用耐火物を表3に示す。炭化室、燃焼室の最も高温になり且つ石炭の入る部位や、炉体構造を支える壁面等の主要部位は、容積安定性に優れる珪石れんがである。

炭化室窯口から2～3 mの部分の珪石れんがは、外気に触れる機会が多いため、熱スポールによる損傷が比較的早い時期から進行し、頻繁に溶射等の補修を行うことが多い。続いて始まるのが窯奥炭化室壁の珪石れんがの損傷である。図1にその損傷例模式図を、図2に後述する“コークス炉炭化室炉壁診断・補修装置”²⁾で観察した大分製鐵所第2コークス炉での診断画像データを示す。炉長方向に等ピッチで入った縦貫通亀裂発生と装入口下部の炭化室炉壁の凹部損傷状況が確認できる。

更に炉齢が進むと、貫通亀裂の拡大や破孔が起こり、その箇所からの燃焼室、蓄熱室への石炭の流入や、これに伴う局部温度低下が発生しやすくなる。これが基点となって

* 環境・プロセス研究開発センター 無機材料研究開発部 炉材エンジニアリンググループ マネジャー 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL:(0439)80-2114

表1 コークス炉用珪石れんがの技術開発¹⁾
Technology of silica bricks for coke oven

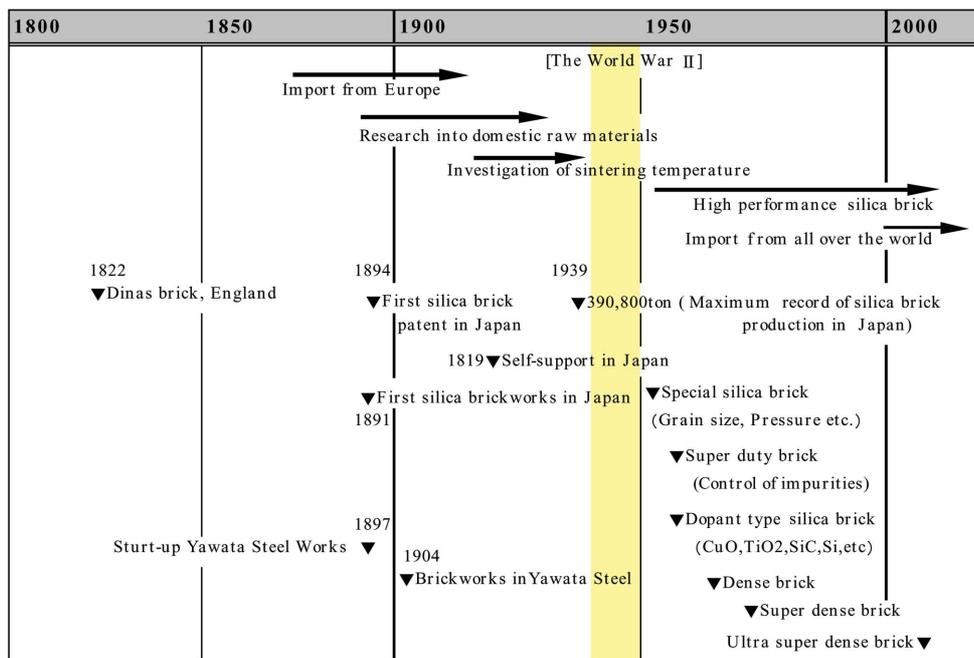
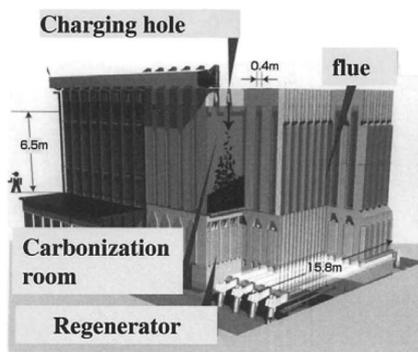


表2 新日本製鐵のコークス炉寿命
Age of coke oven in Nippon Steel Corporation

Works	Batteries	Hot run	Chamber	Age
Yawata	4	Jan. 1965	90	42
	5	Mar. 1970	110	37
Muroran	5	Jul. 1969	91	38
	6 (I)	Jan. 1965	42	26
	6 (II)	May 2007	42	0
	Nagoya	1	Aug. 1964	75
	1A	Aug. 2005	25	2
	2	May 1967	110	40
	3	Sep. 1968	90	39
	4	Oct. 1969	100	38
Kimitsu	1	Oct. 1968	90	39
	2	May 1969	95	38
	3	Dec. 1969	100	38
	4	May 1971	92	36
	5	May 1973	57	34
Oita	1	May 1972	78	31
	2	Jan. 1972	78	35
	3	Oct. 1976	82	35
	4	Sep. 1976	82	31

表3 コークス炉に使用する耐火物材質
Refractories for coke oven



Part	Refractories
Roof	Fireclay brick
	Insulating brick
Flue	Wall: Silica brick
	Jumb: Insulating brick, Fireclay brick
Curved part	Silica brick
Regenerator	Wall: Silica brick, Fireclay brick
	Checker: Fireclay brick
Sole flue	Silica brick, Fireclay brick
Door	Cordierite precasted brick
Ascension pipe	Cordierite precasted brick
Chimney flue	Fireclay brick, Common brick

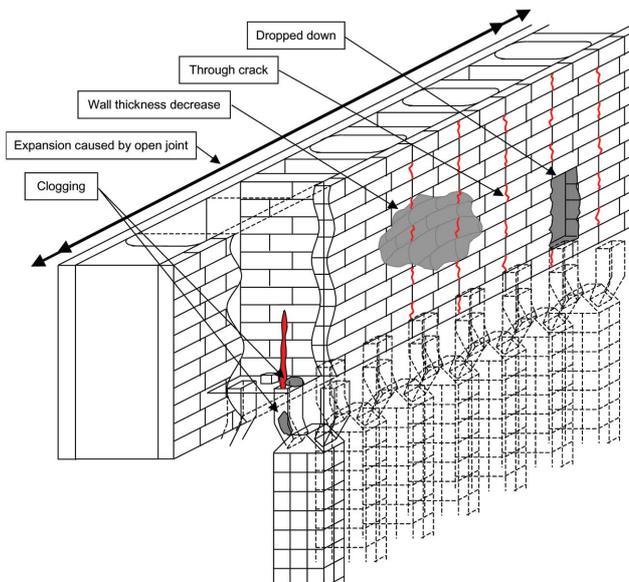


図1 炉体損傷の典型例
Typical damage pattern of chamber brick

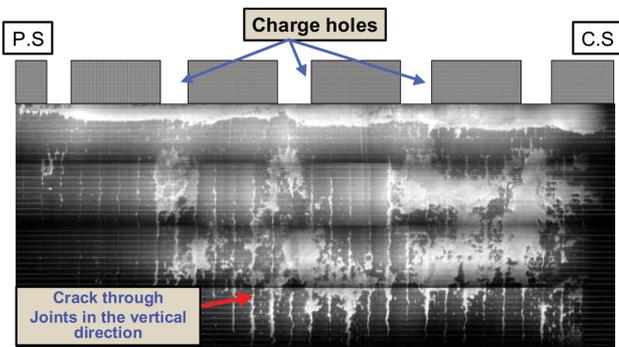


図2 大分No.2コークス炉壁面画像²⁾
Example of the wall surface of Oita No.2 battery

み20～30mmの脆化層が存在する。れんが中央部から燃焼室表面側にかけては、骨材の識別がつかないほど焼結が進行し、元のれんが組織はまったく残っていないかった。

更に詳細に観察するため、反射顕微鏡によりマイクロ組織を観察した。その写真を図5に示す。炭化室稼働面から約5mm以内の部分には、石炭から来たと考えられるCaO、Al₂O₃成分の高い反応層があり、微細な亀裂が多数存在する。顕微鏡で拡大すると、クリストバライト粒が一部残存しているが、表面と平行に亀裂が入り、剥離が進行している状態を観察できる。れんが中央部は、マトリックスと骨材が一体化しており、気孔も均一分散化した状態で、組織の再配列が起こっているように見られる。

燃焼室側は、微細気孔が連結合体した大気孔、CaO、Al₂O₃が濃化した低融物相とそれ以外の部分を満たすガラス化したSiO₂相からなる組織が確認できた。つまり、1200



図3 八幡No.2コークス炉で28年使用した珪石れんが外観
Over view of silica brick in Yawata No.2 coke oven after 28 years operation

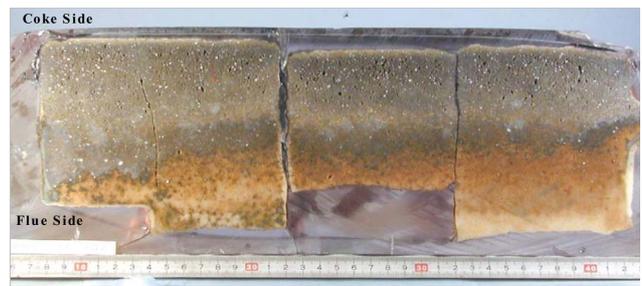


図4 八幡No.2コークス炉使用後珪石れんが断面
Cross section of silica brick in Yawata No.2 coke oven

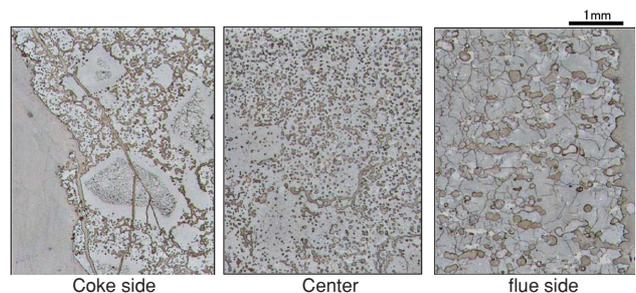


図5 八幡No.2コークス炉使用後珪石れんががマイクロ組織写真
Microstructure of silica brick in Yawata No.2 coke oven wall

更に損傷箇所が拡大していく。

(2) 珪石れんがの損傷実態と損傷機構

コークス炉用耐火物の損傷実態、特に主要耐火物である珪石れんがの損傷に関しては、過去からいろいろな報告があるが、稼働年数30年近く経過した各種耐火物特性の変質に関する報告は比較的少ない³⁾。そこで新日本製鐵で休止炉として現存する八幡No.2コークス炉(28年稼働)、室蘭No.3コークス炉(17年稼働)、名古屋No.1Aコークス炉(7年稼働)から珪石れんがのサンプリングを行い、各種特性調査を行った。

各炉、炉床から1.5mの高さ、窯奥装入口下付近から珪石れんがをサンプルを回収し、解析試料とした。その外観の一例を図3に示す。炭化室～燃焼室に至る大きな貫通亀裂が存在し、その亀裂やれんが目地を中心に表面からの剥離が生じ、れんがが単体としてはかまぼこ状になっている。図4には、このサンプルを水平方向に切断したときの断面を示す。前述の2本の貫通亀裂とだぼを起点に発生した表面に平行な亀裂の存在に加え、炭化室表面には多数の微細亀裂が確認できた。また、背面側には骨材が一部脱落した厚

～1300℃の高温に長期間さらされているれんが中央から燃焼室側は、液相が存在した状態で極限まで焼結が進行することによって、元のれんがとは全く異なる組織に変化している。

次に炭化室側、中央部、燃焼室側の3つの部分から熱間曲げ強度試験片を切り出し、1200℃での熱間曲げ強度及び強度試験片のたわみ量からの静弾性率測定を行った。先に述べたように炭化室表面側には微細亀裂が多数あり、実使用時の強度を正確に表現するため、試験片加工時に25mm×25mm×120mm形状を採取できなければ、強度0とする“見掛けの熱間曲げ強度 Sap”を定義した。測定結果を炉齢に対してプロットすると図6のようになる。炭化室表面では微細亀裂が多く発生しているため、見掛けの熱間強度は次第に低下している。これに対し、高温場で焼結が進行している燃焼室側では見掛けの熱間強度は炉齢と共に上昇している。これは焼結が進行しているためと考えられる。

つまり、れんが表面は、炉齢と共に劣化していくものの、燃焼室側の強度は上がるため、れんが単体としての強度はそれほど低下していない。しかし図7に示すれんがの応力-歪曲線から算出した熱間静弾性率は、元のれんがの3倍程度にまで増加している。この見掛けの熱間曲げ強度 Sap と静弾性率 E から求めた熱衝撃抵抗係数 R' に相似の Rap*1 を定義し、炉齢に対してプロットすると図8となる。これは、炉齢が進むにつれ次第に熱衝撃に対して弱い材質に変化していることを表すものと考えられる。

以上より、コークス炉の炭化室/燃焼室を構成する珪石れんがは、稼動後15年程度経過するとさらされていた温度に応じた焼結の進行により、炭化室側から燃焼室側まで

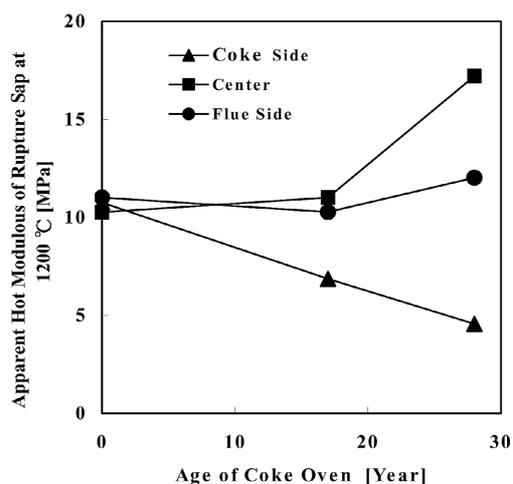


図6 炉齢に対する見掛けの熱間曲げ強度変化
Apparent hot modulus of rupture with oven ages

*1 熱衝撃抵抗係数 $R' = Sap \lambda (1 - \nu) / (E \alpha) \approx Sap / E \Rightarrow Rap$
ここで、見掛けの熱間強度：Sap, ポアソン比： ν ,
熱膨張率： α , 熱伝導率： λ , 弾性率： E
材質が同じであるため、 λ , ν , α をほぼ同等とみなした。

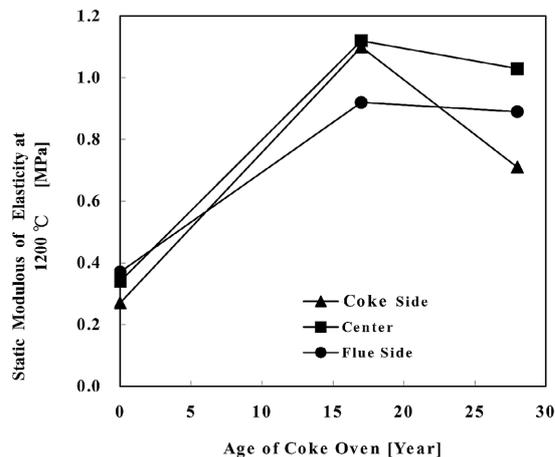


図7 炉齢に対する熱間静弾性率変化
Static modulus of elasticity with oven ages

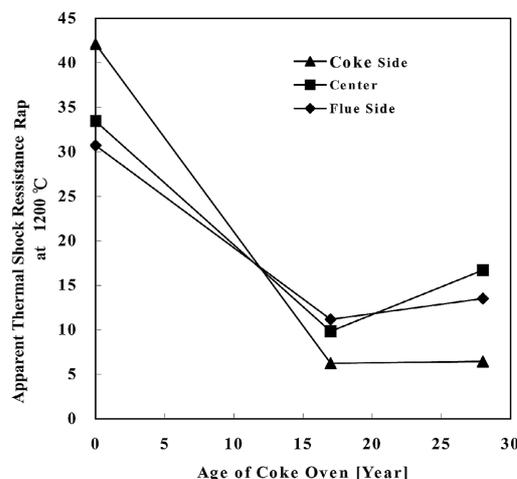


図8 炉齢に対する熱衝撃抵抗係数変化
Relation between oven age and apparent thermal shock resistance

連続的に変化した組織を持つれんがに変わる。また、れんが単体としての平均的な強度特性はあまり変化していないが、静弾性率は大きく変化し、熱衝撃を受けやすい材料に変化している、これは外観、ミクロ観察で判明した、大小多数の亀裂が温度変動の大きな炭化室側を中心に入っていることと関連づけられる。

すなわち、珪石れんが単体としての損傷は、大きく以下の2種類に分類されるが、その原因は長期の焼結進行により元のれんがとはまったく異なる組織の、非常に割れやすい材質に変化することだと考えられる。

- ① 押し出しや、付着カーボン燃焼等の温度変動に起因する熱衝撃割れによって、表面から微小剥離していき、表面凹凸発生を繰り返しながられんがの厚みが次第に減少していく損傷
- ② 炭化室壁面に垂直な貫通亀裂や、れんがダボが起点の壁面に平行な亀裂のように、炉構造やれんが形状との関係で発生する大亀裂

3. コークス炉の診断補修技術開発

(1) 炭化室補修方法について

前述したようにれんがの特性変化に従い、炭化室壁の亀裂発生や破孔頻度は炉齢と共に確実に増加していく。このため、新日本製鐵では熱間での炉内診断や部分補修に関するいくつかの技術を過去開発してきた。そのひとつは、熱間状態で耐火性粉体を炭化室壁面に燃焼ガスと共に吹き付け、局部的な補修を行う溶射方法であるが、近年カメラと溶射補修装置を組み合わせた“コークス炉炭化室炉壁診断・補修装置”を開発した²⁾。2番目は、もっぱら窯口で行われていた積み替え施工を発展させ、積みなおしをする“中ぐり法”⁴⁾等の部分積み替え工法であり、最後は炉団単位で行う新設と同等の大規模積み替え補修である。

(2) 局部補修方法

従来の補修は、オペレータによる目視観察や人力に頼った溶射補修であり、中央部の損傷実態が把握できなかったり、経験的、定性的な損傷度評価のため施工体の精度や耐用が低い等の問題点があった。これらを解決するため、新日本製鐵では、以下の5項目を目的とした“コークス炉炭化室炉壁診断・補修装置”を開発した。

- ① 炉壁凹凸量の定量測定
- ② 損傷部位の正確な位置把握
- ③ 炭化室両壁の短時間測定
- ④ 補修表面の高精度平滑溶射
- ⑤ 自動溶射による作業負荷大幅低減

本装置の概要を図9に示す。装置は、押し出し軌条上に設置した台車上に押し出しラムと類似の形状をした水冷ブ

ローブ、プローブ装入装置、プローブ冷却装置を2組並列で装備している。ひとつにはCCDカメラ、レーザー距離計及びそのコントロール装置を備えた炉壁診断装置、もうひとつには先端にレーザープロフィール計、溶射装置バーナーを装備したマニピュレータからなる補修装置で構成されている。

本装置では、図10に示すようなプロセスにより診断補修を行う。つまり前述した診断装置側で事前に損傷の激しい場所を特定し、次に補修装置を炉内に入れ、詳細な損傷部位の計測を行った後、損傷に応じた補修軌道、吹き付け量等をプログラムにより自動計算し、ボタンひとつで溶射補修を行えるものである。

搭載している溶射装置は、新日本製鐵開発の火炎溶射装置であり、施工能力は約20kg/h、溶射材料を火点中央に集束させるタイプのバーナーを新しく導入し、深さ45mm程度の凹凸を平坦度10mm以内の精度で補修できる。また、使用溶射材料としては、母材である珪石れんがの熱膨張挙動に一致させることと、施工材料の過溶融化による垂れ下がり(だれ)を避ける必要があるため、SiO₂成分がほぼ珪石れんが並みの高純度珪石質溶射材を使用している³⁾。

従来、酸素、LPG等の用役の準備から長大なランス操作、補修位置によっては足場仮設等が必要で、高温環境下で10名以上の作業者で行なっていたが、本装置により一連の作業を2名の操作オペレータのみにて実行可能となった。

上記装置は、炭化室側からの自動補修であるが、燃焼室側から補修を行う装置として、予備装入車により牽引され

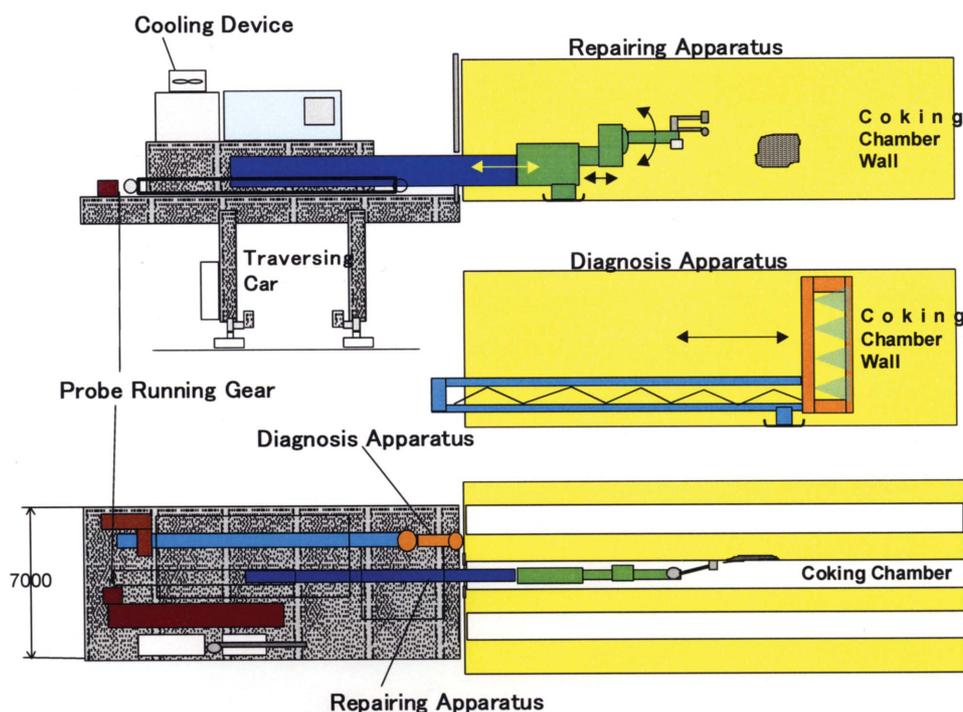


図9 コークス炉炭化室炉壁診断・補修装置模式図²⁾
Schematic diagram of the coking-chamber wall diagnosis and repair equipment

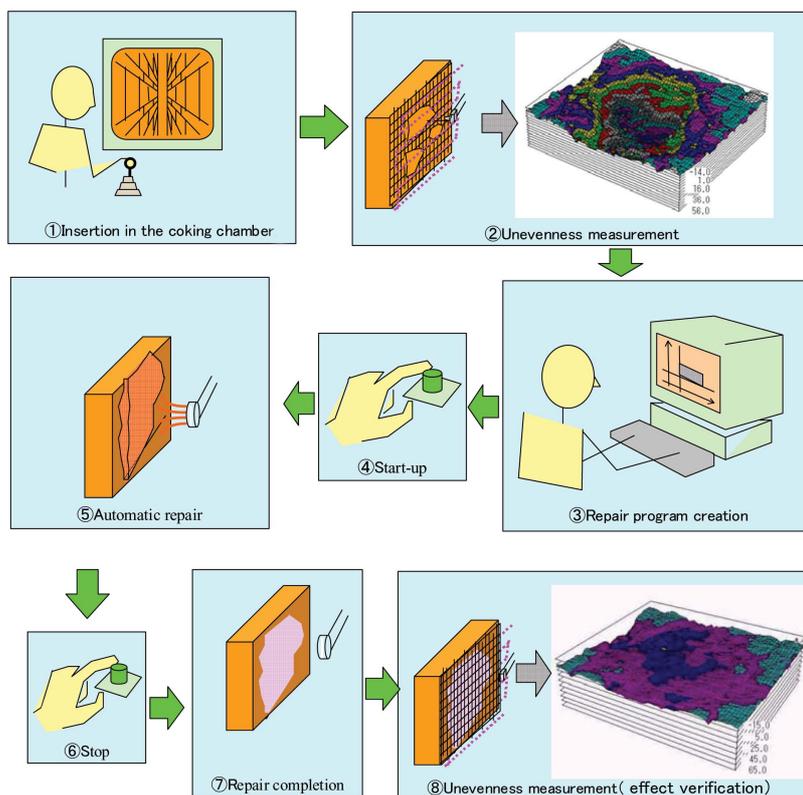


図10 自動補修工程²⁾
Automatic repair process

た台車上に CCD カメラ装備のランスを搭載した火炎溶射装置を開発し、炉頂の点検口から CCD カメラで位置を確認した後補修することで、環境面での改善に役立っている⁶⁾。

(3) 部分積み替え補修方法

部分積み替え補修に関しては、図11のように炭化室壁面全面を対象とする“全面積み替え法”や、1992年の広畑製鐵所での“中ぐり法”のような炭化室中央部だけの補修、端フリーや窯口部分の珪石れんがを積み替える局部

的な“片側積み替え法”まで、その損傷箇所や面積、温度条件に応じた工法検討を行い、実施してきた⁷⁾。

使用される耐火物は、以下のような具備特性を備えた耐火物である。

- ① 熱膨張が小さく、特に熱間補修では施工後の急激な昇温や操業時の温度変動に耐えること。
- ② 熱間強度が高く、石炭、コークスによる磨耗に耐えられること。
- ③ 長期間使用しても焼成収縮しにくいこと

	Total wall relaying method	Door repair extension method	Boring method
Brick relaying area			
Expansion allowance between new brick and old brick	Unnecessary	Unnecessary	Necessary
Working term	1 month	3 months	1.5 month
Working condition	Good	Not bad	bad
Brick cost	Expensive	Not expensive	Cheap

図11 積み替え工法の比較⁴⁾
Comparison of brick relaying methods for coke oven

表4 補修用珪石れんが品質例
Characteristics of silica brick for oven chamber repair

Characteristic	Silica bricks for repair	Fused silica bricks	Advanced silica bricks for hot repair	
		Unburned	A	B
Bulk density	1.74	1.78	1.82	1.85
Apparent porosity (%)	24.4	19.5	18.9	16.7
Apparent density	2.30	2.21	2.25	2.23
Crushing strength (MPa)	36.1	21.2	38.0	36.9
Modulus of rupture at 1200°C (MPa)	6.4	6.6	2.1	0.4
Thermal expansion at 1000°C (%)	1.19	0.15	0.98	0.87

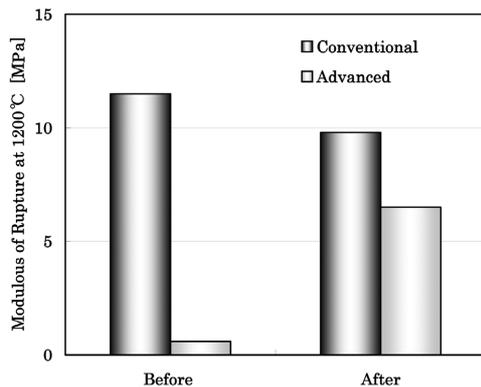


図12 耐熱衝撃性珪石れんがの稼動前後の熱間強度比較
Hot modulus of rupture for advanced silica bricks before and after operation

一般的には、通常珪石れんがの気孔率を上げた補修用珪石れんがが、ほとんど熱膨張しない熔融石英質耐火物、その結晶質珪石原料と熔融石英質原料を組み合わせた耐熱衝撃性れんが^{8,9)}の3種類が主に使用される。その品質例を表4に示す。補修用珪石れんがは、強度等は問題ないものの、施工後の昇温速度が大きいと割れが発生するため昇熱方法が難しい。

一方、海外ではれんがそのものが熱膨張しないので急速昇温に強く、膨張計算が容易な熔融石英質の耐火物を使用することが多いが、失透(結晶化)時の亀裂発生や熱間強

度が弱いことによる操業中の摩耗が懸念される。これに対し、耐熱衝撃性れんがは、前記両者の中間的な材料だけに、長所も多い反面、問題点も多数発生することが懸念された。しかし6年使用後の材料調査を行った結果、亀裂発生もなく、図12のように熱間強度も2章(2)項で述べた17年使用後珪石れんがにおける炭化室側の見掛けの熱間強度(図6)と同等レベルまで上昇していることが判明したため、熱間での積み替え補修には本材質を使用することが多い。

4. 大規模積み替え補修工事

名古屋、室蘭と工事規模を拡大しながら2炉団の積み替え工事を完了した。このうち工事完了炉団の概要を表5に、改修後の室蘭No.6コークス炉の外観を一例として図13に示す。

名古屋No.1Aコークス炉は、蛇腹部分から上の構造体及び蓄熱室ギッターれんがを全て積み替える方式であり、使用耐火物は約4000トン、このうち約1/2が珪石れんがで、炉体築炉工期は、約5か月であった。

室蘭No.6コークス炉では、炉床のコンクリート基礎より上部の耐火物構造体を全て解体、積み替える“パドアップ方式”である。使用耐火物は、約13000トンで、このうち2/3が珪石れんが、残りはシャモットれんが、断熱れん

表5 新設コークス炉の概要
Outline of newly rebuild coke oven

Batteries	Type	Muroran No.6	Nagoya No.1A
		Modified NSC-M	DKH-R compound
	Ovens	42	25
	Height (mm)	6 500	5 000
	Width (mm)	430	450
	Taper (mm)	76	60
	Length (mm)	15 800	13 724
	Effective volume (m ³)	35.1	27.3
	Flue	30	32
	Thickness of wall brick (mm)	110/100	100
Construction	Demolition	Mar. 2006-	Sep. 2004-
	Furnace installation	Jun. 2006-	Jan. 2005-
	Drying (day)	Feb. 2007 (71days)	May 2005 (59days)
	Start-up date	21 May 2007	27 Aug. 2005

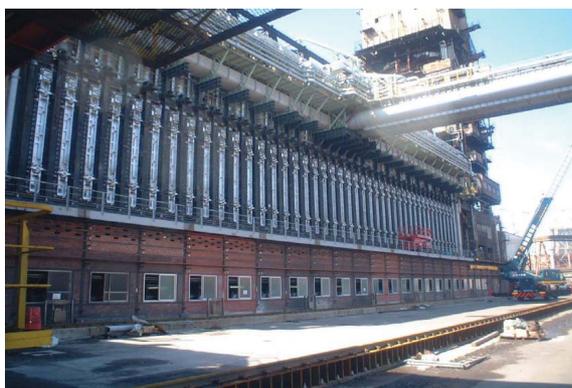


図13 工事後の室蘭No.6 コークス炉
Newly rebuilt Muroran No.6 coke oven

が、セラミックファイバー等になる。炉体築炉工期は約7か月であった。

両工事とも、積み替え補修とは言うものの社内的に約26年ぶりになる本格建設工事であり、工法面、材料面で発生した多くの問題を解決しながら、計画スケジュール通り完工した。

5. これからの新設工事での課題

前述した2件の大規模積み替え工事に加え、先日、大分製鐵所にて1炉団の新設工事が完了した。これらの工事で発生した問題を通してコークス炉用耐火物の課題を考えると数多く挙げられる。特に大きな課題として本報告では以下の3点を挙げたが、単に新日本製鐵だけではなく業界全体で問題解決を図っていかねばならないものもあり、今後の協力体制も重要である。

- ① 新設では、大量の定型れんが、特に珪石れんがを使用するが、コークス炉建設が殆ど無かったこの30年間の国内原料山の相次ぐ閉鎖や、珪石れんがの焼成に使用する“丸窯”の休止解体等に伴い、国内での製造調達が不可能となっている。このため、中国をはじめとする海外調達品を使用しているが、製品の精度確保、ロット変動に対する品質確保、最終納入場所までの品質保証等の考え方に意見相違がある。今後、製造指導者だけでなく、ユーザー側の工事指導者も現地メーカーに派遣して、製造前に十分な意思疎通を図ることが重要である。
- ② 建設工事には、小型で複雑な形状のれんがを組み合わせながら高精度で積んでいく築炉工を始め、図面と工程に合わせてれんがを準備する配列工、目地にモルタ

ルを充填する目地押し工、木枠や定規を製作する木工等、色々な技能を持つ人たちが必要である。しかしこれらの人たちはすでに高齢化している上、それぞれの絶対数も非常に少ないため、業界全体での要員確保や、新人に対する技能伝承等が今後必要である。

- ③ 社会意識が大きく変化する中、コークス炉を取り巻く自然環境に対する考え方も大きく変化している。煤煙発生に対する環境規制がますます厳しくなる中で、コークス炉を50年を越えて長期間使用するためには、稼働中でも局部冷却し、部分補修しやすい構造や、多少目地開きしてもガス漏洩しにくい構造など、今までと異なった思想での炉体構造の検討が必要である。そのためには構造設計－耐火物材質－施工法の三位一体となったエンジニアリングの推進や技術開発が必須と考える。

6. 結 言

昔からいろいろな調査が行われてきたコークス炉用珪石れんがであるが、炉齢の異なる休止炉の使用後珪石れんがを調査した結果、元のれんがとはまったく異なった、熱衝撃に弱い材質に変化し、熱スポールを主体に損傷が進んでいくことが判明した。

また、新しく開発した“コークス炉炭化室炉壁診断・補修装置”により、初めて定期的な熱間での炉内観察と、迅速且つ高精度な壁面補修を行うことができるようになった。現在新日本製鐵全炉団に早期適用すべく設備化を進めているが、本装置を使用しての損傷部に最適な補修や、先を読んだ補修を行うことによる延命はもちろん、新しい補修工法や材質の開発、新設炉の構造設計にも役立てていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 例えば、平櫛ら:製鐵研究.(305), 128(1981)
寄田栄一:耐火物. 54(12), 628(2002)
- 2) 境田 ほか:新日鉄技報.(384), 63(2006)
- 3) 例えば、成田ら:耐火物. 51(8), 459(1999)
- 4) 岡西 ほか:材料とプロセス. 5(4), 1120(1992)
- 5) 石井 ほか:コークスサーキュラー. 40(3), 192(1991)
- 6) 池本 ほか:材料とプロセス. 14(4), 858(2001)
- 7) 岡西 ほか:コークスサーキュラー. 42(4), 224(1993)
- 8) 三島 ほか:耐火材料.(149), 76(2001)
- 9) 前谷 ほか:耐火物. 58(3), 131(2006)



笠井清人 Kiyoto KASAI
環境・プロセス研究開発センター 無機材料
研究開発部
炉材エンジニアリンググループ マネジャー
千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511
TEL:(0439)80-2114



筒井康志 Yasusi TSUTSUI
環境・プロセス研究開発センター 無機材料
研究開発部
炉材エンジニアリンググループ マネジャー