

# 21世紀に向けて:日本のコークス技術の視点

西岡 邦彦\*

Toward the 21st Century: Viewpoints of the Japanese Cokemaking Technology

Kunihiko NISHIOKA

**Synopsis** : A serious problem is predicted to occur to the domestic cokemaking industry in the early years of the 21st century. With the majority of existing coke ovens worn out or obsolete, a significant shortage of coke production would take place. Presently, considering the environmental pollution and improving the work conditions, the development of an innovative process is strongly required for future.

The cokemaking industries in Japan have two candidates as the potential process for the future, i.e., the previously developed Formed coke process and the new Conventional cokemaking process. The project for the latter process has been promoted to develop the innovative process by member companies in The Japan Iron and Steel Federation during eight years since 1994. This project is named after SCOPE 21 (The Super Coke Oven for Productivity and Environment enhancement toward the 21st century). A bench scale test will follow in three years since 1996 and the project is expected to proceed to the 100t/d pilot plant test in next three years until the year 2001.

This process should develop at least the following technical items to realize more economical and clean coke plants.

- 1) Pre-coking treatment for higher utilization of poor coking coals
- 2) Coking system for higher productivity
- 3) Perfect prevention of environmental pollution

In addition, some basic researches are pointed out for the process development toward the 21st century.

**Key words** : coke; cokemaking; coke oven; SCOPE21; non-coking coal; preheated coal; plug flow system; medium temperature carbonization.

## 1. はじめに

石油危機以降の21年間に、わが国のコークス製造技術は原料対応と省エネルギー技術の面で世界に誇れる水準にまで進歩した。しかし粗鋼量の伸びの停滞とあいまってコークス生産量も停滞し、コークス炉の更新は進まず、老朽化の道を辿った。この先コークス炉の延命を図り、高炉の微粉炭吹き込み量の増大やコークスを使わない溶融還元製鉄法の実用化を見込んでも、21世紀前半には大幅なコークス不足が懸念される状況にある。

詳しい解説は既報<sup>1,2)</sup>に譲り、ここでは21世紀前半の視点に立ってコークス製造技術の位置づけを整理、今わが国が取り組んでいるプロセス開発を概説するとともに、基盤となるコークス基礎研究の課題を考えてみたい。

## 2. 21世紀前半のコークス製造環境

### 2.1 粗鋼生産体系とコークスの位置づけ

現在、日本の粗鋼は約70%が高炉製鉄法、残り30%が電

気炉法により生産されている。これまで電気炉法による粗鋼生産は、一貫して拡大基調で推移してきたが、将来的には原料のスクラップの需給および鋼の性状問題などから、電気炉法が今後とも同じ歩調で拡大していくとは見込まれていない。

一方、コークスを使用せず直接石炭を利用する溶融還元製鉄法は高炉製鉄法への代替が期待されている。しかしながら、COREX法のように諸外国で一部実用化された例も報告<sup>3)</sup>されているがまだ小規模である。またわが国が開発中のDIOS法<sup>4)</sup>もまだ実用技術としての実績を積む必要があり、21世紀前半において新製鉄法が高炉製鉄法を凌駕するとは考えにくい状況にある。

こうした背景から、高炉製鉄法は新製鉄法に逐次代替されていくであろうが、21世紀前半はまだ高炉製鉄法が粗鋼生産の重要な位置を占め続けるものと考えられる。

ところが高炉製鉄法を支えるコークス炉は、その寿命が一般に35年程度と言われるのに対して、日本のコークス炉は1995年末時点で平均稼働年数25年に達している。

したがって、21世紀初頭にはわが国のコークス炉は次々と

平成7年11月27日受付 平成8年1月18日受理 (Received on Nov. 27, 1995; Accepted on Jan. 18, 1996)

\* 住友金属工業(株)総合技術研究所 (Corporate Research and Development Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16 Oaza-Sunayama Hasakimachi Kashima-gun Ibaraki-ken 314-02)

炉寿命を迎えると予想<sup>5)</sup>されている。

またコークス使用面で考慮すべきは、高炉製鉄法におけるコークス代替の微粉炭吹き込み(PCI)技術の進展が挙げられる。1994年の実績<sup>6)</sup>では、高炉による鉄鉄生産量は7,373万t/年であり、平均燃料比は514Kg/t、うち微粉炭比は102Kg/t、コークス比は412Kg/tとなっている。したがって高炉でのコークス使用量は3,040万t/年、粉コークス込みの全コークス製造量は3,534万t/年となる。微粉炭比は近い将来さらに増大し平均的には150Kg/tまで到達すると推定される。

これまでの議論を総括し、Table 1 に示す大胆な前提条件で近い将来のコークス需給量を試算すると、Fig. 1 のように2003年頃から急激なコークス不足を来し、2020年時点では必要コークス量2,320万t/年の全量が新設のコークス炉で生産されると予想される。

2・2 労働力構成

現在、わが国におけるコークス製造に従事する従業員の平均年齢は、Fig. 2 に見られるように43才を超えており、若年層労働力の確保および操業運転技術の伝承は大きな課題である。それにもかかわらず、現在のコークス製造プロセスは、まだ高熱、粉じんなどの悪条件の中で人に頼らざるを得ない作業も多く残されている。今後、コークス工場では一層の自動化推進と若年層にも魅力ある作業環境づくりを進め、労働力年齢構成の是正を図りながら技術の伝承を進めることが極めて大きな課題である。

Table 1. Assumptions of coke demand and supply.

Items	Year	2000	2020
Steel product (×10 <sup>4</sup> ton)		10,000	
BF/EAF ratio		70/30	
Smelting reduction(DIOS) ratio (%)		0	20
Coal ratio (kg/HMT)		100	150
Coke ratio (kg/HMT)		414	364
Fine coke ratio (%)		12	
Coke demand (×10 <sup>4</sup> ton/year)		3,290	2,320

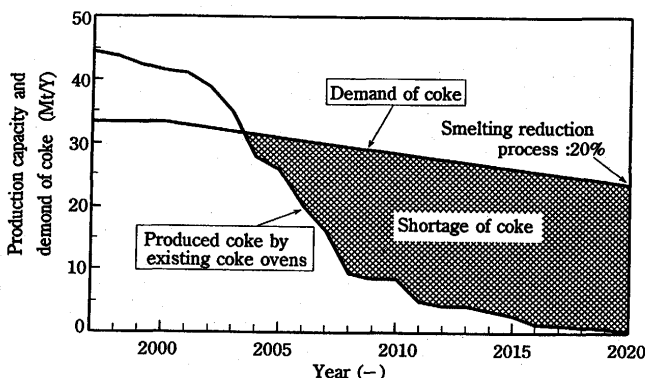


Fig. 1. Prediction of coke demand in Japan.

2・3 石炭資源

わが国の石炭需要は、Fig. 3 に示すように、1994年は総需要量約1億2500万tで、そのうち一般炭と原料炭はほぼ50%ずつであった。しかし2010年予測では、総需要量は約2億tに増大するものの原料炭は約5000万tに減じ、一般炭が1億5000万tに達するとの試算<sup>7)</sup>もある。

こうした趨勢にもかかわらず、現在のコークス製造技術水準では、原料炭の大半を粘結炭に依存せざるを得ない。すなわち、現状の事前処理技術では非微粘結炭使用比率は20%程度が限度である。石炭資源に乏しいわが国が、流動的な世界の石炭市場に今後とも柔軟に対応していくために、粘結炭から非微粘結炭まで幅広く使用できる技術を開発しておく必要がある。

2・4 環境保全

1968年に大気汚染防止法が施行されて以来、日本のコークス工業はNOx、SOxの発生量低減、粉じんや臭気抑制、排水処理の対策を進め<sup>8)</sup>、現在では世界的に最も環境対策の進んだ国になっている。しかしながら、製鉄所の中においてコークス工場は、最も作業環境の悪い職場に数えられ、より一層の努力が求められている。

さらに1990年、米国において抜本的な改訂が行われた大気汚染防止法(Clean Air Act Amendments, 以下CAAと

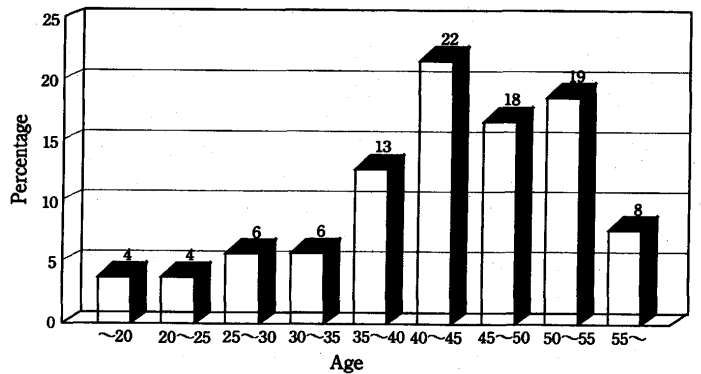


Fig. 2. Age construction of labors at Japanese cokemaking industries in 1993.

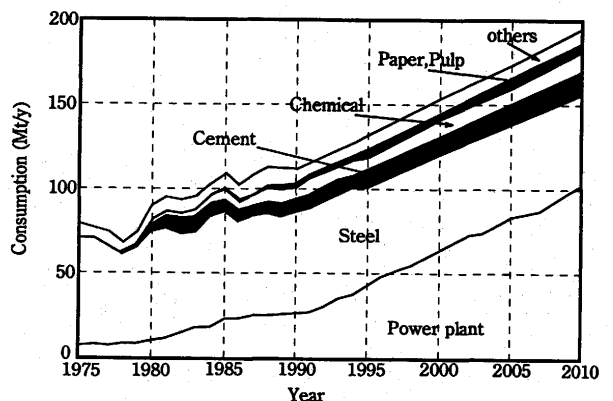


Fig. 3. Trend of coal consumption in Japan.

略記)<sup>9)</sup>は、米国のコークス業界のみならず日本のコークス業界にとっても厳しい対応を迫るものとなった。詳細は割愛するが、CAAでは1992年の乾留ガス漏れ規制値の告示から始まって、2020年までの段階的な改善スケジュールを明示しており、その達成ができなければ、コークス炉を休止せざるを得ない厳しい内容である。

このように、作業環境および地球環境保全の世論の中で、日本のコークス工業は21世紀に向かって完全無公害を目指した技術開発が不可欠との認識に立っている。

### 3. 新コークス技術の目指すべき方向

#### 3.1 2つの選択肢

日本のコークス工業は、連続式成型コークス製造法と革新的コークス製造法との2つの選択肢をもって、21世紀前半のコークス製造に対処しようとしている。

連続式成型コークス製造法<sup>9)</sup>は、1978年から1986年まで日本鉄鋼連盟の参加企業により、200t-coke/dのパイロットプラントの建設と操業が行われ、実用化技術が開発された。しかし成型コークスは原料石炭の制約や高炉使用上の制約から、通常コークスの20~30%代替が安定操業の限界であると認識されている。

そこで通常コークス製造法に関しても、前記した課題を解決できる革新的な技術を付加した新しいタイプのコークス製造法を開発し、Fig. 4 に示す成型コークス法とのコンビネーションでもって対処しようとしている。

#### 3.2 革新的コークス製造プロセス

##### (1) プロセス基礎研究

日本鉄鋼協会は基礎研究支援活動の一つとして、1977年以來今日まで産学共同によるコークス製造の基礎研究を推進してきた。活動の成果は、低品位原料の活用や省エネルギーなどの技術開発を側面から支援してきた。

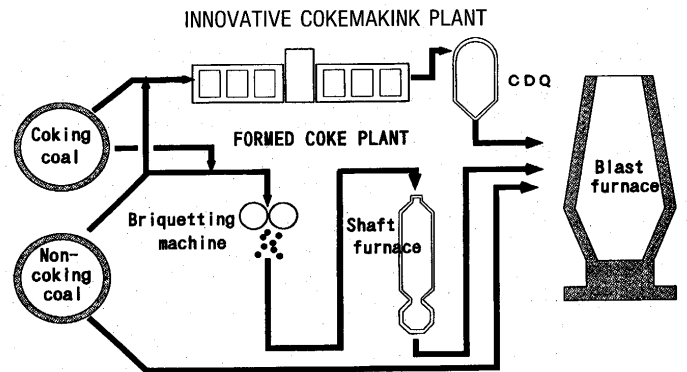


Fig. 4. General view of future cokemaking process.

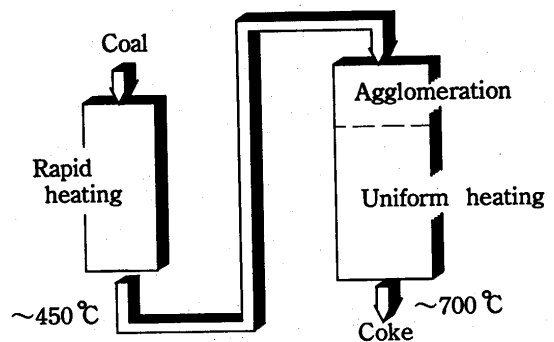


Fig. 5. Concept of the innovative cokemaking process.

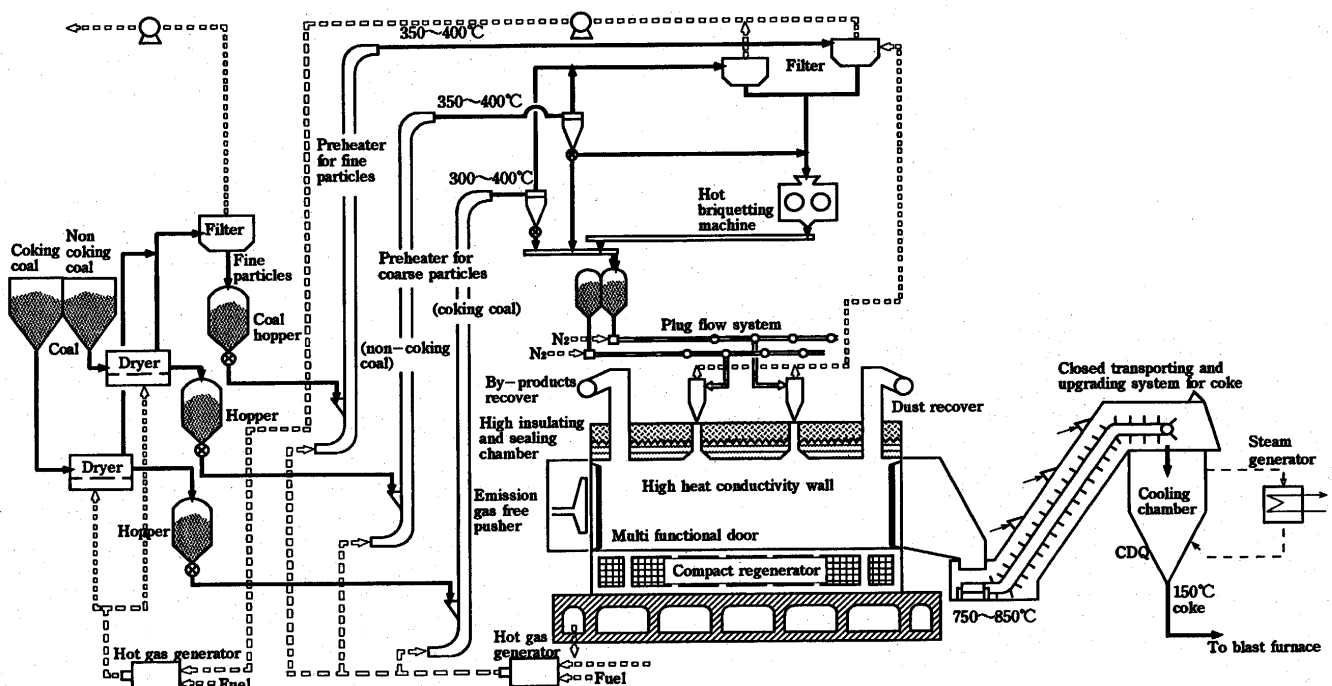


Fig. 6. SCOPE 21 process flow.

1990年から1993年までの研究活動<sup>10)</sup>では、Fig. 5のコンセプトの次世代コークス製造技術の創出を目指した基礎研究が行われた。低品位石炭の高度利用と高生産性のコークス製造技術の確立を目的に、急速加熱された石炭を塊成化、中温で乾留してコークスとするものである。

これらの成果を踏まえ、1994年から3カ年の予定で、コークス製造工程における熱と物質の変化過程を定量化できる数学モデルの開発とモデル入力値となる石炭物性値の評価が進められている。

(2) プロセス技術開発

Fig. 5のコンセプトを基本に、1994年より鉄鋼連盟参加企業による次世代コークス製造技術の調査研究が進められ、Fig. 6の新コークス製造のプロセスフローが描かれた。

本プロジェクトはSCOPE21(Super Coke Oven for Productivity and Environment enhancement toward the 21st century)と命名され、1996年以降要素技術の開発と100t/d規模のパイロットプラント試験が計画されている。主な技術開発テーマは、以下のとおりである。

- ・低品位石炭の高度利用のための石炭事前処理
- ・高生産性コークス化システム
- ・環境汚染物質の完全抑制

## 4. SCOPE21の概要

SCOPE21の具体的な研究開発項目の中で、プロセスを特徴づけるキー技術について概略を説明する。

### 4.1 石炭事前処理技術

#### (1) 石炭の高温予熱・分級

コークス炉に装入する石炭の予熱は、装入炭の均一化と乾留時間の短縮の2つの効果がある。すなわち、均一装入はコークス品質の偏差低減に効果があり、乾留時間の短縮は生産性向上に有効である。本プロセスでは、従来安定操業の限界とされていた200℃を大きく上回る予熱温度350~400℃を目標に技術開発を行っている。

なお、石炭の熱分解開始温度近傍での急速加熱は、石炭の粘結性改善の効果も期待される。

石炭の高温予熱を阻む問題点は、粒度分布をもつ石炭を均一加熱することである。とくに問題なのは、気流層加熱の場合、Fig. 7に示すように、微粒の石炭は加熱初期からガス温度に近接した昇温挙動を示すのに対して、粗粒の石炭は伝熱に時間を要するため加熱ガス温度に徐々に接近する。そのため、高温予熱の場合には微粒の石炭は熱分解温度を超えて加熱され、石炭品質の劣化や粘着による予熱機操業のトラブルを招くおそれがある。

問題解決のため、本プロセスでは石炭予熱の前段に流動床加熱機を置き石炭を粗粒部と微粒部に分級し、後段の気流層加熱では粒度区分ごとに急速加熱する方式を採用している。

#### (2) 微粒部石炭の塊成化

予熱された微粉炭はコークス炉装入時にその一部がキャリーオーバー炭として炉外に飛散し、コークス炉操業トラブルやタール品質の低下原因となる。本プロセスではキャリーオーバーの抑制のため、予熱過程で分級された微粉部分の石炭を塊成化して、粗粒部分の石炭と混合してコークス炉に装入する。また装入原料の一部が密度の高い塊成炭であるため 装入嵩密度は約850kg/m<sup>3</sup>に増大すると予想される。この嵩密度向上効果と装入均一化効果により、コークス品質の改善が期待される。これらの効果により、コークス品質一定の場合、Fig. 8に示されるように配合原料に非微粘結炭を最大で約50%使用可能と見積もられる。

### 4.2 高生産性コークス化システム

#### (1) 装入石炭の高温予熱・塊成炭混合装入

高生産性技術としては、前記した装入炭の350~400℃の高温予熱と、嵩密度向上効果の大きい塊成炭混合の事前処理技術の開発を最重点に推進中である。

#### (2) 高熱伝導性・薄壁レンガ

コークス炉炭化室壁のレンガは熱伝導性で従来珪石レン

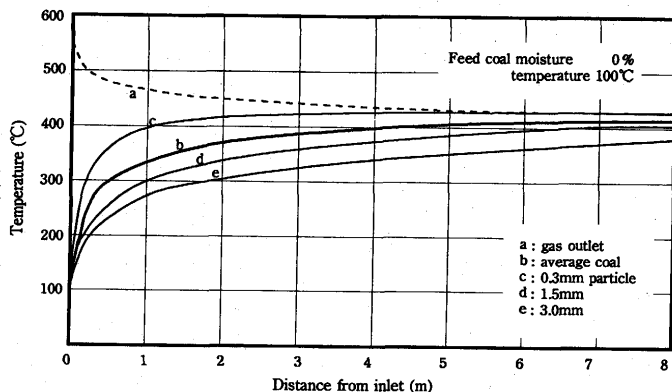


Fig. 7. Simulation results of coal temperature for each particle size in a single type preheater.

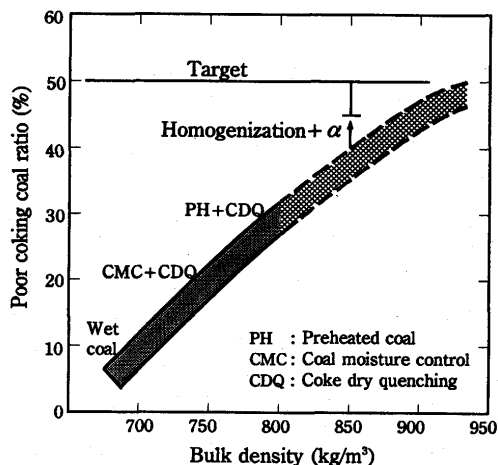


Fig. 8. Relation between blending ratio of poor coking coal and density of charged coal.

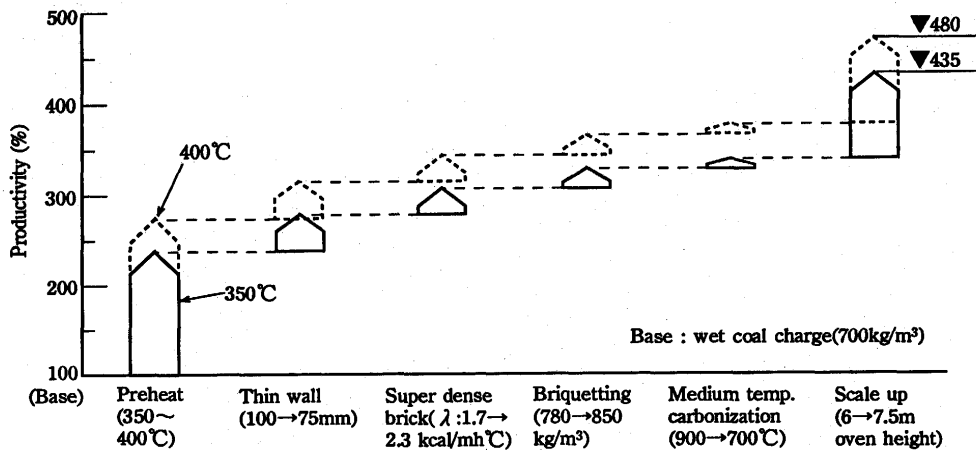


Fig. 9. Effects of new technologies on coke oven productivity.

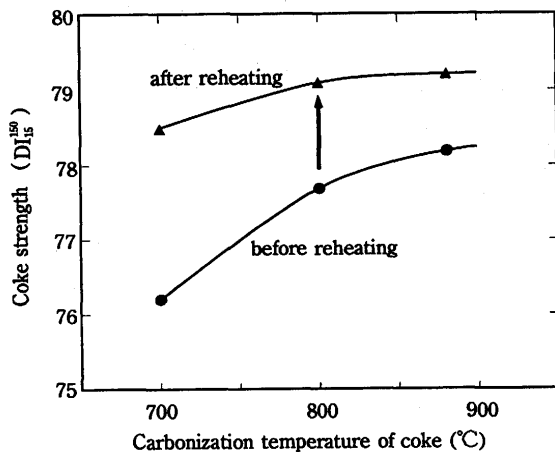


Fig. 10. Upgrading effect of coke by reheating under N<sub>2</sub> atmosphere at 1000°C, 1hr.

の1.5倍を開発目標にしている。またレンガ厚は70～75mmを目標に開発が進められている。

### (3) 中温乾留

炭中部コークス温度が700～800°Cでコークスケーキを排出する中温乾留の達成を目指し、均一加熱技術の開発が進められている。

これら(1)～(3)の技術の組み合わせを数学モデルで評価すると、Fig. 9に示すように、通常的水分を有する装入炭と比較して、SCOPE21は少なくとも300%の生産性向上が見込まれる。

### (4) 中温乾留コークスの改質

中温乾留コークスは、1000°C以上の高温で乾留されたコークス品質に比べて強度不足が懸念される。そこで本プロセスでは、CDQの上部プレチャンバー部において、中温で乾留されたコークスを再加熱して高温乾留コークス並みの品質に改質(Fig.10)する方法をとっている。

再加熱の方法は、プレチャンバー部に空気を吹き込みコークスから発生する可燃性ガスの一部を燃焼させて熱源に

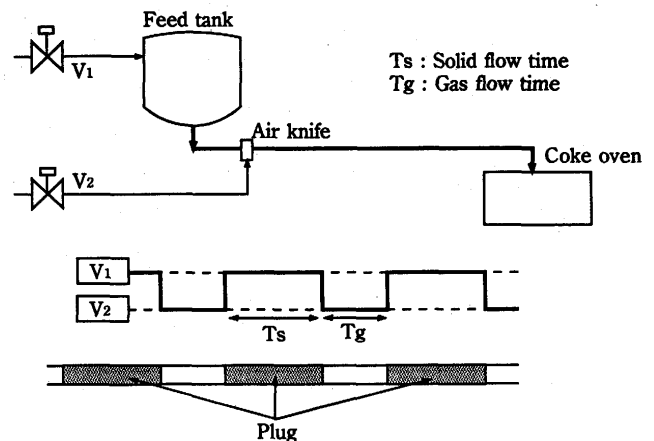


Fig. 11. Schematic diagram of plug flow system.

する方法と、CDQから余剰ガスとして系外に抜き出される可燃性ガスの一部を燃焼させて熱風としてプレチャンバー部に吹き込む方法がある。現在両方法の評価試験が行われている。

## 4・3 環境汚染物質の完全抑制

### (1) 高温予熱炭のプラグ輸送

予熱炭のパイプ輸送技術はすでに開発されているが、搬送石炭量に対する搬送ガス量が多いため、設備規模が大きく輸送動力も大きいため経済的とは言えなかった。本プロセスでは新たに開発したプラグ輸送技術(Fig.11)により、高温予熱炭を少ないガス量で高濃度・低流速で搬送可能とした。この技術により、発じん・発火性の高い高温予熱炭を装炭車を介することなく、クリーンにかつ安全にコークス炉に装入可能とするものである。

### (2) コークス炉からのガス漏れ完全防止

コークス炉からのガス漏れは、コークス炉のシール性不良と正圧操業の炉内圧力に起因するもので、完全抑制は困難であった。本プロセスは、基本的にはコークス炉を鋼板により完全密閉化を目指すとともに、負圧操業を可能とす

る炉内圧調整技術の開発が予定されている。

一例として、Fig.12の中空炉蓋を開発し、中空部に外部より空気を導入することにより、ガス漏れ防止と併せ窯口コークスの加熱が可能である。また、炉上部構造には、鋼板で覆われた断熱材ユニット (Fig.13) を設置、密閉性を向上するとともに炉上部構造を簡素化する試みが計画されている。

なお、コークス炉の燃焼構造改善のために、均一加熱技術や蓄熱室のコンパクト化技術も開発が計画されており、排ガスの低NO<sub>x</sub>化が図られよう。

(3) 赤熱コークスの密閉搬送

通常、コークス炉から排出された赤熱コークスは消火台

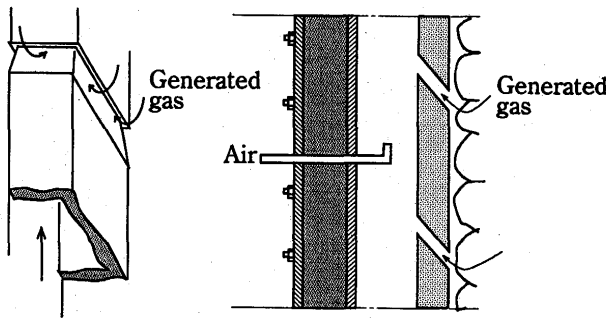


Fig. 12. Schematic diagram of hollow plug door.

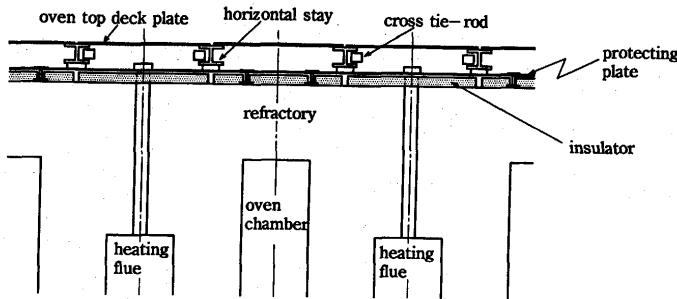


Fig. 13. Heat insulating and sealing structure of oven top.

車に受け込み、消火塔もしくはCDQに搬送される。この搬送中の発じんや発煙を完全に抑えるには、搬送中の消火台車にフードをかぶせるだけでは不十分で、集じん設備を備える必要がある。本プロセスでは、排出コークスを耐熱コンベアで受け込み、密閉状態でCDQへ搬送する技術を開発中である。

以上のキー技術のほかにも、環境改善対策には多くの工夫が凝らされており、石炭の搬送から乾留およびコークスの搬送までの一連の工程で発じん・発煙の完全抑制を目指した試みがなされている。

4.4 実用プラントのイメージ

実用プラントのイメージは、4000m<sup>3</sup>級の大型高炉1基が10,000t/dの出鉄を行い、燃料比500kg/t、PCI比100~150kg/tの操業を行う前提で、約4000t/dのコークス製造プラントが想定される。このプラントをTable 2の諸元で建設した

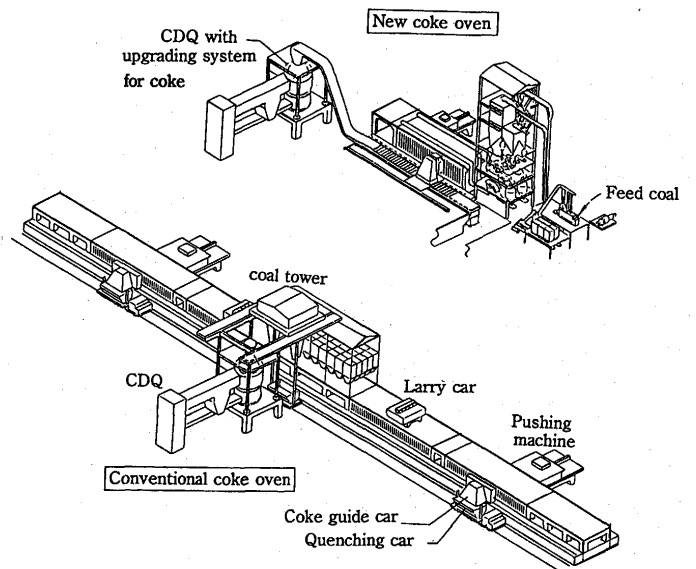


Fig. 14. Outlook of 4,000t-coke/d cokemaking plants

Table 2. Estimation of 4,000t-coke/d commercial coke oven.

		Conventional	SCOPE21	
			Case1	Case2
<b>Assumptions</b>	Charged coal	moisture (%)	9	-
		temperature (°C)	25	400
		bulk density (t/m <sup>3</sup> )	0.7	0.85
		briquetted coal ratio (%)	0	30
Carbonization	flue temperature (°C)	1350	1350	
	oven center tem. (°C)	1000	750	
Oven feature	oven height (m)	6.0	6.0	7.5
	oven length (m)	15.7	15.7	
	oven width (m)	0.45	0.45	
	oven volume (m <sup>3</sup> )	37.6	47.6	
	brick thickness (mm)	100	70	
	heat conductivity of brick (kcal/mh°C)	1.7	2.3	
<b>Results</b>	coking time (h)	17.1	5.0	
	number of ovens (-)	140	36	29

場合、プラントイメージはFig.14, Table 2 のようになる。通常の湿炭装入プロセスと比較して、SCOPE21プロセスは生産性が300%と高いため炉門数は大幅に削減され、装炭車・消火車がないため極めてコンパクトな設備イメージとなる。また設備コストは、少なくとも現行炉方式より、10~30%低減可能と見積もられている。

## 5. コークス基礎研究の方向

日本では前述したように、日本鉄鋼協会のもとで産学共同の基礎研究が行われ、研究成果と人材育成の両面でコークス製造技術の発展を支えてきた。今後も産学が一層緊密な関係を維持しつつ、次世代コークス技術および高炉操業技術の進歩を支えていく必要がある。以下に、今後取り組むべき基礎研究の方向をまとめてみた。

### 5・1 石炭事前処理技術

#### (1) 乾燥・予熱石炭のコークス炉充填特性

コークス炉に装入する石炭は、低水分化→乾燥・予熱化の傾向にある。SCOPE21では、石炭予熱の限界といえる加熱温度350~400°Cの高温予熱に挑戦している。しかしながら、乾燥・予熱化に伴う石炭粒子の挙動については必ずしも明らかではない。とくにコークス炉装入時の充填特性の解析は、コークス品質・炉操業に関わる重要な研究課題である。

また、コークス炉の炭化室は1000°C程度に加熱されており、石炭装入の途中から炉壁に接した部分は熱分解を開始しガスを発生する。発生ガス量は予熱温度の高い石炭ほど、また装入時間が長いほど多く、装入石炭の一部は流動化現象を起こすと推定される。こうした現象は、装入炭の嵩密度や嵩密度分布に影響するだけでなく、装入炭のキャリーオーバー量にも影響するもので、その定量的な解析が望まれる。

#### (2) 石炭の改質

これまでの石炭事前処理技術は、選炭、粉碎、混合、配合、乾燥、成型などに工夫を凝らし、安定した品質のコークスを製造するため貢献してきた。それらは天然に産する石炭の性質を最大限に引き出す技術と認識できる。今後の事前処理技術は、さらに一步踏み込んで石炭の性状を改質制御することが要求されよう。

今後のコークス製造が、非微粘結炭の多配合と乾燥・予熱により装入嵩密度を高める方向の中で、粘結性制御と乾留時の膨張圧制御、コークスの粒径制御が重要な開発課題となる。具体的には、石炭の粘結性・不活性成分制御のために、乾燥・予熱過程での化学的な反応を考慮した事前処理の可能性追究も大きな研究課題である。

### 5・2 乾留反応制御

#### (1) 高温予熱炭の乾留反応

コークス炉における乾留反応については、すでに多くの研究があるものの、SCOPE21のように石炭の熱分解温度近

傍まで予熱された石炭の乾留反応については全く知見がない。とくに炉幅方向の各位置におけるコークス化挙動は興味ある研究課題である。

#### (2) 膨張圧と収縮性評価

将来のコークス技術が装入炭の高嵩密度化と炭化室の薄壁化、そして中温乾留を指向する時、課題となるのはコークスケーキの膨張・収縮性評価である。理論的解析技術の向上とセンサーの開発は大きな研究課題である。

#### (3) コークス粒径制御

コークスの粒径は、セミコークス化過程で発生する収縮応力に支配され、装入炭の炭化度、不活性成分量、装入嵩密度や乾留温度、乾留速度などに左右されることはすでに知られている。将来のコークス製造が生産性を上げる方向にあり、その結果、乾留温度、乾留速度が上がりコークス粒径の低下が懸念される。しかしセミコークス化過程の応力解析は、まだ緒についたばかりでコークス粒径を制御できるまでには至っていない。今後のコークス粒径支配要因の定量的な解析が強く望まれる。

### 5・3 コークス品質評価

#### (1) 高炉用コークスの品質

高炉用コークスの品質は、強度、粒度、CO<sub>2</sub>反応性の大きくは3つの評価で行われる。まず強度に関しては、日本ではDI、ドイツではMI、米国ではTIのように、世界共通して回転ドラム指数による耐破碎・耐摩耗性評価が行われ、高炉操業の管理が行われている。それにもかかわらず、DI、MI、TIには明瞭な関係がないとされる。

一方、CO<sub>2</sub>反応性の評価は、各国必ずしも一様ではない。日本では主にCSRと称せられるCO<sub>2</sub>反応後強度評価が高炉操業の管理に用いられている。CSRの高いコークスが高炉にとって好ましいものの、CSRと高炉操業とに明瞭な関係があるとまでは言い切れていない。

21世紀の高炉操業は高PCI操業だけでなく、鉬石吹き込み・高酸素富化・高圧化など多様化、複雑化していくと予想される。上記問題点を整理し、高炉操業にとってコークス品質はいかにあるべきか、高炉内解析を基礎にした新しい視点からの方向付けが必要である。

#### (2) コークス品質評価試験法

コークスの品質評価指数であるDI、CSRは、高炉操業の重要な管理指数として定着しているが、試験法としての観点からは、到底満足できる指数とは言えない。高炉にとってコークスの強度評価やCO<sub>2</sub>との反応性評価が重要との認識はあるものの、DIやCSRの試験法で評価するのが妥当であるか否かは十分に検討すべき課題である。

また製造工程の自動化の流れの中で、操業管理の自動化も例外ではなく、コークス品質評価試験法の自動化は重要課題である。コークス品質評価試験法の見直しは、コークス製造・高炉操業双方にとっての基本問題である。

## 6. おわりに

21世紀前半も高炉製鉄法が主流の座を継続することは間違いなく、基盤プロセスであるコークス製造技術にも強く変革が求められている。日本はすでに開発した連続式成型コークス製造法に加え、二つ目の選択肢として革新的コークス製造法の開発に着手した。解決すべき課題は山積しているが、これまでの歩みに自信をもって期待に応える次世代コークス製造技術が生み出されるものと確信する。

そして産学共同による基礎研究が、この技術開発を側面から支援し、21世紀のコークス工業の基盤をより強固なものにするであろう。

## 文 献

- 1) 滝沢 譲：鉄と鋼, 78 (1992), 969.
- 2) 西岡邦彦：第146回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, (1993), 55.
- 3) H.M.W.Delport: 2nd EIC Proc., Institute of Metals, (1991), 289.
- 4) K.Shiohara: 2nd EIC Proc., Institute of Metals, (1991), 310.
- 5) M.Tateoka: 2nd Inter. Cokemaking Cong. Proc., 2 (1991), 21.
- 6) 日本エネルギー学会誌, 日本エネルギー学会編, 74 (1995), 430.
- 7) コールジャーナル, 石炭利用技術センター編, 20 (1995), 7.
- 8) D.U.Prabhu and P.F.Cilione: Iron & Steel Eng.Jan., (1992), 33.
- 9) T.Okuhara, F.Izumiya, T.Matsuo and Y.Tawara: Proc. of 45th Ironmaking Cong., AIME, 45 (1986), 269.
- 10) 坂輪光弘：鉄と鋼, 80 (1995), 261.