

© 1988 ISIJ

技術報告

2 段フリュー式コークス乾式消火設備の
開発と操業中島龍一*・小西信明*・栗田富喜男*・松本和俊*
谷 義雄*・木村孝明*²・松田敏晴*³

The Development and Operation of Coke Dry Quenching with Double Flues

Ryuichi NAKAJIMA, Nobuaki KONISHI, Fukio KUWADA, Kazutoshi MATSUMOTO,
Yoshio TANI, Takaaki KIMURA and Toshiharu MATSUDA

Synopsis :

A latest CDQ has been installed at No. 4 coke oven in Fukuyama Works.

CDQ in Fukuyama has been designed on the basis of the operational experience gained over the years at Keihin Works. It is an effective facility which has a production rate of 110 t per h and incorporates with developed equipments such as a multi-stage flue, a rotating coke bucket and a multi-function turbine. The commercial operation was started in February, 1986. Since then, this CDQ facility has been operating successfully and contributing to energy savings in Fukuyama Works.

Key words: coke dry quenching; CDQ; multi-stage flue; double flues; rotating coke bucket; multi-function turbine; energy saving.

1. 緒 言

日本鋼管(株)のコークス乾式消火設備(以下 CDQ と略記)は、1976 年京浜製鉄所扇島(以下扇島と略記)のコークス工場スタート時に、製造されるコークスの全量を処理する目的でソ連から技術導入により建設されたのが最初である¹⁾²⁾。

扇島に第 1 期設備で設置した 5 基の CDQ は、稼働後約 11 年を経過し、第 2 期設備 3 基も約 8 年を経過している。この間、エネルギー価格の変動及び所内のエネルギーバランスの変動に対応すべく、種々の操業・設備改善を行ってきた。

一方、福山製鉄所(以下福山と略記)では 1986 年 2 月に扇島での長年の操業実績を踏まえ、高効率な大型 CDQ を第 4 コークス炉に設置した³⁾⁴⁾。福山 CDQ では効率化・経済性を考慮して、旋回バケット、多段フリューさらに高温高圧混圧抽気タービンを採用し、順調な稼働を継続している。

本報告では、福山 CDQ 設備の概要について述べる。

2. 設 備 概 要

本 CDQ の全景を Photo. 1 に示す。また CDQ 設備フローシートを Fig. 1 に、主要設備仕様を Table 1 に示す。

本設備の特徴は、次のとおりである。

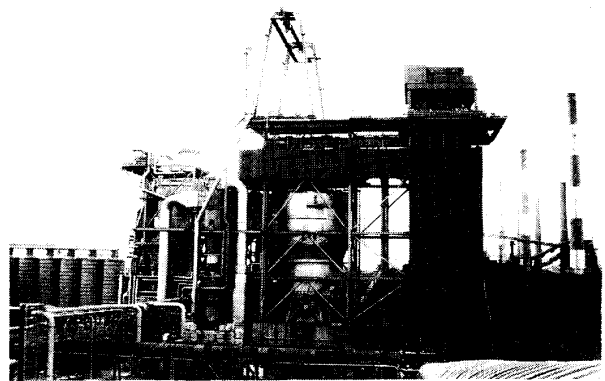


Photo. 1. General view of CDQ plant in Fukuyama.

昭和 61 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 62 年 5 月 18 日受付 (Received May 18, 1987)

* 日本鋼管(株)福山製鉄所 (Fukuyama Works, Nippon Kokan K. K., 1 Kokan-cho Fukuyama 721)

*² 日本鋼管(株)設備技術部 (Plant Construction and Engineering Dept., Nippon Kokan K. K.)

*³ 日本鋼管(株)製鉄エンジニアリング技術部 (Iron and Steel Industries Engineering Group, Nippon Kokan K. K.)

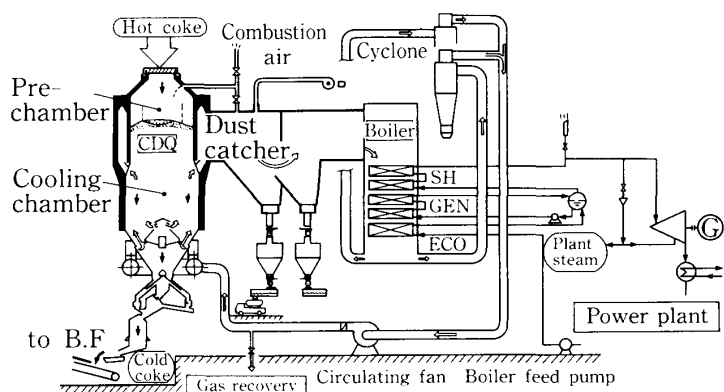


Fig. 1. Outline of CDQ plant in Fukuyama.

Table 1. Specifications of CDQ plant in Fukuyama.

Coke oven	Coke oven Oven type Chamber dimension Max. output	Fukuyama No. 4 coke oven Wilputte-Otto type (50+55) Ovens×6 500 H× 15 430 L×430 Wmm 3 240 t/h
CDQ	Coke quenching capacity Pre-chamber volume Cooling chamber volume Gas circulating fan Hoist Coke bucket volume	110 t/h 290 m ³ 435 m ³ 180 000 Nm ³ /h×900 mmAq× 1 150 kW 55.5 t×35 m 50 m ³
Boiler	Type Generating surface Steam recovery Steam	NKK-LAMONT forced circulation 2 486 m ² Max. 60 t/h 105 kg/cm ² ×540°C
Turbine	Type Power Steam capacity Generator	Impulse type mixed and extraction condensing turbine 25 500 kW HP. section 60 t/h LP. section 100 t/h 31 875 kVA
Others	Gas recovery Dust collector Pure water tank Condensation tank	10 000 Nm ³ /h (Electrostatic precipitator) 3 150 m ³ /h (Bag filter) 440 m ³ 200 m ³

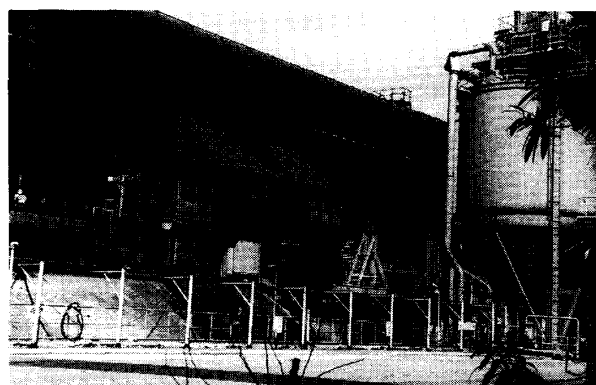


Photo. 2. View of coke bucket car.

- (1) 高温・高圧蒸気回収によるエネルギーの効率的利用。
 - (2) 赤熱コークスの運搬に、円形旋回バケットを採用。
 - (3) 炉内のガス道に2段フリューを採用。
 - (4) 低 H₂～高 H₂ 操業が可能。
- 以下に、これらについて説明する。

2.1 赤熱コークス輸送設備

CDQ 炉内でのコークスの偏析は、赤熱コークスのバケットへの受散状態、CDQ 炉内への投入状態によって大きく左右される。炉内で偏析が生じた時は、コークス冷却時のガス流れに偏流を起し、CDQ の冷却効果に悪影響を与え、コークス処理能力の低下に繋がる。

この偏析防止対策として、当 CDQ はコークス炉から赤熱コークスをバケットに受ける際に、バケットを旋回

させながら受け入れる旋回バケット方式を採用した。旋回バケットはコークス偏析防止の他にバケットの有効積載容量が増加できるため、バケットのコンパクト化が図られ、バケット重量の軽減が可能となった。

バケット台車と、旋回バケットの全景を Photo. 2 に示す。

2.2 多段フリュー

CDQ のコークス処理能力を大きく左右する要因の一つに、冷却ガスがコークスの冷却ゾーンを出て傾斜フリュー部に入るとき発生するコークスの吹上げ現象が挙げられる。この防止対策は、大型 CDQ 開発の最も重要な課題である。著者らはコークスの吹上げ機構を解明するため、実炉実験、フリュー部実寸と 1/4 モデル実験結果にもとづいて数値解析を行った。そしてそれらの解析結果を踏まえ、多段フリューを開発し、福山第 1 号機 CDQ に適用して好結果を得た。

2.2.1 フリュー内コークスの吹上げ機構

コークス吹上げ機構は、Fig. 2 に示すステップで進行する。

(第 1 段階)：正常時

コークス切出しに伴うプレチャンバーからクーリングチャンバーへのコークスの降下の際、傾斜フリュー部に

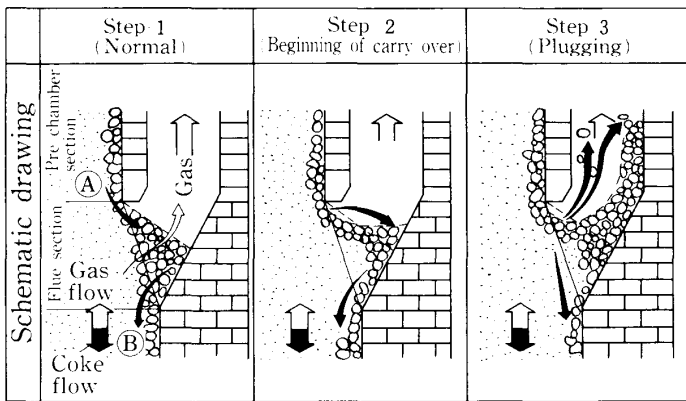


Fig. 2. Observed plugging phenomena of coke in flue.

においてコークスは安息角で決まる表面状態を形成し、この溜り部ではコークスの流出(B)と流入(A)がバランスを保っている。

(第2段階): 詰り始め

コークス処理量の増加に伴い、冷却用循環ガス量を増加させていくと、ついにはガス速度が塊の流動化速度に達し、傾斜フリュー頂部の塊が矢印のように転げ落ち、コークスの流出が不足しはじめ、裾部が点線のように上昇する。これは傾斜フリュー部のコークスの入出バランスがくずれ始める状態である。このようなフリューは円周上に多数配置されており、それぞれのガス配分は必ずしも均等に行われず、かつ切出しごとにも変動する。したがって、ガス流速の速いフリューがまず上記状態になる。

(第3段階): 詰り状態

第2段階の状態がさらに進み、ガス流れに対する抵抗が急激に増していくと、ガス流路が大幅に狭くなつてコークス塊を吹き上げ、ついにはフリューが閉塞状態となりCDQの運転が不能となる。

2・2・2 フリュー詰り防止手段

前述の詰り機構と、気体中の塊の終末速度式から判断したフリュー詰り防止手段としては、下記の2点が挙げられる。

(1)ソフト対応: 比通風量(循環ガス量/コークス処理量)の低減。

(2)ハード対応: フリューの多段化。

ここで、(1)のソフト対応は熱交換の面から決定されるため、著者らは(2)のハード対応を検討した。

2・2・3 ガス流速分布計算及びフリューの必要高さ

フリュー内に流入したコークスの表面から出るガス流速(空塔速度)を計算する。記号をFig. 3に示す。

[従来型(単孔式)]

充填層内のガス流速と抵抗の関係はERUGUNの式⁵⁾が代表的であるが、ガス流速の比較的大きい部分を取り扱

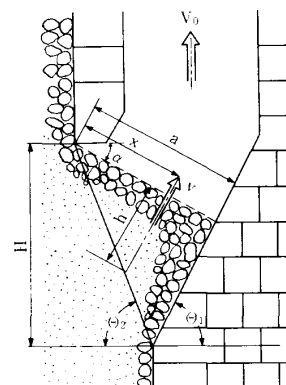


Fig. 3. Cross section of flue and notations used in the simulation model.

うことから簡単のため粘性の項を省略した次式を用いて流速分布を求める。

$$\Delta p = K \cdot h \cdot V^2 \quad K = \text{定数} \dots \dots \dots (1)$$

フリュー内の断面平均流速を V_0 とすると次式が成り立つ。

$$V_0 \cdot a = \int_0^a V \cdot dx \dots \dots \dots (2)$$

(1)式に $h = x \cdot \tan(\theta_2 - \alpha)$ を代入すると、

$$V = \sqrt{\frac{\Delta p}{K \cdot x \cdot \tan(\theta_2 - \alpha)}} \dots \dots \dots (3)$$

(2)、(3)式より任意の点 x におけるガス流速は、次式で与えられる。

$$V = \frac{V_0 \cdot \sqrt{a}}{2 \cdot \sqrt{x}} \dots \dots \dots (4)$$

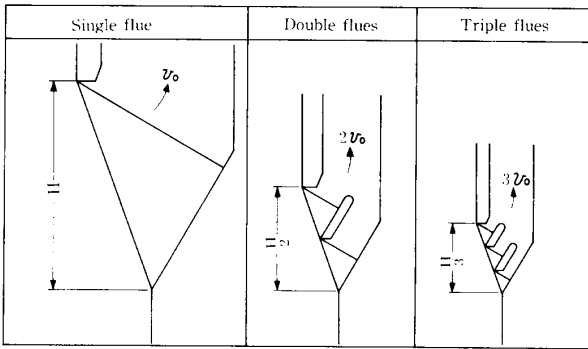


Fig. 4. Change of flue height of different flue types under condition of the same maximum blowing capacity.

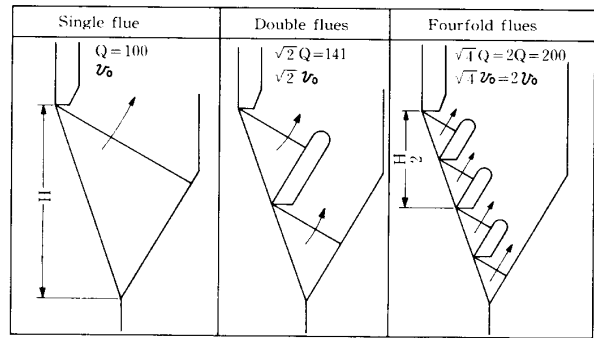


Fig. 6. Change of maximum blowing capacity of different flue types at the same flue height.

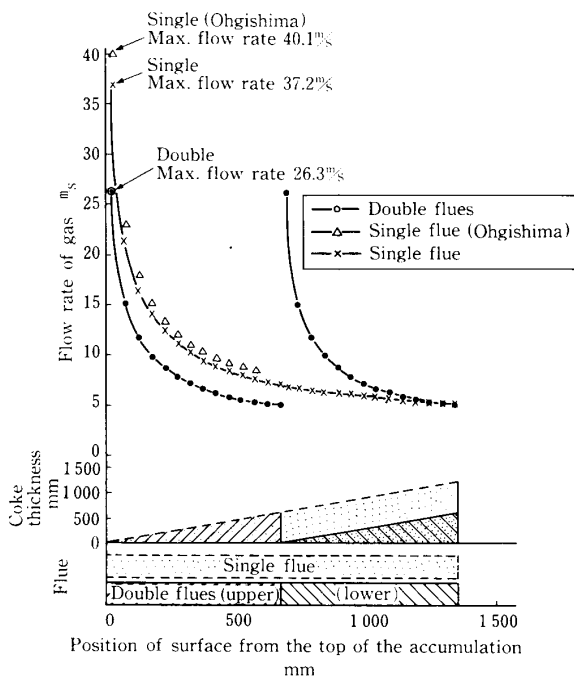


Fig. 5. Calculated flow rate of gas in each flue.

[多段式]

次に Fig. 4 のように中仕切り壁を入れた多段フリューについて同様な計算をすると、

$$\int_0^a V_s \cdot dx = n \int_0^{\frac{a}{n}} V_a \cdot dx \quad \dots\dots\dots (5)$$

故に

$$V_a = \frac{V_s}{n} \quad \dots\dots\dots (6)$$

またフリュー高さ H は、(4)、(6)式より

$$V = \frac{1}{2\sqrt{n}} \sqrt{\frac{a}{x}} V_0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$H = K \left(\frac{Q}{D} \right)^2 \cdot \frac{1}{V^2} \cdot \frac{1}{n} \quad \dots\dots\dots (8)$$

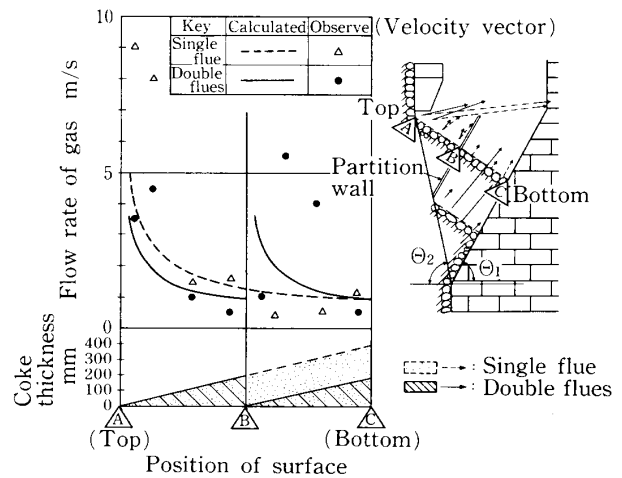


Fig. 7. Comparison of observed gas flow rate with calculated values.

となる。福山 CDQ について計算した結果を Fig. 5 に示す。

以上の結果、 n 段式のフリューの場合、ガス流速を従来の単孔式に比べ、 $\frac{1}{\sqrt{n}}$ に抑えることが可能である。すなわち吹上げ防止の観点から n 段式フリューは、Fig. 6 のように従来型の \sqrt{n} 倍の流速を流せることになり、等しい能力ならばフリュー高さを $\frac{1}{n}$ に低くすることができる。さらに前面角 θ_2 一定の場合には、フリューが低くなつた分だけプレチャンバ径を大きくできることから、同一プレチャンバ容量を確保して高さを低くできる。

2.2.4 $\frac{1}{4}$ コールドモデル実験

上記の関係を実証するため、フリュー部 $\frac{1}{4}$ のモデル実験を行い、次の結果を得た。

(1) Fig. 7 に示すように、フリューのコークス溜り部を通過するガス流速分布は極端に不均一で、その頂部に発生する高速ガス流れがコークスの吹上げの主因である。

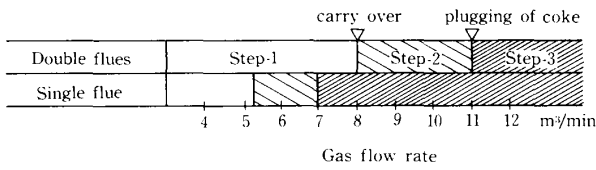


Fig. 8. Comparison of gas flow rate on coke plugging at each flue type.

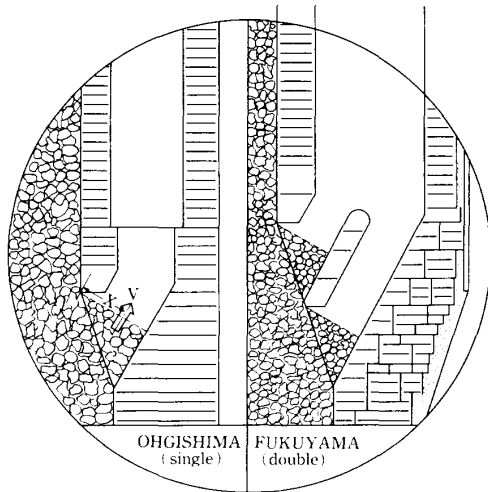


Fig. 9. Cross sections of single flue in Ohgishima and double flues in Fukuyama.

(2)フリューに流入したコークスが確実に荷下りすることも(1)とは独立の必要条件である。そのためには、後面角 θ_1 、前面角 θ_2 およびフリュー幅の選定が重要である。

(3)2段フリューの最大流速は、1段(従来型)に比べ約70%に低下し、吹上げ限界能力はFig. 8に示すように約40%以上向上した。

2.2.5 実炉への適用

本CDQで採用した2段フリューと扇島CDQの従来型フリューとの比較をFig. 9に示す。実炉での2段フリュー効果については、傾斜フリュー部に覗孔を設け、130 t/h 切出し時にコークス流れを観察し、吹上げ傾向は全く見られず十分効果のあることを確認した。また、1年後の開放点検でも傾斜フリューの詰りはなく、煙道にはコークス粒は皆無で極めて清浄な状態であった。多段フリューの副次的効果としては、操業の安定化、コンパクトなCDQの設計が可能となり、設備費・操業コストの低減に反映できる点が挙げられる。

2.3 ガス循環設備

水素濃度コントロール手段には、純窒素の添加による希釈と空気吹込みによる燃焼希釈があり、現在は後者の方法を優先的に実施している。また、製鉄所内のエネルギーバランスに柔軟に対応できるように、低 ($H_2 < 5\%$

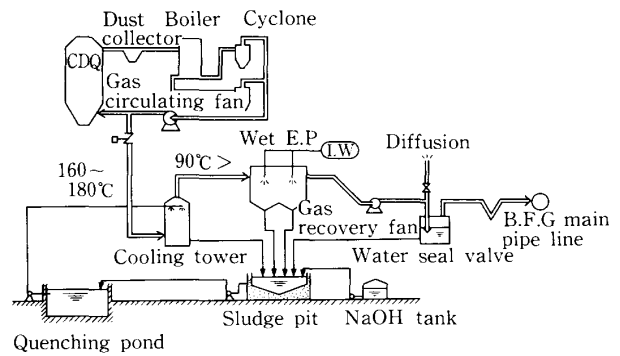


Fig. 10. Outline of gas recovery part.

: 蒸気発生量大)~高 ($H_2 > 15\%$: 蒸気発生量小) 水素濃度操業が選択できるように設計している。

CDQの運転において、循環ガス量は比通風量一定操業を原則として決め、設備に大きな変動を与えないように考慮している。このため、コークスの処理量に応じて循環ガス量を変更するが、当設備は省エネルギーの観点からプロワー回転数制御を採用している。

また、循環ガス中のダストは、ウェット、ドライのいずれの状態でも処理できるように、切出し部に加湿機を備えている。

2.4 ガス回収設備

本CDQの、循環系から抜き出された余剰ガスは、Bガスと同等のカロリーを有していることより、Fig. 10に示すように冷却・除塵後、所内のBガス本管に導入して有効利用を図っている。

除塵には、集塵効率、圧力損失及びメンテナンスの面から湿式電気集塵機を採用した。

2.5 ボイラー及びタービン設備

ボイラーはタービン効率を考慮して、高温 ($540^\circ C$)、高圧 (105 kg/cm^2) 仕様の強制循環式ボイラーを採用した。またタービンについては、CDQからの高圧蒸気の処理とともに、所内の余剰低圧蒸気の利用も考慮し、さらに所内蒸気不足時には抽気による低圧蒸気の供給ができるような衝動式混圧・抽気・復水型タービンを設置し、所内のエネルギー需給調整に幅広く対応できる設備とした。

3. 操 業

3.1 操業実績

福山第1号機である本CDQは、1986年2月5日にホットランを行い、以後初期故障によるトラブルが若干発生したものの操業はFig. 11に示すように順調であった。また、1986年10月からは、コークス処理量を増加して最大処理体制を確立し、合理化に寄与している。

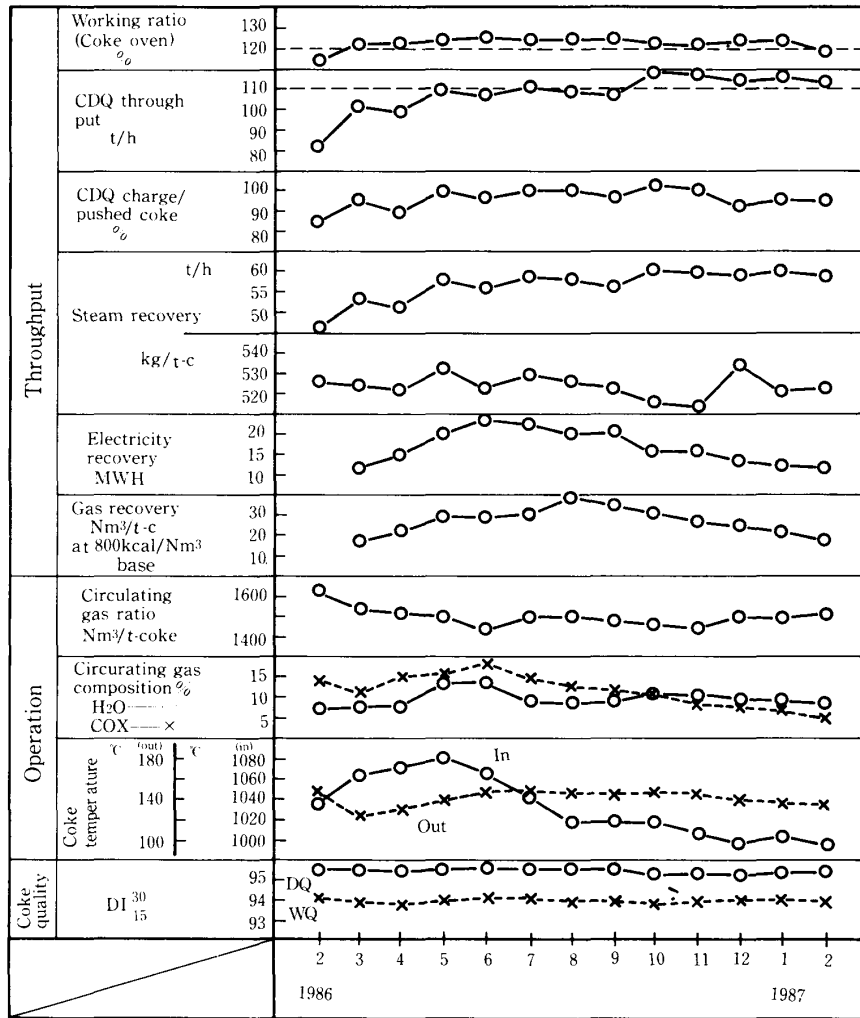


Fig. 11. Operation results of CDQ in Fukuyama.

3・2 蒸気回収量

ボイラーはスタート当初から、最大処理量 60 t/h 付近で運転している。蒸気発生量については、操業解析により次の推定式を得ている。

$$[\text{蒸気発生量 (t/h)}] = 0.309 \times [\text{コークス切出し量 (t/h)}] + 0.114 \times 10^{-3} \times [\text{循環風量 (Nm}^3\text{/h)}] + 1.227 \times 10^{-3} \times [\text{Air 吹込み量 (Nm}^3\text{/h)}] + 0.037 \times [\text{装入コークス温度 (}^\circ\text{C)}] - 39.081 \dots (10)$$

$n=55, R=0.933, \sigma_e=0.24$

現在、蒸気発生量の操業上でのコントロールは、コークス切出し量をほぼ一定に保ちながら循環風量の増減で対処している。しかし、応答性の面から短時間のアクションでは、Air 吹込み量の増減を優先させている。

3・3 ガス回収量

CDQ の炉内圧力コントロールは、炉頂圧力を一定に保つように循環ガスの抜き出し量を自動調整している。

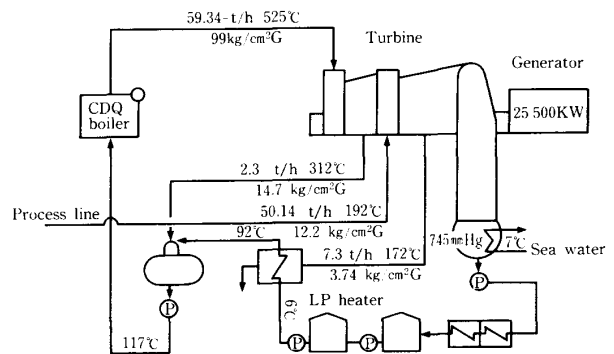


Fig. 12. Estimated heat balance of CDQ operation.

ガス回収量は、コークス炉の操業条件（火落時間、置時間等）や CDQ の運転条件により大きく左右される。

3・4 CDQ の熱効率

CDQ の熱効率については次式のように定義している

が、スタート当初から約 86% を達成しており、熱回収性能の高い設備であることがわかる。

$$[\text{熱効率 (\%)}] = \frac{[\text{高圧蒸気潜} \cdot \text{顕熱}] - [\text{給水顕熱}]}{[\text{投入コークス顕熱}] + [\text{コークス燃焼熱}] + [\text{発生ガス燃焼熱}]} \times 100 \dots\dots\dots(11)$$

3.5 タービン発電出力及び制御性能

定格出力 25 500 kW 時のヒートバランスを Fig. 12 に示すが、タービンプラントの熱効率は 29% と計画値を上まわっている。また、タービン蒸気消費率も以下のとおり良好な値を示している。

タービン蒸気消費率 (kg/kWh)

負荷比	4/4	2/4
計画値	2.19	4.39
実測値	2.16	4.26

Fig. 13 に示すように、プロセス蒸気圧力変動に対し抽気・混気追従によりプロセス蒸気ラインの制御性も良好に推移しており、系統圧力の安定性も向上した。

3.6 コークス品質改善効果

CDQ 処理コークスの品質改善効果⁶⁾⁷⁾として、コークス冷間強度の向上があり、それは機械的強度向上と基質強度向上の二つに分けて考えられる。この品質改善効果は石炭配合上の品位低減に反映させることができ、より安価なコークス製造に寄与することができる。

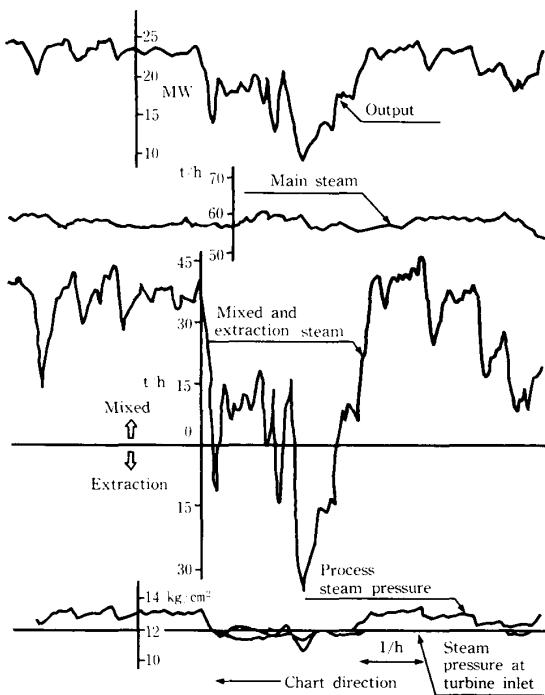


Fig. 13. Operation results of CDQ turbine.

Fig. 14 に示すように、コークス強度は高炉への送骸過程で強度が上昇するが、操業解析の結果、CDQ 下のコークスは湿式消火されたワーフ前コークスと比較して、強度 (DI_{15}^{30}) が次のように向上すると結論された。

機械的強度向上	+1.25
基質強度向上	+0.75
計	+2.00

3.7 低強度コークスの高炉操業への影響

CDQ コークス強度の評価試験結果より、CDQ コークスは従来の湿式消火コークスに比べて $DI_{15}^{30} = +0.75$

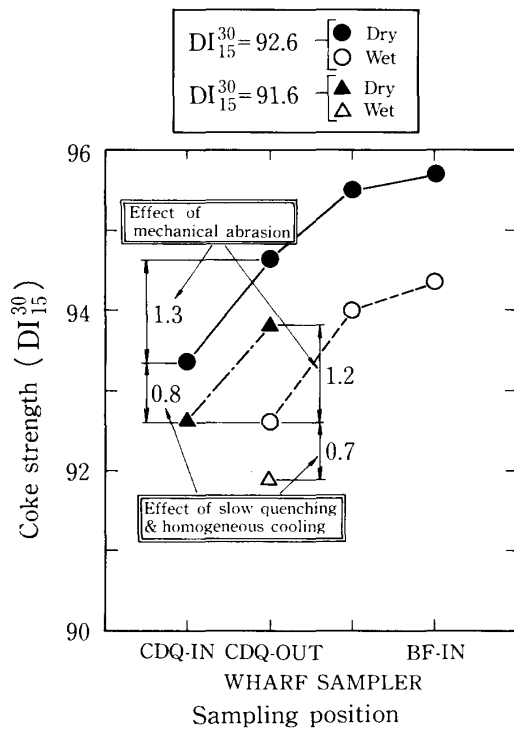


Fig. 14. Improvement of coke strength by dry quenching.

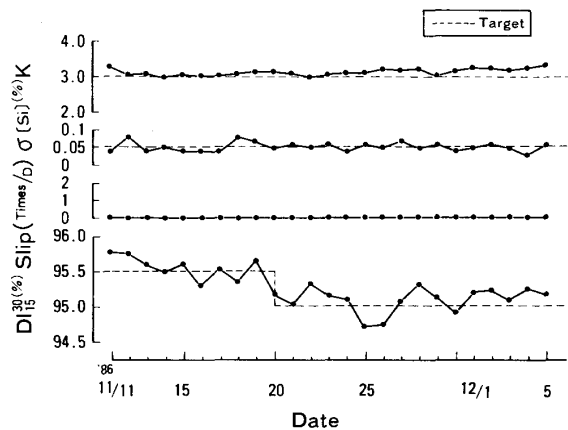


Fig. 15. Operating results in Fukuyama No. 2 BF.

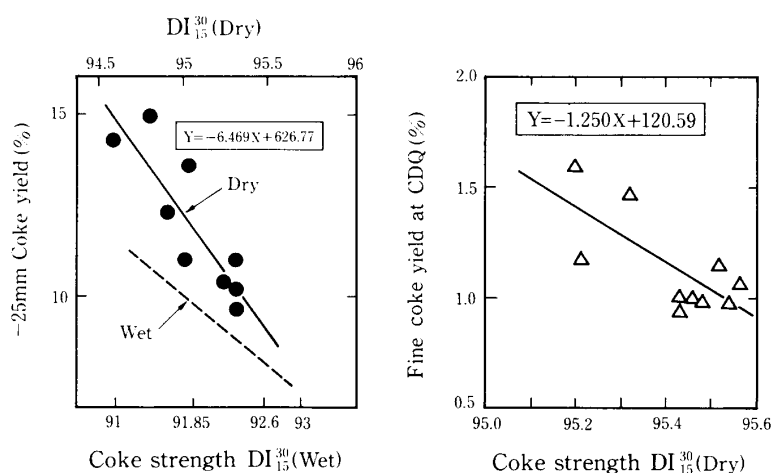


Fig. 16. Relation between coke strength to yield of coke under 25 mm and fine coke.

の向上効果を有することがわかった。

そこで、1986年11月末から約2か月間、コークス強度を DI_{15}^{30} : 95.5 から 95.0 に順次低下し、高炉使用確認試験 (CDQ コークス 40% 使用) を実施した。Fig. 15 に示すように、コークス強度の低下に伴い、高炉の通気抵抗係数 K 値は若干上昇したが、溶鉄の $\sigma[\text{Si}]$ には特に変化は見られなかった。またスリップ回数は試験期間中を通して0であった。以上のことから、今回のコークス強度低下の範囲では、高炉操業に大きな影響はなかったと判断している。

一方、CDQ では Fig. 16 に示すように、コークス強度低下につれ、25 mm 以下の粉コークス及び CDQ 内の微粉コークスの割合が上昇した。

これらを総合的に考慮した結果、原料炭コスト低減メリットがコークス粉率上昇によるデメリットを上回ることが明白になったため、将来原料炭需給を勘案した上で、コークス強度を低下する操業を指向する予定である。

5. 結 言

福山第1号機の大型 CDQ を設置するにあたり、旋回バケット、2段フリューの開発を行い設備化した。

CDQ 稼働後は、その機能を十分に発揮して操業の安定化に寄与している。

現在、本 CDQ は当初計画の仕様を満足し、所内の発生蒸気バランスの調整役としての機能も果たし、さらに高炉操業の安定化に寄与しながら順調な操業を継続中である。

今後は経済効果を高めるため、コストミニマム操業を目指すとともに、次号機に向けてさらに簡素で高効率な CDQ の設計指針を確立する所存である。

文 献

- 1) 伊沢哲夫, 岡田 豊, 藤村武生, 大橋 茂: 日本鋼管技報, **76** (1978), p. 1
- 2) 森 高, 藤村武生, 佐藤誠一郎: 鉄と鋼, **64** (1978), p. 1914
- 3) 中島龍一, 小西信明, 栗田富喜男, 水沢正敏, 松本和俊: 燃料協会コークス部会第 81 回コークス特別会研究発表要旨集 (1986年10月), p. 23
- 4) 中島龍一, 小西信明, 栗田富喜男, 谷 義雄, 木村孝明, 松田敏晴: 日本鋼管技報, **115** (1986), p. 48
- 5) S. ERGUN: Chem. Eng. Progr., **48** (1952), p. 89
- 6) 美浦義明, 原口 博, 西 徹, 古牧育男, 小串嘉宏: 鉄と鋼, **66** (1980), p. 1277
- 7) 宮川亜夫, 伊藤俊治: 川崎製鉄技報, **15** (1983), p. 177