

燃焼等価方式による混合ガス供給技術 Supply System of Mixed Gases by the Use of Combustion Equivalent Method

山 元 深*
Fukashi Yamamoto

篠 原 虔 章**
Yoshiaki Shinohara

大 場 秀 昭***
Hideaki Oba

石 田 七 雄****
Nanao Ishida

深 野 照 雄*****
Teruo Fukano

石 川 俊 幸*****
Toshiyuki Ishikawa

Synopsis:

As a part of the energy saving activities at Kawasaki Steel's Mizushima Works, a mixed gas supply system based on the combustion equivalent (i.e. A₀I equivalent) method, has been established in order to make effective use of by-product gases, especially LD-gas.

In the system based on the A₀I equivalent method, many kinds of by-product gases are mixed and supplied with the values of $A_0/\sqrt{\gamma}$ of the mixed gases made to be equal. A₀ is the theoretical combustion air quantity and γ is the gas density. By applying this system the mixed gases can be burnt with the highest efficiency without changing the air ratio, even if the mixing ratios of the mixed gases are changed. Adoption of this system increases the recovered quantity of LD-gas by about 15% and greatly serves to make the supply and demand adjustment of the by-product gases run more smoothly.

This paper describes the changes made in the mixed gas supply equipment in the Works and the basic concept of the mixed gas supply system based on the A₀I equivalent method.

1. 緒 言

一貫製鉄所における省エネルギー活動の基本は、製造プロセスから発生する多量の副生ガスをいかに有効活用するかにかかっている。

水島製鉄所で発生する副生ガスは、高炉ガス(Bガス)、コークス炉ガス(Cガス)、転炉ガス(LDガス)があり、すべて燃料として使用している。

なかでもここ数年、省エネルギーの重要テーマとして、LDガスの回収量向上のための対策を逐次進めてきた。当所では建設当初よりLDガスを、

主に分塊均熱炉に供給していたが、分塊均熱炉での省エネルギー対策、連铸比率の増大などにより使用負荷が年々減少してきたため、LDガスの使用先拡大に迫られていた。この対策として、当社独自の混合ガス(Mガス)供給技術である燃焼等価(A₀I等価)方式を採用したMガス供給設備が、昭和55年8月に完成した。

本方式の採用により、LDガスの回収量は従来の約15%の増加をもたらし、エネルギーコストの低減に大きく貢献している。さらに燃料ガス需給調整の円滑化に大きな効果を上げている。

以下に当所におけるMガス供給設備の変遷、

* 水島製鉄所動力部部长
*** 水島製鉄所動力部動力技術室主査(課長補)
***** 水島製鉄所企画部企画室主査(課長補)
〔昭和57年7月21日原稿受付〕

** 水島製鉄所動力部動力技術室主査(部長補)
**** 水島製鉄所動力部動力技術室主査(掛長)
***** 水島製鉄所システム部制御技術室

A₀I等価の理論，Mガス混合制御機能の概要などを中心に報告する。

2. Mガス供給設備の変遷

当所のMガス供給設備は，圧延設備の増強に伴ない幾多の増設・改造を行ってきた。

設備計画の基本思想は，副生ガスの特性を生かし，設備に適合した燃料ガスを供給することであり，当所では燃焼効率の良いLDガスを優先的に圧延加熱炉に供給する方針とした。副生ガスの特性の一例をTable 1に示すが，LDガスの燃焼効率はCガスに次いで高い。

一方，公害規制の強化による低硫黄燃料の導入，また，第一次，第二次石油危機を契機とした石油系燃料の削減など，エネルギー情勢の変化にも対応してMガス供給を行ってきた。

Fig. 1に，A₀I等価方式採用の前後におけるMガス供給系統を示す。

ここで，過去10年間にわたるMガス供給設備の変遷について概説する。

昭和47年当時：Mガス供給設備は，M23G系(COG+BFG, 2 300kcal/Nm³)と，M20G系(COG+BFG, 2 000kcal/Nm³)の2系統を有し，LDガスは単独でM20G系に混入していた。この段階ではガスバランス上，Mガスが不足しており，重油が多く使用されていた。

昭和48年～52年：公害規制を受け低硫黄燃料であるLPG(ブタン)の導入を行う。LPGはFig. 1(a)に示すようにBガスと混合し，M30G(LPG+BFG, 3 000kcal/Nm³)として，大形および厚板工場に供給していた。したがって，Mガス供給系統は，M23G系，M20G系，M30G系の3系統であった。なお，M30Gは，燃焼に際して生成する窒

素氧化物(NO_x)が極めて少なく，(重油燃焼時の20～30%) NO_x対策にも効果を上げた。

昭和53年：連铸比率の向上および分塊均熱炉の省エネルギーに伴ない，M20G系の使用量が減少しLDガスの使用量が激減した。この対策として，LDガスの1部をCガスと混合しM26G(COG+LDG, 2 600kcal/Nm³)としてM23G系に混入した。ここで初めてA₀I等価方式を採用した。

また，M30Gも，M23GとA₀I等価にすべく，LPGとBガスの混合比率を変更しM27GとしてM23G系に混入する。

昭和55年8月：各設備における省エネルギーの推進，LDガス回収技術の向上，脱石油化の進展などにより，Mガス供給設備は，大幅に改善され，LDガスは全量をM26G化して，すべてがA₀I等価方式による新しいMガス供給システムが完成した。

Mガス供給系統は，Fig. 1(b)に示すように簡素化され，また，設備的には，ガスブロワの統合・計装設備の刷新，ならびにプロセスコンピュータの導入などが行われた。

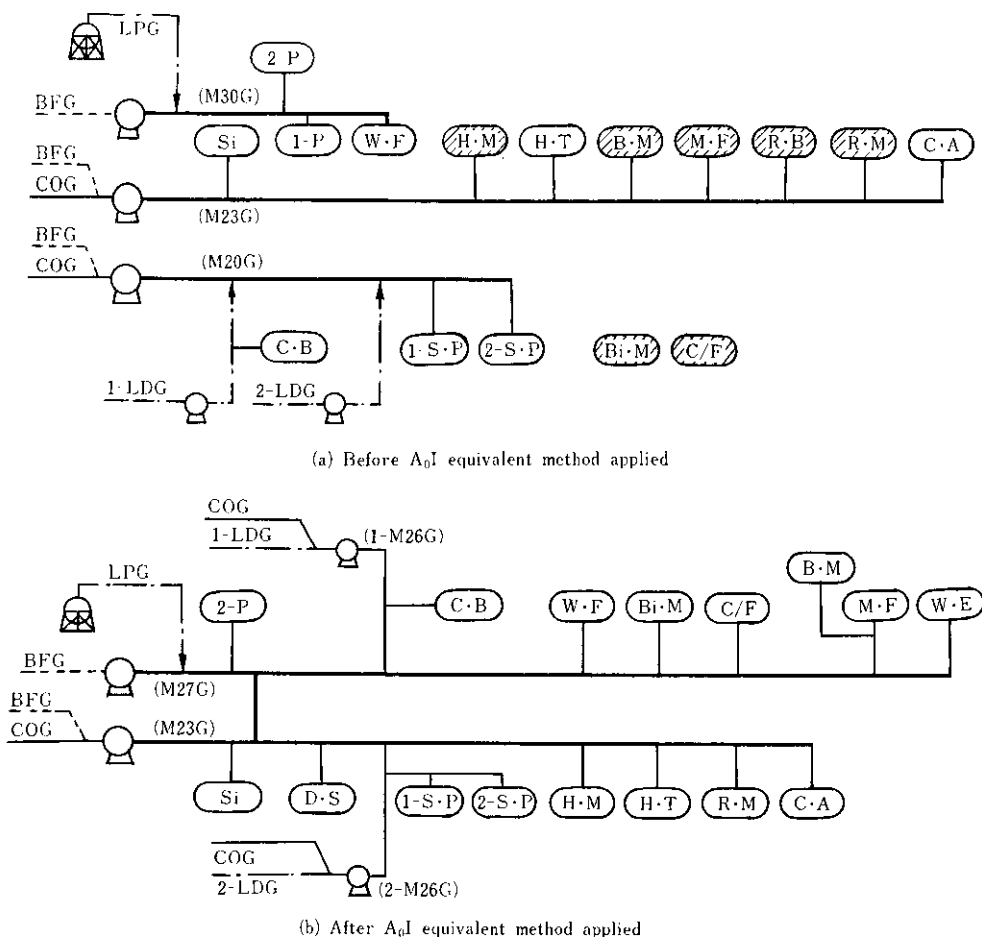
Fig. 2に，圧延部門の燃料バランスの変遷を示す。圧延部門のオイルレス化は，昭和55年秋に達成した。

3. A₀I等価方式

一般にLDガスは，発生が間欠的であり，かつ，性状変化が大きいため利用方法がむずかしく，発電ボイラなどで使用する例が多い。しかし，当所では，燃焼効率の高いLDガスは圧延加熱炉などで使用して，製鉄所全体として副生ガスを効果的に利用する技術を検討してきた。そして開発されたのが，A₀I等価方式によるMガス供給技術である。

Table 1 Characteristics of by-product gases in iron and steel making

	BFG	COG	LDG	C-Oil
Calorific value (kcal/Nm ³ , kg)	720	4 600	1 940	10 420
Theoretical combustion air quantity (Nm ³ /10 ³ kcal)	0.802	1.025	0.784	1.046
Theoretical combustion waste gas quantity (Nm ³ /10 ³ kcal)	2.018	0.911	1.123	1.110
Theoretical combustion waste gas temperature (°C)	1 257	2 153	2 030	2 250
Theoretical combustion efficiency (C-Oil: 100) (%)	88	99	98	100



◼ : Oil combustion furnace

2 P	No. 2 plate mill	Bi·M	Billet mill
Si	Sinter plant	H·T	Heat treatment furnace
1-S·P	No. 1 soaking pit	B·M	Bar mill
2-S·P	No. 2 soaking pit	M·F	Medium-flange beam mill
C·B	Central boiler	W·E	Welding electrode plant
D·S	Exhaust gas desulfurization plant	C/F	Casting/Forging shop
H·M	Hot strip mill	R·B	Rolling boiler
R·M	Rod mill	C·A	Cold annealing furnace
W·F	Wide-flange beam mill	1-P	No. 1 plate mill

Fig. 1 Schematic diagram of supply of mixed gases

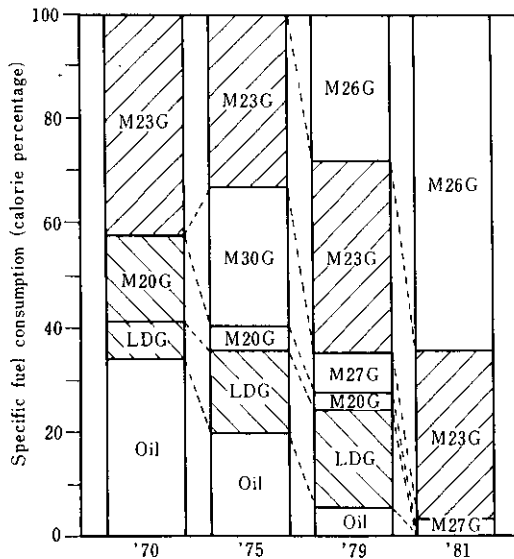


Fig. 2 History of use of fuel gases in rolling section

3・1 A_0I 等価方式の理論

A_0I 等価方式の特徴は、「差圧式流量計を用いた燃焼制御系において、2種類以上のMガスを同一燃焼装置で燃焼させる場合、各Mガスの A_0I ($A_0/\sqrt{\gamma}$, A_0 :理論空気量, γ :ガス密度)を等しくすることによって燃焼中の空気比は常に一定に保たれる」ことである。

すなわち、(1)式を満足した各Mガスならば、混合状態が変化しても燃焼は設定空気比のもとで最適燃焼状態を維持することができる。

$$\frac{A_{0X}}{\sqrt{\gamma_X}} = \frac{A_{0Y}}{\sqrt{\gamma_Y}} \quad (1)$$

ここで x, y はMガスの種類を示す添字である

Fig. 3に差圧式流量計を用いた、一般的な燃焼制御フローを示す。図において、オリフィス、調節弁などの計測機器は、Xガスを基準に設計されているものとする。今、設計基準ガス(Xガス)が流れているとすれば、ガス流量、燃焼空気流量は、(2)、(3)式によって示される。

$$F_{gX} = K \cdot \sqrt{\frac{h}{\gamma_X}} \quad (2)$$

$$F_{aX} = m \cdot A_{0X} \cdot F_{gX} \quad (3)$$

F_g : ガス流量

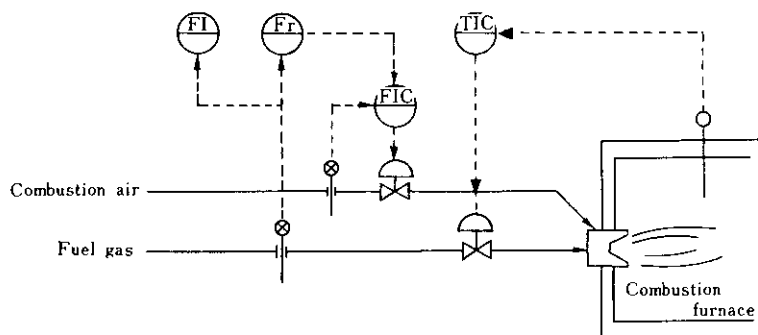
h : オリフィス差圧

F_a : 燃焼空気流量

m : 空気比

K : オリフィス設計定数

次に、設計基準ガスとは異なるYガスが流れたとき、オリフィス差圧を h とするならば、見掛けのガス流量は F_{gX} であるが、Yガスの真流量(F_{gY})および、必要な燃焼空気流量(F_{aY})は、それぞれ(4)、(5)式で表わされる。



	Theoretical combustion air quantity	Density
X gas	A_{0X} , Nm^3/Nm^3	γ_X kg/Nm^3
Y gas	A_{0Y}	γ_Y

Fig. 3 Schematic flow diagram of combustion control

$$F_{gY} = \sqrt{\frac{\gamma_X}{\gamma_Y}} \cdot F_{gX} \quad (4)$$

$$F_{aY} = m \cdot A_{0Y} \cdot F_{gY} \quad (5)$$

一方、X、YガスがA₀I等価であれば前述した(1)式の条件が成り立つので、この条件を(2)～(5)式に代入すると次の(6)、(7)式が導かれる。

$$F_{aY} = m \cdot A_{0X} \cdot F_{gY} \quad (6)$$

$$\therefore F_{aY} = F_{aX} \quad (7)$$

すなわち、実際に流れている燃焼空気流量は、Yガスが必要とする燃焼空気流量に等しいことを示している。ゆえに、X、YガスのA₀Iが等しいならばガス種類に関係なく常に一定の空気比で燃焼できることを証明している。

3.2 Wobbe指数(W・I)等価方式との比較

W・Iは、燃焼装置に対する入熱量の指数として用いられている基礎的な値で、(8)式¹⁾により示される。

$$W \cdot I = \frac{H}{\sqrt{\gamma}} \quad (8)$$

H：ガス発熱量

γ：ガス密度

このW・I等価方式は、差圧式流量計で性状の異なるガスを計量する場合、各ガスのW・Iを等しくすることにより、熱量を正しく計量できることが特徴である。しかし欠点は、ガスの性状変化によ

り、燃焼時の空気比が変化するため、燃焼損失が増大することである。Table 2にA₀I等価方式との違いについて計算例を示す。表よりW・I等価方式は熱量管理が主体であるのに対し、A₀I等価方式は燃焼管理を主体としていることがわかる。Fig. 4は両者の考え方を概念的に比較している。

つぎに、A₀I誤差が燃焼に与える影響(ガスカロリーおよび排ガスO₂%)を、Fig. 5に示す。

本設備の設計にあたっては、A₀I制御の目標精度を、1.5%以内とした。この目標精度は、燃焼排ガス中O₂%の変化にして、約±0.3%に相当する。

Fig. 6は当所で使用している燃料ガスの各組合せにおける混合比率とA₀Iの関係である。図中、M23G (COG+BFG)、M26G (COG+LDG)、M27G (LPG+BFG)が、現在A₀I等価ガスとして、圧延加熱炉、熱処理炉などに使用されている。

4. Mガス混合制御機能

Mガス供給設備には、A₀I等価方式の円滑な運用とMガスの安定供給を図るため、以下の制御機能を具備している。Fig. 7にMガス混合制御フローを示す。

4.1 A₀I制御

A₀I制御は、上位計算機にてA₀I制御演算を行い、

Table 2 Comparison of A₀I and W・I equivalent method

Basic gas	Mixing ratio*1	H (kcal/Nm ³)	γ (kg/Nm ³)	A ₀ (Nm ³ /Nm ³)	W・I	A ₀ I
M23G	0.5874	2 278	0.99086	2.2338	2 288.5	2.244

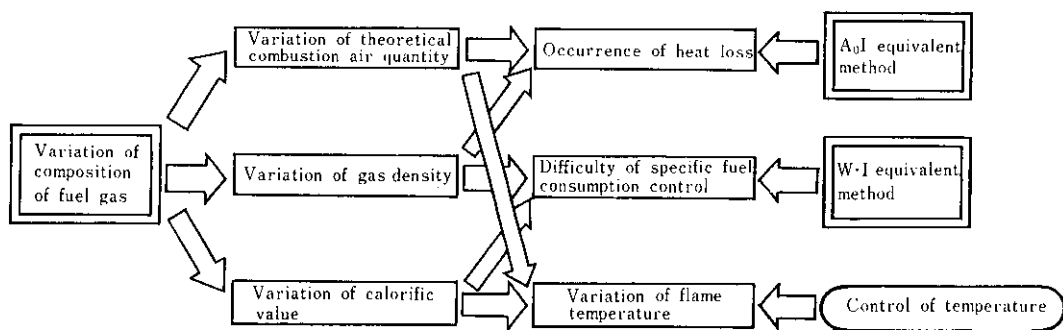
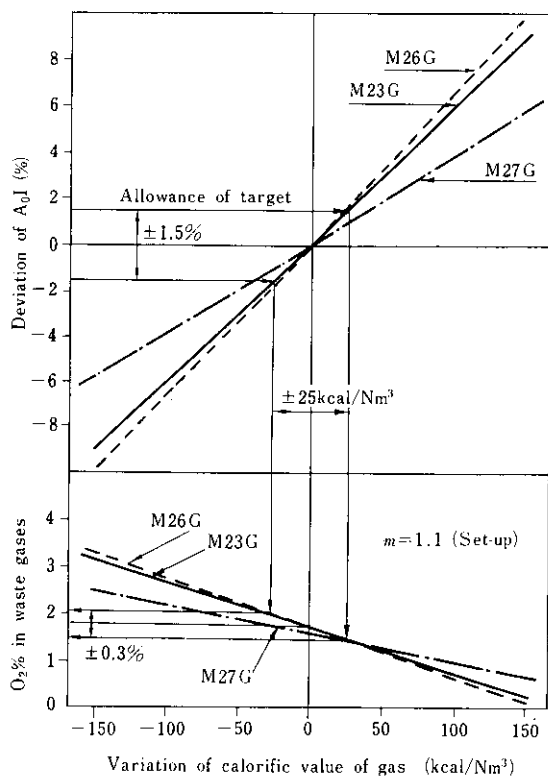
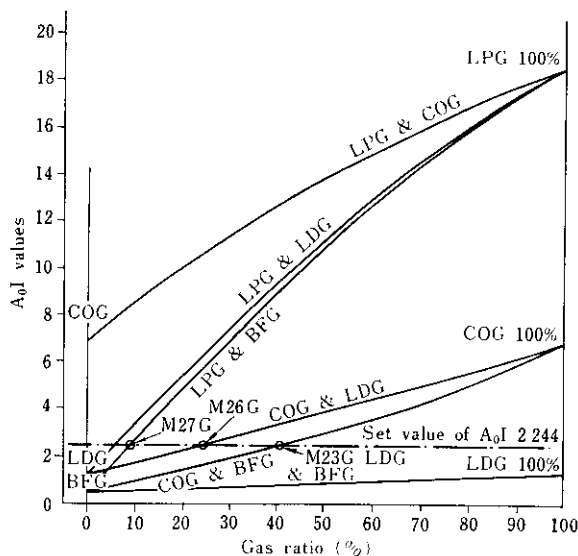
Mixed gas	System	Mixed ratio*1	H(kcal/Nm ³)	γ(kg/Nm ³)	A ₀ (Nm ³ /Nm ³)	Errors in		
						Flow rate*2 (%)	Combustion*3 heat (%)	Air quantity*4 (%)
M27G (LPG+BFG)	W・I	0.9248	2 762	1.4563	2.7826	+21.2	0	-2.7
	A ₀ I	0.9274	2 691	1.4532	2.7058	+21.1	+2.5	0
M26G (COG+LDG)	W・I	0.7293	2 423	1.1211	2.1926	+6.4	0	-8.4
	A ₀ I	0.6859	2 544	1.0814	2.3335	+4.5	-6.5	0

*1 Mixing ratio M27G: BFG/(LPG+BFG), M26G: LDG/(COG+LDG), M23G: BFG/(COG+BFG)

*2 Errors in flow rate [(Apparent flow rate-Real flow rate)/Real flow rate]×100

*3 Errors in combustion heat [(Apparent combustion heat-Real combustion heat)/Real combustion heat]×100

*4 Errors in air quantity [(Observed air quantity-Air quantity required)/Air quantity required]×100

Fig. 4 Difference of A_0I and W-I systems (concept)Fig. 5 Effect of A_0I value on calorific values of gases and on combustionFig. 6 Relation between A_0I value and gas mixing ratio

下位のワンループコントローラ²⁾へ比率設定値を出力する方式をとっている。

比率制御には、可変オリフィス³⁾による差圧比率制御と、標準オリフィスによる流量比率制御の2系統がある。前者は低流量域における混合比率精度が高く、広範囲の制御が可能である。また、後

者はバックアップ用である。

A_0I 制御演算は、Mガス分析計(プロセスガスクロマトグラフ)によるフィードバック(F・B)制御と、LDガス、またはCガスの単味ガス分析計によるフィードフォワード(F・F)制御を組合せて行っている。

流量比率設定値 $S(t_1)$ は、(9)式により求めている。標準オリフィスによる制御の場合は、 $S(t_1)$ がそのまま設定値となるが、可変オリフィスによる制御の場合は、さらに二乗演算して差圧比率設定値に変換している。

$$S(t_1) = S(t_0) + \Delta S_B(t_1) + \Delta S_F(t_1) \cdots \cdots (9)$$

$S(t_0)$: 流量比率設定前回値

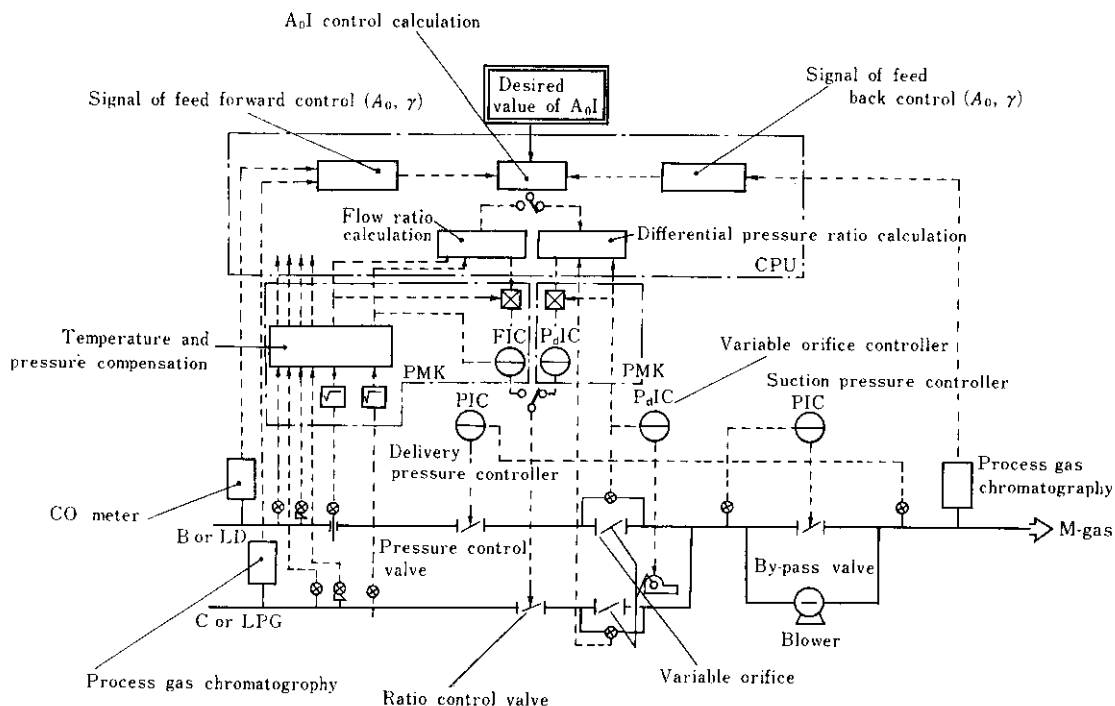


Fig. 7 Flow diagram of M-gas mixing control system

$\Delta S_B(t_1)$: F・B制御演算による補正值

$\Delta S_F(t_1)$: F・F制御演算による補正值

F・B制御演算は、2分周期で上下限チェック、不感帯付PI演算により $\Delta S_B(t_1)$ を算出している。また、F・F制御演算は30秒周期で単味ガスの組成変動と流量変動を考慮して $\Delta S_F(t_1)$ を算出している。

4・2 圧力制御

圧力制御には、吐出圧力制御と吸込圧力制御がある。吐出圧力は、各Mガス供給設備側で単独に制御されるが、負荷変動（圧力変動）に対する系全体の圧力制御は、M23Gの吐出圧力制御系で行っている。また、吸込圧力制御は、ブロワ吸込側からの空気侵入を防止するためのものである。

5. 熱量管理

A_0I 等価方式を採用するにあたっての問題点は、3・2で述べたように、使用側の流量、および熱量計測に誤差を伴ない、熱量原単位管理に支障をき

たすことである。

この問題を解決するために、プロセスコンピュータによりオンラインでMガス潮流仕訳計算を行い、熱量管理の精度向上を図っている。

正確な潮流計算を行うためには、本来、管内のガス流速、ならびに混合比率をリアルタイムに演算する方法が望ましいが、コンピュータの大容量化、ソフトウェアの開発負荷が大きいなどの問題があり、最終的に、配管長を無視した非連続的な潮流仕訳計算手法を採用した。

潮流計算の基本ロジックは、Mガス配管系を、Fig. 8のようにモデル化し、Mガスの供給側、使用側の流量より、その時点の潮流を判別し計測点での各Mガス混合比率を求める。次に、この比率よりMガスの密度および発熱量を計算し、流量の密度補正および熱量演算を行う。

6. 運転結果

6・1 A_0I 制御の精度

Fig. 9にM26G系の A_0I 制御実績例を示す。手

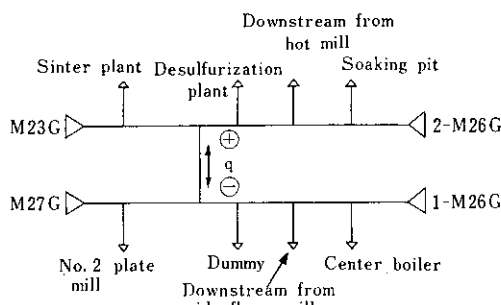


Fig. 8 Schematic diagram of mixed gas supply system

動（流量比率一定）の場合，流量変化，LDガスの組成変化（理論空気量変化）の影響を受け， A_0I 値が設定値から外れたまま運転されている。一方，自動の場合は前述の影響を受けているものの， A_0I 制御不感帯領域を若干逸脱している程度で良好に制御されている。目標精度の $\pm 1.5\%$ は，概ね達成されている。

6・2 Mガス負荷変動制御

LDガスの間欠的発生は，Mガス系のガスバランスを大きく変化させる。通常運用におけるMガス供給バランスをPhoto. 1に示すが，M26Gのガ

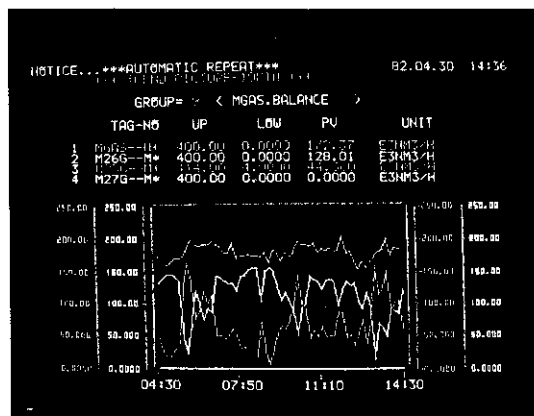


Photo. 1 Trends of supply of mixed gases

ス流量変化は， $10 \times 10^3 \sim 65 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{h}/\text{min}$ である。この変化に対し，Mガス系の圧力変動を抑えるためには，各Mガス制御系の追従性が良好でなければならない。Fig. 10はM23G制御系の負荷変動追従状況を示したもので， $63 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{h}/\text{min}$ の流量変化に対し，瞬時の圧力変化は， $60 \text{ mmH}_2\text{O}$ （約5%）以内であり良好に制御されている。

6・3 仕訳精度

Mガス潮流仕訳計算でのMガス発熱量と同一時

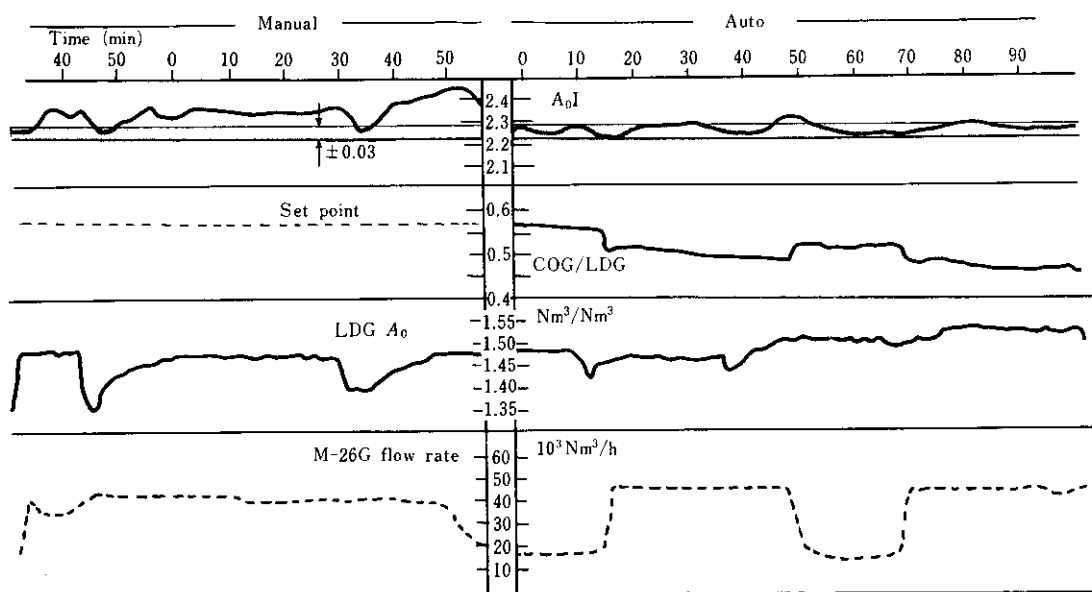


Fig. 9 Results of control by using A_0I system (instantaneous date)

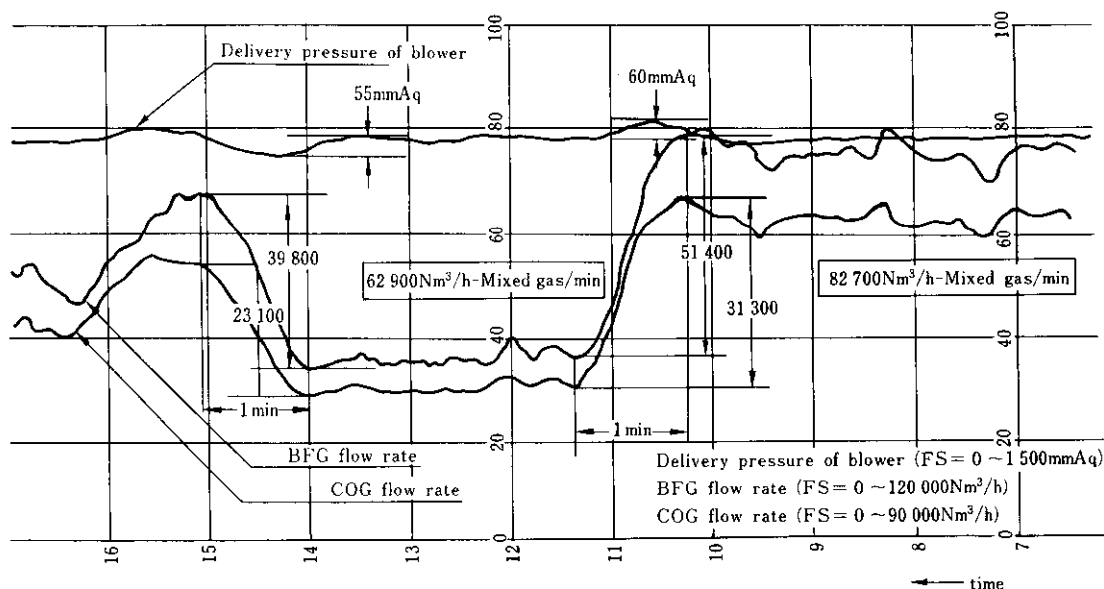


Fig. 10 Results of pressure control of M23-G

刻のガス分析によるMガス発熱量について比較した結果をTable 3に示す。計算値と分析値の差は、ほぼ30kcal/Nm³(約1%)以内であり、潮流計算によるMガス仕訳精度は、十分高いことが確認された。

6・4 LDガスの回収実績

LDガスの回収原単位指数(昭和54年度下期を100とする)の推移をFig. 11に示す。A₀I等価方式が完成した昭和55年8月前後では、LDガス回収原単位指数は約15%の向上となった。

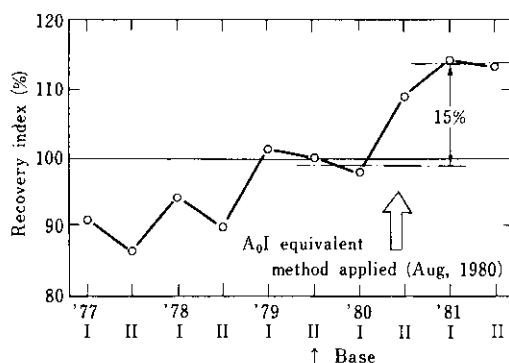


Fig. 11 Trend of recovered quantity of LD-gas per ton of crude steel

Table 3 Comparison of computed vs. analyzed calorific values (5 hour mean values)

Point of analysis	Computed	Analyzed	Errors
	kcal/Nm ³	kcal/Nm ³	kcal/Nm ³
Sinter plant	2 300	2 274	26
	2 236	2 224	12
Cold mill (Annealing)	2 541	2 575	-34
	2 627	2 627	0
	2 589	2 573	16
	2 512	2 543	-33
No. 2 plate mill	2 510	2 590	20
	2 340	2 335	6
Wide-flange beam mill	2 624	2 625	-1
	2 623	2 616	7
	2 633	2 624	9
	2 622	2 623	-1
	2 616	2 618	-2
Medium-flange beam mill	2 606	2 619	-13
	2 502	2 497	5
	2 369	2 322	47
$\bar{x}$	2 515.6	2 517.8	2.2

7. 結 言

多種の副生ガスが大量に発生する一貫製鉄所において、その効率的な運用は省エネルギーの大きな課題であった。

当所では特に発生が間欠的なLDガスの有効利用を狙いとしたAoI等価方式によるMガス供給技術を完成した。

設備完成後2箇年を経過したが、運用状況は良

好であり、LDガス回収量は約15%と大幅に向上している。AoI制御精度も目標の1.5%をほぼ満足している。また、Mガス仕訳精度に関しても、計画値と分析値の差は約1%以内で、十分高く本方式は円滑に運用されている。

最後にAoI等価方式の副次効果としてLDガスがCガスの代替としての役割を果し、結果として当所のオイルレス化を一層早めることができたことを付記しておく。

参 考 文 献

- 1) 日本瓦斯協会：「都市ガス工業器具編」，(1961)，44，〔技報堂〕
- 2) 工業技術社：計装，25 (1982) 3，28
- 3) 日本レギュレーター(株)：「ニレコニュース」，(1980，1) 14，25