

高温ガス化直接溶融炉におけるコークス使用量削減

Reduction of Coke Consumption in High-Temperature Gasifying and Direct Melting System

内山 武 UCHIYAMA Takeshi JFE エンジニアリング 技術本部総合研究所 部長・主幹
奥山 契一 OKUYAMA Keiichi JFE エンジニアリング 技術本部総合研究所 主任研究員
秋山 肇 AKIYAMA Hajime JFE エンジニアリング 都市環境本部環境プラント事業部 部長代理

要旨

JFE エンジニアリングの高温ガス化直接溶融炉は、廃棄物をガス化するとともに、コークスを使用し灰分を溶融させるため、多様な廃棄物に対応できる。この実施設において、籾殻成型品、木屑成型品炭化物および都市ガスを使用することによりコークス使用量を削減する試験を実施した。特に、籾殻成型品は揮発分を保持したまま炉下部に到達して溶融に寄与し、コークス削減率 50%以上を実証した。木屑成型品炭化物を用いた場合、また籾殻成型品と木屑成型品炭化物を組み合わせ用いた場合、コークスの 100%置換を達成した。さらに、炉下部の主羽口より都市ガスを供給する試験を実施し、コークス削減率約 60%を実証した。以上を生かし、経済性・地域性を考慮したコークス削減のための燃料選択が可能になる。

Abstract:

JFE Engineering has delivered waste to energy plants which use its unique high temperature gasifying and direct melting technology. These plants are able to treat and gasify various kinds of wastes and are capable of melting the ash through the usage of coke. In order to increase the environmental compatibility, JFE Engineering has developed various methods to reduce the consumption of coke. The possibility of using rice husk briquettes, wood briquette charcoal and natural gas as an alternative to coke had been investigated in commercial plants. It was found that rice husk briquettes can be utilized in substitution of coke and the usage reduction ratio exceeded 50%. In spite of high temperature conditions in the furnace, the rice husk briquettes, which have volatile matter for ash melting, can reach the bottom of the furnace. It was also found that wood briquette charcoal alone, and the combination of rice husk briquettes and wood briquette charcoal can substitute the coke entirely. Moreover, verification test on natural gas injection from main tuyeres at the bottom of the furnace was successfully carried out for about a month. Results showed that the coke consumption can be reduced by 60% through the usage of natural gas.

1. はじめに

JFE 高温ガス化直接溶融炉設備は、廃棄物をガス化するとともに、コークスを使用し灰分を溶融させるため、一般廃棄物をはじめ、産業廃棄物、焼却灰、掘り起こしごみ、アスベストなど多様な廃棄物を処理でき、2003 年の初号機竣工以降 10 プラントの納入実績がある¹⁻⁴⁾。昨今、CO₂ 排出量削減に関する社会的要望が強まっている中、JFE エンジニアリングではコークス使用量の削減により、CO₂ 排出量を削減する方策について、鋭意検討を進めている^{5,6)}。その一環として、バイオマス由来の固体燃料を使用することにより、通常使用している化石燃料由来のコークス（以下、通常コークス）の使用量を削減する実機試験を実施してきた。近畿大学の井田准教授により開発されたバイオコークス⁷⁾を使

用した試験では、通常コークスを 50%以上削減可能であるとの結果が得られた⁶⁾。バイオコークスとは、各種バイオマスを高圧下、半炭化温度で成型したものであり、高強度を持ちながらバイオマスの持つ揮発分を保持していることが特徴である。そこで、JFE エンジニアリングでは、同様に揮発分の多い籾殻成型品を使用した試験を実施し、通常コークスが効果的に削減できることを示した^{6,8)}。

本研究では、安価な籾殻成型品および入手容易な木屑成型品炭化物を用いた通常コークス削減に関し限界を見極める実機試験を実施し、良好な結果が得られた。この中で、木屑成型品炭化物、またはこれと籾殻成型品を組み合わせることにより、通常コークスをすべてバイオマス固体燃料に代替、すなわち通常コークスを使用しない運転が可能であることが確認できた。

一方で、水素含有量の高い都市ガスなどの燃料ガスを羽口より吹込むことによりコークスを代替する方法は、コーク

ス使用量の削減，すなわち CO₂ 排出量削減に有効と考えられ，高炉において実績がある⁹⁾。

本研究では，燃料ガスとして入手容易な都市ガスを吹込む実機試験を実施し，大幅なコークス使用量の削減を実証した。

通常コークスの多様な燃料種への代替を拡大していくことは，本炉の汎用性を増す。地域ごとに安価な燃料を選定して適用することで，より経済的な操業を行なうことが可能となる。

2. 高温ガス化直接溶融炉の概要

図1にJFE高温ガス化直接溶融炉の炉内断面図を示す。炉頂から廃棄物，コークス，石灰石が投入される。廃棄物層の上段では，水分の蒸発，可燃分の熱分解が進行する。廃棄物中の固定炭素と灰分は，投入されたコークス，石灰石とともに溶融炉内を予熱されながら下降し，炉下部に到達する。炉下部では，コークス充填層が形成され，主羽口から供給された酸素富化空気によりコークスと固定炭素が燃焼し，その燃焼熱で灰分が溶融され，溶融スラグとして出滓口から連続的に排出される。炉下部から廃棄物層にか

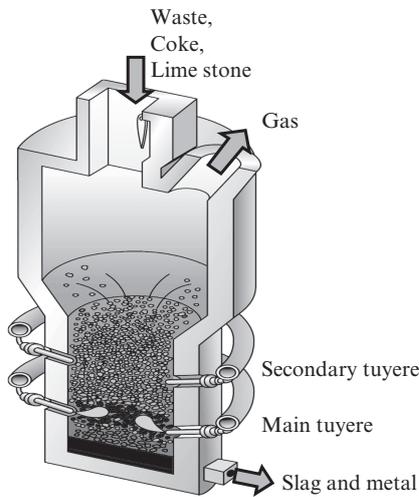


図1 高温ガス化直接溶融炉

Fig. 1 Schematic configuration of high temperature gasifying and direct melting furnace

けて発生した可燃性ガスは，溶融炉後段の二次燃焼室で完全燃焼する。完全燃焼したガスは，ボイラーで熱回収され，排ガス処理系へ送られる。

3. バイオマス固体燃料使用試験

3.1 バイオマス固体燃料の性状

3.1.1 外観と分析値

籾殻成型品は，農業廃棄物である籾殻を籾殻成型機で押出成型した市販品であり，稲作国では比較的容易かつ安価に入手できる。形状は直径53 mm，長さ約80 mmの円柱状で，軸方向の中心に15 mmの孔が開いている。この外観を写真1(a)に示す。

木屑成型品炭化物は，木屑を押出成型した後，高温で炭化した市販品であり，高価な備長炭の代用品として広く用いられている。今回使用した試料の形状は直径30 mm，長さ30~100 mmの円柱状である。この外観を写真1(b)に示す。

籾殻成型品および木屑成型品炭化物の性状分析結果を，通常コークスと比較して表1に示す。籾殻成型品は，通常コークスと比較して固定炭素が少なく，揮発分が多い。これは製造過程で，揮発分放出を伴う乾留処理をしていないためであり，バイオマス固体燃料の保有する熱量が炉内熱源として有効利用されることが期待される。

(a) Rice husk briquette



(b) Wood briquette charcoal



写真1 バイオマス固体燃料の外観

Photo 1 Appearance of biomass solid fuels

表1 バイオマス固体燃料の性状
Table 1 Properties of biomass solid fuels

	Rice husk briquette	Wood briquette charcoal	Coke
Water (mass%)	6.5	5.9	5.0
Ash (mass%-dry)	16.0	6.2	12.6
Volatile matter (mass%-dry)	67.1	5.9	1.6
Fixed carbon (mass%-dry)	16.9	87.9	85.8
Lower calorific value (MJ/kg)	14.23	30.09	29.26

表2 バイオマス固体燃料の強度
Table 2 Strength of biomass solid fuels

Drum index	DI ₁₅ ³⁰ (%)	As received	Rice husk briquette	Wood briquette charcoal
		After pyrolysis	96.8	60.5
Post-CO ₂ reaction strength	CSR (+9.5 mm) (%)	0.0*	14.1	

*Measured after pyrolysis (950°C, 18 h)

木屑成型品炭化物は、炭化処理をされることによりバイオマスが保有する揮発分の多くを失っている。固定炭素の含有量は、通常コークスと同程度になっている。また、灰分が通常コークスよりも低いため、発熱量はやや高い。

3.1.2 強度試験

籾殻成型品および木屑成型品炭化物の強度を、コークス強度の測定手段として用いられる試験方法により評価した。測定結果を表2に示す。ここで、ドラム強度DI₁₅³⁰はJIS K 2151に定められたものであり、規定のドラムに試料を投入し所定回転数で30回転させ、15mmの篩上に残る試料の重量比率として求めるものである。籾殻成型品については、入手したままの試料の測定に加え、炉内で揮発分が脱離した後の強度の指標として、950°Cで18hの乾留処理を施した試料についても測定を行なった。

CO₂反応後強度CSR(+9.5mm)は、20mmに整粒した炭化物試料200gを1100°Cで2時間CO₂と反応させた後、常温下でI型ドラムに投入して20min⁻¹で600回転させ、9.5mmの篩上に残る試料の重量比率として求めるものである。ここで籾殻成型品については、炭化物試料と同条件で整粒を行なうために、整粒操作の前に950°Cで18hの乾留処理を行なった。

表2より、籾殻成型品については、乾留前のドラム強度は高いが、乾留後に大きく低下することがわかる。また、CO₂反応後強度はゼロである。これより、揮発分を失った籾殻成型品は、良好なスラグの流下を維持するため炉底に形成されるコークスベッドの代替材にはならないことが示唆される。揮発分を失うまでの時間で、灰分の溶融に寄与する熱量を放出することが期待される効果である。

一方、木屑成型品炭化物のドラム強度とCO₂反応後強度については、通常コークスの一般的な値には及ばないが、乾留された籾殻成型品よりも高い値となった。これより木屑成型品炭化物は、熱量を放出するとともに、炉底でコークスベッドの代替材として機能することが期待される。

3.2 試験方法

バイオマス固体燃料を使用し通常コークス使用量を削減する実機試験を、浜田地区広域行政組合エコクリーンセンターごみ焼却施設(処理量49t/d×2炉)の1号炉において

実施した。バイオマス固体燃料として籾殻成型品および木屑成型品炭化物を用いた。

バイオマス固体燃料の使用により通常コークス使用量を削減する場合に最も懸念されることは、炉下部においてスラグを溶融させる熱が不足し、スラグの溶融および排出が困難となることである。そこで本試験では、バイオマス固体燃料の使用量を増加させながら、スラグの出滓状況を確認し、スラグ温度が基準値を下回らないように、通常コークス使用量を削減した。

3.3 試験結果

3.3.1 コークス削減の評価指標

本試験結果を評価するにあたり、バイオマス固体燃料使用率R_B(%)および通常コークス削減率R_{ΔC}(%)を以下と定義する。

$$R_B = B/C_0 \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

$$R_{\Delta C} = (C_0 - C)/C_0 \times 100 \dots\dots\dots (2)$$

ここで、C₀はベース条件(通常コークスのみによる操業)における通常コークス原単位(kg/tごみ)、Cは本試験中の通常コークス原単位(kg/tごみ)、Bは本試験中のバイオマス固体燃料原単位(kg/tごみ)を示す。

R_{ΔC}とR_Bとの関係は、バイオマス固体燃料を評価する上で重要である。

3.3.2 籾殻成型品のコークス削減効果

バイオマス固体燃料として籾殻成型品を使用した場合の試験結果を図2に示す。R_Bが160%以上で最大のコークス削減率67%が得られた。R_Bが120%を超えるとR_{ΔC}の増加が抑制された。籾殻成型品ではこれ以下の使用率で操業することが経済的である。

図2には、R_Bに対し、投入したバイオマス固体燃料と等

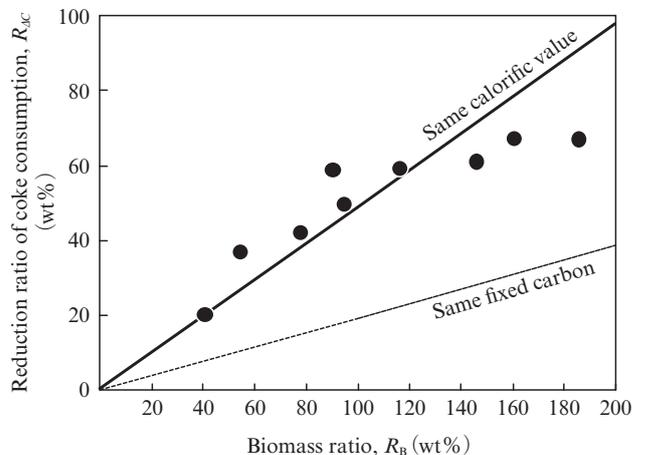


図2 籾殻成型品使用時の通常コークス削減率

Fig. 2 Reduction ratio of coke consumption for rice husk briquette

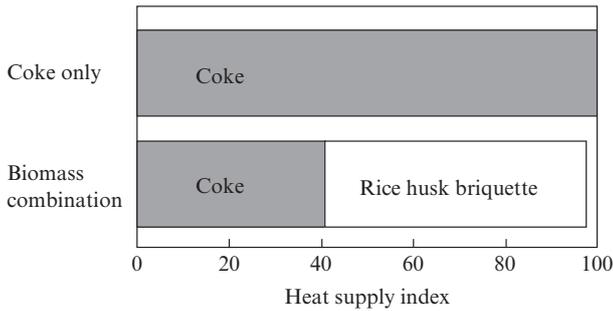


図3 バイオマス固体燃料使用時の供給熱量指数

Fig. 3 Heat supply index on using rice husk briquette

価熱量の通常コークスが削減されたと仮定した場合の関係を直線で示した。 R_B が120%以下の場合のプロットは、この直線よりほぼ上側に位置していることがわかる。

また、ベース条件における通常コークスによる供給熱量を100とした場合の、試験時の通常コークスおよびバイオマス固体燃料による供給熱量合計を供給熱量指数と定義し、 R_B が120%の場合の値を図3に示す。籾殻成型品使用時の供給熱量指数は100以下であることから、籾殻成型品は通常コークスよりも効果的に熱量が使われていることが示された。

以上より、籾殻成型品中の揮発分由来の熱量がコークス削減に寄与しており、さらに籾殻成型品の持つ熱量が、通常コークス以上に、炉下部において灰分の溶融に有効に作用するものと考えられる。JFE 高温ガス化直接溶融炉の場合このような熱量の有効利用に関しては、他のバイオマス固体燃料についても、同様の効果が期待できる。

3.3.3 木屑成型品炭化物のコークス削減効果

バイオマス固体燃料として木屑成型品炭化物を使用した場合の試験結果を図4に示す。図4にも、 R_B に対し、投入したバイオマス固体燃料と等価熱量の通常コークスが削減されたと仮定した場合の関係を直線で示した。 R_B が40%以下の場合、投入した木屑成型品炭化物とほぼ等価熱量の通常コークスが削減された。 R_B が40%を超えた場合のプロットは、この直線より下側に位置することから、等価熱量以上の重量を投入しなければならないことがわかる。しかし、籾殻成型品の場合とは異なり、 R_B の増加と共に通常コークス削減率 R_{dc} は大きくなり、最大で100%の通常コークスが削減された。すなわち、バイオマス固体燃料を用い通常コークスを使用しない運転が可能であることが実証された。

高温ガス化直接溶融炉に投入される通常コークスは、灰分を溶融するための熱源と、生成した溶融スラグを良好に流下させるベッド材としての働きを持つ。熱源の代替機能を期待した籾殻成型品は、乾留後強度が低いためベッド材としては機能しないと予測されたが、60%程度の通常コークスを置換した。この置換された通常コークスは熱源として消費されていたものと推測される。木屑成型品炭化物につい

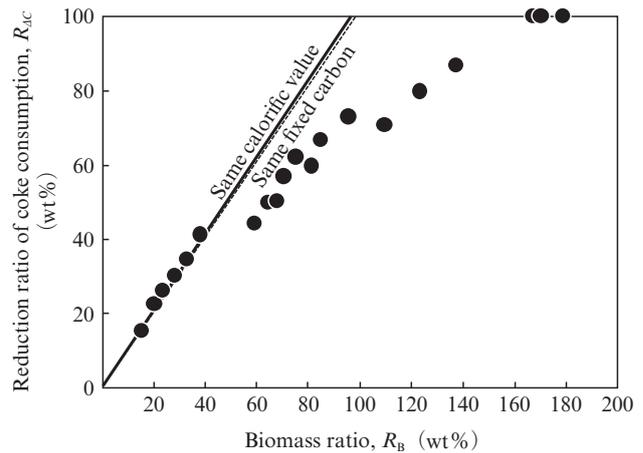


図4 木屑成型品炭化物使用時の通常コークス削減率

Fig. 4 Reduction ratio of coke consumption for wood briquette charcoal

ても同様に、60%程度までの通常コークスは効率よく置換を進めることができた。さらにベッド材の機能を果たすと考えられる領域まで置換を進めると効率は低下したが、これは通常コークスと比較して高温下での強度が低く消失が早いと推測できる。より強度の高い炭化物を使用すれば、より少ない投入量で通常コークス全量の代替が可能であると思われる。

3.3.4 木屑成型品炭化物と籾殻成型品の組合せによるコークスレス運転

バイオマス炭化物は通常高価であるため、炉底部に形成されるコークスベッドを代替するための最小量の使用に留め、灰分の溶融熱源としては安価なバイオマス非炭化物を使用することが経済的である。そこで本研究では木屑成型品炭化物と籾殻成型品を組み合わせ使用することを試みた。

3.2.3項でコークス全量を木屑成型品炭化物で置換したことを述べたが、この状態すなわちコークス全量を木屑成型品炭化物で代替した状態を維持しながら、木屑成型品炭化物の一部を籾殻成型品で置換していった。この結果を図5に示す。

ここでは、非炭化バイオマス使用率 R_B' (%) および炭化バイオマス削減率 R_{dc}' (%) を以下と定義する。

$$R_B' = B'/C_0 \times 100 \dots\dots\dots (3)$$

$$R_{dc}' = (C_0 - C')/C_0 \times 100 \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 C_0 はベース条件(木屑成型品炭化物のみによる操業)における木屑成型品炭化物原単位 (kg/t-ごみ)、 C' は本試験中の木屑成型品炭化物原単位 (kg/t-ごみ)、 B' は本試験中の籾殻成型品原単位 (kg/t-ごみ) を示す。

籾殻成型品の投入量の増加、すなわち R_B' の増加とともに R_{dc}' は増加していき、通常コークス全量の代替を維持しながら、最大で50%以上の木屑成型品炭化物が削減された。

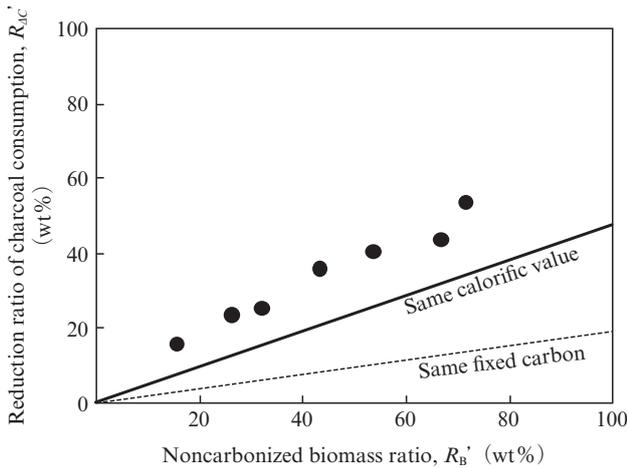


図5 粉殻成型品による木屑成型品炭化物削減率

Fig. 5 Reduction ratio of wood briquette charcoal consumption for rice husk briquette

図5には R_B' に対し投入した非炭化バイオマスと等価熱量の炭化バイオマスが削減されたと仮定した場合の関係を直線で示した。いずれのプロットもこの直線より上側に位置しており、粉殻成型品は木屑成型品炭化物よりも効果的に熱量が使われていることがわかる。

3.3.5 スラグ温度と品質

一連の試験において、スラグ平均温度は、安定操業の目安となる 1400℃と同等レベルを維持し、連続出滓状況も良好であった。本試験でのスラグを採取し、鉛の溶出試験を実施した。結果は定量下限値以下となり、粉殻成型品や木屑成型品炭化物を使用した場合でもスラグの鉛溶出量に影響を及ぼさないことを確認した。

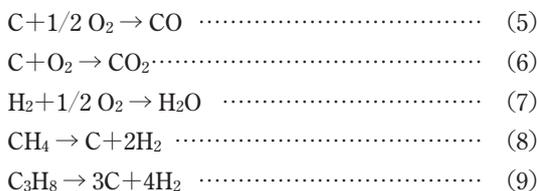
3.3.6 CO₂ 削減効果

今回の試験結果より CO₂ 削減効果を試算した。年間コークス使用量 1000 t/年、コークス中炭素濃度 85%、コークス削減率 50%とすると、年間の CO₂ 削減量は 1550 t-CO₂/年と試算される。

4. 都市ガス吹込み試験

4.1 都市ガス吹込み時の操業条件検討

高温ガス化直接溶融炉の主羽口から都市ガスを吹込む試験を実施するにあたり、コークス置換率および羽口先理論燃焼温度を推定するために、羽口前のスラグ溶融帯における熱・物質収支モデルを作成した。考慮した反応を(5)~(9)式に示す。



都市ガス組成はその主成分である CH₄ および C₃H₈ を考慮し、熱量が実際の都市ガスとほぼ等しくなるような比率に調整し、それぞれ 91%、9%として計算した。羽口より吹き込まれた都市ガスは直ちに (8) および (9) 式の反応で熱分解するとした。この反応により生成した H₂ が (7) 式により反応する割合を、水素反応率 α (%) とする。主羽口より吹き込まれた酸素は、まず水素と反応し、残りの酸素は(8) および(9)式の熱分解により生じた炭素と反応し、さらに残った酸素はコークスの炭素と反応するとした。これらの炭素と酸素は (5) または (6) 式で反応するが、この残りの酸素のうち、(6) 式により反応する割合を β (%) とする。

図6に α および β を変化させた場合の計算により求めたコークス置換率を示す。コークス置換率は約 1.0~2.7 (kg-

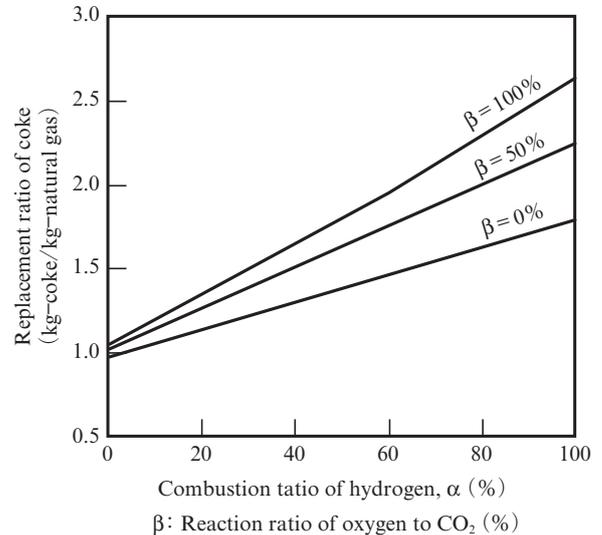


図6 都市ガス吹込み操業予測

Fig. 6 Prediction of natural gas injection operation

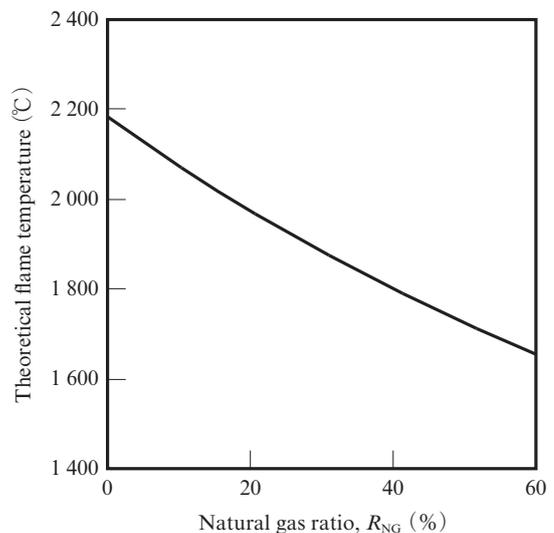


図7 羽口先理論燃焼温度の変化

Fig. 7 Change in theoretical flame temperature

coke/kg-都市ガス)の範囲となることが予測される。

実炉における α および β は分かっていないため、仮に $\alpha=50\%$ 、 $\beta=50\%$ としたときの、羽口先理論燃焼温度と都市ガス使用率との関係を求め、**図7**に示す。横軸の都市ガス使用率 R_{NG} は後述の(10)式で定義される(4.3節)。羽口先理論燃焼温度は都市ガス使用率増加とともに大幅に低下するため、試験操業においては主羽口の酸素濃度を増加させ、羽口先理論燃焼温度の低下を防止する必要がある。

4.2 試験方法

都市ガスを主羽口より吹き込み、通常コークス使用量を削減する実機試験を、福山リサイクル発電株式会社の高温ガス化直接溶融炉(処理量314 t/d×1炉)において約1ヶ月間実施した。

使用した都市ガスの組成を**表3**に示す。試験では都市ガス吹き込み量を徐々に増加し、出滓状況を確認しながら、主羽口からの送風中酸素濃度の増加およびコークス比の削減を行なった。

4.3 試験結果

本試験結果を評価するにあたり、都市ガス使用率 $R_{NG}(\%)$

を以下と定義する。通常コークス削減率 $R_{AC}(\%)$ は3.3.1項で定義したとおりとする。

$$R_{NG} = C_{NG} / C_0 \times 100 \dots\dots\dots (10)$$

$$R_{AC} = (C_0 - C) / C_0 \times 100 \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 C_0 はベース条件(通常コークスのみによる操業)における通常コークス原単位(kg/t-ごみ)、 C は本試験中の通常コークス原単位(kg/t-ごみ)、 C_{NG} は本試験中の都市ガス原単位(kg/t-ごみ)を示す。

都市ガス吹き込み試験における通常コークス削減率と都市ガス使用率との関係を**図8**に示す。通常コークスの削減率は約60%に達しており、都市ガスを主羽口から吹き込むことにより大幅なコークス使用量の削減が可能であることが実証された。また**図8**には**図2**などと同様に等価熱量の関係を示した。試験結果はほぼ等価熱量を示す線上にあり、都市ガスと通常コークスが熱量等価で置換できたことがわかる。本図の傾きが示すコークス置換率は約1.8であり、**図6**での予測の範囲内であった。

5. おわりに

CO₂排出量削減に対する社会的要望が強まっている中、高温ガス化直接溶融炉において、バイオマス固体燃料および燃料ガスの使用により、通常コークス使用量を削減する実機試験を実施した。バイオマス固体燃料としては、安価な粉殻成型品、次に比較的高価であるが入手しやすく炉内での強度維持が期待できる木屑成型品炭化物を使用した。燃料ガスとしては入手しやすい都市ガスを使用した。この結果を以下に述べる。

- (1) 粉殻成型品は固定炭素だけではなく揮発分を保持したまま炉下部に到達し、灰分の溶融に有効に利用できることが示された。通常コークスは等価熱量の粉殻成型品で代替可能であった。さらに通常コークスの削減については50%以上を達成し、大幅なCO₂排出量削減が可能であることを実証した。なおJFE高温ガス化直接溶融炉の場合、この粉殻成型品の効果は多様なバイオマス固体燃料において期待できる。
- (2) 木屑成型品炭化物は炉下部に形成されるコークスベッドも代替することができ、通常コークスを完全に使用しない運転が可能であることを実証した。
- (3) 木屑成型品炭化物は溶融熱源およびベッド材としての機能を併せ持つ。溶融熱源としての機能は安価な粉殻成型品で置き換えることが可能であり、粉殻成型品との組合せにより木屑成型品炭化物の使用量を50%以上削減できることを実証した。
- (4) 炉下部の主羽口から都市ガスを供給することにより、灰分の溶融熱源として有効に利用できることが示された。

表3 都市ガス組成
Table 3 Natural gas content

CH ₄ (%)	87.1
C ₂ H ₆ (%)	6.6
C ₃ H ₈ (%)	4.6
C ₄ H ₁₀ (%)	1.4
N ₂ (%)	0.3

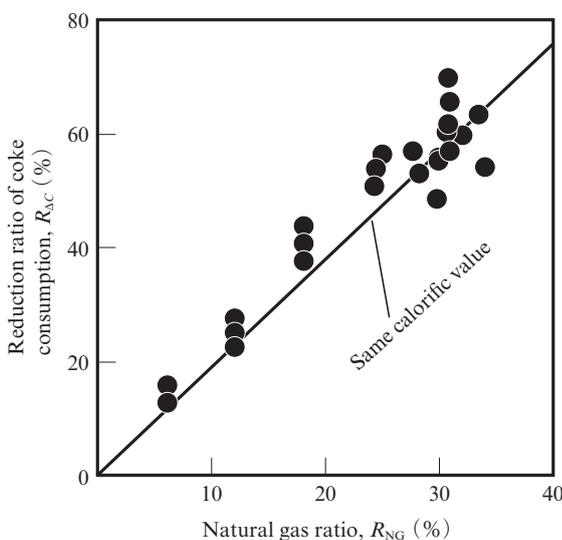


図8 都市ガス吹き込み操業でのコークス削減率

Fig. 8 Reduction ratio of coke consumption for natural gas

通常コークスは等価熱量の都市ガスで代替可能であった。通常コークスの削減率は約 60%に到達し、大幅な通常コークスの削減が可能であることを実証した。

JFE 高温ガス化直接溶融炉では廃棄物の灰分を溶融させるためにコークスを使用しているが、バイオマス固体燃料や燃料ガスを用いて少なくとも半分以上を置換できるという汎用性を持つことが実証された。地域によりこれらの入手性は異なるが、設備ごとに最適な組合せを行なって通常コークスを代替し、より経済的な操業を行なうことが可能である。現在、バイオマス固体燃料や燃料ガスのコストおよび供給安定性を検討し、実用化を推進している。

今回の試験にあたり、多大な協力をいただいた浜田地区広域行政組合殿および福山リサイクル発電株式会社殿に感謝いたします。

参考文献

- 1) 須藤雅弘, 半澤祐幸. JFE 高温ガス化直接溶融炉の稼働状況. 環境浄化技術. 2004, vol. 3, no. 1, p. 21-25.
- 2) 吉田朋広, 篠崎克己. JFE 高温ガス化直接溶融炉の産廃への適用～エコフロンティアかさまの稼働状況. 環境浄化技術. 2006, vol. 5, no. 11, p. 15-18.

- 3) 明石哲夫, 多田光宏, 内山武. 高温ガス化直接溶融炉による飛散性アスベスト廃棄物の溶融無害化処理. JFE 技報. 2010, no.25, p.7-10.
- 4) 内山武, 秋山肇. 高温ガス化直接溶融炉におけるプラスチック混合廃棄物の処理. プラスチックス. 2011, no. 11, p. 82-88.
- 5) 内山武, 秋山肇. 高温ガス化直接溶融炉におけるコークス使用量削減. 産業機械. 2011, no. 729, p. 19-22.
- 6) 内山武, 秋山肇. 高温ガス化直接溶融炉におけるバイオコークス使用による CO₂ 排出量削減. 産業機械. 2012, no. 740, p. 9-12.
- 7) 井田民男. 非炭化転換技術による次世代コークス代替燃料「バイオコークス」の製造技術開発. 日本エネルギー学会誌. 2011, vol. 90, no. 1, p. 2-9.
- 8) 内山武, 奥山契一, 秋山肇. 高温ガス化直接溶融炉におけるバイオマス固体燃料使用によるコークス使用量削減. 環境浄化技術. 2013, vol. 12, no. 2, p. 75-78.
- 9) 山本耕司, 柏原佑介, 築地秀明. 東日本製鉄所(京浜地区)第2高炉における都市ガス吹込み操業. JFE 技報. 2008, no. 22, p. 55-60.



内山 武



奥山 契一



秋山 肇