

# 循環流動層炉の下水汚泥焼却炉への適用

## The Application of CFB (Circulating Fluidized Bed) to Sewage Sludge Incinerator

中村 章 エンジニアリング研究所 燃焼システム研究部  
岩崎 敏彦 エンジニアリング研究所 燃焼システム研究部 主査  
能登 隆 エンジニアリング研究所 燃焼システム研究部 主任研究員  
橋本 久尚 水エンジニアリング計画部 第二グループ 統括スタッフ  
杉山 暢之 水エンジニアリング技術部 汚泥処理技術室 主査  
服部 賢宏 水エンジニアリング技術部 汚泥処理技術室

Akira Nakamura  
Toshihiko Iwasaki  
Takashi Noto  
Hisanao Hashimoto  
Nobuyuki Sugiyama  
Masahiro Hattori

石炭焚きボイラとして広く用いられている循環流動層において、含水率の高い下水汚泥脱水ケーキを焼却するためには、湿潤物質対応の流動化モードを実現する必要がある。循環流動層炉パイロットプラントにおいて各種条件で燃焼実験を実施した結果、脱水ケーキに適した流動化モード、温度・圧力分布を実現し、排ガス性状の優れた燃焼方法を見いだすことができた。循環流動層炉が下水汚泥焼却炉として充分適用できることがわかった。

*CFB (Circulating Fluidized Bed) is widely used for coal combustion boiler. To combust sewage sludge at CFB, suitable fluidization mode for damp material is required. The experiment for combusting sewage sludge were carried out by using pilot scale CFB. As a result, a desirable combusting method was accomplished by suitable fluidization mode, and controlling profiles of temperature and pressure. These results indicated that CFB could be applied for sewage sludge incinerator.*

### 1. はじめに

下水道の発達に伴い、我が国では年間約 200 万トン（固形物重量）の下水汚泥が発生しており、その多くが脱水処理後、焼却による減容化処理がなされている。脱水処理により得られる汚泥脱水ケーキは、含水率が約 70～85%の湿潤物質であるため、焼却には、簡単な構造ながら安定して焼却が可能な気泡型流動層炉が多く用いられてきた<sup>1)</sup>。

ここ数年、当社を含む下水汚泥焼却炉メーカーから汚泥脱水ケーキの焼却に循環流動層炉の適用が提案されている。循環流動層炉は気泡型流動層炉に比較して塔内流速が高く（約 4～6m/s）、燃焼領域を高さ方向へ伸張できるため、断面積あたりの焼却負荷を高く取ることができ、炉体の省スペース化が図れる。また、燃焼空気を流動化空気（一次空気）と二次空気の 2 段に分けて供給できるため、流動プロワの動力負荷が低減できるとともに、2 段燃焼効果による環境負荷低減も期待される。さらに、気泡型流動層炉では攪拌混合が促進されにくい大型炉の場合でも、循環流動層炉ではその高速流動により充分な攪拌混合が行われ、良好な燃焼状態となることが予想される。

循環流動層による燃焼では、固形の未燃分が循環粒子の一部として系内を循環して完全燃焼するため、固定炭素分が多い石炭の燃焼に適しているとされ、石炭焚きボイラで広く用いられてきた。一方、下水汚泥脱水ケーキは含水率

が高く、固形分中の揮発分も 70%近く含まれていることが多く、石炭とは大幅に性状が異なる。そのため、同じ循環流動層技術とは言え、異なる流動化・燃焼技術が必要となる。石炭と下水汚泥脱水ケーキの一般的な性状を Table 1 に示す。

当社では、内径 300mm、高さ 12m のライザ（燃焼室）を有する循環流動層炉パイロットプラントを用い、各種実験を重ねた結果、循環流動層炉が下水汚泥脱水ケーキの焼却に充分適用できることが確認できたので、以下に報告する。

Table 1 Properties of coal & sewage sludge

	Bituminous coal	Sewage sludge
Moisture	0 ~ 8	70 ~ 85
Volatile matter	13 ~ 40	50 ~ 75
Fixed carbon	75 ~ 85	8 ~ 10
Ash	2 ~ 5	15 ~ 40
LHV	20 ~ 25	0.4 ~ 2.5

### 2. 実験装置および条件

Fig.1 に、本実験で用いたパイロットプラントのフロー図を、Photo 1 に概観写真を示す。循環流動層部は、燃焼室であるライザ、循環粒子の捕集を行うサイクロン、炉底部未燃ガスの逆流を防ぐためのループシールなどから構成され、さらに排ガス処理装置が設置されている。ライザは内径 300mm × 高さ 12m の耐火物張り構造で、風

箱，分散板，二次空気供給口，脱水ケーキ供給口，補助燃料（灯油）供給用のオイルガンなどを具備する。一次空気は風箱から分散板を経由してライザに供給される。この一次空気ならびに二次空気によりライザ下部から上部へと流動媒体が吹き上げられ，脱水ケーキは流動媒体と激しく攪拌混合し，乾燥，燃焼が行われる。ライザ上部から飛び出した一部の流動媒体と未燃分は循環粒子としてサイクロンで捕集され，ループシールを経て再びライザに戻される。また，サイクロンから排出された燃焼排ガスは，ガスクーラで減温された後にバグフィルタで除じんされ，誘引ファンを経由して煙突から排出される。

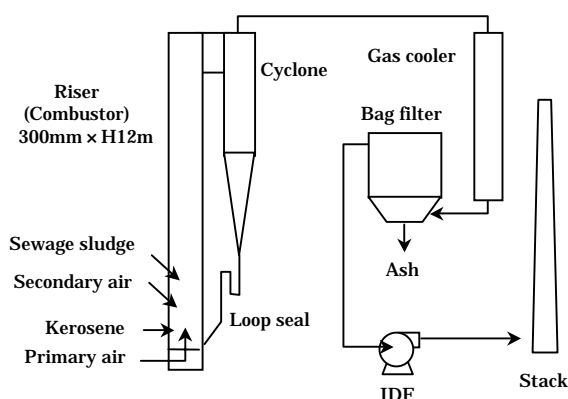


Fig.1 Pilot plant diagram



Photo 1 Pilot plant

本実験に用いた 4 種類の脱水ケーキの性状を Table 2 に示す。それぞれの脱水ケーキの特徴は以下に示すとおりである。

- A：都市型下水処理場から発生する汚泥脱水ケーキであり，比較的含水率が低く，発熱量が高い。
- B：工業系排水を含む汚泥の脱水ケーキであり，固形分中の O 分含有量が高い。

- C：消化汚泥脱水ケーキのため灰分が多く，発熱量が著しく低い。また固形分中の S 分含有量が高い。
- D：地方中小都市の汚泥脱水ケーキであり，含水率が高く，固形分中の N 分含有量が高い。

Table 2 Properties of sewage sludge

Sewage sludge		A	B	C	D
Moisture	%	76.6	78.8	80.1	84.9
Ash	dry%	17.5	19.9	40.3	15.0
Combustibles	dry%	82.5	80.1	59.7	85.0
HHV	MJ/dry-kg	19.7	19.2	13.3	20.2
LHV	MJ/kg	2.3	1.8	0.4	0.7
C	dry%	44.3	42.5	31.1	44.9
H	dry%	6.2	6.1	4.8	6.4
N	dry%	5.3	4.4	4.5	8.3
O	dry%	26.0	26.5	18.1	24.6
S	dry%	0.7	0.6	1.3	0.8

また，実験条件を Table 3 に示す。実験においては，流動媒体として珪砂（主成分  $\text{SiO}_2$ ）を使用し，空気比を約 1.3 とした。一次空気温度は約 400 ，二次空気温度は約 200 で供給した。

Table 3 Experimental conditions

Sewage sludge	kg/h	40 ~ 60
Kerosene	L/h	13 ~ 19
O <sub>2</sub> (Cyclone ext.)	%	4.4 ~ 5.4
Bed material d <sub>p50</sub> (Silica sand)	mm	0.13 ~ 0.30
Gas velocity(800 )	m/s	4.4 ~ 5.6

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 流動化モードの検討

循環流動層炉の運転指標として，燃焼対象物に適した流動化モード，すなわちライザのどの部分にどのような流動化状態を形成させるかの検討が必要となる<sup>2)</sup>。まず，湿潤物質である脱水ケーキの最適流動化モードの検討を行った。

ライザ内に投入された脱水ケーキは，ライザ下部で十分に水分を蒸発させ，乾燥させる必要がある。そのために，ライザ下部の二次空気が吹き込まれる位置よりも下方には流動媒体の粒子密度が高い状態，すなわち濃厚層部を形成させ，従来の気泡型流動層炉と似た流速の低い流動状態を作り出す必要がある。逆に，ライザの二次空気が吹き込まれた位置よりも上方では，乾燥された脱水ケーキ中の可燃分を完全燃焼させる必要があり，攪拌混合が十分に促進される高速流動化状態が望ましいと考えられる。

この状態を実現する流動媒体の粒径，一次空気，二次空気配分について検討した。その一例として，脱水ケーキ A における結果を Fig.2 に示す。この図は，ライザ高さ方向の圧力分布であり，ライザ底部（分散板直上）を 1，ライザ頂部を 0 とし，以下の式で無次元化したものを示している。

$$P' = (P - P_1) / (P_0 - P_1)$$

(P=各測定点の圧力, P<sub>1</sub>=炉頂圧, P<sub>0</sub>=分散板上直上圧)

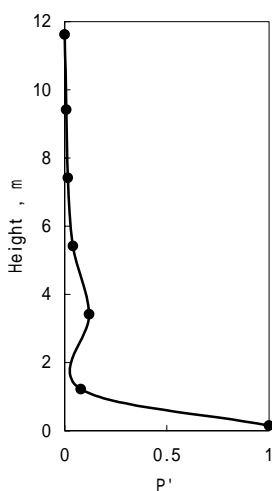


Fig.2 Pressure profiles in riser

ライザ下部では圧力が高くなっており、粒子密度が高い濃厚層が形成されていることがわかる。この無次元化式で P'=0.2 となる高さまでを濃厚層領域と考えることにした。この濃厚層上方では、高さ約 2m の位置に吹き込まれている二次空気の影響で一旦圧力は上昇するものの、炉頂に向かって穏やかに圧力が減少し、高速流動化状態となっている様子が見られる。

この流動化モードが湿潤物質の燃焼に最適であると判断し、以下に記す燃焼特性に関する検討を行った。

### 3.2 濃厚層領域の最適化

湿潤物質の燃焼を循環流動層炉で継続させるためには、濃厚層部で水分の蒸発をさせながら一次燃焼を促進させる必要がある。そのため、濃厚層を燃焼維持可能な温度以上に保つことが非常に重要となる。

そこで、脱水ケーキ A を同一条件のもとで一次/二次空気配分のみを変化させた場合の濃厚層温度を測定した。結果を Fig.3 に示す。横軸に示す一次空気比とは、ライザに供給された脱水ケーキと灯油の燃焼必要空気量に対する、一次空気の比率である。一次空気比が 0.6 のときに濃厚層温度が最も高くなっている様子が見られる。一次空気比を高くすると、脱水ケーキおよび補助燃料の燃焼熱がライザ上部へ多く移動するため、またライザ下部の流速が速くなり濃厚層の粒子密度が不十分となることから熱容量が低下するため、濃厚層温度は低くなると考えられる。逆に、一次空気比を低くすると濃厚層の温度を維持する最低限の燃焼ができなくなるため、濃厚層温度は低くなると考えられる。

また、一次空気比は燃焼初期の条件を決定するため、排ガス性状にも影響を与える。Fig.4 に同一条件で実験を行い、サイクロン出口にて CO 濃度を測定した結果を示す。

一次空気比が低いほどサイクロン出口における CO 濃度が下がる様子が見られる。これは、一次空気比を下げることで、濃厚層における脱水ケーキの熱分解速度を抑制し、そこで生成された可燃成分を二次空気が吹き込まれる位置より上段で完全燃焼させているためと考えられる。これらは、いずれの脱水ケーキでもほぼ同じ傾向を示した。

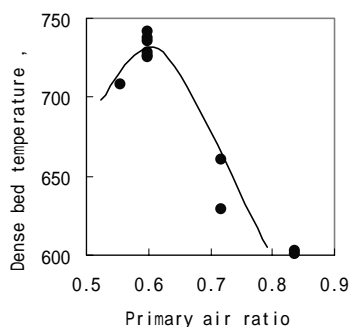


Fig.3 Influence of primary air ratio on dense bed temperature

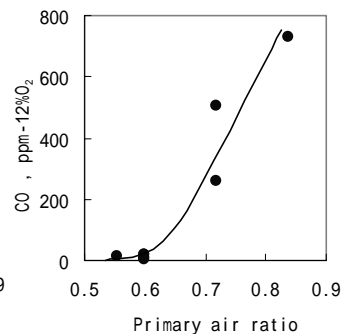


Fig.4 Influence of primary air ratio on CO emissions

Photo 2 に、脱水ケーキ A を一次空気比 0.6 で燃焼させたときの濃厚層(分散板上 150mm)の様子を CCD カメラで撮影したものを示す。黒い球状の物質が脱水ケーキであり、濃厚層領域で安定燃焼が維持されている。

以上のことから、循環流動層炉の場合、一次空気比は 0.6 程度が望ましいと言える。

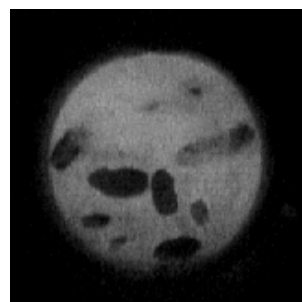


Photo 2 Dense bed

### 3.3 ライザ全域での燃焼特性

ライザ全域での燃焼特性に関する考察を行った。Fig.5 に、脱水ケーキ A, D それぞれを燃焼させたときのライザの酸素濃度分布と温度分布を示す。二次空気が吹き込まれる位置より下方の濃厚層部では、一次空気によって供給される酸素がほぼ消費され、還元雰囲気形成されていることがわかる。またこの領域は温度が 700~800 と比較的低温で、脱水ケーキ中の水分が蒸発し、可燃成分がガス化していることが考えられる。その後、二次空気が吹き込まれた高さ約 2m よりも上方では、高さ方向に向かって徐々に酸素が消費されており、この場所における温度は、850 程度となっていることがわかる。これは、濃厚層部でガス

化された可燃分が、二次空気が吹き込まれた上方の広い範囲に渡って完全燃焼し、充分な高温場を形成していると考えられる。

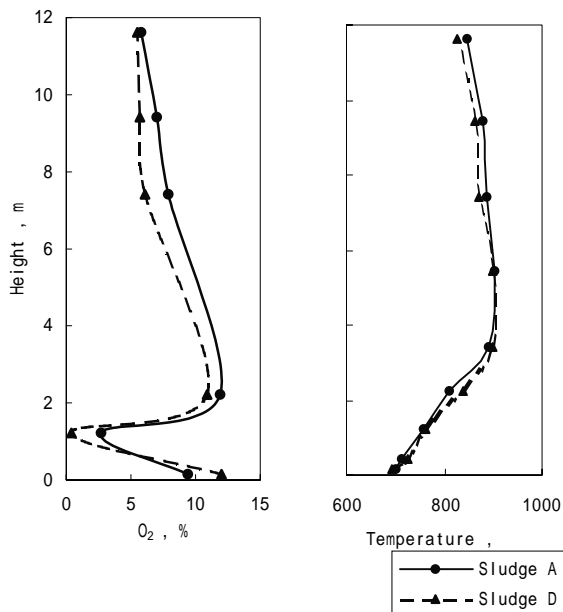


Fig.5 Profiles of O<sub>2</sub> and temperature in riser

### 3.4 排ガス性状

污泥脱水ケーキ中には、都市ごみやプラスチックごみなどの廃棄物と比較して N 分が多く、NO<sub>x</sub>、N<sub>2</sub>O 排出濃度が懸念される。また循環流動層炉の場合、気泡型流動層炉に比較して塔内流速が高いため、滞留時間の不足による不完全燃焼も懸念される。そこで、各有害ガスの低減に関する検討を行った。Table 4 にサイクロン出口で計測した排ガス濃度の一例を示す。

Table 4 Properties of flue gas from cyclone exit

Sewage sludge	A	B	C	D
O <sub>2</sub> %	5.3	5.1	5.0	4.4
CO ppm-12%O <sub>2</sub>	27	17	8	17
CO <sub>2</sub> %	11	10	12	10
NO <sub>x</sub> ppm-12%O <sub>2</sub>	48	65	31	54
N <sub>2</sub> O ppm-12%O <sub>2</sub>	38	-	-	62
DXNs ng-TEQ/Nm <sup>3</sup>	0.00028	-	-	-

いずれの脱水ケーキにおいても、空気比 1.3 程度で、CO、NO<sub>x</sub>、N<sub>2</sub>O のすべてを低濃度に抑えることができた。各成分の低減理由は、以下のとおりである。

#### (1) NO<sub>x</sub>

前節で記した流動化モードで燃焼させる場合、窒素化合物は還元雰囲気の高濃層において NH<sub>3</sub>、HCN などになり、二次空気が吹き込まれた上方において完全燃焼するため、二段燃焼効果により NO<sub>x</sub> 濃度を低減させることができた。

#### (2) N<sub>2</sub>O

前節で記した温度分布の場合、ライザ上方の充分な高温場で N<sub>2</sub>O を分解させることができる。したがって、一般に排出挙動の点でトレードオフの関係にあると言われる NO<sub>x</sub> と N<sub>2</sub>O を同時に低減させることが可能となった<sup>3),4)</sup>。

#### (3) CO

ライザ上方の広い範囲に渡る高温場で十分に攪拌混合されて完全燃焼するため、低濃度に抑えることが可能となった。

#### (4) ダイオキシシン類

ライザ上方の広い範囲に渡る高温場において完全燃焼させることにより、極めて低濃度とすることができた。

### 3.5 炉内脱硫性能

污泥脱水ケーキ中には、都市ごみやプラスチックごみなどの廃棄物と比較して S 分が多く、焼却時の SO<sub>x</sub> 排出濃度が比較的高くなりやすい。そこで、従来から苛性ソーダ (NaOH) 水溶液を用いた排煙脱硫設備を煙突前に設置することが一般的となっている。

循環流動層炉の場合、流動媒体とガスの接触効率が高いため、石灰石 (主成分: CaCO<sub>3</sub>) などの脱硫剤をライザへ直接投入することによる炉内脱硫効果が期待でき、すでに石炭焚きボイラなどで活用されている。この方法によれば、排煙脱硫設備およびそれに伴う排水設備が不要となり、設備の省スペース化、ランニングコストの低減が図れるメリットがある。しかし一方で、石灰石の分解により生成する CaO が NO<sub>x</sub> 生成触媒となるため、燃焼条件によっては NO<sub>x</sub> 濃度への影響が懸念される。

そこで、各種条件での炉内脱硫実験を行った。実験では脱水ケーキ A、B、C を空気比約 1.3 で燃焼させながら、Ca/S モル比 = 3.0 ~ 4.5 で石灰石をライザに投入した。石灰石による脱硫反応は、800 ~ 850 °C が望ましいとされており、ライザ内におけるこの温度領域は Fig.5 で示したように二次空気が吹き込まれた位置よりも上方に相当する。そのため、この位置で流動して反応するように、微粉石灰石を使用した。結果の一例を Table 5 に示す。

Table 5 Results of De-SO<sub>x</sub> experiment

Sewage sludge	A	B	C
Molar ratio (Ca/S)	3.0	4.5	4.2
SO <sub>2</sub> (Estimated*) ppm-12%O <sub>2</sub>	134	81	123
SO <sub>2</sub> (Measured) ppm-12%O <sub>2</sub>	1.9	4.2	2.3
SO <sub>2</sub> removal %	98.6	94.8	98.1
NO <sub>x</sub> ppm-12%O <sub>2</sub>	44	66	31

\*Conversion ratio=100%

脱水ケーキ中に含有される S 分がすべて SO<sub>2</sub> に転換したと仮定したときの推定 SO<sub>2</sub> 濃度 (\*) に対し、SO<sub>2</sub> の除去率はいずれの脱水ケーキでも約 95%以上となることがわかった。また、最適燃焼状態を維持することにより、懸念

された NOx 濃度も炉内脱硫を行わないときとほぼ同程度となった。

すなわち、NOx 濃度に影響を与えることなく高除去率の炉内脱硫が可能であると言える。

### 3.6 焼却灰・流動媒体溶出試験

バグフィルタで捕集された飛灰と、ライザから回収した流動媒体の溶出試験を実施した。Table 6 にその結果を示す。いずれの脱水ケーキの場合でも流動媒体、焼却灰とも、特に問題となる物質の溶出は認められなかった。

## 4. おわりに

循環流動層炉パイロットプラントにおいて、性状の異なる4種類の下汚泥脱水ケーキの燃焼実験を行い、流動化モード、燃焼特性、排ガス性状などに関する検討を行った。その結果、循環流動層炉の適用性について以下の結論を得た。

(1) 湿潤物質に適した流動化モードをライザ内に形成することにより、幅広い種類の脱水ケーキの焼却に対応することが可能である。

(2) 2 段燃焼効果と、ライザ上部の高温場において、NOx と N<sub>2</sub>O を同時に低減させることができ、完全燃焼のパラメータである CO 濃度も低減させることが可能である。

(3) 炉内脱硫による SOx 濃度低減が可能である。

(4) 焼却灰、流動媒体から、特に問題となるような重金属の溶出は見られなかった。

石炭焚きボイラとして発展してきた循環流動層技術が、湿潤物質である下水汚泥焼却炉としても充分適用可能であることがわかった。

固定炭素分の多い石炭と、含水率が高い下水汚泥に対応できるということは、さらに幅広い物質に十分対応できると考えられる。これはすなわち、循環流動層燃焼技術が、今後多様化すると考えられるエネルギーの有効利用手段として、各種燃料・廃棄物に対応可能な技術であることを示している。特に下水汚泥処理においては、しさ・沈砂や、他の廃棄物との混焼に対応できると考えられ、エネルギー回収を視野に入れることもできる。

今後は、本実験で得られた結果を足掛かりとし、さらなる循環流動層燃焼技術の発展に注力する次第である。

### 参考文献

- 1) 坪井晴人ほか。“流動層総合技術”。NKK 技報。No.123, pp.2-9(1988)。
- 2) 鞭巖ほか。“流動層の反応工学”。東京、培風館。1984. pp.270-274。
- 3) 鈴木善三ほか。“石炭の循環流動層燃焼における N<sub>2</sub>O 生成”。燃料協会誌。Vol.69, No.12, pp.1146-1151(1990)。
- 4) 清水忠明。“講座「石炭科学基礎論」(X)”。日本エネルギー学会誌。Vol.75, No9, pp.851-859(1996)。
- 5) 堀尾正朝ほか。“流動層ハンドブック”。東京、培風館。1999. 432p。

<問い合わせ先>

エンジニアリング研究所 燃焼システム研究部

Tel. 044 (322) 6305 中村 章

E-mail address : anakamu@lab.keihin.nkk.co.jp

水エンジニアリング計画部 第二グループ

Tel. 045 (505) 7622 橋本 久尚

E-mail address : hashimh@eng.tokyo.nkk.co.jp

Table 6 Results of leaching test for fly ash and bed material

Sewage sludge	Bag filter ash						Bed material		
	A	A + Lime-stone	B + Lime-stone	C	C + Lime-stone	D	A	A + Lime-stone	B + Lime-stone
Cd mg/l	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.005	<0.005	<0.005
CN <sup>-</sup> mg/l	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
P mg/l	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.07	<0.05	<0.05
Pb mg/l	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.005	<0.005	<0.005
Total-Cr mg/l	<0.05	<0.05	0.07	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.07
Cr <sup>6+</sup> mg/l	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.05	<0.04	<0.04	<0.04
As mg/l	0.04	<0.05	<0.05	<0.01	<0.01	0.03	<0.05	<0.05	<0.05
Total-Hg mg/l	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005
Alkyl-Hg mg/l	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005
PCB mg/l	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005