

# 廃棄物処理プラントにおける排ガス中水銀濃度のフィード フォワード制御開発

## Development of Feedforward Control of Mercury Concentration in Flue for Waste Treatment Plant



前田健一\*  
Kenichi Maeda  
技術士（上下水道部門）



島 孝一\*  
Koichi Shima



藤田 淳\*  
Jun Fujita  
技術士（衛生工学部門）



梶原吉郎\*\*  
Yoshio Kajihara  
技術士（衛生工学部門）



奥住宣裕\*\*\*  
Nobuhiro Okuzumi

これまで当社では、バグフィルタ後に設置した水銀濃度計の値により水銀を吸着する活性炭供給量を制御するフィードバック制御（以下FB制御）を行ってきたが、活性炭の供給位置よりも測定点の下流側にあるため、制御に遅れが生じるという問題があった。そこで今回、活性炭供給位置よりも上流側（エコノマイザ入口）に水銀濃度計と当社が独自開発したサンプリング装置を設置し、これらを用いてフィードフォワード制御（以下FF制御）を行う水銀濃度抑制技術を開発した。FB制御に比べてFF制御では活性炭供給量が21～49%少ないことに加え、大気への水銀放出量は82～84%低減しており、FF制御の有効性が確認された。

Until now, we used feedback (FB) control to control the supply of activated carbon to adsorb mercury, based on the value of a mercury concentration meter installed after the bag filter, but there was a problem in that control was delayed because the measurement point was downstream from the supply point of the activated carbon. Therefore, we installed a mercury concentration meter and a sampling device originally developed by our company on the upstream side (economizer inlet) of the activated carbon supply point and developed mercury concentration reduction technology that performs feedforward (FF) control using this equipment. FF control reduced activated carbon supply 21-49% and released 82-84% less mercury into the atmosphere, compared to FB control, confirming the effectiveness of the FF control.

### Key Words :

排ガス水銀濃度

Mercury concentration in flue gas

フィードフォワード制御

Feedforward control

活性炭

Activated carbon

### 【セールスポイント】

- ・エコノマイザ入口に水銀濃度計を設置することにより、水銀ピークの検知が約8分早くなった。
- ・前処理ろ過装置を設置することにより、市販の水銀濃度計を利用できた。
- ・FF制御により、水銀の大気放出を80%以上低減できた。
- ・FF制御により、活性炭供給量は同等の入口水銀濃度に対し、21～49%低減できた。

\*環境エンジニアリング事業本部 環境プラント事業部 プラント技術部 機能開発室

\*\*環境エンジニアリング事業本部 環境プラント事業部 プラント技術部 プロポーザル室

\*\*\*環境エンジニアリング事業部 環境プラント事業部 アフターサービス部 設備改善技術室

## まえがき

2017年の水俣条約発効に伴い、大気汚染防止法が改正され2018年に施行された。この改正により廃棄物焼却炉では、排ガス中の水銀濃度に $30 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ （新設）、 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ （既設）の基準が設定され、遵守が義務付けられている。

これまで当社では、水銀を吸着するバグフィルタ後に設置した水銀濃度計の値により活性炭供給量を制御するFB制御を行ってきたが、活性炭の供給位置よりも測定点が下流側にあるため、制御に遅れが生じるという問題があった。このため、活性炭供給位置よりも上流側（エコマイザ入口）に水銀濃度計を設置して、従来よりもいち早く水銀濃度ピークの発生を検知する技術の開発が望まれていた。

活性炭供給位置よりも上流側に水銀濃度計を設置するためには、除じんを行うバグフィルタよりも前からサンプリングする必要がある。水銀濃度計は、市販のバグフィルタ後用を使用したため、水銀濃度計のために除じんを行うサンプリング装置を独自に開発して設置した。また、水銀濃度計は応答速度の速いものを選定した。制御は、設置位置から煙突入口の水銀濃度上昇を予想して制御するFF制御とした。

本稿では、当社が納入したストーカ炉に導入したFF制御を用いた燃焼排ガス中水銀濃度抑制技術の概要および運転結果について報告する。

## 1. FF制御による燃焼排ガス中水銀濃度抑制技術

### 1.1 サンプリング位置と手法

図1にサンプリング位置、写真1に試験装置全景を示す。バグフィルタ前の極上流側で水銀濃度上昇を検知し活性炭供給量を増加すれば、水銀がバグフィルタに到達する前に活性炭を供給することができ、バグフィルタでの効果的な水銀除去が期待できる。このため、サンプリング位置はエコマイザ入口とした。また、水銀濃度計は通常バグフィルタの下流側に設置される市販の連続分析計を使用したため、除じん機能を有する独自のサンプリング装置を開発し、エコマイザ入口煙道中に挿入してサンプリングを行った。なおサンプリング位置の排ガス温度は約 $300^\circ\text{C}$ である。

図2にエコマイザ入口と煙突入口の各水銀濃度計の検出時間タイムチャートを示す。エコマイザ入口から煙突入口までの排ガス通過時間は、計算上約39秒であった。これに加えて、サンプリング時間

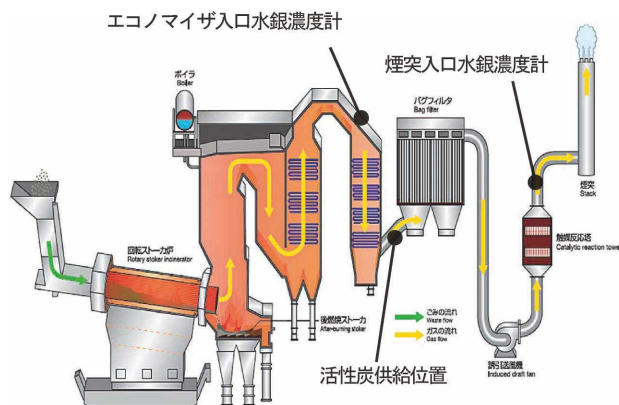


図1 サンプリング位置図

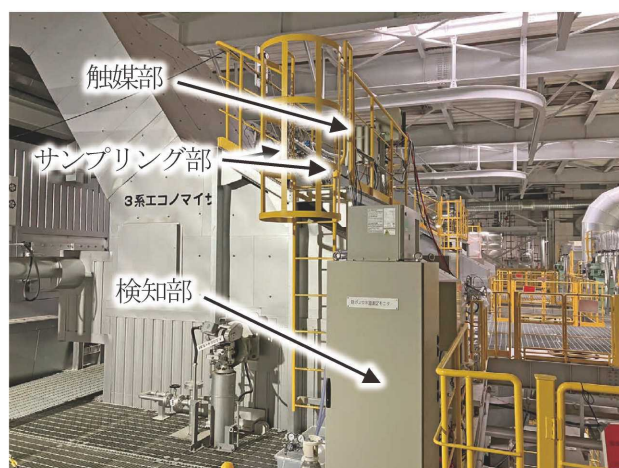


写真1 試験装置全景

がエコマイザ入口水銀濃度計の方が煙突入口水銀濃度より約5秒速いことと、エコマイザ入口水銀濃度計は、既設煙突入口水銀濃度計よりも約60秒速い応答時間であることから少なくとも約104秒の水銀濃度上昇の早期検知が期待できた。

### 1.2 制御方法

制御はエコマイザ入口水銀濃度をPV値とする単独のPID制御とした。図3に従来のFB制御、図4に本開発のFF制御のブロック線図を示す。予想される問題点としては、エコマイザ入口水銀濃度に応じた活性炭の増加量が不足し、煙突入口水銀濃度が下がり切らないことが考えられる。しかしながら32日間のFF制御試験期間中にその問題は発生しなかったため、バグフィルタろ布に担持された活性炭による吸着効果のみならずFF制御での増量が適切であったと考えられる。

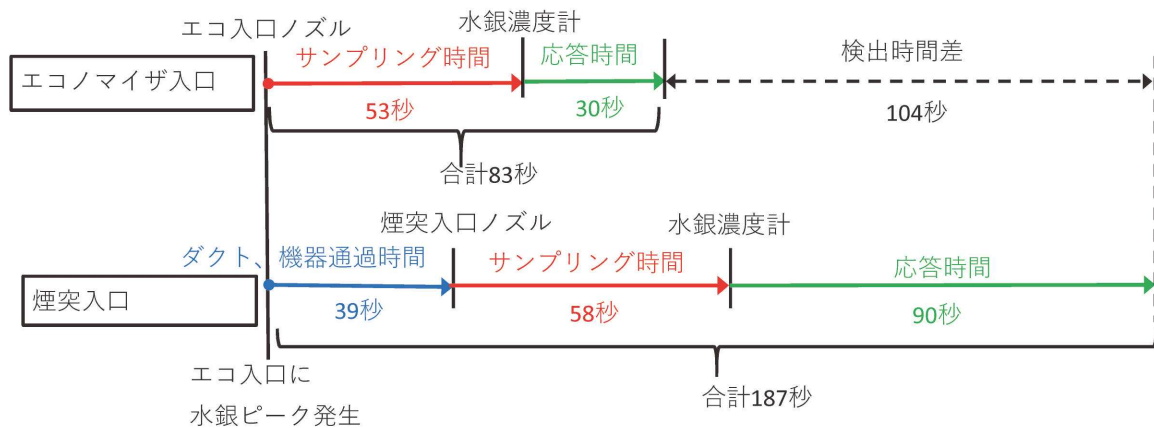


図2 水銀濃度計検出時間タイムチャート

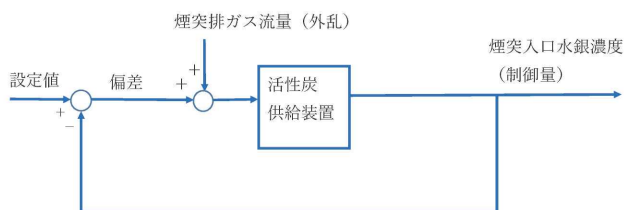


図3 FB制御ブロック線図

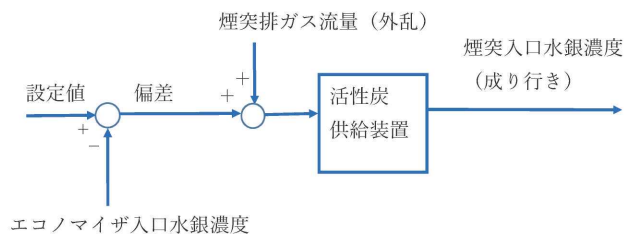


図4 FF制御ブロック線図

## 2. FF制御燃焼排ガス中水銀濃度抑制運転結果

### 2.1 水銀濃度の経時変化特性の比較

図5に試験期間中のエコノマイザ入口水銀濃度計と煙突入口排ガス水銀濃度計の瞬時値のトレンド比較、図6にピーク2の詳細のトレンドを示す。図5に示す通り、42日間の試験期間中に $150 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  ( $\text{O}_2$  12%換算値)を超えるピークは10回発生し、 $154 \sim 565 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  ( $\text{O}_2$  12%換算値)の範囲であった。図6に示す通り、エコノマイザ入口と煙突入口各水銀濃度計ピーク開始時間の差は6分程度(全ピーク平均8分)であり、当初想定 $104$ 秒に比べ、かなり大きい結果となった。これは、エコノマイザ入口と煙突入口の両水銀濃度計のサンプリング時間、応答時間の差に加えて、ピーク発生前に供給されバグフィルタ表面に広く保持されていた活性炭を触媒とした塩化第二水銀の還元反応を伴った吸着<sup>1)</sup>により、

高濃度の水銀が流入しても数分間は除去されるが、吸着し切れなくなった水銀がバグフィルタを通過してピークが発生するものと考えられる。

### 2.2 FF制御とFB制御の運転結果比較

表1に、従来のFB制御と今回試験したFF制御のピーク発生時の水銀除去性能や活性炭供給量の比較を示した。比較はピーク時のエコノマイザ入口水銀濃度が比較的近いピーク2とピーク5および、ピーク3とピーク9をそれぞれ比較①、比較②として行った。図7～10に各比較ピークのトレンドを示す。なお、表中の流入水銀量、流出水銀量は、それぞれの水銀濃度瞬時値のピーク開始時点からピーク終了時点までの水銀濃度に排ガスを乗じた値の積分値であり、水銀除去率はそれらの値を用いて算出した。また、活性炭供給量は、ピークの発生による増量開始時から終了時までの活性炭供給量の積分値である。

比較①、②の積分値から活性炭供給量はFF制御の方がそれぞれ49%、21%少ないにも関わらず、流出水銀量つまり大気への放出量は、FF制御により84%、82%低減しており、FF制御の有効性が確認された。

なお、FF制御は32日間継続し、期間中幾度かエコノマイザ入口水銀濃度にピークが現れたが、煙突入口水銀濃度は低く維持されており、最大でも $5 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ 以下( $\text{O}_2$  12%換算値)であった。

### 2.3 長期間データとの比較

2022年10月1日～2023年3月9日までの1～3号系のDCSのトレンドデータから、ピーク発生時間、ピーク時の水銀濃度を表2～4にまとめた。ここでのピークとは煙突入口水銀濃度瞬時値( $\text{O}_2$  12%換算値)がSV値である $5 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ を超え、活性炭の増量が行われた時のものとした。上記期間中、炉停止日を除いた運転日数は1号系89日、2号系122日、

3号系98日間であり、発生したピークは1号系4回、2号系10回、3号系22回であった。また最大のピーク時濃度は、1号系26.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ 、2号系79.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ 、3号系100.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ であった。

2023年5月11日～6月13日の期間中は、FF制御

を行った。この期間のピークデータを表5に示す。なお、FF制御期間中は5  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ を超えるピークは現れなかったが、エコマイザ入口水銀濃度の上昇による活性炭の増量制御がおこなわれたものをピークとして抽出した。煙突入口水銀濃度瞬時値 ( $\text{O}_2$

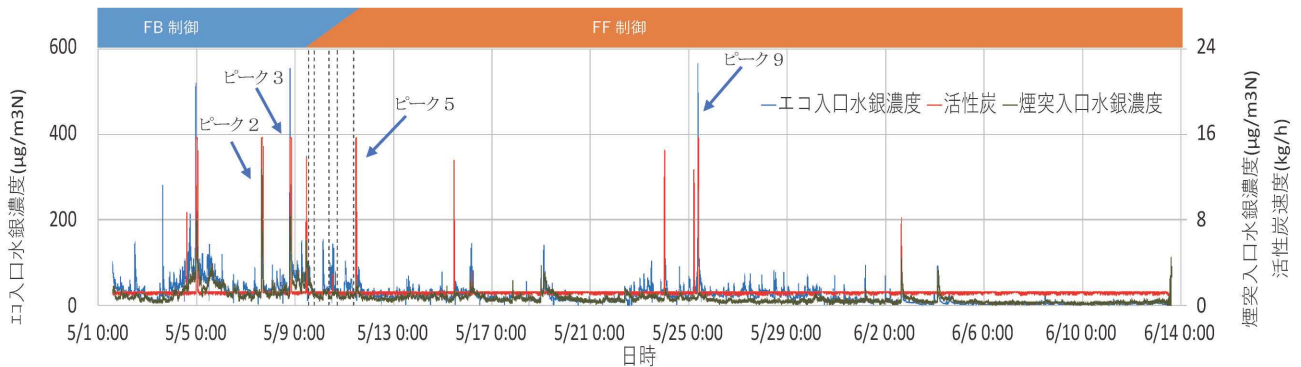


図5 エコマイザ入口と煙突入口水銀濃度

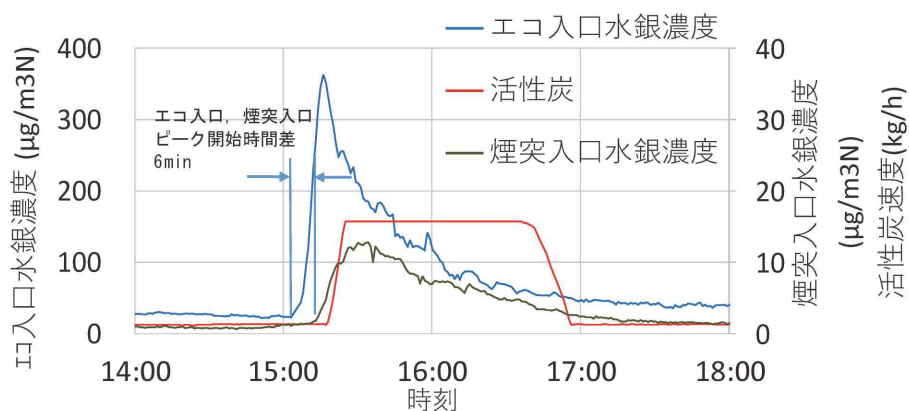


図6 ピーク2の詳細 (FB制御)

表1 ピーク発生時のFF制御とFB制御の比較

No.	制御種別	水銀濃度 ( $\text{O}_2 12\%$ 換算) 最大値 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )		活性炭供給量 最大値 (kg/h)	水銀除去率 1h 移動平均 最大値 (%)	積分値 (※積分時間幅は各ピークに応じて個別に設定)				
		瞬時値	1h 移動平均値			活性炭供給量 (kg)	流入水銀量 (g)	流出水銀量 (g)	水銀除去率 (%)	
比較①	2	FB	362	181	15.7	97.0	22.9	12.8	0.75	94.2
	5	FF	354	186	15.7	99.0	11.6(49%減)	10.5	0.12(84%減)	98.9
比較②	3	FB	555	287	15.7	98.9	24.1	24.0	0.84	96.5
	9	FF	565	241	15.7	99.5	19.0(21%減)	20.3	0.15(82%減)	99.3

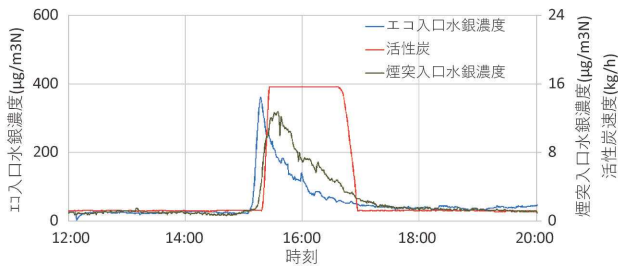


図7 比較①FB制御（ピーク2）

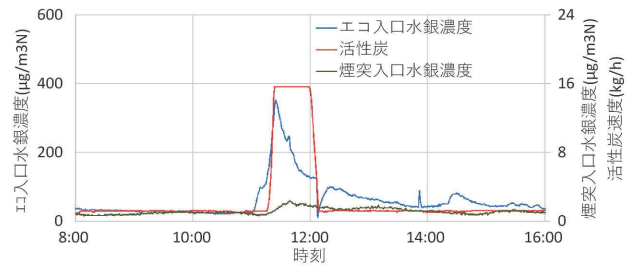


図8 比較①FF制御（ピーク5）

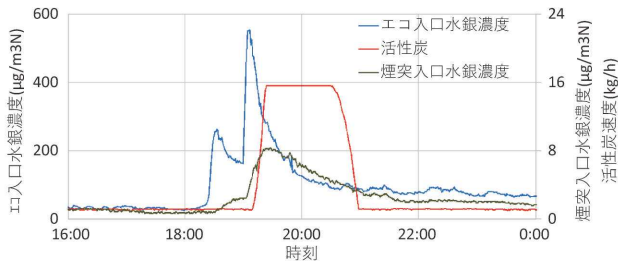


図9 比較②FB制御（ピーク3）

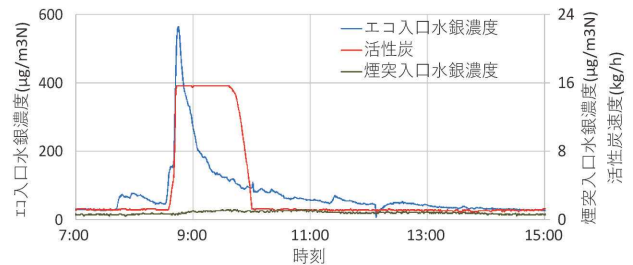


図10 比較②FF制御（ピーク9）

表2 長期ピークデータ（1号系）

No.	ピーク時刻	煙突入口水銀濃度 12%O <sub>2</sub> 換算 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )
1	2022 / 12 / 5 3:57	26.4
2	2022 / 12 / 19 22:39	6.4
3	2023 / 3 / 7 12:46	14.1
4	2023 / 3 / 8 3:02	6.1
平均値	—	13.3

：最大値

表3 長期ピークデータ（2号系）

No.	ピーク時刻	煙突入口水銀濃度 12%O <sub>2</sub> 換算 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )
1	2022 / 10 / 14 18:16	13.6
2	2022 / 10 / 27 19:41	21.6
3	2022 / 11 / 6 11:32	79.4
4	2022 / 11 / 8 1:50	7.0
5	2022 / 11 / 19 22:28	14.4
6	2022 / 12 / 22 4:28	32.4
7	2022 / 12 / 22 22:46	20.6
8	2022 / 12 / 24 10:45	7.3
9	2023 / 1 / 12 1:21	5.9
10	2023 / 2 / 15 21:08	7.4
平均値	—	21.0

：最大値

表4 長期ピークデータ（3号系）

No.	ピーク時刻	煙突入口水銀濃度 12%O <sub>2</sub> 換算 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )
1	2022 / 10 / 15 16:27	7.5
2	2022 / 10 / 18 8:43	9.1
3	2022 / 10 / 19 0:01	34.9
4	2022 / 10 / 22 1:11	11.9
5	2023 / 10 / 23 7:54	7.6
6	2022 / 10 / 27 12:47	19.9
7	2022 / 10 / 28 6:34	100.1
8	2022 / 10 / 30 23:47	52.8
9	2022 / 11 / 9 0:22	7.0
10	2022 / 11 / 14 2:41	100.1
11	2022 / 11 / 20 22:26	12.5
12	2022 / 11 / 23 1:22	10.9
13	2022 / 12 / 3 13:42	14.8
14	2022 / 12 / 8 17:40	13.6
15	2022 / 12 / 15 1:36	15.3
16	2022 / 12 / 16 1:59	11.6
17	2022 / 12 / 21 21:55	7.0
18	2022 / 12 / 22 19:28	100.1
19	2022 / 12 / 25 17:55	6.2
20	2022 / 12 / 26 16:43	6.6
21	2023 / 1 / 9 9:18	12.3
22	2023 / 1 / 10 1:52	5.9
平均値	—	25.8

：最大値

表5 FF制御試験ピークデータ

No.	ピーク時刻	煙突入口 水銀濃度 12%O <sub>2</sub> 換算 (μg / m <sup>3</sup> N)
1	2023 / 5 / 11 11 : 34	2.1
2	2023 / 5 / 15 11 : 25	1.4
3	2023 / 5 / 24 1 : 18	1.5
4	2023 / 5 / 25 5 : 12	0.9
5	2023 / 5 / 25 9 : 31	1.2
6	2023 / 6 / 2 15 : 30	4.4
平均値	—	1.9

：最大値

12%換算値)最大値は、4.4 μg/m<sup>3</sup>Nであり長期試験の最大値の1/6～1/23程度であった。またピーク時の煙突入口水銀濃度瞬時値(O<sub>2</sub>12%換算値)の平均値は、1号系13.3 μg/m<sup>3</sup>N、2号系21.0 μg/m<sup>3</sup>N、3号系25.8 μg/m<sup>3</sup>Nに対して今回試験のFF制御実施時は、1.9 μg/m<sup>3</sup>Nと1/10程度であり、FF制御を実施することにより流出水銀濃度を低く抑えることができた。

### 3. 水銀濃度計運転費用の削減

42日間の全試験期間中、水銀濃度計校正時のキャリブレーションファクタ(校正値/標準ガスの値)低下により写真2に示す触媒を交換する必要が生じた。これは、標準的な交換頻度とされている3～4カ月に対し、1/3程度の短さである。触媒は高価であるため、本技術の実用化のためには、触媒寿命を少なくとも標準的な交換頻度まで延ばす必要がある。

水銀濃度計は、2価の塩化第二水銀を0価の金属

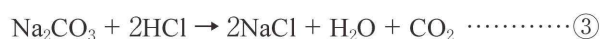
水銀に還元して測定している。触媒の成分は亜硫酸カリウムが使用されていると想定しており<sup>2), 3)</sup>、その還元式は式①の通りである。



FF制御用の水銀濃度計はバグフィルタ前に設置しているため、HCl濃度が高い。そのため式②による反応式で触媒成分である亜硫酸カリウムが必要以上に消費されたと考えられる。



そこで炭酸ナトリウムを充填した乾式スクラバを触媒の前に設置し、式③のようにHClを中和して触媒の寿命を延ばす方法<sup>3)</sup>を現在試験中である。



### むすび

一般的な水銀濃度計に独自のサンプリング装置を組み合わせた機器構成にて、FF制御による燃焼排ガス中の水銀濃度抑制試験を行った。その結果、FF制御よりも活性炭供給量を21～49%低減した上で、大気への水銀流出量を80%以上低減することができた。また32日間のFF制御連続稼働試験においても、煙突入口水銀濃度を低く維持した安定した運転ができています。今後も、本制御の長期間における有効性および安定性を確認していく所存である。

#### [参考文献]

- 1) 高岡昌輝, 武田信生, 岡島重伸: 廃棄物学会誌, Vol.6, No.6, 1995, p.235-244
- 2) 公開特許: 2007-268426
- 3) 石川浩二: Readout HORIBA Technical Reports, No.37, 2010, p.82-87