# The development in environmental-protection-technologies utilizing incineration plants for industrial waste

| | |
|---|---|
| 氏　　　　名 | 水越　裕治 |
| 学位の種類 | 博士(工学) |
| 学位記番号 | 博甲第８４０号 |
| 学位授与の日付 | 平成１８年９月２８日 |
| 学位授与の要件 | 課程博士（学位規則第４条第１項) |
| 学位授与の題目 | 産業廃棄物焼却炉による環境保全技術の開発 |
| 論文審査委員（主査) | 大谷　吉生（自然科学研究科・教授) |
| 論文審査委員（副主査) | 川西　琢也（自然科学研究科・助教授), 汲田　幹夫（自然科学研究科・助教授), 田村　和弘（自然科学研究科・教授), 二宮　善彦（中部大学・教授) |


**Abstract**

The development in environmental-protection-technologies utilizing incineration plants for industrial waste

The problems on environmental pollution by dioxins and dioxin-like-compounds generated by the combustion of industrial wastes seem to be settled because of the enforcement of tightened regulations as well as the developments of countermeasure techniques for dioxins emission. Now, incineration plants are asked to have versatile functions to achieve sustainable societies, e.g., recycle or reutilization of solid wastes, recovery of heat generated by the combustion of wastes, in addition to the conventional functions, i.e., reduction of waste mass, sterilization of medical wastes, etc.

The present work includes the history of industrial hygiene management via incineration, the evolution of incineration systems for minimizing the environmental impact, the fundamental combustion control and emission control techniques of industrial incinerator.

The reaction mechanisms between hydrated lime and hydrogen chloride at a high temperature are studied using a Short Time Differential Reactor (STDR) by measuring the influences of temperature, humidity, HCl concentration and $Ca(OH)_2$ particle properties onto the reaction rate. It is found that the reaction is an equi-molar reaction to form CaClOH instead of $CaCl_2$, and that chemical reaction governs the removal of HCl when the surface area of $Ca(OH)_2$ particles is larger than 20 $m^2/g$.

In order to prevent the secondary pollution by fly ash generated by the combustion of solid wastes, heat treatment of fly ash is carried out in laboratory-scale furnace. The solidification of Ca-rich fly ash is found to occur by the formation of CaClOH, but the solidification is successfully suppressed by the addition of mullite, which also enhances the decomposition of dioxins.

Furthermore, a combustion/fusion model is proposed for the heat treatment of dehydrated sewage sludge under oxygen–rich environment. The model successfully predicted SO2 and CO2 concentrations in flue gas as well as the reduction of sewage sludge height during the combustion.

Combustion/fusion of raw sewage sludge at various $O_2$-concentrations are studied

experimentally. It is found that the combustion rate is controlled by intra-particle mass transfer of water and volatiles.

Finally, the prospects of incineration plants are discussed through the development of environmentally benign incineration systems.

## 論文要旨

一時期の廃棄物焼却設備に起因するダイオキシン類による環境汚染問題が一段落し，近年廃棄物焼却設備には，廃棄物の減量・滅菌の機能に加え，循環型社会形成のため廃棄物を資源として再利用させる機能や焼却時に発生する新エネルギー回収機能が求められるようになってきた。焼却による衛生管理の歴史，筆者が開発した焼却炉の環境負荷を極力少なくするための取り組み，研究開発の歴史について述べる。

但し，廃棄物の処理には必然的に熱処理や化学処理が必要なために有害物の発生が懸念される。特に焼却処理で排出される排ガスを無害化させるための分離技術や除塵技術の開発には多くの基礎研究が必要である。また，燃焼は言い換えれば化学反応であり，反応前後のメカニズムの解明が焼却炉の開発には不可欠である。

次に，産業廃棄物焼却炉は比較的安定した焼却物を処理する都市ごみ焼却炉と異なり，性状や熱量が刻々と大きく変動する産業廃棄物に対応するためには，バッファー容量の大きな焼却炉が必要であり，これらには長年燃焼関連設備に携わってきた筆者の経験工学から生み出されたテクノロジーが必要であると言える。

燃焼工学に基づくメカニズムの解明他について以下に示す４編の研究内容を述べると共に，将来の焼却設備が果たす役割について考察する。

緒言では，本論文の背景と目的について概説した後，本論文の構成について述べた。

第１章では，筆者が開発した焼却プラントの開発の歴史を述べ，経験工学から見出したその時代の要求する設備開発について，最新式の焼却設備を例に取り，従来の焼却設備が成し得なかった有害物の高温無害化に供する燃料の大幅節約を実現した焼却設備について述べた。また，長年の開発においてひとつのセオリーが見出され，燃焼は化学反応に他ならず，それが高温域での反応であるために，ダイオキシン類の合成等の常温では起きない反応が起きるため，それらを無害化処理するためにはメカニズムの解明のための基礎研究が非常に重要であることが解り，以下の章にてそれらの各論を述べた。

第２章においては，焼却処理で排出される排ガスを排出基準まで浄化させるための除塵装置、たとえばバグフィルターにおける酸性ガスと反応助剤との反応機構について研究を行った。排ガス中に含まれる酸性ガスの内、塩化水素ガス「以下 HCl ガス」と反応助剤である消石灰「化学式 $Ca(OH)_2$」との反応を取り上げ、薄い消石灰の充填層を持つ反応容器に高速で HCl を含む模擬排ガスを送り込む方法（STDR 法）により、製法の異なる消石灰を用いて、HCl ガスと反応助剤である消石灰との最終反応率を測定し反応機構を明らかにした。その結果、模擬排ガス中に水蒸気が共存しない場合は、比表面積が大きいほどまた反応温度が高いほど最終反応率は高くなった。一方、水蒸気が共存する場合は、最終反応率は温度に対し最大値を持つ。また、消石灰の比表面積は大きくなるほど最終反応率は高くなる。しかしながら、比表面積が $20m^2/g$ 以上となると反応速度は反応抵抗支配となる事を明らかにした。さらに、消石灰と HCl ガスとの反応生成物は通念的に言われていた $CaCl_2$ ではなく、CaClOH であることを明

らかにした。この反応では、消石灰１モルに対し HCl ガス１モルが反応するが、この結果は産業廃棄物焼却プラントのバグフィルター飛灰の分析結果と一致する。

これら、産業廃棄物の焼却処理を行った際に発生する飛灰や焼却灰中には、酸性ガスを中和した化合物の他、有害な重金属化合物と同時に希少な重金属化合物が含まれている。それらを有効な資源として再利用するための回収分離技術で従来課題となっていた熱処理過程における飛灰の固化について次章で述べる。

第３章においては，循環型社会を形成するにあたり焼却により発生する焼却飛灰の有効利用を図るための課題解決のための研究開発について述べる。従来，焼却飛灰は排ガス処理装置にバグフィルタを用いる関係上，酸性ガスの中和剤として，一般的には消石灰を用いているため、焼却飛灰は酸性ガスと消石灰が反応したカルシウム化合物が多く存在する。

また、ダイオキシン類が捕集されており、飛灰を再利用するためには、含まれるダイオキシン類の分解除去と含まれる重金属の回収を行う必要がある。これまでの研究では、酸化雰囲気中で 500 ℃以上の熱処理を行うと飛灰が固化することが経験的に知られていた。従って，還元雰囲気での加熱や固化温度以下での処理が行われていたが、装置の複雑さやダイオキシン類分解性能の面で課題が残っていた。そのため、有効利用に制限が加わり，それら多くが最終処分場に埋め立てられており，回収分離による資源リサイクルに大きな障害になっていた。そこで，その固化機構を解明することにより，処理方法上の制限を緩和し，多くの希少金属を含有している焼却飛灰から金属回収を可能とする手法について研究を行った。実験装置は管状電気炉設置された充填層に飛灰を置き、温度維持しながら上部より乾燥空気を送り込み、フィルターで捕集粒子をまたガス成分をインピンジャーで吸収させる方式を用いた。温度は 200℃から 700℃まで変化させた。その結果、飛灰のみの場合 700℃で固化し飛灰の固化原因物質は CaClOH であることがわかった。飛灰に水酸化ナトリウム（化学式 $NaOH$）、ムライト（化学式 $Al_6Si_2O_{13}$）及びムライトを含む石炭灰（発電用石炭ボイラーの燃焼残渣灰）を混合して加熱すれば、CaClOH は分解され従来固化していた温度域での固化を防止することが出来ることを見出した。さらに、飛灰中に含まれるダイオキシン類の分解を促進する事も明らかになった。

廃棄物中の金属資源リサイクルでの分野で技術が確立していない分野として、下水汚泥が挙げられる。下水汚泥は我々の生活で発生した汚泥であり、体内より有害な重金属等が排出されている。また、温泉地域等地下水や土壌が特殊な地域の下水汚泥は、砒素や鉄濃度が高いことが知られている。これらの下水汚泥は大都市部では、焼却処理され管理型処分場に埋めた照られたり、熔融処理によりスラグ化されているが、処理場の大部分を占める中小処理場では脱水し水分 80%程度の脱水汚泥として、管理型処分場へ埋め立てられている。そこで、次章ではこれら下水汚泥からの資源回収を前提とした小型で効率の良い熔融炉の開発について述べる。

第４章においては，現在社会問題化されている最終処分場（埋立場）の不足に対応するため，これまで最終処分場に埋立するしか処理手段が無かった地方中小自治体が行う小規模下水処理場において発生する汚泥の再資源化技術の研究開発について述べる。この技術は産業廃棄物の半分以上を占める汚泥一般を小型の溶融炉により溶融処理するものである。現在，大都市の下水汚泥は溶融炉を用いて処理する事が一般的になっているがその設備の建設・維持管理には巨額の予算が必要である。しかし，昨今の厳しい中小規模自治体における財政事情の下，シンプルで維持管理性が優れた溶融プラントが求められている。従来の常識である小型溶融炉で低コスト処理を実現する

のは困難であったが、本研究ではすべての下水処理場発生する水分 80%程度の脱水汚泥を乾燥させる事なく、1350℃の高温領域に投入した場合の汚泥の熔融プラントを構築し、実運転データから燃焼挙動モデルを明らかにした。その結果、脱水汚泥の総括反応速度として、$2.3\times10^{-3}\mathrm{m}\cdot\mathrm{min}^{-1}$が得られた。脱水汚泥を直接投入しても、汚泥表面で水分や揮発成分のガス化が起り緩慢な燃焼であることが明確になった。緩慢な燃焼であるので、排ガス中への溶融ミストの飛散量は従来システムに比べ少ないため、排ガス中の固形分中の金属成分割合は高いと期待され、溶融スラグと合わせ、これらの金属成分の回収技術は今後のテーマである。本技術は、中小自治体レベルに対応可能なスケールメリットを追及した熔融炉の開発であり、今後産業界に大きく寄与する事が可能であると考える。

第5章においては、4章で述べた熔融プラントでの熔融メカニズムについて、一個の脱水汚泥粒子に着目し、縦型電気式反応管を用いて、反応時間ごとの粒子性状を観察してその反応メカニズムを解明した。脱水汚泥の燃焼過程は複雑で、以下の過程の逐次的な過程からなる。①水分の蒸発、②揮発分の放出／Auto-gasification、③揮発分のガス燃焼、④灰の溶融、⑤チャーの燃焼、⑥溶融灰の凝集・粒子化。水分の蒸発と揮発分の放出は脱水汚泥の表面でほぼ同時におこり、反応界面は、未反応核モデル的に表面から内部へと進行する。一方、生成した水蒸気および揮発分は、逆に粒子内部から外部へ移動し、粒子表面近傍の外気で酸素と接触して燃焼反応がおこる。この燃焼熱によって、粒子表面の温度が上昇し、粒子表面に生成した灰層が溶融する。溶融灰は反応の進行とともに凝集して粒子化し、チャー粒子表面を覆うようになる。汚泥の燃焼においては、揮発分放出後の残渣の固体チャーの量は少なく、その結果、チャーの燃焼過程は重要な律速段階にはならない。むしろ、チャー中の炭素が灰や溶融スラグの還元剤に使用され、溶融灰の粒子化を促進していると考えられる。チャーが粒子表面に残存する理由は、水分蒸発と揮発分放出などの過程において固体表面から周囲への継続的なガス流れが発生するため、チャー表面への酸素の拡散が妨げられるからで、そのため揮発分燃焼からチャーの燃焼反応に移行するのに時間がかかるからである。

脱水汚泥の燃焼に対する未反応核モデルを適用した反応解析を行った。この結果、概ね

$$t^{*}=k_i d_i^2$$

の関係が得られ、物質移動が脱水汚泥の総括的な反応過程における律速段階になっていることが示された。

また結びとして，将来の焼却設備に求められる循環型社会形成に貢献する設備開発について述べた。

# 学位論文審査結果の要旨

平成18年7月31日に口頭発表と質疑応答を行い、その後に開催した学位論文審査会において以下のように決定した。

本論文は、産業廃棄物焼却炉の歴史をレビューするとともに、焼却炉を開発するために筆者らが検討した環境保全要素技術をまとめ、さらに、これまでの筆者の経験から、将来の焼却設備の在り方について提言を行ったものである。環境保全要素技術としては、焼却炉排ガス中の塩化水素ガスを除去するために煙道中に投入される消石灰粒子と塩化水素の高温での反応機構について明らかにするとともに、焼却炉飛灰中のダイオキシンを無害化するための熱処理法、および飛灰の熱処理時に問題となる高温での飛灰の固化防止法を提案した。また、高温・酸素富化条件で脱水汚泥を溶融する場合の燃焼モデルの提案を行い、溶融炉から排出される$SO_2$、$CO_2$濃度、および脱水汚泥堆積高さの推定を可能にした。さらに、酸素濃度が異なる雰囲気での、脱水汚泥の燃焼・溶融機構について検討を行い、モデル燃焼・溶融実験により、脱水汚泥の燃焼と溶融機構を明らかにするとともに、燃焼溶融の律速過程は水分あるいは揮発性成分の脱水汚泥内の物質移動過程であることを明らかにした。

本論文は、産業廃棄物焼却炉による二次的環境汚染を防止するために筆者らが開発した技術をまとめただけでなく、焼却炉を利用して積極的に環境保全を行う上で重要な提案を行っており、博士（工学）の学位に値すると判断する。