

下水汚泥炭化物の自己発熱性およびその抑制技術に関する研究

その他（別言語等）のタイトル	A study on self-heating characteristics of carbonized sewage sludge and technologies to control it
著者	上田 厚志
学位名	博士（工学）
学位の種別	課程博士
報告番号	甲第427号
研究科・専攻	工学専攻
学位授与年月日	2019-03-25
URL	http://doi.org/10.15118/00009900

氏 名 上 田 厚 志

学 位 論 文 題 目 下 水 汚 泥 炭 化 物 の 自 己 発 熱 性 お よ び そ の 抑 制 技 術 に 関 す る 研 究

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 河 合 秀 樹
教 授 板 倉 賢 一
准 教 授 大 平 勇 一

論文内容の要旨

下水汚泥は、他のバイオマスと比較して量・質ともに年間を通して安定しており、収集や運搬についても既存の都市インフラを活用できる等、メリットの多い純国産のバイオマスである。下水汚泥の燃料利用については、2012年度頃より普及が進んでおり、政策的にもさらに後押しする大きな流れが形成されつつある。一方で、RDFに代表される廃棄物由来の固形燃料の自己発熱性に起因して、重大な火災・爆発事故につながるケースが顕在化しており、その特性を十分に理解し、対策につなげることが求められている。

本来廃棄物である下水汚泥から製造した炭化物（以下、下水汚泥炭化物という）は、下水汚泥特有の不快臭が軽減され、性状が石炭に近いので、石炭代替燃料として利用しやすい。しかし、下水汚泥には人間活動に伴って排出される成分や、下水処理場の処理工程で添加される薬剤が含まれる等、石炭と同様に自己発熱性を評価することはできない。石炭においても、自己発熱のメカニズムが全て明らかになっているわけではないことを勘案すると、下水汚泥炭化物の自己発熱性について個別に十分な検証が必要である。

本研究では、下水汚泥炭化物の性状と自己発熱性の関係を明らかにし、実際に下水汚泥炭化物を製造する商用プラントを対象として、適用可能な自己発熱性抑制技術について検討するとともに、下水汚泥炭化物の自己発熱性を従来手法よりも簡便に評価可能な試験方法を開発することを目的とした。本論文の構成は以下の通りである。

第1章では、本研究の背景ならびに目的について述べている。

第2章では、下水汚泥炭化物について、炭化度と炭化物性状の関係（炭化特性）を明らかにするとともに、石炭との比較を行い、固形燃料としてのポテンシャルについて論述した。また、炭化度と自己発熱性の関係、鉄化合物含有率と自己発熱性の関係について検証した。

第3章では、下水処理場の処理工程で広く使用されている薬剤であるポリ硫酸第二鉄に注目し、自己発熱性へ与える影響について検証した。鉄化合物の酸化反応による発熱挙動については、TG-DTAによる測定にて確認した。また、酸化反応に寄与する鉄化合物を特定するため、大型放射光施設（SPring-8）を用いたXAFS測定ならびにXRDによる鉄化合物の形態解析を行った。

第4章では、下水汚泥炭化物を製造する商用プラントに適用可能な自己発熱性抑制技術

の検討を行った。検討した技術は大きく分けて「炭化物の搬送過程における強制酸化」と「炭化物の貯留過程における強制酸化」の2種類である。

第5章では、自己発熱性の試験方法に関して従来の試験方法では試験期間約3日間試料量約8Lが必要であり、日常管理に取り込みにくいという課題があったことから、従来方式よりも短期間かつ少量の試料量で評価できる試験手法の開発を行った。

そして、以上で得られた成果を第6章にて総括している。

ABSTRACT

Sewage sludge is a biomass expected to be utilized as energy source, but due to its moisture and odor it is difficult to utilize as it is. Carbonization technology makes sewage sludge similar to coal and remove odor, so it becomes easier to utilize as fuel. On the other hand, carbonized sewage sludge has self-heating characteristics like coal, so it is important to understand its characteristics and deal with carefully. In this study, properties of carbonized sewage sludge and self-heating characteristics were measured, and the relationships between them were revealed. And technologies to control self-heating characteristics were examined for commercial plants that actually produce carbonized sewage sludge. In addition, a test method that can evaluate self-heating characteristics of carbonized sewage sludge more easily than conventional methods was developed. The structure of this thesis is as follows.

Chapter 1 describes the background and objectives of this study.

Chapter 2 revealed the relationships between degree of carbonization and properties of carbonized sewage sludge, and potential as a solid fuel was discussed compared with coal. And the relationships between self-heating characteristics and degree of carbonization, iron compound content were verified.

Chapter 3 focused on poly ferric sulfate that is one of the chemicals widely used in sewage treatment plants, and the influence of poly ferric sulfate on self-heating characteristics was examined. Thermal behavior of iron compounds due to low temperature oxidation was measured by TG-DTA. In order to identify the iron compounds causing low temperature oxidation, elemental speciation of iron compounds was conducted by XAFS and XRD.

In Chapter 4, technologies to control self-heating characteristics for commercial plants that actually produce carbonized sewage sludge were examined. Examined technologies are roughly divided into two types: "forced oxidation in transport process" and "forced oxidation in storage process".

In Chapter 5, a test method that can evaluate self-heating characteristics of carbonized sewage sludge more easily than conventional methods was developed. Because the developed method reduced test period and sample volume, it has become easier to apply to daily management.

Chapter 6 summarizes the results obtained through all chapters.

論文審査結果の要旨

下水汚泥は量・質とも安定供給が見込めるバイオマスであるが、その75%は未利用でありエネルギーの再生化が望まれる。しかし、その固形燃料化は自己発熱性を有することから安全指標の確立が急務である。本論文では、下水汚泥炭化物の性状と自己発熱性の関係を検証し、実プラントに適用できる自己発熱抑制技術について検討した。これより、中程度の炭化度で内部化合物の還元化が進み、自己発熱性が最も高くなることが分かった。また下水処理工程で広く普及しているポリ硫酸第二鉄が汚泥に含まれる場合、その炭化物は自己発熱性が上昇する傾向を見つけた。これについては、より詳細な実験解析を行い、 $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ($x=1, 4, 7$)に含まれる二価の鉄イオンが、炭化物の存在で $\text{Fe}(\text{OH})\text{SO}_4$ の三価鉄イオンに酸化されることが予想され、その際に発生する熱量が自己発熱性に起因することを示唆した。これらの知見と燃料物粒径や空気量の変化等、環境因子を変化させて燃焼の伝熱特性を考慮し、実プラントでの自己発熱抑制技術の検討を行った。

実プラントでは、(1) 搬送プロセス(スクリーコンベアの3段直列組み合わせ)を利用したもの、(2) 炭化物の貯留プロセスを利用したもの、更には(3) 炭化物の粒径に寄らない自己発熱抑制技術についても検討している。(1) 搬送プロセスの利用により、スクリーコンベアにおける反応温度と、得られた炭化物の通気式発熱特性試験による上昇温度には負の相関がみられ、反応温度が高いほど炭化物の自己発熱性が抑制された。また空気供給量が多いほど酸化反応が促進され、自己発熱性の抑制に繋がることが分かった。例えば反応温度として 230°C 付近の環境下で燃料を酸化した場合、分オーダーで自己発熱性が抑制される。(2) 貯留プロセスの利用により、蓄熱環境にある貯留ホップ内部の温度を一定に保持するには、炭化物の残留水分による蒸発潜熱を利用する方法が効果的であることが分かった。水分の残留がある限り貯留ホップ内部の温度は水の沸点以上には上らない。またホップ内の通風をゼロにした場合、滞留時間2日の方が1日に比べて自己発熱性が大幅に抑制された。更には強制通気を施した場合、滞留時間1日でも自己発熱性を低レベルに抑制

することができた。更には、炭化物の粒径に寄らない自己発熱技術についても、貯留ホッパの知見を利用し、安価でシンプルな抑制法を考案して、より実プラントでのオペレーションに寄与できる改善を提案している。

以上より、本論文は下水汚泥炭化物に関する自己発熱性を基礎研究から実プラントオペレーションへの応用に至るまで有益な知見を見出しており、博士論文の価値を有すると判断される。