

論文の要旨

題目 木質バイオマスボイラ燃焼灰の有効利用法の開発

(Development of Utilization Methodology for Woody Biomass Boiler Ash)

氏名 前田 典生

木質バイオマスを用いたボイラ発電プラントは、再生可能エネルギーの一つとして二酸化炭素の排出抑制に寄与するのみならず、わが国の山林の保全、林業の活性化にもつながり、近年導入促進に向けた動きが活発化している。しかしながら、わが国ではこれまで木質バイオマス燃焼時に発生する燃焼灰が有効利用されることはなく、ほとんどが産業廃棄物として埋立処分されており、その費用がボイラ発電施設の維持管理費に占める割合は少なくない。平成 25 年 6 月の環境省の通達により、建築廃材を含まない木質燃料を使用しているボイラ施設から排出された燃焼灰で有効活用されるものは、産業廃棄物とはみなされないこととなった。これにより、燃焼灰の取扱いに関する規制が緩和され、再資源化等の有効利用が可能となった。

本論文は、木質バイオマス燃焼灰にカリウム成分が多く含まれていることから、主に燃焼灰の肥料化に向けての研究をまとめた。肥料として有効利用し拡販するためには、「普通肥料」の一つである「化成肥料」の原料として用いることが適している。「化成肥料」の成分保証値としては、窒素、リン、カリウムのいずれか 2 成分以上について 10%以上の濃度が必要であるとの規定があるが、肥料製造過程でリンを添加することでカリウム成分が希釈されることも考慮し、燃焼灰中のカリウム濃度が K_2O 換算で 20%以上を研究の目標値とした。また、含有を許される有害成分の最大量が規定されている「化成肥料の公定規格」を満足し肥料原料としての安全性が確保できるかを検討した。

また、木質バイオマス燃焼灰の肥料化以外の有効利用として、「木質バイオマス燃焼灰から抽出したカリウム成分を K 源およびアルカリ源とした K 型ゼオライトの合成と合成した K 型ゼオライトの Cs^+ 吸着材としての有効性」、「セメント原料としての再資源化」および「合板接着剤の充填剤としての再資源化」に関する検討を行った。

本論文は第 1 章の序論を含めて 6 章の構成とし、内容は以下の通りである。

第 2 章では、木質バイオマス燃焼灰の再資源化を実現するための基礎データを取得するため、実プラントから排出される燃焼灰の性状を検討した。燃焼灰の中位径が減少するに従い、カリウム濃度が増加し、 $10\ \mu m$ 以下の粒子径範囲では強い粒子径依存性を有することがわかった。実験室規模で分級処理することにより、肥料化に必要なカリウム濃度以上まで濃縮可能であることが確認できた。

一方、燃焼方式、燃料種の異なる実プラントから排出されるバグフィルタ灰中のカリウム濃度に違いが見られたが、各プラントともバイオマス燃料中に含まれる灰分から算出した燃焼灰質量と、実際に排出された燃焼灰総量は、おおむね一致した。同様にバイオマス燃料中のカリウム濃度から算出したカリウム量と、実際に排出された燃焼灰質量および各燃焼灰に含まれるカリウム濃度から算出されたカリウム総量とも、おおむね一致した。このことから、燃焼方式は、燃焼灰中のカリウム成分に影響を与えず、木質バイオマス燃料中のカリウム成分のほとんどが燃焼灰中に残留することがわかった。すなわち、燃焼灰中のカリウム濃度は、木質バイオマス燃料中に含まれるカリウム量により異なることがわかった。

また、木質バイオマス燃焼灰が「化成肥料」の原料として利用できることの確認を目的とし、「カリウ

ム成分は、水溶性であること」、「カリウム成分を濃縮した燃焼灰中の重金属類濃度は、『化成肥料』の公定規格で許容される含有量よりも十分に低いこと」、も明らかにした。燃焼灰の中和処理で、細粒状にしたハンドリング性の良い再資源化肥料の肥効をコマツナ、ハウレンソウで確認した結果、慣行化学肥料（塩化カリ）と同等以上であることが明らかとなり、燃焼灰が肥料原料として利用可能であることが示唆された。

第3章では、実証規模での燃焼灰肥料化のための基礎的検討として、実際の木質バイオマスボイラプラント内に実証設備を設置し、プラント規模でのカリウム成分の濃縮実験を行った。実証実験は、木質バイオマスボイラ燃焼排ガスの一部を分岐させ、実証用分級装置（燃焼灰分離用サイクロン、濃縮カリウム回収用バグフィルタ）へ導入することで、燃焼灰を分級した。第2章の実験室規模の分級による燃焼灰のカリウム成分濃縮基礎実験と同様の結果が得られ、35%以上の非常に高いカリウム濃度を含有する燃焼灰を分離回収できることが明らかとなり、「化成肥料」の原料として必要な濃度（ K_2O 換算で20%）以上まで濃縮可能であることが実プラント規模の実験で確認された。

また、本章の中で燃焼灰の分級に用いるサイクロンの高性能化の検討を行った。サイクロン入口部に直管からなる整流部を設置することによるサイクロンの分離性能の向上を数値シミュレーションで評価した結果、整流部を設置することにより、粒子濃度分布の一様性が増大し、整流部を設置しないサイクロンに比べ、サイクロン外壁側を通過する粒子が増加した。この効果がサイクロンの分離性能を向上させることが数値シミュレーションによって示唆された。整流部がサイクロンの部分分離効率に与える影響を実験により確認した結果、分離性能が向上し、50%分離径は微細化することも確認できた。

第4章では、燃焼灰肥料化の実用化に向けて、燃料種や燃焼方式が異なる複数のプラントから排出される燃焼灰を採取し、各種性状の粒子径依存性を検討した。未利用材や一般木材を燃料としているプラントは、カリウムを多く含有している微粉側を分離することでカリウム成分を高濃度で分離濃縮が可能であった。重金属類についても「化成肥料」の公定規格を満足する燃焼灰が得られ、肥料の原料として使用可能であることがわかった。一方、建築廃材を燃料としているプラントの燃焼灰は、カリウム成分を多く含む微粉側を分離すると重金属類も高濃度で分離され、肥料の公定規格を超過する場合があった。木質バイオマス燃焼灰の含有成分およびその濃度については、燃焼方式や施設規模による差も見られず、木質バイオマス燃焼灰の含有成分の濃度は、燃料種の違いによるものであると判明した。

また、実際の木質バイオマスボイラプラントで実証実験を行い、燃焼灰の肥料成分分離・濃縮実験を実施し、肥料化の評価を行った。実証実験は、大規模の木質バイオマスボイラプラントから排出される燃焼灰全量を、機械式遠心分離分級機を有した実証実験装置で粗粉と微粉に分級し、燃焼灰中のカリウム、重金属類などの成分分析を行った。実証実験においても実験室規模での分級実験と同等の結果を得ることができ、実用規模で燃焼灰の成分分離が可能なシステムを開発することができた。

また、本章の中で燃焼灰中のカリウム存在形態とカリウム濃縮率に与える影響の検討を行った。水とエタノールを分散媒とした燃焼灰の積算分布と燃焼灰を水に溶解させた前後の質量減少と燃焼灰のカリウム濃度さえわかれば、燃焼灰のカリウム成分の濃縮率を算出することができることがわかった。

第5章では、肥料以外の有効利用法として、石炭灰をSi源、Al源として、木質バイオマス燃焼灰から抽出したカリウム成分をK源としてK型ゼオライトを合成し、その性状を評価した。KOH濃度0.4mol/Lでは木質バイオマス燃焼灰を2.0g以上用いることでゼオライト結晶の生成が確認できたが、KOH濃度

の低い 0.25mol/L では、木質バイオマス燃焼灰を 5.0g 以上、KOH 濃度 0.1 mol/L では 8.0g 以上を使用する必要があった。NH₄⁺吸着容量は、KOH 濃度 0.4, 0.25 および 0.1 mol/L において、木質バイオマス燃焼灰の使用量がそれぞれ 2.0, 5.0 および 8.0 g で吸着容量が 40 mg/g まで急激に増加し、ゼオライト結晶の生成に必要となる燃焼灰使用量と一致した。また、燃焼灰を添加して水熱合成した K 型ゼオライトは、KOH のみを K 源とした K 型ゼオライトと同等の Cs⁺吸着容量を有していることがわかり、燃焼灰が K 型ゼオライト合成の K 源として代替可能であることを見出した。すなわち、火力発電所から排出される石炭灰と木質バイオマス発電燃焼灰を同時に再資源化できることを示した。

また、「セメント原料」と「合板の接着剤の充填剤」としての再資源化についての検討を行った。セメント原料としての利用を検討したが、粒子径の大きな木質バイオマス燃焼灰であってもカリウム濃度が高く、原料としての受入れ基準 ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}\times 0.658 < 4\%$) 大きく超過する結果となったため、セメント原料として現在使用されている廃棄物、副産物の代替としての優位性は見いだせなかった。一方、合板の接着剤の充填剤としての利用は、粒子径の細かい燃焼灰であれば、合板接着剤の充填剤として利用できる可能性が示唆された。日本には合板製造メーカーが出資している木質バイオマスボイラ発電プラントがあり、その場合、合板製造工場にボイラ発電プラントを併設しているケースが多い。したがって、木質バイオマスボイラ発電プラントで発生した燃焼灰をそのまま合板製造工場接着剤の充填剤として利用できれば、燃焼灰の輸送費が不要となり、かつ現状充填剤として使用している炭酸カルシウムの維持管理費が不要となるため、燃焼灰の再資源化が容易となることが予想される。

第 6 章では、本研究で得られた成果について総括した。