

氏名	くぼた ひろし 久保田 洋		
学位の種類	博士（工学）		
報告番号	甲第 1802 号		
学位授与の日付	令和 2 年 3 月 16 日		
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当（課程博士）		
学位論文題目	一般廃棄物焼却灰の散水・通気処理による安定化促進技術と土木資材化に関する研究		
論文審査委員	(主査) 福岡大学	教授	佐藤 研一
	(副査) 福岡大学	教授	樋口 壯太郎
	福岡大学	教授	村上 哲
	九州大学大学院	教授	島岡 隆行

## 内容の要旨

わが国の一般廃棄物の処理量は年間約 4,100 万 t あり、そのうち 80%に相当する 3,300 万 t が直接焼却処理されている。焼却処理等の中間処理を経て最終処分場への埋め立てられる量は 390 万 t にのぼる。焼却処理により発生する焼却残渣は最終処分量の 8 割近くに達しており、その安定化は処分場の「安全・安心」な維持管理やリサイクル促進という観点からも極めて重要な役割を担っている。現在、国内では重金属等を含む一般廃棄物焼却残渣をリサイクルする方法としては、熔融や焼成といった熱処理が主流である。一方、焼却灰（焼却主灰）を土木資材としてリサイクルしている欧州では、エージングと呼ばれる自然の降雨による洗い出しや、大気中の二酸化炭素との炭酸化反応により、コストや環境負荷を抑えながら安定化を進める手法が行われている。近年の地球温暖化問題を鑑みると、わが国においても、多くのエネルギーを消費する熱処理ではなく、エージング処理が普及することが望ましいが、従来のエージング処理では 3 ヶ月以上という長い時間を要するため、敷地確保が難しく、実施が限られてしまう。

そこで本研究ではこのエージング処理の機能に着目し、焼却灰を対象として、適切にコントロールされた散水・通気処理を施すことにより、オンサイトで安定化を促進する技術の開発を行った。また安定化促進処理後の焼却灰の土木資材化のための処理フローについても検討・提案を行うことで、低環境負荷型の焼却灰リサイクルシステムの構築を目指した。本論文は大きく 4 つの研究から構成されている。

1 つ目の研究では、散水・通気処理（空気）が焼却灰の溶出特性に与える影響について評価することを目的として、異なる地域の 4 種類の焼却灰を用いて、カラム試験にて、同じ液固比（液固比 0.5-0.6）で異なる処理時間（1 日、約 50 日）の処理区を設け、それぞれの溶出特性や結晶構造の変化について調査した。散水処理の結果、Na や TOC に関して

は、散水強度の調整は必要であるが、液固比 10 の環告 13 号法 (JLT13 法) とほぼ同等の洗い出し量が得られた。約 50 日間の通気処理を加えることによって Cl は洗い出しを促進、TOC は抑制される傾向があることが示された。特に Cl では、焼却灰の初期の化学組成や鉍物組成が、洗い出し量に影響を与える可能性が示唆された。Pb, Ca は散水処理での洗い出しは難しく、通気処理による炭酸化が溶出抑制に効果的であることも確認された。

2 つ目の研究では、焼却灰の短期間での安定化促進を目的として、散水処理による塩類の洗い出しと、組み合わせることが可能な Pb 不溶化処理の検討を行った。検討方法として、不溶化効果が期待される 3 種類の薬剤 (炭酸水素ナトリウム (SHC), リン酸 (PA), 有機系キレート (OC)) の水溶液を散布する「薬液散布処理」ならびに CO<sub>2</sub> ガスを用いた「促進炭酸化処理 (CO<sub>2</sub> 通気処理)」について、それぞれカラム試験によりその効果を検証した。薬液散布処理については、SHC 区、PA 区では焼却灰中の Ca と反応が進み、Pb 低減効果がカラム内の中・下層で低下したのに対して、OC 区では全層 (上・中・下層) で Pb 濃度 0.01mg/L 以下となった。促進炭酸化処理では、Pb 不溶化効果が見られる CO<sub>2</sub> 供給量の閾値としては、30-40g/kgDW 程度と推定された。また CO<sub>2</sub> 濃度 10% でも、供給量を同様にすることで同等の効果が得られた。一方で、炭酸化の進行に伴い、Cr (VI) 濃度が上昇することも示唆された。

3 つ目の研究では、2 つ目の研究で効果が明らかになった散水・炭酸化処理を現地 (オンサイト) における安定化促進処理技術として実装するべく、脱着式コンテナを用いた散水・通気処理装置を開発し、その効果を実証した。実証試験は 1 回あたり有姿の一般廃棄物焼却灰 2.2t 程度を使用し、散水のみ、散水+CO<sub>2</sub> 通気の 2 処理区 (液固比 0.6-0.7, 24hr) で実施した。また実証試験後の焼却灰について長期溶出特性を把握する目的で、小型ライシメータ試験を実施した。コンテナ型処理装置の実証試験では、散水処理後に複数地点から採取した焼却灰の溶出液中 Cl 濃度及び焼却灰中の Cl 含有量の結果 (最大 72% 低減) から、本装置において塩類の洗い出しが良好に行われていたことが確認された。散水+CO<sub>2</sub> 通気処理区においては、Pb 濃度の低減効果が確認されたが、未反応の部分も確認されており、CO<sub>2</sub> 供給量と装置構造の改善が必要であることが示された。小型ライシメータ試験では、散水+CO<sub>2</sub> 処理区においては、滞水が発生せず、浸出水中の Cl や Pb 濃度が 400 日経過後も低く安定して推移していることが明らかになった。

4 つ目の研究として、散水・炭酸化処理後の焼却灰 (改質灰) の土木資材化技術の確立を目指して、これら処理の安定化促進効果について、異なる地域の 6 種類の焼却灰を用いて、溶出特性の知見の蓄積を図るとともに、力学特性への影響についても調べた。加えて混合材料の効果についても検討を行った。散水・炭酸化処理を施した焼却灰は、未処理に比べ、高い Pb 溶出抑制効果が見られる一方で、Cr (VI) の溶出増加、修正 CBR 値が低下する傾向にあることが示唆された。これらの課題に対応する混合材料として、鉄剤による Cr (VI) 溶出抑制効果、また 4 種類の副資材による強度改善効果について評価し、コンクリートガラ由来の再生砂が、コーン指数を増加させることを明らかにした。また改質灰の用途と基準についての考え方を提示した。

本論文では、これらの4つの研究成果を踏まえて、オンサイト安定化促進処理を組み込んだ、一般廃棄物焼却灰の低環境負荷型土木資材化技術のフローを提案し、結論としている。

## 審査の結果の要旨

### 審査経過

1. 令和元年11月20日の博士論文事前審査会で、申請者は申請資格に適合すると判定された。
2. 令和元年11月11日の類似度判定で、申請論文は学位論文として問題が無いことが確認された。
3. 令和元年12月9日の第1回審査会で審査論文に対して質疑と指示があり、公聴会の開催が了承された。
4. 令和元年1月8日に公聴会と最終審査会で、申請論文は博士（工学）の学位論文に値すると認められ、申請者は合格と判定された。

### 審査委員会の結論

一般廃棄物の処理量は年間約4,100万tであり、そのうち約8割に相当する3,300万tが直接焼却処理されている。この焼却残渣は、焼却処理等の中間処理を経て最終処分場への埋め立て処分されており、約400万tにのぼる。この焼却残渣は最終処分量の8割近くに達しており、その安定化は処分場の「安全・安心」な維持管理やリサイクル促進という観点からも極めて重要な役割を担っている。

現在、国内では重金属等を含有する一般廃棄物焼却残渣をリサイクルする方法としては、熔融や焼成といった熱処理が主流であり、非常に処理コストを要している。このうち、焼却灰（焼却主灰：焼却炉で底部に落ちる灰）は、欧州では、土木資材としてリサイクルされている。焼却灰中にある重金属類をエージングと呼ばれる自然の降雨による洗い出しや、大気中の二酸化炭素との炭酸化反応により、コストや環境負荷を抑えながら不溶・安定化を進める手法が用いられ、十分な実績を挙げている。近年の地球温暖化問題を鑑みると、わが国においても、多くのエネルギーを消費する熱処理ではなく、エージング処理が普及することが望ましいと考えられる。しかしながら、従来のエージング処理では3ヶ月以上という長い時間を要し、かつ市街地近郊に処理を行うための広大な敷地確保が必要であり、実施が限られてしまう。

そこで本論文では、このエージング処理の機能に着目し、焼却灰を対象として、汎用性の高いコンテナを用いて、適切にコントロールされた散水・通気処理を施すことにより、オンサイトで安定化を促進する技術の開発を行っている。また、安定化促進処理後の焼却灰の土木資材化のための処理フローについても検討・提案を行うことで、低環境負荷型の

焼却灰リサイクルシステムの構築も行っており、今後の一般廃棄物焼却灰の有効利用に大きく貢献できる。よって、本論文は博士（工学）の学位論文に値すると認める。

本論文に対し審査委員から質問や指摘があったが、久保田氏からの的確な回答がなされた。公聴会での聴講者からの質問でも、久保田氏の説明により質問者の理解が得られた。以上の結果、久保田氏は学位論文の審査に合格したものと認める。