

木質バイオマス発電燃焼灰の有効利用に関する研究

田 島 孝 敏 甚 野 智 子
大 島 義 徳

Study on Effective Utilization of Combustion Ash from Woody Biomass Power Generation

Takatoshi Tajima Tomoko Jinno
Yoshinori Ohshima

Abstract

In July 2012, a feed-in tariff program for renewable energy was launched, and woody biomass power plants have been operating in Japan. Most of the generated combustion ash is disposed of as industrial waste; however, because it contains potassium, it is expected to be used as a raw material for fertilizers. To reuse combustion ash, we investigate several methods, i.e., using civil engineering materials by cement solidification, granulation firing, and melting. The result indicate that is practical and economically advantageous to use combustion ash as a raw material for fertilizers.

概 要

2012年7月に再生可能エネルギーの固定価格買取制度(FIT)が開始し、全国で木質バイオマス発電所が計画、建設、運転されている。発電所から発生する燃焼灰の多くは産業廃棄物として処分されているが、燃焼灰はカリウムを比較的多く含むため肥料原料への利用が期待されている。ここでは、稼働中の発電所の灰を用いて、肥料原料の利用可能性に関する試験を行うとともに、セメント固化、造粒焼成、熔融固化の改質による土木資材への利用可能性を実験的に検討し、処理費用を試算した。その結果、肥料原料としての利用価値があること、燃焼灰を改質することによって肥料以外の用途に適用できることが明らかとなった。

1. はじめに

2012年7月に再生可能エネルギーの固定価格買取制度が開始し、木質バイオマス発電所が全国で計画され、2017年までに全国58カ所で稼働している。木質専焼ボイラから発生する燃焼灰(以下、木質燃焼灰と称する)は少なくとも年間50万トン発生すると見込まれている。今後も木質バイオマス発電所は増加し、2020年には全国100カ所が稼働を始め、そこから発生する木質燃焼灰の発生量はさらに80万トンの増加が見込まれている¹⁾。

木質燃焼灰は、石炭灰やごみ焼却灰などに比べてカリウムの濃度が高く、さらに、肥料用カリウムは海外輸入にはほぼ100%依存していることから、肥料原料としての利用が社会的に広く期待されている。

しかし、肥料の製造販売の流通の確保が容易でなかったり、燃料の品質によって灰の性状が異なり、都道府県によっては利用に慎重になっている等の理由で、セメント会社や中間処理業者に処理を委託する場合が多い。産廃処分される木質燃焼灰を肥料の原料に活用できれば、処分費を削減でき、カリウム資源を安定確保できる。

そこで、稼働中の木質バイオマス発電所から燃焼灰を入手し、その物理・化学特性を調査し、燃焼灰を土壌に添加してコマツナの栽培試験を行い、木質燃焼灰の肥料利用の可能性について検討した。

次に、セメント固化、造粒焼成、熔融固化による灰の

改質を実験的に検討した。そして、これらの処理費用を概算し、有効利用の可能性を評価した。

2. 木質燃焼灰の利用動向

2.1 国や自治体の取り組み

平成25年(2013年)6月28日付け環産発第1306282号の通達²⁾では、木質ペレットまたは木質チップ専焼ボイラの燃焼灰については、一定の要件を満たせば産業廃棄物に該当しないとされた。通達を受けて、高知県は2014年7月に「木質バイオマス燃焼灰の自ら利用の手引き」を策定し、燃焼灰は、①自ら利用、②肥料・肥料原料、③土壌改良材として販売等により有効利用されている。北海道は2017年3月に「焼却灰(天然木由来)の利用の手引き」を発行し、自ら利用、肥料販売の考え方を示している。また、農林水産省は、木質燃焼灰などの産業副産物の有効利用のため、肥料制度の見直しを行っている。

2.2 活用事例

燃焼灰を肥料原料に活用する際、カリウム含有量が重要な検討項目になる。燃焼灰をふるい分けして夾雑物を除いて特殊肥料に利用する例があり、燃焼灰を分級して、粒径10 μ m前後のカリウム濃縮灰が製造されている³⁾。肥料以外では、灰をセメント等の固化材・水と混合して造粒固化して、路盤材などに使用する例がある。

3. 木質燃焼灰の物理・化学性状

九州および東北地方の発電所で発生した燃焼灰(A灰, B灰)を試験に供した。灰の性状をTable 1に示す。いずれも発電燃料は主に未利用木材で、これを循環流動床ボイラで750~900°Cで燃焼して発生した燃焼灰である。粒子密度はA灰が2.6 g/cm³, B灰が3.1g/cm³, 充填密度(最小/最大密度)はA灰の方が大きい。

化学組成を蛍光X線分析により測定した。A灰はケイ素が79%と最も多く、次いで、カルシウム, カリウムが多く含まれていた。一方, B灰はカリウムが32%と最も多く、次いで、カルシウム, ケイ素が多く含まれていた。A灰のケイ素が多い理由として、ボイラの流動媒体に使用される砂の微粒子が灰に混入したことが考えられる。

地盤工学会基準に準じて、燃焼灰と水を質量比1:5で混合し、1時間静置した後にpHと電気伝導率(EC)を測定した。pHは、A灰が12.2, B灰が13.0で、強アルカリ性であった。ECは、Aが0.48 S/m, Bが6.26 S/mで、B灰はA灰に比べて水溶性の塩類が多いことが示唆される。

4. 肥料原料としての利用

木質燃焼灰を肥料として使用した場合、植物生育への影響の有無を調べるために植害試験を行った。これは、肥料や土壌等に含まれる成分の有害性を植物の発芽率や生育状況を観察することにより総合的に判断する試験であり、「植物に対する害に関する栽培試験の方法(59農蚕第1943号通知)」の方法に準じた。

4.1 使用燃焼灰

木質燃焼灰(A灰, B灰)を供試肥料に、パームヤシ殻燃焼灰(PKS灰)を対照肥料に使用した。肥料分析法に準じて測定したpHと肥料成分値をTable 2に示す。いずれも高アルカリで、特にB灰とPKS灰は13と高い。カリ全量はA灰が1.5%, B灰が18.1%, PKS灰が37.4%と、灰種による顕著な差が認められた。

4.2 試験方法

供試土壌に燃焼灰を施用してコマツナを栽培し、発芽率、生育量およびカリウム吸収量を測定した。1/10,000aのポットを用い、灰をK₂Oとしてポット当たり100, 200, 300, 400mg施用した。化成肥料を施用した標準区と、比較用に無施肥区を加えた。ポット土壌への灰の施用量をTable 3に示す。なお、木質灰, パーム灰の試験区にポット当たり, N, P₂O₅, K₂Oとして100mgに相当する、硫酸アンモニア, 過リン酸石灰, 塩化カリウムを添加した。

1試験区あたり3連のポットを準備し、淡色黒ボク土を0.4kg入れ、コマツナ(*Brassica rapa* var. *perviridis*, 品種: 楽天)を20粒播種した。ポットを温度22°C, 湿度30%の人工気象機に入れ、定期的に散水した。播種してから2週間後に発芽率を調査し、約2か月後に収穫して収量調査を行

った。A灰の収穫前の様子をPhoto 1に示す。供試区と標準区は順調に生育し、無施肥区は生育不良であった。B灰, PKS灰も同様であった。

Table 1 木質燃焼灰の物理・化学性状
Physical and Chemical Properties of Combustion Ash

	A灰	B灰
燃焼温度	800~900°C	750~850°C
粒子密度	2.61 g/cm ³	3.06 g/cm ³
最小/最大密度	1.23/1.57 g/cm ³	0.83/1.25 g/cm ³
pH / EC	12.2 / 0.48 S/m	13.0 / 6.26 S/m
主な化学組成	SiO ₂ 78.5 %	K ₂ O 32.1 %
	CaO 7.5 %	CaO 27.8 %
	K ₂ O 5.2 %	SiO ₂ 20.9 %
	MgO 2.2 %	SO ₃ 5.3 %
	Al ₂ O ₃ 1.9 %	MgO 4.6 %
	SO ₃ 1.4 %	Fe ₂ O ₃ 2.3 %
	Fe ₂ O ₃ 1.1 %	Al ₂ O ₃ 1.9 %
		Cl 1.9 %
		Na ₂ O 1.2 %
		P ₂ O ₅ 1.1 %

Table 2 木質燃焼灰のpH, 肥料成分
pH and Fertilizer Components of Combustion Ash

	単位	A灰	B灰	PKS灰
pH	-	11.4	13.0	13.1
窒素全量	%	0.01未満	0.01未満	0.09
リン酸全量(P ₂ O ₅)	%	0.40	0.98	3.61
カリ全量(K ₂ O)	%	1.5	18.1	37.4

Table 3 木質燃焼灰の施用量(成分投入量)
Amount of Test Ashes (Amount of Component Input)

試験区	施用量	成分分析値(有姿,%)			仕込量 (g/pot)	成分投入量(mg/pot)		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
供試区 A灰	標準量	0.00	0.40	1.5	6.7	0.0	27	100
	2倍量				13.3	0.0	53	200
	3倍量				20.0	0.0	80	300
	4倍量				26.7	0.0	107	400
供試区 B灰	標準量	0.00	0.98	18.1	0.56	0.0	5	100
	2倍量				1.11	0.0	11	200
	3倍量				1.67	0.0	16	300
	4倍量				2.22	0.0	22	400
対照区 PKS灰	標準量	0.09	3.61	37.4	0.27	0.2	10	100
	2倍量				0.53	0.5	19	200
	3倍量				0.80	0.7	29	300
	4倍量				1.07	1.0	39	400
標準区	化成肥料	5.80	5.80	5.8	0.43	25	25	25

注)供試区と対照区に、N, P₂O₅, K₂Oとして100mg/potの化成肥料を添加



Photo 1 収穫前の生育状態(A灰)
Growing Condition before Harvest (Ash A)

4.3 試験結果

カリ投入量に対する発芽率、草丈、地上部新鮮重および地上部乾物重に対するカリウム含有率をFig. 1に示す。

4.3.1 発芽率 木質灰Aは他の試験区に比べて発芽は良好であった。木質灰Bはカリ投入量300mg, 400mgで発芽率が低かった。

4.3.2 草丈 パーム灰の400mg試験区は草丈が高かったが、それ以外の試験区の草丈は灰のカリ投入量によらず同程度であった。

4.3.3 地上部新鮮重 木質灰Aとパーム灰は、カリ投入量が300mgまでは比例して増加し400mgで低下した。カリウムが過剰な条件では生育が阻害された可能性が唆される。木質灰Bは投入量によらず同程度であった。

4.3.4 カリウム含有率 供試区は標準区に比べて高い値を示し、カリ成分が多く吸収されていた。木質灰Aとパーム灰は、灰のカリ投入量が増加するにしたがって、カリウム含有率が増加している。

A灰, B灰ともに、施用量が多い試験区でもコマツナの生育を阻害することはない、カリウムの代替資源として有効と考えられる。

5. 土木資材などへの利用

石炭灰や一般ごみ焼却灰の有効利用として、灰にセメント等の固化剤を添加、混合して、これを造粒物に加工して埋戻材などの土木資材に活用することが行われている。また、焼却灰に膨張性頁岩と水を混練して造粒した後、1000℃以上の高温で焼成し、人工軽量骨材を製造し、軽量コンクリート用骨材などに利用する技術がある。さらに、灰を熔融してスラグにすることで、これを路盤材などに活用する技術がある。

これらの技術を木質燃焼灰に適用したときの可能性について検討した。それぞれの技術について以下に述べる。

5.1 セメント造粒固化

5.1.1 材料と配合 燃焼灰にセメント等の固化材と水を混合・造粒して、一定期間養生した後に路盤材等の土木資材として利用する場合、周辺土壌を汚染しないことが重要である。ここでは、セメントによる重金属の不溶化効果を調べた。セメントは高炉セメントB種を用い、添加量は灰に対して、5%、10%および20%とした。

5.1.2 試験と結果 材料をミキサーで混練し、φ30×h60mmのモールドに充填した。モールド上部をフィルムで覆って気中養生し、材齢28日に環告46号法による溶出試験を行った。試験結果をTable 4に示す。重金属等の溶出量の下に各々の土壌環境基準を併記した。

A灰は、全ての配合で土壌環境基準に適合したが、B灰は、砒素、セレン、ほう素および一部のふっ素が基準値を超過した。B灰に対しては、土木資材の環境安全性を確保するため、セメント造粒固化以外の方法が適していると考えられる。

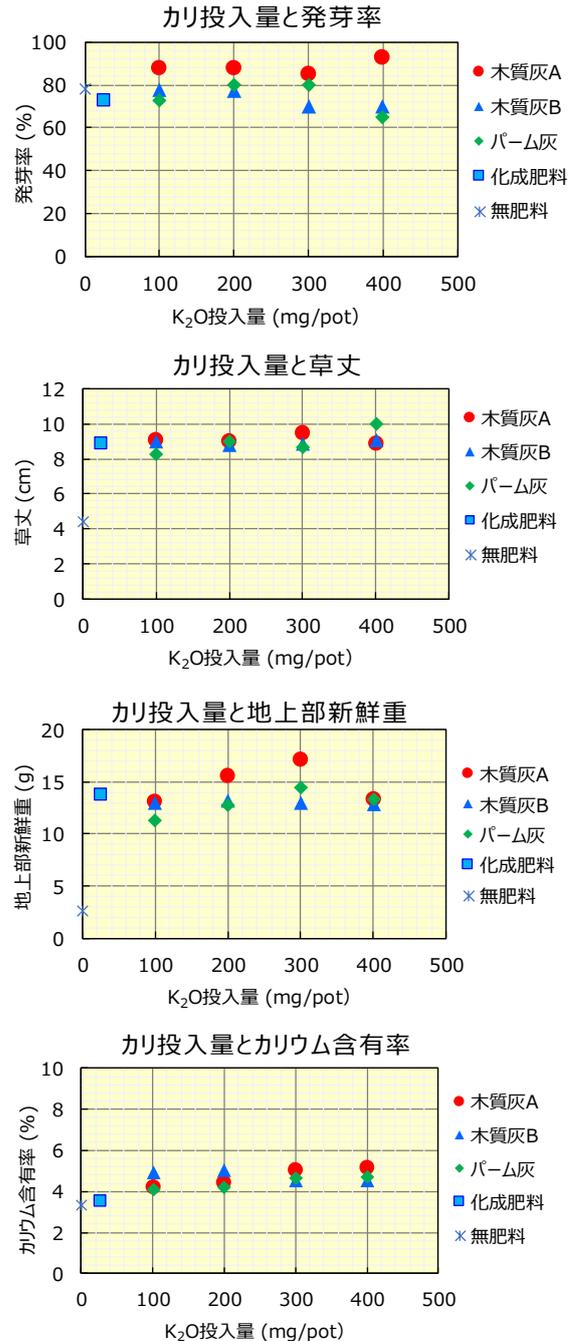


Fig. 1 植害試験結果
Results of Planting Tests

Table 4 配合と溶出試験結果(環告46号法, 材齢28日)
Mixture and Elution Test Results (JLT-46, 28days)

灰種	高炉セメントB種 (g)	水 (g)	溶出液 pH	溶出量 (mg/L)				
				六価クロム	砒素	セレン	ふっ素	ほう素
A	50	230	11.2	<0.01	<0.005	<0.005	0.39	0.91
	100	230	11.9	<0.01	<0.005	<0.005	0.29	0.51
	200	230	12.4	<0.01	<0.005	<0.005	0.19	0.13
B	50	320	13.0	0.020	0.110	0.068	0.27	6.1
	100	320	13.1	0.020	0.110	0.058	0.64	5.4
	200	320	13.2	<0.01	0.120	0.062	1.10	4.3
土壌環境基準値				0.05	0.01	0.01	0.8	1

5.2 焼成骨材

一般ごみ焼却灰を主原料として焼成骨材を製造する場合、内部に空隙を形成するために発泡材が添加される。発泡材には、赤鉄鉱、ドロマイト、石灰石など、分子中にC, S, H, Oなどのガス化しやすい元素を有する鉱物が使用され、高温加熱による膨張-収縮を経て軽石構造となる。焼成骨材は、コンクリート用骨材、軽量盛土、ろ過材、植栽などに利用されている。

5.2.1 作製方法 材料配合表をTable 5に示す。試験では発泡材として膨張性頁岩微粉を使用した。まず、木質燃焼灰と頁岩微粉を混合して水を添加し、これを円筒形のプラスチック容器に入れて手で回転して造粒した。次に、造粒物を室内に一晩静置した後、電気炉を用いて1150°Cで10分間焼成した。

焼成骨材の外観をPhoto 2に示す。頁岩微粉の添加量が多くなるにしたがい、焼成物の表面に光沢が現れ、灰粒子の焼結が進んだことが示された。A灰は灰100%の配合で緩く焼結し、頁岩微粉50%と75%のケースで骨材表面に光沢が現れた。一方、B灰は灰100%では焼結程度は低く、頁岩微粉75%のケースで表面に光沢が現れた。

5.2.2 圧潰強度 各試験ケースの焼成物の中から、比較的球形で大きいものを3個選択し、圧潰試験を行った。圧潰荷重の平均値をFig. 2に示す。A灰は、木質灰単体で緩く焼結したが、頁岩微粉を25%添加することにより、平均圧潰荷重は約1200Nと著しく増大した。頁岩微粉50%で圧潰荷重は850N、頁岩微粉75%で圧潰荷重は1250Nであった。一方、B灰は、木質灰単体では強度が出ず、指で潰せた。頁岩微粉の添加量が増えるにしたがって、圧潰荷重が増加した。頁岩微粉75%のケースで、平均圧潰荷重は1300Nであった。

市販の人工軽量骨材の圧潰荷重が約500Nであることを勘案すると、供試灰について、圧潰強度500N以上の焼成骨材を作製するには頁岩微粉を添加する必要がある。A灰は25%以上、B灰は75%以上のケースで圧潰荷重500N以上を超えた。灰種によって頁岩微粉の添加量が圧潰強度に及ぼす影響が異なるが、木質燃焼灰と頁岩微粉の化学組成に応じて、混合物の焼結温度が異なることが一因として考えられる。

5.3 溶融スラグ

都市ごみを焼却した後、埋立処分場の延命化の目的で、焼却灰を溶融して容積を減らした後に埋め立てる場合がある。ここでは、溶融処理を木質燃焼灰に適用し、生成する溶融スラグの性状を調べた。

5.3.1 作製方法 B灰をアルミナるつぼに入れて、電気炉で加熱した。まず、800°Cに昇温し、1時間保持した後、1000°Cまで昇温し、1時間保持した。これを、1200°C、1400°C、1600°Cについて順次行った。加熱物の外観をPhoto 3に示す。灰は1000°Cで焼結し、1200°Cで溶融してガラス化が始まり、1400°Cで試料が完全にガラス化した。1600°Cではアルミナるつぼの侵食が確認された。

Table 5 材料配合表

灰種	配合 (g)		
	木質灰	頁岩微粉	水
A灰	100	0	21
	75	25	21
	50	50	21
	25	75	25
B灰	100	0	37
	75	25	35
	50	50	33
	25	75	31



Photo 2 焼成骨材の外観
Appearance of Sintered Aggregates

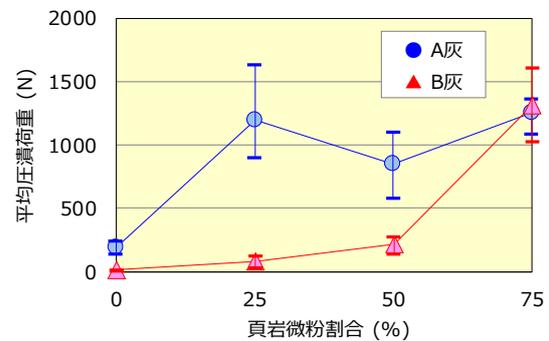


Fig. 2 造粒物の圧潰強度
Crushing Strength of Sintered Granules

温度	1000°C	1200°C	1400°C
外観			
焼成状態	焼結 灰粒子が焼結して、指で触っただけでは崩れない	ガラス化初期 灰粒子が溶融して、液状化した状態	ガラス化 全体が溶融して冷え固まった状態

Photo 3 加熱温度と燃焼灰の外観
Heating Temperature and Appearance of Combustion Ash

5.3.2 加熱物の性状変化 加熱処理後の質量変化と体積変化を測定した。体積変化は、るつぼ底面から試料上面までの距離を基に算定した。初期状態に対する質量減少率と体積減少率をFig. 3に示す。質量減少率は1400°Cで21%であった。加熱によって水和鉱物や炭酸塩などが分解して揮散したためと推定される。体積減少率は、1000°Cで13%であったのが、1200°Cで77%、1400°Cで80%に急増した。灰が溶融して粘性が下がり、空隙が充填されて密実になったためと考えられる。

5.3.3 溶融スラグの環境安全性 1400°Cで加熱した溶融スラグを2mm未満に粉碎し、溶出試験を行った結果をTable 6に示す。いずれの項目も土壤環境基準に適合し、検液のpHは10.1であった。木質燃焼灰は発電燃料の種類によって重金属等の溶出が多くなることも考えられるが、灰を溶融スラグにすることで環境安全性が向上し、セメント固化に比べてpHが低くなるため、路盤材などの土木資材として活用しやすい形態に改質できる。

6. 木質バイオマス発電への適用性検討

木質バイオマス発電燃焼灰の活用方法として、肥料原料の他、セメント造粒固化、造粒焼成および溶融スラグの可能性を検討した結果、技術的には従来の方法で処理が可能と判断された。適用性判断には、費用の検討も必要になるため、処理費、処理に必要な原材料費および処理物の運搬費を試算した。処理物の運搬は片道100km圏を想定し、セメント原料として利用する場合の費用(セメント会社への委託費+運搬費)を基準として、これを1としたときの比率を求めた。

燃焼灰の利用用途ごとに処理物の外観、特徴、利用用途および費用をTable 7にまとめる。肥料利用が経済的に優れ、セメント固化がセメント原料利用と同程度であり、焼成と溶融は高コストであった。肥料利用の場合、灰の取引価格は考慮していないが、実際には塩化カリウムなどの従来の原料価格と、灰のカリウム濃度や前処理の有無などを考慮して取引価格を精査する必要がある。

7. まとめ

木質バイオマス発電で発生する燃焼灰の循環利用を促進するため、2か所の発電所の燃焼灰を用いて肥料原料と改質による土木資材等への利用を実験的に検討し、コスト試算を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 燃焼灰は燃料の原料や燃焼方式などによって、灰の粒子密度などの物理特性やpHや化学組成などの化学特性が異なる。
- 2) 肥料原料利用に関して、コマツナを用いた植害試験を行った結果、灰の施用量が多いケースでも発芽率、草丈、地上部新鮮重はほぼ同等であり、生育を阻害することはなく、カリウム原料の代替資源として有効である。

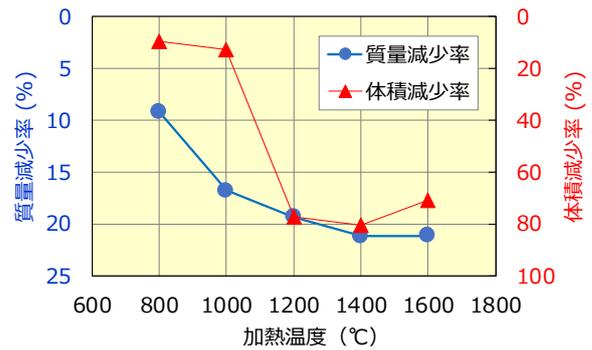


Fig. 3 加熱温度と質量減少率・体積減少率の関係
Weight and Volume Loss by Heating Temperature

Table 6 溶融スラグの溶出試験(環告46号)
Elution Test of Molten Slag (JLT-46)

項目	単位	木質灰B	溶融スラグ	土壤環境基準	
カドミウム	mg/L	<0.001	<0.001	0.01	
鉛	mg/L	0.004	<0.001	0.01	
六価クロム	mg/L	<0.01	<0.01	0.05	
砒素	mg/L	0.078	<0.005	0.01	
水銀	mg/L	<0.0005	<0.0005	0.0005	
セレン	mg/L	0.055	<0.005	0.01	
ふっ素	mg/L	0.45	<0.1	0.8	
ほう素	mg/L	3.4	<0.1	1	
検液	pH	—	13.0	10.1	—
	EC	mS/m	4200	23	—

- 3) セメントで造粒固化した場合、重金属等の溶出量が土壤環境基準を超過する灰があった。土木資材に利用する場合、環境安全性の確保が必要となる。
- 4) 燃焼灰を発泡材、水と混合して造粒し、これを1150°Cで10分間加熱して焼成骨材を作製した。発泡材の添加量が多いほど焼結が進み、骨材の圧潰強度が大きかった。
- 5) 燃焼灰(B灰)は1200°Cで溶融してガラス化が始まり、1400°Cで完全に溶融してガラス化した。溶融スラグから重金属等はほとんど溶出せず、pH10程度と土木資材として活用しやすくなる。
- 6) 各利用方法の費用を試算した結果、肥料原料利用が経済的に優れる。燃焼灰のカリウム濃度が高く、肥料の流通を確保できれば有望である。

FIT制度の開始当初は国内の間伐材を主な燃料とした数千~数万kWの発電所が多数を占めたが、最近では海外からパームヤシ殻(PKS)や木質ペレットを輸入したり、石炭と混焼する大型発電所が増加している。そのため、燃焼灰の発生量は今後増加し、灰の性状が多様になることが予想される。しかし、肥料利用だけで燃焼灰を十

Table 7 木質燃焼灰の利用用途と費用の試算
Use of Wood Combustion Ash and Estimation of Treatment Cost

利用用途	処理方法	処理物の外観	処理物の特徴	利用用途	費用 (処理費+運搬費) ※セメント原料に対する比率を示す
1.セメント原料	灰のまま利用		・ケイ素やアルミニウムを含み、セメント原料の粘土の代替材になる	セメント原料の粘土代替として利用	1.0 (委託費+運搬費)
2.肥料原料	灰のまま利用 (必要に応じて分級)		・高アルカリ ・カリウムが比較的多く含まれる ・燃料や燃焼方式によりカリウム濃度が異なる	肥料原料として肥料メーカーが有価で引き取り	0.44 (運搬費のみ)
3.セメント造粒固化	灰にセメントと水を混合して造粒固化		・セメント水和反応で強度が発現する ・灰に重金属等が含まれても不溶化される	埋戻材、路盤材等の土工材料	1.1
4.造粒焼成	灰を造粒して1000℃以上で焼成		・材料、配合および焼成温度により、人工軽量骨材と同等の強度を発現する	盛土材、緑化資材、水質浄化材など	2.3
5.熔融スラグ	灰を1200℃以上で熔融し、冷却後、破砕・分級		・高アルカリの灰に比べてpHが低い ・重金属等がほとんど溶出しない	埋戻材、路盤材等の土工材料	2.9

分に利用するのは容易ではなく、灰を改質して、土木資材などに活用することが必要になる。

2015年9月の国連サミットで持続可能な開発目標(SDGs)が決められた。2030年までに達成すべき17の目標の内、木質バイオマス発電は、再生可能エネルギーの利用、循環型社会の構築、気候変動への対策、森林の保全に貢献できる。

当社は2018年に木質バイオマス発電事業に新規参入したが、安定運転と今後の普及を目指して、燃焼灰の資源循環への取り組みを続けていく所存である。

参考文献

1) 平成24年度高知県木質バイオマスエネルギー利用促進協議会、第1回運営委員会資料、2012
2) 松本真悟：平成24年度 新産業創出研究会 研究成果報告書「木質バイオマス燃焼灰と有機性廃棄物の融合による理想的有機質肥料の開発」、ちゅうごく産業創造センター、2012

3) 中国木材、タクマ、広島大学、片倉チッカリン：平成26年度「地域材利用活用倍増戦略プロジェクト事業のうち木質バイオマス加工・利用システム開発事業」、高効率バイオマス発電システムのための 木質バイオマス燃焼灰の再資源化実証事業、2015.3
4) 松岡、小日、福井、前田、井藤：木質バイオマス燃焼灰の分級による有効利用システムの開発、第27回廃棄物資源循環学会研究発表会、2016.9
5) 中国木材、森林総合研究所：平成28年度木質バイオマス加工・利用システム開発事業、木質バイオマス燃焼灰循環利用のための林地還元技術の開発、2017.3
6) 田島、大島、千野：木質燃焼灰の肥料原料としての利用に関する調査、土木学会全国大会 第72回年次学術講演会、2017.9
7) 田島、大島、甚野：木質バイオマス発電由来の燃焼灰の有効利用に関する研究、廃棄物資源循環学会 第29回研究発表会、2018.9