

放射性物質に汚染されたバイオマスの ガス化発電による減容化処理

松 生 隆 司・大 山 将・近 藤 秀 樹

福島第一原子力発電所の事故に伴い、放射性セシウムが拡散し、広い範囲の草木類に放射性セシウムが含まれ、間伐材・製材残材および飼料等で利用していた牧草・稲わら等の利用が困難となっている。これらは、焼却処理することで減容化できるが、経済的な負担が大きく、他の可燃物と混合焼却すると放射性セシウムを含む焼却灰が増加することが課題となっている。筆者らは、除染に伴い発生するバイオマスをガス化処理装置でバイオマスガスと炭として回収し、それらを燃料として有効活用することを目的とした実証試験を実施し、放射性セシウムの濃縮挙動等を調査し、実発電設備を運用する上での課題抽出と対応策を検討した。

キーワード：バイオマス、放射性セシウム、除染、減容化、ガス化発電、エネルギー回収、灰固化

1. はじめに

福島第一原子力発電所の事故により広い範囲の土地が放射性セシウムにより汚染された。これら地域のうちの居住地域では、表土除去をはじめとする除染作業が行われ、生活域の空間線量低減が図られている。

しかし、福島県をはじめ比較的汚染濃度の高い地域には広大な森林が存在するが、それらの積極的な除染は計画されていない。従来、これらの地域の山林は間伐による森林の更新が図られていたが、原子力発電所事故以来、放射性セシウムを含む間伐材は製材、製紙原料、燃料化（ペレット燃料）、堆肥化、土木資材等の利用が出来なくなっており、間伐による森林の更新が停滞している。その結果、森林に蓄積した放射性セシウムの除去・搬出も停滞する可能性が高い。表一1に放射性セシウムの汚染で通常の処理が困難になったバイオマスの種類を示す。

森林に蓄積している放射性セシウムは、直ちに生活域に影響を及ぼす可能性は少ないものの、豪雨や山火事等により生活域へ移動する可能性があり、間伐等により徐々にでも森林から回収し、放射性セシウムを管理下に置くことが重要と考える。

これら低濃度ながら放射性セシウムに汚染された森林のバイオマス原料や飼料用途のバイオマスは、発電に利用すれば再生可能エネルギーを回収しながら除染・減容化が可能であり、また間伐の再開により停滞している林業の活性化や発電事業での雇用も図られる。

表一1 放射性セシウム含有バイオマスの種類

品 目	通常の処理が困難な理由	発生時期
間伐材 (木質チップ)	バイオマス利用後の灰のセシウム濃度が高くなるため、燃料としての利用が困難となっている。	長期間
伐採時残材 (枝葉、梢材等)	従来は焼却処理していたが、セシウム濃度が高く焼却施設が受け入れを拒否。	長期間
松くい虫被害木	同上	長期間
製材残材 (端材、オガくず)	同上	長期間
果樹剪定枝	同上	比較的短期間
パーク (樹皮)	従来は燃料/堆肥等で利用されていたが、セシウム濃度が高く、利用困難。	長期間
シイタケ原木	収穫されたシイタケの濃度が高く、廃棄処分を望むが焼却処理が困難。	比較的短期 (1~2年程度)
牧草、稲わら	飼料として収穫した牧草、稲わらのセシウム濃度が高く、飼料として利用困難。	比較的短期 (3年程度、除染で濃度低下)
雑草・雑木	道路脇、河川敷等土壌除染を行わない場所から発生する有機物では、長期にわたりセシウム濃度の高い雑草・雑木が発生。通常は各事業者が処分(焼却/堆肥化/チップ化)するが、セシウムが含まれるため通常の焼却処理が困難。	長期間

そこで、実際の林地バイオマスを用いてバイオマスガス化試験装置によるガス化実証試験を実施し、放射性セシウムの濃縮挙動等を調査し、実発電設備を運用する上での課題の抽出と対応策を検討した。

本報告では、バイオマスの炭化・燃焼処理における放射性セシウムの挙動と、その減容化効果および経済性の検討結果について報告する。

2. バイオマスガス化発電の概要

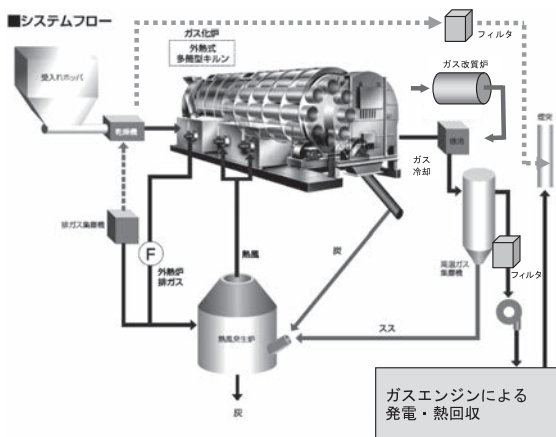
バイオマスガス化発電は、比較的小規模で高効率の発電が可能で、放射性セシウムの拡散を防止しつつ、その減容化処理とエネルギー利用の両立が可能である。また、各市町村単位で処理を行うことで、バイオマス

の発生量と消費量がほぼ等しくなり、運搬コストの削減と効率的で長期の運用が可能である。表一2にバイオマスの減容化処理について適用技術の比較を示す。

表一2 バイオマス減容化処理の適用技術比較

技術	バイオマスガス化発電	バイオマスのボイラー式発電	仮設焼却炉	一般廃棄物焼却炉
処理規模	～50t/日	～250t/日	～500t/日	100t/日以上
本来の目的	バイオマスからガス及び炭を回収して発電・給熱事業を行う。結果として減容化が図られる。	バイオマスを燃焼した熱で発電・給熱の事業を行う。結果として減容化が図られる。	大量に発生した震災がれき等の短期間での処理。	家庭等から発生する放射性セシウムを含まない廃棄物の処理。
運転期間	10年以上	10年以上	3年程度	15～20年程度
特徴・課題	バイオマスの供給	安定供給が必要(市町村レベルの発生量)	安定供給が必要(広域処理レベル)	供給の変動には対応可能(長期運転には不向き)
	減容化能力	高い(1/100程度)	高い(1/100程度)	中程度(1/20程度)
	処理コスト	安価～処理費不要	安価～処理費不要	高価

バイオマスガス化発電は図一1に示すように、バイオマスを外気と遮断されたガス化炉(外熱式多筒型キルン^{1), 2)}で蒸し焼き(熱分解)にして、高カロリーのバイオマスガスと炭化物に分離する。ガス化後の残さである炭化物はガス化炉より排出され熱風発生炉で完全燃焼させガス化炉の熱源となる。ガス化炉より排出されたバイオマス熱分解ガスはガス改質炉でタール分を分解し、冷却装置・フィルタを経由してクリーンなガスとしてガスエンジンへ送り、発電と熱回収が行われる。



図一1 バイオマスガス化発電のシステムフロー

バイオマスガス化発電設備で放射性セシウム含有バイオマスを燃料として使用するに当たり、以下の問題点や対策項目が必要と考えた。

- ・ガス改質炉・冷却装置内部の放射性セシウムの蓄積と防止。
- ・熱風発生炉内部の放射性セシウムの蓄積と防止。
- ・ガス化炉熱風通過部分への灰の蓄積防止。
- ・フィルタ内部の放射性セシウムの蓄積と除去方法。

- ・放射性セシウムが濃縮した灰の貯留部における放射線防護。
- ・灰取り出し時の被ばく及び灰の飛散防止(セメント固化処理)。

3. セシウム挙動把握に関する室内試験

セシウムのおおまかな挙動を把握するために、バイオマスガス化処理を模した管状炉を用い、市販木チップに塩化セシウムを含浸させた模擬汚染木質チップの熱分解試験(炭化)と炭の燃焼試験を行い、安定セシウムの挙動を確認した。

熱分解試験での安定セシウム挙動は、チップ中のセシウムの91.9%が炭から回収され、それ以外からは検出されず、炭化処理ではセシウムのほぼ全量が炭に移行すると想定できた。

一方、燃焼試験において、炭の燃焼に伴いセシウムの一部がガス化もしくは液滴化し、ガスの流れに沿って後段に移行したが、系全体からセシウムの99.3%が回収され、セシウムが系内にとどまっていることを確認した。

4. 放射性セシウムの挙動把握試験

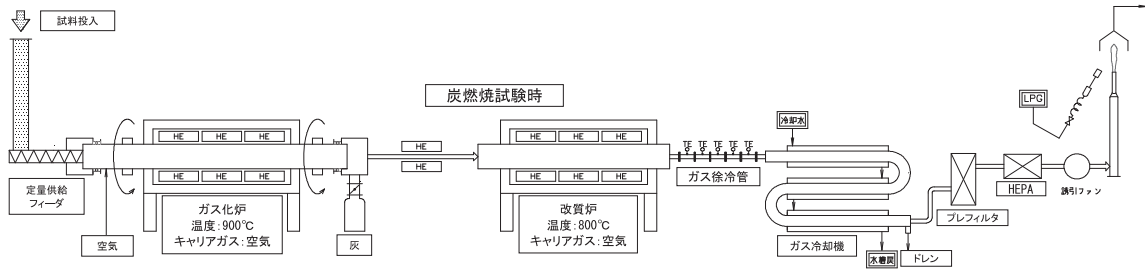
実証試験はバイオマスガス化試験装置を保有する岩手県奥州市衣川区内で実施した。室内試験で確認したセシウムの挙動をもとに、放射性セシウムに汚染されたバイオマスをバイオマスガス化試験装置に投入し、バイオマスガス生成時(炭化処理)の放射性セシウムの挙動と、炭化処理で発生した炭の燃焼時における放射性セシウムの挙動を確認した。

表一3に試験装置の仕様を、図一2に試験装置の構成を示す。写真一1に試験装置全体を、写真一2にガス化炉を示す。

試料は表一4に示す種類として、今後長期間発生

表一3 バイオマスガス化試験装置の仕様

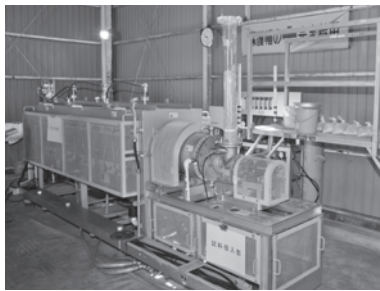
名称	仕様
1 ガス化炉	電気ヒータ式外熱キルン炉, 電気容量 25 kW L4,700 mm × W1,044 mm × H1,470 mm 加熱部延長 2,500 mm
2 接続管	40 A, 外部 600℃ヒーター保温
3 改質炉	電気ヒータ式マッフル炉, 電気容量 25 kW L2,650 mm × W1,344 mm × H1,620 mm 加熱部延長 1,950 mm
4 徐冷管	40 A, 空冷配管, L = 300 mm × 5本
5 ガス冷却機	ジャケット式水冷ガス冷却機
6 ガスフィルタ	プレフィルタ: φ 400 mm × L1,000 mm 不織布+表面加工, 捕集効率 0.3 μm × 99% HEPA フィルタ: □ 305 mm × 105 mm
7 ブロワ	耐圧防爆形 0.5 kw 2P 8.3 m ³ /min × 3.1 kPa



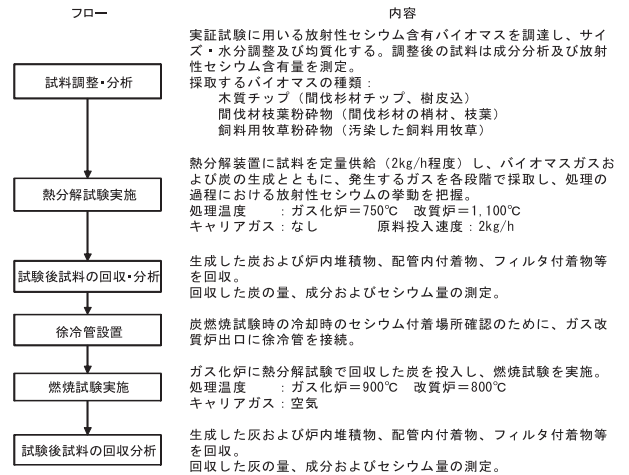
図一 炭化物燃焼時のバイオマスガス化試験装置の構成



写真一 バイオマスガス化試験装置



写真二 ガス化炉 (試料投入部)



図一 試験フロー

表一 試料の種類と放射性セシウム濃度

試料種類	内容	濃度
木チップ (間伐材)	奥州市内のうち、空間線量が比較的高い地域でH23冬～H24春にかけて間伐した杉材のチップ(樹皮付き)を使用した。あらかじめ15mm程度以下にサイズ調整し、十分に均質化して試料とした。	84Bq/kg
木チップ (枝葉)	奥州市内でH23冬～H24春の間伐時に発生した林地残材(枝葉、梢材)を採集し、15mm程度以下にサイズを調整。放射性セシウムは、杉の上部に付着していることから、可能な限り梢材を採取・使用した。	1,708Bq/kg
牧草	事故後に刈り取った牧草のうち、放射性セシウム濃度が高いと思われる一番草を使用した。採取した牧草は、一定サイズ(15mm程度以下)に裁断し、均質化した。	1,968Bq/kg

しガス化発電の主要な原料になると想定される放射性セシウムを含む間伐材(杉チップ)および伐採残材(杉の梢材、枝葉)と、放射性セシウム濃度が高く飼料として利用できず廃棄物として焼却もできない非木質系バイオマスの牧草を調整して用いた。

図一 3 に試験フローを示す。炭化処理では各試料を 2 kg/h で、燃焼処理では炭化処理で発生した各炭化物を混合して 0.8 kg/h の投入速度で、各々 6 時間連続投入した。各試験終了後、装置を分解して内部の付着物と処理物を回収した。回収物は各装置単位に区別管理し、質量測定と放射性セシウム量の分析と、付

着物の除去前後の表面線量測定を行った。

5. 放射性セシウムの収支と付着物

表一 5 に放射性セシウムの収支を示す。炭化・燃焼処理においてガス中の放射性セシウムは冷却およびフィルタにより除去され、排出ガスからは検出されないレベルであった。炭化処理で回収した炭には放射性セシウムの 88.8 ～ 94.9% が含まれ、残りは煤や粉末状の炭から回収された。

一方、燃焼処理で回収された灰には放射性セシウムの 21.9% が含まれ、残りはガス化炉以降に移行したもののから回収された。これは、放射性セシウムの一部が霧状ないしガス状となり、ガスの流れに沿って装置内を流下し、温度の低下に伴い固体となりその一部が白色～灰白色のダストとして装置の管内面に付着した。この箇所付着物の主体は蛍光 X 線分析結果で塩化カリウム (KCl) と想定されたことから、放射性セシウムも塩化セシウム (CsCl) の形態が主体と考えられた。

なお、これらの付着物は拭き取りが容易なものであった。

実機においても同様な性状であれば付着物は水洗で容易に除去できるものと想定される。

ガス冷却機で発生したドレン水については、放射性

表一五 放射性セシウムの収支

試料	単位	炭化処理			燃焼処理	
		木チップ (間伐材)	牧草	木チップ (枝葉)	炭	
投入量	Bq	1,008.0	23,033.5	20,496.0	622.4 9,040.0 11,968.0	
投入合計		1,008.0	23,033.5	20,496.0	21,630.4	
固形分回収	炭/灰	Bq	874.7	19,299.3	18,077.7	4,595.2
	ガス化炉内回収	Bq	63.9	369.6	947.0	2,892.6
	接続管付着物	Bq	1.9	292.1	34.2	577.2
	改質炉内回収	Bq	0.6	23.4	10.8	2,897.4
	接続管	Bq	7.3	93.7	48.9	882.9
	徐冷管	Bq				1,339.9
	ガス冷却部	Bq	28.7	150.0	131.3	2,744.4
	プレフィルタ回収	Bq	8.3	115.3	118.4	5,050.5
	HEPA フィルタ	Bq				0.0
	回収合計	Bq	985.3	20,343.4	19,368.2	20,980.3
回収率	%	97.7	88.3	94.5	97.0	
分布	炭/灰	%	88.8	94.9	93.3	21.9
	ガス化炉内	%	6.5	1.8	4.9	13.8
	接続管	%	0.2	1.4	0.2	2.8
	改質炉内	%	0.1	0.1	0.1	13.8
	接続管・徐冷管	%	0.7	0.5	0.3	4.2
	徐冷管	%	-	-	-	6.4
	ガス冷却	%	2.9	0.7	0.7	13.1
	プレフィルタ	%	0.8	0.6	0.6	24.1
	HEPA フィルタ	%	0.0	0.0	0.0	0.0
			100.0	100.0	100.0	100.0

表一六 減量化・減容化効果

項目	単位	木チップ (間伐材)	牧草	木チップ (枝葉)	備考	
炭化処理時						
処理前	投入量	kg	10,423 (12.0)	10,502 (11,704)	9,756 (12.0)	() 内は湿潤重量
	Cs濃度	Bq/kg	97 (84)	2,193 (1,986)	2,101 (1,708)	() 内は湿潤ベース
	容積	L	107.1	165.3	82.6	
処理後	排出炭量	kg	2,359 (2,365)	3,437 (3,437)	2,427 (2,427)	() 内は湿潤重量。 煤は少量のため計算から除外
	Cs濃度	Bq/kg	390 (389)	5,651 (5,650)	7,480 (7,480)	() 内は湿潤ベース
	Cs回収率	%	97.7	88.3	94.5	付着物含む。 炭中Cs/回収Cs = 88.8 ~ 94.9%
	容積	L	30.7	60.4	20.7	
	減量化率	%	77.4	67.3	75.1	(処理前重量 - 炭重量) / 処理前重量。 乾燥ベース
	減容化率	%	71.3	63.5	74.9	(処理前容積 - 炭容積) / 処理前容積
炭燃焼後						
処理前	炭投入量	kg-wet	1.6	1.6	1.6	
原料換算	重量	kg	7,053 (8,119)	4,888 (5,448)	6,431 (7,911)	炭投入量 × 原料投入 / 排出炭量。 () 内は湿潤重量
			18,372 (21,478)			
	容積	L	72,475	76,960	54,481	
	合計容積	L	203,917			
処理後	灰重量	kg	0,718 (0,718)		ダスト (飛灰相当) は少量のため計算から除外	
	Cs濃度	Bq/kg	6,401 (6,400)		() 内は湿潤ベース。 灰中Cs総量 = 4,595 Bq	
	Cs回収率	%	97.0		付着物含む。 灰中Cs / 回収Cs = 21.9%	
	容積	L	0,803			
	減量化率 (灰)	%	96.1		(原料換算重量 - 灰重量) / 原料換算重量。 乾燥ベース	
	減容化率 (灰)	%	99.6		(原料換算容積 - 灰容積) / 原料換算容積	
固化処理後						
固化 処理後	重量	kg-wet	1,156		セメント20%、水40%、ペントナイト1% 添加時を想定	
	湿潤密度	kg/L	1,610		28日試験時	
	容積	L	0,718			
	減量化率 (固化体)	%	94.6		(原料重量 - 固化体重量) / 原料重量。湿潤 ベース	
	減容化率 (固化体)	%	99.6			

セシウムは検出されなかった。

6. 減容・減量効果の評価

表一六にバイオマスのガス化・炭燃焼及び灰の固化処理に伴う減量化と減容化の効果を示す。

炭化処理に伴う減容化率は63.5 ~ 74.9%であり、概ね1/3 ~ 1/4程度の減容効果が認められた。炭の燃焼処理では牧草由来の灰が多く発生したが、原料換算での減容化率は99.6%であった。

灰はそのままの状態では取り扱いにくく、飛散・溶出のリスクが高いことから、セメントによる固化処理を行った。

普通ポルトランドセメントを灰に対して20%添加するとともに、溶出抑制の向上を目的としてペントナイトを灰の1%添加した配合で、減量化率は94.6% (当初重量の約1/18)であったが、セメント固化処理することで見かけの密度が大幅に増加することから減容化率は悪化せずに99.6%となり、廃棄物の容積を当初の1/250に圧縮できた。

7. バイオマスガス化設備の空間線量の評価

放射性セシウムの収支結果を基に一定量の放射性セ

シウムを含有するバイオマスを実処理設備により処理することを想定し、一定時間運転後の装置周辺の想定空間線量率を算出して放射性セシウムの蓄積対策と遮蔽の効果の評価した。表一七に算定結果を示す。

蓄積・遮蔽対策として、熱風発生炉・ガス化炉に耐熱金属板の内張り、空気予熱器にコンクリート遮蔽壁の設置等を施すとした。

表一七 計算から求めた空間線量率低減効果

	建屋内平均	機械周辺平均
対策無 (μSv/h)	2.55	6.32
対策あり (μSv/h)	0.95	2.47
空間線量率低減効果	63%	61%

対策を講じた場合の建屋内の空間線量率低減効果は63%となった。機械設備周辺部に限ると、対策を行わない場合の平均空間線量は6.32μSv/hと特定線量下業務(2.5μSv/h以上)の基準より高くなるが、対策を行った場合は2.47μSv/hとなり、同基準とほぼ同等程度に収まり、空間線量率低減効果は61%となった。

8. 実用化設備の対策

放射性セシウムの蓄積対策と濃縮物(灰)の処分方法(セメント固化処理)については、通常のバイオマ

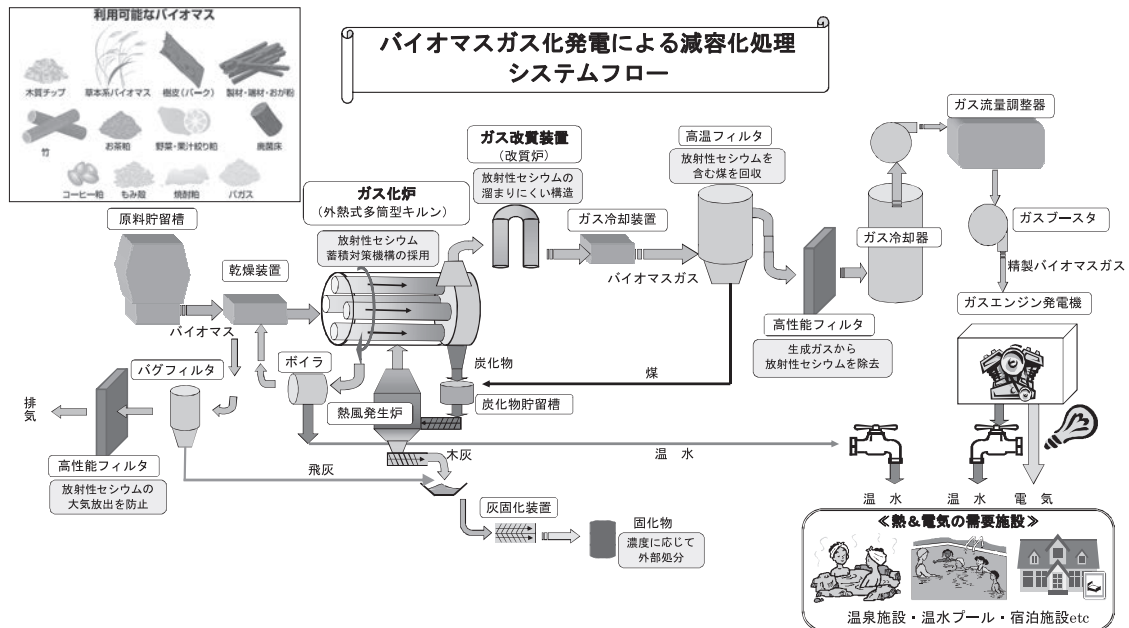


図-4 実用化設備のシステムフロー (参考文献3に一部加筆)

スガス発電設備に以下に示す改造を加えることで、放射性セシウムを含むバイオマスを安全に処理することが可能になるものと想定される。

- ・断熱材の内側に耐熱金属板を張りつけ、放射性セシウムの断熱材への含浸を防止する。
- ・メンテナンス時に、高圧空気により耐熱金属表面に付着したダストの払落しを可能とする(耐熱鋼板の表面から払い落したダストは、粉じんとして排ガス処理用フィルタで回収)。また、必要に応じて、排ガス経路の洗浄が可能な構造とする。
- ・排出した灰を自動でセメント混合処理する機構を設ける。灰ピット及びセメント固化処理装置は特に線量が高くなることから、コンクリートの遮蔽壁を設ける。

図-4に放射性セシウムを含むバイオマスの減容化処理に対する、バイオマスガス化発電実用化設備のシステムフロー³⁾を示す。本設備により、放射性セシウムを含むバイオマスを資源として活用しながら、安全で効率のかつ経済的な減容化・エネルギー回収が図られる。

9. おわりに

本報告は、環境省が実施した「平成23年度除染技術実証事業」のうち、「除染に伴い発生する有機物のバイオマスガス化発電による減容化およびエネルギー回収」^{4), 5)}として、中外炉工業株式会社と共同実施した成果を取りまとめたものである。

最後に、本実証試験で得られた諸知見が、事故由来

放射性物質に対する除染・汚染廃棄物処理事業等の推進の一助となれば幸いである。

JCMMA

【参考文献】

- 1) 中外炉工業(株)ウェブページ。
(http://www.chugai.co.jp/env/11_biomass/01.html)
- 2) 谷口美希, 西山明雄, 笹内謙一: ロータリーキルンを用いたバイオマスガス化システムの現状と展望, 日本エネルギー学会誌, 第91巻, 第10号, pp.1024-1029, 2012.
- 3) 中外炉工業(株): バイオマスガス化コージェネレーションシステムパンフレット.
- 4) 株鴻池組: 環境省平成23年度除染技術実証事業, 「除染に伴い発生する有機物のバイオマスガス化発電による減容化およびエネルギー回収」実証試験報告書, 2012年9月.
- 5) 環境省ウェブページ。
(<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=15864>)

【筆者紹介】



松生 隆司 (まついけ たかし)
株鴻池組
土木事業本部 環境エンジニアリング部
部長



大山 将 (おおやま しょう)
株鴻池組
土木事業本部 環境エンジニアリング部
課長



近藤 秀樹 (こんどう ひでき)
株鴻池組
本社
課長 (株)ジオスチーム出向中)