

放射性セシウム含有バイオマスの減容化に関する研究

Study of Volume Reduction for Radioactive Cesium Contamination Biomass

中島 卓夫*1 松生 隆司*1
Takuo Nakashima Takashi Matsuike
大山 将*1 谷口 美希*2
Sho Oyama Miki Taniguchi

要旨

本報告は、バイオマスガス化発電技術に着目し、同技術による放射性セシウム含有バイオマスの減容化の可能性について検討したものである。福島第一原子力発電所事故に伴い、環境中に放射性セシウムが放出され、広範囲の草木類に放射性セシウムが含まれることとなった。今後長期間にわたって放射性セシウムを含む草木が発生することが想定されることから、これらの草木をバイオマスガス化発電の原料として利用し、再生可能エネルギーを回収しながら、コストをかけないで減容化する手法について検討した。

なお、本検討は環境省の「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及びエネルギー回収」¹⁾として実施した成果を取りまとめたものである。

キーワード：放射性セシウム バイオマス バイオマスガス化発電 減容化

1. はじめに

福島第一原子力発電所の事故に伴い放射性セシウムが環境中に放出され、広範囲の草木類に放射性セシウムが含まれることとなった。

現在、福島県内外の各所で除染作業が行われ、放射性セシウムを含有する多量の刈草・切枝等のバイオマスが発生している。これらのバイオマスは今後、除染廃棄物として焼却等による減容化が図られるものと思われる。

一方、生活圏より離れた山林は、人への被ばくの影響が小さく除染コストが膨大となることから現時点では除染の対象となっていない。しかしながら、山火事や豪雨に伴い、放射性セシウムが再拡散する可能性があることから、これらについても放射性セシウムの回収を図ることが望まれる。

従来、これらの山林では、間伐、伐採による森林資源の回収・更新が行われており、生活圏の除染が完了した後は、環境保全や土砂災害防止の観点からも、これらの産業活動が再開される見通しである。このため、これらの作業に並行して枝葉、梢材や落葉・下草等（以下、枝葉等と記す）を回収すれば、放射性セシウムの効率的な回収が可能である。さらに、回収した枝葉等を利用した発電・熱回収を行い、収入を得ながら最終的に少量の燃焼灰とすることで経済的で持続可能な放射性セシウム含有バイオマスの減容化が可能と考えた。

枝葉等の木質系バイオマスや刈草等の草本系バイオマスからのエネルギー回収技術には表 1 に示すような技術があ

る。放射性セシウムを含有する枝葉等の利用・処理を主目的とする場合、放射性セシウムを処理施設に一旦持ち込むことになるため、地元外からの集荷に対して地元の反発が生じることが予想され、集荷範囲が地元自治体等に制限される可能性が高いと考える。経済性のみを考えた場合、規模の大きなボイラー式の発電が有利であるが、上記の理由から大量の原料（バイオマス）の確保が難しい。また、建設廃棄物（木材）や非汚染バイオマス等との混合利用も考えられるが、最終的に発生する燃焼灰が増加するため、減容化の目的に相反する。

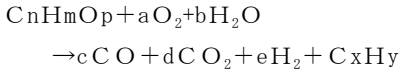
表 1 バイオマスからのエネルギー回収技術

方式	装置	目的
直接燃焼	ストーブ	輻射熱、加熱空気の対流による暖房
	ボイラー	蒸気生成(加熱・動力・発電用)
ガス化	ガス化炉	燃料ガス(発電、バーナー用)、液化燃料用中間体
急速熱分解	熱分解装置	熱分解油、有用成分抽出
炭化	炭化炉	炭(燃料用等)の製造
その他	成形燃料化	固体燃料化

このような点から、放射性セシウム含有バイオマスの経済的な減容化を図るには、比較的小規模で、発生する燃焼灰も少なく、効率の高い技術が適しており、バイオマスガス化発電が最も有利であると考えた。

本検討で想定したバイオマスガス化発電は、枝葉等を加熱分解して、水素等のバイオマスガスを取り出すものである。ガス化の簡易的な化学反応式を次に示す。

*1 土木事業本部 環境エンジニアリング部 *2 ㈱中外炉工業



C_nH_mO_p: 草木類の主成分

a~e, x, y: 反応に伴い決まる整数(yは0ないし4以上)

ガス化には、表2に示すように加熱方式やガス化炉の形式の違う多くの処理方式がある。本検討の主目的は、放射性セシウム含有バイオマスの処理(減容化)であるが、対象として想定される物には枝葉以外にも樹皮や刈草、剪定枝等、多くの種類・形状があり、それらに対応する必要がある。このような多種多様な原料の処理にはロータリーキルン式のバイオマスガス化設備の適用性が高いことから、本検討では間接加熱ロータリーキルン方式のガス化炉を有するバイオマスガス化発電設備を検討対象とした。

表2 ガス化方式の違いによるガス化炉の種類²⁾

ガス化方式	直接式		間接式	
	アップドラフト式	ダウンドラフト式	噴流式	ロータリーキルン
炉型	湿チップ定型	乾チップ定型	乾燥粉体	乾~湿チップ定型~不定形
原料	大きなものは不可		不可	50mmまで可能
異物	大きなものは不可		不可	50mmまで可能
ガス (MJ/m ³ N)	一酸化炭素 主体 4~5		水素 主体 8~12	
設備構成	単純	単純	複雑	複雑
タール	多い	少ない	少ない	少ない
発電量	10~2,000kW	10~200kW	50~250kW	180~1,000kW
残渣	チャーアッシュ	チャーアッシュ	灰	灰
廃水	多い	少ない	多い	無

2. ロータリーキルン式バイオマスガス化発電

2.1 技術の概要

図1にバイオマスガス化発電システムフローを示す。本システムでは、バイオマスは乾燥装置で水分を調整した後、外熱式キルンでガス化を行う。ガス化の温度は750℃程度で、ガス化しなかったものは炭化物として炭化物貯留槽に排出される。一方、揮発したガスには水素・一酸化炭素等

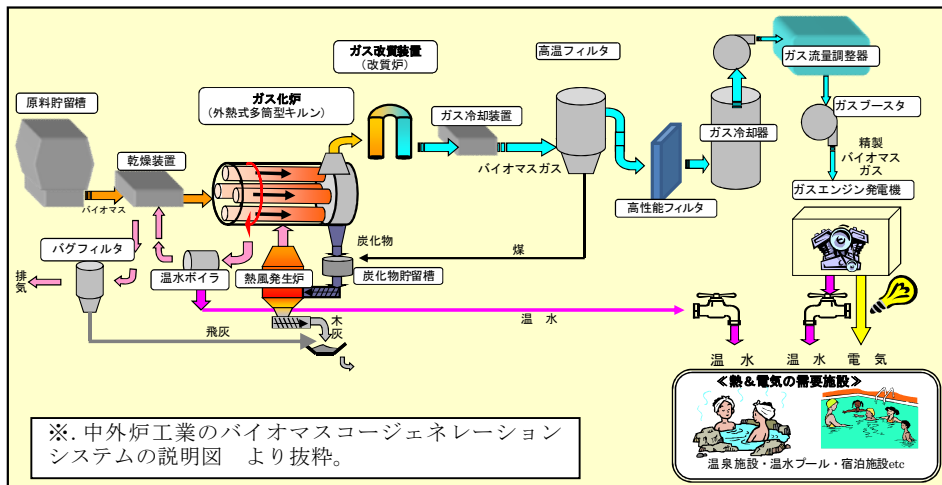


図1 バイオマスガス化発電設備のシステムフロー³⁾

の可燃性ガス成分以外に水分・タール分を含む。このうち、タール分は機械トラブルの原因となることから改質炉で加熱分解し、可燃性ガスに変換する。その後、すすなどの固形成分の除去および冷却・除湿を行なって燃料ガスとし、ガスエンジン発電機の燃料として利用する。

一方、炭化物は熱風発生炉に投入して燃焼させ、ガス化炉の熱源となる熱風を作る。燃焼後の主灰は熱風炉の底部から、飛灰についてはバグフィルタにより回収される。バイオマス由来の灰には植物の有用元素であるカリウム等が豊富に含まれることから通常は肥料として有効利用される。

2.2 検討すべき課題

本システムで放射性セシウムを含有する枝葉等のバイオマスを処理するには以下の点を明確にする必要がある。

- ①放射性セシウムの挙動把握
- ②放射性セシウムの環境中への排出防止対策
- ③長期間の運転に伴うセシウムの蓄積対策
- ④灰の処理処分方法

これらの4点について模擬試料を用いた室内試験および実際の放射性セシウム含有バイオマスを用いた実証試験を行い確認した。

3. 試験概要

本システムは、炭化・ガス化の段階と炭化物の燃焼の2段階の処理を行う。このため、本検討ではそれぞれの段階を模擬した試験を実施し、全体の挙動を把握することとした。試験概要を以下に示す。

3.1 試料

室内試験には模擬試料を、実証試験では実汚染試料を用いた。それぞれの詳細を以下に示す。

3.1.1 模擬試料

模擬試料は、市販の木質チップ(燻製用、広葉樹ミックス)を塩化セシウム水溶液中で1時間程度攪拌混合し、安定セシウムを木質チップ中に含浸させ、その後、溶液中から取り出し、附着水を落とした後に30℃設定の乾燥炉内で乾燥させて作製した。乾燥後のチップは十分に攪拌混合したうえで一定期間養生して試験に供した。出来上が

った模擬木質チップのセシウム濃度は 55mg/kg-dry であつた。模擬木質チップの作製状況を写真 1 に示す。



写真 1 模擬木質チップ作製状況

3.1.2 実汚染試料

実汚染試料には、放射性セシウムを含有する間伐材の幹部のチップと枝葉のチップおよび牧草を用いた。表 3 に各試料の概要および濃度等を示す。

表 3 実汚染試料の概要

試料	木チップ(間伐材)	木チップ(枝葉)	牧草
内容	H23冬～H24春にかけて間伐した杉材のチップ(樹皮付き)を用いた。あらかじめ15mm程度以下に調整し、十分に均質化して試料とした。	H23冬～H24春の間伐時に発生した林地残材(枝葉・梢材)を採取し、15mm程度以下に調整後、十分に均質化して試料とした。	H24春に刈り取った牧草で乾燥状態で保管中のものを15mm程度以下に裁断し均質化して試料とした。
写真			
濃度	¹³⁴ Cs 34Bq/kg ¹³⁷ Cs 50Bq/kg 合計 84Bq/kg	688Bq/kg 1.020Bq/kg 1.708Bq/kg	778Bq/kg 1.190Bq/kg 1.968Bq/kg
嵩密度	g/L 112.09	145.2	70.79
強熱減量	% 99.5	97.64	88.63

3.2 試験設備

室内試験はセシウムの収支の把握および発生ガスの状況観察が容易なように管状炉を用い、実証試験では小型のバイオマスガス化試験装置を用いた。詳細を以下に示す。

3.2.1 室内試験装置

室内試験装置の概要を表 4、写真 2 および図 2 に示す。模擬汚染試料は燃焼ポート(石英製ポートおよびインコネル製ポートを使用)に入れ、1 段目の管状炉にセットした。1 段目および 2 段目の管状炉は実処理時の条件を想定した温度に加熱した。また、キャリアガスとして、ガス化処理時は窒素を、燃焼処理時は空気を一定量流している。

3.2.2 実証試験装置

実証試験装置は既存のバイオマスガス化小型実証炉を改造したもので、ロータリーキルン部分とガス改質部分の 2 段の加熱ゾーンを有する。既存設備では排ガス処理用集塵設備が無かったことから、プレフィルタおよび HEPA フィルタを追加設置した。各設備の詳細を表 5、写真 3 および図 3 に示す。

表 4 室内試験装置仕様

名称	仕様
1 管状炉1	いすゞ製作所EPKRO-11K 加熱延長300mm、最高温度1050℃(常用850℃)
2 管状炉2	アサヒ理化製作所ARF-30KC 加熱延長260mm、最高温度1200℃(常用1100℃)
3 炉心管	石英管 φ26×30mm、L=850mm および L=650mm
4 流量調節弁	精密ニードルバルブ付流量計KOFLOC製Air/N2二連 最大1L/min
5 ガス吸収瓶	ガス吸収瓶(吸収液:蒸留水もしくはアセトン、アイスバスにて冷却)
6 吸引ポンプ	ポータブルアスピレーター MDA-015
7 ガス配管	テフロンチューブ、シリコンチューブ



写真 2 室内試験装置設置状況

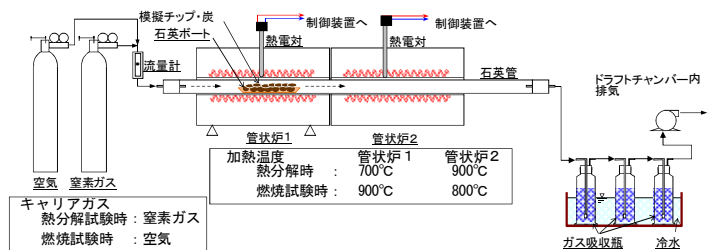


図 2 室内装置設備構成

表 5 実証試験装置仕様

名称	仕様
1 ガス化炉	電気ヒータ式キルン炉、電気容量25kW L ³ 4,700mm×W ¹ 1,044mm×H ¹ 1,470mm、加熱部長 2,500mm
2 接続管	40A、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25kW L ² 2,650mm×W ² 1,344mm×H ² 1,620mm、加熱部長 1,950mm
4 徐冷管	40A、空冷配管、L=300mm×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:エアパルス付 φ400mm×h1000mm 不織布+表面加工、捕集効率0.3μm×99% HEPAフィルタ:□305mm×105mm
7 プロワ	耐圧防爆形 0.5kw 2P、8.3m ³ /min×3.1kPa
8 ガス流量計	フローセル式流量計 1~10m ³ /h



写真 3 実証試験装置全景

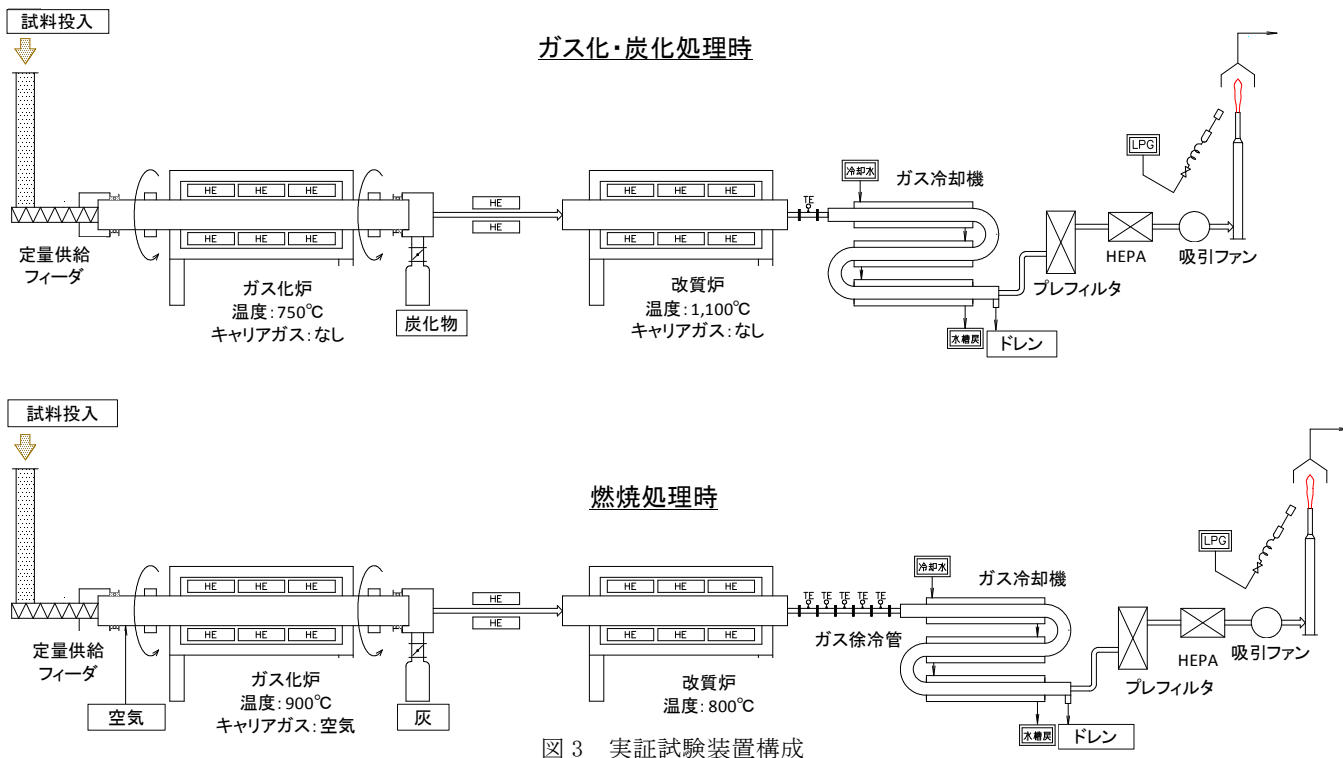


図3 実証試験装置構成

実証試験は、装置を十分に加熱した後、各試料を定量供給フィーダで定量供給し、処理完了後に炭化物ないし主灰を回収すると共に、各試験終了時にすべての装置を解体し、内部の付着物を回収することでセシウムの追跡を行った。

試験フローを図4に示す。

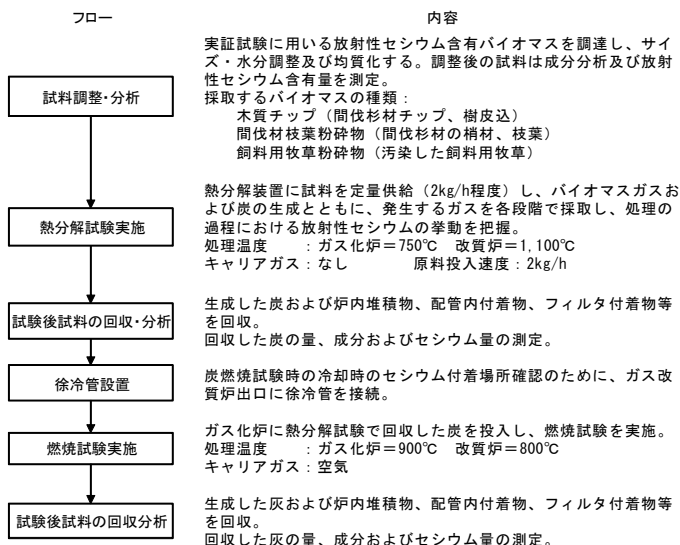


図4 試験フロー

写真4はガス化炉出口部分の状況を示したものである。実証試験前には非汚染の木質チップを用いた試運転を行なったため、それらの残留成分の影響を避けるため、実証試験

開始前に装置内を拭き取り清掃し、金属面を露出させている〔写真4(1)参照〕。なお、各々の試験完了後、同様の拭き取り清掃等を行い、すべての試験開始時には同様の状態にしている。写真4(2)は炭化処理後の状況である。装置内壁にはタール分由来の黒色皮膜が一面に付着したが、これらはすべて拭き取り回収し、全量を放射性セシウムの分析に使用した。写真4(3)は燃焼処理試験後の状況である。燃焼処理試験後は飛灰相当の白色付着物が内面に付着した。これらも回収し、全量分析している。すべての試験終了後、再度清掃を行い写真4(4)の状態とした。

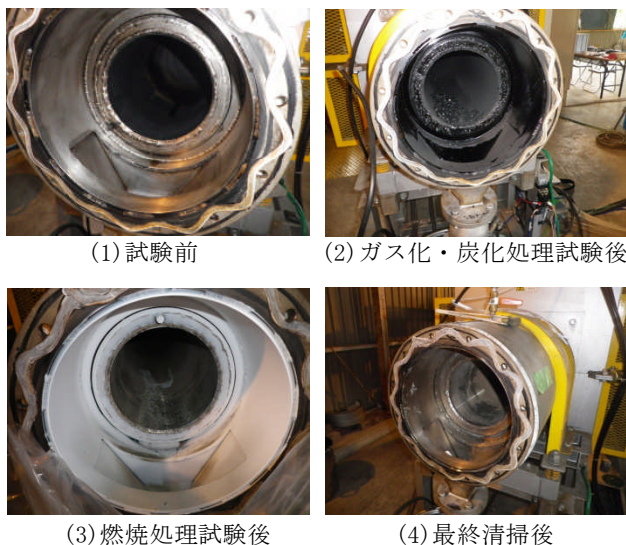


写真4 ガス化炉出口部の状況

の形態で塩化カリウムと同様の挙動を示すものと想定された。この結果は国立環境研究所の廃棄物焼却過程における放射性セシウムの挙動に関する研究成果⁴⁾と一致する。なお、これらの付着物は拭き取りが容易なものであった。

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

4.2.2 減容・減量効果の評価

表9にバイオマスのガス化・炭化焼およ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の検討を行った。

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ベントナイトを灰の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。

表8 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	

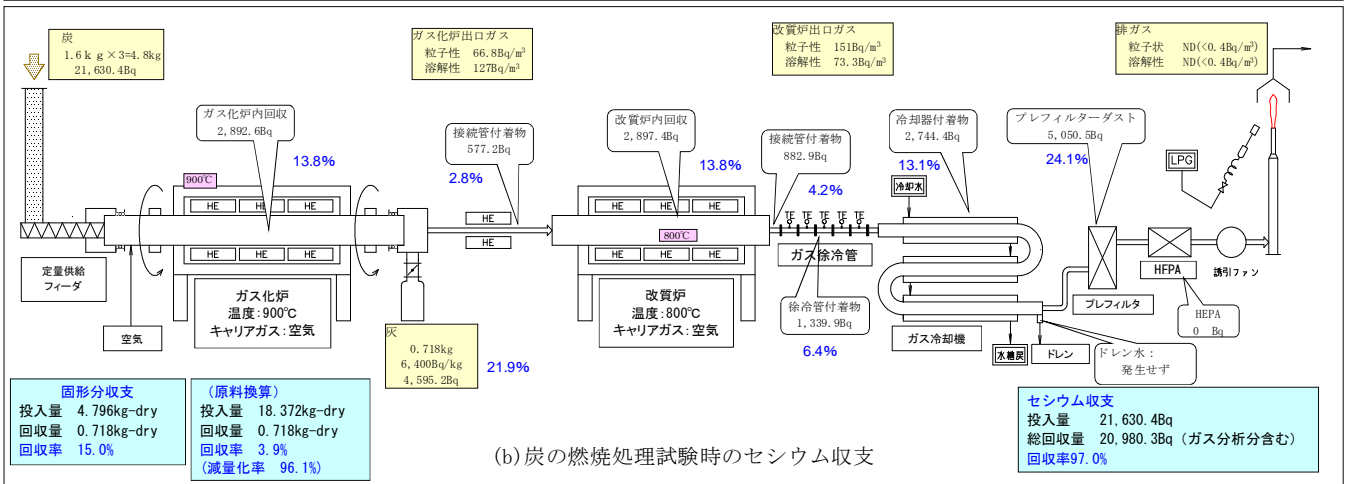
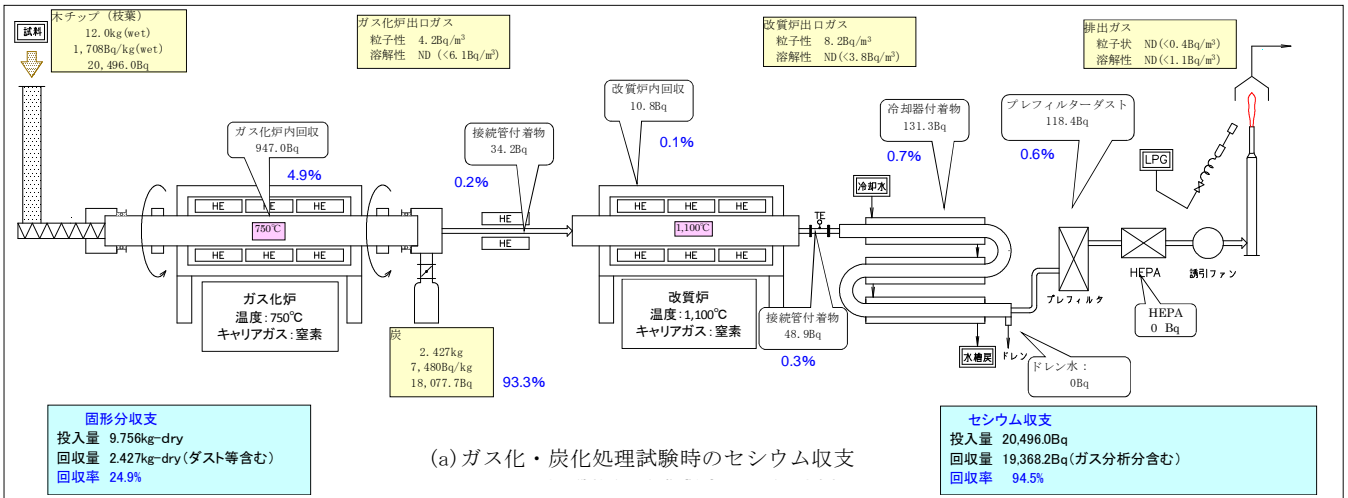


図7 小型実証試験装置の収支

表9 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	10.42	10.50	9.76	乾重量
	Cs濃度	Bq/kg	97	2,193	2,101	乾重量ベース
	容積	L	107.1	165.3	82.6	
処理後	排出炭量	kg	2.36	3.44	2.43	乾重量
	Cs濃度	Bq/kg	390	5,651	7,480	乾重量ベース
	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
	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						
原料 換算	炭投入量	kg-wet	1.6	1.6	1.6	
	重量	kg	7.05	4.89	6.43	投入炭量+原料投入/排出炭量、乾重量ベース
	容積	L	72.48	76.96	54.48	換算投入セシウム総量=21,630Bq
	合計容積	L		203.92		
処理後	灰重量	kg		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		灰中Cs総量=4,595Bq
	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
	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%、ベントナイト1%添加時
	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、湿ベース
	減容化率(固化体)	%		99.6		

5. コスト試算と実用化に向けた課題

5.1 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(2,000Bq/kg)の放射性セシウムを含有するバイオマスを実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を評価した。表10に算定結果を示す。

表10 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%

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、熱風発生炉にコンクリート遮蔽壁の設置等を施すとした。

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。

5.2 コスト試算と問題点

放射性セシウム含有バイオマスを原料として用いる場合の対策費を考慮し、処理コストの試算を行った。試算条件を以下に示す。

主な試算条件

1) バイオマスの種類

燃料としては、現地で発生する放射性セシウム含有バイオマスのうち、長期にわたり発生が考えられる木質系バイオマスおよび草本系バイオマス(稲藁、もみがら)を想定した。なお、原材料の価格は、地元森林組合の木材チップ販売実績価格や林野庁の木材チップ価格統計(針葉樹で12.7千円/t-dry、広葉樹17.6千円/t-dry)より、放射性セシウム含有バイオマスであることを考慮し1/2~1/3程度の価格帯となる5,000円/t-dryを想定した。

2) 設備条件

設備規模は、バイオマス処理量が88t-wet/日となる送電端出力1,200kWクラスの設備(600kW×2台)を想定した。年間の処理量は26,400tを想定したが、この量は、例えば下表に示すように岩手県奥州市の未利用バイオマスの概ね半分に相当する。

表11 岩手県奥州市におけるバイオマス利用可能量⁵⁾

	賦存量	現状利用量	現状利用率	発電 利用可能量
	t	t	%	t
林地残材	8,717	0	0	8,717
果樹剪定枝	1,319	0	0	1,319
稲わら	69,973	25,841	37	44,132
もみがら	17,933	16,458	92	1,475
合計				55,643

3) 運転条件

運転は年間300日-24時間で運転するものとした。ただし、連続運転期間は12.5日とし、定期的に付着物の払落し等のメンテナンス期間を設けている。

4) 収支条件

放射性セシウム含有バイオマスを原料として発電および熱回収を行い、その売電収入および熱供給に伴う燃料用重油削減費用を収入として、設備の経済的な自立の可否を検討した。

バイオマス利用設備では、設備費に50%の補助金を用いるケースとFIT制度(再生可能エネルギー固定買い取り制度)を利用する場合が想定されることから、両者を比較した。

上記の条件で試算した結果、FIT制度の未利用バイオマス発電(買取価格33.6円/kWh)を利用した場合、14.6年で投入した資金の回収が可能であることが分かった。一方、補助金を利用した場合、売電単価(15円/kWh)が低く、運転時の支出が収入を上回り、事業が成立しない結果となった。

表 12 送電端出力 1200kW 級 バイオマスガス化発電に伴うコスト収支 (試算)

項目		補助利用	FIT利用	備考
1. 建設費				
ガス化発電設備一式	千円	2,299,700	2,299,700	
公的補助 補助率	%	50	0	
初期投資額	千円	1,149,850	2,299,700	
2. 年間維持管理費				
資本費	千円/年	86,699	155,690	減価償却 (90%、15年定額) および固定資産税
バイオマス代	千円/年	66,000	66,000	5千円/tを想定
メンテナンス費	千円/年	70,231	70,231	15年間平均
ユーティリティフィー	千円/年	64,223	64,223	
灰処理費	千円/年	3,168	3,168	10千円/t (固化処理原材料費)
人件費他	千円/年	28,800	28,800	常時2名
(上記合計)	千円/年	319,121	388,112	
3. バイオマス導入による経済メリット				
売電収入	千円/年	129,600	290,304	15円/kWh (FIT不使用), 33.6円/kWh (未利用木材扱い)
重油削減効果	千円/年	117,852	117,852	80円/L、ボイラ効率90%
導入メリット (上記合計)	千円/年	247,452	408,156	
年間収入	千円/年	-71,669	20,044	
償却年数	年	(成立せず)	14.6	

本検討は概算での検討であり、実際の適用に当たっては詳細な再検討を必要とするが、放射性セシウム含有バイオマスを有効利用することにより処理費用をかけない減容化処理が十分可能なことが期待できる結果となった。

一方、売電などを行わず、放射性セシウム含有バイオマスの減容化処理施設 (廃棄物処理施設) として運用した場合の処理コストは 12 千円/ t-wet であった。

6. おわりに

本検討により、放射性セシウムを含有するバイオマスであっても、装置内への放射性セシウムの蓄積対策、放射線遮蔽対策および排ガス対策を行うことで、バイオマスガス化発電の原料として安全に利用でき、事業として成立する可能性が確認できた。

これは、バイオマスガス化発電が森林内に残っている放射性セシウムの経済的な回収・減容化のシステムとして成立することを示唆している。

現在、森林の除染については明確な方針が示されていないが、長期的には森林内からセシウムを回収する手段が必要と考える。その場合に、この様なシステムを活用することで、森林内のセシウムを回収してコストをかけることなく減容化し、安全に保管することが可能となり、結果的に山間部の除染に寄与できるものとする。

参考文献

- 1) 株式会社鴻池組：環境省「平成 24 年度 (平成 23 年度からの繰越分) 除染技術実証事業 (その 1) : 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及びエネルギー回収」実証試験報告書、2012. 9
- 2) 笹内謙一：スマートエネルギーネットワーク最前線、(株)エヌ・ティー・エス、pp. 78-91、2012. 4
- 3) 中外炉工業技術資料：木質バイオマスガス化熱電併給設備
- 4) 国立環境研究所：放射性物質の挙動から見た適切な廃棄物処理処分 (技術資料：第三版)、pp. 64-70、2012. 12
- 5) 岩手県奥州市：奥州市バイオマスタウン構想ダイジェスト版、2010. 3