

# 論文の内容の要旨

論文題目 バイオマスガス化技術の実用化研究及び  
エネルギー作物を利用した放射線汚染地域への適用に関する検討

氏名 松本 啓吾

## 1. 背景

バイオマスはカーボンニュートラルであり、潜在量の多さから積極的なエネルギー利用が強く期待されているが、これまでは主に燃焼利用に限られてきた。小規模の燃焼プラントでは効率が低下し、比較的安価なバイオマスに限定される。そこで、輸送コストが高い林地残材等を利用でき、食物との競合がないガス化液体燃料製造プロセスに着目した。また、海外では運転実績が多いもの<sup>(1)</sup>、国内では事例が少ない<sup>(2)</sup> ガス化発電システムに着目した。液体燃料製造システムは海外も含めて実用事例がなく<sup>(3)</sup>、実用規模でのプラント効率向上（コストダウン）が必要であり、2t/日試験プラント運転結果から、実機プラント効率向上を検討するためのガス化モデルを構築することを目的とした。また、ガス化発電では、国内の普及にはバイオマス収集から有効利用まで含めた総合的なモデル構築が必要であり、放射能汚染地域におけるエネルギー作物を利用したガス化発電事業に関するケーススタディを行った。

## 2. バイオマスガス化モデルの開発

### 2-1 ガス化方式及び使用バイオマス

実機プラント設計のため、2t/日試験プラントのデータを取得した。流木は土砂が混合しており、灰分が多かった（表 1）。液体燃料はメタノールを選定した。メタノール合成のためにはガス組成が  $H_2/CO=2$  とする必要があり、バイオマス ( $CH_2O$ ) をガス化しても適した生成ガスは得られない。そこで、水蒸気と酸素をガス化剤とし、温度コントロールが容易な噴流床ガス化方式を採用した。

表 1: 供試バイオマス

	C* (wt%)	H* (wt%)	S* (wt%)	O* (wt%)	N* (wt%)	灰分* (wt%)	HHV* (kcal/kg)
スギ	50.8	6.0	0.02	42.8	0.09	0.31	4942
広葉樹	48.2	5.8	0.03	45.1	0.14	0.74	4684
スギ樹皮	50.7	5.7	0.03	41.4	0.26	1.87	4966
伐採木	50.2	5.9	0.03	43.0	0.14	0.59	4869
流木	45.3	5.4	0.04	37.7	0.18	11.4	4381
建築廃材	49.7	5.9	0.08	42.5	0.60	1.08	4818

### 2-2 ガス化モデル

ガス化炉は上に向かって断面積が拡大する構造となっており、上部のガス化域が 80% 以上を占める（図 1）。また、炉上部の温度勾配が条件により変化しないため、ガス化炉上部温度でガス化特性を整理した。ガス化モデルは、水蒸気を除いて平衡計算をして部分燃焼ガス化を模擬し、 $CH_4$  をメタネーション反応で所定の転換率 ( $\eta_c$ ) で発生することとし、最後に水蒸気が混合し、シフト反応が反応進行率 ( $\eta_s$ ) に従い進行することとした。

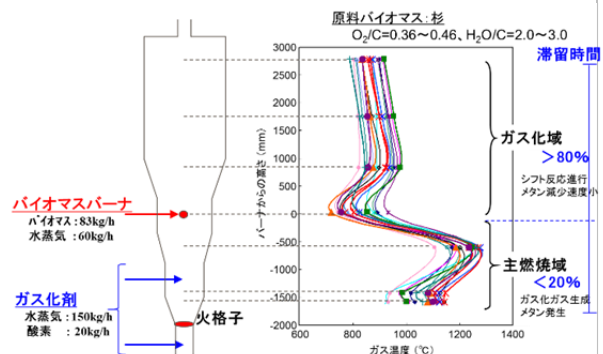


図 1: バイオマスガス化炉と温度分布

### 2-3 モデルパラメータ解析結果

試験プラント運転結果を逆解析し、各々のパラメータを整理した。CH<sub>4</sub>は1050℃でも8%程度残存した(図3)。シフト反応の観点では、ガス化炉上部温度は950~1,000℃が望ましいことが示された。950℃以下ではシフト反応が十分進行せず、1,000℃以上では酸素量が増加することでH<sub>2</sub>が燃焼し、減少する。

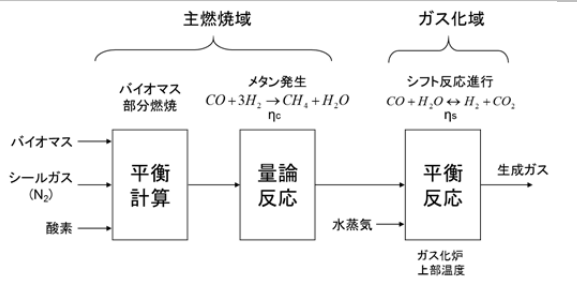


図2: バイオマスガス化モデル

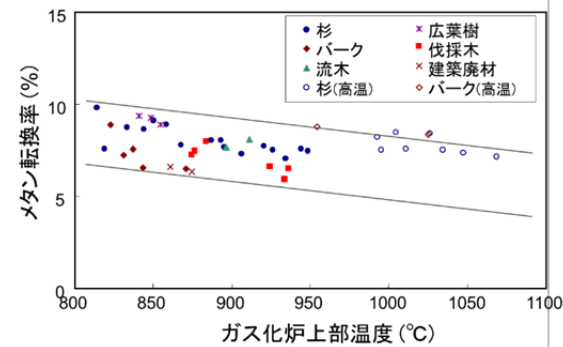


図3: ガス化炉上部温度とメタン転換率の関係

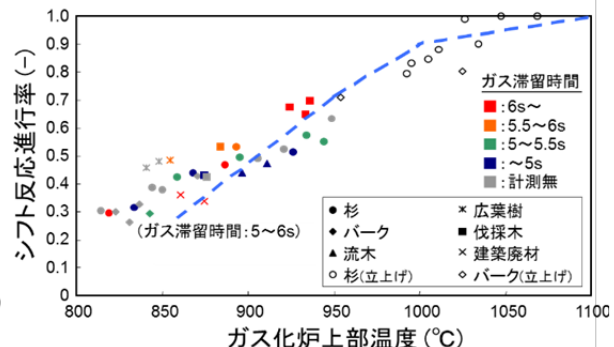


図4: ガス化炉上部温度とシフト反応進行率の関係

### 3. 副生物リサイクルモデルの構築

2t/日試験プラントではチャーが5%程度残存し、O<sub>2</sub>/Cを下げると未燃分が増加し、冷ガス効率は頭打ちとなった。このため、リサイクルにより冷ガス効率(生成ガス熱量/バイオマス入熱量)を向上させる必要があった。そこで、チャー反応モデルの構築を行った。

#### 3-1 チャー反応モデル試験結果

ガス化炉内を一定温度とし、ガス化剤量により滞留時間を設定する管型反応炉を用いて、チャー反応速度を算出した。典型的なガス化条件であるH<sub>2</sub>O分圧0.05MPaでは、約0.06(1/s)の反応速度が得られた(図6)。

#### 3-2 バイオマス種類による反応率の関係

240kg/日規模試験でのシバも含めて解析した結果、触媒作用を持つアルカリ金属濃度で反応速度が整理できることが示された(図6)。

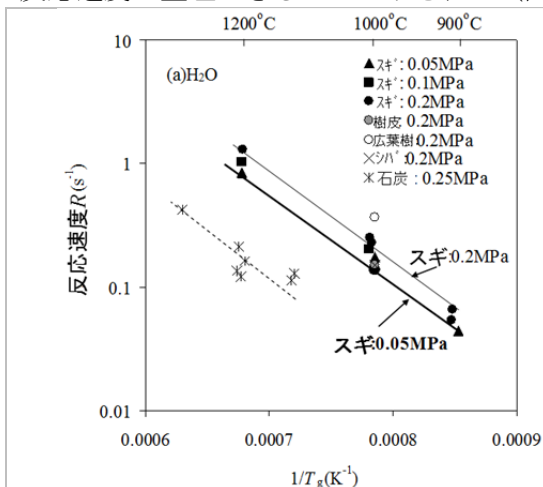


図5: 水蒸気雰囲気でのアレニウスプロット

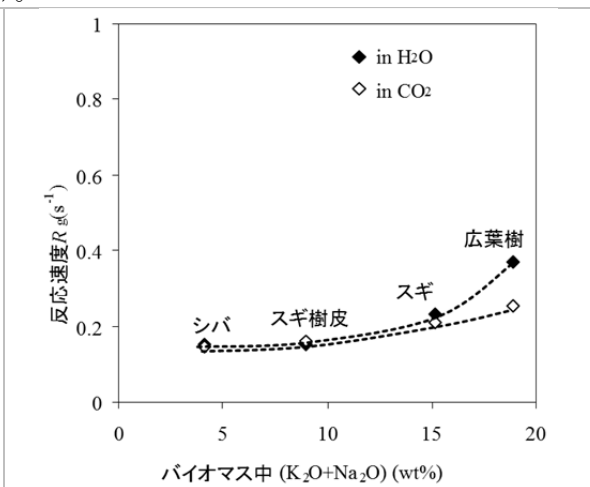


図6: バイオマス中アルカリ金属と反応速度の関係

## 4. バイオマスガス化プロセスによる放射能汚染地域の有効活用

### 4-1. 背景

2011年3月11日に起こった福島第一原子力発電所事故により大気中に放出された放射性物質は風により運ばれ、広範囲の農地が荒地となる問題が起こっている。そこで、エネルギー作物を栽培することで、放射線汚染地域にて農業生産を早期に再開し、売電により生産者、事業者の利益を確保しながら、農地としての機能を維持・回復し、再生エネルギーを生み出すことが有効であるものと考えた。そこで、本研究は半減期が約30.2年と長いCs<sub>138</sub>に着目し、ガス化利用時のCs挙動を把握することを目的とした。

### 4-2 燃料性状

エリアンサスは2kg/m<sup>2</sup>/年の高い成長率を持ち、灰分が3.5%と一般的な草本類(10%前後)に比べ少なく、発生する廃棄物量が少ない。また、冬季に立毛乾燥状態で収穫するために水分が少なく、プラント効率が高いことが特長である(表2)。

圃場試験の結果<sup>(3)</sup>、土壌中のCsの移行率は1%以下であり、Cs濃度が8,000Bq/kgまでは通常の燃料としての扱いが可能であることから<sup>(4)</sup>、少なくとも約9×10<sup>6</sup>Bq/m<sup>2</sup>の汚染地域で栽培したエリアンサスのCs濃度は8,000Bq/kgを下回るものと考えられ、居住制限区域(約2×10<sup>6</sup>Bq/m<sup>2</sup>)で栽培されたものでも燃料利用として許容できる。

表2: エリアンサス分析結果

項目	単位	エリアンサス	スギ
水分	%	4.77	27.7
灰分	%	3.50	1.91
可燃分	%	96.5	98.1
炭素	%	47.2	54.6
水素	%	6.10	5.75
窒素	%	0.72	0.41

### 4-3 基礎試験(図9)

50gのバイオマス試料に単体として50mgのCs(非放射性CsCO<sub>3</sub>)を混合して試験を実施した。燃焼条件では、電気炉出口以降のCs回収率が11.8%となった(図7)。一方、ガス化条件を模擬した無酸素条件では、冷却過程におけるCs回収率は0.4%以下となり、燃焼利用時に比べ後流への飛散が抑制できることが示された。

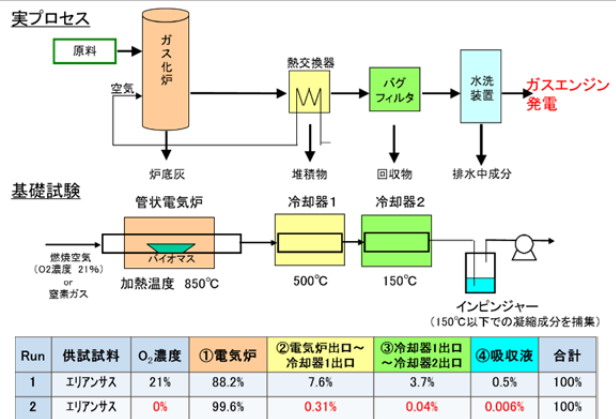


図7: ガス化プロセスと基礎試験方法及び試験結果

### 4-4 平衡計算による検証

基礎試験結果におけるCs挙動を考察するために、平衡計算では汎用コードMALT2を用いて平衡計算を行った。酸化雰囲気ではCsNO<sub>3</sub>が支配的となり、低温ほど存在割合が増加することが示された。一方、無酸素雰囲気(還元雰囲気)ではCsClが支配的であり、冷却時に固相に移行することが示された(図8)。

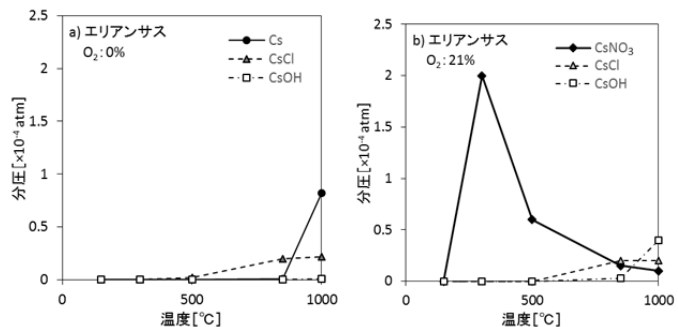


図8: Cs化合物の平衡計算結果(左: O<sub>2</sub>濃度0%, 右: O<sub>2</sub>濃度21%)

#### 4-5 経済性検討

100t/日処理量のガス化発電プラントを建設し、放射線汚染地域でのエリアンサス栽培を行うケースの経済性を検討した。

水分量は10wt%とした。ガス化炉のヒートロスバイオマス入熱量に対して2%、炭素転換率は99%とした。

計算の結果、 $O_2/C$ (燃料中Cに対するガス化剤  $O_2$ mol 量)を0.32以下とすれば、冷ガス効率が78%となり(ガス化温度:  $850^{\circ}C$ )、スクラバから排出されるドレン(排水)量を0にできることが示された(図9)。このため、排水処理が不要となると考えられる。

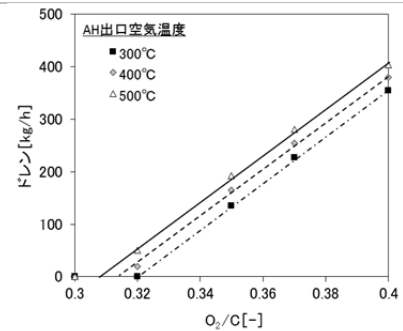


図9:  $O_2/C$  とドレン量の関係

経済検討では、所内動力は20% (粉碎、スクラバ動力、ファン動力等)とした。売電単価は20円/kWhとした。支出はバイオマス生産費用、灰処理費用(溶融処理)、建設費用<sup>(2)</sup>、メンテナンス費用(2%)、人件費、管理費、税金を見込んだ。償却期間は10年とし、ユーティリティは所内動力に含めた。検討の結果、収入が支出を上回ったことを確認した(表3)。

ここで、Csは灰に約30倍に濃縮されるため、Cs濃度は8,000Bq/kgを超える可能性が高く、放射性物質としての取扱いが必要となる。灰の発生量はエリアンサスの灰分3.5%として、約1,300t/年となる。

表3: 経済性試算結果

大項目	小項目	単位	
収入		万円/日	75,920
検討条件	バイオマス	t/日	100
	発電効率	%	31
	送電効率	%	28
	バイオマス発熱量	kcal/kg	4,000
	所内率	%	20
	発電量	MWh/日	104
	売電単価	円/kWh	20
支出		万円/年	74,618
バイオマス費	バイオマス単価	万円/t	0.6
	バイオマス費用	万円/年	21,900
灰処理費	灰分	wt%	3.5
	溶融処理単価	万円/t	1
	灰処理費用	万円/年	1,278
償却費	建設費	億円	40
	償却期間	年	10
メンテ費	償却費	万円/年	40,000
	メンテ費用率	%	2
人件費	メンテ費用	万円/年	8,000
	人件費	万円/年	2,400
ユーティリティ	(所内率に含む)	万円/年	0
管理費・税金	(人件費+メンテ費)×10%	万円/年	1,040

灰貯蔵設備費用は10万円/m<sup>3</sup>と言われており、年間費用は灰溶融後の灰比重を1.0kg/m<sup>3</sup>として約1.3億円/年、貯蔵設備費用まで含めた売電価格は約24円/kWhとなる。これでもFIT制度における一般木材等燃焼発電時の買取り価格(25.2円/kWh)を下回っており、本プロセスが放射性物質汚染地域活用の有効手段のひとつであることが示された。

#### 5. まとめ

再生可能エネルギーとして安定してエネルギーが供給可能なバイオマスに着目した。輸送コストが高いバイオマスを活用するためには、高付加価値で利用する必要があり、ガス化プロセスに着目した。

バイオマス処理量2t/日の試験プラント運転結果から、メタン転換率、シフト反応進行率を用いたガス化モデルを構築した。また、副生物のチャーのガス化モデルを基礎試験結果より構築し、リサイクル装置設計及びバイオマス種類変化時の予測を可能とした。

福島第一原子力発電所事故により放射線物質に広範囲に汚染された農地の有効活用のため、エリアンサスを用いたガス化発電システムを検討した。燃焼プロセスに比べてCsの後流機器への飛散が少ないことが示され、有効な手段のひとつであることが確認された。

#### 参考文献

- (1) Jan Brandin et al. "Small Scale Gasification: Gas Engine CHP for Biofuels", Swedish Energy Agency Report, Växjö/Lund (2011)
- (2) バイオマスエネルギー導入ガイドブック (第3版)、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2010)
- (3) 第2世代バイオ燃料製造技術の研究開発に関する報告書、財団法人 石油産業活性化センター (2007)
- (4) Kobayashi M et al., Grassland Science 59: 173-181 (2013)
- (5) 農研機構 2012年度成果情報「放射性物質を含む作物残さ・雑草、枝葉等の安定・減容化技術」(2012)