

## 2. 草木バイオマスの浮遊外熱式ガス化と液体燃料合成 実証プラント「農林バイオマス3号機」の成果

長崎総合科学大学・新技術創成研究所 特任教授 坂井正康

### 1. はじめに

バイオマスの中でも量的な観点から期待の大きい草木系のバイオマスを対象とした高効率エネルギー変換技術と、この技術を中心とした実用機展開について説明したい。新しい技術の起点となるのは熱化学的ガス化法で、浮遊外熱式高カロリーガス化法と呼んでいる。外部より加熱した反応管の内部に水蒸気と原料バイオマス粉体を供給し、水蒸気改質反応によってガス化させるもので、得られる生成ガスはクリーンな高品質高カロリーガス燃料となる。生成ガスはガス燃料としてだけでなく、これまでにない化学合成原料に利用可能な組成を持っている。

まず、効率が高いエンジンによるガス化発電を50kW実証プラント（以下、「農林バイオマス3号機」と呼ぶ）によって実用化開発を進めた。一方、この技術で得られる生成ガスは水素と一酸化炭素を主成分とする化学原料となることから、液体燃料メタノール合成に利用できる。メタノール合成では小規模プラントにも適用できる低圧多段方式を開発し、「農林バイオマス3号機」に付設したプラントで実証した。

現在はガス化発電とメタノール合成併行運転システムを実用機として展開中である。

### 2. 新しい浮遊外熱式高カロリーガス化法

#### 2.1 技術の概略

従来のガス化技術では達成できなかった高品質・高カロリーなバイオマスガス化生成ガスが得られる新しい浮遊外熱式高カロリーガス化法（以下、高カロリーガス化法と呼ぶ）を開発した。この技術によって、ガス燃料製造、ガスエンジン発電、液体燃料合成、燃料電池発電等への新しい実用化展開が進められている。ここでは、このガス化法の基本現象、基礎実験結果を説明する。

本ガス化法は外部から800~1000℃に加熱した反応管内で、粉碎（3mm以下）したバイオマス粉と水蒸気をガス化反応（水蒸気改質）させる。酸素・空気をガス化剤として使わず、完全な水蒸気雰囲気でのガス化反応で、触媒も使わずに常圧で、原料バイオマス粉はガス燃料に変換される。原料バイオマスの有機成分のほぼ全量が $H_2$ 、 $CO$ 、 $CH_4$ 等の高カロリーガス燃料に（約16MJ/Nm<sup>3</sup>）に変換され、エンジンによる高効率発電が可能となった。さらに、この生成ガスは $H_2$ 、 $CO$ の組成比率が高いことから、化学合成原料ガス（合成ガスと呼ぶ）としても利用できる。現在は液化収率が高い低圧多段式メタノール液体燃料合成装置を開発し、「農林バイオマス3号機」に付設した実験プラントで実証した。

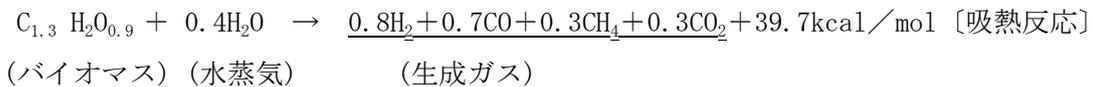
#### 2.2 高カロリーガス化法の基本原理

本高カロリーガス化法は従来になかった技術で、草木の固体バイオマスを利便性の高い化

石燃料なみのガス燃料に変換することが可能である。本ガス化法は 3mm 程度に粉碎したバイオマス粉体と水蒸気を反応管内で 800℃～1,000℃雰囲気において化学反応（水蒸気改質法と同意）させるもので、必要な反応熱は反応管からのふく射熱によって供給する。

このとき、反応管は別途に燃焼させたバイオマス熱ガス発生燃焼炉からの高温ガスで反応管外壁を加熱する。供給された粉体原料バイオマスは灰分を残すだけで、有機成分はほぼ全量がガス化し、クリーンな高カロリーガス燃料（約 4000kcal/Nm<sup>3</sup>、約 16MJ/Nm<sup>3</sup>）へ変換される。技術の概要と原理を図 1 に示す。ガス組成は、水素（H<sub>2</sub>）35～50%、一酸化炭素（CO）20～30%、メタン（CH<sub>4</sub>）7～15%、エチレン（C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>）1～4%、二酸化炭素（CO<sub>2</sub>、燃えないガス）10～20%で、外部燃焼熱を含めたガス化冷ガス効率は約 75%である。つまり、供給バイオマスエネルギーの 75%を都市ガス同様のガス燃料に転換できることになる。

このガス化反応は反応温度、滞留時間（反応時間）、[水蒸気] / [バイオマス炭素] モル比等の反応条件によって発生するガス組成が変化するが、一例を示すと次の様な反応式で表される。



このとき、このガス化反応は吸熱反応であるため反応管外部からの加熱が必要である。この外部からの加熱によって、原料粉体がガス燃料となるため、生成ガスの保有する冷ガス熱量は原料バイオマスの熱量より大きく約 120%になる。ただし、反応に使われた外部よりの入熱を考慮した冷ガス効率は約 75%である。得られる生成ガスは H<sub>2</sub>、CO の成分が 70%をこえ、化学原料となる合成ガスとして十分利用できる性状である。一般的な部分燃焼ガス化と外熱式ガス化の生成ガス組成の違いを図 2 に示す。外熱式では、横軸左端の [O<sub>2</sub>]/[C]=0（左軸）のガス組成となり、

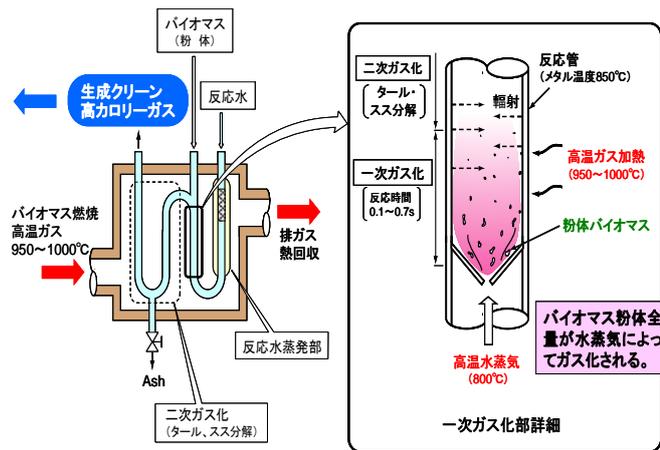


図 1 浮遊外熱式・高カロリーガス

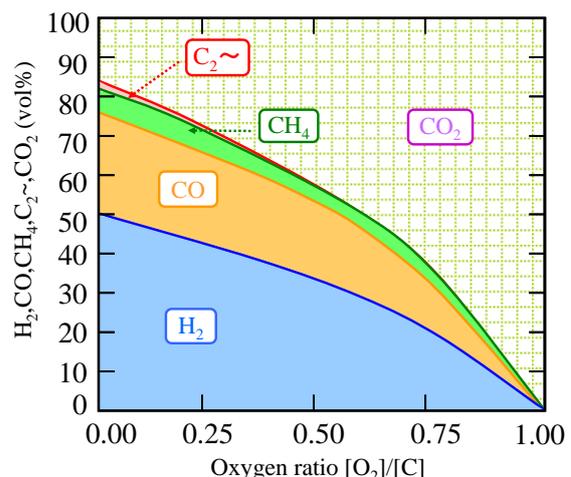


図 2 部分燃焼ガス化と外熱式ガス化による発生ガス組成特性、外熱式は [O<sub>2</sub>]/[C]=0.0

部分燃焼ガス化に比べ高品質組成になっていることがわかる。このガス化法ではタールの発生がほとんど無いのも特徴である。

また、H<sub>2</sub>の発生比率を反応温度、粒子径等によっても制御することが可能で、高温・微粒子ではH<sub>2</sub>比率は50%を超える。

基礎実験例を図3に示す。この生成されたガス燃料の理論燃

焼温度は天然ガスやプロパンの燃料より高く、ガスエンジンやマイクロガスタービンによる発電およびコ・ジェネレーション（熱電併給）に高効率で適用できることを示している。

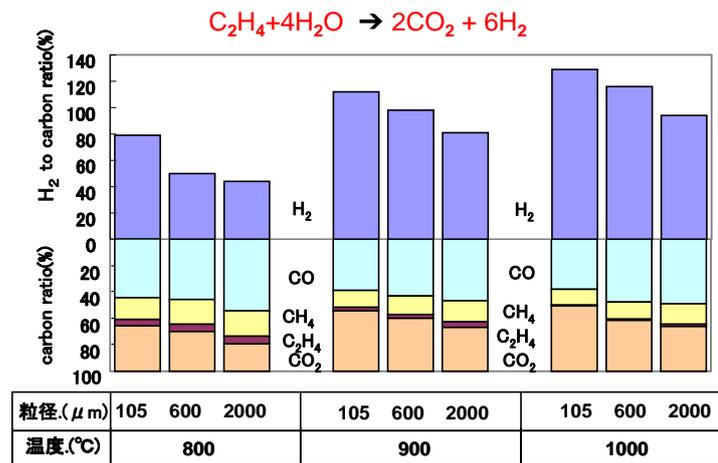


図3 ガス化条件による生成ガス組成比較

### 3. 高カロリーガス化法によるバイオマス高効率熱電併給システム

#### 3.1 システムの構成

この外熱式の高カロリー化法では間伐材、おが屑、バーク、稲わら、ネピアグラス、ソルガムなどの草本類・木本類ほとんどが原料として利用できる。この小規模バイオマスの高効率熱電供給システムの概要を図4に示す。

このシステムを大きく分けると (1) チップ状燃料を燃焼して、1200°C~の高温熱ガスを発生させる熱ガス発生燃焼炉、(2) この熱ガスを導入して反応管外壁を加熱し、反応管内に供給された水蒸気とバイオマス粉体から水蒸気改質反応を行なわせるガス化反応炉、(3) 反応炉からの排ガスの熱利用ボイラおよび排気、(4) 生成ガスの燃料タンク (5) ガスエンジン発電およびガス燃料利用系から構成される。

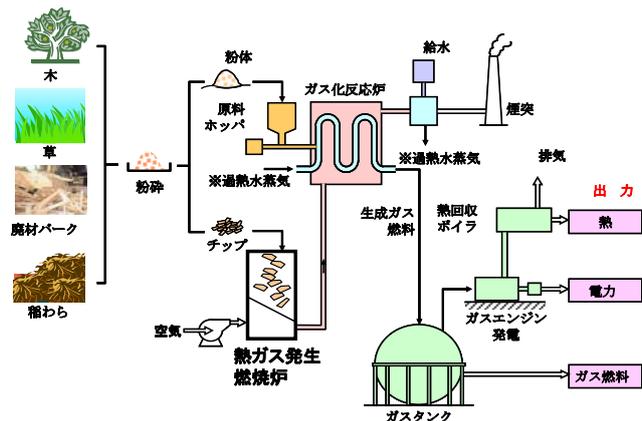


図4 小規模バイオマスの高効率熱電併給システム



図5 農林バイオマス3号機

### 3.2 実証プラント「農林バイオマス3号機」<sup>1)</sup>

高カロリーガス化法によってバイオマスを変換して得られるガス燃料は発電効率の高いガスエンジンによる発電にも問題なく使用できるもので、数kWから数百kWの小中型発電を高効率で実現できるものである。

この技術を実証するため、農林水産省プロジェクト研究として、50kWガスエンジン発電システムによって、実証試験を行った。この実証プラントは「農林バイオマス3号機」と名づけられている(図5、図6参照)。

本試験機では、1時間当たり50kgのバイオマス(乾燥重量)消費で50kWの電力が得られ、発電効果21%を実証した。得られた発電効率は図7に示すように従来方式の発電効率を大幅に向上させ、とくに、数kWから数百kWの小型発電では最高の発電効率(15~30%)を実現した。現在は実用機へ展開中である。



図6 農林バイオマス3号機・ガスエンジン発電

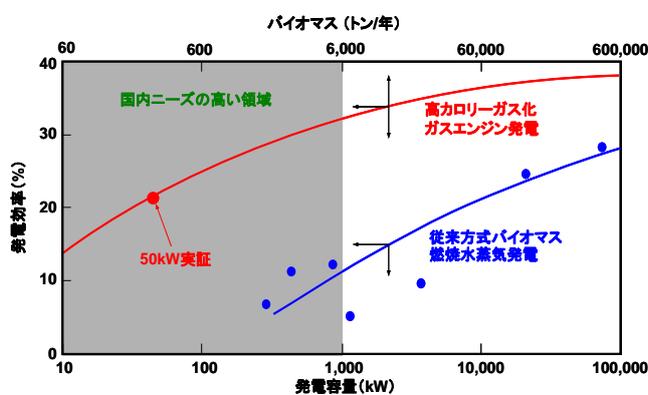


図7 従来発電システムとの発電効率比較

## 4. 高カロリーガス化法による小規模バイオメタノール製法

### 4.1 低圧多段抽出メタノール合成法の開発

高カロリーガス化法が「農林バイオマス3号機」によって、実用レベル技術であることが、実証され、得られる生成ガスは水素(H<sub>2</sub>)と一酸化炭素(CO)を主組成とすることから、化学合成原料ガスに適用できることが明らかになった<sup>2)</sup>。

一方、農林水産省委託研究において低圧多段抽出式メタノール合成法が小規模装置に有効であることが確認された。そこで、浮遊外熱式高カロリーガス化法によるバイオマスからの合成ガス製造と、低圧多段抽出式メタノール合成法を組み合わせることによって、小規模メタノール合成(数10ℓ/d~数kℓ/d)プラント

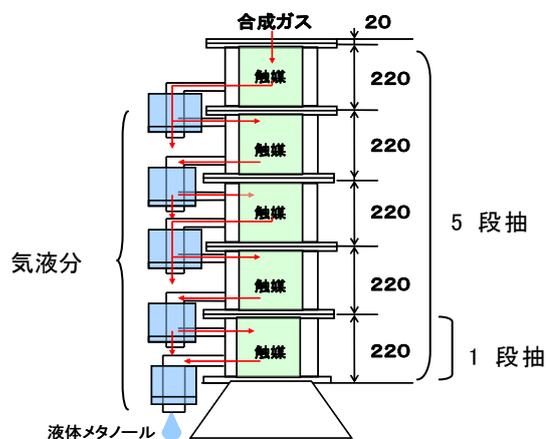
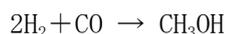


図8 小型メタノール合成試験装置の概略

が可能になった。この場合、天然ガスを原料とした実用技術の合成圧力が 10MPa であるのに対し、低圧多段抽出式メタノール合成装置では 1.5~2MPa の低圧力メタノール合成が可能になる。

この合成ガスを 1.5~2MPa (約 15~20 気圧) にポンプで加圧し、メタノール合成触媒 (銅・亜鉛) 塔に送ると、次の反応でメタノール (CH<sub>3</sub>OH) を合成される。



反応温度は 200~250℃ の発熱反応であるが、ガス状のメタノールは 60℃ 以下に冷却することによって、液体メタノールとして採取できる。基本的実験装置を図 8 に示す。本装置は CO、H<sub>2</sub> を含む合成ガスを触媒反応後、冷却し、未反応の混合ガスと合成されたメタノールを気液分離し、メタノールガスを逐次冷却液化して抽出し、未反応ガスのみを次の触媒反応筒に送る。

5 段階抽出におけるメタノール転換率 (モル基準: 合成メタノール / [H<sub>2</sub>, CO] 供給ガス) を従来法 (中間抽出なし、1 段階抽出に相当) と比較すると、合成圧力 1MPa (約 10 気圧) では約 4 倍、1.5MPa では約 6 倍に達し、平衡転換率を大きく上回る効率を得た (図 9)。平衡転換率からみて、実用機を想定した合成圧力 2MPa ではメタノール転換率 70% を達成でき、所要動力は既存技術 (10MPa) の 1/3 程度に低減できる。

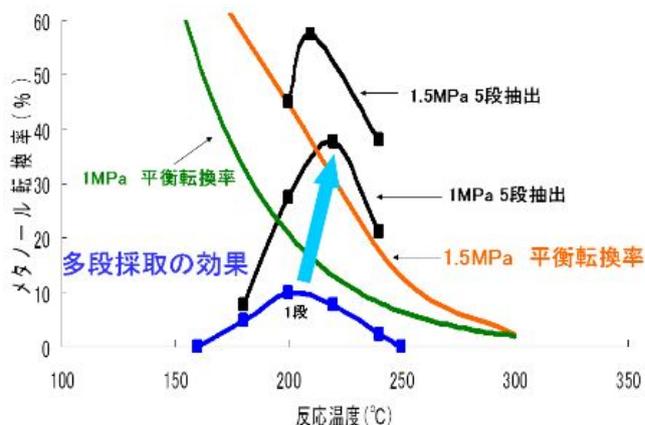


図 9 メタノール合成実験結果

## 4.2 高カロリーガス化発電と低圧メタノール製造併用運転実証

現在、「農林バイオマス 3 号機」高カロリーガス化発電プラントにメタノール製造 30ℓ/日規模の多段式メタノール合成装置 (図 10 参照) を付設し、実証試験を行った。データが取得でき所期目標が達成できる見通しを得ている。このバイオマスガス化ガスから合成されたバイオメタノール採取サンプルを図 10 に示す。バイオメタノール (粗メタノール、精製していない) の組成はメタノール 96% のほか、炭化水素系燃料と水分を幾らか含んでいるが火炎はきれいなブルーを示す。現在既に実用化展開中である。



図 10 メタノール合成装置

### 4.3 バイオメタノールの期待される用途

バイオマスを原料とするバイオメタノールも従来の化石燃料を原料とするメタノールと同じで、粗メタノール合成から精製をして純メタノールとなる。

現在、粗メタノールの精製について実験中であるが、用途次第では粗メタノール利用も考えてみたい。今後利用が期待される用途について、図 11 に示した。①石油代替液体燃料、②メタノール車燃料（新エネ法低公害車認定）、③直接メタノール燃料電池（DMFC）燃料、④家庭用アルコール燃料（例：メタノールに約 20%のエタノールを混合したアルコール燃料）等。



図 11 バイオメタノール燃料の多様性

## 5. むすび

EU と比べると、我が国のバイオマスエネルギーの導入遅れが指摘され、この要因の一つに、日本の事情に適合したバイオマスエネルギー変換技術がなかったことがあげられると思う。これに対する一つの解答が、ここに説明したバイオマス高効率熱電供給システムであり、メタノール液体燃料合成であり、さらに、ガス化発電とメタノール合成併行運転システムであると考えている。現在、250kW クラスの実用機を展開中である。

なお、本研究のうち、基礎研究部分は文部科学省・私学大学学術フロンティア推進事業によるものであり、プラントの実証試験は農林水産省の委託研究で実施しているものである。

また、NEDO 国際共同研究等の実験結果も活用させて頂いた。関係先に厚くお礼申し上げます。

## 参考資料

- 1) 農林水産省技術会議事務局、プレスリリース「小型可搬式・低コスト高効率の新しい熱電エネルギー供給システム“農林バイオマス 3 号機”の開発」(2004. 3. 16)
- 2) 坂井、村上、日本エネルギー学会誌、81 巻、908 号、(2002)

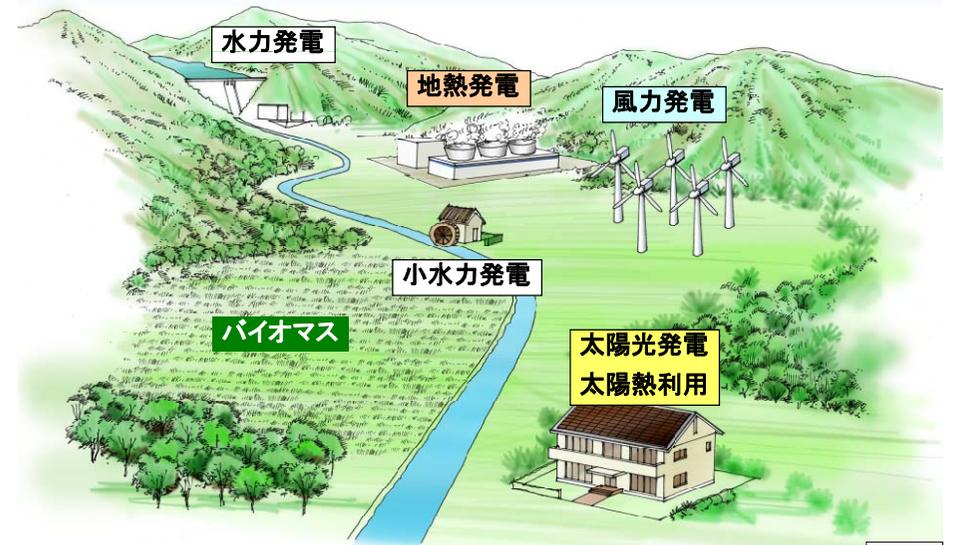
# 草木バイオマスを原料の 浮遊外熱式ガス化と液体燃料合成

実証プラント「農林バイオマス3号機」の成果

平成22年3月15日

長崎総合科学大学 特任教授 坂井正康

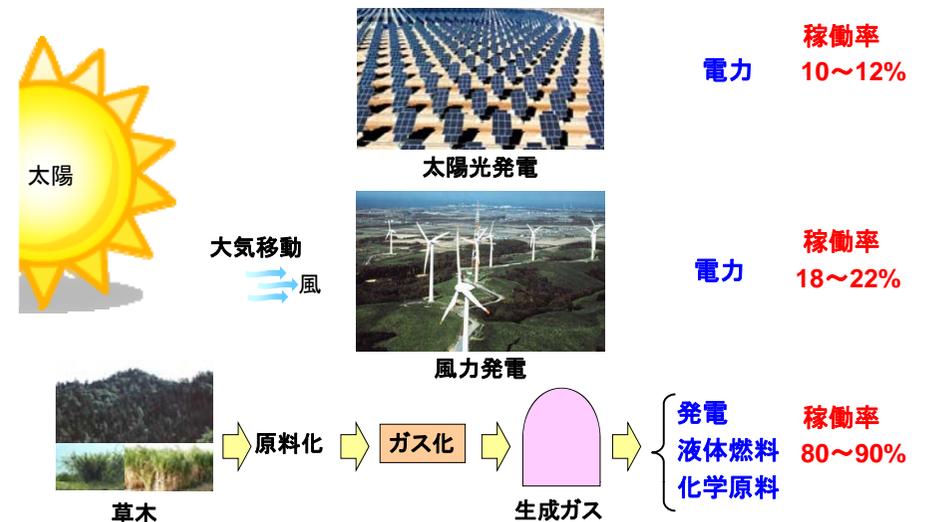
## 再生可能エネルギー



## 主な再生可能エネルギーの形態

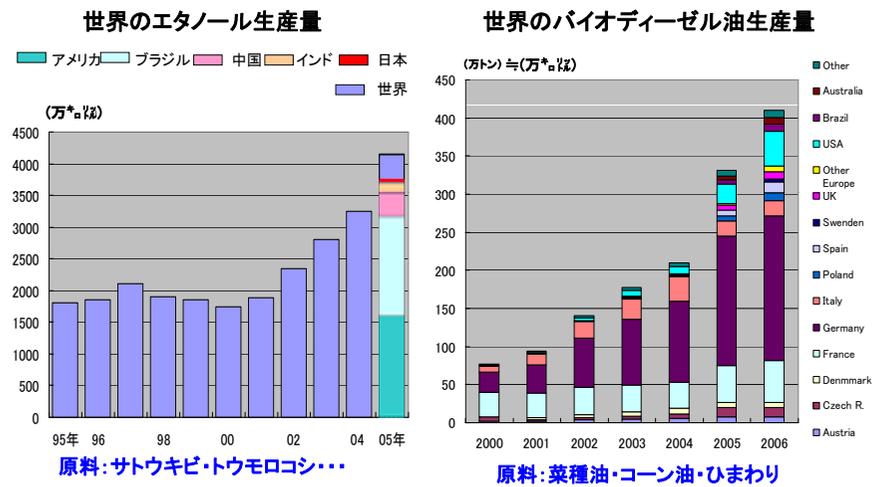
主な再生可能エネルギー	エネルギー形態
風力発電	電力
水力発電	電力
太陽光発電	電力
地熱発電	電力
バイオマス	電力・燃料・化学品

## 再生可能3代表エネルギーの特徴 バイオマス250kW発電は太陽光2000kW発電に相当



# バイオマス自動車用燃料の問題点

## 食料と競合し生産性が低い

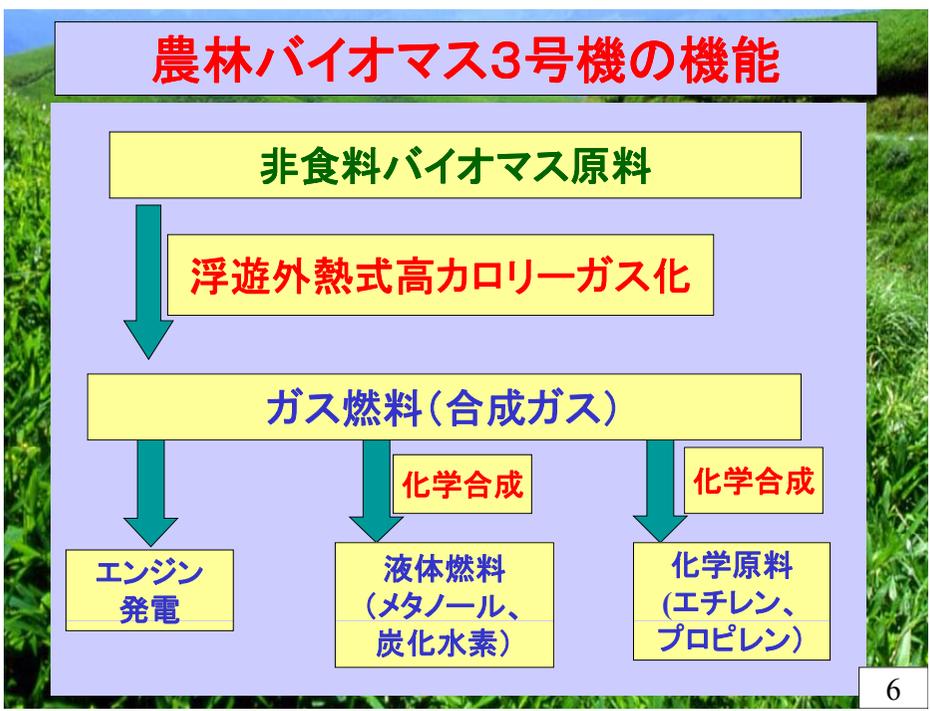


<出典> (左)米国再生可能燃料協会(RFA)資料 (右) Copyright (C)2006 Rainbow Energy Corporation

# 農林バイオマス3号機

農林水産省委託研究開発

## 基本: 浮遊外熱式ガス化法



# 新しい技術

## 浮遊外熱式ガス化法

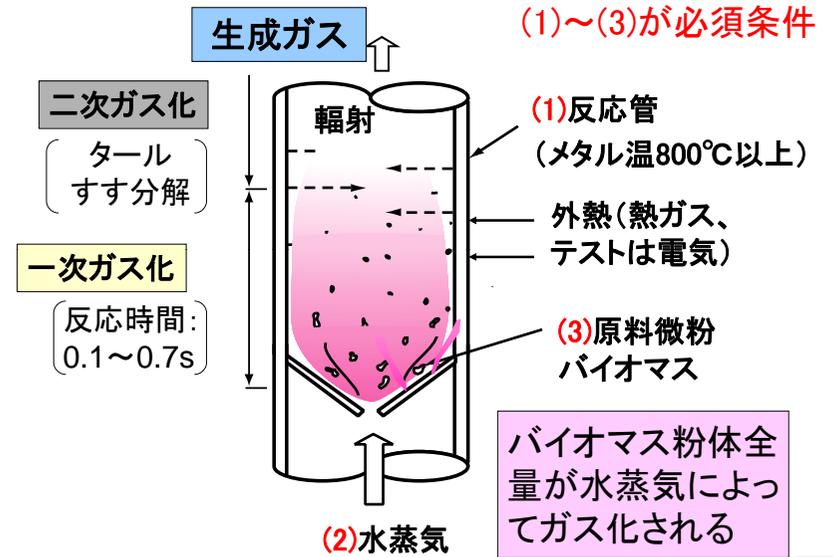
### 高カロリーガス化法

## 多種のバイオマスが原料となる



8

## ガス化反応管内部模式図



9

## 杉木粉ガス化

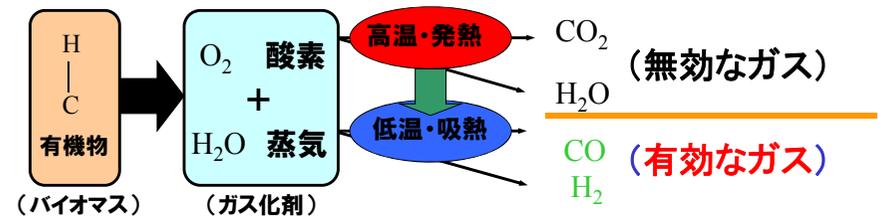


バイオマスサンプル			杉木粉			
高位発熱量 kcal/kg			4570			
元素分析	C	%	51.1			
	H	%	5.9			
	O	%	42.5			
	N	%	0.12			
	T-CL	%	0.01			
	T-S	%	0.02			
灰分			0.5			
	H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	Total
	53.1	24.8	5.3	0.1	16.7	100vol%

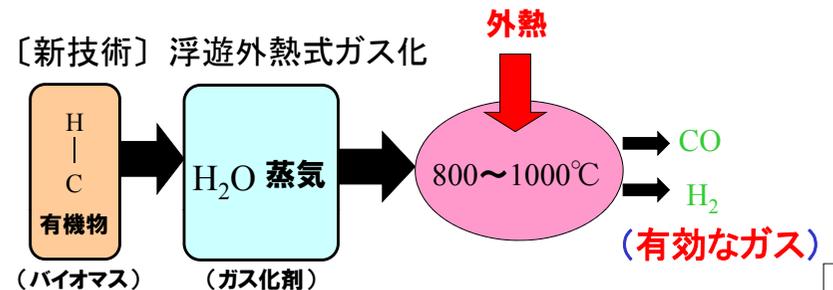
10

## 従来法に比べ有効成分が圧倒的に多い

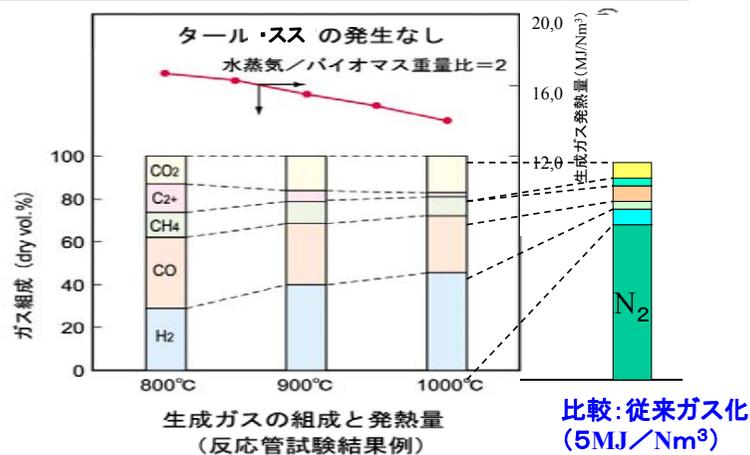
〔従来技術〕 酸素、蒸気部分燃焼ガス化



〔新技術〕 浮遊外熱式ガス化

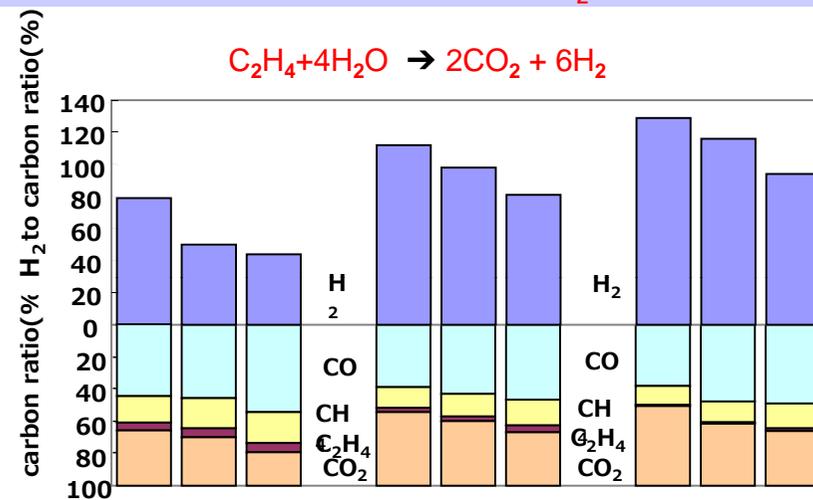


11



12

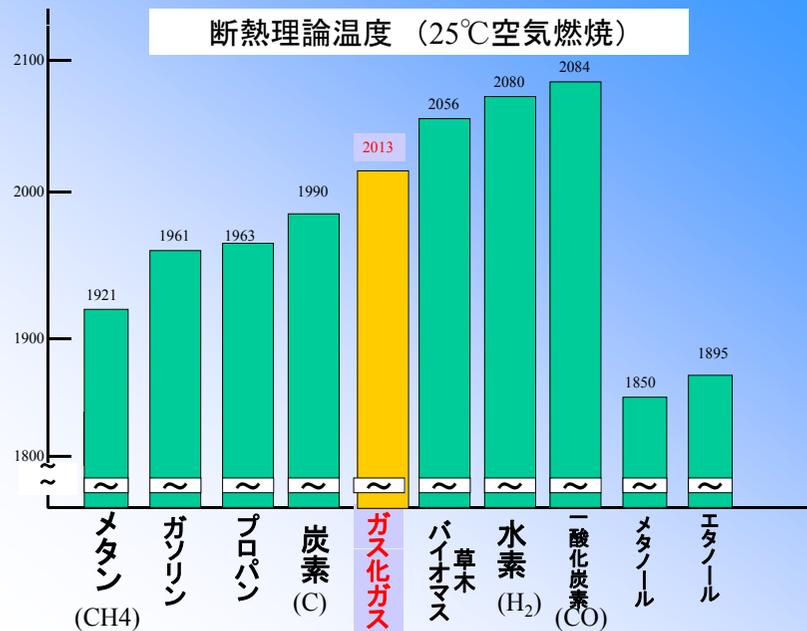
反応温度・粒径・反応時間によってH<sub>2</sub>量を変化できる



粒径.(μm)	105	600	2000	105	600	2000	105	600	2000
温度.(°C)	800			900			1000		

13

生成ガスの燃焼温度はメタン・ガソリンより高い



14

## 浮遊外熱式ガス化法の特長

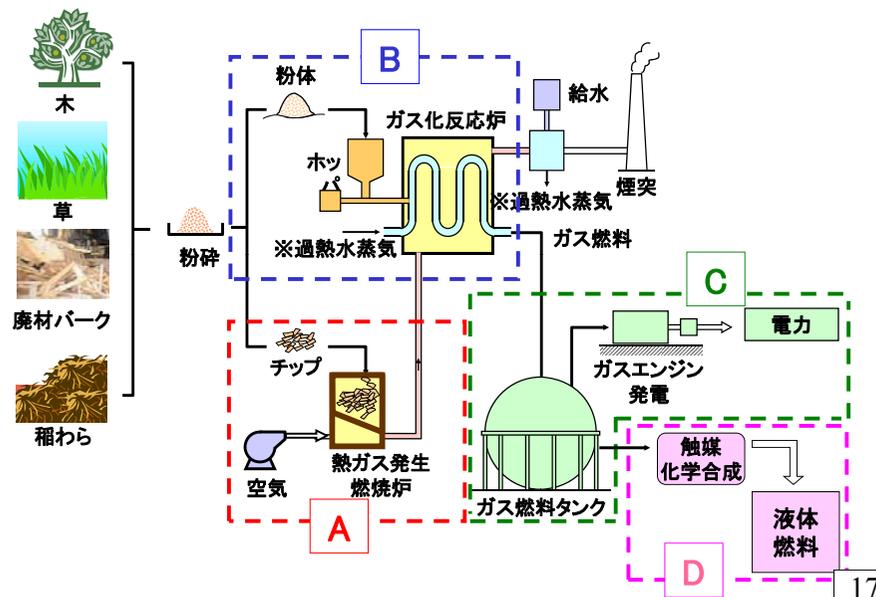
- 化学的には水蒸気改質反応。ただし、触媒を必要としない新しいガス化法。
- 高カロリー・高品位のガス組成で、熱機関において高い機械(発電)効率が見られる。
- 生成ガスはH<sub>2</sub>・COが主成分であるため、化学原料ガス(合成ガス)として使用できる。

15

# 草木バイオマスガス化 ガスエンジン発電実証プラント 農林バイオマス3号機

( A + B + C )

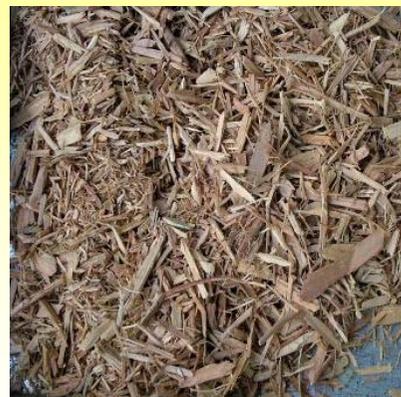
本システムはA,B,C,Dパーツより構成される



## 50kWバイオマス・ガスエンジン発電システム試験機 主要仕様

出力	: 50kW	ガス化原料バイオ量	: 31kg/h
エンジン出力	: 30%	外熱バイオ量	: 20kg/h
ガス化効率	: 75%	ガス化剤:H2O量	: 113kg/h
総合発電効率	: 21%	生成ガス量	: 45.6m <sup>3</sup> /h

## 50kW発電で実験使用の原料バイオマス



チップ



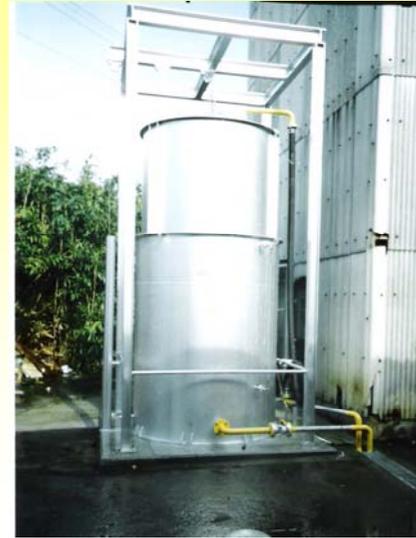
粉体

## コンパクトな50kWガス化反応炉外観



20

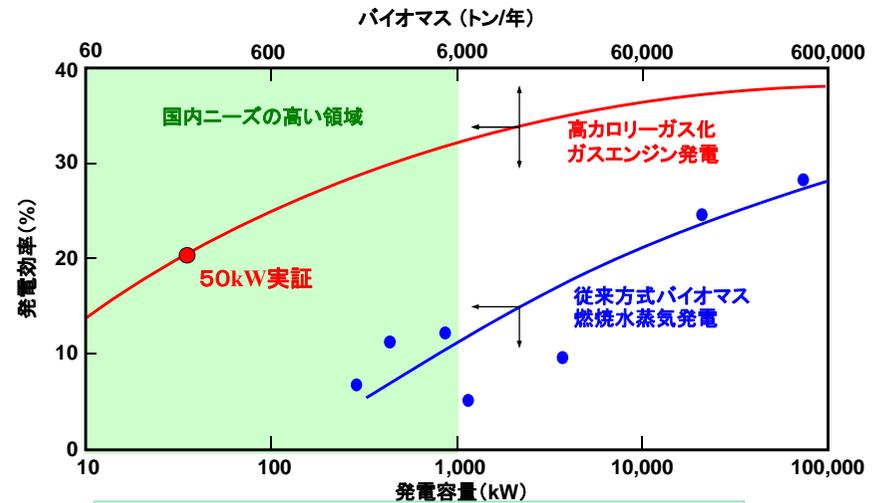
## 生成ガス貯蔵タンク及びガス化ガス火炎



21

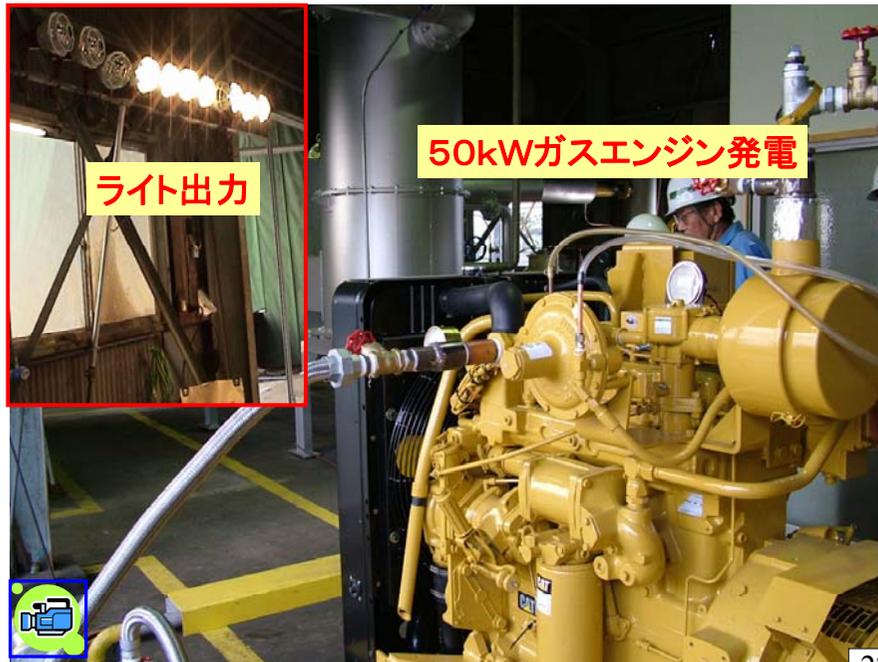
## 小容量プラントでも高い発電効率を得られる

### 高カロリーガス化発電と従来方式の発電効率比較



特にバイオマス資源が分散している我国において、ニーズが高い小規模設備で極めて有効

23



## 50kWガスエンジン発電

ライト出力

22

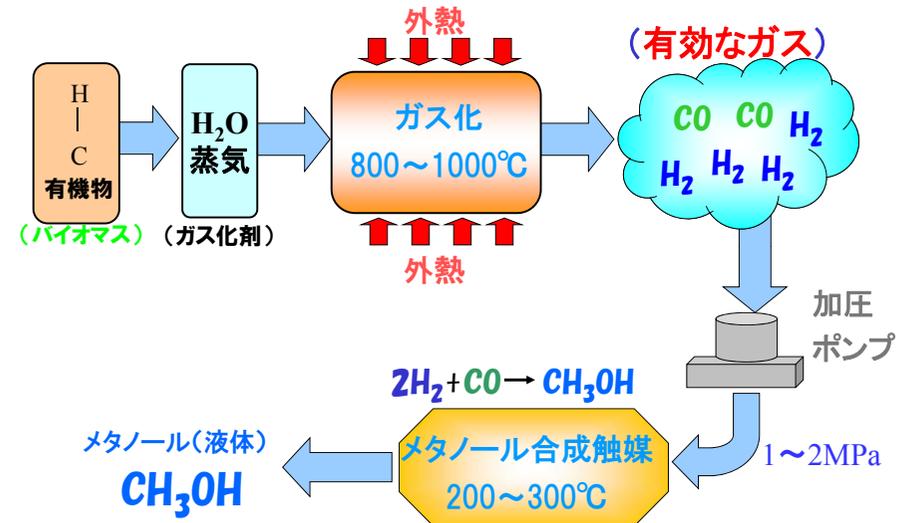
# 液体燃料メタノール合成

## 小規模多段式メタノール合成装置

( A + B + D )

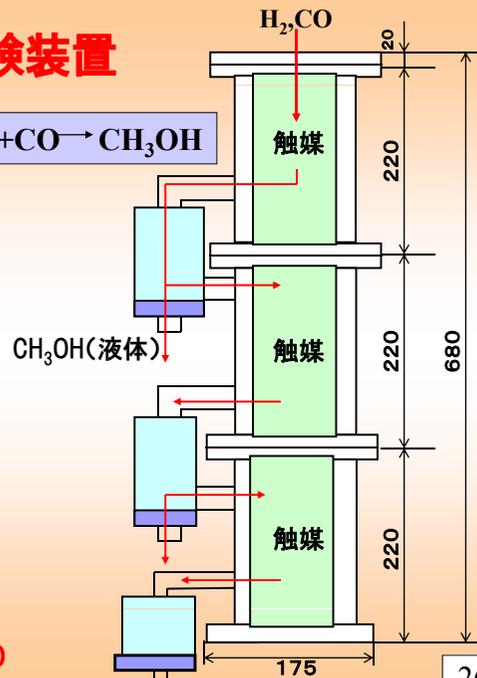
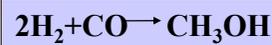
24

# バイオマス生成ガスからのメタノール製造



25

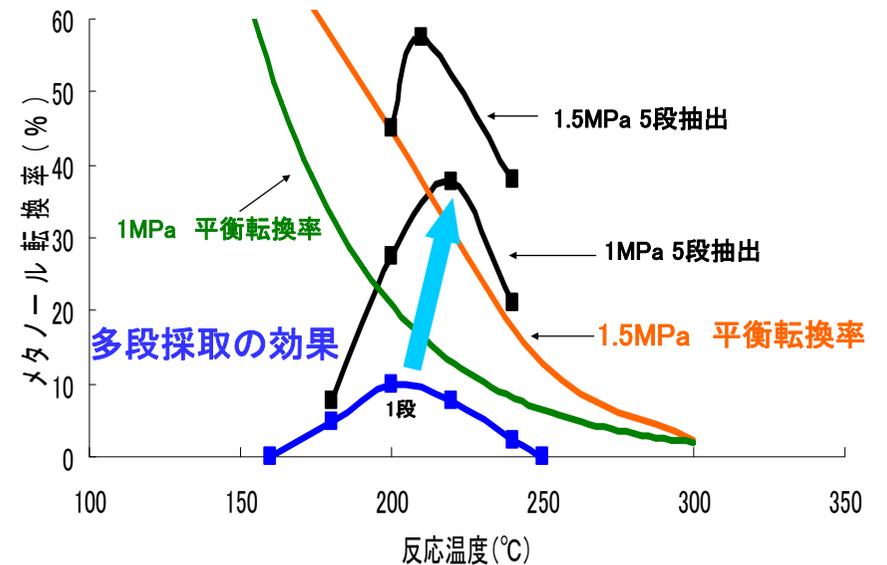
# メタノール合成実験装置



メタノール合成触媒 CuO・ZnO

26

# 低圧合成で一般合成圧(10MPa)と同等の収率を得る



27



## バイオメタノールの用途(1)

**自動車用燃料:メタノール車(M85)  
燃料電池車  
FFV**

29

<p><b>メタノール自動車の種類とメタノールスタンド</b></p>	<p><b>日本メタノール自動車株を通じ開発・普及が進められているメタノール自動車</b></p>	<p><b>那石油産業活性化センターが自動車メーカーの協力を得て開発を進めている(ガソリン混合)メタノール自動車</b></p>

## FFV

フォード・モーターが  
発売した新型  
FFV

GM社も販売を  
行っている。

http://www.carview.co.jp/news/2/id5569

31





## バイオメタノールの用途(4)

### DMFC : Direct Methanol Fuel Cell

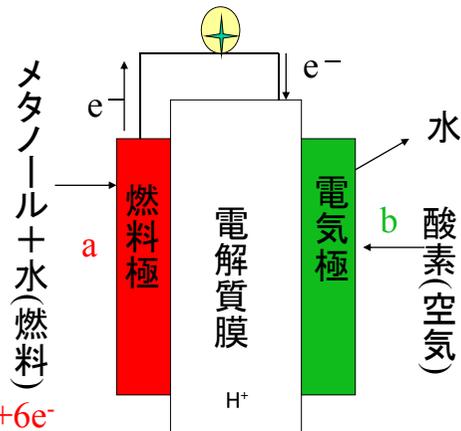
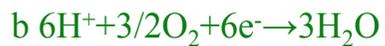
### パソコン・携帯電話への利用

## 燃料電池

### ダイレクトメタノール(DM)型

- 直接メタノールを燃料とする
- DMFC (Direct Methanol Fuel Cell)

小型電子機器用電源



### バイオメタノール用途技術実証: 燃料電池燃料

携帯電話充電用DMFC



可搬電源用DMFC  
 ・100V/100W  
 ・非常用電源等



室内で使えるクリーン発電機  
 災害時に威力を発揮



充電時



# 今後の展開

生成ガスは合成ガス性状  
多くの液体燃料製法に活用できる

