

平成22年 3月31日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2009

課題番号：19360439

研究課題名（和文） 逆有償の有機系廃棄物からの水素製造に関する実用化研究

研究課題名（英文） A practical study on bio-hydrogen production through the Blue Tower gasification process in the use of organic materials with a inverse onerous fee.

研究代表者 堂脇 清志 (DOWAKI KIYOSHI)

東京理科大学・理工学部経営工学科・准教授

研究者番号：50339115

研究成果の概要（和文）：逆有償スキームを伴うバイオマス資源（例：木質系廃棄物，農業系廃棄物，下水汚泥）を対象に、これらの原料からガス化プロセスによる電力あるいは水素の生産について検討した。特に、本研究では現在、分散型バイオマスガス化システムとして注目されている Blue Tower プロセスについて、験をベースとしたプロセス設計ならびに、燃料電池等の複合化によるシステム分析、農業分野への適応事例の評価及び燃料製造に係る LCA を実施した。

研究成果の概要（英文）：In this study, we investigated the performance of Blue Tower (BT) gasification process, based on the basic experiments on pyrolysis and steam reforming reaction. Also, using the experimental data, we executed the process design on the bio-energy system on basis of BT. For instance; the gasification cogeneration system on the combination of BT and gas-engine or fuel cell equipment, and the purified H<sub>2</sub> production system were considered. Due to not only the technological estimation but also the evaluation of economic and/or environmental condition on LCA methodology, the incentives of the environmentally friendly energy system on BT process were discussed. Based on the partial results which we estimated in this study, the commercial plant on Bio-H<sub>2</sub> production through BT process was decided to be set up in the domestic area.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
19年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
20年度	1,800,000	540,000	2,340,000
21年度	2,000,000	600,000	2,600,000
年度			
年度			
総計	9,400,000	2,820,000	12,220,000

研究分野：エネルギーシステム工学

科研費の分科・細目：総合工学・エネルギー学

キーワード：バイオマス，ガス化プロセス，水素，コージェネレーション，LCA

## 1. 研究開始当初の背景

新エネルギーに関する特別措置法（RPS法）が施行され、電力会社が新エネルギーによる買取義務により、今後、さらに事業化へ

の負担が軽減されると期待されている。しかしながら、木質系バイオマスを利用した当該システムに関する事業性評価においては、木材の伐採価格や輸送コストにより、いまだ厳

しい条件となっており、さらなるコスト削減や新たなビジネスモデルの提案が必要な状況である。

他方、木質系以外の廃棄物においては、循環型社会形成促進法等の整備により、有機系廃棄物資源の逆有償化が促進されるなど新たな環境ビジネスの機会が増加してきている。我々の研究グループでは、ドイツ DM2 社が開発したヒートキャリアによる移動層ガス化炉に焦点をあて、技術特性ならびにプラントコスト等の検討結果から、わが国における分散型システムの一部を担う技術システムとなり得ることを確信し、これまで、当該技術に関する技術開発ならびにビジネスモデルの提案を実施してきている。当該技術特許の優先実施権については、国内企業がその権利を数年前に取得し、この特許技術（ガス化炉プラント）について、実用化開発している段階である。

これまでの研究活動は、以下のとおりである。

#### (1) 木質系バイオマスの活用を中心としたエネルギー化（水素、電気、熱等）の検討

分散型システムの構築について事業性も含めた検討を行った。特に、既に基本的な試験装置により技術特性を把握するとともに、ビジネスモデルの提案等、当該システムの有効性について検証を行ってきた。なお、木質系バイオマスを対象とした当該技術については、現在、別途、民間企業による実証研究継続実施している。また、これまでの試験結果から水素が比較的高い濃度で生成されている。

#### (2) 未来燃料として期待されている水素の需要動向に関する調査

未来燃料として期待されている水素は、その導入が今後ますます期待されるとしており、これまでに燃料電池の技術動向を踏まえた水素需要予測やメーカーのヒアリングを経て外販市場等の調査研究を実施してきている。この結果、小規模生産かつ環境付加価値（CO<sub>2</sub>削減に貢献すること）の高い有機系廃棄物からの水素の市場性に関しては、逆有償の有機系廃棄物資源を利用することによる製造コスト低減等の努力で、ビジネス的にも成立する可能性が高く、技術面ならびに事業性の観点から検討することの意義は高いと判断している。

以上の事案を勘案し、有機系廃棄物からの水素製造による環境ビジネスの成立を目途に、現在、提案者が保有している化学試験装置（熱天秤、ガスクロマトグラフ、電気炉）を活用した当該技術のガス化特性から水素製造までの一連のシステム特性の把握（プロセス設計を行うための基本条件の取得）のための試験装置の構築し、さらに、ビジネス的に有用となる逆有償である有機系廃棄物（食品残渣、建築残渣、下水汚泥等）を対象にし

た当該システムによる基礎実験の実施及びプロセス設計を行う。また、その結果を反映させたビジネスモデルの提案と事業性について検討を行うことが、本研究の主な趣旨である。なお、本研究の成果は、最終的には、当該資源を活用としたバイオ水素製造システムの実用化につなげるための基本情報として活用することとしたい。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、国内外のバイオマス系廃棄物に対して、国内においては、地域における分散型エネルギーシステムの構築ならびにエネルギーの地産地消の確立を主な目的とし、また、国外においても、クリーン開発メカニズムの対象プロジェクトになり得る調査を実施した。特に、従来研究のように技術的な検討だけでなく、原料の採取からエネルギー変換及びエンドユーザーまでのエネルギー供給に至るまでの全体システムの評価をコストあるいは LCA による CO<sub>2</sub> 排出量を行うことで、より実現可能な条件の明確化を図ることとした。また、燃料電池の普及が始まりつつある今日において、そのような将来的なエネルギーシステムの組み合わせ（含むビジネスモデル）を勘案したシステムの検討、あるいは、その他、国内産業での CO<sub>2</sub> 削減義務の可能性を踏まえ、具体的な事例の 1 つとして、農業分野との融合を考え、農商工連携モデルを提案し、その分析を行い、当該システムの導入可能性について言及することとした。

## 3. 研究の方法

まず、本研究はガス化の試験及びその実験データを利用したプロセス設計の実施し、それをベースとした各種評価を実施した。また、対象としたバイオマス原料は、杉廃材、きのこ廃菌床（農業系廃棄物）及び下水汚泥を主な原料とし、一部、海外での FS 調査に関しては、文献値等により評価を実施した。

### (1) ガス化実験

最初に、ガス化試験用の実験装置の概要を図 1 に示す。

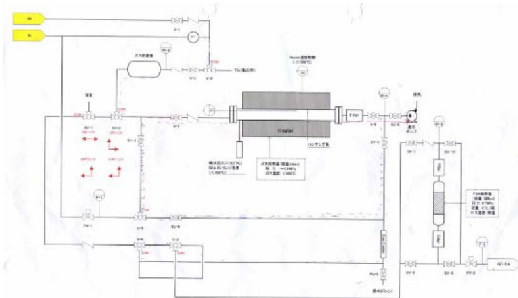


図 1 ガス化実験装置概要

実験装置の大まかな運用手順については、管状炉内に原料を乗せた燃焼ボートを入れ、真空脱気及び所定の S/C (スチームカーボン比) に見合う水分注入を行った後、熱分解実験では、450~600°C (50°C刻み)、改質反応実験では、800~950°C (50°C刻み) で実験を行った。熱分解実験の結果は、プロセスシミュレーターの初期値として利用し、改質反応実験の結果については、シフト反応及び CH<sub>4</sub> の水蒸気改質反応における平衡定数と理論平衡との差を温度アプローチとして利用評価することとした。また、その他、るつぽによる灰分測定、ならびに揮発率測定を実施し、最終的には、固体反応に物質収支を求め、また、原料及び熱分解実験後に生じたチャーについては、発熱量を測定し、プロセス設計の基本データとした。なお、各ガス成分は、縮 GC(ガスクロマトグラフ)により測定し、本研究で考慮したガス成分は H<sub>2</sub>、CO、CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub> 及び N<sub>2</sub> とし、H<sub>2</sub>O に対して反応前後の物質収支が評価した。

次に、モレキュラシーブを充填させて反応管に合成ガス流通させ、周辺温度に対する H<sub>2</sub> の通過量を評価し、H<sub>2</sub> 濃度に対する H<sub>2</sub> 通過量を周辺温度の関数として評価した。

## (2) プロセス設計

次に、実験に基づくデータにより、以下のエネルギーシステムについてプロセス設計を行った。1つは、H<sub>2</sub> 製造システムを想定し、4N (濃度 99.99Vol.%) の H<sub>2</sub> 製造システムを設計し、工業用水素用途のシステムを検討した。また、将来的な新規システムの1つとして、PEFC (燃料電池との複合システム) を検討し、その優位性を調べた。また、これらのシステムを中心として、需要家の特徴を勘案したシステム構築、すなわち、エネルギー効率最大化、あるいは、化石由来の従来システムに対する CO<sub>2</sub> 削減率最大化を目指したシステムを設計した。

次に、ガス化コージェネレーションシステムの設計であり、これはガスエンジンを用いたシステムである。当該システムは、既に BT 実証炉において、実証試験を実施しているシステムである。また、プロセス設計で評価した当該プラントの性能を、実証プラントの運転データと比較し、本研究で開発したプロセスシミュレーターの優位性を示した。

## (3) LCA による CO<sub>2</sub> 削減量の検討

(2)のシステムについて、LCA による CO<sub>2</sub> 削減量の検討を行った。特に、バイオマス資源の利用については、原料の輸送あるいは、乾燥におけるエネルギー負荷が高く、これらのプロセスでは、化石由来のエネルギーが使用されるため、CO<sub>2</sub> 排出量の負荷が高くなる傾向がある。そのため、本研究における分析

においては、収集距離及び含水率に対しては、各要素の不確実性を考慮した分析を行った。また、下水汚泥については、従来ケースの汚泥焼却のケースでは、温室効果ガスの1つである N<sub>2</sub>O の排出が見込まれることとなる。従って、この排出ガスを等価 CO<sub>2</sub> 値 (N<sub>2</sub>O は CO<sub>2</sub> の 310 倍の温室効果がとす。) に換算し、新規に導入するシステムとの比較を行った。

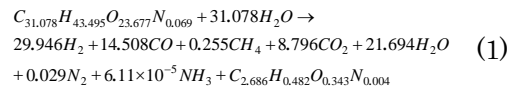
その他のシステム構築として、近年では、循環型社会の形成、エネルギー地産地消モデルの構築、あるいは、国内産業に対する排出権取引 (キャップアンドトレードに基づくスキーム) 等の可能性から、特に、農業分野への適応事例の研究が進んできている。従って、ここでは、パブリカ園芸施設を需要家として、ここに BT プラントからの熱及び栽培用の CO<sub>2</sub> 投入、また、水素を外販させるシステムを想定し、当該システムにおける CO<sub>2</sub> 削減量とこのときのパブリカ 1 個あたりの CO<sub>2</sub> 排出量をカーボンフットプリントの観点から評価した。

## 4. 研究成果

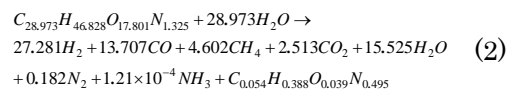
最初に、杉廃材、きのこ廃菌床及び下水汚泥の改質反応における実験結果を示す。なお、改質反応の条件として、S/C が約 1.0 になるように投入水分を調整し、炉内温度を 900°C から 950°C にしたときの結果である (図 2~4 参照)。

また、これらの改質ガスの測定結果から、各原料の物質収支を以下のように評価した。

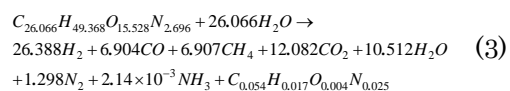
### ・杉廃材



### ・廃菌床



### ・下水汚泥

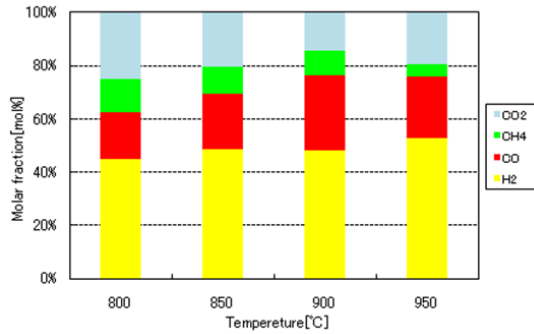


これらの物質収支に伴い、熱収支を合わせるようにして、各種システムのプロセス設計を行った。

次に、これらのデータの整合性を実証プラント (島根県出雲市にある BT 実証プラント 1t/d における運転データ (2009 年 3 月実施)) のガス組成に関する運転データを用いて検討した (図 5 参照)。

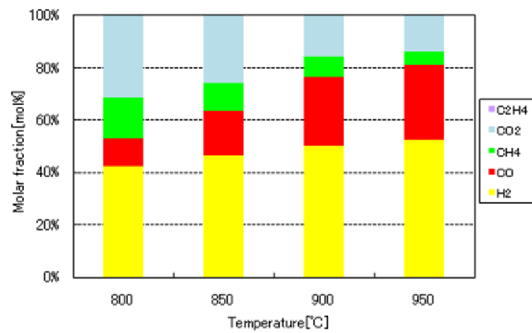
この結果から、ラボベースにおけるシミュ

レーターと実証試験のデータとは、ある程度の整合性があると判断されよう。



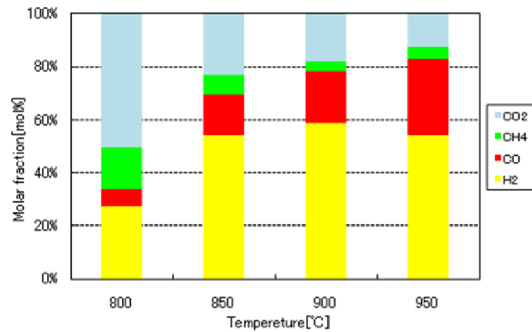
(H<sub>2</sub> 濃度 : 52.3 Vol.% at 950°C)

図2 改質ガスの結果 (杉廃材)



(H<sub>2</sub> 濃度 : 53.0 Vol.% at 950°C)

図3 改質ガスの結果 (廃菌床)

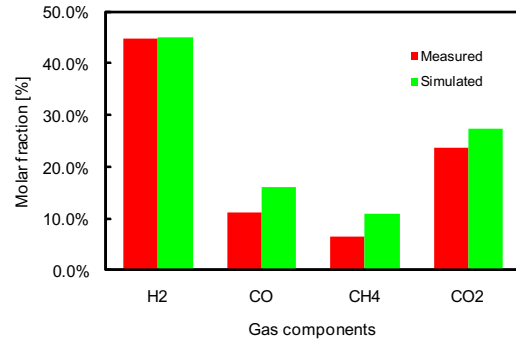


(H<sub>2</sub> 濃度 : 55.0 Vol.% at 900°C)

図4 改質ガスの結果 (下水汚泥)

次に、本研究で開発したシミュレーターに関して、前述した原料3種について、水素製造システムのプロセス設計を行った。

ここでのプロセスの条件としては、BT ガス化炉の標準規模である 15t/d とし、原料の初期含水率 20%、運転時間: 7,200 hrs/年、蒸気投入量 (S/C) 1.0、熱分解温度 550-600°C、及び改質温度 900-950°C としたときの結果で



(杉ペレット : 改質温度 820°C)

図5 実証プラントデータとの比較

ある。なお、熱風炉から排出される排ガスの顕熱は原料乾燥への利用を想定した。

次に、これらのプロセス設計をもとに、LCA による CO<sub>2</sub> 排出原単位について検討した。特に、ここでは、天然ガス起源の H<sub>2</sub> 製造との Wheel To Tank ベース、すなわち、原料供給から燃料製造に係る CO<sub>2</sub> 排出原単位を検討することとし、システム境界は図6の

表1 H<sub>2</sub> 製造能力 (杉廃材)

BT Process (Gasifier)	Feed Biomass	781.3 kg/h
	Cold-Gas Efficiency	9,025 MJ/h
	Auxiliary Power*	59.1% LHV-%
PSA (4N-H <sub>2</sub> )	Bio-H <sub>2</sub>	260.8 kW
	Total Eff. (Net)	399 Nm <sup>3</sup> /h
		40.2% LHV-%

表2 H<sub>2</sub> 製造能力 (廃菌床)

BT Process (Gasifier)	Feed Biomass	1,120 kg/h**
	Cold-Gas Efficiency	14,649 MJ/h**
	Auxiliary Power*	53.2% LHV-%
PSA (4N-H <sub>2</sub> )	Bio-H <sub>2</sub>	267.4 kW
	Total Eff. (Net)	554 Nm <sup>3</sup> /h
		40.8% LHV-%

\*PSA の動力を含む、\*\*補助熱原料を含む

表3 H<sub>2</sub> 製造能力 (下水汚泥)

BT Process (Gasifier)	Feed Biomass	870.7 kg/h**
	Cold-Gas Efficiency	11,104 MJ/h**
	Auxiliary Power*	64.3% LHV-%
PSA (4N-H <sub>2</sub> )	Bio-H <sub>2</sub>	265.8 kW
	Total Eff. (Net)	223 Nm <sup>3</sup> /h
		21.6% LHV-%

\*PSA の動力を含む、\*\*補助熱原料を含む

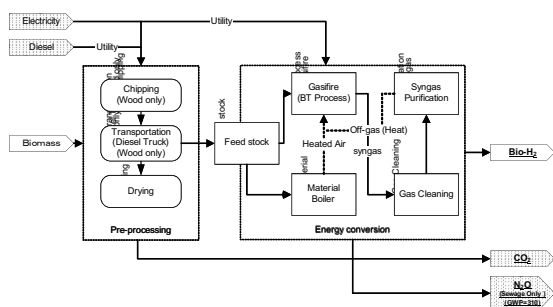


図6 システム境界

ように設定した。

このシステム境界に基づき、杉廃材、きこの廃菌床及び下水汚泥の H<sub>2</sub> 製造原単位として、56.1、24.5 及び 429.6g-CO<sub>2</sub>/MJ-H<sub>2</sub> の原単位が得られた。これらの値を例えば天然ガスからの水素製造における CO<sub>2</sub> 原単位 (109.9 g-CO<sub>2</sub>/MJ-H<sub>2</sub>) と比較した場合、廃材ときこの廃菌床は、CO<sub>2</sub> 原単位の削減が見込まれることとなる。一方、下水汚泥については、従来方式における処理方法においては、消化汚泥を焼却処分しているケースが多く、これを比較ケースとした場合には、N<sub>2</sub>O を等価 CO<sub>2</sub> としてカウントする必要がある。この場合には、還元処理である BT による H<sub>2</sub> 製造システムにおいては、殆ど N<sub>2</sub>O の発生はなく、その削減分 (Δ496.0 g-CO<sub>2</sub>/MJ-H<sub>2</sub>) が見込まれることから、当該システムの確立は大きな CO<sub>2</sub> 削減につながるようになる。

また、廃菌床についても、実験結果から、当該原料を用いた場合には、CO<sub>2</sub> 原単位削減の観点から以下のような特異な結果が得られた。

廃菌床には、木質系原料に比して、多くの灰分が含まれている。このことは、フライアッシュやスラグ等の問題等、通常のプラント運転においては、問題となることが知られている。しかしながら、BT プロセスにおいては、熱分解炉において、灰分及びチャー（固形炭素）が熱分解ガスとほぼ分離し、かつ、熱分解炉中の運転温度が 550°C とスラグ化の温度より低温であるため、前述したような問題は起りにくい。従って、灰分中のアルカリ金属（例：CaO）の触媒作用による CO<sub>2</sub> 固定の可能性について検討した。なお、本研究で使用した廃菌床の灰分は 12.39wt.%、灰分中の CaO の含有量は 40.82wt.% である。また、関連実験においては、本研究で用いた原料と同じ原料により H<sub>2</sub> 濃度が向上したことが確認されたため、ここでは、杉廃材を用いて、廃菌床中の C と CaO の比と同等の CaO を杉廃材に添加し実験を行った。

この結果、熱分解実験においては、ガス流量が添加しない場合と添加した場合とを比較した場合、明らかにガス収量が減少し、かつ CO<sub>2</sub> 濃度が減少した。この比較から、廃菌

床の原料を使用した場合においても CaO による CO<sub>2</sub> が固定され排出されるものとして、Δ14.9 g-CO<sub>2</sub>/MJ-H<sub>2</sub> 相当の CO<sub>2</sub> が固定されることが推察された。

次に、当該研究テーマにおける他の関連研究として、以下の 2 つについて述べる。

BT の需要先としては、前述してきたように合成ガスの特性から H<sub>2</sub> 製造システムの取組みがメインとなっている。しかしながら、一方で、当該プラントにおいては、バイオマス原料のカーボンニュートラルであるということに加え、電力・熱供給あるいは CO<sub>2</sub> を含む排ガス供給が可能なことから、需要とマッチさせることにより、さらに追加的な CO<sub>2</sub> 削減が見込まれることとなる。本研究では、園芸施設を対象にして、パプリカ栽培の例を挙げ、需要家や余剰のエネルギーを考慮したシステム分析を実施した。また、当該ガス化プラントは、合成ガスの H<sub>2</sub> 濃度が高い特性を持つことから、現在、家庭部門を中心に導入が進められている PEFC（固体高分子形燃料電池）システムへの複合化の可能性についても検討した。

パプリカの施設園芸の例では、宮城県の施設園芸（施設面積 4.6ha）を視察し、重油、電力消費量の実データのほか、栽培促進用に投入される CO<sub>2</sub>（化石由来）量、また LCA の見地から、栽培に係る肥料等の間接 CO<sub>2</sub> 排出量を含め既存施設におけるパプリカ 1 個あたりの栽培に係る CO<sub>2</sub> 排出量を検討した。また、新規のケースでは、当該モデル地域周辺で多く排出される牛糞をバイオマス原料とし、前述してきたような実験的な検討に加え、プラントからの排熱利用及び排ガス中に含まれる CO<sub>2</sub>（バイオマス由来）の利用、及び H<sub>2</sub> 製造による化石由来（天然ガスを想定）の H<sub>2</sub> との代替効果によるパプリカの CO<sub>2</sub> 原単位を検討した。この結果、プラント規模 15t/d を想定した場合、牛糞からの H<sub>2</sub> 製造能力は約 118.3 万 Nm<sup>3</sup>/年、H<sub>2</sub> 製造効率は 16.7%・LHV となった。一方、上記提案システムによるパプリカ 1 個当たりの CO<sub>2</sub> 削減量は、約 440g-CO<sub>2</sub>/個と推察された。

次に、PEFC との複合システムについては、現在、福岡県前原市において新日本石油、西部ガス及び福岡水素エネルギー戦略会議のもとで、エネファーム 150 台が集中設置されており、将来的にも非常に導入が期待されている分散型エネルギーシステムの 1 つである。しかしながら、燃料となる H<sub>2</sub> は多様なエネルギー資源を持ち、現在の導入事例においては、都市ガスを改質し、H<sub>2</sub> 燃料を供給している。このときの燃料電池入口の H<sub>2</sub> 濃度は約 80Vol.% となるが、本研究で注目している BT からの H<sub>2</sub> 供給は、HTS 及び LTS 等の CO 変成器あるいは CO 選択酸化器が必要であるが、約 65Vol.% と評価され（実験で得ら

れた合成ガスの組成から評価した値)、PEFCの運転が可能であることが示唆された。

ここでの研究においては、さらに、25cm<sup>2</sup>のPEM-Cellを用いて、H<sub>2</sub>濃度を変えた模擬ガスにより電流・電圧特性ならびに開回路電圧の影響について考察した。

この結果、開回路電圧については、H<sub>2</sub>濃度また、ビジネスモデルとして、例えば、BTプラントの標準規模が15t/dであること、及び1kW級のPEFCの導入状況を鑑み、一部を燃料電池用の燃料として電熱併給を想定し、その他の合成ガスについては工業用水素として供給するトライジェネレーションシステムを想定した。これにより、PEFC側の需要がない場合には工業用H<sub>2</sub>の生産に回すなど合成ガスの供給において平準化が可能となり、各ガスの供給においても、コスト的に大幅な変動が起こり難いことが示唆された。また、電流・電圧特性から判断されるPEFC-CGS(燃料電池コージェネレーションシステム)のプロセス設計においても、大幅な出力低下は起らず、セルへのH<sub>2</sub>供給の影響が大きい可能性があることが示唆された。なお、BTガス化炉とPEFCの複合化システムの技術的な検討は、将来的に実証試験を計画しており、運転特性等の把握については、今後の検討課題としたい。

その他、BTガス化炉における海外調査事例として、タイやインドネシアにおけるCDM事業の可能性についてソフト面からの検討を行っており、例えば、タイについては、キャッサバやサトウキビからのエタノール工場において、そこから排出される廃棄物(キャッサバチップあるいはバガス)をBTの原料として利用することを想定し、これから、追加的なCO<sub>2</sub>削減量(CO<sub>2</sub>排出権)を想定したシステム分析を行った。当該廃棄物の利用することにより、エタノール工場の所内動力の炭素依存度を軽減させるだけでなく、タイ国内の電力インフラへの貢献も可能であり、エネルギーに関する国策とCO<sub>2</sub>削減を両立し得るシステム提案を検討している。なお、当該研究課題については、タイやインドネシアを中心にバイオマス資源が豊富な地域から原料サンプルを入手した上で、本研究の実験的な検証、技術を含めたハード面での検討あるいは、これまでのビジネスモデルを含めた各種システムの提案等ソフト面での検討結果を含め、実用化に目指した検討を行っていきたいと考えている。

また、本研究で取り扱わなかった原料に対するH<sub>2</sub>製造システムの検討やその他のエネルギー生産、それに付随するシステム提案については、本研究で得られたノウハウやデータ等を利用し、有機的に各種関連研究の実施を踏まえ実施していくこととしたい。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計18件)

- ① 堂脇 清志, 江口 勉, 大久保 隼, 玄地 裕; 分散型バイオマスガス化システムによる燃料製造に係るLCA, 電気学会C部門特集論文, 128巻2号, pp.168-175 (2008.2), 査読有
- ② 亀山 光男, 小倉 伸介, 上内 恒, 堂脇 清志; ブルータワーガス化プロセスの1t/dプラントによる運転評価, エネルギー資源学会, 31巻2号, pp.43-50 (2010.3), 査読有

[学会発表](計13件)

- ① Kiyoshi Dowaki, Yoshitaka Kon and Mitsuo Kameyama; A modified design of CGS operation or Bio-H<sub>2</sub> production through Blue Tower (BT) process., The 8th International conference on Eco balance (2008,12)
- ② 上平田 潤, 堂脇 清志; バイオマスガス化+燃料電池CGSによるシステム分析, 第24回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス(2008.1)
- ③ 山成 素子, 堂脇 清志, 定道 有頂, 匂坂 正幸; タイ北部におけるバイオマス利活用モデルの構築, 第5回日本LCA学会研究発表会(2010.3)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

堂脇 清志 (DOWAKI KIYOSHI)  
東京理科大学・理工学部経営工学科・准教授  
研究者番号: 50339115

### (2)研究協力者

亀山 光男 (KAMEYMA MITSUO)  
株式会社 日本計画機構・BLUE Project  
技術部・取締役部長  
研究者番号: 60525749  
布浦 鉄兵 (NUNOURA TEPPEI)  
東京大学・環境安全研究センター・准教授  
研究者番号: 40444070  
富田 啓明 (TOMITA HIRAAKI)  
トミタテクノロジー株式会社・代表取締役  
社長  
研究者番号: 00577348  
山成 素子 (YAMANARI MOTOKO)  
産業技術総合研究所・安全科学研究部門・  
素材エネルギー研究グループ・博士研究員  
研究者番号: 10577381