Original Paper

A System Analysis on the Biomass Gasification with PEFC-CGS (Polymer Electrolyte Fuel Cell Co-generation System) in the Advanced Greenhouse

Jun KAMIHIRATA, and Kiyoshi DOWAKI

(Received September 2, 2008)

園芸施設におけるバイオマスガス化+燃料電池 CGS のシステム分析
上平田潤, 堂脇清志

The necessity of the low carbon society has been more significant since Toya Lake summit was held in Hokkaido, Japan. Under the circumstances, the biomass energy system and/or fuel cell system are promising systems for CO₂ emission mitigation. In order to promote PEFC-CGS (Polymer Electrolyte Fuel Cell Co-generation), on the promotion of PEFC-CGS, we have to solve the discrepancy between the supply and the demand.

In this paper, the operating cost, the equivalent CO₂ emissions including N₂O emissions and CO₂ abatement cost for the greenhouse facility of strawberries in which PEFC-CGS was installed were analyzed. Through the Blue Tower process, which is one of gasification processes, the high concentration hydrogen gas (Bio-H₂) is synthesized. The PEFC-CGS operation using Bio-H₂ fuel, that is, the PEFC-CGS combined with BT gasifier would be extremely significant for the realization of low carbon emission society.

In our analyses, the green house scale was assumed to be 1 to 5 ha. As a result, the power efficiency and the heat recovery efficiency were 24.0 LHV-% and 22.1 LHV-%, respectively. Also, the annual CO₂ emissions in the case of 1ha green house were 2,350t-CO₂/yr, and the abatement cost range was between 7,675 and 33,393 JPY/t-CO₂.

Key Words

Greenhouse facility, Blue Tower, PEFC-CGS, Bio-H₂

1. 序 論

2008年7月に開催された北海道洞爺湖サミットにおいて、我が国をはじめとする先進各国は、今後、将来にわたり化石燃料への依存を断ち切り、温暖化、資源枯渇等の課題に対処するため低炭素社会へ移行していく方針が示された¹⁾。現在、我が国におけるCO₂の地球温暖化への直接的寄与度は95%を占めており、現在開発中の省エネ技術あるいは代替エネルギーへの転換技術によるCO₂削減対策が地球温暖化に対して最も効果的であるといえよう。その中で、現在の日本の電力供給は、ベース電源である原子力発電や水力発電、石炭火力発電等を基調とし、昼間の負荷変動対応あるいはピーク電力の対応については、化石資源を燃料とする火力発電で賄っているのが現状であり、CO₂排出要因の大きな部分を占めている³⁾。近年の火力発電効率は、エネルギー転換の技術の向上により、送電端効率は40% (HHV, 2006年) 程度とされ、さらに、比

較的効率が高い天然ガスコンバインドサイクル発電の導入が進んだとしても、大気中へのCO₂排出量の負荷は大きいことが予想される。このため、CO₂排出量削減のためには、電力供給側の電源構成の見直しや発電効率向上等の努力も必要であるが、一方で、電力消費側での総合エネルギーの有効利用、すなわち、廃熱源の利用等によるエネルギー負荷の低減策や低炭素エネルギー資源を燃料とする分散型エネルギーシステムの導入等の方策が必要となっている。

このような背景から、現在、我が国においては、エネルギー効率の向上と廃熱源の有効利用の観点から、燃料電池コージェネレーションの開発が進められてきている。特に、固体高分子型燃料電池コージェネレーションシステム (Polymer Electrolyte Fuel Cell Co-generation System, PEFC-CGS) はすでに家庭用システム機器として2007年度現在2,187台の導入実績があり²⁾、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)

Tokyo University of Science
2641 Yamazaki, Noda-shi, Chiba 278-8510, Japan

東京理科大学理工学研究科経営工学専攻
〒278-8510 千葉県野田市山崎2641

の試算においても、2010年において220万kWの導入目標が立てられ、早い段階で実用化されよう²⁾³⁾。燃料電池の原理は、電気化学反応により熱を経由せず直接電力を取り出す技術であり、理論的な発電効率が高く、システム規模の大小にあまり影響されないことから、高い発電効率が期待できると同時に、CGSによる廃熱利用により総合効率も $>80\%$ HHVと高くなり、CO₂排出削減に貢献することが期待されている。特に、PEFCは、動作温度が常温から90℃と比較的低温であるため、温水としての利用が容易であり、また発電出力の密度が高いため小型化が比較的容易である³⁾。

また、PEFC-CGSでは、バイオマス起源のH₂(Bio-H₂)を利用することも可能であり、当該システムの実現は、さらなるCO₂排出量削減が期待される。バイオマスからのH₂製造に関しては、分散型エネルギーシステム導入の観点から、5～30t/d級のBlue Tower (BT) と呼ばれる小規模Bio-H₂製造プラントの導入を我が国の民間企業が目指しており、地域での低炭素分散型エネルギーシステムとして、そのモデルを提案するものである。

一方で、現在の家庭部門へのPEFC-CGSの導入には、次のような課題が残っている。例えば、熱エネルギーの過剰供給による年間一次エネルギー削減率が3～13%に留まってしまうこと、また、水素の起源が都市ガス等の化石起源のエネルギーを利用しているため年間CO₂削減効果が7～20%程度としかならず⁴⁾、これらの改善を求めるためには、戸建住宅単独よりもより熱需要が大きい施設について、当該システムの導入を検討することや低炭素資源からの水素供給等のシステムの開発が必要であると考えられる。

そこで本研究では、CGSの導入が可能であり、かつ熱需要の大きい施設の1つとして園芸施設へのPEFC-CGSの検討を行った。さらに、この熱の過剰供給の課題については、熱需要の時間的な偏りにあり、例えば、PEFC-CGSは定常運転時には熱電比90%近くに達するが、冬季以外の昼間帯(12:00～14:00)では一般家庭においては、熱電比が20%以下になることもあり、電力に対する熱の需要が少なくなることが、過剰供給の要因となろう。また、夜間帯(18:00～20:00)においても30%以下になることもあり、熱の供給過剰になる可能性が高くなることが想定される⁶⁾。

以上のような背景を勘案し、本研究では実現可能性に着目し、最終的にはバイオマスガス化からのH₂によるPEFC-CGSの導入を目指したものであり、余剰熱供給の問題を解決する1つの方策として園芸施設への導入を検討したものである。これまでのPEFC-CGSの導入評価においては、熱供給が過剰となる場合があるので、必ずしもCO₂削減効果が効果的ではない。また、低炭素社会の実現を目指している今日においては、例えば、バイオマス資源からの燃料供給も重要な役割を担っており、本研究のように、バイオマスのガス化による高濃度H₂を利用したPEFC-CGSの適用は非常に重要な意義がある。さらに、熱の供給過剰を勘案することにより、熱需要の大きい園芸施設に当該システムの導入を想定することは、その導入ポテンシャルが大きいといえよう。

なお、本研究で対象とする園芸施設のエネルギー供給を想定した場合には、導入規模やエネルギー効率の観点から固体酸化物形燃料電池コージェネレーションシステム(Solid Oxide Fuel Cell Co-generation system, SOFC-CGS)も候補の1つと考えられるが、本研究では実現可能性から、まずはPEFC-CGSの検討を行うこととした^{2) 23)}。なお、バイオマスガス化システムであるBTプラントとSOFC-CGSを組み合わせたシステムの検討については、今後の研究課題としたい。

ここで、想定する農作物として、主に12月から5月において出荷されるが、一年を通して需要のあるイチゴ栽培を想定した⁷⁾²⁴⁾。さらに、イチゴは販売価格に対する燃料コストの割合は1.6%程度であり、利益率にも因るが、ある程度燃料費に対する許容があると考えられ、バイオ燃料などのコストが高い燃料利用のポテンシャルが高いと考えられる。

次に、園芸施設でのビニールハウスの利用は、イチゴを日中25℃程度、また夜間に8℃程度の温度管理が必要とされ熱需要も大きくなる⁸⁾。また、対象地域については、バイオマス資源も比較的多いことが予想され、平成18年度においてイチゴ収穫高がもっとも高い栃木県(宇都宮市)の園芸施設に導入されることを想定した。

次に、当該施設に扱うバイオマスガス化プラントの特性について述べる。本研究で想定するバイオマスガス化システムはBTプロセスと呼ばれ、水蒸気熱分解+改質反応をその特徴としており、その合成ガスが比較的H₂リッチとなるプロセスである⁵⁾。このプラントの特徴は小規模分散型対応として開発されており、そのエネルギー生産規模及び高濃度のH₂製造を可能とすることから、燃料電池への応用も期待されている。また、これまで開発導入が進められている燃料電池コージェネレーションシステムと組み合わせることにより、熱需要の比較的大きい園芸施設への導入が1つの環境ビジネスモデルになり得る考えられる。なお、本論文におけるプロセス設計では、汎用のプロセスシミュレーターであるPRO-IIを用いることとし、特に、BTプラントについては、基礎実験の結果から得られる熱分解特性及び改質反応の平衡定数をパラメータとして用いた⁹⁾。また、PEFC-CGSのプロセス設計においては、PEMセルを利用した実験結果¹⁰⁾から、開回路電圧、セル抵抗及びターフェル勾配を評価し、さらに、これらのデータで近似される電流-電圧特性をパラメータとして用いた^{9) 10)}。また、当該園芸施設における電力及び熱需要については、モデル地域の気象データ及び関連文献等のデータから施設規模の設定から推定し、それらの需要データに対して、本論文で提案する新システムの導入に対するシステム分析を行った。特に、本評価においては、今後の農業分野も含めた産業界への排出権取引の導入を勘案し、CO₂のみならず空気との燃焼で排出されるN₂Oを含めた温室効果ガスを等価CO₂で表し、温室効果ガスとしての削減コストの算出も行った。

2. システムの構成

まず、Fig. 1に全体システムの構成を示す。

当該システムは、BTプロセスであるガス化炉、ガス精製装

Fig. 1 Schematic design of BT-PEFC-CGS

置、ガス冷却装置、CO変成装置、CO選択酸化装置及びPEFC-CGSから構成され、最終的に電力及び熱を園芸施設に供給するシステムである。なお、システム全体の発電効率は、NEDOが現在目標としている10t級バイオマスガス化発電システムの20%以上を達成し得るシステムを目標としたプロセス設計を行った³⁰⁾。

2.1 BT プロセス

本研究では、BTプラントの規模は15t/dとして、バイオマス原料を廃材 (Table 1 参照) として、メンテナンス期間を考慮して、年間300日の連続運転を想定する。なお、プラント規模及び年間稼働日数の条件については、現在、当該技術所有の民間企業により計画されているデータを参照した³²⁾。また、炉の起動時においては、炉内加熱のためにLPG等の燃料が必要となるが、後述するCO₂排出量及びコスト分析においては考慮しないこととした。

当該プラントは、主に熱分解炉、改質炉、熱風炉から構成される。炉内では、反応に必要な熱源はヒートキャリア(HC)と呼ばれるアルミナボールが循環し、そのHCにより炉内に熱が供給される。HCの加熱には、熱分解炉から排出されるCharと呼ばれる炭素分及び燃料電池側から排出されるオフガスを利用したシステムである。本研究で利用した各パラメータについては、次のとおりである。

Table 1 Ultimate analysis of biomass material (wood)

C ^a	[wt%]	50.90
H ^a	[wt%]	5.90
O ^a	[wt%]	40.50
S ^a	[wt%]	0.10
N ^a	[wt%]	0.52
Cl ^a	[wt%]	0.08
Ash ^a	[wt%]	2.00
Heating value ^a	[kJ/kg]	18,348

^a Dry-basis

2.1.1 熱分解炉

熱分解炉においては、バイオマス原料 (原料含水率:20wt%) 及び水蒸気量が供給される。水蒸気の供給量は、一般的には原料中の炭素のモル比として表され (スチーム[mol/h] / カーボン[mol/h], S/Cとして表す)、本研究においては、この比を1とした。供給されたバイオマスは550℃にて、CO₂、CO、H₂O、H₂、CH₄、C_xH_y、Tar及びCharに分解される。本研究では、還元雰囲気中の実験によって得られた熱分解ガス組成及び元素分析値から評価された次の化学式を用いることとした⁹⁾。また、Tarについては、炉の最終的な出口温度が高温になることから理想的に分解が進むとして考慮せず、Charについても固定炭素まで分解が進むとして扱った。

2.1.2 改質炉

次に、改質炉では、水蒸気とともに熱分解ガスが950℃で次の平衡反応により改質されるものとした。

ここでの評価では上記の2つの平衡反応式から形成される代数方程式を解くことによって、平衡組成が決定するが、実際の炉においては、温度によって決定する理論上の平衡組成になることはない。従って、ここでは、当該システムの基礎試験装置による改質実験によって求められた各平衡組成と理論上の平衡組成の差をアプローチ温度差として表し、その温度差をシミュレーションに反映させることとした。なお、(2)及び(3)式のアプローチ温度差363℃及び45.6℃を用いることとした⁹⁾。

2.1.3 熱風炉

熱風炉では、燃料として熱分解炉から排出されたCharとPEFCのアノード側から排出されるオフガスを熱源として利用する。ここでは、いずれの燃料も空気比を1.4として完全燃焼するものと仮定した。なお、オフガスの燃焼特性やHCへの熱伝導については効率的に行われるものとして仮定するが、実

際は、オフガスの燃焼性の検証やHCへの熱伝導が炉全体のプロセス能力に起因することから、これらのより詳細な検討については今後の研究課題としたい。

また、BT炉内の熱源をHCによって供給するために、チャーかオフガスの燃焼（(4)式参照）反応が考慮されている。このときの供給熱のバランスは熱損失が3割程度で、チャー及びオフガスの供給熱割合はほぼ1：1である。また、熱風炉での反応は以下の式に示される。

次に、本研究では、プラントからの温室効果ガスの影響を考慮するため、温室効果ガスの1つである N_2O （温暖化係数＝310）についても、次式で表わされる N_2 の酸化に伴う平衡反応により検討することとした¹⁵⁾。

通常、本研究のようなバイオマスエネルギーシステムにおける CO_2 排出量の評価においては、燃焼時における CO_2 排出量はバイオマスのカーボンニュートラルの特性により、ゼロとして評価しているが、温室効果ガス全体で見た場合、その他の地球温暖化の影響が大きいガスを考慮することも重要である。従って、本研究では当該システムから排出される CO_2 排出量と N_2O 排出量をシステム全体からの等価 CO_2 として評価することとした。

2.1.4 ガス精製装置・CO変成装置・CO選択酸化装置

BTプロセスで生成された合成ガスは、ガス精製装置を経て、不純物が取り除かれる。続いて、CO変成装置により H_2 濃度を高められ、さらに、CO選択酸化装置によりCOを完全に除去される。これらの装置では、触媒及び適切な温度により運転されるものとして、理想的なガス組成が得られるものとした。

2.1.5 プラント性能

以上の条件から、プラントの規模を15t/dにしたときのプラント性能をTable 2に示す。

これらの結果から、PEFC入口の H_2 濃度は56%となり、例えば、都市ガスを燃料とする H_2 濃度が77%程度であることから、燃料電池における電流－電圧特性に出力の低下等の影響が懸念される。しかしながら、PEFCのベースとなるPEMセル（電改質膜：Nafion 115、セル面積：25cm²、 H_2 濃度：60～80%、（株）ミクロ）を使った H_2 濃度の影響を検討した実験においても、大きな影響は見られなかったため、当該燃料でも

Table 2 Specification of Blue Tower

BT	Scale	[t/d]	15.00
	Auxiliary	[kW]	175.00
	Syngas Flow	[Nm ³ /h]	665.78
	Syngas Heating Value	[MJ/Nm ³]	12.22
	Cold-gas Eff.	[LHV-%]	74.60

十分に発電できると仮定した¹⁶⁾²⁵⁾。すなわち、PEFCの発電特性は燃料ガスの H_2 ガスの供給速度のみに依存し、詳細な H_2 濃度に依存しないものと仮定した。また、このPEFC発電特性への H_2 濃度の影響については、今後の研究課題としたい。

2.2 PEFC-CGS

次に、PEFC-CGSについては、前述した25cm²のPEMセルを用いて、開回路電圧及び電流－電圧特性を測定した²⁵⁾。このデータを用いて、セル抵抗及びターフェル勾配をデータフィッティングによって評価した。ここで、電流密度J[mA/cm²]、開回路電圧U0[mV]、ターフェル勾配b[mV/dec.]及びセル抵抗R[ohm]とした場合、セル電圧U[mV]は次式の関係があることを用いた¹⁷⁾。なお、本研究で想定したPEFC-CGSの運転条件については、Table 3に示すとおりである。

$$U = U_0 - R \times J - b \times \ln(J) \quad (7)^{17)}$$

以上から、PEFC-CGSの性能については、Table 4のように評価した。なお、オフガスについては、BTプロセスの熱風炉用の燃料として利用されることを想定する。

2.3 エネルギー需要の想定

次に、本研究で想定したエネルギー需要について考察した。ここでのエネルギー需要は電力需要及び熱需要であり、電力需要に関しては、BTプラントの所内動力、園芸施設の照明、ポンプ及び空調動力（冷房用）がメインである。また、熱需要は園芸施設内での暖房用需要である。

ここで、園芸施設のエネルギー需要については関連文献及びヒアリングによって次のように決定した^{9) 12) 13)}。

電力需要は、施設内の電灯及び空調の時間別需要とし、これにBTプラントでの所内動力を加えて全体の電力需要とした。この場合、発電電力は、当該施設の電力需要よりも大きくなることが想定されるが、その余剰電力については、本研

Table 3 Parameters of PEFC performance

Operating Temp.	[°C]	80
Humidity (at 80°C)	[%]	100
Current density	[mA/cm ²]	200
Stoichiometric proportion	-	1.3
B ¹⁰⁾	[mV/dec.]	70.14
R ¹⁰⁾	[ohm]	0.63
U0 ¹⁰⁾	[mV]	987
DC/AC converter Eff.	[%]	95

Table 4 Performance of PEFC-CGS

PEFC-CGS	Scale	[kW]	30
	Number of Unit	-	17
	Fuel-gas Flow	[Nm ³ /h]	876
	H ₂ Conc.	[vol%]	56
	OFF-gas Flow	[Nm ³ /h]	468
	OFF-gas Heating Value	[MJ/Nm ³]	7.3
	Power Eff.	[LHV-%]	34.3
	Heat Recovery Eff.	[LHV-%]	30

Fig. 2 Energy demands at one day of the middle of each month

究においては一般電気事業者以外の特定規模電気事業者の参入状況及びBTプラントの導入計画等の条件を勘案し、余剰電力購入価格にRPS分を上乗せすること想定した。一方、園芸施設内の電灯及び空調機器の電力需要を含め、熱需要については、園芸施設を運営する企業のヒアリングにより得られた年間の重油使用量及び電力使用量から、以下のように各月及び各時間帯のエネルギー需要として評価した³²⁾。

まず、熱需要については、イチゴを栽培している期間における栽培必要温度と外気温度との差に比例するものとして、年間の熱需要を時系列データに変換した³¹⁾。なお、園芸施設の規模の決定については、BTの標準的な規模(15t/d)を考慮し、また、当該プロセスを利用した関連する事業報告書から、その規模を1haとした。但し、後述する感度分析においては、施設面積を1ha～5haと変化させた。この設定条件の場合、このとき当該施設(BTプラントの所内動力含まない)の年間電力需要は876MWh/yr及び熱需要は9.5TJ/yrとなった。なお、Fig. 2に各月の1日のエネルギー需要変化(推定値)を示す。この図から、晩秋から春季にかけて熱需要が増加し、熱電比の向上が推測される。

3.1 シミュレーション条件の設定

次に、前述した条件に基づいて、次のようなケース設定を

行った。特に、ここでは、化石エネルギーによるエネルギー供給システム(従来ケース)との優位性を示すために、以下のようなPEFC-CGSを導入する2つのシステム(現在、導入が進んでいる都市ガス等の燃料によるPEFC-CGSケースとBio-H₂を燃料としたPEFC-CGSのケース)についてケースを設定し、従来ケースとの比較により燃料や設備コストの価格分散を勘案し、当該施設に係る年間の運転コスト、等価CO₂排出量及び等価CO₂削減費用について検討することとした。なお、各ケースの簡潔な説明は以下のとおりである。

a. 従来ケース(Conv. Case)

電力供給：一般電気事業者

熱供給：温水ボイラー(A重油、効率80%)

b. PEFC-CGS導入ケース(Case 1)

電力供給：都市ガスPEFC-CGS＋一般電気事業者(不足の場合)

※PEFC-CGSからの電力が余剰となる場合は売電を想定する。

熱供給：都市ガスPEFC-CGS＋A重油温水ボイラー(不足の場合、効率80%)

※余剰となる場合は廃棄することを想定する。

c. BT-PEFC-CGS導入ケース(Case 2)

電力供給：BT-PEFC-CGS＋一般電気事業者(不足の場合)

※BT-PEFC-CGSからの電力が余剰となる場合は売電を想定する。

熱供給：BT-PEFC-CGS＋A重油温水ボイラー(不足の場合、効率80%)

※余剰となる場合は、廃棄することを想定する。

次に、各エネルギーのコスト及びCO₂原単位について、

Table 5に示す。

ここで、BTプラントの設備については、例えば、農林水産省関連の補助金(補助率50%)の補助金が利用できるものとした²⁶⁾。これは、当該プラントの導入実績が少ないために、過剰な仕様での設計となり、この段階においては補助金の利用

Table 5 Data of Cost and specific CO₂ emission

Investment cost	BT-plant (Subsidy ratio 50%)	[10 ⁶ JPY]	750
	PEFC-CGS	[10 ³ JPY/kW]	400, 500, 700
Energy cost	Electricity (Normal) ¹⁹⁾	[JPY/kWh]	10.30
	Electricity (Summer) ¹⁹⁾	[JPY/kWh]	11.40
	Biomass (wood)	[10 ³ JPY/t-20%]	－ 5.0 ～ 5.0
	Public gas ¹⁶⁾	[JPY/Nm ³]	62.95 ～ 71.91
	Bunker A	[JPY/L]	70.03 ～ 108.50
Power Selling Price	Electricity (Normal) ¹⁹⁾	[JPY/kWh]	10.30
	Electricity (Summer) ¹⁹⁾	[JPY/kWh]	11.40
	RPS (Case 2) ¹⁴⁾	[JPY/kWh]	4.90
Other Cost	Maintenance cost	[10 ⁶ JPY/yr]	37.5
	Labor	[10 ⁶ JPY/yr]	20.0
Specific CO ₂ Emissions	Electricity (CO ₂) ¹⁸⁾	[kg-CO ₂ /kWh]	0.410
	Bunker A (CO ₂) ¹⁵⁾	[kg-CO ₂ /L]	2.7
	Bunker A (N ₂ O) ¹⁵⁾	[10 ⁻⁶ kg-N ₂ O/L]	7.0

なしでは、その運用が難しいと考えられる。従って、本研究のコスト分析においては、まず補助金を利用したビジネスモデルを考えることとした。しかしながら、将来的に導入実績が多くなり、技術の成熟が図られれば、コスト低減も期待でき、補助金を利用しないビジネスモデルも可能となることが想定される。

次に、PEFC-CGSの設備費については、2010年から2020年時点での導入価格を想定した。なお、この場合の価格は1kWが標準規模となっているが、当該システムからの発電規模は数100kW程度であることから、設置台数が多くなり経済的ではない。そこで、現状におけるPEFCの開発規模(30kW)を標準単位として、100%定格運転できる最大の台数で導入されることを想定した。なお、この標準単位の導入コストは、1kWの価格に対して2/3乗則に比例するものとしてコスト設定を行った^{20) 27)}。

次に、本システムのCO₂削減量 ΔCO_2 [t-CO₂/yr] 及びコスト増加量 Δcost [JPY/yr] は

$$\Delta\text{CO}_2 = \text{Conv_CO}_2 - \text{New_CO}_2 \quad (8)$$

$$\Delta\text{cost} = \text{Conv_cost} - \text{New_cost} \quad (9)$$

のように示されるので、これらの式から、等価CO₂削減の限界費用 $\text{Abate_CO}_2\text{_Cost}$ [JPY/t-CO₂] は、次式のように定義される。

$$\text{Abate_CO}_2\text{_Cost} = \frac{\Delta\text{cost}}{\Delta\text{CO}_2} \quad (10)$$

ここで、従来ケースの等価CO₂排出量及びコストを Conv_CO_2 及び Conv_cost で表し、新規ケース(Case 1及び2)のCO₂排出量及びコストをそれぞれ New_CO_2 及び New_cost とした。なお、 New_cost では売電による収益を勘案した正味コストで評価を行った。また、 New_cost におけるBTプラント及びPEFC-CGSユニットの設置費用にかかる減価償却費は耐用年数15年として定額法により年間費用に換算し、その他、メンテナンス費用及び人件費等も考慮した(Table 5参照)。

4. シミュレーション結果

4.1 シミュレーション結果

まず、各ケースのエネルギー効率について述べる。ここで、各種エネルギー効率の定義は次式のとおりである。

$$\text{Power Eff.} = \frac{\text{Net Power [MJ/h]}}{\text{Public Gas or Biomass [MJ/h]}} \quad (11)$$

$$\text{Heat Recovery Eff.} = \frac{\text{Net Heat Supply [MJ/h]}}{\text{Public Gas or Biomass [MJ/h]}} \quad (12)$$

$$\text{Total Eff.} = \text{Power Eff.} + \text{Heat Recovery Eff.} \quad (13)$$

燃料電池導入ケースのエネルギー効率については、Case 1においては発電効率36.9LHV-%、熱効率35.3LHV-%(総合効率46.1LHV-%)となり、また、Case 2においては発電効率24.0LHV-%、熱効率22.1LHV-%(総合効率46.1LHV-%)となった。

次に、燃料電池導入ケースにおけるコスト分析においては、Table 5に示すように、過去1年間(2007年8月～2008年8

月)におけるA重油価格の推移70.03～108.50円/Lを用い、またガスの従量料金単価についても同期間の価格推移62.95～71.91円/Nm³とし、さらに、PEFC-CGSの導入価格については、我が国における燃料電池・水素技術ロードマップから、2010年から2030年までの目標価格として、400,000～700,000円/kWを用いて、運転コストの分析を行った²⁸⁾。また、Case 2においては、廃材原料の受入価格について-5,000～5,000円/t(含水率20wt.%)のときの価格分散を考慮した。なお、この場合、原料価格の負数は逆有償価格を意味しており、これは地域及び受入先の条件や契約期間等によって決定する価格である。

また、需要側の施設規模の影響に関する感度分析として、施設面積を1～5haについて分析した。

ここで、各ケースにおける年間の電力及び熱需要に対する運転コストをFig. 3に示す。

Fig. 3において、今後の化石エネルギー価格の上昇を勘案した場合、Case 2では、BT及びPEFC-CGSの価格の課題等もあるが、原料の受入価格によっては、4～5haにおいてConv. Caseに比して、同程度となることが想定される。さらに、バイオマス利用のCase 2においては、余剰電力の販売においてRPS(Renewable Portfolio Standard)法による価格の上乗せが期待できる。例えば、当該ケースにおいて5haの施設規模に、逆有償(-5,000円/t)となる原料を利用し、通常の余剰電力価格に加え、RPS相当量(4.9円/kWh)を考慮することによって1,400万円程度のコスト低下が見込まれ、これはCase 2の1haのときの最大コストの約13%となり、そのRPS利用による効果は大きい¹⁴⁾。

一方、燃料電池のみを導入したケース(Case 1)においては、従来ケースで使われる燃料価格の上昇と同様に都市ガスの価格も上昇することが想定されるため、実際には、Conv. Caseよりも優位になる可能性は低いと考えられる。

次に、Fig. 4に各ケースの売電におけるCO₂換算量及びN₂O排出量を考慮した等価CO₂排出量を示す。

この結果から、例えば、施設規模1haのときのCase 1及びCase 2における等価CO₂排出量は、Conv. Caseと比較して年間164t-CO₂/yr及び2,298t-CO₂/yrの削減が可能である。各ケースにおける排出要因は、Conv. Case及びCase 1においては、主に燃料の燃焼によって発生するCO₂とN₂Oであり、Case 2

Fig. 3 Annual operating cost in each case

Fig. 4 Annual equivalent CO₂ emission in each case

Fig. 5 Equivalent abatement cost in each case

における排出要因はBT内の熱供給のためのChar及び燃料電池からのオフガスの燃焼に伴うN₂Oと温水ボイラーからの排出が主要な要因である。

またCase 2においては、原料であるバイオマスをカーボンニュートラルとすることから、売電相当量と同じ従来の化石資源から発電量のCO₂排出量 (Table 5 参照) が抑制され、当該ケースのCO₂換算量が負数となった (Fig. 4 参照)。また、導入する施設規模が大きくなるほど温水ボイラーによる熱供給が増加するため、等価CO₂排出量が増大する。

以上の結果を考慮し、最後にConv. Caseに対する等価CO₂削減単価を示す (Fig. 5 参照)。

各ケースともに1 haの施設に導入した場合の等価CO₂削減コストが最も高くCase 1のときは、16,721～41,988円/t-CO₂となり、Case 2では、7,675～33,393円/t-CO₂となった。

また、2 ha以降はほぼ一定となり、Case 1では、16,000～41,700円/t-CO₂、またCase 2では、6,800～30,000円/t-CO₂となった。このことから、Case 2のBio-H₂を利用したPEFC-CGSのケースが優位になることが想定される。なお、他の再生可能エネルギーによるCO₂削減効果については、例えば、太陽光発電の場合には、34,000円/t-CO₂程度であることを鑑みれば、Bio-H₂によるPEFC-CGSの選択肢も実現可能性が高いといえよう²¹⁾。また、施設規模による2 ha以上にしても、等価CO₂削減費用が変化しないことから、これ以上の規模への導入は、等価CO₂削減の観点からは効率的ではない。

5. 結 論

本論文では、バイオマスガス化からのH₂製造 (Bio-H₂) と燃料電池コージェネレーションシステム (PEFC-CGS) を組み合わせた複合システムを園芸施設に導入した場合を想定し、コスト面及び環境面からの導入可能性について検討した。

ここでは、特に、一般電気事業者からの電力供給とA重油を燃料とした温水ボイラーによる熱供給を従来ケースとし、このケースに対して、PEFC-CGS単独ケース及びBio-H₂によるPEFC-CGSのケースについてコスト、等価CO₂排出量及び等価CO₂削減費用について検討した。また、本評価においては、将来の排出権取引制度の活用や温室効果ガスの削減の観点から、N₂Oを含めた温室効果ガスの削減ポテンシャルについても評価を行った。

その結果、コスト面については、PEFC-CGSの価格及び化石系燃料の価格に大きく依存し、近年のわが国の施策や開発状況を鑑みた場合には、PEFC-CGSの価格低減は可能であると想定されるが、一方で、燃料価格の高騰傾向は続くものと予想され、また、産業界全体での排出削減の義務化などの動きを勘案すれば、化石燃料に依存せざるを得ないPEFC-CGS単独の導入については、当該施設への導入可能性は低いと考えられる。

次に、Bio-H₂によるPEFC-CGSの導入については、前述したようにシステムの設置コストや原料価格に大きく依存するものの廃材利用による逆有償スキームやRPS法の利用等、価格を低下させるオプションもあり、そのポテンシャルは高いといえよう。また、本論文で示した等価CO₂削減費用について、太陽光発電のCO₂削減費用と比較した場合には、その価格が低いケースもあり、将来的に導入される企業間での排出権取スキームの導入状況にもよるが、国内の温暖化対策の1つのオプションとなる可能性を有している。また、園芸施設に対してCGSを導入することにより一般電気事業者からの買電とA重油による熱供給よりもCO₂排出量を削減できることが示された。また、燃料電池やBTプロセスの導入段階における初期費用が割高であることから、導入費用に対する支援制度が効果的であると考えられる。

文 献：References

- 1) 北海道洞爺湖サミットHP, <http://www.g8summit.go.jp/news/gaiyo0709.html> (2008/10/05アクセス)
- 2) 総合資源エネルギー調査会需給部会, 2030年のエネルギー需給展望 (答申), (行政), (2005): Sougou Shigen Energy Tyousa Jyukyuu Bukai, 2030nen No Energy Jyukyuu Tenbou (Toushin), (Gyosei), (2005)
- 3) 環境省, 循環型社会白書, (行政), (2007): Ministry of the Environment, Junkangata Syakai Hakusyo, (Gyosei), (2007)
- 4) 黒木洋, 日本建築学会環境系論文集, **610**, 67-73 (2006): Kuroki, Y., *J. Environ. Eng., AIJ*, **610**, 67-73 (2006)
- 5) 相村建設, http://www.aimura.co.jp/kaihatsu/kisokenkyuu/baiomasu_%20kisokenkyuu_16.htm (2008/

- 05/21アクセス)
- 6) Dowaki, K., Kawabuchi, T., Operations Research Proceedings 2007, pp. 193-197 (2007)
 - 7) 栃木県東京事務所首都圏農業情報センター, [http://www.pref.tochigi.jp/tokyo-snjc/\(2008/05/21アクセス\)](http://www.pref.tochigi.jp/tokyo-snjc/(2008/05/21アクセス))
 - 8) 栃木県農業試験場, 新技術シリーズNo.3, p. 14(2001): Tochigi Agricultural Experiment Station, new technology series No.3, p. 14(2001)
 - 9) Dowaki, K., *Renewable Energy*, **32**(1), 80-94(2007)
 - 10) 福田純, PEM-cellの実験装置による固体高分子型燃料電池コージェネレーションシステムの分析, (東京理科大学), (2008): Fukuda, J., PEM-cell No Jikken Souchi niyuru PEFC-CGS No Bunseki, (TUS), (2008)
 - 11) 機械システム振興協会, システム技術開発調査研究, 18-R-12, pp. 9(2007): Kikai System Shinkou Kyokai, System Gijyutu Kaihatu Tyousa Kenkyuu, 18-R-12, pp. 9(2007)
 - 12) 気象庁, [http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php\(2008/05/21アクセス\)](http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php(2008/05/21アクセス))
 - 13) 広島県農業情報ローカルネットワークシステム, [http://www.f-net.naka.hiroshima.jp/keieishihyo/xls/eyuPo1161160890109.xls\(2008/05/21アクセス\)](http://www.f-net.naka.hiroshima.jp/keieishihyo/xls/eyuPo1161160890109.xls(2008/05/21アクセス))
 - 14) 資源エネルギー庁「RPS法下における新エネルギー等電気等に係る取引価格調査結果について」, [http://www.rps.go.jp/RPS/new-contents/pdf/chosa_kekka_H19.pdf\(2008/11/05アクセス\)](http://www.rps.go.jp/RPS/new-contents/pdf/chosa_kekka_H19.pdf(2008/11/05アクセス))
 - 15) 環境省, 温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル, (行政), (2006): Ministry of the Environment, onshitsu kouka gas haisyuturyou santei houkoku manual, (Gyosei), (2006)
 - 16) 東京ガス, [http://home.tokyo-gas.co.jp/userguide/userguide_06.html\(2008/05/21アクセス\)](http://home.tokyo-gas.co.jp/userguide/userguide_06.html(2008/05/21アクセス))
 - 17) 水素・燃料電池ハンドブック編集委員会, 水素・燃料電池ハンドブック, pp. 72-90(2006): Suiso-Nenryou Denchi Handbook Henshyuu Iinkai, Suiso-Nenryou Denchi Handbook, pp. 72-90(2006)
 - 18) 電気事業連合会, [http://www.fepc.or.jp/about_us/pr/kaiken/_icsFiles/afieldfile/2008/08/20/200805.pdf\(2008/05/21アクセス\)](http://www.fepc.or.jp/about_us/pr/kaiken/_icsFiles/afieldfile/2008/08/20/200805.pdf(2008/05/21アクセス))
 - 19) 東京電力(株), [http://www.tepco.co.jp/e-rates/custom/shiryuu/tanka/dentou-j.html\(2008/05/21アクセス\)](http://www.tepco.co.jp/e-rates/custom/shiryuu/tanka/dentou-j.html(2008/05/21アクセス))
 - 20) 社会法人日本電機工業会, [http://www.jema-net.or.jp/Japanese/denki/2002/de-0202/de_01.pdf\(2008/05/21アクセス\)](http://www.jema-net.or.jp/Japanese/denki/2002/de-0202/de_01.pdf(2008/05/21アクセス))
 - 21) 環境省, 総括調査票(メガワットソーラー共同利用モデル事業), (行政): Ministry of the Environment, Soukatu tyousa hyou(mega watt solar kyoudou riyou model jigyou), (Gyosei)
 - 22) 固体高分子形燃料電池(PEFC)ロードマップ(定置用燃料電池システム), [https://app3.infoc.nedo.go.jp/informations/koubo/events/FA/nedoeventpage.2008-06-18.1414722325/30ed30fc30de30c3PEFC5b9a7f6e7528.pdf\(2008/11/05アクセス\)](https://app3.infoc.nedo.go.jp/informations/koubo/events/FA/nedoeventpage.2008-06-18.1414722325/30ed30fc30de30c3PEFC5b9a7f6e7528.pdf(2008/11/05アクセス))
 - 23) 固体酸化物形燃料電池(SOFC)ロードマップ, [https://app3.infoc.nedo.go.jp/informations/koubo/events/FA/nedoeventpage.2008-06-18.1414722325/30ed30fc30de30c3SOFC.pdf\(2008/11/05アクセス\)](https://app3.infoc.nedo.go.jp/informations/koubo/events/FA/nedoeventpage.2008-06-18.1414722325/30ed30fc30de30c3SOFC.pdf(2008/11/05アクセス))
 - 24) 平成18年 青果物卸売市場調査報告 主要都市の月別果実の卸売数量・価額・価格, [http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/Xlsdl.do?sinfid=000001220102\(2008/11/05アクセス\)](http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/Xlsdl.do?sinfid=000001220102(2008/11/05アクセス))
 - 25) 小柳壮士, 堂脇清志, 第25回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, バイオ水素燃料電池CGSのシステム分析, pp. 515-518
 - 26) 農林水産省バイオマスの環づくり交付金, [http://www.maff.go.jp/nouson/hyouka/bukai/09/sup_data.pdf\(2008/11/05アクセス\)](http://www.maff.go.jp/nouson/hyouka/bukai/09/sup_data.pdf(2008/11/05アクセス))
 - 27) 相良紘, 入門化学プラント設計, (培風館), pp. 203: Sagara H., Nyuumon Kagaku Plant Sekkei, (Baifuukan), pp. 203
 - 28) NEDOの燃料電池・水素技術開発ロードマップ2008, [https://app3.infoc.nedo.go.jp/informations/koubo/events/FA/nedoeventpage.2008-06-18.1414722325/30ed30fc30de30c3PEFC5b9a7f6e7528.pdf\(2008/11/05アクセス\)](https://app3.infoc.nedo.go.jp/informations/koubo/events/FA/nedoeventpage.2008-06-18.1414722325/30ed30fc30de30c3PEFC5b9a7f6e7528.pdf(2008/11/05アクセス))
 - 29) (財)新エネルギー財団, 定置用燃料電池大規模実証事業, [http://happyfc.nef.or.jp/fc.html\(2008/11/10アクセス\)](http://happyfc.nef.or.jp/fc.html(2008/11/10アクセス))
 - 30) 農林水産省, 「バイオマス・ニッポン総合戦略」(平成18年3月31日策定)本文, p. 15, [http://www.maff.go.jp/j/biomass/pdf/h18_senryaku.pdf, pp18\(2008/10/31アクセス\)](http://www.maff.go.jp/j/biomass/pdf/h18_senryaku.pdf, pp18(2008/10/31アクセス))
 - 31) 小澤行雄, 園芸施設入門, (川島書店), pp. 86: Ozawa Y., Engei Sisetsu Nyuumon, (Kawashima Syoten), pp. 86
 - 32) (株)日本計画機構, 未利用バイオマス資源を活用した大規模野菜生産事業報告書(2008): Kabushiki Gaisya Nihon Keikaku Kikou, Miriyou Biomass Shigen wo Katsuyousita Daikibo Yasaiseisanjigyou Hyoukokusyo(2008)
 - 33) 資源エネルギー省HP, <http://www.enecho.meti.go.jp/faq/electric/q1.htm>