

## ごみ発電の効果的サーマルリサイクルに向けて

～ Waste to Energy コンセプトと CFB 技術の可能性～

パブリックコンサルティング事業部 エネルギー戦略室 研究員 養田 智子

## はじめに

ごみ発電<sup>1</sup>を取り巻く環境は日々変化しており、化石燃料の高騰を始め、地球温暖化に至るまで、様々な問題を含んでいる。エネルギーの有効利用や地球温暖化対策等の諸問題は、ごみ発電の追い風となっており、環境負荷の少ない社会に向け、さらに導入が進むと考えられる。

一方、現在行われているようなごみの適正処理を主眼とした焼却方式は、効果的なサーマルリサイクル（熱回収）が行われているとは言いがたい。ごみの持つエネルギーの有効利用という観点からは、今後、欧米で積極的に取り入れられている Waste to Energy（WTE）コンセプトに重きを置いた技術導入が求められる。

本稿は、現状のごみ発電を取り巻く環境及び課題を踏まえ、課題解決に向けた循環流動床（CFB；Circulating Fluidized Bed）ボイラ技術の特徴を述べるとともに、CFB ボイラ活用のごみ発電の可能性を示唆するものとする。

## 1. ごみ発電をとりまく環境

図1に示すように、近年、過去最高水準で化石燃料価格が高騰しており、ガソリンや灯油等の燃料を始め、食品に至るまで関連する様々な製品の価格が上昇傾向にある。

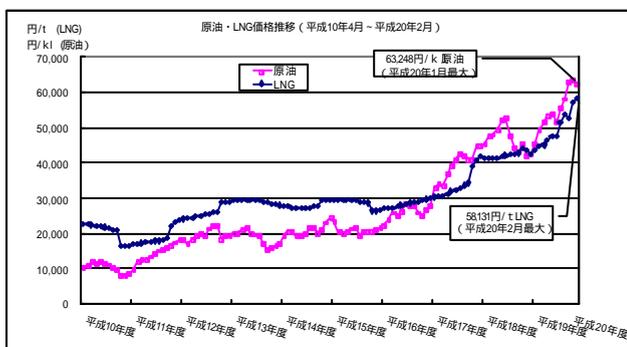


図1 原油・LNGの価格推移

(出所：石油連盟ホームページ、石油統計資料等より作成)

<sup>1</sup> ここでいう「ごみ」は一般廃棄物を指す。

このまま化石燃料価格の高騰が続けば、ガスや電気の価格がさらに上昇し、産業界、地方自治体、一般家庭等、多くの分野の財政に大きく影響が及ぶことが懸念される。こういった動向を受け、将来的には、ごみ発電のような化石燃料に依存しない電源の確保が重要となる。

ごみ発電は、全国のごみ処理施設数の約2割に導入されている。年々、設置数は増加しているものの、ごみ発電の発電量は横ばいしている（図2）。

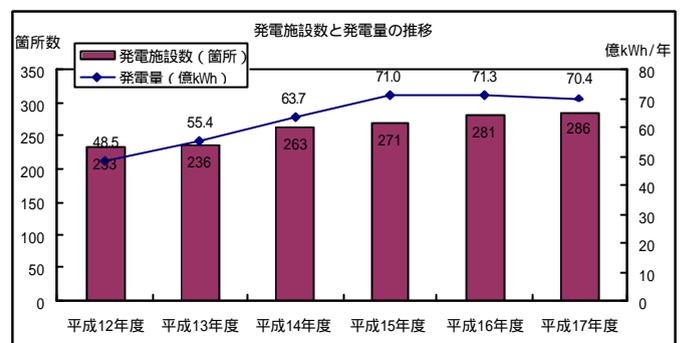


図2 ごみ発電施設数と発電量の推移

(出所：環境省「一般廃棄物処理事業実態調査」より作成)

京都議定書目標達成計画に基づく「廃棄物処理施設整備計画」におけるごみ発電の導入目標値は、平成24年度で250万kWであり、平成19年度見込みの1.5倍の発電容量が必要となり、導入目標達成は厳しい状況となっている（図3）。

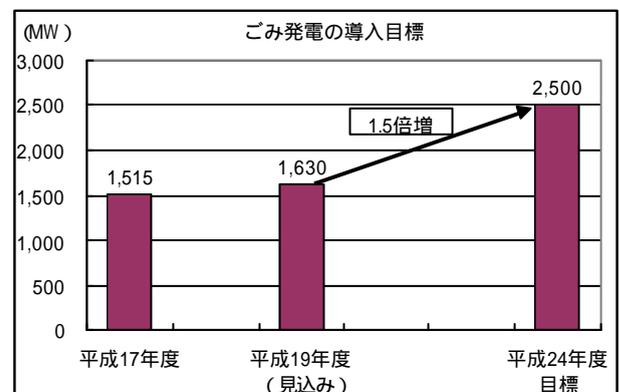


図3 ごみ発電の導入目標

(出所：環境省「廃棄物処理施設設備計画」より作成)

一方、ごみ発電は CO<sub>2</sub> 排出の少ない新エネルギーとして位置づけられており、電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法（RPS 法）においても導入促進が進められている。RPS 法では、新エネルギーのうち、太陽光、風力、水力（1,000kW以下）、地熱、バイオマス<sup>2</sup>による発電の一部導入が電気事業者に義務付けられている。そのなかでも、ごみ発電を含むバイオマス発電が寄与する割合は高まっており、CO<sub>2</sub> 排出の少ない貴重な電源として、温暖化対策における環境価値が認められている（図 4）。今後、温室効果ガス削減対策が進むにつれ、ごみ発電のもつ環境価値はさらに高まるものと考えられる。

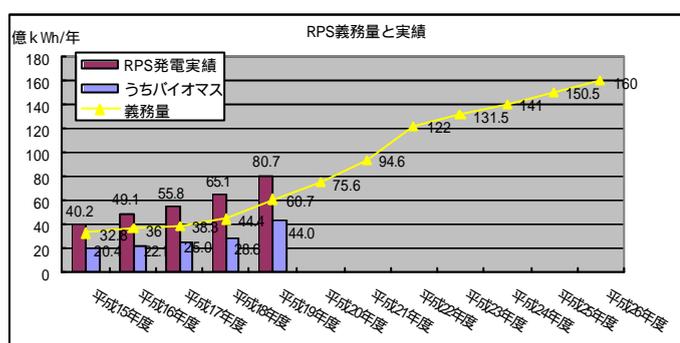


図 4 RPS 義務量と実績

（出所：RPS 法小委員会資料等より作成）

ごみ発電の RPS 認定分は、ごみ中のバイオマス相当量

現在、ごみのほとんどは、ストーカー方式によって焼却処分されており、複雑な前処理が必要なく、ごみを大量かつ容易に処理できる技術として従来から用いられている。しかし、ストーカー方式は、ごみの安定的な処理には適しているものの、燃焼効率が低く、未燃のごみ処理残渣が多い。発電効率は、現状の全国平均で 10% 程度と低く、発電量を増加させるためには、熱回収の観点からも、高効率な発電システムの導入が重要になる。

また、2000 年に始まった電力自由化により、現在では 50kW 以上の需要家まで電力供給範囲が拡大されており、ごみ発電は、分散型電源として、他の施設に電力供給することが可能となった。ごみ発電設備を所有する自治体の一定規模以上の公共施設への電力供給も可能となり、自治体の財政負担も軽減できると考えられる。

ごみ発電をよりいっそう効果的に利用するためには、ごみの持つエネルギーを最大限に利用できるよう、発電効率の向上等が必要となる。

<sup>2</sup> 動植物に由来する有機物を熱源とする熱。一般廃棄物系バイオマスを含む。

## 2. Waste to Energy の考え方

Waste to Energy (WTE) は、廃棄物を焼却し熱回収（サーマルリサイクル）するものであり、ごみを燃料とした「発電所」としても位置づけることができる。

WTE のコンセプトは、ごみの持つエネルギーをどれだけ有効活用できているか、といった点にあり、ごみを燃料として有効活用するためには、エネルギーとして回収されていない未利用ごみを減らすこと、発電に利用できごみのエネルギーを増やすこと（発電効率の向上等）が重要である。

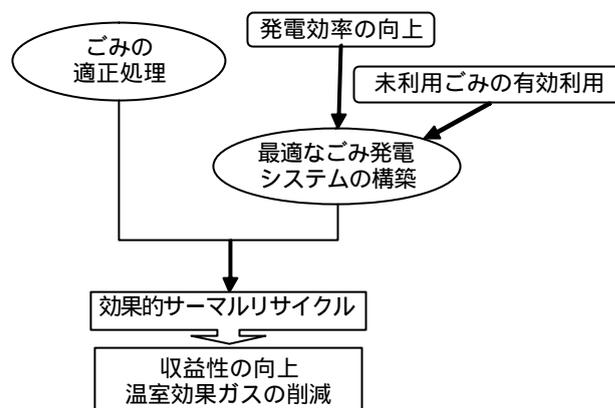


図 5 効果的サーマルリサイクルの導入

ごみの持つエネルギーを有効利用するためには、それぞれのごみの持つ熱量が重要となる。未利用ごみとして利用価値が高い高カロリーな廃プラスチック（以下、廃プラ）はごみ発電の燃料として十分に活用できるポテンシャルがある。化石燃料の高騰下では、ごみは十分に高い価値を持った燃料となる。ごみを、都市ごみ、RDF、廃プラに分け、それぞれの燃料価格推移を、原油は石油火力発電、LNG は天然ガス火力発電の熱量等価で換算すると、図 6 に示す通りである。現状では、石油燃料代替の廃プラの価値は、1t あたり 17,000 円/t、LNG 燃料代替では 13,000 円/t にもなる。

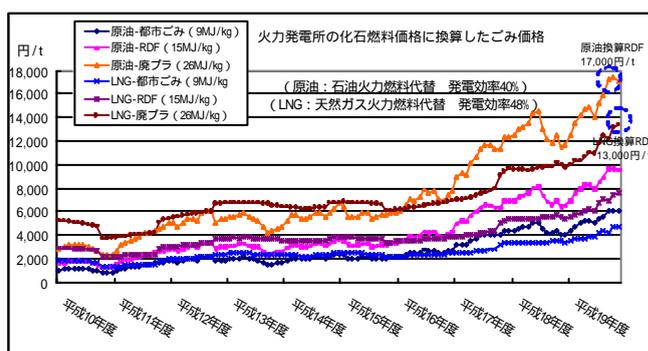


図 6 化石燃料価格に換算した場合の各種ごみ価格推移

最近では、エネルギーの有効活用の観点から焼却不適物<sup>3</sup>として埋立て処理されている廃プラ等を可燃ごみと混焼し、サーマルリサイクルする試みがなされている。しかし、一般ごみと廃プラを混焼した場合、廃プラのもつ高い熱量や含有塩素によって、現状の焼却炉を損傷する可能性があるため、それに対応するための既存炉の補強等の必要性が懸念される。また、廃プラとの混焼によるごみ発電の発電電力量の増加は、既存発電システムの発電効率を上げるような改修が行われない限り期待できない。廃プラは、すでに回収システムが確立されている自治体にとっては、混焼させるよりは、専焼の発電プラント（WTE）の燃料として活用していく仕組みが効果的である。

しかしながら、現状の制度では廃プラはRPS法に適用される新エネルギーとしては認められていない。最終処分量の削減、化石燃料の代替エネルギーとして、廃プラをごみ発電に利用することは有効な手段であることから、制度面において、廃プラを含めたごみ発電に何らかの環境価値が付与されるインセンティブが必要である。

### 3 . CFB 技術の可能性

循環流動床（CFB；Circulating Fluidized Bed）ボイラ技術は、燃料を循環させて燃焼することにより、高い燃焼効率を得られる技術である（図7）。

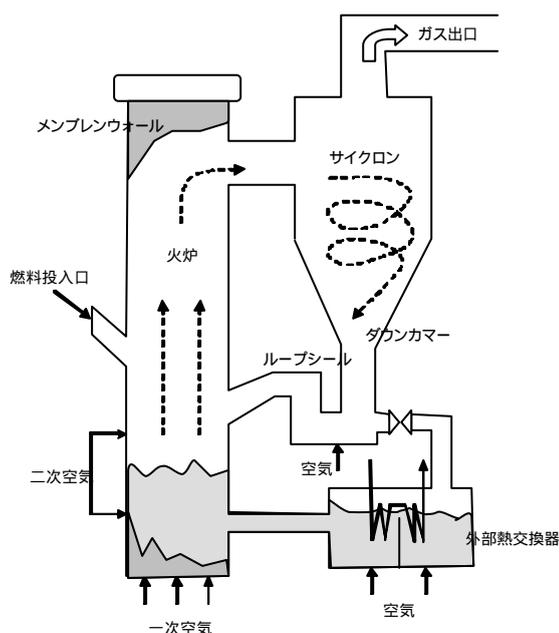


図7 一般的なCFBボイラの概略図

燃料が燃焼しながら火炉の上部方向に押し上げられ循環し、燃焼時間が長くなるため未燃分が少ない。よって、燃焼効率がよく、燃料の適用範囲（6～40MJ/kg<sup>4</sup>）が広い。また、燃料中の硫黄分はフィード中に石灰を混入することで効率的に脱硫でき、SO<sub>x</sub>の発生も抑制され、環境負荷の低減に役立つ。さらに、燃焼温度が比較的低温（800～900）であるため、サーマルNO<sub>x</sub>が発生しにくいという利点がある。

CFBの発電効率は、およそ25～30%であり、現状のごみ発電と比較すると非常に高い。また、燃料適応範囲が広く、燃料としては低カロリー～高カロリーまで多様なごみが有効活用できる。特に、未利用廃プラは、CFBにより処理することによって高効率なサーマルリサイクルが期待できる。CFBの燃料は、ある程度の前処理が不可欠であり、破砕機等の燃料供給方式等に注意する必要があるため、多様な形状の燃料を含む一般可燃ごみよりも、すでに分別されている廃プラのほうがより適合性があるといえる。

CFBの特徴として特筆すべきところは、その負荷調整能力にある。発電による収益性を求める場合、売電価格が高い昼間に多く発電し、電力価格が安価な夜間には発電量を落とす運転方式がある。また、電力市場に応じた負荷追従運転も可能である。

電力自由化に伴い、ごみ発電等の分散型電源から電力を供給できる需要家の範囲が拡大したことから、自治体が所有するごみ発電を分散型電源として、公共施設へ電力を供給することが効果的な手法の1つとして考えられる。公共施設に供給する電力単価を、系統電力への売電価格よりも高く設定し、かつ、公共施設が購入する系統電力価格よりも安く販売することで、売電による収益性と自治体の電力コスト削減の両方が可能となると考えられる。

### 4 . ごみ発電におけるCFB導入効果

高い発熱量を持つ廃プラを従来型焼却施設で混合処理した場合と廃プラ専焼のCFBを導入し、サーマルリサイクルを実践した場合の効果を比較する。

表1に示すように、廃プラ100t/日を燃料に発電した場合、CFBのほうが所内消費電力は高いが、発電効率が従来型より2.7倍高いため、約2.5倍の送電（販売）量が確保できる。従来型発電では、廃プラの専焼ができないため、複数の従来型焼却炉で混焼するものとする。

<sup>3</sup> 分別収集された異物が混在し、リサイクルが困難な廃プラスチック類や塩素含有量などにより燃料としての扱いが困難な可燃性廃棄物等

<sup>4</sup>（参照）AE&E社のCFB燃料適用範囲を参照

表1 廃プラ処理のサーマルリサイクル効果比較

|                | 単位    | 従来型発電  | CFB発電   |
|----------------|-------|--------|---------|
| 廃プラ投入量         | t/日   | 100    |         |
| 廃プラ発熱量         | MJ/kg | 26.2   |         |
| 発電効率           | %     | 11     | 30      |
| 所内(消費)率        | %     | 10     | 18.5    |
| 送電端効率          | %     | 9.9    | 24.5    |
| 発電量            | kWh/日 | 79,942 | 218,023 |
| 送電(販売)量        | kWh/日 | 71,948 | 177,689 |
| 販売電力量比(従来型100) |       | 100    | 247     |
| 発電能力           | kW    | -      | 12,112  |

注1 従来型発電は、一定量の廃プラを従来型施設群で混合処理し、CFB発電は廃プラを専焼  
 注2 従来型発電の発電効率は、平成17年度全国一般廃棄物処理施設の平均、CFBはメーカーヒアリング等による  
 注3 CFBは負荷調整運転(14時間100%MCR、10時間40%MCR)を行うと仮定した発電能力

次に、ごみ発電による電力を公共施設に供給するシステムを考えた場合のCFB導入効果を検討する。

図8に公共施設の時刻別電力パターンと従来型発電及びCFB発電設備からの電力供給パターンを示す。需給パターンと従来型発電電力パターンは、ある自治体の平均的な事例を参考とした。従来型発電の時刻別電力供給パターンは、昼夜に係わらずほぼ一定となっている。CFBの発電パターンは、14時間の最大負荷連続運転と10時間の40%負荷連続運転を仮定する。なお、公共施設の1日あたりの電力需要量は表1の規模のCFB発電施設の供給可能量である、177,689kWhとした。CFBは、電力需要が多い時間帯と電力需要が少ない時間帯で発電量を調整し、電力需要に基づいた運転を行う。

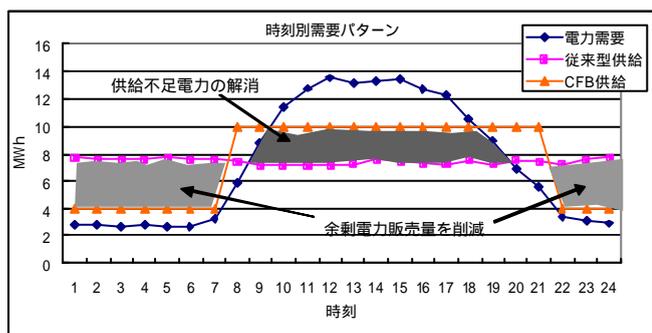


図8 電力需要と電力供給パターン

CFB導入効果は、電力需給ギャップの調整を電力会社に依存するとした前提で試算した(表2)。

従来型発電では、過不足調整電力量が50,786kWh/日(需要量の28.6%相当)に対して、CFB発電では24,048kWh/日(需要量の13.5%相当)と、約53%縮小する。電力需給調整負担金額は、一日あたり、従来型では507,864円、CFBでは240,484円と267,380円の削減となる。年間稼働日数が320日と仮定すると、約8,560

万円の削減が期待できる。

表2 発電施設からの供給過不足調整負担額の比較

| 項目                | 電力量(kWh/日) |         | 金額(円/日)  |          |
|-------------------|------------|---------|----------|----------|
|                   | 従来型発電      | CFB発電   | 従来型発電    | CFB発電    |
| 余剰電力販売量と金額(a)     | 50,786     | 24,048  | 152,359  | 72,145   |
| 供給不足電力購入量と金額(b)   | -50,786    | -24,048 | -660,223 | -312,629 |
| 電力需給調整負担金額(c)=a-b | -          | -       | -507,864 | -240,484 |
| CFB導入効果           |            |         |          |          |
| 需給調整電力量縮小割合       | 53%        |         |          |          |
| 需給調整負担額縮小割合       |            |         | 53%      |          |
| 需給調整負担額縮小額        |            |         | 267,380  |          |

注) 余剰電力の販売単価は3円/kWh、不足電力購入単価は13円/kWhと仮定

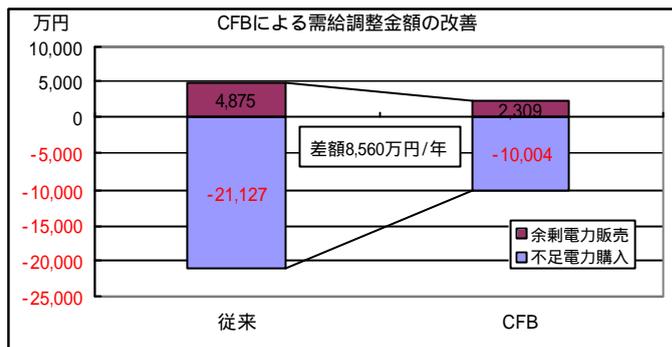


図9 CFBによる需給調整の効果(年間)

## 5. 先進事例紹介

欧米諸国では、石炭用ボイラ、また、その他の低品位化石燃料用ボイラとしてCFBが利用されている。最近では、再生可能エネルギーとしてバイオマス等、廃棄物処理にもCFBが用いられている。以下に、CFBの特徴を生かした海外事例を紹介する。

### (都市ごみ型RDF発電 Lomellina)

CFBボイラメーカーの大手であるFoster Wheeler(FW)は、バイオマスや産業・一般廃棄物を燃料としたCFB(Renewable Energy CFBs)の開発を行っている。代表的なプラントにイタリアのLomellina Plantがある。2000年にLomellinaI(発電能力:15MW)、2007年にLomellina(発電能力:17MW)のCFBボイラを導入し、一般廃棄物(MSW; Municipal Solid Waste)から製造したRDF(Refuse Derived Fuel)を処理している。



写真: Lomellina Plant (現地視察時に撮影)

Lomellina Plant では、MSW 処理を一連のシステムで行っている。Lomellina の MSW 処理工程を図 10 に示す。MSW は、破碎、選別を経て堆肥、金属類、RDF に分けられる。MSW のうち 60% がフラフ状の RDF となり、CFB で焼却処理される。RDF は 9cm 以下に破碎されている。

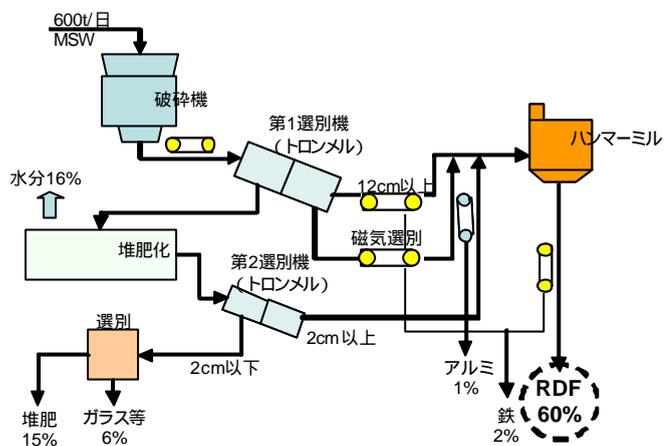


図 10 Lomellina Plant の MSW 処理システム  
（出所：Lomellina Energia HP 資料より作成）

収入は、MSW 処理収入 50% と売電収入 50% で、MSW は現在、157 リラ/kg（約 1 万円/t）で受け入れている。また、電力は ENEL（電力会社）との長期 PPA（Power Purchase Agreement）が結ばれており、再生可能エネルギーの活用としてインセンティブが付与されている。

#### （都市ごみ型 RDF 発電 Neumunster）

ドイツの SWN Stadwerke Neumunster GmbH では、欧州の大手メーカーである、AE&E(Austrian Energy and Environment)社の CFB（発電能力：20MW）を導入し、MSW（Municipal Solid Waste）から分別されたフラフ状 RDF を処理している。



写真：Neumunster 処理場  
（現地視察時に撮影）



写真：フラフ状 RDF  
（現地視察時に撮影）

Neumunster の CFB は、塩素濃度が高い（設計値～1%上限）廃プラ系 RDF に対応した仕様となっており、燃焼効率が高く、燃料性状の変動による負荷変動にもすばやく対応することができる。

フラフ状の RDF はごみ処理場から特別仕様のコンテナによって運搬されており、圧縮することによってコンテナ 1 台あたり 19t の RDF が運搬可能である。日本では、長距離輸送や貯蔵するため、臭気対策として RDF を固化処理しているが、Neumunster のコンテナ方式は RDF の固化処理を行わず、郊外からの運搬も可能である。RDF の固化処理にはコストがかかり、問題となっていることから、日本においても、前処理や運搬方式の効率化が重要である。



写真：RDF 運搬用トラック  
（現地視察時に撮影）



写真：RDF 運搬用のコンテナ  
（現地視察時に撮影）

#### （米国のバイオマス発電）

カリフォルニア州の Colmac Energy は、廃木材等の木質バイオマスを主燃料とした 45MW 級バイオマス発電所（最大出力 47MW）である（1992 年稼働開始）。発電された電力は、再生可能エネルギーとして位置づけられており、30 年間の長期契約で South California Thomas Edison Company（電力会社）に売電されている。



写真：Colmac Energy プラント  
（現地視察時に撮影）



写真：燃料運搬トラック  
（現地視察時に撮影）

Colmac Energy の発電電力は、設定されたベースライン電力による発電電力量の 36,936 万 kWh より多く発電した電力に対し、売電価格が +2.8 ¢/kWh（ベース売電価格：6.15 ¢/kWh）となるインセンティブが得られる（表 3）。現在の年間発電量（実績値）のうち、564 万 kWh がインセンティブ加算対象となり、年間で約 5,800 万円（うちインセンティブ追加分が約 2,000 万円）近い収入が得られる。

このように、サーマルリサイクルの効果を向上させた分のインセンティブが得られるといった企業努力が報わ

れる法制度の整備も、今後、日本では必要となるだろう。

表3 Colmac Energyの収益試算

|               |                              |  |                    |
|---------------|------------------------------|--|--------------------|
| 年間発電量         | 375,000 MWh                  | 年間稼働日数                                   | 342 日              |
| ベース発電量        | 369,360 MWh                  | 年間処理量                                    | 419,760 t/年        |
| インセンティブ発電分    | 5,640 MWh                    | バイオマス                                    | 365,000 t/年        |
| 売電価格(ベース)     | 6.15 ¢ /kWh                  | PetCoke                                  | 54,750 t/年         |
| 売電価格(インセンティブ) | +2.80 ¢ /kWh                 | 年間燃料投入量                                  | 5,187,186,550 MJ/年 |
| 売電合計          | 23,220,420 \$/年<br>26.7 億円/年 | バイオマス発熱量                                 | 13 MJ/kg(仮)        |
| ベース発電分        | 22,715,640 \$/年<br>26.1 億円/年 | PetCoke発熱量                               | 33 MJ/kg(仮)        |
| インセンティブ発電分    | 504,780 \$/年<br>0.58 億円/年    | 発電熱量                                     | 1,349,985,000 MJ/年 |
|               |                              | 発電効率                                     | 26.0%              |
|               |                              | PetCokeの投入割合は、バイオマスの5%投入<br>115 円/\$とする。 |                    |

(出所：現地入手情報より算出)

#### (電力市場に応じた負荷調整運転)

米国ウィスコンシン州マニトワック市の公営発電所である Manitowoc Public Utilities(MPU)は、PetCoke(石油コークス)を主燃料とし、石炭と産業廃棄物のペーパーペレットを混焼した発電を行っている。発電規模は116MWで市内の電力を供給している。



写真：MPUの発電プラント  
(現地視察時に撮影)



写真：ペーパーペレット  
(現地視察時に撮影)

MPUでは、CFBの負荷追従特性を生かし、電力価格に応じた負荷調整運転を行っており、MISO(Midwest Independent System Operator)市場で電力を取引している。価格は5分間隔で変動するため、取引は、専任のトレーダーが監視している。MPUのCFBボイラは、最低40%の負荷で稼働することができ、電力価格が安価な時は、発電量を下げ、燃料価格との兼ね合いにより運転の調整を行っている。

CFBによる負荷追従運転を行っている事例は、石炭等の性状が安定した燃料を用いている場合が多い。日本で分別されている廃プラは、ある程度の熱量を保持し、かつ、性状もほぼ安定していると考えられ、前処理によって形状が均一にできれば、廃プラによる負荷調整運転は、実現の可能性が高いと考えられる。

#### (国内の導入状況)

日本のごみ処理では、三重県 RDF 発電所において一般廃棄物系の RDF の処理に CFB が適用されている。RDF は長距離輸送や貯蔵、臭気対策等のため、前処理段階で固形化されたものである。日本のごみ発電において、国の補助対

象となる RDF 発電は、発電効率が 23~28%<sup>5</sup>以上と高く設定されているが、RDF は、成形にコストやエネルギーがかかっている。他のごみ発電設備においても、高効率が求められてきているが、CFB 技術との原理的な性能の差は大きいだろう。

産業廃棄物処理では、近年、製紙工場やセメント工場等への導入が進んでいる。(株)サニックスエナジー(北海道)では、全国にあるプラスチック資源開発工場から収集したフラフ状の廃プラを燃料として CFB を稼働させ、平均 27%の高い発電効率を維持している。(株)サニックスエナジーで扱うフラフ状廃プラは、一般廃棄物処理施設である海外の Lomellina や Neumunster の RDF 性状に近いものと考えられる。

## 6. まとめ

ごみ発電は、化石燃料に依存せず、また、環境性に優れた分散型電源として利用価値が高い。ごみのもつエネルギーをより有効に利用するためには、ごみ発電をごみを燃料とした発電所と位置づけ、ごみの適正処理とサーマルリサイクルの両立かつ最大化することが重要な鍵となる。

現状のごみ処理方式は、ストーカー炉等、技術が既に確立されつつあるが、現状のごみ処理を取り巻く環境の変化に伴い、新しいコンセプトを持つ技術革新が必要であろう。燃料適合性、高効率発電および負荷調整能力に優れる CFB 技術は、現状のごみ焼却技術にとって、よりいっそうの効果的サーマルリサイクルに向けた革新的技術として位置づけることができる。

ごみ発電における負荷調整能力の活用については、海外でも行っている事例はないようだが、技術的には十分可能であり、経済的にもメリットがある。また、将来的には、リサイクルの促進等によるごみ量の減少といった変化にも、CFBの負荷調整運転によって柔軟に対応できるものと考えられる。CFBの適用にあたっては、前処理等の諸問題を解決し、安定的なごみ処理およびごみ発電を最大限に利用するための検討が必要である。

今後、焼却不適物(廃プラ、木屑等)の未利用ごみを始め、日本の一般ごみ全般に適用できる CFB 技術の導入は、エネルギーコスト問題や最終処分場の問題を解決するための有効な手法の1つとなるだろう。

<sup>5</sup> 平成 20 年度「廃棄物処理施設における温暖化対策事業」の対象となる要件。ガスリパワリング型廃棄物発電は 20%、その他の廃棄物発電は 15%以上。