環境にやさしいゴミの資源化

Environment-Friendly Refuse Recycling

小林 義雄

Yoshio Kobayashi

Keywords : Refuse recycling, Zero toxic emission, Hydrogen chloride removal, High efficiency electricity generation

1. はじめに

ゴミは社会の厄介物と言うのがこれまでの考え方であったが、ゴミの高カロリー化と地球温暖化問題、灰捨て場問題が深刻化する21世紀には、ゴミは捨てるものでなく有用な資源として取扱わざるを得なくなるだろう。小泉首相もかねてからそのような見解を述べておられる。それを可能にするのが21世紀のゴミ処理技術である。

真の循環型社会とは、循環のために大きな経済的負担を強いるものであってはならない。あくまでも合理的な循環でなければならない。化学工業では大量生産によって石油からプラスチック類を低コストで製造している。そのプラスチックゴミを人海戦術で細かく分別収集し化学原料にする方法では、コストが掛かるばかりで合理的な方法とは言えない。従って、可能な限り Reuse を進めた後は、環境にやさしい方法で焼却して高効率にエネルギーを回収し、燃え滓（灰）をセメント原料にするのが最も合理的な方法である。

以下にそれを具体化するための方法について述べる。

2. ゴミの発熱量とゴミ発電の推移

ゴミの発熱量はおおよそ1年に60kcal/kgの割合で増え続けている（図1）¹⁾。この調子でゆくと2010年頃にはおおよそ3400kcal/kgになることが予想され、乾物基準では石炭に近い発熱量となる。これは、日本全体では約1700万トン/年の石油に相当するエネルギー資源である。

発熱量の増加とともに、最近ではゴミ発電が増えつつある（図2）¹⁾。また、発電効率も表1²⁾から分かるように年を追って高くなってはいるが、最新ののもでも高々20%強で必ずしも高くはない。

その原因は、図3³⁾に示す様にHClによるボイラ

図1 清掃工場（東京都）搬入ゴミの低位発熱量の推移

表1 最近竣工したゴミ発電の発電効率

	竣工年度	ゴミの発熱量	発電機出力	発電効率
埼玉東部	1997年	3000kcal/kg	24000kw	20.5%
大阪八尾	1996年	3000kcal/kg	14500kw	16.6%
横浜鶴見	1995年	2500kcal/kg	22000kw	15.1%
東京都目黒	1992年	2800kcal/kg	11000kw	13.5%
東京都太田	1991年	3500kcal/kg	15000kw	14.7%

2002年3月11日受付
エンバイロテック研究所
(〒590-0423 大阪府熊取町自由が丘2丁目16-22)
TEL 0724-53-5579

<著者紹介>

1959年京都大学工学部燃料化学科卒業、1964年同大学院修士課程修了、1973年工学博士（京都大学）、日本カーバイド工業、三菱化工機、日立造船を経て1995年エンバイロテック研究所設立、1999年東京農工大学・福井大学客員教授。
専門：乾式排煙脱硫、ごみ処理、脱水汚泥メタン発酵などエネルギー・環境技術の開発。

図2 ゴミ発電容量の累計（1995年以降は予定）

図3 HCl（数100ppm）によるボイラ伝熱管腐食の概念図

伝熱管の高温腐蝕のためである。高温腐蝕のメカニズムについては諸説あり複雑であるが、 O_2 共存が高温腐蝕の条件であることから、鉄触媒を用いてHClを O_2 で酸化して Cl_2 を製造する方法として、古くから知られているDeacon Processの反応メカニズムを参考にして、次のように単純化して考えると分かりやすい。ボイラ伝熱管表面に生じた鉄錆（式（1））は 300°C 以上で式（2）の反応により $FeCl_3$ に変化するが、 $FeCl_3$ の沸点が 317°C であるために、生成した $FeCl_3$ は直ちに蒸発すると同時に式（1）、（2）の反応が起こる。 O_2 とHClが共存する 300°C 以上、とりわけ高効率火力発電で必要とされる $500\sim 600^\circ\text{C}$ の温度では式（2）の反応が盛んになり、式（1）、（2）の反応を繰り返しながらボイラ伝熱管が際限なく蒸発してゆく。と言うわけで、従来はボイラ伝熱管温度は 300°C 以下で設計されるのが普通であった。これが、ごみ焼却発電の効率を10%近辺に留めていた主要原因であったが、近年はボイラ伝熱管を消耗品と見なして、腐蝕が進めば取り替えると言う考え方で表1に

示す20%に近い効率が得られるようになってきた。

$FeCl_3$ 生成反応速度（＝腐蝕速度）を式（2）の反応式通り単純に考えると、式（3）のようにHCl濃度の3乗に比例することになるのでボイラ伝熱管の寿命に対する炉内のHCl濃度の影響が大変大きい。もし、式（3）が正しければ、炉内のHCl濃度を1/10にすればボイラ伝熱管の寿命は1000倍に延びる事になる。

3. ダイオキシン（以下DXNsと略記）の発生メカニズムと防除

現状のDXNs防除対策：①DXNsは有機化合物であるから高温の燃焼雰囲気中に長時間曝せば燃え尽きるに違いない②飛灰触媒によるDXNs合成温度領域（ $150\sim 300^\circ\text{C}$ ）での滞留時間を短くする。①②を組み合わせるとDXNs生成量を抑制する。

この考え方が原理的に間違っているわけではないが、実際問題として炉内が不均一であるためにDXNsおよび、その前駆物質が完全に燃え尽きることはないし、DXNsのDe Novo合成温度領域（ $150\sim 300^\circ\text{C}$ ）での滞留時間をゼロにすることも不可能である。その結果、現状の考え方では中途半端なDXNs対策になる。

もう一つのDXNs防除対策（炉内のHCl濃度低減法）：①炉内のHCl濃度を下げればDXNsは減る筈である。②飛灰（触媒）をDXNs合成温度領域（ $150\sim 300^\circ\text{C}$ ）に至る前の上流部で除去する。①②を併用すればDXNsは完全に防除出来る。

このHCl濃度低減法の有効性の根拠については、理論研究の結果 $[DXNs \propto (HCl \text{ 濃度})^{2.0\sim 3.0}]$ を廃棄物学会誌⁴⁾に発表し、DXNsの前駆物質であるクロルフェノールとHCl濃度の相関関係を実験的に明らかにした⁵⁾。また、企業の協力を得てゴミに理論量の3倍量のHCl吸収剤（石灰や重曹）を混入して実炉で焼却テストを行い、排ガス中のHCl濃度とDXNs濃度を測定して、 $[DXNs \propto (HCl \text{ 濃度})^{2.3}]$ の実験結果を得た（図4参照）。さらにトヨタ自動車は、自家用ボイラで塩素含有量の異なる燃料を焚いて発生したHCl濃度とDXNs濃度を測定して、 $[DXNs \propto (HCl \text{ 濃度})^{2.3\sim 3.0}]$ の実験結果を得た（図5参照⁶⁾）。かくして、DXNs発生量は炉内のHCl濃度の2～3乗に比

図4 炉内の HCl 濃度の影響 A

例することが理論研究と実験で明らかになった。

4. ゴミ焼却灰のセメント原料化

国内のセメント生産量は約7000万トン／年で推移すると考えられるが、セメント産業では現在、約2400万トン／年の産業廃棄物・副産物（鉄鋼スラグ：約1200万トン／年、石炭灰：約400万トン／年、副産石膏：約250万トン／年、非鉄金属精錬スラグ：約100万トン／年、ボタ：約100万トン／年など）をセメントの原料として使っている。これにゴミ焼却灰が新たに加わろうとしている。セメント品質および製造上好ましくない成分が限界値を超えるなどの問題が生じることから、セメント業界のゴミ焼却灰引き取り限度量は約300万トン／年（ゴミ焼却灰の約50％に相当、セメント生産量の約4％に相当）と考えられる。ゴミ焼却灰に含まれる主な汚染物質は、Pb、Zn、Cu、ダイオキシン、Clであるが、Pb、Zn、Cuはゴミ焼却灰の処理量がセメント生産量の4％程度ならば、全く問題にならない。DXNsは1450℃のキルンの中で燃え尽きる。問題なのはClである。Clはセメントの品質を悪くするためにゴミ焼却灰中のCl量を減らさなければならない。また、ゴミ焼却灰の内、飛灰は法律적으로는セメントキルンの中に入れることは出来なかったが、最近、法律が改正されてゴミ焼却飛灰をセメント原料にすることが

図5 炉内の HCl 濃度の影響 B

出来る様になった。

現在、(株)太平洋セメントの熊谷工場では、熊谷市のゴミ焼却灰の原料化をすでに実施している。また、(株)トクヤマと宇部興産(株)は共同でゴミ焼却灰のセメント原料化工場を建設中であり、2002年春の稼働を予定している。他のセメント各社も、早晚、セメント原料化事業を実施すると考えられている。

一方、NEDOの肝いりでゴミ焼却灰処理専用のセメント工場（エコセメントを生産）を(株)太平洋セメント、三井物産などが建設中であるが、予め焼却灰中のClを十分に除去出来ないため、また、製品セメントに対するゴミ・下水污泥焼却灰の投入量が多いためにセメント中の有害不純物（特にCl）が多く、エコセメントは特殊な用途にしか使えない。また、生産規模が小さい（10万トン／年）ためにコストが割高になる。

なお、セメント工場は北九州・山口地区に比較的偏在しており、ゴミ焼却灰の輸送コスト面で問題があるが、（ゴミ焼却灰の輸送限界距離は陸上輸送では200kmであるが、海上輸送では1000km以上）社会的な受け入れ態勢さえ整えば、海上輸送も可能になる。

ゴミ焼却灰の各種処分方法（①セメント原料化②エコセメント化③熔融スラグ化）を国民経済的な観点から評価すると、およそ次のようになる。

①セメント原料化では、ゴミ焼却灰中のCl除去操作以外にコストを掛けることなく、厄介もののゴミ焼却灰を付加価値のあるセメントに転換するのであるから、この方式が合理的で国民経済的に最も優れている。

②エコセメント化では、エコセメントが通常出回っているセメントに比べ、強度およびコンクリート内部の

図6 環境にやさしいゴミの資源化システム

鉄筋腐食の点で若干、問題があり、用途が限定される。更に、小規模生産（セメント業界における73基のキルンのセメント生産能力の平均値：130万トン／年に対して、エコセメント工場の生産能力：10万トン／年）であるために生産コストが割高となる。

③熔融スラグ化では、熔融炉（1300～1500℃）の規模は高々1～2万トン／年であるのに対して、セメントキルン（1450℃）の平均規模は130万トン／年である。この規模の違いは、処理コストに歴然とした差として表れる。その上、生成物である熔融スラグは依然として負の価値を持つ廃棄物扱いである。

5. 環境にやさしいゴミの資源化構想と解決すべき問題点

炉内のHCl濃度を下げることによる①発電効率の向上と②DXNsの抑制効果。また③ゴミ焼却灰のセメント原料化。この三つの要素を組み合わせることによって、環境にやさしいゴミ資源化が達成できる。これを具体化する方法として図6に示すシステムを考案した。ゴミは流動床式部分燃焼ガス化炉に導き約650℃でガス化する。

ゴミに含まれる有機塩素化合物の塩素分は650℃ではほぼ完全に分解してHClになる。また、炭素分は90%以上がガス化される（図7⁷⁾。このガス化炉

図7 熱分解温度と脱塩率率，チャー生成率

に天然ソーダ等のアルカリを添加して発生したHClを素早くNaClとして固定する。流動媒体は通常硅砂がよく用いられるが、硅砂の代わりに鉄鉱石粒を使うことによってアルカリとの反応による流動床の固結トラブルを回避し、且つ発生するH₂Sを除去することが出来る。熱分解ガスを高温集塵機に導き固形分（灰、燃え滓・チャー、劣化ソーダ、粉化鉄鉱石）とクリーン燃料ガスに分ける。固形分は水洗によりNaClを洗い流してセメントの原料とする。煤塵とHClを除去したクリーン燃料ガスはガス燃焼ボイラで焚いて高温高圧蒸気（550℃，25MPa）を得、高効率発電を行う。ガス燃焼ボイラではHCl濃度が低く（約10ppm）、且つ触媒となる煤塵が存在しないため

図8 環境にやさしいゴミ発電の熱収支

表2 環境にやさしいゴミの資源化とガス化熔融の比較

	ゴミの資源化	ガス化熔融
DXNs	なし	0.01ng/m ³
炉内 HCl 濃度	10ppm	300~700ppm
発電効率	30%以上	10~20%
灰処理	セメント原料	熔融スラグ
建設費	ストーカ炉並	ストーカ炉の1.2~1.5倍

に DXNs は全く発生しない (cf 微粉炭焚きボイラ排ガスでは通常 HCl が ~40ppm 含まれているが DXNs の発生はない)。また、ガス化炉では還元雰囲気、HCl 濃度が低く且つ炉内温度が DXNs の De Novo 合成温度領域 (150~300℃) から大きく離れているために、ガス化炉でも DXNs は発生しない。

図8に、低位発熱量: 2200kcal/kg、可燃分: 48.8%、水分: 42%、灰分: 9.2%の性状のゴミを処理したときの環境にやさしいゴミ発電の熱収支を示す。また、物質収支の概略は図6に示した。本システムでは発電効率に重点を置き、ガス燃焼ボイラの燃焼効率のよさを活かして排ガス中の O₂ 濃度を3%に絞り、蒸気温度を550℃とした結果、チャーへの持ち出し熱量が8.5%あるにもかかわらず、30.9%の発電効率となっている (cf 表1: 従来のゴミ発電効率は20%以下)。排ガス損失17.5%の内12%が厨芥の水分の蒸発潜熱と顕熱に起因するので、ゴミの低位発熱量が3400kcal/kgになれば水に起因する12%分が相対的に減り、発電効率は更に高くなる。

通常のストーカ炉に比べて排ガス量が50~60%であるために、燃焼工程が熱分解ガス化とガス燃焼の2

段階になっているにもかかわらず、設備建設費はほぼストーカ炉並に納まると思われる。

ガス化熔融法との比較を表2に示す。本構想は炉内の HCl 濃度を下げる事を軸にして組み立てられたものであり、それを実現するための方法として、これまでよく知られたユニットプロセスを巧みにシステム化したものである。したがって基本的には実現可能性は高いが、ガス化工程と集塵工程の繋ぎ部分には幾つかの不確定要素があり、今後の研究課題はこの部分にある。高温集塵機については、石炭ガス化発電技術の開発では400~500℃で1600時間の実績があると言われるが、タールなどの粘着性物質の発生のために高温集塵機が採用出来ない場合でも、タールなどの粘着性物質を除去する機能と伝熱をよくする機能を兼ね備えた流動床付きの熱回収伝熱管をガス化工程の出口に設けて出口のガス温度を200℃以下にまで下げればガス量も少なくなり、通常のバグフィルターでコンパクトに処理することも可能であるし、また HCl 除去は NaHCO₃ や Na₂CO₃ などの Na 系除去剤より安価で取り扱いやすい Ca(OH)₂ で処理することも可能になる。

6. まとめ

- ①ゴミ焼却の諸悪 (DXNs 発生、低発電効率) の根元は HCl である。その HCl を断つために、ゴミの熱分解ガス化工程で生成した HCl をアルカリ性物質で NaCl や CaCl₂ として固定し、次いで集塵機に導いてクリーン燃料ガスと固形分 (熱分解残滓、劣化アルカリ性物質) を得る。
- ②クリーン燃料ガスはガス燃焼ボイラで焚いて高効率

発電（30 % 以上）を行い、ダストは水洗により NaCl や CaCl_2 を除去してセメント原料とし、ゴミの完全資源化を達成する。

③ DXNs の完全ゼロエミッション（微粉炭炊きボイラ排煙よりもクリーン）を達成する。

④ 建設費はストーカ炉並である。

⑤ 本構想の実用化のための研究課題はガス化工程と集塵工程の繋ぎ部分の技術開発であるが、基本的にはガス化工程と集塵工程の間に流動床を組み込んだ熱回収工程を設け、集塵工程の温度を下げることによってこの研究課題は解決できる。

⑥ 有害物質ゼロエミッション度、資源化、経済性の点で、ガス化熔融法よりもはるかに優れている。

〔謝辞〕本解説文は（社）大阪工業会エコテクノサロン（2001 年 9 月 25 日）での講演要旨に加筆したものであり、その内容は東京農工大学客員教授（1999 年 4 月～2001 年 3 月）としての仕事を纏めたものである。本研究遂行に当たり研究費を提供して下さいった（株）トクヤマに、また東京農工大学での研究に多大な便宜を図って下さった東京農工大学堀尾正靱教授と（社）大阪工業会での講演に推挙して下さいった大阪府立大学宮南啓名誉教授に厚くお礼を申し上げます。

引用文献

- 1) 鍋島淑郎, 森棟隆昭: テクノライフ選書「ゴミから電気をつくる」, オーム社 (1999)
- 2) 田中 勝, 他: “廃棄物学概論”, 丸善出版 (1998)
- 3) 久保田宏: “廃棄物工学”, 培風館 (1996)
- 4) 小林義雄: “ごみ焼却における HCl 除去とダイオキシン排出量の抑制” 廃棄物学会誌, **10**, 86～98 (1999)
- 5) 小野あゆみ, 小林義雄, 堀尾正靱: “ダイオキシン類の生成反応における HCl 濃度の影響” 第 11 回廃棄物学会研究発表会講演論文集, C4-5 (2000)
- 6) 近藤元博, 浜井満彦, 山口正隆, 他: “廃棄物固形燃料の内部循環型流動層燃焼におけるダイオキシン類の排出特性” 化学工学論文集, **25**, 921-927 (1999)
- 7) 保田静生, 堀添浩俊, 佐藤 淳: “熱分解ガス化熔融ごみ処理システムの開発” 第 11 回廃棄物学会研究発表会講演論文集, C12-5 (2000)