

廃プラスチックのガス化リサイクルとその評価

行本正雄, 中島江梨香*, 村澤佑樹*

Evaluation for Gasification Recycling Processes of Waste Plastics

Masao Yukumoto, Erika Nakashima* and Yuuki Murasawa*

Abstract: Recently the process of gasification has received much attention as a major chemical recycling process of waste plastics. This report evaluates the environmental effects of reproduction processes for packaging plastics by stages of transportation and recycling processes. The following four disposal processes were applied to the research: landfill, incineration, energy recovery, and gasification. It takes into account an inventory analysis for the functional unit of waste of 1kg/Mcal on the emissions to air (CO₂, NO_x, SO_x), and solid waste emission. The conclusion is that the EUP process that processed packaging plastics that collected separately from others is the best for the environment. As for the container packaging plastics processing, it has been understood that doing the mixture processing becomes advantageous from single processing on the cost side.

Keywords : *Packaging plastics, Recycle ,CO₂, NO_x, SO_x*

1. はじめに

近年, 最終処分場, 資源の枯渇, 有害物質の発生などの観点から循環型社会の構築が叫ばれるようになった. そのためには, 国民の意識改革やリサイクル技術の向上が必要であるが, まずは, 循環型社会の構築に向けた法律による規制が, 最も効果的である. 過去 10 年間で我が国においても, リサイクルに関する法規制がかなり整備されてきた.

我が国のリサイクル法は, 1995 年に公布され, 1997 年 4 月から施行された容器包装リサイクル法から始まった. つづいて, 1998 年には家電リサイクル法が公布された. このように容器包装と家電からリサイクル法が始まったのは, 家庭から排出される一般廃棄物では, 容器包装廃棄物と使用済み家電製品の割合が高かったことや, 欧州においてもこれらの品目に対する規制の実施や規制案の検討が早かったことなどが上げられる.

その後 2000 年には, 容器包装リサイクル法が全面施行されたことをはじめ, 循環型社会形成推進基本法, 建設リサイクル法, 食品リサイクル法, グリーン購入法が公布され, 再生資源利用促進法が, 資源有効利用促進法に改正された.

2005 年 1 月より自動車リサイクル法が施行され, 一般廃棄物, 産業廃棄物を含め, リサイクルに関する法律はほぼ整った. 10 年を経て, いくつかのリサイクル法改正では, さらに質的な向上やリサイクルコストの負担の適切性などが議論されている^{1), 2)}.

* 工学研究科機械工学専攻

中でも、容器包装リサイクル法における廃プラスチックのリサイクルは 2000 年 4 月よりペットボトルに加え、その他プラスチックもリサイクル対象となり普及が進んだ。容器包装プラスチックの再製品化手法として材料リサイクルとケミカルリサイクルが認められている。ガス化は既存設備を活用して化学原料を製造でき、残渣がゼロで埋め立て処分が必要ないのでケミカルリサイクルの一つとして注目されている。一方、現在一部の自治体では、分別回収していないので一般廃棄物中の容器包装プラスチックは焼却し、熱利用している。本報告では、ガス化リサイクル技術について論じ、次に 2 つのガス化、焼却、焼却発電、埋め立ての 5 つのシナリオを設定し、ライフサイクル解析の計算結果は廃棄物 1 Mcal 当たりの CO₂、NO_x、SO_x と固形廃棄物の環境負荷を求めた。経済性についてはガス化プロセスにおける産業廃棄物と廃プラスチックの混合処理を検討した。

2. ガス化リサイクルの特徴

容器包装プラスチックのガス化技術開発は、1998 年からプラスチック処理促進協会、荏原製作所、宇部興産の共同研究にて NEDO（新エネルギー産業技術総合開発機構）からの委託研究でスタートした。荏原と宇部の合併会社である EUP（エバラウベプロセス）によって開発され、2001 年から運転が開始された。EUP で採用された加圧二段ガス式システムは、宇部興産の石炭ガス化法の一つであるテキサコ法と荏原製作所の流動床炉の技術を組み合わせたもので、家庭から排出されるあらゆるプラスチック類を材質別に分別することなく処理できる点が大きな特徴である。昭和電工は 2003 年に EUP から技術導入し、川崎に処理能力 195 t/日の廃プラスチックガス化処理プラントを建設し運転をしている。

図 1 に示す EUP プロセスは前処理工程、低温ガス化工程、高温ガス化工程、スラグ回収・排水処理工程、ガス冷却・圧縮工程から構成される³⁾。前処理工程で廃プラスチックは細かく破碎され、金属等を除去した後に筒状の固体原料に成形された。低温ガス化炉は内部循環流動床炉で、加圧下（0.8～1.2 MPa）600℃～800℃で炉底から水蒸気と酸素を供給しながら廃プラスチックを熱分解し、水素、一酸化炭素、二酸化炭素、炭化水素ガス、タール、チャーへ転換している。原料に含まれる不燃物はけい砂と共に抜き出され、金属等を除去した後に再び低温ガス化炉に循環される。高温ガス化炉は巡回熔融型反応器で、上部のガス化室と下部の冷却部から成り、ガス化剤として水蒸気と酸素を吹き込みながら、圧力（0.8～1.2 MPa）温度 1400℃～1500℃で運転される。2つの炉では、ガス化剤として水蒸気と酸素が使用されており、原料の一部を燃焼させることによりガス化反応に必要なエネルギーを供給している。生成ガス中の水素、一酸化炭素、二酸化炭素の濃度は、それぞれ 40～45 vol%，30～35 vol%，20～25 vol%で、アンモニアを含む水で 200℃以下まで急速冷却され、洗浄、CO 転化、脱硫設備を経て、既存のアンモニア製造設備に原料として送られる。

一方、JFE エンジニアリング（旧川崎製鉄）は NEDO の支援を得て、処理能力 300t/日炉を千葉製鉄所構内に建設した。2000 年 4 月より産業廃棄物を受託処理して燃料ガスを製造し、JFE スチール東日本製鉄所千葉地区の発電燃料等に利用する廃棄物燃料製造事業を開始した。2001 年 4 月からは容器包装リサイクル法でのその他プラスチック再商品化事業（ガス化認定）に参入した。図 2 に示すサーモセレクトプロセスではごみを圧縮して 600℃で間接加熱し、熔融炉下部へ純酸素を吹き込んで熔融物と合成ガスに分離する^{2), 4)}。熱分解ガスは 1200℃でガス改質し、酸・アルカリ水で洗浄後精製合成ガスとして回収する。有害物を再利用副産物に転換し、飛灰を出さない。ガス冷却は急冷式でダイオキシンの再合成を防止する。ごみの事前破碎は不要で、回収された燃料ガス（精製合成ガス）は水素、一酸化炭素を主体とし、施設のある製鉄所内の製鉄所副生ガス配管に導かれ、最終的に製鉄所内の発電設備等で工業用燃料として利用されている。スラグは炉盤材、インターロッキングブロックなどに、金属は銅精錬原料として有効利用されている。

3. ライフサイクル解析

3.1. 計算条件

2つのガス化再商品化施設のある千葉県と川崎市の間にあり, 東京都大田区をモデル地区に設定した. 例えば, 大田区の人口は約6万8千人(2006年)であるので, わが国の一人当たりの平均的な一般廃棄物の排出量1.1kgを用いて, 一日の廃棄物排出量を計算すると768.4tとなった. ごみ質は, 70%を可燃ごみ, 15%を不燃ごみ, 20%を容器包装プラスチックとした. 分別回収された容器包装プラスチックは99.2%がペール化され圧縮される⁵⁾. 建設廃棄物は千葉県北部から回収され, 千葉県産業廃棄物業者によって分別され, その残渣がサーモセレクト炉に投入されている. 表1に計算に用いた5種類のごみの排出量, 低位発熱量, 炭素含有量, 灰分を示す^{6), 7)}.

図3に5つのシナリオにおけるごみの処理工場, 副産物, 残渣, 灰の輸送場所と距離を示す. ガス化処理により発生する固形廃棄物の中のスラグは埼玉県のリサイクル業者に輸送され, 路盤材やインターロッキングブロックに再生加工される. 鉄は電炉メーカ原料, 銅合金は銅精錬工場の原料としてリサイクルされている. その他の固形廃棄物は全て非鉄精錬工場で亜鉛, 鉛の原料となっている. 処理中に発生するエネルギーは電気, 工場の燃料代替, 化学原料に利用されている. 具体的には, サーモセレクト炉から発生する精製合成ガスは隣接する製鉄所に販売され, 天然ガス代替として利用され, EUP炉から発生する合成ガスは同じ敷地内のアンモニア工場で水素原料として利用されており, 二酸化炭素も炭酸製造の原料となっており, 排気ガスは発生しないとした. 焼却・焼却発電で発生する焼却灰は全て埋め立て処分されると仮定した.

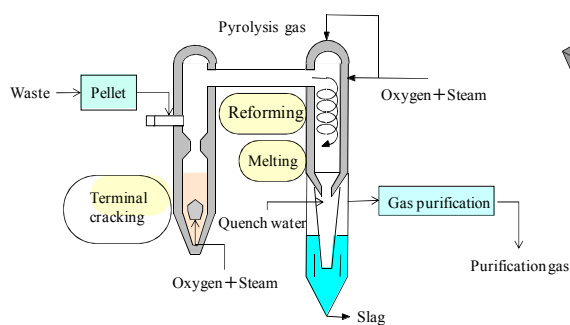


Figure1. EUP process

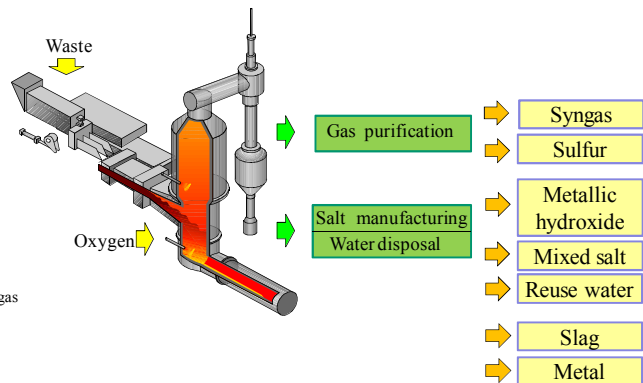


Figure2. Thermoselect process

Table1. Setting condition of garbage

Variety	Disposed packed plastic	Industrial wastes	Blend garbage	Burnable garbage	Unburnable garbage
Throughput	135t/day	151.2t/day	300t/day	420t/day	112t/day
Calorific value	8000 kcal/t	2400 kcal/t	4920 kcal/t	2400 kcal/t	4000 kcal/t
Carbon content	70%	30%	48%	42%	
Ash content	5%	15%	8%	14%	-

廃プラスチックのガス化リサイクルとその評価

焼却発電では、焼却炉で発生した熱の一部を発電に利用し、自家消費、電力会社への余剰電力販売を行っている。表 2 に使用燃料、副産物、排気ガスの環境負荷（CO₂、NO_x、SO_x）を示す。

表 3 に各処理プロセスの計算条件を示す。サーモセレクト炉では酸素製造を含む電力 330kWh/t、LNG 70m³/t を使用し、ガス化効率 74% とし、投入原料の熱量の 74% を天然ガス代替として、LNG 84t/day を製造する⁸⁾。EUP 炉では、全電力 530kWh/t、内 RDF 化には 134kWh/t を使用し、LNG 0.0089m³/t と蒸気 9560kg/t を使用した⁷⁾。合成ガス 1m³ あたり 0.335kg のアンモニアが製造されるので、アンモニアは 119t/day を製造する⁵⁾。ガス化の電力は酸素製造を含む。焼却では電力 32kWh/t、重油 0.174L/t を使用し、発電量は 1.2MW とした。最後に埋め立ては電力 30.7kWh/t、軽油 0.62L/t、重油 2.4L/t を使用した⁹⁾。分別されたプラスチックのペール化には、電力 89.4kWh/t と軽油 2.58L/t を使用した¹⁰⁾。埋め立てのための不燃物の分別は電力 56.8kWh/t と軽油 0.71L/t を使用する。

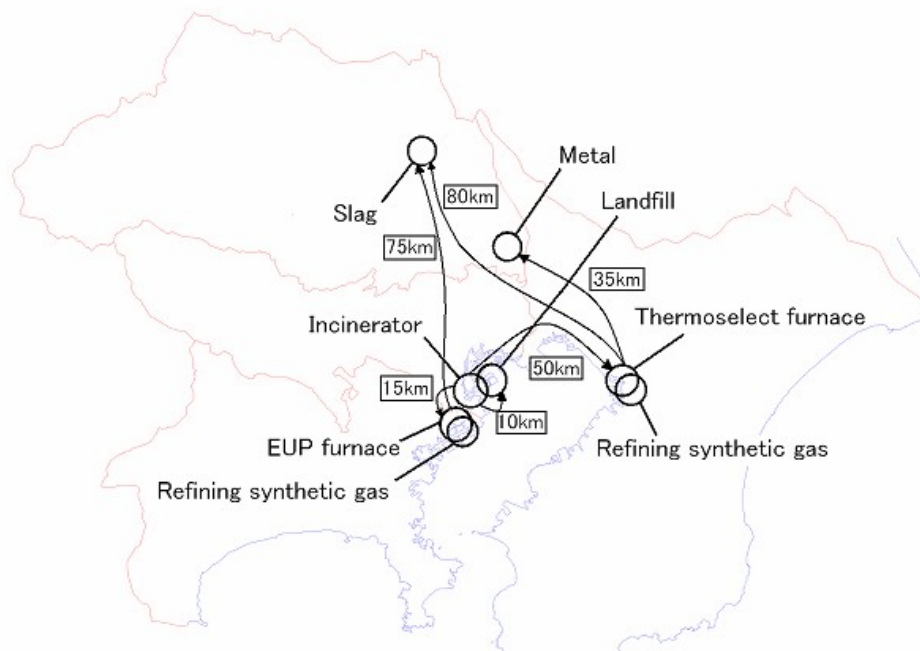


Figure3. Transportation route map

Table2. Impact assessment by the exhaust gas

	Unit	CO ₂ (kg)	NO _x (g)	SO _x (g)
Power	kWh	0.096	0.290	0.233
Light fuel oil	L	0.800	3.100	1.600
Heavy fuel oil	L	0.800	2.500	2.400
LNG (before combustion)	m ³	0.677	1.216	0.000
LNG (after combustion)	m ³	1.012	0.732	0.000
LNG (after combustion)	kg	0.749	0.549	0.000
Steam	kg	0.065	0.0003	0.0002
Ammonia	m ³	0.461	0.208	0.154
Exhaust emission	kg	0.486	1.15	0.69

Table3. Setting condition of processing

Treatment process	Thermoselect	EUP	Incineration	Landfill
Power	330 kWh/t	530 kWh/t	32 kWh/t	30.7 kWh/t
Light fuel oil				0.62L/t
Heavy fuel oil			0.174 L/t	2.4 L/t
LNG	70 m ³ /t	0.0089 m ³ /t		
Steam		9560 kg/t		
Yield of gas	74%		-	
Electricity generated			288MWh/day	
LNG(output)	84.0t/day			
Ammonia(output)		119 t/day		
exhaust gas			6761 t/day	
landfill disposal			58.8t/day	89.6t/day

3.2. 5つのシナリオと処理フロー

本論文では5つのシナリオを提案し,それぞれのマテリアルフローを図4に示す.

[Scenario 1] The Thermoselect process

大田区第一清掃工場内でペール化された容器包装プラスチックは千葉市に運ばれ,開梱後,千葉県内で回収された建設廃棄物とピット内で混合される.投入された混合ごみは炉内でガス化され,急冷後精製される.精製合成ガスは隣接する製鉄所の燃料として販売される.精製合成ガスの発熱量からLNG代替燃料として計算した.ゴミの熔融後,スラグ,メタルは分離し,回収されたスラグメタルはリサイクル工場に運ばれる.

[Scenario 2] The EUP process

大田区第一清掃工場内でペール化された容器包装プラは川崎市に運ばれ,ペレットを製造後,EUP 炉に投入され,ガス化される.精製合成ガスは敷地内のアンモニア製造工場に送られる.アンモニア製造後に残る二酸化炭素は炭酸製造に使用する.熔融スラグは回収され,リサイクル工場に運ばれる.

[Scenario 3] Incineration

大田区内で回収された燃えるごみは焼却され,焼却後の灰は埋め立て処分場へ運ばれる.

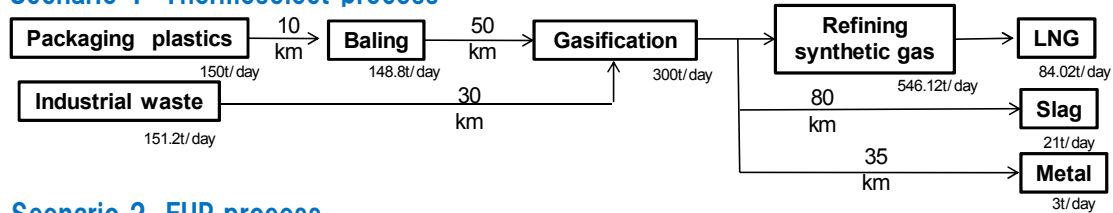
[Scenario 4] Incineration & power generation

大田区内で回収された燃えるごみは焼却・発電され,灰は埋立て処分場に運ばれる.

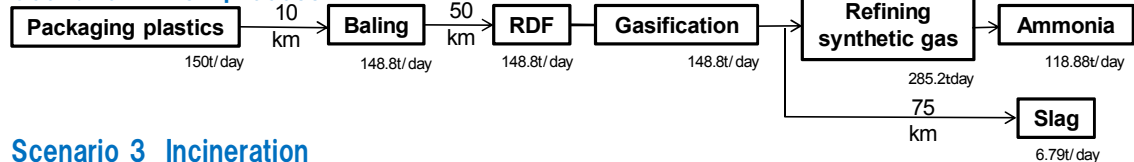
[Scenario 5] Landfill

大田区内で回収された不燃物ごみは京浜島プラントにて分別され,鉄,アルミ,ガラスはリサイクルされ,残渣は埋め立て処分場に運ばれる.

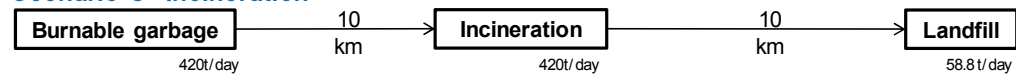
Scenario 1 Thermoselect process



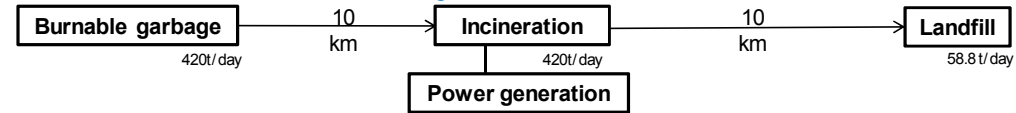
Scenario 2 EUP process



Scenario 3 Incineration



Scenario 4 Incineration + Power generation



Scenario 5 Landfill

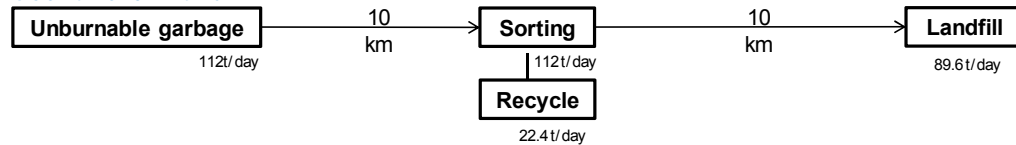


Figure4. Material balance of five scenarios

3.3. 計算結果

上記計算条件に基づきライフサイクルの計算を行い、ごみの熱量 1Mcal 当たりの CO_2 , NO_x , SO_x の全排出量を図 5 に示した。図中に示した CO_2 排出量, NO_x 排出量, SO_x 排出量とも、焼却と焼却発電はガス化、埋め立て処理に比べ全排出量が大幅に多い。

図 6 に示した個別プロセスでは、輸送、処理の排出量は焼却、埋め立てに比べ、ガス化が多い。焼却は排ガス負荷が多く、ガス化は精製合成ガスの副産物ができるため排出量はマイナスとなる。従って焼却、焼却発電、埋め立て、サーモセレクトガス化、EUP ガス化の順に全排出量が多く、ガス化は排出量がマイナスとなる。表 4 に示す固形廃棄物は埋め立て、焼却、ガス化の順に多く、ガス化は 2 つともゼロである。

図 6 ではバール化、輸送、埋め立て処理の環境負荷は少なく、ガス化の処理の環境負荷が大きい。ガス化において酸素、補助燃料の使用が大きく影響している。焼却発電で得られる電力が小さいため、焼却と焼却発電の排出量の差は小さい。

表 4 には固形廃棄物の残渣を比較した。2 つのガス化は残渣がゼロで、埋め立て処分の必要がいらな

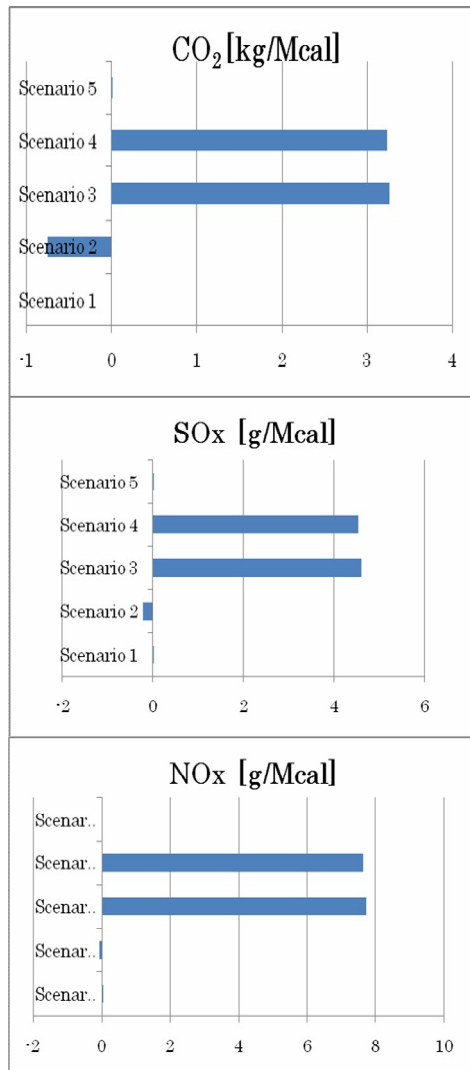


Figure5. Amount of total exhaust gas

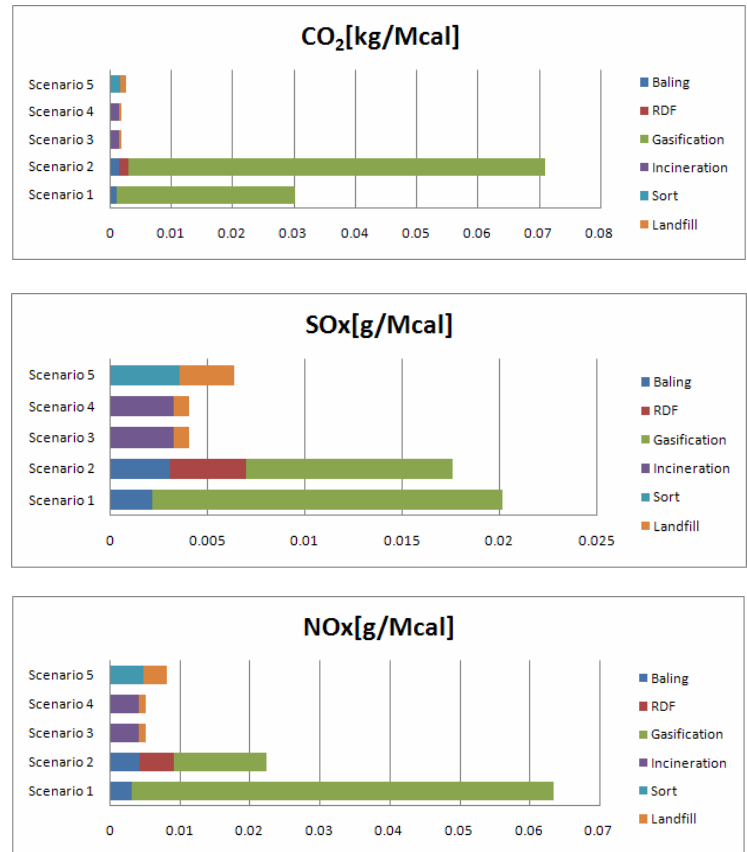


Figure6. Amount of exhaust gas in treatment process

Table4. Solid waste

		Thermoselect	EUP	Incineration	Landfill
Solid waste	t/day	0	0	58.5	89.6

4. 経済性

事業収支シュミレーションプログラム（IRR=10%）を用いた容器包装プラスチックと産業廃棄物処理費の関係を図 7 に示す¹¹⁾。混合比は 50%と仮定した。ガス化炉の処理規模を日量 100 トン、設備費を 80 億円、運転維持費は設備費の 7%とし、減価償却は 20 年とした。産業廃棄物処理費が高くなると、容器包装プラスチック処理費が安くなる。容器包装プラスチック処理は混合処理した方が単独処理より費用面では有利になることがわかり、産業廃棄物処理費を 2.5～3.5 万円/トンと仮定すると、容器包装プラスチック処理費は 6～8 万円/トンと算定され、ガス化リサイクルの再商品化コストは大幅に削減できる事がわかった。

5. 結論

容器包装リサイクル法のガス化リサイクルに関して EUP プロセスとサーモセレクトプロセスの特徴を紹介した。この 2つのガス化と焼却、焼却発電、埋立て処理の環境負荷を計算した。計算の結果、焼却、焼却発電の処理では排ガスの環境負荷量が多く、輸送や処理プロセスの負荷量の削減効果はない。一方ガス化、特にアンモニア製造の副産物の排出量削減効果が大きい。埋め立て処理では固形廃棄物量が多く、ガス化はゼロであった。従って分別回収した容器包装プラスチックを EUP プロセスで処理するシナリオ 2 が最も環境に優しいと結論が得られた。

処理費用の削減が期待される産業廃棄物との混合処理を検討し、経済性評価を事業収支シミュレーションにより計算した。50%の混合処理で、再商品化コストが大幅に削減できる可能性がある。

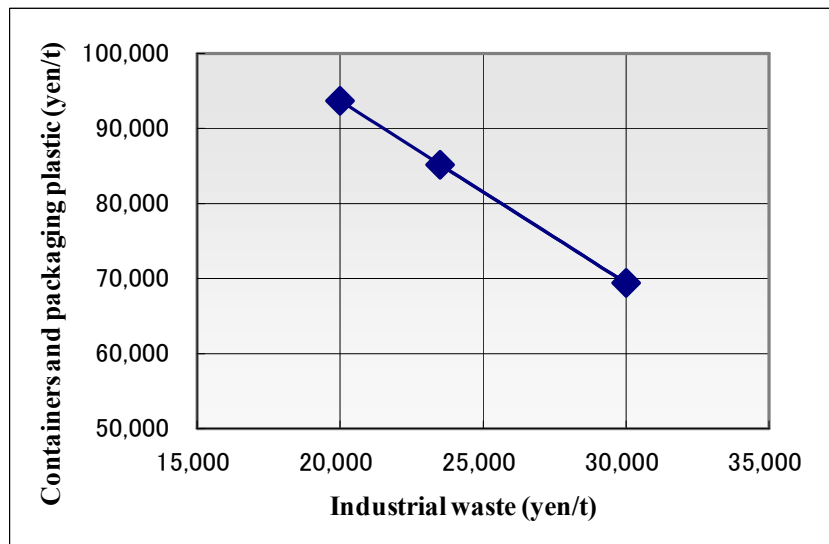


Figure7. Calculation result of cost for disposed package plastic

謝辞

本研究は中部大学平成 20 年度, 21 年度の総合工学研究所の援助と日比研究財団寄付金を受け遂行されたものであり, ここに謝意を表します.

参考文献

- 1) 行本正雄: プラスチックリサイクル技術の動向, 第 105 回講演会 ここまできたプラスチックリサイクル技術, 社団法人 プラスチック成型加工学会, 6-7(2008)
- 2) 行本正雄, 西哲生, 立田真文: シリーズ 21 世紀のエネルギー6 ごみゼロ社会は実現できるか, 株式会社コロナ社, 6,79(2006)
- 3) 亀田修: 廃プラスチックの加圧二段ガス化技術, プラスチックの化学再資源化技術, 142-148(2005)
- 4) 行本正雄, 丸島弘也: 廃棄物ガス化熔融炉と新しい発電技術, プラスチックの化学再資源化技術, 161-167(2005)
- 5) 財団法人 日本容器包装リサイクル協会: プラスチック製容器包装再商品化手法に関する環境負荷等の検討, 27(2007)
- 6) 志垣政信: 絵とき廃棄物の焼却技術, 株式会社オーム社, 21,25(1998)
- 7) 株式会社 三菱総合研究所: 廃棄物処理・リサイクルプロセスに係るライフサイクルイベントリーダーの調査業務(Ⅱ) 報告書, 2-23,2-26,3-8(2002)
- 8) Masao Yukumoto, Misao Murakami: LCI Analysis for Treatment Processes of Disposed Office Appliances, Eco-Design IEEE conference proceeing, 542-545(2001)
- 9) 社団法人 プラスチック処理促進協会: プラスチック廃棄物の処理・処分に関する LCA 調査研究報告書, 83,87(2001)
- 10) 社団法人 プラスチック処理促進委員会: プラスチック製容器包装の処理に関するエコ効率分析, 58(2005)
- 11) 行本正雄, 坂本健太郎, 遠藤小太郎, 武田邦彦: 容リプラのガス化再商品化事業の経済性, 環境性評価, 第 15 回日本エネルギー学会大会講演要旨集, 371-372(2006)