

〈論文〉

自動車シュレダーダストの熱分解(乾留)リサイクルプロセスにおける LCA 評価

雨宮 隆¹⁾, 松橋 隆治²⁾, 吉田 好邦²⁾

株式会社 東芝 水・環境システム事業部 環境システム技術部¹⁾

(〒105-8001 東京都港区芝浦 1-1-1, E-mail:takashi2.amemiya@toshiba.co.jp)

東京大学大学院 新領域創成科学研究科 環境システム学専攻²⁾

(〒277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5, E-mail:matu@k.u-tokyo.ac.jp, y-yoshida@k.u-tokyo.ac.jp)

概要

熱分解(乾留)ガス化方式を用いた、自動車シュレダーダスト(ASR)のリサイクルプロセスを対象に、商用プラント運転データに基づくライフサイクルインベントリ分析を行い、ASR の処理に伴い発生する環境負荷として、直接および間接的な生産波及による効果を含めた CO₂ 排出量とエネルギー消費量を算定した。この結果、本プロセスから得られる主要な生産物(ガスエネルギー、鉄、銅、アルミ、炭化物)のリサイクルによって市場製品の一部を代替することで、間接的な環境負荷に関し大きな削減効果が得られることを明らかにした。

キーワード: シュレダーダスト, ASR, 熱分解, 乾留, LCA

1.はじめに

自動車シュレダーダスト(Automobile Shredder Residue;以下 ASR と称す)とは、使用済み自動車から油脂液類や有価部品を取り除いた廃車ボディを大型破砕機により破砕処理し、鉄スクラップや非鉄金属を回収したのち、軽量物として回収される破砕屑のことであり、国内の年間発生量は約 60 万トンと報告されている。ASR は、プラスチック、木質、繊維、ゴム、ガラス、配線片、電装基板、金属小片などの混合物であり、概略的に言えば ASR 重量の 2/3 程度が可燃分、残りが灰分で、高位発熱量は 15~20MJ/kg 程度である。ASR に含まれる有機物の大半は PP、ABS、PS、PVC そのほか、多種のプラスチック成分から成る。Fig.1 に ASR の外観写真を示す。



Fig.1 Automobile Shredder Residue (ASR)

かつて ASR の大半はリサイクルされることなく埋立て処分されていたが、2002 年 7 月に制定された使用済み自動車の再資源化等に関する法律(自動車リサイクル法)により、ASR の引き取りと一定の目標のもとでのリサイクル義務を自動車メーカーが負い、その費用を自動車ユーザが負担することが制度化されたことで、ASR のリサイクルと

適正処理のための費用が保証されることになった。

このような背景のもとで、近年各種の ASR 処理・リサイクル手法の開発と実用化が進んだが、本稿で取り上げる熱分解(乾留)ガス化によるリサイクルプロセスもそのひとつであり、2000 年度から 2005 年度にわたり、NEDO プロジェクト「先進型廃棄物発電フィールドテスト事業」の一環として商用プラントを用いた開発研究が行なわれた。この技術については、これまで無害化性能やリサイクル性能を中心とするフィールドテスト結果が報告されている。^{1),2)}

一方、現在の地球温暖化問題への対応として、わが国の経済活動の各分野において広く温室効果ガスの削減対策が求められている。上述のような ASR 処理・リサイクル手法の選定に際して、ASR からの回収資源やエネルギーの利用に伴う、直接および間接的な生産波及まで含めた社会的な環境負荷量(とくに CO₂ 排出量およびエネルギー消費量、あるいはこれらの削減量)を算定し、環境負荷へ与える要因を評価しておくことは重要な課題であり、その評価方法としてはライフサイクルアセスメント(以下 LCA)手法が有効である。

ASR 処理の LCA に関しては、埋立て処分や従来型のエネルギー回収システムに関する研究例^{3),4)}があるが、ASR リサイクルから得られる金属などの回収資源が、間接的にもたらす環境負荷の低減効果まで含めて評価した報告はほとんどない。

本稿では、商用プラントの運転実績を踏まえて、ASR の熱分解(乾留)ガス化によるリサイクルプロセスを対象としたライフサイクルインベントリ分析を行い、直接的・間接的な CO₂ 排出量とエネルギー消費量を総合的に算定する。これにより、これらの環境負荷(増加および削減の両面がある)に与える影響の大きい要因を明らかにする。

なお、先進型廃棄物発電フィールドテスト(FT)事業の対象となった商用プラント(以下「FT 事業プラント」と称す)では、立地上の制約等から回収資源のリサイクル利用が限られる部分があったが、3章以下の LCA 評価では、本来この熱分解ガス化プロセスにおいて実現可能な回収資源のリサイクル利用が実施されることを前提としている。

2. 熱分解(乾留)ガス化プロセスの概要

2.1 システム構成

Table1 に、熱分解(乾留)ガス化によるリサイクルプロセスを用いた FT 事業プラントの設備仕様を示す。Fig.2 はそのシステムフロー図である。フロー図に沿いシステム構成を説明する。

Table1 Specification of ASR Recycling Plant with Pyrolysis Gasification Process

処理容量	60t/日 (ASR受入量)	
機器方式 及び定格	ASR破碎	回転ハンマ型 (2.5t/h)
	熱分解	回転キルン方式(間接加熱) (550℃)
	ガス改質	空気高温改質 (1100℃)
	ガス冷却	蒸気ボイラ (1.0MPa)
	ガス洗浄	バクフィルタ+湿式スクラバ
発電	ガスエンジン発電 (300kW×2)	

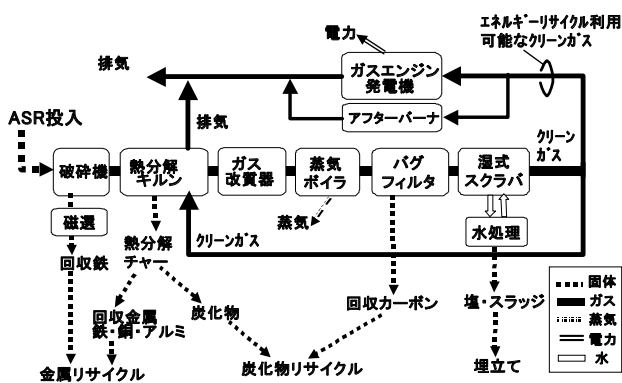


Fig.2 System Flow Diagram



Fig.3 Pyrolysis Kiln

ASR は本システムに搬入後、破碎機により細破碎され、磁力選別機にて鉄類が回収される。ASR 中には鉄材(上流のシュレダー工程の選別残余分)が普通 10%程度以上含まれているが、磁力選別機にて容易に分離回収できる。破碎された ASR は次に間接加熱式の熱分解キルンに投入され、ここで空気を絶った状態で、500~600℃の温度で間接的に加熱することにより熱分解(乾留)ガス化

が行なわれる。この段階では ASR 中のプラスチックや繊維などの高分子構造の有機物が分解し、炭化水素分子となってガス化する。一方脱ガスした後の固体カーボンや無機成分、金属などの不燃物は乾留残渣として残る。これが熱分解チャーである。熱分解キルンの加熱用燃料としては、最終的に生成された燃料ガス(クリーンガス)の一部を用いた。Fig.3 に熱分解キルン外観を示す。

熱分解ガスは次に約 1100℃に保たれたガス改質器に入り、分子構造の大きな有機化合物から水素と一酸化炭素を主成分とする改質ガスに変換される。ガス改質器内では熱分解ガスと空気の部分酸化反応により反応熱を供給する。この高温のもとで、ダイオキシン類などの有害化学成分も分解される。ガス改質器を出たガスは、熱交換器(蒸気ボイラ)で急冷されることによりダイオキシン類の再合成を防止する。この時発生した蒸気は系統内の機器の加熱源とし、余剰分は凝縮循環される。改質ガスは次にバクフィルタに導かれて、ガス中に浮遊するカーボンが回収される。さらに改質ガスは湿式スクラバで洗浄されて塩成分や有害微量成分が除去された状態でクリーンガスとして取り出される。

ガスの洗浄に用いたプロセス処理水は、中和、沈殿、浮上処理、MF 膜ろ過の処理により重金属、ダストなどの微粒子を除いた後に、逆浸透膜を通して塩分を濃縮・分離した上で循環利用される。濃縮された塩分は乾燥工程を経て固形塩として排出される。

生成されるクリーンガスは 1,200kcal/m³N 程度の安定した熱量を持ち、水素、一酸化炭素といった軽量の可燃ガス組成からなる。クリーンガス生成量のうち約 3 割が熱分解キルン加熱用燃料として使われるが、残りのクリーンガスは発電や熱供給、工業用向けのガス燃料として外部でのエネルギーリサイクル利用が可能である。なお FT 事業プラントにおいては、Fig.2 のシステムフローに示すように、エネルギーリサイクル利用可能なガスの一部で発電をおこない、電力を所内負荷に供給する構成とした。プラントの立地制約でガスの外部供給ができないため、余剰分のクリーンガスはアフターバーナで燃焼後放出とした。

2.2 ASR および生産物の成分組成

本システムの運転データについては、NEDO プロジェクト「先進型廃棄物発電フィールドテスト事業」期間中の各年度毎の成果報告書の中で報告されている。以下で示す投入 ASR および各種生産物の主要成分の組成データは、平成 16 年度報告書⁵⁾の記載値を用い、一部の灰分中の金属成分値は実際の分析記録から補足した。

Table2 に ASR の成分組成を示す。ここでは磁選機で鉄片類を除いたのち熱分解プロセスへ投入する段階の代表的な成分・組成を示した。本システムへの ASR の供給元(上流シュレダー工場)は 1 箇所のみで、常に同じシュレダーマシンからの排出軽量物を ASR として受け入れたため、ASR の性状は比較的安定していた。

Table2 Properties of Input ASR

発熱量・成分分析			組成分析(無水)		
高位発熱量	kcal/kg	4194	ウレタン・スポンジ	14.6%	
水分	wt%	5.0%	プラスチック	13.1%	
可燃分の化学組成	wt%	炭素(C)	38.9%	PVC	10.7%
		水素(H)	5.0%	紙・(布)・木	7.3%
		窒素(N)	1.7%	ゴム	4.0%
		酸素(O)	17.8%	金属	15.6%
		硫黄(S)	0.2%	ガラス	0.1%
		塩素(Cl)	1.2%	繊維	17.0%
		その他	0.1%	土砂	14.0%
灰分中の主な成分	wt%	Fe	2.0%	その他	3.6%
		Al	4.3%		
		Cu	10.6%		
		Pb	0.2%		
		Zn	0.7%		
		Ca	2.1%		
		Si	2.5%		
		その他	7.6%		

Table3 に本システムで回収された熱分解チャーとバグフィルタカーボンの発生量および代表組成を示す。炭素(C)成分が約80%と高く瀝青炭並みの熱量が得られるバグフィルタカーボンに比べると、熱分解チャーは灰分が多く熱量が低い。篩選別により鉄、銅、アルミの金属分(チャー灰分重量の約40%に相当)を分離することでより高い熱量の炭素燃料を得ることができる。

Table3 Properties of Output Materials

		熱分解チャー	バグフィルタカーボン	
発生量 (ASR熱分解投入トン当たり)		0.365トン (銅74除去後)	0.103トン	
高位発熱量	kcal/kg	1350	6780	
水分	wt%	2.8%	0.4%	
可燃分(揮発分)	wt%	7.8%	3.6%	
可燃分(固定分)	wt%	15.0%	81.1%	
灰分	wt%	74.5%	15.2%	
可燃分の化学組成	wt%	炭素(C)	13.3%	79.1%
		水素(H)	1.0%	0.6%
		窒素(N)	1.2%	0.4%
		酸素(O)	4.5%	2.3%
		硫黄(S)	0.3%	0.4%
		塩素(Cl)	2.6%	2.0%
灰分中の主な成分	wt%	Fe	12.0%	0.9%
		Al	11.0%	0.4%
		Cu	7.7%	0.0%
		Pb	0.4%	0.2%
		Zn	1.3%	0.6%
		Ca	6.0%	1.8%
		Si	10.0%	1.7%

ASR 中に含まれる資源価値の高い金属は、鉄、銅、アルミであるが、熱分解(乾留)ガス化によるリサイクルプロセスの長所のひとつは、これらの金属が酸化作用を受けず回収されるため、資源リサイクルがしやすいという点である。鉄の大部分は熱分解キルン投入前の磁選の段階で回収される。また、銅、アルミなどの非鉄金属は、熱分解チャーに混入して回収され、篩、風力、渦電流選別などで分離することが可能である。ただし、実際の FT 事業プラントにおいては、回収した銅とアルミを分別する機構を設けておらず、銅の再生の目的でそのまま非鉄精錬炉へ送られた。なお金属と分離した炭化物については、主

に石炭代替の固形燃料として利用された。

3. LCA の評価方法

3.1 評価対象とするシステム境界

一般に LCA 評価では、評価を行なう対象物の生産、利用、廃棄までの一貫工程を扱うことが多いが、本研究では、ASR そのものが既に存在する原料と捉え、その処理工程(リサイクル・資源利用、残さ廃棄を含む)のみを評価の範囲とする。したがって、使用済み自動車から ASR 生産にいたる上流工程はシステム境界に含まない。評価の対象とするプロセス(工程)は、熱分解(乾留)ガス化によるリサイクルプロセスであり、その詳細は 2 章で述べた。また処理設備の製造や建設の工程については、設備別の構成材料、製造方法、設置環境、耐用年数等の条件により結果が変わり、評価の一般性に影響を及ぼす可能性があるため、今回の検討では考慮外とした。

インベントリ分析の項目として、ASR 単位量を本プロセスで処理するためにインプットされる用役類(燃料、電力、用水、薬液等)、およびプロセスからアウトプットされる各種の生産物(鉄類、銅、アルミ、炭化物)、残さ(塩、スラッジ等)、ガスエネルギー、CO₂ 排出量を扱う。これらの生産物やガスエネルギーは、既に市場に流通している製品・材料やエネルギー燃料(都市ガス)の一部を代替(節約)するものと考え、その代替による環境負荷の差分(削減分)を評価する。ASR および用役類については、本プロセスの入口で供給されるものとし、輸送距離は考慮しない。アウトプットされる生産物利用や残さの処理に伴う輸送距離は一定の距離を仮定する。

以上による LCA 評価のシステム境界を Fig.4 に示す。

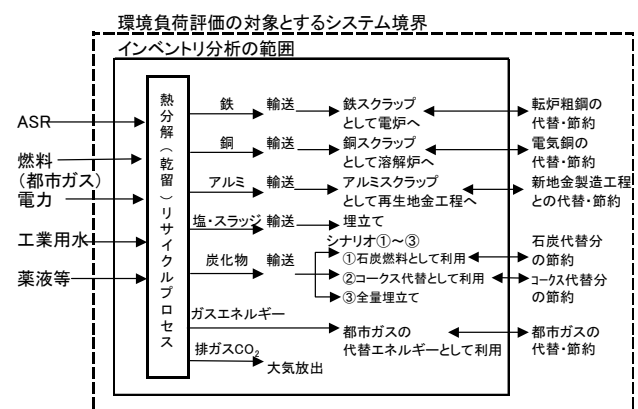


Fig.4 System Boundary for LCA

3.2 アウトプット生産物の利用シナリオ

以下の LCA 評価では、熱分解(乾留)ガス化プロセスにかかわる回収資源のリサイクル利用が、実現可能なレベルで高度に行われることを前提として、プロセスからのアウトプット物の利用シナリオを下記のように設定する。

鉄については、電炉粗鋼の原料として投入されるものと

する。これによって、転炉粗鋼生産量が節約される。同じ生産量に対する環境負荷は転炉粗鋼生産に比べ電炉粗鋼生産の方が小さいので、環境負荷評価ではその差分を負荷削減分として計上する。

銅については、スクラップ銅として溶解炉へ投入されるものとする。これによって、同量の電気銅の溶解炉投入が節約されるものとする。したがって電気銅生産にともなう環境負荷量が控除されることになるので、その控除量を削減分として計上する。

アルミについては、スクラップ溶解工程を経て再生地金として利用されるものとする。これにより、ボーキサイトから電解精錬工程を経て生産される新地金の生産量が節約される。同じ生産量に対する環境負荷は新地金に比べ再生地金の方が小さいので、環境負荷評価ではその差分を削減分として計上する。

炭化物の利用については、①石炭代替燃料として利用、②コークス代替として利用、③全て廃棄物として埋め立てる、の3つのシナリオを比較する。

残さ（塩・スラッジ）は最終処分場へ輸送し埋め立てるものとする。

なお、プロセス境界から、次の再生工程あるいは最終処分場までの輸送距離は、現実のケースでは種々異なるが、ここでは、京浜地区の ASR リサイクル設備から、回収金属スクラップを関東地方周縁部の電炉工場や非鉄精錬炉工場へトラック輸送すると仮定して、輸送距離を一律 200km と設定した。残さについても同等の輸送距離で評価するため最終処分場への距離を 200km と仮定した。

本プロセスで製造されるガスエネルギーについては、外部へ供給可能なガスエネルギーと同量の熱量に相当する都市ガスの代替として利用されるものとする。このエネルギー供給量、代替都市ガス分に相当する直接的な CO₂ 排出量（燃焼による排出量）、さらにその都市ガス分の生産にともなう間接的な環境負荷量が控除されることになるので、これらの控除量を削減分として計上する。

3.3 インベントリ分析の方法

インプットおよびアウトプットのインベントリ分析では、本ガス化リサイクルプロセスの商用プラントの運転実績に基づく投入 ASR、処理生産物、排出物の組成・熱量データを用いたマテリアルバランスおよびエネルギーバランスを根拠とする。インベントリ分析に用いる主要なプラントデータは、2 章と同様、NEDO「先進型廃棄物発電フィールドテスト事業」平成 16 年度報告書⁵⁾による。補足が必要な一部のデータは聞き取りによる。

なお FT 事業プラントでは、クリーンガス発電で所内動力負荷への供給を行なったが、インベントリ分析では、プロセスのインプットである電力と、アウトプットとして得られるエネルギーを分離して評価するのが分かり易いため、ASR 処理に必要な電力はすべて系統から得るものとし、一方 ASR の処理のアウトプットとしてプロセス外部へ供給

可能なガスエネルギーは、すべてガス燃料（都市ガス）代替エネルギーとして評価することとした。

3.4 環境負荷の算定方法

ASR の処理に関わり発生する温室効果ガスのほとんどが CO₂ であること、ASR そのものが高い燃焼エネルギーを有しその処理に伴うエネルギーの授受が大きいことから、本研究で LCA 評価の対象とする環境負荷は、CO₂ 排出量およびエネルギー消費量の2項目とした。ASR 処理設備から大気放出される他の環境負荷物質（NO_x、SO_x、SPM、ダイオキシン類など）は、法規制に基づき小さい値に管理されるものとするが、そのために必要な（設備の適正運用に必要な）種々の用役の CO₂ やエネルギーは以下の LCA 評価でカウントされている。

環境負荷量の算定においては、ASR 単位数(1t)を処理するために、直接的および間接的に発生する CO₂ 排出量とエネルギー消費量を求めた。このための手法として、国立環境研究所地球環境研究センター発行の「産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID)」⁶⁾に記載される、平成 12 年産業連関表に基づく部門別(399 部門)の CO₂ 排出原単位およびエネルギー消費原単位を使用した。（本稿中では 3EID データと略称する。）また、プロセスからの生産物や生産ガスエネルギーについては、既存市場で代替（控除）できる製品・材料や代替ガス燃料（都市ガス）の生産にともなう直接・間接の CO₂ 排出量とエネルギー消費量を算定する必要があり、ここでも 3EID データを使用した。

3EID データは、産業連関表に基づく部門別の直接 CO₂ 排出原単位および直接エネルギー原単位を生産額ベースで算定し、これをレオンチェフ逆行列に乗じる形で間接的な生産波及までを含んだ環境負荷原単位（CO₂ 排出量およびエネルギー消費量）を行列形式で提示している。3EID データに付属する「品目別国内生産額との対応表」の中から、個々の生産物に対応する品目単価を選び上記の環境負荷原単位に乗じることで、個々の生産物の直接・間接の環境負荷が算定されることになる。

ただし、アルミ再生地金で新地金を代替する差分（節約分）の評価では、産業連関表の部門別をベースとする 3EID データでは新地金と再生地金が部門統合されていて、両工程の差について精度よい算定ができないことから、LCA 日本フォーラムから公開されている報告書「アルミニウム新地金および展伸用再生地金の LCI データの概要」⁷⁾のデータを使用した。また、生産物のトラック輸送や残さの埋立てに係わる CO₂ 排出量とエネルギー消費量の算定には、JLCA-LCA データベース 2004 年度 2 版⁸⁾を使用した。（本稿中では JLCA データと略称する。）

4. インベントリ分析

4.1 インプットされる物質とエネルギー

熱分解(乾留)ガス化リサイクルプロセスへのインプット物質とインプットエネルギーについては、下記のような根拠により算出した。この結果は、Fig.5 の左半分のカラムにまとめている。

(1)ASR

ASR 投入量 1t 当たりについては、破碎・磁選工程での鉄類選別率を 12.7%(平成 16 年度平均実績)とした。これを差し引いた 873kg の ASR が熱分解キルンに投入されるとし、その組成は Table2 のデータを用いた。

(2)燃料

ASR 処理時の熱分解キルンの加熱用の燃料は、プロセス内で生成されたクリーンガスの一部で賄われるため、起動時を除いて補助燃料は不要だが、キルン用バーナおよびガス改質器バーナの保安用パイロットバーナの点火用都市ガス量を計上する。日量 60 トン ASR 処理設備で 22.5m³/h の実績消費量であることから、ASR 投入量 1t 当たり 9.0m³/h の都市ガスのインプット量とした。

(3)電力エネルギー

NEDO プロジェクト平成 16 年度報告書用の運転データ分析が行なわれた 2004 年 6 月度において、1ヶ月間の積算値で ASR 投入量 1,516.5t に対し設備電力使用量 472,380kWh とのデータが得られている。これから ASR 投入量 1t 当たり、311.5kWh の電力消費量とした。

(4)用水

プラント各機器に供給する 2 次冷却水系の補給水およびボイラ用給水として工業用水が必要となる。前項と同様の期間 1ヶ月間の積算値で、用水補給量 1,849m³とのデータが得られている。これから ASR 投入量 1t 当たり、1.22m³の用水量とした。

して供給する。前項と同様の期間 1ヶ月の積算値で窒素ガス使用量 28,413m³とのデータがあり、これから ASR 投入量 1t 当たり窒素ガス 18.7m³、液体窒素に換算して 0.0290m³ を消費するとした。また、ガス洗浄水の中和処理用の薬液として硫酸(30%濃度)を用いる。同様の期間 1ヶ月の積算値で 19.9m³ とのデータがあり、これから ASR 投入量 1t 当たり硫酸 0.0131m³を消費するとした。

4.2 アウトプットされる物質とエネルギー

アウトプット物質とアウトプットエネルギーは、下記により算出した。結果を Fig.5 の右半分のカラムにまとめた。

(1)鉄、銅、アルミ

ASR 中に含まれる鉄は熱分解キルン投入前の磁選工程と熱分解チャーから回収される。銅、アルミについては、熱分解チャーから、篩、風力、渦電流選別など適切な選別システムを用いて分離回収するものとする。実績データでは、各金属の数%程度は粒子径が小さく金属としての分離回収は困難である。そこで、本インベントリ分析では、鉄、銅、アルミの回収率として、それぞれ投入 ASR の含有量の 95%と設定する。

(2)塩・スラッジ

インプットデータの設定と同様の期間 1ヶ月の積算値で、ガス洗浄水処理後の濃縮塩水排出量が 101m³(塩濃度 23%)とのデータから、ASR 投入量 1t 当たりの固形塩排出量は 15.3kg となる。一方、水処理スラッジは ASR 投入量 1t 当たり 0.05kg と少量であり、塩と合わせて 15.4kg が排出されるとした。

(3)炭化物

熱分解チャーから金属(鉄、銅、アルミ)を分離した後バグフィルタカーボンと合わせた固形物が炭化物として回収される。炭化物中の可燃成分の重量は、Table3 に示される熱分解チャーおよびバグフィルタカーボン中の可燃成分を合算して求めた。また、投入 ASR に含まれる灰分のうち(1)項で回収された金属分を除いたものが物質バランス上すべて炭化物に移行するとして炭化物の灰分重量を求めた。この結果、1t の ASR 投入量当たり得られる炭化物の量は 297.7kg となる。炭素含有率 43.5%で、単位熱量は 3,988kcal/kg である。

(4)ガスエネルギー

プラント運転実績に基づくエネルギーバランスに基づき、外部利用可能なクリーンガス分の燃焼エネルギー全量を計上する。これより ASR 投入量 1t 当たり生産されるアウトプットエネルギーは 1,386Mcal となる。

(5)排ガス中の CO₂ 量

システム全体の炭素バランスから ASR 投入量 1t 当たりの排ガス中の CO₂ 量を算定した。すなわち投入 ASR 中に含まれる炭素量(C)から、熱分解チャーおよびバグフィルタカーボンとして回収される炭素量を差し引いた値は、クリーンガス中の炭化水素を構成する炭素量であり、クリーンガスの燃焼(完全燃焼と仮定)に伴い全量が CO₂ に

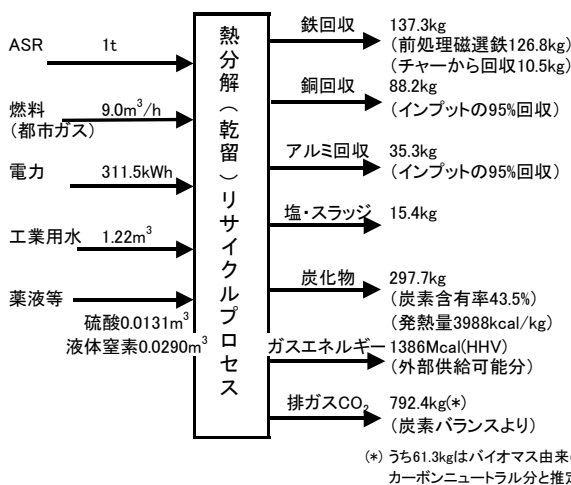


Fig.5 Input and Output of Pyrolysis Gasification Process

(5)薬液等

可燃性のガスや固形物を扱う系であることから、窒素ガスを安全ページ用に用いている。プラントへは液体窒素と

転換すると考えることができる。プラント運転データおよび Table2、Table3 の組成データから、投入 ASR1tに含まれる C は 340.1kg、投入 ASR1t 当たり生産される熱分解チャー(364.6kg)中の C は 48.5kg、バグフィルタカーボン(102.5kg)中の C は 81.1kg と算出され、差引き 210.5kg(61.9%)の C 分が排ガス中の CO₂(771.8kg)になって排出されると考えることができる。なお、インプット物質のうち都市ガスの燃焼にともなう CO₂ 量は、東京ガス公表⁹⁾の CO₂ 排出係数 2.29kg/m³N を用いて、ASR 投入量 1t 当たり 20.6kg であることから、合計して 792.4kg の CO₂ 排出量となる。

一方、Table2 に示される ASR 組成では、バイオマス由来と考えられる「紙・(布)・木」成分が 7.3% 含まれるので、この成分由来の CO₂ 排出分はカーボンニュートラルとして扱うことが適切である。ASR 中の上記組成中の C 分の割合を 0.45 と想定し、本プロセスでの排ガスへの炭素移行割合 61.9% を用い、CO₂ 排出量のうち、61.8kg CO₂/ASR トンがカーボンニュートラル分と推定できる。

5. 環境負荷の評価結果

前章で検討した熱分解（乾留）ガス化リサイクルプロセスのインプット・アウトプットインベントリに基づき、直接的・間接的な環境負荷（CO₂ 排出量およびエネルギー消費量）を算定した。環境負荷の算定方法は 3.4 で説明したとおりである。アウトプット生産物の利用シナリオは 3.2 に拠る。ここで、環境負荷の節約分あるいは控除分が生じる場合は削減量としてマイナス値で表示している。

これらの結果をまとめて、投入 ASR1t 当たりの CO₂ 排出量およびエネルギー消費量の詳細を Table4 に示す。同表では、それぞれのインプット・アウトプット項目ごとの環境負荷算定の考え方と使用したデータを記載した。また、Fig.6 に、今回の検討対象システム範囲全体のフロー上での環境負荷の分布を示した。

Table5 の左列は、Table4 と同様の手法で FT 事業プラントでの回収資源リサイクルに対応する CO₂ 排出量およびエネルギー消費量を求めた結果を示す。右列はより高度なリサイクルシナリオである Table4 の結果であるが、FT 事業プラントで考慮されていなかったアルミリサイクルとエネルギー全量利用が実施されれば、大きな CO₂ 排出量の削減とエネルギー消費量の削減に結びつくことがわかる。

Table5 Influence of Plant Outputs Recycling Level on CO₂ Exhaust and Energy Consumption

	FT事業プラントの場合	高度リサイクルの場合 (Table4の炭化物利用シナリオ②)
回収資源		
鉄	Fig.5に示す全量をリサイクル	Fig.5に示す全量をリサイクル
銅	Fig.5に示す全量をリサイクル	Fig.5に示す全量をリサイクル
アルミ	リサイクルせず	Fig.5に示す全量をリサイクル
炭化物	Fig.5に示す全量をリサイクル (石炭燃料代替として)	Fig.5に示す全量をリサイクル (コークス代替として)
ガスエネルギー	Fig.5に示す利用可能なガスエネルギーのうち44.3%を利用 (ガス発電600kW)	Fig.5に示す利用可能なガスエネルギーの全量を利用
生産物の輸送距離	一律200kmと想定	一律200kmと想定
環境負荷		
CO ₂ 排出量	513.0 kgCO ₂ /ASRトン	8.2 kgCO ₂ /ASRトン
エネルギー消費量	-872.0 Mcal/ASRトン	-2877.9 Mcal/ASRトン

6. 考察

(1)環境負荷の総括結果

Table4 および Fig.6 の環境負荷総合計で炭化物をコークスに代替利用するシナリオ②をとると、ASR 処理量当たり、CO₂ 排出量は 8.2kgCO₂/ASR トンであり、さらにバイオマス由来の CO₂ 排出量をカーボンニュートラル分として差し引くと、-53.1kgCO₂/ASR トンの排出量を削減したことになる。またエネルギーについては、消費削減量が -2,878Mcal/ASR トンに達すると結果を得た。このことは、熱分解（乾留）ガス化リサイクルプロセスの手法による

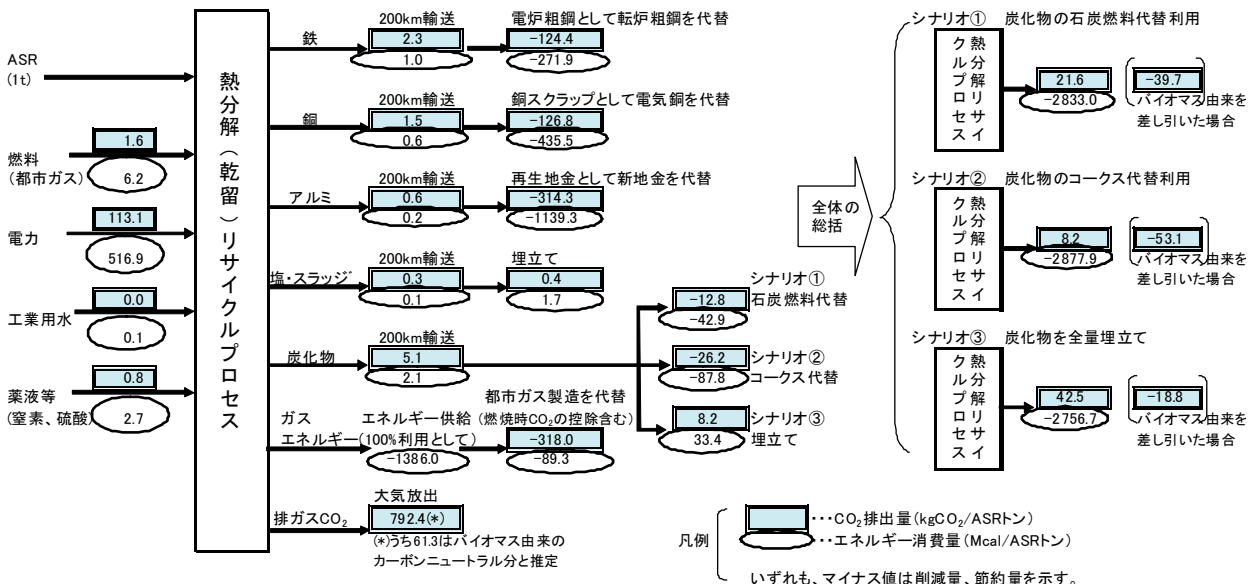


Fig.6 CO₂ Exhaust and Energy Consumption around Pyrolysis Gasification Process

ASRの処理量を増やすことにより、社会的なCO₂排出量の削減とエネルギー消費量の節約に貢献できることを意味しており、とくに後者の効果が大きい。

一方、もしASRの全量をそのまま最終処分場に埋め立てる(輸送距離200kmと仮定)としたときの環境負荷は、JLCAデータの「一般廃棄物埋立(製品構成既知)」ケースに準じて計算し、ASR中のバイオマス由来成分からの生分解メタンガス化推定量を温暖化係数倍したCO₂換算

量も加えると、CO₂排出量は235.0kgCO₂/ASRト、またエネルギー消費量は119Mcal/ASRトと推算される。これらの値に対し、上述した本プロセスでの環境負荷を比較すると、CO₂排出量、エネルギー消費量ともに削減効果が相当に大きいことがわかる。

なお、アウトプット材の後段処理への輸送(200kmレベル)に伴う環境負荷は全体への影響はさほど大きくない。

Table 4 CO₂ Exhaust and Energy Consumption around Pyrolysis Gasification Process

*3EIDデータ・・・「産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID)」に記載される平成12年産業連関表に基づく部門別の環境負荷データによる
*JLCAデータ・・・JLCA日本フォーラムJLCA-LCAデータベース2004年度2版による

項目	考え方	プロセスにおけるインベントリ量	CO ₂ 排出量(*)			エネルギー消費量(*)			参照した品目別単価(3EIDデータより)
			原単位(単位: tC/MtF)	プロセスのインベントリ単位数当たりのCO ₂ 排出量	CO ₂ 排出量(単位: kgCO ₂)	原単位(単位: TOE/MtF)	プロセスのインベントリ単位数当たりのエネルギー消費量	エネルギー消費量(単位: Mcal)	
(1) ASR	ASR単位投入量1t当たりの環境負荷影響を算出する。	1 t							
(2) 燃料	3EIDデータの「都市ガス部門」から算出。	9.0 m ³	0.520	0.177 kgCO ₂ /m ³	1.60	0.745	0.693 Mcal/m ³	6.24	93.011 ¥/m ³ (都市ガス)
(3) 電力	3EIDデータの「事業用発電部門」から算出。	311.5 kWh	6.198	0.363 kgCO ₂ /kWh	113.05	10.390	1.659 Mcal/kWh	516.87	15.970 ¥/kWh (事業用電力)
(4) 用水	JLCAデータベースの「工業用水製造」から、用水1m ³ 製造のためのインベントリを使用。(電力、凝集剤)	1.22 m ³		0.022 kgCO ₂ /m ³	0.03		0.098 Mcal/m ³	0.12	21.027 ¥/kg (ボリ塩化アルミ)
(5) 薬液等	液体窒素:3EIDデータ「圧縮・液化ガス部門」から算出。 硫酸:3EIDデータ「無機化学工業製品」から算出。	0.029 m ³ 0.013 m ³	2.444 2.200	0.162 kgCO ₂ /m ³ 61.336 kgCO ₂ /m ³	0.00 0.80	3.928 2.691	0.708 Mcal/m ³ 204.613 Mcal/m ³	0.02 2.68	18.032 ¥/m ³ (液化窒素) 6.049 ¥/kg (硫酸)
(6) 鉄	鉄がスクラップとして電炉粗鋼原料として利用され、転炉粗鋼生産量の節約に寄与するため、環境負荷は下記の差が削減量となる。 3EIDデータの「粗鋼(電気炉)部門」から算出。 3EIDデータの「粗鋼(転炉)部門」から算出。	137.3 kg		-0.906 kgCO ₂ /kg (下記の差分) 0.643 kgCO ₂ /kg 1.549 kgCO ₂ /kg	-124.44 - 15.265		-1.980 Mcal/kg (下記の差分) 1.760 Mcal/kg 3.741 Mcal/kg	-271.91 - 24.504	¥/kg (鉄塊普通鋼) ¥/kg (鉄塊普通鋼)
(7) 銅	生産されたスクラップ銅と同量の電気銅の生産が節約されるため、下記が削減量となる。 3EIDデータの「銅部門」から算出。	88.2 kg	1.836	-1.438 kgCO ₂ /kg	-126.80	2.312	-4.938 Mcal/kg	-435.46	213.57 ¥/kg (電気銅)
(8) アルミ	アルミスクラップ溶解工程により再生地金として再生されることで、電解精錬工程での新地金の生産量が節約されるので、下記のJLCAデータベースから、環境負荷の差が削減量となる。 アルミ展伸材用再生地金のLCIデータ(スクラップから溶解まで) アルミ新地金のLCIデータ(原料採掘から製品輸入まで)	35.3 kg		-8.909 kgCO ₂ /kg (下記の差分) 0.309 kgCO ₂ /kg 9.218 kgCO ₂ /kg	-314.25 - 8.20		-32.298 Mcal/kg (下記の差分) 1.362 Mcal/kg 33.660 Mcal/kg	-1139.26 - 33.38	
(9) 塩・スラッジ	廃棄物として埋立てとする。JLCAデータベースの「焼却灰埋立て」を使用し、浸出処理の電力、カセイソーダ、塩化第二鉄、軽油(重機用)による環境負荷を3EIDデータから求め合計する。軽油の燃焼排出CO ₂ も含む。	15.4 kg		0.028 kgCO ₂ /kg	0.42		0.112 Mcal/kg	1.73	
(10) 炭化物	炭化物生産量(インベントリ分析結果から) シナリオ①石炭代替燃料として利用・・・3EIDデータ「石炭部門」から削減量を算出。 シナリオ②コークス代替として利用・・・3EIDデータ「石炭製品部門」から削減量を算出。 シナリオ③廃棄物として埋立て・・・(9)項と同様の方法で環境負荷量を算出。	297.7 kg -186.8 kg -165.1 kg 297.7 kg	1.599 4.455	0.068 kgCO ₂ /kg 0.158 kgCO ₂ /kg 0.028 kgCO ₂ /kg	-12.76 -26.16 8.20	1.973 5.484	0.230 Mcal/kg 0.532 Mcal/kg 0.112 Mcal/kg	-42.93 -87.81 33.38	11.647 ¥/kg (一般炭) 9.700 ¥/kg (コークス)
(11) エネルギー	外部供給可能なクリーンガスエネルギー(マイナスのエネルギー消費として計上) 上記に加え、外部供給可能なガスエネルギーと同量のエネルギー(1,386Mcal/ASRト)の都市ガス128.9m ³ /ASRトを代替することになるので、この製造・供給に伴う環境負荷分と、都市ガス燃焼に伴うCO ₂ 排出も避けることができる。 都市ガス代替量の製造・供給に伴う環境負荷を3EIDデータの「都市ガス部門」から算出。 都市ガス代替量の燃焼に伴うCO ₂ 排出量節約分(CO ₂ 排出係数2.29kgCO ₂ /m ³ から算出)	1386.0 Mcal -128.9 m ³	0.520	0.177 kgCO ₂ /m ³ 2.290 kgCO ₂ /m ³	-22.86 -295.18	0.745	0.693 Mcal/m ³	-89.32	93.011 ¥/m ³ (都市ガス)
(12) 排ガスCO ₂	クリーンガス燃焼に伴うCO ₂ 排出量(インベントリ分析結果から)	792.4 kg			792.40				
(13) 輸送	JLCAデータベース「10トトラック輸送」のデータを使用。軽油燃費が0.02371kg/tkm、軽油比重0.84、走行のCO ₂ 排出係数2.64kg/lにて、軽油製造環境負荷を3EIDデータから算出。(6)から(10)の生産物をそれぞれ200km輸送したとする。	運用距離200kmと仮定		0.017 kgCO ₂ /輸送kg	9.56		0.007 Mcal/輸送kg	4.22	

	CO ₂ 排出量	エネルギー消費量
環境負荷総合計 シナリオ①炭化物を石炭燃料として利用	21.59 kgCO ₂ /ASRト	-2833.01 Mcal/ASRト
シナリオ②炭化物をコークス代替として利用	8.19 kgCO ₂ /ASRト	-2877.89 Mcal/ASRト
シナリオ③炭化物を全量埋立て	42.54 kgCO ₂ /ASRト	-2756.70 Mcal/ASRト

(2)ガスエネルギー利用の効果

前項の結果は、アウトプットのガスエネルギー利用率を100%として、同熱量の都市ガスを代替したときの効果を前提としている。ガスエネルギー利用率が50%に留まる場合は、エネルギー消費削減量は約75%に低減し、CO₂排出量は約170(シナリオ②)～200(シナリオ③)kgCO₂/ASR トンに増加する。したがって、発電や熱利用などでガスエネルギーの利用率を高く維持することが、環境負荷低減の観点で非常に重要であることがわかる。

(3)CO₂排出量の低減に効果的な要因

CO₂排出量を見ると、ガス化プロセスからの直接的排出量が最も大きく、次いでインプット電力の間接的排出量が多い。直接的排出量の削減は難しいが、所内動力を削減することがCO₂排出量の低減に結びつく。アウトプット側で最もCO₂削減(控除)効果大きいのは、ガスエネルギーによる都市ガス代替効果と、アルミスクラップのリサイクル利用によるCO₂排出量削減効果である。また、鉄スクラップの電炉粗鋼製造による転炉粗鋼代替のCO₂削減効果は、インプット電力の間接的排出量をほぼ打ち消す程度あることが分かる。

(4)エネルギー消費量の低減に効果的な要因

電力の間接的エネルギー消費量が多いのはCO₂の場合と同じである。しかし、アウトプット側での直接的エネルギー供給量や、アルミスクラップリサイクルによるエネルギー消費削減効果が大きく上回っている。また、これに続いて銅と鉄のリサイクル効果の寄与が大きい。

(5)金属類のリサイクル効果

前項から、鉄、銅、アルミのリサイクル利用の効果が、間接的な環境負荷の削減に大きく寄与していることが分かった。とくにアルミはASR投入量のうち重量は4%程度に過ぎないが、その再生地金化リサイクルによるCO₂排出削減量、エネルギー消費削減量は、アウトプットのガスエネルギーで都市ガスを代替した場合のCO₂排出削減量とエネルギー消費削減量に匹敵している。

したがって、ASRからの鉄、銅、アルミの回収率をできるだけ上げることが、システム全体の環境負荷削減に大きな効果をもたらすことが分かる。

(6)炭化物の利用シナリオの効果

炭化物処理に関するフローにおける環境負荷については、炭化物を石炭代替とするシナリオに比べ、コークス代替で利用するシナリオを採用すれば、CO₂排出削減量、エネルギー消費削減量とも約2倍の効果があることが分かる。これには、市場のコークス生産で間接的に発生する環境負荷が、一般炭に比べもともと2倍程度高いという背景がある。このことから、本プロセスで生産される炭化物は単純に燃料として利用とするのではなく、溶鉱炉、電炉など向けのコークス代替利用を拡げていくことが望ましい。

7. まとめ

ASRの熱分解(乾留)ガス化によるリサイクルプロセスのLCA分析を行い、環境負荷であるCO₂排出量とエネルギー消費量について、直接および間接的な生産波及による効果を含めて評価した。この結果、本プロセスから得られる生産物のリサイクル利用により市場製品の代替を行うことで、間接的な環境負荷の削減効果が高い値で得られることが明らかになった。とくに、ASRに含まれる主要金属分(鉄、銅、アルミ)の回収率と再生物の利用率を高めること、およびガスエネルギーの利用率を高めることが、環境負荷の大きな削減効果に結びつく。なかでもアルミの再生地金としての利用効果が顕著である。

また、本プロセスで生産された炭化物の用途としては、石炭代替の燃料としての利用よりも、コークス代替で利用する方が、CO₂排出削減量、エネルギー消費削減量とも大きい。このことから、溶鉱炉、電炉など向けのコークス代替への利用を拡げていくことが望ましいことが示された。

ASRは廃棄物ではあるが、高いカロリーと金属資源を有する資源でもある。その処理プロセスとリサイクル方法を総合して、今回のような直接的・間接的な環境負荷の評価を行い、より低環境負荷のプロセスの採用を図ることが、今後の温暖化対策時代に求められる方向と考える。

[参考文献]

- 野間毅, 井手勝記, 小城和高, 木村信一, 雨宮隆, 川口敬二: 熱分解ガス化改質システムによるカーシュレッダーダストリサイクルのフィールドテスト, 廃棄物学会第15回研究発表会講演論文集(2004)
- 雨宮隆, 野間毅, 今井正, 井手勝記, 川口敬二: 自動車シュレッターダスト熱分解リサイクルプロセスのCO₂排出量評価, 第25回エネルギー・資源学会研究発表会論文集(2006)
- 船崎敦, 種田克典, 田原聖隆, 稲葉敦: 自動車シュレッターダスト処理に関するライフサイクルアセスメント(第一報)ー埋立て処分ー, エネルギー・資源, vol.24, No.6, pp.62-67(2003)
- 船崎敦, 種田克典, 田原聖隆, 稲葉敦, 上宮成之, 小島紀徳: 自動車シュレッターダスト処理に関するライフサイクルアセスメント(第二報)ーエネルギー回収ー, エネルギー・資源, vol.25, No.1, pp.56-62(2004)
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO): 先進型廃棄物発電フィールドテスト事業 産業廃棄物処理業(中間処理)における先進型廃棄物発電FT事業ー平成16年度成果報告書(2005)
- 国立環境研究所地球環境研究センター: 産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID)ー2000年表に基づく原単位データファイル(http://www-cger.nies.go.jp/publication/D031/jpn/page/data_file.htm), 参照2008.4.10)
- 日本アルミニウム協会: アルミニウム新地金および展伸再生地金のLCIデータの概要, LCA日本フォーラム(2005)
- 産業環境管理協会 LCA 日本環境フォーラム: JLCA-LCA データベース 2004年度2版(http://www.jemai.or.jp/lcaforum/forum_news.cfm), 参照2008.4.10)
- 東京ガス(株): 都市ガスのCO₂排出係数, 東京ガスホームページ(<http://www.tokyo-gas.co.jp/env/gas/category08.html>), 参照2008.4.10)

LCA Study of ASR Recycle System with Pyrolysis Gasification

Takashi Amemiya¹⁾, Ryuji Matsushashi²⁾ and Yoshikuni Yoshida²⁾

¹⁾ Environmental Systems Division, Toshiba Corporation

²⁾ Department of Environmental Systems, The University of Tokyo

Abstract

Life cycle inventory analysis was performed for the recycling process of the automobile shredder residue (ASR) using the pyrolysis gasification system. CO₂ emissions and the amount of energy consumption including the effect of direct and indirect influence by production for input and output materials were calculated as environmental load generated with processing of ASR. Consequently, it was shown that the big curtailment effect of environmental load is acquired by recycling of the main products (gas energy, iron, copper, aluminum, carbide) obtained from this process because they can substitute for market products deducting indirect environmental load.

Key words:

ASR(automobile shredder residue), shredder dust, pyrolysis, carbonization, LCA