

## 【 論 文 】

自動車破碎残渣 (ASR) の資源化・処理に関する  
ライフサイクルアセスメント

長 田 守 弘\*・真名子 一 隆\*\*・平 井 康 宏\*\*\*・酒 井 伸 一\*\*\*

**【要 旨】** 自動車破碎残渣 (ASR) の資源化・処理方式に関する4つのシナリオ (埋立, 焼却+埋立, 溶融+埋立, 溶融+山元還元) を対象にライフサイクルアセスメント (LCA) を行った。影響領域としては, 地球温暖化, 酸性化, 有害化学物質 (人間毒性), 生態毒性, 廃棄物 (埋立地消費) を取り上げ, ASR の溶融処理試験結果で得られたインベントリーデータを中心に, LIME (日本版被害算定型環境影響評価手法) の最新版, LIME2 が提供する各種評価係数等を活用して評価した。溶融は埋立や焼却に比べて温室効果ガスの排出が多いものの, 重金属類等の排出による人間健康影響が少ないことと埋立地を削減できる効果がこれを上回った。さらに生態系への影響 (生物多様性) を考慮すると, その差は大きくなった。溶融の中では, 溶融飛灰の山元還元 (資源化) の実施による重金属類の排出抑制効果が, 評価に大きく寄与することが示された。

**キーワード:** ライフサイクルアセスメント (LCA), 自動車破碎残渣 (ASR), 溶融処理, 重金属類, 臭素化難燃剤 (BFR)

## 1. は じ め に

自動車破碎残渣 (ASR) の処理については, これまでは埋立処分が主流とされてきたが, 2005 年に自動車リサイクル法が制定されて資源化が求められたことから, 溶融処理も進められるようになってきた<sup>1)</sup>。ASR は高カロリーで焼却発電に適している一方, 無機物が多くあり, かつ重金属類, 難燃剤, 塩素分等を多く含んでおり, 処理が困難な対象物である。著者らは, これまで ASR の溶融処理時における臭素化難燃剤, 臭素化ダイオキシン類や重金属類等の挙動について調査し, これらの有害物

質が溶融処理により適正に処理, または資源化できることを確認した<sup>2)</sup>。一方で, 溶融処理は温室効果ガスの排出量が多い点や, 処理費用が高いといった指摘もなされている。今回, これまでの試験データ等を基に ASR の溶融処理の他に埋立処分や焼却処理などの各処理方式を対象として, ライフサイクルアセスメント (LCA) を実施した。その評価結果をここに報告する。

LCA を用いた廃棄物処理方式の比較評価は, これまでも種々の手法で検討が進められてきているが<sup>3-5)</sup>, ヨーロッパにおいても ASR 処理方法に関する Eco-Indicator 99 を用いた LCA 評価が実施されており, イタリア国内で稼働しているプロセスの中では「埋立」>「非鉄選別回収後に埋立」>「発電・熱回収付き焼却 (参考事例は都市ごみとの5%混合焼却)」の順に環境影響が小さくなっていくことが示されている<sup>6)</sup>。ただし, 臭素系難燃剤や重金属類を多く含む ASR について, それらの挙動や環境影響, 被害評価に焦点を当てた検討はなされていない。

本研究ではこうした有害物質の影響を定量的に評価することも念頭に置き, LCA の実施にあたっては, 産業技術総合研究所ライフサイクルアセスメント研究セン

原稿受付 2010. 12. 3 原稿受理 2012. 9. 3  
J-STAGE 早期公開論文 (2012. 12. 27 早期公開)

\* 新日鉄住金エンジニアリング㈱ 環境ソリューション事業部  
(旧社名 新日鉄エンジニアリング㈱)

\*\* 日鉄住金環境プラントソリューションズ㈱ 技術企画部  
(旧社名 日鉄環境プラントソリューションズ㈱)

\*\*\* 京都大学環境安全保健機構環境科学センター

連絡先: 〒141-8604 東京都品川区大崎一丁目5番1号 大崎センタービル

新日鉄住金エンジニアリング㈱ 環境ソリューション事業部

長田 守弘

E-mail: osada.morihiro@eng.nssmc.com

ターが中心となって開発した LIME（日本版被害算定型環境影響評価手法）の更新版、LIME2 が提供する各種評価係数を活用することとした<sup>7,8)</sup>。LIME2 では、日本の環境条件や環境科学の最先端の手法を用いて有害物質の毒性評価から環境運命・曝露評価までモデル検討を行うことで膨大なデータベースを提供しており、本検討に有効なツールと考えた。その評価にあたっては、各資源化・処理方式の特性を十分評価できるように、対象とする影響領域として地球温暖化、酸性化、有害化学物質（人間毒性）、生態毒性、廃棄物（埋立地消費）を取り上げて考察した。

## 2. 調査範囲および評価手法の設定

### 2.1 機能単位

本研究では、ASR 1 ton の処理を機能単位とする。ここでいう ASR とは、シュレッダー事業者から排出される廃車ダストをいい、その性状は表 1 に示すとおりとした。表 1 は、著者らが実施した溶融処理試験で用いた ASR の分析結果であり、日本の平均的な ASR のばらつきの範囲内にある<sup>1)</sup>。

表 1 ASR 分析結果

| 分析項目  |               | 単位                 | 測定値    |
|-------|---------------|--------------------|--------|
| 三成分   | 水分            | %-wet              | 1.2    |
|       | 可燃分           | %-wet              | 68.1   |
|       | 灰分            | %-wet              | 30.7   |
| 物理組成  | 5 mm 篩下       | %-dry              | 30.1   |
|       | プラスチック        | %-dry              | 29.1   |
|       | ゴム            | %-dry              | 9.4    |
|       | ウレタン          | %-dry              | 5.0    |
|       | 繊維            | %-dry              | 3.7    |
|       | 紙             | %-dry              | 0.94   |
|       | 木             | %-dry              | 0.02   |
|       | 金属類           | %-dry              | 2.2    |
|       | ガラス類          | %-dry              | N. D.  |
|       | 電線            | %-dry              | 3.5    |
|       | その他（分離不能物）    | %-dry              | 14.6   |
|       | その他（発泡スチロール等） | %-dry              | 0.19   |
|       | 雜物            | %-dry              | 1.4    |
|       | 全塩素           | mg/kg-dry          | 29,000 |
| 重金属類等 | 全臭素           | mg/kg-dry          | 300    |
|       | 全硫黄           | mg/kg-dry          | 3,600  |
|       | カルシウム         | %-dry              | 12.4   |
|       | ケイ素           | %-dry              | 12.9   |
|       | アルミニウム        | %-dry              | 5.4    |
|       | ナトリウム         | %-dry              | 1.9    |
|       | カリウム          | %-dry              | 0.53   |
|       | 鉛             | mg/kg-dry          | 1,700  |
|       | 水銀            | mg/kg-dry          | 0.08   |
|       | カドミウム         | mg/kg-dry          | 6.2    |
|       | ヒ素            | mg/kg-dry          | 3.5    |
|       | セレン           | mg/kg-dry          | 0.2    |
|       | 六価クロム         | mg/kg-dry          | <1     |
|       | 鉄             | %-dry              | 2.8    |
|       | 銅             | %-dry              | 3.4    |
|       | 亜鉛            | %-dry              | 0.875  |
|       | アンチモン         | %-dry              | 0.04   |
| 真発熱量  |               | kJ/kg              | 21,500 |
| かさ比重  |               | ton/m <sup>3</sup> | 0.164  |

### 2.2 評価対象とするシナリオ

評価対象とするシナリオを、(1)埋立シナリオ（以下「埋立」という）、(2)焼却+焼却残渣埋立シナリオ（以下、「焼却+埋立」という）、(3)ガス化溶融+スラグ・メタル資源化+溶融飛灰埋立シナリオ（以下、「溶融+埋立」という）、(4)ガス化溶融+スラグ・メタル資源化+溶融飛灰山元還元（以下、「溶融+山元還元」という）の 4 種類とした（図 1）。

評価対象とするライフサイクルは、ASR の収集から最終処分までとした。また永田らの研究によれば、システムの運用段階が環境負荷の大半を占めることから<sup>9)</sup>、運用段階のみを対象として施設建設段階は対象外とした。

### 2.3 システム境界の設定

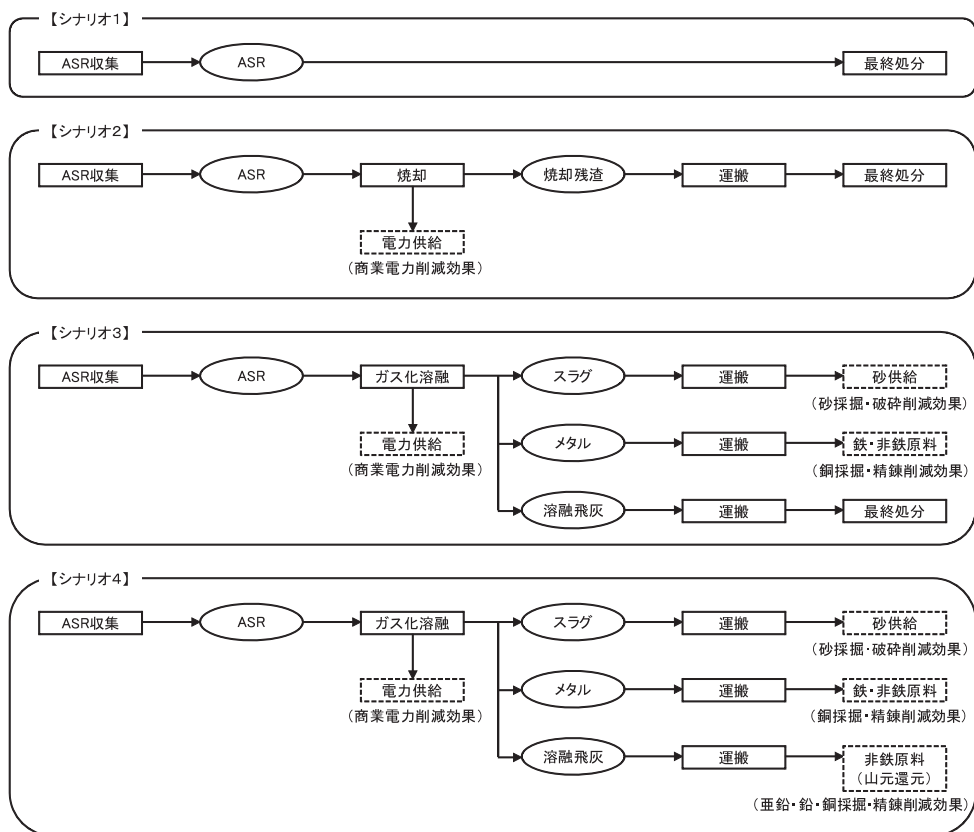
評価対象としたシステムは、ASR の処理のほかに、回収エネルギー（電力）、資源化物（スラグ・メタル等）の副産物を提供している。これらの副産物がシナリオ間で差異のないように、副産物と同等の製品を提供するサブシステムを用いて、機能単位を「ASR 1 ton の処理」に揃えた。つまり、副産物を有するシナリオからは、同等の製品を提供するサブシステムの環境負荷を差し引くこととした。すなわち得られた電力は、日本における商業電力を代替するものとし、スラグやメタルについては、それぞれ細骨材として利用される砂の採掘や非鉄原料の生産を代替するとした。

### 2.4 影響領域・対象物質と特性化手法の選定

影響領域の選定にあたっては、(1)廃棄物発電による高効率なエネルギー回収への期待、(2)埋立地逼迫問題への対応の重要性、(3)高温溶融による難燃剤を含むダイオキシン類緑化合物削減への期待、(4)スラグ・メタル資源化や山元還元による資源代替、重金属分離回収等を考慮した。また、重金属類やダイオキシン類の人間健康への影響と生態系への影響も評価対象とした。

上記を勘案し、以下の項目を影響領域、対象物質、特性化手法とした。

- (1) 地球温暖化（CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O : GWP100 年値）
- (2) 酸性化（NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> : DAP）
- (3) 有害化学物質（人間毒性）  
（PCDDs/DFs, Co-PCBs, PBDDs/DFs, PBDEs, 重金属類 : HTP）
- (4) 生態毒性（PCDDs/DFs, Co-PCBs, PBDDs/DFs, PBDEs, 重金属類 : AETP, TETP）
- (5) 廃棄物（埋立地消費）  
（Occupied space : 重量体積換算係数）



\* 点線囲みの項目は、( )内の他プロセスの代替になることを示す

図1 ASR資源化・処理の4つのシナリオのシステム境界

重金属類では、注釈のない限り Pb, Zn, Cd, T-Cr, Cu, As, T-Hg を対象とした。

上記の中で、有害化学物質の項目は人の健康影響のみを、また生態毒性の項目では水生生物と陸生生物への有害性の評価を行うものである。また、廃棄物の項目では、埋立処分による土地利用のみを評価するものであり、埋立地からの重金属の溶出等は有害化学物質と生態毒性の影響領域で扱われ、これには含まれない。

PCDDs/DFs は塩素化ダイオキシン類、Co-PCBs はダイオキシン様のコプラナ PCB 類をさすが、本研究では TEF (Toxic Equivalency Factor: 毒性等価係数) の定められた異性体のみを評価対象とした。PBDDs/DFs は臭素化ダイオキシン類を指し、塩素化ダイオキシンと同じ置換位置の異性体のみを評価対象とした。PBDEs はポリ臭素化ジフェニルエーテル類を指し、毒性データが利用可能な DecaBDE (デカブロモジフェニルエーテル)、OctaBDE (オクタブロモジフェニルエーテル)、PentaBDE (ペンタブロモジフェニルエーテル)のみを評価対象とした。

各影響領域内での特性化手法としては、地球温暖化には IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)、第四次評価報告書に示される GWP (Global Warming Potential) 100 年値、酸性化には DAP (Deposition-oriented Acidification Potential: 沈着面からの酸性化ポテンシャル) を特性化係数として用いた。基準物質はそれぞれ CO<sub>2</sub> と SO<sub>2</sub> である。有害化学物質については、HTP (Human Toxicity Potential: 人間毒性ポテンシャル) を特性化係数として用い、発がん性と慢性疾患のハザード比で特性化した。また生態毒性に関しては、AETP (Aquatic Eco-Toxicity Potential: 水生生物毒性ポテンシャル) と TETP (Terrestrial Eco-Toxicity Potential: 陸生生物毒性ポテンシャル) を特性化係数として用い、それぞれ水生生物への有害性、陸生生物への有害性を評価して特性化した。基準物質はベンゼンを用いており、それぞれベンゼンを水域排出、土壌排出したときと比較して何倍のインパクトになるかを相対評価している。廃棄物については、廃棄物重量を埋立容積に換算する係数を特性化係数として用いた。これらの特性化

係数は、LIME2 特性化係数リスト<sup>4)</sup>に提供されているものを活用した。

## 2.5 ダイオキシン類と臭素化難燃剤の特性化手法

塩素化ダイオキシン類とコプラナ PCB 類については、LIME2 には 2378-テトラクロロジベンゾジオキシン (2378-TeCDD) のみの特性化係数が掲載されているので、それ以外の異性体は TEF で 2378-TeCDD に等価毒性換算して特性化した。また臭素化ダイオキシン類については、1 mol の 2378-TeBDD が 1 mol の 2378-TeCDD と毒性が等価として塩素化ダイオキシン類の TEF を準用し、等価毒性換算してから特性化した。

さらに、PBDEs では研究例が少なく、ダイオキシン類とは毒性発現機構が異なるため TEF が存在しない。LIME2 では DecaBDE のみの特性化係数が示されている。したがって、OctaBDE、PentaBDE を評価するには、DecaBDE との毒性および環境排出後の挙動の相対的な差異を定量化し、DecaBDE に換算する必要がある。そこで、PBDEs の NOAEL (No Observed Adverse Effect Level) の逆数にて毒性評価することと摂取比率比を考慮して DecaBDE に等価毒性換算してから DecaBDE の特性化係数を用いることで、式(1)(2)により特性化した。

$$\begin{aligned} \text{OctaBDE 換算排出量} &= \text{OctaBDE 実排出量} \\ &\times (\text{OctaBDE 摂取比率} / \text{DecaBDE 摂取比率}) \\ &\times (\text{DecaBDE} \cdot \text{NOAEL} / \text{OctaBDE} \cdot \text{NOAEL}) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{PentaBDE 換算排出量} &= \text{PentaBDE 実排出量} \\ &\times (\text{PentaBDE 摂取比率} / \text{DecaBDE 摂取比率}) \\ &\times (\text{DecaBDE} \cdot \text{NOAEL} / \text{PentaBDE} \cdot \text{NOAEL}) \end{aligned} \quad (2)$$

PBDEs の毒性に関しては、御産業技術総合研究所 化学物質リスク管理研究所の調査によれば、ヒトへの BDEs 曝露による皮膚および眼刺激性、短期および長期投与毒性についての情報に基づく有害性評価値は見あたらないが、PBDEs の動物での長期投与試験では、肝臓、甲状腺、腎臓、脾臓、リンパ器官に有害影響がみられた。この中で、DecaBDE、OctaBDE、PentaBDE に共通して影響が見られた肝臓への影響を共通指標として NOAEL がまとめられている。DecaBDE では肝臓の血栓症と変性を、OctaBDE に関しては肝酵素誘導・肝臓の病理組織学的変化を、PentaBDE に関しては肝細胞肥大をとりあげ、NOAEL は、DecaBDE で 1.120 mg/kg/日、OctaBDE で 0.77 mg/kg/日、PentaBDE で 0.1

mg/kg/日が推定されている<sup>10)</sup>。

また、PBDEs を大気に排出したときの各物質の摂取比率については、平井らの研究データを活用した<sup>11)</sup>。この研究では PBDEs の環境中での脱臭素化反応および PBDFs の生成を考慮しているため、排出時の物質のみならず、それらが低臭素化した物質の摂取比率も示しているが、ここではモデルの精度を考慮して低臭素化反応は考慮しないこととし、DecaBDE 摂取比率は  $3.29 \times 10^{-5}$  を、OctaBDE 摂取比率は  $2.32 \times 10^{-3}$  を、PentaBDE 摂取比率は  $7.53 \times 10^{-3}$  を採用した。

## 2.6 被害評価と統合化

単一の指標に向けた統合化を行うための前段階として、LIME2 では、「人間健康」、「社会資産」、「生物多様性」、「一次生産」の 4 つの保護対象ごとに被害量を評価する。人間健康では障害調整生存年 DALY (Disability Adjusted Life Year) を、社会資産では資源や農産物、水産物等が受ける影響を包括的に計量する経済指標 (円) を、生物多様性では生物種絶滅リスクを算定する EINES (Expected Increase in Number of Extinct Species) を、一次生産では生態系の豊かさを表わす指標として NPP (Net Primary Production) を被害指標として定義している。

なお、有害化学物質の中で重金属類は各々の被害評価係数を用いて被害量を算出した。塩素化ダイオキシン類、コプラナ PCB 類および臭素化ダイオキシン類については、2378-TeCDD のみの被害評価係数が LIME2 に掲載されているので、それ以外の異性体は各々の TEF を 2378-TeCDD の被害評価係数に乗じて、各異性体の被害評価係数として被害評価を実施した。PBDEs も DecaBDE のみの被害評価係数が示されているので、OctaBDE、PentaBDE は DecaBDE に特性化してから DecaBDE の被害評価係数を用いて被害評価を行った。また、廃棄物に関する社会資産被害は、土地を埋立地に使用したことで、将来他に利用する機会を失ったことへの損失評価額を意味している。

こうして得られた 4 つの保護対象間に重みづけを行い、単一指標に統合化するために、LIME2 では日本国民を対象としたアンケート調査を実施している。全国で 1,000 件の訪問面接調査が行われ、その回答を統計解析することで個人の支払い意思額の代表値を算出している。これを基に人間健康、社会資産、生物多様性、一次生産の各保護対象ごとにその経済換算係数を定め、それぞれの被害量と積和することにより単一指標が算出できる。なお、統合化係数としては、人間健康には  $1.47 \times 10^7$  円/DALY、社会資産には 1 円/円、一次生産には 46.2 円/kg、生物多様性には  $1.42 \times 10^{13}$  円/種を用いている<sup>8)</sup>。

### 3. 各プロセスのモデル化

各プロセスの主要パラメータを表2に示す。

#### 3.1 収集・運搬プロセス

収集プロセスは、ASRを発生地（シュレッダー事業者）から処理施設まで運搬するものとした（往復245 km）。運搬プロセスは、ASRまたは焼却残渣、溶融飛灰を最終処分場へ運搬するものと、スラグ・メタルを利用先へ運搬するものとした（ASRは往復174 km、焼却残渣、溶融飛灰、スラグ、メタルは往復20 km）。なお、溶融飛灰を山元還元するときは還元先まで運搬するものとした（往復20 km）。

ASRの収集・運搬には、10 ton ダンプ車（ディーゼルエンジン、NO<sub>x</sub> 原単位：2.29 g-NO<sub>2</sub>/km、軽油中硫黄：0.398%、燃費3.5 km/L、積載量8 ton）を用い、焼却残渣、溶融飛灰、スラグ・メタルの運搬には、4 ton ダンプ車（ディーゼルエンジン、NO<sub>x</sub> 原単位：1.45 g-NO<sub>2</sub>/km、軽油中硫黄：0.398%、燃費6.5 km/L、積載量

4 ton）を用いると想定し、軽油燃焼に伴うCO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>の排出量を求めた<sup>12,13)</sup>。

#### 3.2 焼却プロセス

焼却プロセスは、処理対象物の焼却・減容化を行い、回収熱を用いた発電を行う。排ガス処理は、バグフィルター＋消石灰吹込み、触媒反応塔の組み合わせとした。焼却プロセスでは、廃棄物燃焼によるCO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、ダイオキシン類とその類縁化合物、重金属類の大気への排出、施設の電力消費（発電）によるCO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>の排出を計上した。助燃剤燃焼によるCO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>の大気への排出も計上した。

ASRそのものの焼却時における臭素化難燃剤、臭素化ダイオキシン類や重金属類等の有害物質の挙動に関する情報を収集できなかったため、下記の方法により求めた。すなわちPCDDs/DFs、Co-PCBs、PBDDs/DFs、PBDEsに関しては、PBDEsをASRと同程度含有した可燃ごみと廃テレビケーシング破砕物（1%）の混合ごみを、ダイオキシン対策後の小型焼却炉（15 ton/8 h×2

表2 各プロセスの主要パラメーター一覧表

| プロセス            | 項目                            |                       | 単位                       | 数値                     | 根拠       |          |
|-----------------|-------------------------------|-----------------------|--------------------------|------------------------|----------|----------|
| 収集              | ASR 収集車（10 ton）軽油燃費           |                       | km/L                     | 3.5                    | 参考文献 12) |          |
|                 | 軽油中硫黄含有量                      |                       | %                        | 0.398                  | 参考文献 12) |          |
| 焼却              | 窒素酸化物排出量                      |                       | g-NO <sub>2</sub> /km    | 2.29                   | 参考文献 12) |          |
|                 | 電力消費原単位                       |                       | kWh/ton-ASR              | 205                    | 参考文献 19) |          |
|                 | 重油消費原単位                       |                       | L/ton-ASR                | 0.34                   | 参考文献 12) |          |
|                 | 焼却灰発生原単位                      |                       | kg/ton-ASR               | 342                    | 今回設定     |          |
|                 | 焼却飛灰発生原単位                     |                       | kg/ton-ASR               | 41                     | 今回設定     |          |
|                 | 発電効率                          |                       | %                        | 15.5                   | 今回設定     |          |
| 溶融              | 電力消費原単位                       |                       | kWh/ton-ASR              | 320                    | 稼働炉実績    |          |
|                 | コークス消費原単位                     |                       | kg/ton-ASR               | 170                    | 参考文献 2)  |          |
|                 | 石灰石消費原単位                      |                       | kg/ton-ASR               | 75                     | 参考文献 2)  |          |
|                 | LPG 消費原単位                     |                       | Nm <sup>3</sup> /ton-ASR | 7.6                    | 稼働炉実績    |          |
|                 | 溶融スラグ発生原単位                    |                       | kg/ton-ASR               | 257                    | 参考文献 2)  |          |
|                 | 溶融メタル発生原単位                    |                       | kg/ton-ASR               | 129                    | 参考文献 2)  |          |
|                 | 溶融飛灰発生原単位                     |                       | kg/ton-ASR               | 45                     | 参考文献 2)  |          |
|                 | 発電効率                          |                       | %                        | 15.5                   | 稼働炉実績    |          |
| 運搬              | 最終処分場および資源化物運搬車（4 ton）軽油燃費    |                       | km/L                     | 6.5                    | 参考文献 12) |          |
|                 | 軽油中硫黄含有量                      |                       | %                        | 0.398                  | 参考文献 12) |          |
|                 | 窒素酸化物排出量                      |                       | g-NO <sub>2</sub> /km    | 1.45                   | 参考文献 12) |          |
| 埋立              | 電力消費原単位                       |                       | kWh/ton-埋立物              | 64.5                   | 参考文献 12) |          |
|                 | 重機使用による軽油消費原単位                |                       | L/ton-埋立物                | 0.62                   | 参考文献 12) |          |
|                 | 重機使用による NO <sub>x</sub> 排出原単位 |                       | g-NO <sub>2</sub> /L     | 0.88                   | 参考文献 12) |          |
|                 | 埋立地での炭素ガス化率                   |                       | %                        | 0                      | 今回設定     |          |
|                 | 埋立地でのメタン比率                    |                       | %                        | 0                      | 今回設定     |          |
|                 | 埋立地での窒素→亜酸化窒素変換率              |                       | %                        | 0.3                    | 参考文献 22) |          |
|                 | 山元還元                          | 抽出工程                  | 塩酸消費量                    | ton/ton 飛灰             | 0.83     | 参考文献 24) |
|                 |                               | 塩化揮発工程                | 焙焼消費電力                   | kWh/ton 飛灰             | 47.9     | 参考文献 24) |
| 塩化揮発消費電力        |                               |                       | kWh/ton 飛灰               | 28.6                   | 参考文献 24) |          |
| 転炉ガス（CO 30%）消費量 |                               |                       | Nm <sup>3</sup> /ton 飛灰  | 13.4                   | 参考文献 24) |          |
| 再資源化物           |                               | Zn                    | kg/ton 飛灰                | 17.7                   | 参考文献 24) |          |
|                 |                               | Pb                    | kg/ton 飛灰                | 5.2                    | 参考文献 24) |          |
|                 |                               | Cu                    | kg/ton 飛灰                | 3.8                    | 参考文献 24) |          |
| 商業電力            |                               | CO <sub>2</sub> 排出原単位 |                          | g-CO <sub>2</sub> /kWh | 561      | 参考文献 25) |
|                 | NO <sub>2</sub> 排出原単位         |                       | g-NO <sub>2</sub> /kWh   | 0.45                   | 参考文献 13) |          |
|                 | SO <sub>2</sub> 排出原単位         |                       | g-SO <sub>2</sub> /kWh   | 0.40                   | 参考文献 13) |          |
|                 | 重金属類排出原単位                     | Cd                    | μg/kWh                   | 0.012                  | 参考文献 27) |          |
|                 |                               | Cr                    | μg/kWh                   | 0.42                   | 参考文献 27) |          |
|                 |                               | Pb                    | μg/kWh                   | 0.90                   | 参考文献 27) |          |
|                 |                               | Hg                    | μg/kWh                   | 1.10                   | 参考文献 27) |          |
|                 |                               | As                    | μg/kWh                   | 0.44                   | 参考文献 27) |          |

表3 焼却・溶融における重金属類の移行率  
(単位: %)

|     |     | 焼却移行率    | 溶融移行率   |
|-----|-----|----------|---------|
| Cd  | 排ガス | 1.3      | 1.7     |
|     | 主灰  | 44.0     | —       |
|     | 飛灰  | 54.8     | 98.3    |
|     | スラグ | —        | 0       |
|     | メタル | —        | 0       |
| Cr  | 排ガス | 0.12     | 9.9     |
|     | 主灰  | 79.0     | —       |
|     | 飛灰  | 20.9     | 0       |
|     | スラグ | —        | 0       |
|     | メタル | —        | 90.1    |
| Cu  | 排ガス | 0.060    | 0.00032 |
|     | 主灰  | 86.0     | —       |
|     | 飛灰  | 13.9     | 0.85    |
|     | スラグ | —        | 2.4     |
|     | メタル | —        | 96.8    |
| Pb  | 排ガス | 0.050    | 0.0065  |
|     | 主灰  | 62.0     | —       |
|     | 飛灰  | 38.0     | 90.6    |
|     | スラグ | —        | 0.60    |
|     | メタル | —        | 8.7     |
| Hg  | 排ガス | 3.3      | 57.9    |
|     | 主灰  | 0        | —       |
|     | 飛灰  | 96.7     | 42.1    |
|     | スラグ | —        | 0       |
|     | メタル | —        | 0       |
| Zn  | 排ガス | 0.010    | 0.0013  |
|     | 主灰  | 50.0     | —       |
|     | 飛灰  | 50.0     | 97.2    |
|     | スラグ | —        | 0.69    |
|     | メタル | —        | 2.1     |
| As  | 排ガス | 0.40     | 3.0     |
|     | 主灰  | 40.0     | —       |
|     | 飛灰  | 59.6     | 30.4    |
|     | スラグ | —        | 0       |
|     | メタル | —        | 66.5    |
| 根 拠 |     | 参考文献 17) | 参考文献 2) |

系列)で焼却したときの試験結果報告の文献値<sup>14)</sup>を用いて推計した。また重金属類については、ASR中の含有量と文献値<sup>4,15-17)</sup>を参考にして求めた重金属別の移行率を用いて算出した。特に排ガスへの移行率は、乾式処理でのデータが収集できなかったため、ダイオキシ対策後の湿式処理での値を用いた(表3)。産廃焼却時の発電効率については、環境省の委託調査<sup>18)</sup>によれば、ほとんど0に近いものから17%程度までとばらつき、一廃との混焼を含めた全国平均でも約7%と低いが、この検討では次に示すガス化溶融炉の実績値(15.5%)と同じレベルに合わせた。また消費電力については、東京二十三区清掃一部事務組合の焼却炉稼働実績の平均値を用いた<sup>19)</sup>。

### 3.3 ガス化溶融プロセス

ガス化溶融プロセスは、実績のあるシャフト炉式ガス化溶融炉を取り上げ処理対象物の溶融・資源化を行い、回収熱を用いた発電を行う。排ガス処理は、バグフィルター+消石灰吹込、触媒反応塔の組み合わせとした。ASRの溶融処理試験において有害物質の挙動を詳細に調査した結果<sup>2)</sup>を基に、ガス化溶融プロセスにおけるPCDDs/DFs、Co-PCBs、PBDDs/DFs、PBDEsおよび重

金属類の排ガス、スラグ、メタル、溶融飛灰への移行率を算出し、インベントリを定めた。本プロセスでは、高温還元雰囲気の影響で低沸点物は揮発し、メタルとして高沸点のFe、Cu、Crが回収される。揮発したZn、Pb、Cdは大半が溶融飛灰に移行するという特性を有する。

また、ASRの溶融処理において使用するコークスや石灰石等の副資材や助燃剤を含め、ASRの燃焼に伴って排出されるCO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>等についても試験結果に基づき算出した<sup>2)</sup>。コークスについては製造時に発生するCO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>等を、また石灰石については採掘に伴うCO<sub>2</sub>排出を考慮した<sup>20,21)</sup>。ただし、溶融試験では把握できない、ガス化溶融施設全体の発電効率や消費電力についてはASRを溶融処理している実機施設のデータを用いた。

### 3.4 埋立プロセス

埋立プロセスは、ASRを直接、または焼却残渣、溶融飛灰を最終処分場に埋め立て、浸出水処理を行うものとし、重機使用によるCO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>の排出、浸出水経路で水系に排出される重金属類を計上した。また、最終処分場からのN<sub>2</sub>Oの排出量の算出に関しては、焼却残渣主体の埋立地における亜酸化窒素の発生機構に関する研究結果<sup>22)</sup>に示されるN<sub>2</sub>Oへの転換率を準用した。

ASRからの重金属類の浸出量に関しては、ASRの溶出試験結果<sup>1)</sup>と含有量試験結果<sup>1)</sup>をもとに式(3)により浸出率を求め、ASR中の重金属含有量に乘じて算出した。

$$\text{浸出率(\%)} = \text{溶出液中重金属濃度(mg/L)} \times \text{L/S} \div \text{含有量試験結果(mg/kg)} \times 100 \quad (3)$$

深さが10mの最終処分場で降水量が1,500mm/年のケースを想定してみる。降水量の2/3が浸透して浸出水になるとし、廃棄物の比重を1ton/m<sup>3</sup>とすると、1年間で廃棄物層厚10m(10ton)に対して浸出水が1ton出ることになり、L/S(液固比)は0.1になる。溶出試験はL/S=10で実施されているので、式(3)を用いて算出された重金属類の浸出量は、100年分の総浸出量に相当することになる。

ASR焼却残渣の浸出率に関しては実測値が入手できないので、影響が大きいと想定されるPb、Cdについて、焼却灰およびキレートで無害化した焼却飛灰に関する溶出試験および含有量試験結果の文献値<sup>23)</sup>を用いて浸出率を算出し、他の重金属類については、焼却灰はASRの浸出率を準用、焼却飛灰は溶融飛灰の浸出率を準用し、それぞれ焼却灰および焼却飛灰中の重金属含有量に乘じて浸出量を算出した(表4)。

ASR溶融処理時の溶融飛灰については、実機での無害化処理飛灰を入手して、溶出試験と含有量試験を実施

表4 埋立における重金属類浸出率  
(単位 %)

|      |    | 埋立浸出率   | 根拠             |
|------|----|---------|----------------|
| ASR  | Cd | 1.4     | 参考文献1)を基に今回設定  |
|      | Cr | 0.052   | 参考文献1)を基に今回設定  |
|      | Cu | 0.010   | 参考文献1)を基に今回設定  |
|      | Pb | 0.56    | 参考文献1)を基に今回設定  |
|      | Hg | 3.6     | 参考文献1)を基に今回設定  |
|      | Zn | 0.74    | 参考文献1)を基に今回設定  |
|      | As | 4.0     | 参考文献1)を基に今回設定  |
| 焼却主灰 | Cd | 0.40    | 参考文献23)を基に今回設定 |
|      | Cr | 0.052   | ASRの数値を準用      |
|      | Cu | 0.010   | ASRの数値を準用      |
|      | Pb | 0.11    | 参考文献23)を基に今回設定 |
|      | Hg | 3.6     | ASRの数値を準用      |
|      | Zn | 0.74    | ASRの数値を準用      |
|      | As | 4.0     | ASRの数値を準用      |
| 焼却飛灰 | Cd | 0.18    | 参考文献23)を基に今回設定 |
|      | Cr | 0.97    | 溶融飛灰の数値を準用     |
|      | Cu | 0.00010 | 溶融飛灰の数値を準用     |
|      | Pb | 0.033   | 参考文献23)を基に今回設定 |
|      | Hg | 3.3     | 溶融飛灰の数値を準用     |
|      | Zn | 0.19    | 溶融飛灰の数値を準用     |
|      | As | 0.063   | 溶融飛灰の数値を準用     |
| 溶融飛灰 | Cd | 0.019   | 表5を基に今回設定      |
|      | Cr | 0.97    | 表5を基に今回設定      |
|      | Cu | 0.00010 | 表5を基に今回設定      |
|      | Pb | 0.00010 | 表5を基に今回設定      |
|      | Hg | 3.3     | 表5を基に今回設定      |
|      | Zn | 0.19    | 表5を基に今回設定      |
|      | As | 0.063   | 表5を基に今回設定      |

表5 溶融飛灰の浸出率算出結果

|    | 溶出量試験結果<br>(mg/L) | 含有量試験結果<br>(mg/kg) | 浸出率<br>(%) |
|----|-------------------|--------------------|------------|
| Cd | <0.001            | 52                 | 0.019      |
| Cr | 0.30              | 310                | 0.97       |
| Cu | <0.001            | 7,000              | 0.0001     |
| Pb | <0.001            | 11,000             | 0.0001     |
| Hg | <0.0001           | 0.03               | 3.3        |
| Zn | 8.0               | 42,000             | 0.19       |
| As | <0.001            | 16                 | 0.063      |

\* 溶出試験は環境庁告示13号(L/S=10)による

した。この結果を表5に示すが、これを基に式(3)により浸出率を求め、ASR溶融飛灰中の重金属含有量に乘じて浸出量を算出した。

こうして算出した各重金属類の浸出量を100 tonの浸出水量で除した値を排水濃度と見なし、この値が環境省の一律排水基準(健康項目および生活環境項目)に示される重金属類の許容限度を遵守するように浸出水処理されるものとした。すなわち、一律排水基準を超えている場合は、これをクリアするまで浸出量を低減させた。

### 3.5 代替プロセス

#### 3.5.1 溶融飛灰資源化(山元還元)プロセス

本プロセスは、溶融飛灰を塩化揮発処理により、精錬プロセスに供給できる品位に非鉄金属類を濃縮して回収することとした。

本プロセスの実機調査<sup>24)</sup>における調査を基に塩化揮発処理に伴うCO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、ダイオキシン類の大気への

排出および沈殿ろ過水経由で水系に排出される重金属類、およびダイオキシン類を算出した。また施設の電力消費によるCO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、重金属類の排出量を算出した。

#### 3.5.2 砂供給プロセス

本プロセスでは、砂採掘工場における掘削、破碎、整粒時の重機使用による燃料消費、電力消費に伴うCO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、重金属類の大気への排出量を計上した。原単位は、年間222万tonの生産規模の砕石工場をヒアリング調査した結果に基づく。なお、軽油消費原単位は0.88 L/ton-砂、電力消費原単位は5.6 kWh/ton-砂であった。

#### 3.5.3 非鉄原料供給プロセス

本プロセスでは、非鉄精錬工場における非鉄原料のうち銅、亜鉛、鉛の生産および電力消費に伴うCO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、重金属類の大気への排出量を計上した<sup>12)</sup>。

#### 3.5.4 電力供給プロセス

本プロセスでは、CO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>および重金属類の大気への排出を計上した。

電気のCO<sub>2</sub>換算係数は、経済産業省および環境省が確認して電気事業者別のCO<sub>2</sub>排出係数とともに公表している代替値を用いた<sup>25)</sup>。これは、廃棄物処理施設の基幹的設備改良事業において、ごみ発電によるCO<sub>2</sub>排出削減量を算出するときに地域間格差を生じないように全国一律のCO<sub>2</sub>排出係数として使用することが定められたものである<sup>26)</sup>。NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>は、電力中央研究所の報告書から引用した<sup>13)</sup>。また、重金属類の大気への排出は石炭火力に由来するものとし電力中央研究所の報告書を基に石炭火力発電比率25%にして算出した<sup>27)</sup>。なお、CuとZnはデータがないために評価していない。

## 4. 評価結果と考察

各シナリオ別の全プロセスのインベントリー評価結果を表6に示す。

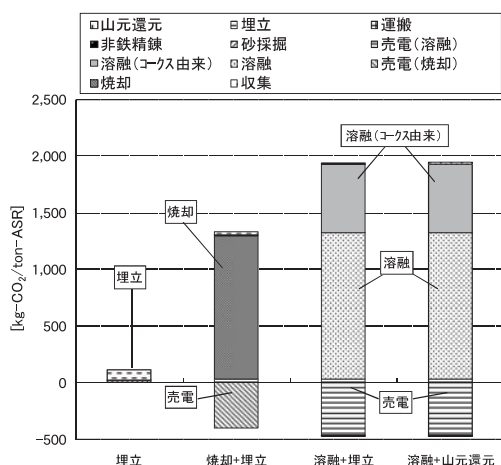
### 4.1 各影響領域内の特性化結果

#### 4.1.1 地球温暖化

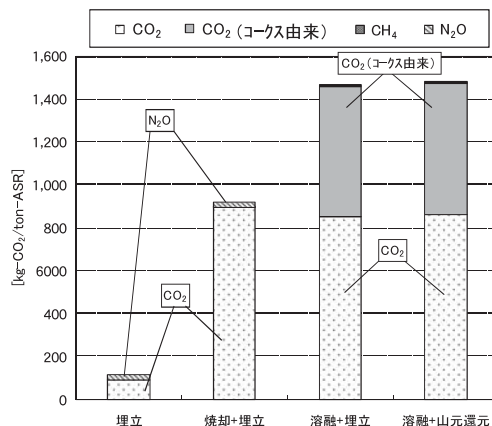
地球温暖化に関する特性化結果を図2(a)(b)に示す。地球温暖化においては、埋立で最も影響が小さく、次いで焼却+埋立、溶融+埋立と溶融+山元還元がほぼ同じで、これに続く結果となった。ASR中のプラスチック等の比率が高く、焼却起因のCO<sub>2</sub>が多いため、余剰電力売却による削減効果はあるものの、これを打ち消すには至らなかったことが、埋立より他の3つのシナリオの方が高かった主たる要因と考えられる。溶融では図中に示すようにコークスを使用している分、さらにCO<sub>2</sub>が多くなった。

表6 シナリオ別のインベントリ評価結果

| プロセス  | インパクトカテゴリ  | サブカテゴリ                           | 単位                  | シナリオ1<br>埋立 | シナリオ2<br>焼却+埋立 | シナリオ3<br>溶融+埋立 | シナリオ4<br>溶融+山元還元 |
|-------|------------|----------------------------------|---------------------|-------------|----------------|----------------|------------------|
| 収集    | 地球温暖化      | CO <sub>2</sub> 排出量 (軽油)         | kg-CO <sub>2</sub>  |             | 2.44E+01       | 2.44E+01       | 2.44E+01         |
|       | 酸性化        | SO <sub>2</sub> 排出量 (軽油)         | g-SO <sub>2</sub>   |             | 5.77E+01       | 5.77E+01       | 5.77E+01         |
|       |            | NO <sub>x</sub> 排出量 (軽油)         | g-NO <sub>x</sub>   |             | 7.01E+01       | 7.01E+01       | 7.01E+01         |
| 焼却・溶融 | 地球温暖化      | CO <sub>2</sub> 排出量 (ASR 焼却・溶融)  | kg-CO <sub>2</sub>  |             | 1.24E+03       | 1.24E+03       | 1.24E+03         |
|       |            | CO <sub>2</sub> 排出量 (重油)         | kg-CO <sub>2</sub>  |             | 8.41E+00       |                |                  |
|       |            | CO <sub>2</sub> 排出量 (コークス)       | kg-CO <sub>2</sub>  |             |                | 5.29E+02       | 5.29E+02         |
|       |            | CO <sub>2</sub> 排出量 (石灰石)        | kg-CO <sub>2</sub>  |             |                | 3.30E+01       | 3.30E+01         |
|       |            | CO <sub>2</sub> 排出量 (LPG・軽油)     | kg-CO <sub>2</sub>  |             |                | 2.21E+01       | 2.21E+01         |
|       |            | CO <sub>2</sub> 排出量 (コークス製造)     | kg-CO <sub>2</sub>  |             |                | 7.75E+01       | 7.75E+01         |
|       |            | CO <sub>2</sub> 排出量 (石灰石製造)      | kg-CO <sub>2</sub>  |             |                | 1.63E-01       | 1.63E-01         |
|       |            | CH <sub>4</sub> 排出量 (ASR 焼却・溶融)  | kg-CH <sub>4</sub>  |             | 2.94E-02       | 1.97E-03       | 1.97E-03         |
|       |            | CH <sub>4</sub> 排出量 (コークス製造)     | kg-CH <sub>4</sub>  |             |                | 1.87E-01       | 1.87E-01         |
|       |            | N <sub>2</sub> O 排出量 (ASR 焼却・溶融) | kg-N <sub>2</sub> O |             | 9.10E-02       | 5.87E-03       | 5.87E-03         |
|       |            | N <sub>2</sub> O 排出量 (コークス製造)    | kg-N <sub>2</sub> O |             |                | 1.00E-03       | 1.00E-03         |
|       |            | CO <sub>2</sub> 排出量 (売電)         | kg-CO <sub>2</sub>  |             | -4.06E+02      | -4.69E+02      | -4.69E+02        |
|       | 酸性化        | SO <sub>x</sub> 排出量 (ASR 焼却・溶融)  | g-SO <sub>x</sub>   |             | 2.52E+03       | 0.00E+00       | 0.00E+00         |
|       |            | NO <sub>x</sub> 排出量 (ASR 焼却・溶融)  | g-NO <sub>x</sub>   |             | 3.50E+03       | 3.50E+03       | 3.50E+03         |
|       |            | SO <sub>x</sub> 排出量 (重油)         | g-SO <sub>x</sub>   |             | 2.84E+01       |                |                  |
|       |            | NO <sub>x</sub> 排出量 (重油)         | g-NO <sub>x</sub>   |             | 0.00E+00       |                |                  |
|       |            | SO <sub>x</sub> 排出量 (コークス)       | g-SO <sub>x</sub>   |             |                | 1.70E+03       | 1.70E+03         |
|       |            | SO <sub>x</sub> 排出量 (砂採掘)        | g-SO <sub>x</sub>   |             |                | -1.50E+00      | -1.50E+00        |
|       |            | NO <sub>x</sub> 排出量 (砂採掘)        | g-NO <sub>x</sub>   |             |                | 0.00E+00       | 0.00E+00         |
|       |            | SO <sub>x</sub> 排出量 (コークス製造)     | g-SO <sub>x</sub>   |             |                | 1.11E+01       | 1.11E+01         |
|       |            | NO <sub>x</sub> 排出量 (コークス製造)     | g-NO <sub>x</sub>   |             |                | 6.93E+01       | 6.93E+01         |
|       |            | SO <sub>x</sub> 排出量 (売電)         | g-SO <sub>x</sub>   |             | -2.92E+02      | -3.40E+02      | -3.40E+02        |
|       |            | NO <sub>x</sub> 排出量 (売電)         | g-NO <sub>x</sub>   |             | -3.28E+02      | -3.80E+02      | -3.80E+02        |
|       | ダイオキシン類排出量 | PCDD/DFs 排出量 (排ガス)               | μg-TEQ              |             | 3.51E-01       | 1.67E-02       | 1.67E-02         |
|       |            | PCDD/DFs 排出量 (排水)                | μg-TEQ              |             | 4.50E-04       | 0.00E+00       | 0.00E+00         |
|       |            | PBDDs/DFs 排出量 (排ガス)              | μg-TEQ              |             | 0.00E+00       | 0.00E+00       | 0.00E+00         |
|       |            | MoBPCDD/DFs 排出量 (排ガス)            | μg                  |             | 1.36E-01       | 2.86E-01       | 2.86E-01         |
|       |            | PBDEs 排出量 (排ガス)                  | μg                  |             | 2.71E+02       | 1.79E+01       | 1.79E+01         |
|       | 重金属類排出量    | Cd 排出量 (排ガス)                     | mg                  |             | 2.51E+01       | 1.10E+02       | 1.10E+02         |
|       |            | Cr 排出量 (排ガス)                     | mg                  |             | 2.48E+01       | 1.10E+02       | 1.10E+02         |
|       |            | Cu 排出量 (排ガス)                     | mg                  |             | 2.51E+01       | 1.10E+02       | 1.10E+02         |
|       |            | Pb 排出量 (排ガス)                     | mg                  |             | 2.45E+01       | 1.09E+02       | 1.09E+02         |
|       |            | Hg 排出量 (排ガス)                     | mg                  |             | 1.18E+01       | 1.09E+02       | 1.09E+02         |
|       |            | Zn 排出量 (排ガス)                     | mg                  |             | 2.51E+01       | 1.10E+02       | 1.10E+02         |
|       |            | As 排出量 (排ガス)                     | mg                  |             | 9.37E-01       | 1.10E+02       | 1.10E+02         |
|       | 地球温暖化      | CO <sub>2</sub> 排出量 (軽油)         | kg-CO <sub>2</sub>  | 1.73E+01    | 8.24E-01       | 9.27E-01       | 9.27E-01         |
|       |            | SO <sub>x</sub> 排出量 (軽油)         | g-SO <sub>x</sub>   | 4.10E+01    | 1.95E+00       | 2.19E+00       | 2.19E+00         |
|       |            | NO <sub>x</sub> 排出量 (軽油)         | g-NO <sub>x</sub>   | 4.97E+01    | 2.78E+00       | 8.82E+00       | 8.82E+00         |
| 埋立    | 地球温暖化      | N <sub>2</sub> O 排出量 (ASR)       | kg-N <sub>2</sub> O | 7.07E-02    | 7.78E-04       | 0.00E+00       | 0.00E+00         |
|       |            | CO <sub>2</sub> 排出量 (電力)         | kg-CO <sub>2</sub>  | 7.24E+01    | 2.77E+01       | 3.28E+00       | 3.28E+00         |
|       |            | CO <sub>2</sub> 排出量 (軽油)         | kg-CO <sub>2</sub>  | 1.73E+00    | 6.64E-01       | 7.85E-02       | 7.85E-02         |
|       | 酸性化        | SO <sub>x</sub> 排出量 (電力)         | g-SO <sub>x</sub>   | 5.20E+01    | 1.99E+01       | 2.36E+00       | 2.36E+00         |
|       |            | NO <sub>x</sub> 排出量 (電力)         | g-NO <sub>x</sub>   | 5.86E+01    | 2.24E+01       | 2.65E+00       | 2.65E+00         |
|       |            | SO <sub>x</sub> 排出量 (軽油)         | g-SO <sub>x</sub>   | 4.10E+00    | 1.57E+00       | 1.86E-01       | 1.86E-01         |
|       |            | NO <sub>x</sub> 排出量 (軽油)         | g-NO <sub>x</sub>   | 5.46E-01    | 2.09E-01       | 2.47E-02       | 2.47E-02         |
|       |            | ダイオキシン類排出量                       | PCDD/DFs 排出量 (排水)   | μg-TEQ      | 1.28E-04       | 4.90E-05       | 5.79E-06         |
|       | 重金属類排出量    | Cd 排出量 (排ガス)                     | mg                  | 1.55E-03    | 5.93E-04       | 7.01E-05       | 7.01E-05         |
|       |            | Cr 排出量 (排ガス)                     | mg                  | 5.42E-02    | 2.08E-02       | 2.45E-03       | 2.45E-03         |
|       |            | Cu 排出量 (排ガス)                     | mg                  | 0.00E+00    | 0.00E+00       | 0.00E+00       | 0.00E+00         |
|       |            | Pb 排出量 (排ガス)                     | mg                  | 1.16E-01    | 4.45E-02       | 5.26E-03       | 5.26E-03         |
|       |            | Hg 排出量 (排ガス)                     | mg                  | 1.42E-01    | 5.44E-02       | 6.43E-03       | 6.43E-03         |
|       |            | Zn 排出量 (排ガス)                     | mg                  | 0.00E+00    | 0.00E+00       | 0.00E+00       | 0.00E+00         |
|       |            | As 排出量 (排ガス)                     | mg                  | 5.68E-02    | 2.18E-02       | 2.57E-03       | 2.57E-03         |
|       |            | Cd 排出量 (排水)                      | mg                  | 8.86E+01    | 3.45E+01       | 1.53E+00       | 1.53E+00         |
|       |            | Cr 排出量 (排水)                      | mg                  | 5.20E-01    | 3.04E+00       | 0.00E+00       | 0.00E+00         |
|       |            | Cu 排出量 (排水)                      | mg                  | 3.32E+03    | 2.86E+03       | 3.76E-01       | 3.76E-01         |
|       |            | Pb 排出量 (排水)                      | mg                  | 9.44E+02    | 3.90E+02       | 2.00E+00       | 2.00E+00         |
|       |            | Hg 排出量 (排水)                      | mg                  | 2.86E+00    | 3.32E+00       | 3.43E+00       | 3.43E+00         |
|       |            | Zn 排出量 (排水)                      | mg                  | 1.93E+04    | 7.59E+03       | 1.11E+03       | 1.11E+03         |
|       |            | As 排出量 (排水)                      | mg                  | 1.40E+02    | 5.77E+01       | 9.00E-01       | 9.00E-01         |
|       |            | 埋立地消費                            | m <sup>3</sup>      | 1.00E+00    | 2.25E-01       | 2.67E-02       |                  |
| 山元還元  | 地球温暖化      | CO <sub>2</sub> 排出量 (焙焼炉)        | kg-CO <sub>2</sub>  |             |                |                | 1.10E+01         |
|       |            | CO <sub>2</sub> 排出量 (塩化揮発)       | kg-CO <sub>2</sub>  |             |                |                | 0.00E+00         |
|       |            | CO <sub>2</sub> 排出量 (電力)         | kg-CO <sub>2</sub>  |             |                |                | 6.16E+00         |
|       |            | CO <sub>2</sub> 排出量 (塩酸製造)       | kg-CO <sub>2</sub>  |             |                |                | 8.44E-05         |
|       |            | CO <sub>2</sub> 排出量 (転炉ガス製造)     | kg-CO <sub>2</sub>  |             |                |                | 1.70E-01         |
|       |            | CO <sub>2</sub> 排出量 (Zn 再資源化)    | kg-CO <sub>2</sub>  |             |                |                | -1.99E+00        |
|       |            | CO <sub>2</sub> 排出量 (Pb 再資源化)    | kg-CO <sub>2</sub>  |             |                |                | -3.00E-01        |
|       |            | CO <sub>2</sub> 排出量 (Cu 再資源化)    | kg-CO <sub>2</sub>  |             |                |                | -2.63E-01        |
|       | 酸性化        | NO <sub>x</sub> 排出量 (焙焼炉)        | g-NO <sub>x</sub>   |             |                |                | 1.07E+01         |
|       |            | NO <sub>x</sub> 排出量 (塩化揮発)       | g-NO <sub>x</sub>   |             |                |                | 4.28E+00         |
|       |            | NO <sub>x</sub> 排出量 (電力)         | g-NO <sub>x</sub>   |             |                |                | 4.99E+00         |
|       |            | NO <sub>x</sub> 排出量 (塩酸製造)       | g-NO <sub>x</sub>   |             |                |                | 6.83E-05         |
|       |            | NO <sub>x</sub> 排出量 (転炉ガス製造)     | g-NO <sub>x</sub>   |             |                |                | 0.00E+00         |
|       |            | NO <sub>x</sub> 排出量 (Zn 再資源化)    | g-NO <sub>x</sub>   |             |                |                | -1.43E+00        |
|       |            | NO <sub>x</sub> 排出量 (Pb 再資源化)    | g-NO <sub>x</sub>   |             |                |                | -7.96E-02        |
|       |            | NO <sub>x</sub> 排出量 (Cu 再資源化)    | g-NO <sub>x</sub>   |             |                |                | -1.53E-01        |
|       |            | SO <sub>x</sub> 排出量 (焙焼炉)        | g-SO <sub>x</sub>   |             |                |                | 3.88E+00         |
|       |            | SO <sub>x</sub> 排出量 (塩化揮発)       | g-SO <sub>x</sub>   |             |                |                | 6.47E-01         |
|       | ダイオキシン類排出量 | PCDD/DFs 排出量 (焙焼炉)               | μg-TEQ              |             |                |                | 1.37E-02         |
|       |            | PCDD/DFs 排出量 (塩化揮発)              | μg-TEQ              |             |                |                | 3.02E-04         |
|       |            | PCDD/DFs 排出量 (排水)                | μg-TEQ              |             |                |                | 1.81E-04         |
|       | 重金属類排出量    | Cd 排出量 (排ガス)                     | mg                  |             |                |                | -4.35E-05        |
|       |            | Cr 排出量 (排ガス)                     | mg                  |             |                |                | -1.52E-03        |
|       |            | Cu 排出量 (排ガス)                     | mg                  |             |                |                | 0.00E+00         |
|       |            | Pb 排出量 (排ガス)                     | mg                  |             |                |                | -3.26E-03        |
|       |            | Hg 排出量 (排ガス)                     | mg                  |             |                |                | -3.99E-03        |
|       |            | Zn 排出量 (排ガス)                     | mg                  |             |                |                | 0.00E+00         |
|       |            | As 排出量 (排ガス)                     | mg                  |             |                |                | -1.60E-03        |
|       |            | Cd 排出量 (排水)                      | mg                  |             |                |                | 0.00E+00         |
|       |            | Cr 排出量 (排水)                      | mg                  |             |                |                | 0.00E+00         |
|       |            | Cu 排出量 (排水)                      | mg                  |             |                |                | 0.00E+00         |
|       |            | Pb 排出量 (排水)                      | mg                  |             |                |                | 5.89E+00         |
|       |            | Hg 排出量 (排水)                      | mg                  |             |                |                | 0.00E+00         |
|       |            | Zn 排出量 (排水)                      | mg                  |             |                |                | 0.00E+00         |
|       |            | As 排出量 (排水)                      | mg                  |             |                |                | 0.00E+00         |

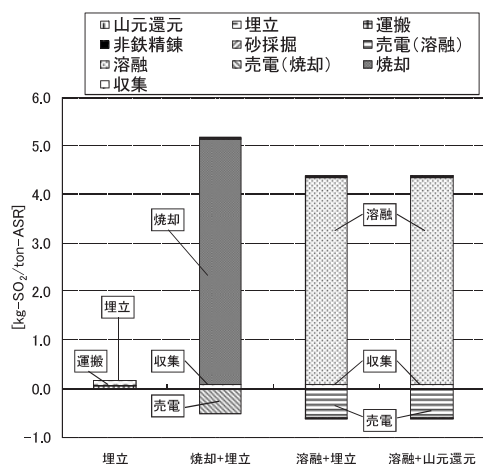


(a) 地球温暖化特性化結果 (プロセス別)

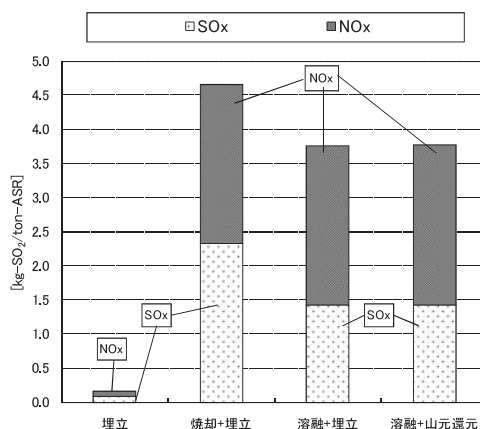


(b) 地球温暖化特性化結果 (構成要素別)

図 2



(a) 酸性化特性化結果 (プロセス別)



(b) 酸性化特性化結果 (構成要素別)

図 3

#### 4.1.2 酸性化

酸性化に関する特性化結果を図3(a)(b)に示す。酸性化においては、埋立が最も小さく、次いで溶融+埋立と溶融+山元還元がほぼ同程度、焼却+埋立が最も大きい結果となった。溶融では石灰石を添加しているため、SOxが焼却より低くなっている。

#### 4.1.3 有害化学物質 (人間毒性)

##### (1) 発がん (図4)

大気への排出では埋立が最も小さく、次いで焼却+残渣埋立が、さらに溶融+山元還元と溶融+埋立がほぼ同じで最も大きい結果となった。水域への排出では逆に、溶融+山元還元と溶融+埋立が非常に少なく、焼却+埋立、埋立の順で大きくなった。なお、大気への重金属類の排出は、焼却と溶融いずれも検出限界値以下であった

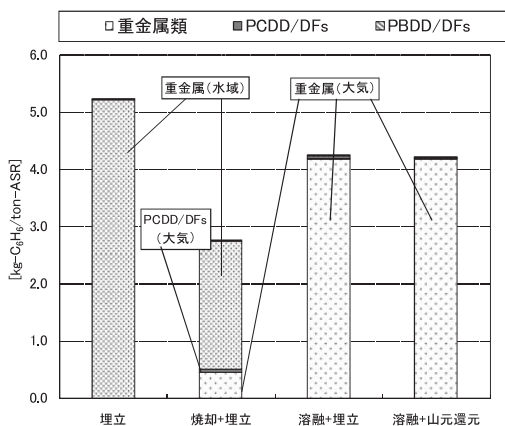


図 4 有害化学物質発がん特性化結果 (大気+水域、構成要素別)

が、検出限界値を用いて評価しているため、分析時の検出限界値が高かった溶融の方が排出は大きいという結果になった。

#### (2) 慢性疾患 (図5)

大気への排出では埋立が最も小さく、次いで溶融+山元還元と溶融+埋立が同程度で続き、焼却+埋立が最も大きい結果となった。水域への排出では溶融+山元還元が最も小さく、それに次いで溶融+埋立が少なく、次いで、焼却+埋立、埋立の順に大きくなった。

有害化学物質全体を通じては、慢性疾患に及ぼす大気への排出でPBDEsが影響していること以外は、重金属類の排出の影響が大きかった。特に水域への排出は、埋立処分場の浸出水経路のPbの寄与が大きかった。

#### 4.1.4 生態毒性

##### (1) 陸生生物への有害性 (図6)

大気への排出では埋立が最も小さく、次に焼却+埋立、これに次いで溶融+山元還元、溶融+埋立が同程度で大

きいという結果になった。水域への排出では、絶対値はいずれも非常に小さい値であるが、その中では溶融+山元還元が最も小さく、次いで溶融+埋立が続き、焼却+埋立、埋立の順で大きくなった。

##### (2) 水生生物への有害性 (図7)

大気への排出では埋立が最も小さく、次に焼却+埋立、これに次いで溶融+山元還元、溶融+埋立が同程度で大きいという結果となった。水域への排出では溶融+山元還元が最も低く、次いで溶融+埋立、さらに焼却+埋立、埋立の順で大きくなった。

いずれも重金属の排出が主たる影響因子である。大気への重金属の排出は焼却と溶融ともに検出限界値以下であったが、検出限界値を用いて評価しているため、分析時の検出限界値が高い溶融の方が排出は大きいという結果になった。また重金属の中で、CuとZnはLIME2に特性化係数が示されていないので評価できないことから、影響因子に上がっていない。

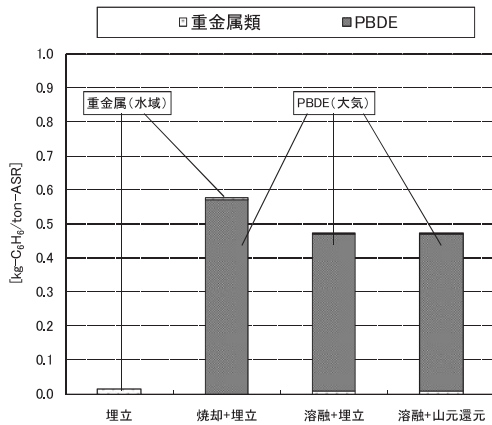


図5 有害化学物質慢性疾患特性化結果 (大気+水域, 構成要素別)

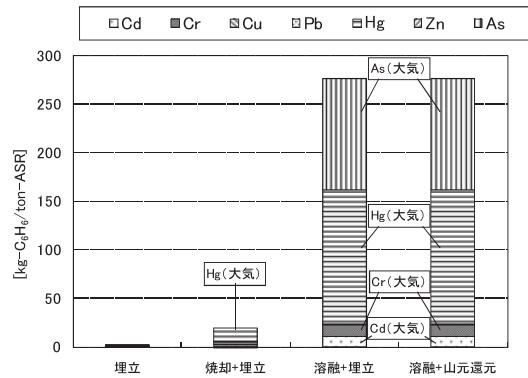


図6 生態毒性陸生生物特性化結果 (大気+水域, 構成要素別)

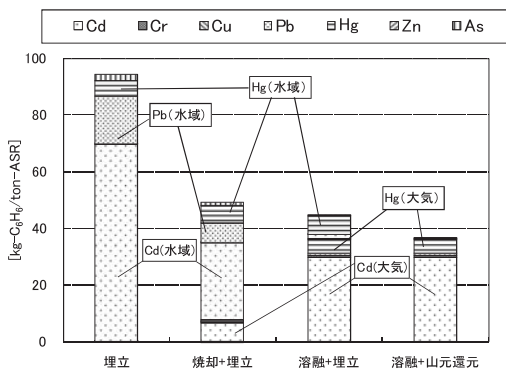


図7 生態毒性水生生物特性化結果 (大気+水域, 構成要素別)

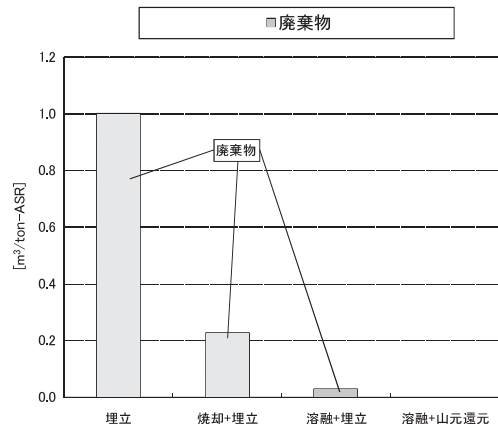


図8 埋立容積特性化結果 (構成要素別)

#### 4.1.5 廃棄物（埋立地消費）(図 8)

廃棄物量を埋立容積に変換して特性化した結果、溶融+山元還元、溶融+埋立、焼却+埋立、埋立の順に大きくなった。各方式の減容効果の差がそのまま現れた結果になった。

### 4.2 被害評価結果

影響領域ごと、保護対象ごとに各排出量により直接、被害量を算出した結果を表 7 に示す。

#### 4.2.1 地球温暖化

地球温暖化は人間健康被害（DALY）と社会資産被害（円）として評価されるが、評価結果はどちらも同じ傾向を示し、特性化結果と同様であった。なお、3つの温室効果ガスの中で、埋立では CH<sub>4</sub> は 0 であり、CO<sub>2</sub> と N<sub>2</sub>O はやや CO<sub>2</sub> の被害量が大きく、焼却+埋立、溶融+埋立、溶融+山元還元では CO<sub>2</sub> の被害量が大きかった。

#### 4.2.2 酸性化

酸性化は社会資産被害（円）と一次生産被害（NPP）として評価されるが、評価結果は同じ傾向を示し、特性化結果と同様であった。なお、酸性ガス間の比較では、埋立は SO<sub>x</sub> の方が、NO<sub>x</sub> より被害量がやや大きく、焼却+埋立、溶融+埋立、溶融+山元還元では NO<sub>x</sub> の方が、SO<sub>x</sub> より被害量がやや大きかった。

#### 4.2.3 有害化学物質（人間毒性）

有害化学物質は人間健康被害（DALY）として評価される。

##### (1) 塩素化ダイオキシン類

埋立で最も小さく、次いで溶融+埋立、溶融+山元還元と続き、焼却+埋立が最も大きいという結果になった。

##### (2) 臭素化ダイオキシン類

排出される臭素化ダイオキシンの中に TEF に対応す

る異性体が存在しないため、等価毒性換算ベースではすべての値が 0 となった。

##### (3) ポリ臭素化ジフェニルエーテル類

評価結果は、埋立は被害量が 0 で、次いで溶融+埋立、溶融+山元還元が同程度、焼却+埋立がやや大きいという結果になった。

##### (4) 重金属類

溶融+山元還元が最も小さく、次いで溶融+埋立と続き、焼却+埋立、埋立の順で大きくなるという結果となり、山元還元の重金属の分離回収効果が現れている。なお、本評価では排出基準を満足しながら少しずつ排出され蓄積した重金属類の総量が与える潜在的な影響を評価していることになる。

#### 4.2.4 生態毒性

生態毒性は生物多様性被害（EINES）として評価される。生態毒性の被害評価結果は、有害化学物質に対する被害評価結果と同様であった。

#### 4.2.5 廃棄物（埋立地消費）

廃棄物は社会資産被害（円）、一次生産被害（NPP）と、生物多様性被害（EINES）で評価される。いずれの被害評価結果も特性化結果と同様であった。

#### 4.2.6 保護対象ごとの被害集約と各々の影響因子

保護対象ごとに各シナリオの被害量を集約したものを図 9～12 に示す。人間健康被害では CO<sub>2</sub> の排出による影響が最も大きく、重金属類（Pb、Cd、As 等）と PBDEs がそれに次ぐ影響因子となっていた。社会資産被害と一次生産被害では廃棄物（埋立地消費）が主たる影響因子となっていた。生物多様性被害では重金属類（Cu、Zn、Pb 等）の排出による影響が大きかった。したがって影響の大きな因子として、廃棄物、重金属類、CO<sub>2</sub> の 3 つがあげられる。図 13 に保護対象ごとにシナリオ間の被害評価の大小関係とその主たる影響因子を整

表 7 被害評価結果

| シナリオ            | 地球温暖化           |                 |                  | 酸性化             |                 | 有害化学物質   |          |          | 生態毒性     |          | 廃棄物      |
|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                 | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | N <sub>2</sub> O | SO <sub>2</sub> | NO <sub>2</sub> | 重金属類     | 塩素化 D    | PBDE     | 重金属類     | 塩素化 D    |          |
| 埋立              |                 |                 |                  |                 |                 |          |          |          |          |          |          |
| 人間健康被害 (DALY)   | 1.20E-05        | 0.00E+00        | 2.76E-06         | —               | —               | 5.65E-05 | 1.43E-10 | 0.00E+00 | —        | —        | —        |
| 社会資産被害 (円)      | 2.95E+01        | 0.00E+00        | 1.03E+01         | 1.05E+01        | 9.34E+00        | —        | —        | —        | —        | —        | 1.52E+04 |
| 一次生産被害 (NPP)    | —               | —               | —                | 2.93E-02        | 2.59E-02        | —        | —        | —        | —        | —        | 2.85E+01 |
| 生物多様性被害 (EINES) | —               | —               | —                | —               | —               | —        | —        | —        | 2.98E-09 | 6.12E-19 | 9.18E-11 |
| 焼却+埋立           |                 |                 |                  |                 |                 |          |          |          |          |          |          |
| 人間健康被害 (DALY)   | 1.17E-04        | 9.62E-08        | 3.58E-06         | —               | —               | 2.44E-05 | 4.70E-08 | 6.75E-05 | —        | —        | —        |
| 社会資産被害 (円)      | 2.88E+02        | 3.57E-01        | 1.33E+01         | 2.54E+02        | 2.80E+02        | —        | —        | —        | —        | —        | 3.42E+03 |
| 一次生産被害 (NPP)    | —               | —               | —                | 7.05E-01        | 7.77E-01        | —        | —        | —        | —        | —        | 6.42E+00 |
| 生物多様性被害 (EINES) | —               | —               | —                | —               | —               | —        | —        | —        | 2.11E-09 | 5.75E-17 | 2.07E-11 |
| 溶融+埋立           |                 |                 |                  |                 |                 |          |          |          |          |          |          |
| 人間健康被害 (DALY)   | 1.91E-04        | 6.18E-07        | 2.68E-07         | —               | —               | 6.26E-06 | 2.21E-09 | 5.48E-05 | —        | —        | —        |
| 社会資産被害 (円)      | 4.71E+02        | 2.29E+00        | 9.96E-01         | 1.55E+02        | 2.80E+02        | —        | —        | —        | —        | —        | 4.05E+02 |
| 一次生産被害 (NPP)    | —               | —               | —                | 4.31E-01        | 7.78E-01        | —        | —        | —        | —        | —        | 7.59E-01 |
| 生物多様性被害 (EINES) | —               | —               | —                | —               | —               | —        | —        | —        | 1.56E-10 | 2.65E-18 | 2.45E-12 |
| 溶融+山元還元         |                 |                 |                  |                 |                 |          |          |          |          |          |          |
| 人間健康被害 (DALY)   | 1.93E-04        | 6.18E-07        | 2.68E-07         | —               | —               | 6.13E-06 | 4.26E-09 | 5.48E-05 | —        | —        | —        |
| 社会資産被害 (円)      | 4.75E+02        | 2.29E+00        | 9.96E-01         | 1.56E+02        | 2.82E+02        | —        | —        | —        | —        | —        | 0.00E+00 |
| 一次生産被害 (NPP)    | —               | —               | —                | 4.32E-01        | 7.81E-01        | —        | —        | —        | —        | —        | 0.00E+00 |
| 生物多様性被害 (EINES) | —               | —               | —                | —               | —               | —        | —        | —        | 8.49E-11 | 5.69E-18 | 0.00E+00 |

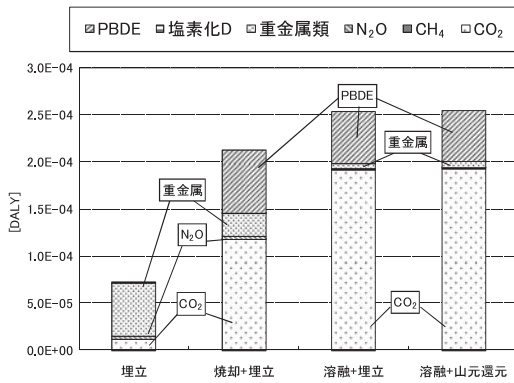


図9 人間健康被害評価結果

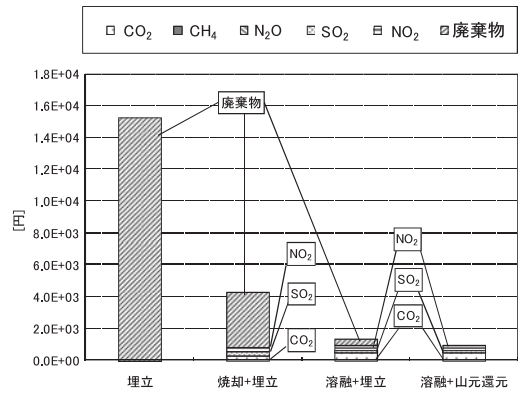


図10 社会資産被害評価結果

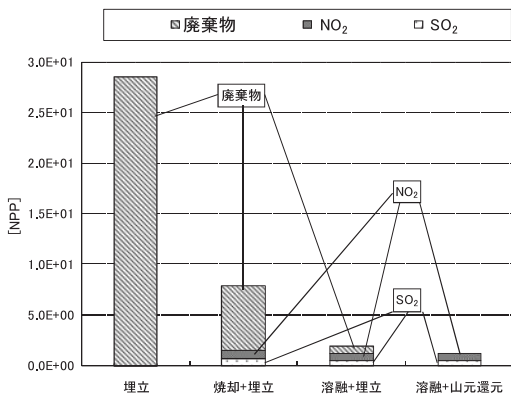


図11 一次生産被害評価結果

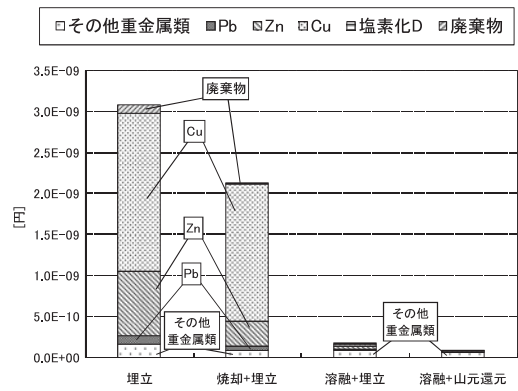


図12 生物多様性被害評価結果

| 保護対象  | シナリオ間の被害評価比較 |   |      |   |      |        | 主たる影響因子 |                                                                                                  |
|-------|--------------|---|------|---|------|--------|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
|       | 埋立           |   | 焼却埋立 |   | 溶融埋立 | 溶融山元還元 |         |                                                                                                  |
| 人間健康  | 小            | < | 中    | < | 大    | =      | 大       | ・ ASR とコークス燃焼による CO <sub>2</sub><br>・ ASR 燃焼に伴う PBDEs の大気排出<br>・ 埋立地から Pb, Cd, As 等の水域への溶出       |
| 社会資産  | 大            | > | 中    | > | 小    | >      | 微小      | ・ ASR と焼却残渣埋立による埋立地消費<br>・ ASR とコークス燃焼による CO <sub>2</sub> , SO <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub> 排出 |
| 一次生産  | 大            | > | 中    | > | 小    | >      | 微小      | ・ 埋立地の土地占有に伴う生産量低下                                                                               |
| 生物多様性 | 大            | > | 中    | > | 小    | >      | 微小      | ・ ASR と残渣埋立に伴う Cu, Zn, Pb 等の水域溶出<br>・ 埋立地の土地占有に伴う生息・生育地の破壊                                       |

\* 図中の等号・不等号は被害評価の大小関係を示す

図13 保護対象毎の被害評価に及ぼす主たる影響因子

理した結果を示す。

#### 4.3 統合化結果

人間健康、社会資産、一次生産、生物多様性の4つの保護対象ごとの被害量の合計に、それぞれの統合化係数を乗じて足し合わせることで、項目間の重みづけを行い、単一指標を導いた。

4つの保護対象で評価した場合は、溶融+山元還元が

最も被害量が少なく、次いで溶融+埋立が続く、焼却+埋立、埋立の順に大きくなるという結果になった（図14(a)(b)）。溶融は埋立や焼却に比べて温室効果ガスの排出が多いものの、重金属類等の排出による人間健康影響が少なくことや埋立地消費が少ないことから被害量の合計は小さくなった。さらに生物多様性（生態毒性）が加わると、重金属類等の排出による生態系への影響がより大きく現れ、その差が大きく広がるという結果になった。

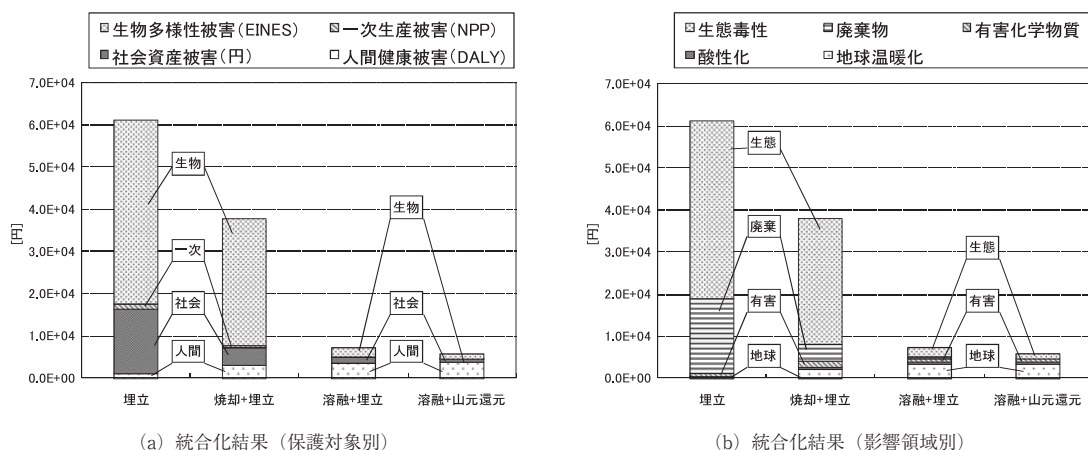


図 14

溶融処理における埋立処分容積削減価値を、CO<sub>2</sub> 排出削減価値とともに評価することの重要性については、(財)地球環境産業技術研究機構システム研究グループの調査報告においても指摘されている<sup>28)</sup>。

現状の ASR 処理費用として定まったものはないが、溶融に対して、焼却は ASR 1 ton あたり 5 千円程度安価、埋立は 1~1 万 5 千円程度安価といわれている。被害評価額は個人の支払い意思額の代表値という形で環境価値を貨幣価値換算したもので、処理費用とは意味合いの異なるものであるが、処理費用の増分と被害評価額の削減との大小関係を比較評価してみた。上記 4 つの保護対象での統合化を行う過程で、それぞれの被害量を経済価値換算した結果、全被害評価額では、溶融に対して焼却が 3 万 1 千円程度高く、埋立は 5 万 4 千円程度高くなっており、その処理費用の差分より被害評価額削減効果が大幅に上回っている。生物多様性被害を除いた評価額で、処理費用の差額がほぼ同じレベルであるという結果になった。

#### 4.4 総合評価

4 つの保護対象で比較すると、シナリオの順位づけに影響しているものは、生物多様性被害が最も大きく、次いで社会資産被害、人間健康被害と続き、一次生産被害が最も影響が小さかった。生物多様性被害への主たる影響因子は、埋立プロセスでの重金属排出であり、特に、Zn, Pb, Cu があげられる。いずれも ASR に多く含まれていて溶出しやすい元素であり、平成 16 年度に実施された 11 事業所からのサンプルでの調査結果に基づくものである。もし今後、Pb 使用の低減努力がなされ<sup>29)</sup>、ASR 中の Pb 濃度がこの 10 分の 1 程度に低減したとすれば、埋立の被害額は約 2 千円下がることになるが、シ

ナリオの順位づけを変えることにはならない。

次の社会資産被害の影響因子は廃棄物であり、埋立量の大小が影響している。これは各シナリオの減容効果がそのまま現れているといえる。廃棄物の社会資産被害評価係数  $1.52 \times 10^4$  円/m<sup>3</sup> が、 $3 \sim 5 \times 10^4$  円/m<sup>3</sup> へと上昇すれば、埋立>焼却+埋立>溶融+埋立の被害額の差はより広がっていく。

人間健康被害に影響する地球温暖化については、余剰電力売却の効果を評価しておく必要がある。溶融では実用施設での実績から発電効率 15.5% としているが、焼却でも溶融と同じ 15.5% を採用したので、ここでの差はないと見てよい。また、CO<sub>2</sub> の被害評価係数の不確実性を考慮して現状の 5 倍になったと仮定すると溶融の被害評価額は 6~7 千円から 1 万 6 千~1 万 7 千円程度になるが、これもシナリオの順位を変えるほどの寄与はない。

以上により、4 つのシナリオの評価においては、埋立物からの重金属の溶出特性、減容効果、CO<sub>2</sub> 排出量等が優劣を決める要因となっているが、重金属の溶出特性と減容効果で溶融が焼却、埋立に勝っており、CO<sub>2</sub> 排出量でのマイナス分を大きく上回っている。また溶融の中では、山元還元を行うことが、このメリットをより高める効果がある。

なお、本検討では、化石燃料等の資源消費に関しては、これに伴う CO<sub>2</sub> 排出として地球温暖化の影響領域で扱っていることから、評価対象に含めなかった。ただし、溶融において使用されるコークス分について、石炭に置き換えて「資源消費」の被害評価額を試算してみたが、一次生産被害、社会資産被害、生物多様性被害を合計しても約 200 円にしかならず、影響は小さなものであった。

冒頭で紹介したイタリアでの LCA 評価<sup>6)</sup>に用いられ

た評価手法 Eco-Indicator 99 では、保護対象として「人間の健康」、「生態系の質」、「資源」の3項目を設定し、それぞれの重みづけを 40, 40, 20% において統合化しているが、人間の健康と生態系の質に重きを置いている点で、LIME2 と似通った傾向を示している。ASR の処理方法の評価結果としても埋立処分量を減らし、エネルギー回収、マテリアル回収の高度化を目指すべきという点で、類似の結果を得ている。ただし、生態系への影響に関しては、詳細は報告されていないが、大気への排出に対する重みづけが大きいいためか、焼却が埋立より大きなインパクトを与えるという結果になっていた。

また永田の提唱する統合化指標 ELP (Environmental Load Point) においては、異なるインパクトカテゴリー間の重要度(重みづけ)は、パネル法にて統合化の係数が定められている<sup>30)</sup>。通常採用される化学系 A 学会一般会員へのアンケートに基づく設定では、地球温暖化、廃棄物処理問題(固形廃棄物の排出量)、生態系への影響の各係数は、それぞれ 0.082, 0.197, 0.107 となっており、概ね 1:2:1 で、廃棄物の排出量に重きが置かれる結果となっている。

## 5. お わ り に

本研究では、ASR の資源化・処理方式に関する 4 つのシナリオ(埋立、焼却+埋立、溶融+埋立、溶融+山元還元)を対象に、地球温暖化、酸性化、有害物質、生態毒性、廃棄物(埋立地消費)の観点から LCA を行い、比較評価して以下の結論を得た。

- (1) 地球温暖化、酸性化、有害物質、生態毒性、廃棄物の観点で評価すると、溶融+山元還元が最も影響が少なく、次いで溶融+埋立が続く、焼却+埋立、埋立の順に大きくなるという結果になった。
- (2) 以上により、溶融は埋立や焼却に比べて温室効果ガスの排出が多いものの、重金属類等の排出による人間健康影響、生態毒性が少ないことや埋立地消費が少ないことから被害量の合計は小さいという評価になった。
- (3) 埋立や焼却との比較において溶融は処理費用は高くなるが、人間健康、社会資産、一次生産量、生物多様性の 4 つ被害評価額の合計の削減効果がその処理費用増分を上回るという結果になった。
- (4) 山元還元は溶融による重金属の分離回収機能を活かし、健康影響、生態系へ影響をさらに低減する有効な手段であるといえる。

## 参 考 文 献

- 1) 勸日本環境衛生センター：平成 16 年度環境省請負業務 ASR の資源化・スラグの有効利用に関する技術検討調査報告書 (2005)
- 2) M. Osada, N. Tanigaki, S. Takahashi and S. Sakai: Brominated Flame Retardants and Heavy Metals in Automobile Shredder Residue (ASR) and their Behavior in the melting process, J. Mater. Cycles Waste Manag., Vol. 10, No. 2, pp. 93-101 (2008)
- 3) 永田勝也, 藤井美文, 伊藤悦子, 出口昭浩, 武藤寛也：廃棄物焼却発電システムの LCA 評価, 日本機械学会第 8 回環境工学総合シンポジウム講演論文集, pp. 156-159 (1998)
- 4) A. Tukker: Life Cycle Assessment for Waste, Part II, A Comparison of Thermal Treatment Processes for Hazardous Waste, Int. J. Life Cycle Assess., Vol. 4, No. 6, pp. 341-351 (1999)
- 5) 松藤敏彦：都市ごみ処理システムの分析・計画・評価——マテリアルフロー・LCA 評価プログラム, 技報堂出版 (2005)
- 6) L. Ciacci, L. Morselli, F. Passarini, A. Santini and I. Vassura: A Comparison among Different Automobile Shredder Residue Treatment Process, Int. J. Life Cycle Assess., Vol. 15, No. 9, pp. 896-906 (2010)
- 7) 伊坪徳宏, 稲葉 敦：ライフサイクル環境影響評価手法, 産業界環境管理協会 (2005)
- 8) 産業界環境管理協会：LIME2 係数リスト (2010 年 7 月 1 日公開, 同 7 月 20 日修正版)  
[http://www.jemai.or.jp/lcaforum/db/01\\_06.cfm](http://www.jemai.or.jp/lcaforum/db/01_06.cfm)  
(閲覧日 2010 年 10 月 25 日)
- 9) 永田勝也, 伊藤悦子, 出口昭浩, 藤井美文：廃棄物焼却発電システムの LCA 評価——運用時を中心とした評価について——, 第 9 回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp. 87-90 (1998)
- 10) 中西準子, 東海明宏, 岩田光夫：詳細リスク評価書シリーズ 23 デカブロモジフェニルエーテル, 丸善株, pp. 161-195 (2008)
- 11) 平井康宏, 佐藤俊一, 酒井伸一：臭素系難燃剤 (BFRs) の環境動態モデルの開発と検証, 平成 18~20 年度科学研究費成果報告書(基盤研究 B, 課題番号 18360436), 残留性化学物質の物質循環フローモデルの開発と検証, 第 2 章, pp. 7-28 (2009)
- 12) 産業界環境管理協会：ライフサイクルアセスメント実施支援ソフトウェア JEMAI-LCA Pro 用オプションデータバック 手引きと解説, 2006 年版 (2006)
- 13) 本藤祐樹, 外岡 豊, 内山洋司：産業連関表を用いた我が国の生産活動に伴う環境負荷の実態分析, 電力中央研究所報告, 研究報告 Y97017 (1998)
- 14) 勸廃棄物研究財団：廃棄物処理過程におけるダイオキシン類緑化合物の挙動と制御に関する研究, 平成 13 年度廃棄物処理等科学研究報告書, pp. 280-308 (2002)
- 15) 中村一夫：製品のライフサイクルからみた飛灰の性状, 廃棄物学会誌, 第 5 巻, 第 1 号, pp. 60-68 (1994)
- 16) P. R. White, M. Franke and P. Hindle: Integrated Solid Waste Management: A Lifecycle Inventory, Blackie Academic & Professional (1996)
- 17) 貴田晶子, 酒井伸一, 芝川重博, 松本暁洋：一般廃棄物焼却炉のダイオキシン類対策に伴う重金属類の排出抑制効果に関する研究, 環境化学, 第 13 巻, 第 1 号, pp. 51-67 (2003)
- 18) ㈱エックス都市研究所：平成 21 年度環境省委託業務廃棄物熱回収施設の設置促進方策に関する調査業務報告書 (2010)
- 19) 東京二十三区清掃一部事務組合：廃プラスチックの

- サーマルリサイクル実施による効果と影響について (2010)
- 20) 産業界環境管理協会: MiLCA 付属インベントリデータベース (IDEA), 2010 年更新版 (2010)
- 21) LCA 日本フォーラム: LCA データベース, 2012 年度 2 版 (2012)
- 22) 立藤綾子, 松藤康司, 花嶋正孝: 焼却残渣主体の埋立地における亜酸化窒素の発生機構に関する研究, 廃棄物学会論文誌, 第 12 巻, 第 6 号, pp. 241-248 (2001)
- 23) 島岡隆行, 於久弘治, 宮脇健太郎, 花嶋正孝, 堀 好弘, 松本克美, 古川清治, 内田敏仁: 廃棄物埋立地における薬剤処理飛灰の有害重金属安定性に関する研究, 廃棄物学会論文誌, 第 9 巻, 第 6 号, pp. 264-273 (1998)
- 24) 早稲田大学環境総合研究センター 溶融飛灰資源化研究会: 平成 20 年度「溶融飛灰資源化事業のシステム評価および情報開示のあり方」に関する調査研究報告書 (2009)
- 25) 環境省報道発表資料 (2009 年 12 月 28 日): 平成 20 年度の電気事業者別排出係数・調整後排出係数等の公表について (お知らせ) (2009)  
http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=11956 (閲覧日 2010 年 10 月 25 日)
- 26) 環境省: 廃棄物処理施設の基幹的設備改良マニュアル, pp. I-9 (2010)  
http://www.env.go.jp/recycle/misc/facility\_improve/manual.pdf (閲覧日 2010 年 10 月 25 日)
- 27) 朝倉一雄, 津崎昌東, 伊藤茂男, 酒田昌弘, 野田直希, 西村 泉, 岩田伸弘: 石炭燃焼に伴う微量物質の挙動と健康リスク評価, 電力中央研究所報告, 総合報告 V01, p. 25 (2006)
- 28) 財地球環境産業技術研究機構 システム研究グループ: 都市ごみ処理の環境影響とコストの総合的評価 (2010)  
http://www.rite.or.jp/Japanese/labo/sysken/about-global-warming/download-data/EIA\_waste\_management.pdf (閲覧日 2010 年 9 月 21 日)
- 29) 酒井伸一: 自動車リサイクルと化学物質管理, 廃棄物資源循環学会誌, 第 21 巻, 第 2 号, pp. 103-110 (2010)
- 30) 永田勝也, 服部君弥, 横田隆一郎, 嬉野通弥生: LCA におけるインパクトアセスメント手法の開発 (その 1) —— 指標統合化のためのカテゴリ重要度の推定について ——, 日本機械学会, 第 5 回環境工学シンポジウム '95 講演論文集, pp. 151-154 (1995)

## Life Cycle Assessment for Treatment and Recycling of Automobile Shredder Residue (ASR)

Morihiro Osada\*, Kazutaka Manako\*\*, Yasuhiro Hirai\*\*\* and Shin-ichi Sakai\*\*\*

\* Environmental Solutions Division, Nippon Steel & Sumikin Engineering Co., Ltd.  
(formerly known as Nippon Steel Engineering Co., Ltd.)

\*\* Technical Planning Department, Nippon Steel & Sumikin Environmental Plant Solutions Corporation  
(formerly known as Nippon Steel Environmental Plant Solutions Co., Ltd.)

\*\*\* Kyoto University, Environment Preservation Research Center

† Correspondence should be addressed to Morihiro Osada:

Environmental Solutions Division, Nippon Steel & Sumikin Engineering Co., Ltd.  
(Osaki Center Building 1-5-1 Osaki, Shinagawa-ku, Tokyo 141-8604 Japan)

### Abstract

A comparative study of ASR treatment and recycling was conducted to evaluate the impact of four scenarios: landfilling, incineration followed by landfilling, melting followed by landfilling and melting followed by heavy metal recovery. Considering global warming, acidification, hazardous chemical substances (human toxicity), eco-toxicity and waste volume (landfill space occupied) as impact categories, the life cycle impact of each scenario was assessed based on an inventory of data obtained from the melting treatment of ASR and other processes and by making use of evaluation coefficients given in LIME2, which is a new version of LIME (Life cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling). Melting had the demerit of emitting more greenhouse gas than landfilling or incineration, but its merits of causing less damage to human health due to its smaller discharge of heavy metals and of requiring less space for landfilling outweighed this demerit. The difference between the merits and the demerit was larger when their effects on the ecosystem (biological diversity) were considered. It was found that the heavy metal recovery of fly ash in the melting process had a significant impact on the suppression of heavy metal discharge.

**Keywords:** life cycle assessment (LCA), automobile shredder residue (ASR), melting treatment, heavy metal, brominated flame retardants (BFR)