研究ノート

廃自動車シュレッダーダスト（ASR）に含まれるパラジウムの調査

古山 隆・大矢 仁史

1．はじめに

日本において自動車は「一家に一台」から「一人に一台」と言われるようになり、保有台数は2010年で75,361,876台[1)]となっている。また、販売台数についてはリーマンショック以降減少し、2008年が5,082,235台であったのに対して2009年は4,609,256台、2010年は4,956,136台となっている[2)]。このような状況と平行して、高騰を続ける原油価格や着実に浸透しつつある地球温暖化問題など、年を追うごとに強まる自動車の脱石油、低炭素化という社会的な要求にも鑑み、自動車メーカーはハイブリッド自動車、電気自動車、プラグイン・ハイブリッド自動車、燃料電池自動車、クリーンディーゼル自動車等の次世代型自動車の開発・販売に精力を注ぐようになってきた。

一般に、次世代型自動車には、イットリウム、ランタン、セリウムなどの希土類元素や白金、パラジウム、チタン、ホウ素、コバルト、ニッケル、ジルコニウム、チタンなど様々なレアメタルが性能向上に欠くことのできない触媒や微量添加材として使われている。しかしながら、廃棄された自動車からは鉄、アルミニウム、銅などのベースメタルがもっぱら回収・リサイクルされており、前述のレアメタルのほとんどは有価金属を回収した後に発生する廃自動車シュレッダーダスト（Automobile Shredder Residues：ASR）に含まれていると考えられる。

本研究では、レアメタルであり、かつ、貴金属の中でも白金族に分類されるパラジウムに着目し、ASR中にパラジウムがどのように分布しているかについて調査を行った。具体的には、自動車の部品において貴金属類はめっきやクラッドの材料として使用されている場合が多いことから、6mm以下のふるい分け産物に対して走査電子顕微鏡による定性分析（EPMA）や高周波誘導結合プラズマ発光分光装置（ICP-AES）による定量分析を行い、ASRリサイク

ルのどの工程においてパラジウムがどのように賦存しているかについて調査を行った。

2．日本におけるASRの現状

2．1　概略

ASRとは“Automobile Shredder Residue”の略で、使用済み自動車からエアバッグ類やフロン類、ドア、エンジンなどの部品を取り外し、破砕（シュレッディング）して有用金属を回収した後に残る残渣である（写真1）。日本では2005年に自動車リサイクル法が施行され、いすゞ自動車、クライスラー日本、スズキ、日産自動車、日産ディーゼル工業、ピー・エー・ジー・インポート、フォードジャパン、富士重工業、マツダ、三菱自動車工業、三菱ふそうトラック・バス、メルセデス・ベンツ日本の12社で結成されているART（Automobile shredder residue Recycling promotion Team）および本田技研工業（株)、ダイハツ工業（株)、日野自動車（株)、トヨタ自動車（株)、アウディジャパン（株)、ビー・エム・ダブリュー（株)、プジョー・ジャポン（株)、フォルクスワーゲングループジャパン（株）の8社で結成されている豊通リサイクル株式会社ASR資源化事業部（THチーム）の2チームによって引取・再資源化することが義務づけられている。表1に日本自動車工業会が公表しているASRの構成物の割合と元素分析を示す[3)]。樹脂、繊維、木材、紙、などの有機系物質が75%を占め、金属、ガラスなどの無機系物質は25%程度である。現在、ASRは固形燃料化、乾留、焼却、焙焼、溶融、セメント焼成などによるサーマルリサイクルによる手法で主にリサイクルされている[4)]。

写真１　ASRの写真

2．2　ASRリサイクルの現状

2005年から2010年までのARTおよびTHチームが行なったASRの引取及び適正処理の実績を表2に示す。2010年のASRの引取重量は681,485tであり、

表1　ASRの構成物および元素の割合

構成物	割合（%）	元　素	割合（%）
樹脂	33	有機物	60
ウレタン	16	Fe	6
繊維	15	Cu	3
ゴム	7	Al	1
木材	3	Si	7
紙	2	Ca	5
鉄	8	Na	2
非鉄金属	4	Cl	4
ワイヤーハーネス	5	その他（無機物）	12
ガラス	7		
合　計	100	合　計	100

出典：日本自動車工業会における自動車シュレッダーダストのバッチ式乾留ガス化技術の開発（飯田修司），p.50（1998）を元に作成

表2　日本におけるASRリサイクルの実績（単位：トン）

年　度	2005	2006	2007	2008	2009	2010
ASR引取重量	480,463	597,974	643,322	644,175	694,567	681,485
ASRﾘｻｲｸﾙ施設への投入量	289,519	394,353	457,545	511,356	573,651	588,150
ASRﾘｻｲｸﾙ施設からの廃棄物量	40,585	47,964	43,573	57,618	54,631	51,776
全部利用施設への投入量	50,825	71,949	59,018	47,952	45,417	37,906
全部利用施設からの廃棄物量	928	3,650	745	685	2,289	3,469
埋立処分量	181,632	183,286	171,077	143,170	132,419	110,673

出典：ARTおよびTHチームがホームページで掲載しているASR再資源化等の実施状況を元に作成

そのうちの588,150tがASRリサイクル施設に、51,776tが全部利用施設に投入されている。ここで、全部利用施設とは廃自動車をプレス加工したものを処理する電炉や転炉を所有する施設である。全部利用施設では図1で示すようなASRを取り扱わないが、同じ組成のプラスチックやゴム等を処理していることから自動車リサイクル法ではASRリサイクル施設として認定されている。ASRリサイクル施設と全部利用施設から排出される廃棄物はそれぞれ37,906t

および3,469tであり、それらと施設に投入されなかったASRとの合計110,673tが埋立処分されている。

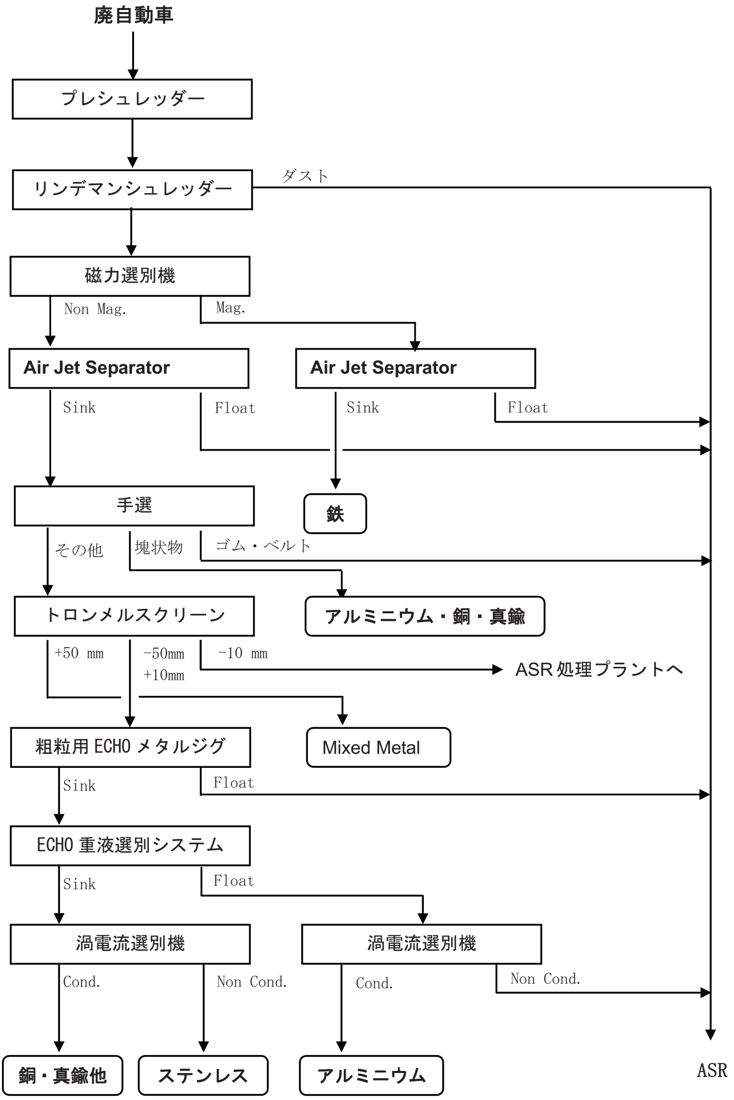


図１　九州メタル産業株式会社の有価金属回収工程

3.パラジウムの概要

3．1　歴史と特性[5)]

パラジウムは1803年にイギリスのウオラストンによって発見された。パラジウムの名前の由来は、前年（1802年）に発見されて話題なっていた小惑星Pallas（古代ギリシャの都市アテネの守護女神パラス・アテネーの異名）にちなんで名づけられた。パラジウムは主に＋2と＋4の酸化状態をとる。パラジウムは銀白色の金属であり、銅、亜鉛、ニッケルの製錬の副産物として得られる白金族元素である。表3にパラジウムの特性を示す。

表3　パラジウムの特性

名称，記号，番号	パラジウム，Pd，46
原 子 量	106.42
電子配置	［Kr］4d10
密度（室温付近）	12.023 $g{\cdot}cm^{-3}$
融　　点	1552 ℃
沸　　点	3140 ℃
地殻濃度（クラーク数）	0.0006 ppm

出典：元素111の新知識第2版（桜井弘），p218（2009）を元に作成

3．2　鉱物組成[6)]

白金族に属する金属、すなわちプラチナム（Platinum：Pt)、イリジウム（Iridiumu：Ir)、オスミウム（Osmiumu：Os)、パラジウム（Palludiumu：Pd)、ルテニウム（Ruthenium：Ru)、ロジウム（Rhodium：Rh）を主とする鉱物は、白金族相互の合金からなる鉱物と、硫化物・ヒ化物などの鉱物に大別される。前者は主として超塩基性岩中に分散して含有されていた鉱物粒が、風化作用で二次的に集積して形成された漂砂鉱床中に、クロム鉄鉱、カンラン石、輝石、磁鉄鉱などとともに産し、後者は塩基性貫入岩に成因的に関係ある銅ニッケル硫化鉱床中に産出する。表4にパラジウムを含む個物の名称と組成を示す。

表4　パラジウムを含む鉱物の名称と組成（%）

鉱物名	元素						
	Ru	Rh	Pd	Os	Ir	Pt	その他
Iridosmine	7〜15	0〜6	0〜2	29〜39	43〜55	0〜4	Ee〜7
Ruthenosmiridium	21	0〜1	0〜1	37〜39	38〜39	0〜2	
Palladium-Platinum			51			49	
Platinum	4	6	0.4	23	17	49	
Cooperite, PtS			0〜4			80〜85.9	S 14.1
Stibiopalladium, Pd_3Sb			〜70				Sb〜28
Braggite,（Pt_2, Pd, Ni）S_4			18〜20			59〜60	Ni〜2.8

出典：工業原料鉱物選鉱便覧（冨田堅二），p.314（1966）を元に作成

3.3　需給状況[7)]

パラジウムは、鉱山においてプラチナに付随して採れる。産地はプラチナと同様に偏在しており、ロシア、南アフリカ、アメリカ合衆国、カナダで世界全体の100%近くを占める。ロシアは大量のパラジウム在庫を保有していると推測され、ロシアの生産や販売の動向が日本のみならず全世界の供給に影響を与えている。わが国では供給の大部分を輸入に依存しており、そのうち、ロシア、南アフリカの2カ国で3分の2を占めている。パラジウムは国内ではプラチナと同様にニッケルや銅の精錬工程において、副産物として採取される。陽極スライムとして白金族金属（PGM）が濃縮され、化学的方法でパラジウムが分離生産されるが、生産量の統計上充分に把握されていない。表5にパラジウムの需給の推移を示す。

3.4　用途[8)]

パラジウムは触媒として 工業的には自動車の排気ガス浄化用の触媒（三元触媒）やエチレンからのアセトアルデヒドの合成（ワッカー酸化）に用いる触媒など、様々な反応の触媒として使われている。1979年に鈴木章・北海道大学教授（当時）によって発見された、パラジウムを触媒とするホウ素化合物とハロゲン化合物のカップリング反応は「鈴木カップリング反応」として、工業

表5　パラジウムの需給の推移（単位：純分t）

年		2005	2006	2007	2008	2009
供給	南アフリカ	81	86	86	76	74
	ロシア	144	122	141	114	113
	北米	28	31	31	28	23
	その他	8	8	9	10	11
	合計	262	247	267	227	221
	触媒回収	31	38	48	50	45
	再計	281	285	315	278	265
需要	欧州	45	44	53	56	60
	日本	51	49	49	51	41
	北米	77	67	71	60	52
	中国	55	47	46	45	49
	その他	31	38	42	47	41
	合計	246	245	261	258	242

出典：鉱物資源マテリアルフロー2010「22白金族（PGM）」（独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構金属企画調査部），p.247（2011）を元に作成

的にも多く用いられている。また、パラジウムは加工のしやすさから電子部品の材料や歯科治療に使われる合金として使われている。なお、自分の体積の900倍以上もの水素を吸収するため、水素吸蔵合金としても利用されている。

3.5　白金族金属のリサイクル状況[9)]

自動車用触媒のリサイクルについては、廃車の際にコンバータを取り外し、切断して中の触媒を取り出し、リサイクル業者に持ち込まれている。2009年の自動車リサイクル法に基づく解体引取台数は3,712千台であり、2008年比わずかに（0.6%）増加した。触媒資源化協会の統計によれば、同協会会員企業が回収した廃触媒は、廃自動車触媒が2,228t、自動車触媒以外（接触改質触媒、水素化触媒など）は1,991tであった。パソコン、サーバー、電話交換機、携帯電話等の基板には銅、金、銀、パラジウム、プラチナ等の有価金属が比較的多量に含まれている。触媒資源化協会統計によれば、同協会会員企業が回収し

た電子基板等が907t、その他歯科合金、宝飾品、写真感光剤、その他がおよそ72,500tであった。廃自動車の基板は統計がなく、処理の実態は不明である。信頼性確保の観点から、自動車に使用されるエンジン制御、ハイブリッド制御など各種基板にはかなりの貴金属が含有されているものと見られ、これらの回収、リサイクルが課題と考えられる。

4．貴金属を材料としたメッキとクラッド[10)]

4.1　メッキ

貴金属メッキとは、製品の素地を金や銀などの貴金属で覆う表面被覆技術の一つである。主な目的は、①装飾品や工芸品などの外観を美しくする、②さびや摩耗から表面を保護する、③電気の通電性などの機能性を改善する、などがある。貴金属メッキの方法には、電気メッキ法、化学メッキ法（無電解メッキ法）、乾式メッキ法、アマルガムメッキ法、塗布メッキ法、電鋳メッキ法、溶融メッキ法、溶射メッキ法、金液メッキ法などがあり、素地の物理的性質（導電性の有無など）や、メッキ膜の特性（厚さ、硬さなど）、製造コストなどから、それぞれの使用目的に適したメッキ方法がとられる。表6に代表的な貴金属メッキ薬品と用途を示す。

4.2　クラッド（複合）

クラッドとは、2種類以上の金属をそれぞれの特徴を活かすために接合することをいう。貴金属材料は他の金属材料と比較して化学的に安定であるなど優れた特性から、装飾品や電気・電子部品などに使用されているが、価格が高いという経済面や機械的な強度が小さいことなどが欠点となる。そこで、貴金属と他の金属をクラッド化することにより価格を抑えて相互の金属の特徴を活か

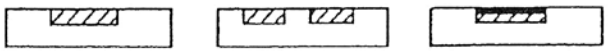
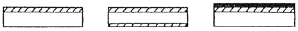
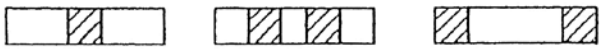
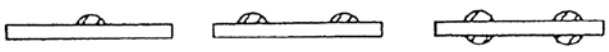
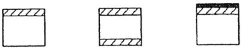
すことが可能となる。クラッド材の製法には、熱間圧接法、冷間圧接法、爆発圧接法、ろう接法、拡散接合法、液相接合法、摩擦圧接法、熱間・温間・冷間押し出し法、高周波抵抗溶接法、超音波圧接法などがある。表7にクラッド接点材料の形状と組合せを示す。

表6　代表的な貴金属メッキ薬品と用途

種　類	薬品名（塩）	用　途
金めっき	シアン化金カリウム	装飾品，電気・電子部品
	塩化金酸	酸性金めっき，化学めっき，陶器，ガラス
銀めっき	シアン化銀カリウム	装飾品，食器，電気・電子部品
	硝酸銀	鏡
ロジウムめっき	硫酸ロジウム	装飾品，電気・電子部品
	塩化ロジウム	陶器，ガラス
	リン酸ロジウム	装飾品，反射鏡
白金めっき	ジニトリトアンミノ白金	装飾品，電気・電子部品，電極
	亜硝酸白金カリ	
	塩化白金酸ナトリウム	
パラジウムめっき	ジアンミノ塩化パラジウム	装飾品，電気・電子部品
	ジアンミノ亜硝酸パラジウム	
	塩化パラジウムナトリウム	
ルテニウムめっき	塩化ルテニウム	電気部品

出典：貴金属のはなし（山本博信），p.160（1992）

表7　クラッド接点材料の形状と組合せ

名　　称	断　面　形　状	材　　質
インレイ		■ Au, Au-Ag, Au-Pd, Ag-Pd ▨ Ag, Ag-Ni, Ag-Pd, Ag-Cd Ag-CdO, Au-Pt-Pd-Me □ Cu, PBS, BS, MSS
オーバーレイ		■ Au, Au-Ag, Au-Pt-Pd-Me ▨ Ag, Ag-Ni, Ag-CdO, Ag-Cu, Pt-Ir, Ru-Pd, Ag-Pd □ Ag-Pd, Ag, Pu-Pd, Agロウ Cu, Cu-Ni, BS, PBS, SUS
スルーレイ エッジレイ		▨ Ag, Ag-CdO, Ag-Ni □ Cu, BS, PBS, Cu-Ni
トップレイ		▨ Ag, Ag-Ni, Ag-CdO □ PBS, NSS, Cu-Ni
ワイヤー クラッド 丸型		■ Au, Au-Ag, Au-Pd, Au-Pt-Pd-Me, Au-Cu-Ni ▨ Ag, Ag-Ni, Ag-Pd, Ag-CdO □ Cu, Cu-Ni, BS, NSS
角型		■ Au, Au-Ag ▨ Ag, Ag-Ni, Ag-Pd, Ag-CdO □ Cu, Cu-Ni, NSS
シーム溶接材		■ Au, Au-Ag, Ag-Pd ▨ Ag, Ag-Pd, Ag-Cd, Ag-Ni □ Cu-Ni, NSS
クラッド リベット接点		▨ Ag, Ag-Ni, Au-Ag, PGS □ Cu, Cu-Ni

出典：貴金属のはなし（山本博信），p.162（1992）

5．調査方法および結果

5．1　対象としたASR

調査は九州メタル産業株式会社の廃自動車処理工程で発生しているASRを対象とした。

同社では1975年12月から操業を開始しており、2000馬力のリンデマン社製シュレッダー破砕機により年間年間約84,000トンの廃自動車等の金属含有廃棄物を処理している。主要な選別装置としては、Air Jetセパレータ、Jig選別機、重液選別機などの比重選別機と磁力選別機、渦電流選別機などの磁気選別機がある。図1に同社の有価金属回収工程を示す。本工程により、年間約60,000tの鉄スクラップ、960tのアルミニウム、120tの銅・真鍮とステンレス、360tのミックスメタルを回収している。ASRはリンデマンシュレッダーのダスト、Air Jetセパレータの浮上物、手選、ECHO粗粒メタルジグの浮上物、渦電流選別機の非飛翔物で構成されており、年間約22,440t発生している。

同社で発生したASRに対しては3つの乾式空気選別機からなるASR処理プラントによってさらに減量・資源化が行なわれる。そのフローを図2に示す。

ジグザク空気選別機は図3に示すように立型をしており、－100mmのASRを浮上物（軽質物：写真2（a））と沈下物（重質物：写真2（b））に分けている。沈下物は孔径35mmのトロンメルスクリーンによりふるい分けられ、＋35mm産物は磁力選別機、高磁力選別機、渦電流選別機により鉄、ステンレス、アルミニウムが回収される。－35mm産物は図4に示す箱型空気選別機により浮上物（軽質物）と沈下物（重質物）に分けられる。

箱型空気選別機はシロッコファンを用いて内部で空気を循環させる仕組みになっており、排気がないことからサイクロンを必要としない空気選別機である。沈下産物は振動スクリーンにより＋15mm産物および＋6mm産物がふるい分けられ、それぞれメタルソータ工程と流動床式乾式比重選別工程に送られ、－2mm産物からはエアテーブル選別により銅線が回収されている。

エアテーブル選別機の選別原理を図5に示す。本選別機では主に比重と摩擦抵抗を利用して選別が行われる。まず、デッキ上に投入された産物は、デッキ下から吹き上げる風によって、低比重の物は浮き、高比重の物はデッキと接触

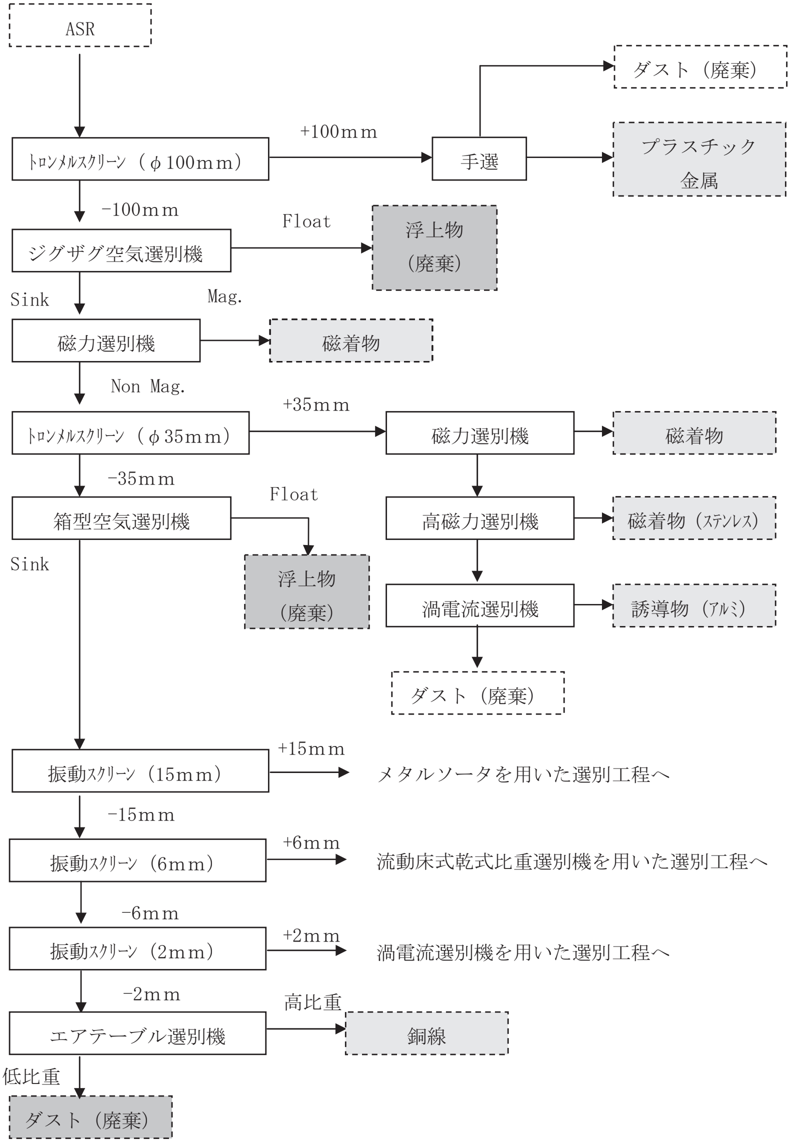


図２　九州メタル産業（株）ASR処理プラントの工程

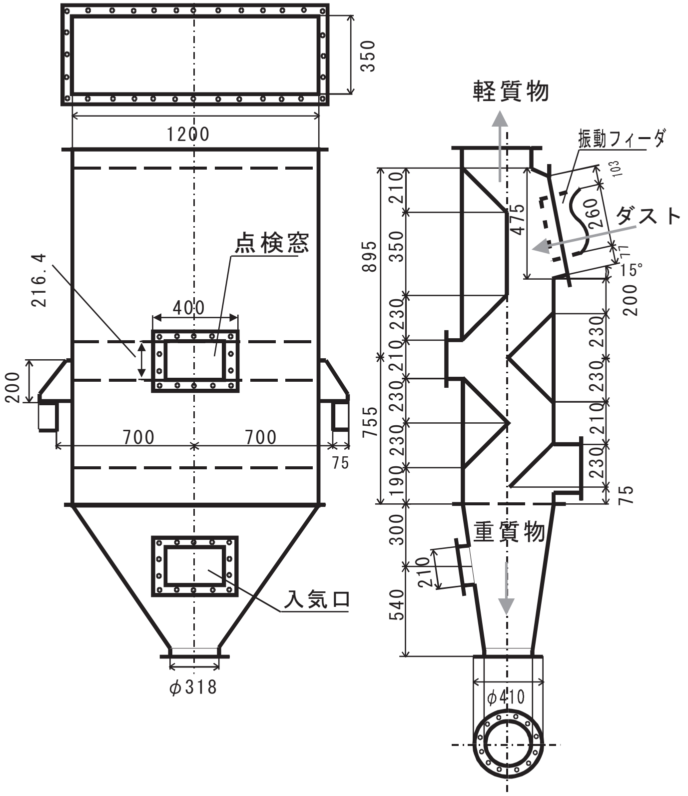


図３　立型ジグザグ空気選別機の模式図

を保つ。この時デッキ上ではエンドスロープに沿う振動が起きている。これによりデッキと接触している高比重物にはデッキの振動により慣性力が働き、エンドスロープ上側へ移動する。上昇流によって浮いている低比重物は、エンドスロープの傾きが作られていることでエンドスロープ下側へと流れ落ちる。エアテーブル選別機は送風ファンの周波数、サイドスロープ角度、デッキの振動数を変化させることによって、様々な条件下で選別を行うことが可能である。

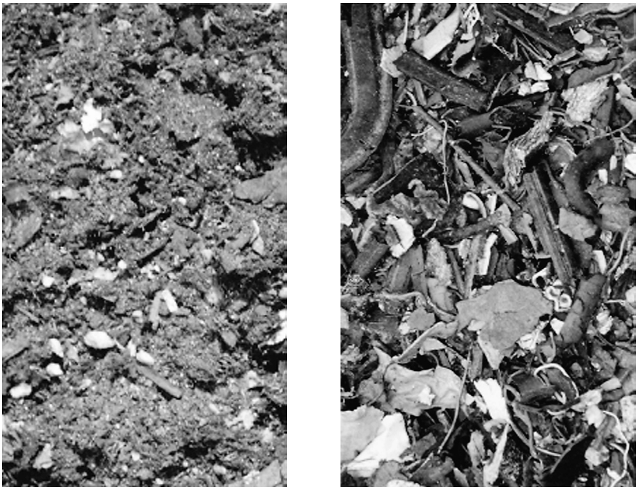


写真２　ジグザグ空気選別機の回収産物（a：浮上物、b：沈下物）

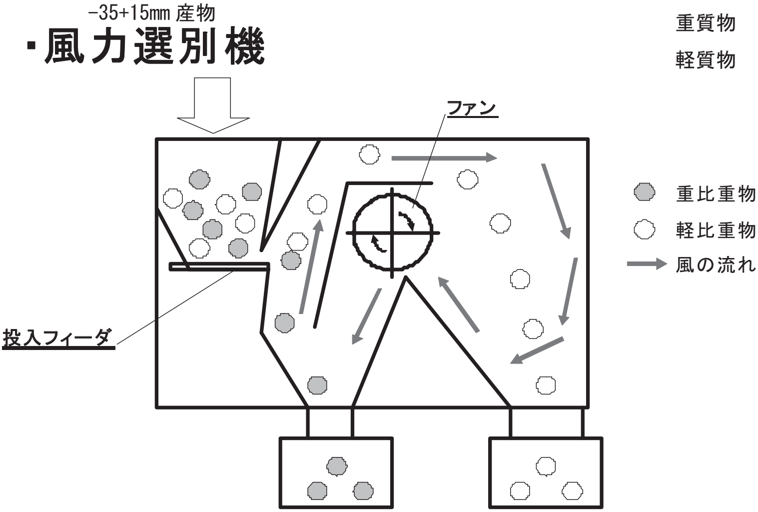


図４　箱型空気選別機の模式図

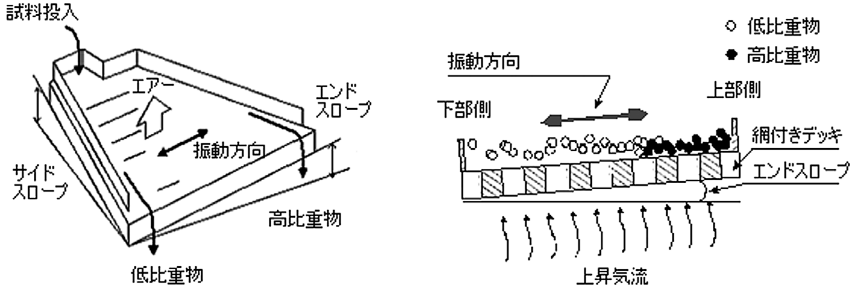


図５　エアテーブル選別機の選別原理

５．２　調査を行ったASR産物

自動車に使用されているパラジウムは排気ガスを処理する触媒または電子部品に含まれている。通常、触媒はマフラー内にあることから、廃自動車をシュレッダー処理する前に手で取り外されている。よって、ASRに存在するパラジウムは主に電子部品由来であると考えられる。即ち、パラジウムは微細な状態で賦存していると予測されることから、空気選別では浮上物に、ふるい分けではふるい下産物に濃縮されていると推察される。そこで、図2にあるASR処理プラントのジグザグ空気選別機の浮上物（試料A)、箱型空気選別機の浮上物（試料B)、および箱型空気選別の沈下物を2mm幅のスリットでふるい分けたふるい下産物（試料C）に対してパラジウムの賦存状況を調査した。

５．３　試料採取および分析

各ASR産物からの試料採取状況をそれぞれ写真3から写真5に示す。採取された試料は2mmおよび1mmでふるい分けを行った。各試料の粒度分布を表8に示す。－1mm産物については高周波誘導結合プラズマ発光分光分析（ICP-AES：Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy）により定量分析を行った。分析は、試料を500℃で1時間熱処理した後に酸で溶解し、溶解液をICP-AESで分析した。

写真３　ジグザグ空気選別機浮上産物の採取状況

写真４　箱型空気選別機浮上産物の採取状況

写真５　箱型空気選別機沈下物の－2mm産物の採取状況

表8　採取された試料の粒度分布

試料名	重　量　(%)			
	＋2mm	－2＋1mm	－1mm	Total
試料A	68.5	5.6	25.9	100.0
試料B	89.3	6.2	4.5	100.0
試料C	36.3	47.2	16.6	100.0

5.4　調査結果および考察

各試料の－1mm産物における貴金属の含有割合を表9に示す。金（Au）は各試料に5～10ppm含まれており、ASR産物の違いによる含有割合の変化はあまり見られなかった。銀（Ag）は試料Aに27ppm、試料Bに43ppm、試料Cに102ppm含まれていた。パラジウムについては各試料中にはほとんど含まれていなかった。パラジウムは表7にあるように銅（Cu）やニッケル（Ni）を母材としメッキまたは複合化されている場合がある。そこで、金属片が多く見られる試料Cの＋2mm産物から32個の金属片を任意に抽出し、EPMA（Electron Probe Micro Analyzer：走査電子顕微鏡）による同定分析を行った。その結果、金を含む金属片が8個（写真6）、銀およびパラジウムを含む金属片がそれぞれ1個および2個（写真7）確認された。さらに写真6のサンプル①、写真7のサンプル⑨およびサンプル⑩についてはEPMAの印加電圧を変化させて表面の状態を調べた。その結果、サンプル①ではニッケル、銅、亜鉛の合金の上に金

表9　各試料の－1mm産物における貴金属の含有量（ppm）

試料名	Au	Ag	Pd
試料A	10	27	＜1
試料B	5	43	＜1
試料C	7	102	＜1

表10　EPMAの印加電圧を変化させた場合の各種元素の割合（Atom %）

サンプル①（Au）				
元素	電圧（kV）			
	10	15	20	25
Fe				
Ni		69.1	83.1	71.0
Cu		5.1	2.2	2.6
Zn			0.9	1.0
Pd				
Ag				
Au	35.3	5.9	1.3	2.5
サンプル⑨（Ag）				
元素	電圧（kV）			
	10	15	20	25
Fe		0.6	1.8	0.4
Ni				0.4
Cu		1.3	1.9	1.1
Zn				0.7
Pd				
Ag	46.9	38.1	19.8	45.9
Au				
サンプル⑩（Pd）				
元素	電圧（kV）			
	10	15	20	25
Fe				
Ni		43.4	62.4	62.8
Cu		2.8	2.4	3
Zn				
Pd	21.3	5.3	3.6	3.0
Ag				
Au	1.8	0.4	0.3	0.2

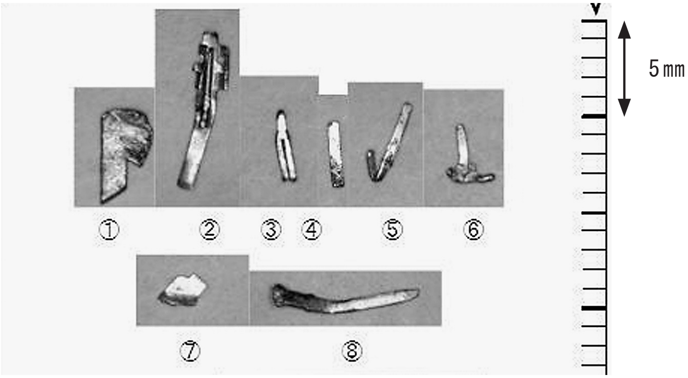


写真６　EPMA で判明した金含有金属片

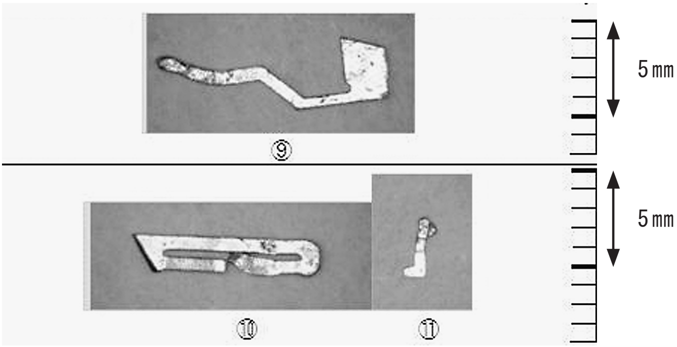


写真７　EPMA で判明した銀（上）およびパラジウム（下）含有金属片

の層があり、サンプル⑨ではサンプル①よりもさらに厚い銀の層があることが分かった。また、サンプル⑩ではニッケルと銅の合金の上にパラジウムと金の合金の層があることが分かった。

６．まとめ

本研究では北九州市にある九州メタル産業株式会社のASR処理プラントで発生しているASRに含まれるパラジウムの調査を行った。具体的には、ASR処理プラントのジグザグ空気選別機の浮上物、箱型空気選別機の浮上物、および箱型空気選別の沈下物を２mm幅のスリットでふるい分けたふるい下産物に対してパラジウムの賦存状況を調査した。ICP-AESによる定量分析の結果、各産物の－１mm産物にパラジウムはほとんど含まれていなかったが、箱型空気選別の沈下産物の＋２mm産物をEPMAで分析した結果、パラジウムを含む金属片が存在することが分かった。これらのことから、ASRからパラジウムを回収には空気選別等の比重選別とふるい分け等の分級を組み合わせることが有効であると考えられる。

謝辞

本研究の一部は東北公益文科大学平成23年度奨励研究費、財団法人北九州産業学術推進機構産学連携研究開発事業平成23年度助成金および環境省環境研究総合推進費平成23年度補助金によって実施されたことを明記する。また、本研究にご協力頂いた九州メタル産業株式会社　権藤正信氏、および、DOWAエコシステム株式会社　渡邊亮栄氏に感謝の意を表す。

引用文献

１）（社）日本自動車工業会：日本の自動車工業2011，p.12-13,2011
２）同上，p.8-9,2011
３）飯田修司：日本自動車工業会における自動車シュレッダーダストのバッチ式乾留ガス化技術の開発 , 自動車研究，Vol.20,No.12,p.50,1998
４）古山隆：環境資源工学会シンポジウム「リサイクル設計と分離精製技術」第18回：ASRリサイクルのための高効率化のための分離精製技術資料集,p.9-12,2009

5）桜井弘：元素111の新知識　第2版，豊国出版株式会社，p218-219,2009
6）冨田堅二：工業原料鉱物選鉱便覧，共立出版株式会社，p.314,1966
7）独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構金属企画調査部：鉱物資源マテリアルフロー2010「22白金族（PGM）」，p.244-253,2011
8）山口潤一郎：図解入門よくわかる最新元素の基本と仕組み，株式会社秀和システム，p.165-167,2007
9）独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構金属企画調査部：鉱物資源マテリアルフロー2010「22白金族（PGM）」，p.257-259,2011
10）山本博信：貴金属のはなし，技報堂出版株式会社，p.157-163,1992