日本における白金族金属のリサイクルポテンシャル評価

栗木 辰 悟*   醍醐 市 朗   松野 泰 也   足立 芳 寛

東京大学工学系研究科マテリアル工学専攻

J. Japan Inst. Metals, Vol. 74, No. 12 (2010), pp. 801-805
© 2010 The Japan Institute of Metals

Recycling Potential of Platinum Group Metals in Japan

Shingo Kuriki*, Ichiro Daigo, Yasunari Matsuno and Yoshihiro Adachi

Department of Materials Engineering, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, Tokyo 113-8656

The production of the platinum group metals (PGM) consumes large quantities of energy and induces a lot of carbon dioxide. The promotion of PGM recycling is important to construct a sound material-cycle society. In this article, a dynamic material flow analysis for PGM in Japan was conducted in order to evaluate the recycling potential of PGM. In Japan, PGM demand for autocatalyst accounted for about 50% of the total PGM demand in 2008. Therefore, this study focused on platinum, palladium, and rhodium used as autocatalyst. The amount of material stock regarding these autocatalysts were estimated during 1975-2008. The amount of these autocatalysts generated from end-of-life vehicles (ELV) were also estimated during 1988-2008.

As the result, the material stock of these metals as autocatalysts has monotonically increased during the investigated period. The amount of these autocatalysts generated from ELV has also increased, but the amount of recycled ones have been rather stable due to growing exportation of used automobiles, used auto engines, and used autocatalysts.

(Received June 25, 2010; Accepted August 23, 2010)

Keywords: *dynamic material flow analysis, platinum group metals, autocatalyst*

1. 緒 言

白金族金属とは、Pt, Pd, Rh, Ru, Ir, Os の総称であり、PGM (the platinum group metals) とよばれている。PGM は、高融点、高強度、高触媒性能などの特性があり、工業的に重要な元素である。しかしながら、天然資源としての PGM は極端に偏在しているため、常に供給リスクを伴っている。また、鉱石中の PGM の含有率は 3~7 ppm 程度¹⁾ であり、Pt を 1 トン製造するのに 4 万トンの CO₂ が誘発され、また TMR (Total Material Requirement) は 68 万トンと環境負荷が大きい²⁾。そのため、使用済み製品からの PGM リサイクルの促進が望まれている。近年、素材や物質の、社会中的の物質フローと物質ストック量を推計する、マテリアルフロー分析 (Material Flow Analysis, MFA) が盛んに行われてきている。PGM に関しては、中條と中村³⁾、岡部と中田⁴⁾、JOGMEC⁵⁾ によるものがある。これらの既存研究では静的な分析を行っており、単年のフローを示している。リサイクルのフローは、過去の製品の投入量などの影響を受けるため、単年のフローではリサイクルのフローを推計するのが困難である。

リサイクルのフローを把握するための手法として、動的 MFA がある⁶⁾。動的 MFA は、過去の製品の社会中への投入量や寿命分布から、将来の物質ストック量やスクラップ発

生量を推計する手法である。動的 MFA には、トップダウン手法とボトムアップ手法の二つの手法がある。前者は、各種素材の生産統計や産業連関表などの統計データと、素材の最終用途製品の寿命分布から、社会中的の物質ストック量を推計するものである。それに対して後者は、統計データなどが得られない場合に、対象とする地域において使用されている製品の数を推計し、その製品中の原単位から素材の物質ストック量を推計するものである⁷⁾。

原田ら⁸⁾は、日本における PGM の使用量を 1995 年から 2005 年まで解析し、各製品の物質ストック量を推計している。そこでは各製品は一定の使用期間後に廃棄されるとして、寿命分布を考慮せずにスクラップ発生量を推計している。しかし、この方法では、製品の投入量が大きく増減すると、スクラップ発生量も大きく増減する結果となる。実際の製品は、投入されてから法的耐用年数後にすべて廃棄されるわけではない。製品の寿命には分布があり、スクラップ発生量は過去の製品の投入量と寿命分布の履歴に依存する。さらに、PGM の主用途である自動車は平均寿命が 10 年をこえるため、正確な物質ストック量および排出量を推計するためには、20 年以上を考慮した分析が必要である。

また、Saurat と Bringezu^{2,9)} は、欧州における PGM の動的 MFA を実施し、自動車触媒に使用される PGM の物質ストック量を、2020 年まで推計している。そこでは、ボトムアップ手法を用いて推計しており、自動車一台当たりの PGM 使用原単位は、燃料、シリンダー容量、排ガス規制値により異なると言及している。しかしながら、日本を対象と

* 東京大学大学院生 (Graduate Student, The University of Tokyo)

Fig. 1 PGM demand per automobile in Japan.

して、使用原単位の経年変化を考慮した精緻なデータを用いた研究は行われていないのが現状である。

日本で生産される自動車 1 台あたりの PGM 需要量は、Fig. 1 に記すように推移しており^{10,11)}、自動車 1 台あたりの PGM 使用原単位は、経年で大きく変化していることが分かる。これは、素材価格が大きく増減していることや、企業が PGM 使用量を小さくするために技術水準の向上に努めていることなど、複数の要因がある。また、製造年だけでなく、車種によっても自動車 1 台あたりの PGM 使用原単位は異なる。しかし、原単位は自動車メーカーが対外的に公表するものではなく、詳細なデータを入手することはできない。そのため、自動車の台数に使用原単位を乗じる方法で、PGM のフローおよび物質ストック量を推計することは、困難であると考えられる。

さらに、日本の場合、使用済み自動車 (end-of-life vehicles, ELV) および自動車部品の海外への輸出が多く¹²⁾、それに伴い多くの PGM が流出している点も指摘されている¹³⁾。したがって、PGM の動的 MFA を実施するためには、ELV および自動車部品の海外輸出による流出量の把握が必須である。しかし、ELV および自動車部品の海外輸出量の経年変化を、定量的に分析した研究は行われていない。

そこで本研究では、製品の寿命分布を考慮したトップダウン手法により動的 MFA を行い、日本における PGM のリサイクルのフローを明確にし、そのリサイクルポテンシャルを明らかにすることを目的とする。対象期間は、1975 年から 2008 年までとする。

2. 研究手法

2.1 評価対象

PGM の主要な工業用途は、自動車の排ガス浄化触媒、化学プロセス用触媒、ガラス工業用つば、歯科材料、電子部品である。化学プロセス用触媒や、ガラスの溶解に使用されるつばは、劣化するとリサイクル業者に委託処理され、再び同じ設備で利用されており、既に PGM のサイクルが確立している^{2,14-16)}。歯科材料とは、主に歯冠修復材のことである。電子部品は、多層セラミックコンデンサなどに使用され

ているが、電子部品用 PGM 需要量は日本における PGM 需要量の 20% に満たない¹⁰⁾。その他、PGM の大きな用途の一つに宝飾品があるが、そのほとんどを個人消費者が退蔵していると考えられる¹⁴⁾。そこで、本研究では、日本における PGM 需要量の約 50% を占める自動車触媒に着目し、自動車触媒に使用されている Pt, Pd, Rh を対象とした。

2.2 動的分析手法

動的分析には、自動車触媒用 PGM の国内投入量、自動車の寿命分布が必要である。これらを推計するのに用いたデータおよび計算方法を以下に示す。

日本の自動車触媒用 PGM 需要量は、Johnson Matthey 社の統計¹⁰⁾に、Pt については 1975 年から 2008 年、Pd については 1980 年から 2008 年までのデータが記されている。また、Rh については、世界の自動車触媒用需要量のデータはあるが、日本の自動車触媒用需要量のデータがない。そのため、日本の自動車触媒用 Rh 需要量は、世界の自動車触媒用 Rh 需要量が世界の自動車触媒用 Pt, Pd 需要量の和に対する割合に、日本の自動車触媒用 Pt, Pd 需要量の和を乗じたものとした。しかし、この需要量とは、日本で生産される自動車全体の需要量であり、日本で生産される自動車の半数が輸出されていることを考慮する必要がある。そこで、日本における自動車触媒用 PGM の国内投入量は、日本の自動車触媒用 PGM 需要量に、日本の自動車生産台数に占める日本の自動車新規登録台数の割合を乗じたものとした。自動車の生産台数、自動車の新規登録台数は、それぞれ世界自動車統計年報¹¹⁾より 1975 年から 2008 年までのデータが得られる。

また、統計¹⁷⁾より、各年 3 月末における初度登録年別自動車保有台数が 1975 年から 2008 年まで得られる。これは年度別のデータであるため、登録年翌年 3 月末の保有台数を、登録年末の保有台数とした。初度登録年を製造年と考え、製造年に製造された自動車は製造年末時点で 1 台も ELV とならず、すべて使用されているとした。各年末の自動車保有台数を、製造年末時点での自動車保有台数で割ると、自動車の寿命分布となる。

2.3 使用済み自動車のフローの把握

日本で発生する ELV は、中古自動車として輸出されたり、そのうちの一部の部品が中古部品として輸出されたりするため、すべて国内でスクラップになるとは限らない。中村ら¹³⁾が、詳細な調査により 2005 年における日本で発生する ELV のフローを明らかにしている。このフローのうち、ELV の発生台数、中古自動車の輸出台数、中古エンジン輸出台数を変数として、ELV のフローを 1988 年から 2008 年まで推計した。ELV の発生台数は、推計年前年の自動車保有台数と推計年の自動車新規登録台数の和から推計年の自動車保有台数を引いたものとした。中古自動車の輸出台数は、1988 年から 2005 年は布施と鹿島¹²⁾が推計した値を使用した。ただし、この論文で解析されていない 2006 年以後は統計¹⁸⁾の値を使用した。中古エンジン輸出台数は、1988 年から 2005 年は布施と鹿島が推計した値を使用した。2006 年から 2008 年は、布施と鹿島が推計した、2005 年における中古自

自動車輸出台数に対する中古エンジン輸出量の割合に、統計¹⁸⁾の中古自動車輸出台数を乗じて求めた。

3. 研究結果

3.1 リサイクルポテンシャル

日本国内の自動車触媒に使用される PGM の物質ストック量 (Fig. 2), 日本国内の ELV の発生に伴う PGM の排出量 (Fig. 3) を導出した。

1990 年代前半までは自動車触媒には主に Pt が用いられてきたが、技術水準の向上により、それまで Pt で担ってきた機能が Pt に比べて価格の安い Pd で代替できるようになったため¹⁴⁾, 1998 年頃に Pd の需要量が大きく増加した。これに伴い, Pd の物質ストック量も 1998 年頃から大きく増加している (Fig. 2)。Pd の物質ストック量の増加により, 5 年後の 2003 年頃から ELV の発生に伴う Pd の排出量が大きく増加していることが確認できる (Fig. 3)。しかし Pd 価格は大きく増減しており, Pd 価格が大きく上昇した 2001 年頃から再び Pt が多く使用されるようになった。これは Pt の物質ストック量, ELV の発生に伴う Pt の排出量の増加に

Fig. 2 Estimated amount of material stock of PGM as autocatalyst in Japan.

Fig. 3 Estimated amount of PGM scraps as autocatalyst generated from end-of-life vehicles in Japan.

Fig. 4 Destination of PGM generated from autocatalyst in end-of-life vehicles in Japan. (a) Pt, (b) Pd and (c) Rh.

Fig. 5 Recycling rate of PGM as autocatalyst in Japan. (The recycling rate of PGM denotes the ratio of the amount of recycled PGM to the amount of PGM generation as autocatalyst in Japan.)

反映されている (Fig. 2, Fig. 3). 日本における自動車触媒用 PGM の物質ストック量は, 2008 年では Pt が 85.5 トン, Pd が 106.5 トン, Rh が約 17 トンとなった. 原田ら⁸⁾が推計した, 2005 年における自動車触媒用 PGM の物質ストック量は Pt, Pd, Rh の合計が 115.0 トンである. それに対して本研究では 176.6 トンとなり, 大きな差が見られた. これは, 原田らは過去 7 年分の投入量の和を物質ストック量としているのに対し, 本研究では, 1975 年からの投入量と自動車の寿命分布を考慮しているためであると考えられる. 本研究により, より正確な物質ストック量が推計できたと考えられる.

日本国内の ELV の発生に伴う PGM の排出量は, 2008 年では Pt が 5.5 トン, Pd が 5.3 トン, Rh が約 1 トンとなった. 2008 年の日本における自動車触媒用 PGM 需要量は Pt が 18.5 トン, Pd が 26.4 トン, Rh 約 9 トンであり, 排出量と大きな差が見られる. これは, 2008 年における排出量は過去の投入量に依存し, 投入された PGM の約半数は輸出車として海外に流出しているためである.

3.2 使用済み自動車のフロー

2.2 で推計した, 日本国内の ELV の発生に伴う PGM の排出量と, ELV のフローから, 自動車触媒に用いられる PGM の回収量, 輸出による流出量, 精錬ロス, その他ロスの経年変化を推計した (Fig. 4(a)~(c)). 回収量とは, 日本で発生し, 回収された ELV から, 国内の精錬業者により精錬された PGM の量を示す. 輸出による流出量とは, 中古自動車, 中古エンジン, 中古触媒の輸出による PGM の流出量を示す. 精錬ロスとは, 精錬時の歩留まりを示す. その他ロスとは, 解体業者による ELV からの触媒回収時のシュレッダーロス, ELV や触媒の滞留, 行き先不明等によるロスを示す. また, 日本国内の ELV の発生に伴う PGM の排出量に対する, 自動車触媒からの PGM の回収量の割合をリサイクル率として計算した (Fig. 5).

Fig. 6 The comparison between the estimation and the statistic of recycled PGM as autocatalyst in Japan. (a) Pt, (b) Pd and (c) Rh.

ELV の発生に伴う PGM の排出量は年々増加しているが, 回収量はあまり変化していない. これは, 中古車, 中古エンジン, 中古触媒の輸出による PGM の海外への流出量が大きくなったためである. ELV 発生に伴う PGM の排出量に対する, 中古車, 中古エンジン, 中古触媒の輸出による PGM の流出量の割合は, 1988 年では 13% だったのが, 2008 年では 43% まで増加している. 1988 年のリサイクル率は Pt, Pd が 65%, Rh は 58% だったのが, 2008 年では Pt, Pd が 44%, Rh が 39% まで減少していることが分かった.

4. 考 察

本研究により、国内で発生する ELV から回収された PGM の量が推計された一方、Johnson Matthey 社の統計¹⁰⁾に、自動車触媒からの PGM の回収量が記されている。しかし、日本において PGM の回収量は一次統計の対象外であり¹⁵⁾、Johnson Matthey 社が公表している統計値が一次統計ほどの確度があるとは限らない。そこで、推計値と統計値を比較することで、本研究で得た推計結果および統計値の妥当性を考察した (Fig. 6(a)~(c))。

Pt の回収量は、全体的に統計値よりも推計値の方が大きい。これは、次のような理由が考えられる。現在、ディーゼル車に使用される PGM のうち Pt が占める割合は、ガソリン車に使用される PGM のうち Pt が占める割合よりも大きい。そして、日本からの自動車輸出台数が北米に次いで多い欧州では、ディーゼル車が新車販売台数の約半数を占める。よって、国内で生産された自動車が輸出される時点で、Pt が Pd や Rh よりも多く流出しており、実際に Pt が国内に投入された量は、推計した Pt の国内投入量よりも小さかったと考えられる。

ELV から回収された Pt, Pd, Rh の量は、ともに推計値と統計値が概ね近い値となっており、本研究の手法による推計結果と統計の値が妥当であることが確認された。よって、Fig. 3 のように、今後、PGM のスクラップ量が増加すると言える。また、Fig. 4(a)~(c) のように、ELV からの PGM の回収量は輸出による影響が大きい。特に、中古エンジンの輸出による PGM の流出量は、ELV の発生に伴う PGM の排出量の約 10% と大きいにもかかわらず、中古エンジンの輸出量はほとんど把握されていない。資源戦略上の観点からもこれらの輸出量の把握が必要であり、統計等の整備が望まれる。

5. 結 言

動的 MFA により、日本において自動車用触媒として使用される Pt, Pd, Rh の、ELV からの発生後のフローを明らかにし、日本における PGM のリサイクルポテンシャルを定量

的に分析した。自動車触媒用 PGM の物質ストック量は、2008 年では Pt が 85.5 トン、Pd が 106.5 トン、Rh が約 17 トンと推計された。ELV の発生に伴う Pt, Pd, Rh の排出量は年々増加しているのにもかかわらず、中古自動車、中古エンジン、中古触媒の輸出量増加による資源流出のため、国内での回収量はあまり変化していないことが分かった。

文 献

- 1) T. Okabe and H. Nakada: Catalysts & Catalysis **50**(2008) 350–357.
- 2) M. Saurat and S. Bringezu: Journal of Industrial Ecology **12** (2008) 754–767.
- 3) H. Nakajo and T. Nakamura: *Technology of Alternatives and Recycling of Rare Metals*, (CMC Publishing Co., Ltd., Tokyo, 2008) pp. 248–271.
- 4) T. Okabe and H. Nakada: *Technology of Alternatives and Recycling of Rare Metals*, (CMC Publishing Co., Ltd., Tokyo, 2008) pp. 332–350.
- 5) Web-Site of JOGMEC Mineral Resource Information Center: http://www.jogmec.go.jp/mric_web/jouhou/material/2008/PGM.pdf, (Status: 2010/Apr/15).
- 6) Y. Adachi, Y. Matsuno, I. Daigo and H. Takiguchi: *Advanced LCA Methodology for a Sustainable Society*, (University of Tokyo Press, Tokyo, 2004) pp. 159–181.
- 7) T. Hirato, I. Daigo, Y. Matsuno and Y. Adachi: Tetsu-to-Hagane **95**(2009) 96–101.
- 8) K. Harada, K. Ijima, M. Shimada and N. Katagiri: J. Japan Inst. Metals **73**(2009) 151–160.
- 9) M. Saurat and S. Bringezu: Journal of Industrial Ecology **13** (2009) 406–421.
- 10) David Jollie: *Platinum 2009*, (Johnson Matthey, England; Japanese: Tanaka Kikinzoku Kogyo).
- 11) Japan Automobile Manufacturers Association, Inc.: *World Motor Vehicle Statistics*, (Japan Automobile Manufacturers Association, Inc., Tokyo, 2009).
- 12) M. Fuse and S. Kashima: Journal of the Japan Society of Waste Management Experts **18**(2007) 305–313.
- 13) S. Nakamura, N. Kojima and K. Yokoyama: Journal of MMIJ **123**(2007) 799–802.
- 14) T. Okura: Kinzoku **76**(2006) 1030–1033.
- 15) S. Kondo, A. Takeyama and T. Okura: Shigen to Sozai **122** (2006) 386–395.
- 16) T. Hamada, H. Yamasaki and S. Hitomi: Kinzoku **76**(2006) 998–1004.
- 17) Automobile Inspection & Registration Information Association: *Jikenkyo-Tokei Jidosha Hoyu Sharyosu*, (Automobile Inspection & Registration Information Association, Tokyo, 1975–2008).
- 18) Web-Site of Japan Used Motor Vehicle Exporters Association: http://www.jumvea.or.jp/j/info/info.php?srch_flag=1&ca_id=12&ca_id=12&if_id=48&if_kubun=&page=1&sum_count=1&kensuu=1, (Status: 2010/Apr/15).