

資源循環・廃棄物管理と脱炭素社会構築

連載 (8) 自動車リサイクルと 再生プラスチック素材利用

酒井 伸一 京都高度技術研究所・京都大学名誉教授
SAKAI SHINICHI

専門は環境システム工学。2001年より国立環境研究所循環型社会形成推進・廃棄物研究センター長、2005年より京都大学教授、2021年より現職、および大阪工業大学客員教授。中央環境審議会循環型社会部会長。廃棄物資源循環学会 2010～2012年会長。Journal of Material Cycle and Waste Management (JMCWM), Springer 編集担当。著書に『ゴミと化学物質』(岩波新書)、『循環型社会をつくる』(中央法規)など。



1. 使用済み自動車の発生と自動車リサイクル

2020年の世界の自動車保有台数は15億台を超え、そのうちEUと米国が約40%を占め、それぞれ3.4億台と2.9億台であった¹⁾。一方、中国の自動車保有台数は3.2億台となり、日本は7,700万台であった。このような数の自動車を、この地球が維持できるかというプラネタリーバウンダリの観点からの見方があり、世界は化石燃料から再生可能エネルギーを用いた電気自動車にシフトすることで持続可能性の方向にシフトしているように見える。こうした見方の是非はともかく、世界の自動車使用に伴って発生する使用済み自動車(End-of-Life Vehicles, ELV)数は、2010年には4,000万台と推定され、自動車保有台数全体の4%を占めており²⁾、ELVの管理は世界的にも重要な課題となっている。

日本では、2005年に施行された「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)で、ELV管理を規定している。日本の自動車リサイクル法は、使用済み自動車の環境に配慮した処理を実現することに重点をおいて制定された。つまり、地球環境保全のために確実な破壊が必要なフロン類、安全な取扱いが必要なエアバッグ類、不法投棄・不適正処理の原因となっていた自動車シュレッダー残渣(ASR, Automobile Shredder Residue)の特定再資源化等物品(指定3品目)について、自動車製

造事業者等が再資源化等を行う義務を負う。一方、自動車所有者には、新車購入時に指定3品目の再資源化等に必要な費用の負担を求め、自動車製造事業者等の再資源化等の実効性を担保している。この再資源化費用は資金管理法人が管理しており、不法投棄や自動車製造業者等の倒産・解散による滅失等を防止し、預託期間中の安定的な運用・管理を可能としている。自動車リサイクル法施行後は、制度の適切な執行を通じて、法制定当時の目的であったASRに起因する不法投棄が減り、エアバッグ類の再資源化やフロン類の破壊ASRの適正処理が行われてきた³⁾。

日本の自動車リサイクルは、エアバッグ類、冷媒ガス、ASRを主たる処理対象に設定しているが、その過程で解体業者は、エンジン、サスペンション、バッテリー、触媒、タイヤ、廃油、廃液、蛍光管などの部品や素材を回収し、再利用や適正処理するという重要な役割を果たしている。解体業者とそのグループ企業は、中古部品のリサイクル事業や輸出事業者、再製造や修理の事業者などと広範なネットワークを形成している。こうしてELVの30～40%程度は、シュレッダー(破碎機)にかけられる前に部品などとして分離されて再利用や再生利用されている。その後、シュレッダー事業者が自動車の金属成分を回収して、金属精錬業者に引き渡している。

1) International Organization of Motor Vehicle Manufacturers. Total World vehicles in use.

<https://www.oica.net/wp-content/uploads/Total-World-vehicles-in-use-2020.pdf>, Accessed Dec 2023

2) Sakai S, Yoshida H, Hiratsuka J, Vandecasteele C, Kohlmeyer R, Rotter VS, Passarini F, Santini A, Peeler M, Li J, Oh G, Chi NK, Bastian L, Moore S, Kajiwara N, Takigami H, Itai T, Takahashi S, Tanabe S, Tomoda K, Hirakawa T, Hirai Y, Asari M, Yano J (2014) An international comparative study of end-of-life vehicle (ELV) recycling systems. J Mater Cycles Waste Manag 16 (1) : 1-20

3) 産業構造審議会産業技術環境分科会廃棄物・リサイクル小委員会自動車リサイクルワーキンググループ、中央環境審議会循環型社会部会自動車リサイクル専門委員会合同会議：自動車リサイクル制度の施行状況の評価・検討に関する報告書、2021年5月24日

ELV の 60% 程度がシュレッダーにかけられて、スクラップ鉄がガラスやプラスチック・繊維類から分離されて二次金属資源となっている。最終的には、16% 程度の ASR は、主にガス化分解や燃焼分解処理され、熱回収されている。

2. 廃自動車の有する資源価値と環境負荷

6 台の使用済み自動車を対象に詳細な解体分別を行い、素材組成や化学成分を調査研究された結果が京都大学から 2019 年に報告されている⁴⁾。調査対象の 6 台は、1997 年から 2011 年に製造された使用済みの内燃エンジン車 4 台とハイブリッド型電気自動車 1 台と電気自動車 1 台であった。パーツ単位に解体する作業として、エンジンルーム、内装 4 箇所（フロント、シート周り、リア、トランク）、外装 2 箇所（サスペンション、その他）、残りのボディ、その他に分類し、それらのサブパーツから構成部品に分別することで階層的に分類した。磁石、プリント配線板（PWB）、樹脂、繊維などを最も小さなカテゴリーを構成部品とした。そして、素材組成を、金属（鉄、銅、アルミ、その他）、プラスチック（PE：ポリエチレン、PP：ポリプロピレン、ABS：アクリロニトリル・ブタジエン・スチレン共重合樹脂、PUR：ポリウレタン、その他）、繊維、ガラス、ゴム、その他に分類した結果は表 1 のように報告されている。鉄金属が 59~71% を占め、銅やアルミニウムなどの非鉄金属が 8~12%、非金属組成が 14~19% であった。従来車では大きな差は見られず、次世代自動車は駆動用モーターや発電機が重いため、銅の含有量が従来車より多い。電動車には、解体現場で特定できない未知の部品があったため、「未確認」の含有量が従来車より多くなっている。2011 年時点のイタリアでの実証によると、処理された自動車に含まれる鉄スクラップは 72%、ドイツの年次報告書によると 2000 年に生産された

自動車の金属組成は平均 75.5%（鉄 65.3%、非鉄 10.2%）であった⁵⁾。

この解体調査の主目的は、希少金属の存在を確認することであったが、希土類元素（REE）の含有量は、ハイブリッド車で 3100 g、電気自動車で 710 g であったのに対し、従来車は 22~64 g であった。従来車の希土類元素は主に触媒コンバーターとリアガラスに由来するのに対し、次世代車の希土類元素は主に駆動モーターと発電機の磁石に由来する。貴金属含有量（Rh、Pd、Pt、Ag、Au の合計）は 3.1~9.6 g であった。貴金属（PM）含有量（Rh、Pd、Pt、Ag、Au の合計）は、ハイブリッド車で 7.9 g、電気自動車で 9.6 g であったのに対し、従来車は 3.1~5.6 g であった。触媒コンバーターでの存在が最も多く、電動車ではリチウムイオンバッテリーユニット、インバーター、コンデンサーアセンブリのプリント配線板にも存在した。ただし、これらの構成元素は回収システムを導入しないと失われる可能性があることに留意すべきである。

自動車に用いられるプラスチックの種類は多く、熱可塑性プラスチック、エンジニアリングプラスチックやフォームがある。バンパー、ダッシュボード、ハンドル、ボタン、ケーシングなどの部品や部材を中心に、金属に次いで自動車に使われる素材がプラスチック類である。このプラスチック素材の組成が、使用済み自動車の解体調査において調べられており、表 2 に整理して示した。表 2 には EU で 2023 年に提案された再生プラスチック利用規則提案において前提とされた自動車プラスチック素材の構成比も併記している⁶⁾。日本の解体調査車両の場合は、ポリエチレン（PE）、ポリプロピレン（PP）、アクリロニトリルブタジエンスチレン（ABS）、ポリウレタン（PUR）と他の樹脂や繊維類をその他として含めている。EU のプラスチック素材構成のその他には、ポリアミドや PET などが含まれている。日

4) Yano, J. Xu, G., Liu, H., Toyoguchi, T., Iwasawa, H., Sakai, S., Resource and toxic characterization in end-of-life vehicles through dismantling survey, Journal of Material Cycles and Waste Management (2019) 21: 1488-1504

5) German Environment Agency, Federal Ministry for Environment, Nature, Conservation and Nuclear Safety (2018) Annual report on end-of-life vehicle reuse/recycling/recovery rates in Germany for 2016. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/jahresbericht_altfahrzeuge_2016_en_bf.pdf. (2019 年 6 月アクセス)

6) Maury, T., Tazi, N., Torres de Matos, C., Nessi, S., Antonopoulos, I., Pierri, E., Baldassarre, B., Garbarino, E., Gaudillat, P., Mathieux, F.: Towards recycled plastic content targets in new passenger cars and light commercial vehicles, Technical proposals and analysis of impacts in the context of the review of the ELV Directive, JRC SCIENCE FOR POLICY REPORT, July 2023, <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/0980feaf-2146-11ee-94cb-01aa75ed71a1/language-en>

表1 廃自動車の解体調査による素材構成比⁴⁾

車種	製造年	金属					プラスチック							繊維	ガラス	ゴム	その他	未確認
		鉄	銅	アルミニウム	その他	小計	PE	PP	ABS	PUR	その他	小計						
小型エンジン車	1999	67.5	0.8	2.0	5.1	75.4	0.4	4.1	0.4	3.3	0.5	8.8	2.4	4.7	3.3	0.1	5.4	
小型エンジン車	2009	70.0	0.5	2.4	5.0	77.8	0.4	3.9	0.5	3.4	1.0	9.2	1.8	4.4	2.8	0.1	3.9	
標準エンジン車	1997	70.8	0.9	2.6	7.4	81.7	0.3	3.2	0.3	1.7	0.9	6.3	2.2	3.4	3.4	0.0	2.9	
高級エンジン車	1997	69.5	1.1	3.3	5.3	79.2	0.4	4.3	0.3	2.8	0.8	8.6	1.7	4.6	3.0	0.6	2.2	
ハイブリッド電動車	1998	66.3	2.9	2.9	6.2	78.3	0/4	2.8	0.0	2.1	1.4	6.6	2.1	3.7	3.5	0.3	5.5	
電動車	2011	58.7	4.3	3.7	2.8	69.5	0.1	3.2	0.3	2.0	1.3	6.9	1.3	2.8	2.8	0.2	16.4	

PE：ポリエチレン、PP：ポリプロピレン、ABS：アクリロニトリル・ブタジエン・スチレン、PUR：ポリウレタン

本やEUの使用済み自動車のプラスチック素材構成比としては、日本やEUともポリプロピレン、ポリウレタン、ポリエチレン、ABSが主要な素材となっており、ほぼこの順で量的構成が多いことが分かる。自動車の主要素材あるポリプロピレンの使用部位としては、フロント/リアバンパー、インテリアパネル、ダッシュボード、ケーブル絶縁材などである。また、使用されるプラスチック素材の種類は、今後の再生材使用増加に向けて減少していく傾向にあるとみている。一方、機能性のプラスチック素材としての特定のエンジニアリングプラスチック（ポリカーボネートなど）は使用増加になる素材もある。

プラスチック素材には、リサイクルにおいて留意すべき物質含有の可能性もある。自動車は、難燃性能などその求められる性能に応えるために、さまざまな化学物質や重金属類が用いられてきた。これまで重金属類4物質（鉛、水銀、カドミウム、6価クロム）については、自動車工業会の自主行動計画に基づき目標を達成してきているが、加えて自動車の難燃剤として使われてきたデカブプロモジフェニルエーテル（Deca-BDE）は、2017年に残留性有機汚染物質に関するストックホルム条約（POPs条約）において附属書Aの廃絶対象物質に追加され、処分するにはPOPsの特性を示さなくなるように分解

が求められこととなった。先に述べた6台の解体調査において、蛍光X線分析装置でスクリーニングしたところ、162試料から臭素が検出された。そのうち、臭素の含有量が0.01重量%未満の試料は129検体、0.01~0.1%の試料は22検体、0.1%を超える試料は11検体であった。約6.8%の試料に0.1%以上の臭素が含まれていたことから、断熱材（エンジン）や床材などの部材について、ポリ臭素化ジフェニルエーテル（PBDE）やヘキサブプロモシクロデカン（HBCD）の詳細化学分析を行った。

表2 廃自動車（ELV）のプラスチック組成

	PE	PP	ABS	PUR	その他
小型エンジン車（1999）	3.6	36.9	3.6	29.7	26.1
小型エンジン車（2009）	3.6	35.5	4.5	30.9	25.5
標準エンジン車（1997）	3.5	37.2	3.5	19.8	36.0
高級エンジン車（1997）	3.9	41.7	2.9	27.2	24.3
ハイブリッド電動車（1998）	4.5	31.8	0.0	23.9	39.8
電動車（2011）	1.2	39.0	3.7	24.4	31.7
EUのELV素材設定（将来のエンジン車） ⁶⁾	8.0	37.0	7.0	15.0	33.0
EUのELV素材設定（将来の電動車） ⁶⁾	15.0	40.0	5.0	10.0	33.0

DecaBDE を含む PBDEs の濃度は 1~6,000ppm であったが、防音材の PBDE 含有量が 6,000ppm であった以外は、RoHS 規制値の 1,000ppm 未満であった。HBCD の含有量は 4~9,400ppm で、シート生地とトランクシートには 5,600ppm と 9,400ppm が含まれており、異性体の中では γ -HBCD が支配的であった。このように一部の廃プラスチック素材においては、残留性化学物質の存在に留意することが必要である。

3. 再生プラスチック素材利用促進の動き

2023 年 7 月 13 日、欧州委員会は、現行の使用済み廃自動車 ELV (End-of-Life Vehicles) 指令等を改正し、「自動車設計の循環性要件及び廃自動車管理に関する規則案」を公表した⁷⁾。規則案では、自動車の再生プラスチック最低含有率の義務化等が盛り込まれている。この ELV 指令は 2000 年に採択され、耐用年数を迎え、廃棄物とみなされる自動車の環境的に健全な処理を確保することを目的に制定された。ELV の回収と汚染除去、新車に含まれる有害物質の制限、再使用とリサイクル (85%)、再使用と回収 (95%) に関する規定を定めている。しかしながら、自動車セクターの循環経済への移行を促進すること、自動車の生産と使用済み処理に関連する環境フットプリントを削減すること、欧州の自動車産業とリサイクル産業の持続可能性を強化するためには、大幅な改善が必要であると認識され、今回の改正が行われた。自動車製造業は、その多くを一次原材料 (鉄鋼、アルミニウム、銅、プラスチックなど) の供給に依存しており、リサイクル材料の使用量は限られている。さらに、自動車部門は、電気自動車へのシフトに伴い、大きな変革期を迎えており、この変革は自動車の環境フットプリントの多くが、使用段階から生産・リサイクル段階に移行することを意味し、必須原材料 (Critical Raw Materials, CRM) の供給が必要となるとみているのであ

る。2023 年 ELV 規制改正のポイントは表 3 のとおりであるが、この 2023 年提案は、次の 5 つの具体的な目標を追求している。つまり、循環設計としてより循環が進む設計と生産に移行すること、生産におけるリサイクル材料の使用を大幅に増やすこと、再使用やリサイクルされる材料の量、質、価値を大幅に高めること、ELV の回収を大幅に増やし EU 域外に輸出される中古車が走行可能であることを確認すること、現在は ELV 制度の適用範囲外となっている車両 (バス、トレーラーなど) を対象にすることである⁸⁾。

循環型の設計の観点としては、自動車メーカーに対して自動車における CRM の使用と位置、新車に使用される再生資源の割合など、詳細かつ使いやすい解体・リサイクル情報を提供する短期的な義務が含まれている。中期的な措置として、型式承認段階での新車のリサイクル可能性と再利用可能性の算定方法の改訂や環境自動車パスポートの開発が取り上げられている。また、2030 年までにプラスチックの再生利用率目標を 25% とすること、つまり車両製造に使用するプラスチックの 25% 以上を再生プラスチック (うち 25% を ELV 由来) とするという野心的水準が設定されている。鉄鋼については、規則発効後 3 年以内にフィージビリティ・スタディに基づき、自動車に含まれる鉄鋼のリサイクル率目標を設定することとされている。アルミニウムや CRM のような他の材料についてもリサイクル含有量目標を設定する可能性は、自動車設計の変化やリサイクル能力の利用可能性に基づいて、今後評価することを考えるとしている。ELV に対する生産者の経済的責任を規定することで法定処理費用を確保し、リサイクル事業者の品質向上を促す検査の強化、各国車両登録システムの相互運用性、中古車と ELV の区別改善、走行に耐えない中古車の輸出禁止により、「行方不明」となる車両を阻止することなども検討している。

7) European Commission, End-of-Life Vehicles, EU rules to make the automotive sector circular, to maximize the efficient use of resources and to protect the environment.

https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/end-life-vehicles_en#review (2023 年 7 月閲覧)

8) COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT EXECUTIVE SUMMARY OF THE IMPACT ASSESSMENT REPORT Accompanying the document Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on circularity requirements for vehicle design and on management of end-of-life vehicles, amending Regulations (EU) 2018/858 and 2019/1020 and repealing Directives 2000/53/EC and 2005/64/ECSWD/2023/257 final

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=SWD%3A2023%3A257%3AFIN&%3Bqid=1689323637403> (2023 年 12 月閲覧)

表3 EUの自動車設計と廃自動車管理に関する規則案（2023）の概要

Regulation on circularity requirements for vehicle design and on management of end-of-life vehicles (Proposal)

2023年7月13日、欧州委員会は、現行のELV指令（End-of-Life Vehicle 指令、廃自動車指令）等を改正し、「自動車設計の循環性要件及び廃自動車管理に関する規則案」を公表した。規則案では、自動車の再生プラスチック最低含有率の義務化等が盛り込まれている。

1. 目的

設計・製造から廃車・最終処分までの全段階を対象として、再利用性、リサイクル性、リカバリー性を促進することにより、環境の保護、生産の脱炭素化、材料依存の削減を目的とする

2. 主たる規則案の内容

- 1) 循環設計を改善し、材料や構成部品の取り外しを容易にし、再利用とリサイクルを促進する
- 2) 必須原材料（CRM）、プラスチック、鉄鋼、アルミニウム等の材料を、より多くより高品質に回収する
- 3) 車両製造に使用するプラスチックの25%以上を再生プラスチック（うち25%をELV由来）とする

時期	再生プラスチック最低含有率
施行6年後～ (欧州委員会の事前検討では2031年を想定)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 25%（ポストコンシューマー材） ・ 上記25%のうち25%（=6.25%）は、当該車型のcar to carリサイクル由来

3. 効果見通しとモニタリング

- ・ 2035年にEU域内で380万台のELVが追加的に回収処理される
- ・ 2035年に年間1,230万トンのCO₂-eq削減
- ・ 540万トンの材料（プラスチック、鉄鋼、アルミニウム、銅、CRM）が再利用

https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/end-life-vehicles_en#review（2023年7月14日閲覧）

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=SWD%3A2023%3A257%3AFIN&%3Bqid=1689323637403>（2023年12月12日閲覧）

こうしたELV規制改正提案2023の効果として、自動車の生産と使用済み自動車管理に関連する環境フットプリントを削減することにより、環境に大幅なプラスの効果が期待されている。全体的な環境メリットとしては、2035年に年間1,230万トンのCO₂-eq削減と評価されており、自動車産業の脱炭素化にとって重要である。これは、EU域内で最大380万台のELVが追加的に回収・処理されることになることで、540万トンの材料（プラスチック、鉄鋼、アルミニウム、銅、CRM）が、より高い品質でリサイクルされるか、再使用されることになることが主要因とされている。また、2035年には、永久磁石材料に含まれるレアアース350トンが、再利用とリサイクルのために別途回収され、これはCRMの戦略的自立に向けたEUの取り組みに大きく貢献するとしている。

翻って日本では、自動車リサイクル法において、施行後五年以内に、この法律の施行の状況について検討を加え、その結果に基づいて必要な措置を講ずる（法附則第13条）と規定されており、2010年に

「自動車リサイクル制度の施行状況の評価・検討に関する報告書」（平成22年報告書）が取り纏められた。その後、2015年には平成27年報告書、2021年には令和3年度報告を取り纏めている。令和3年度報告では、自動車リサイクル制度の安定化・効率化と3Rの推進・質の向上とともに、変化への対応と発展的要素として、2050年カーボンニュートラルの実現に向けた取り組みに触れ、電動化の推進や車の使い方の変革等に応じた新しい部品・素材の使用における環境配慮設計等を求めるとともに、適切な回収・リユース・リサイクル体制の整備や、使用済み自動車全体の資源循環における温室効果ガス排出削減等、制度の柔軟な見直しを含む必要な措置を講じることを求めた。具体的な措置の検討と実施を進めつつ、自動車リサイクルのあるべき姿を、再度、根本的に考えるべき時期にきている。