

令和5年度自動車リサイクルにおける再生材利用拡大に向けた

産官学連携推進事業

(うち POPs を含む廃プラスチック高度選別技術実証事業)

ELV プラスチックの選別・検出系の高度化実証事業

報告書

令和7年3月



株式
会社

東和テクノロジー

全体概要

2050 年カーボンニュートラルを実現するためには、化石由来資源が使われているプラスチック製品のリサイクルが不可欠である。また、自動車リサイクルにおいては、使用済自動車 (End-of-Life Vehicles、以下、「ELV」という。) の設計の循環性要件及び管理に関する規則案 (以下、「ELV 規則案」という。) が欧州にて提案されており、同規則案では、2030 年以降に EU 域内で流通する自動車に一定比率以上の再生プラスチックの使用を義務付ける方針が示されている。

欧州のこうした規則案や、残留性有機汚染物質 (Persistent Organic Pollutants、以下、「POPs」という。) に関するストックホルム条約 (以下、「POPs 条約」という。) 等への対応として、自動車リサイクルに関わる製造業者やリサイクル業者等が連携し、高品質な再生材の利用拡大に向けた技術の構築を進めるとともに、プラスチックのリサイクル技術・システムの高度化を図り、社会実装を見据えた技術的課題を解決していくことが求められる。

令和5年度自動車リサイクルにおける再生材利用拡大に向けた産官学連携推進事業 (うち、POPs を含む廃プラスチック高度選別技術実証事業) (ELV プラスチックの選別・検出系の高度化実証事業) (以下、「本実証事業」という。) では、自動車リサイクルシステムにおいて、再生プラスチックの高度利用化促進に向けた選別技術の実用化を目的とし、高度利用を阻害する化学物質 (POPs 及びその他の化学物質) を含むプラスチックの選別技術の開発・実証を行った。

以下に、本事業を通じて得られた主な成果を示す。

成果 1 ELV 規則及び POPs 規則に適合した POPs 対応の方向性

ELV 規則案においては、第 5 条(1)において「懸念物質の存在を最小限に抑えること」が規定されているものの、現時点では具体的な規制内容や数値基準は明示されていない。将来的に、エコデザイン・持続可能な製品に関する規則 (Proposal for a Regulation on Ecodesign for Sustainable Products、以下、「ESPR」という。) との整合性が求められることになれば、残留性有機汚染物質に関する欧州規則 (Regulation (EU) 2019/1021 on POPs、以下、「POPs 規則」という。) 等との平仄が図られる可能性がある。

本実証事業では、POPs 条約に基づき規制対象となっている化学物質のうち、臭素系難燃剤に着目した。臭素系難燃剤は、プラスチックの難燃化目的で広く使用されてきた物質であり、特に電気・電子機器や自動車等の耐用年数の長い製品においては、規制後も依然として臭素系難燃剤を含有する部品の存在が確認されている。

近年、自動車の部品プラスチックに臭素系難燃剤が使用される例は減少していると考えられるが、自動車に搭載される繊維製品や電装部品からは依然として高濃度の臭素が検出されており、稀に部品プラスチックからもポリ臭素化ジフェニルエーテル (Polybrominated diphenyl ethers、以下、「PBDEs」という。) が検出される事例が報告されている。これらのことから、解体工程や再商品化プロセス等において、PBDEs が非意図的に部品プラスチックに混入するリスクが懸念される。

POPs 規則においては、PBDEs に対する低濃度基準値 (Low POP Content、以下、「LPC」という。) が段階的に引き下げられることが規定されており、2025 年末までは 500ppm、2027 年末までは 350ppm、以降は 200ppm とされている。この LPC は、テトラ BDE、ペンタ BDE、ヘキサ BDE、ヘプタ BDE、デカ BDE の合算濃度を対象としたものである。なお、仮に臭素源をテトラ BDE と仮定した場

合、これに相当する臭素元素の濃度はそれぞれ約 330ppm、230ppm、130ppm となる。

成果 2 ELV 由来プラスチックの実態把握と優先的に回収すべき部品の選定・評価

ELV 由来の部品プラスチックの回収においては、回収対象とする部品の情報を多角的に把握することがリサイクル実務の実効性を左右する重要課題である。このため、本調査では、既存データベースを活用した定量的分析と、国内 2 事業者による実車解体実証試験を組み合わせ、部品プラスチックの回収性及びリサイクル適正に関する検証を行った。

具体的には、データベース解析に基づき、比較的重量の大きい部品として 11 パーツグループを抽出した上で、さらに解体作業の容易性や作業時間等の実務的観点を加味し、回収優先度の高い部品として(1)バンパー、(2)ドアパネル、(3)トランクコンパートメント、(4)ピラーパネル、(5)インストルメントパネルの 5 パーツグループを選定した。その後、解体業者が保有する実際の ELV を対象として、臭素濃度調査を実施し、既存知見とあわせて部品プラスチック中の臭素濃度分布を網羅的に把握した。さらに、上記 5 パーツグループについては、PBDEs 等の臭素系難燃剤を対象とした化学分析を行い、本実証事業においては、いずれのパーツグループにおいても臭素系難燃剤が含有されていないことが確認された。

なお、ELV 由来プラスチックが含有する可能性がある POPs 等の実態については、主要な国際規則に基づき対象物質をより広範に選定した上で、化学分析による含有状況について付録 A に集約した。

成果 3 POPs 規則対応に向けた臭素除去選別技術の開発及び検証

臭素を含有する部品プラスチックの検知及び選別技術について、本実証事業において実証試験を実施した。対象とした技術は、X 線分光法に基づく「透過 X 線選別装置」と「蛍光 X 線選別装置」の二種類である。

透過 X 線選別装置については、既に他分野で実用化されている実機(以下、「既存機」という。)に加え、臭素含有部品の選別性能を高めることを目的として、本実証事業では、ダイオーエンジニアリング(株)が自社の費用で独自に開発した新型機(以下、「新型機」という。)を用いて実証実験を実施した。新型機においては、部品の大きさやタルク等の充填材の有無に関わらず、臭素濃度 10,000ppm 以上の部品を安定して除去選別可能であることが確認された。

また、臭素の微量検知に対応するため、新たに開発・製作した蛍光 X 線選別装置については、臭素濃度 30ppm 程度までの検知が可能であることが確認された。ただし、当該装置の処理能力については、実用化に向けた更なる改良の必要性が示唆された。

成果4 部品プラスチックのリサイクルポテンシャルと臭素濃度の影響評価

解体実証試験及び既存統計データ(A2MAC1 が提供するデータベース)に基づき、部品プラスチックの回収ポテンシャル及び臭素濃度の推計を行った。ポテンシャル評価では、成果2で選定した 5 パーツグループ(バンパー、ドアパネル、トランクコンパートメント、ピラーパネル、インストルメントパネル)に着目し、ELV 由来のポリプロピレン(Polypropylene、以下、「PP」という。)量を算出した。その結果を表1に示す。5 パーツグループから回収される PP 量は、新車製造に必要な PP 量に対して、2030 年時点で 11.6%、2050 年時点で 10.1%を占めると推計された。

表1 ポテンシャル計算の結果

項目	2030	2050
①新車販売に必要なプラスチック量(万トン)	61.5	57.5
(②①のうち、PP 量(万トン))	(37.3)	(34.9)
③ELV 由来のプラスチック量(万トン)	21.8	17.7
(④③のうち、PP 量(万トン))	(12.7)	(10.3)
(⑤④のうち、5パーツ G の PP 量(万トン))	(7.2)	(5.8)
自動車部品として再利用した際の割合ポテンシャル(%) (⑤÷①×100)	11.6	10.1

また、再生プラスチック中の臭素濃度について、解体工程あるいは回収後の処理工程において、臭素濃度 10,000ppm 以上の部品プラスチックを選別除去した場合の影響を推計した。本推計は、本実証事業で得られた部品プラスチックの臭素濃度分布データを用い、PP 製の上記5パーツグループと、それ以外の部品群に分けてシミュレーションを実施した。他の部品群の構成割合(混入率)を変動させながら、再生プラスチックの平均臭素濃度を算出した。

その結果、図1に示すとおり、POPs 規則における PBDEs の LPC (500ppm、臭素換算で約 300ppm)を満たすためには、臭素濃度 10,000ppm 以上の部品を除去選別することで、その他の部品群の混入率が 100%であっても基準値内に収まることが確認された。一方、除去選別を行わない場合は、その他部品群の混入率を 40%以下に抑える必要があることが確認された。

実証試験に基づく評価では、ELV におけるその他部品群の重量割合は、約 38%であり、現時点の LPC (500ppm)に対しては十分対応可能と判断される。ただし、今後 LPC が 200ppm へと段階的に強化された場合には、臭素含有プラスチックの除去選別が実務上必要となる可能性がある。

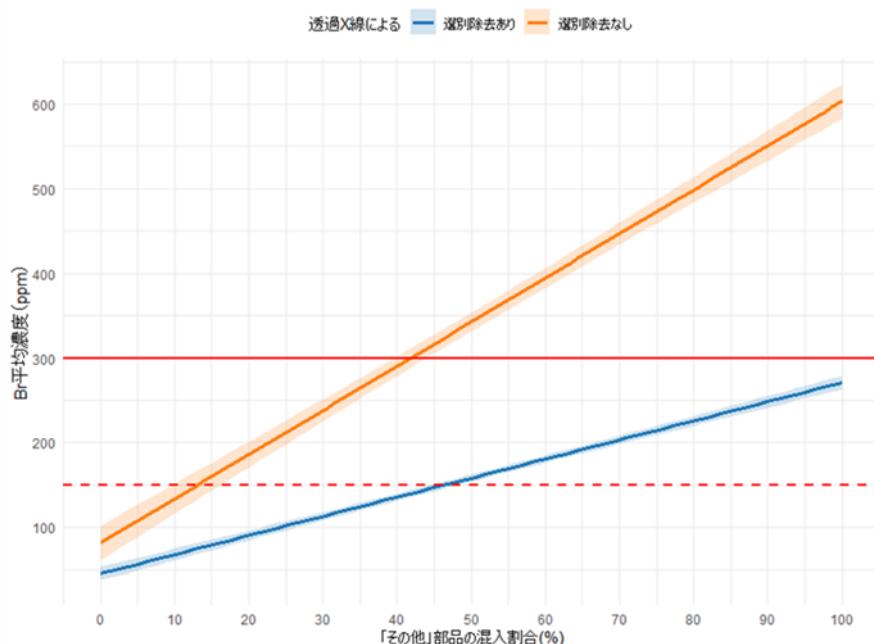


図1 透過X線選別の有無と「それ以外」部品の混入割合によるBr平均濃度[ppm]の推移

※着色部分：95%信頼区間、赤線：Br 300 ppm（POPs 規則におけるPBDEs のLPCである500ppm相当）、赤破線：150 ppm（POPs 規則におけるPBDEs の2027年以降のLPCである200ppm相当）

今後の展望

以上の実証結果を踏まえ、ELV から回収される部品プラスチックを原料とする再生プラスチックが、POPs 規則によるPBDEs 規制に適合するためには、今後次の三つの段階を見据えた対応が求められる。

- 第1段階は、PBDEs のLPC が500ppm とされる時期である。この段階では、ELV リサイクルループにおいて、臭素含有プラスチックの選別が必ずしも必要とならない可能性がある。
- 第2段階は、LPC が350ppm に強化される期間であり、2025 年末から2027 年末までの移行期と位置づけられる。
- 第3段階は、LPC が200ppm に引き下げられる2027 年末以降である。

こうした規制強化のスケジュールに合わせて、本実証事業で性能が確認された臭素含有プラスチックの選別装置を活用することで、リサイクルループにおける選別体制の構築が可能となる。全体像は図2に示すとおりである。

臭素含有プラスチックの選別は、解体業者及びプラスチックリサイクラー（コンパウンダー）双方で実施されることが想定される。解体業者においては、素材表示に基づく部品プラスチックの選別や、シート繊維等の難燃加工された部品の除去といった二次解体が有効である。一方、プラスチックリサイクラーにおいては、破碎状態で搬入されるプラスチックに対して、リサイクルラインの最上流に透過X線選別装置を設置することで、高濃度の臭素含有部材の除去が可能となる。

本装置を導入した場合のコスト増加は、受け入れプラスチック量を基準とした試算で約 11 円/kg となり、再生プラスチック原料価格 (237.1～249.1 円/kg)¹の 6～7%程度に相当する。導入による主な効果としては、臭素非含有素材としての市場競争力の向上が挙げられる。特に、今後導入が見込まれる循環型自動車パスポート制度等の認証制度においては、こうした取り組みが付加価値として評価される可能性が高い。

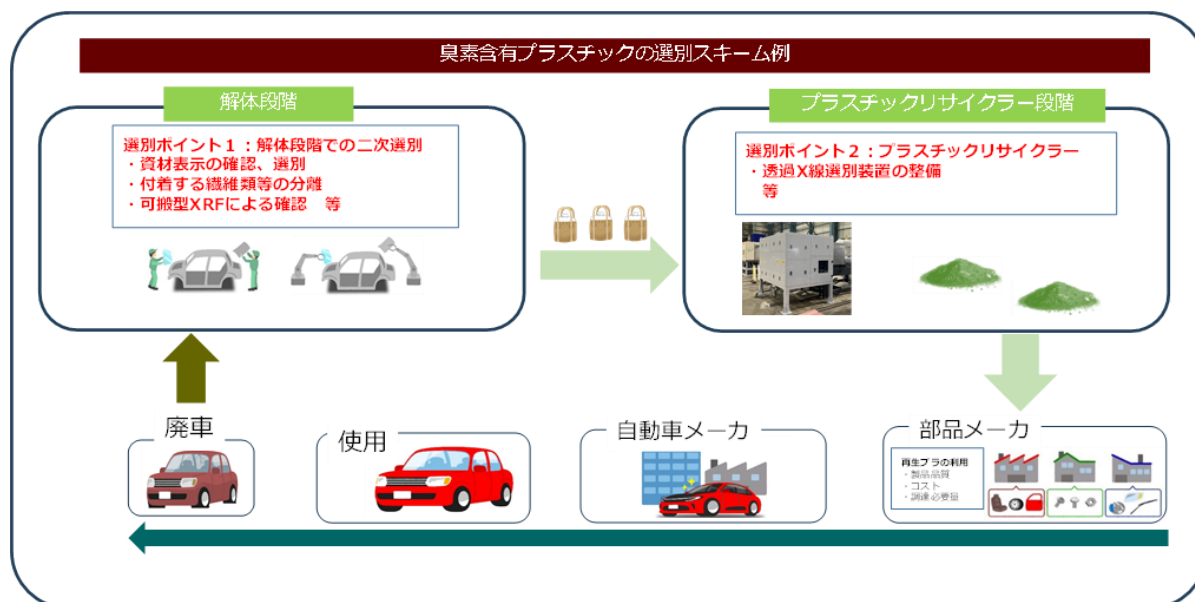


図2 臭素含有プラスチックの選別ポイント例

本実証事業で得られた知見と技術的成果は、今後の部品プラスチックの高度リサイクル実現に向けた出発点であり、実際の運用においては解体業者、リサイクラー、素材メーカー等、関係事業者の主体的かつ協調的な取り組みが不可欠である。これらの連携が進展し、ELV 由来プラスチックの資源循環がさらに促進されることに期待し、本実証事業を締めくくることがしたい。

¹ 環境省委託事業「平成 27 年度低炭素型 3R 技術・システム実証事業(動静脈の連携による自動車樹脂部品リサイクルスキームの構築)」(平成 28 年 2 月 いその株式会社)

実施体制

本実証事業の実施体制は、図3に示すとおりである。

本実証事業は、(株)東和テクノロジーを代表者として、共同実施者として、いその(株)、三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング(株)、(株)島津テクノロジーが各業務を実施した。具体的には、(株)東和テクノロジーが全体事業計画の策定を行うとともに、選別装置の設計、製作、実証試験を行い、事業性の評価を行った。いその(株)は、ELV プラスチックリサイクル工程におけるコンパウンダーの立場から、選別装置開発の支援及び実証試験会場の確保を行い、ELV からの部品プラスチックの調達及び再生プラスチックの品質検査等を実施した。三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング(株)は、本実証事業を進めるために必要となる自動車業界静脈、動脈産業からの情報収集を行うとともに、阻害物質に関するリストの作成を行った。(株)島津テクノロジーは、主に部品プラスチックに含まれる阻害物質の分析方法を検証し、必要と考えた物質の分析を実施した。

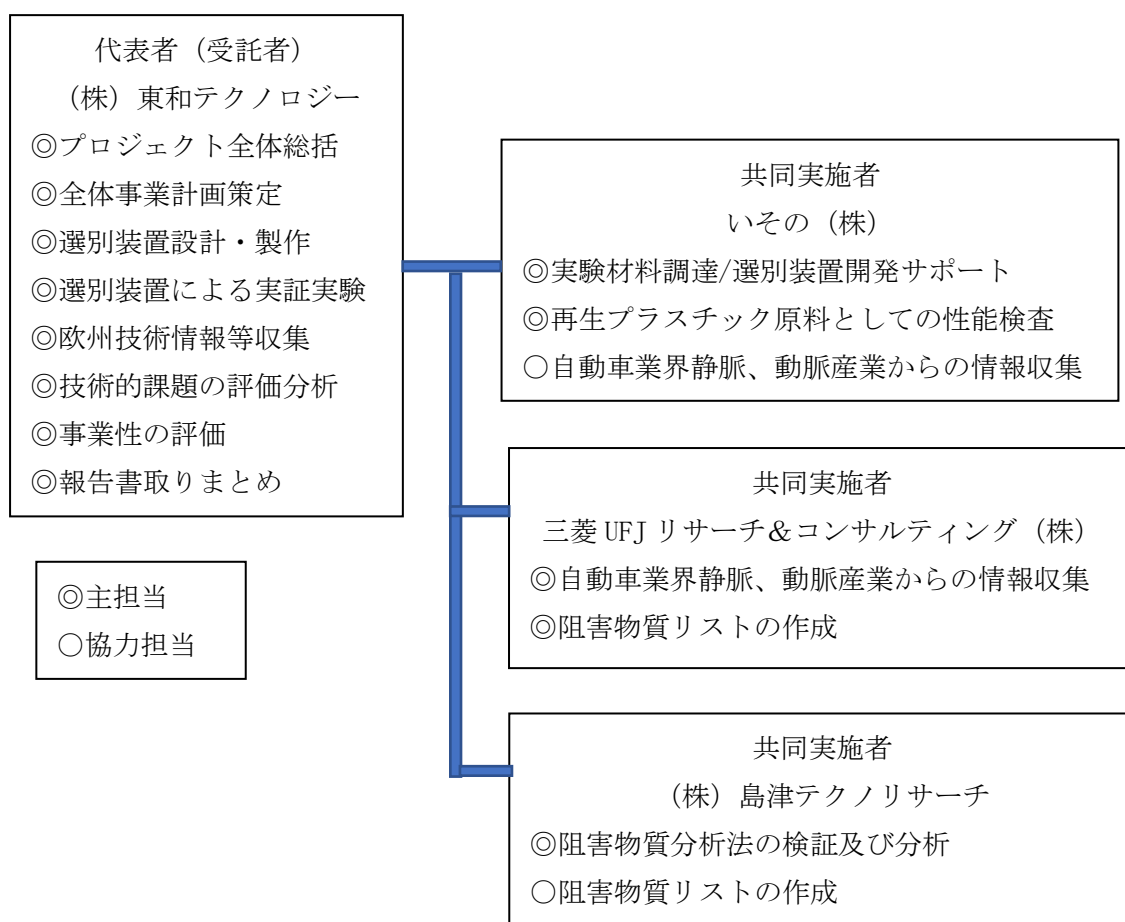


図3 業務実施体制図

Summary

Achieving carbon neutrality by 2050 necessitates the recycling of plastic products currently derived from fossil resources. In Europe, a regulatory proposal for the automotive recycling sector mandates a minimum percentage of recycled plastics in vehicles sold within the EU from 2030 onward, as part of the proposed regulations on circularity requirements for vehicle design and end-of-life vehicle (ELV) management (the ELV Regulation Proposal). In response to these European proposals and instruments, such as the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (POPs), we must develop technologies—through collaboration among manufacturers, recyclers, and related stakeholders—that expand the use of high-quality recycled materials, advance plastic recycling technologies and systems, and address technical challenges with the aim of practical implementation.

This demonstration project aims to commercialize sorting technologies that promote the advanced utilization of recycled plastics within automotive recycling systems. Specifically, it focuses on developing plastic-sorting techniques capable of detecting and segregating plastics containing chemical substances (including POPs and other compounds) that hinder high-level reuse. The key findings from this project are outlined as follows:

Key Finding 1: Compliance with the ELV and POPs Regulation

While Article 5(1) of the ELV Regulation Proposal stipulates the minimization of substances of concern, it does not specify any concrete provisions or numerical thresholds so far. Going forward, this proposal may be aligned with other regulations, such as the Proposal for a Regulation on Ecodesign for Sustainable Products (ESPR), potentially leading to harmonization with Regulation (EU) 2019/1021 on POPs (the POPs Regulation).

In this project, our research focused on brominated flame retardants, among the regulated chemicals under the POPs Convention. Brominated flame retardants have historically been used extensively in plastics to improve flame resistance. Even after the introduction of regulatory measures, components containing these substances persist in products with long service lives, such as electrical and electronic equipment and vehicles.

Although the use of brominated flame retardants in automotive plastic parts has reportedly declined in recent years, elevated bromine concentrations are still detected in textiles and electronic components within vehicles, and there are occasional reports of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in plastic parts. Consequently, there is concern that PBDEs may inadvertently contaminate other parts during the dismantling or reconditioning processes.

Under the POPs Regulation, the Low POP Content (LPC) for PBDEs will be reduced in stages—500 ppm until the end of 2025, 350 ppm until the end of 2027, and subsequently 200 ppm. These thresholds apply to the total concentration of tetraBDE, pentaBDE, hexaBDE, heptaBDE, and decaBDE. Notably, if we assume that bromine originates from tetraBDE, the corresponding bromine concentrations for these LPC values would be approximately 330, 230, and 130 ppm, respectively.

Key Finding 2: Assessment of ELV-Derived Plastics and Prioritization of Parts for Recovery

Effective recovery of plastic components from ELVs requires comprehensive, multifaceted information on target parts, which is vital for ensuring the practical feasibility of recycling operations. To this end, the present study combined a database-driven quantitative analysis with actual vehicle dismantling tests carried out by two domestic recycling companies.

First, the database analysis identified 11 parts with relatively large mass. Considering additional practical factors such as ease of dismantling and labor time, five parts were selected as high-priority recovery targets: (1) bumpers, (2) door panels, (3) trunk compartments, (4) pillar panels, and (5) instrument panels. Subsequently, bromine concentration measurements were performed on actual ELVs at dismantling facilities, revealing the overall distribution of bromine concentrations in plastic parts. Further chemical analyses of these five parts for PBDEs and other brominated flame retardants confirmed that none of the analyzed parts contained brominated flame retardants.

Additional details regarding the potential presence of POPs and other regulated chemicals in ELV-derived plastics are provided in Appendix A, which includes a broader screening of target substances based on major international regulations.

Key Finding 3: Development and Evaluation of Bromine Removal and Sorting Technologies for POPs Compliance

As part of this project, demonstration tests were conducted to detect and sort brominated plastic parts. Two types of X-ray-based technologies were evaluated: a “transmission X-ray sorter” and a “fluorescence X-ray sorter.”

For the transmission X-ray sorter, both a commercially available model (already used in other industries) and a newly developed prototype were tested. The prototype was designed to enhance sorting performance for brominated parts. Results showed that parts containing 10,000 ppm or more of bromine could be reliably detected and removed, regardless of part size or the presence of fillers such as talc.

To enable the detection of trace bromine concentrations, the newly developed fluorescence X-ray sorter was also evaluated. It demonstrated a detection capability as low as approximately 30 ppm of bromine. However, further technical improvements are recommended to achieve throughput levels suitable for large-scale commercial applications.

Key Finding 4: Evaluation of Recycling Potential and Impact of Bromine Concentration

Drawing on data from dismantling tests and existing statistics, this project estimated the quantity of recoverable plastic from specific parts and its associated bromine concentration. Focusing on the five parts identified under Key Finding 2—bumpers, door panels, trunk compartments, pillar panels, and instrument panels—the polypropylene (PP) content in ELVs was calculated. Table 1 summarizes the findings, indicating that the recovered PP from these five components would account for approximately 11.6% of the PP required for new vehicle production by 2030, and about 10.1% by 2050.

Table 1. Results of Potential Estimation

Item	2030	2050
(1) Total plastic required for new vehicle sales (10,000 tons)	61.5	57.5
(2) of (1) that is polypropylene (PP) (10,000 tons)	(37.3)	(34.9)
(3) Plastic derived from ELVs (10,000 tons)	21.8	17.7
(4) of (3) that is PP (10,000 tons)	(12.7)	(10.3)
(5) of (4) corresponding to the 5 selected parts (10,000 tons)	(7.2)	(5.8)
Reuse potential as automotive components (%) ((5)/(1)×100)	11.6	10.1

Next, a simulation evaluated the potential impact of sorting and removing parts with 10,000 ppm or greater bromine at either the dismantling stage or the post-recovery process. Using bromine concentration distribution data from this project, the average bromine level in recycled plastic was estimated under various “miscellaneous parts” mixing ratios—where the five major PP parts were separated from the rest.

As shown in Figure 1, to meet the PBDE LPC threshold under the POPs Regulation (500 ppm, corresponding to roughly 300 ppm of bromine), removing parts with 10,000 ppm or greater bromine ensured compliance even with a 100% mixture of miscellaneous components. Without such removal, however, the proportion of miscellaneous parts had to be limited to approximately 40% or less. According to these demonstration results, miscellaneous parts currently comprise about 38% of overall ELV mass, suggesting that the existing LPC threshold of 500 ppm can still be met. Nevertheless, once the LPC is tightened to 200 ppm by the end of 2027, practical separation of brominated plastics will likely become essential.

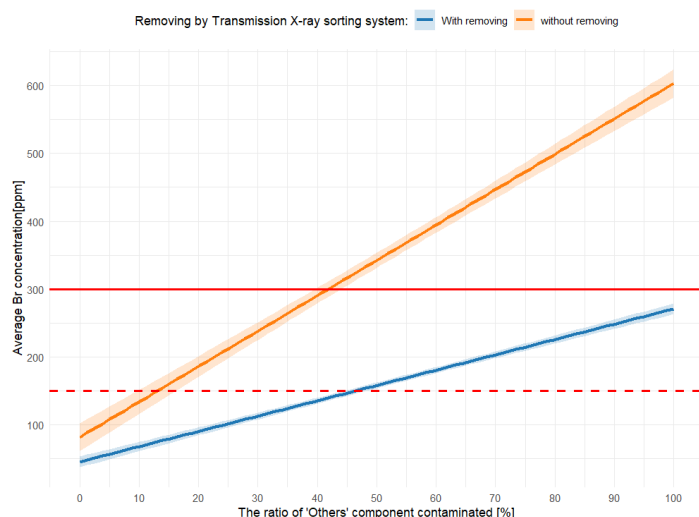


Figure 1. Changes in average Br concentration (ppm) with and without transmission X-ray sorting under varying mixing ratios of ‘miscellaneous’ parts².

²Shaded area: 95% CI; Red line: Br 300 ppm (equivalent to PBDE LPC = 500 ppm under POPs Regulation); Red dashed line: Br 150 ppm (equivalent to PBDE LPC = 200 ppm after 2027).

Outlook

In view of these demonstration results, ensuring compliance with PBDE regulations under the POPs Regulation for recycled plastics derived from ELVs will require a staged approach:

- Stage 1: While the LPC for PBDEs remains at 500 ppm, it may be feasible to maintain compliance without mandating the removal of brominated plastics from the ELV recycling loop.
- Stage 2: From the end of 2025 to the end of 2027, when the LPC will be tightened to 350 ppm, the industry will be in a transitional phase.
- Stage 3: From the end of 2027 onward, once the LPC is further reduced to 200 ppm, systematic separation of brominated plastics will likely become indispensable.

To address these increasingly stringent thresholds, the X-ray-based sorting technologies validated in this project can be integrated into the existing recycling chain. Figure 2 illustrates the envisioned sorting points for bromine-containing plastics.

Both dismantling companies and plastic recyclers (compounders) are expected to remove bromine-containing plastics. At dismantling facilities, effective secondary dismantling may include sorting based on material labeling and removing flame-retardant textiles (e.g., seat covers). Plastic recyclers can then install transmission X-ray sorters at the upstream stage of their recycling lines to eliminate heavily brominated materials from shredded plastic inputs.

A preliminary cost analysis indicates that installing such equipment would add approximately JPY 11 per kilogram of incoming plastic—equivalent to about 6–7% of the current market price of recycled plastics (JPY 237.1–249.1 per kilogram). While this raises processing costs, the primary benefit lies in enhanced market competitiveness for non-brominated materials. Notably, in future certification schemes such as circular automotive passports, this initiative could generate significant added value.

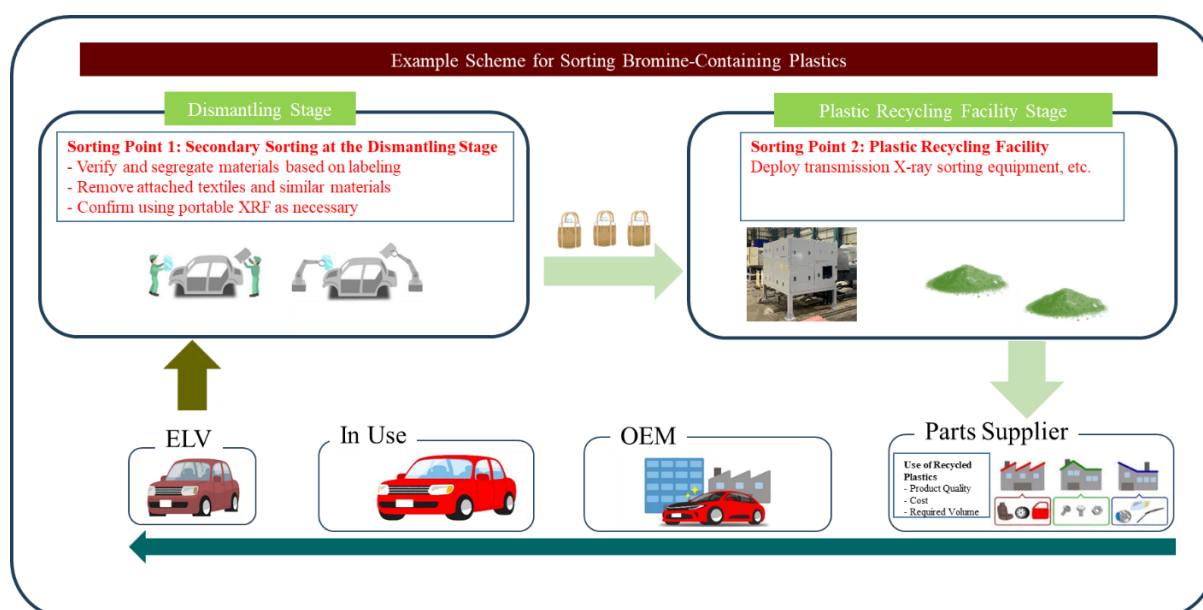


Figure 2. Example of sorting points for bromine-containing plastics

The findings and technological accomplishments of this demonstration project serve as a foundation for advancing high-level automotive plastic recycling. Successful deployment will require proactive, collaborative efforts among dismantlers, recyclers, material manufacturers, and other stakeholders. It is anticipated that such concerted actions will strengthen supply chain linkages, thereby further promoting resource circulation of ELV-derived plastics. We conclude this project with the expectation that these results will spur further progress toward a robust circular economy for automotive plastics.

Implementation system

The implementation system for this demonstration project is shown in Figure 3.

For this demonstration project, Towa Technology Co., Ltd. served as the lead organization, while the co-implementing partners—Isono Co., Ltd., Mitsubishi UFJ Research & Consulting Co., Ltd., and Shimadzu Techno-Research Inc.—each carried out their respective tasks. Specifically, Towa Technology Co., Ltd. formulated the overall project plan, designed and fabricated the sorting equipment, conducted the demonstration tests, and evaluated business feasibility. Acting from the perspective of a compounder within the ELV plastic-recycling process, Isono Co., Ltd. supported the development of the sorting equipment, secured the test site, procured plastic parts from ELVs, and conducted quality inspections of the recycled plastics. Mitsubishi UFJ Research & Consulting Co., Ltd. gathered information from both the downstream and upstream sectors of the automotive industry necessary to advance the project and compiled a list of inhibitory substances. Shimadzu Techno-Research Inc. validated analytical methods for detecting contaminants in component plastics and performed analyses of any substances deemed necessary.

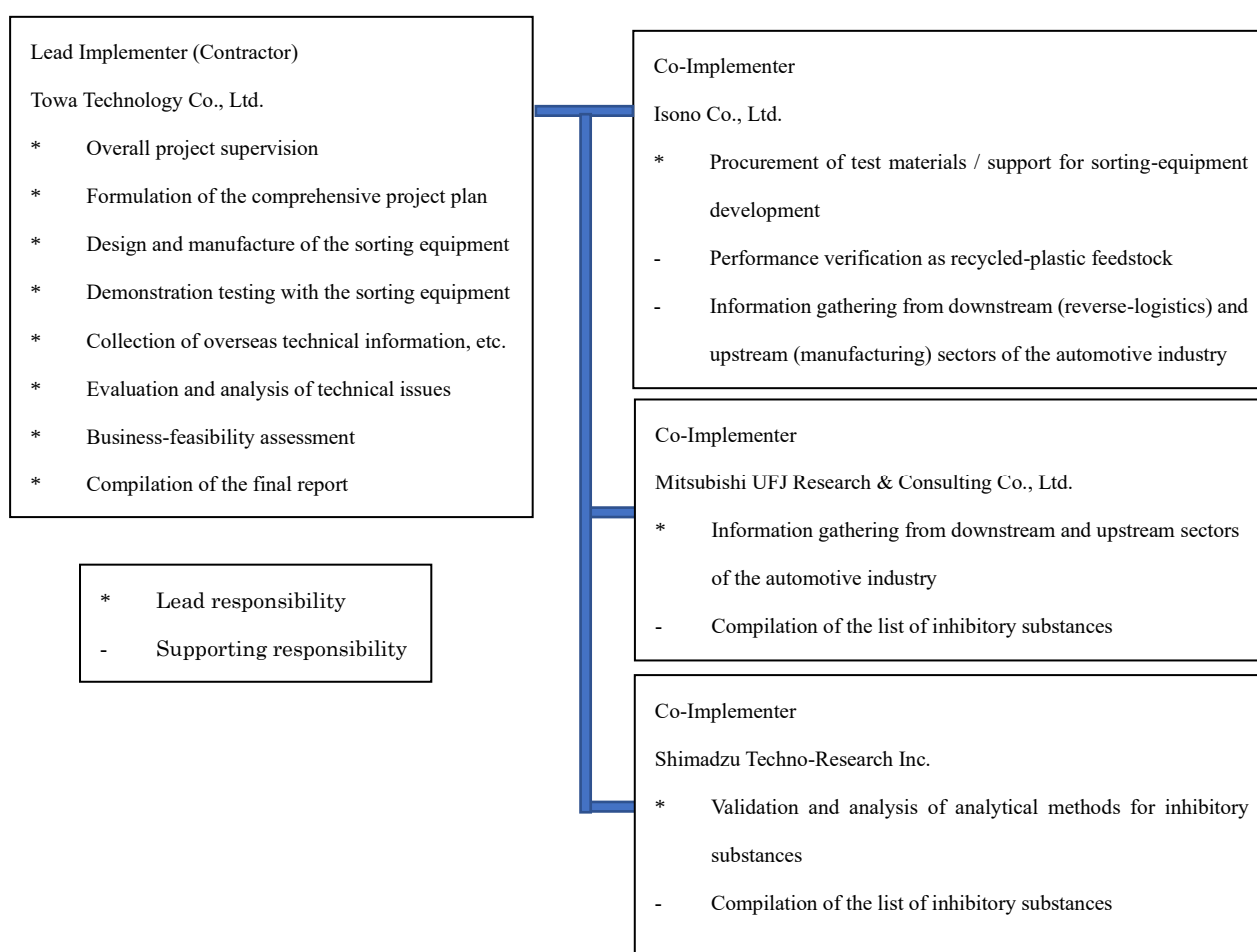


Figure 3. Implementation system of the demonstration project

目次

全体概要

第1章 自動車部品プラスチックに含まれる POPs 等に関する情報の整理・蓄積	1
1. ELV 規則案及び関連規制における POPs 対応の方向性	2
1. 1. ELV 規則案の概要	2
1. 2. ELV 規則案におけるプラスチックリサイクルの概要	4
1. 3. ELV 規則案における懸念物質の概要	4
1. 4. 本実証事業に関連する重要な規則：POPs 規則の概要	4
1. 5. 本実証事業に関連する重要な規則：エコデザイン規則の概要	6
1. 6. EU の専門家へのヒアリング結果	6
1. 7. まとめ	8
2. 本実証事業で優先的に評価する POPs の選定と位置づけ	9
2. 1. POPs 条約の概要	9
2. 2. POPs 指定されている臭素系難燃剤	11
2. 3. PBDEs に関する既往知見	12
2. 4. 本実証事業で優先的に評価する POPs	17
3. ELV 由来プラスチックと回収候補パーツの選定	18
3. 1. ELV 由来プラスチックパーツ候補の検討	18
3. 2. プラスチックパーツの回収と評価	38
4. 部品プラスチック中の臭素系難燃剤の分析	48
4. 1. 三世代別車両部品一世代別に等量混合した試料	48
4. 2. 三世代別車両部品一個別車両ごとの試料	52
4. 3. 自動車部品プラスチック由来の再生材	56
4. 4. (参考) フリップモニター	58
4. 5. まとめ	60
第2章 プラスチック成分の検知・選別装置の開発と実証 (POPs 他)	61
1. X 線選別装置の原理	62
2. 透過 X 線選別装置による実証試験	63
2. 1. 方法	63
2. 2. 結果	69
3. 蛍光 X 線選別装置の開発及び実証試験	77

3. 1. 蛍光 X 線選別装置の開発・製作.....	77
3. 2. 実証試験	86
4. X 線選別装置による実証試験のまとめ	93
5. 再生プラスチック原料としての性能を有することの評価実証試験	95
5. 1. 目的	95
5. 2. 方法	95
5. 3. 結果	97
5. 4. 評価	98
6. ELV から回収できる部品プラスチックのポテンシャル及び臭素濃度の推計	99
6. 1. 調査概要	99
6. 2. 廃自動車中のプラスチック使用量推定.....	99
6. 3. 廃自動車中の選別除去による Br 除去効果の解析.....	103
7. パーツ回収等のシステム化検討.....	107
7. 1. EU 圏内の各種規則等において考慮すべき事項	107
7. 2. 部品プラスチックに含まれる臭素濃度分布と LPC の関係.....	107
7. 3. 透過 X 線選別装置導入時の費用概算.....	108
7. 4. 環境影響の低減.....	110
7. 5. 臭素選別装置の社会実装の可能性及び課題.....	112
付録 A 使用済自動車から回収したプラスチック部品の化学分析	113
1. 分析の対象とした部品プラスチック.....	113
2. 化学分析の方法及び結果.....	114
2. 1. 分析手順	114
2. 2. 分析手法の概略と測定条件.....	115
2. 3. 混合検体の調製	118
2. 4. 化学分析の結果	119
2. 5. 化学分析結果の評価	136

第1章 自動車部品プラスチックに含まれる POPs 等に関する情報の整理・蓄積

欧州において現在審議中の「自動車設計及び使用済自動車(ELV)に関する持続可能性要件規則案(ELV 規則案)」では、ELV 由来のプラスチックに含まれる残留性有機汚染物質(POPs)等の懸念物質については、これを最小化することとされており、リサイクル工程における混入防止措置が求められることになる。さらに、現行案では、2030 年以降に市場投入される新車に対しては、使用されるプラスチックの少なくとも 25%をリサイクル由来とし、そのうち 25%(すなわち全体の 6.25%)は ELV 由来でなければならないという、新たなリサイクル材使用義務も導入される見通しである³。このような要件により、自動車メーカーは、リサイクル材の調達・トレーサビリティ確保とともに、ELV 由来プラスチックを原料とする再生プラスチックの品質確保及び規制物質の混入リスク低減に取り組むことが求められるようになる。

一方、現時点においては、ELV 由来プラスチックに含まれる POPs 等の含有実態や回収量に関する体系的な情報は十分に整備されておらず、選別技術の高度化や実効的な管理手法の確立に向けた基礎情報の蓄積が課題となっている。そのため、優先的に評価すべき POPs(以下、「優先評価物質」という。)を明確化するとともに、ELV から回収可能なプラスチックの種類及び回収量を把握し、リサイクル工程において優先的に選別・管理すべき部品(以下、「回収候補パーツ」という。)を選定することで、選別技術の高度化に向けた基礎情報を整理する必要がある。

本章では、まず ELV 規則案について概観し、本実証事業における検討課題を明確化する。次いで、ELV 由来のプラスチック部品等に含まれる POPs を整理し、本実証事業において優先評価物質として臭素系難燃剤を選定する背景を示す。続いて、ELV から回収可能なプラスチックの種類、回収可能量、発生頻度を推定することにより回収候補パーツを選定する。さらに、回収候補パーツについて、臭素系難燃剤及び構成元素である臭素の含有実態を化学分析により明らかにする。

なお、ELV 由来プラスチックが含有する可能性がある POPs 等の実態については、主要な国際規則に基づき対象物質をより広範に選定した上で、化学分析による含有状況について付録 A に集約した。

³ ELV 規則案については、EU 議会は 2025 年 1 月 29 日、ELV 規則案を改定した第 2 版を公表し、従来案である基準の再生プラスチック利用率を 25%から 20%に、そのうち ELV(廃自動車)由来の利用率を 25%から 15%にそれぞれ緩和した。
<https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/theme-a-european-green-deal/file-revision-of-eu-rules-on-end-of-life-vehicles-and-type-approval-of-motor-vehicles>

1. ELV 規則案及び関連規制における POPs 対応の方向性

欧州委員会が提案した ELV 規則案では、ELV からの部品プラスチックの再資源化を促進するための新たな制度的枠組みが提示されており、リサイクル材使用義務の導入や懸念物質の管理強化が盛り込まれている。リサイクル工程における懸念物質の混入防止も重要な課題とされており、POPs 等の規制対象物質への対応が求められている。

本節では、ELV 規則案の概要とともに、POPs 規則、エコデザイン規則等の関連制度の動向を整理し、本実証事業の背景及び位置づけを明確にする。

1. 1. ELV 規則案の概要

2023 年 7 月 13 日、欧州委員会は ELV 規則案を提案した。欧州グリーン・ディール及び循環経済行動計画に沿って、ELV 規則案の提案は、既存の 2 つの指令に基づき、これらに代わるものとされる。既存の 2 つの指令とは、使用済み自動車に関する指令 2000/53/EC と、再利用可能性、リサイクル可能性、回収可能性に関する自動車の型式承認に関する指令 2005/64/EC である(欧州委員会 2023⁴)。

欧州グリーン・ディールは、欧州の成長戦略であり、2050 年までに気候変動に左右されない、クリーンで循環型の経済を実現することを目標としている。循環経済行動計画⁵と欧州の新産業戦略⁶は、グリーン・ディールの目標を達成するための欧州産業のロードマップを示している。行動計画には、「設計上の問題を廃棄物処理に関連付けることによって、より循環的なビジネスモデルを促進し、特定の材料に対するリサイクル率の義務付けに関する規則を検討し、リサイクル効率を向上させる」ことを目的として、使用済み自動車(ELV)に関する法律を見直すという公約が含まれている。EU の行動計画「大気、水、土壌の汚染ゼロに向けて」⁷でも、欧州委員会が、ELV や中古車の輸出に関連した EU の対外的な環境フットプリントに対処するための新たな措置を提案する必要性が強調されている(欧州委員会 2024)⁸。

ELV 規則案については、図 1-1-1 のとおり、現在、公募した意見を踏まえた審議中とされる。

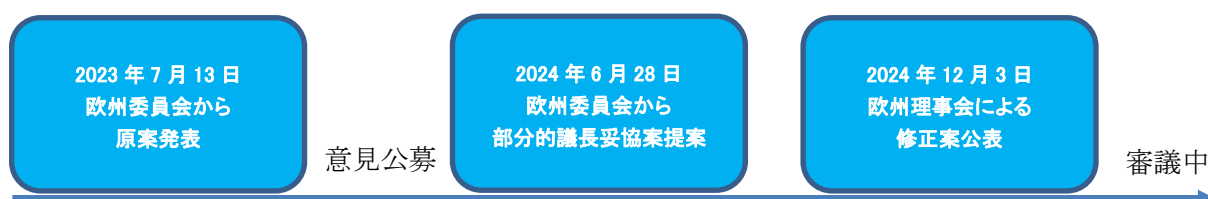


図 1-1-1 ELV 規則案の進捗状況

⁴自動車設計のための循環性要件及び使用済み自動車の管理に関する欧州議会及び欧州理事会の規則案。ブリュッセル，13.7.2023 COM(2023) 451 final 2023/0284 (COD).

⁵https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en

⁶<https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/industry-and-green-deal>

⁷https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en

⁸ 欧州委員会(2024 年)使用済み自動車 - 自動車セクターを循環型にし、資源の効率的利用を最大化し、環境を保護するための EU 規則 https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/end-life-vehicles_ja

ELV 規則案の骨子は、つぎの5点である。

- 車両設計の循環性向上
- 自動車におけるリサイクル材使用率向上
- 廃棄物処理改善によるリサイクル材価値向上
- 車両ライフサイクルのガバナンス改善
- 行方不明車両の低減

また、ELV 規則案では、ELV 処理事業者に対して、次の事項を義務付けている。

- 部品へのラベル表示
- 循環性戦略作成
- デジタル解体証明書の発行
- 認可を受けた施設での収集、保管、処理
- 指定部品の取り外し(バッテリー、eドライブモーター、触媒コンバーター、エアバック、ガラス、タイヤ、大型プラスチック(10kg 以上)、ダッシュボード等)
- 部品の適切な処理

ELV 規則案に対して公募された意見等から主な論点をまとめると、次のとおりとなる。

- 高すぎるリサイクル目標
- 再生材ソースを拡大しないとリサイクル原料が不足する
- 懸念物質管理について懸念、特に製造段階後に規制された物質への対応困難性
- 2032 年施行予定とされるタイトなスケジュールに対する準備期間の不足

ELV 規則案における施行スケジュールは表 1-1-1 のとおりとされている。このうち、本実証事業と関連がある項目としては、「懸念物質対応明確化(2027 年から)」、「リサイクル材使用率義務化(2031 年から)」及び「循環型自動車パスポート搭載義務化(2032 年から)」がある。なお、これらは現時点のスケジュール案であり、今後の状況に応じて変更される可能性があることに留意が必要である。

表 1-1-1 ELV 規則案の施行スケジュール

項目	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
規則の発効									
規則案の採択	●→								
リサイクル材使用率計算方法規定			●→						
懸念物質対応明確化				●→					
拡大生産者責任制度適用				●→					
リサイクル材含有率宣言義務化									
リサイクル材使用率義務化							●→		
循環型自動車パスポート搭載義務化								●→	

1. 2. ELV 規則案におけるプラスチックリサイクルの概要

欧州委員会が提案した ELV 規則案は、現在、立法府である EU 議会と EU 理事会で審議されている。この提案には、自動車部品プラスチックにおける再生プラスチックの利用率を 25%、さらにこのうち ELV 由来のプラスチック利用率を 25%とし、クローズドループのリサイクル率を 6.25%とする規定が含まれている。ただし、このリサイクル率については、EU 議会が令和7年 1 月 29 日に発出した ELV 規則案第 2 版によると、従来案である基準の再生プラスチック利用率を 25%から 20%に、そのうち ELV(廃自動車)由来の利用率を 25%から 15%にそれぞれ緩和されている。

3R 型式承認指令及び ELV 指令の改正に向けた ELV 規則案では、プラスチックに関して次の新しい規定が導入される。

まず、プラスチックについては、第 2 条(9)で定義されており、「プラスチック」とは、規則(EC)第 3 条(5)にいうポリマーを意味するとしている。一方、天然ポリマーを除外するかどうかが議論され、定義が以下のように調整される可能性がある。

「プラスチック」とは、規則(EC)No 1907/2006 の第 3 条(5)に規定されるポリマーのうち、添加物やその他の物質が添加され、最終製品の主要構成成分として機能するものを意味する。

新車に搭載されるプラスチック部品やコンポーネントは、新プラスチック製であるか再生プラスチック製であるかにかかわらず、この規制に適合しなければならない。

1. 3. ELV 規則案における懸念物質の概要

ELV 規則案では、「懸念物質」の定義を定めておらず、また、第 2 条(27)で定義を定めているエコデザイン・持続可能な製品規則(ESPR)⁹にも言及していない。しかし、ESPR の定義(附属書 II 参照)が適用され、ELV 規則最終版に関連性が導入される可能性がある。もしそうであれば、懸念物質には、POPs 規則、CLP 規則、REACH 規則で規制されている物質(REACH の附属書 XIV の候補に挙げられている物質を含む)、及びそれが存在する製品中の材料の再使用とリサイクルに悪影響を及ぼす物質が含まれることになる。

また、ELV 規則案には、第 5 条(1)の「懸念物質の存在を最小限に抑える」という要求がどのように実行され、監視されるのかについての手順は示されていない。

高懸念物質(Substance of Very High Concern、以下、「SVHC」という。)及び REACH 候補リストの物質については、REACH 規則に基づく報告義務が成形品又は製品に含まれる懸念物質(SCIP)データベースで実施されているにもかかわらず、ELV 規則案には、自動車に含まれる懸念物質の存在を知らせるための追加規定は現時点では含まれていない。

1. 4. 本実証事業に関連する重要な規則：POPs 規則の概要

POPs 条約及びバーゼル条約の加盟国として、EU はこれらの条約の規定を EU POPs 規則で実施している。

発効後、同規則は何度か改正されており、最新の改正は 2023 年である。法改正に伴い、以前は

⁹ 2024 年 6 月 13 日付欧州議会及び理事会規則(EU)2024/1781 は、持続可能なエコデザイン要求事項設定のための枠組みを確立し、指令(EU)2020/1828 及び規則(EU)2023/1542 を改正し、指令 2009/125/EC を廃止するものである(EEA 関連文書)。

POPs 条約に関する義務がなかった使用済み製品も、EU POPs 規則の規定に従って扱うことが必要とされている。従って、POPs を含む使用済み製品のリサイクルは EU POPs 規則の影響を受ける。

POPs 規制は、具体的な管理措置によって人の健康と環境を守ることが目的としている。

- 規制の附属書 I 非意図的微量汚染物質 (Unintentionally Trace Contaminant、以下、「UTC」という。)の制限値を超える POPs の製造、上市、使用を禁止 (特定の除外を含む) または厳しく制限する。
- 規制の附属書 II で産業副産物として形成される POPs の環境放出を最小化する。
- 規制対象の POPs の備蓄が、規制の附属書 III で安全に管理されていることを確認する。
- POPs 規則の附属書 IV では、POPs から成る、または POPs に汚染された廃棄物の環境的に健全な処分を確保する POPs の濃度限度 (LPC) を規定する。

POPs を含む廃棄物は、規則で定められた方法で処理されなければならない。廃棄物に含まれる POPs は、POPs の特性を示さないように破壊されるか、不可逆的に変換されなければならない。POPs に汚染された ELV からの廃棄物の流れに対して許可された処理方法は、POPs 規則の附属書 V に記載されている。

第 7 条(4)によれば、附属書 IV に列挙された物質を含む廃棄物または汚染された廃棄物は、廃棄物中の列挙された物質の含有量が附属書 IV に規定された濃度限度以下であることを条件に、関連する EU 法に従って処分または回収することができる。

POPs 規則は、POPs 条約で特定された物質やバーゼル条約で定められた廃棄物管理要件を踏襲しているため、将来レガシー物質となる可能性があり、POPs 規則で対応する可能性がある物質を特定するためには、これらの条約のプロセスを踏まえることが重要である。

基本的に UTC は製品中に含まれることが許容できる上限値である。プラスチックリサイクルにおいては、プラスチックリサイクラーが製造するコンパウンドされた商品 (ペレット) に適用される。プラスチックリサイクラーは製造事業者と定義される。

POPs 規則によると、ポリ臭素化ジフェニルエーテル (PBDEs) のうち、POPs 指定された同族体¹⁰ (以下、「POP-BDEs」という。)) に関しては、POP-BDEs の合計とする LPC を現行の 500ppm から 2025 年 12 月 30 日から 350ppm に、さらに 2027 年 12 月 30 日から 200ppm に段階的に厳しくすることが決められている。UTC 規定はまだないが、委員会委任規則案によると、LPC と同じ濃度による規制を提案している。

また、新規 POPs であるペルフルオロオクタン酸 (以下、「PFOA」という。)) とその塩及び PFOA 関連化合物及びペルフルオロヘキサンスルホン酸 (以下、「PFHxS」という。)) とその塩及び PFHxS 関連化合物の UTC は、0.025mg/kg とされる。なお、ペルフルオロオクタンスルホン酸 (以下、「PFOS」という。)) とその塩及びペルフルオロオクタンスルホンフルオリド (以下、「PFOSF」という。)) については、10mg/kg である。ベンゾトリアゾール系紫外線吸収剤の一種である UV-328 については、UTC は決定されていないが、当面、100mg/kg とし、2年後に 10mg/kg、4年後に 1mg/kg とする委任規則案が作成されているとのことである。

¹⁰ POPs 指定されている PBDEs の同族体は、テトラ BDE、ペンタ BDE、ヘキサ BDE、ヘプタ BDE、デカ BDE の 5 つ。

1. 5. 本実証事業に関連する重要な規則：エコデザイン規則の概要¹¹

2024年7月18日に域内市場に流通する製品の環境要件を定める「持続可能な製品のためのエコデザイン規則(ESPR)」が施行された。エコデザイン規則は、製品のライフサイクル全体の情報を追跡・確認できるように、対象製品に共通して求められる情報が記載されたデジタルフォーマットを定め、バーコードやQRコード等の二次元バーコードをデバイスで読み取り、製品と情報を紐づけていくデジタルプロダクトパスポート(DPP)の運用を決める枠組み法である。

DPPの優先対象品目は、鉄鋼、アルミ、繊維製品、タイヤ、化学物質、エネルギー関連製品等とされ、現時点では、自動車は、対象品目とはなっていない。

DPPのデータ項目の大枠はエコデザイン規則ANNEX Iで規定されているが、詳細は決まっておらず、今後、個別製品法において詳細化が進むと考えられる。ANNEX Iでは、大項目として、性能情報、メンテナンス情報、エネルギー効率情報、リサイクル情報、環境負荷情報が規定されており、このうち、環境負荷情報には、懸念物質としてリサイクル材の含有量情報の記載が規定されている。

ELV規則案では、循環型自動車パスポートの搭載が規定されており、このパスポートは、枠組み法であるエコデザイン規則と平仄をとる、つまり、DPPと同じ内容、運用になる可能性がある。このことは、自動車用部品プラスチックについては原料の一部を構成する再生プラスチックに含まれる臭素系難燃剤等の懸念物質に係る検査方法、含有量等を証明した情報を求められる可能性に留意する必要があることを意味する。

1. 6. EUの専門家へのヒアリング結果

ELV規則案第6条等で規定されるプラスチックリサイクル規定や、第5条で規定される懸念物質への対応、特にPOPs等の規制物質への対応状況について、EUのPOPs及びELV規則の専門家による2回のオンラインヒアリングを行い、その動向について情報を聴取した。以下にその概要を述べる。

1. 6. 1. 各種規則の解釈及びELV規則案の課題等について

1) ELV規則案におけるプラスチックリサイクルに関する規定

ELV規則案では、生産者に対して、プラスチックリサイクル率が適切に達成されていることを証明する義務が課されている。

2) 第6条における適用対象外プラスチックの範囲

ELV規則案第6条で対象とするプラスチックの範囲には、以下の物質は含まれないものとされている。

- ・ エラストマー
- ・ ポリウレタン・フォーム以外のクッション用途の熱硬化性樹脂
- ・ POPs規則(EU)2019/1021 附属書IVの閾値を超え、かつ同規則第7条により規制対象となる物質を含有または汚染されたプラスチック(いわゆるPOPs規則対象物質)

¹¹ 2024年6月13日付欧州議会及び理事会規則(EU)2024/1781は、持続可能なエコデザイン要求事項設定のための枠組みを確立し、指令(EU)2020/1828及び規則(EU)2023/1542を改正し、指令2009/125/ECを廃止するものとした(EEA関連文書)。 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R0341&from=EN>

3) 第 30 条における事前解体義務とその課題

ELV 規則案第 30 条では、特定部品の事前解体を義務付けている。事前解体により、ゴム、塗料、接着剤、燃料と接触したプラスチック部品に起因する悪臭等、リサイクルを阻害する要因の除去を行うことも可能になる。

しかしながら、事前解体は作業工数の増加のみならず、解体後部品の保管・仕分け、さらには例えばヘッドライトとダッシュボードのように異なる処理が必要となるケースもあり、物流面での負担も大きい。また、シュレッダー事業者にとって、除去されたプラスチック部品が付加価値となるか否かの判断も難しく、結果として、現状のプラスチックリサイクルの経済性を踏まえると、事前解体は限定的な範囲でしか実施されていないのが実情である。

このため、第 30 条及び附属書 VII 部 C に定める内容については、OEM 及び生産者責任団体から「非効果的かつ非効率的」とする強い批判が寄せられている点は留意すべきである。

今後、規制の最終文言や、義務対象となる事前除去項目の範囲、またシュレッダー後の処理結果が「同等」であると見なされる条件の具体的運用については、動向を注視する必要がある。

4) POPs 規則における上限濃度 (UTC) の適用対象

POPs 規則において定められている上限濃度 (UTC) は、製品中の含有濃度の許容値であり、プラスチックリサイクルにおいては、リサイクラーが製造するコンパウンド製品 (ペレット等) に適用される点に留意すべきである。

1. 6. 2. POPs 含有プラスチックの選別技術について

EU においては、リサイクル可能なプラスチックとリサイクル不可能なプラスチックを分離する場合、一般的には異なる画分を分離する比重差選別を行う。ASR 用の湿式比重差分離装置は、例えば Galloo/Ad Rem 社や SICON 社 (Polyfloat) が提供している。これらの湿式比重差分離には、溶液またはリサイクル可能な懸濁液を使用することができる。適用される比重差の分割レベルは、シュレッダーの投入材料の組成、オペレーターの経験、異なる出力フラクションのコストと収益に依存する。

1. 7. まとめ

EU 圏内の ELV 規則案及び関連する規則等の規定等から、POPs 含有プラスチックに関連する留意点を整理すると表 1-1-2 のとおりとなる。

表 1-1-2 EU 圏内の ELV 規則案等を踏まえた POPs 含有プラスチックに関連する留意点

規則等	留意点
ELV 規則案	1. 第 5 条に示される懸念物質最小化規定については、具体的な規定はないが、POPs 規則を踏まえることになる可能性が高い。
	2. 懸念物質に関する規定は具体的には示されていないが、EU における POPs 規則を踏まえると、POP-BDEs に関しては、ELV 部品プラスチックに LPC 規定が適用される。POP-BDEs (テトラ+ペンタ+ヘキサ+ヘプタ+デカ) については、2025 年末まで 500ppm⇒2025 年末から 2027 年末まで 350ppm⇒2027 年末から 200ppm と段階的に厳しくなる。
	3. プラスチックリサイクル率に関しては実現可能性に関する議論があり、特に事前解体に関しては、現状のコストバランスでは採算性がないとの情報がある。プラスチックリサイクル率は、令和 7 年 1 月に公表された規則案第 2 版では緩和されている。
	4. 臭素系難燃剤 (BFR) を含むプラスチックの選別は、現行の規制であれば、比重差選別で対応できると考えられている。
	5. 懸念物質対応が明確化されるのは、2027 年、リサイクル材使用義務化は 2031 年、循環型自動車パスポート搭載義務は 2032 年とされる。
	6. 循環型自動車パスポートは、エコデザイン規則におけるデジタルプロダクトパスポート (DPP) と類似の制度になる可能性がある。
POPs 規則	1. POPs 条約の EU での担保法であるが、POPs 条約やバーゼル条約の規定に比較して、厳しい規定が先行して制定されている。各条約では制定されていない UTC の規定もあり、PBDEs では、最終的に 200ppm、PFOA では 0.025ppm、UV-328 では 1ppm が制定されている又は提案されている。
エコデザイン規則	1. エコデザイン規則では、EU 圏内の製品については、DPP 搭載が義務化される。これには、環境負荷物質として懸念物質含有濃度情報を掲載することが必要となる。自動車は指定品目に含まれていないが、将来的には ELV 規則案の循環型自動車パスポート制度が DPP に平仄をとる可能性がある。

2. 本実証事業で優先的に評価する POPs の選定と位置づけ

POPs をはじめとする規制対象物質は、リサイクル材の品質や市場適合性に重大な影響を及ぼすことから、ELV 由来プラスチックにおける含有実態の把握が不可欠である。

本節では、これまでに実施された国内外の調査研究・業界報告等を踏まえ、本実証事業において優先的に評価すべき対象物質（優先評価物質）として臭素系難燃剤を選定する背景を整理した。また、ASR や内装部材における PBDEs の残留状況等、既往知見に基づく管理上の懸念事項についても整理した。

2. 1. POPs 条約の概要

POPs 条約は、POPs の生産・使用を排除または制限することを目的とした国際環境条約であり、2001 年に署名され、2004 年 5 月に発効した。2024 年 10 月現在、締約国は 186 カ国に及ぶ。

POPs は環境中で分解されにくく、生物濃縮によって食物連鎖を通じて広範囲に拡散する特性を持つ。これにより、汚染源から遠く離れた地域でも蓄積し、人体や生態系に深刻な影響を及ぼす可能性がある。そのため、国際的な規制が強化されており、条約発効後も科学的知見の進展に伴って継続的に対象物質の追加が行われてきた。

本条約では、規制対象物質の管理内容に応じて、以下の三つの附属書に分類して整理している。

- **附属書 A (廃絶)** : 対象物質の製造及び使用の原則的な廃絶を求める。例外的に特定用途での適用除外が認められることもあるが、代替物質への速やかな切替えが基本方針とされている。
- **附属書 B (制限)** : 特定用途での使用制限を規定し、限定的な使用継続が可能とされるケースがある。
- **附属書 C (非意図的生成)** : 製造工程等で副次的に生成される POPs について、排出の最小化及び削減措置の導入を求める。

プラスチックリサイクル分野において特に関連性が高いのは附属書 A であり、リサイクル資源への混入防止の観点からも、対象物質の管理が重要となる。表 1-2-1 に POPs 条約の附属書に記載された POPs を示す。

なお、POPs として規制された化学物質については、規制発効までに順次、非対象の代替物質への置換が進められてきており、今後のリサイクル資源の品質確保にも影響を及ぼす可能性がある。

表 1-2-1 プラスチックリサイクルに関連する可能性のある POPs と適用除外¹²

No	物質名 (英)	物質名 (日)	附属書	決議番号	採択年	適用除外/認めることのできる目的、生産	適用除外 / 認めることのできる目的、使用
1	Alpha hexachlorocyclohexane	アルファーヘキサクロロシクロヘキサン	A	SC4/10	2009	なし	なし
2	Beta hexachlorocyclohexane	ベーターヘキサクロロシクロヘキサン	A	SC4/11	2009	なし	なし
3	Chlordecone	クロルデコン	A	SC4/12	2009	なし	なし
4	Decabromodiphenyl ether (commercial mixture, c-decaBDE)	デカブロモジフェニルエーテル	A	SC8/10	2017	登録簿に記載されている締約国に認められる	車両、航空機、繊維製品、プラスチック製ハウジング等の添加剤、建築断熱用ポリウレタンフォーム、付属書 A のパート IX に準拠
5	Dechlorane Plus	デクロランプラス	A	SC11/10	2023	なし	航空宇宙、宇宙及び防衛用途、医療用画像処理及び放射線治療装置及び設備、付属書 A の第 XI 部に従った用途の物品の交換部品及び修理。
6	Dicofol	ジコホル	A	SC9/11	2019	なし	なし
7	Hexabromobiphenyl	ヘキサブロモビフェニル	A	SC4/13	2009	なし	なし
8	Hexabromocyclododecane	ヘキサブロモシクロドデカン	A	SC6/13	2013	特定除外事項の登録簿に記載されている締約国	附属書 A 第 VII 部の規定に従った建築物における発泡ポリスチレン及び押出ポリスチレン
9	Hexabromodiphenyl ether and heptabromodiphenyl ether (commercial octabromodiphenyl ether)	ヘキサブロモジフェニルエーテル及びヘプタブロモジフェニルエーテル	A	SC4/14	2009	なし	附属書 A 第 IV 部の規定に基づく記事
10	Hexachlorobutadiene	ヘキサクロロブタジエン	A 及び C	SC7/12 SC8/12	2015 2017	なし	なし
11	Lindane	リンデン	A	SC4/15	2009	なし	アタマジラミ症及び疥癬のセカンドライン治療薬としてのヒト用医薬品
12	Methoxychlor	メトキシクロル	A	SC11/9	2023	なし	なし
13	Pentachlorobenzene	ペンタクロロベンゼン	A 及び C	SC4/16	2009	なし	なし
14	Pentachlorophenol and its salts and esters	ペンタクロロフェノール (PCP)、その塩及びエステル類	A	SC7/13	2015	附属書 A の第 VIII 部の規定に従って登録簿に記載された締約国に対して認められるもの	附属書 A のパート VIII の規定に従った電柱及びクロスアーム用ペンタクロロフェノール
15	Perfluorohexane sulfonic acid (PFHxS), its salts and PFHxS-related compounds	ペルフルオロヘキサンスルホン酸 (PFHxS) とその塩及び PFHxS 関連物質	A	SC10/13	2021/2022	なし	なし
16	Perfluorooctane sulfonic acid (PFOS), its salts and perfluorooctane sulfonyl fluoride (PFOSF)	ペルフルオロオクタンスルホン酸 (PFOS) とその塩, ペルフルオロオクタンスルホニルフオリド (PFOSF)	B	SC9/4	2019	右の用途	附属書 B の第 III 部に従った許容される目的及び特定の免除
17	Perfluorooctanoic acid (PFOA), its salts and PFOA-related compounds	ペルフルオロオクタン酸 (PFOA) とその塩及び PFOA 関連物質	A	SC9/12	2019	泡消火剤：なし。その他の製造については、附属書 A の第 X 部の規定に従い、登録簿に記載された締約国で許可された通り。	附属書 A 第 X 部の規定に従うもの
18	Polychlorinated naphthalenes	ポリ塩化ナフタレン (塩素数 2～8 のものを含む)	A 及び C	SC7/14	2015	右の用途	オクタフルオロナフタレンを含むポリフルオロナフタレンの製造
19	Short-chain chlorinated paraffins (SCCPs)	短鎖塩素化パラフィン (SCCP)	A	SC8/11	2017	登録簿に記載されている締約国	トランスミッションベルト、ゴム製コンベヤーベルト、皮革、潤滑油添加剤、屋外装飾用電球チューブ、塗料、接着剤、金属加工、可塑剤の添加剤
20	Technical endosulfan and its related isomers	エンドスルファン	A	SC5/3	2011	特定除外事項の登録簿に記載されている締約国	附属書 A の第 VI 部の規定に従いリストアップされた作物-害虫複合体
21	Tetrabromodiphenyl ether and pentabromodiphenyl ether (commercial pentabromodiphenyl ether)	テトラブロモジフェニルエーテル	A	SC4/18	2009	なし	附属書 A 第 V 部の規定に基づく物品
22	UV-328	UV-328	A	SC11/11	2023	附属書 A の第 XII 部の規定に従って登録簿に記載された締約国について認められるもの	自動車部品;自動車、土木機械、鉄道輸送車両、大型鋼構造物用の重防食用塗料;採血管用の機械的分離器;偏光板用のトリアセチルセルロース (TAC) フィルム;印画紙;用途の物品の交換部品;附属書 A のパート XII の規定に従う

¹² 出典:<https://www.pops.int>

2. 2. POPs 指定されている臭素系難燃剤

POPs の中でも、プラスチックリサイクル分野において特に重要な課題とされてきたのが、PBDEs 等の臭素系難燃剤である。これらの難燃剤は、プラスチック材料の耐火性を向上させる目的で、家電製品の筐体や電子機器、自動車部品等に広く使用されてきた。ELV 由来の部品プラスチックにこれらの物質が残留している場合、リサイクル材の品質確保や規制遵守の観点からこれが障害となる可能性がある。

PBDEs は、1970 年代以降、安価かつ高い難燃効果を持つ添加剤として大量に使用されてきたが、その後、環境中での難分解性、生物蓄積性、長距離移動性といった特性が明らかとなり、ヒトや生態系への影響が国際的に懸念されるようになった。こうした科学的知見を背景に、PBDEs は POPs 条約において段階的に附属書 A(廃絶)に追加され、現在では主要な化合物群が国際的に使用禁止の対象となっている。

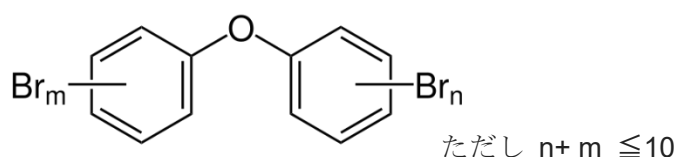


図 1-2-1 PBDEs の基本構造式

PBDEs の基本構造を図 1-2-1 に示す。PBDEs は、酸素原子によって結合した 2 つのベンゼン環からなるジフェニルエーテル構造を基本骨格とし、この骨格上の水素原子が臭素 (Br) に置換された化合物群である。臭素の置換数 ($n+m$) に応じて、表 1-2-2 に示すように分類及び命名される。なお、臭素置換数の違いは、それぞれの PBDEs の物理化学的特性に影響を及ぼし、環境中での挙動や毒性にも関与する重要な要素となる。POPs に指定されているのは臭素置換数が 4 (テトラ)、5 (ペンタ)、6 (ヘキサ)、7 (ヘプタ) 及び 10 (デカ) のものである。

表 1-2-2 PBDEs の分類と命名

分類名	臭素置換数	異性体数
MonoBDE	1	3
DiBDE	2	12
TriBDE	3	24
TetraBDE	4	42
PentaBDE	5	46
HexaBDE	6	42
HeptaBDE	7	24
OctaBDE	8	12
NonaBDE	9	3
DecaBDE	10	1

市販されてきた PBDEs の混合物には、以下のような製剤が広く知られている。

- 商業用ペンタ BDE (以下、「c-PentaBDE」という。)
主成分は PentaBDE～HexaBDE である。
- 商業用オクタ BDE (以下、「c-OctaBDE」という。)
主成分は HeptaBDE～NonaBDE である。
- 商業用デカ BDE (以下、「c-DecaBDE」という。)
主成分は DecaBDE である。

化学物質規制においては、実際に市場で使用されている製剤を対象とする必要がある。そのため、これらの商業用 PBDE 製剤が規制対象とされてきた。2004 年以降、c-PentaBDE 及び c-OctaBDE は段階的に製造・使用が廃止され、さらに 2017 年には c-DecaBDE も POPs 条約の附属書 A (廃絶) に追加された。現在、欧州をはじめとする多くの地域では PBDEs の使用が全面的に禁止されている。

PBDEs の他にも、POPs 条約に基づき規制対象となっている臭素系難燃剤として、ヘキサブロモシクロドデカン (Hexabromocyclododecane、以下、「HBCD」という。) 及びポリ臭素化ビフェニル (Polybrominated biphenyls、以下、「PBBs」という。) 等が挙げられる。HBCD は主にポリスチレンフォーム製の断熱材や繊維製品等に使用されてきたが、2013 年に POPs 条約の附属書 A (廃絶) に追加された。一方、PBBs はかつてプラスチック樹脂や電子機器部品等に広く用いられたものの、すでに国際的な規制対象となっている。なお、PBBs 等についても、臭素の置換数に応じた分類及び命名が PBDEs と同様に行われている。

2. 3. PBDEs に関する既往知見

2. 3. 1. PBDEs の推定総生産量生産と使用状況

PBDEs は、臭素系難燃剤の中でも、テトラブロモビスフェノール A と呼ばれる化合物及びその誘導体に次いで最も広く生産・使用されてきた化学物質群である。Abbasi らの研究で推定されているように (表 1-2-3(a))、これまでに全世界で約 200 万トンの商業用 PBDEs 混合物が生産されており、その 85%以上 (約 165 万トン) は、c-DecaBDE に由来する。

前節で述べたように、PBDEs はその環境リスクから POPs 条約により規制対象となり、2017 年以降、各国において段階的に生産・使用が制限されている。欧州、日本、米国ではすでに生産が終了しており、2023 年には中国でも製造が停止された。現在、c-DecaBDE の生産を継続しているのはインドのみであるが、その生産規模は公表されていない。

Abbasi らはまた、商業用 PBDEs の世界的な用途分布として、電子機器 (30%)、家具・カーペット用発泡体 (25%)、建築分野のプラスチック/ポリマー (20%)、輸送機器 (15%)、繊維 (15%) と推定している (表 1-2-3(b))。特に輸送分野においては、約 25 万トンの c-DecaBDE が使用されてきたと報告されている。国連環境計画 (United Nations Environment Programme、以下、「UNEP」という。) の報告によれば¹³、c-DecaBDE が広く使用されていた 1970 年代から 2016 年までに製造された輸送機器の大部分は、現在も発展途上国において使用されているとされる。

¹³ 出典: UNEP, Sectoral Guidance for Inventories of POPs and Other Chemicals of Concern in Buildings/Construction, Electrical and Electronic Equipment, and Vehicles

表 1-2-3 Abbasi らの研究による PBDEs の推定総生産量と使用状況¹⁴

(a) 商業用 PBDEs 混合物の推定総生産量

商業用PBDEs混合物	生産時期	生産量(トン)
c-PentaBDE	1970年代から2004年	175,000
c-OctaBDE	1970年代から2004年	131,000
c-DecaBDE	1970年代から今日まで(継続中)	1,650,000

(b) 主な用途における商業用 PBDEs の割合と製品別の平均寿命

使用用途	商業用ペンタ BDE	商業用オクタ BDE	商業用デカ BDE	寿命(年)
エレクトロニクス	10%	40%	30%	7 - 20※
フォーム&カーペット	50%	15%	25%	10
建設	20%	25%	20%	30 - 50
輸送セクター	15%	15%	15%	15 - 35
テキスタイル	5%	5%	15%	10

※低・中所得の国々では、自動車や電子機器を長く使い続けることが多い。

2. 3. 2. 家電プラスチック中の PBDEs 濃度の経年変化

プラスチック中の臭素濃度は経年的に漸減傾向にある。家電プラスチック中の PBDEs 濃度及び臭素濃度の経年変化の例を、既往の知見から引用し図 1-2-2 に示す。

図の左側(PBDE content)は、2014 年から 2023 年にかけて、各年の廃プラスチックサンプルに含まれる PBDE 濃度(ppm)を示している。図の右側(Bromine content)は、同様に各年のサンプル中の臭素濃度(ppm)を示している。各年ごとに複数のサンプルが分析されており、Mix(複数種の樹脂が混在)や PS and/or ABS(ポリスチレン及び、またはアクリロニトリル・ブタジエン・スチレン樹脂、以下、「ABS」という。)、PC-ABS(ポリカーボネート・ABS ブレンド)、PP and/or PE(ポリプロピレン及び/またはポリエチレン)等、素材の種類ごとの濃度が可視化されている。

解釈の要点は以下①から③のとおりである。

①PBDE 含有量の経年変化(左図)

2014～2016 年では、最大で 2,638ppm(2016 年)等、PBDEs 含有量が非常に高いサンプルが多数存在している。これは、POPs 指定される前に製造・使用されたプラスチックに PBDEs が多く含まれていたことを示している。

2017 年以降、PBDE 濃度は一気に低下し、ほとんどのサンプルが 200 ppm 以下に収まっている。特に、PS/ABS 系素材等の新しい素材では、PBDE がほとんど含まれていない傾向が顕著である。この変化は、PBDEs の国際的な規制によって、材料設計段階で使用が回避されるようになったことを反映していると思われる。

¹⁴ 出典:Golnouch Abbasi et al.,Global Historical Stocks and Emissions of PBDEs, Environ Sci Technol 2019 Jun 4;53(11):6330-6340

②臭素含有量の経年変化(右図)

PBDEs と異なり、臭素の含有量は必ずしも同じように減少していない点が注目される。例えば、2022～2023 年でも 1,000ppm 超のサンプルが複数存在しており、臭素系化合物や臭素元素そのものが引き続き材料に含まれている可能性を示唆している。このことから、PBDEs 以外の臭素系難燃剤や他用途での臭素由来成分が存在している可能性が考えられる。

③素材種別ごとの傾向

PS and/or ABS 系プラスチックでは、2017 年以降も PBDEs 含有は低いが、臭素濃度は一定程度残っていることから、PBDEs 以外の臭素系難燃剤の使用が推測される。PP/PE 系素材は、臭素含有も PBDEs 含有も比較的low、非ハロゲン系材料への代替が進んでいる可能性がある。

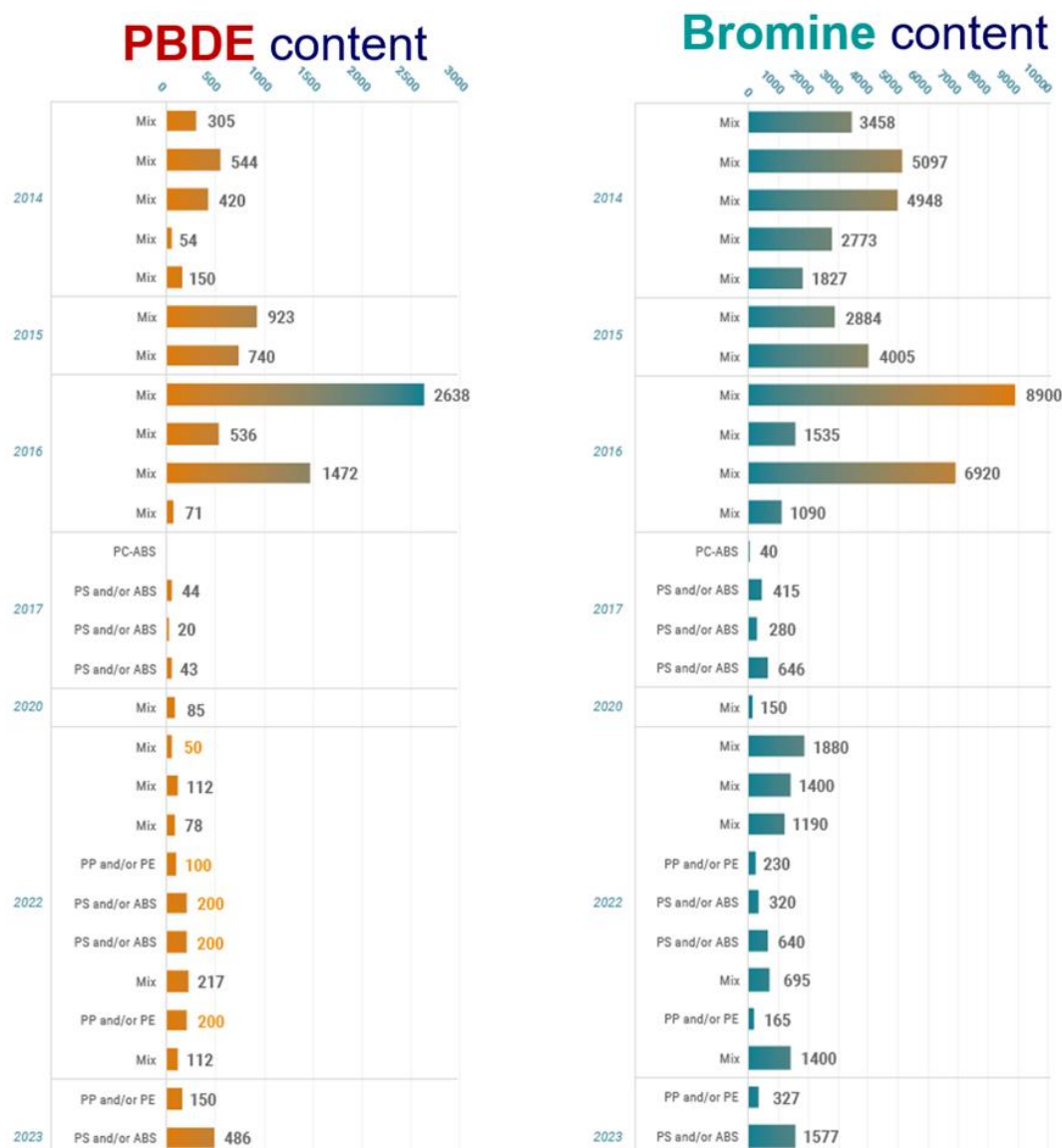


図 1-2-2 家電プラスチックにおける PBDEs 濃度及び Br 濃度の経年変化 (ppm) ¹⁵

¹⁵ 出典:Haarman, A.; Fedato, S.; Holt, A. (2023): Brominated Flame Retardants and the Circular Economy of WEEE Plastics – State of Play; Dss+ commissioned by BSBF <https://www.bsef.com/wp-content/uploads/2023/09/Brominated-Flame-Retardants-and-the-Circular-Economy-of-WEEE-plastics-online-140923.pdf>

2. 3. 3. 自動車破碎残さに含まれる POPs 等

自動車破碎残さ(Automobile Shredder Residue、以下、「ASR」という。)とは、ELV を対象に、エアバッグ類やフロン類、ドア、エンジン等の主要部品を取り外し、有用金属の回収を目的として破碎処理を実施した後に発生する残渣であり、主にプラスチック、繊維類、非鉄金属等で構成される。ASR には、自動車の製造・使用過程において導入された様々な化学物質が広範に残留しているとされている。これに関する既往研究の一例を表 1-2-4 に示す。

同研究によれば、ASR 中には PBDEs が 110,000～310,000 μ g/kg (110～310ppm) の濃度で含有されていたことが報告されている。これらの濃度は、欧州の POPs 規則において定められている LPC (500ppm) を直ちに超過する水準ではない。なお、LPC は POPs 含有廃棄物のリサイクル適否を判断するためのしきい値であり、同基準を超過する場合には、リサイクルではなく POPs の分解処理等を含む適正処理が法的に義務付けられる。

表 1-2-4 ASR に含まれる化学物質¹⁶

物質名	単位	ASR中濃度の幅
ダイオキシン類 及び臭素系難 燃剤	PCDD, PCDF	ng-TEQ/g
	D.L.-PCBs	ng-TEQ/g
	PCDDs/DFs + D.L.-PCBs	ng-TEQ/g
	PCBs (total)	μ g/kg
	PCN	μ g/kg
	PBDDs/DFs	μ g/kg
	MoBrPCDDs/DFs	μ g/kg
	Brominated diphenyl ethers	μ g/kg
	PBDEs	μ g/kg
	Tetrabromobisphenol A	μ g/kg
	HBCD	μ g/kg
	TBP	μ g/kg
ASRの組成	布地・繊維	wt%
	プラスチック	wt%
	ゴム	wt%
	織物	wt%
	金属類	wt%
	紙	wt%
	ポリウレタンフォーム	wt%
	木材	wt%
	ガラス	wt%
	ワイヤー	wt%

¹⁶ 出典:S.Sakai, et al.,An international comparative study of end-of-life vehicle (ELV) recycling systems, Journal of Material Cycles and Waste Management, 16(1): 1-20 から作成

2. 3. 4. ELV 内装材に含まれる PBDEs 濃度

ELV 由来の内装材に含有される PBDEs 濃度については、既往知見による調査例がある¹⁷。同調査では、対象車両 48 台に対し、主に内装材を中心とした計 446 部位に対して蛍光 X 線分析が実施された。そのうち、臭素濃度が 1,000ppm 以上であった部位の分析結果を表 1-2-5 に示す。該当部位の大半はシート及びシート内部のウレタン材であり、検出された臭素濃度は数万 ppm に達していた。一方で、ドアパネルやピラー等のプラスチック部品については、本調査では測定対象外とされている。

表 1-2-5 ELV 内装材等の臭素分析結果（臭素含有量 1,000ppm 以上）

メーカー	製造年	製造国	認識No.	測定部位		Br濃度
						ppm
C社	1994	ドイツ	R-10	ハーネス被覆材	-	2,347
K社	1993	アメリカ	A-3	シート(布地)	-	4,833
K社	1993	アメリカ	A-3	シート(ウレタン)	小(黒)	18,300
K社	1993	アメリカ	A-3	シート(ウレタン)	小(黄)	22,400
K社	1993	アメリカ	A-3	シート(ウレタン)	大(濃黄)	1,397
K社	1993	アメリカ	A-3	シート(ウレタン)	大(黄)	2,630
J社	1997	アメリカ	A-5	シート(布地)	表	1,362
J社	1997	アメリカ	A-5	シート(布地)	裏	1,317
J社	1997	アメリカ	A-8	シート(布地)	表	1,270
J社	1997	アメリカ	A-8	シート(布地)	裏	1,053
J社	1997	アメリカ	A-8	シート(ウレタン)	上面	12,800
N社	1996	日本	J-2	シート(布地)	表	2,608
N社	1996	日本	J-2	シート(布地)	裏	5,640
N社	1996	日本	J-2	フロア内装材	表	6,698
O社	1989	日本	J-3	シート(布地)	表	19,700
O社	1989	日本	J-3	シート(布地)	裏	26,500
O社	1994	日本	J-4	シート(布地)	裏	1,567
O社	1994	日本	J-5	フロア内装材	表	15,200
O社	1994	日本	J-5	天井内装材	表	2,755
P社	1993	日本	J-6	ハーネス被覆材	-	11,300
P社	1997	日本	J-7	シート(布地)	表	57,100
P社	1997	日本	J-7	シート(布地)	裏	44,300
P社	1990	日本	J-8	天井内装材	表	1,070
Q社	1998	日本	J-9	シート(布地)	表	33,100
Q社	1998	日本	J-9	シート(布地)	裏	14,700
Q社	1998	日本	J-9	フロア内装材	表	33,100
Q社	1998	日本	J-9	フロア内装材	裏	12,400
R社	1994	日本	J-10	シート(布地)	表	5,890
R社	1994	日本	J-10	シート(布地)	裏	6,870
R社	1994	日本	J-10	天井内装材	表	2,327
T社	1996	日本	J-14	シート(布地)	表	36,400
T社	1996	日本	J-14	シート(布地)	裏	13,600
T社	1996	日本	J-14	天井内装材	表	6,765
R社	1999	日本	J-15	シート(布地)	表	45,900
R社	1999	日本	J-15	シート(布地)	裏	34,500
P社	1999	日本	J-17	フロア内装材	フェルト	26,400
P社	1999	日本	J-17	フロア内装材	綿	10,200
N社	1996	日本	J-18	シート(布地)	表	2,731
N社	1996	日本	J-18	シート(布地)	裏	6,224
N社	1996	日本	J-18	フロア内装材	表	8,543
N社	1996	日本	J-18	フロア内装材	裏	1,759
R社	1997	日本	J-19	シート(布地)	表	40,400
R社	1997	日本	J-19	シート(布地)	裏	54,900
R社	1997	日本	J-19	シート(ウレタン)	フェルト面	1,207
P社	1997	日本	J-20	フロア内装材	黒フェルト	6,946
T社	1998	日本	J-21	天井内装材	表	3,543
T社	1998	日本	J-21	天井内装材	裏	1,556
R社	1996	日本	J-22	ハーネス被覆材	ゴムシート	3,604
S社	1998	日本	J-23	シート(布地)	表	16,600
S社	1998	日本	J-23	シート(布地)	裏	12,900

¹⁷ 株式会社環境管理センター(平成 24 年 3 月)、平成 23 年度使用済自動車再資源化に係る臭素系難燃剤等対策調査業務報告書(環境省請負業務報告書)

2. 4. 本実証事業で優先的に評価する POPs

前節で整理した既往知見からは、ELV 由来プラスチックにおいて臭素系難燃剤が依然として広範に残留している実態が明らかとなっている。具体的には、ASR 中には 110～310ppm の PBDEs が含有されているとの報告があり、また内装材を中心とした ELV 構成部材においても、数万 ppm に達する高濃度の臭素が検出されていることが確認されている。さらに、PBDEs の使用履歴や用途分布に関する国際的な調査からは、輸送機器分野で相当量のデカ BDE が使用されてきたことが示唆されており、ELV を起源とするプラスチックに臭素系難燃剤が残留している蓋然性は極めて高いと評価される。

自動車部品向けプラスチック材料に臭素系難燃剤が直接添加される事例は限定的であるが、シートや内装用ウレタンフォーム等の難燃処理が施された部材においては、広範に使用されてきたことが明らかとなっている。これらの部材が ELV の解体・破砕工程を経る過程で、他の部品プラスチックへの付着や混入が生じるリスクが懸念されている。

とりわけ POP-BDEs については、欧州 POPs 規則における LPC の段階的な厳格化が見込まれていることから、リサイクル材の品質管理及び規制遵守の観点で極めて重要な管理対象物質として位置づけられている。現時点で報告されている ASR 中の PBDEs 濃度 (300ppm 程度) は、現行の LPC 基準値 (500ppm) を超過していないため、ASR の再資源化を直ちに阻害するリスクは限定的とみられるものの、規制強化の動向を踏まえると、予防的な管理措置を進める必要がある。

本実証事業では、以上の背景を考慮し、POPs 指定されている化学物質の中でも特に POPs 指定されている臭素系難燃剤を優先評価物質として設定し、ELV 規則案の進展を念頭に置きながら、含有実態の把握及び効果的な選別・管理手法の検討に向けた基礎情報の収集・整理を重点的に進めるものである。また、補完的に他の POPs 等規制対象物質についても情報整理を行うこととする。これらの詳細は付録 A に掲載した。

3. ELV 由来プラスチックと回収候補パーツの選定

ELV 規則案においては、ELV 由来プラスチックのリサイクル材使用義務の導入が見込まれており、それに伴い、回収される部品プラスチックの品質確保及び規制対象物質の適切な管理が今後一層重要となる。とりわけ、リサイクル工程において「どの部品を優先的に選別・管理対象とすべきか」という論点は、リサイクル実務の実効性を左右する極めて戦略的かつ実務的な検討項目である。

本節では、ELV 由来プラスチックのリサイクルポテンシャルを定量的に把握するとともに、リサイクル工程で優先的に選別・管理すべき部品(回収候補パーツ)の選定を目的として検討を行う。具体的には、代表的な車両の解体データを用いて、主要プラスチック素材ごとの部品構成傾向や出現頻度を分析し、選別及び管理対象となる部品の抽出に向けた基礎情報を整理する。

3. 1. ELV 由来プラスチックパーツ候補の検討

3. 1. 1. 調査概要

A2MAC1¹⁸が提供する自動車の解体データを用いて、パーツの素材、重量等について調査した。対象としたのは、EU 市場において 2002 年から 2024 年に販売された日本車 74 台の解体データである。A から E、及び S セグメント¹⁹の車があり、内燃機関式自動車(ICEV: Internal-Combustion Engine Vehicle)及びバッテリー式(BEV: Battery Electric Vehicle)・ハイブリッド式(HEV: Hybrid Electric Vehicle)の自動車を網羅している。その分布を示す。EU 市場の自動車であるため、日本独自の軽自動車は含まれていない。なお、残念ながら A2MAC1 に日本市場の解体データはない。

図 1-3-1 より、もっとも普及している C セグメントのデータが多く、E セグメントは全期間を通して 1 台分しかない。また、2011 年以降に BEV、HEV が登場するが 2021 年以降はこれらのデータしかない。また、これら 74 台の全てが、注目するパーツのデータを有しているわけではなく、パーツによっては数台にのみデータが存在する場合もあった。

表 1-3-1 年代別のセグメント、ICEV、BEV・HEV の分布

年代	～2005						2006～2010						2011～2015						2016～2020						2021～					
セグメント	A	B	C	D	E	S	A	B	C	D	E	S	A	B	C	D	E	S	A	B	C	D	E	S	A	B	C	D	E	S
ICEV	0	4	3	2	0	0	3	4	9	4	0	0	1	5	7	1	1	1	0	5	4	0	0	1	0	0	0	0	0	0
BEV・HEV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	1	0	0	0	3	6	0	0	0	0	1	5	0	0	0

¹⁸ A2MAC1 はフランスに本社を置く企業で、世界中の車輛を毎年 100 台以上解体・分析し、そのデザイン、技術、性能に関する知見を蓄積、データベースを構築している。

¹⁹ 主に欧州で用いられている乗用車のクラスカテゴリーである。明確なボディサイズの定義はないが、概ね以下のように分類されている。なお、S セグメントは特別仕様車であり、今回取り上げたデータの中の 2 台は日産「GT-R」とホンダ「NSX」である。

セグメント	一般呼称	全長(明確な定義なし)	車輛価格
A	軽自動車、小型コンパクトカー	～約 3.7m	約 150～250 万円
B	コンパクトカー 例:ホンダ「フィット」	約 3.7m～4.2m	約 200～300 万円
C	大きめのコンパクトカー、小型セダン 例:日産「リーフ」、マツダ「MAZDA3 セダン」	約 4.2m～4.5m	約 250～400 万円
D	小型セダン、ワゴン 例:日産「スカイライン」	約 4.5m～4.8m	約 350～600 万円
E	中型セダン 例:トヨタ「クラウン」	約 4.8m～5m	約 550～1,000 万円
F	大型セダン 例:レクサス「LS」	約 5m～	約 1,000 万円～

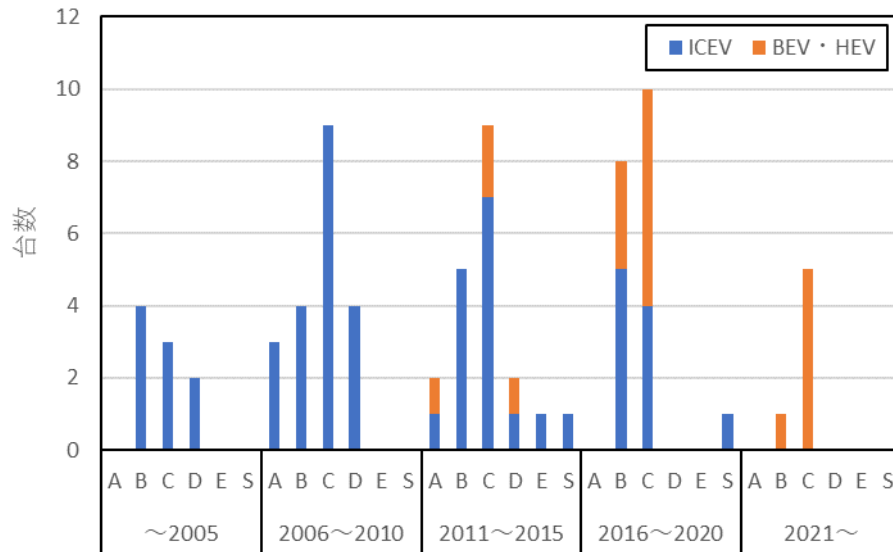


図 1-3-1 解析データ（自動車）の年代別、エンジン別セグメント分布

回収が期待される素材としてポリプロピレン (PP)、ポリエチレン (PE)、ポリアミド (PA)、ポリカーボネイト (PC) を選択、フィルタリングして、それぞれの素材でできているパーツの中から、重量の重いもの、データ数の多いものを選び、そのパーツを構成している樹脂等の台数割合を求めた。

3. 1. 2. 回収候補パーツの分類（PP・PE・その他）

素材のデータ数割合がおよそ 70% 以上のパーツを回収候補として一次選別した。その結果を以下に示す。例えば、円グラフで PP70% というのは、そのパーツを回収した場合に、その主成分が PP である割合が 70% ということである。

図 1-3-2 に主なパーツの設置箇所を示す。

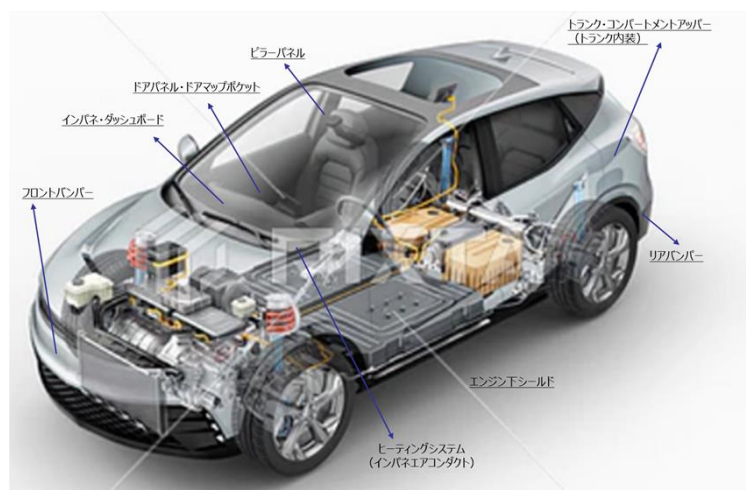


図 1-3-2 主なパーツの設置箇所

① PP 回収候補のパーツー外装品ーバンパー

フロントバンパーとリアバンパーの素材の割合をそれぞれ図 1-3-3、1-3-4 に示す。

フロントバンパーでは、データのある 72 台が全て素材は PP であった。リアバンパーは 70 台のうち 69 台の素材が PP であり、1 台がその他であった。また、いずれも平均重量は 3.2kg であり、PP の回収効率が高いパーツである。KMI(株) (以下、KMI) や西日本オートリサイクル(株) (以下、WARC) でも回収している。ただし、外面に塗装がしてあり、これがリサイクルの課題になっている。いその(株)では塗装を剥がすことはせず、そのまま使用できる、意匠性を必要としない部品へのリサイクルを進めている。

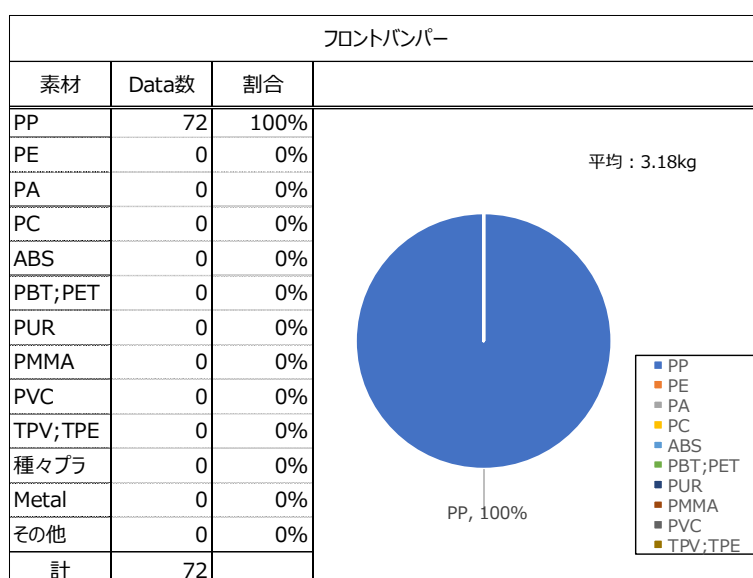


図 1-3-3 フロントバンパーの素材が PP である割合

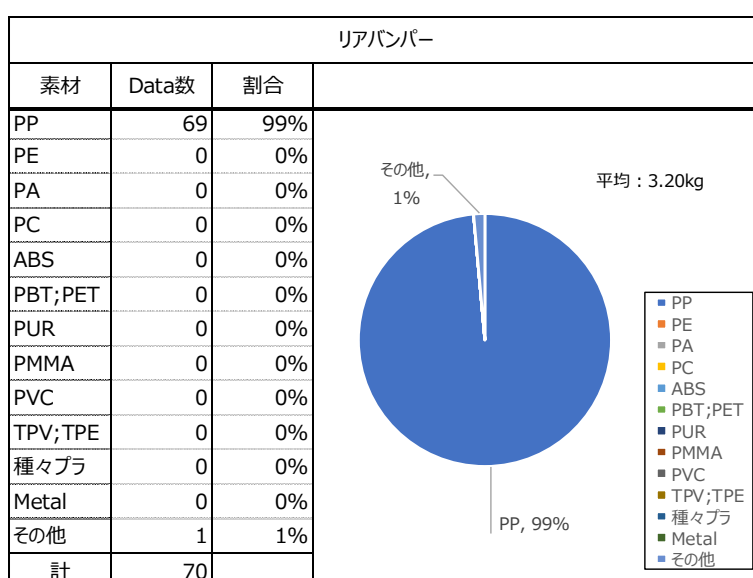


図 1-3-4 リアバンパーの素材が PP である割合

② PP 回収候補のパーツー外装品ースクリーンエアロダイナミクス(アンダーカバー)・エンジン下シールド

スクリーンエアロダイナミクスは、車体の床下にある、一連のガードスクリーン類のことである。大きなものを図 1-3-5 に表示する。

図 1-3-6 からわかるようにエンジン下シールドは 70%が PP でできており、平均重量も約 1kg であるため、回収候補に挙げた。8%の割合で PE の回収候補にもなり得る。

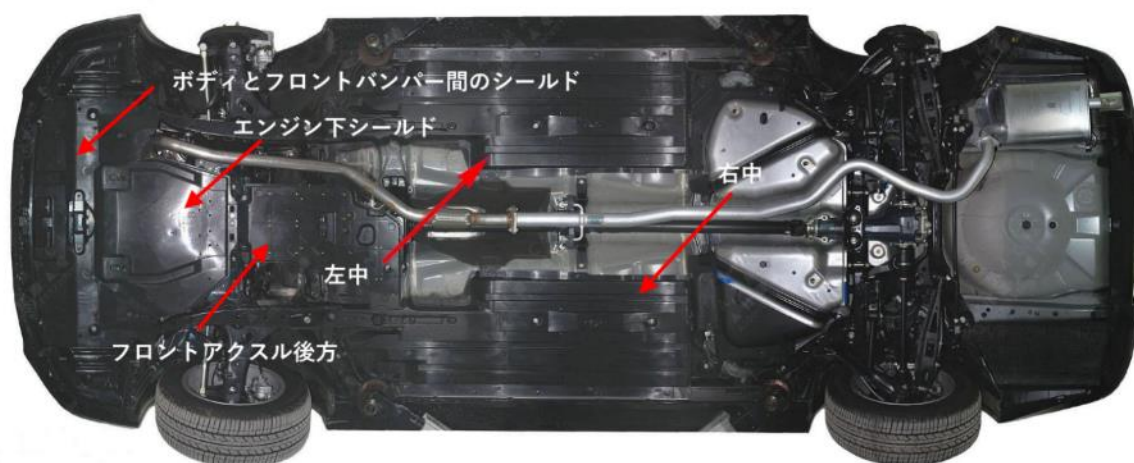


図 1-3-5 スクリーンエアロダイナミクスの中の大きなもの

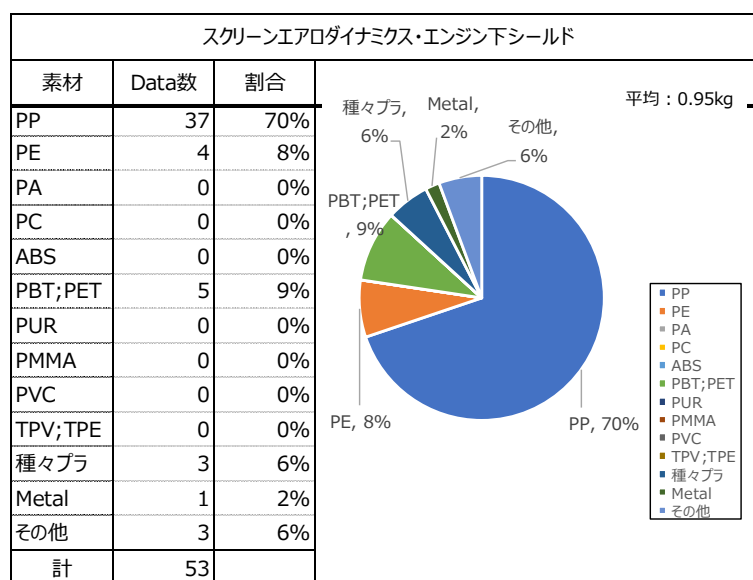


図 1-3-6 エンジン下シールドの素材の割合

③ PP 回収候補のパーツー外装品ースクリーンエアロダイナミクス・左中／右中、ボディとフロントバンパーの間のスクリーン、フロントアクスル後方のスクリーン

スクリーンエアロダイナミクス・左中、右中、ボディとフロントバンパー間のスクリーン、フロントアクスル後方のスクリーンの素材の割合を図 1-3-7 から 1-3-10 に示す。いずれも PP が 70%以上を占める。また、平均重量は 1kg を超えており、これら 4 カ所のスクリーンで 4kg を超える回収が見込める。

スクリーンエアロダイナミクスは、ここに記載したものの以外にも、車種によりいくつかのパーツが存在する。ここでは取り上げなかったが主な素材は PP であり、合わせて回収することが期待される。

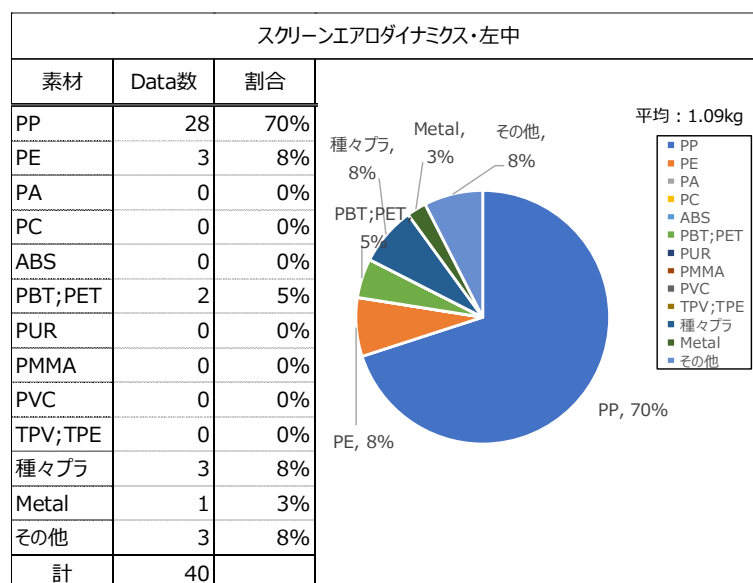


図 1-3-7 フレーム・スクリーンエアロダイナミクス左中の素材の割合

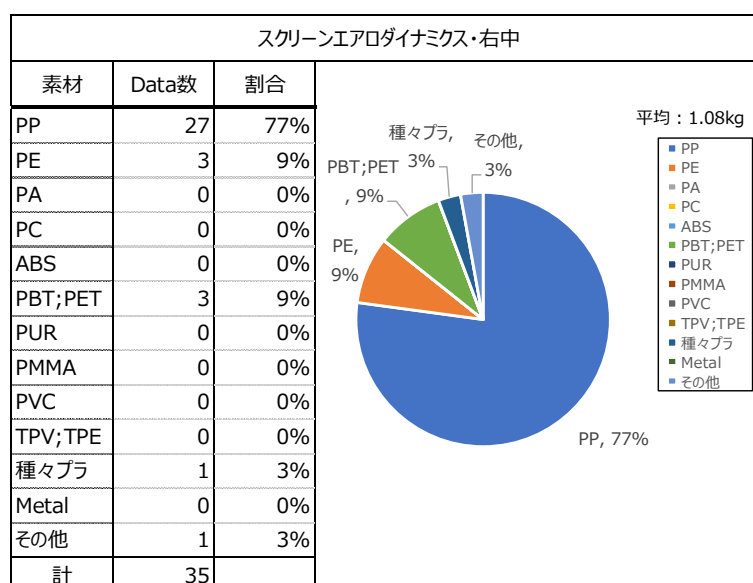


図 1-3-8 フレーム・スクリーンエアロダイナミクス右中の素材の割合

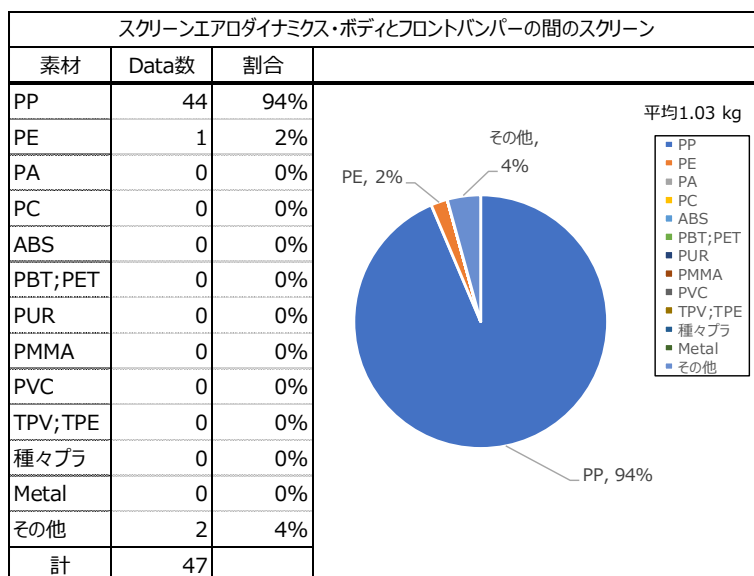


図 1-3-9 ボディとフロントバンパーの間のスクリーンの素材割合

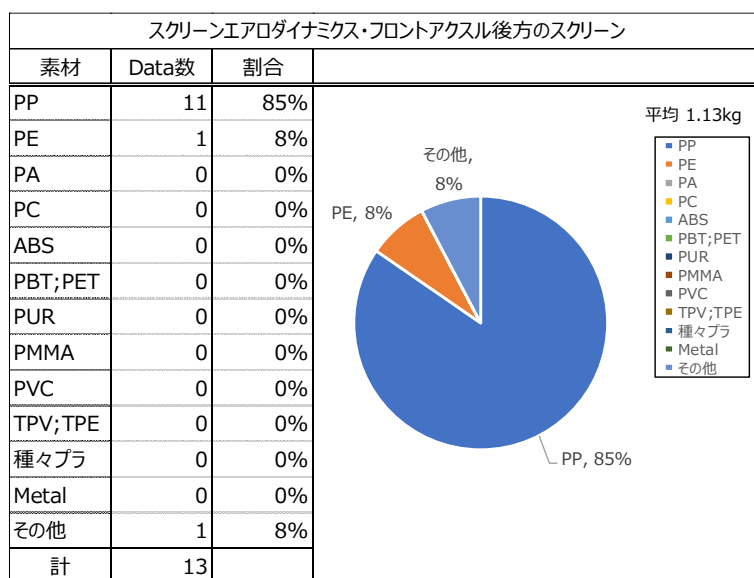


図 1-3-10 フロントアクスル後方のスクリーン

④ PP 回収候補のパーツー内装品ードアパネル・パネルキャリア、ドアマップポケット

図 1-3-11 に示すように、ドアパネル・パネルキャリアが PP で作られている割合は 88%である。平均重量もドア 1 枚当たりおよそ 1.3kg である。

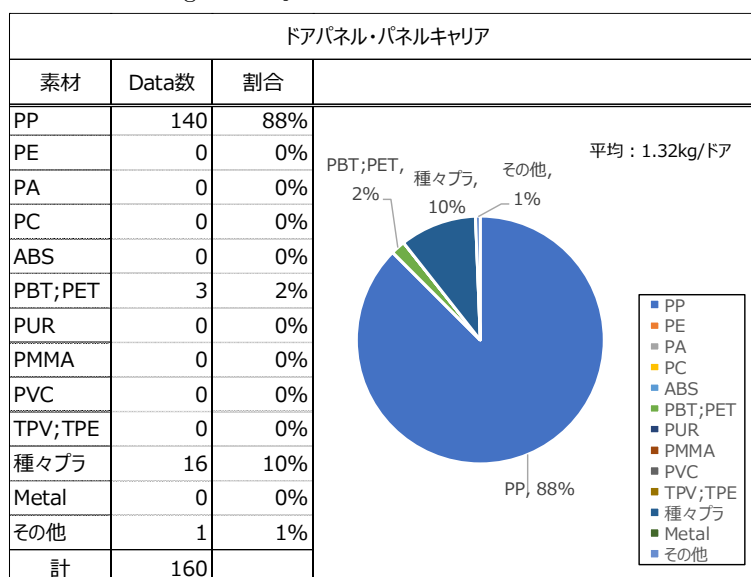


図 1-3-11 ドアパネル・パネルキャリアの素材割合

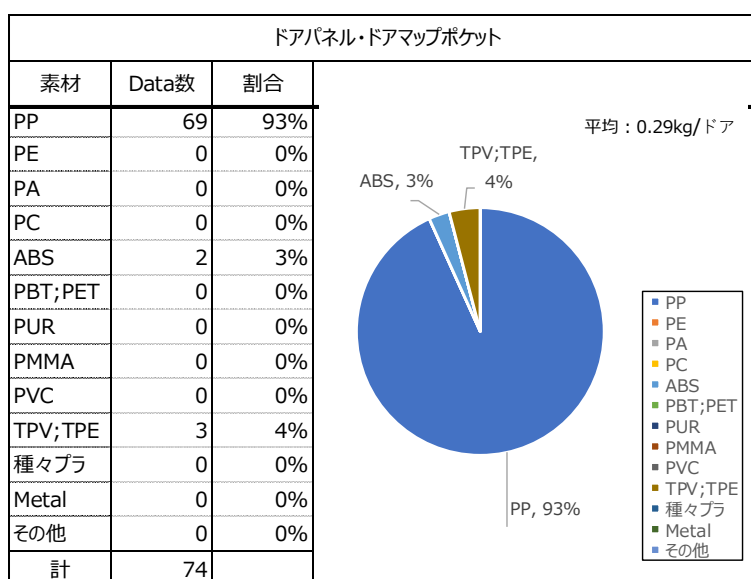


図 1-3-12 ドアパネル・ドアマップポケットの素材割合

ドアマップポケットは、ドアパネルに設置してあるポケットであり、およそ 0.3kg/ドアしかないが、PP の割合はパネルキャリアよりも高い(図 1-3-12)。つまり、パネルキャリアが PP でできていなくても、マップポケットは PP である可能性が高いことを表す。

KMI、WARC においてもパネルキャリアは回収されている。

パネルキャリアとドアマップポケットを合わせると約 1.6kg/ドアの回収が可能となり、ドア数が最低限のツードアでも 3.2kg/台の回収が見込める。

ドアパネルに付随するものとして、他にドアパネル・インサート、ドアパネル・アームレスト、ドアパネル・アッパーバンドがあるが、これらがPPである割合は55～60%とパネルキャリアやマップポケットよりも10%以上低い。そのため回収候補からは外したが、平均重量が0.2～0.5kgであり、パネルキャリアの回収時に手間なく回収可能で素材判別できれば回収するのが良い。

⑤ PP回収候補のパーツー内装品ーテールゲート・インナーパネル

テールゲートのある車の場合、そのインナーパネルもドアパネル同様、PPで作られている割合が高い(図1-3-13)。重量も平均で1.3kg程度あり、回収候補となる。

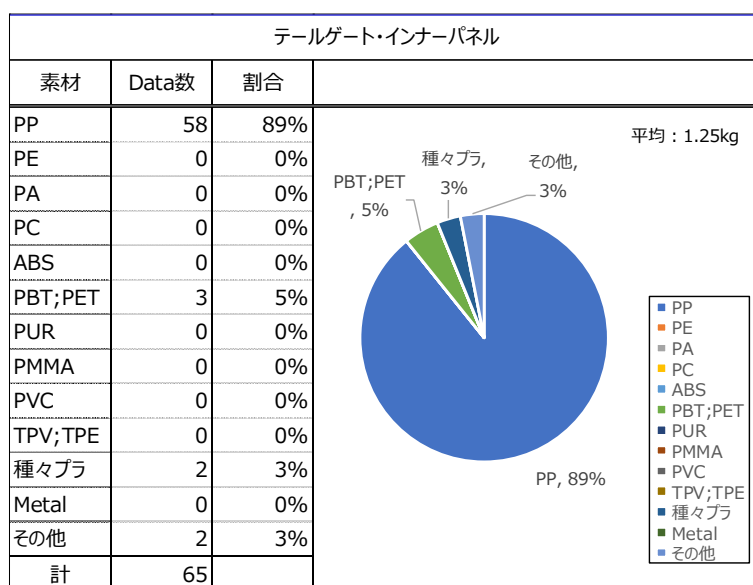


図 1-3-13 テールゲート・インナーパネルの素材割合

⑥ PP 回収候補のパーツー内装品 トランク・コンパートメントアッパー

トランク・コンパートメントアッパーが PP でできている割合は 93%と高い(図 1-3-14)。平均重量は左右両側を合わせると 0.9kg 近い量が回収できる。トランク・コンパートメントにはロワー(下部)もあり、こちらは PP で作られている割合は 54%であるが、平均重量が左右両側で 2.4kg もあるので、PP である場合は回収するのが良い。

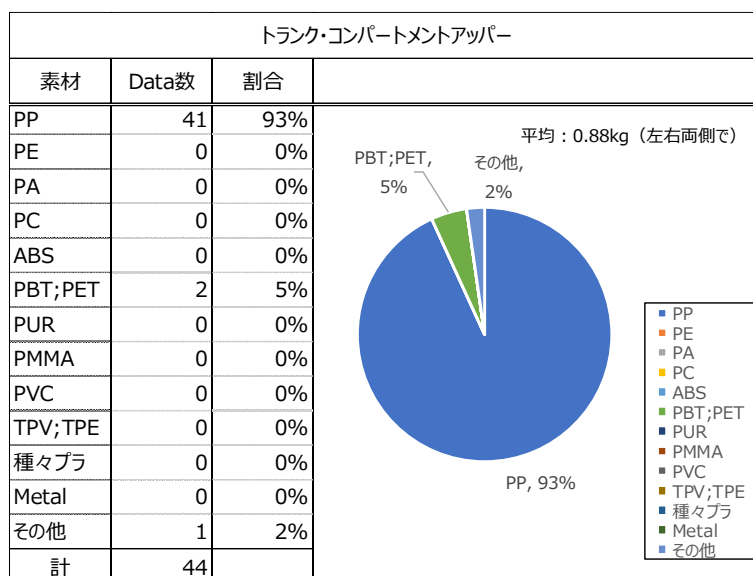


図 1-3-14 トランク・コンパートメントアッパーの素材割合

⑦ PP 回収候補のパーツー内装品 ストレージ・トランク収納ボックス

データ数は8点と少なかったが、トランク収納ボックスは PP で作られている割合が高く、かつ平均重量も 1.5kg と回収効率が良い(図 1-3-15)。取り外しも容易であると思われる。

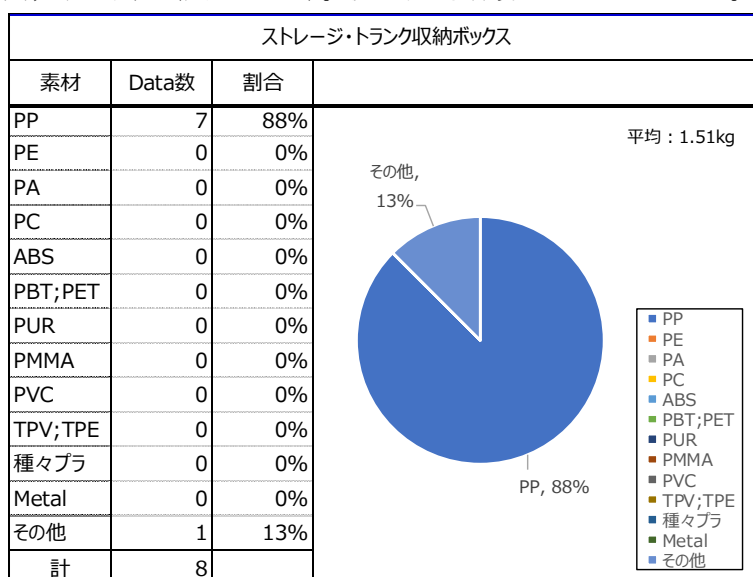


図 1-3-15 ストレージ・トランク収納ボックスの素材割合

⑧ PP 回収候補のパーツー内装品ートリム部品・ピラーパネル

ピラーは基本的に A(フロント)、B(中央)、C(リア)の 3 か所に左右 2 本ずつある。ただし、最近では B ピラーのない車もある。ピラーパネルは 1 本のピラーに上下 2 つのパーツに分かれてついていることが多い。

これら A～C、左右、上下のデータをまとめて表したのが図 1-3-16 である。

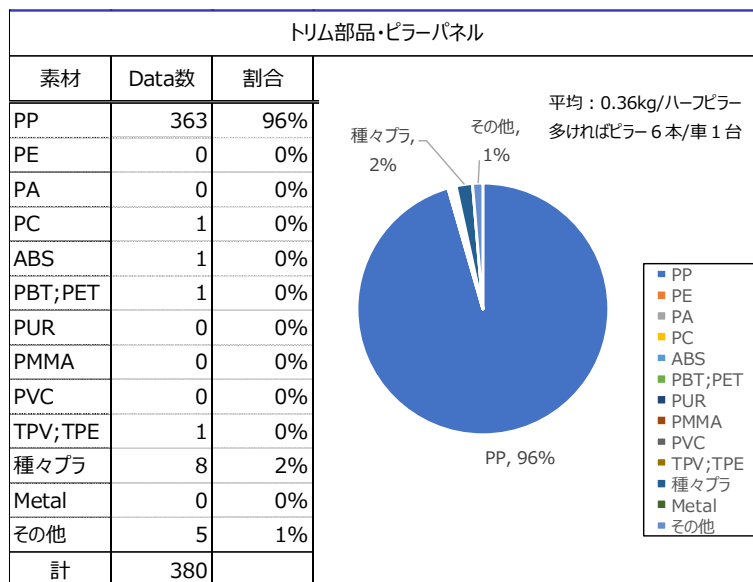


図 1-3-16 ピラーパネルの素材割合

ピラーパネルが PP で作られている割合は 96%であり、上下それぞれが同程度の重量で約 0.36kg/個である。したがって、1 本のピラーからは約 0.7kg のピラーパネルが回収でき、A、B、C 左右で 6 本のピラーがあれば、自動車 1 台から 4kg 以上の回収が期待できる。WARC では、ピラーパネルも回収対象になっている。

⑨ PP 回収候補のパーツー内装品ーセンターコンソール・コンソール主要部

最近センターコンソールのない自動車も多くみられるが、センターコンソールも PP で作られていることが多いパーツである。また、重量も 1kg 以上のものが期待できる。

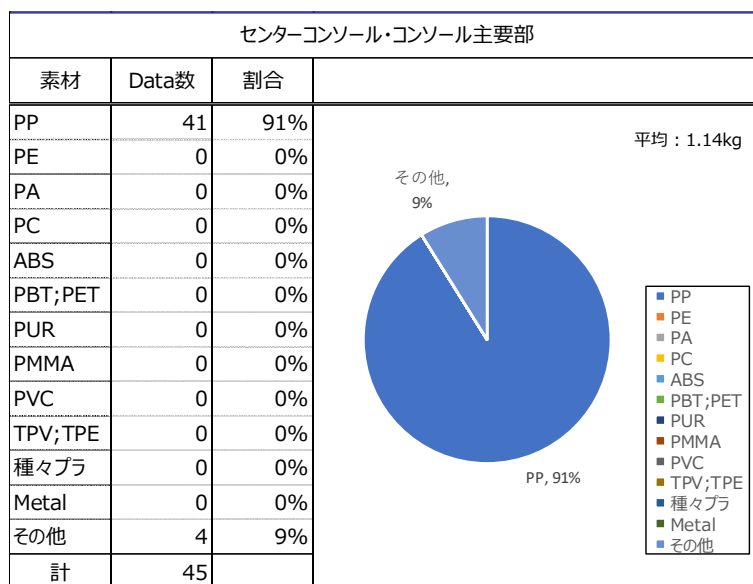


図 1-3-17 センターコンソール・コンソール主要部の素材割合

⑩ PP 回収候補のパーツー内装品ーインストルメントパネル

インストルメントパネルのダッシュボード、ダッシュボードカバー・運転席側トリム（アッパートリムとステアリングアンダーカバー）、アッパースキン及びグローブボックスそれぞれの素材割合を図 1-3-18 から 1-3-21 に示す。

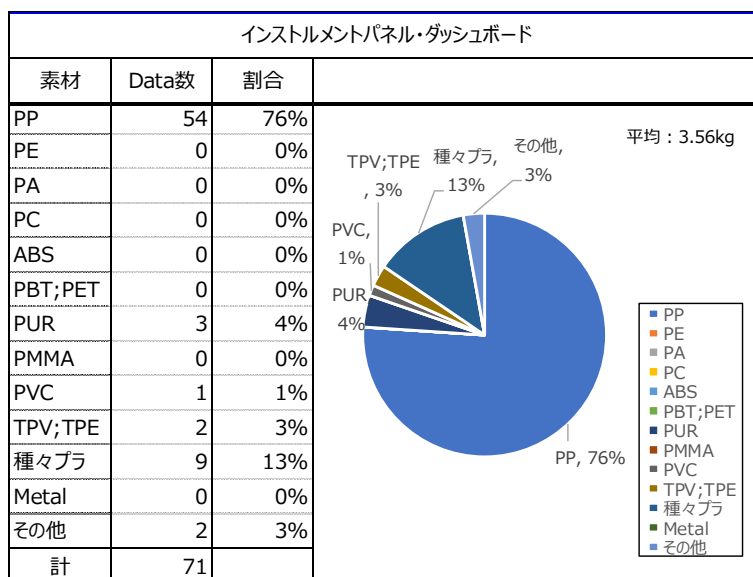


図 1-3-18 インストルメントパネル・ダッシュボードの素材割合

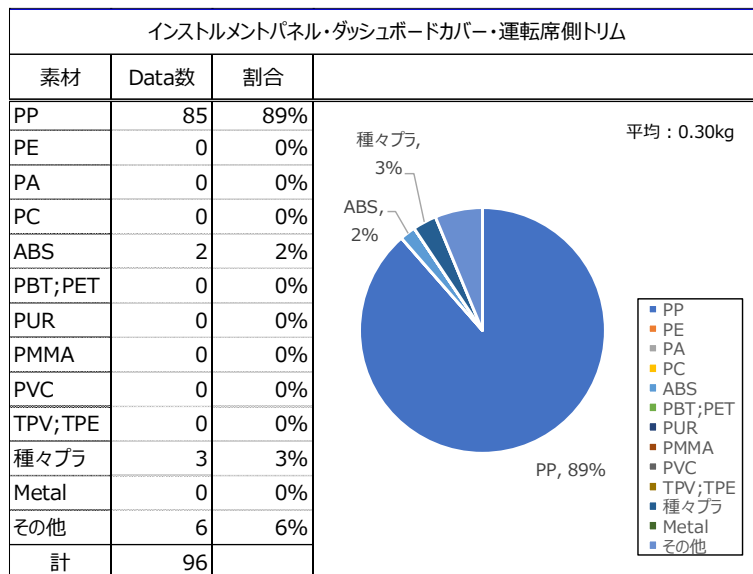


図 1-3-19 インストルメントパネル・ダッシュボードカバー・運転席側トリムの素材割合

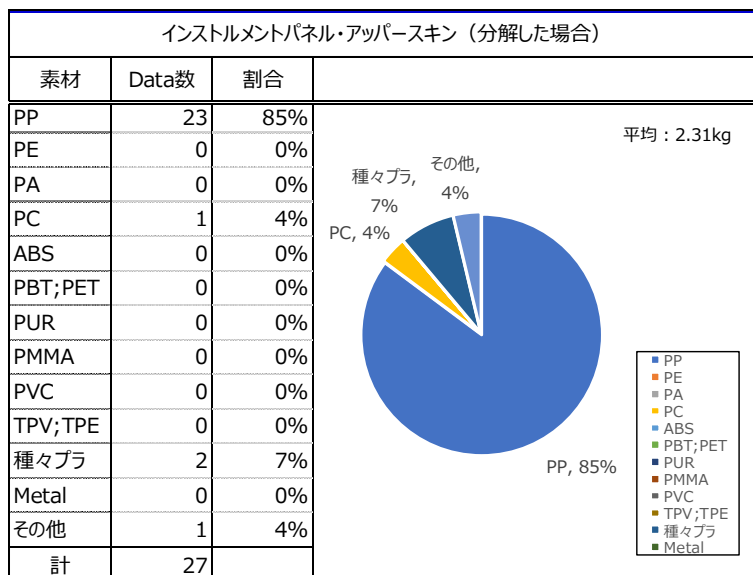


図 1-3-20 インストルメントパネル・アッパースキンの素材割合

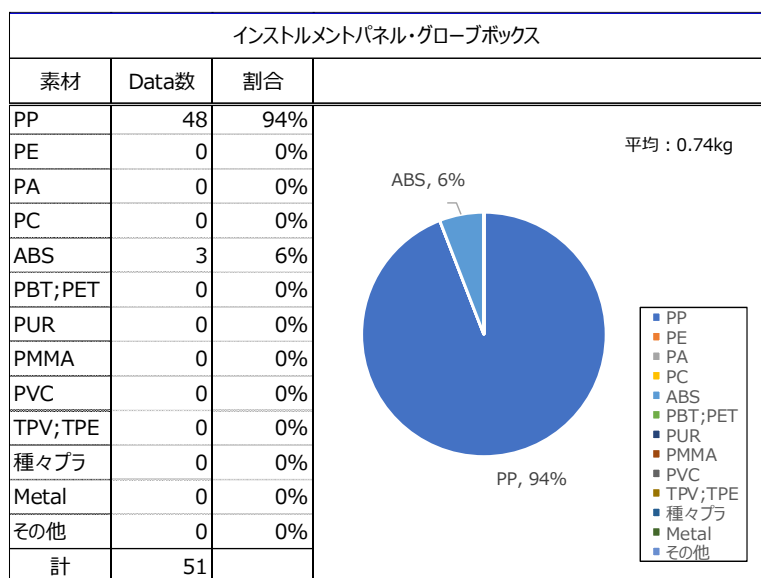


図 1-3-21 インストルメントパネル・グローブボックスの素材割合

これらの図からわかるように、インストルメントパネルは PP から作られていることが多く、またかなりの重量の回収が期待できる。しかし一方で、ステアリング、計器類、電気配線やダクト等が接続されており、解体が容易ではないという課題がある。

⑪ PP 回収候補のパーツ アクセサリー ツールボックス・収納部

アクセサリの中では、ツールボックス・収納部が平均重量 0.7kg、PP で作られている割合が 90% 以上であり(図 1-3-22)、また回収作業も容易であることから回収すべきと考えられる。

アクセサリでは、他にオーディオシステムのサウンドウーファーボックスが平均重量 1.2kg で PP の割合が 93%もあるのだが、この PP の 30%以上が GF(グラスファイバー)入りであった。そのため、リサイクル可能な PP の割合は 60%程度に減少してしまうため、ここでは回収候補としなかった。

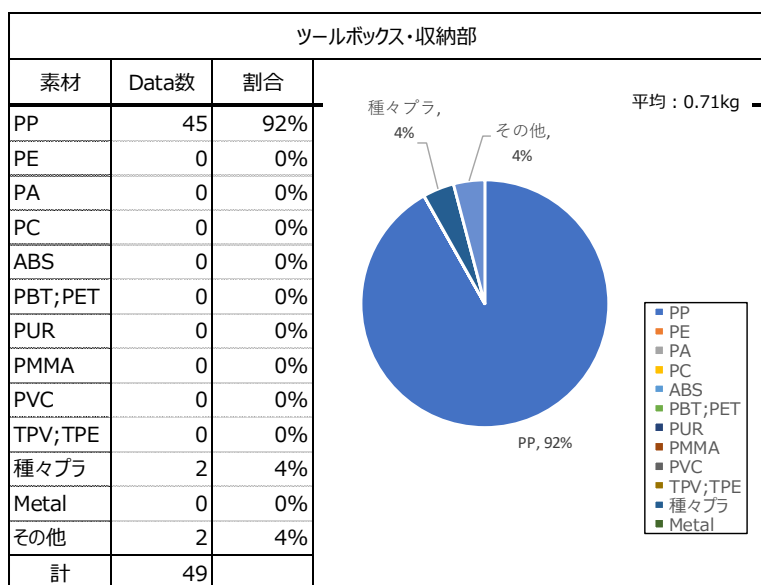


図 1-3-22 ツールボックス・収納部の素材割合

⑫ PE 回収候補のパーツーヒーティングシステム

PE の回収候補のパーツは、ヒーティングシステムのダクト類に集中している。平均重量はさほどではないが、これらはほぼ PE から作られている(図 1-3-23 から 1-3-25)。

なお、燃料タンクシステムのガソリンタンクが PE から作られている割合は 63%であるが、大きなパーツであり、PE の判別が容易であれば回収が期待できる。このガスタンクの平均重量は 8.3kg であるが、金属でできている割合が 15%あり、これが重量を押し上げていると考えられる。また、回収後、洗浄等の作業が必要になる可能性がある。

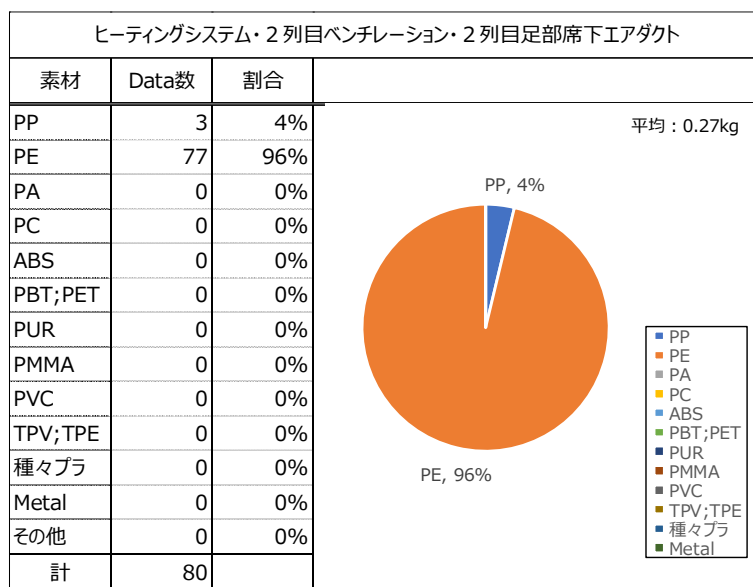


図 1-3-23 ヒーティングシステム・2 列目ベンチレーション・2 列目足部関下エアダクトの素材割合

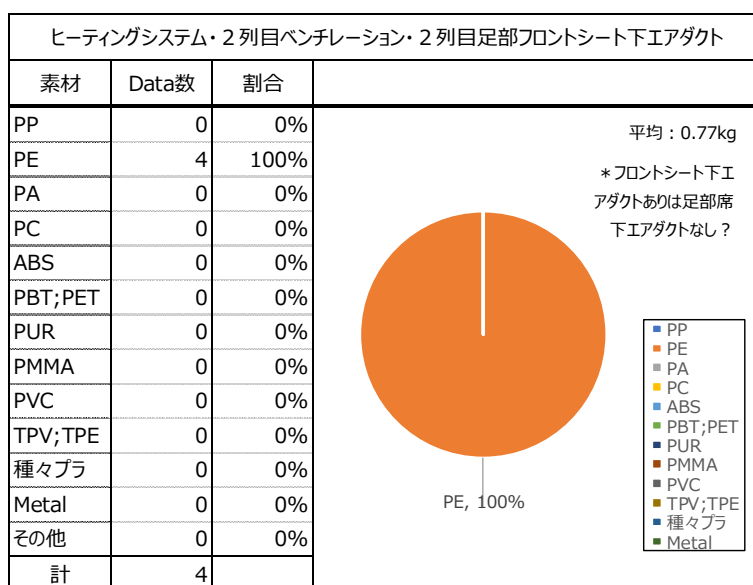


図 1-3-24 ヒーティングシステム・2 列目ベンチレーション・2 列目足部フロントシート下エアダクトの素材割合

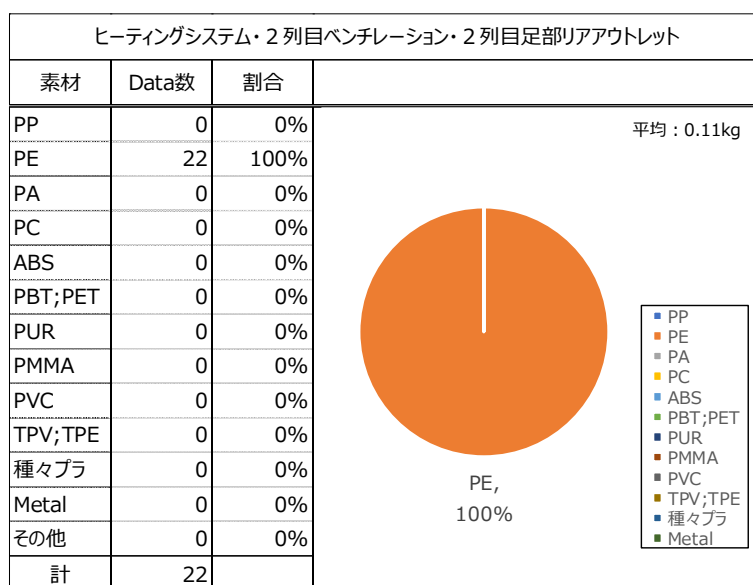


図 1-3-25 ヒーティングシステム・2列目ベンチレーション・2列目足部リアアウトレット
エアダクトの素材割合

3. 1. 3. 素材特性の変化（年代・セグメント・エンジン別）

一例として、回収候補として挙げた内装品のドアパネルキャリアの年代別、セグメント別、エンジン別の素材を図 1-3-26、1-3-27 に示す。

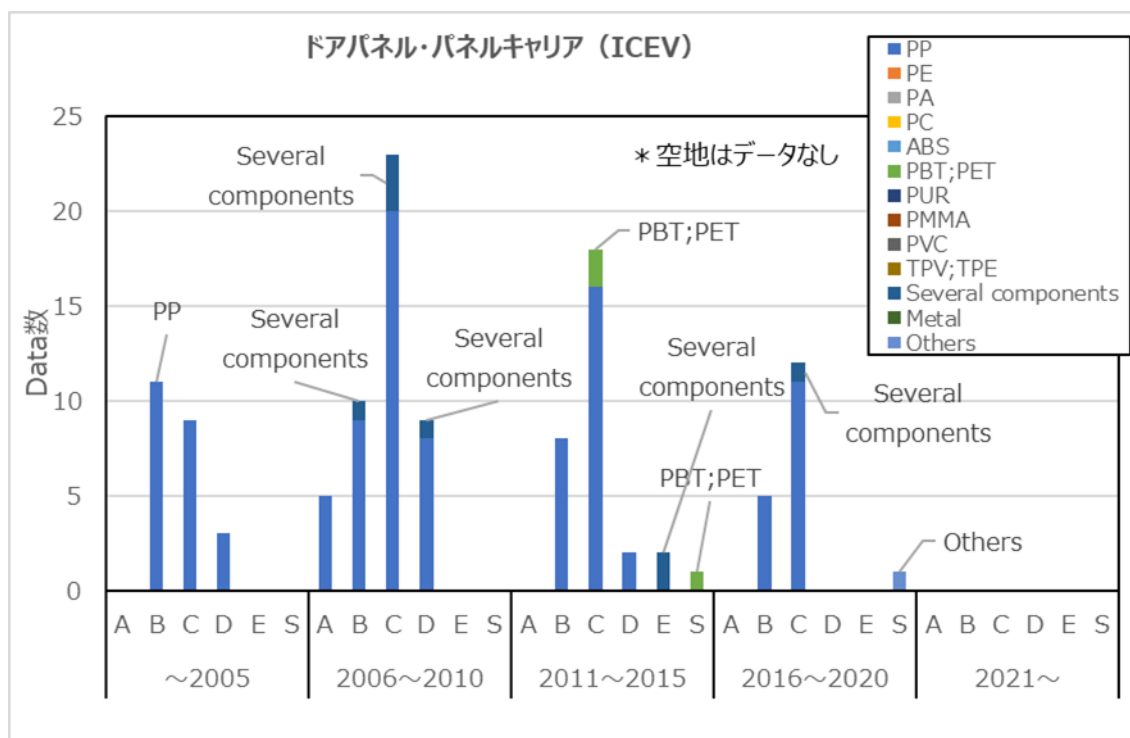


図 1-3-26 ICEV のドアパネルキャリアの年代別・セグメント別素材割合

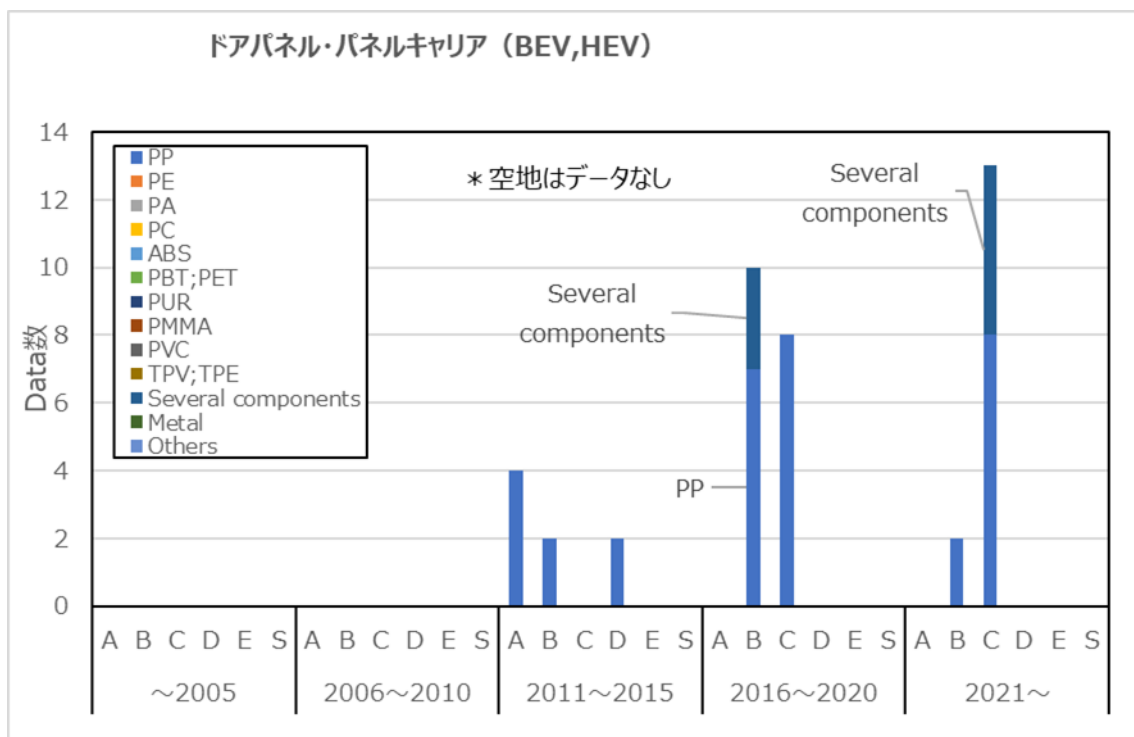


図 1-3-27 BEV・HEV のドアパネルキャリアの年代別・セグメント別素材割合

図からは、年代別に大きな差があるようには見受けられない。2021 年以降、BEV・HEV で種々の樹脂 (Several components) が使用されている割合が大きく見えるが、この年代には BEV・HEV のデータしかないため明確なことは言えない。

セグメント別に関しては、図 1-3-26 の E セグメントで種々の樹脂が、S セグメントで PBT、PET が使われているが、それぞれデータ数は 2 件、1 件であり、この結果から結論付けるのは難しい。ただし、解体業者からは高級車 (日本では大きな車ほど高級になりがち) ほど、ドアパネルにいろいろな素材が使われていて回収作業が煩雑になるという声がある。

ICEV と BEV・HEV のエンジンの別に関しては、データ数が十分とは言えないが、2011~2020 年のデータを比較しても使用素材に差があるようには見えない。

3. 1. 4. 素材別重量分布

ここまで、回収候補となるパーツの素材が何であるかの割合とパーツ自体の平均重量を示してきたが、上述と同様に A2MAC1 のデータを基に、素材ごとに平均、最低、最高重量を整理して表 1-3-2 に表す。

表からは、同じ呼称のパーツでも車種により重量が異なり、その振れ幅はずいぶん大きいことがわかる。一方、素材による重量の大きな差は見られない。

表 1-3-2 回収候補パーツの素材別重量分布

		部品重量(kg/部品)				樹脂別パーツ重量(kg/部品)																								
						PP				PE				PC				ABS				PBT/PET				PUR				PVC
		平均	Min	Max	Data数	平均	Min	Max	Data数	平均	Min	Max	Data数	平均	Min	Max	Data数	平均	Min	Max	Data数	平均	Min	Max	Data数	平均	Min	Max	Data数	
外装品	フロントバンパー	3.18	1.25	5.06	72	3.18	1.25	5.06	72																					
	リアバンパー	3.20	1.80	5.11	70	3.21	1.80	5.11	69																					
	スクリーンエロダイナミクス・エンジン下シールド	0.95	0.13	2.03	53	1.03	0.13	1.93	37	1.21	0.89	2.03	4						0.75	0.60	0.96	3								
	スクリーンエロダイナミクス・左中	1.09	0.19	2.48	36	1.12	0.19	2.48	28	1.29	1.23	1.41	3						0.66	0.51	0.82	2								
	スクリーンエロダイナミクス・右中	1.08	0.27	2.12	35	1.12	0.27	2.12	27	1.20	1.20	1.21	3						0.68	0.60	0.81	3								
	スクリーンエロダイナミクス・ボディフロントバンパーの側	1.03	0.19	4.88	47	1.04	0.19	4.88	44	0.26	0.26	0.26	1																	
	スクリーンエロダイナミクス・フロントアクスル後方	1.13	0.07	3.12	13	1.08	0.10	3.12	11	0.07	0.07	0.07	1																	
内装品	運転席ドアパネルキャリア	1.43	0.56	3.04	73	1.33	0.56	3.04	61										1.18	1.15	1.22	2								
	前席乗員用ドアパネルキャリア	1.48	0.57	2.67	20	1.47	0.57	2.67	19																					
	リアドア左パネルキャリア	1.14	0.49	2.58	67	1.10	0.50	2.58	60										1.16	1.16	1.16	1								
	運転席ドア・ドアマップポケットパネル	0.70	0.43	1.45	7	0.57	0.43	0.74	6										1.45	1.45	1.45	1								
	運転席ドア・ドアマップポケット下部	0.23	0.05	0.56	50	0.23	0.09	0.56	47										0.31	0.31	0.31	1								
	前席乗員用ドア・ドアマップポケットパネル	0.5	0.48	0.52	2	0.50	0.48	0.52	2																					
	前席乗員用ドア・ドアマップポケット下部	0.06	0.06	0.55	13	0.27	0.13	0.55	12																					
	リアドア左・ドアマップポケットパネル	0.43	0.38	0.47	2	0.43	0.38	0.47	2																					
	テールゲートインナーパネル・下部/メインパネル	1.25	0.12	2.27	65	1.32	0.20	2.27	58										0.21	0.12	0.34	3								
	トランク・左コンパートメントアッパー	0.45	0.04	1.10	21	0.45	0.04	1.10	20										0.34	0.34	0.34	1								
	トランク・左コンパートメントロウ	1.20	0.13	2.58	70	1.58	0.49	2.58	38	1.43	1.03	2.21	3						0.69	0.13	1.16	10								
	トランク・右コンパートメントアッパー	0.43	0.04	1.15	22	0.44	0.04	1.15	21										0.30	0.30	0.30	1								
	トランク・右コンパートメントロウ	1.20	0.13	2.66	70	1.59	0.61	2.66	38	1.40	0.88	2.07	3						0.60	0.13	1.18	10								
	トランク収納ボックス	1.51	0.33	2.96	8	1.51	0.33	2.96	7																					
	トリム部品-Aピラーアッパーパネル左側	0.30	0.11	73	73	0.29	0.11	0.48	64		0.83	0.83	0.83	1	0.33	0.33	0.33	1												
	トリム部品-Aピラーロウパネル左側	0.15	0.08	0.22	71	0.15	0.08	0.22	71																					
	トリム部品-Bピラーアッパーパネル左側	0.30	0.12	0.53	70	0.29	0.12	0.53	67										0.42	0.42	0.42	1								
	トリム部品-Bピラーロウパネル左側	0.49	0.33	0.66	67	0.48	0.33	0.66	65																					
	トリム部品-Cピラーアッパーパネル左側	0.52	0.17	1.33	68	0.53	0.17	1.33	65																					
	トリム部品-Cピラーロウパネル左側	0.48	0.22	0.71	31	0.48	0.22	0.71	31																					
	トリム部品-センターコンソール主要部	1.14	0.23	2.65	45	1.11	0.23	2.64	41																					
	インストルメントパネル・ダッシュボード	3.56	0.82	6.95	71	3.50	0.82	6.95	54														5.00	4.59	5.46	3	5.08	5.08	5.08	1
	インストルメントパネル・アゲアースキン	2.31	0.50	4.81	27	2.25	0.50	4.81	23		1.15	1.15	1.15	1																
	インストルメントパネル・運転席側アゲアーストリム	0.20	0.02	0.59	33	0.19	0.02	0.59	25						0.09	0.03	0.16	2												
インストルメントパネル・ステアリングコラムアンダーカバー	0.36	0.08	0.65	63	0.35	0.08	0.65	60																						
インストルメントパネル・グローブボックス	0.74	0.32	1.24	51	0.73	0.32	1.24	48						0.88	0.74	1.13	3													
サブリイセ	ツールボックス・収納部	0.71	0.02	2.68	50	0.71	0.02	2.68	45																					
	(オーディオシステム・サブウーファーボックス)	1.19	0.17	2.61	14	1.23	0.17	2.61	13																					
ヒステイミングシ	2列目ベンチレーション・足部右席下ダクト	0.27	0.09	0.67	40	0.27	0.24	0.30	2	0.27	0.09	0.67	38						0.61	0.61	0.61	1								
	2列目ベンチレーション・足部左席下ダクト	0.26	0.08	0.69	40	0.26	0.26	0.26	1	0.26	0.08	0.69	39																	
	2列目ベンチレーション・フロントシート下ダクト	0.77	0.53	1.13	4					0.77	0.53	1.13	4																	
	2列目ベンチレーション・足部リア右アウトレット	0.11	0.03	0.20	11					0.11	0.03	0.2	11																	
	2列目ベンチレーション・足部リア左アウトレット	0.11	0.06	0.20	11					0.11	0.06	0.20	11																	

		部品重量[kg/部品]				樹脂別パーツ重量[kg/部品]																備考		
						TPV/TPE				種々のブラスの組合せ				その他のブラス				金属						
						平均	Min	Max	Data数	平均	Min	Max	Data数	平均	Min	Max	Data数	平均	Min	Max	Data数			
外装品	フロントバンパー	3.18	1.25	5.06	72										2.74	2.74	2.74	1						
	リアバンパー	3.20	1.80	5.11	70										2.74	2.74	2.74	1						
	スクリーンエロダイナミクス・エンジン下シールド	0.95	0.13	2.03	53										0.62	0.53	0.72	3	0.45	0.45	0.45	1	部品重量平均値はMetalも含む。樹脂のみであれば0.91kg。	
	スクリーンエロダイナミクス・左中	1.09	0.19	2.48	36					1.29	1.29	1.29	1	0.64	0.51	0.78	2							
	スクリーンエロダイナミクス・右中	1.08	0.27	2.12	35					1.28	1.28	1.28	1	0.61	0.61	0.61	1							
	スクリーンエロダイナミクス・ボディフロントバンパーの側	1.03	0.19	4.88	47										0.34	0.34	0.34	1						
	スクリーンエロダイナミクス・フロントアクスル後方	1.13	0.07	3.12	13																			
内装品	運転席ドアパネルキャリア	1.43	0.56	3.04	73					1.97	0.62	2.83	9	1.97	0.62	2.83	1							
	前席乗員用ドアパネルキャリア	1.48	0.57	2.67	20					1.53	1.53	1.53	1	1.53	1.53	1.53								
	リアドア左パネルキャリア	1.14	0.49	2.58	67					1.13	0.49	1.61	6											
	運転席ドア・ドアマップポケットパネル	0.70	0.43	1.45	7																			
	運転席ドア・ドアマップポケット下部	0.23	0.05	0.56	50	0.20		0.05	0.34	2														
	前席乗員用ドア・ドアマップポケットパネル	0.5	0.48	0.52	2																			
	前席乗員用ドア・ドアマップポケット下部	0.06	0.06	0.55	13	0.06	0.06	0.06	1															
	リアドア左・ドアマップポケットパネル	0.43	0.38	0.47	2																			
	テールゲートインナーパネル・下部/メインパネル	1.25	0.12	2.27	65					0.92	0.31	1.53	2	0.66	0.31	1.00	2							
	トランク・左コンパートメントアッパー	0.45	0.04	1.10	21																			
	トランク・左コンパートメントロウ	1.20	0.13	2.58	70					0.65	0.35	1.01	11	0.54	0.33	0.65	8							
	トランク・右コンパートメントアッパー	0.43	0.04	1.15	22																			
	トランク・右コンパートメントロウ	1.20	0.13	2.66	70					0.68	0.41	1.1	11				8							
	トランク収納ボックス	1.51	0.33	2.96	8																			
	トリム部品・Aピラーアッパーパネル左側	0.30	0.11	73	73					0.29	0.21	0.37	9	0.29	0.29	0.29	1							
	トリム部品・Aピラーロウパネル左側	0.15	0.08	0.22	71																			
	トリム部品・Bピラーアッパーパネル左側	0.30	0.12	0.53	70										0.21	0.21	0.21	2						
	トリム部品・Bピラーロウパネル左側	0.49	0.33	0.66	67	0.63	0.63	0.63	1	0.65	0.65	0.65	1											
	トリム部品・Cピラーアッパーパネル左側	0.52	0.17	1.33	68					0.33	0.33	0.33	1	0.31	0.29	0.34	2							
	トリム部品・Cピラーロウパネル左側	0.48	0.22	0.71	31																			
	トリム部品・センターコンソール主要部	1.14	0.23	2.65	45									1.47	0.78	2.65	4							
	インストルメントパネル・ダッシュボード	3.56	0.82	6.95	71	3.89	2.94	4.84	2	3.64	2.40	4.36	9	1.89	1.89	1.89	1							計器類等が搭載しており、解体作業が煩雑
	インストルメントパネル・アガースキン	2.31	0.50	4.81	27					2.12	1.79	2.45	2	3.72	3.72	3.72	1							計器類等が搭載しており、解体作業が煩雑
	インストルメントパネル・運転席側アパートリム	0.20	0.02	0.59	33					0.14	0.10	0.21	3				3							計器類等が搭載しており、解体作業が煩雑
インストルメントパネル・ステアリングコラムアンダーカバー	0.36	0.08	0.65	63									0.40	0.37	0.42	3							計器類等が搭載しており、解体作業が煩雑	
インストルメントパネル・グローブボックス	0.74	0.32	1.24	51																				
サブリイセ	ツールボックス・収納部	0.71	0.02	2.68	50																			
	(オーディオシステム・サブウーファーボックス)	1.19	0.17	2.61	14								0.94	0.53	1.24	5								
	2列目ベンチレーション・足部右席下ダクト	0.27	0.09	0.67	40																			
	2列目ベンチレーション・足部左席下ダクト	0.26	0.08	0.69	40																			
	2列目ベンチレーション・フロントシート下ダクト	0.77	0.53	1.13	4																			
セシステイミング	2列目ベンチレーション・足部17右アクトレット	0.11	0.03	0.20	11																			
	2列目ベンチレーション・足部17左アクトレット	0.11	0.06	0.20	11																			

3. 1. 5. 調査のまとめ

A2MAC1 が提供する自動車の解体データを用いて、PP あるいは PE で作られている可能性があるパーツが 70%以上あり、比較的重量の重いものを回収候補のパーツとして一次選別した。その結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 表 1-3-3 に PP の回収候補パーツを、各パーツが PP でできている割合、重量の幅、平均重量とともに示す。PP の回収候補パーツは、①バンパー(前後で 3.1~10.2kg、平均約 6.4kg;表 1-3-2 の PP でできたパーツから推定。以下、同じ)、②スクリーンエアロダイナミクス各パーツ(0.9~14.5kg、平均約 5.4kg)、③ドアパネル・パネルキャリア及びマップポケット(2ドアと4ドアの中間をとりドア 3 枚とし、ここでは前席2ドアと後席1ドアを合算すると 3.1~11.1 平均約 5.9kg)、④テールゲートインナーパネル(セダンにはないが、0.2~2.3kg、平均約 1.3kg)、⑤トランクコンパートメントアッパー(0.1~2.3kg、平均約 0.9kg)、⑥トランク収納ボックス(0.3~3.0kg、平均約 1.6kg)、⑦ピラーパネル(2.1~7.9kg、平均約 4.4kg)、⑧センターコンソール主要部(0.2~2.6kg、平均約 1.1kg)、⑨インストルメントパネル(1.7~14.2kg、平均約 7.0kg)、⑩ツールボックス収納部(0.02~2.7kg、平均約 0.7kg)である。期待できる回収量は車 1 台当たりおよそ 12~71kg、平均で約 34.7kg となる。
このうち現在①、③、⑦を回収している一部の解体業者においても、上記のパーツの回収により、平均で約 18kg の回収量増加が見込める。また、これらは年代別、セグメント別、エンジン別による素材の変化はない。ただし、BEV・HEV においては車重低減のために ICEV よりも多くの樹脂パーツを採用している可能性があり、別の検討が必要である。
- (2) PE の回収候補パーツはヒーティングシステムの2列目ベンチレーション・エアダクト類である。これらのパーツが PE でできている割合とその重量を表 1-3-4 に示す。これらはおよそ 0.8~2.9kg、平均で約 1.5kg 程度の回収が期待できる。
- (3) 上記候補を合計すると、1 台の車から PP、PE 合わせて 36kg 程度の樹脂回収が期待できる。今後は解体・回収作業の容易さ等を考慮に入れる必要がある。また、GF が含まれているものはリサイクル不可として回収候補から外したが、これ以外にも添加物等によっては素材コードの識別段階でリサイクル不可のものがあると考えられる。

今回、PP もしくは PE で作られている割合が 70%以上のものを回収候補として選択したが、例えば割合が 60%程度であっても回収前に素材が PP あるいは PE であることがわかり、重量の重い大きなパーツや、回収が容易であるパーツは回収するのが望ましい。

また、照明の透明カバーは PC の回収候補と考えられるが、精緻解体で小さなパーツまでデータのある A2MAC1 で照明は照明器具一体としてしかデータがなかった。これは解体の難しさがあるのかもしれない。

表 1-3-3 PP 回収候補パーツの PP である割合と重量

		部品重量[kg/部品]					PPである割合とその際の重量[kg/部品]						備 考
		Min	～	Max	平均	Data数	%	Min.	～	Max.	平均	Data数	
外 装 品	1 フロントバンパー	1.25	～	5.06	3.18	72	100%	1.25	～	5.06	3.18	72	塗装されており、塗料の剥離が課題
	2 リアバンパー	1.80	～	5.11	3.20	70	99%	1.80	～	5.11	3.21	69	塗装されており、塗料の剥離が課題
	3 スクリーンエアロダイナミクス・エンジン下シールド	0.13	～	2.03	0.95	53	70%	0.13	～	1.93	1.03	37	部品重量平均値はMetalも含む。樹脂のみであれば0.91kg。
	4 スクリーンエアロダイナミクス・左中	0.19	～	2.48	1.09	36	78%	0.19	～	2.48	1.12	28	
	5 スクリーンエアロダイナミクス・右中	0.27	～	2.12	1.08	35	77%	0.27	～	2.12	1.12	27	
	6 スクリーンエアロダイナミクス・ボディとフロントバンパーの間のスクリーン	0.19	～	4.88	1.03	47	94%	0.19	～	4.88	1.04	44	
	7 スクリーンエアロダイナミクス・フロントアクスル後方	0.07	～	3.12	1.13	13	85%	0.10	～	3.12	1.08	11	
内 装 品	1 運転席ドアパネルキャリア	0.56	～	3.04	1.43	73	84%	0.56	～	3.04	1.33	61	
	2 前席乗員用ドアパネルキャリア	0.57	～	2.67	1.48	20	95%	0.57	～	2.67	1.47	19	
	3 リアドア左パネルキャリア	0.49	～	2.58	1.14	67	90%	0.50	～	2.58	1.10	60	
	4 運転席ドア・ドアマップポケットパネル	0.43	～	1.45	0.70	7	86%	0.43	～	0.74	0.57	6	
	5 運転席ドア・ドアマップポケット下部	0.05	～	0.56	0.23	50	94%	0.09	～	0.56	0.23	47	
	6 前席乗員用ドア・ドアマップポケットパネル	0.48	～	0.52	0.5	2	100%	0.48	～	0.52	0.50	2	
	7 前席乗員用ドア・ドアマップポケット下部	0.06	～	0.55	0.06	13	92%	0.13	～	0.55	0.27	12	
	8 リアドア左・ドアマップポケットパネル	0.38	～	0.47	0.43	2	100%	0.38	～	0.47	0.43	2	
	9 テールゲートインナーパネル・下部/メインパネル	0.12	～	2.27	1.25	65	89%	0.20	～	2.27	1.32	58	
	10 トランク・左コンパートメントアッパー	0.04	～	1.10	0.45	21	95%	0.04	～	1.10	0.45	20	
	11 トランク・右コンパートメントアッパー	0.04	～	1.15	0.43	22	95%	0.04	～	1.15	0.44	21	
	12 トランク収納ボックス	0.33	～	2.96	1.51	8	88%	0.33	～	2.96	1.62	7	
	13 トリム部品・Aピラーアッパーパネル左側	0.11	～	73	0.30	73	88%	0.11	～	0.48	0.29	64	
	14 トリム部品・Aピラーロワパネル左側	0.08	～	0.22	0.15	71	100%	0.08	～	0.22	0.15	71	
	15 トリム部品・Bピラーアッパーパネル左側	0.12	～	0.53	0.30	70	96%	0.12	～	0.53	0.29	67	
	16 トリム部品・Bピラーロワパネル左側	0.33	～	0.66	0.49	67	97%	0.33	～	0.66	0.48	65	
	17 トリム部品・Cピラーアッパーパネル左側	0.17	～	1.33	0.52	68	96%	0.17	～	1.33	0.53	65	
	18 トリム部品・Cピラーロワパネル左側	0.22	～	0.71	0.48	31	100%	0.22	～	0.71	0.48	31	
	19 トリム部品・センターコンソール主要部	0.23	～	2.65	1.14	45	91%	0.23	～	2.64	1.11	41	
	20 インストールメントパネル・ダッシュボード	0.82	～	6.95	3.56	71	76%	0.82	～	6.95	3.50	54	計器類等が付着しており、解体作業が煩雑
	21 インストールメントパネル・アッパースキン	0.50	～	4.81	2.31	27	85%	0.50	～	4.81	2.25	23	計器類等が付着しており、解体作業が煩雑
	22 インストールメントパネル・運転席側アッパートリム	0.02	～	0.59	0.20	33	76%	0.02	～	0.59	0.19	25	計器類等が付着しており、解体作業が煩雑
	23 インストールメントパネル・ステアリングコラムアンダーカバー	0.08	～	0.65	0.36	63	95%	0.08	～	0.65	0.35	60	計器類等が付着しており、解体作業が煩雑
	24 インストールメントパネル・グローブボックス	0.32	～	1.24	0.74	51	94%	0.32	～	1.24	0.73	48	計器類等が付着しており、解体作業が煩雑
ア ク セ ス リ ー	1 ツールボックス・収納部	0.02	～	2.68	0.71	50	90%	0.02	～	2.68	0.71	45	
	2 (オーディオシステム・サブウーファーボックス)	0.17	～	2.61	1.19	14	93%	0.17	～	2.61	1.23	13	13件のデータのうち、4件がGF入りのPP

表 1-3-4 PE 回収候補パーツの PE である割合と重量

			部品重量[kg/部品]					PEである割合とその際の重量[kg/部品]						備 考
			Min	～	Max	平均	Data数	%	Min.	～	Max.	平均	Data数	
ヒ ー テ ィ ン グ シ ス テ ム	1	2列目ベンチレーション・足部右席下ダクト	0.09	～	0.67	0.27	40	95%	0.09	～	0.67	0.27	38	
	2	2列目ベンチレーション・足部左席下ダクト	0.08	～	0.69	0.26	40	98%	0.08	～	0.69	0.26	39	
	3	2列目ベンチレーション・フロントシート下ダクト	0.53	～	1.13	0.77	4	100%	0.53	～	1.13	0.77	4	
	4	2列目ベンチレーション・足部リア右アウトレット	0.03	～	0.20	0.11	11	100%	0.03	～	0.2	0.11	11	
	5	2列目ベンチレーション・足部リア左アウトレット	0.06	～	0.20	0.11	11	100%	0.06	～	0.2	0.11	11	

3. 2. プラスチックパーツの回収と評価

3. 2. 1. 廃自動車の選定

前節で選別したプラスチックパーツを回収するために解体する廃自動車を選定した。選定に当たり、自動車製品に含まれる可能性のある法的規制対象等の有害物質をリストアップした Global Automotive Declarable Substance List (以下、「GADSL」という。)が自動車メーカーの標準に組み込まれた 2005 年以前と、(一社)自動車工業会が PBDEs の使用を自主規制し、Br の含有量が大幅に減っていると推察される 2017 年以降、及びその中間の 2006 年～2016 年の 3 つの年代に分けて、軽自動車と普通車それぞれ 3 台ずつ、計 18 台を解体することにした(表 1-3-5)。

表 1-3-5 解体する廃自動車

年代	軽自動車	普通車
～2005 年	3 台	3 台
2006 年～2016 年	3 台	3 台
2017 年～	3 台	3 台

3. 2. 2. パーツ回収手法と回収量

回収対象のプラスチックパーツとして、外装品はバンパーとスクリーンエアロダイナミクス(アンダーカバー)、内装品はドアパネル(パネルキャリア、マップポケット等)、トランクコンパートメント、ピラー、センターコンソール、インストルメントパネル、カウルサイドトリム、スカッフプレート(ここまで PP 材)及びヒータリングシステムのエアダクト(PE 材)をリストアップした。

手による一次解体(廃自動車からのパーツ回収)を行っている WARC とニブラによる一次解体を行う KMI(いずれも、パーツから異材を取り除く二次解体は手作業による)の 2 社において、軽自動車、普通自動車の解体・パーツ回収を行った。

解体・回収においては一次解体、二次解体の作業時間、各パーツの回収量、異材量を測定するとともに、パーツの材料コード、異材を記録し、必要に応じてパーツの回収作業状況(解体のしやすさ等)を両社にヒアリングした。

前述の A2MAC1 に記載されている総プラスチックパーツ重量と車輻重量の割合を図 1-3-28 に示す。ただし、A2MAC1 のデータには、左右対称で同じパーツ片側のデータしか記載されていない(例えば左右ドアの材料・形状や重量が同じ場合、運転席ドアやリア左ドアのデータしか記述がない)。したがって、この総プラスチックパーツ重量は、実際の車輻重量よりも少し軽めである(ただし、10kg は変わらないと考えられる)が、図 1-3-28 によると総プラパーツの平均重量は車輻重量のおよそ 8% である。車種別に見ると BEV ではプラスチックパーツが比較的少ないことがわかる。

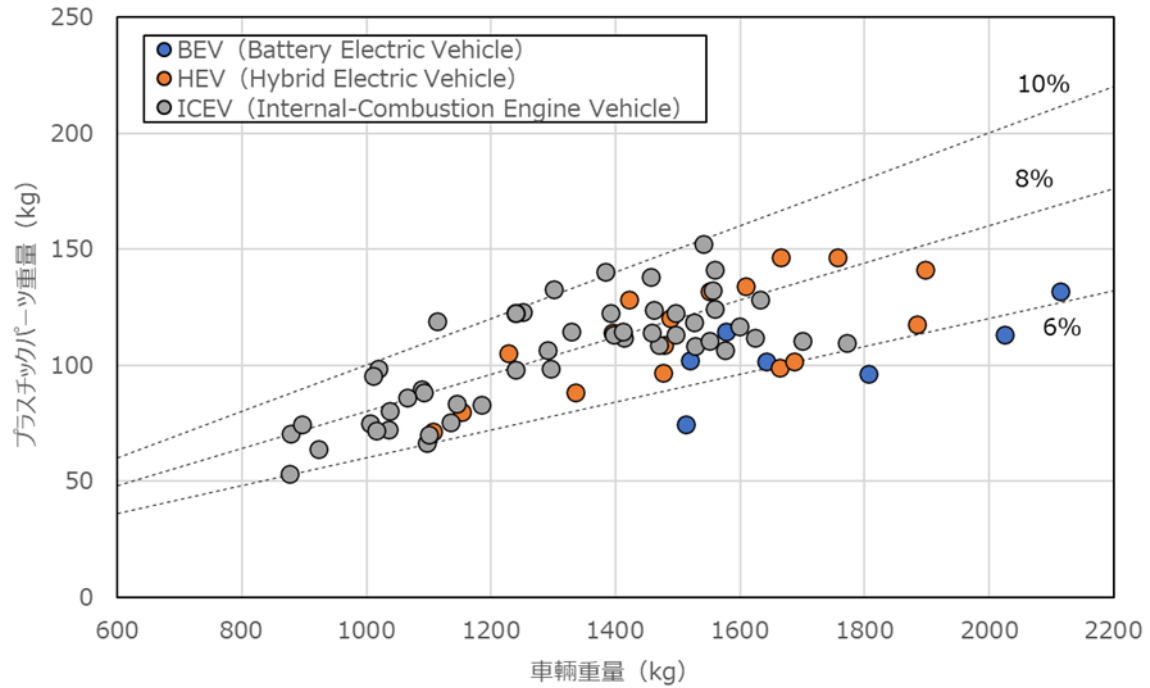


図 1-3-28 車重と総プラスチックパーツ重量

図 1-3-29～1-3-31 はそれぞれ、総プラスチックパーツに占める各プラスチックの重量割合、0.5kg 未満のプラスチックパーツと 0.5kg 以上の各プラスチックの総プラスチックパーツに占める割合、1kg 未満のプラスチックパーツと 1kg 以上の各プラスチックの総プラスチックパーツに占める割合を表す。

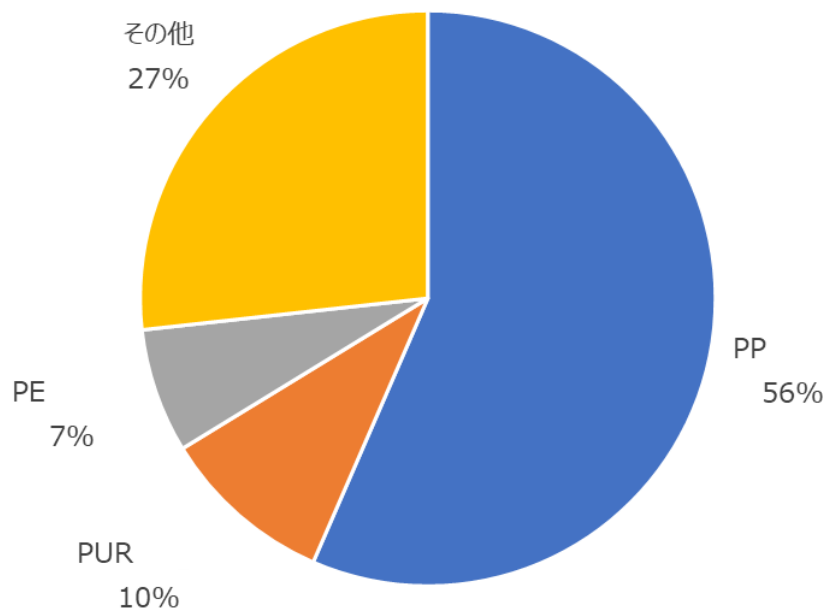


図 1-3-29 プラスチックパーツに占める各プラスチックの重量割合

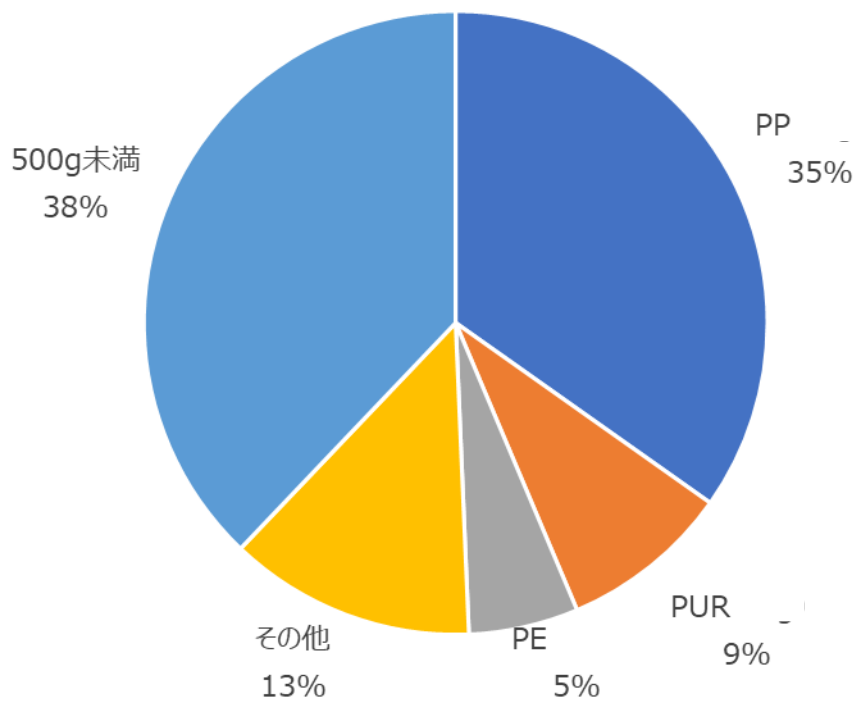


図 1-3-30 0.5kg 以上の各プラスチックパーツの総プラスチックパーツに占める重量割合

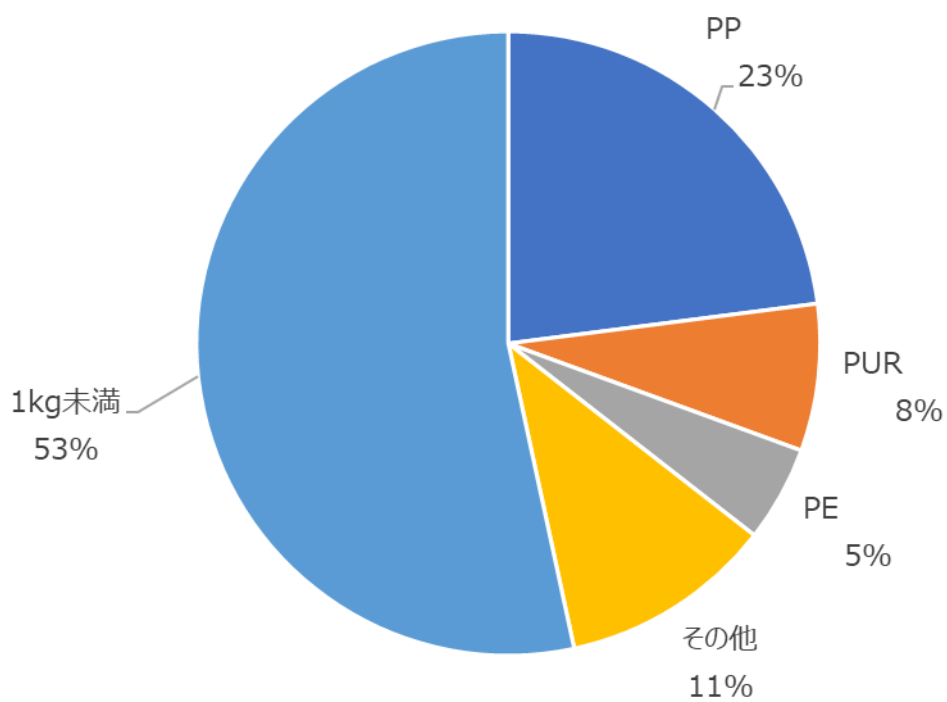


図 1-3-31 1kg 以上の各プラスチックパーツの総プラスチックパーツに占める重量割合

プラスチックパーツの材料としては PP がもっとも多く、60%弱を占める。次いで PUR、PE である。0.5kg 以上の PP パーツの総プラスチック量に占める割合は約 35%であり、1kg 以上の PP パーツの場合は約 23%である。一方、PUR や PE について見ると総プラスチック量に占める割合はそれぞれ 10%、7%、0.5kg 以上のパーツの割合は 9%、5%、そして 1kg 以上のパーツの割合は 8%、5%であり、PP のようには減少しない。このことから、PP は小さなパーツから大きなパーツまで幅広く使われているのに対して、PUR や PE は比較的大きなパーツに使用されていることがわかる。

18 台の自動車の回収量を図 1-3-32 に示す。車輛乾燥重量の増加に伴い、回収プラスチック量も増加している。図には図 1-3-28 から総プラスチック重量が乾燥車重の 8%と推定したときの 25%と 35%の一点鎖線も併せて示す。今回の回収量は 1 点を除き、この一点鎖線の間に収まっている。

回収プラスチックパーツは平均でおよそ 1kg 以上となるものを選定しているが、これは例えばピラーのように A、B、C ピラーを合わせて1つのパーツ(ピラー)として扱い、その平均値を求めている。また、詳しくは後述するが、リストアップしたパーツが全て回収できたわけではない。これらを考え合わせると、概ね期待通りの量を回収できたと言える。

解体した 18 台は全て異なる自動車であり、回収できたパーツにも差があったので単純比較はできないが、一次解体が手解体とニブラ解体を比較すると、手解体の方が回収量が多い傾向がある。その理由としてニブラはスカッフプレートが掴みにくい、解体時にファスナー周辺をはじめとして一部が欠損したり紛失したりすること等が挙げられる。

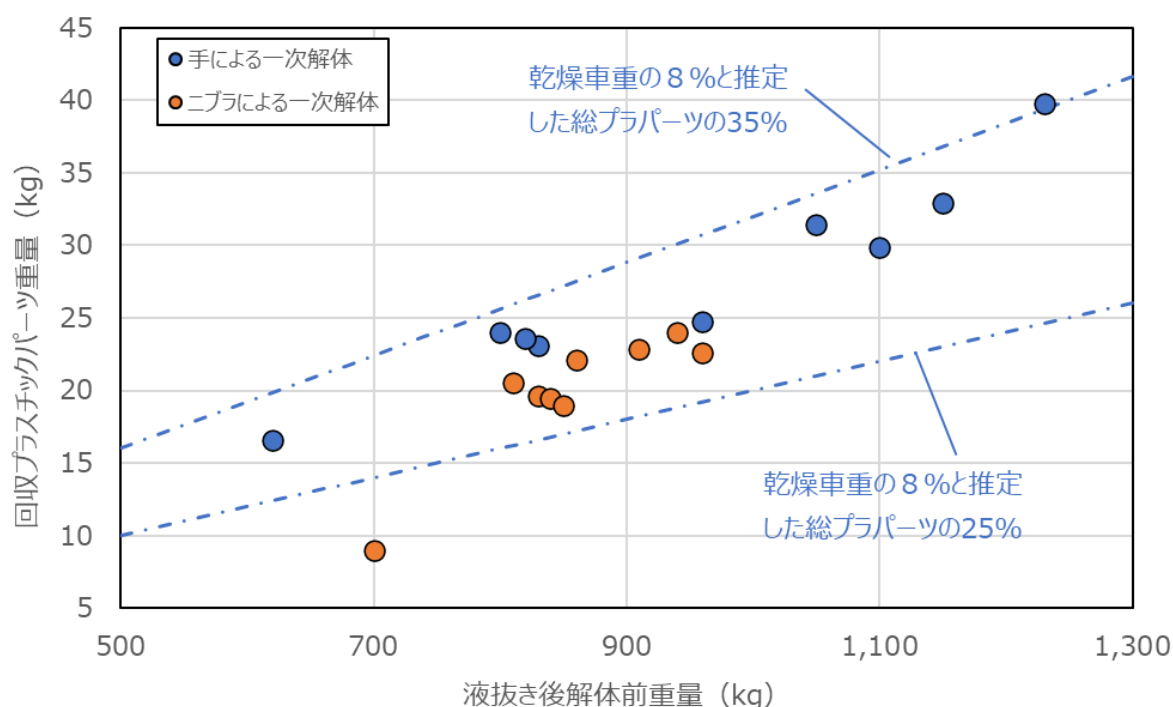


図 1-3-32 車輛乾燥重量と回収プラスチックパーツの総重量

図 1-3-33 には解体時間を示す。青色が手による一次解体、橙色がニブラによる一次解体の結果であり、濃い色が一次解体時間、薄い色が二次解体時間である。ファスナーを一つ一つ外す手解体に対して、パーツを掴み引きはがすニブラ解体は圧倒的に一次解体時間が短く、車種によるばらつき

きも小さい。異物を除去する二次解体はどちらも手によるため、二次解体時間だけを比べれば大きな差は生じないはずであるが、一次解体から手で行っている方が、概して二次解体時間も長いように見える。この理由としては、回収量、車種による違いや異物除去の方法(異物が付随している部分をパーツごと切り取る等)の違いが考えられる。結果として、総解体時間には大きな差が生じている。

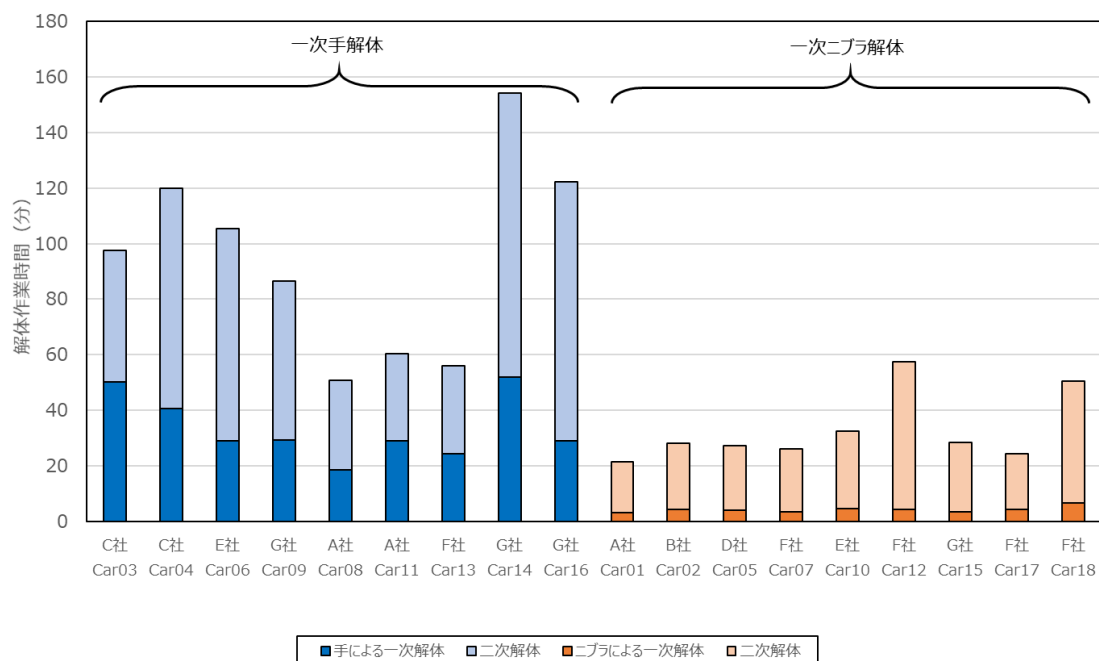


図 1-3-33 一次解体に要した時間

図 1-3-34 に、一次手解体と一次ニブラ解体に分けて各パーツの回収量を示す。ばらつきが大きい。回収量が多いのはバンパー、ドアパネル、インストルメントパネル、次いでトランクコンパートメント、ピラー、センターコンソールである。スクリーンエアロダイナミクス(アンダーカバー)やセンターコンソールは車格によってないものが多かった。カウルサイドトリムとスカッフプレートはニブラ一次解体において回収できていないものがある。これは当初、ニブラで掴むことが難しいと判断し、回収しなかったためである。その後、試行によりこれらのパーツも掴めるようになった。ヒーティングシステムは、当初フロアのダクトを対象として選定していたが、ここでは全てインパネに付随するフロントのエアダクトである。手による一次解体で一部抜けがあるのは、フロントエアダクトの回収徹底が遅れたためである。

図 1-3-35 は一次解体と二次解体を合わせて、各パーツの回収にかかった時間である。回収量の期待できるインストルメントパネルであるが、計器や配線類が付随しているため、とくに一次手解体において多くの回収時間を要している。一方で、トランクコンポーネント、ピラー、スカッフプレートやカウルサイドトリムは一次解体が容易で、手解体とニブラ解体で総回収時間に大きな差がない。

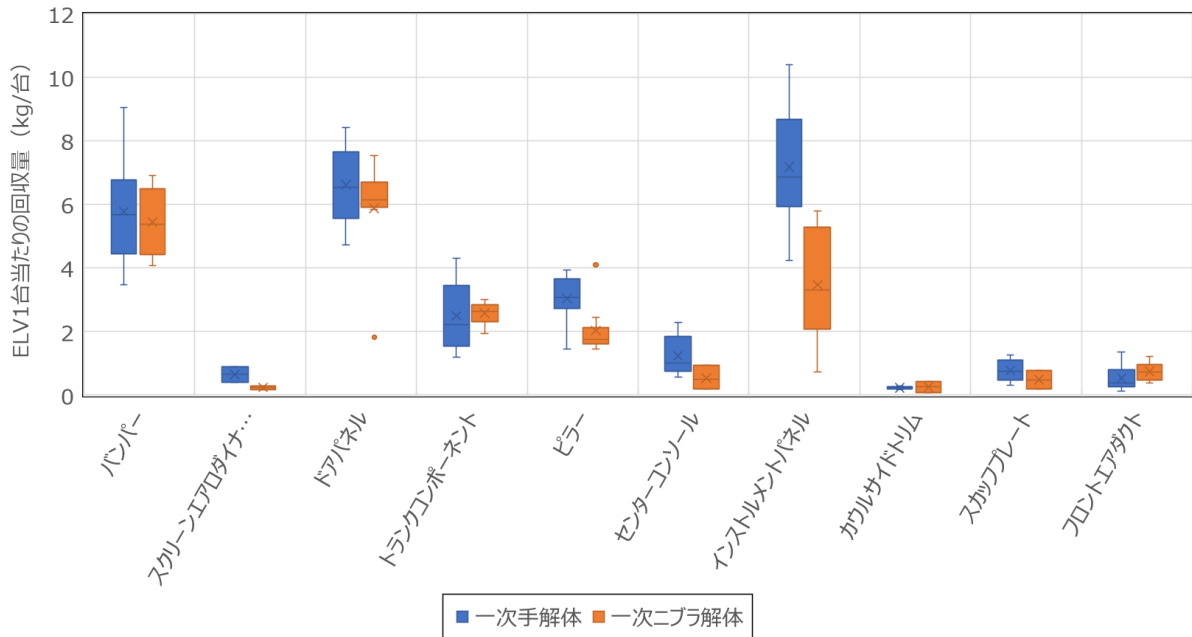


図 1-3-34 各パーツの回収量

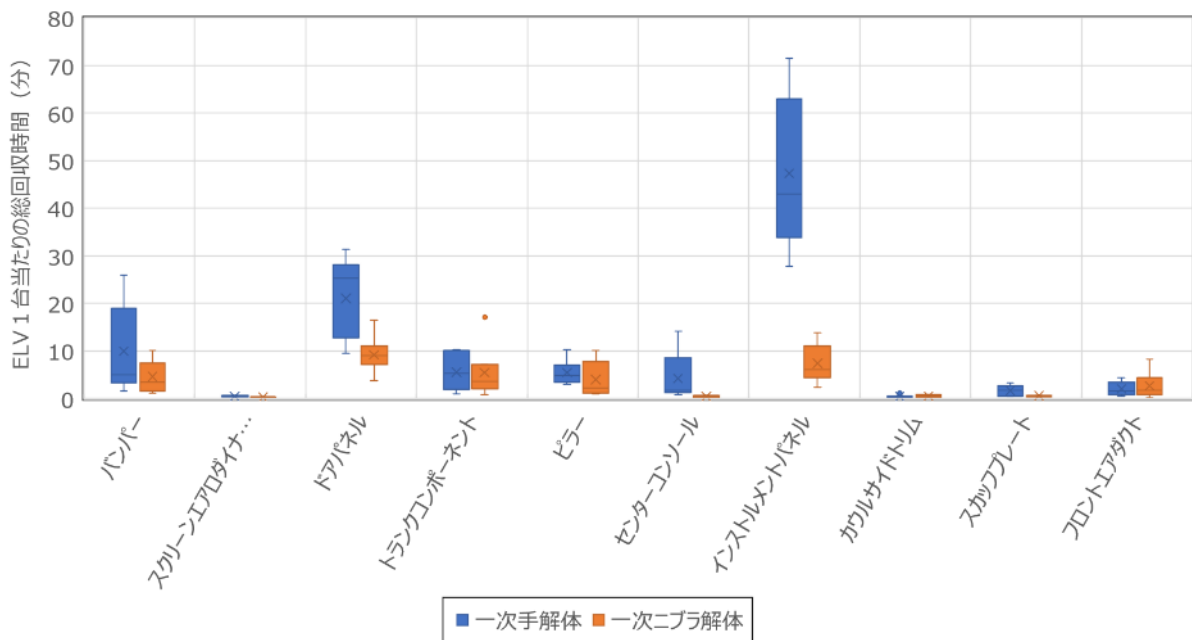


図 1-3-35 各パーツの回収時間

図 1-3-34 と図 1-3-35 の結果から、1 分間で回収できるパーツの重量を示す回収効率を求めた結果が図 1-3-36 である。回収効率もばらつきが大きく、一次手解体と一次ニブラ解体に顕著な差は見られず、ほとんどのパーツの回収効率が 1kg/分以下である。また、どちらの解体であっても、インストルメントパネルの回収効率は低い。

廃自動車からのプラスチック回収量を増やすために、解体効率の視点からは、以下のことが言え

る。

① さらに回収候補パーツを増やす。

② 一次解体に手解体とニブラ解体を適切に組み合わせる。具体的には回収時間が短く、かつ回収効率がニブラとあまり変わらないピラー、カウルサイドトリム、そしてスカッフプレートは手による一次解体を行い、それ以外はニブラにより一次解体を行う。

③ 解体が容易になるようにパーツを設計する。手による一次解体の回収時間を短くするためには、ファスナーの数を減らす、構造を簡素化する、取付位置を分解しやすい箇所に設置する等の設計が必要である。また二次解体の時間を短縮するためには遮音材等の異物の接着を簡素化することが必要である。

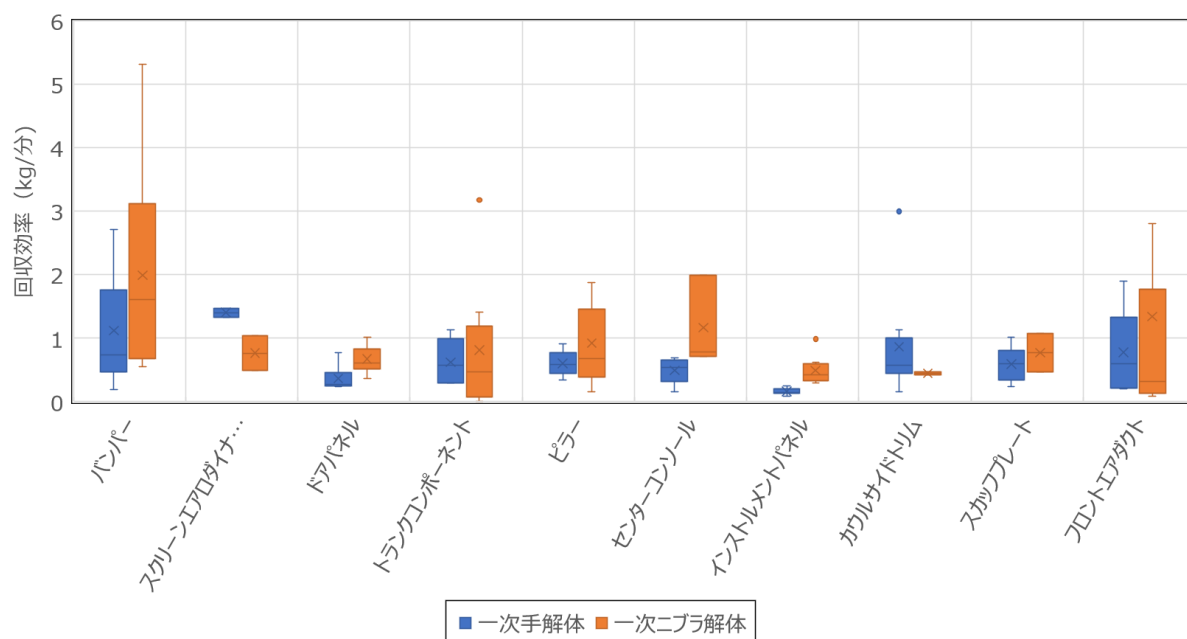


図 1-3-36 各パーツの回収効率

3. 2. 3. 各パーツ中の臭素濃度分布

今後、再生プラスチックの自動車製造における原料化を行うためには、POPs 規則に定める LPC を遵守することが有効と考えられる。POPs 規則では、現在、PBDEs(テトラ+ペンタ+ヘキサ+ヘプタ+デカ)の LPC は 500ppm である。安全を見て、テトラ BDE で臭素換算すると、PBDEs500ppm は Br330ppm となる。このため、再生プラスチック中の Br 濃度を 300ppm 未満とすれば、再生プラスチックのリサイクル原料化に係る臭素系難燃剤の規制は満足できることになる。

梶原²⁰は蛍光 X 線分析により、数多くの使用済み自動車部材に含まれる Br 濃度を測定した。本実証事業においても解体業者の協力を得て、回収したパーツ以外に在庫の廃自動車も対象に可搬型の蛍光 X 線分析計装置(Thermo Fisher Scientific 社製、XL2-980S Plus、認証標準物質(NMIJ CRM 8108-b No.510 及び NMIJ CRM 8110-b No.086、産業技術研究所計量標準総合センター)による差異の確認済み、以下、「可搬型 XRF」という。)を用いて多くの部材の Br 濃度を測定した。回収候補パーツの Br 濃度測定結果を梶原らの日本車のデータと合わせて図 1-3-37 に示す。図より、2000 年以降の自動車でもドアトリムに Br>10,000ppm を示すデータがあるが、回収候補パーツからは高濃度の Br は検出されなかった。

図 1-3-37 に示した結果から PE 材であるフロントエアダクトを除いた、PP 材の回収候補の Br 濃度分布を示したのが図 1-3-38 である。図 1-3-39 には横軸の Br 濃度までを回収した場合のパーツの平均 Br 濃度も併せて示す。PP 材の回収候補 927 点の全平均 Br 濃度は 56ppm であり、前述の Br < 300ppm を十分に満足する値である。

図 1-3-39 には回収候補以外のパーツの Br 濃度測定結果を示す。年代が新しくなるにつれ、濃度が減少しているようにも見えるが、シート布地に高濃度の Br が検出された。また、本実証事業で測定したフリップダウンリアモニターの筐体から 80,000ppm 前後の Br が検出された。この筐体の材料コードには難燃剤を示す -FR の表示があった。

解体現場においては、これらのパーツが回収パーツに混入する可能性がある。そこで、混入率を考慮せず、これらの回収候補以外のパーツも含めた全データの Br 濃度分布を求めると図 1-3-40 になる。

²⁰ 梶原夏子、滝上英孝「使用済み自動車部材及び車内ダスト中の難燃剤等の調査」(平成 24～26 年度 環境研究総合推進費補助金研究事業補助金 総合研究報告書「使用済み自動車 (ELV) の資源ポテンシャルと環境負荷に関するシステム分析 (3K123001) 平成 27 年 3 月 研究代表者 京都大学 酒井伸一」

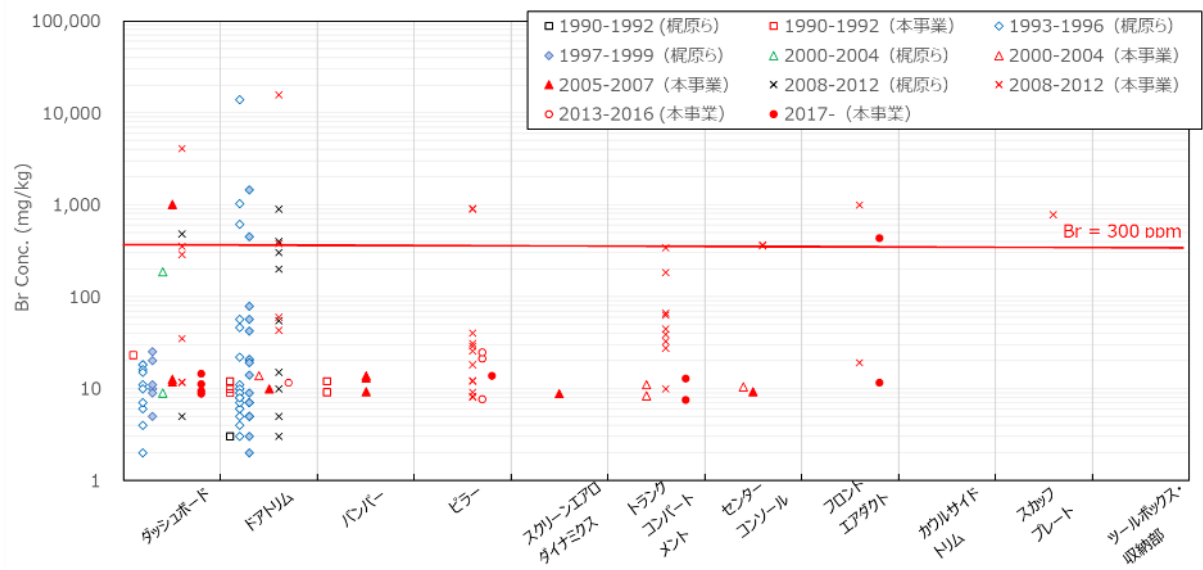


図 1-3-37 可搬型 XRF による回収候補パーツの Br 濃度測定結果（年代別・パーツ別）

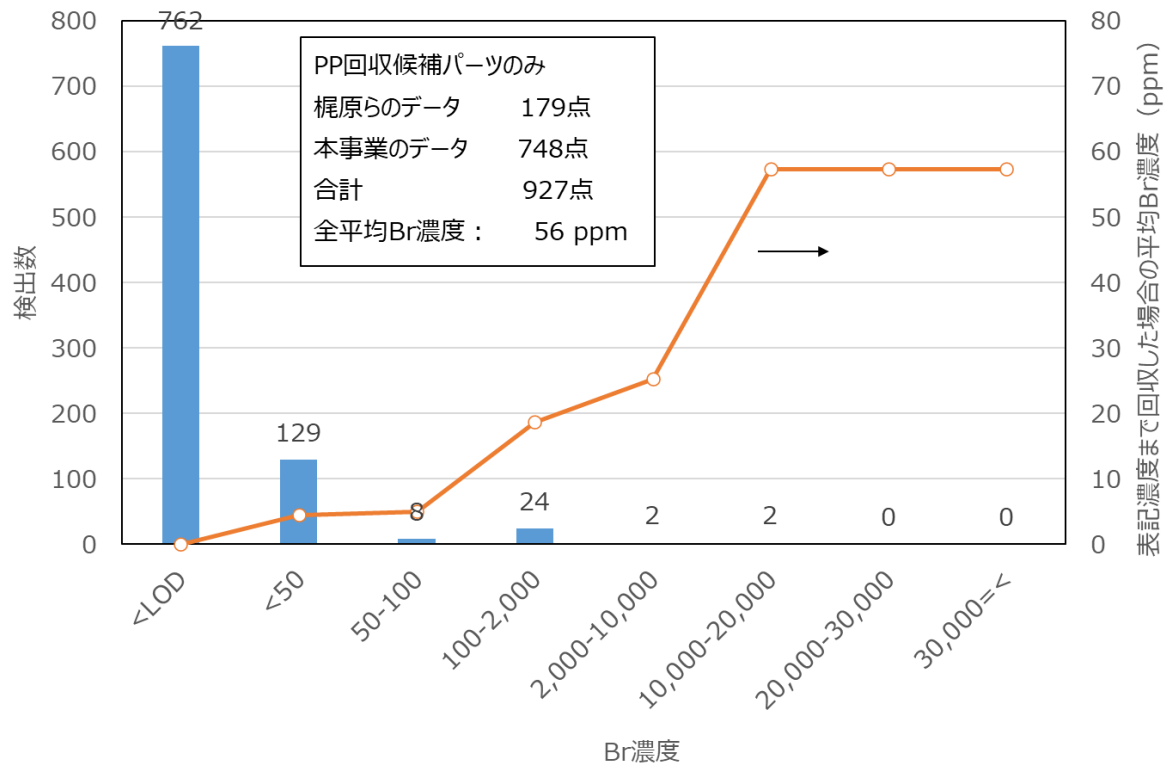


図 1-3-38 回収候補パーツの Br 濃度分布（梶原らのデータも含む）

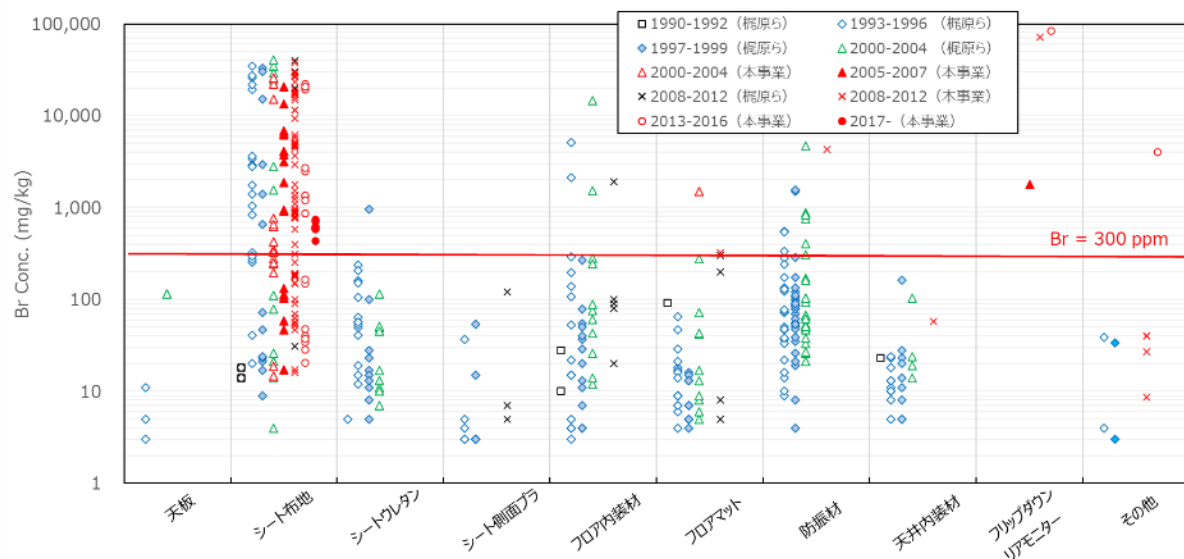


図 1-3-39 回収候補以外のパーツの Br 濃度測定結果

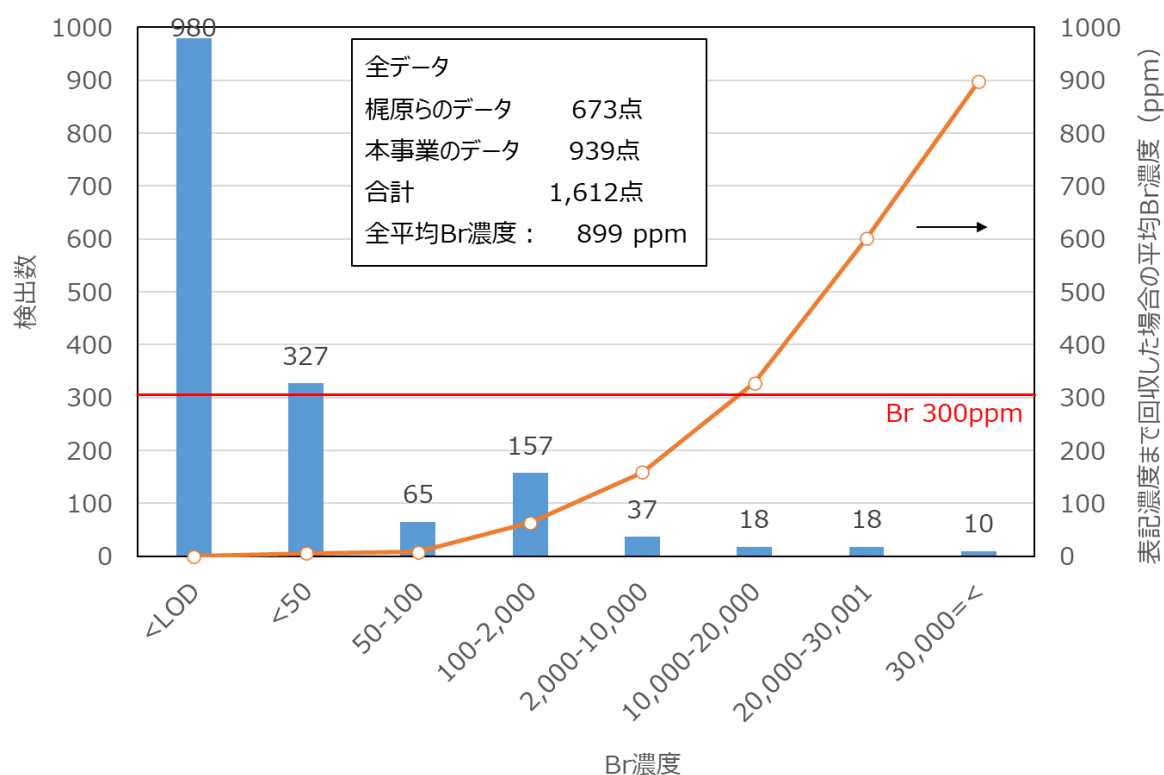


図 1-3-40 全パーツの Br 濃度分布（梶原らのデータも含む）

全データ数 1,612 点の平均濃度は 899ppm であるが、1%以上を選別除去できれば残る部材の平均 Br 濃度は 159ppm になり、余裕をもって $\text{Br} < 300\text{ppm}$ を満足することができるとわかった。ただし、この推定には、プラスチック重量による荷重平均が考慮されていないことに留意が必要である。

4. 部品プラスチック中の臭素系難燃剤の分析

前節において、ELV 由来プラスチックの中でも臭素系難燃剤の混入リスクが高いと想定される部品を抽出したことを踏まえ、本節では、これら対象部品における臭素系難燃剤及び構成元素である臭素の含有実態を化学分析により検証する。POPs 規則において段階的な LPC 基準の強化が見込まれる中、リサイクル材料に含有される臭素系難燃剤の濃度を正確に把握することは、適正な選別・管理手法の基礎情報として重要である。

本節で分析対象とする試料は以下のとおりである。

- 三世代別車両部品(5 パーツごと)
 - － 世代別に等量混合した試料
 - － 個別車両ごとの試料
- 自動車部品プラスチック由来の再生材
- (参考)フリップモニター

なお、臭素系難燃剤以外の規制対象物質の含有状況については、付録 A を参照すること。

4. 1. 三世代別車両部品－世代別に等量混合した試料

製造年に基づき、国産車を以下の三世代に分類する。

- 第 1 世代(～2005 年) :2005 年までに製造された車
- 第 2 世代(2006 年～2016 年) :2006 年から 2016 年までに製造された車
- 第 3 世代(2017 年～) :2017 年以降に製造された車

この分類の根拠は、自動車業界の化学物質管理基準である Global Automotive Declarable Substance List (GADSL) が 2005 年に策定され、以降の車両では規制物質の管理が強化されたことにある。2006 年以降の車両では、GADSL の適用により臭素系難燃剤を含む特定化学物質の使用が制限されるようになり、規制対応の変遷を反映するため、第 2 世代を 2006 年～2016 年とした。

2017 年以降を第 3 世代とした理由は、POPs 条約や REACH 規則の改正により、臭素系難燃剤を含む特定化学物質の規制がさらに強化された時期にあたるためである。特に、DecaBDE が 2017 年に POPs 条約の附属書 A (廃絶) に追加され、これにより欧州をはじめとする各国で使用禁止が進んだ。この規制強化は、自動車業界における材料選定にも影響を与えたと考えられる。また、日本国内においても、化審法や電気・電子機器における特定有害物質の使用制限に関する指令(以下、「RoHS 指令」という。)の改正が行われたタイミングであり、自動車メーカーがより厳格な化学物質管理を進めた時期と重なる。これらの要因を踏まえ、2017 年以降の車両を第 3 世代と位置づけた。

分析対象とする車両の基本情報(年代、メーカー、車種)の一覧を表 1-4-1(a)に、対象パーツの詳細を表 1-4-1(b)に示す。

解体業者より回収した部品プラスチックは、事前に 5mm 以下に粉砕した後、年代別及びパーツ別に等量混合し、約 10g の均一試料として調製した。さらに、レッチェ製 MM400 を用いて凍結粉砕を行い、粒径 1mm 角未満に均一化した後、分析に供した。なお、一部の車種においてトランクコンパートメントの回収が不可能であったため、第 1 世代及び第 3 世代のトランクコンパートメント試料は、5 台分を混合試料として調製した。

表 1-4-1 分析対象とする使用済自動車

(a) 車両の基本情報（年代、メーカー、車種）

世代	車両の基本情報		
	年式	製造社	車種
第 1 世代	2002 年	A 社	Car01
	2004 年	B 社	Car02
	2005 年	C 社	Car03
	2005 年	C 社	Car04
	2005 年	D 社	Car05
	2005 年	E 社	Car06
第 2 世代	2008 年	F 社	Car07
	2009 年	A 社	Car08
	2009 年	G 社	Car09
	2009 年	E 社	Car10
	2011 年	A 社	Car11
	2013 年	F 社	Car12
第 3 世代	2017 年	F 社	Car13
	2017 年	G 社	Car14
	2018 年	G 社	Car15
	2018 年	G 社	Car16
	2021 年	F 社	Car17
	2024 年	F 社	Car18

(b) パーツの詳細

バンパー
ドアパネル
トランクコンパートメント
ピラー
インストルメントパネル

4. 1. 1. 分析結果

表 1-4-2 に世代別に混合した試料の臭素元素スクリーニング結果を示す。定量下限値未満の数字は“<”付きで記す。当該スクリーニングは、燃焼イオンクロマトグラフ (Combustion Ion Chromatography、以下、「CIC」という。)を用いて実施した。測定条件等の詳細については、付録 A を参照すること。

表 1-4-2 世代別に混合した試料の臭素元素スクリーニング結果

試料名			測定結果 (ppm)
			Br
第1世代 (2005年以前の年式)	バンパー	6台混合	<10
	ドアパネル	6台混合	<10
	トランクコンパートメント	5台混合	<10
	ピラー	6台混合	<10
	インストルメントパネル	6台混合	<10
第2世代 (2006～2016年の年式)	バンパー	6台混合	<10
	ドアパネル	6台混合	<10
	トランクコンパートメント	6台混合	<10
	ピラー	6台混合	<10
	インストルメントパネル	6台混合	<10
第3世代 (2017年以降の年式)	バンパー	6台混合	<10
	ドアパネル	6台混合	<10
	トランクコンパートメント	5台混合	<10
	ピラー	6台混合	<10
	インストルメントパネル	6台混合	<10
定量下限値			10

表 1-4-3 に世代別に混合した試料のターゲット分析結果を示す。定量下限値未満の数字は“<”付きで記す。当該分析は、Gas Chromatography-Orbitrap Mass Spectrometry (以下、「GC-Orbitrap MS」という。)または Liquid Chromatography-Orbitrap Mass Spectrometry (以下、「LC-Orbitrap MS」という。)を用いて実施した。測定条件等の詳細については、付録 A を参照すること。なお、NonaBDEs、DecaBDE、DecaBB については、多項目の同時分析を実施したため個別物質の条件の最適化が困難であり、定量下限値が他成分に比して高くなっている。また、表 1-4-3 において黄色塗で強調された項目は、POPs 条約により POPs として指定されていることを示す。

4. 1. 2. 評価

表 1-4-2 に示すスクリーニング結果によると、三世代別の車両部品から回収したプラスチックを等量混合した試料において、臭素元素は検出されなかった。さらに、表 1-4-3 のターゲット分析結果においても、臭素系難燃剤として添加される化合物は検出されなかった。これら二つの分析結果は整合しており、当該試料には臭素系難燃剤は含まれていないと考えられる。

表 1-4-3 世代別に混合した試料のターゲット分析結果（単位：ppm）

測定分析項目／試料名			第1世代					第2世代					第3世代				
分類	項目名	CAS番号	バンパー	ドアパネル	トランクコンパートメント	ピラー	インストルメントパネル	バンパー	ドアパネル	トランクコンパートメント	ピラー	インストルメントパネル	バンパー	ドアパネル	トランクコンパートメント	ピラー	インストルメントパネル
ポリ臭素化ジフェニルエーテル（PBDEs）	#47-TeBDE	5436-43-1	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	#99-PeBDE	60348-60-9	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	#154-HxBDE	207122-15-4	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	#153-HxBDE	68631-49-2	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	#183-HpBDE	207122-16-5	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	#197-OBDE	117964-21-3	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	MonoBDEs	101-55-3	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	DiBDEs	2050-47-7	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	TriBDEs	49690-94-0	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	TetraBDEs	40088-47-9	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PentaBDEs	32534-81-9	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	HexaBDEs	36483-60-0	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	HeptaBDEs	68928-80-3	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	OctaBDEs	32536-52-0	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	NonaBDEs	63936-56-1	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
	DecaBDE	1163-19-5	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
ポリ臭素化ビフェニル（PBBS）	MonoBBs	26264-10-8	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	DiBBs	27479-65-8	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	TriBBs	51202-79-0	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	TetraBBs	40088-45-7	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PentaBBs	56307-79-0	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	HexaBBs	36355-01-8	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	HeptaBBs	35194-78-6	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	OctaBBs	27858-07-7	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	NonaBBs	27753-52-2	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	DecaBB	13654-09-6	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
ヘキサブロモシクロデカン（HBCDs）	α-HBCD	134237-50-6	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	β-HBCD	134237-51-7	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	γ-HBCD	134237-52-8	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10

4. 2. 三世代別車両部品－個別車両ごとの試料

前節では、製造年に基づき国産車を三世代に分類し、各世代の車両から回収したプラスチックを等量混合した試料の分析を実施した。本節では、混合を行わず、個別車両ごとに分析を行う。ただし、付録 A に示した元素分析の塩素やフッ素の結果より、ターゲット分析については規制対象物質の検出リスクが高いバンパー、インストルメントパネルの 2 部位を選定した。

- **元素スクリーニング：**

バンパー、ドアパネル、トランクコンパートメント、ピラー、インストルメントパネルの 5 部位

- **ターゲット分析：**

バンパー、インストルメントパネルの 2 部位

分析対象の使用済自動車は、表 1-4-1 (a) に示したものと同様である。

4. 2. 1. 分析結果

表 1-4-4 に個別車両ごとの臭素元素スクリーニング結果を示す。定量下限値未満の数字は“<”付きで記す。当該スクリーニングは、CIC を用いて実施した。測定条件等の詳細については、付録 A を参照すること。

表 1-4-4 個別車両ごとの試料の臭素元素スクリーニング結果

(a) 第 1 世代

試料名			測定結果(ppm)
			Br
第1世代 (2005年以前の年式)	バンパー	Car01	<10
		Car02	<10
		Car03	<10
		Car04	<10
		Car05	<10
		Car06	<10
	ドアパネル	Car01	<10
		Car02	<10
		Car03	<10
		Car04	<10
		Car05	<10
		Car06	<10
	トランクコンパートメント	Car01	<10
		Car02	<10
		Car03	<10
		Car04	<10
		Car05	試料無し
		Car06	<10
	ピラー	Car01	<10
		Car02	<10
		Car03	<10
		Car04	<10
		Car05	<10
		Car06	<10
	インストルメントパネル	Car01	<10
		Car02	<10
		Car03	<10
		Car04	<10
		Car05	<10
		Car06	<10
定量下限			10

(b) 第 2 世代

試料名			測定結果(ppm)
			Br
第2世代 (2006年～2016年の 年式)	バンパー	Car07	<10
		Car08	<10
		Car09	<10
		Car10	<10
		Car11	<10
		Car12	<10
	ドアパネル	Car07	<10
		Car08	<10
		Car09	<10
		Car10	<10
		Car11	<10
		Car12	<10
	トランクコンパートメント	Car07	<10
		Car08	<10
		Car09	<10
		Car10	<10
		Car11	<10
		Car12	<10
	ピラー	Car07	<10
		Car08	<10
		Car09	<10
		Car10	<10
		Car11	<10
		Car12	<10
	インストルメントパネル	Car07	<10
		Car08	<10
		Car09	<10
		Car10	<10
		Car11	<10
		Car12	<10
定量下限			10

(c) 第3世代

試料名			測定結果(ppm)
			Br
第3世代 (2017年以降の年式)	バンパー	Car13	<10
		Car14	<10
		Car15	<10
		Car16	<10
		Car17	<10
		Car18	<10
	ドアパネル	Car13	<10
		Car14	<10
		Car15	<10
		Car16	<10
		Car17	<10
		Car18	<10
	トランクコンパートメント	Car13	<10
		Car14	<10
		Car15	<10
		Car16	<10
		Car17	試料無し
		Car18	<10
	ピラー	Car13	<10
		Car14	<10
		Car15	<10
		Car16	<10
		Car17	<10
		Car18	<10
	インストルメントパネル	Car13	<10
		Car14	<10
		Car15	<10
		Car16	<10
		Car17	<10
		Car18	<10
定量下限			10

表 1-4-5 に個別車両ごとのターゲット分析結果を示す。定量下限値未満の数字は“<”付きで記す。当該分析は、GC-Orbitrap MS または LC-Orbitrap MS を用いて実施した。測定条件等の詳細については、付録 A を参照すること。なお、NonaBDEs、DecaBDE、DecaBB については、多項目の同時分析を実施したため個別物質の条件の最適化が困難であり、定量下限値が他成分に比して高くなっている。また、表 1-4-5 において黄色塗で強調された項目は、POPs 条約により POPs として指定されていることを示す。

4. 2. 2. 評価

表 1-4-4 に示すスクリーニング結果によると、三世代別車両部品から回収したプラスチックを個別車両ごとに分析した試料において、臭素元素は検出されなかった。さらに、表 1-4-5 のターゲット分析結果においても、臭素系難燃剤として添加される化合物は検出されなかった。これら二つの分析結果は整合しており、当該試料には臭素系難燃剤は含まれていないと考えられる。

表 1-4-5 世代別に混合した試料のターゲット分析結果（単位：ppm）

[illegible]

4. 3. 自動車部品プラスチック由来の再生材

本節では、再資源化業者により加工された使用済自動車部品プラスチック由来の再生材（以下、「再生ペレット」という。）について、化学分析を実施した。なお、当該ペレットにはバージン原料等、他の由来を持つプラスチックは含まれていない。分析対象とした再生ペレットは 10 種類である。

4. 3. 1. 分析結果

表 1-4-6 に世代別に混合した試料の臭素元素スクリーニング結果を示す。定量下限値未満の数字は“<”付きで記す。当該スクリーニングは、エネルギー分散型 X 線分光分析 (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy、以下、「EDX」という。)を用いて実施した。

表 1-4-6 再生ペレットの臭素元素スクリーニング結果

試料名		測定結果(ppm)
		Br
再生ペレット	pellet01	<10
	pellet02	<10
	pellet03	<10
	pellet04	<10
	pellet05	<10
	pellet06	<10
	pellet07	13
	pellet08	<10
	pellet09	<10
	pellet10	<10
定量下限		10

表 1-4-7 に再生ペレットのターゲット分析結果を示す。定量下限値未満の数字は“<”付きで記す。当該分析は、ガスクロマトグラフ質量分析法 (Gas Chromatography/Mass Spectrometry、以下、「GC/MS」という。) または液体クロマトグラフ質量分析法 (Liquid Chromatography/Mass Spectrometry、以下、「LC/MS」という。)を用いて実施した。なお、表 1-4-7 において黄色塗で強調された項目は、POPs 条約により POPs として指定されていることを示す。

4. 3. 2. 評価

表 1-4-6 に示したスクリーニング結果によると、臭素元素が検出された再生ペレットは 10 検体のうち 1 検体のみであり、その濃度は 13ppm であった。また、表 1-4-7 のターゲット分析結果では、臭素系難燃剤として添加される化合物は検出されなかった。これら両分析の結果には整合しており、当該試料には臭素系難燃剤は含まれていないと考えられる。

表 1-4-7 再生ペレットのターゲット分析結果（単位：ppm）

測定分析項目／試料名			再生ペレット									
分類	項目名	CAS番号	pellet01	pellet02	pellet03	pellet04	pellet05	pellet06	pellet07	pellet08	pellet09	pellet10
ポリ臭素化ジフェニルエーテル（PBDEs）	#47-TeBDE	5436-43-1	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	#99-PeBDE	60348-60-9	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	#154-HxBDE	207122-15-4	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	#153-HxBDE	68631-49-2	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	#183-HpBDE	207122-16-5	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	#197-OBDE	117964-21-3	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	MonoBDEs	101-55-3	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	DiBDEs	2050-47-7	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	TriBDEs	49690-94-0	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	TetraBDEs	40088-47-9	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PentaBDEs	32534-81-9	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	HexaBDEs	36483-60-0	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	HeptaBDEs	68928-80-3	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	OctaBDEs	32536-52-0	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	NonaBDEs	63936-56-1	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	DecaBDE	1163-19-5	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
ポリ臭素化ビスフェニル（PBBSs）	MonoBBs	26264-10-8	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	DiBBs	27479-65-8	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	TriBBs	51202-79-0	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	TetraBBs	40088-45-7	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PentaBBs	56307-79-0	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	HexaBBs	36355-01-8	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	HeptaBBs	35194-78-6	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	OctaBBs	27858-07-7	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	NonaBBs	27753-52-2	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	DecaBB	13654-09-6	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
ヘキサブロモシクロデカン（HBCDs）	α-HBCD	134237-50-6	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	β-HBCD	134237-51-7	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	γ-HBCD	134237-52-8	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10

4. 4. (参考) フリップモニター

本節では、解体業者での可搬型 XRF による臭素濃度調査の際に、高濃度の臭素含有が確認された天井吊り下げ型のリアモニター(フリップモニター)を対象に化学分析を実施する。当該モニターの主構成樹脂はポリプロピレンではなくアクリロニトリル・ブタジエン・スチレン(ABS)であり、素材コードは、難燃化されているとの表記(ABS+PC FR(17))が刻印されていた。

なお、本試料は本事業が主眼とする自動車用部品由来のプラスチック材料ではないが、参考情報として分析対象としたものである。

4. 4. 1. 分析結果

表 1-4-8 にフリップモニターの臭素元素スクリーニング結果を示す。当該スクリーニングは、CIC を用いて実施した。測定条件等の詳細については、付録 A を参照すること。

表 1-4-8 フリップモニターの臭素元素スクリーニング結果

試料名	測定結果(ppm)
	Br
フリップモニター	43,000

表 1-4-9(a)にフリップモニターのターゲット分析結果を示す。定量下限値未満の数字は“<”付きで記す。当該分析は、GC-Orbitrap MS または LC-Orbitrap MS を用いて実施した。測定条件等の詳細については、付録 A を参照すること。なお、NonaBDEs、DecaBDE、DecaBB については、多項目の同時分析を実施したため個別物質の条件の最適化が困難であり、定量下限値が他成分に比して高くなっている。また、表 1-4-9(a)において黄色塗で強調された項目は、POPs 条約により POPs として指定されていることを示す。

表 1-4-9 フリップモニターのターゲット分析結果（単位：ppm）

(a) PBDEs、PBBs、HBCDs

測定分析項目／試料名			(参考)フリップ モニター
分類	項目名	CAS番号	
ポリ 臭 素 化 ジ ブ フェ ニ ル エ ー テ ル (P B D E s)	#47-TeBDE	5436-43-1	<10
	#99-PeBDE	60348-60-9	<10
	#154-HxBDE	207122-15-4	<10
	#153-HxBDE	68631-49-2	<10
	#183-HpBDE	207122-16-5	<10
	#197-OBDE	117964-21-3	<10
	MonoBDEs	101-55-3	<10
	DiBDEs	2050-47-7	<10
	TriBDEs	49690-94-0	<10
	TetraBDEs	40088-47-9	<10
	PentaBDEs	32534-81-9	<10
	HexaBDEs	36483-60-0	<10
	HeptaBDEs	68928-80-3	<10
	OctaBDEs	32536-52-0	<10
	NonaBDEs	63936-56-1	<100
	DecaBDE	1163-19-5	<100
ポリ 臭 素 化 B ビ フ エ ニ ル (P B B s)	MonoBBs	26264-10-8	<10
	DiBBs	27479-65-8	<10
	TriBBs	51202-79-0	<10
	TetraBBs	40088-45-7	<10
	PentaBBs	56307-79-0	<10
	HexaBBs	36355-01-8	<10
	HeptaBBs	35194-78-6	<10
	OctaBBs	27858-07-7	<10
	NonaBBs	27753-52-2	<10
	DecaBB	13654-09-6	<100
ヘキサブ ロモ シクロ デカン (HBCDs)	α -HBCD	134237-50-6	<10
	β -HBCD	134237-51-7	<10
	γ -HBCD	134237-52-8	<10

(b) その他の臭素系難燃剤

測定分析項目／試料名		(参考)フリ ップ モニター
項目名	CAS番号	
TBBPA	79-94-7	7
TBP	118-79-6	67

4. 4. 2. 評価

表 1-4-8 に示したスクリーニング分析結果では、フリップモニターから臭素元素が 43,000ppm (4.3%) という高濃度で検出された。一方、表 1-4-9(a) に示したターゲット分析では、POPs 条約等で規制対象となっている臭素系難燃剤は検出されなかった。

そのため、追加分析としてテトラブロモビスフェノール A (以下、「TBBPA」という。) 及びトリブロモフェノール (以下、「TBP」という。) を対象に分析を行ったが、それぞれ微量の検出 (表 1-4-9(b) 参照。) にとどまり、総臭素量 43,000ppm との間に大きな乖離が認められた。

日本難燃剤協会が公表する「主要難燃剤の種類と用途」によれば²¹、フリップモニターの主構成樹脂である ABS 樹脂に対しては、オリゴマー型成分である「TBBPA・エポキシオリゴマー」が添加剤として広く使用されていることが記載されている。このようなオリゴマー型難燃剤は、複数の分子が結合した重合体であり、分子量が 40,000 に達するものもある。また、個別化合物としての定量が困難であることが知られている。

4. 5. まとめ

本節では、自動車部品プラスチック及び自動車部品プラスチック由来の再生ペレットにおける臭素系難燃剤の含有実態について、化学分析による調査を実施した。三世代別に混合した試料、個別車両ごとの試料、再生ペレット、ならびに参考情報として収集されたフリップモニターを対象とした分析の結果、三世代別試料及び再生ペレットの大部分からは臭素元素及び臭素系難燃剤は検出されなかった。これにより、近年製造された自動車部品への臭素系難燃剤の使用は限定的である可能性が示唆された。

一方、参考分析を実施したフリップモニターでは、非常に高濃度の臭素が検出されたものの、主要な POPs 条約対象物質は検出されず、TBBPA 系オリゴマー等の難定量性化合物の存在が示唆された。

²¹ <https://www.frcj.jp/type/>

第2章 プラスチック成分の検知・選別装置の開発と実証（POPs 他）

自動車由来プラスチックの循環利用を高度化するためには、有害化学物質を含む部品の選別技術の確立に加え、選別後の再生材の品質評価及び実装性の検討が不可欠である。とりわけ、POPs 規則により段階的に強化される PBDEs の LPC を踏まえ、部品プラスチック中の臭素系難燃剤を適切に識別・除去する技術の導入は、実効性あるリサイクルシステムの構築に向けた鍵となる。

本章では、こうした背景のもと、以下の観点から実証検討を実施した。

- 臭素含有プラスチックの識別・選別に向けた装置技術の開発と性能実証
- 再生プラスチックとしての機械的特性評価
- リサイクル工程全体の効率化を見据えたシステム化検討

選別装置としては、(1)透過 X 線選別装置、(2)蛍光 X 線選別装置の2種を対象とした。透過 X 線選別装置については、既に他分野で実用化されている既存機と、本実証事業で新たに開発した新型機の両方を活用し、性能比較を行った。既存機は主に食品・金属異物検出等に用いられてきた汎用モデルであるのに対し、新型機は臭素の定量検出に特化した構造を有しており、部品のサイズやタルク等の無機充填材の影響を受けにくく、臭素濃度 10,000ppm 以上の部品を安定して選別除去できることが実証された。

蛍光 X 線選別装置についても、本実証事業において新たに開発・製作されたものであり、30ppm 程度までの臭素濃度を高感度に検出可能であることが確認された。一方で、処理能力や装置構成等の面で実用化に向けた改良点も明らかとなった。

さらに、選別後の再生プラスチックについては、素材純度の観点だけでなく、引張強度・衝撃強度等の機械的特性評価を実施し、再利用材料としての機能性を検証した。あわせて、解体業者・リサイクラーそれぞれの現場プロセスへの装置導入を想定したシステム化検討も行った。

本章では、上記の技術開発・評価結果を総合的に整理するとともに、将来的な再生材利用促進に向けた技術的要件と実装方策の道筋を示すものである。

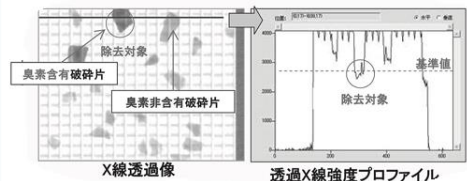
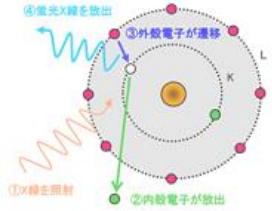
1. X線選別装置の原理

臭素を含むプラスチックの検知・選別技術としては、比重差選別技術と光学選別技術が社会実装されている。比重差選別技術については、ELV 部品プラスチックに含有されることが多いタルク入りプラスチックも臭素含有と誤認識する可能性があること、規制値が厳しくなると低濃度の選別は困難になること、装置が複雑で大規模となり相当の投資が必要となることを勘案し、本実証事業においては、光学選別装置による実証を行うものとした。

臭素含有プラスチックの検知・選別における光学選別装置としては、家電リサイクル分野で導入されている透過 X 線選別装置がある。一方、透過 X 線選別装置は、検知濃度が%オーダーであることから将来的に規制が強化されてくると対応できない可能性がある。このため、本実証事業においては、オンサイトにおける臭素濃度測定に利用されている蛍光 X 線測定装置(可搬型 XRF)をインラインに装着した蛍光 X 線選別装置を新たに開発し、実証試験を行うものとした。

透過 X 線選別装置及び蛍光 X 線選別装置の特徴は表 2-1-1 のとおりである。

表 2-1-1 本実証事業で実証する透過 X 線選別装置と蛍光 X 線選別装置の概要

検知・選別方式	透過X線方式	蛍光X線方式
概念図	 (出典：日本エネルギー学会機関誌,97,61-66 (2018))	 (出典：一般財団法人材料科学技術振興財団HP) https://www.mst.or.jp
概要	X線が対象物を透過する際に一部吸収され、物質の密度(原子番号が大きいほど大)により吸収強度が異なることを利用して、特定の吸収強度を閾値として対象物を選別する。	X線を選別対象物に照射し臭素から発生する固有X線(蛍光X線)の強度から臭素を定量した後、臭素濃度が基準値以上となる選別対象物を除去する。
検知するBr濃度	比較的高濃度(1%程度以上)	比較的低濃度(数十～百ppm)
検知速度	比較的早い(msレベル)	比較的遅い(2秒程度)
自動車リサイクルシステムへの適用可能性	比較的高濃度のBrが含まれると推測される旧年式(低年式)車由来の部品を選別することで再生プラスチック中の平均Br濃度を下げ、再生プラ中の臭素化合物濃度が基準値(目標値)以下とするための選別装置としての社会実装を想定する。	規制開始以降の高年式車にはBr化合物が含まれていないか意図せず低濃度が含まれていることを想定し、再生プラ中の臭素化合物濃度が基準値(目標値)以下を保証するための選別装置としての社会実装を想定する。

2. 透過 X 線選別装置による実証試験

2. 1. 方法

2. 1. 1. 試験ケース

1) 事前試験

ELV から回収された部品プラスチックには、家電由来のプラスチックと異なり、タルクが含まれていることがあり、家電リサイクル用に開発された透過 X 線選別装置では、臭素とタルクの区分が出来ない可能性が考えられたため、事前試験として、透過 X 線選別装置における臭素含有プラスチック選別性能に与えるタルクの影響を確認した。

2) 本試験

本試験のケースは表 2-2-1 を基本とするが、試験結果に応じて、他のパラメータ(しきい値*等)についてもケースを設定した。

※:しきい値とは、当該装置において、臭素を含むとするか、含まないとするかの判断を行なうための指標であり、「物質通過後の X 線強度」/「物質なしの X 線強度」で設定される無次元量。

表 2-2-1 透過 X 線選別装置による試験ケース

【第 1 段階】	パラメータ			
	臭素濃度 (%)	臭素含有プラ混合率 (重量%)	コンベア速度 (m/min)	試料サイズ (mm)
	2.2	5	80	<8
	6.5	10	120	<20
	9.0	—	—	<50

【第2段階】	パラメータ			
	臭素濃度 (%)	臭素含有プラ混合率 (重量%)	コンベア速度 (m/min)	試料サイズ (mm)
	0.02	5	80	<8
	0.05	10	120	<20
	0.1	—	—	<50
	0.5	—	—	—
	1.0	—	—	—

2. 1. 2. 試験試料の調達

1) 事前試験

事前試験に用いた試料は、表 2-2-2 のとおりである。

表 2-2-2 事前試験に用いた試料

区分	試料
異物なし	ABS 白 (ダイセル製造) ABS 黒 (購入品) LDPE 黒 (購入品) POM 黒 (購入品) PP 黒 (小家電)
タルク含有 プラスチック (PP)	タルク 10 (自動車バンパー) タルク 20, 30, 40 (ダイセル製造)
Br 含有 プラスチック (廃家電からの PP)	Br 2.2% (TV ケース, No.29) Br 6.5% (TV ケース, No.64) Br 9.0% (TV ケース, No.67)

2) 本試験

① ELV から回収した部品プラスチック

本試験に用いた ELV から回収した部品プラスチックの仕様を表 2-2-3 に示す。

部品プラスチックは、6試料である。いずれも PP (ポリプロピレン) で、2つの解体業者により手解体で回収され、二次解体 (金属等の異物除去) の後、破砕機 (一軸型) で破砕されたものである。部品プラの部位については、内装、外装を区分した。タルクは 10-23% 程度混合されており、選別性能におけるタルクの影響も事前試験を実施した。なお、試験では車種及び内外装ごとに均等混合した。破砕サイズは、 $\langle 50\text{mm}$ 、 $\langle 20\text{mm}$ 、 $\langle 10\text{mm}$ とし、サイズによる選別性能を比較するものとした。いずれも臭素は検出限界 (概ね 15ppm) 未満であった (可搬型 XRF での測定による)。なお、破砕プラスチック (50 mm) の重量は、平均 3.5g であった。

表 2-2-3 選別試験に用いた ELV から回収した部品プラスチックの仕様

通し番号	表記	数量	粒度 (mm)	重量 (kg)	Br 濃度 (ppm)
①	A車 内装 $\phi 50$	2袋	50~10	10~15	検出限界 (概ね 15ppm) 未満
②	A車 外装 $\phi 50$	1袋	50~10		検出限界 (概ね 15ppm) 未満
③	B車 内装 $\phi 20$	1袋	20~4	10~15	検出限界 (概ね 15ppm) 未満
④	B車 外装 $\phi 20$	1袋	20~4		検出限界 (概ね 15ppm) 未満
⑤	C車 内装 $\phi 8$	1袋	8~4	10~15	検出限界 (概ね 15ppm) 未満
⑥	C車 外装 $\phi 8$	1袋	8~4		検出限界 (概ね 15ppm) 未満

② 破碎特性

本実証事業では、ELVから回収された部品プラの破碎特性についても実証を行った。破碎物の形状が選別装置の性能に影響を与える可能性があったためである。

プラスチック破碎機には一般的に一軸方式と多軸方式(二軸以上)がある(図 2-2-1)。一軸方式は、カッターで裁断する方式であり、多軸方式は、引きちぎりによる破碎である。処理能力は多軸方式がより高い。一軸方式は、セットするメッシュサイズになるまで繰り返し破碎を行う必要があるため、時間を要する(=比較すると処理能力が低い)。本実証事業では、平面性がより高いとされる一軸方式を利用することとした。

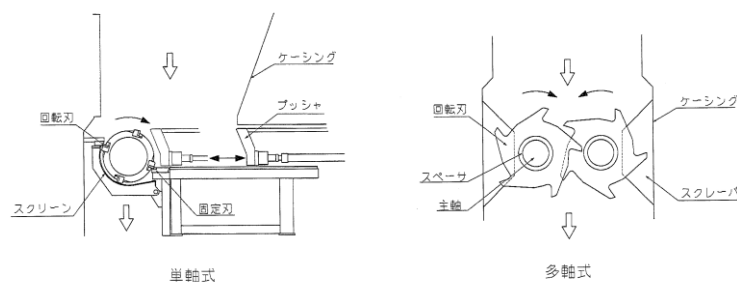


図 2-2-1 破碎機の構造

国内の3カ所の事業所でそれぞれ異なる破碎機による試験を実施し形状として平面度を測定した。この結果を表 2-2-4 に示す。

これによると、同じ一軸破碎機においても機種等による違いがあり、平面性が高いのは C 社によるものであることが分かった。本実証事業においては、破碎作業は、基本的には C 社において実施した。

表 2-2-4 破碎機による破碎プラの形状の違い

破碎事業者	A 社	B 社	C 社
破碎機タイプ	一軸方式	一軸方式	一軸方式
破碎形状 (凹凸度)	30mm 以上	23-25mm	14-15mm
破碎物の外観			

③ 臭素含有プラスチック

ELV から回収した部品プラスチックには、臭素が検出限界未満であったことから、臭素含有プラスチックについては、別途に製作した。

- ◆ 高濃度プラスチック:数%の臭素を含むプラスチックについては、表 2-2-5 に示すとおり、家電から回収したプラスチックを用いた。このプラスチックの概観を図 2-2-2 に示す。

表 2-2-5 高濃度臭素含有プラスチック（家電から回収したものを破砕した）

通し番号	表記	数量	粒度(mm)	重量(kg)	Br濃度(ppm)
⑦	No.29 φ50 ライトグレー	1袋	50～4	0.1～0.2	22,000
⑧	No.29 φ20 白	1袋	20～4	0.1～0.2	
⑨	No.29 φ8 白	1袋	8～4	0.1～0.2	
⑩	No.64 φ50 スカイブルー	1袋	50～4	0.1～0.2	65,000
⑪	No.64 φ20 ライトブルー	1袋	20～4	0.1～0.2	
⑫	No.64 φ8 ピンク	1袋	8～4	0.1～0.2	
⑬	No.67 φ50 オレンジ	1袋	50～4	0.1～0.2	90,000
⑭	No.67 φ20 黄	1袋	20～4	0.1～0.2	
⑮	No.67 φ8 レッド	1袋	8～4	0.1～0.2	



図 2-2-2 高濃度臭素含有プラスチックの外観

- ◆ 低濃度臭素含有プラスチック:1%以下の低濃度の臭素を含むプラスチックについては、以下の要領で製作した。試料原料の概要を表 2-2-6 に、製作したプラスチックの概観を図 2-2-3 に示す。

【製作要領】

任意の濃度の BFR を含有するポリプロピレン(PP)を難燃剤製造工場で作成した。

・ベースとなるプラ:PP

・混入する BFR:デカブロモジフェニルエタン (DBDPE) (購入した試薬の純度は 96%)

・難燃補助剤:三酸化アンチモン(Sb_2O_3)

・Br 濃度:

①10,000ppm(1%):透過型 X 線選別装置の性能から設定

②5,000ppm(0.5%):透過型 X 線選別装置の性能から設定

③1,000ppm(0.1%):RoHS 指令,バーゼル条約 POP-BDEs の LPC(低 POP 含有量)案から設定

④500ppm(0.05%):③の 50%

⑤200ppm(0.02%):EU での POPS 規則における UTC(非意図的微量汚染濃度:Unintentional Trace Contaminant)議論での案を参考

※一般的な臭素系難燃剤と三酸化アンチモンの混合比である3:1から相当量の三酸化アンチモンも混合した。

・PPは板状に成形し、その後、8 mm以下、20 mm以下、50 mm以下に破砕し、試料とした。

表 2-2-6 低濃度臭素含有プラスチック試料原料の概要

材料	形態	素材	Br 濃度
汎用樹脂	ペレット	PP	0%
Br 化合物試薬	試薬	DBDPE	(試薬の純度は 96%)
難燃助剤	試薬	Sb ₂ O ₃	0%



図 2-2-3 製作した低濃度臭素含有プラスチックの外観
(濃度区分ごとに塗色している)

2. 1. 3. 試験に用いた透過 X 線選別装置

1) 既存機

試験装置(既存機)は、ダイオーエンジニアリング(株)三島寒川工場に設置され、家電リサイクルプラント等向けに製作された臭素含有プラスチックを除去できる性能を有する設備とした。設備の写真と処理概念図を図 2-2-4 に示し、装置の概略仕様を表 2-2-7 に示す。

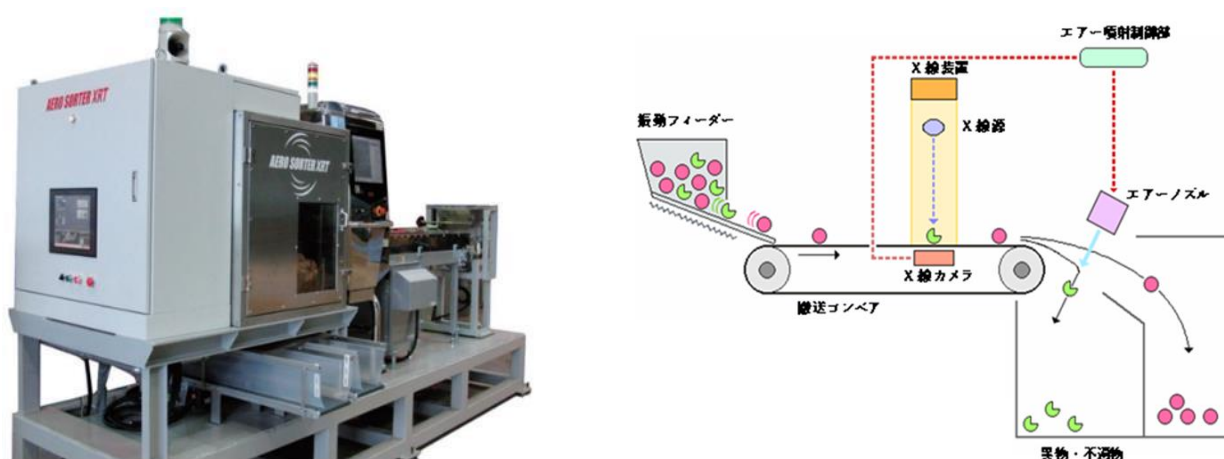


図 2-2-4 透過 X 線選別装置（既存機）の概念図

表 2-2-7 透過 X 線選別装置（既存機）の概略仕様

試験機：デュアルX線選別機（エアロソータXRT）	
型式	DSPXRT-400
ベルト幅	440mm（有効：400mm）
コンベア機長	2,400mm（プーリー芯）
検出方式	デュアルX線
ノズルピッチ	4mm（100個）
選別種類	2種類
選別可能なサイズ	4mm～50mm
動力	合計 約8.5kW
重量	約2.0ton

2) 新型機

試験装置(既存機)は、数%オーダーの臭素の検知が限界であることから、ダイオーエンジニアリング(株)では、新型機を製作している。新型機においては、新型 X 線センサー及び X 線照射装置を搭載するとともに、独自アルゴリズムを採用した。新型機の外観と X 線画像の例を図 2-2-5 に示す。

本実証事業においては、新型機においても臭素選別性能を実証することとした。

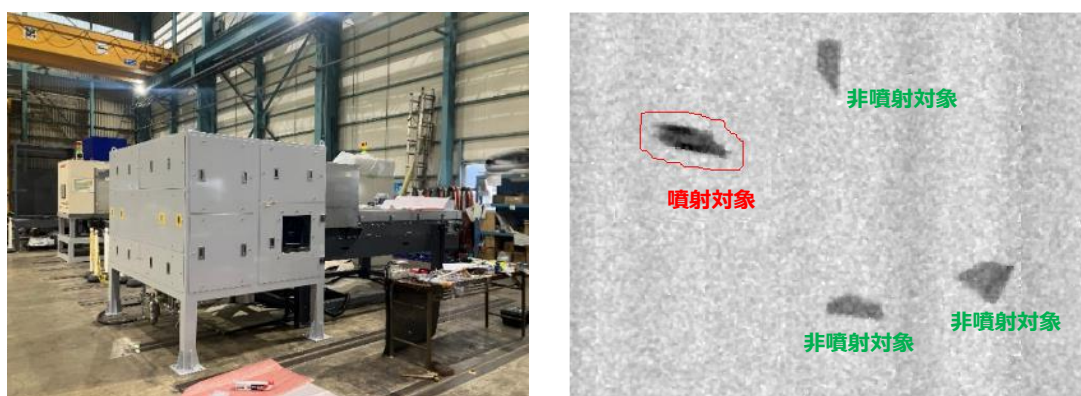


図 2-2-5 新型透過 X 線選別装置の外観（左）と X 線画像の例（右）

※右図のなかで「噴射対象」とあるのが臭素含有と判定されたプラスチック片

2. 1. 4. 透過 X 線選別装置の運転条件

透過 X 線選別装置の運転条件は、既存機及び新型機とも次のとおりとした。

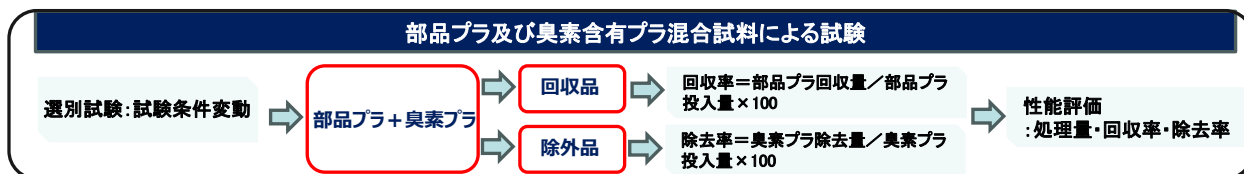
- ① 臭素含有プラスチック混合率:10%
- ② コンベア速度:80m/min(処理能力:333kg/h)、120m/min(処理能力:500kg/h)

2. 1. 5. 試験スケジュール

- ① 既存機:令和6年7月(事前試験)及び8月(本試験)
- ② 新型機:令和7年2月(噴射試験)

2. 1. 6. 評価方法

以下のとおりの手順で、試験結果から、処理量、回収率及び除去率を求めた。



2. 2. 結果

2. 2. 1. 既存機

1) 事前試験

事前試験の結果は次のとおりであった。

- ① デフォルト設定(管電圧=70kV, 管電流=4.2mA)における Br 識別可否テスト

結果は、図 2-2-6 のとおりであった。これにより、X 線遮断度は、Br2.2%よりもタルク 30 及びタルク 40 のほうが高いため、タルク含有と Br2.2%の区分は出来ないことが分かった。このため、タルク 30、タルク 40 及び Br2.2%に限定して、管電圧及び管電流の調整を実施することとした。

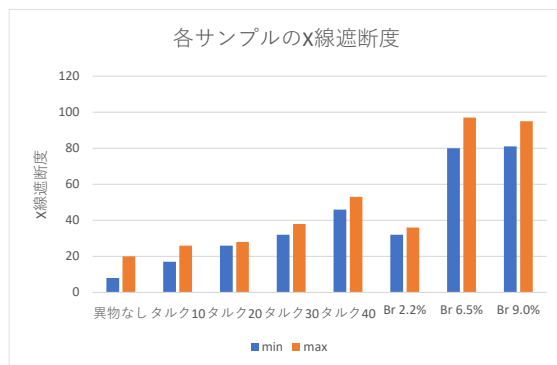


図 2-2-6 デフォルト設定(管電圧=70kV, 管電流=4. 2mA)における Br 識別可否テストの結果

- ② 管電圧、管電流の調整

結果は図 2-2-7 に示すとおりであった。これにより、タルク 30<Br2.2%となっている 115kV, 2.5mA (図中赤枠)を選択することとした。

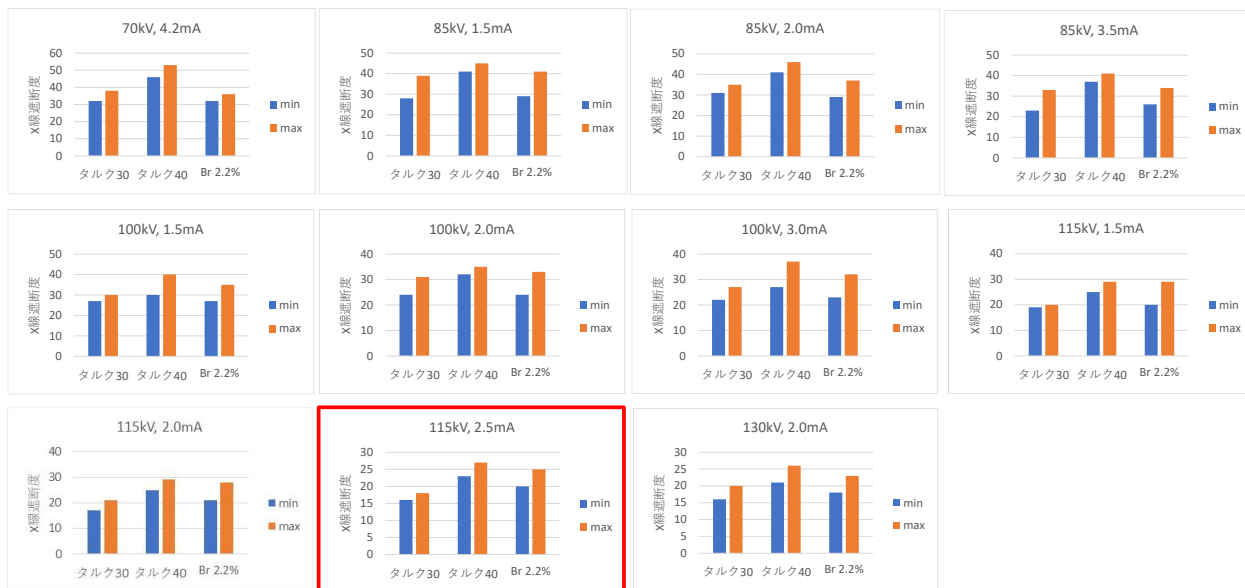


図 2-2-7 管電圧、管電流の調整テストの結果

③ 管電圧=115kV，管電流=2.5mA における Br 識別可否テスト

結果を図 2-2-8 に示す。X 線遮断度が Br 2.2% をタルク 40 よりも小さくなるように調整することで、タルク 40 と Br 6.5% の差分を大きくできた。投入試料にタルク混入プラが無い場合には、しきい値=15 で Br 有無の判定が可能である。また、投入試料にタルク混入プラがある場合には、しきい値=30 で Br 有無の判定が可能である。

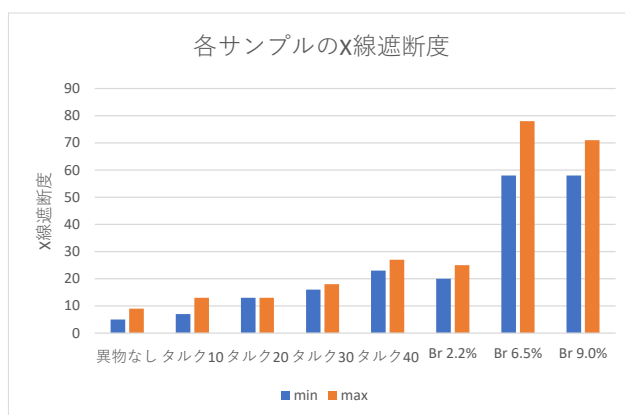


図 2-2-8 管電圧=115kV，管電流=2.5mA における Br 識別可否テストの結果

④ 管電圧=115kV, 管電流=2.5mA, しきい値=15 におけるブランクテスト

しきい値 15 によるブランクテストの結果を図 2-2-9 に示す。誤射が認められる。



図 2-2-9 管電圧=115kV, 管電流=2.5mA, しきい値=15 におけるブランクテストの結果

⑤ 管電圧=115kV, 管電流=2.5mA, しきい値=30 におけるブランクテスト

しきい値 30 によるブランクテストの結果を図 2-2-10 に示す。誤射がほとんど認められない。



図 2-2-10 管電圧=115kV, 管電流=2.5mA, しきい値=30 におけるブランクテストの結果

⑥ まとめ

- 試料とした A 車内装Φ50、A 車外装 Φ50 には、タルク 30、タルク 40 相当のプラスチックが混入していると思われる。
- タルク 30、タルク 40 相当のプラと Br2.2%のプラを識別することは既存機では難しいと思われる。
- 識別の際にサイズが大きなプラとサイズの小さなプラのしきい値を変更する必要があると思われる。

2) 本試験

① 個数ベースでの試験結果(抜粋)

個数ベースでの選別試験結果(抜粋)を図 2-2-11 に示す。

1) A車内装φ50 [450g] + No.64 (臭素6.5%) [50 g 36個⇒8/8 37個]		2) A車外装φ50 [450g] + No.64 (臭素6.5%) [50 g 36個⇒8/8 37個]	
1回目 (8月7日実施)		1回目 (8月7日実施)	
	重量		No.64混入
噴射側	100g	36個	100.0%
未噴射側	400g	0個	0.0%
噴射側分布：No.64 50g、部品プラ 50g		噴射側分布：No.64 47g、部品プラ 88g	
			
2回目 (追加 8月8日実施)		2回目 (8月7日実施)	
	重量		No.64混入
噴射側	90g	37個	100.0%
未噴射側	410g	0個	0.0%
噴射側分布：No.64 50g、部品プラ 40g		噴射側分布：No.64 49g、部品プラ 115g	
			
3回目 (追加 8月8日実施)		3回目 (追加 8月8日実施)	
	重量		No.64混入
噴射側	140g	36個	97.3%
未噴射側	360g	1個	2.7%
噴射側分布：No.64 49g、部品プラ 115g			

図 2-2-11 個数ベースでの選別試験結果 (抜粋)

② 回収率及び除去率

重量ベースでの選別試験結果及びこの結果から計算した回収率(回収部品プラ/投入部品プラ)及び除去率(選別家電プラ/投入家電プラ)を表 2-2-8 及び図 2-2-12 に示す。

表 2-2-8 重量ベースでの選別試験結果及びこの結果から計算した回収率及び除去率

No	試料 (A車)	搬送速度	投入試料重量[g]		回収品重量[g]		回収率 (回収部品プラ/ 投入部品プラ)	除去品重量[g]		除去率 (除去家電プラ/ 投入家電プラ)
			[m/min]	部品プラ	家電プラ	部品プラ	家電プラ	[%]	部品プラ	家電プラ
1	内装φ50+No.29 (臭素2.2%)	120m/s (高速)		450	50	416	3.8	92%	34	46.2
2	内装φ50+No.64 (臭素6.5%)	120m/s (高速)		450	50	419.2	0.9	93%	30.8	49.1
3	内装φ50+No.67 (臭素9.0%)	120m/s (高速)		450	50	419.4	2.5	95%	20.6	47.5
4	外装φ50+No.29 (臭素2.2%)	120m/s (高速)		450	50	412	1.7	92%	38	48.3
5	外装φ50+No.64 (臭素6.5%)	120m/s (高速)		450	50	414.7	1.5	92%	35.3	48.5
6	外装φ50+No.67 (臭素9.0%)	120m/s (高速)		450	50	407.1	2.5	90%	42.9	47.5
7	内装φ20+No.29 (臭素2.2%)	120m/s (高速)		450	50	435.2	12.4	97%	14.8	37.6
8	内装φ20+No.64 (臭素6.5%)	120m/s (高速)		450	50	435.9	4	97%	14.1	46
9	内装φ20+No.67 (臭素9.0%)	120m/s (高速)		450	50	430.8	2.9	96%	19.2	47.1
10	外装φ20+No.29 (臭素2.2%)	120m/s (高速)		450	50	403.6	12.3	90%	46.4	37.7
11	外装φ20+No.64 (臭素6.5%)	120m/s (高速)		450	50	403.7	3.1	90%	46.3	46.9
12	外装φ20+No.67 (臭素9.0%)	120m/s (高速)		450	50	407.8	1.6	91%	42.2	48.4
13	内装φ8+No.29 (臭素2.2%)	120m/s (高速)		450	50	415.7	9.7	92%	34.3	40.3
14	内装φ8+No.64 (臭素6.5%)	120m/s (高速)		450	50	405.1	5.5	90%	44.9	44.5
15	内装φ8+No.67 (臭素9.0%)	120m/s (高速)		450	50	405.4	1.3	90%	44.6	48.7
16	外装φ8+No.29 (臭素2.2%)	120m/s (高速)		450	50	399.6	9.5	89%	50.4	40.5
17	外装φ8+No.64 (臭素6.5%)	120m/s (高速)		450	50	395.1	1.9	88%	54.9	48.1
18	外装φ8+No.67 (臭素9.0%)	120m/s (高速)		450	50	380.3	1.8	85%	69.7	48.2

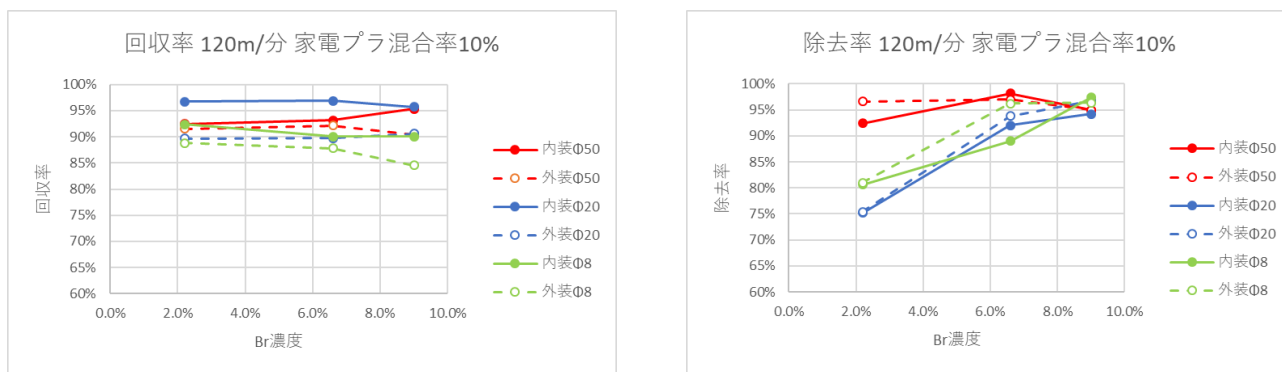


図 2-2-12 部品プラ及び臭素含有プラの臭素濃度ごとの回収率及び除去率

- ③ 臭素濃度と噴射率の関係(噴射率=噴射対象数合計/臭素プラスチック投入数合計)
 臭素含有プラの臭素濃度と噴射率(≒除去率、回収率)の関係を図 2-2-13 に示す。これにより、サイズごとに異なるパラメータで識別する必要があるため、選別前処理が必要であること、Φ 50 であれば、Br1%から 9%まで全て識別が可能であること、Br2.2%は、サイズが小さいと除去率が低下することがわかった。なお、回収率は、全てのサイズにて、84%以上であった。

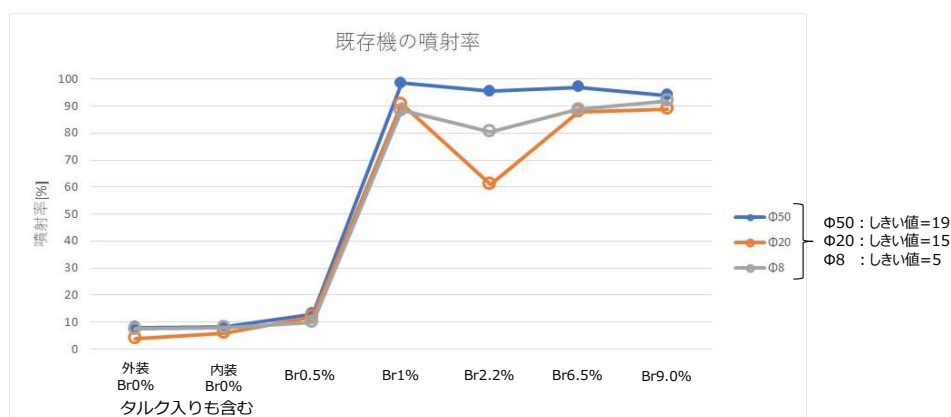


図 2-2-13 臭素含有プラの臭素濃度と噴射率

3) 評価

- ① 既存機では、タルク影響が排除できず、選別可能となる臭素濃度は 1%以上であることが確認された。なお、回収率についてはタルクの影響を若干うけているものの 90%を超えることも確認できた。
- ② 破砕プラスチックのサイズについては、<50mm が必要である。小さいと噴射率(≒回収率)が 80%前後まで低下する。
- ③ タルク影響については、臭素濃度 10,000ppm 以上の部品プラスチックであれば、回避できることが分かった。

2. 2. 2. 新型機

1) 新型機の特徴

新型機は、既存機に比べると、新型 X 線センサーや、新たに開発したアルゴリズムによる識別ソフトを搭載していることから、タルクの影響を抑制でき、かつより低い濃度の臭素が検知できる。また、コンベアが2系列あり、処理能力が既存機の2倍とすることが可能である(500kg/h⇒1,000kg/h)。

2) 新型機によるタルク影響の抑制原理

透過 X 線選別装置では、被写体に X 線を照射し、透過量から対象物質濃度を求める。X 線の透過しやすさは、元素によって一定の傾向があり、重い元素ほど透過しにくい。元素表でこの関係を見ると図 2-2-14 のとおりであり、臭素とタルクを区分するためには、タルク成分であるマンガン (Mg) とシリカ (Si) を検知する必要がある。

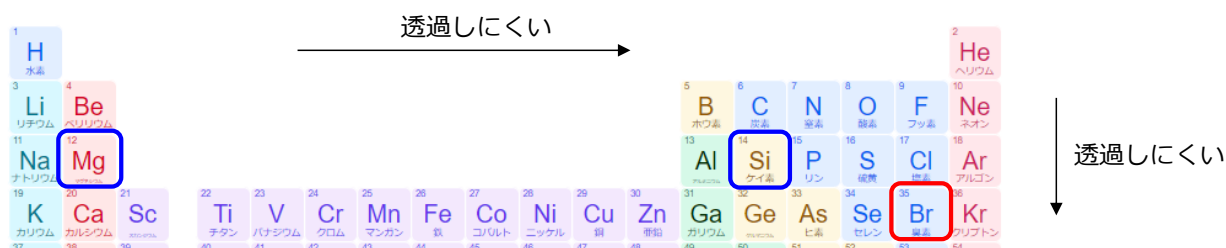


図 2-2-14 元素と X 線の透過傾向

新型機では、臭素とタルクをより明確に区別するために、X 線透過量が元素に依存することに加えて、X 線透過率の波長特性(波長による違い)が元素に依存することを利用する。

すなわち、波長 1、波長 2 とともに重い元素を含む Br 含有プラの方が X 線透過量が小さくなっているが、これに加えて、波長 1 と波長 2 の差分に着目すると、タルク含有プラでは波長 2 の X 線透過量が波長 1 の 2 倍になっているのに対し、Br 含有プラでは波長 2 の X 線透過量が波長 1 の 3.5 倍になっている。そのため、波長 1 の透過データを 2 倍(補正係数)して波長2から減じることにより、Br 含有プラだけを浮かび上がらせることが可能となり、タルク含有プラとの区分をより明確とすることが可能となる(図 2-2-15)。

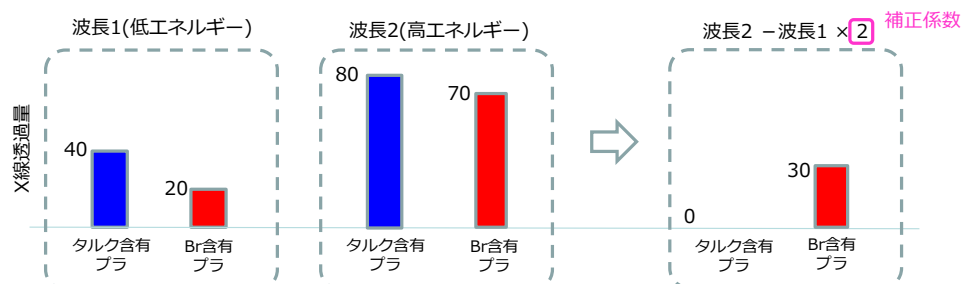


図 2-2-15 タルクと臭素を区分するためのアルゴリズムの原理

3) 新型機による試験方法

新型機は、令和6年夏から設計、製作が行われたが、電子部品の世界的な品不足等から、完成は令和7年1月末となった。このため、新型機による試験は、条件を以下のとおりとし限定的な試験を実施した。

- ① 試料のサイズ: 8mm、20mm、50mm の3種類とした。
- ② 臭素含有プラスチック中の臭素濃度: 予備的試験の結果を踏まえ、最小値 5000ppm (0.5%) とし、他は1%、2.2%、6.5%、9.0%とした。
- ③ 測定項目: 選別性能の測定項目は、推定噴射率とした。選別装置との連結は行わなかった。推定噴射率と選別率・回収率はほぼ同一のレベルであることを既存機で確認している。
- ④ 部品プラ中のタルク濃度: タルク濃度については新型機での影響は抑制出来ていると考え、部品プラスチックを用いたタルク影響試験は実施せず、タルク含有量が 10% から 23% までの部品プラスチックを混合して試験に供した。

4) 試験結果

新型機による推定噴射率の測定結果を図 2-2-16 に示す。これによると、臭素1%を超えるとタルク含有量及び試料サイズに関わらず、90%以上の噴射率(≒除去率、回収率)が得られた。一方で0.5%では、噴射率 50%前後となり、精度が低下した。臭素を含まない部品プラスチックについては内装材、外装材とも5%前後の誤認識となった。

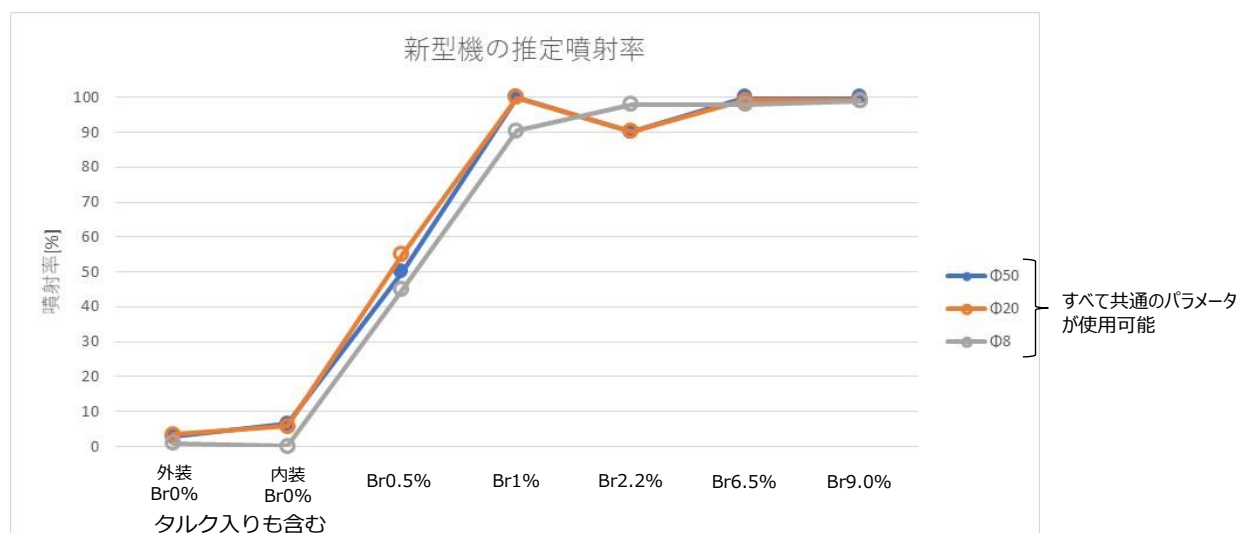


図 2-2-16 新型機による推定噴射率の測定結果

5) 評価

- ① 新型機では、X 線の波長による透過特性の違いを利用することで、臭素とタルクの透過挙動の差を抽出し、タルク含有プラスチックによる誤検知を回避している。具体的には、波長の異なる二つの X 線を用いて、波長 1 と波長 2 の透過量の比率の違いに着目し、波長 1 データに補正係数を掛けて差分処理を行うことで、タルクの影響を除去し、臭素含有プラスチックのみを選別可能としている。
- ② サイズ影響も抑制され、8mm-50mm の範囲で推定噴射率 90%以上が達成できた。既存機では、タルク影響については、臭素濃度 10,000ppm 以上の部品プラスチックであれば、回避できることが分かった。
- ③ 新型機においては、ELV プラスチックの特徴でもあるタルク含有プラスチックの誤認識がないこと、破砕サイズに関わらず臭素含有プラスチックが識別できること、から、ELV リサイクルシステムへの実装は有効であると評価される。

3. 蛍光 X 線選別装置の開発及び実証試験

蛍光 X 線をセンサーとした臭素選別装置は、国内には実用化されたものがないことから、本実証事業では、蛍光 X 線選別装置の開発・製作を行った。引き続き、製作した選別装置を用いた実証実験を実施し、選別装置の臭素含有プラスチック選別性能を評価した。

3. 1. 蛍光 X 線選別装置の開発・製作

3. 1. 1. 装置の開発にあたっての課題及び対策

蛍光 X 線選別装置の開発にあたっては、表 2-3-1 内に示す三つ技術的課題が存在する。これらの課題の対しては同表に示す対策を講じた上で、装置設計および製作に適切に反映させた。課題と対策の図解を図 2-3-1 に示す。

表 2-3-1 蛍光 X 線選別装置開発にあたっての課題

課題	内容	対策の検討
①検出時間が長い	蛍光 X 線センサーで高精度に Br を検出するには、20 秒程度の照射が必要であり、高速搬送が前提のリサイクルリサイクルラインへの実装は困難である。実験により、照射時間が短くなるにつれて表示濃度のばらつき(誤差)が増加し、再現性が低下することが確認された。例えば、照射時間 20 秒では表示誤差は±6ppm 程度であるのに対し、2 秒では±20ppm 近くとなる。	実験により照射時間と検出誤差の関係を定量的に評価した結果、POPs 規則において必要とされる 300ppm 前後の検出精度を満たすには、1～2 秒程度の照射でも実用的であると判断した。
②センサーと測定対象物との距離による検出精度の低下	蛍光 X 線センサーでは、測定対象物(破碎プラスチック片)との距離(クリアランス)を最小かつ一定に保つことが、高精度な検出において重要である。しかし、通常の上部照射方式では、搬送される破砕片が不規則な形状・高さを有するため、クリアランスがばらつき、検出精度が低下する。	検出精度の安定化を図るため、センサー照射方式を上部照射から下部照射へと変更。さらに、X 線を直接破砕片に照射する必要条件を満たすため、搬送コンベアには間隙構造が求められる。これに対応する手段として、二条コンベア方式(2 本ベルトコンベア)を採用。2 本のベルトの間に適度な空隙を設け、センサーが下方から直接照射できる構造とした。また、間隙は破砕片のサイズに応じて柔軟に調整可能であり、実ラインへの適用性・柔軟性にも優れる構成である。
③測定対象物が不陸形状になると検出精度低下	二条コンベアに供給される破碎プラスチックの形状が不規則である場合、センサーとのクリアランスが一定せず、X 線照射位置が不安定となり、検出精度の低下を招く。平面性の高い形状での供給が望ましい。	供給装置として吸引式搬送コンベアを採用。吸引エリアを中央部に限定することで、平面的形状を有する破碎プラスチックを優先的に選別・整列搬送できる構成とした。実証実験により、本構成によって安定的かつ効率的に整列供給が可能であることを確認。さらに、破砕物の形状制御を目的に、破砕機の選定も実施。複数の破砕方式を比較した結果、一軸破砕機による破砕物が最も適していることが確認された。ただし、破砕サイズと平面性はトレードオフの関係にあるため、今後は最適な破砕方式・サイズ設定を含めた供給システム全体の最適化が必要である。

課題① 検出時間が長い

蛍光X線方式ではBr検出に長時間（20秒程度）要すると考えられた

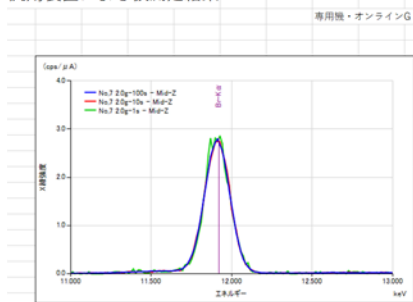
対策① 事前検証にて短時間での検出を確認

事前検証の結果、1～2秒程度の短時間でも大きな誤差は生じないこと、測定対象物を移動させても検出

【事前検証結果】 ア) 照射時間の変化によるBr測定濃度の変動 イ) 移動による測定への影響

A社製

汎用装置による仮測定結果



照射時間100秒～1秒でピーク形状変わらず

B社製

試験試料	照射時間 (秒)	表示濃度 (ppm)	表示誤差 (ppm)
ペレットA	20	656.3	6.2
	10	653.2	8.8
	5	667.5	14.2
	3	665.6	19.8
	2	645.5	19.4
	約10秒※	265.5	16.1
ペレットB	2	161.6	8.5

照射時間20秒から2秒に変化させても表示濃度に大きな誤差は生じなかった

測定対象物移動測定状況



測定対象物（ペレット）を移動させても測定可能であった

(a) 課題への対策①

課題② センサーと測定対象物の距離が長くなると検出精度低下

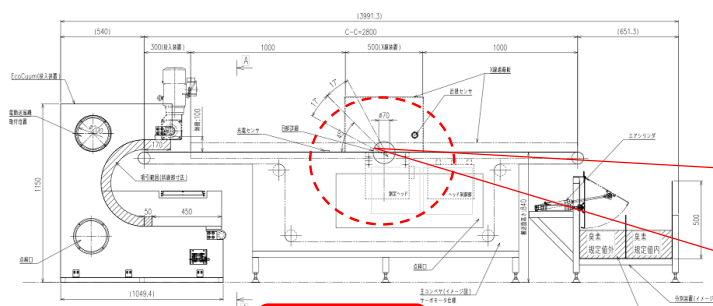
蛍光X線方式ではセンサーと測定対象物の距離を一定の距離内（5mm程度）にしなければ検出精度が低下

対策② X線を搬送コンベア下部より照射する方式を採用

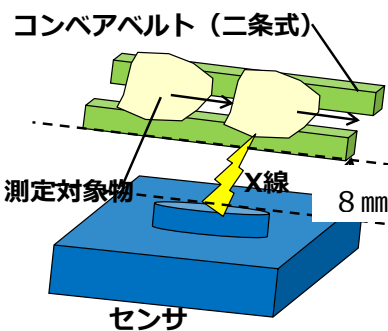
搬送コンベア上部にセンサを設置し上部より照射する方式（**上部照射方式**）：測定対象物との距離を短くすると、搬送物の形状や積載形態（山になる場合など）によってはセンサーと測定対象物が干渉するリスクあり

採用

搬送コンベア下部にセンサを設置し下部より照射する方式（**下部照射方式**）：測定対象物との距離を短くしても、コンベアベルト、それに積載された測定対象物とセンサの距離は一定であり、その距離も短くすることができる



選別装置
(主コンベア)



拡大図

(b) 課題への対策②

図 2-3-1 課題に対して講じた具体的な対策

課題③

測定対象物が不陸形状になると検出精度低下

蛍光X線方式で測定対象物の形状を平面的にしな
ければ検出精度が低下
また、測定対象物の厚さはできる限り一定とする
必要がある

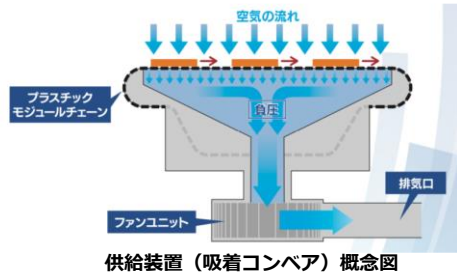
対策③

供給コンベヤに吸着方式を採用し平面
形状に近いものを選択的に供給

主コンベヤに測定対象物を供給するコンベヤを吸着方式と
し、平面的な形状のものを選択的に供給し、そうでないも
のは重力を利用して選別除外する方法を採用

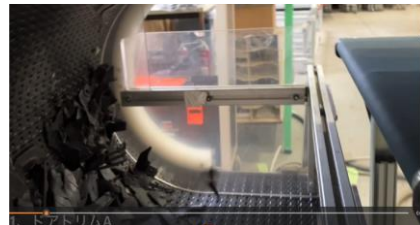
【その他対策】

平面形状に近づくよう破碎方式等を検討中

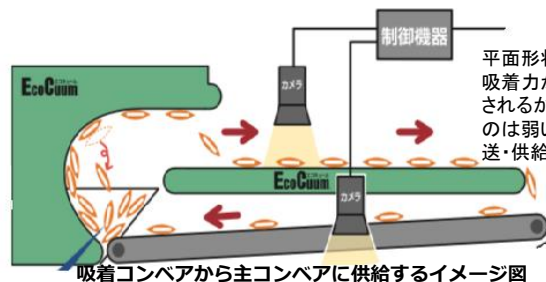


供給装置（吸着コンベア）概念図

コンベア裏面より空気
を吸引し負圧とすること
で搬送物を吸着しなが
ら搬送する



吸着コンベアによる破碎プラ吸着状況



吸着コンベアから主コンベアに供給するイメージ図

平面形状に近いものは
吸着力が強いため吸着
されるが不陸形状のも
のは弱いため落下し搬
送・供給されない



吸着コンベアで吸着されない凸凹のある破碎プラ

5

(c) 課題への対策③

図 2-3-1 課題に対して講じた具体的な対策

3. 1. 2. 装置の設計・製作

1) 装置の基本設計

装置の開発に先立ち考えられた課題への対策を講じたうえで、蛍光 X 線選別装置フローは図 2-3-2 に示すとおりとした。すなわち、吸着式の供給装置(吸着コンベア)により、平面形状に近いものを選択的に主コンベアに供給できるものとし、主コンベアの下部に取り付けた蛍光 X 線センサーで測定対象物との距離を一定に保ちながら測定できるものとした。

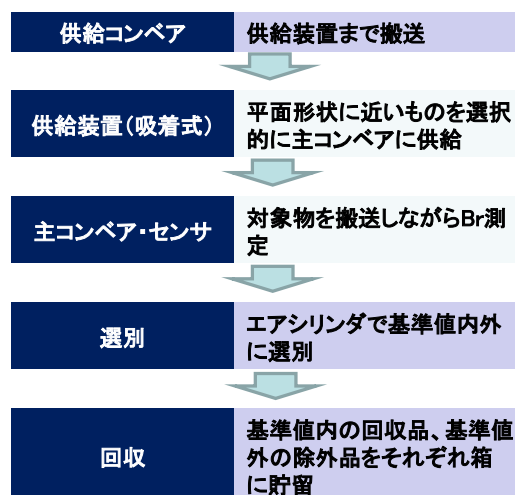


図 2-3-2 蛍光 X 線選別装置フロー

2) 蛍光 X 線センサーの選定

蛍光 X 線選別装置に組み込む蛍光 X 線センサーについては、国内で当該装置の販売実績のある A 社及び B 社の2者が市場に供給する製品を用いることとした。これらの概要を表 2-3-2 に示す。また、蛍光 X 線センサーの外形図を図 2-3-3、図 2-3-4 に示す。A 社製に比較して B 社製は、コンパクトで電気消費量も少ないが、出力は弱い。このため、本実証事業では、より低濃度の選別性能を達成する目的であることを踏まえ、A社製センサーによる試験を中心とし、B社製センサーは、予備的に実施するものとした。

表 2-3-2 蛍光 X 線センサーの概要

項目		A 社製	B 社製
外形寸法・重量	測定ヘッド部	315W×211D×310H、約 15kg	100W×266D×79H、約 2.4kg
	ヘッド制御部	300W×150D×220H、約 10kg	
X 線発生装置		X 線用高圧電源：最大 50W、50kV (管電圧) Br 測定時：3 5 k V-1.2mA(42W)	8～40KeV (最大 4W) ※X 線エネルギー
X 線シャッター		自動制御	
検出器		半導体検出器(SSD)：7mm ² or 50mm ² Br 計測用：50mm ²	標準シリコンドリフトディテクター
所用電源		ヘッド：DC24V 10A パソコン：単相 AC100V 5A	Power over Ethernet または 18VAC 電源アダプター
測定雰囲気		N ₂ ガスパージ：流量 25mL/min 供給圧力 0.2～0.4MPa	温度範囲：-10～50℃ 相対湿度：10～90%
データ処理装置		民生用 PC・Windows10、LCD モニタ、ソフトウェア	民生用 PC、ソフトウェア
通信接続		イーサネット、TCP/IP	イーサネット、USB、ディスクリー ト I/O (16 ピン)

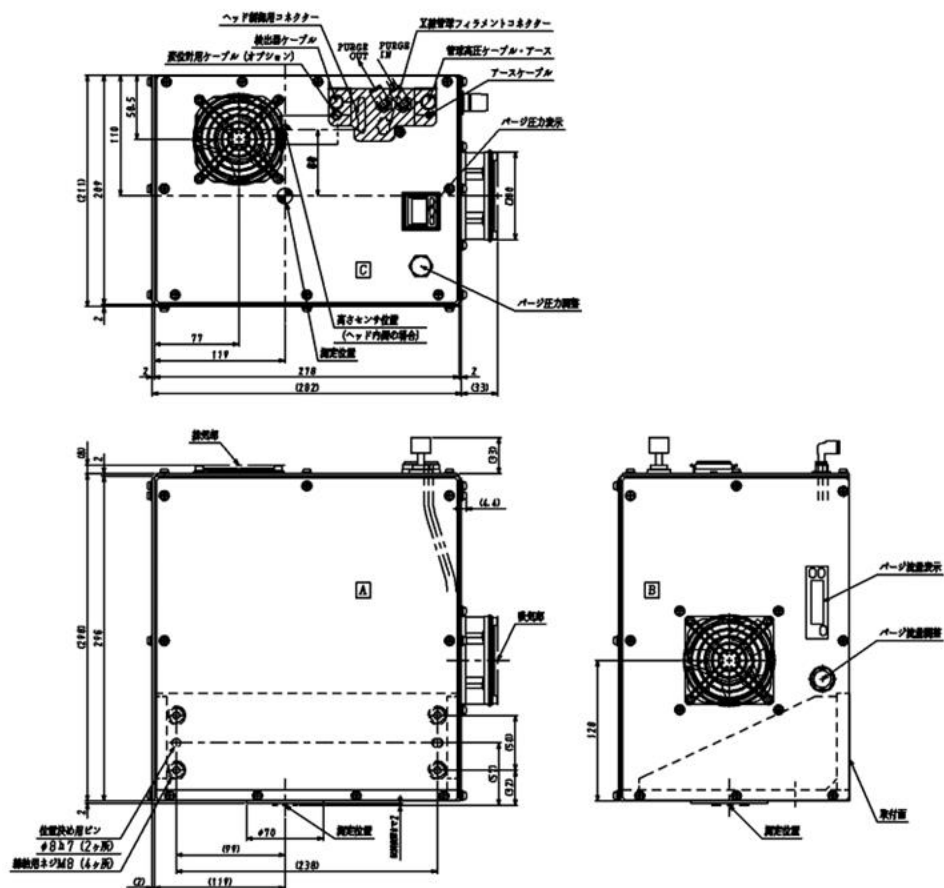


図 2-3-3 蛍光 X 線センサー外形図 (A 社製)

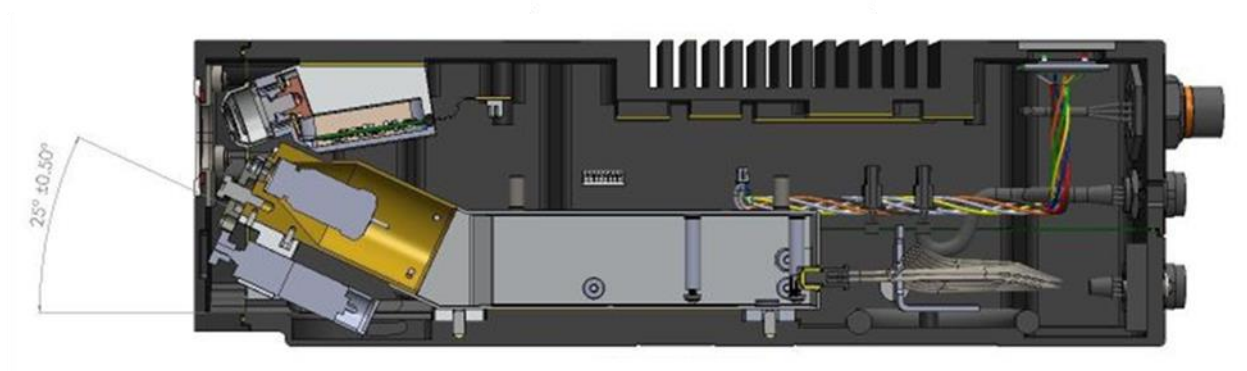


図 2-3-4 蛍光 X 線センサー外形図 (B 社製)

3. 1. 3. 装置の実施設計

基本設計を踏まえ、蛍光 X 線選別装置を構成する機器の実施設計を行った。

装置の規模は、調達可能な試験試料の量や試験場所の制約等を考慮し、20kg/h 程度を想定するものとした。装置を構成する各機器の仕様を表 2-3-3 に示す。また、装置の配置計画図を図 2-3-5 に、システム構成図を図 2-3-6 に示す。

表 2-3-3 構成機器の仕様

機器名称	数量	形式	仕様内容
供給コンベア	1 台	ベルトコンベヤ	搬送速度：4.7～18.9m/min 水平機長：1,500mm 機幅：250mm 駆動方式：チェーン駆動 電動機方式：ブレーキ付インバータモータ 電動機容量：60W 搬送ベルト：ポリウレタン製、幅 250mm
投入コンベア	1 台	吸着コンベヤ	搬送速度：MAX20m/min 機幅：348mm 揚程：610mm 傾斜角度：180 度 U ターン型 駆動方式：カップリング式 電動機：ブレーキ付サーボモータ、400W 搬送ベルト：POM 製モジュールチェーン、幅 304.8mm
投入コンベア 用送風機	2 台	上方吐出式送風機	保証負圧：600Pa 電動機容量：1.0kW 付属品：吸気ダクト（φ200×2m フレキシブルダクト）2 本、 排気ダクト（□160、90 度エルボ）2 本、微差圧計
主コンベア	1 台	二条式ベルトコンベヤ	搬送速度：MAX20m/min 水平機長：2,600mm 機幅：334mm 駆動方式：カップリング式 電動機：サーボモータ、200W 搬送ベルト：ポリウレタン製、幅 50mm×2 本 付属品：光電センサー、X 線遮蔽板
分別装置	1 台	ダンパ式	駆動方式：電動アクチュエーター 主要材質：SUS304、アルミフレーム
制御盤	1 面	鋼板製自立型	主要寸法：W700×D400×H1650 材質：鋼板製、板厚 2.3～3.2t 付属品：操作用 PC、制御線

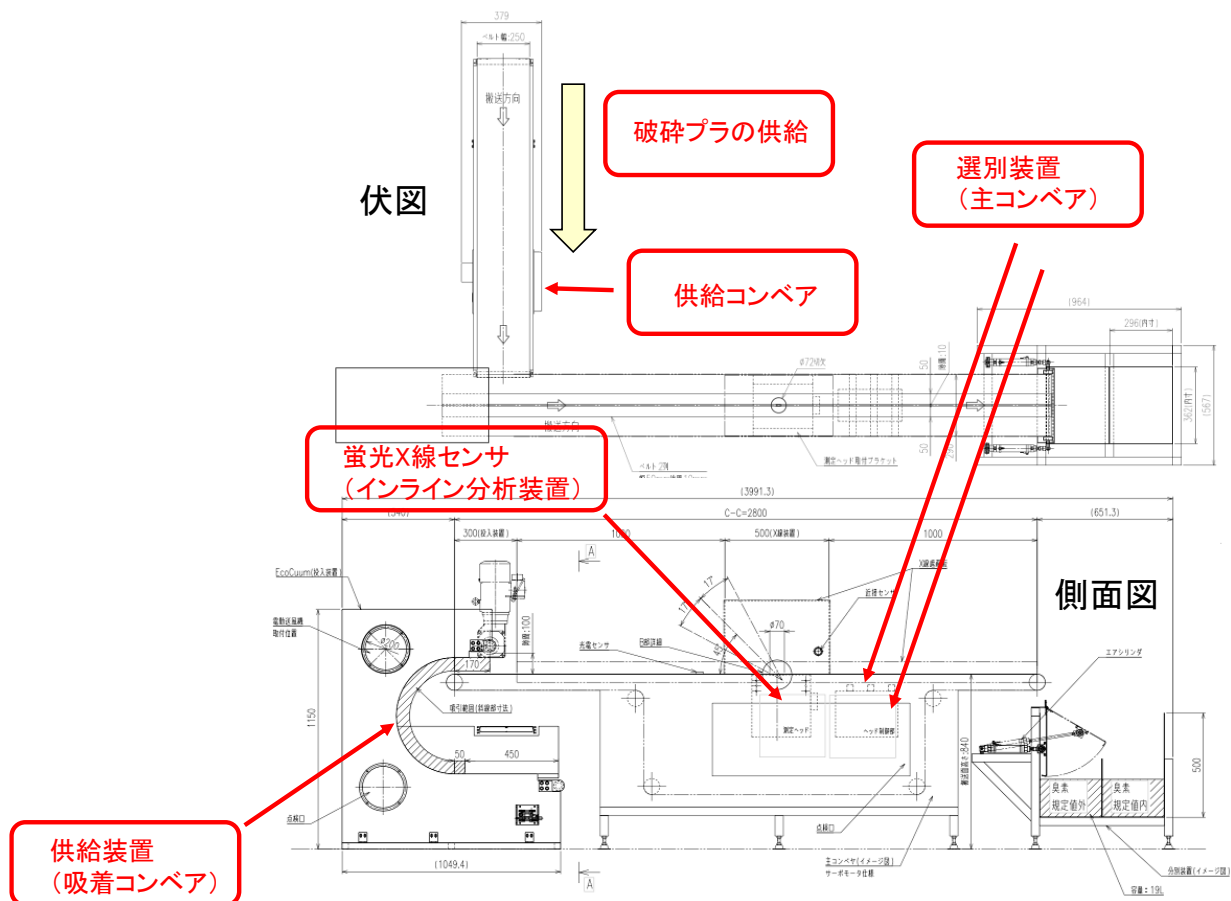


図 2-3-5 装置の配置計画図

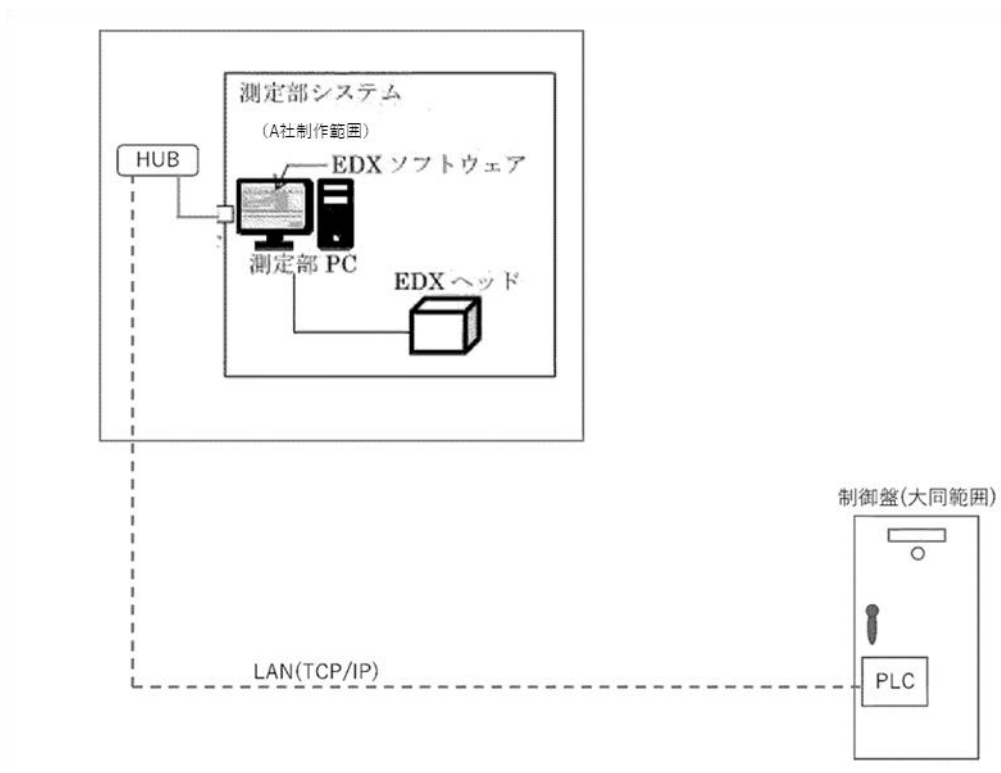


図 2-3-6 システム構成図 (A 社製の例)

3. 1. 4. 装置の製作

実施設計に基づき、国内工場にて蛍光 X 線選別装置を構成する機器の製作、組立及び作動試験を行った。その概要を表 2-3-4 に、製作工場における試験状況を図 2-3-7 に示す。

表 2-3-4 装置の製作概要

項目	内容	備考
製作場所	石川県加賀市熊坂町イ 197 番地	大同工業(株) 本社工場
製作期間	令和 6 年 9 月 10 日～12 月 9 日	
試験期間	令和 6 年 12 月 10 日～28 日	



図 2-3-7 製作工場における試験状況

3. 1. 5. 関係法令に基づく届出

蛍光 X 線選別装置の設置にあたり、労働安全衛生法第 88 条及び労働安全衛生規則第 85 条に基づき、機械等設置届、放射線装置摘要書及び関係書類を、令和 6 年 12 月 10 日に設置場所を所管する一宮労働基準監督署に提出し受理された。

3. 1. 6. 装置の設置工事

国内工場にて製作された蛍光 X 線選別装置を試験場所である、いその株式会社稲沢事業所に設置した。その概要を表 2-3-5 に、工事状況を図 2-3-8 に示す。

表 2-3-5 装置の設置工事

項目		内容	備考
設置場所		愛知県稲沢市石橋 6 丁目 5 2 番地	いその株式会社稲沢事業所
工事期間	据付	令和 7 年 1 月 13 日～1 月 16 日	
	試運転調整	令和 7 年 1 月 15 日～1 月 17 日	



図 2-3-8 工事状況写真

3. 2. 実証試験

3. 2. 1. 方法

1) 試験ケース

試験ケースは、表 2-3-6 に示すとおりとした。事前に予備的な試験を行い、蛍光 X 線選別装置の選別特性を確認したうえで、この結果を踏まえた本試験を実施した。なお、X 線照射時間は、1秒とした。制御上は、さらに長い時間の照射も可能であるが、最短である1秒でも十分な検知性能が確認できたためである。

表 2-3-6 蛍光 X 線選別装置による試験ケース

(a) 予備試験

項目	試験内容
吸着コンベアにおける歩留まり	供給コンベアから吸着コンベアに供給された部品プラのうち、落下せず主コンベアに供給される部品プラの割合(歩留まり)を確認した。
被写体サイズと蛍光 X 線センサーの検知濃度の関係	蛍光 X 線選別装置では、X 線を照射した被写体の面積に比例して検知濃度が低下することから、破碎プラスチックのサイズによる検知濃度の違いを確認した。
臭素含有プラが臭素なしプラに重なった状態での検知濃度の変化	コンベア上で、破碎プラスチックが重なり合ったときの検知濃度の低下傾向を確認した。
コンベア上で、プラが連続する場合と臭素含有プラが単独で存在する場合の検知濃度の差異	コンベア上で被写体が隙間なく連続して流れている場合と断続的に流れている場合では、検知濃度に差が生じると考えられる。この確認を行った。
コンベアベルトが検知濃度に与える影響	蛍光 X 線選別装置で採用した二条コンベアは、X 線の照射及び蛍光 X 線の感知を直接的に行うために導入した。一方で、破碎プラスチックのサイズが限定的となること、コンベア上で破碎プラスチックを一行に整列させる必要があることから、処理能力の向上に限界がある。このため、二条コンベアから板コンベアに変更した時の実用性、つまり検知濃度の低下度合いを確認した。

(b) 本試験

パラメータ			
臭素濃度(ppm)※	臭素含有プラ混合率(重量%)	コンベア速度(mm/min)	試料サイズ(mm)
200	1	200	20
100	5	330	50

※臭素含有プラの臭素濃度は、蛍光 X 線センサーの検知性能を確認したうえで設定した。

2) 試験に用いた蛍光 X 線選別装置

試験では、3. 1で述べたとおり、本実証事業で開発、製作し、いその株式会社稲沢事業所に設置した蛍光 X 線選別装置を用いた。

3) 蛍光 X 線センサーのしきい値

本実証事業で開発、製作した装置では、主コンベア(二条コンベア)下に設置した蛍光 X 線センサーの出力は測定部 PC 内で濃度換算され、この結果は、制御盤中の PLC(プログラマブルロジックコントローラ、Programmable Logic Controller)に出力され、一定の濃度(しきい値)を超えた場合、選別システムの分別板を稼働させる信号が装置に発信される。蛍光 X 線センサーは、臭素を含まない被写体においても誤差としての濃度を検知することから、臭素非含有プラによる誤差値を勘案したしきい値を設定しておくことが必要である。しきい値については、予め、臭素を含まない部品プラによる繰り返し測定を行い、20ppm 程度以下にすればよいことを確認の上、選別試験では、安全を見込み、しきい値を 30ppm とした(図 2-3-9)。

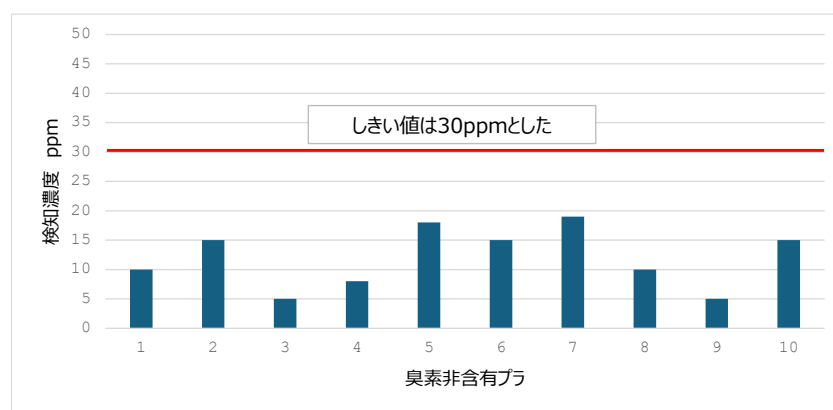


図 2-3-9 しきい値の設定

4) 試験試料の調達

① ELV から回収した部品プラスチック(臭素非含有)

臭素非含有の部品プラスチックは、ELV から回収した部品プラスチックから、表 2-3-7 に示す ELV 4台分の内装材及び外装材とした。これらは、破砕機(一軸式)により 50 mm以下に破砕した。試験では、これらを手選別により、概ね 20mm と概ね 50mm の2つに分けた。なお、蛍光 X 線選別装置における二条コンベアのクリアランス(8mm)から、これ以下のサイズでは正常な搬送が出来ない。破砕後の部品プラスチックを図 2-3-10 に示す。試験試料は表 2-3-7 の部品プラを均等混合したものとした。これらについては、臭素は、検出下限未満であった(可搬型 XRF による測定)。

表 2-3-7 試験試料（部品プラ）

No.	車種	種別	試料重量(kg)	粒度(mm)
①	軽自動車（D 社）	内装（ドアパネル）	1	<50
②	普通自動車（M 社）			
③	普通自動車（N 社 N）			
④	普通自動車（N 社 L）			
⑤	普通自動車（N 社 L）	外装（バンパー）	1	



図 2-3-10 部品プラ（<50 mm）

② 臭素含有プラスチック

臭素含有プラスチックは、2. 1. 2. で述べたとおり、難燃剤製造工場で作製したものを用いた（表 2-3-8）。試験に際しては、着色の上、破砕機（一軸式）により 50 mm 以下に破砕した。破砕後の臭素含有プラスチックを図 2-3-11 に示す。

表 2-3-8 蛍光 X 線選別装置実証試験に用いた臭素含有試験試料

Br 化合物濃度* ¹ (ppm) (目標濃度)	難燃助剤濃度* ² (ppm)	準備した試料重量 (kg)
5,926 (5,000)	2,000	0.52
3,399 (2,000)	1,100	0.49
698 (500)	200	0.5
363 (200)	120	0.56
142 (100)	50	0.5

*1 DBDPE

*2 Sb₂O₃

図 2-3-11 臭素含有プラ破砕後（<50 mm）

5) 試験スケジュール

蛍光 X 線選別装置を用いた実証試験のスケジュールは表 2-3-9 のとおりとした。実証試験は、令和7年2月に行い、試験終了後は、当該装置を解体撤去した。

表 2-3-9 試験スケジュール

項目	令和 7 年 1 月			2 月			3 月
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬
試験装置搬入・据付		1/13~14 1/15~17					
試運転調整				1/20~2/28*			
実証試験							
解体撤去							
記録の整理・報告							

*実証試験は 1/20~2/28 の間で随時実施

6) 評価方法

蛍光 X 線選別装置を用いた実証試験では、次の計算により、臭素含有プラの回収率を求めた。

臭素含有プラの回収率 = (臭素入りとして検知・選別された重量 / 試験に投入した臭素入りプラ重量) × 100

また、時間当たり処理量を計算した。

3. 2. 2. 試験結果

1) 基礎的試験

① 吸着コンベアにおける歩留まり試験

吸着コンベアにおける歩留まりは、平均 50%(30%-65%)であった。吸着コンベアから二条コンベアへの移送は、吸着コンベア内で吸着されたままであることが必要であるが、本試験で準備した部品プラスチックには、不陸があり(14mm-15mm)、このため吸着強度が弱かったものと考えられた。歩留まりを向上させるためには、不陸が生じにくい破碎システムが必要であることが分かった。

② 蛍光 X 線センサーの検知濃度について

蛍光 X 線センサーは、臭素系難燃剤標準物質による校正は行っているが、装置に装着した段階で、被選別物と 8mm の空隙が生じる。この空隙により検知濃度はどのように変化するかを確認した。また、可搬型 XRF 測定値との差異を確認した。標準物質に対してセンサー濃度は 81%であったが、ばらつきは少ない(RSD(相対標準偏差):選別装置センサーで 5.2%、可搬式 XRF で 9.6%)(表 2-3-10)。

表 2-3-10 選別装置に装着された蛍光 X 線センサーの検知濃度と標準物質濃度等の比較
ppm

臭素標準物質	選別装置のセンサー	可搬型XRF
978	754	935
	785	1124
	836	990
平均	792	1016
割合 (%)	81	104

③ 臭素含有プラのサイズと蛍光 X 線センサーの検知濃度について

臭素含有プラのサイズにより、蛍光 X 線センサーで検知できる濃度はどのように変化するかを確認した。センサーは、一定範囲の固定された面積全体の濃度を平均化することから、小さい臭素入り含有プラでは、検知する濃度は低下する。面積比で 6% のペレットサイズ (4mm*4mm) の検知濃度は 29% に低下した (表 2-3-11)。

表 2-3-11 臭素含有プラスチックのサイズと検知濃度

Br含有プラのサイズ	面積mm2	検知濃度ppm			平均ppm
32mm*8mm	256	462	389	400	417
4mm*4mm	16	100	127	134	120
割合 (%)	6.0	—	—	—	29.0

④ 臭素含有プラが臭素なしプラに重なった状態での検知濃度について

臭素なしプラを 5mm 程度重ねてこの上部に臭素含有プラを乗せた場合 (コンベア上で重なりが生じた場合を想定)、検知濃度は 50% 以下となった。破砕プラスチックの重なりを生じさせないガイド等が必要である。

⑤ コンベア上でプラが連続する場合と単独で存在する場合の検知濃度について

臭素なしプラと臭素入りプラが混在する状態でプラがコンベア上で途切れることなく連続して流れる場合と臭素含有プラのみが単独で流れる場合を比較すると (供給装置の不具合が生じた場合を想定)、連続して流れる場合は単独で流れる場合の 45% の検知濃度となった。測定の原理から、1秒間に照射する被写体の面積が広がる (≡コンベア上を被写体が連続して流れる) とセンサーはこの間を平均化するので、連続して流れるほうが検知濃度は低くなる。

⑥ コンベアベルトの影響はあるか

二条コンベアのベルトは、厚さ:0.9mm、材質:ポリエステル帆布 (ポリウレタンコーティング) の食品用であり、コンベア間には 8mm の間隙があり、この間隙を通じて X 線を照射する。この間隙を手動で閉じた状態 (二条ではなくなる) で臭素含有プラを流したところ、検知濃度はほとんど変化しなかった。

2) 本試験 (A 社製センサー使用)

① 回収率

本試験では、臭素含有プラの臭素濃度(100ppm 及び 200ppm)、主コンベアの搬送速度(200mm/sec 及び 330mm/sec)、試料サイズ(20mm 及び 50mm)及び臭素含有プラの混合率(1% 及び 5%)の各条件でそれぞれ3回の繰り返し選別試験を実施し、臭素含有プラの回収率(臭素含有プラとして回収された重量/投入した臭素含有プラ重量)を求めた。

本試験の結果を図 2-3-12 に示す。これによると、全ての条件で臭素含有プラの回収率は、ほぼ 100%であった。わずかに誤作動を生じることがあった(臭素濃度 200ppm、試料サイズ 50mm、搬送速度 330mm/sec の条件下等)が、これは蛍光 X 線選別装置を設置した工場内の機器稼働に伴い時々発生した電磁波等が蛍光 X 線選別装置の通信システムにノイズを与えた結果であり、蛍光 X 線選別装置の性能とは無関係である。

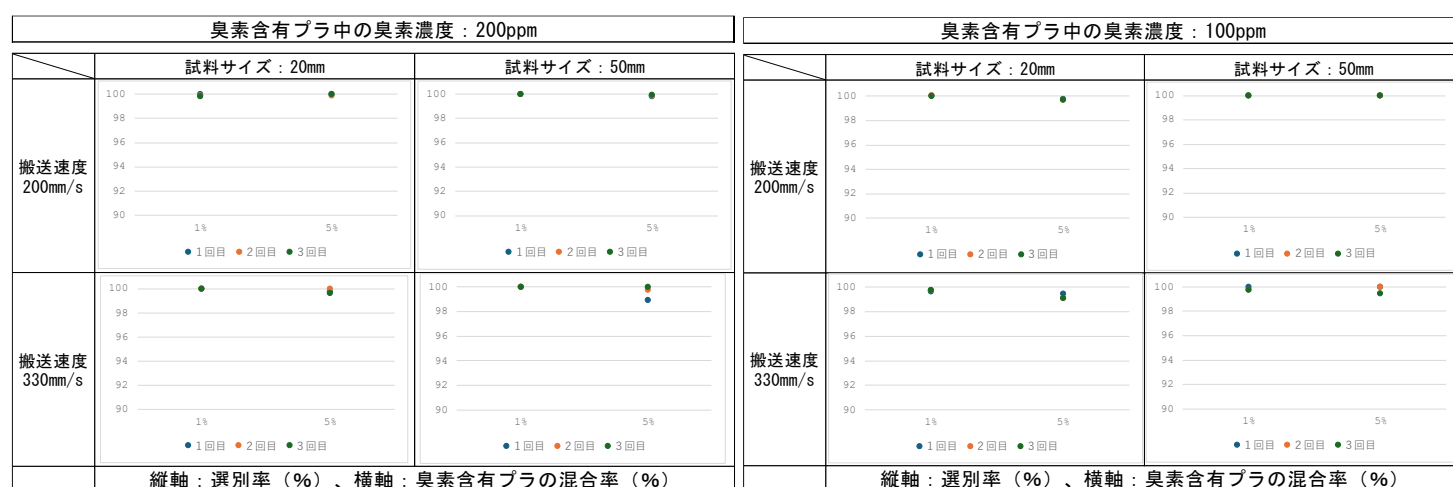


図 2-3-12 蛍光 X 線選別装置による臭素含有プラスチックの選別試験結果

② 処理能力

蛍光 X 線選別装置における処理能力は、主コンベア搬送速度及び主コンベア上でのプラ単位重量から求めることが出来る。本試験では、搬送速度:200mm/sec 及び 330mm/sec、主コンベア上でのプラ重量:17g/m(14g/m-21g/m)であったことから、計算上は、概ね、20kg/h(330mm/sec の時)であった。

一方、通信システムにおいて、センサーで検知した臭素濃度を測定部 PC から PLC に転送する通信時間が 2 秒程度かかり、この間、コンベアは停止する。このため、本装置の実質的な処理能力は、この通信時間が影響し、計算上の処理能力に対して 33%程度になった。これは、通信システムにおける通信速度の改良により解決できる課題である。

さらに、二条コンベア上でプラを整列させるために導入した吸着コンベアでは、プラの性状や重量によって吸着できないものが生じた。吸着率は 50%前後であった。吸着コンベアについては、基礎的試験で明らかとなった、コンベアベルトの影響がほとんどないという特性を活かし、二条コンベアを同様の素材を用いた平面コンベアに変更することにより振動篩等の他の効率的な供給システムに改良されるものと考えられた。

3) 本試験 (B 社製センサー使用)

① 回収率

B 社製センサーは、A 社製センサーに比べるとセンサー出力が小さく、本試験により、十分な検知精度を得るためには、蛍光 X 線照射時間に3秒を要することが分かった。この照射時間であれば、臭素含有プラの回収率は 100%となった。

② 処理能力

処理能力は、照射時間が長く、かつ通信システムによる通信時間を要することから、計算上の処理能力に対して、20%程度となった。

3. 2. 3. 評価

蛍光 X 線選別装置での選別試験結果では、処理能力は低いものの、30ppm でしきい値を設定することにより、30ppm 以上の検知濃度であれば、選別出来ることが分かった。臭素で 30ppm であると、PBDEs ベースでは、50ppm (テトラ BDE として)となる。基礎的試験の結果から、被写体とのクリアランス確保によるセンサー検知濃度低下度合いを 81%、連続して流れる際の検知濃度低減度合いを 45%とすると、実際には PBDEs 濃度 140ppm 程度を検知、選別出来ることになる。POPs 規則における PBDEs の段階的規制強化において最終的には LPC:200ppm となることから、本実証事業で開発、実証した蛍光X線選別装置は、これを保証するための検査ツールとして有効であることが分かった。

4. X線選別装置による実証試験のまとめ

本実証事業では、臭素選別装置について、部品部位、破碎サイズ等を変えつつ繰り返し試験を実施した。透過X線選別装置及び蛍光X線選別装置の性能概要を表2-4-1に示す。蛍光X線選別装置については、本実証事業で明らかとなった解決可能な課題(搬送システム及び通信システムの改良)に対応した改良機に関する推定値を示した。

透過X線選別装置は、臭素濃度1%の検知、選別が高速かつ正確にでき、新型機では破碎サイズやタルク影響もないことが実証された。

蛍光X線選別装置においては、蛍光X線センサーを搬送コンベア下に設置することにより、数十ppm オーダーの低濃度の検知が可能となることが実証された。一方で、搬送システムや通信システムの影響から処理能力が低いため、今後、搬送装置の改良(二条コンベア⇒平板コンベア)や通信システムの改良を行うことにより、実用的な処理能力を確保した改良機を開発することが必要である。

表 2-4-1 本実証事業で確認した臭素選別装置の性能概要

項目	透過X線選別装置(新型)	蛍光X線選別装置(改良)
処理能力 kg/h	コンベア1系列あたり 500	500 ^{※4} (本実証事業では 20kg/h)
臭素検知下限濃度 ^{※1} ppm	10,000	30
選別率 ^{※2} %	90	90 (本実証事業では概ね 100%)
誤選別率 ^{※3} %	15	0.14 ^{※5} (330mm/sec として)
※1：臭素検知下限濃度：10,000ppm を選別出来れば、ペレット段階での POPs 規則の現行 LPC:500ppm を満足できる。100ppm を選別すれば、将来の LPC:200ppm を満足できる。 ※2：選別率：臭素含有と判定されたプラスチックを臭素ありと選別できる割合 ※3：誤選別率：臭素なしのプラスチックを臭素ありと選別してしまう割合(臭素ありと誤認識量/臭素なし量) ※4：ここでは、蛍光X線センサーを透過X線選別装置搬送装置に装着する等の改良を行い、処理能力を透過X線選別装置(新型)と同等にするものと想定している。 ※5：コンベア速度 330mm/sec において回収された臭素含有プラスチックにおける臭素非含有プラスチックの割合(0%-1.02%, n=6)の算術平均		

EUにおけるELV規則案第5条1項は、「自動車及びその部品・構成部品に含まれる懸念物質の存在を可能な限り最小化しなければならない」とされているが、懸念物質の定義は、規則案では示されていない。GADSLでは、関連する規制等に関して網羅的に対応していることを踏まえると、懸念物質については、EUにおけるPOPs規則、RoHS指令について配慮することが想定される。これを踏まえ、本実証事業では、臭素系難燃剤に関し、POPs規則におけるLPC及びRoHS指令におけるPBDE規制(0.1%未満)を指標として選別装置の評価を行ってみた。

各選別装置とそれぞれが検知できる臭素濃度及びEUにおけるPOPs規則で定められるPBDEs濃度との関係を表2-4-2に示す。なお、PBDEsはテトラBDEと仮定してBrとPBDEsの濃度換算を行った。

これによると、第1章で述べたとおり、再生プラスチック(ペレット等)中のPBDEs濃度500ppm未満を担保するために必要となる部品プラのうち10,000ppm以上を選別、除去することに関しては、透

過 X 線選別装置(新型)において対応可能となる。一方で、将来的な規制強化に対しては、PBDEs の存在情報を更新しつつ選別必要性を見極めるとともに、より低濃度の臭素が検知できる蛍光 X 線選別装置の改良を行うことが考えられる。POPs 規則において製品中濃度規制が PBDEs においても設定されることになると、将来的には蛍光 X 線選別装置の改良により対応が可能となるが、PBDEs の存在状況によっては、再生プラの品質検査用としての活用も有効と考えられる。

表 2-4-2 各選別装置とそれぞれが検知できる臭素濃度の一覧

選別装置	Br:10,000ppm を選別し PBDEs:500ppm (Br:330ppm) 未満を担保	PBDEs:350ppm (Br:230ppm)	PBDEs:200ppm (Br:130ppm)
透過 X 線(既存)	△(50mm)	no	no
透過 X 線(新型)	○	no	no
蛍光 X 線	○	○	○

POPs 規則では、規制対象とする PBDEs をテトラ+ペンタ+ヘキサ+ヘプタ+デカの合計値としている。規制値(LPC)は、段階的に強化され、2025 年末までは 500ppm、これ以降 2027 年末までは 350ppm、2027 年末から 200ppm となる。UTC は現時点では、欧州委員会委任規則案で提案値があり、LPC と同値である。

- LPC の適用時点:
EU では「素材別に分離」する際に適用。これを超えるものは、リサイクルではなく、POPs 分解可能な処理技術により処理する。
日本では LPC に対応する明確な法的根拠はないが、業界で慣習的に「解体・手選別」にて RoHS 指令を根拠に PBDE 1,000ppm を採用
- 製品混入(UTC)に関する規制:
EU では「プラリサイクル」後に製造・販売される二次製品(コンパウンド等)に適用される UTC を設定している。(リサイクル業者は廃棄物処理業者であると同時に製造事業者として制度が適用される)
日本では二次製品に対する法的根拠はない。

5. 再生プラスチック原料としての性能を有することの評価実証試験

5. 1. 目的

本実証事業では、臭素選別装置により臭素含有プラが選別除去された後の臭素を含まない部品プラスチックが、自動車部品プラの原料として利用できるかについての確認・評価を行うことを目的として、臭素を含まないことが確認された部品プラに対する品質確認試験を行った。

5. 2. 方法

5. 2. 1. 試験用試料（ペレット）製作の流れ

品質確認試験は、ELV から回収され、臭素非含有プラとして選別した部品プラを、いその株式会社において、破碎し、押し出し溶融装置を用いてペレット化したものを試験用試料とした。試験用試料製作の流れを図 2-5-1 に示す。この間にコンパウンドは行っていない。



図 2-5-1 品質確認試験用試料製作の流れ

5. 2. 2. 原料とした部品プラ

品質確認試験では、ELV から回収され、臭素非含有プラとして選別した部品プラを原料とした。部品プラは、外装材としてバンパー、内装材としてドアピラー、ドアパネル、トランクコンパートメント及びインパネの5パーツとした。なお、いずれも破碎後の部品プラであったことから、車種、年代等による区分は行えなかった。また、試験に際しては、通常のプラスチック受入状況を踏まえ、5パーツのほか、内装材4パーツの均等混合試料も製作し、試験試料とした。

5. 2. 3. 押し出し溶融加工要領

破碎された部品プラを押し出し溶融加工しペレットに加工した。押し出し溶融加工の仕様は、次のとおりとした。

- ・押し出し機:…(株)石中鉄工所製, スクリュー径 55mm, 単軸 1 ベント押し出し機
- ・スクリーン…#40/#60 (目開き: #40…0.415 mm , #60…0.285 mm)
- ・加工温度: ヒータ設定温度は、220 度から 240 度

5. 2. 4. 試験項目

1)SOC 等

製作されたペレットの化学物性として、RoHS 指令で規制されている環境負荷物質 (Substances of Concern、以下、「SOC」という。)等とされる物質の分析を行った。分析項目及び分析方法は表 2-5-1 のとおりとした。

表 2-5-1 分析項目及び分析方法

分析項目	分析方法
カドミウム (Cd)	蛍光 X 線分析
鉛 (Pb)	
総クロム (総 Cr)、六価クロムの代替として実施	
水銀 (Hg)	
総ブロモ (総 Br)	
塩素 (Cl)	
RoHS 指令による SOC は、カドミウム (Cd)、鉛 (Pb)、水銀 (Hg)	

2)一般機械特性(物性)

自動車部品としてのプラスチック原料化に際しては、各自動車メーカーや部品メーカー等が定める物性を満足する必要がある。具体的な項目や品質基準については、公開されていないが、ここでは、一般的に最低限必要と考えられる項目について適性を確認することとした。

製作されたペレットの一般機械特性に係る試験項目及び試験方法を表 2-5-2 に示す。

表 2-5-2 一般機械特性に係る試験項目及び試験方法

試験項目	試験条件	単位	試験方法
メルトフローレート	230℃、2.16kg	g/10min	ISO 1133 JIS K 7210-1
シャルピー衝撃強さ	23℃、ノッチ付	kJ/m ²	ISO 179-1 JIS K 7111-1
引張降伏強さ	試験速度50mm/min	MPa	ISO 527-1 JIS K 7161-1
引張破壊ひずみ	試験速度50mm/min	%	ISO 527-1 JIS K 7161-1
引張弾性率	試験速度1mm/min	MPa	ISO 527-1 JIS K 7161-1
ロックウェル硬さ	R硬さスケール	-	ISO 2039-2 JIS K 7202-2
荷重わたり温度	0.45MPa	℃	ISO 75-1 JIS K 7191-1
比重	水中置換法	-	ISO 1183 JIS K 7112

3)その他

本実証事業における POPs 対応とは直接的な関連はないが、一般的に使用済みプラスチックを原料として再生プラスチックを製造する場合、使用済みプラスチックに添加されているタルクやフィラー等のほか、補修に使用したパテ、塗装剤及び金属類等がリサイクル工程で障害となることがある。障害により、押出溶融装置等の加工用機器に不具合が生じ、結果的に採算性を含めてリサイクル事業そのものの経済性を劣化させてしまう。このため、本実証事業においても、参考として、原料とした部品プラの加工過程における課題について整理を行った。

5. 3. 結果

5. 3. 1. SOC 等

SOC 等の分析結果を表 2-5-3 に示す。これによると、SOC 項目（カドミウム、鉛、水銀）は、いずれも RoHS 指令で定める基準値（カドミウムは 0.01%、他は 0.1%）を満足していた。また、総クロムも数十 ppm であり、SOC である六価クロムにおいても基準値（0.1%）を満足していると推察できる。

表 2-5-3 SOC 等の分析結果

試験項目	選別対象部品ごとの分析結果（ppm）					
	バンパー	ピラー	ドアパネル	トランク コンパート メント	インパネ	内装 4種類 混合
Cd	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Pb	ND	ND	ND	ND	ND	ND
総Cr	ND	32.2	46.5	31.5	26.8	34.6
Hg	ND	ND	ND	ND	ND	ND
総Br	1.1	ND	ND	ND	ND	ND
Cl	90.2	120.3	75.2	54.1	118.1	61.1

5. 3. 2. 一般機械物性

一般機械特性の試験結果を表 2-5-4 に示す。いずれも自動車部品原料としての品質の範囲にあるとされた。

表 2-5-4 一般機械特性の試験結果

試験項目	単位	選別対象部品					
		バンパー	ピラー	ドアパネル	トランク コンパート メント	インパネ	内装 4種類 混合
メルトフローレート	g/10min	28.6	32.0	36.6	35.6	24.7	32.6
シャルピー衝撃強さ	kJ/m ²	22.0	9.6	13.0	8.1	37.0	9.5
引張降伏強さ	MPa	18.3	21.7	26.6	24.4	21.3	22.5
引張破壊ひずみ	%	29	35	38	29	26	29
引張弾性率	MPa	1570	1550	1250	1430	2130	1610
ロックウェル硬さ	-	60	82	82	92	75	84
荷重わたり温度	°C	98	102	95	98	111	104
比重	-	0.99	0.96	0.92	0.92	1.03	0.95

5. 3. 3. その他

その他として、加工工程での確認によると、異物の混入が認められ、これらが押出溶融装置のフィルターに付着する等の障害をもたらした試料があった。これらの異物が含まれていた理由としては、解体段階での取り残し(パテ等)、もともとプラスチックの添加材及び運搬過程や破砕過程での非意図的混入等が考えられたが、原因は特定できていない。

5. 4. 評価

ELV から回収した部品プラを原料として製作した再生プラ(ペレット)については、化学的特性及び物理的特性(一般機械物性)の側面からは、自動車部品の原料として利用可能であると評価される。

6. ELV から回収できる部品プラスチックのポテンシャル及び臭素濃度の推計

6. 1. 調査概要

前節において臭素濃度1万 ppm 以上の部品プラスチックを選別すると、選別後の再生プラスチック中 Br 濃度は 300ppm 以下となり、現状の POPs 規則規定を満足できると推定された。ここでは、回収される部品プラスチックの重量による重みづけを考慮した解析を行い、この推定を検証した。

6. 2. 廃自動車中のプラスチック使用量推定

6. 2. 1. 方法

2030 年ならびに 2050 年の新車販売台数と ELV 発生台数を推定し、これに解体調査によって得られた自動車部品プラスチック重量を乗じることで、ELV 中のプラスチック使用量を推定した。

＜新車販売台数ならびに ELV 発生台数推定＞

新車販売台数は国内新車販売台数と国外への新車輸出台数の合計を推定した。いずれも統計データがある過年度分は統計値を用いた。また、将来推定について、2024 年度以降の国内新車販売台数は 2023 年度人口に対する将来人口比で変化(減少)すると仮定した。新車輸出台数については直近の 2023 年度統計値と同じと仮定した。

また、ELV 発生台数は国内の自動車リサイクルルートに流れる ELV 台数を扱うものとし、以下の手順で推定した。

- ① 国内新車販売台数及び初度登録年別保有台数の統計データ(普通車は報告書²²から 1973-2022 年度のデータを使用、軽自動車は軽自動車検査協会 2019-2022 年度のデータを使用)より、初度登録年から i 年後の残存率を求める残存率関数の推定を行った(後述)。
- ② 各年の新車販売台数に推定した残存率関数を乗じて、使用中の自動車保有台数を推定した。集計年 t 年の保有台数はその年までの初度登録年別の保有台数の総和として求めた。
- ③ 各販売年度の登録年別保有台数の前年との差を $t-1$ 年度まで足し合わせた台数が使用済台数となる。ここから、財務省貿易統計から得た t 年の中古自動車輸出台数を差し引くことで、 t 年の国内の自動車リサイクルルートに流れる ELV 発生台数を推定した。

2024 年の自動車の平均使用年数は普通車が 13.3 年、軽自動車が 16.2 年²³であり、軽自動車の方が 3 年程度長い。製品寿命分布が両者で異なると考えられるため、それぞれ分けて残存率関数を設定し ELV 発生台数を推定した。ここで、2つの残存率関数を検討し、統計値から求めた残存率と最も当てはまりが良い方の残存率関数を採用することとした。具体的には、普通車はワイブル分布を適用した残存率関数、軽自動車はロジスティック曲線をハザード関数に適用した残存率関数を採用した。

²² 自動車検査登録情報協会:わが国の自動車保有動向、平均使用年数

<https://www.airia.or.jp/publish/file/v19mrm00000019lz.pdf> (閲覧日:2025 年 2 月 27 日)

²³ 軽自動車検査協会:軽自動車の平均車齢・平均使用年数、軽自動車の平均使用年数

https://www.keikenkyo.or.jp/Portals/0/files/information/statistics/average_data/heikinsui2005-2024.pdf (閲覧日:2025 年 2 月 27 日)

ワイブル分布として表した残存率関数 $S(t)$ は式(1)で表される。ここで、 t は使用年数、 λ は尺度パラメータ、 α は形状パラメータである。

$$S(t) = \exp\left\{-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^\alpha\right\} \quad (1)$$

一方、ハザード関数 $h(t)$ をロジスティック曲線で表した

$$h(t) = \frac{K}{1 + \exp\{rK(t_0 - t)\}} \quad (2)$$

に対し、一般に残存率関数は、

$$S(t) = \exp\left\{-\int h(t)dt\right\} \quad (3)$$

となることが知られており、これを適用し表した残存率関数 $S(t)$ は

$$S(t) = \left\{ \frac{1 + \exp(-rKt_0)}{1 + \exp\{rK(t - t_0)\}} \right\}^{\frac{1}{r}} \quad (4)$$

と表される。普通車、軽自動車について最小二乗法を用いて式(1)－(4)のパラメータを推定した。ここで、図 2-6-1、図 2-6-2 に普通車、軽自動車の残存率関数推定結果の例(2000-2022 年平均値)をそれぞれ示した。両者の残存率関数を比較すると、軽自動車の方が普通車よりも使用年数が短い期間において残存率の減少速度が緩やかであることが分かる。

普通車については、初度登録年別の統計データが得られていることから、統計値がある 2023 年度までは初度登録年別にそれぞれ推定した α 、 λ を用いた。ただし、統計値があってもデータ数が不足していると、残存率関数を精度よく推定できないことが知られている。そのため、普通車の平均使用年数を考慮し、2008 年度以降は 2008 年度の α 、 λ を用いた。また、統計値がない将来(2024 年度以降)の残存率関数に用いたパラメータは表 2-6-1 のとおりである。

軽自動車については、初度登録年別の残存率関数を推定できるほどのデータ数が得られなかったことから、初度登録年に依らず残存率関数は同じとして扱い、表 2-6-1 のとおりパラメータを推定した。

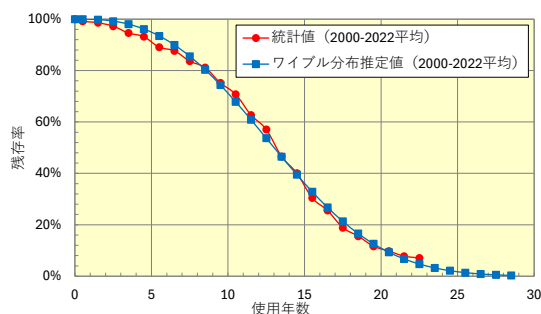


図 2-6-1 普通車の残存率関数推定結果

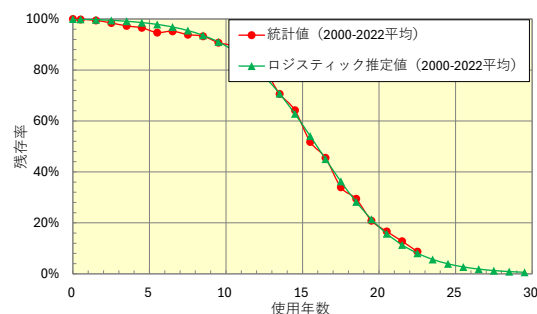


図 2-6-2 軽自動車の残存率関数推定結果

表 2-6-1 2024 年度以降に販売される自動車の残存率関数の設定パラメータ

普通車	$\alpha = 2.19$ 、 $\lambda = 16.06$
軽自動車	$t_0 = 16.4$ 、 $r = 0.88$ 、 $K = 0.39$

<自動車1台当たりの部品別のプラスチック使用量設定>

第1章の解体調査で回収したプラスチック部品のうち回収量が多かったバンパー、ドアパネル、トランクコンパートメント、ピラー、インストルメントパネル(インパネ)の 5 部品を部品単位で扱い、それ以外の部品は全て「その他」とした。回収重量の実測値と、「その他」については A2MAC1 のデータを元に部品別プラスチック重量を表 2-6-2 のとおり設定した。自動車 1 台当たりは普通車 88.9 kg、軽自動車 60.0 kg、そのうち PP は 55.2 kg、31.3 kg である。

表 2-6-2 自動車 1 台当たりの部品別プラスチック重量

	普通車			軽自動車		
	PP	PP 以外	小計	PP	PP 以外	小計
バンパー	7.7	0.0	7.7	5.1	0.0	5.1
ピラー	2.5	0.0	2.5	1.6	0.0	1.6
ドアパネル	8.5	0.0	8.5	3.8	1.8	5.5
トランクコンパートメント	2.9	0.0	2.9	1.7	0.0	1.7
インパネ	8.5	1.2	9.7	5.1	0.8	5.9
その他	25.0	32.5	57.5	14.2	26.0	40.2
合計	55.2	33.7	88.9	31.3	28.6	60.0

※四捨五入のため合計(小計)が一致しないセルがある。

6. 2. 2. 結果と考察

まず、新車販売台数と ELV 発生台数の推定結果を図 2-6-3、図 2-6-4 に示した。2030 年と 2050 年の新車販売台数は 756 万台/年、703 万台/年となり、7%の減少となった。ELV 発生台数は 296 万台、241 万台となり、19%の減少となった。また、新車販売台数に占める軽自動車の割合は 15.0-16.4%であるのに対し、ELV では 45.9-46.3%と推定された。これは新車輸出や中古輸出の多くが普通車であるため、新車販売台数に占める普通車の割合が高くなり、国内の自動車リサイクルルートに回る普通車の割合が低くなるためである。ただし、本推定は新車輸出、中古輸出ともに 2023 年時点の輸出量が 2030 年、2050 年においても同じと仮定した場合の推定であり、将来の自動車輸出の変化を加味できていない点には留意が必要である。

ELV 発生台数の方が新車販売台数よりも減少割合は高いこと、新車販売台数に比べ ELV 中の軽自動車の割合が高いこと、を勘案すると、将来的に新車販売需要に対して ELV からのプラスチック回収による供給量がより難しくなっていくことが示唆される。

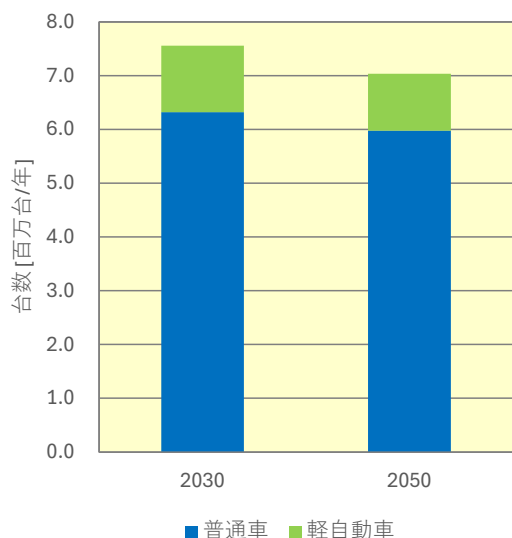


図 2-6-3 新車販売台数推定結果

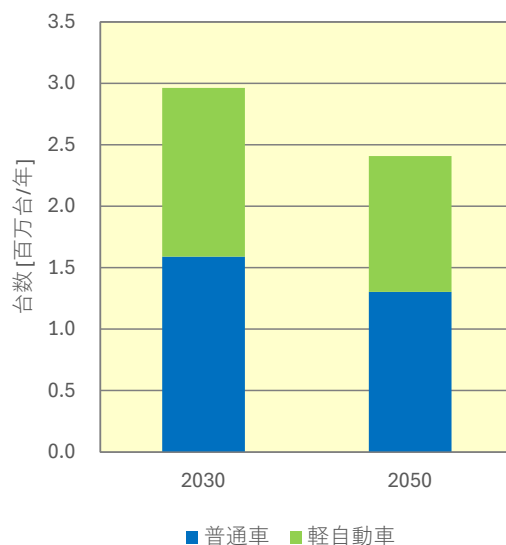
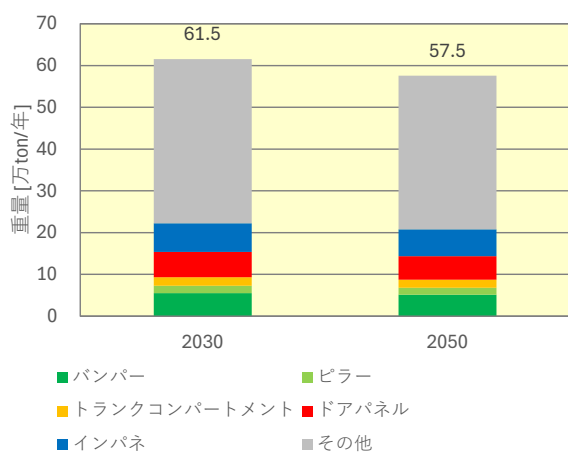
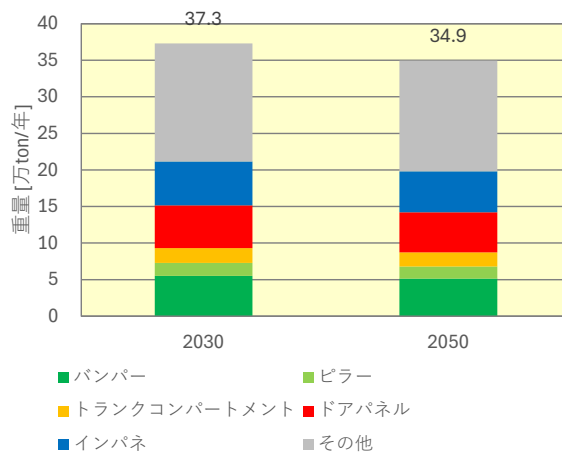


図 2-6-4 ELV 発生台数推定結果

台数推定結果にプラスチック重量を乗じて推定した新車販売車中ならびに ELV の全プラスチック重量、そのうちの PP 重量は図 2-6-5 のとおりである。2030 年、2050 年の新車販売車に必要なプラスチックは 61.5 万 ton/年、57.5 万 ton/年であり、そのうち PP は 37.3 万 ton/年、34.9 万 ton/年と推定され、2030 年から 2050 年は微減傾向を示した。一方、ELV 中に含まれるプラスチックは 21.8 万 ton/年から 17.7 万 ton/年まで減少、PP 重量としては 12.7 万 ton/年から 10.3 万 ton/年の減少となった。このうち、部品重量が重い 5 部品中の PP は 7.2 万 ton/年(2030 年)から 5.8 万 ton/年(2050 年)と推定された。新車販売車に必要なプラスチック 57.5－61.5 万 ton/年に占めるこれら 5 部品 PP 回収による Car to Car 割合ポテンシャルとしては、11.6%(2030 年)、10.1%(2050 年)と算出される。

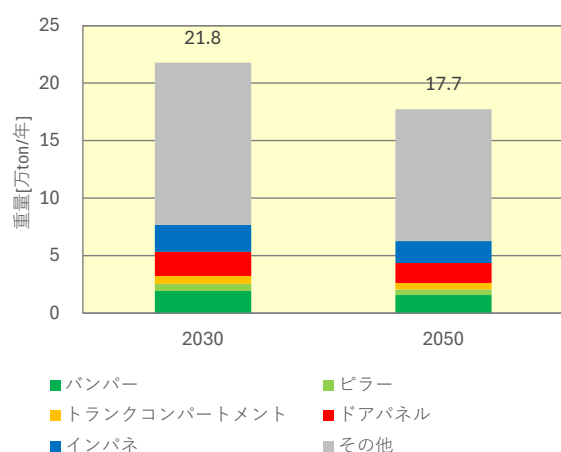


(a) 新車販売車中の全プラスチック

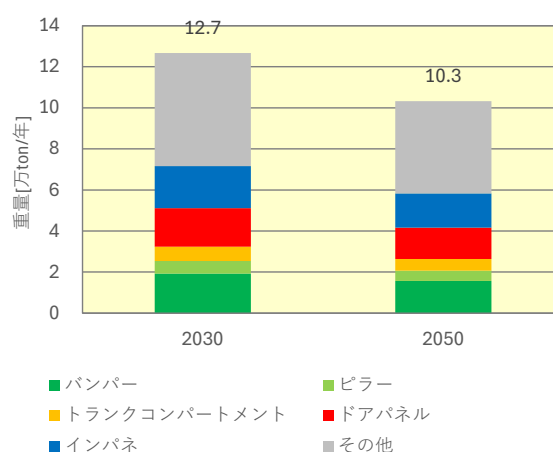


(b) 新車販売車中の PP

図 2-6-5 新車販売車ならびに ELV 中の全プラスチック、PP 重量推定結果



(c) ELV 中の全プラスチック



(d) ELV 中の PP

図 2-6-5 新車販売車ならびに ELV 中の全プラスチック、PP 重量推定結果

6. 3. 廃自動車中の選別除去による Br 除去効果の解析

6. 3. 1. 方法

自動車中のプラスチック部品には懸念化学物質が含有されているおそれがあり、再生プラスチック中のコンタミとして循環することは望ましくない。ここでは、自動車部品に使用される代表的な懸念化学物質の1つである臭素系難燃剤に着目し、解体工程あるいは解体工程で回収後の工程において Br 濃度でスクリーニングし、プラスチック部品を選別除去するシステムの効果をシミュレーションし評価した。

<対象部品>

ELV 中のプラスチック使用量推定で対象とした 5 部品 (バンパー、ピラー、ドアパネル、トランクコンパートメント、インストルメントパネル) と「それ以外」の 6 部品群とした。5 部品の各部品の重量は表 2 の普通車の部品重量を使用し、回収対象候補となる 5 部品の合計重量 30.8 kg/台に対して、Br 濃度がより高濃度である「それ以外」の部品が 0-100%の割合 (最大 100%の時は、5 部品合計 30.8 kg と等量の「それ以外」が混入することになる) で混入した時の Br 濃度の変化を算定した。

<部品群別の Br 濃度>

梶原らの先行研究²⁴ならびに本実証事業の計 1612 点の Br 濃度測定データを用い、部品群別の濃度分布データを作成した。Br 濃度の測定データは検出下限以下のデータが多いことから、部品群 i の Br 濃度分布は (μ_i, σ_i) のゼロ過剰対数正規分布に従うものとし、プログラミング言語 R を用いて部品群別に 10,000 回シミュレーションした。ここで、ゼロ過剰対数正規分布とは、実測データのゼロである割合を用いてゼロかゼロでないか (本解析においては検出下限以下か検出下限以上

²⁴ 梶原夏子・滝上英孝「使用済み自動車部材及び車内ダスト中の難燃剤等の調査」『使用済み自動車 (ELV) の資源ポテンシャルと環境負荷に関するシステム分析 (3K123001)』総合研究報告書 (平成 24~26 年度環境研究総合推進費、研究代表: 酒井伸一)、2015 年 3 月

か)を判定し、ゼロでない場合に対数正規分布に従うと仮定する分布である。ただし、実際のプラスチック部品に Br 濃度が 10%(10 万 ppm)を超えて添加されることは考えにくいとため、Br 濃度の上限を 10 万 ppm に制約した上でゼロ過剰対数正規分布に従うものとした。

<透過 X 線による選別除去性能設定>

解体工程で回収したプラスチックを破碎し、本実証事業で開発した透過 X 線選別装置によって選別除去するシステムを想定した。ここで、自動車プラスチック由来の Br 濃度の影響を最大限把握するため、普通車に 6 部品群全ての PP を全量回収した場合を想定した。

透過 X 線選別装置の選別性能は「10,000 ppm 以上の試料を 90%の確率で除去できる」とした。すなわち、シミュレーションで得た部品群別の Br 濃度(6 部品群×10,000 回)のデータセットに対し、Br 濃度 10,000 ppm 以上のものを 90%の確率で除外した。その上で、選別除去後に回収されたプラスチック重量と各部品の Br 濃度から式(1)を用いて選別除去後プラスチック試料の Br 濃度を推定した。

$$Br_{screening} = \frac{\sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^{n_i^{after}} (Wt_i \times C_{i,j})}{\sum_{i=1}^6 (Wt_i \times n_i^{after})} \quad (1)$$

$Br_{screening}$: 選別除去後の Br 濃度 [ppm]

i : 6 部品群

Wt_i : 部品群 i の PP 重量 [kg]

$C_{i,j}$: 部品群 i の j 番目の試料の Br 濃度 [ppm]

n_i^{after} : 部品群 i の透過 X 線選別除去後の試料数 ($\leq 10,000$) [個]

6. 3. 2. 結果と考察

まず、部品別の Br 濃度を 10,000 回シミュレーションした部品群別の Br 濃度分布を測定値とともに図 2-6-6 に示した。シミュレーションの方が濃度分布幅は広く中央値が若干高い傾向があるものの、概ね実測データを再現することができた。

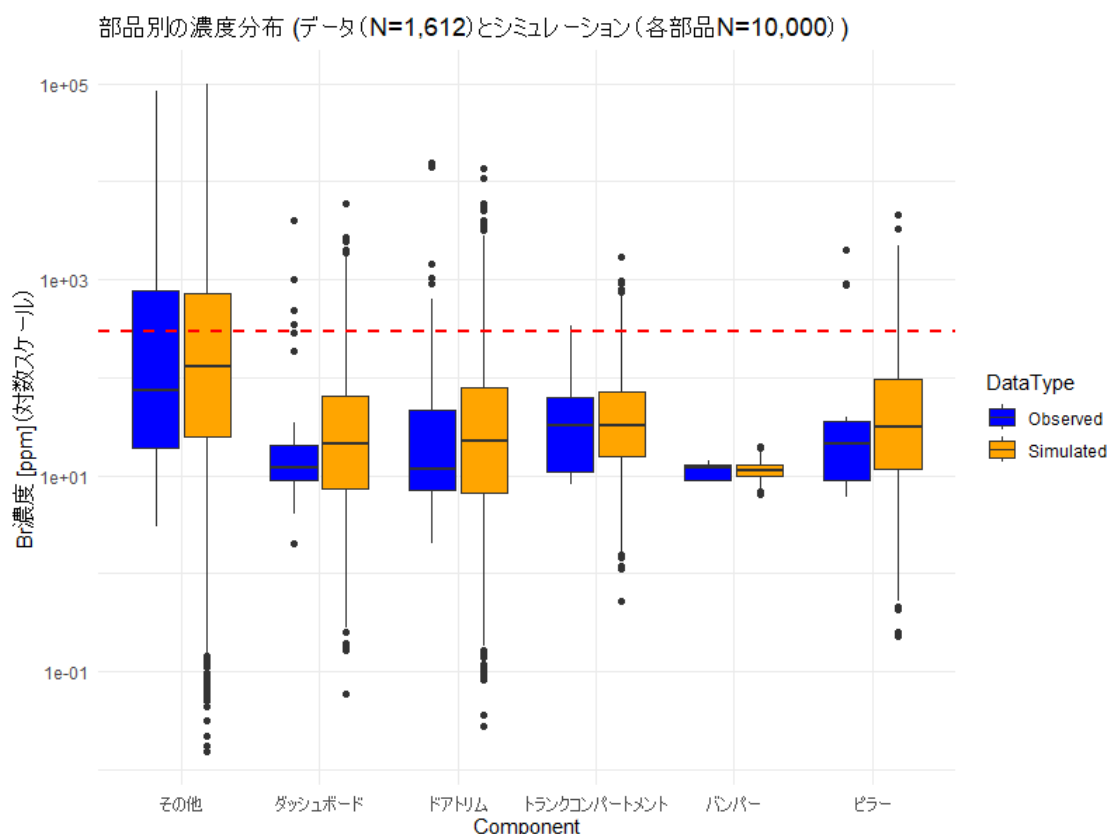


図 2-6-6 測定データとシミュレーションによる部品群別の Br 濃度分布
(Observed : 測定データ、Simulated : シミュレーションデータ、赤破線 : Br 濃度 300 ppm)

シミュレーションデータを用いた透過 X 線選別装置の選別除去後の回収プラスチック部品の Br 平均濃度推定結果について、5 部品以外の「それ以外」が 50%混入した場合の結果は図 2-6-7 のとおりである。透過 X 戦による選別除去がない時の平均 377ppm から、選別除去を行うことで 169 ppm まで 55%削減することができた。

また、5 部品以外の「それ以外」の混入割合を変化させた時の Br 平均濃度推移は図 2-6-8 のとおりである。透過 X 線による選別除去を行わない場合、回収候補 5 部品重量に対する「それ以外」部品の混入割合が 4 割を超えてくると Br 平均濃度は 300ppm を超えることが確認された。一方、本実証の透過 X 線による選別除去を行うことで、仮に 5 部品と等量の「それ以外」部品が混入したとしても 300ppm 以下に抑制できることが明らかとなった。また、POPs 規則における PBDEs の UTCである 200ppm 相当の Br 濃度 150ppm の基準でみると、選別除去がない場合は「それ以外」部品の混入が 10%を超えると Br 濃度 150ppm を超える結果となった。対して、選別除去がある場合は混入割合

が 45%までであれば対応可能であることが明らかになった。

以上から、回収候補部品以外の意図せぬ混入割合がどの程度起こり得るのかの把握が今後必要ではあるものの、10,000 ppm 以上のプラスチック部品を 90%除去できれば、POPs 規則における PBDEs の LPC である 500ppm (Br 濃度でおよそ 300 ppm) を下回ることができることが確認された。

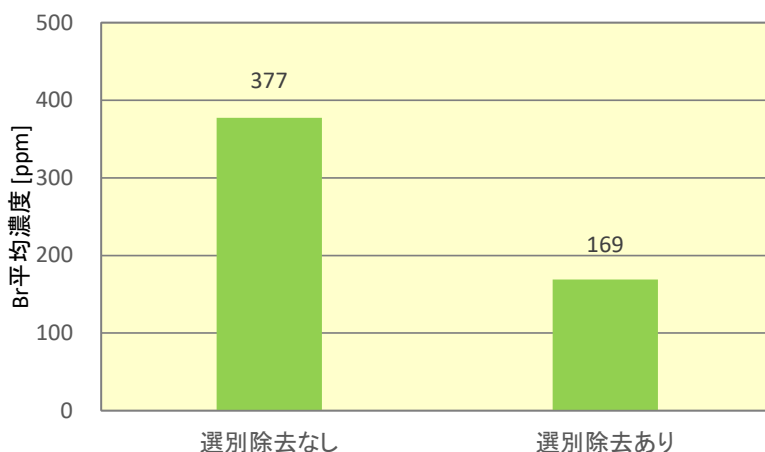


図 2-6-7 透過 X 線選別の有無によるプラスチック部品中 Br 平均濃度 [ppm] 比較
(5 部品以外の「それ以外」部品の混入割合 50% ケース)

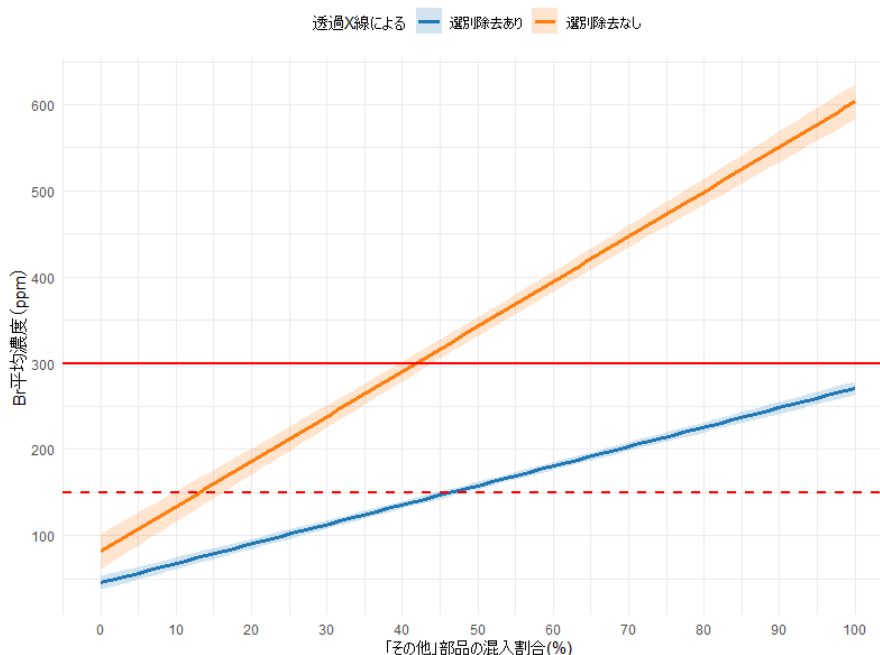


図 2-6-8²⁵ 透過 X 線選別の有無と「それ以外」部品の混入割合による Br 平均濃度 [ppm] の推移

²⁵ 着色部分: 95%信頼区間、赤線: Br 300 ppm (POPs 規則における PBDEs の LPC である 500ppm 相当)、赤破線: 150 ppm (POPs 規則における PBDEs の 2027 年以降の LPC である 200ppm 相当)

7. パーツ回収等のシステム化検討

7. 1. EU 圏内の各種規則等において考慮すべき事項

EU 圏内の ELV 規則案及び関連する規則等の規定を踏まえると、ELV 部品プラスチックから臭素含有プラスチックを選別するために参考となる事項は、ELV 規則案及び POPs 規則が考えられる。

ELV 規則案には、懸念物質に関しては、「存在を最小限に抑える」とするが、具体的な規定はない。ここでは、POPs 規則を参照する。

POPs 規則では、PBDEs について LPC が定められており、LPC は、POP-BDEs (テトラ BDE、ペンタ BDE、ヘキサ BDE、ヘプタ BDE、デカ BDE の合計) で、500ppm (2025 年末まで)、350ppm (2025 年末から 2027 年末まで)、200ppm (2027 年末以降) と段階的に厳しくなる。

7. 2. 部品プラスチックに含まれる臭素濃度分布と LPC の関係

第2章6. ELV から回収できる部品プラスチックのポテンシャル及び臭素濃度の推計で示したように、現状の POP-BDEs の LPC である 500ppm (臭素濃度でおよそ 300ppm) に対しては、特段の選別工程は不要である可能性が強いことがわかっている。

また、LPC として 200ppm (臭素濃度でおよそ 150ppm) が適用された場合においては、解体工程における対応 (プラスチックの材質表示に注意し、臭素系難燃剤が意図的に使用されているものを目視で選別する、繊維類等の二次選別を行うなど)、又は、破砕された部品プラスチックにおいては、プラスチックリサイクル入口で、透過 X 線選別装置により、10,000ppm 以上の部品プラスチックを 90% 除去出来れば満足できると考えられた。

LPC200ppm への対応について、臭素含有プラスチック (臭素濃度 10,000ppm 以上) の選別ポイント例を図 2-7-1 に示す。臭素含有プラスチックの選別は、解体段階 (選別ポイント1) 及びプラスチックリサイクラー段階 (選別ポイント2) が考えられ、選別ポイント2では、本実証事業で性能が実証され、社会実装可能である透過 X 線選別装置の活用が考えられる。なお、蛍光 X 線選別装置については、更なる改良を行うことが必要である。



図 2-7-1 臭素含有プラスチックの選別ポイント例

なお、POP-BDEs については、デカ BDE が、2017 年5月の POPs 条約第8回締約国会議において附属書 A(廃絶)の対象物質として追加されたことにより(デカ BDE 以外は 2009 年5月の第4回締約国会議で追加済み)、これ以降は、プラスチック中の臭素濃度が漸減傾向にあることが知られており、LPC 規制強化に併せて部品プラスチック中の POP-BDEs の濃度分布を確認し、再評価することも有効である。

7. 3. 臭素含有プラスチック回収を行う時の手間について

7. 3. 1. 解体段階

解体段階においては、資材表示の確認や付着する繊維類の分離などの精緻な二次解体作業を行うものとする。この際、併せて可搬型 XRF にて臭素含有量の確認も行うものとする。

本実証事業で行った「3. ELV 由来プラスチックと優先回収部品の選定」では、実際の解体業者において手間をかけた精緻な二次解体を行っており、この結果をもとに、解体工程(一次解体+二次解体)における人件費概算を試算した。なお、一次解体の工法には、手解体とニブラ解体があるので、双方について試算した。また計算方法や人件費単価については、既往報告書との比較ができるように、これらと同様とした²⁶。

試算結果を表 2-7-1 に示す。これによると、加重平均では手解体において 115 円/kg、ニブラ解体において 49 円/kg となった。この単価は、既往報告書における試算単価である平均作業コスト 57.3 円/kg²⁷及び 30 円(バンパー異物除去)、50 円/kg(PP 内装品)²⁸と比較すると、ニブラ解体を行う場合はほぼ同等であり、手解体を行う場合は2倍程度であった。ニブラ解体がより廉価であるが、回収量は手解体の8割弱である。

表 2-7-1 解体段階におけるコストの試算結果

回収パーツ	回収時間(分/kg) ※1		人件費単価(円/h)	作業コスト(円/kg)		1台あたり平均重量(kg/台)	
	一次手解体	一次ニブラ解体		一次手解体	一次ニブラ解体	一次手解体	一次ニブラ解体
インストルメンタルパネル	6.81	2.31	2000	225	76	7.19	3.47
ドアパネル	3.17	1.63		105	54	6.63	5.89
バンパー	1.73	0.86		57	28	5.78	5.45
トランクコンポーネント	2.09	2.22		69	73	2.49	2.58
ピラー	1.81	2.08		60	69	3.05	2.03
荷重平均(円/kg)	—	—	—	115	49	—	—

※1：図1-3-36に示す回収効率の逆数

※2：一次解体工法ごとの1台あたり平均重量による荷重

7. 3. 2. プラスチックリサイクラー段階

プラスチックリサイクラー段階において臭素含有プラスチックを選別するために、透過 X 線選別装置²⁹を導入することとし、その場合の再生プラスチック重量あたりに与える影響を概算した。概算結果

²⁶ 既往報告書では、コストとして人件費のみを計上しており、使用する機材やユーティリティ費用(水道、電気等)は見込んでいない。

²⁷ 環境省委託事業「平成 26 年度低炭素型 3R 技術・システム実証事業(自動車又は自動車部品に含有されるレアメタル等有用金属、ガラス、プラスチックの事前選別、高度選別等によるリサイクルの促進)」業務報告書(平成 27 年 2 月 一般社団法人日本 ELV リサイクル機構)

²⁸ 環境省委託事業「平成 27 年度低炭素型 3R 技術・システム実証事業(動静脈の連携による自動車樹脂部品リサイクルスキームの構築)」(平成 28 年 2 月 いその株式会社)

²⁹ 本実証事業では、蛍光 X 線選別装置についても開発、実証を行っているが、改良の必要があり、装置価格の設定が困難であったことから、ここでは社会実装可能である透過 X 線選別装置のみでの試算を行った。

を表 2-7-2 に示す。左は、年間取扱台数 8,000 台程度の事業者を想定した。処理量に対して選別装置の能力が過剰である。右は、年間取扱台数 16,000 台程度の事業者を想定した試算であり、処理量と選別装置処理能力がバランスしたケースである。プラスチック処理量あたり費用をみると、前者では 22 円/kg、後者では、11 円/kg となる。スケール効果が大きいことがわかる。

表 2-7-2 透過 X 線選別装置を導入した場合の増額コスト概算（想定による試算）

項目	規格等	単位	備考	項目	規格等	単位	備考
透過X線選別装置	40,000,000	円	1系列のみ,税込み	透過X線選別装置	40,000,000	円	1系列のみ,税込み
同上処理能力	4,000	kg/日		同上処理能力	4,000	kg/日	
リサイクルの処理能力	8,000	台/年		リサイクルの処理能力	16,000	台/年	
年間稼働日数	200	日	200日稼働	年間稼働日数	200	日	200日稼働
日取扱い台数	40	台		日取扱い台数	80	台	
一台当たりブラ量	60	kg	軽自動車	一台当たりブラ量	60	kg	軽自動車
内処理対象量	51.3	kg	二次解体での選別率：90% 破碎段階での歩留まり：95%	内処理対象量	51.3	kg	二次解体での選別率：90% 破碎段階での歩留まり：95%
日要処理量	2,052	kg		日要処理量	4,104	kg	
年間処理量	410,400	kg		年間処理量	820,800	kg	
機器の償還期間	7	年		機器の償還期間	7	年	
借入金利	1.5	%		借入金利	1.5	%	
年間返済額	6,000,000	円		年間返済額	6,000,000	円	
運転管理費	3,000,000	円	補修費含む	運転管理費	3,000,000	円	補修費含む
年間費用	9,000,000	円	年間返済額＋運転管理費	年間費用	9,000,000	円	年間返済額＋運転管理費
処理量当たり費用	22	円	年間経費/年間処理量	処理量当たり費用	11	円	年間経費/年間処理量

7. 3. 3. まとめ

以上の試算から、臭素含有プラスチックを選別する場合、解体段階で行うならば、一次解体をニブラで行うと回収量は少なくなるが、精緻解体による手間の増加は少ないと考えられた。一方、一次解体を手解体で行うと、回収量は増えるが手間が増加する可能性が考えられた。

また、プラスチックリサイクラー段階で本実証事業で実証した選別装置を整備・運用すると、最適な事業規模（選別装置処理能力と取扱量がバランスする）であると、11 円/kg 程度の費用増になることが示唆された。

以上を整理すると、臭素含有プラスチックの選別については、解体段階の二次解体で行うと、一次解体でニブラ使用する場合は手間が大幅に増加する可能性は少ないと考えられ、可搬型XRFの整備・運用により適切な品質管理が可能となる可能性が考えられた。

一方、プラスチックリサイクラー段階では、複数の解体業者から破碎された部品プラスチックを受け入れる状況がある場合は、選別装置の導入による全量検査は品質確保の観点から有効であると考えられた。

なお、既往調査報告書によると、リサイクル素材を原料としたときの販売単価は 237.1-249.1 円/kg³⁰とされる。これを踏まえると、選別装置導入に際して必要となる費用11円/kg は販売価格に対して 4-5%程度と小さくないことに留意が必要である。

³⁰ 環境省委託事業「平成 27 年度低炭素型 3R 技術・システム実証事業（動静脈の連携による自動車樹脂部品リサイクルスキームの構築）」（平成 28 年 2 月 いそ株式会社）

7. 4. 環境影響の低減

7. 4. 1. 低減効果の概要

本実証事業により開発した選別装置による環境影響の低減効果は、POP_sの拡散・汚染リスクの低減、マテリアルリサイクルへの転換によるCO₂の削減、枯渇資源利用量の削減が想定される。概念図を図 2-7-2 に示す。

【環境影響の低減効果】

- ① 自動車リサイクルプロセスから有害物質 (POP_s) を除去して、POP_s を分解できることが実証されている高温熱分解等の技術を用いて適正処理することで有害物質の拡散及び環境汚染を防止できる
- ② すべてマテリアルリサイクルになるため、従来の ASR 焼却廃熱からのサーマルリサイクルプロセスに比べ、プラスチック燃焼由来の温室効果ガスである二酸化炭素排出量を削減
- ③ Car -to-Car 水平リサイクルによって、プラスチック原料である枯渇資源であるナフサの利用量を削減

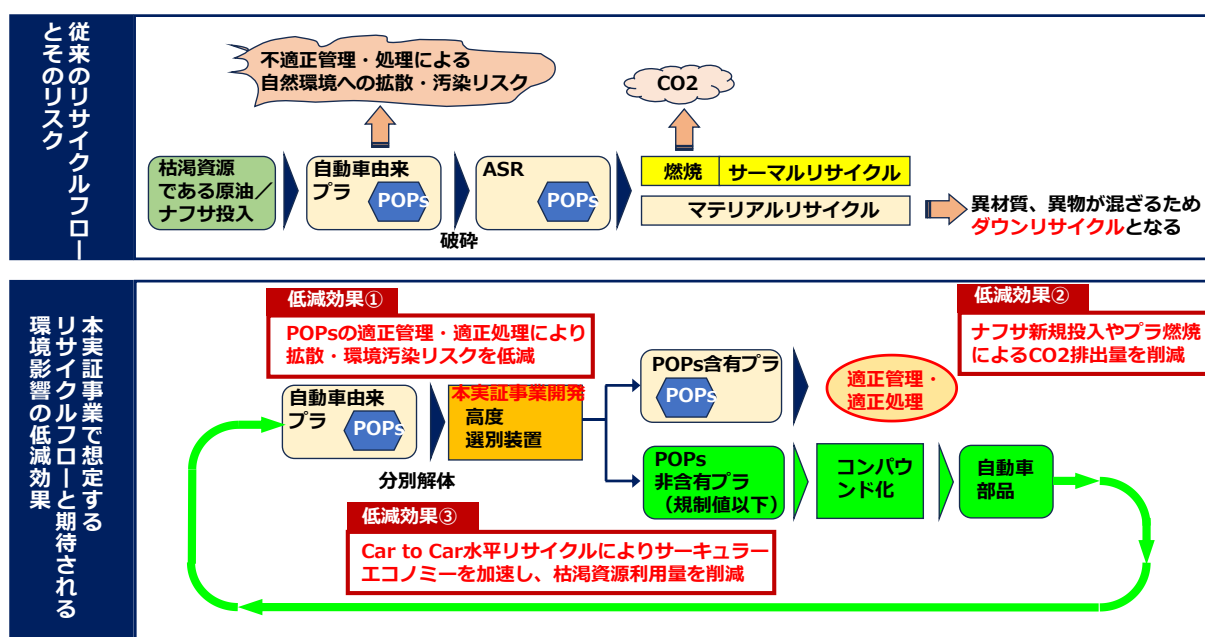


図 2-7-2 本実証事業想定フローにおける環境影響の低減効果の概念

7. 4. 2. CO₂削減効果の試算

6. ELV から回収できる部品プラスチックのポテンシャル及び臭素濃度の推計結果を踏まえ、自動車由来プラスチック(PP)の二酸化炭素削減効果を試算した(表 2-7-3)。

推計では、解体効率＝経済性を考慮し部品重量が重い 5 部品中の PP を対象とし、推定回収量 7.2 万 ton/年(2030 年)から 5.8 万 ton/年(2050 年)としている。このプラスチック(PP)燃焼由来及びバージン材(PP)製造由来の二酸化炭素排出量から POPs選別プロセスで必要となる消費電力由来の二酸化炭素排出量を差し引き、二酸化炭素削減量を試算した。なお、材料や回収品の輸送に係る二酸化炭素削減は比較ケースと代替ケースで同等として考慮しないものとした。

試算の結果、本実証事業で想定する自動車リサイクルプロセスでは従来プロセスと比べて、2030 年で約 24.5 万トン、2050 年で約 19.8 万トンの二酸化炭素排出量が見込まれた。

表 2-7-3 自動車由来プラスチック (PP) の二酸化炭素削減効果試算結果

項目		根拠・計算式	試算結果	
			2030 年	2050 年
条件	マテリアルリサイクル量	6. 2. 2. 結果と考察	7.2 万 t/年	5.8 万 t/年
	CO ₂ 排出原単位	PP 製造 : 1.483tCO ₂ /t ^{*2} 、PP 燃焼 : 2.55tCO ₂ /t ^{*2} 、 電力消費 : 0.000422tCO ₂ /kWh ^{*3}		
CO ₂ 削減量試算	バージン材製造 (A)	マテリアルリサイクル量 × 歩留率 89.5% ^{*2} × 1.483tCO ₂ /t	95,564 tCO ₂ /年	76,982 tCO ₂ /年
	サーマルリサイクル (B)	マテリアルリサイクル量 × 2.55tCO ₂ /t	183,600 tCO ₂ /年	147,900 tCO ₂ /年
	マテリアルリサイクル (C)	マテリアルリサイクル量 × 電力消費原単位 ^{*2} 1,103kWh/t × 0.000422tCO ₂ /kWh	33,513 tCO ₂ /年	26,869 tCO ₂ /年
	合計	(A) + (B) - (C)	245,651 tCO ₂ /年	198,013 tCO ₂ /年

*1 「一般にバンパー6kg/台、回収可能な内装部品 10kg 程度」(*2 報告書)

*2 平成27年度低炭素型3R 技術・システム実証事業(動静脈の連携による自動車樹脂部品リサイクルスキームの構築) 報告書(平成 28 年 2 月 いその株式会社)

*3 電気事業者別排出係数一覧(令和 7 年度提出用代替値)

(環境省 HP:<https://policies.env.go.jp/earth/ghg-santeikohyo/calc.html>)

7. 5. 臭素選別装置の社会実装の可能性及び課題

本実証事業で実証した透過 X 線選別装置については、既に社会実装可能なレベルで完成しており、POPs 規制による PBDEs の LPC を前提にすると、並行して実施した ELV の解体試験やシミュレーションの結果に照らして、10,000ppm の選別が確実に可能となる点で、その有効性は高いと考えられる。

一方で、本実証事業で実証された臭素選別に関する課題としては、次の点があげられる。

- ① ELV プラスチックを取り扱うプラスチックリサイクラー又はコンパウンダーの事業規模と整合した処理能力の装置とすることにより、導入コストの最適化が可能となる。今後、多様な事業規模に応じた処理能力を持つ装置の製作が望まれる。
- ② 今後、POPs 規則によりより低い濃度の規制基準が適用されることを想定すると、さらに低い濃度の検知が必要である。このため、透過 X 線選別における検知濃度をさらに低くすること、及び本実証事業で実証された低濃度の検知ができる蛍光 X 線センサーの搭載を検討する等の技術開発が望まれる。

さらに、懸念物質制御の視点から、ELV から回収された部品プラスチックの高度な用途への再利用に際しては、臭素系難燃剤以外の POPs 等の規制物質への対応や、添加物質等に由来する再生プラスチック加工段階での課題もある。規制物質及びこれらの候補物質に関しては、含有量に関する継続的なモニタリングと対策の検討が有効であり、これらを含めた総合的な取り組みが必要と考えられる。

付録 A 使用済自動車から回収したプラスチック部品の化学分析

1. 分析の対象とした部品プラスチック

分析試料の選定にあたっては、以下の点を考慮した。

- 1) **年代別の違い** :法規制の変遷や添加剤技術の変化を考慮するため、製造年の異なる複数の車両から部品を回収する。
- 2) **パーツ別の違い** :車両内部や外装等、用途の異なる部品で使用する樹脂材料が異なるため、主要部位(バンパー、インテリア、電装部品等)を選定する。
- 3) **実用上の頻度** :リサイクル工程で大量に発生する可能性の高い部品を優先する。

年代別の違いについては、製造年に基づき、国産車を以下の三世代に分類した。

- ・ **第 1 世代(～2005 年)** :2005 年までに製造された車
- ・ **第 2 世代(2006 年～2016 年)** :2006 年から 2016 年までに製造された車
- ・ **第 3 世代(2017 年～)** :2017 年以降に製造された車

この分類の根拠は、GADSL が 2005 年に策定され、以降の車両では規制物質の管理が強化されたことにある。2006 年以降の車両では、GADSL の適用により規制対象物質の使用が制限されるようになり、規制対応の変遷を反映するため、第 2 世代を 2006 年～2016 年とした。

2017 年以降を第 3 世代とした理由は、POPs 条約や REACH 規則の改正により、臭素系難燃剤を含む特定化学物質の規制がさらに強化された時期にあたるためである。特に、DecaBDE が 2017 年に POPs 条約の附属書 A(廃絶)に追加され、これにより欧州をはじめとする各国で使用禁止が進んだ。この規制強化は、自動車業界における材料選定にも影響を与えたと考えられる。また、日本国内においても、化審法や RoHS 指令の改正が行われたタイミングであり、自動車メーカーがより厳格な化学物質管理を進めた時期と重なる。これらの要因を踏まえ、2017 年以降の車両を第 3 世代と位置付けた。

パーツ別の違いについては、実際の回収可能量等を見込み、バンパー、ドアパネル、トランクコンパートメント、ピラー、インストルメントパネルの 5 部位を対象とした。これらはリサイクル工程で比較的大量に発生する部品であり、再生プラスチックとしての利用可能性や影響を検証する上で重要と考えられる。

2. 化学分析の方法及び結果

2. 1. 分析手順

本分析では、使用済自動車から回収したプラスチック部品に含まれる規制対象物質を対象とし、成分に応じた分析手法を適用する。規制対象物質は、ハロゲン(臭素 Br、塩素 Cl、フッ素 F)を含むものと含まないものに大別し、それぞれに適した手順で分析を行う。手順の概略を図 A-2-1 に示す。

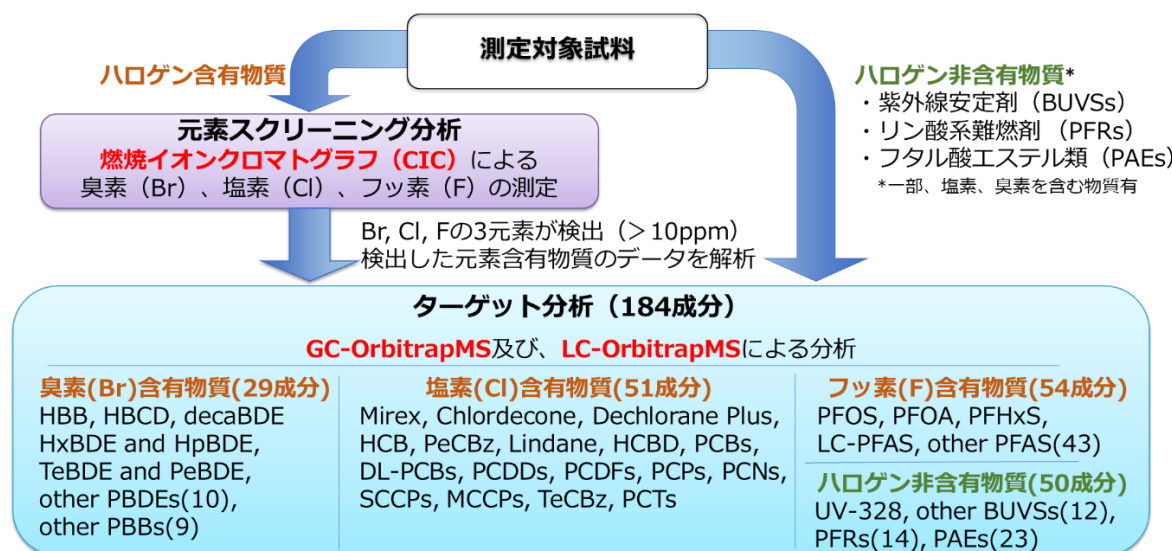


図 A-2-1 化学分析手順の概略

- ハロゲン含有物質の分析

燃焼イオンクロマトグラフ (Combustion Ion Chromatography、以下、「CIC」という。)による元素スクリーニングを実施し、10ppm を閾値としてハロゲン含有の有無を判定する。

ハロゲンが相対的に高濃度で検出された試料については、Gas Chromatography-Orbitrap Mass Spectrometry (以下、「GC-Orbitrap MS」という。)または Liquid Chromatography-Orbitrap Mass Spectrometry (以下、「LC-Orbitrap MS」という。)によるターゲット分析を実施する。

- ハロゲン非含有物質の分析

BUVS 等のハロゲンを含まない規制対象物質については、CIC による元素スクリーニングでは検知が困難であることから、試料を選定した後、GC-Orbitrap MS または LC-Orbitrap MS によるターゲット分析を実施する。

2. 2. 分析手法の概略と測定条件

CIC は、試料を高温燃焼させ有機・無機成分を完全分解した後、生成されたガスを吸収液に捕集し、ハロゲンや硫黄をイオンの形で溶解する分析手法である。CIC の概略を図 A-2-2 に示す。

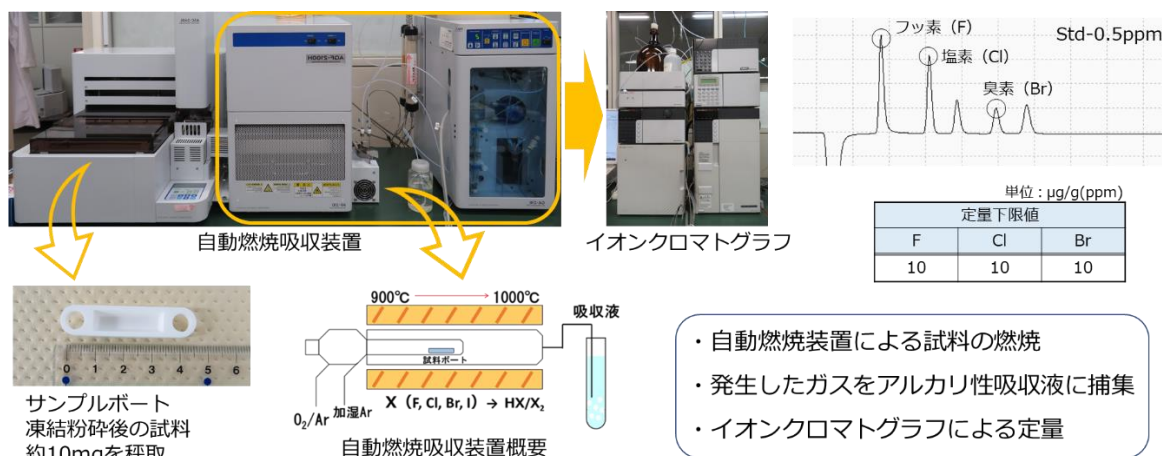


図 A-2-2 燃焼イオンクロマトグラフの概略

CIC の測定条件は、以下のとおりである。

- 自動燃焼装置の測定条件

装置: AQF-2100H (日東精工アナリテック株式会社)

燃焼温度: Inlet 900°C、Outlet 1,000°C

ガス流量: アルゴン 200mL/min
酸素 400mL/min

吸収液: 水酸化ナトリウムと過酸化水素及びヒドラジンの混合水溶液

- イオンクロマトグラフの測定条件

装置: HIC-20Asp (株式会社島津製作所)

カラム: 分離カラム (Shim-pack IC-SA2)
保護カラム (Shim-pack IC-SA2(G))

溶離液: 14mM-NaHCO₃
0.70mM-Na₂CO₃

溶離液流量: 1.0mL/min

カラム温度: 40°C

検出器: 電気伝導度

注入量: 100 μ L

Orbitrap MS は、Thermo Fisher Scientific 社が開発したフーリエ変換型質量分析装置 (FT-MS) であり、Orbitrap と呼ばれる特殊な電場を利用したイオントラップ技術を採用することで、広範な質量範囲において卓越した高分解能と高質量精度を実現する。従来の選択的イオンモニタリング (SIM) や多重反応モニタリング (MRM) と比較し、測定回数を大幅に削減しながら、多種類の化合物を高感度

で検出することが可能である。また、新たな規制物質が追加された場合でも、過去の測定データを再解析することで、対象物質の存在を迅速かつ効率的に評価できる。本分析における Orbitrap MS の分析手順を図 A-2-3 に示す。

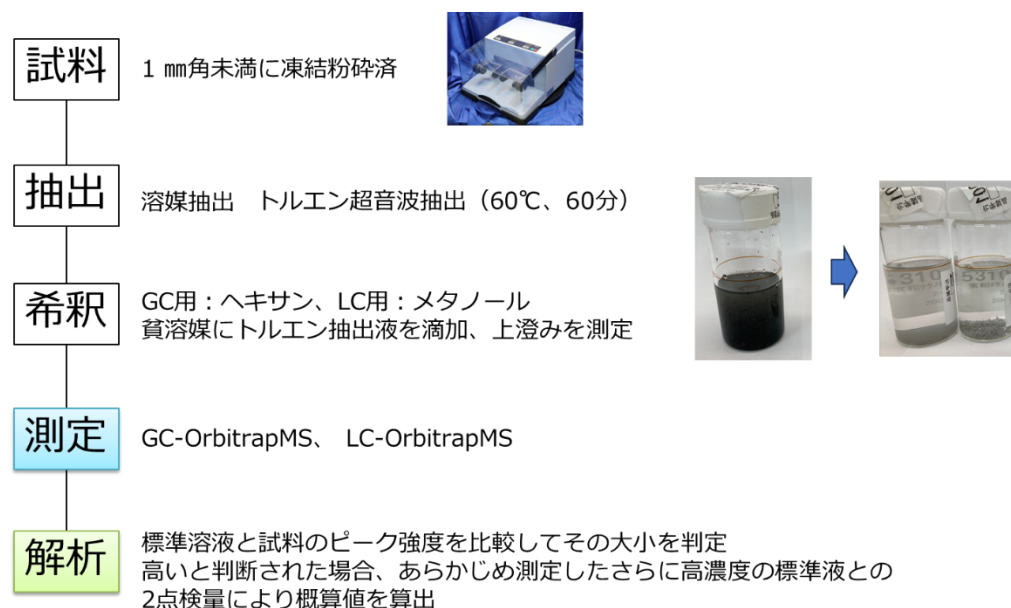


図 A-2-3 Orbitrap MS の分析手順

GC-Orbitrap MS 及び LC-Orbitrap MS の測定条件は、以下のとおりである。

- GC-Orbitrap MS 測定条件
 - 条件1 NCI(15m カラム)
 - GC: DB-5MS 長さ 15m、内径 0.25 mm、膜厚 0.1 μ m
100℃ (1min) $\rightarrow$ 40℃/min $\rightarrow$ 300℃ (6min)
スプリットレス注入 (280℃)、キャリアガス (He) 流量 1mL/min
 - MS: 測定範囲 (m/z) 70~1,000
イオン化電圧 120eV、イオン源温度 200℃
測定速度 7spectra/sec、分解能 60,000FWHM
 - 測定対象:
塩素含有物質 SCCPs 及び MCCPs (塩素数 6~11)
 - 条件2 EI(15m カラム)
 - GC: DB-5MS 長さ 15m、内径 0.25 mm、膜厚 0.1 μ m
100℃ (2min) $\rightarrow$ 20℃/min $\rightarrow$ 320℃ (10min)
スプリットレス注入 (260℃)、キャリアガス (He) 流量 1mL/min
 - MS: 測定範囲 (m/z) 80~1,000
イオン化電圧 70eV、イオン源温度 300℃
測定速度 7spectra/sec、分解能 60,000FWHM
 - 測定対象:

臭素含有物質	PBDEs、PBBs
塩素含有物質	PCTs、SCCPs 及び MCCPs (塩素数 4~5)
ハロゲン非含有物質	PFRs

－ 条件3 EI(30m カラム)

GC: DB-5MS 長さ 30m、内径 0.25 mm、膜厚 0.25 μ m

80°C (5min) → 10°C/min → 320°C (10min)

スプリットレス注入 (280°C)、キャリアガス (He) 流量 1mL/min

MS: 測定範囲 (m/z) 80~1,000

イオン化電圧 70eV、イオン源温度 300°C

測定速度 7spectra/sec、分解能 60,000FWHM

測定対象:

塩素含有物質	Mirex (Dechlorane)、Dechlorane Plus、HCB、 PeCBz、Lindane、HCBd、PCBs、DL-PCBs、 PCDDs、PCDFs、PCPs、PCNs、TeCBz
ハロゲン非含有物質	PAEs

• LC-Orbitrap MS 測定条件

－ 条件

LC: カラム: ACQUITY UPLC BEH C18 長さ 100 mm、内径 2.1 mm、粒径 1.7 μ m

移動相: A 2 mM 酢酸アンモニウム水溶液、B メタノール

流量: 0.3 mL/min (グラジエント条件)

MS: イオン化法 ESI-POSITIVE/NEGATIVE

測定範囲 (m/z): 100~1500

スプレー電圧: 3500 / 2500 V、キャピラリー温度: 250°C、脱溶媒温度: 400°C

分解能: 60,000 FWHM

測定対象1 (ESI-POSITIVE):

ハロゲン非含有物質	UV-328、Other BUVs、 PFRs (CAS 番号: 545-55-1 のみ)
-----------	--

測定対象2 (ESI-NEGATIVE):

臭素含有物質	HBCD
塩素含有物質	Chlordecone
フッ素含有物質	PFOS、PFOA、PFHxS、LC-PFCAs、other PFAS

2. 3. 混合検体の調製

本分析で対象とする使用済自動車の基本情報を表 A-2-1(a)に、対象パーツの詳細を表 A-2-1(b)に示す。回収した部品プラスチックは事前に 5mm 以下に粉砕し、年代別及びパーツ別に等量混合して約 10g の均一試料として調製した。さらにこれをレッチェ製 MM400 を用いて凍結粉砕し、粒径 1mm 角未満に均一化した後、分析に供した。なお、一部の車種においてトランクコンパートメントの回収が不可能であったため、第 1 世代及び第 3 世代のトランクコンパートメント試料は、5 台分を混合試料として調製した。以下、当該の合計 15 検体を「混合検体」という。

混合検体から特定の規制対象物質が検出された場合には、混合前の試料に遡及し、再度ターゲット分析を実施するため、混合前の試料についても適切に残余分を確保する。

表 A-2-1 分析対象とする使用済自動車

(a) 車両の基本情報（年代、メーカー、車種）

世代	車両の基本情報		
	年式	製造社	車種
第 1 世代	2002 年	A 社	Car01
	2004 年	B 社	Car02
	2005 年	C 社	Car03
	2005 年	C 社	Car04
	2005 年	D 社	Car05
	2005 年	E 社	Car06
第 2 世代	2008 年	F 社	Car07
	2009 年	A 社	Car08
	2009 年	G 社	Car09
	2009 年	E 社	Car10
	2011 年	A 社	Car11
	2013 年	F 社	Car12
第 3 世代	2017 年	F 社	Car13
	2017 年	G 社	Car14
	2018 年	G 社	Car15
	2018 年	G 社	Car16
	2021 年	F 社	Car17
	2024 年	F 社	Car18

(b) パーツの詳細

バンパー
ドアパネル
トランクコンパートメント
ピラー
インストルメントパネル

2. 4. 化学分析の結果

CIC による元素スクリーニングの結果を表 A-2-2 に示す。

また、GC-Orbitrap MS 及び LC-Orbitrap MS によるターゲット分析の結果については、対象物質の特性に応じて以下に分類し、それぞれの結果を示す。

- 表 A-2-3:臭素含有物質
- 表 A-2-4:塩素含有物質
- 表 A-2-5:フッ素含有物質 (PFAS)
- 表 A-2-6:ハロゲン非含有物質

なお、個別車両の分析においては、CIC スクリーニング結果及び分析費用を踏まえ、分析対象部位をバンパー及びインストルメントパネルの 2 部位に限定している。

また、分析感度の制約により、一部の物質では他成分と比較して定量下限値が相対的に高く設定されている場合がある。表 A-2-3 から表 A-2-6 に示すターゲット分析結果では、定量下限値を超える濃度が検出された値について、視認性向上のため黄色でハイライトしている。

表 A-2-2 元素スクリーニング結果
(a) 混合検体

試料名			測定結果 (ppm)		
			F	Cl	Br
第1世代 (2005年以前の年式)	バンパー	6台混合	37	170	<10
	ドアパネル	6台混合	19	43	<10
	トランクコンパートメント	5台混合	<10	47	<10
	ピラー	6台混合	21	30	<10
	インストルメントパネル	6台混合	57	150	<10
第2世代 (2006～2016年の年式)	バンパー	6台混合	39	83	<10
	ドアパネル	6台混合	14	55	<10
	トランクコンパートメント	6台混合	<10	59	<10
	ピラー	6台混合	15	37	<10
	インストルメントパネル	6台混合	52	49	<10
第3世代 (2017年以降の年式)	バンパー	6台混合	51	91	<10
	ドアパネル	6台混合	17	58	<10
	トランクコンパートメント	5台混合	13	35	<10
	ピラー	6台混合	15	21	<10
	インストルメントパネル	6台混合	55	42	<10
定量下限値			10	10	10

表 A-2-2 元素スクリーニング結果

(b-1) 個別車両 (第 1 世代)

試料名			測定結果(ppm)		
			F	Cl	Br
第1世代 (2005年以前の年式)	バンパー	Car01	28	170	<10
		Car02	32	130	<10
		Car03	24	110	<10
		Car04	24	120	<10
		Car05	42	490	<10
		Car06	16	130	<10
	ドアパネル	Car01	<10	170	<10
		Car02	<10	38	<10
		Car03	<10	55	<10
		Car04	20	31	<10
		Car05	<10	37	<10
		Car06	19	41	<10
	トランクコンパートメント	Car01	<10	100	<10
		Car02	<10	48	<10
		Car03	<10	51	<10
		Car04	<10	36	<10
		Car05	試料無し	試料無し	試料無し
		Car06	<10	20	<10
	ビラー	Car01	<10	32	<10
		Car02	16	45	<10
		Car03	27	38	<10
		Car04	51	31	<10
		Car05	<10	39	<10
		Car06	15	36	<10
	インストルメントパネル	Car01	41	72	<10
		Car02	39	230	<10
		Car03	41	66	<10
		Car04	90	550	<10
		Car05	53	110	<10
		Car06	36	42	<10
定量下限			10	10	10

(b-2) 個別車両 (第 2 世代)

試料名			測定結果(ppm)		
			F	Cl	Br
第2世代 (2006年～2016年の 年式)	バンパー	Car07	44	76	<10
		Car08	40	36	<10
		Car09	31	82	<10
		Car10	31	120	<10
		Car11	17	170	<10
		Car12	36	91	<10
	ドアパネル	Car07	16	63	<10
		Car08	<10	120	<10
		Car09	15	63	<10
		Car10	14	54	<10
		Car11	<10	55	<10
		Car12	45	35	<10
	トランクコンパートメント	Car07	11	52	<10
		Car08	<10	210	<10
		Car09	14	72	<10
		Car10	25	33	<10
		Car11	<10	73	<10
		Car12	<10	41	<10
	ビラー	Car07	<10	56	<10
		Car08	<10	95	<10
		Car09	43	33	<10
		Car10	43	32	<10
		Car11	<10	44	<10
		Car12	<10	34	<10
	インストルメントパネル	Car07	54	44	<10
		Car08	36	62	<10
		Car09	28	100	<10
		Car10	45	26	<10
		Car11	40	46	<10
		Car12	74	41	<10
定量下限			10	10	10

表 A-2-2 元素スクリーニング結果
(b-3) 個別車両 (第 3 世代)

試料名			測定結果(ppm)		
			F	Cl	Br
第3世代 (2017年以降の年式)	バンパー	Car13	87	25	<10
		Car14	44	240	<10
		Car15	26	110	<10
		Car16	60	180	<10
		Car17	47	62	<10
		Car18	54	49	<10
	ドアパネル	Car13	<10	54	<10
		Car14	48	84	<10
		Car15	22	30	<10
		Car16	24	210	<10
		Car17	<10	33	<10
		Car18	<10	39	<10
	トランクコンパートメント	Car13	<10	86	<10
		Car14	32	37	<10
		Car15	<10	29	<10
		Car16	24	32	<10
		Car17	試料無し	試料無し	試料無し
		Car18	<10	<10	<10
	ピラー	Car13	<10	38	<10
		Car14	49	48	<10
		Car15	11	34	<10
		Car16	24	43	<10
		Car17	<10	25	<10
		Car18	21	24	<10
	インストルメントパネル	Car13	62	80	<10
		Car14	68	97	<10
		Car15	27	28	<10
		Car16	27	28	<10
		Car17	71	41	<10
		Car18	75	42	<10
定量下限			10	10	10

表 A-2-3 ターゲット分析結果：臭素含有物質
(a) 混合検体

測定分析項目／試料名			第 1 世代					第 2 世代					第 3 世代				
			バンパー	ドアパネル	トランクコンパ ートメント	ピラー	インストルメン トパネル	バンパー	ドアパネル	トランクコンパ ートメント	ピラー	インストルメン トパネル	バンパー	ドアパネル	トランクコンパ ートメント	ピラー	インストルメン トパネル
分類	項目名	CAS 番号															
PBDEs	#47-TeBDE	5436-43-1	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	#99-PeBDE	60348-60-9	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	#154-HxBDE	207122-15-4	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	#153-HxBDE	68631-49-2	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	#183-HpBDE	207122-16-5	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	#197-OBDE	117964-21-3	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	MonoBDEs	101-55-3	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	DiBDEs	2050-47-7	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	TriBDEs	49690-94-0	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	TetraBDEs	40088-47-9	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PentaBDEs	32534-81-9	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	HexaBDEs	36483-60-0	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	HeptaBDEs	68928-80-3	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	OctaBDEs	32536-52-0	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	NonaBDEs	63936-56-1	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
	DecaBDE	1163-19-5	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
PBBs	MonoBBs	26264-10-8	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	DiBBs	27479-65-8	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	TriBBs	51202-79-0	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	TetraBBs	40088-45-7	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PentaBBs	56307-79-0	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	HexaBBs	36355-01-8	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	HeptaBBs	35194-78-6	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	OctaBBs	27858-07-7	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	NonaBBs	27753-52-2	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	DecaBB	13654-09-6	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
HBCDs	α -HBCD	134237-50-6	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	β -HBCD	134237-51-7	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	γ -HBCD	134237-52-8	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10

(b) 個別車両（バンパー、インストルメントパネルのみ）

測定分析項目／試料名			第 1 世代												第 2 世代												第 3 世代												
			バンパー						インストルメントパネル						バンパー						インストルメントパネル						バンパー						インストルメントパネル						
分類	項目名	CAS 番号	Car01	Car02	Car03	Car04	Car05	Car06	Car01	Car02	Car03	Car04	Car05	Car06	Car01	Car02	Car03	Car04	Car05	Car06	Car01	Car02	Car03	Car04	Car05	Car06	Car01	Car02	Car03	Car04	Car05	Car06	Car01	Car02	Car03	Car04	Car05	Car06	
PBDEs	#47-TeBDE	5436-43-1	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10		
	#99-PeBDE	60348-60-9	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10		
	#154-HxBDE	207122-15-4	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	
	#153-HxBDE	68631-49-2	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	
	#183-HpBDE	207122-16-5	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	
	#197-OBDE	117964-21-3	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	MonoBDEs	101-55-3	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	
	DiBDEs	2050-47-7	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	
	TriBDEs	49690-94-0	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	
	TetraBDEs	40088-47-9	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PentaBDEs	32534-81-9	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	
	HexaBDEs	36483-60-0	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	
	HeptaBDEs	68928-80-3	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	
	OctaBDEs	32536-52-0	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	
	NonaBDEs	63936-56-1	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	
	DecaBDE	1163-19-5	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	
PBBs	MonoBBs	26264-10-8	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10		
	DiBBs	27479-65-8	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10		
	TriBBs	51202-79-0	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10		
	TetraBBs	40088-45-7	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10		
	PentaBBs	56307-79-0	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10		
	HexaBBs	36355-01-8	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10		
	HeptaBBs	35194-78-6	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10		
	OctaBBs	27858-07-7	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10		
	NonaBBs	27753-52-2	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10		
	DecaBB	13654-09-6	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	
HBCDs	α-HBCD	134237-50-6	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10		
	β-HBCD	134237-51-7	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10		
	γ-HBCD	134237-52-8	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10		

表 A-2-4 ターゲット分析結果：塩素含有物質
(a) 混合検体

測定分析項目／試料名			第 1 世代					第 2 世代					第 3 世代				
			バンパー	ドアパネル	トランクコンパ ートメント	ピラー	インストルメン トパネル	バンパー	ドアパネル	トランクコンパ ートメント	ピラー	インストルメン トパネル	バンパー	ドアパネル	トランクコンパ ートメント	ピラー	インストルメ ントパネル
分類	項目名	CAS 番号															
Mirex (Dechlorane)		2385-85-5	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Chlordecone		143-50-0	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Dechlorane Plus	syn-	135821-03-3	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	anti-	135821-74-8	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
POP-PhCls	HCB	118-74-1	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PeCB	608-93-5	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Other PhCls	TCB-1234	634-66-2	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	TCB-1245	95-94-3	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	TCB-1235	634-90-2	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	TCB	12408-10-5	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30
Lindane		58-89-9	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
HCBd		87-68-3	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
PCBs	PCBs	1336-36-3	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50
	PCB 31	16606-02-3	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PCB 47	2437-79-8	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PCB 153	52663-72-6	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PCB 149	35065-27-1	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PCB 77	32598-13-3	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PCB 169	32774-16-6	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PCB 81	70362-50-4	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PCB 126	57465-28-8	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PCB 105	65510-44-3	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PCB 118	31508-00-6	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PCB 114	32598-14-4	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PCB 123	74472-37-0	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PCB 156	38380-08-4	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PCB 157	69782-90-7	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PCB 189	39635-31-9	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
PCDDs	OCDD	3268-87-9	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	2,3,7,8-TCDD	1746-01-6	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	1,2,3,7,8-PeCDD	40321-76-4	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10

表 A-2-4 ターゲット分析結果：塩素含有物質
(a) 混合検体

測定分析項目／試料名			第 1 世代					第 2 世代					第 3 世代				
			バンパー	ドアパネル	トランクコンパ ートメント	ピラー	インストルメン トパネル	バンパー	ドアパネル	トランクコンパ ートメント	ピラー	インストルメン トパネル	バンパー	ドアパネル	トランクコンパ ートメント	ピラー	インストルメ ントパネル
分類	項目名	CAS 番号															
	1,2,3,4,7,8-HxCDD	57653-85-7	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	1,2,3,6,7,8-HxCDD	34465-46-8	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	1,2,3,7,8,9-HxCDD	19408-74-3	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	35822-46-9	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
PCDFs	OCDF	39001-02-0	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	2,3,7,8-TCDF	51207-31-9	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	1,2,3,7,8-PeCDF	57117-41-6	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	2,3,4,7,8-PeCDF	57117-31-4	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	1,2,3,4,7,8-HxCDF	70648-26-9	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	1,2,3,6,7,8-HxCDF	57117-44-9	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	1,2,3,7,8,9-HxCDF	72918-21-9	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	2,3,4,6,7,8-HxCDF	60851-34-5	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	67562-39-4	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	55673-89-7	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
PCPs	Pentachlorophenol	87-86-5	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50
	Pentachloroanisole	1825-21-4	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
PCNs		70776-03-3	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
SCCPs		85535-84-8	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
MCCPs		85535-85-9	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
PCTs		61788-33-8	<200	<200	<200	<200	<200	<200	<200	<200	<200	<200	<200	<200	<200	<200	<200

(b) 個別車両（バンパー、インストルメントパネルのみ）

[illegible]

(b) 個別車両（バンパー、インストルメントパネルのみ）

[illegible]

表 A-2-5 ターゲット分析結果：フッ素含有物質																	
(a) 混合検体																	
測定分析項目／試料名			第 1 世代					第 2 世代					第 3 世代				
			バンパー	ドアパネル	トランクコンパ ートメント	ピラー	インストルメン トパネル	バンパー	ドアパネル	トランクコンパ ートメント	ピラー	インストルメン トパネル	バンパー	ドアパネル	トランクコンパ ートメント	ピラー	インストルメ ントパネル
分類	項目名	CAS 番号															
POP-PFASs	PFOS	1763-23-1	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFHxS	355-46-4	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFOA	335-67-1	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFNA (C9 PFCA)	375-95-1	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFDA (C10 PFCA)	335-76-2	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFUnDA (C11 PFCA)	2058-94-8	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFDoDA (C12 PFCA)	307-55-1	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFTrDA (C13 PFCA)	72629-94-8	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFTeDA (C14 PFCA)	376-06-7	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFHxDA (C16 PFCA)	67905-19-5	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFOcDA (C18 PFCA)	16517-11-6	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
PFSA	PFPrS	423-41-6	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFBS	375-73-5	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFPeS	2706-91-4	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFHpS	375-92-8	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFNS	68259-12-1	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFDS	335-77-3	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFDoS	120226-60-0	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
PFCA	PFPrA	422-64-0	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFBA	375-22-4	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFPeA	2706-90-3	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFHxA	307-24-4	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFHpA	375-85-9	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
PFESA	PFEESA	113507-82-7	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	9Cl-PF3ONS	756426-58-1	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	11Cl-PF3OUdS	763051-92-9	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
PFECAs	HFPO-DA	13252-13-6	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	ADONA	919005-14-4	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFMOPA	377-73-1	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFMOBA	863090-89-5	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	NFDHA	151772-58-6	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10

表 A-2-5 ターゲット分析結果：フッ素含有物質
(a) 混合検体

測定分析項目／試料名			第 1 世代					第 2 世代					第 3 世代				
			バンパー	ドアパネル	トランクコンパ ートメント	ピラー	インストルメン トパネル	バンパー	ドアパネル	トランクコンパ ートメント	ピラー	インストルメン トパネル	バンパー	ドアパネル	トランクコンパ ートメント	ピラー	インストルメ ントパネル
分類	項目名	CAS 番号															
FTSAs	4:2 FTSA	757124-72-4	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	6:2 FTSA	27619-97-2	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	8:2 FTSA	39108-34-4	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
FTCAs	6:2 FTCA	53826-12-3	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	8:2 FTCA	27854-31-5	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	10:2 FTCA	53826-13-4	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	3:3 FTCA	356-02-5	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	5:3 FTCA	914637-49-3	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	7:3 FTCA	812-70-4	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
PAPs	8:2 diPAP	678-41-1	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
FASAs	FBSA	30334-69-1	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	FHxSA	41997-13-1	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	FOSA	754-91-6	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	N-MeFOSA	31506-32-8	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	N-EtFOSA	4151-50-2	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
FASAAs	N-MeFOSAA	2355-31-9	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	N-EtFOSAA	2991-50-6	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
FASEs	N-MeFOSE	24448-09-7	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	N-EtFOSE	1691-99-2	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
FTOHs	4:2 FTOH	2043-47-2	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	6:2 FTOH	647-42-7	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	8:2 FTOH	678-39-7	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	10:2 FTOH	865-86-1	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10

(b) 個別車両（バンパー、インストルメントパネルのみ）

測定分析項目／試料名			第 1 世代												第 2 世代												第 3 世代												
			バンパー						インストルメントパネル						バンパー						インストルメントパネル						バンパー						インストルメントパネル						
分類	項目名	CAS 番号	Car01	Car02	Car03	Car04	Car05	Car06	Car01	Car02	Car03	Car04	Car05	Car06	Car01	Car02	Car03	Car04	Car05	Car06	Car01	Car02	Car03	Car04	Car05	Car06	Car01	Car02	Car03	Car04	Car05	Car06	Car01	Car02	Car03	Car04	Car05	Car06	
POP- PFASs	PFOS	1763-23-1	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10		
	PFHxS	355-46-4	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10		
	PFOA	335-67-1	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	
	PFNA (C9 PFCA)	375-95-1	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	
	PFDA (C10 PFCA)	335-76-2	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	
	PFUnDA (C11 PFCA)	2058-94-8	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFDoDA (C12 PFCA)	307-55-1	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFTTrDA (C13 PFCA)	72629-94-8	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFTeDA (C14 PFCA)	376-06-7	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFHxDA (C16 PFCA)	67905-19-5	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
PFOcDA (C18 PFCA)	16517-11-6	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
PFESAs	PFPrS	423-41-6	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFBS	375-73-5	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFPeS	2706-91-4	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFHpS	375-92-8	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFNS	68259-12-1	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFDS	335-77-3	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFDoS	120226-60-0	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
PFCAs	PFPrA	422-64-0	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFBA	375-22-4	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFPeA	2706-90-3	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFHxA	307-24-4	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFHpA	375-85-9	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
PFESAs	PFEESA	113507-82-7	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	9CI-PF3ONS	756426-58-1	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	11CI-PF3OUdS	763051-92-9	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
PFECAs	HFPO-DA	13252-13-6	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	ADONA	919005-14-4	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFMOPA	377-73-1	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	PFMOBA	863090-89-5	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	NFDHA	151772-58-6	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10

(b) 個別車両（バンパー、インストルメントパネルのみ）

[illegible]

表 A-2-6 ターゲット分析結果：ハロゲン非含有物質（定量下限値を超える濃度が検出された値は黄色マーカを付している）
(a) 混合検体

測定分析項目／試料名			第 1 世代					第 2 世代					第 3 世代				
			バンパー	ドアパネル	トランクコンパ ートメント	ピラー	インストルメン トパネル	バンパー	ドアパネル	トランクコンパ ートメント	ピラー	インストルメン トパネル	バンパー	ドアパネル	トランクコンパ ートメント	ピラー	インストルメ ントパネル
分類	項目名	CAS 番号															
POP-BUVS	UV-328	25973-55-1	19	<10	<10	<10	<10	24	<10	<10	<10	<10	31	<10	<10	<10	<10
Other BUVs	UV-320	3846-71-7	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	UV-327	3864-99-1	<10	<10	22	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	UV-350	36437-37-3	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	UV-326	3896-11-5	110	<10	27	<10	320	<10	63	100	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	UV-329	3147-75-9	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	UV-P	2440-22-4	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	UV-234	70321-86-7	67	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	UV-928	73936-91-1	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	UV-531	1843-05-6	<10	<10	170	25	27	15	<10	75	<10	<10	<10	84	330	250	<10
	UV-1084	14516-71-3	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	UV-1164	2725-22-6	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	UV-1577	147315-50-2	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
PFRs	TNPP	26523-78-4	<200	<200	<200	<200	<200	<200	<200	<200	<200	<200	<200	<200	<200	<200	<200
	TXP	25155-23-1	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	TCEP	115-96-8	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	TDBPP	126-72-7	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	TAPO	545-55-1	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	TIBP	126-71-6	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	TBP	126-73-8	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	TBEP	78-51-3	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20
	TEHP	78-42-2	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	TCPP	13674-84-5	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	17	<10	<10
	TDCPP	13674-87-8	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	TPP	115-86-6	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	EHDPP	1241-94-7	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	TMPP	1330-78-5	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
PAEs	DEHP	117-81-7	<30	54	60	53	81	<30	<30	<30	<30	63	<30	<30	<30	<30	<30
	BBP	85-68-7	<10	16	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	DBP	84-74-2	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30

表 A-2-6 ターゲット分析結果：ハロゲン非含有物質（定量下限値を超える濃度が検出された値は黄色マーカを付している）
(a) 混合検体

測定分析項目／試料名			第 1 世代					第 2 世代					第 3 世代				
			バンパー	ドアパネル	トランクコンパ ートメント	ピラー	インストルメン トパネル	バンパー	ドアパネル	トランクコンパ ートメント	ピラー	インストルメン トパネル	バンパー	ドアパネル	トランクコンパ ートメント	ピラー	インストルメ ントパネル
分類	項目名	CAS 番号															
	DIBP	84-69-5	<10	10	12	10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	DIPP	605-50-5	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	DHBP	71888-89-6	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50
	DHBP	68515-42-4	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	DPPm	84777-06-0	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30
	DMEP	117-82-8	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	DPP	131-18-0	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	NPIPP	776297-69-9	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	DHPm	68515-50-4	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	DHP	84-75-3	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	DHEP	68648-93-1	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	16	<10	<10	<10	<10	<10
	DHP(C6-10)	68515-51-5	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	DIDP	26761-40-0	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	DINP	28553-12-0	<50	<50	76	100	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50
	DNOP	117-84-0	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	DHP(C9-11)	68515-49-1	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	DHP(C8-10)	68515-48-0	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
	DCHP	84-61-7	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	13	<10	<10	<10	<10	<10
	DIHP	71850-09-4	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	TBPH	26040-51-7	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50

(b) 個別車両 (バンパー、インストルメントパネルのみ)

[illegible]

表 A-2-6 ターゲット分析結果：ハロゲン非含有物質（定量下限値を超える濃度が検出された値は黄色マーカを付している）
(b)個別車両（バンパー、インストルメントパネルのみ）

測定分析項目／試料名			第 1 世代												第 2 世代												第 3 世代												
			バンパー						インストルメントパネル						バンパー						インストルメントパネル						バンパー						インストルメントパネル						
分類	項目名	CAS 番号	Car01	Car02	Car03	Car04	Car05	Car06	Car01	Car02	Car03	Car04	Car05	Car06	Car01	Car02	Car03	Car04	Car05	Car06	Car01	Car02	Car03	Car04	Car05	Car06	Car01	Car02	Car03	Car04	Car05	Car06	Car01	Car02	Car03	Car04	Car05	Car06	
	DIBP	84-69-5	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10		
	DIPP	605-50-5	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10		
	DHBP	71888-89-6	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	
	DHBP	68515-42-4	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	
	DPPm	84777-06-0	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	
	DMEP	117-82-8	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	
	DPP	131-18-0	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	
	NPIPP	776297-69-9	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	
	DHPm	68515-50-4	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	
	DHP	84-75-3	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	DHEP	68648-93-1	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	50	<10	<10	<10	<10	<10	77	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	DHP(C6-10)	68515-51-5	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	
	DIDP	26761-40-0	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	
	DINP	28553-12-0	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	
	DNOP	117-84-0	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	
	DHP(C9-11)	68515-49-1	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	
	DHP(C8-10)	68515-48-0	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	
	DCHP	84-61-7	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	44	<10	<10	<10	<10	<10	68	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	
	DIHP	71850-09-4	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	
	TBPH	26040-51-7	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	

2. 5. 化学分析結果の評価

表 A-2-2 に示した元素スクリーニングの結果を以下に要約する。

- **臭素(定量下限値:10ppm)**
 - 混合検体(全 15 検体) :検出率 0%
 - 個別検体(全 88 検体) :検出率 0%
- **塩素(定量下限値:10ppm)**
 - 混合検体(全 15 検体) :検出率 100%(全検体で検出)
 - 第1世代 :最大値 170ppm、平均値 88ppm
 - 第2世代 :最大値 83ppm、平均値 57ppm
 - 第3世代 :最大値 91ppm、平均値 49ppm
 - 個別検体(全 88 検体) :検出率 100%(全検体で検出)
 - 第1世代 :最大値 550ppm、平均値 106ppm
 - 第2世代 :最大値 210ppm、平均値 69ppm
 - 第3世代 :最大値 240ppm、平均値 65ppm
- **フッ素(定量下限値:10ppm)**
 - 混合検体(全 15 検体) :検出率 87%(13 検体で検出)
 - 第1世代 :最大値 57ppm、平均値 34ppm
 - 第2世代 :最大値 52ppm、平均値 30ppm
 - 第3世代 :最大値 55ppm、平均値 30ppm
 - 個別検体(全 88 検体) :検出率 68%(60 検体で検出)
 - 第1世代 :最大値 90ppm、平均値 34ppm
 - 第2世代 :最大値 74ppm、平均値 33ppm
 - 第3世代 :最大値 87ppm、平均値 43ppm

臭素元素については全ての検体で不検出であった。

一方、塩素元素については、全世代を通じて検出されたものの、世代が進むにつれて濃度が低下する傾向が認められた。特に第 1 世代では平均濃度が他の世代より高く、最大 550ppm に達する検体も確認されており、旧世代の車両において塩素系化合物の使用頻度が高かった可能性を示唆している。これは、過去に塩素系添加剤や難燃剤が広く使用されていたことと整合する傾向であり、技術進展や規制強化により第 2 世代以降での使用が減少したことが反映された結果と考えられる。

フッ素元素は世代間で大きな差が見られず、検出率・濃度ともに各世代でおおむね均等に分布している。このことから、フッ素については車種や時期に特有の使用実態というよりも、解体・回収・粉砕の過程で混入した交差汚染である可能性が考えられた。

リサイクル適性の表示:印刷用の紙にリサイクルできます

この印刷物は、グリーン購入法に基づく基本方針における「印刷」に係る判断の基準にしたがい、印刷用の紙へのリサイクルに適した材料[Aランク]のみを用いて作製しています。