

平成 31 年度省 CO2 型リサイクル等設備技術実証事業

**低濃度白金族含有製品からの白金族濃縮及び
リサイクル技術・システムの実証**

報告書

**令和 2 年 2 月
株式会社フルヤ金属**

要約

ルテニウム（以下、Ruとする。）を含む白金族元素（以下、PGMとする。）等の希少金属の鉱山は供給量に限りがある上に、埋蔵地が偏在、地政学的にも安定供給に懸念があるケースが多い。また、HDD（HDメディア）、電解電極（以下、電極とする）、抵抗ペースト（以下、ペーストとする）において使用されているRuは基材に対して薄く塗られているという構造特性、及び酸に溶解しにくいというRu酸化物の物性特性上、HDメディア、電極、ペーストからのRu濃縮はコスト面・技術面から実現されておらず、Ruリサイクル技術の開発、循環利用の社会システムが確立されていない。

一方、RuはPGMの中で最も優れた特性（耐熱性、強度、化学安定性）を有していることから、今後電気・電子デバイスに必要な不可欠な材料として需要が伸びていくことが見込まれており、リサイクル技術の開発及び循環利用の社会システムの確立の必要性が高まってきている。近年はRuを含有するHDメディア、電極、ペーストの回収ポテンシャルが見出されていることに加え、既存技術を活用することで、従来散逸していたRuの回収が可能になると見込まれている。

そこで本実証では、既存技術活用によるHDD、電極、ペーストからの効率的なRuリサイクル実現の可能性と課題の明確化を目指した。更にHDD排出者及び解体事業者との調整によるHDD回収ルート拡大可能性検討や事業性評価を行うことで、Ruリサイクルの仕組み構築の可能性を検討した。

HDメディアからのRuリサイクルについては、アルミ溶解（全溶解）、表面溶解、電気パルスの3手法について、回収効率性の検証を行った。表面溶解手法では、まずガラスメディア、アルミメディアそれぞれの溶解条件の精査を行った。ガラスメディアについては、溶解溶液として酸混合溶液を使用し、酸により金属層を溶解することで膜剥離を行い、ガラスメディアからRuおよびPtが剥離することが確認された。アルミメディアについては、メディア表層にDLC層が存在し、溶液の浸透を妨害するために時間がかかることから、前処理としてアルミメディアを塑性加工し、DLC層に亀裂をいれることで、反応時間の短縮を図った。その後溶解溶液として酸溶液を使用し、金属層を溶解することで膜剥離を行った。剥離後のアルミメディアの表面を簡易XRFにて測定したところ、RuおよびPtが検出されなかったため、剥離に成功したと判断した。上記溶解条件の精査結果をもとに、アルミメディアを対象とした大規模試験を実施し、剥離が成功したことを確認した。

電気パルスに関しては、アルミメディアに対しては治具/HDD界面での固定位置での放電が起こり、中央部では電流痕が見られなかったものの、ガラスメディアに対しては電気パルスによるRu剥離が行えることが確認された。また、剥離条件については、電圧一定条件と比較して電圧変化条件による剥離が剥離面積、充電エネルギーの観点から効率的な剥離が可能であること、また倍電圧回路とBlumlein電源を比較し、剥離面積は大きく変わらないものの、Blumlein電源では消費エネルギーが少なく効率的な剥離が可能であることが確認された。

ペーストからのRuリサイクルについては、乾式試金法と直接酸溶解法の2手法について、回収効率性の検証を行った。乾式試金法において、ペースト中のRuはNbとの合金もしくは二酸化ルテニウムの形で存在しており、還元熔融により鉛鉛に濃縮することができた。鉛鉛からPbを

灰吹きにて除去しようとするルテニウム酸鉛が生成し Ru と Pb の分離が困難となったが、鉛鉛を硝酸で溶解することにより鉛除去と Ru 濃縮が可能となり、目標の Pb 品位 1%以下の Ru 濃縮物を得ることができた。また、Ru 収率は 103%であった。直接酸溶解法では、弗酸+硝酸法により効率的に鉛除去と Ru 濃縮ができ、目標の Pb 品位 1%以下の Ru 濃縮物を得ることができた。また、Ru 収率は 106%であった。

また、事業化に向けて、効率的に HDD を解体して HD メディアを回収できる技術を持つ解体事業者に廃 HDD を集約するための回収スキーム検討を実施した。廃 HDD の回収については、主に国内の再資源化処理業者・産廃処理業者からの回収、海外 HD メディアメーカーからの回収の 2 つのルートを検討した。海外メディアメーカーからのメディアスクラップ回収については、大きな回収ポテンシャルを有し、スクラップ品は使用済製品と比較してアルミメディア、ガラスメディアともに良好な状態であることが期待されるため、後の剥離工程との連携の観点からもメリットがあることが確認された。一方、海外からの回収ということで輸送費が高くなることが想定され、HD メディアの調達費をどのように削減していくかが課題となる。国内 HDD 回収業者（産廃事業者等）からの HDD 回収についても、国内の PC 向けで HDD400 万台（メディアで約 800 万枚）、含有貴金属は Ru8kg（約売価 800 万円）、Pt4kg（売価約 1400 万円）と、事業化に向けては国内流通量が少ないことも課題となり、事業化に向けては両ルートを活用した廃 HDD 回収が求められることになる。

HDD 調達～解体～剥離プロセス全体における採算性を試算したところ、事業全体での採算性確保が難しいことが確認された。HDD 調達費用、解体費用に対して HDD 部品の売却益、剥離後メディアの売却益が小さいため、採算性の確保に向けては、HDD 調達プロセスにおける輸送コストの削減、解体プロセスにおける大量処理実施による解体コストの削減等に向けた検討が必要となる。また、HDD の部品売却益については、鉄・非鉄（アルミ）の相場の不調によるものと思料され、相場の上昇に伴い部品売却益も増加することが期待される。なお、HD メディア調達～剥離～濃縮～精製プロセスにおける採算性については、濃縮 Ru、Pt の売価がメディアの調達コスト及び剥離、濃縮、精製コストを上回り、事業採算性が確保されることが確認された。試算の中で、表面溶解による剥離と比較した電気パルスによる剥離のコスト優位性も確認された。

CO2 削減効果については、本事業で実証した HDD 自動解体装置使用による HDD 解体に伴う CO2 排出量は 2,052kg-CO2/kg-Ru となり、現状 HDD 解体に使用されている破砕・選別機を使用した場合の CO2 排出量 6,035kg-CO2/kg-Ru より小さく、本実証プロセスによる CO2 削減効果が確認された。また、本事業で実証した工程による CO2 排出量は 1,320kg-CO2/kgRu（ガラスメディア/電気パルス）、336kg-CO2/kgRu（粉砕ガラス）、1,366kg-CO2/kgRu（アルミメディア/表面溶解）は、ベースラインにおける CO2 排出量 30,000kg-CO2/kg-Ru より小さくなり、本実証適用による CO2 削減効果が確認された。

本実証事業において、HD メディア、電極、ペーストからの効率的な Ru リサイクルの可能性が示されたものの、事業化に向けてはいくつかの課題が残されている。HD メディアからの Ru リサイクルにおいては、HDD 調達量の確保、調達・解体プロセスにおけるコスト削減、解体、剥離プロセスにおける成果物売却先の検討、剥離物及び溶解液の精製工程へのライン間の調整、表面剥離前処理の自動化および電気パルスの自動化、スケールアップ設備設計の検討等が挙げられ

る。電極からの Ru リサイクルについては、剥離後の貴金属回収量の詳細分析の実施、電気パルス自動化及びスケールアップ設備設計の検討が必要となる。最後に、ペーストからの Ru リサイクルについては、処理対象物の組成（主に Cr の有無）に応じた電気炉による還元溶融及びスラグ分離後の酸溶解プロセス、もしくは弗酸及び硝酸により直接溶解するプロセスの適用検討、各種不純物の分配調査の実施が必要となる。

EXECUTIVE SUMMARY

Mines of rare metals such as platinum group elements (hereinafter referred to as PGM) containing ruthenium (hereinafter referred to as Ru) have limited supply volumes, reserves are unevenly distributed, and there are many cases where there are geopolitical concerns about stable supply. In addition, because Ru used in HDD (HD media), electrodes, and pastes is thinly coated on a base material, and because Ru oxide hardly dissolves in acid, the enrichment of Ru from HDD, electrodes, and pastes has not been realized in terms of cost and technology, and a social system for the development and technology of recycling of Ru has not been established.

On the other hand, because Ru has the best characteristics (heat resistance, strength, chemical stability) among PGMs, demand is expected to grow as an indispensable material for electrical and electronic devices in the future, and the necessity of developing recycling technology and establishing a recycling-based social system is increasing. In recent years, in addition to finding the recovery potential of the HDD containing Ru, the electrolysis electrode (hereinafter referred to as electrode), and the resistor paste (hereinafter referred to as paste), it is expected that the recycling of Ru, which has been conventionally dissipated, will become possible by utilizing existing technologies.

Therefore, this demonstration aims to clarify the possibility and problems of realizing efficient Ru recycling from HDD, electrode and paste by using existing technology. In addition, the possibility of expanding the HDD recovery route by coordination with HDD dischargers and dismantling businesses and the possibility of constructing the Ru recycling system were examined by conducting business feasibility evaluation.

Regarding the recycling of Ru from HD media, the efficiency of recycle was verified for three methods of aluminum dissolution (total dissolution), surface dissolution, and electric pulse. In the surface melting method, firstly, the melting conditions of glass media and aluminum media were investigated. Regarding the glass media, it was confirmed that Ru and Pt were peeled from the glass media by using an acid mixed solution as a dissolving solution and performing film peeling by dissolving a metal layer with an acid solution. As for the aluminum medium, since the DLC layer exists on the surface layer of the medium and it takes time to prevent the penetration of the solution, the reaction time was shortened by plastically processing the aluminum medium as a pretreatment and cracking the DLC layer. Thereafter, an acid solution was used as a dissolving solution, and the metal layer was dissolved to perform film peeling. When the surface of the aluminum medium after peeling was measured by simple XRF, Ru and Pt were not detected, and therefore, it was judged that peeling was successful. Based on the results of the detailed examination of the dissolution conditions, a large-scale test was conducted on aluminum media to confirm that the peeling was successful.

Regarding the electric pulse, it was confirmed that the discharge occurred at the fixed position at the jig/HDD interface with respect to the aluminum medium, and the current trace

was not observed in the center portion, but Ru peeling by the electric pulse could be performed with respect to the glass medium. As for the peeling condition, it was confirmed that the peeling by the voltage change condition can be performed efficiently from the viewpoint of the peeling area and the charge energy as compared with the voltage constant condition, and that the peeling area does not greatly change by comparing the voltage doubler circuit and Blumlein power supply, but the energy consumption by Blumlein power supply is small and the efficient peeling can be performed.

Regarding the recycling of Ru from paste, the recovery efficiency was verified for the two methods of dry test method and direct acid dissolution method. In the dry test method, Ru in the paste was present in the form of an alloy with Nb or ruthenium dioxide, and could be concentrated to a lead button by reduction melting. When lead was removed from the lead button by ash blowing, lead ruthenate was produced, and separation of Ru and Pb became difficult. However, by dissolving the lead button with nitric acid, lead removal and Ru concentration became possible, and an Ru concentrate having a target Pb quality of 1% or less could be obtained. The Ru yield was 103%. In the direct acid dissolution method, lead removal and Ru enrichment were efficiently carried out by hydrofluoric acid+nitric acid method, and Ru enrichment with a target Pb grade of 1% or less could be obtained. The Ru yield was 106%.

For commercialization, a collection scheme was considered to put the waste HDD into a dismantler with a technology capable of efficiently dismantling the HDD and collecting HD media. Regarding the recovery of waste HDDs, two routes were examined: recovery from recycling and industrial waste disposal companies in Japan, and recovery from overseas HD media manufacturers. With regard to media scrap recovery from overseas media manufacturers, it has been confirmed that scrap products have a large collection potential, and that scrap products are expected to be in a better state than used products both in aluminum media and in glass media. Therefore, it has been confirmed that scrap products have merits from the viewpoint of cooperation with the later peeling process. On the other hand, it is anticipated that the cost of transportation will increase due to recovery from overseas, and how to reduce the cost of procurement of HD media will be an issue. With regard to HDD recovery from domestic HDD collectors (industrial waste companies, etc.), there are also issues such as HDD400 of 10,000 units for domestic PCs (approximately 8 million sheets in the media), Ru8kg content (approximately 8 million yen in the sales price), and Pt4kg content (approximately 14 million yen in the sales price). For commercialization, there is a need to collect waste HDD effectively using both routes.

When the profitability of the entire HDD procurement-demolition-stripping process was estimated, it was confirmed that it was difficult to secure the profitability of the entire business. Since the profit on the sale of HDD parts and the profit on the sale of media after peeling are small compared to the HDD procurement cost and the dismantling cost, it is necessary to examine the reduction of the transportation cost in the HDD procurement process and the

reduction of the dismantling cost by the mass processing in the dismantling process in order to secure the profitability. The profit on the sale of parts for HDDs is expected to be attributable to the sluggish market for iron and non-ferrous (aluminum), and the profit on the sale of parts is expected to increase with the rise in market prices. Regarding profitability in HD media procurement, stripping, enrichment, and refining processes, it was confirmed that the selling prices of enriched Ru and Pt exceeded the procurement costs of media and the costs of stripping, enrichment, and refining, thereby ensuring business profitability. In the trial calculation, the cost advantage of the peeling by the electric pulse compared with the peeling by the surface dissolution was also confirmed.

Regarding CO₂ reduction effect, CO₂ emissions associated with HDD dismantling due to the use of the HDD automated dismantling equipment demonstrated in this project were 2,052 kg-CO₂/kg-Ru, which was smaller than CO₂ emissions of 6,035 kg-CO₂/kg-Ru when the crushing and sorting machines currently used for HDD dismantling were used, and CO₂ reduction effect by this demonstration process was confirmed. In addition, CO₂ emissions from the processes demonstrated in this project were 1,320 kg-CO₂/kgRu (glass media/electric pulses), 336 kg-CO₂/kgRu (ground glass), and 1,366 kg-CO₂/kgRu (aluminum media/surface dissolution)-less than the baseline CO₂ emissions of 30,000 kg-CO₂/kg-Ru, confirming CO₂ reductions achieved by this demonstration application.

Although this demonstration project has shown the possibility of efficient Ru recycling from HD media, electrodes, and paste, several challenges remain for commercialization. Regarding Ru recycling from HD media, the following are mentioned : Securing of HDD procurement volume, cost reduction in procurement and disassembly process, examination of destinations of deliverables in disassembly process, adjustment of lines to purification process of debris and dissolved solution, automation of surface debonding pretreatment and automation of pulse crushing, examination of scale-up facility design, etc.. Regarding the recycling of Ru from the electrode, it is necessary to carry out detailed analysis of the recovery amount of precious metal after peeling, and to examine pulse crushing automation and scale-up equipment design. Lastly, for the recycling of Ru from paste, it is necessary to examine the application of an acid melting process after reduction melting and slag separation by an electric furnace in accordance with the composition (mainly the presence or absence of Cr) of the object to be treated, or a process in which Ru is directly dissolved by hydrofluoric acid and nitric acid, and to carry out an investigation of the distribution of various impurities.

目次

I. 背景と目的	1
II. 事業実施内容	2
1. 事業の全体概要.....	2
2. Ru 濃縮及び関連技術の検証.....	4
2.1. HD メディアからの Ru 濃縮・一次剥離技術の検証.....	4
2.1.1. 技術概要・実証概要.....	4
2.1.2. 全溶解・表面溶解による剥離.....	4
2.1.3. 電気パルスによる剥離.....	11
2.1.4. 実証結果まとめ・事業化に向けた課題・対応策.....	20
2.2. 電極からの Ru 剥離技術の検証.....	21
2.2.1. 技術概要・実証概要.....	21
2.2.2. 試験方法.....	21
2.2.3. 分析結果.....	23
2.2.4. 実証結果まとめ・事業化に向けた課題・対応策.....	24
2.3. ペーストからの鉛除去技術の検証.....	25
2.3.1. 技術概要・実証概要.....	25
2.3.2. 試験方法.....	25
2.3.3. 分析結果.....	33
2.3.4. 実証結果まとめ・事業化に向けた課題・対応策.....	39
3. 廃 HDD 回収ルート拡大に向けた検討.....	41
3.1. HDD 商流調査.....	41
3.1.1. HDD の市場概要.....	41
3.1.2. 国内における廃 HDD の回収状況.....	42
3.2. 廃 HDD 回収ルート検討.....	44
3.2.1. 国内再資源化処理業者・産廃処理業者からの廃 HDD 回収.....	44
3.2.2. 海外からの廃 HD メディア回収.....	45
3.2.3. 廃 HDD 回収スキームの全体像.....	46
4. 環境影響及び事業性評価.....	48
4.1. LifeCycleAssessment.....	48
4.1.1. インベントリ・バウンダリの考え方.....	48
4.1.2. CO2 削減効果.....	49
4.2. 事業性評価.....	52
4.2.1. 支出項目.....	52

4.2.2.	収入項目	53
4.2.3.	事業性評価	55
5.	事業化可能性の検討.....	59
5.1.	事業化に向けたマイルストーン案.....	59
5.2.	普及の見通し.....	59
5.3.	事業化に向けた課題.....	60
6.	まとめ	61

I. 背景と目的

ルテニウム（以下、Ru とする。）を含む白金族元素（以下、PGM とする。）等の希少金属の鉱山は供給量に限りがある上に、埋蔵地が偏在、地政学的にも安定供給に懸念があるケースが多い。また、HDD（HD メディア）、電解電極（以下、電極とする）、抵抗体ペースト（以下、ペーストとする）において使用されている Ru は基材に対して薄く塗られているという構造特性、及び酸に溶解しにくいという Ru 酸化物の物性特性上、HD メディア、電極、ペーストからの Ru 濃縮はコスト面・技術面から実現されておらず、Ru リサイクル技術の開発、循環利用の社会システムが確立されていない。図表 I-1 に示す通り、Ru は HD メディア、電極、ペーストにおいて年間 40t 程度使用されているが、そのうち約 50%以上の約 22t が回収されずに散逸されている^{※1}ことが確認される。Ru の年間需要量は 2017 年において 38.4t^{※2}であることを勘案すると、年間で 22t 以上の Ru が散逸していることは大きな課題であるといえる。これは経済価値に換算すると約 240 億円程度^{※2}の損失となる。

一方、Ru は PGM の中で最も優れた特性（耐熱性、強度、化学安定性）を有していることから、今後電気・電子デバイスに必要不可欠な材料として需要が伸びていくことが見込まれており、リサイクル技術の開発及び循環利用の社会システムの確立の必要性が高まってきている。近年は Ru を含有する HD メディア、電極、ペーストの回収ポテンシャルが見出されていることに加え、既存技術を活用することで、従来散逸していた Ru の回収が可能になると見込まれている。Ru を中心とした独自技術で多数の世界トップシェア製品を製造している当社が本実証を行うことで、今後廃製品からの低濃度 PGM 回収の動きがより活性化していくことも期待される。

本実証は、既存技術活用による HD メディア、電極、ペーストからの効率的な Ru リサイクル実現の可能性と課題の明確化を行う。更に HDD 排出者及び解体事業者との調整による HDD 回収ルート of 拡大可能性検討や事業性評価を行うことで、Ru リサイクルの仕組み構築の可能性を検討する。

図表 I-1 用途別 Ru 年間使用量と年間散逸量（対象：世界市場）

	年間Ru使用量	年間Ru散逸量
HDD	24t	6t
電極	6t	未計測（※大部分が散逸）
ペースト	10t	未計測（※大部分が散逸）
全体	40t	約22t

※1...当社独自調査より

※2...Johnson Matthey 「PGM 市場レポート 2019 年 2 月」

※3...2019 年 2 月時点の Ru 単価 1,120 円/g より算出（田中貴金属 HP より）

II. 事業実施内容

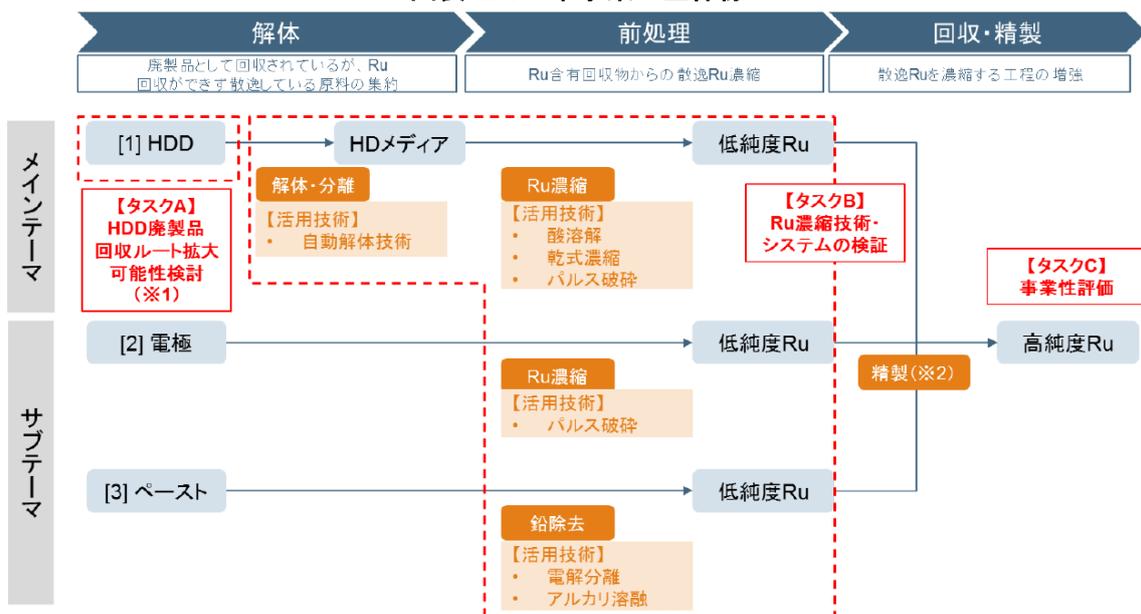
1. 事業の全体概要

図表 II-1 に本実証の全体像を示す。本事業では、既存技術の活用による HD メディア、電極、ペーストからの効率的な Ru リサイクル実現の可能性と課題の明確化を行う。HD メディアからの Ru リサイクルについては、アルミメディア、ガラスメディアの両メディアに対して HDD の自動解体技術を適用した後、アルミ溶解（全溶解）に加え、表面の記録層のみを選択的に剥離し、低エネルギーでの貴金属の剥離・濃縮実現が期待される「表面溶解」、大電流を HD メディア表層に与え、低エネルギーでの貴金属剥離・濃縮実現が期待される「電気パルス」の 3 技術により HD メディアからの Ru 剥離を試行する。Ru 濃縮技術・システムについては、溶解条件、溶化工程、濃縮物分析、コスト、CO2 削減効果等の観点から検証を行う。電極についても、HDD と同様に電気パルス手法での Ru 剥離を試行し、既存技術（薬液処理法）との比較検証を実施する。ペーストにおいても、Ru リサイクルの既存工程活用に向けた前処理としての鉛除去技術の開発を行った。

また、HDD からの Ru リサイクル実現に向け、効率的に HDD を解体して HD メディアを回収する技術を有する HDD 解体事業者に廃 HDD を集約する回収スキームを検討する。具体的には、国内の回収事業者や海外 HD メディアメーカーとの調整により、回収ポテンシャル、回収ルート、回収コストについて調査・検討を行う。

また、上記検討を通じて、事業化に向けた事業性評価及び採算性確保に向けた課題整理を行う。事業性評価においては、採算性が確保できる Ru 価格の下限値の試算も行う。また、本事業における解体・前処理・生成の各プロセスと比較対象のベンチマークプロセスのインベントリやバウンダリを整理し、本事業による CO2 削減効果の試算も行う。

図表 II-1 本事業の全体像



※1...電極、ペーストについては既に回収スキームが確立されているため、本実証の検討対象外とする
 ※2...低純度Ruから高純度Ruの精製技術については既に活用されており、本実証の検討対象外とする

図表 II-2 本実証の全体像 (HDD からの Ru リサイクル)



図表 II-3 本実証における主な実施タスク

タスク概要		実施タスク
①	Ru 剥離・一次濃縮技術の検討	<ul style="list-style-type: none"> HD メディア、電極、ペーストからの Ru 濃縮技術の検証 技術適用による CO2 排出量削減効果の算出
②	廃 HDD の回収ルート拡大に向けた検討・調整	<ul style="list-style-type: none"> 国内外の HDD 商流調査実施 (HDD 回収業者、回収量がテンシヤル等) HDD 調達に向けた HDD 回収業者等との調整 (回収ルート・コスト検討)
③	実証技術の事業化可能性に関する検討	<ul style="list-style-type: none"> 事業全体の採算性の検討 事業化に向けた出口戦略及び課題・対応策の検討

上記検討を実施し、本実証事業においては、HD メディア、電極、ペーストからの Ru リサイクル工程及び事業化に向けた課題の具体化、廃 HDD の回収スキームの構築、本実証事業の技術的・経済的な実現可能性評価及び今後の課題の導出をゴールとする。

2. Ru 濃縮及び関連技術の検証

2.1. HD メディアからの Ru 濃縮・一次剥離技術の検証

2.1.1. 技術概要・実証概要

HD メディアからの Ru 剥離については、アルミ溶解（全溶解）、表面溶解、電気パルスの 3 手法により試行をおこなった。3 手法について、Ru 回収効率性の検証、処理プロセスの大規模化・事業化に向けた課題及び対応策の明確化を目的に実証を行った。

図表 II-4 HD メディアからの Ru 剥離手法

手法	概要
全溶解	<ul style="list-style-type: none">HD メディアの基板部分も含めて溶解させる。
表面溶解	<ul style="list-style-type: none">本事業では薬液に工夫を行い、表面の記録層を選択的にはがすことを検討。HD メディアの記録層のみを剥がすことにより、低エネルギーかつ短時間で貴金属の濃縮が可能。
電気パルス	<ul style="list-style-type: none">大電流を HD メディアの記録層と基板の界面の表層のみに与え、剥離を行うため、剥離のためのエネルギーの効率が非常に高い。HD メディアの記録層のみを剥がすことにより、低エネルギーかつ短時間で貴金属の濃縮が可能。

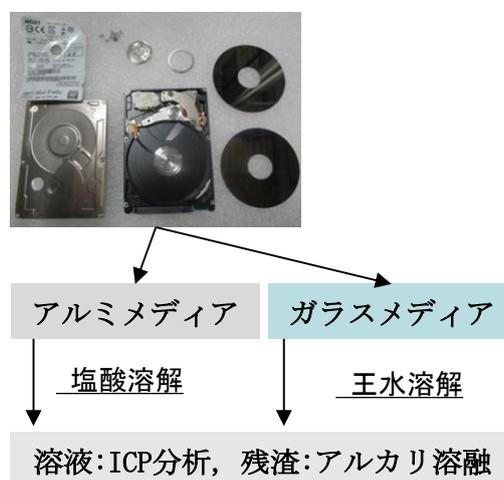
2.1.2. 全溶解・表面溶解による剥離

1) 試験方法

(1) 全溶解

全溶解では、酸性溶液を使用し、Ru 及び Pt を溶解し、残渣及び溶液中の Ru 及び Pt を定量することで剥離率を検証した。なお、アルミメディアに対しては塩酸、ガラスメディアに対しては王水にて溶解を行った。残渣分析にはアルカリ溶融後 ICP 分析を、溶液には ICP 分析を行った。

図表 II-5 全溶解試験実施フロー

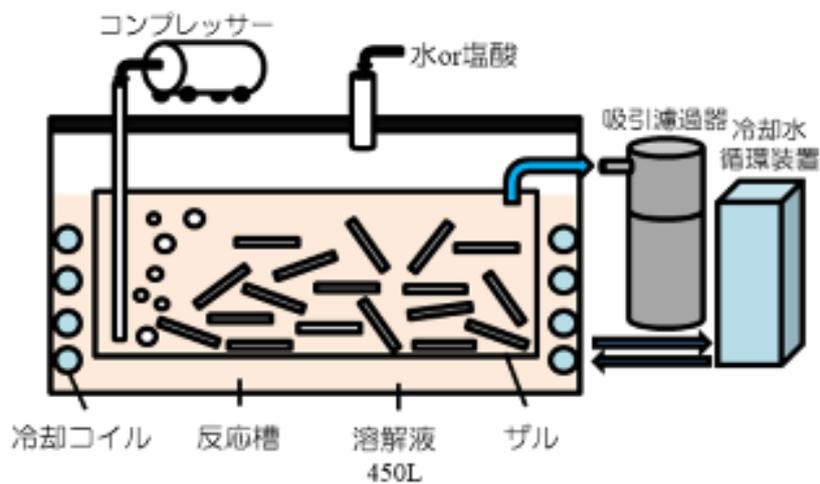


アルミメディアの全溶解試験の概要を図表 II-6 に示す。試験は、塩酸を投入しても反応溶液の温度上昇が緩やかになった時点を終点とした。また、一部溶解しきらないメディアが存在した。

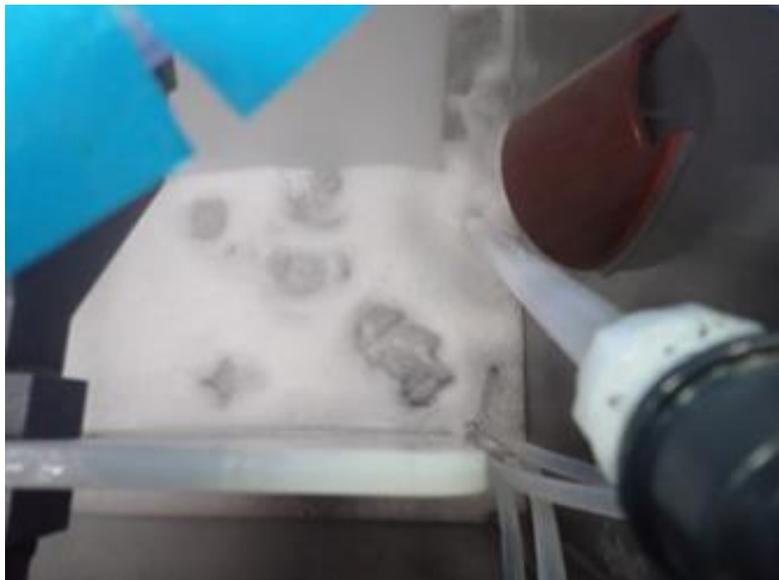
図表 II-6 アルミメディア全溶解試験条件

場所	酸溶解エリア溶解槽
溶液	純水 300L+塩酸 150L (後入滴下)
時間	塩酸投入後約 8 時間

図表 II-7 アルミメディア全溶解試験概略図



図表 II-8 槽内のアルミメディア



図表 II-9 反応後のアルミメディア



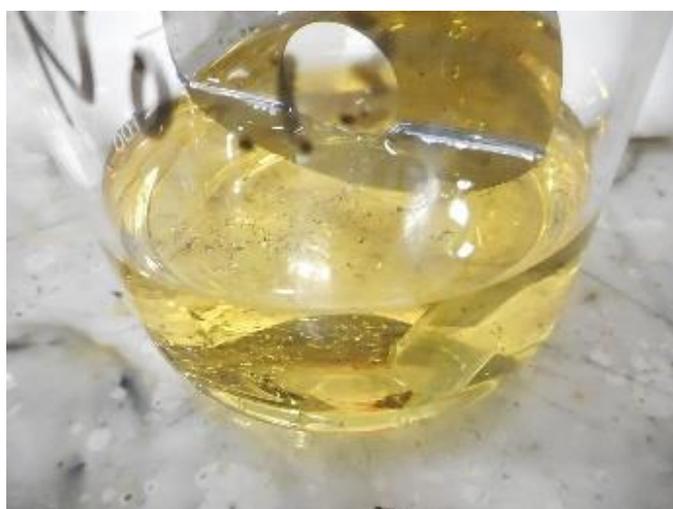
(2) 表面溶解

(ア) 溶解条件の精査

表面溶解の試験実施に向け、まずガラスメディア、アルミメディアそれぞれの溶解条件の精査を行った。

ガラスメディアについては、溶解溶液として酸混合溶液を使用し、酸により金属層を溶解することで膜剥離を行うことで、ガラスメディアから Ru および Pt が剥離されることが確認された。浸漬時間は 30 分間であった。

図表 II-10 溶解中ガラスメディア



図表 II-11 溶解後ガラスメディア



アルミメディアについては、メディア表層に DLC 層が存在し、溶液の浸透を妨害するために時間がかかることから、前処理としてアルミメディアを塑性加工し、DLC 層に亀裂をいれることで、反応時間の短縮を図った。その後溶解溶液として酸溶液を使用し、金属層を溶解することで膜剥離を行った。浸漬時間は約 1.5 時間であった。剥離後のアルミメディアの表面を簡易 XRF にて測定したところ、Ru および Pt が検出されなかったため、剥離に成功したと判断した。

図表 II-12 溶解中アルミメディア



図表 II-13 溶解後アルミメディア



(イ) 大型溶解試験の実施

上記溶解条件の精査結果をもとに、アルミメディアを対象とした大規模試験を実施した。溶解液は酸混合溶液と、酸溶液を使用した。

図表 II-14 アルミメディア表面溶解大規模試験条件

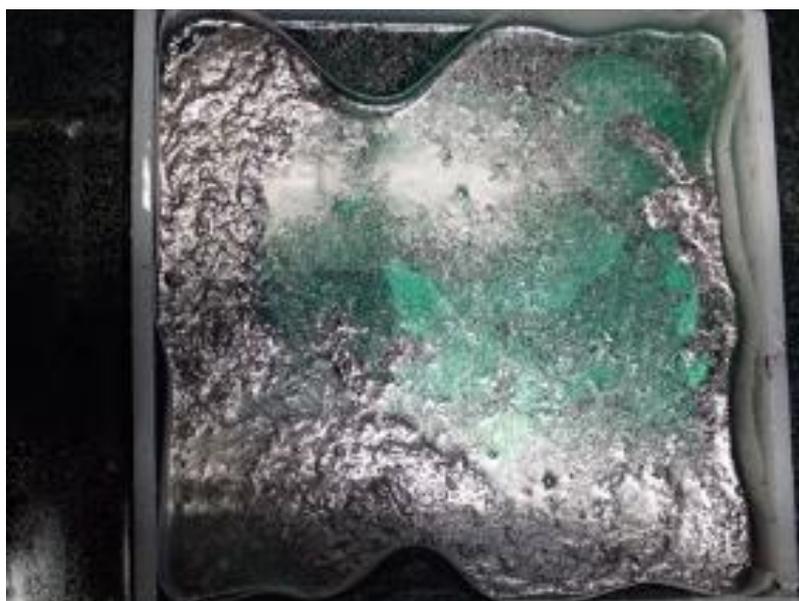
場所①	試験エリアウォークインドラフト
溶液①	酸混合溶液
時間①	酸投入後約 2 時間
枚数①	100 枚

場所②	酸溶解エリア溶解槽
溶液②	酸溶液
時間②	酸投入後約 1 時間
枚数②	2800 枚 (700 枚/ザル×4)

図表 II-15 溶解中アルミメディア（塩酸混合硝酸溶液）



図表 II-16 溶解中アルミメディア（硝酸溶液）



2) 分析結果

ガラスメディア、アルミメディアについて、それぞれ全溶解、表面溶解による大規模試験結果を整理した。

ガラスメディア中の Ru および Pt 含有量（1 枚当たり）は、王水溶解後の残渣および溶液中の Ru および Pt を定量合算した数値（①とする）を使用している。①を分母とし、酸混合溶液を溶解液とした溶解後の残渣および溶解中の Ru および Pt を定量合算した数値を分子としてそれぞれの剥離率を算出した。

図表 II-17 大規模試験分析結果（ガラスメディア）

薬液	残渣		溶液		合計	
	含有量 / mg		含有量 / mg		含有量 / mg (剥離率 / %)	
	Ru	Pt	Ru	Pt	Ru	Pt
王水	0.37	0.32	0.42	N.D.	0.79 (100)	0.32 (100)
酸混合溶液	0.11	0.29	0.57	N.D.	0.68 (86)	0.29 (91)

アルミメディア中の Ru および Pt の含有量（1枚当たり）は、全溶解（塩酸溶解）後の残渣および溶解液中の Ru および Pt を定量合算した数値（②とする）を使用している。②を分母とし、酸混合溶液を溶解液とした溶解後の残渣および溶解中の Ru および Pt を定量合算した数値を分子としてそれぞれの剥離率を算出した。

また、②を分母とし、酸溶液を溶解液とした溶解後の残渣および溶解中の Ru および Pt を定量合算した数値を分子としてそれぞれの剥離率を算出した。

図表 II-18 大規模試験分析結果（アルミメディア）

薬液	溶液		残渣		合計	
	含有量 / mg		含有量 / mg		含有量 / mg (剥離率 / %)	
	Ru	Pt	Ru	Pt	Ru	Pt
塩酸（全溶解）	1.16	0.67	0.46	0.03	1.62 (100)	0.69 (100)
酸混合溶液	0.46	0.49	0.70	0.06	1.16 (72)	0.55 (80)
酸溶液	1.02	0.55	0.42	0.07	1.44 (89)	0.62 (90)

また、膜剥離されたガラス基板に対し、X線分析（XRF）および定量分析（ホウ素）した結果を以下に示す。表中の色に関しては、ガラス基板の着色された色を表している。膜中の Ru および Pt の定量は、湿式処理後の溶液および膜（残渣）へ ICP 分析を用いて分析している。

図表 II-19 ガラスメディア X線分析・定量分析結果

分析方法	ICP	XRF(酸化物換算値)							
単位		wt%							
元素	B	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	ZrO ₂	TiO ₂	MgO
透明	<0.01	68.19	16.12	10.12	0.73	N.D.	4.48	N.D.	N.D.
緑透明	<0.01	67.27	16.86	12.05	0.46	2.18	N.D.	N.D.	0.97
透明黒	<0.01	66.57	16.64	12.38	1.04	2.24	N.D.	N.D.	0.87
薄黒	<0.01	66.77	16.6	10.93	1.23	1.63	1.45	N.D.	0.55
濃茶	<0.01	61.22	23.18	6.92	4.73	0.18	0.82	0.93	1.73
薄茶	<0.01	67.89	16	10.54	0.73	N.D.	4.78	N.D.	N.D.

2.1.3. 電気パルスによる剥離

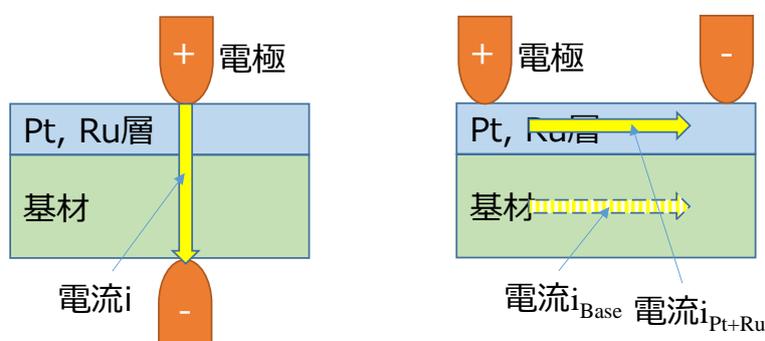
1) 試験方法

電気パルスによる剥離では、大電流を HD メディアの記録層のみに与え、メディアの記録層のみの剥離を試行した。また、剥離結果の分析は放電部を元素分析することにより実施した。また、剥離面積や電流痕深さ測定、画像解析による最適条件の検討も行った。

電極の位置については、基材と層を直列に見なす場合と基材と層を並列に見なす場合の 2 ケースにより実施した。基材と層を直列とみなす場合の電極配置は、抵抗及び剥離面積が小さく、電極接触位置での電流痕発生が想定され、アルミメディアでの試験に適用する。また、基材と層を並列とみなす場合は、抵抗及び剥離面積が大きく、基材が絶縁物の場合、層境界での剥離が想定され、ガラスメディアでの試験に適用した。

図表 II-20 電気パルス実験模式図

- ・ 層を直列とみなした場合
- ・ 層を並列とみなした場合

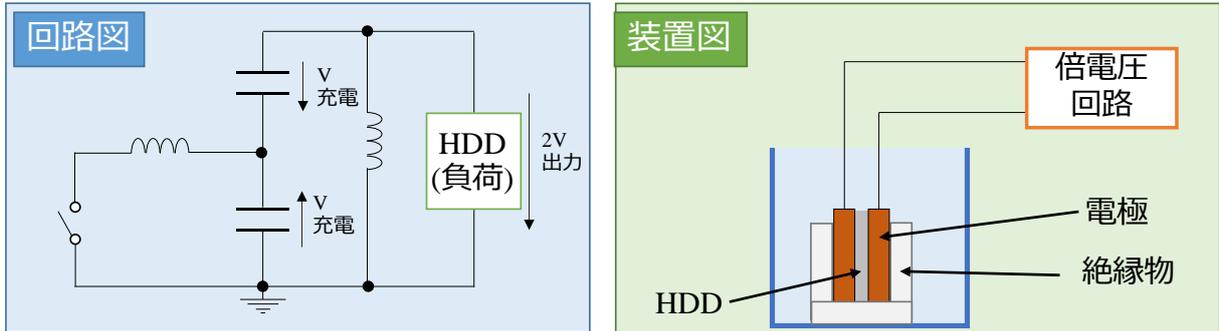


また、放電は水中及び気中にて実施した。水中で放電を行う利点として、「空気よりも密度が高いことによる衝撃波の増大」、「安全な試験の実施」が挙げられる。一方、気中での放電の利点として「印加電圧の低減」、「処理プロセスの簡易化」が挙げられる。以下、アルミメディア、ガラスメディアそれぞれの試験方法について整理した。

(1) アルミメディア

アルミメディアの電気パルスによる剥離においては、倍電圧回路による放電を行った。倍電圧回路は低エネルギーでのパルス実験が可能で、約 100Hz までの連続印加が可能であるという特徴を持つ。

図表 II-21 倍電圧回路の回路図及び装置図

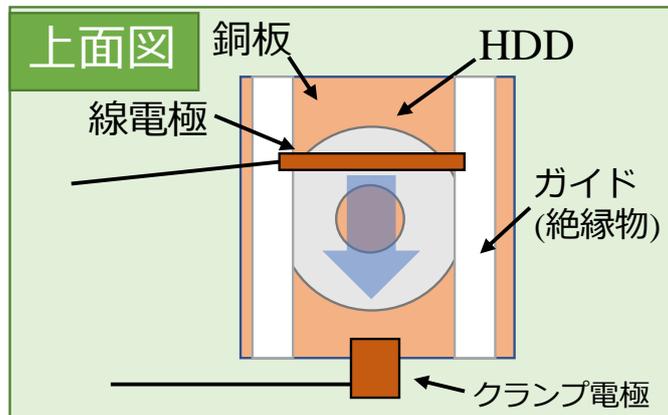


剥離試験では、両側を HD メディアサンプルではさみこむ“はさみこみ型”の治具を使用した。両側をメディアサンプルとすることで電極へのダメージを低減し、また均一な電極間距離を確保することも可能となる。こちらの治具を使用した剥離試験の条件を図表 II-25 に示す。

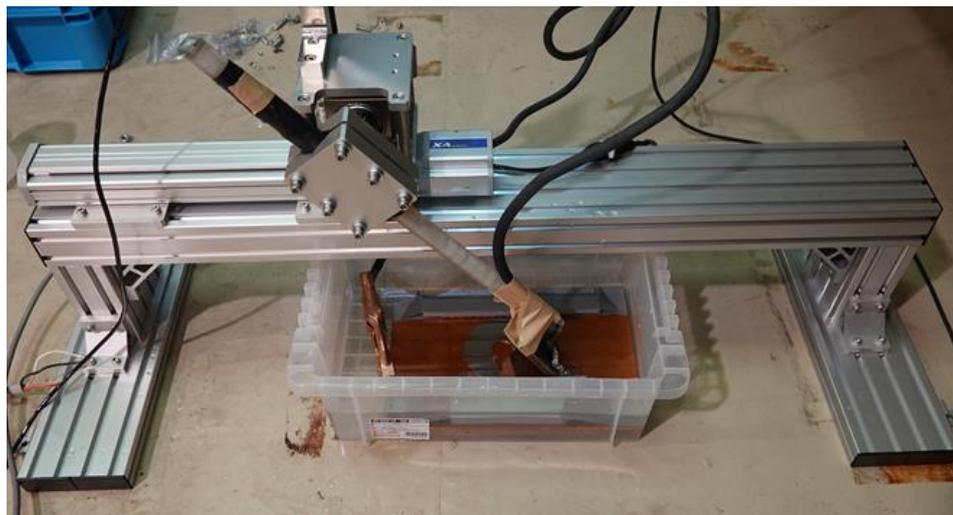
図表 II-22 アルミメディア剥離試験（電気パルス）における治具写真



図表 II-23 アルミメディア剥離試験（電気パルス）における治具全体構造



図表 II-24 アルミメディア剥離試験（電気パルス）における装置概観



図表 II-25 アルミメディア剥離条件（電気パルス）

コンデンサー容量	12.15 μ F
印加電圧	10.8、21.6kV
掃引速度	1、2mm/sec
印加周期	50Hz
電極・試料間隔	約 1mm

(2) ガラスメディア

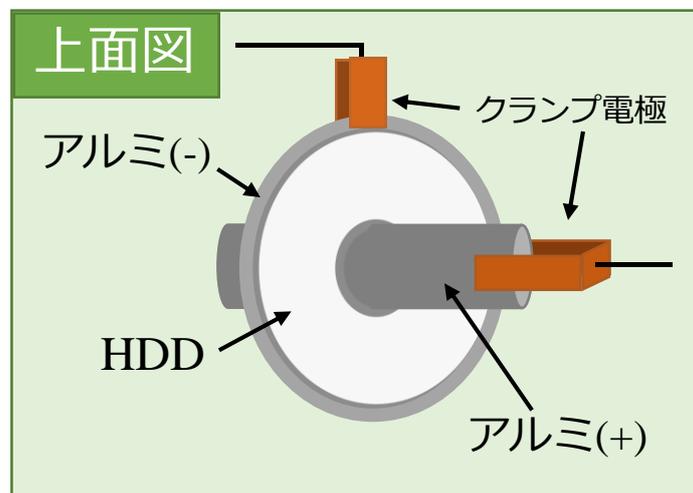
ガラスメディアに対してもアルミメディアと同様倍電圧回路での放電を実施した。また、ガラスメディアでの剥離試験では、放電時に電圧一定とする条件と電圧変化とする条件で放電回数、剥離面積、使用エネルギー等の比較を行った。放電は気中にて放電が起こらなくなるまで実施した。

治具については、試行の結果ガラスメディアの内外をアルミで覆い、それぞれをクランプ電極で接続したものをを使用した。治具のイメージを図表 II-26、図表 II-27 に示す。また、これらの治具を使用した剥離条件を図表 II-28 に示す。

図表 II-26 ガラスメディア剥離試験（電気パルス）における治具写真



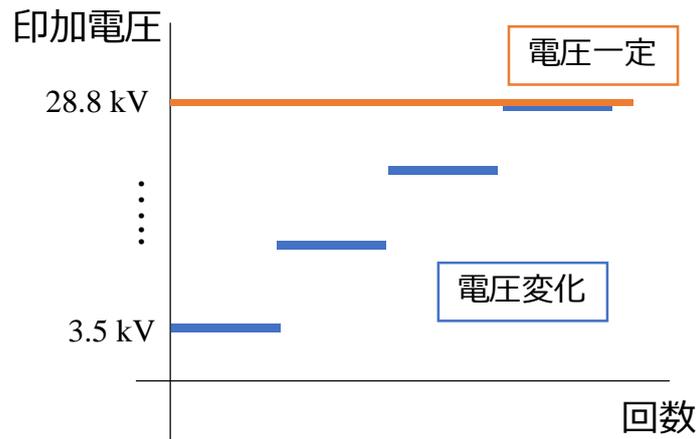
図表 II-27 ガラスメディア剥離試験（電気パルス）における治具全体構造



図表 II-28 ガラスメディア剥離条件（電気パルス）

コンデンサー容量	0.1 μ F
印加電圧	3.5~28.8kV
印加条件	1Hz（電圧一定時） 20Hz（電圧変化時）

図表 II-29 ガラスメディア剥離条件（電圧変化条件）（電気パルス）



また、倍回路電圧での比較実験に加え、倍電圧回路と比較して低エネルギーでの放電が可能で、かつナノ秒のパルス放電が可能な Blumlein 電源での放電も行い、放電回数、剥離面積等の比較を行った。

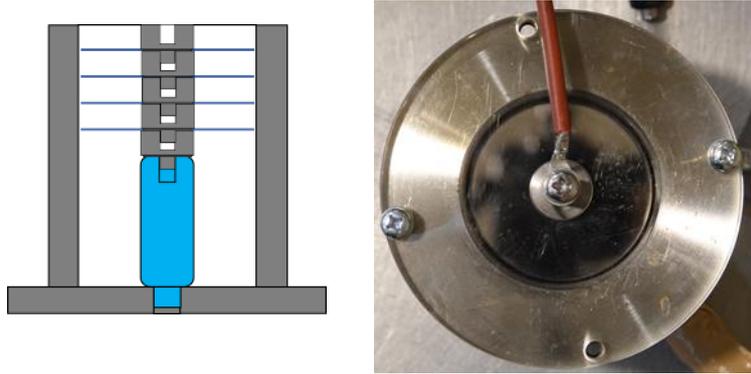
図表 II-30 Blumlein 電源装置



図表 II-31 Blumlein 電源を使用した装置概観



図表 II-32 Blumlein 電源使用時の電極イメージ



2) 分析結果

(1) アルミメディア

まず液中にて放電を実施したところ、電源電圧とパルス幅の不足により放電が起こらないことが確認された。これは印加電圧が水の絶縁破壊電圧に至っていなかったためと推測され、液中での剥離実施に向けては電極—試料間距離の短縮もしくはパルス幅及び電源出力の増大が必要と考えられる。

液中での放電が起こらなかったため、放電が起こりやすい気中での掃引実験を行ったところ、治具/HDD 界面での固定位置での放電が起こり、中央部では電流痕が見られなかった。効率的な剥離の実施に向けては治具形状を見直す必要がある。

図表 II-33 気中での掃引実験結果（アルミメディア）

印加電圧 掃引速度	10.8 kV	21.6 kV
1 mm/sec (50 Hz印加)		
2 mm/sec (50 Hz印加)		

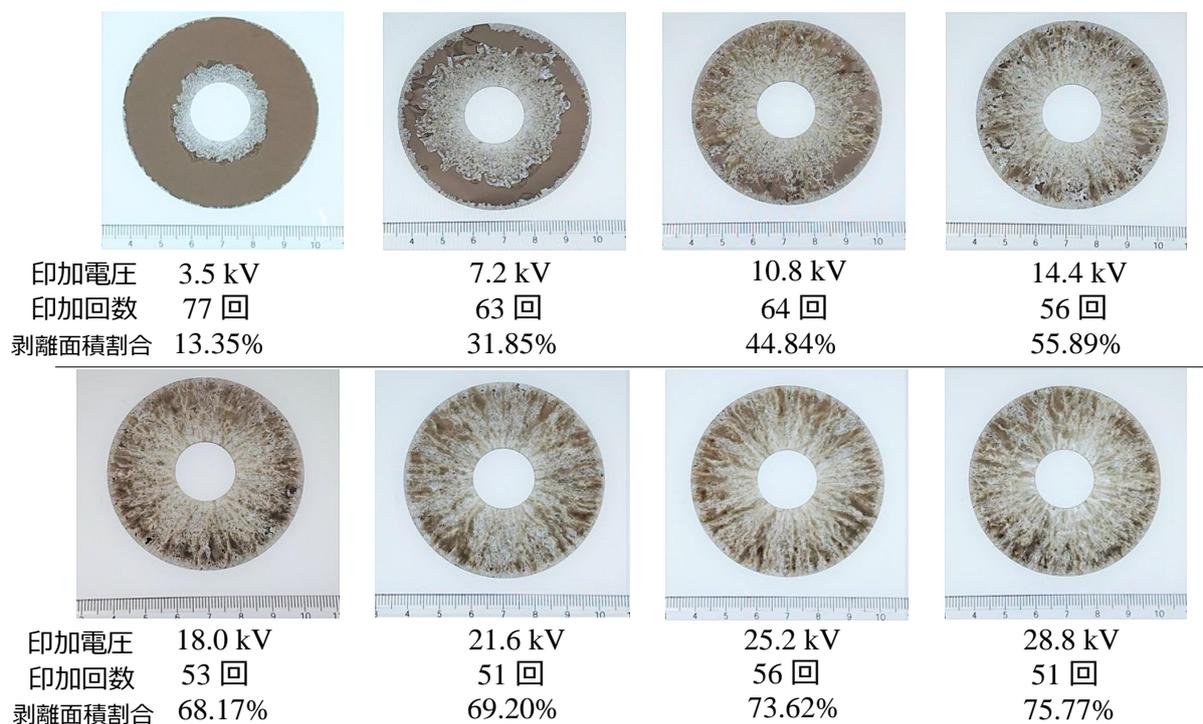
(2) ガラスメディア

まず、倍電圧回路で電圧一定条件のもと放電を行った結果を図表 II-34、図表 II-35 に示す。電

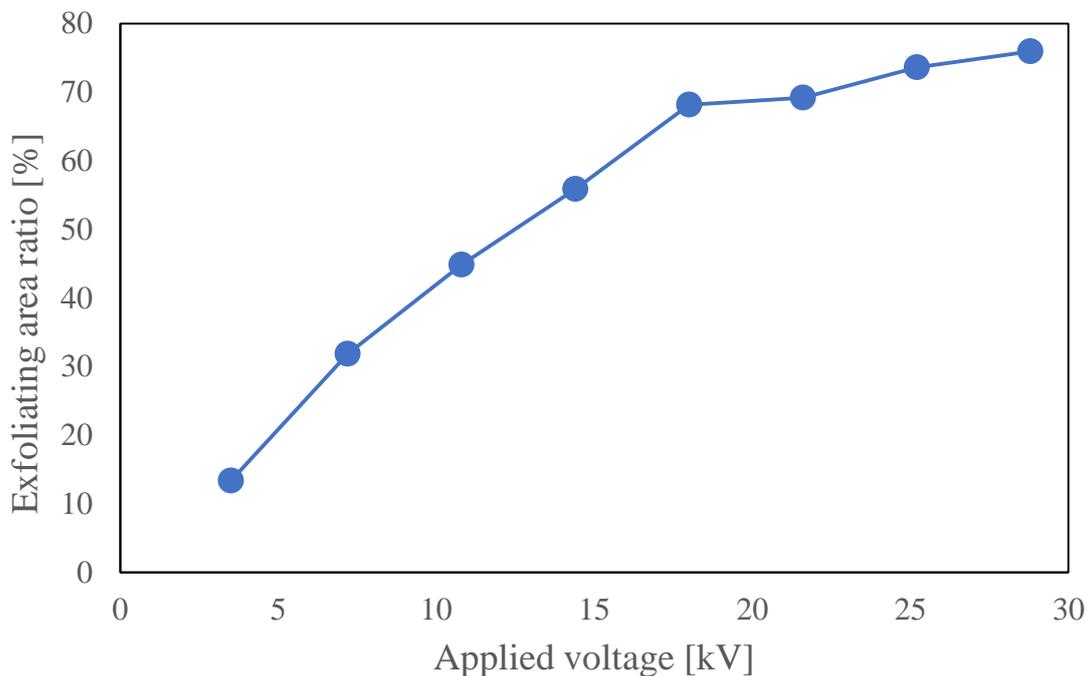
圧が低いほど放電回数が多く、印加電圧が高いほど剥離面積が大きくなることが確認された。また、印加電圧 18kV 付近で剥離割合の変化が小さくなっており、電極間全体の金属層剥離に至る印加電圧が 18kV 程度であることが推測される。なお、剥離面積については画像解析ソフト Image J により以下の手順で算出した。

- ① 画像の取り込み
- ② 白黒画像への変換
- ③ 濃度閾値を設定（設定値 135、閾値以上を黒とする）
- ④ pixel 数をカウントし、割合を算出

図表 II-34 電圧一定条件での剥離結果（ガラスメディア）



図表 II-35 電圧一定条件での剥離結果② (ガラスメディア)



次に、電圧一定条件と電圧変化条件の比較分析結果を示す。電圧変化条件の方が剥離面積割合が高く、エネルギー効率が良いことが示唆された。

図表 II-36 電圧一定条件/電圧変化条件比較結果

項目	電圧一定条件	電圧変化条件
剥離面積割合	75.95%	79.77%
放電回数	51回	計 270回
充電エネルギー	652.8J	630.2J

図表 II-37 電圧一定条件/電圧変化条件比較結果②

電圧一定条件

電圧変化条件



続いて、倍電圧回路と Blumlein 電源による剥離の比較結果を示す。剥離面積については大きな差はみられなかったが、Blumlein 電源においては消費エネルギーが少なく、より効率的な剥離

を行うことが可能であると確認された。

図表 II-38 倍電圧回路/Blumlein 電源比較結果

項目	倍電圧回路	Blumlein
剥離面積割合	66.5%	62.1%
充電電圧	1.78×10^4 V	2.4×10^4 V
充電電力	316.8 J/s	316.2 J/s
放電時間	54.3 s	16.2 s
消費エネルギー	17202 J	5122 J

図表 II-39 倍電圧回路/Blumlein 電源比較結果②



また、Blumlein 電源での剥離においては、治具に複数枚のメディア（3 枚）を設置した条件においても一枚設置した時と同様に剥離されることも確認された。

図表 II-40 Blumlein 複数枚設置時の電極



図表 II-41 Blumlein 複数枚設置時の剥離後メディア



2.1.4. 実証結果まとめ・事業化に向けた課題・対応策

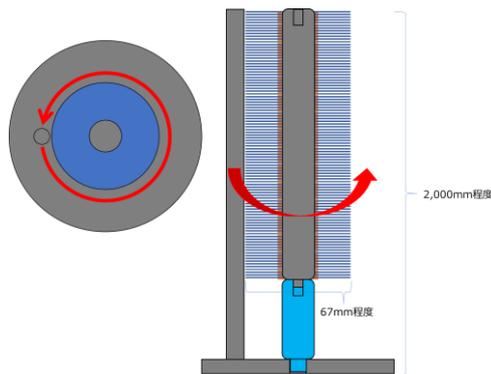
HD メディアからの表面溶解による剥離では、アルミメディア、ガラスメディアそれぞれについて溶解条件を精査した後、大規模剥離実証（2800 枚）の実施により、効率的にメディアから Ru を剥離することが可能であると確認された。

電気パルスに関しては、アルミメディアに対しては治具/HDD 界面での固定位置での放電が起こり、中央部では電流痕が見られなかったものの、ガラスメディアに対しては電気パルスによる Ru 剥離が行えることが確認された。また、剥離条件については、電圧一定条件と比較して電圧変化条件による剥離が剥離面積、充電エネルギーの観点から効率的な剥離が可能であること、また倍電圧回路と Blumlein 電源を比較し、剥離面積は大きく変わらないものの、Blumlein 電源では消費エネルギーが少なく効率的な剥離が可能であることが確認された。

実用化に向けた課題として、まずはスケールアップに向けた治具の改良及び一部処理の自動化の実現が挙げられる。具体的には、表面溶解における前処理や、電気パルスの自動化設備設計が求められる。電気パルスの自動化設備に関しては、ガラスメディア外周に設置された棒電極を回転させ、中心電極と棒電極間で放電を発生させることでガラスメディア上の金属箔を剥離する治具の使用が検討される。

その他、剥離物の捕集方法および精製ライン投入に向けた Ru の溶液化に課題が残るが、捕集については一般的な集塵技術で対応可能であり、溶液化については乾式精錬などの弊社既存の技術で対応可能と考えられる。

図表 II-42 電気パルス自動化に向けた治具案



2.2. 電極からの Ru 剥離技術の検証

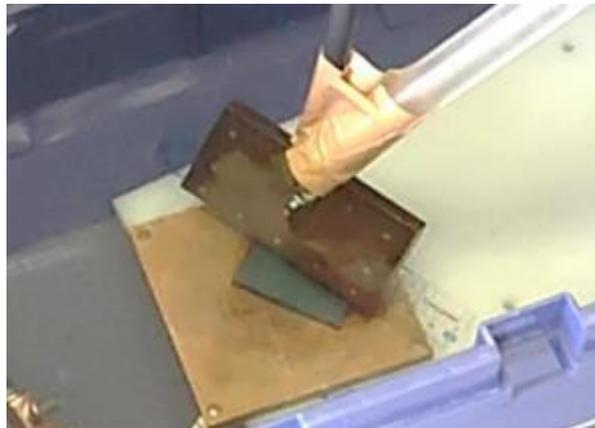
2.2.1. 技術概要・実証概要

HD メディアからの Ru 剥離に適用した電気パルス手法を電極からの剥離に適用し、Ru 回収可能性及び効率性について検証した。

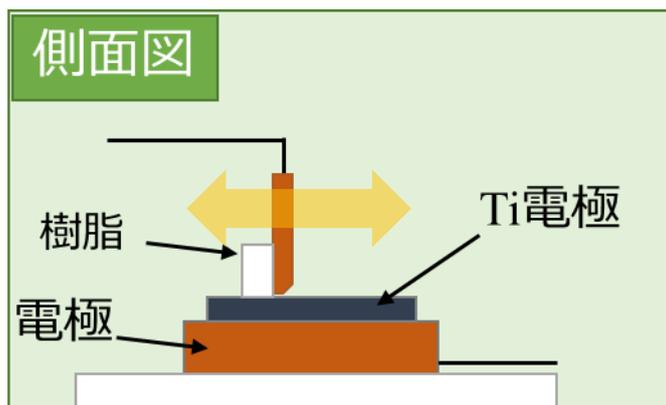
2.2.2. 試験方法

電極からの剥離においては、図表 II-43、図表 II-44 に示す板状の電極を使用し、放電させながら板電極を移動させて発生する電流痕を検証した。また、線電極を固定し、放電に用いるコンデンサー容量を変化させ、電流痕の比較を行った。剥離時の条件は図表 II-45 に示す。

図表 II-43 板電極からの剥離における電極



図表 II-44 板電極からの剥離における電極②



図表 II-45 板電極からの剥離条件

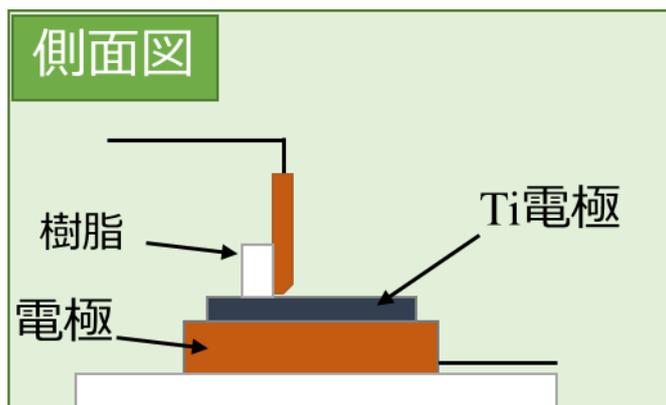
コンデンサー容量	1.2 μ F
印加電圧	約 9kV
印加条件	500Hz、100,000 回
電極・試料間隔	約 0.5mm

板電極に加え、図表 II-46、図表 II-47 に示す網状電極に対しても剥離試行を行い、網表面及び側面における剥離状況の検証を行った。剥離条件は図表 II-48 に示す。

図表 II-46 網状電極からの剥離における電極



図表 II-47 網状電極からの剥離における電極②



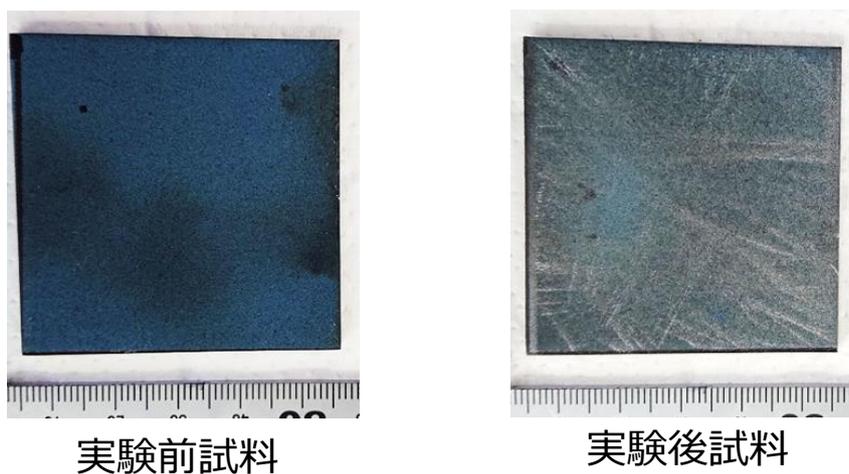
図表 II-48 網状電極からの剥離条件

コンデンサー容量	1.2 μ F
印加電圧	約 7kV
印加条件	500Hz、100,000 回
電極・試料間隔	約 0.5mm

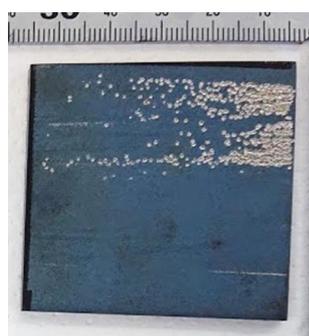
2.2.3. 分析結果

板状電極の剥離結果を図表 II-49、図表 II-50 に示す。電極の移動に合わせて線状の電流痕が連続して見られた。また、コンデンサー容量による比較結果を見ると、コンデンサー容量が大きい場合、電流痕が大きいことも確認された。

図表 II-49 板状電極の剥離結果①

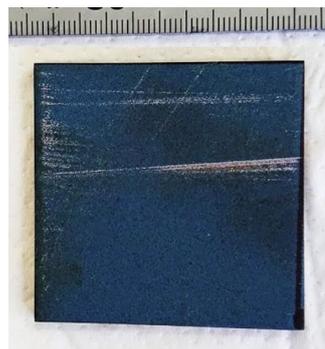


図表 II-50 板状電極の剥離結果②



実験後試料

印加条件：50% (約12 kV)
コンデンサー容量：**100 nF**

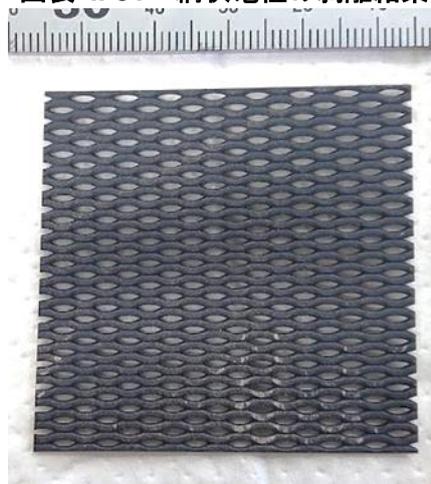


実験後試料

印加条件：70% (約9 kV)
コンデンサー容量：**1.2 nF**

続いて、網状電極の剥離結果を図表 II-51 に示す。網状電極の表面では剥離が確認されたが、側面ではあまり剥離が確認できなかった。

図表 II-51 網状電極の剥離結果



2.2.4. 実証結果まとめ・事業化に向けた課題・対応策

本実証により、HD メディアからの Ru 剥離に使用した電気パルス手法が電極からの Ru 剥離にも適用可能であることが確認された。従来技術の剥離と比較して、剥離に際して薬品および電気炉による数時間の加熱を必要とし、時間およびエネルギーを大量に要していたが、本方法の低エネルギーかつ短時間で処理することができるので、優位性を示す可能性が見いだされた。

本実証では剥離後の成分分析を実施したが、剥離サンプルが少量すぎて精度のある分析値を得ることができなかった。事業化に向けては Ru の剥離量を正確に分析するだけの大型試験を行う必要がある。そのために、本実証にて実施した治具では 1 枚単位での剥離となるため、スケールアップに向けた大量処理向け治具の検討を進めていく必要がある。

2.3. ペーストからの鉛除去技術の検証

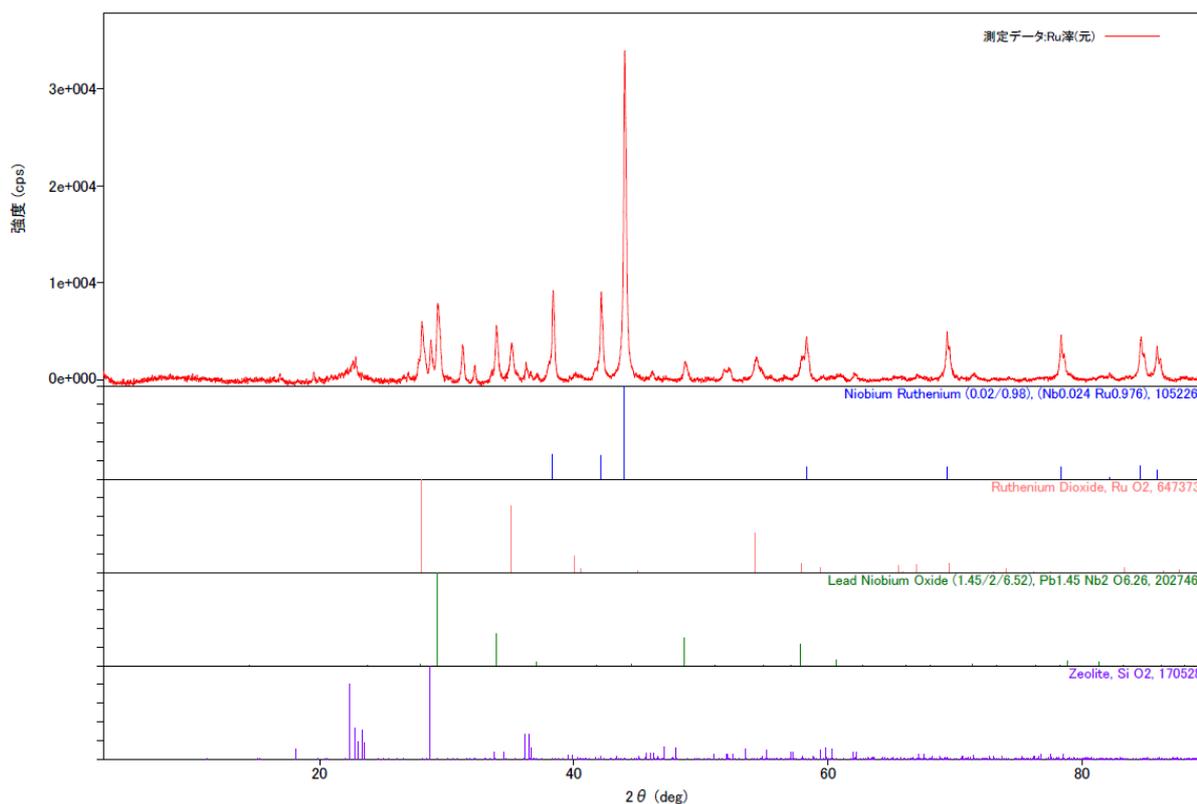
2.3.1. 技術概要・実証概要

ペーストは一定濃度以上の鉛を含有していることから、リサイクルする際に鉛を含有した特別管理産業廃棄物等の発生や既存設備の鉛汚染により、リサイクルコストの増加やリサイクル可能事業者が限定されていた。このため、リサイクルの前処理として鉛除去技術が求められていた。事前に鉛が除去できれば、既存の Ru 精製工程を活用することでペーストリサイクルを比較的容易に行うことが可能となる。鉛除去は鉛製錬所のプロセスを活用することにより、鉛の再資源化と鉛除去に伴って発生する排ガス・排水の適正処理を容易に行うことができる。目標となる低純度 Ru 中の Pb 品位は、Ru 精製ラインでの処理が容易となる 1%以下とする。

2.3.2. 試験方法

1) 試験サンプル

本試験で用いるペーストサンプルは黒色の粉体であり、その外観を図表 II-52 に示す。実験に先立ち図表 II-53 に示す分析装置を用いて各種分析を行ったので、その分析値を図表 II-54、図表 II-55、



図表 II-56、図表 II-57 に示す。

図表 II-52 ペースト外観写真



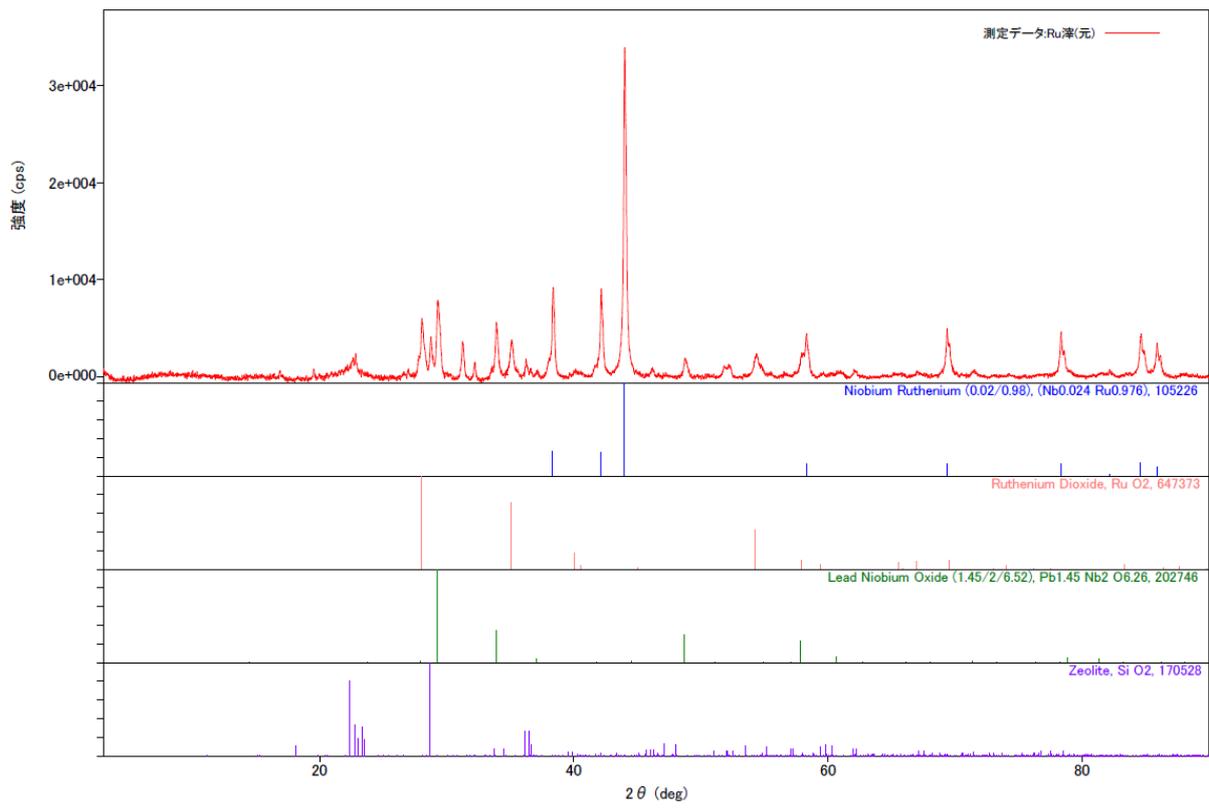
図表 II-53 分析装置

分析項目	分析方法	メーカー	機種
成分定量	アルカリ融解-ICP	ThermoFisherScientific	iCAP7400
	発光分光分析		
形態解析	X線回折	(株)リガク	MiniFlex600
表面観察	SEM-EDS	日本電子(株)	JSM-6360LA

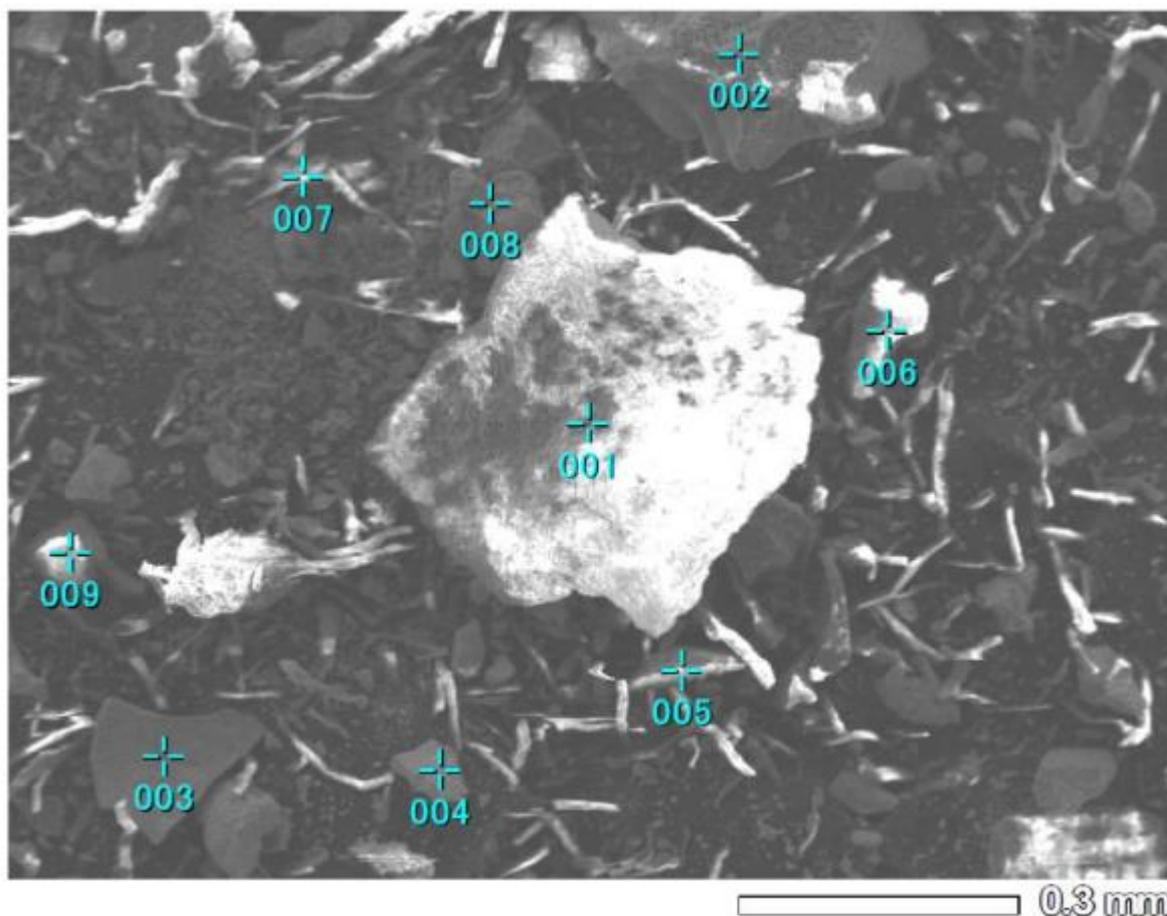
図表 II-54 ペースト成分

	[単位：%]							
	Ru	Pb	Ti	Cr	Bi	Ag	Pd	Si
事前情報	28	25	24	4.2	1.0	4.1	2.5	—
契島分析	21	10	—	—	—	—	1.1	17
	Nb	Ca	Fe	Al	Cu	Zn	Ta	水分
事前情報	—	—	—	—	—	—	—	—
契島分析	3.4	0.8	0.5	0.7	0.5	0.5	0.8	3.7

図表 II-55 X線解析によるペースト形態解析結果



図表 II-56 ペーストの SEM 写真



図表 II-57 ペーストの SEM-EDS 分析結果

質量%

	C	O	Al	Si	S	Ca	Zn	Nb	Ru	Pb	合計
001		68.53		31.47							100.00
002		27.47	1.94	22.82	1.99	3.03	2.39		15.93	24.43	100.00
003	2.64	33.99		22.24		1.11		6.02	21.99	12.01	100.00
004	39.35	40.35		9.84					10.46		100.00
005	4.48	42.10	0.39	36.42		0.81			15.79		100.00
006	4.86	45.79	0.38	37.00					11.97		100.00
007	37.78	36.88	0.34	9.03		1.26			8.56	6.15	100.00
008	13.21	34.97	0.49	22.61				5.08	23.63		100.00
009		48.93	1.55	49.52							100.00

まず、アルカリ融解-ICP 発光分光分析により、ペーストの主成分は Ru、Pb、Si であり、それぞれ、21%、10%、17%含有されていることが確認された。また、Nb も少量存在しており、3.4%であった。事前情報にあった Ti、Cr、Bi、Ag は確認されなかった。

次に X 線回折による形態解析の結果、主成分は Ru と Nb の合金であり、その他には二酸化ルテニウム、ニオブ酸鉛、ゼオライトが存在していることが確認された。

また、SEM-EDS での観察によりペーストには様々な大きさ・形状の様々な組成の化合物が混在していることが確認された。

これらの分析結果と事前情報を考慮し、本試験では乾式試金法と直接酸溶解法の 2 つを検討することとした。

まず、乾式試金法を選択した理由としては、事前情報にあった Cr への対策である。Cr 含有物を酸で処理した場合、排水処理工程へ有害物質である 6 価 Cr が流入する可能性があるが、一般的な製錬所の排水処理工程には 6 価 Cr を還元処理するための設備がないことが多い。そこで Cr を固体として分離可能な手法を検討することとした。

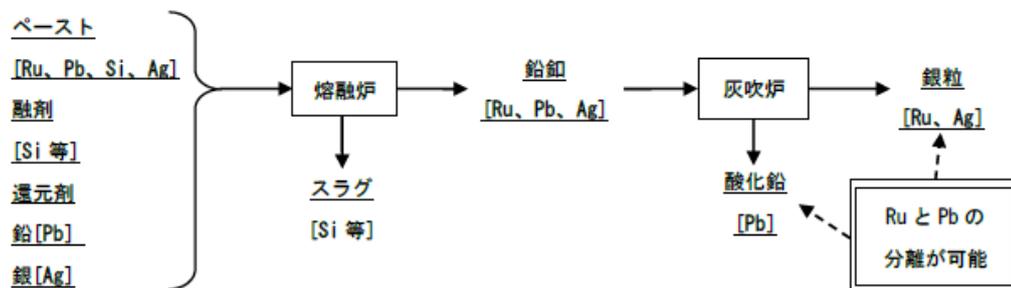
次に、直接酸溶解法を選択した理由としては、Ru が塩酸以外の酸に難溶であること及び除去対象成分である Pb が硝酸等で容易に溶解できるためである。また、金属を高温熔融する必要がなく、省エネルギー型の処理プロセスであることも理由の一つである。

2) 試験方法

(1) 乾式試金法

乾式試金法は鉱石中の貴金属の定量に用いられる方法である。乾式試金法のフローを図表 II-58 に示す。

図表 II-58 乾式試金法フロー



- ① 試料に融剤、還元剤、鉛、銀を添加し、その混合物を炉により熔融する。
- ② 熔融した混合物は比重により貴金属を含有した金属鉛である鉛鉛とガラス質のスラグに分離される。スラグを物理的に分離し、形を整えた鉛鉛をキューペル（灰皿）に乗せて炉により灰吹する。
- ③ 鉛鉛は灰吹炉にて鉛分が揮散またはキューペルに吸収され、キューペル上に貴金属を含有した銀粒が残る。

本試験においては、まずペーストの主成分の一つである Si をスラグとして分離し、Ru、Pb を鉛鉛に濃縮する。その後、Pb を灰吹きで除去することにより、Ru を銀粒に残すというフローとなる。

図表 II-59 試料と融剤等の混合



図表 II-60 混合物の熔融



図表 II-61 鉛鉛とスラグの分離



図表 II-62 鉛鉛の成型とキューベル



図表 II-63 灰吹き



図表 II-64 銀粒



(2) 直接酸溶解法

直接酸溶解法とは、金属毎の各種酸への溶解度の差を利用し、目的とする Ru を溶解せずに除去対象成分である Pb を酸を用いて溶解する方法である。本試験で用いた酸は、硫酸、弗酸、硝酸である。

2.3.3. 分析結果

1) 乾式試金法

(1) 融剤等の混合物の検討

まずは良い鉛鉞を得るために必要な融剤等の最適添加条件の検討を実施した。良い鉛鉞が得られたかどうかは鉛鉞重量 (2841g) とスラグ外観 (濁り等) で判断した。結果を図表 II-65 に示す。鉛鉞の最適条件は小麦粉を 3.0g 添加した時であり、還元在一定以上の還元剤が必要なことが確認された。全体的な傾向としてスラグ状態は良好であった。

図表 II-65 鉛鉞最適条件試験[単位 : g]

No.	試料量	PbO	Na ₂ CO ₃	SiO ₂	Na ₂ B ₂ O ₇	小麦粉 (還元剤)	鉛鉞量	スラグ
1	0.5000	80	40	12	20	3.0	38.5	○
2	0.5000	80	40	12	20	2.0	27.8	○
3	0.5000	80	40	12	20	1.0	15.8	○
4	0.5000	110	50	15	30	3.0	37.4	○
5	0.5000	110	50	15	30	2.0	26.1	○
6	0.5000	110	50	15	30	1.0	14.5	○
7	0.5000	80	40	15	35	3.0	33.9	○
8	0.5000	80	40	15	35	2.0	24.5	○
9	0.5000	80	40	15	35	1.0	14.4	○

(2) 灰吹き条件の検討

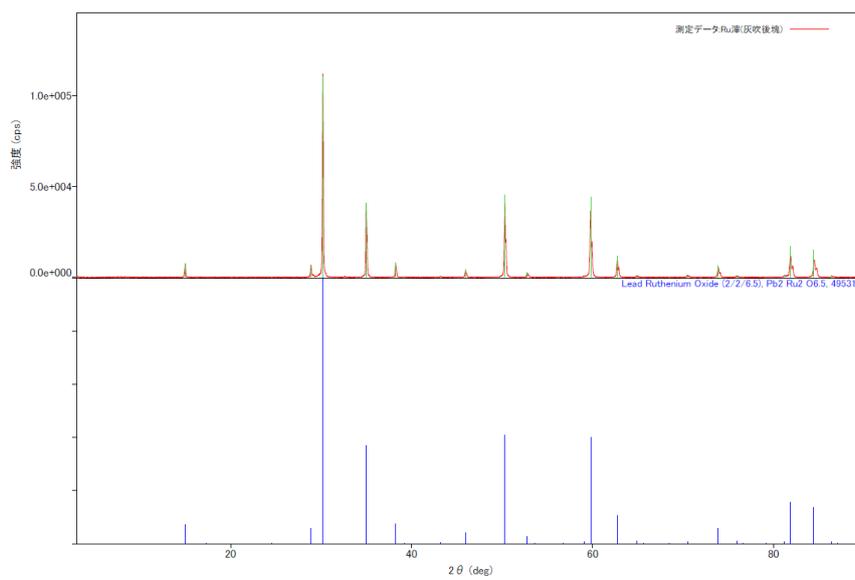
次に、得られた鉛鉞の灰吹き具合を確認するため、状態の良くなかった鉛鉞を用いて予察試験を実施した。

灰吹き後のキューペルを確認したところスポンジ状の黒色塊が発生していた。その様子を図表 II-66 に示す。この黒色塊を調査するため、X 線回折及び SEM-EDS で形態解析と表面観察を実施したところ、黒色塊がルテニウム酸鉛であること及び灰吹きによって Pb が除去できていないことが確認された。X 線回折による形態解析の結果を図表 II-67 に、SEM-EDS による表面観察結果を図表 II-68、図表 II-69 に示す。

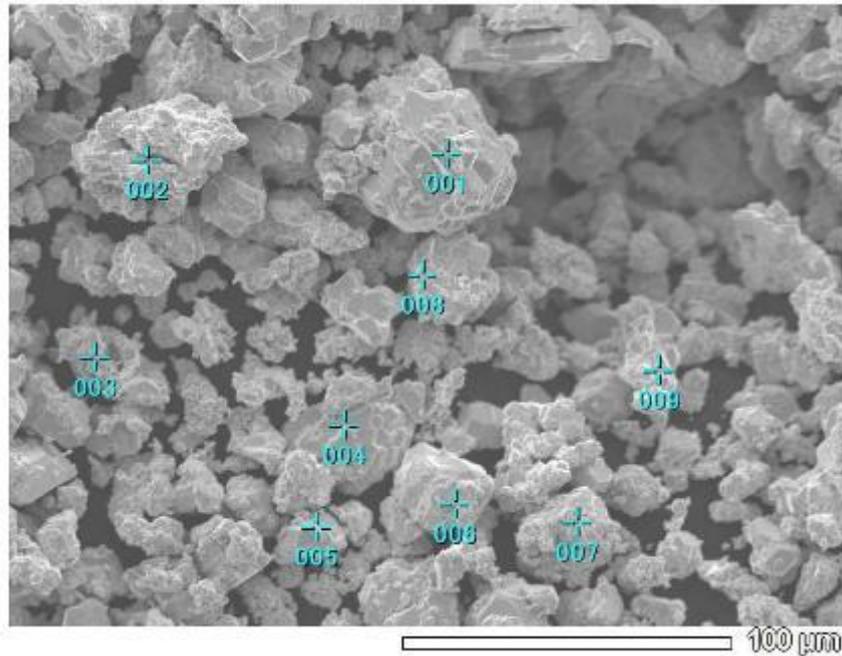
図表 II-66 灰吹き後の黒色塊



図表 II-67 X線回折による黒色塊形態解析結果



図表 II-68 黒色塊の SEM 写真



図表 II-69 黒色塊の SEM-EDS 分析結果

質量%

	O	S	As	Ru	Pb	合計
001	9.97	7.40	0.52		82.10	100.00
002	10.00	7.82			82.17	100.00
003	8.37	4.64	0.22	24.90	61.88	100.00
004	6.61	4.71		28.00	60.68	100.00
005	8.31	4.81		28.74	58.14	100.00
006	1.86	7.09			91.05	100.00
007	5.17	7.84			86.99	100.00
008	3.25	5.13		26.98	64.64	100.00
009	12.89	4.32		27.46	55.33	100.00

(3) 融剤等の混合物の再検討

これまでの試験より鉛鉬の作成状況は良好であったが、ルテニウム酸鉛が生成することから灰吹きによる鉛の分離に問題があることが確認された。そこでルテニウム酸鉛の生成を抑制するために銀粒が生成しやすい条件を検討することとした。図表 II-70 に銀の添加量を変化させた鉛鉬作成試験結果を、図表 II-71、図表 II-72 に銀を添加して作成した鉛鉬 No.1、9 の灰吹き後の写真を示す。No.1~9 の全鉛鉬を灰吹きしたが全ての鉛鉬で黒色塊が生成し、結果として銀添加量を増やしても灰吹き状態の改善はできなかった。

図表 II-70 銀添加試験

No.	試料量	PbO	Na ₂ CO ₃	SiO ₂	Na ₂ B ₂ O ₇	小麦粉 (還元剤)	鉛卸量	Ag 添加量
1	0.1000	80	40	12	20	3.0	37.0	20
2	0.1000	80	40	12	20	3.0	38.4	40
3	0.1000	80	40	12	20	3.0	36.9	60
4	0.1000	80	40	12	20	3.0	36.7	80
5	0.1000	80	40	12	20	3.0	36.8	100
6	0.1000	80	40	12	20	3.0	39.6	150
7	0.1000	80	40	12	20	3.0	39.9	200
8	0.1000	80	40	12	20	3.0	38.3- 39.7	300
9	0.1000	80	40	12	20	3.0	41.2	400

図表 II-71 銀添加試験における灰吹き後の黒色塊 (No1)



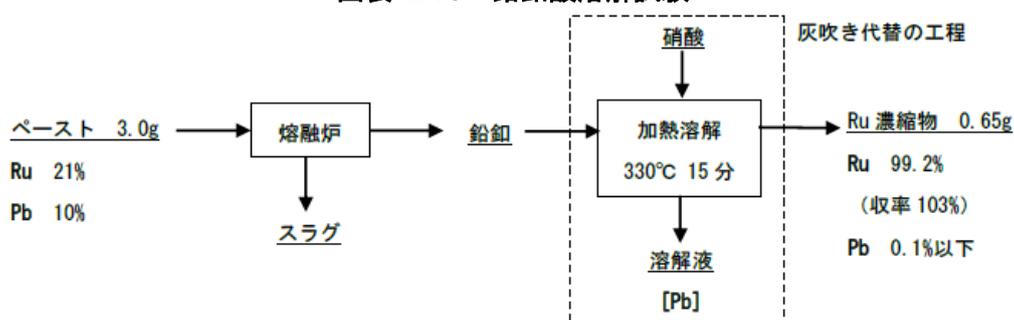
図表 II-72 銀添加試験における灰吹き後の黑色塊 (No9)



(4) 鉛鉛の酸溶解試験

これまでの一連の試験により、良い鉛鉛は得られるが灰吹きによる鉛の分離に問題があることが確認された。そこで灰吹きの代替として鉛鉛を酸溶解することで鉛除去が可能か検討を行った。仮にペースト中に Cr が存在した場合でも、Cr は熔融時にスラグへ移行すると考えられるため、鉛鉛の酸溶解には排水処理に関する懸念はなくなる。鉛鉛を全量硝酸で溶解し、濾過により溶解残渣と溶解液を分離後、溶解残渣の Ru、Pb 濃度を分析した。試験フローとその結果を図表 II-73 に示す。

図表 II-73 鉛鉛酸溶解試験



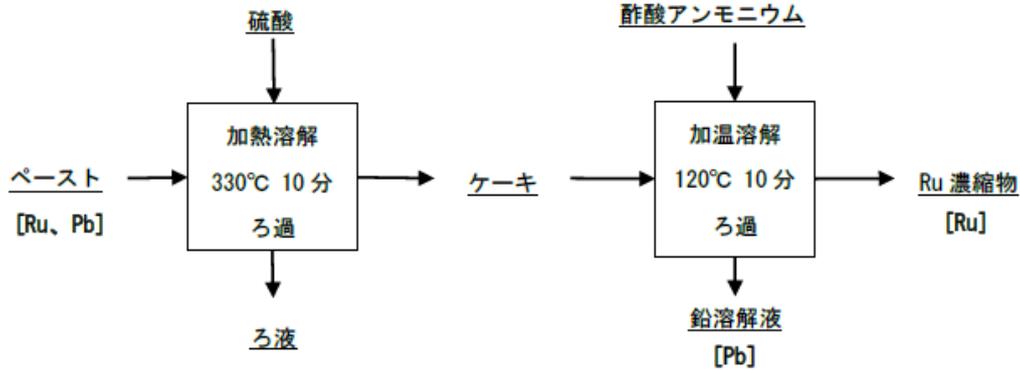
還元熔融処理と硝酸溶解により、Ru 品位 99.2%、Pb 品位 0.1%以下の Ru 濃縮物を得ることができた。また、Ru 収率は 103%であった。分析誤差により収率が 100%超となってしまったが、このことから Ru ロスがほとんど無いことも確認された。

2) 直接酸溶解法

(1) 硫酸法

直接酸浸出法による鉛除去を検討するにあたり、まずは最も一般的な鉍酸である硫酸で処理する方法を検討した。処理フローを図表 II-74 に示す。

図表 II-74 硫酸法フロー



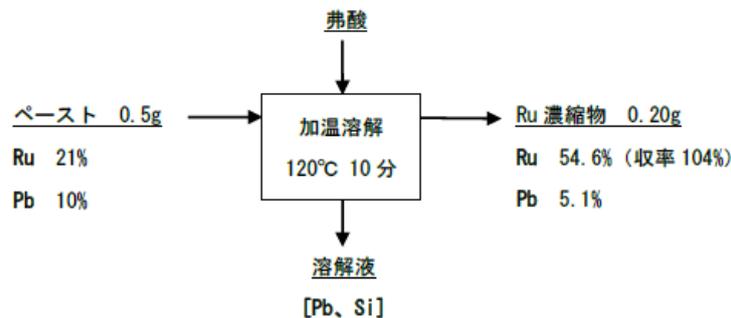
まず、ペーストを硫酸で処理することで硫酸に可溶な不純物を除去し、Pb を硫酸鉛とする。次に硫酸鉛を酢酸アンモニウムで溶解することで Pb が除去された Ru 濃縮物を得る、という方法を検討した。予察試験を実施したが鉛除去率が約 50%と低かったため、本法の実操業への応用は困難と判断した。除去率が低い原因としては、ペースト中の Ru、Si が反応を阻害したためと考えられ、次に Pb と同時に Si も除去できる手法を検討した。

(2) 弗酸法

ペースト中の Si と Pb を除去可能な酸としては弗酸が考えられる。弗酸は Si を溶解すると硅弗化水素酸となり、これは鉛製錬の電解工程において電解液として使用されている酸である。つまり、その他の可溶成分の影響を検討する必要はあるが、Pb の硅弗化水素酸溶解液は鉛製錬の電解液に供することが可能と考えられる。

ペーストを弗酸で溶解し、濾過により溶解残渣と溶解液を分離後、溶解残渣の Ru、Pb 濃度を分析した。試験フローとその結果を図表 II-75 に示す。

図表 II-75 弗酸法フロー

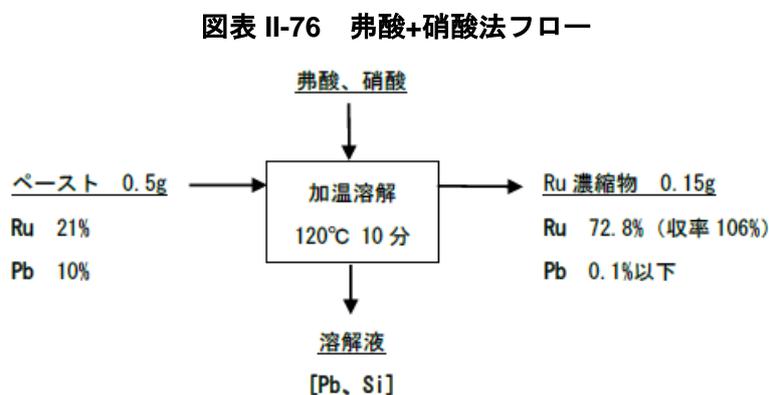


Ru 濃縮物中の Pb 品位は 5.1%と目標の 1%以下まで除去することはできなかった。このことは弗酸が弱酸であることが原因と考えられ、次に弗酸に酸化力のある酸を加えて Pb 及び Si が除去できるか検討した。

(3) 弗酸+硝酸法

ペースト中の Si と Pb を除去可能な酸である弗酸に酸化力のある硝酸を加えて処理する方法を検討した。

ペーストを弗酸と硝酸で溶解し、濾過により溶解残渣と溶解液を分離後、溶解残渣の Ru、Pb 濃度を分析した。試験フローとその結果を図表 II-76 に示す。



弗酸及び硝酸で溶解することにより、Ru 品位 72.8%、Pb 品位 0.1%以下の Ru 濃縮物を得ることができた。また、Ru 収率は 106%であった。分析誤差により収率が 100%超となってしまったが、このことから Ru ロスがほとんど無いことが確認された。

この手法は Cr を含有する処理対象物には適用が困難ではあるが、一段階で Ru と Pb の分離が可能となる点で優れていると考えられる。

2.3.4. 実証結果まとめ・事業化に向けた課題・対応策

ペーストの鉛除去試験を乾式試金法にて実施した。ペースト中の Ru は Nb との合金もしくは二酸化ルテニウムの形で存在しており、還元熔融により鉛鉛に濃縮することができた。鉛鉛から鉛を灰吹きにて除去しようとするルテニウム酸鉛が生成し Ru と Pb の分離が困難となったが、鉛鉛を硝酸で溶解することにより鉛除去と Ru 濃縮が可能となり、目標の Pb 品位 1% 以下の Ru 濃縮物を得ることができた。また、Ru 収率は 103% であった。

ペーストの直接酸溶解法では、弗酸+硝酸法により効率的に鉛除去と Ru 濃縮ができ、目標の Pb 品位 1% 以下の Ru 濃縮物を得ることができた。また、Ru 収率は 106% であった。

事業化への応用にあたっては処理対象物の組成（主に Cr の有無）に応じて、電気炉による還元熔融及びスラグ分離後に酸溶解するプロセス、もしくは弗酸及び硝酸により直接酸溶解するプロセスの適用が考えられる。どちらのプロセスであっても Ru 濃縮物は Ru 精製ラインへ投入可能であり、スラグ及び各種酸溶解液は鉛製錬所の既存プロセスを活用して処理することが考えられるが、実際の適用には詳細な検討を進める必要がある。また、本試験は Ru の収率及び鉛除去率の確認を目的とした調査であったため、実操業を考慮した各種不純物の分配調査が今後の課題となる。

その他の課題として、弗酸+硝酸処理の大型化について検討を行う必要がある。なお、大型化を実施した際の処理コストの概算を検討した結果、弗酸+硝酸処理における前処理方法については Ru 1g 当たり数十円程度のコストであり、Ru 単価と比較して十分に安価である。また、Ru 濃度

も十分に高濃度化が可能のため、既存の精製ラインに投入可能であることから、経済的に回収可能であると判断できる。

3. 廃 HDD 回収ルート拡大に向けた検討

3.1. HDD 商流調査

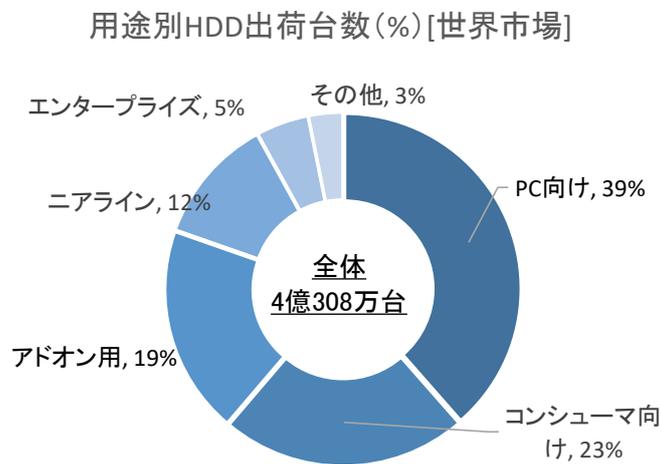
事業化に向けた廃 HDD の回収ルート検討に向けて、国内における HDD の商流調査を実施した。また、国内に限らず、海外からの HDD 回収可能性、回収ポテンシャルについてもあわせて調査・検討を実施した。

3.1.1. HDD の市場概要

2017年における世界市場での HDD 出荷台数は前年度比 4.9%減の 4 億 308 万台となっている。HDD の総需要は 2017 年以降も減少傾向が続いており、2019 年の全世界の出荷台数は 3 億 6,500 万台まで減少すると予測されている（2016 年以降年平均 4.4%減）。国内市場における HDD の出荷台数については、2014 年の実績値（3,300 万台）と世界市場でのトレンドから、2019 年で約 2,600 万台程度であると予測される*。

世界市場における用途別の HDD 出荷台数をみると、2017 年時点で PC 向けが 1 億 5,580 万台で 39%を占めて最も多い。PC 向けの内訳はデスクトップ PC 向けが 7,550 万台、ノート PC 向けが 8,030 万台である。PC 向けの次に多いのが、ビデオゲームや監視カメラ、ビデオレコーダ、カーナビゲーション等のコンシューマ向け（23%）である。コンシューマ向けの内訳は、ビデオレコーダが 3,303 万台、ビデオゲームが 2,850 万台である。PC 向け、コンシューマ向けに続いてアドオン用が 7,910 万台（19%）、ニアライン（12%）、エンタープライズ（5%）と続く。

図表 II-77 用途別 HDD 出荷台数割合（世界市場）



※...JEITA「磁気記憶装置に関する調査報告書 2017年7月21日」

図表 II-78 用途別の HDD 利用製品例

用途		製品例
39%	PC向け	<ul style="list-style-type: none"> • デスクトップPC • モバイルPC
23%	コンシューマ向け	【小型家電】 <ul style="list-style-type: none"> • ビデオゲーム • ビデオレコーダー • カーナビ等
19%	アドオン用	<ul style="list-style-type: none"> • 外付けHDD
12%	ニアライン	<ul style="list-style-type: none"> • サーバー、ストレージ機器 (高速データ転送、高信頼性)
5%	エンタープライズ	<ul style="list-style-type: none"> • データセンター(大容量)

3.1.2. 国内における廃 HDD の回収状況

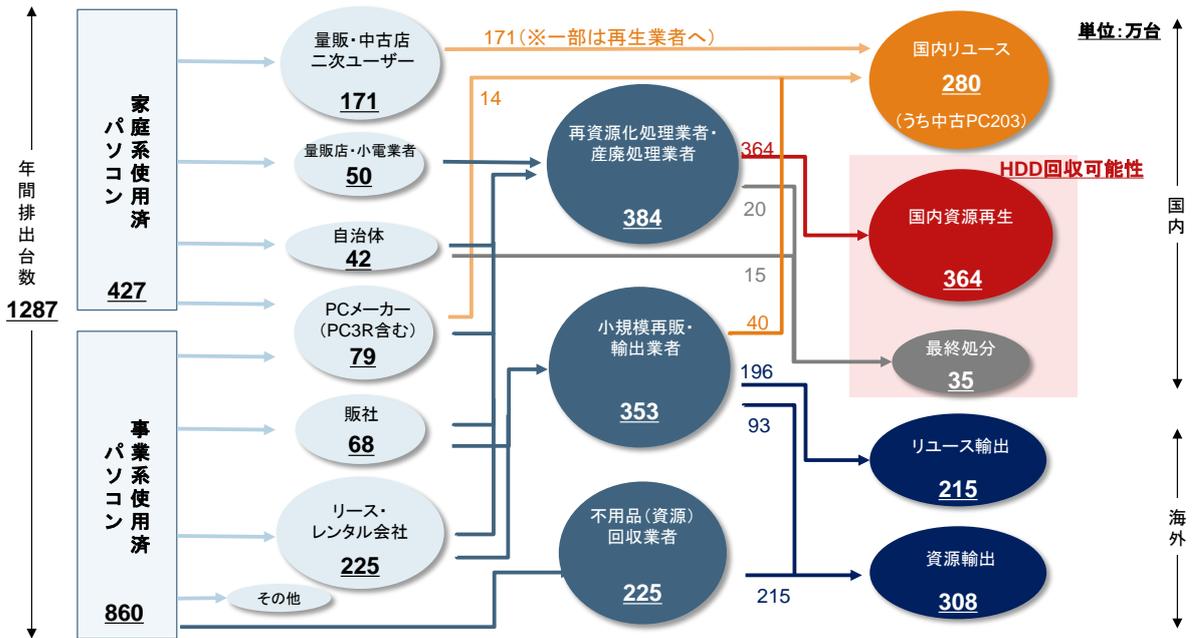
国内における廃 HDD の回収フローについて、特に用途の多い PC とコンシューマ向けについて整理する。

1) 廃 PC の回収状況

国内における廃 PC の回収フローの概要を図表 II-79 に示す。国内の年間 PC 排出台数は 2014 年実績値で 1,287 万台（うち家庭系が 427 万台、事業系が 860 万台）となっており、主に不用品（資源）回収業者、リース・レンタル会社や量販・中古店二次ユーザー、PC メーカー、自治体等に回収されている。回収された PC は再資源化処理業者・産廃処理業者や小規模再販・輸出業者に回収され、リユース、再資源化、輸出、処分されることになる。

資源再生されている PC は年間で 364 万台（年間排出台数の 28.3%）、国内リユースされている PC は 280 万台（同 21.8%）、最終処分されている PC は 35 万台（同 2.7%）である。また、海外輸出されている PC は 523 万台（同 40.6%、リユース輸出と資源輸出の両者を含む）に上る。廃 PC からの HDD 回収に向けては、再資源化処理業者・産廃処理業者が資源再生の対象とする PC、最終処分している PC をターゲットにすることが検討される。

図表 II-79 国内における廃 PC の回収フロー概要（数値は 2014 年時点の台数）

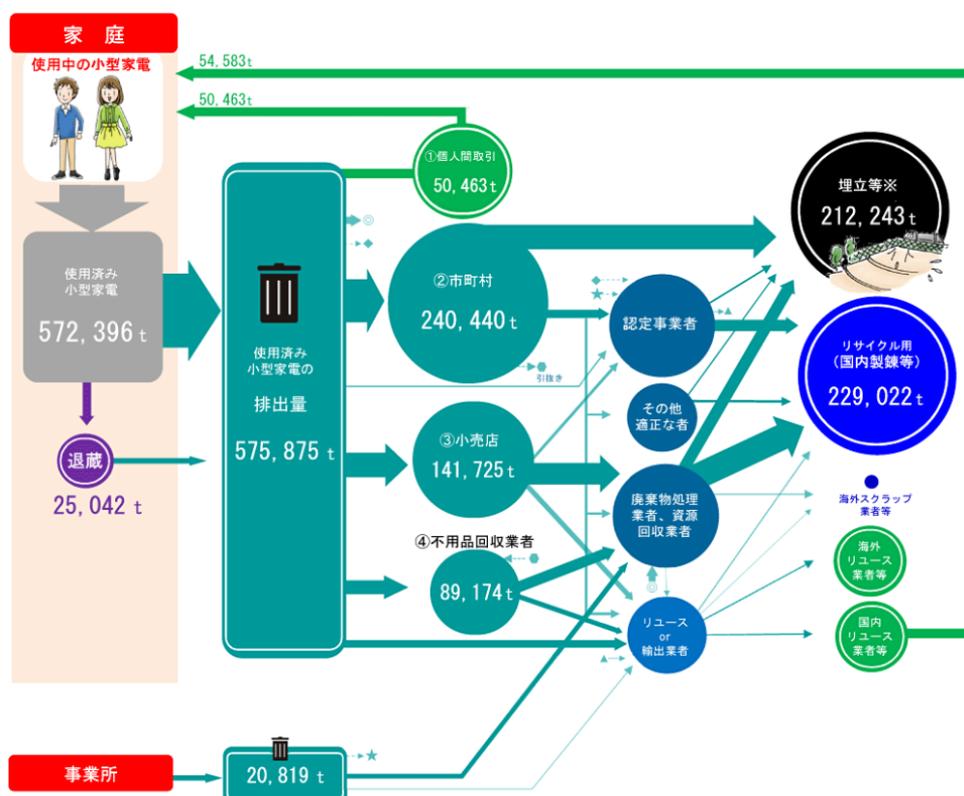


2) 廃小型家電の回収状況

国内における廃小型家電の回収フローを図表 II-80 に示す。国内の年間小型家電排出台数は 2017 年実績値で 596,694t（うち家庭系が 575,875t、事業系が 20,819t）となっており、主に自治体、小売店、不用品回収業者に回収されているほか、個人間取引により回収されている。回収された小型家電は産廃処理業者や小型家電リサイクル認定事業者、輸出業者等に回収され、埋立処分、再資源化、リユースされることになる。

産廃物処理業者や認定事業者等により国内でリサイクルされている小型家電は年間で 229,022t（年間排出台数の 38.4%）、産廃物処理業者や自治体等により埋立処分されている小型家電は 212,243t（同 35.6%）である。廃小型家電からの HDD 回収に向けては、これらの小型家電回収をターゲットにすることが検討される。

図表 II-80 国内における廃小型家電の回収フロー



3.2. 廃 HDD 回収ルート検討

事業化に向けて、効率的に HDD を解体して HD メディアを回収できる技術を持つ解体事業者に廃 HDD を集約するための回収スキーム検討を実施した。廃 HDD の回収については、主に国内の再資源化処理業者・産廃処理業者からの回収、海外 HD メディアメーカーからの回収の 2 つのルートが存在する。

3.2.1. 国内再資源化処理業者・産廃処理業者からの廃 HDD 回収

国内の再資源化処理業者・産廃処理業者から廃 HDD を回収する場合、各業者において実施している情報漏洩防止のセキュリティ対策のための HDD 処理に留意する必要がある。HDD 処理は穴あけ、折り曲げ、圧迫の 3 段階破壊を実施する物理破壊、穴あけによる破壊を実施する穴あけ処理、HD メディア内の磁気の向きを強磁界によってすべて同じ方向に整え、記録データを消去する磁気破壊の 3 パターンがある。

物理破壊処理を適用した場合は、HDD の基板は粉碎され、HD メディアの選別回収や剥離技術の適用が難しくなる課題がある。一方、穴あけ処理はメディアの一部に穴が開くものの多少の変形に留まり、磁気破壊も HDD への外損が与えられないため、回収後の HD メディアからの剥離技術適用が容易である。本実証における検討では、廃 HDD 回収後に Ru 剥離技術を適用することを勘案し、物理破壊されている HDD は回収対象外とする。

図表 II-81 セキュリティ対策のための HDD 処理

処理	処理概要	Ru 剥離技術適用への影響
物理破壊	<ul style="list-style-type: none"> 穴あけ&折り曲げ&圧迫の 3 段階の破壊等を実施 	<ul style="list-style-type: none"> 処理後は HD メディアの基盤は粉碎され、メディアの選別回収及び剥離技術適用が難しい
穴あけ処理	<ul style="list-style-type: none"> 穴あけによる破壊等を実施 	<ul style="list-style-type: none"> 処理後は HD メディアの一部に穴が空くものの、多少の変形に留まるため、メディアからの剥離技術適用可能性がある
磁気破壊	<ul style="list-style-type: none"> HDD 内の磁気の向きを強磁界によって全て同じ方向に整え、記録データを消去 	<ul style="list-style-type: none"> HDD に外損を与えないため、メディアからの剥離技術適用が容易

また、PC3R 及び PC メーカーから PC を回収している再資源化処理業者・産廃処理業者等を対象に、回収ルート検討に向けた現状の回収状況についてのヒアリング調査を実施した。事業化に向けては、下記に示す穴あけ処理もしくは磁気破壊を行っている再資源化処理業者・産廃処理業者等からの廃 HDD 回収を実施する。

図表 II-82 再資源化処理業者・産廃処理業者による HDD 回収実態

事業者	HDD 回収元	セキュリティ対応処理
A 社	<ul style="list-style-type: none"> PC3R 経由、もしくは大手メーカーから回収した PC を解体 	穴あけ処理
B 社	<ul style="list-style-type: none"> PC3R 経由、もしくは大手メーカーから回収した PC を解体 	穴あけ処理
C 社	<ul style="list-style-type: none"> PC3R や北海道内自治体、自衛隊等から回収した PC、サーバーを解体。 HDD 単体の回収も実施 	穴あけ処理
D 社	<ul style="list-style-type: none"> PC3R 経由で回収した PC を解体 回収した小型家電を解体 	穴あけ処理
E 社	<ul style="list-style-type: none"> PC メーカー、病院、企業からの回収した PC を解体 	磁気破壊
F 社	<ul style="list-style-type: none"> 中古車回収により取得したカーナビの解体 	磁気破壊

3.2.2. 海外からの廃 HD メディア回収

海外からの廃 HDD 回収については、主に HD メディアメーカーからの製品規格外品メディアスクラップの回収が検討される。海外 HD メディアメーカーによるメディア処理の実態についてヒアリング調査を実施した。

図表 II-83 海外 HD メディアメーカーへのヒアリング結果

事業者	HD メディア排出量	処理
A 社	年間約 12t (アルミメディア 6t、 ガラスメディア 6t)	<ul style="list-style-type: none"> アルミ基板については LME (ハイグレード) 価格で売却 ガラス基板については売却
B 社	年間約 12t (アルミメディア 6t、 ガラスメディア 6t)	<ul style="list-style-type: none"> アルミ基板については溶解し、HDD アルミ 躯体として再利用 ガラス基板についてはリサイクル (用途は 不明)

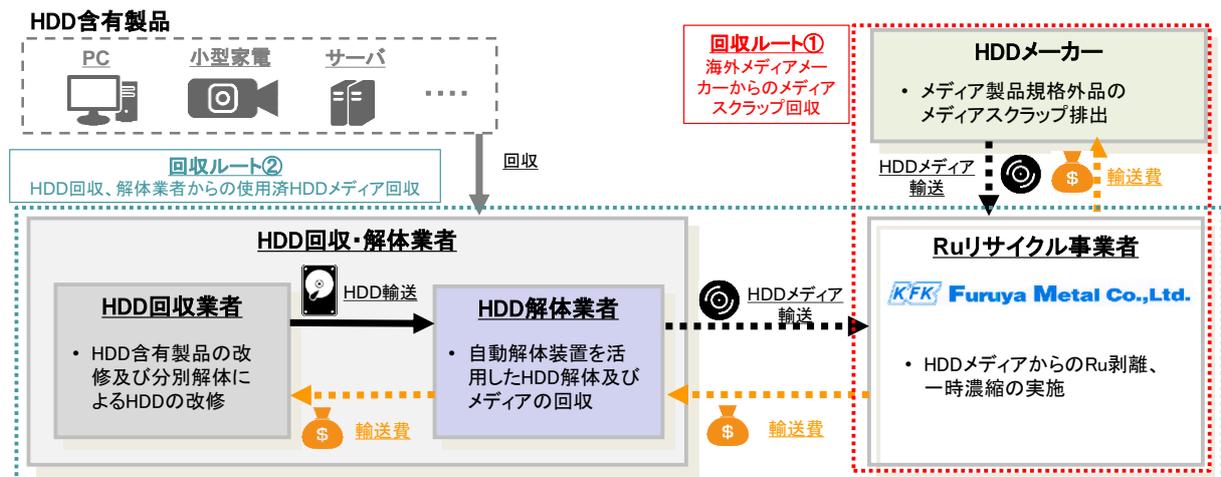
3.2.3. 廃 HDD 回収スキームの全体像

上記商流調査結果等を踏まえた廃 HDD の回収スキームの全体像を図表 II-84 に示す。

まず海外 HD メディアメーカーからのメディアスクラップ回収については、メーカーへのヒアリング結果から年間約 12t のメディア (ガラス、アルミ) が売却されていることが確認でき、大きな回収ポテンシャルを有する。また、スクラップ品は使用済製品と比較してアルミメディア、ガラスメディアともに良好な状態であることが期待されるため、後の剥離工程との連携の観点からもメリットがある。一方、海外からの回収ということで輸送費が高くなることが想定され、HD メディアの調達費をどのように削減していくかが課題となる。

国内 HDD 回収業者 (産廃事業者等) からの HDD 回収についても、事業化に向けては HDD 自動解体装置の国内横展開及び設備スケールアップが必要となる。また、回収ポテンシャルを見ても、国内の PC 向けで HDD400 万台 (メディアで約 800 万枚)、含有貴金属は Ru8kg (約売価 800 万円)、Pt4kg (売価約 1400 万円) と、事業化に向けては国内流通量が少ないことも課題となる。そのため、事業化に向けては両ルートを活用した廃 HDD 回収が求められることになる。

図表 II-84 廃 HDD 回収スキーム全体像



3.2.4. 事業化に向けた課題

HDD 回収にあたっては、近年社会問題となっている情報漏えい対策は欠かせないものとなる。

特に、今回の実証において主に回収対象とする HDD は物理破壊された製品ではなく、穴あけ破壊、もしくは磁気破壊された製品であり、セキュリティ面でのリスクを勘案する必要がある。特に本実証のスキームでは、HDD 回収業者にて HDD を回収しセキュリティ対策を実施した後、解体事業者にて HDD の解体を行うことになるが、情報セキュリティポリシー等で組織全体としてのルールを明確に定め、実際に事故が発生した際の対処方法及び責任所在を明確にする必要がある。

セキュリティ対策に向けては、HDD (HD メディア) のトレーサビリティシステムの構築も検討される。HDD メーカー、HD メディアメーカーに加え、HDD の回収・解体に関わる複数の産廃事業者や解体事業者がトレーサビリティシステムを共同で構築し、メディアごとに「誰が製造したのか」「誰がデータ消去処理を行ったのか」「今どこでそういった処理がなされているのか」に関する情報へのアクセス利便性を高めることで、事故の発生リスクの低減及び事故発生時の迅速な対応につながることを期待される。事業化に向けては、トレーサビリティシステム構築等による情報漏えいリスクへの対策及び対策に向けたコスト負担についても検討していくことが求められる。

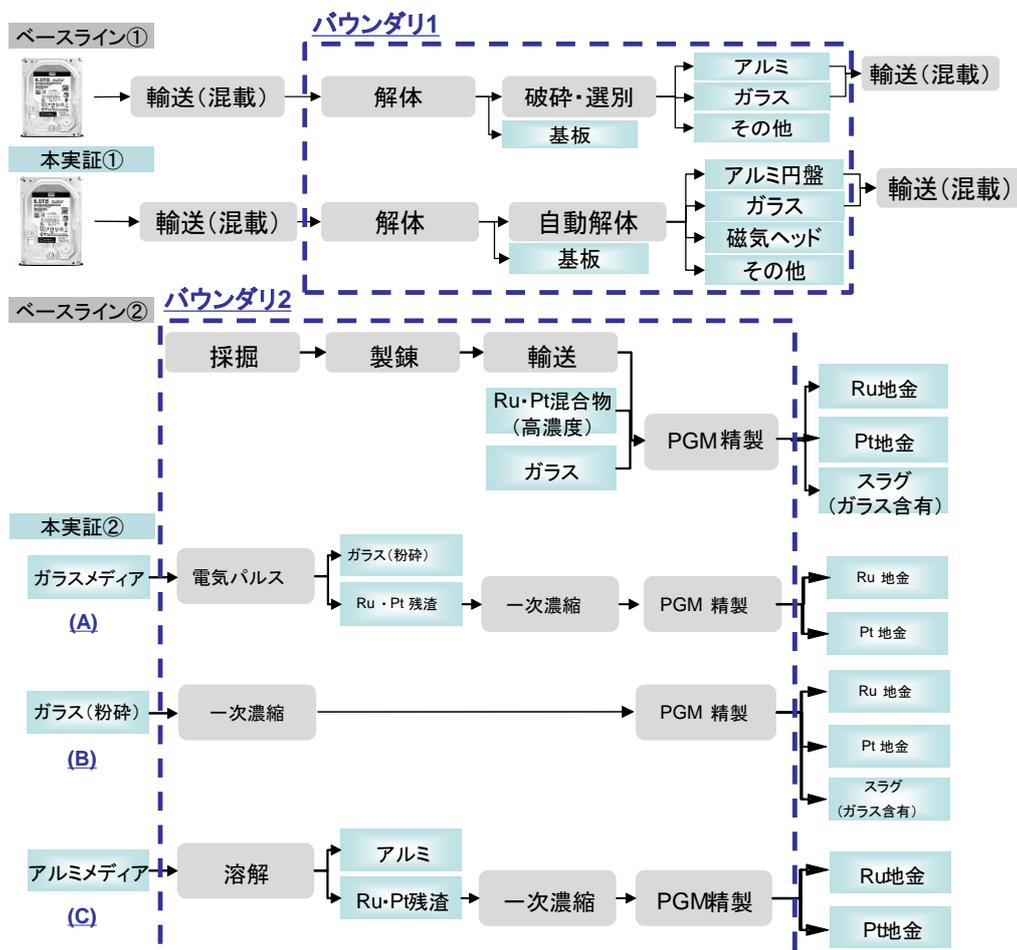
4. 環境影響及び事業性評価

4.1. LifeCycleAssessment

4.1.1. インベントリ・バウンダリの考え方

図表 II-85 に今回算出する CO2 排出量の対象範囲を示す。HDD 調達から Ru 製錬のライフサイクルの中で、本事業の対象である『HDD 解体』、『剥離』、『濃縮』、『製錬』プロセスを評価対象とした。なお、『HDD 解体』と『剥離』、『濃縮』、『製錬』でそれぞれバウンダリを設定した。『HDD 解体』においては、本実証では自動解体装置の使用であるが、ベースラインでは HDD 破砕機の使用とした。また、本実証における『剥離』、『濃縮』、『製錬』においては、ベースラインとして、鉱山からの『Ru 採掘』、『製錬』、『輸送』とした。なお、HDD 調達、解体後 HD メディアの輸送プロセスは本実証とベースラインで同等であると仮定し、CO2 排出量の算出の評価対象外とした。また、比較する CO2 排出量の原単位としては、製錬後の Ru1kg あたりの CO2 排出量とした。

図表 II-85 本実証における CO2 排出量の対象範囲



図表 II-86 バウンダリ設定

バウンダリ		詳細
バウンダリ 1	ベースライン	<ul style="list-style-type: none"> HDD 解体に既存の破碎・選別機を使用した際の CO2 発生量
	本実証	<ul style="list-style-type: none"> HDD 解体に自動解体装置を使用した際の CO2 発生量
バウンダリ 2	ベースライン	<ul style="list-style-type: none"> 鉱山から採掘し、製錬、輸送する際にかかる CO2 排出量
	本実証	<p>【ガラスメディア/電気パルス】</p> <ul style="list-style-type: none"> 電気パルス手法によるガラスメディアからの積層物質剥離及び剥離後の Ru、Pt 残渣の一次濃縮・PGM 精製に係る CO2 排出量 <p>【粉碎ガラス】</p> <ul style="list-style-type: none"> ガラスメディアをプラズマ炉にて熔融し Fe メタルにて捕集、濃縮化するプロセスに係る CO2 排出量 <p>【アルミメディア/表面溶解】</p> <ul style="list-style-type: none"> アルミメディアの表面溶解、剥離後の Ru・Pt 残渣の一次濃縮・PGM 精製に係る CO2 排出量

4.1.2. CO2 削減効果

1) 算出根拠

各プロセスにおける CO2 排出量の導出根拠を示す。

図表 II-87 CO2 排出量導出根拠 (バウンダリ 1)

	項目	導出根拠
ベースライン	破碎機使用に伴う CO2 排出量	<ul style="list-style-type: none"> 破碎機の使用電力は、HDD 解体事業者へのヒアリング結果に基づき、75kW と設定。 (HDD 処理重量 830kg 時) HDD 解体に伴い回収される各部品の売却価格按分により、HD メディア回収に伴う CO2 排出量を算出。 CO2 排出係数は東京電力調整後排出係数 (2018 年) 0.455kg-CO2/kWh を使用。
本実証	自動解体装置使用に伴う CO2 排出量	<ul style="list-style-type: none"> 破碎機の使用電力は、HDD 解体事業者へのヒアリング結果に基づき、25.5kW と設定。 (HDD 処理重量 830kg 時) HDD 解体に伴い回収される各部品の売却価格按分により、HD メディア回収に伴う CO2 排出量を算出。 CO2 排出係数は東京電力調整後排出係数 (2018 年) 0.455kg-CO2/kWh を使用。

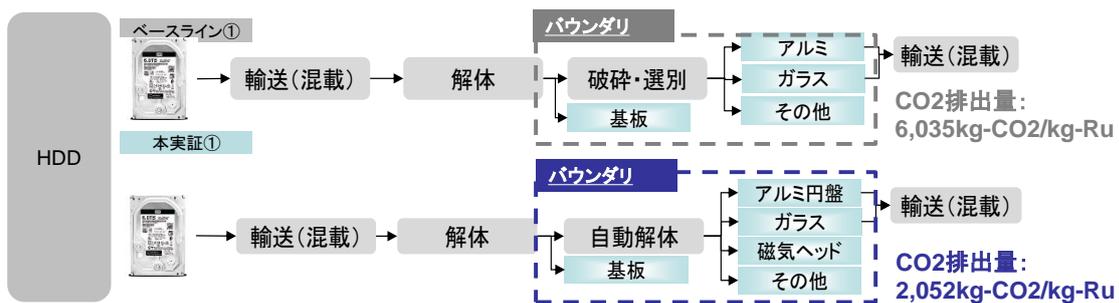
図表 II-88 CO2 排出量導出根拠 (バウンダリ 2)

項目	導出根拠
ベースライン 貴金属鉱石、資源の採掘～輸送～精製に伴う CO2 排出量	<ul style="list-style-type: none"> IPALCAStudy2013 にて示されている PGM の鉱山採掘～精製過程の CO2 排出原単位 (ロジウム) の値 30kg-CO2/kg を使用
本実証 剥離に伴う CO2 排出量	<ul style="list-style-type: none"> 実証結果から得られた電気使用量、薬品使用量、燃料使用量を使用。
濃縮・溶液化に伴う CO2 排出量	
精製に伴う CO2 排出量	

2) 試算結果

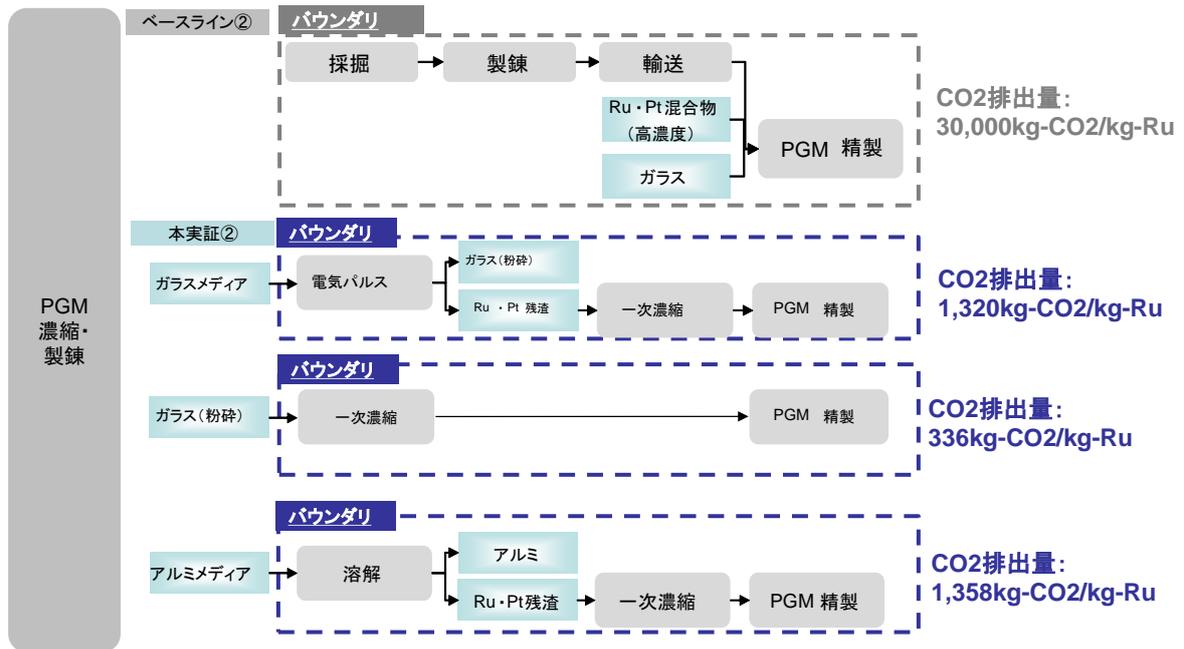
上記の導出根拠に基づいて試算した CO2 削減効果について示す。バウンダリ 1 について、本事業で実証した HDD 自動解体装置使用による HDD 解体に伴う CO2 排出量は 2,052kg-CO2/kg-Ru となり、現状 HDD 解体に使用されている破碎・選別機を使用した場合の CO2 排出量 6,035kg-CO2/kg-Ru より小さく、本実証プロセスによる CO2 削減効果が確認された。また、バウンダリ 2 についても、本事業で実証した工程による CO2 排出量は 1,320kg-CO2/kgRu (ガラスメディア/電気パルス)、336kg-CO2/kgRu (粉碎ガラス)、1,366kg-CO2/kgRu (アルミメディア/表面溶解) は、ベースラインにおける CO2 排出量 30,000kg-CO2/kg-Ru より小さくなり、本実証適用による CO2 削減効果が確認された。

図表 II-89 CO2 削減効果算出結果 (バウンダリ①)



※解体と輸送(混載)についてはベースラインと本実証でプロセスが同等であると仮定し、CO2排出量の算出の評価対象外とした

図表 II-90 CO2 削減効果算出結果 (バウンダリ②)



4.2. 事業性評価

本節では、HDD からの Ru リサイクル事業の事業性を評価するための評価項目及び評価手法について整理する。HDD からの Ru リサイクル事業については、HDD の解体～剥離・濃縮～分離精製までのプロセスごとに評価項目を整理する（図表 II-91）。

図表 II-91 実証プロセスごとの評価項目概要



4.2.1. 支出項目

支出の算定に必要な項目を図表 II-92 に示す。

図表 II-92 事業性評価における評価指標（支出項目）

項目	算定の考え方
① HDD 調達コスト	・ 再資源化処理業者・産廃処理業者等、HD メディアメーカーからの HDD 回収コスト（輸送費含む）
② HDD 解体コスト	・ HDD 自動解体装置使用に伴う電気使用料、人件費
③ 剥離コスト	・ HD メディアからの Ru 剥離に係る薬品使用コスト、電気使用料、人件費等
④ 濃縮・溶液化コスト	・ Ru 濃縮、溶液化に係る薬品使用コスト、電気使用料、人件費等
⑤ 分離精製、回収コスト	・ Ru、Pt の分離精製、回収に係るコスト

1) HDD 調達コスト

HDD 調達コストについては、再資源化処理業者・産廃処理業者及び HD メディアメーカーの HDD 販売価格を参考値として使用した。対象とする HDD は「基盤あり、3.5 インチ型」で、磁気破壊済のものとする。輸送費については、フレコンパックでの輸送を前提とし、東京～大阪間での輸送ケースを想定した場合の値を事業者からご提供いただいた。

2) HDD 解体コスト

HDD 解体コストについては、従来の完全手分解ではコスト過多になることが自明のため、短時間に大量分解のメリットがあり、HDD 解体事業者が実際に使用している HDD 自動解体装置使用に伴う電気使用料、人件費を解体コストとして使用した。

3) 剥離コスト

メディアからの Ru 剥離コストについては、剥離に活用する技術（表面剥離、電気パルス）別に薬品使用料、電気使用料、人件費等を算出した。

4) 濃縮・溶液化コスト

Ru 濃縮・溶液化コストについては、剥離に活用する技術（表面剥離、電気パルス）別に薬品使用料、電気使用料、人件費等を算出した。

5) 分離精製コスト

メディアから剥離、濃縮した Ru 及び Pt を分離精製し回収するコストについては、薬品使用料、電気使用料、人件費等を算出した。

4.2.2. 収入項目

収入の算定に必要な項目を示す。

図表 II-93 事業性評価における評価項目（収入項目）

項目	算定の考え方
① HDD 部品売却収入	・ HDD 分解後の部品（基板、筐体等）に含まれる貴金属の売却収入
② 剥離後メディア売却収入	・ Ru 剥離後の HD メディア（ガラス、アルミ）の売却収入
③ 回収済 Ru・Pt 価値	・ 変動が大きいため、パラメータ設定

1) HDD 部品販売収入

HDD 部品の販売収入については、HDD 使用部品のマテリアルバランス集計を実施したうえで、各部品の出荷先及び平均売却単価から販売収入を算出した。HDD 使用部品のマテリアルバランス集計結果及び売却先を示す（重量比率は電磁破壊 HDD を自動分解した際の数値を記載）。

図表 II-94 HDD 使用部品のマテリアルバランス集計結果及び売却先

部品	評価対象	売却先	重量比率 (%)
HDD ネジ類	鉄(低品位)	製鉄業者	0.4
スピンドルモータ	鉄(低品位)	製鉄業者	2.0
磁気ヘッド	鉄・非鉄混合物	金属商→製鋼・精錬	2.1
廃プラ類	廃プラスチック(産廃)	(焼却)	0.2
HDD 基板	PC 基板(金銀滓)	貴金属精錬	2.8
HDD 筐体	アルミ	金属商→非鉄精錬	42.1
HDD 蓋部	ステンレス・アルミ	金属商→製鋼・精錬	20.1
HDD メディア	アルミ(低品位)	金属商→非鉄精錬	9.2
ヨーク部	鉄	製鉄業者	10.7

部品	評価対象	売却先	重量比率 (%)
ネオジム磁石	ネオジム磁石	磁石製造業者	3.3
集塵ダスト	PC 基板	貴金属精錬	0.1
鉄混り	鉄(低品位)	製鉄業者	1.2
ガラス混じり	金銀滓	貴金属精錬	0.4
非鉄混り	アルミ	アルミ精錬	0.4
プラ混り	金銀滓	貴金属精錬	2.6
SUS 混り	ステンレス	金属商→製鋼	2.1
その他	—	—	0.2

2) 剥離後メディア販売収入

HD メディアメーカーおよびアルミ・ガラスメーカーへのヒアリング調査を実施し、Ru 剥離後のメディアの販売可能性について検討を行った。

図表 II-95 剥離後メディアの販売可能性調査結果

調査先		調査結果
ガラス	HDD 用ガラスメディアメーカー	• 品質が担保できないため、リサイクルは不可
	ガラスウールメーカー	• グラスウール原料としてリサイクル可能性あり。
アルミ	金属商、非鉄精錬業者	• 剥離時に使用した薬液に毒性がある等問題が無くアルミニウムが残っていれば、剥離前と同様に買取が可能

3) 回収済 Ru、Pt 価値

回収済の Ru、Pt の市場価値については、田中貴金属「産業用相場情報」を参考とする。2019 年 12 月の Ru、Pt の相場（平均値）を図表 II-96 に示す。

図表 II-96 貴金属相場（2019 年 12 月平均値）

貴金属	相場
Ru	1,002 円/g
Pt	3,283 円/g

4.2.3. 事業性評価

1) 算出根拠

採算性の試算に用いた各パラメータの値を示す（非公開とされる一部データを除く）。

図表 II-97 採算性試算参考データ（HDD 基本情報）

項目	値
HDD 重量（ガラスメディア）	87g/台
HDD 重量（アルミメディア）	700g/台
ガラスメディア重量	0.005kg/枚
アルミメディア重量	0.022kg/枚

図表 II-98 採算性試算参考データ（貴金属剥離量）

項目	値
ガラスメディア 1 枚当たり Ru 抽出量 （電気パルス適用時）	0.00037g/枚
ガラスメディア 1 枚当たり Pt 抽出量 （電気パルス適用時）	0.00032g/枚
ガラスメディア 1 枚当たり Ru 抽出量 （表面溶解適用時）	0.00011g/枚
ガラスメディア 1 枚当たり Pt 抽出量 （表面溶解適用時）	0.00029g/枚
アルミメディア 1 枚当たり Ru 抽出量 （表面溶解適用時）	0.00116g/枚
アルミメディア 1 枚当たり Pt 抽出量 （表面溶解適用時）	0.00055g/枚

図表 II-99 採算性試算参考データ（HDD 調達・解体コスト）

項目	値	備考
HDD1kg あたり調達費用	100 円/kg	基盤付き、磁気破壊後穴あけなし HDD の調達を想定
HDD1kg あたり輸送費用	50 円/kg	フレコンでの輸送、車両 1 台あたり 1000kg の輸送で東京～大阪間の輸送を想定。
HDD 解体に係る人件費 （HDD1kg あたり）	104.8 円/kg	HDD 重量 830kg 処理時のコスト
HDD 解体に係る電気使用量 （HDD1kg あたり）	5.5 円/kg	HDD 重量 830kg 処理時のコスト

図表 II-100 採算性試算参考データ（剥離コスト）

項目	値
Ru1kg あたり電気使用料（ガラスメディア/電気パルス適用時）	25.0 円/g
Ru1kg あたり電気使用料（アルミメディア/表面溶解適用時）	14.9 円/g
Ru1kg あたり薬品使用コスト（ガラスメディア/電気パルス適用時）	0 円/g
Ru1kg あたり薬品使用コスト（アルミメディア/表面溶解適用時）	25.8 円/g
Ru1kg あたり人件費（ガラスメディア/電気パルス適用時）	404.8 円/g
Ru1kg あたり人件費（アルミメディア/表面溶解適用時）	504.2 円/g

図表 II-101 採算性試算参考データ（濃縮・精製コスト）

項目	値
Ru1kg あたりコスト（電気使用量、薬品コスト、人件費）	100 円/g

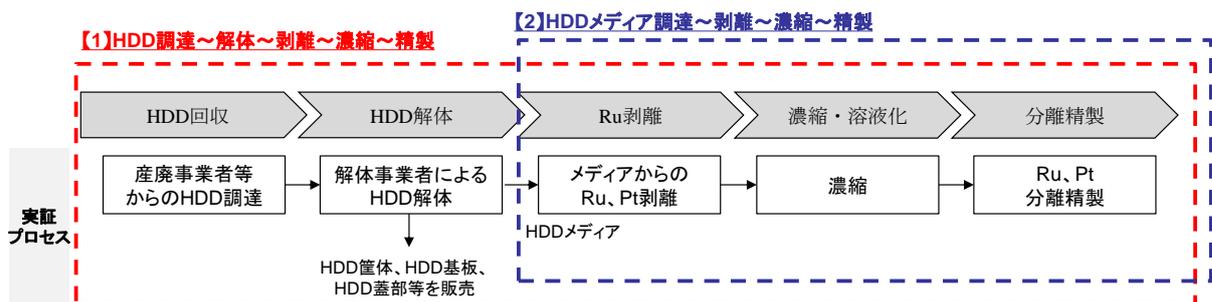
図表 II-102 採算性試算参考データ（剥離後アルミ・ガラス売却益）

項目	売却単価
剥離後粉砕ガラス	3 円/kg
剥離後アルミメディア	51 円/kg

2) 試算結果

事業性評価では、本実証プロセスのうち、HDD 調達～HDD 解体～剥離～濃縮～精製プロセス全体における採算性と HD メディア調達～剥離～濃縮～精製プロセスにおける採算性について試算を行った。採算性の試算は“電気パルスによるガラスメディアからの剥離”と“表面溶解によるアルミメディアへの表面溶解”の2ケースにおいて実施した。

図表 II-103 事業性評価の全体像



まず、プロセス全体における採算性試算結果を示す。HDD 調達費用、解体費用に対して HDD 部品の売却益、剥離後 HD メディアの売却益が小さいため、事業全体での採算性確保が難しいことが確認された。採算性の確保に向けては、HDD 調達プロセスにおける輸送コストの削減、解体プロセスにおける大量処理実施による解体コストの削減等に向けた検討が必要となる。また、HDD の部品売却益については、鉄・非鉄（アルミ）の相場の不調によるものと思料され、相場の上昇に伴い部品売却益も増加することが期待される。

図表 II-104 採算性試算結果①【ガラスメディア/電気パルス】

項目		値 (円/Ru1g)
支出項目	HDD 調達コスト	35,270
	HDD 解体コスト	25,933
	剥離コスト	429.8
	濃縮・精製コスト	168.2
収入項目	HDD 部品売価収入	31,057
	剥離後ガラス売却収入	41
	Ru、Pt 売却収入	3,981
計 (収入－支出)		-26,723

図表 II-105 採算性試算結果①【アルミメディア/表面溶解】

項目		値 (円/Ru1g)
支出項目	HDD 調達コスト	31,262
	HDD 解体コスト	22,986
	剥離コスト	544.8
	濃縮・精製コスト	169.4
収入項目	HDD 部品売価収入	27,527
	剥離後アルミ売却収入	967.2
	Ru、Pt 売却収入	2,500
計 (収入－支出)		-24,935

続いて、HD メディア～剥離～濃縮～精製プロセスにおける採算性試算結果を示す。この場合、濃縮 Ru、Pt の売価が HD メディアの調達コスト及び剥離、濃縮、精製コストを上回り、事業採算性が確保されることが確認された。また、表面溶解による剥離と比較し、電気パルスによる剥離のコスト優位性も確認された。

図表 II-106 採算性試算結果②【ガラスメディア/電気パルス】

項目		値 (円/Ru1g)
支出項目	HD メディア調達コスト	689
	剥離コスト	429.8
	濃縮・精製コスト	168.2
収入項目	剥離後ガラス売却収入	41
	Ru、Pt 売却収入	3,981
計 (収入－支出)		2,736

図表 II-107 採算性試算結果②【アルミメディア/表面溶解】

項目		値 (円/Ru1g)
支出項目	HDD 調達コスト	967
	剥離コスト	544.8
	濃縮・精製コスト	169.4
収入項目	剥離後アルミ売却収入	967.2
	Ru、Pt 売却収入	2,500
計 (収入－支出)		1,786

5. 事業化可能性の検討

5.1. 事業化に向けたマイルストーン案

図表 II-108 に、事業化に向けたマイルストーン案を示す。2020 年度は、Ru リサイクル工程のスケールアップに向けた設備投資を開始する。Ru 剥離、一次濃縮プロセスでは既存設備の活用が可能であるが、特に本実証で検証した自動解体技術適用による HDD 解体工程や電気パルスによる剥離工程におけるスケールアップが必要となる。2021 年度には、設備の信頼性検証に加え、HDD 及び HD メディアの調達ルートを確立し、採算性の詳細評価検討を実施する。2022 年度から、上記検討を経て、本格商用化を開始する予定とする。

2022 年度の商用化開始時点では、HDD メーカーによる HD メディア 12t (約 200 万枚)、HDD 回収・解体事業者からの回収 128t (約 1000 万枚) を対象にすることを旨とする (Ru、Pt リサイクル額：3,300 万円程度)。2025 年度をめどに海外 (アジア圏) からの調達を開始し、各拠点に電気パルス剥離装置の設置及び剥離物の日本への輸送を開始する。この時点での対象 HD メディアを 6,000 万枚程度とする (Ru、Pt リサイクル額：1 億 6,500 万円程度)。2030 年度時点で全世界の HD メディアの約 3 割 (3 億枚程度) を回収することを目標とする (Ru、Pt リサイクル額：8 億 2,500 万円程度)。

図表 II-108 事業化に向けたマイルストーン案

2019	2020	2021	2022	2023
技術検証 調達ルート検討	設備投資 開始	採算性詳細検討 調達ルート調整	商用化開始	
本実証による検討	HDD自動解体装置 や電気パルス治具 のスケールアップ	産廃事業者や メディアメーカー との調整		

5.2. 普及の見通し

本実証により、HD メディアからの Ru 剥離・濃縮技術は、HD メディアに加え電極にも展開の可能性が確認された。HD メディア他のアルミ付着、ガラス付着貴金属からの Ru 濃縮において本実証事業で得た成果を展開し、全体の処理量、貴金属の回収量をかき上げし、設備投資に対しての資金回収を早めることで、商用化を実現することが検討される。また、本実証工程が既存工程と比較して省 CO2 であることが確認されたことから、環境価値の側面からも今後の普及が十分に見込まれる。

さらに、Ru を中心とした独自技術で多数の世界トップシェア製品を製造している当社が本実証成果を展開していくことで、今後廃製品からの低濃度 PGM 回収の動きがより活性化していくことが期待される。

5.3. 事業化に向けた課題

本実証事業において、HD メディア、電極、ペーストからの効率的な Ru リサイクルの可能性が示されたものの、事業化に向けてはいくつかの課題が残されている。最終的な事業化に向けて検討すべき課題を以下に示す。

【HD メディアからの Ru リサイクル】

- HDD 調達量の確保（日本国内の PC 向けのみで HDD400 万台（HD メディアで 800 万枚）含有貴金属は Pt4kg（1400 万円）、Ru8 kg（800 万円）と、事業化に向けては国内流通量が少ない）
- HDD 調達～解体プロセスにおけるコストの削減（解体設備横展開による輸送費の削減等）
- 解体、剥離プロセスにおける成果物売却先の検討
- 表面剥離および電気パルス後 HD メディアのリサイクル検討
- 剥離物および溶解液の精製工程へのライン間の調整
- 表面剥離前処理の自動化および電気パルスの自動化、スケールアップ設備設計の検討

【電極からの Ru リサイクル】

- 剥離後の貴金属回収量の詳細分析
- 採算性の詳細検討
- 電気パルスの自動化、スケールアップ設備設計の検討

【ペーストからの Ru リサイクル】

- 処理対象物の組成（主に Cr の有無）に応じ、電気炉による還元溶融及びスラグ分離後の酸溶解プロセス、もしくは弗酸及び硝酸により直接溶解するプロセスの適用検討
- 各種不純物の分配調査の実施

6. まとめ

本事実証事業では、HD メディア、電極、ペーストからの効率的な Ru リサイクル実現の可能性と課題の明確化を行った。

HD メディアからの Ru リサイクルについては、アルミ溶解（全溶解）、表面溶解、電気パルスの 3 手法について、回収効率性の検証を行った。表面溶解手法では、まずガラスメディア、アルミメディアそれぞれの溶解条件の精査を行った。ガラスメディアについては、溶解溶液として酸混合溶液を使用し、酸により金属層を溶解することで膜剥離を行うことで、ガラスメディアから Ru および Pt が剥離されることが確認された。アルミメディアについては、メディア表層に DLC 層が存在し、溶液の浸透を妨害するために時間がかかることから、前処理としてアルミメディアを塑性加工し、DLC 層に亀裂をいれることで、反応時間の短縮を図った。その後溶解溶液として酸溶液を使用し、金属層を溶解することで膜剥離を行った。剥離後のアルミメディアの表面を簡易 XRF にて測定したところ、Ru および Pt が検出されなかったため、剥離に成功したと判断した。上記溶解条件の精査結果をもとに、アルミメディアを対象とした大規模試験を実施し、剥離が成功したことを確認した。

電気パルスに関しては、アルミメディアに対しては治具/HDD 界面での固定位置での放電が起こり、中央部では電流痕が見られなかったものの、ガラスメディアに対しては電気パルスによる Ru 剥離が行えることが確認された。また、剥離条件については、電圧一定条件と比較して電圧変化条件による剥離が剥離面積、充電エネルギーの観点から効率的な剥離が可能であること、また倍電圧回路と Blumlein 電源を比較し、剥離面積は大きく変わらないものの、Blumlein 電源では消費エネルギーが少なく効率的な剥離が可能であることが確認された。

ペーストからの Ru リサイクルについては、乾式試金法と直接酸溶解法の 2 手法について、回収効率性の検証を行った。乾式試金法において、ペースト中の Ru は Nb との合金もしくは二酸化ルテニウムの形で存在しており、還元熔融により鉛鉛に濃縮することができた。鉛鉛から鉛を灰吹きにて除去しようとするルテニウム酸鉛が生成し Ru と Pb の分離が困難となったが、鉛鉛を硝酸で溶解することにより鉛除去と Ru 濃縮が可能となり、目標の Pb 品位 1%以下の Ru 濃縮物を得ることができた。また、Ru 収率は 103%であった。直接酸溶解法では、弗酸+硝酸法により効率的に鉛除去と Ru 濃縮ができ、目標の Pb 品位 1%以下の Ru 濃縮物を得ることができた。また、Ru 収率は 106%であった。

また、事業化に向けて、効率的に HDD を解体して HD メディアを回収できる技術を持つ解体事業者に廃 HDD を集約するための回収スキーム検討を実施した。廃 HDD の回収については、主に国内の再資源化処理業者・産廃処理業者からの回収、海外 HD メディアメーカーからの回収の 2 つのルートを検討した。海外 HD メディアメーカーからの HD メディアスクラップ回収については、大きな回収ポテンシャルを有し、スクラップ品は使用済製品と比較してアルミメディア、ガラスメディアともに良好な状態であることが期待されるため、後の剥離工程との連携の観点からもメリットがあることが確認された。一方、海外からの回収ということで輸送費が高くなることが想定され、HD メディアの調達費をどのように削減していくかが課題となる。国内 HDD 回収業者（産廃事業者等）からの HDD 回収についても、国内の PC 向けで HDD400 万台（メディアで約 800 万枚）、含有貴金属は Ru8kg（約売価 800 万円）、Pt4kg（売価約 1400 万円）と、事

業化に向けては国内流通量が少ないことも課題となり、事業化に向けては両ルートを活用した廃 HDD 回収が求められることになる。

HDD 調達～解体～剥離プロセス全体における採算性を試算したところ、事業全体での採算性確保が難しいことが確認された。HDD 調達費用、解体費用に対して HDD 部品の売却益、剥離後 HD メディアの売却益が小さいため、採算性の確保に向けては、HDD 調達プロセスにおける輸送コストの削減、解体プロセスにおける大量処理実施による解体コストの削減等に向けた検討が必要となる。また、HDD の部品売却益については、鉄・非鉄（アルミ）の相場の不調によるものと思料され、相場の上昇に伴い部品売却益も増加することが期待される。なお、HD メディア調達～剥離～濃縮～精製プロセスにおける採算性については、濃縮 Ru、Pt の売価がメディアの調達コスト及び剥離、濃縮、精製コストを上回り、事業採算性が確保されることが確認された。試算の中で、表面溶解による剥離と比較した電気パルスによる剥離のコスト優位性も確認された。

CO₂ 削減効果については、本事業で実証した HDD 自動解体装置使用による HDD 解体に伴う CO₂ 排出量は 1319.8kg-CO₂/kg-Ru となり、現状 HDD 解体に使用されている破碎・選別機を使用した場合の CO₂ 排出量 6,035kg-CO₂/kg-Ru より小さく、本実証プロセスによる CO₂ 削減効果が確認された。また、本事業で実証した工程による CO₂ 排出量は 1,320kg-CO₂/kgRu（ガラスメディア/電気パルス）、336kg-CO₂/kgRu（粉碎ガラス）、1,366kg-CO₂/kgRu（アルミメディア/表面溶解）は、ベースラインにおける CO₂ 排出量 30,000kg-CO₂/kg-Ru より小さくなり、本実証適用による CO₂ 削減効果が確認された。

本実証事業において、HD メディア、電極、ペーストからの効率的な Ru リサイクルの可能性が示されたものの、事業化に向けてはいくつかの課題が残されている。HD メディアからの Ru リサイクルにおいては、HDD 調達量の確保、調達・解体プロセスにおけるコスト削減、解体、剥離プロセスにおける成果物売却先の検討、剥離物及び溶解液の精製工程へのライン間の調整、表面剥離前処理の自動化および電気パルスの自動化、スケールアップ設備設計の検討等が挙げられる。電極からの Ru リサイクルについては、剥離後の貴金属回収量の詳細分析の実施、電気パルス自動化及びスケールアップ設備設計の検討が必要となる。最後に、ペーストからの Ru リサイクルについては、処理対象物の組成（主に Cr の有無）に応じた電気炉による還元溶融及びスラグ分離後の酸溶解プロセス、もしくは弗酸及び硝酸により直接溶解するプロセスの適用検討、各種不純物の分配調査の実施が必要となる。