平成27年度低炭素型3R技術・システム実証事業

(家電リサイクルにおける 自社開発の省エネ破砕システムを用いた 高効率解体工程の実証)

報告書

平成28年 2月 29日

パナソニック株式会社

目次

要約	4
1. 背景・目的	20
1.1. 背景	20
1.2. 目的	22
 従来の破砕方法に関する現状調査 	24
2.1. 難破砕物(DD モータ)の資源回収フロー	24
2.2. 小型家電の資源回収フロー	26
3. 実証方法	29
3.1. 本実証に用いた省エネ破砕システムについて	29
3.1.1. 自社開発のマルクス式パルス破砕装置(1.8kJ/パルス)	29
3.1.2. マルクス式パルス破砕装置(6.4kJ/パルス)	31
3.1.3. コンデンサバンク式パルス破砕装置(18kJ/パルス)	32
3.1.4. マルクス式パルス破砕装置(9.6kJ/パルス)	34
3.2. 小型家電の実証について	35
3.2.1. パルス放電による筐体からの基板取り出しプロセスに関する	実証35
3.2.2. パルス放電による基板からの部品剥離プロセスに関する実証	56
3.3. 難破砕物の実証	72
3.3.1. 難破砕物の実証取組みの全体像	72
3.3.2. マルクス式パルス破砕装置(1.8kJ)を用いた基礎実験	74
3.3.3. マルクス式パルス破砕装置(6.4kJ)を用いた破砕実証	76
3.3.4. コンデンサバンク式パルス破砕装置(18kJ)を用いた破砕実	証 87
3.3.5. マルクス式パルス破砕装置(9.6kJ)を用いた破砕実証	93
4. 実証結果のまとめ	95
4.1. 小型家電の実証について	95
4.2. 難破砕物の実証について	96
4.3. 連続処理の実証について	96
5. 環境改善効果の評価	101
5.1. 難破砕物の環境性評価	101
5.1.1. 計算方法	101
5.1.2. 計算結果	103
5.2. 小型家電の環境性評価	104
5.2.1. 計算方法	104
5.2.2. 計算結果	106
5.3. 環境性/経済合理性の評価まとめ	111

6.	まとめ	113
7.	資料編	115
7	7.1. 薄型 TV 破砕検証	115
	7.1.1. ED 放電による破砕検証	115
	7.1.2. EHD 放電による破砕検証	117
7	2.2. 破砕物の組成分析	120
	7.2.1. パーツセパレータによる破砕物の組成分析	121
	7.2.2. パルス放電による破砕物の組成分析	122

要 約

1.目的・背景

金属と樹脂等を分離できる自社開発の破砕システムを用いて、廃家電機器 を高効率に解体することにより、省エネ化と回収する資源の純度向上をもた らし、CO2排出量の削減を促進することを目的とする。大型4家電リサイクル に加え、小型家電リサイクルへの適用拡大により、発生するCO2排出量削減に 供する指針を示し、社会実装に繋げる。

家電リサイクルでは、廃家電機器を解体し、主に、鉄、アルミ、銅などの ベースメタルや、PP、PS、ABSなどの樹脂を回収する。解体工程では、破砕後 の回収工程も含めた破砕の高効率化が低炭素型リサイクル推進の観点で大変 重要となる。

家電機器では、洗濯機に使われているDDモータなど、破砕が困難である難 破砕物が存在する。破砕には、剪断式による機械式の破砕機の使用が必要と なる。また、小型廃家電からの電子基板や電子部品の回収にも、機械式のク ロスフロー破砕機が使用される。

廃棄物を破砕した後は、資源を選別し分別回収する。しかし回転刃による 剪断式破砕機による破砕では、単品分離されている資源は少ないため、選別 後に、金属と樹脂等が混在している残渣が多く発生する。残渣から資源を選 別するためには、さらなる粉砕を必要としたり、選別すべき資源の数が多く なったりするために、選別に必要なエネルギーが大きくなる。純度向上に向 けては、部品を選択的に破砕できる、新たな工法の破砕システムが必要とな る。

4

2. 本実証で用いる自社開発のパルス破砕システム

自社開発のパルス破砕システムを用いて、難破砕物から金属と樹脂等を分離、及び、小型家電から回路基板・電子部品を分離する工程の実証を行う。



パルス破砕メカニズムと装置構成

原理としては、電気エネルギーを極めて短時間に一気に放出(パルス波) することで莫大なエネルギーを液体中の電極先端から発生させ、液体の気化 膨張により衝撃波を発生させる。その際、衝撃波は異種境界面で通過する波 と反射する波に分かれ、境界面で引張力を発生させ、境界界面で材料を分離 する。この原理を利用して、DDモータなどの難破砕物から金属と樹脂等を高 純度で分離、もしくは、回路基板から電子部品を単品で分離することができ る。破砕後は、基板と電子部品、金属モータコア部品と樹脂など、大きさが 異なる状態になることを利用し、篩・脱水装置を用いて、部品分離、及び、 脱水が実現できる。 3.評価範囲(バウンダリー)

以下のとおり、難破砕物と小型家電で、比較対象となる従来破砕システム と、パルス破砕を用いた工程フローを検討した。当初計画から拡張させた範 囲で評価した。対象物も、難破砕物は樹脂の回収に加えて、銅線の回収まで、 小型家電はプリント基板からの電子部品回収に加えて筐体破砕によるプリン ト基板自体の回収を追加した。小型家電は有価性の高い携帯電話で評価を行 った。



4. パルス破砕システムのプロセス評価

自社開発のパルス破砕システムを用いて、難破砕物からの銅線分離と小型 家電から回路基板・電子部品を分離する工程の実証を行う。工程実証にあた り、破砕条件を最適化に向け、実験を実施した。

難破砕物のDDモータについては、連携先の熊本大学にて、コンデンサ容量 を増やしエネルギーを上げ(1.8kJから18kJに変更)、縦置きと横置き型の治 具で評価を行った。

小型家電の携帯電話では、筐体破砕の模擬実験、回路基板破砕(薄型TV用 回路基板を使用)では放電方式を変えての最適条件出しを行った。



対象物	これまでに得た知見	実施内容	評価結果
筐体	筐体に電極を常に接触させ、 筐体表面・近傍に 放電を走らせることが重要。	破砕サンプル (携帯電話を 模擬したプラスチックケース) 対象物の下部に電極設置	放電回数55回で 携帯電話5個を 基板回収可能な 状態まで破砕可能
回路基板 (薄型TV用基板 を使用)	破砕範囲を拡大させるため には、基板表面へ直接放電 を落とすED放電より、基板表 面・近傍でEHD放電を起こす ことが重要。 電極間距離/基板表面と の距離など放電条件の 最適化が重要。	受電側電極 出力側電極 電極間距離 基板表面 との距離	電極間距離100mm 基板表面との距離 10mmとする ことにより 放電回数34回で 150×300mmの 基板から、ICの 80%を分離可能

本事業でのプロセス評価結果

上記の評価結果を最適化条件とみなし、環境改善効果の評価を行うこととした。

また、単位時間当たりの破砕量アップに向け、小型家電用の連続搬送治具の詳細 設計を実施した。搬送ユニットは実証に必須の機能絞込みを行い、簡易化して製作 実証を行った。



本事業で構想・実証した連続搬送治具

5. C02排出量削減効果及び経済合理性の評価

難破砕物と小型家電でC02排出量削減効果および経済合理性の評価を行った。パルス破砕システムと比較対象である従来の機械破砕方式では、破砕の結果得られる回収資源の品位が異なるため、難破砕物と小型家電の回収資源の違いをそれぞれ示した後、C02削減効果を示す。

5.1. 難破砕物



比較対象とパルス破砕での回収資源の比較(難破砕物)

銅線は積層鋼板から切断・脱落するため、磁力選別を用いずとも篩等の簡 易な方法で積層鋼板との分離が可能である。

【CO2排出量削減効果、経済合理性】評価対象:DDモータ1kgからの銅線分離 kg-co2/kg-DDモー									
		環境改	善効果	A=1	经安全通知				
	破砕 銅線回収		銅線回収	द्व ा					
C02	従来破砕	0.023	0.006	0.029					
排出量	パルス破砕	0.173	0.003	0.176	工程簡素化/資源品位向上のメリットと 設備コスト/生産性の精査必要				
C02	評価結果	-0.150	0.003	-0.147					
削減量	当初目論見	0.103	0.032	0.135					

【上記計算上の仮定】(1)0.579kg-C02/kWh,(2)パルス破砕消費電力 18kJ/1パルス DDモータ 1個破砕に必要な電力 0.9kW (3)従来破砕については、DDモータ 1.838^k>(612個)破砕時の 消費電力実測値から計算

比較対象とパルス破砕でのC02削減量/経済合理性の比較(難破砕物)

銅線と積層鋼板は共に導体で界面剥離作用が弱く、パルス破砕設備のエネ ルギー消費量が大きかった。それに対して従来工程の消費電力が予想以上に 小さいため、CO2削減効果でパルス破砕設備は課題がある。樹脂/銅線/積層 鋼板への単品分離は可能で、資源純度向上による工程簡易化は可能である。

5.2. 小型家電



比較対象とパルス破砕での回収資源の比較(小型家電)

写真及び粒度分布から、パルス破砕後の破砕物はサイズが大きいため、手 選別による回収が容易であると考えられる。

写真から有価性の高い電子部品の破砕が少ないことがわかる。そのため回 収率も高いと考えられる。また、従来方式のパーツセパレータに比べ、パル ス破砕の方が破砕後の残渣の粒子数は圧倒的に少ない。

【CO2排出量削減効果、経済合理性】

評価対象:筐体破砕から回路基板1kgの分離、回路基板1kgからの部品分離 単位:kg-CO2/kg-回路基板								
		環境改	善効果	<u>A=1</u>	经令人抽出			
		筐体破砕 ⇒ 基板回収	基板破砕 ⇒ IC回収		栓消管理性			
CO2	従来破砕	2.627	0.486	3.113	選別にかかる支出が大きく 収支は赤字			
排出量	パルス破砕	0.640	0.175	0.815	選別にかかる支出が小さく 収支バランスが取れる			
CO2	評価結果	1.986	0.311	2.297 🔨	19倍の効果			
削減量	当初目論見	_	0.118	0.118				

比較対象とパルス破砕でのC02削減量/経済合理性の比較(小型家電)

筐体/基板共に、破砕工程は、省エネ設備導入だけでは効果は無いが、パ ルス破砕では処理物は部品毎に単品分離され、細かい粒子にまで破砕される 量が少ないため、工程簡易化による効果が大きく、CO2削減が可能である。 筐体からの破砕も評価範囲に加えることで、目論見比で約19倍のCO2の削減 効果が見込める。

6.まとめ

【効果まとめ】

パルス破砕では、処理物が部品毎に単品分離されるため、

・回収資源の品位が高く、単一素材へ戻す工程の簡易化可能

・細かい粒子にまで破砕される量が少なく、選別工程で CO2 削減可能 ということがわかった。



【経済合理性(小型家電)】

経済合理性の試算結果

FY2015 Low Carbon Type 3R Technology System Verification Operation

(Verification of high-efficiency dismantling process by using in-house-developed energy-efficient crushing systems for appliance recycling)

Operation Report

January 2016 (Interim edition)

Panasonic Corporation

Outline

1. Purpose and Background

The operation intends to dismantle waste electrical equipment at high efficiency by using in-house-developed fragmentation systems that can separate metals and resins, and to achieve energy conservation and improved purity of recycled resources, while at the same time reducing CO2 emissions. The operation aims to provide guidelines for reducing CO2 emissions generated by expanded application of recycling to small appliances in addition to the initial recycling of four large appliances, thereby leading to better social implementation.

Appliance recycling is performed by dismantling waste appliances and collecting base metals such as iron, aluminum, copper, as well as resins such as PP, PS, and ABS. During the dismantling process, improvement of the efficiency of fragmentation, including the collection process after crushing, is very important from the viewpoint of promoting low-carbon type recycling.

Home appliances include hard-to-crush components such as the direct drive (DD) motors used in washing machines. Crushing requires a mechanical crushing machine based on shearing action. A mechanical cross-feed crusher is employed to collect electronic circuit boards and components from small waste appliances.

After crushing the waste appliances, the resources produced are separated and collected. However, crushing by means of a shearing type crusher that employs rotary blades produces only small quantities of resources separated into uniform material, and generates large quantities of mixed residues comprising metals and resins after sorting. To extract resources from the residue, further crushing is required, increasing the number of types of resources to be separated, as well as requiring more energy for separation. To improve resource purity, a next-generation crushing system based on a new process is needed for selectively crushing components.

2. In-house-developed Pulse Fragmentation System used for Verification

This report describes the verification of a process of separating metals and resins from hard-to-crush items, and separating circuit boards and electronic components from small appliances using an in-house-developed pulse fragmentation system.



Pulse fragmentations mechanism and equipment configuration

The principle applied here is the generation of high energy from an electrode tip immersed in water by releasing electrical energy in the form of a pulse wave in an extremely short time, which generates an extremely powerful shock wave by vaporizing the liquid. During this process, the shock wave divides itself into a wave that passes through the boundary surface of different material types and a wave that reflects on the boundary and separates the materials. By applying this principle, metals and resins can be separated at high purity from hard-to-crush objects such as DD motors, or electronic components from circuit boards as single items. After fragmentation, using the size difference between circuit board and electronic components, and metal motor core parts and resin particles, part separation and dehydration can be achieved by using a sieve and dehydration equipment.

3. Process Assessment Scope (Boundary)

As shown below, the conventional crushing system was experimentally compared with the pulse fragmentation process using hard-to-crush items and small appliances. Assessment was made by expanding the original plan. Copper wire was added to the hard-to-crush objects in addition to resin particles, and enclosures were added to the circuit boards of small appliances. A mobile phone was used as an example of a small appliance which has high resource value.



Range of assessments used in this operation

4. Process Assessment of a Pulse Fragmentation System

By using the in-house-developed pulse fragmentation system, we verified the separation process of copper wire from hard-to-crush objects, and the separation process of circuit board and electronic components from small appliances. In preparation for the process verification, experiments were conducted for optimizing fragmentation conditions.

Fragmentation testing was conducted on DD motors, selected as hard-to-crush objects, using both vertically and horizontally-held jigs at our associated site at Kumamoto University, using tenfold increased energy (1.8 kJ \rightarrow 18 kJ), achieved by increasing the condenser capacitance.

To obtain the optimum conditions for small appliances, simulation experiments on enclosure fragmentation combined with a different discharge method were carried out with the aim of fragmenting circuit boards.



Target object	Knowledge obtained so far	Experiment	Result of assessment
Enclosure	Important to continuously maintain the electrode in contact with the enclosure and generate discharge on the surface and near the enclosure.	Fragmentation samples (Plastic case simulating a mobile phone enclosure) Electrode placed underneath the target objects	Five mobile phone enclosures were crushable into the level for enabling extraction of circuit boards with 55 times discharges.
Circuit board (A flat-panel TV board was used)	To expand the area of fragmentation, generating EHD discharge on or near the circuit board is more effective than direct ED discharge onto the board surface. The key is optimization of discharge conditions, such as distance between the electrodes and distance between the electrodes and board surface.	Receiving side electrode Distance between electrodes Distance between electrodes and board surface	Electrode distance 100 mm and electrode-board distance 10 mm and 34 discharges enabled to separate 80% of ICs from a 150 X 300 mm circuit board.

Result of process assessment for this operation

The environmental improvement effect was evaluated by assuming the above assessment result to have been achieved under optimum conditions.

To increase fragmentation quantity per hour, a detailed design for a continuous transport unit was also produced for small appliances. By narrowing the process down to only the essential functions required for verification, a transport unit was produced for verification that had a simplified structure.



Continuous transport jig used for the concept and verification of this operation

5. Assessment of CO2 emission reduction effects

Degree of reduction of CO2 emissions was assessed for hard-to-crush objects and small appliances. In a comparison of the pulse fragmentation system and conventional mechanical fragmentation system, a CO2 reduction effect was confirmed after describing the difference in resource collection, since the collected resource quality is different after fragmentation.

Collected items	After fragmentation	After air blow After magnetic separation separation		After magnetic separation	After magnetic separation	After aluminum separation
Compari- son targets (Conven- tional)					on of laminated copper wire	
Collected items	After	· crushing		After airflow separation	After separation by sieve	After aluminum separation
Pulse fragmen- tation (Im- proved)						

[Hard-to-crush objects]

Comparison between the target objects and collected resources from pulse fragmentation

Because copper wire is cut and separated from laminated sheet metal, separation from the laminated sheet metal can be achieved by simpler means, such as a sieve.

[CO2 emission reduction effect, economic rationalization]				Boundary before expansion:Resin separation from 1 kg of DD motors Boundary after expansion:Copper wires (90%) from 1 kg of DD motors Unit: kg - Co2/kg					
				Enviro	nment im	orovemen			
		With energy-efficient equipment		With simplified processes		Total		Economic rationalization	
	Target object		Copper wire	Resin	Copper wire	Resin	Copper wire	Resin	
		Comparison	0.023	0.023	0.006	0.006	0.029	0.029	
	CO2	targets (Conventional)	Shearing type vertical crusher		Magnetic separation 2 times, aluminum separation				_
	emission quantity	Pulse fragmentation	0.173	0.015	0.003	0.003	0.176	0.018	Examination is required to pinpoint the advantages of the simplified process and the
			High-powe fragmenta	er pulse tion (18 kJ)	Sieve, a separati	luminum on			disadvantages of the operating/equipment cost of the high-power pulse fragmentation process
	CO2 reduction quantity	Result of assessment	-0.150	0.008	0.003	0.003	-0.147	0.011	
		Initial prospect	-	0.103	-	0.032	-	0.135	

Comparison targets and comparison of CO2 emissions by pulse fragmentation

Both copper wire and laminated sheet metal are conductive, with weak boundary separation action, requiring high energy input by the pulse fragmentation equipment. On the other hand, power consumption using the conventional process was smaller than expected, thus presenting a dilemma as to the CO2 reduction effect of the pulse fragmentation system. Separation of resin, copper wire and laminated sheet metal into single materials is possible, and process simplification by improved resource purity is also possible.

[Small appliances]



Comparison between the target objects and collected resources from pulse fragmentation

The large size of crushed objects after pulse fragmentation makes for easy material collection by manual sorting.

Less crushing is applied to high-value electronic components with a high collection rate. Compared to the conventional part separator, pulse fragmentation delivers a substantially smaller number of resource types after fragmentation.

[CO2 emission reduction effect, economic rationalization] Assessment range before expansion (Boundary): Component separation from 1 kg of circuit boards Assessment range after expansion (Boundary): Separation of 1 kg of circuit boards from fragmented enclosures										
Environment improvement effect								Unit: kg - CO2 / kg - circuit board		
		With energ equip	y-efficient ment	With simplified process		Total		Economic rationalization		
	Target object	Enclosure	Board	Enclosure	Board	Enclosure	Board			
	Comparison	0.096	0.035	2.530	0.451	2.627	0.486	Losses due to the high		
CO2	(Conventional)	Parts separator		Selecting multiple resources				separation		
quantity	Pulse fragmentation	0.139	0.057	0.502	0.117	0.641	0.174	Balanced profit with small expenditure required for separation		
		Pulse frag (1.8 kJ)	mentation	Selecting a small number of resources				Soparation		
CO2 reduction quantity	Result of assessment	-0.043	-0.022	2.028	0.334	1.985	0.312			
	Initial prospect	-	0.075	-	0.043	-	0.1118	_		

[Assumptions made in the above calculation] (1) 17 yen/kwh, (2) 0.579 kg-CO2/kwh, (3) Residue separation equipment capacity: 20,000 pcs/kWh (based on the results of 3 types of air-blow separation equipment. Assuming that comparable equipment will become practical for separation of inorganic materials in the future)

In the conventional crushing process of enclosures and circuit boards, no CO2 reduction effect is obtained by adopting energy-efficient equipment only; however, pulse fragmentation can separate components into single items with a smaller quantity of crushed small particles, thereby presenting improved CO2 reduction by process simplification. By adding fragmentation from enclosures to the assessment scope, an approximately 16-fold CO2 reduction effect can be expected, based on our estimate.

18

6. Summary

[Summary of effects]

Because pulse fragmentation separates the processed objects into individual single components,

- The quality of collected resources is higher, and the process for re-generating uniform material can be made simpler.
- A smaller quantity of material is crushed into fine fragments, thereby reducing CO2 emissions during the selection process.

[Economic rationale]

result)



Calculation results of economic rationality

1. 背景·目的

1.1. 背景

家電リサイクルでは、廃家電機器を解体(破砕)し、主に、鉄、アルミ、 銅などのベースメタルや、PP、PS、ABSなどの樹脂を回収する。破砕工程では、 破砕後の回収工程も含めた破砕の高効率化が低炭素型リサイクル推進の観点 で大変重要となる。

家電機器では、図 1-1 に示す洗濯機に使われているDDモータなど、破砕が 困難である難破砕物が存在する。破砕には、DDモータ 図 1-2 に示す 剪断式による機械式の破砕機の使用が必要となる。また、図 1-3 に示す廃小 型家電からの電子基板や電子部品の回収にも、 図 1-4 に示す 機械式のクロスフロー破砕機が使用される。



図 1-1:DD モータ



図 1-2:二軸剪断式破砕機(近畿工業 HP より)



図 1-3:廃小型家電の回路基板



図 1-4:クロスフロー破砕機

廃棄物を破砕した後は、資源を選別し分別回収する。しかし回転刃による 剪断式破砕機による破砕では、単品分離されている資源は少ないため、選別 後に、金属と樹脂等が混在している残渣が多く発生する。残渣から資源を選 別するためには、さらなる粉砕が必要になったり、選別すべき資源の数が多 くなったりするため、選別に必要なエネルギーが大きくなる。純度向上に向 けては、部品を選択的に破砕できる、新たな工法の破砕システムが必要とな る。

クロスフロー破砕機は、破砕物のサイズを均一にすることは可能であるが、 部品が単品に分離されずに破砕される。従って、後工程処理にコストがかさ むため、電子部品の回収は進んでいない。結果として、埋め立てや焼却処分 されるケースが多く、資源循環が十分に成されているとは言えない。なお、 小型電子機器のリサイクルを促進するために、平成25年に小型家電リサイク ル法が施行されているが、従来技術によるリサイクルでは収益が上がる見込 みが立っていないために、小型家電のリサイクルは浸透していない。回収す る自治体でも金銭的なメリットがない。その結果、図 1-5 に示すとおり、環 境省が行った自治体1742件のアンケート調査では、75%の自治体が実施する方 針と回答しているが、「予算困難・収入にならない」ために自治体での回収 も進んでいない。



図 1-5:環境省 平成 25年小型家電リサイクル法の自治体アンケート結果



図 1-6:パルス破砕メカニズムと装置構成

本実証事業では、自社開発のパルス破砕システムを用いて、難破砕物から 金属と樹脂等を分離、及び、小型家電から回路基板・電子部品を分離する工 程の実証を行う。パルス破砕のメカニズム・装置構成を図 1-6 に示す。

原理としては、コンデンサに充電された電気エネルギーを極めて短時間に 一気に放出(パルス波)することで莫大なエネルギーを液体中の電極先端か ら発生させ、液体の気化膨張により衝撃波を発生させる。その際、衝撃波は 異種境界面で通過する波と反射する波に分かれ、境界面で引張力を発生させ、 境界界面で材料を分離する。この原理を利用して、DDモータなどの難破砕物 から金属と樹脂等を高純度で分離、もしくは、回路基板から電子部品を単品 で分離することができる。破砕後は、基板と電子部品、金属モータコア部品 と樹脂など、大きさが異なる状態になることを利用し、篩・脱水装置を用い て、部品分離、及び、脱水が実現できる。

1.2. 目的

金属と樹脂等を分離できる自社開発の破砕システムを用いて、廃家電機器 を高効率に解体することにより、省エネ化と回収する資源の純度向上をもた らし、CO2排出量の削減を促進することを目的とする。大型4家電リサイクル に加え、小型家電リサイクルへの適用拡大により、発生するCO2排出量削減に 供する指針を示し、社会実装に繋げる。

以下に本事業により開発された破砕システム適用による資源循環スキーム の変化を図 1-7 にて示す。



図 1-7: 適用前後のフロー

本事業により開発された破砕システムを適用することにより、これまで埋 め立て等の廃棄処分されていた廃家電・廃小型家電から有用金属を高純度で 回収することができれば、家電リサイクルでの省エネルギーに寄与するだけ でなく、リサイクル業者で高付加価値の資源を創出することができる。従っ て、高付加価値の資源流通量が増え、リサイクル業者から安定した価格と量 を原材料製造業者に供給することができ、また製品製造業者は、その再生材 料を用いることで安定した品質の商品を小売業者に提供することが可能に なり、消費者は高品質で低価格な商品を使用できる。

また、リサイクル業者で小型電子機器の回路基板上の電子部品に含まれる 原材料を回収することができれば、現在海外からの輸入に頼るために価格の 変動が大きい原材料を国内で安定した価格で原材料製造業者は購入するこ とができるので、安定した価格と量を製品製造業者に供給することができ、 また製品製造業者は安定した品質の商品を小売業者に提供することが可能 になり、消費者は高品質で低価格な商品を使用できる。

2. 従来の破砕方法に関する現状調査

2.1. 難破砕物(DD モータ)の資源回収フロー

図 2-1にDDモータの構造と実物の写真を示す。DDモータ(ダイレクトドラ イブモータ)は洗濯機の洗濯槽回転部に使用されており、ロータとステータ の2部品にて構成されている。

今回、資源回収フローの調査先として、家電リサイクル、アップグレード 工場にヒアリングし、DDモータ破砕システムを従来の資源回収フローと設定 し調査を行った。(アップグレード工場とは、家電リサイクル工場や市場か らリサイクル可能な原材料を入手し、破砕装置や選別装置を用いて有価物の 回収を行っている工場である。)

図 2-2に、DDモータ破砕システムの従来の工程フローと各工程での回収資源を示す。



図 2-1:DDモータの構造と写真



図 2-2:DDモータの破砕工程と各工程での回収物(従来フロー)

回収されたDDモータは先ず、手作業によりロータとステータに分離される。 分離されたロータは、現状、それ以上解体されることはなくそのまま資源と して売却される。その理由は、ロータの構成部品であるネオジウム等の磁石 を破砕機に投入すると、破砕機内部の刃の折損や欠損、砕かれた磁石の破片 が破砕機内部に吸着することにより装置トラブルの原因となるため事前に 分離される。

ロータとステータの分離後、ステータのみ破砕機に投入され破砕が行われ る。破砕後の破砕物は風力選別機により樹脂等の軽比重物とその他の重比重 物に選別される。風力選別機により回収された樹脂は樹脂材料として有価性 があり売却される。風力選別後の破砕物は磁力選別機に送られ、鉄系の破砕 物とそれ以外の非鉄金属系の破砕物に選別される。鉄系破砕物の純度・回収 量を向上させるため、破砕物は2回、磁力選別を行う。磁力選別機により鉄 系破砕物を回収した後、破砕物はアルミ選別機(渦電流式選別機)に送られ、 アルミ系材料と銅系材料に選別される。アルミ選別機により選別された各材 料はそれぞれ有価物として売却される。

次に各工程での回収資源について説明する。破砕機にて破砕後、風力選別 により回収された樹脂材料は有価物として売却される。次に磁力選別機にて 鉄系材料としてステータの積層鋼板が回収される。写真に示すとおり、破砕 時に積層鋼板に巻き付けられているコイル銅線が完全に分離されず、積層鋼 板に絡みついた状態で回収されるケースが発生する。この状態からの銅線分 離は困難であるため、現状は銅線と積層鋼板が絡みついた破砕物は銅が含ま れるにも関わらず鉄系材料として売却される。このような銅成分が混在した 鉄系材料を精錬にて再資源化する場合、銅は不純物となり鉄の品位を低下さ せるため、銅成分の比率を下げるため、鉄原料を大量に投入し希釈する必要 がある。結果として、回収される鉄系材料の有価性や歩留まりを低下させる 原因となっている。

2.2. 小型家電の資源回収フロー



図 2-3:小型家電の回収フロー

パーツセパレータ等の衝撃式破砕機を用いて破砕を行った場合の資源回 収フローを図 2·3に示す。消費者より回収された小型家電は、有価性の高い 回路基板を多く含む製品(主に携帯電話やデジカメ等の情報家電製品)に選 別される。その後、電池を取り出し、破砕機に投入する。破砕後の破砕物か らは、磁力選別機により鉄系材料を回収する。回収された鉄系材料は有価性 があるためそのまま売却される。

鉄系材料回収後の破砕物の状態を図 2-4に示す。



図 2-4:鉄系材料回収後の破砕物の状態

パーツセパレータにて破砕後、手選別にて有価性の高い回路基板を回収する。回収する回路基板の品位・回収量を上げるために手選別は2回繰り返される。回路基板が取り除かれた後の残渣は、別途、回収される。

次に回収された回路基板から更に有価性の高い電子部品を回収するため に回路基板を再度、パーツセパレータにて破砕する。破砕後の状態を図 2-5 に示す。右下の粒子群は、φ6.7mmの篩を通過した粒子である。



図 2-5:パーツセパレータによる破砕物

このように、パーツセパレータによる破砕物は、6.7mm以下の非常に細かい粒子にまで破砕されているものも多い。また、基板上に実装された有価性の高い電子部品が原形を留めない状態まで破砕されており、篩等を用いた選別を行った後、大量の残渣が回収されるだけで、電子部品など有価性の高い破砕物の回収は困難な状態である。

前工程の手選別、及び篩選別にて残った残渣中には、細かい粒子に破砕さ れた電子部品が多く含有しているため、回収物の有価性を上げるために、こ の残渣をまとめて選別機(ソーティング装置)に投入し有価物の回収を行う。

3. 実証方法

3.1. 本実証に用いた省エネ破砕システムについて

3.1.1. 自社開発のマルクス式パルス破砕装置(1.8kJ/パルス)



図 3-1:自社開発設備

図3-1は自社開発のマルクス式パルス破砕装置であり、マルクス回路を用いた多段式パルス電圧発生器を備える。その回路図を、図 3-2に示す。



図 3-2:マルクス式パルス電源の回路図(5段)

放電時の出力エネルギーは、1.8kJ/パルスに、放電電圧は150kVに設定し ている。

また、図 3-3に示すよう、電極部材の組み換えにより、破砕対象物を挟む ように正極とGND極を配置し、破砕対象物に直接パルス放電を印加して破 砕を行うED放電と、水の絶縁破壊によって発生する衝撃波により破砕を行 うEHD放電の選択が可能な構造となっている。



図 3-3:開発設備(放電治具)



・回路基板からの電子部品の分離について、小型高速度カメラにより、水中での放電挙動を確認。

図 3-4: 自社開発パルス破砕装置によるプリント基板からの電子部品剥離の様子(撮影速度: 960fps)

図 3-4は、EHD放電を用いてプリント基板上の電子部品剥離の様子を高速 度カメラにより撮影した図である。このように、放電の状態と、放電に伴う 破壊の進展を、実際に映像で確認しつつ、検証を進められるようになってい る。

この装置を用いて、難破砕物及び小型家電の破砕の実証を行った。

3.1.2. マルクス式パルス破砕装置(6.4kJ/パルス)

図 3-5に、放電エネルギー6.4kJ/パルス、放電電圧400kVのパルス破砕装置を示す。この装置は熊本大学所有物のマルクス式パルス破砕装置であり、前記3.1.1.の装置の放電エネルギーと放電電圧を上げたものである。この装置に用いられているマルクス回路の回路図を図 3-6に示す。この装置も難破砕物(DDモータ)の破砕及び、小型家電・プリント基板の破砕の効率化の実証に用いた。



図 3-5:マルクス式パルス破砕装置(6.4kJ/パルス)



図 3-6:マルクス式パルス電源の回路図(10段)

3.1.3. コンデンサバンク式パルス破砕装置(18kJ/パルス)

DDモータの破砕に関して、積層鋼板からの銅線剥離を効率的に行うために は、更に大きな放電出力が必要となり、図 3-7に示す、熊本大学所有の

コンデンサバンク式パルス破砕装置を用いて実証を行った。その回路図を、

図 3-8に示す。

放電時の出力エネルギーは、18kJ/パルスに設定している。



図 3-7:コンデンサバンク式パルス破砕装置(18kJ/パルス)



図 3-8:コンデンサバンク式パルス電源の回路図

3.1.4. マルクス式パルス破砕装置(9.6kJ/パルス)

DDモータの破砕検証用として、3.1.3にて説明のコンデンサバンク式パルス破砕装置に加えて、図 3-9に示す、1パルス当りの出力エネルギーが9.6kJ/パルスの熊本大学所有のマルクス式パルス破砕装置も準備した。



図 3-9:マルクス式パルス破砕装置(9.6kJ/パルス)

3.2. 小型家電の実証について

3.2.1. パルス放電による筐体からの基板取り出しプロセスに関する実証

パルス放電によって、小型家電から基板を分離するプロセスの実証を行った。 図 3-10 にこの節の取組の全体像を示す。ED 方式および EHD 方式について それぞれ検証を推進し、このプロセスには EHD 方式が適していることを明確化 した。そして EHD 方式における条件の精査を進め、放電 55 回で、5 個の携帯 電話サンプルを全て破砕して、基板が露出した状態にできるという結果を得た。 なお、図中の TEG とは、携帯電話を模擬した ABS 製樹脂ケース(150×100× t 30mm)である。



図 3-10:小型家電から基板を分離するプロセス実証の取組み全体像

この一連の取組の詳細を 3.2.1(1)~(8)に述べる。

(1) ED 方式及び EHD 方式の比較

【目的】

ED 方式と EHD 方式の標準的な条件において、それぞれの特性を把握する。 量産で有効な方式について目処を立てる。

【サンプル】

ABS 製樹脂ケース(150×100×t 30mm)1個

※小型家電(携帯電話)の筐体を模したもの

【評価方法】

蓋が開くまでに要した放電回数。

【実証条件】

サンプルを固定して放電。ED 方式及び EHD 方式について実証。

図 3-11 に ED 方式及び EHD 方式の電極部の模式図を示す。サンプルは、底面に穴を開け、樹脂バンドで固定して実証した。また、サンプルを水中にセットする際に、サンプル内の気泡が抜けるようにサンプル上面にも4箇所穴を開けた。

放電回路は、前記 3.1.1 節で述べた放電エネルギー1.8kJのマルクス式パルス 破砕装置を使用した。その他の条件は下記の表 3-1 に示す。



ED 方式

EHD 方式

図 3-11: ED 方式及び EHD 方式の模式図
条件	方式	電極間距離 mm	電極・サンプル間距離 (正極) mm	電極・サンプル間距離 (GND) mm
1	ED	_	0	0
2	ED	_	10	0
3	EHD	20	0	0
4	EHD	20	10	10
5	EHD	100	0	0
6	EHD	100	10	10

表 3-1: 筐体破砕における ED 方式及び EHD 方式の比較実験条件

【実証結果】

実験結果を表 3-2 に示す。放電前の状態と、放電により蓋が開いた状態(破 砕後)と、破砕に要した放電回数を示している。

この結果から、ED 方式の方がサンプルが破壊されるまでの(サンプルの蓋が 開くまでの)放電回数が少ない事が分かる。図中、条件1の放電後のサンプル 写真からわかるとおり、サンプル側面に放電痕が残っている事がわかる。放電 痕はサンプルの上面、側面、下面すべてについていることから、放電は正極か ら GND まで、サンプルの中心を貫通して最短距離で放電されたのではなく、電 気抵抗の低いサンプルの表面を走っていることが分かる。このときに発生する プラズマや衝撃波が、サンプルの破壊に影響したと考えられる。

また、同じ ED でも、電極を接触させない条件 2 のほうが放電回数が少ない。 電極をサンプルに接触させない場合、サンプルを電流が走ることによる破壊に 加えて、水の絶縁破壊に伴って発生する衝撃波に起因する破壊と、水の気化膨 張による圧力に起因する破壊の 2 つの追加の破壊力が発生する。この 2 つが効 果的にサンプルの破壊に寄与すると考えられる。

しかし、ED 方式で破壊したサンプルは、ネジ止め部など力学的に弱い位置が 破壊して蓋が開いた。一方で EHD は、放電回数は多かったものの、ネジ止め部 以外にも蓋が割れるなど、破壊が全体的に進行していた。

このことから、少ない放電回数で部分的に破壊を進めるには ED 方式が適しているが、広い面積を弱く破壊するには EHD 放電が適している。

携帯電話などの小型家電は、筐体が嵌め込みで組み立てられている製品もある事から、ED 方式では破壊力が強すぎてしまい、EHD 方式の方が過破砕を防ぎ、より良好な破砕後の処理物性状を得られる可能性がある。今回、短い時間で破壊が進んだ ED 方式を中心に検証を進めるが、ED 方式及び EHD 方式のどちらが適しているかの最終的な判断は、実際のサンプル(携帯電話など)を使った検証を実施した上で判断することにした(3.2.1(5),(6)に該当)。またその

前に、ED 方式において複数のサンプルを処理するケースや、バッチ式などでサンプルを固定しないケースの実証を進めることとした(3.2.1(2),(3),(4)に該当)。

条件	放電前	破砕後	破砕後の状態(詳細)		
1			 側面 「「」」 「」」 「」 「」<	底面 「「」 「」 「」 「」 「」 「」 「」 「」	
2			上面	底面	
	in the second		蓋が開くまでの放電回数	(:3回	
3		THE R. LAND	上面	底面	
	30 40 59 40 78 181 10 10 110 110	29 30 40 30 47 <u>10 10 10 10 10 10 10</u>	蓋が開くまでの放電回数	(:15 回	
4			上面	底面	
	6				
			蓋が開くまでの放電回数	(:65 回	
5			上面側	底面側	
			蓋が開くまでの放電回数	(:23 回	
6			上面	底面	
		Į			
			蓋が開くまでの放電回数	(:60 回	

表 3-2: ED 方式及び EHD 方式の比較実験結果

(2) 容器を用いる ED 方式の筐体破砕実証(金属容器)

【目的】

前記(1)の結果を踏まえ、ED 方式において複数の処理物を容器にいれて処理した時の効率を評価する。(金属製容器内に複数サンプルを入れ、一括処理したときの効果を検証)

【サンプル】

ABS 製樹脂ケース(150×100×t30mm)×5 個

【評価方法】

放電回数あたりの蓋が開いたサンプル個数

【実証条件】

評価に用いた装置を図 3-12 に示す。左側が金属筐体にサンプルを入れた状態 の写真である。金属の筐体は、GND に接続されており、アース電極を兼ねる。 金属の筐体の大きさは、高さが 90mm,底面は φ 10mm、上面が φ 20mm であ る。この金属の筐体の中にサンプル 5 個を入れ、その上に正極を 4 本セットし た。正極の長さ(金属の筐体の上面から下方に飛び出した長さ)は、サンプル に十分接触する長さである 35mm とした。図の右側の写真が放電前の状態であ り、金属筐体の上にはサンプルの飛び出しを防ぐために樹脂製の網をかぶせた。 また、4 本の正極は編組線で接続し、放電回路の正極に接続した。放電回路は、 前記 3.1.1 で説明した、放電エネルギー1.8kJ のマルクス式パルス破砕装置を用 いた。

この構成で、放電 10 回ごとにサンプルの破壊状況を確認し、サンプルの半数 程度の蓋が開いた時点での、放電回数あたりの蓋が開いたサンプル個数を評価 した。



正極保持兼飛び 出し防止用の蓋



金属製容器サンプル(5個)(兼GND)容器保持用治具

図 3-12:実証に用いた実験装置の写真

【実証結果】

実証した結果、放電 10 回でサンプル 1 個が破壊した。その後放電を進め、放 電 30 回目でサンプルの半数程度である 2 個強の破壊が確認できた。30 回放電 した時のサンプルの状態を図 3-13 に示す。左上の写真がサンプル飛散防止用の 網の隙間から容器内部を撮影した写真であり、右上の写真が、容器の蓋を外し た状態の写真である。写真上右側のサンプルを中心に破壊が進んでいることか ら、放電の偏りが発生していると考えられる。

中心の写真2枚は、処理後の金属筐体の容器にできた打痕を撮影したもので ある。この打痕は放電によって発生したものと考えられるが、打痕は側面に多 かった。このことから、今回の放電は正極から真下に向かって、多くのサンプ ルを通る放電経路ではなく、側面に向かってごく一部のサンプルを通る放電経 路だったと考えられる。このことは放電経路改善による破壊効率改善の余地が ある事を示唆している。一番下の写真が、金属製容器から取り出した処理後サ ンプルの写真である。左側の写真は、サンプルの蓋側(蓋は内側)から撮影し たものであり、右側の写真はその裏側を撮影したものである。2 個の蓋が完全に 開いている。また残り3 個も、ネジ止め部などが部分的に破壊されており、そ れぞれの破壊の進行を3 割程度と定性的に判断し、今回の破壊効率は『5 個中 2.9 個破壊/30 回放電』と判定した。

以上を踏まえ、同じ ED 方式について、破砕の非効率化の原因と想定される 側面の放電を防止するために、容器を絶縁性である樹脂容器する影響を実証した(3.2.1(3)に該当)



図 3-13:破砕後の状況

(3) 容器を用いる ED 方式の筐体破砕実証(樹脂容器)

【目的】

前記(2)で ED 方式かつバッチ式で処理する場合、金属製のバッチでは放電 がケースに飛ばず、正極近傍の金属製バッチに飛んで、破砕の効率が悪化して いる懸念があったことを踏まえ、破砕サンプルを保持する容器に非導電性の材 料を使用する効果を明確化する。

【サンプル】

ABS 製樹脂ケース(150×100×t30mm)×5 個

【評価方法】

放電回数あたりの蓋が開いたサンプル個数 【実証条件】

図 3-14 に実証に用いた放電部の構成を示す。樹脂製の容器を用いた左側の 写真はサンプルを入れていない状態の、容器の内部を撮影したものであり、 右側がサンプルを入れて蓋をした状態のものである。容器はポリエチレン(以 降 PE)製の板を張り合わせて製作した。具体的には、PE製の5mm厚の板 を、底辺が300mm、高さ300mmの三角形に切出し、その端に穴を開けたも のを4枚用意し、樹脂バンドで接続して三角錐の容器にした。この容器の底 面から100mmの位置にGND電極を4本設置した。電極の長さは45mmと した。正極は、上記の三角錐の容器とは別にPE製の5mm厚の板に設置した うえで、この板を上記三角錐の容器の上面から100mm下の位置に固定した。 PE 板から容器内部に出る正極の長さは、35~40mmとした。図中、右側の写 真は、サンプルを入れたのを、この正極を設置した PE 板で蓋をした状態を撮 影したものである。蓋の隙間からサンプルが飛び出すことを防ぐため、この 隙間には PE 製の網を樹脂バンドで固定した。

放電回路は、前記 3.1.1 で述べた放電エネルギー1.8kJ のマルクス式パルス 破砕装置を用いた。

この構成にて、放電 10 回ごとにサンプルの破砕状況を確認し、半数程度の サンプルの蓋が開いたときの、放電回数あたりの蓋が開いたサンプル個数を 評価した。



側面:サンプル保持用容器 (4枚の板を張り合わせ)





【実証結果】

実証の結果、放電 10 回でサンプル 1 個の蓋が開いた。その後、放電を進め、 放電 30 回目で 5 個中 3 サンプルの蓋が開いたことを確認できたため、取り出し て破砕状況を評価した。

放電 30 回後のサンプルの写真を図 3-15 に示す。

図中、上側の2つの写真は、樹脂ケースに入った状態のサンプルである。左 上の写真は蓋を開けたところを撮影したもので、右上の写真は上からサンプル を取り除き、GND 電極が見えたところで撮影した写真である。この写真から、 壁面に近いサンプルの破砕はそれほど進んでいないが、中心に存在したサンプ ル(約3個)は破砕が進んでいたことがわかる。このように正極下部に存在す るサンプルが破壊されたことから、放電は前述 3.2.1 (2)の実証で金属バッチ を用いたときのように水平に放電したのではなく、真下に向かって放電し、効 率的にサンプル破砕が進んだと考えられる。

図中下側の写真は取り出したサンプルを撮影したものであり、3 サンプルの蓋 が完全に開いている。他のサンプルもネジ止め部など部分的に破壊が進んでい る。これらの部分的に破壊が進んだサンプルの破壊の進捗を、前節 3.2.1 (2) と同様に 3 割程度と見積もり、放電回数あたりの蓋が開いたサンプル個数を、 『5 個中 3.6 個破壊/30 回放電』と評価した。

3.2.1 (2) の結果と比較して、金属製容器にサンプルを保持し、容器全体を GND 電極とするよりも、樹脂製容器を用いて下部の一部分を GND 電極とする 方が破壊が進みやすいことがわかった。このことから、ED 方式を用いてバッチ 式で処理する場合、サンプルを保持する容器の材質は非導電性として GND の位 置は放電が処理物を貫通するように設置する構成が適していることが明確にな った。

また処理中は、放電が安定しない(放電しない)ときが多数発生した。この 事は、電気抵抗が大きかったためにサンプルに対して放電していなかった可能 性が考えられる。電極を押さえつけるか、電圧を上げるなどして放電を安定化 することにより、更に効率改善する可能性があるため、非導電性容器を用いる ED 方式について電極を押さえつける条件及び電圧を上げた条件で追加の実証 を進めることとした(3.2.1(4)に該当)。



図 3-15:破砕後のサンプルの状態

(4) ED 方式における放電安定化を目的とした、押さえつけ電極の効果実証 【目的】

前記(3)の結果を踏まえ、非導電性容器を用いる ED 方式の、放電安定化に およぼす電極をサンプルの上から押さえつける構成の影響を検証

【サンプル】

ABS 製樹脂ケース (150×100×t30mm) ×5 個

【評価方法】

放電回数あたりの蓋が開いた個数。

【実証条件】

図 3-16 に実証に用いた放電部分の治具を示す。底面に GND 電極を有する容器の中に処理サンプルを入れ、正極を設置した PE 製の板で蓋をして放電した。 図中、左側の写真が蓋を開けたところを撮影したものである。サンプルを入れている容器は PE 製の板を樹脂バンドで張り合わせて製作しており、V字に張り合わせた板(図中では底板と表記)を、左右から長方形の PE 板(図中では側板と表記)で保持した。この容器の中にサンプルである ABS 製樹脂ケースを5つ入れた。その上から、正電極を4つ設けた、容器の蓋も兼ねた PE 板を上からサンプルに押さえつけ、樹脂バンドで固定し、放電・破砕処理をした。 放電回路は、前記 3.1.1 で述べた放電エネルギー1.8kJ のマルクス式パルス破砕装置を用いた。

この条件で、放電を進め、放電 10 回毎に破壊状況を確認し、全体の半数程度 のサンプルの蓋が開いた時点で、放電回数あたりの蓋が開いた個数を評価する 事とした。



図 3-16:実証に用いた治具

【実証結果】

放電 10 回で、5 つのサンプルのうち 2 個の蓋が開いた。再度放電すると過破 砕になり、評価が困難になる懸念があったため、処理容器から取り出して、放 電回数あたりの蓋が開いた個数を評価する事とした。

図 3-17 に取り出したサンプルの写真を示す。左側の写真が樹脂サンプルを蓋 側から撮影(蓋はケース内側の面を撮影)したものであり、右側の写真が底面 側から撮影(蓋はケース外側の面を撮影)したものである。

その結果、同時に処理した5つのサンプルのうち、2つの蓋が開き、他のサン プルの破砕も部分的に進行していた。部分的に破砕が進行していたサンプルの 破砕の進捗を3割と評価することとし、この条件の破砕力を『5個中2.9個破壊 /10回放電』と評価した。この結果は、前述の3.2.1(1)~(3)の結果と比較 して、大変良好な結果である。筐体破砕に適した放電部構成として、次の実証 では実際の小型家電(携帯電話)をサンプルとして実証を進めることとした (3.2.1(5)に該当)。



図 3-17:処理後のサンプルの写真

(5) ED 方式における押さえつけ電極を用いた小型家電の破砕実証

【目的】

前記(4)の電極構成において、樹脂筐体サンプルで良好は破砕結果だった事 を踏まえ、実際の小型家電の破砕性能を実証する。

【サンプル】

携帯電話5台

【評価方法】

放電回数あたりの基板が露出した携帯電話個数

【実証条件】

図 3-18 にサンプルを入れた放電部の写真を示す。設備構成は、上記 3.2.1 (4) と同様であるため、詳細な説明は省略する。

放電回路も、3.2.1(4) 同様に、前記 3.1.1 で述べた放電エネルギー1.8kJの マルクス式パルス破砕装置を用いた。

この条件で、放電 10 回毎に破壊状況を確認し、半数以上のサンプルの基板が 露出した放電回数でサンプルを取り出し、放電回数あたりの基板が露出した携 帯電話個数を評価した。



図 3-18:実証に用いた放電部の構成

【実証結果】

図 3-19 に放電に伴う処理物の変化を示す。放電による破砕処理前と、放電 30 回後の破砕物、放電 50 回後の破砕物の写真を示す。放電 30 回目に写真撮影 のために取り出した破砕物は、元の位置に戻して、再度放電処理を進めており、 図中の写真に写っているサンプルは全て同一物である。同じ放電回数の写真が 複数あるのは、同じサンプルを様々な方向から撮影したものを載せているため である。

放電 10~20 回では、内部の基板が見えたり、樹脂製の筐体が大きく破損した りといった状況は観測されなかった。放電 30 回目で、5 台入れたサンプルのう ち、2 台で破壊が進行した。それ以外のサンプルはほとんど破壊が進んでいなか った。このことから、放電が最も導電性の良い部分に集中して起こっており、 そのために一部のサンプルに破壊が集中したうえ、さらにサンプルの導電性が 良かったために絶縁破壊に伴う衝撃波が十分に発生せず、破壊が進まなかった と考えられる。

50回放電させて、サンプル2台で基板が露出したが、基板と筐体は依然強固 に接続されており、破砕後の選別工程(篩やソータ等による樹脂筐体と基板の 選別工程)で処理できるほどの分離性は全く得られなかった。

このことから、電極をサンプルに押さえつけて ED 方式で破砕処理を進める 事は、絶縁性の高い樹脂ケースなどに対しては有効だが、導電性の高い部分を 有する小型家電などでは、放電が一部分に偏ってしまい、なおかつ放電に伴う 衝撃波が十分発生しないために破砕効率は非常に悪くなることが判明した。

よって、放電の安定化は、正電極を押さえつける方法は中止し、電圧を上げる方法を検討することとした(3.2.1(6)に該当)。



図 3-19: 押さえつけ電極の小型家電での実証結果

(6) ED 方式における放電安定化を目的とした、電圧を上げる効果実証

【目的】

前記(3)及び(4)の結果を踏まえ、非導電性容器を用いる放電安定化にお よぼす、電圧を上げる影響を検証

【サンプル】

携帯電話1台

【評価方法】

放電回数あたりの基板が取り出せる携帯電話の数

【実証条件】

放電部分の構成は、板状の GND 電極の上にサンプルを置き、その上に空間 を空けて複数の正電極を設置した。具体的には、円状の金属板(φ150)をア ースに接続して GND 電極としたうえで、その上にサンプルを置き、放電でサ ンプルが飛び出さないようにゴムで電極及びサンプルの周りを円筒状に覆っ た。この高さは 100mm 以上あり、サンプルは飛び出すことなく破砕処理を 進めることができる。正極は円状の樹脂の板に、等間隔に 6 本設置したもの を、サンプルの上に設置した。サンプルの上面表面から正極先端までの距離 は 30mm にした。

放電回路は、前記 3.1.2 で述べた、放電エネルギー6.4kJ, 放電電圧 400kV のマルクス式パルス破砕装置を用いた。サンプル数は、複数のサンプルにす ると、この方式は放電の偏りが発生する事が想定されるため、1 個とした。量 産においては、ベルトコンベア等で流れてくるサンプル1つ1つに対して放 電する構成を想定している。

【実証結果】

図 3-20 に結果を示す。放電 5 回、20 回、40 回で破砕状況を確認した。同 じ放電回数で複数の写真をあげているが、これは同一のサンプルを様々な角 度から撮影したものである。放電 5 回では、樹脂筐体の一部が剥離している が、基板の露出は無かった。放電 20 回で基板が露出してきたため、サンプル を放電処理容器から取り出して観察したが、樹脂筐体と基板は分離していな かった。放電 40 回で樹脂筐体と基板が層状に分離した。

基板と樹脂筐体の分離状態は、ほぼ目的としている状態であった。つまり、 破砕後の基板はほぼ原型を保っており、後工程での基板の分離にかかる負荷

(人件費や設備の消費電力など)の大幅な削減が期待できる状態であった。

ただし、放電回数は40回と多く、放電に必要な消費電力(二酸化炭素排出量)の増加が見込まれる。試算上、CO2排出量削減のためには、あくまで携帯電話1個(100g)あたりの放電回数は10~20回程度に抑える必要がある。

このことから、今回の条件で ED 方式では二酸化炭素排出量削減には繋が らないリスクがある。また、3.2.1 (1) ~ (5) までの一連の実証を踏まえ、 今回の条件以外で ED 方式の効率を上げることは難しいと判断し、3.2.1 (1) で説明した EHD 方式について検証を進めることとした(3.2.1(7)に該当)。 ただし、3.2.1 (4) の結果から、ED 方式は樹脂ケースなど絶縁物の破壊は効 率的に行うことができた。ED 方式は、小型家電以外の別の種類の破砕物で活 用できる可能性が大いにあり、本事業終了後も検証を進める事が望まれる。

放電回数	サンプルの状態
0回 (放電処理前)	
放電5回後	
放電 20 回後	
放電 40 回後	

図 3-20: ED 方式における押さえつけ電極を用いた小型家電の破砕実証結果

(7) EHD 方式による小型家電の破砕実証

【目的】

EHD 方式による小型家電の破壊性能の明確化

【サンプル】

携帯電話1個及び3個

【評価方法】

基板が分離するまでに要した放電回数

【実証条件】

サンプルを 150×240mm の網の上に載せ、網の下側に正極及び GND 電極 を設置した。電極の先端はほぼ網の面と同じ位置とした。このことで、電極 は放電に伴うサンプルの移動はさまたげないが、サンプルに接触しているよ うにした。網の周りは、サンプルが飛び出さないよう、高さ 100mm 以上の PE 製の板で覆った。放電に用いた回路は、前記 3.1.2 で述べた、放電エネル ギー6.4kJ,放電電圧 400kV のマルクス式パルス破砕装置を用いた。

この条件で、放電5回毎に破砕状況を目視確認し、基板が分離できると判断したところでサンプルを取り出し、基板が分離するまでに要した放電回数 を評価した。

ー度に処理するサンプル数は、携帯電話1個と、携帯電話3個の、2条件を 別々に実施して評価した。

 放電回数
 携帯電話1個破砕した条件
 携帯電話3個を同時破砕した条件

 0回 (放電処理前)

 「飲電処理前)

 「「」」」

 「」」」

 「」」」

 「」」」

 「」」」

 「」」」

 「」」」

 「」」」

 「」」」

 「」」」

 「」」」

 「」」」

 「」」」

 「」」

 「」」

 「」」

 「」」

 「」」

 「」」

 「」」

 <t

図 3-21 に破砕処理前のサンプルの写真を示す。

図 3-21: 処理前のサンプルの状態

【実証結果】

図 3-22 に破砕後のサンプルの写真を示す。

携帯電話1個を処理した条件では、放電20回で基板と樹脂筐体が分離できた。今回の結果はCO2排出量削減に繋がりうる好適な結果である。試算では、携帯電話1個あたりの破砕に必要な放電回数10~20回程度でCO2排出量削減に繋がる見込みがあったためである。さらに携帯電話3個を同時に破砕処理した結果を見ると、完璧に基板が分離されたサンプルは無かったが、破砕が偏ることなく、全てのサンプルで均一に破砕が進んでいた。基板や樹脂筐体の過破砕も起きていないため、EHD条件では一度に複数サンプルを処理しても、携帯電話1個を破砕したときと同様の処理後のサンプル性状が均一に得られると想定される。EHD方式は、ED方式と比較して、破壊力では劣るものの、多くのサンプルを均一に破砕するには適した構成であると考えられる。

よって、今後の実証は、EHD 方式を中心に進め、また一度に破砕するサン プル数も複数個とする事とした。

放電回数	携帯電話1個破砕した条件	携帯電話3個を同時破砕した条件
放電 5 回後		
放電 10 回後		
放電 20 回後		

図 3-22: EHD 方式による小型家電の破砕実証結果

(8) EHD 方式による複数の小型家電の同時破砕実証

【目的】

これまでの結果を踏まえた最適条件で携帯電話を処理し、基板取り出しまで に必要な放電回数を明確化。さらに、次節で環境性評価するために使用する処 理後サンプルを得る。

【サンプル】

携帯電話5個

【評価方法】

基板が取り出せるまでに要する放電回数

【実証条件】

前記 3.2.1 (7) と同じ構成で、サンプルの破砕処理を実施した。詳細な構成 は前述のため省略する。ただし放電回路は、(7) では放電エネルギー6.4kJの 装置を用いたが、今回は 1.8kJ の装置を用いた。回路の詳細な説明は 3.1.1 で述 べているため省略する。放電エネルギーを下げた理由は、放電エネルギー1.8kJ で実証した 3.2.1 (1) と、放電エネルギー6.4kJ で実証した 3.2.1 (7) の破砕状 況を比較すると、破砕状況があまり変化していないように見受けられたためで ある。EHD 方式では放電電圧や放電エネルギーの影響は少ないと考えられたた め、CO2 排出量削減を目的に、放電回路は上記のとおり、1.8kJ のマルクス式 パルス破砕装置を用いることとした。

放電5回ごとに破砕状況を確認し、ほぼ全ての基板が筐体と分離できたとこ ろでサンプルを回収し、基板が取り出せるまでに要する放電回数を評価した。

【実証結果】

放電 55 回で、5 個の携帯電話サンプルが全て破砕され、基板が露出した状態になった。

図 3-23 に破砕前のサンプルと、55 回放電後のサンプルの写真を示す。図 中、上段の写真が、破砕前のサンプルである。下の写真は破砕後に樹脂製の バッドに回収したサンプルの写真である。サンプルは、様々な種類の携帯電 話を処理する必要を鑑みて、折りたたみ式の携帯電話3台と、折りたたみ式 でない携帯電話2台と異なる種類の携帯電話を混ぜて用いた。破砕後のサン プルは、基板がほぼ原型をとどめたまま樹脂筐体から分離されており、従来 法に比べて後工程の選別工程の負荷軽減に伴うCO2排出量削減が期待できる。 また、放電回数も、携帯電話5台で55回と比較的少ない回数であり、破砕工 程自体のCO2排出量も抑えられている。

図 3-24 に、放電回数から算出される CO2 排出量と、破砕後の処理物の品 位を示す。品位は、篩などの簡単な選別機で回収できない残渣の粒子数とし た。この残渣中の粒子数が少ないことが、CO2 排出量低減と経済合理性の両面において破砕プロセスで求められる事だからである。

また従来の破砕方式として、パーツセパレータ(PS)を用いた時の結果も 同時に示している。CO2排出量、粒子数、PSの処理条件など、この算出根拠 は「5.環境改善効果の評価」で詳しく述べるが、このグラフからもパルス破砕 を用いることによって、破砕処理自体のCO2排出量は増加するが、品位が非 常に高いため、環境性が高いことが期待できる。

環境性の評価は、この実証で得られたサンプルを元に、『5.環境改善効果の 評価』にて詳細を述べる。



図 3-23: EHD 方式における携帯電話破砕前後の写真



図 3-24: 従来法とパルス破砕法の CO2 排出量と品位の関係(筐体破砕)

3.2.2. パルス放電による基板からの部品剥離プロセスに関する実証

小型家電から取り出した基板から、貴金属が含まれる電子部品をパルス放電によって分離するプロセスの実証を行った。

図 3-25 にこの節の取組の全体像を示す。ED 方式および EHD 方式について それぞれ検証を推進し、このプロセスには EHD 方式が適していることを明確化 した。そして EHD 方式における条件の精査を進め、34 回の放電で、基板 150mm ×300mm の面積から電子部品の8割を剥離できるという結果を得た。

(1) ED方式およびEHD方式の比較 ED方式とEHD方式を比較 サンプルは薄型テレビ由来の基板を使用
【結論】 EHD方式の方が、広い範囲で部品を剥離できる。 ED方式なら、局所的な範囲の破壊効率が高い。
 ・ EHD方式の方が優れていると想定 ・ ED方式についても、電極構成の変更による改善効果を検証 したうえで、採用する方式を決定することとした。
ED方式について、様々な電極構成を検証
(2)ED方式において正極を複数にする効果の実証-1 (3)ED方式において正極を複数にする効果の実証-2
【 結論】 破砕の偏りは少なく、基板で均一に部品剥離が進む。 しかし電極の本数や位置関係、一度に処理するサンプル数を変えても破砕回数 は改善しない。
・ ED方式ではなく、EHD方式を採用することに決定。
EHD方式において、様々な設備構成を検討
(4)EHD方式においてサンプルを固定しないケースの破砕効果実証 (5)EHD方式におけるサンプルの水平移動を規制する条件の効果確認 (6)EHD方式の最適条件における基板の破砕実証
【結論】 (6)の条件により、放電34回で、基板の150mm×300mmの面積で部品の8 割を剥離させることに成功。この条件を最適条件とした。

図 3-25:パルス放電による基板からの部品剥離プロセスに関する実証の全体像

この一連の取組の詳細を、3.2.2(1)~(6)に述べる。

(1) 基板からの部品剥離における、ED 方式及び EHD 方式の比較

【目的】

ED 方式及び EHD 方式の標準的な条件において、基板からの部品剥離において有効な方式を判断。

【サンプル】

薄型テレビ由来の基板。60~70mm×110~150mm

【評価方法】

部品剥離率 (=剥離した IC 数/実装された IC 数×100(%))

【実証条件】

図 3-26 に ED 方式及び EHD 方式の装置構成を示す。サンプルは樹脂バンド で固定して実証した。

その他条件は、表 3-3 に示す。

放電回路は、前記 3.1.1.で述べた、放電エネルギー1.8kJのマルクス式パルス 破砕装置を用いた。また各条件の放電回数は5回とした。



EHD 方式



図 3-26: ED 方式及び EHD 方式の模式図

条件方式		電極間距離	電極・サンプル間距離 (正極)	電極・サンプル間距離 (GND)
			mm	mm
1	ED	_	0	0
2	ED	-	10	0
3	EHD	20	0	0
4	EHD	20	10	10
5	EHD	100	0	0
6	EHD	100	10	10

表 3-3: ED 方式及び EHD 方式の比較実験条件

【実証結果】

表 3-4 に、実証結果を示す。

表 3-4 に示す剥離率及び破壊前後の写真から、EHD 方式で、なおかつサンプ ルから電極までの距離がある正極とサンプルの距離を 0mm ではなく 10mm に する事により、広い範囲を破壊できる事が分かる。本実証での最大部品剥離箔 利率は、放電 5 回で 75%であった。

また ED 方式でも放電 5 回で 67%の部品剥離が確認でき、それなりに高い値 が得られた。ただし、剥離した部分は電極の周辺に集中しているため、基板の 全体に実装されている電子部品を剥離させるためには、放電経路が 1 つに固定 されないよう、複数の電極を設けるなどの工夫が必要である事がわかった。

以上の結果を踏まえ、大きな効果が得られた EHD 方式は引き続き詳細な検証 を継続するが、ED 方式においても、正電極を剣山のように複数本とする追加検 証を実施し、その結果を踏まえて最適な方式を判断することとした(3.2.2(2),(3) に該当)。

58

条件	放電前	放電後	結果	
			表	裏
1				
			部品剥離率:55%(6個	剥離/全11個)
2				
			部品剥離率:67%(2個	副剥離/全3個)
3			部品剥離率:33%(1 個	∃剥離∕全3個)
4			部品剥離率:17%(1個	∃剥離∕全6個)
5			部品剥離率:0%(0個	剥離/全5個)
6			部品剥離率:75%(3個	∃剥離∕全4個)

表 3-4: ED 方式及び EHD 方式の比較実験結果

(2) ED 方式において正極を複数にする効果の実証-1

【目的】

3.2.2(1)において、ED 方式では正電極の直近の部品しか剥離できなかった 結果を踏まえ、正電極を複数電極とするによる事による改善の度合いを明確化 する。

【サンプル】

薄型テレビ由来の基板。120×195×t20mm

【評価方法】

部品剥離率

【実証条件】

図 3-27 に今回の実証に用いた装置の写真を示す。

ほぼ基板と同じ大きさの樹脂ケースの下に編組線を這わせ、GND へ接続した。 その上にサンプルである基板を3枚重ねて入れ、その上から蓋をした。蓋に は正極を4本セットした。

その他条件は、表 3-5 に示す。サンプル枚数は、3 枚重ねの条件と、1 枚のみ の条件の2つの条件で実施した。3 枚重ねはバッチ式でやることを想定しており、 1 枚のみの条件は、コンベアで流れるサンプルに対して放電処理することを想定 している。

放電回路は、前記 3.1.1 で述べた、放電エネルギー1.8kJ のパルス放電回路を 用いた。



図 3-27: ED 方式において正極を複数にする効果の実証に用いた装置(1)

条件	方式	正極 本数	電極・サンプル間 距離 (エな)	電極・サンプル 間距離	サンプル数 枚	放電回数 回
1	ED	4	(止極), mm 15 ~ 30	(GND), mm 0	3	40
2	ED	4	30	0	1	20

表 3-5: ED 方式において正極を複数にする効果の実証条件

【実証結果】

表 3-6 に、破壊後の処理物の写真を示す。

正電極を多くし、なおかつコンベアのように1枚ずつ流れてくるサンプルに 20回放電したとしても(条件2に相当)、部品剥離率は57%に留まった。処理 後の部品剥離状況を見ても部品の剥離は電極の直下に集中している。部品箔利 率、部品の剥離位置両方とも、前節3.2.2(1)のEDとの結果と比較して大差 ないため、正極数を4本程度に増加による効果は無いことが判明した。

ただし本実証において、ED 放電において基板を重ねて処理しても、部品が剥離する基板に大きな偏りが出ることなく、全ての基板で均一に部品剥離が進む ことがわかった。

この結果を踏まえ、基板を重ねて処理できる事は魅力的であったこと、正電 極を4本以上に増やすことによって改善する可能性も考えられることから、正 電極を増やした条件で引き続き検証し、基板破砕に適した方式(ED 方式もしく は EHD 方式)を判断することとした(3.2.2(3)に該当)。

条件	放電	部品剥離率,%	
	表	裹	
1	GND 側/中間/正極側	GND 側/中間/正極側	 サンプル 1(正極側のもの) 30% (3 個剥離/全 10 個) サンプル 2(中間のもの) 43%(3 個剥離/全 7 個) サンプル 3 (GND 側のもの) 30%
2			(6 個剥離/全 20 個) 57%(4 個剥離/全 7 個)

表 3-6: ED 方式において正極を複数にする効果の実証結果

(3) ED 方式において正極を複数にする効果の実証-2

【目的】

3.2.2(2)において、ED 方式で正電極の本数が基板に対して4本程度では効果が見られなかったことを踏まえ、電極数を増やした条件で実証を行い、正電極を複数電極とするによる改善の度合いを明確化する。その上で、基板からの部品剥離において ED 方式と EHD 方式のどちらが適しているかを判断する。

【サンプル】

薄型テレビ由来の基板。120×120mm

【評価方法】

剥離した部品点数(率)

【実証条件】

図 3-28 に今回の実証に用いた装置の写真を示す。

基板が丁度入る大きさの円筒形のゴム管の下に GND 電極を、その上に基板を 置いた上で、電極数6本の正極をセットした。

その他条件は、表 3-7 に示す。

放電回路は、放電エネルギーを増加させた影響も見るために、前述 3.1.2 で述べた、放電エネルギー6.4kJのマルクス式パルス破砕装置を用いた。



図 3-28: ED 方式において正極を複数にする効果の実証に用いた装置(2)

条件	方式	正極	電極・サンプル間	電極・サンプル間	サンプル数,枚	放電回数
		本数	距離	距離		回
			(正極), mm	(GND), mm		
1	ED	6	20~30	0	1	20

表 3-7: ED 方式において正極を複数にする効果の実証(2)

【実証結果】

表 3-8 に実証結果を示す。20 回放電後のサンプルの部品剥離率は、50%(部品 6 個剥離/全 12 個)であった。処理後のサンプル写真からわかるとおり、正極の本数を4本とした 3.2.2(2)に比べて、基板全体から部品が剥離している効果はあるものの、部品剥離率は大差が無かった。また、放電エネルギーを、

3.2.2(2) では 1.8kJ だったところを 6.4kJ に増加させたが、今回のように ED 方式で基板を 1 枚ずつ処理するケースでは効果がほとんどなかった。

この結果と、3.2.2(1),(2)の結果を踏まえ、同じ放電回数では ED 方式よ りも EHD 方式の方が広い面積で基板から部品を剥離できると判断し、基板破砕 には EHD 方式を採用することとした(EHD 方式の実証は 3.2.2(4),(5),(6)に該 当)。

条件	放電前	5回放電	10 回放電	20 回放電
1				

表 3-8: ED 方式及び EHD 方式の比較実験結果

(4) EHD 方式においてサンプルを固定しないケースの破砕効果実証

【目的】

EHD 方式について、実際の量産プロセスに近い条件での部品剥離率を明確化 する。具体的には、前述 3.2.2 (1) ではサンプルを樹脂バンドで固定して行っ たが、本実証ではベルトコンベア上に載った状態を想定し、サンプルを固定し ない条件で破砕処理を行い、破砕効率を明確化する。

【サンプル】

薄型テレビ由来の基板。120×195×t20mm

【評価方法】

面積あたりの部品剥離率。ICに加えて、金などが含まれるコネクターも部品 としてカウントした。 【実証条件】

図 3-29 に今回の実証に用いた装置の写真を示す。

長方形の箱の中に基板を設置し、上部に正極及び GND 電極を設け、水中にて 放電させた。箱の短辺側の長さは基板とほぼおなじだが、長辺側は基板の 1.5 倍程度の長さとし、基板が移動できるようにした。

その他条件は、表 3-9 に示す。電極とサンプル間の距離は、正極、GND 共に 20mm とした。なぜなら、これまでの実証で、電極とサンプル間の距離は 0mm だとほとんど破壊が進まないこととがわかっており、また基板上の部品の高さ を考えると最低でも 20mm 程度はあるべきと考えられるためである。電極間距 離は、幅 120mm の基板上の部品を一様に取るために、120mm よりわずかに狭 い 100mm とした。もし、電極間距離をサンプルの幅である 120mm に近づける と、サンプルを保持する容器や、量産ではコンベア等へ放電しており、処理効 率が落ちるため、120mm よりも狭い条件で実証することとした。

放電回路は、前記 3.1.1 で述べた、放電エネルギー1.8kJ のパルス放電回路を 用いた。



図 3-29: EHD 方式においてサンプルを固定しないケースを想定した破砕効果実証に用いた装置

条件	方式	電極・サンプル間	電極・サンプル間	電極間	放電回数
		距離	距離	距離, mm	回
		(正極), mm	(GND), mm		
1	EHD	20	20	100	5

表 3-9: EHD 方式においてサンプルを固定しないケースを想定した破砕効果実証条件

【実証結果】

破砕処理後の結果を表 3-10 に示す。部品剥離率自体は 43~57%と低い値だ が、これは放電 5 回での結果であり、放電回数あたりの部品剥離率は高い。こ のため放電によって効率的に部品を剥離できたと言える。特に電極直下幅 50mm の部品剥離が進んだ。また、基板の端に載っているコネクターも剥離さ せることに成功した。このことから、コンベアに乗って移動してくる基板に対 して、EHD 方式で連続的に放電することにより、基板全体から部品を剥離する ことが可能であると考えられる。

一方で、今回の条件では基板は長辺方向へ自由に移動できるような構成だったが、5回の放電により位置が100mm 近く変わっていた。基板の長さが200mm 弱である事を考えると無視できない距離である。よって、処理物の固定に関しては、上下方向には完全に固定しなくてもかまわないが、平面方向については移動を制約させる必要があることがわかった(この実証は3.2.2(5)に該当)。

	放電前 5回放電後		
表			
裏			
破砕装置 にセットし た状態			
5回放電後の部品剥離率(全体),%		43%(9個剥離/全 21 個)	
5 回放電後の部品剥離率		57%(4個剥離/全7個)	
(電極直下	幅 50mm),%		

表 3-10: EHD 方式においてサンプルを固定しないケースを想定した破砕効果実証結果

(5) EHD 方式におけるサンプルの水平方向移動を規制する条件の効果確認 【目的】

3.2.2(4)の結果を踏まえ、EHD 方式の効率改善を目的に、サンプルの水平 方向の移動を規制する容器を用いる条件の破砕効率への影響を明確化する。

【サンプル】

薄型テレビ由来の基板。165×255mm

【評価方法】

面積あたりの部品剥離率。ICに加えて、金などが含まれるコネクターも部品としてカウントする。

【実証条件】

図 3-30 に実証に用いた装置を示す。

サンプルである基板がちょうど入る治具(ケース)の上に、EHD 放電される よう正極及び GND 電極を設けた。このサンプルを入れるケースの位置は変更で きるようになっており、サンプルに対する正極及び GND 電極の位置を変えて、 放電処理をした。

ケースの大きさは、幅 160mm×長さ 290mm とした。

その他の条件を表 3-11 に示す。処理サンプルの幅が 165mm である事を踏ま え、サンプルの端の部分にも実装されている部品が全て取れるよう、電極間距 離はサンプルの幅よりも若干少ない 130mm とした。電極間距離に比べてサン プルの方が 35mm 大きいが、3.2.2(4)の検証結果から、この程度の差であれ ばサンプルの端に実装されている部品も剥離可能である。

サンプルと電極間の距離は、30mm とした。3.2.2(4)の実証では 20mm で 実施したが、3.2.2(1)の実証から、サンプルと電極間の距離は広い方が部品の 剥離に効果があったことから、30mm と増やした。また、電極とサンプル間の 距離を増やすことによって、放電しないリスクや、水にエネルギーがとられる リスクが考えられたため、放電回路を、電圧 400kV、放電エネルギー6.4kJの ものに変更した(3.2.2(4)で使用した回路は、電圧 150kV,放電エネルギー1.8kJ)。

放電回数は、合計で15回とした。ただし、量産時点ではコンベアで連続的に 搬送されてくるサンプルに対して放電することを想定し、サンプルの長手方向 に位置を変えながら放電させた。具体的には、長手方向に3回位置をずらして おり、この位置は、長手方向の端面から25mm、75mm(中心)、125mmの3 つの位置である。1つの位置での放電回数は各5回であり、5回×3位置=合計 15回放電した。



図 3-30:実証に用いた装置

条件	方式	電極・サンプル間	電極・サンプル間	電極間	放電回数
		距離	距離	距離, mm	回
		(正極), mm	(GND), mm		
1	EHD	30	30	130	5回×3
					位置
					計 15 回

表 3-11: 実証条件

【実証結果】

実証結果を表 3-12 に示す。

15回放電での部品剥離率は57%に留まった。前述の3.2.2(1)では75%剥離 した事に比べると、低い値である。

この原因は、今回の実証ではサンプルの大きさが比較的大きかった事と、部 品の大きさが比較的小さかったこと、電極とサンプル間の距離が広かったこと の3点が考えられる。

・サンプルの大きさの影響

これまでの実証の破砕後サンプルの写真と今回のものを比較すると、放 電による部品剥離は電極の近傍で特に起こっている。よって、放電エネル ギーは 3.2.2 (1)の実証から増やしたものの、電極の周辺のみにエネルギ ーが集中し、基板全体から部品を剥離するにはいたらなかったと考えられ る。そのため、電極間距離は闇雲に広げるのではなく、3.2.2 (1)の条件で ある 100mm 程度とし、放電回数を増やすことで大きな基板にも対応する ことが望ましいと想定される。

・部品の大きさの影響

放電時に水が気化膨張するときに生じる加速度によって部品に加わる力 は、体積に比例して変わると考えられるため、部品の大きさも破壊効率に 影響する。

・電極とサンプル間の距離の影響

電極とサンプル間の距離が大きい場合、水中の放電経路が長くなり、放 電経路で気化膨張する水の体積が増えてしまうため、この気化膨張に放電 エネルギーの大部分を取られてしまう。この時、強い衝撃波が発生するの でサンプルの破壊に繋がる場合もあるが、衝撃波は大幅に減衰しながら水 中を伝播するため、この放電によって発生した衝撃の大部分が破壊に寄与 しない無駄な衝撃波だった可能性がある。このことが効率悪化に繋がった 可能性がある。そのため、電極とサンプル間の距離は30mmより短い方が 好ましく、特に3.2.2 (1)の条件である10mm程度が良いと推定した。た だし、電極とサンプル間の距離を10mmにすると、サンプルと電極が接触 する場合があるため、量産に向けての画像解析や放電波形の解析による、 電極の位置調整機構の開発が望まれる。

以上の事から、EHD 方式の更なる改良条件として、電極間距離 100mm、電 極・サンプル間距離を 10mm とする事として、実証を継続した(3.2.2(6)に該当)。

表 3-12: 実証結果

条件	放電前	5回放電	10 回放電	15 回放電
1				
部品	0%	36%	43%	57%
剥離率	0/14	5/14	6/14	8/14

(6) EHD 方式の最適条件における基板の破砕実証

【目的】

パルス放電による基板破砕における CO2 排出量評価に向けて、3.2.2(1)~ (5)の結果を踏まえた最適条件で破砕処理を行い、基板から8割の部品が剥離 するまでに要した放電回数を測定する。

【サンプル】

薄型テレビ由来の基板(150×150mm)2枚

(面積の合計値は150mm×300mm)

【評価方法】

放電回数:基板上のICが8割剥離するまでに要した放電回数を計測

【実証条件】

装置は、3.2.2 (5) で用いたものと同様である。ただし放電エネルギーは 1.8kJ, 放電電圧は 150kV とし、また電極間距離は 100mm とした。電極とサンプル間 の距離は 10mm とした。

この条件で、サンプルの長手方向に位置をずらしながら放電処理を行った。 【実証結果】

放電34回で、サンプル上の部品の8割を剥離することに成功した。

この結果は、従来法に比べて後工程の選別工程の負荷軽減に伴う CO2 排出量 削減が期待できる。図 3-31 に、放電回数から算出される CO2 排出量と、破砕 後の処理物の品位を示す。品位は、篩などの簡単な選別機で回収できない残渣 の粒子数とした。この残渣中の粒子数が少ないことが、CO2 排出量低減と経済 合理性の両面において破砕プロセスで求められる事だからである。

また従来の破砕方式として、パーツセパレータ(PS)を用いた時の結果も同時に示している。CO2排出量、粒子数、PSの処理条件など、算出根拠は「5. 環境改善効果の評価」で詳しく述べるが、このグラフからもパルス破砕を用いることによって、破砕処理自体のCO2排出量は増加するが、品位が非常に高いため、環境性が高いことが期待できる。

環境性の評価は、この実証で得られたサンプルを元に、『5.環境改善効果の 評価』にて詳細を述べる。



図 3-31: 従来法とパルス破砕法の CO2 排出量と品位の関係

3.3. 難破砕物の実証

家電機器では、洗濯機に使われている DD モータなど、破砕が困難である難 破砕物が存在する。ここでは、難破砕物として DD モータを対象物として、パ ルス放電による難破砕物からの樹脂・銅線の取り出しプロセスに関して実証を 行った。

3.3.1. 難破砕物の実証取組みの全体像

図 3-32 に難破砕物の実証取組みの全体像をまとめたフローチャットを示す。 難破砕物の実証において、まず 3.3.2 節にて、放電エネルギー1.8kJ のパルス 破砕装置を用いて DD モータを破砕における基礎実験を実施した。ここでは、 難破砕物が破砕可能であること、分離状況が良好であることが確認できた。し かし、破砕に必要な放電回数が非常に大きく最適条件にはなっていなかった。

そこで、3.3.2 節にて、破砕力を増すために放電エネルギー6.4kJのパルス発 生装置を用いて実証実験を行った。同時に、5 種類のパルス放電の印加方法につ いて検証を行った。破砕効率の改善を確認できたが、さらなる破砕効率の向上 が必要ということが判明した。

最後に、3.3.3 節にて放電エネルギーを 18kJ まで高めたパルス発生装置を用 いて実証実験を実施した。ここでは、DD モータ 1 個をパルス放電 180 回 (3240kJ) で破砕できることが確認でき、この条件を最適条件とした。

以下、各節にて詳細を述べる。


図 3-32: 難破砕物の実証取組みの全体像

3.3.2. マルクス式パルス破砕装置(1.8kJ)を用いた基礎実験

パルス破砕装置を用いて DD モータを破砕した場合の、消費エネルギー及び 破砕物の分離状況を確認するために、基礎実験を行った。

【目的】

標準的なパルス印加条件での、消費エネルギー及び破砕物の分離状況の確認。 【サンプル】

DD モータの4 ティース分を切り出したサンプル。

ティース:DDモータのコイルの1つ1つ

【評価方法】

処理物の分離状況を確認しながら、パルス放電を印加していき、樹脂、積層 合板、銅線が分離できるまでに要したパルス印加回数(消費エネルギー)を評 価。

【実証条件】

図 3-33 に電極構造の模式図及び放電条件を示す。また、放電回路は、前述 3.1.1 で述べた、放電エネルギー 1.8kJ のパルス放電回路を用いた。

150kV

1Hz

20mm



図 3-33: 電極構造の模式図及び放電条件

【実証結果】

図 3-34 に、各パルス印加回数における処理物の状態を示す。



図 3-34: 各パルス印加回数におけるサンプルの状態

図 3-34 から、パルス印加回数 100 回程度から、銅線の切断が始まり、500 回程度で放電が当ったティースについては、1/3 程度の銅線が切断・分離できて いる。最終的にパルス印加回数 3,000 回電で、樹脂、積層合板、銅線が極めて 良好な分離性で分解できることが確認できた。

一方で、銅線を完全に分離するためには、2 ティースで 3,000 回のパルス放電の印加が必要であり、この時の消費エネルギーは 5,400kJ、処理時間は約 50 分であった。この結果から、DD モータ 1 個を分離した場合を試算すると、必要な放電回数は、約 54,000 回となり、消費エネルギー97,200kJ、処理時間 900 分となり、どちらも非常に大きな値になってしまうことがわかった。

パルス発生装置の動作周波数については、コンデンサへの充電時間で律速す るため、大幅に向上させることができない。そのため、要求される処理量を実 現するには、放電回数を大幅に減らす必要がある。そのために、放電エネルギ ーがより大きな放電回路を用いて、1回の放電による破砕力を増加させることで、 放電回数を削減することにした。同時に、対象物への放電方法についても検討 を行い、より効率的な破砕ができる最適な放電条件、方式の検討をことにした (3.3.3 節)。

3.3.3. マルクス式パルス破砕装置(6.4kJ)を用いた破砕実証

基礎実験で使用した放電エネルギー 1.8kJ のパルス放電回路に対して、約 3.5 倍のエネルギーを持つ、6.4kJ のマルクス式パルス破砕装置を用いて、より 効率的な破砕ができる方式について検討を行った。

【目的】

放電エネルギー6.4kJのマルクス式パルス破砕装置を用いて、パルス放電を、 以下に示す5つの方法で印加した場合について、評価を行い、効率的な破砕条 件を明確にする。

- (1) 積層合板にパルス放電を印加する場合
- (2) 銅コイル部にパルス放電を印加する場合
- (3) 銅コイル部を電極で挟んでパルス放電を貫通させる場合
- (4) DD モータ中心にパルス放電を印加する場合
- (5) 4 等分に切断した DD モータにパルス印加する場合

【サンプル】

DD モータ 1個(合計 36 ティース)

【評価方法】

処理物の分離状況を確認しながら、パルス放電を印加していき、樹脂、積層 合板、銅線が分離できるまでに要したパルス印加回数(消費エネルギー)を評 価。

【使用電源】

放電回路は、前述 3.1.2 で述べた、放電エネルギー6.4kJ のマルクス式パル ス破砕装置を用いた。その他条件は、表 3-13 に示す。

印加電圧	400kV
周波数	2Hz
コンデンサ容量	0.8µF

表 3-13: 放電条件

(1) 積層合板にパルス放電を印加した場合

【実証条件】

図 3-35 に今回の実証に用いた装置の写真と模式図を示す。



図 3-35:装置写真及び模式図(積層合板にパルス放電を印加した場合)

金属製の処理槽の中に、パイプ型の冶具を設置し、DDモータを縦向きに固定 した。正電極は、縦向きに配置した DDモータの積層合板にパルス放電が発生 するように、DDモータ上部に正電極先端が配置されるようにした。電極間距離 については、10mm、20mm、5mmの3通りで変化させた。電極間距離を変化 させることによって、水が絶縁破壊する距離をコントロールすることが可能で ある。絶縁破壊距離が長くなると、発生する衝撃波が強くなる傾向がある。一 方で、衝撃波は伝播する際に急激に減衰する性質を持っているため、対象物ま での距離が長くなってしまうと減衰により破砕力が低下してしまう。破壊に最 適な電極間距離を検討するために、前述した3通りについて実験を実施した。

【実証結果】

表 3-14 に、破壊後の処理物の写真を示す。

放電回数 (累積)	110	310	510	710
電極間距離 (mm)	10	10	20	5
状態				
備考	鋼板表面の 樹脂が 剥がれる	積層鋼板が少し開く 銅線は何本か切断する 	積層鋼板が少し開く 銅線は何本か切断する	両端の積層鋼板は更に 開くが銅線が巻かれている ため拘束され拡がらない

表 3-14: 各パルス印加回数におけるサンプルの状態

まず、電極間距離を10mmにセットし、110回の放電を行った。この時点で、 積層合板の表面を覆っていた樹脂が剥がれ落ち、樹脂の分離が完了しているこ とがわかる。次いで、電極間距離は10mmのまま、200回の追加放電を実施し たが、積層合板が少し開き、銅線の何本かが切断されたものの、破砕は大きく は進展しなかった。次に、電極間距離を20mmにセットし、200回の追加放電 を実施したが、破砕状況に大きな変化は見られなかった。最後に、電極間距離 を5mmにセットし、こちらも200回の追加放電を実施した。この場合、積層 合板の開き具合はわずかに大きくなったが、巻きつけられている銅線コイルの 切断にまではいたらなかった。

以上の結果から、積層鋼板部に放電を直接落とし、大電流を積層合板部に流 しても破壊には至らないことが判明した。また、電極間で発生した衝撃波も放 電と同時に積層鋼板部に当っているが積層鋼板部を破壊するには至らないこと が判明した。 (2) 銅線コイル部にパルス放電を印加した場合

【実証条件】

図 3-36 に今回の実証に用いた装置の模式図を示す。



図 3-36:装置写真及び模式図(銅線コイル部にパルス放電を印加した場合)

金属製の処理槽の中に、パイプ型の冶具を設置し、DD モータを縦向きに固定 した。正電極は、縦向きに配置した DD モータの銅線コイル部にパルス放電が 発生するように、DD モータのコイル部の横に正電極先端が配置されるようにし た。電極間距離については、10mm 固定とした。

【実証結果】

表 3-15 に、破壊後の処理物の写真を示す。

まず、200回の放電を行った。この時点で、銅線が何本か引きちぎられたよう に破断し、銅線コイルの巻きつきが若干ゆるくなったが、銅線の大部分は依然 として積層合板に巻きついたままであった。そのまま追加で300回の放電を実 施したところ、積層合板が折れ曲がるように変形した。これは衝撃波とともに 発生した磁界による変形と推測される。

以上の結果から、銅線コイル部に放電を直接落とすことで、銅線コイルを切 断する ことを試みたが、破壊には至らないことが判明した。



表 3-15: 各パルス印加回数におけるサンプルの状態

(3) 銅線コイル部を電極で挟んでパルス放電を貫通させた場合 【実証条件】

図 3-37 に今回の実証に用いた装置の模式図を示す。



図 3-37:装置写真及び模式図(銅線コイル部を電極で挟んでパルス放電を貫通させた場合)

金属製の処理槽の中に、パイプ型の冶具を設置し、DD モータを縦向きに固定 した。正電極と負電極の先端が、縦向きに配置した DD モータの銅線コイル部 を挟むように配置し、パルス放電が銅線コイル部を貫通するようにした。電極 間距離については、どちらの電極も 10mm 固定とした。

【実証結果】

表 3-16 に、破壊後の処理物の写真を示す。

放電回数 (累積)	110	510	
電極間距離 (mm)	10	10	
状態			
備考	鋼板表面の樹脂が剥がれた 水が濁った	積層鋼板が折れ曲がり変形 放電が当った部分は、銅線が切断	

表 3-16: 各パルス印加回数におけるサンプルの状態

まず、110回の放電を行った。この時点で、積層合板を覆う樹脂は剥がれ落ち たが、銅線コイルについては、顕著な変化は見られなかった。そのまま追加で 400回の放電を実施したところ、積層合板が折れ曲がるように変形し、放電が当 った部分については約1/3の銅線が切断された。これは、前述した(1)積層合 板にパルス放電を印加した場合、(2)銅線コイル部にパルス放電を印加した場 合と比較すると良好な結果となった。

以上の結果から、銅線コイル部を電極で挟み、パルス放電を貫通させること で、放電を直接落とすことで、他の方式より効率的に破砕を進展させることが できることが判明したが、大幅な破砕効率の向上には至らなかった。 (4) DD モータ中心にパルス放電を印加する場合

【実証条件】

図 3-38 に今回の実証に用いた装置の模式図を示す。



図 3-38:装置写真及び模式図(DDモータ中心にパルス放電を印加する場合)

GNDに接続された金属製の処理槽の中に、金属製ザルを設置し、DDモータ をザル内に置いた。この時、ザル及び処理槽が金属製であるため導通しており、 ザル自体が負電極として機能する。次に、正電極の先端が、横向きに置かれた DDモータの中心部で、上辺から10mmの位置に来るように設置した。

【実証結果】

図 3-39 に、破壊後の処理物の写真を示す。



(A) 放電前

(B) 放電200回後

図 3-39: 放電前と放電 200 回後のサンプルの状態

200回放電を印加したが、DD モータ内部の樹脂が剥がれ落ちるだけで、銅線 コイルについては、顕著な変化は見られなかった。そこで、図 3-40の(A)に 示すように、正電極を DD モータ上辺から 20mm の位置に設置し、追加で 200 回パルス放電を印加した。図 3-40の(B)に示すように、特に変化は見られな かった。以上から、DD モータ中心部にパルス放電を印加しても、銅線コイルの 分離には至らないことが判明した。



(A) 正電極をDDモータ上方20mmに設置

(B) 追加放電200回後(累計400回)

図 3-40:処理槽の模式図と追加放電 200 回後のサンプルの状態

(5) 4 等分に切断した DD モータにパルス印加する場合

【サンプル】

図 3-41 に今回の実証に用いたサンプル (DD モータ 1 個を 4 等分に切断。9 ティース分)を示す。



図 3-41:4 等分に切断した DD モータ

【実証条件】

図 3-42 に今回の実証に用いた装置の模式図を示す。



図 3-42:装置写真及び模式図(4等分に切断した DD モータにパルス印加する場合)

GND に接続された金属製の処理槽の中に、金属製ザルを設置し、4 等分した DD モータ 1 個をザル内に置いた。この時、ザル及び処理槽が金属製であるため 導通しており、ザル自体が負電極として機能する。次に、正電極の先端が、DD モータの上辺から 10mm の位置に来るように設置した。

【実証結果】

図 3-43 に、破壊後の処理物の写真を示す。

100回放電を印加したが、DD モータ内部の樹脂が剥がれ落ちるだけで、銅線 コイルについては、顕著な変化は見られなかった。そこで、破砕効率を向上さ せるために4等分した DD モータ3つを、一度に処理槽に投入し、同時にパル ス印加して検証することにした。



(A) 放電前

(B)100回放電後



【実証条件】

図 3-44 に今回の実証に用いた装置の模式図を示す。



図 3-44:装置写真及び模式図(4等分に切断した DD モータ3つにパルス印加する場合)

GND に接続された金属製の処理槽の中に、金属製ザルを設置し、4 等分した DD モータ 3 個をザル内に置いた。この時、ザル及び処理槽が金属製であるため 導通しており、ザル自体が負電極として機能する。正電極の先端は、ザル中心 部に来るように設置した。

【実証結果】

図 3-45 に、破壊後の処理物の写真を示す。



図 3-45: 放電 150 回後のサンプルの状態

150回放電を印加したが、DDモータ表面の樹脂が剥がれ落ちるだけで、銅線 コイルについては、顕著な変化は見られなかった。以上の実験から、DDモータ を予め4等分に切断した状態で、パルス放電を印加しても、破砕効率の向上に は至らないことが判明した。

放電エネルギー6.4kJのマルクス式パルス破砕装置を用いて、パルス放電を、 (1)積層合板に印加する場合、(2)銅コイル部に印加する場合、(3)銅コイ ル部を電極で挟んで貫通させる場合、(4)DDモータ中心に印加する場合、(5) 4等分したDDモータに印加する場合の5種類について、評価を行った結果、(3) の方式が最も破砕効率が良いことが判明した。しかし、500回もの放電を印加し ても十分な破砕が進展しなかったことから、更なる放電エネルギーの強化が必 要と判断し、放電エネルギー18kJのコンデンサバンク式パルス破砕装置を用い た評価も実施することにした(3.3.4節)。

3.3.4. コンデンサバンク式パルス破砕装置(18kJ)を用いた破砕実証

3.3.2 マルクス式パルス破砕装置(6.4kJ)を用いた破砕実証で使用したパルス放電回路に対して、約3倍のエネルギーを持つ、放電エネルギー18kJのコンデンサバンク式パルス破砕装置を用いて、より効率的な破砕ができる方式について検討を行った。

【目的】

放電エネルギー18kJのコンデンサバンク式パルス破砕装置を用いて、パルス 放電を、(1)積層合板に印加する場合、(2)銅コイル部を電極で挟んで貫通 させる場合の2種類について、評価を行い、効率的な破砕条件を明確にする。 【サンプル】

DD モータ 1 個 (合計 36 ティース)

【評価方法】

処理物の分離状況を確認しながら、パルス放電を印加していき、樹脂、積層 合板、銅線が分離できるまでに要したパルス印加回数(消費エネルギー)を評 価。

(1) 積層合板にパルス放電を印加した場合(縦置き冶具)

【実証条件】

図 3-46 に今回の実証に用いた装置の写真と模式図を示す。



図 3-46:装置写真及び模式図(縦置き冶具)

金属製の処理槽の中に、パイプ型の冶具を設置し、DD モータを縦向きに固定 した。正電極は、縦向きに配置した DD モータの積層合板にパルス放電が発生 するように、DD モータ上部に正電極先端が配置されるようにした。電極間距離 については、数 mm で固定した。また、銅線コイル部を両側からボルトで締め 付けて DD モータが放電によって動かないように固定した。

その他条件は、表 3-17 に示す。

表 3-17: 放電条件

印加電圧	15kV	
コンデンサ容量	160µF	

放電回路は、前述 3.1.3 で述べた、放電エネルギー18kJ のコンデンサバンク 式パルス破砕装置を用いた。

【実証結果】

図 3-47 に、各パルス印加回数における処理物の写真を示す。



(A) 放電前



(B) 放電1回目



(C)放電2回目



(D) 放電3回目

図 3-47: 各パルス印加回数におけるサンプルの状態(上部)

対象物の状況を確認しながら放電を行った。2回目の放電までは、黒い跡がつ く程度で特に変化は見られなかった。しかし、3回目の放電で、積層合板を覆う 樹脂の一部が剥がれた。3回目の放電を実施した後の、処理物の様子を図 3-48 に示す。サンプルを取り出し、パイプ冶具の下部を確認すると、DDモータの積 層合板部が割れており、固定用ネジ付近の銅線コイルが切断されていた。また、 処理槽の底に、樹脂とともに細かく千切れた銅線が落ちていることが確認でき た。6.4kJのパルス電源を用いた実験では、数百回放電しても、切断できた銅線 はわずかであったことを考慮すると、劇的な改善効果が確認できた。



(A)パイプ治具の下側



(B)処理槽底



(C)固定用ネジ付近



(D)固定用ネジ付近(拡大)

図 3-48:3回目の放電後の処理物の状態

続いて、4回目の放電を実施した後の、処理物の様子を図 3-49 に示す。電極 直下については、樹脂が剥がれた量は増加したが、積層合板、銅線コイルにつ いては、特に変化は確認できなかった。しかし、下部側を確認すると、DD モー タが切断され、処理槽底部に落下しており、固定用ネジ付近では、銅線の切断 が進展していた。この時点で、DD モータの積層合板部が破壊されてしまい、さ らに固定していた冶具も破損してしまったので、放電実験はここで中止とした。

以上の結果から、コンデンサバンクによるパルス放電を用いることで、3回という少ない放電回数で銅線コイルを切断できることが確認できた。正電極直下の部分では銅線が切断されず、固定用ネジが銅線コイルと接している箇所で銅線の切断が観測されたことから、銅線部に大電流パルスを印加することで効率的な破砕が進展すると考えられる。コンデンサバンクを用いた放電では、衝撃力が非常に強いため、数回の放電で冶具が破壊されてしまう課題や、放電時に処理槽の水が大量に飛散してしまう課題が発生したため、冶具の強化と処理水の飛散対策を行った上で、銅線コイル部への放電実験を実施することにした。





(A)電極直下

(B)パイプ治具の下側



(C)固定用ネジ付近 図 3-49:4回目の放電後の処理物の状態 (2) 銅線コイルにパルス放電を印加した場合(横置き冶具)

【実証条件】

図 3-50 に今回の実証に用いた DD モータ横置き冶具の写真を示す。



図 3-50: DD モータ横置き冶具

図 3-51 に今回の実証に用いた装置の写真と模式図を示す。



図 3-51:装置写真及び模式図(横置き冶具)

金属製の処理槽の中に、横置き冶具を設置し、DD モータを横向きに固定した。 正電極は、横向きに配置した DD モータの銅線コイル部にパルス放電が発生す るように、正電極先端を銅線コイル部に接触するように配置した。また、銅線 コイル部を両側からボルトで締め付けて DD モータが放電によって動かないよ うに固定した。処理水の飛散防止のため、水はね防止用ふたを設定した。

その他条件は、表 3-18 に示す。

表 3-18: 放電条件

印加電圧	15kV	
コンデンサ容量	160µF	

放電回路は、前述 3.1.3 で述べた、放電エネルギー18kJ のコンデンサバンク 式パルス破砕装置を用いた。

【実証結果】

図 3-52 に、5 回放電後の処理物の写真を示す。

放電前

放電後



図 3-52:5回放電後のサンプルの状態

放電部位では、銅線をほぼ分離することができている。放電部位直下のネジ に放電の後があることから、パルス放電は、正電極から放電部位にある銅線コ イルを貫通し、下部のネジに向かって流れたと考えられる。その他のネジ止め コイル部には、傷がついただけで銅線の切断には至らなかった。

以上の結果から、コンデンサバンクによるパルス放電を用いることで、5回という少ない放電回数で1ティース分の銅線コイルを切断できることが確認できた。この時の消費エネルギーは90kJであることから、DDモータ1個(36ティース)を分離した場合を試算すると、必要な放電回数は180回、消費エネルギー3,240kJとなり、3.3.1での基礎実験に対して、1/30の低消費電力化を達成した。

3.3.5. マルクス式パルス破砕装置(9.6kJ)を用いた破砕実証

3.3.3(3)節では、放電エネルギー6.4kJのパルス電源を用いることで、放電回数 500 回程度で、1 ティース分の銅線コイルの 1/3 を切断することができた。一方、3.3.4(2)節では、放電エネルギー18kJのパルス電源を用いることで、放電回数 5 回という非常に少ない放電回数で、1 ティース分の銅線コイルを切断することができた。更なる CO2 削減を目指して、その 2 つの放電エネルギーの中間の放電エネルギーを持つ、9.6kJのパルス放電回路を用いて、追加の実証を行った。

【目的】

放電エネルギー9.6kJのマルクス式パルス破砕装置を用いて、パルス放電を、 (1)積層合板に印加する場合、(2)銅コイル部を電極で挟んで貫通させる場 合の2種類について評価を行い、放電エネルギー18kJのコンデンサバンクを用 いた実証結果に対して優位性があるかを明確にする。

【サンプル】

DD モータ 1 個(合計 36 ティース)

【評価方法】

3.3.4(2)節で銅線コイルを切断できた放電回数である 5 回の放電を印加し、処理物の分離状況を 3.3.4(2)節と比較する。

(2) 銅線コイルにパルス放電を印加した場合(横置き冶具)

【実証条件】

3.3.4(2)節と電源以外は同じ条件とした。(今回の実証に用いた装置は、図 3-51と同じである。)その他条件は、表 3-19に示す。

表 3-19: 放電条件

印加電圧	200kV
コンデンサ容量	2.4 µ F

放電回路は、前述 3.1.4 で述べた、放電エネルギー9.6kJ のマルクス式パルス 破砕装置を用いた。

【実証結果】

図 3-53 に、5 回放電後の処理物の写真を示す。



図 3-53:5回放電後のサンプルの状態

放電部位では、銅線コイルのいくつかが切断されることが確認できたが、 3.3.4(2)節では同じ放電回数で1ティース分の放電コイルが切断できており、破 砕効率の向上は見込めないことと判断した。

以上の結果から、銅線コイルを切断するには、3.3.4(2)節の条件が最適化条件 と考えられる。この条件を最適化条件として、CO2 排出量の試算に用いること にした。

4. 実証結果のまとめ

小型家電及び難破砕物両方について、前節3の実証で得られた結果をまと める。

4.1. 小型家電の実証について

前述のとおり、経済合理性の観点から、有価性の高い携帯電話で、実証・プロセス評価を行ってきた結果のまとめを図 4-1に示す。これは前述の3.2.1 (8)及び3.2.2 (6)の結果をまとめたものである。装置の詳細および図中のED,EHD放電の説明は、「3.2 小型家電の実証」の章で詳細を述べているため省略する。

対象物	一連の実証で得た知見	最適な放電部の構成	評価結果
筐体	筐体に電極を常に接触させ、 筐体表面・近傍に 放電を走らせることが重要。	破砕サンブル (携帯電話を 模擬したプラスチックケース) 対象物の下部に電極設置	<mark>放電回数55回で</mark> 携帯電話5個を 基板回収可能な 状態まで破砕可能
回路基板 ^(薄型TV用基板 を使用)	破砕範囲を拡大させるため には、基板表面へ直接放電 を落とすED放電より、基板 表面・近傍でEHD放電を 起こすことが重要。	受電側電極 <u>電磁間距離</u> 基板表面 との距離	電極間距離100mm 基板表面との距離 10mmとする ことにより 放電回数34回で 150×300mmの 基板から、IC80% を分離可能

図 4-1:小型家電のプロセス実証結果のまとめ

上記図 4-1の評価結果を最適化条件とみなし、次節にて環境改善効果の評価を行うこととした。

4.2. 難破砕物の実証について

コンデンサの容量を増やしエネルギーを上げ(1kJ→18kJ)、縦置きと横 置き型の治具で評価を行った。結果のまとめを図 4-2に示す。この結果は、 前述の3.3.3(1)及び3.3.3(2)の結果をまとめたものである。



図 4-2: 難破砕物のプロセス実証結果のまとめ

1次評価時に比べ、1ティース分の銅線分離に必要な放電回数は1/300(1500 回⇒5回)に減少した。放電1回当たりの消費エネルギーは増大(約10倍)し ているが、消費電力は1/30を達成している。次節の環境性の評価はこの条件 を元に算出した。

また、縦置き型治具では、破砕力は大きいが、銅線のみの分離は困難であ る。横置き型治具は、放電集中により、銅線のみの分離が可能である。ただ し消費エネルギーは大きく、課題が残る。

4.3. 連続処理の実証について

3章において、筐体からの基板取り出しプロセス(3.2.1節)、基板から部 品分剥離プロセス(3.2.2節)、難破砕物の分離プロセス(3.3節)の実証実 験を行い、それぞれの最適条件を導きだした。筐体からの基板取り出しプロ セスおよび難破砕物の分離プロセスの実証においては、電極と処理容器の位 置関係が固定であった。一方で、基板からの部品分離プロセスの実証におい ては、3.2.2(6)節で実施した、5回の放電毎にサンプルを移動させてセット しなおしながら実験を実施することで、電極に対して対象物を移動させなが ら処理を行う条件を最適化条件とした。この方法では、セッティングに時間 が掛かってしまい大量処理することができない。実際の量産設備では、大量 処理が要求されるため、コンベア等で処理物を搬送しながら、連続的に処理 する必要がある。ここでは量産時の実現性検討のために、サンプルをベルト コンベア等で移動させながら、パルス放電を印加しても同等の処理結果が得 られることを確認する。

そこで新たに簡易搬送装置を作成し、処理槽内に設置したパレットをコン ベアに見立てて、サンプルを搬送させながらパルス放電を印加し、その場合 でも3.2.2(6)節で述べた最適化条件と同等の処理結果が得られるかの確認 を行った。

【目的】

処理槽内のレールに設置した可動式パレットに基板を固定し、制御モータを 用いてパレットを移動させながら、EHD方式パルス放電を基板に印加した場 合に、3.2.2節(6)での最適化条件と同等の部品剥離率が得られるかの確認を 行う。

【サンプル】

薄型テレビ由来の基板。120mm×190mm

【評価方法】

部品剥離率 (=剥離したIC数/実装されたIC数×100(%))

【実証条件】

図 4-3 に今回の実証に用いた装置の模式図と外観写真を示す。

サンプルである基板をパレットに固定し、処理槽内のレールにパレットを 設置した。パレットには、樹脂製の糸が取り付けられており、滑車を介して 接続されたモータを制御することで、パレットを処理槽内で水平方向に移動 させることが可能となっている。両電極は、処理槽中央付近においてパレッ トの進行方向に対して垂直に設置した。実証にあたっては、パレットをモー タ制御により一定速度で移動させ、電極直下に基板の長辺方向の端部が来た ところから放電を開始し、基板を移動させながらパルス放電を印加した。そ の後、電極直下に基板の長辺方向の終端部が来たところで放電を停止した。

3.2.2(6)節の最適化条件では、長辺方向300mmの基板に対して、パルス放 電回数34回で80%以上の部品剥離率を達成している。今回の基板は、長辺方 向190mmであるので、比例計算により20回の放電で、80%以上の部品剥離率を 達成できれば、同等の効果が得られたと言える。そこで、電極を基板に対し て走査する回数を1回とし、その間に20回パルス放電を行う条件と、走査回 数を2回とし、1回の走査で10回パルス放電を印加し、2回の走査の合計で20 回のパルス放電を印加する2つの条件について実証を行った。





図 4-3:連続処理装置の模式図および外観写真

図 4-4に各条件での電極走査位置を示す。走査回数が1回の場合は、両電 極が基板の長辺方向の中心部を挟んで対称に配置した。走査回数が2回の場 合は、1回目は基板短辺方向の上側を、2回目は下側を走査するようにした。

表 4-1に実証条件を示す。条件1、2では、電極・サンプル間距離を10mm に設定し、条件3のみ20mmとしている。

なお、放電回路は、前述3.1.2で述べた、放電エネルギー6.4kJのマルクス 式パルス破砕装置を用いた。



(1) 走査回数1回の場合
(2) 走査回数2回の場合

図 4-4: 各条件での電極走査位置

条件	方式	電極・サンプル間	電極間	走査回数	放電回数
		距離 B	距離 A, mm		回
		(正極、GND), mm			
1	EHD	10	80	1 回	20 回
2	EHD	10	60	2 回	10 回 X2 回
					計 20 回
3	EHD	20	60	2 回	10 回 X2 回
					計 20 回

表 4-1: 実証条件

【実証結果】

表 4-2に実証結果を示す。走査回数が1回の条件1において、放電回数20 回で部品剥離率80%以上を達成できることが確認できた。このときの部品剥 離率は、92%であった。続いて、走査回数が2回の条件2を実施した。この場 合には、放電回数20回で94%という非常に良好な結果を得ることができた。 最後に、良好な結果が得られた条件2において、電極間距離を10mmから20mm に変更した条件3を実施した。これは、水の絶縁破壊距離を長くすることで 破砕範囲/威力が大きくなる可能性があるかどうかの検討のため実施した。 結果としては、部品剥離率が83%となり、条件2の結果を上回ることはできな かった。

以上から、電極に対して対象物を移動させながら処理を行っても3.2.2(6) 節で示した最適条件と同等の結果が得られることが確認できた。

表 4-2:各条件での実験結果

条件	放電前	10 回放電 20 回放電 (片側終了後)	
1			
	部品剥離率	_	92%(22/24)
2			00 a m a 120 a m a a 200 a a a a con a a a con a a a con a a con a a a con a a con a a con a a con a c
	部品剥離率	71%(17/24)	96%(23/24)
3			<image/>
	部品剥離率	58%(14/24)	83%(20/24)

5. 環境改善効果の評価

5.1. 難破砕物の環境性評価

5.1.1. 計算方法

(1) 計算の対象範囲

難破砕物である DD モータに関する従来法及びパルス破砕を用いる方式のリ サイクルフローを図 5-1 に示す。

従来破砕は、ロータとステータを手作業で分離したのち、力学的な破砕装置 (例えば堅型破砕機など)にかける。その後風力選別で樹脂を取り除いたのち、 磁力選別を2回実施して鉄を回収する。その後、渦電流選別機で、銅線とアル ミを分離する。

それに対し、パルス破砕は従来破砕法に比べて過度に破砕して鉄などが細かい粒径になることを抑制できるため、従来は磁力選別を2回実施していた代わりに、1回の篩選別などで鉄を回収できる。

以上のフローを評価範囲と定義して、環境性(CO2 排出量)を評価した。



図 5-1: 難破砕物のリサイクルフロー

(2) 評価方法の概要

評価は、投入サンプル1kgあたりのCO2排出量として整理した。

CO2 排出量は、(a)設備のランニングにおける CO2 排出(破砕設備の電力消費に伴う CO2 排出)と、(b)破砕物の残渣処理に必要な CO2 排出(後工程の選別装置で消費される電力に起因する CO2 排出)の 2 つに切り分けて評価した。

(a) 設備のランニング(図 5-1 中の『破砕』で示した部分)における CO2 排出は、目的の破砕物が得られるまで実際に破砕設備を動かし、その時の消費 電力を実測した。(b)破砕物の選別工程(図 5-1 中の『銅線回収』で示した 部分)に必要な CO2 排出量も、磁力選別などの既存の設備を使用して選別した 時の消費電力を実測した。

次の節で、詳細な計算内容と結果を説明する。

5.1.2. 計算結果

5.1.2.1. 従来法の計算結果

(a) 設備のランニングにおける CO2 排出

DD モータ 1.838 t を竪型破砕機で処理し、破砕終了までに消費した消費電力 を電力計で測定した。破砕終了まで 112 分かかり、その間の消費電力は 74.4kWh であった。

CO2 排出量原単位を 0.579kg-CO2/kWh として従来破砕の設備のランニン グにおける CO2 排出量を計算すると、0.023kg-CO2/kg-DD モータとなった。

(b) 選別工程に必要な CO2 排出量

(a) にて処理した破砕物を後工程(風力選別と2回の磁力選別、渦電流選別) にかけたときの選別装置の消費電力を実測した。選別終了までは、破砕時間と 同じ112分かかり、消費電力は19kWhであった。このことから、CO2排出量 は0.006kg-CO2/kg-DDモータとなった。

5.1.2.2. パルス破砕の計算結果

(a) 設備のランニングにおける CO2 排出

DD モータ1個(=3kg)をパルス破砕処理し、その時に銅線が分離できた面積を元に、DD モータ1個に必要な放電回数を算出した。

パルス破砕条件は、前節 3.3.3(2)と同等である。(コンデンサ 40 µ F×4 段、 放電エネルギー18kJ/1 パルス)。DD モータは 36 個のコイル (ティース)を円 状に有しているが、実験の結果、放電 5 回でティース 1 個分の銅線を分解する ことができた。

このことから、DD モータ 1 個分の銅線を分解するのに必要な放電回数は 5× 36=180 回と計算でき、上記放電エネルギー(18kJ)と CO2 排出量原単位

(0.579kg-CO2/kWh)、1 個あたりの DD モータ重量(3kg)から、パルス破 砕における設備ランニング時の CO2 排出量は 0.173kg-CO2/kg-DD モータと 算出した。

(b) 選別工程に必要な CO2 排出量

(a) にて処理した破砕物を後工程(篩選別とアルミ選別機)にかけたときの消 費電力を実測した。そのときの消費電力は篩選別が 3kWh,アルミ選別機が 6kWh となった。このことから、CO2 排出量は 0.003kg-CO2/kg-DD モータ と算出した。

5.2. 小型家電の環境性評価

5.2.1. 計算方法

(1) 計算の対象範囲

従来法及びパルス破砕を用いる方式の小型家電のリサイクルフローを図 5-2 に示す。

まず従来破砕法の処理フローについて説明する。リサイクル工程は大きく2 つに分けられ、①筐体を破砕して基板を取り出す工程と、②基板を破砕してIC などの電子部品を回収する工程に分けられる。①筐体を破砕して基板を取り出 す工程では、まずリサイクル対象となる小型家電を回収選別し、電池を取り出 した後、パーツセパレータ(PS)などの機械的な破砕装置で破砕を行う。パー ツセパレータ(PS)は、金属の円筒状の容器の中に、回転可能な金属製の羽を 有した装置であり、この円筒状の容器の中に処理物を入れ、羽を回転させて処 理物を粉砕する仕組みとなっている。破砕後のサンプルは、磁力選別装置にて 鉄を回収しているが、残渣から基板を回収するためには、現状は手選別を行っ ている。PSで破砕したものは粒径が細かくなる傾向があるため、十分な選別を 行うために、この手選別を2回行っている。

基板を回収したあとは、②基板を破砕して IC を回収する工程を実施する。この工程では、まず回収した基板を、再度 PS にて破砕する。これによって、処理物を基板に実装されている部品が基板から剥離する。その後、篩で部品と基板を分離する。

この①筐体を破砕して基板を回収する工程と、②基板を破砕して IC を回収す る工程の両方から、手選別や篩で選別できない、粒径の細かい残渣が発生する。 この残渣の中に金等の貴金属が含まれるが、残渣の選別は、現在は特に実施さ れていない。しかし LIBS などの選別機が開発途上にあり、将来はこういったソ ータが実現すると考えられるため、フローの中にこういった選別工程を盛り込 んだ。この選別工程に必要な消費エネルギーおよび CO2 排出量は、現在、樹脂 を対象に実用化されている近赤外線を用いた樹脂選別装置と同じであると仮定 して算出した。

以下にパルス破砕について説明する。この工程は破砕装置を PS の代わりにパ ルス破砕装置に置き換えたものである。大きく二つの工程(①筐体を破砕して 基板を取り出す工程と、②基板を破砕して IC などの電子部品を回収する工程) を踏むことは従来破砕法と同じである。しかしパルス破砕装置により、筐体破 砕して基板を回収する工程において、手選別の工程が1回分簡略化できる。そ のため、コスト削減などの効果が見込まれる。 それに加え、破砕物が過度に破砕されることなく、粒径が大きい状態で破砕 ができるため、後工程の選別工程の負荷軽減による CO2 排出量削減と、回収資 源量及び純度の向上による金銭的な収支改善が見込まれる。

計算では、①筐体を破砕して基板回収までのプロセスと、②回収した基板を 再度破砕して IC を回収するプロセスの2つを分けて計算した。プロセスは分け るが、結果を合計することでトータルプロセスのCO2排出量を評価できるよう、 単位は両プロセスに共通する素材ある、基板1kg あたりのCO2排出量を評価し た。



図 5-2:小型家電のリサイクルフロー

(2) 評価方法の概要

計算結果は、前述のとおり基板 1kg あたりの CO2 排出量としてまとめた。つ まり①筐体を破砕して基板を回収するまでのプロセスは、破砕後に回収される 基板量 1kg あたりの CO2 排出量として評価した。また②回収した基板を再度破 砕して IC を回収するプロセスは、投入材料である基板 1kg あたりの CO2 排出 量を評価した。

このことにより、①及び②の各プロセスで別々に計算した CO2 排出量は、合計することで、筐体破砕から IC 回収までのトータルプロセスの CO2 排出量として評価が可能である

また、①②の両プロセスにおける CO2 排出量は、(a)設備のランニングにおける CO2 排出 (電力消費に伴う CO2 排出)と、(b)破砕物の残渣処理に必要な CO2

排出(後工程の選別装置で消費される電力に起因する CO2 排出)の2つに切り 分けて評価した。

(a) 設備のランニングにおける CO2 排出は、目的の破砕物が得られるまで 実際に設備を動かした時の消費電力を実測した。

(b)破砕物の残渣処理に必要な CO2 排出量は、粒子1 個の選別に必要な消費電力を、近赤外線を用いた樹脂選別装置と同等と仮定して、残渣中の粒子数を掛け合わせて算出した。この選別装置は、小型家電や基板の残渣を選別することには使用できないが、電子部品の選別に適した装置が現在量産化されていないため、将来、同等性能の選別装置が電子部品の選別で実現すると想定して、近赤外線樹脂選別装置で仮定した。しかし、こういった装置は開発が進められており、近い将来実現することが期待されている。

以下、詳細な計算内容を説明する

5.2.2.計算結果

5.2.2.1. 従来破砕の CO2 排出量

①筐体を破砕して基板を回収するまでのプロセスの CO2 排出量

①-(a) 設備のランニングにおける CO2 排出

従来破砕として、パーツセパレータ(PS)について検証した。PSの詳細な説 明は前述のため省略する。

PSにより、以下の2つの条件で破砕処理を行った。

【条件 1】

サンプル:携帯電話, 9.979kg

処理条件:10秒で破砕。

【条件 2】

サンプル:携帯電話, 3.36kg

処理条件:20秒で破砕。

条件2では破砕しやすいよう ϕ 50mm程度の鉄の破材を一緒に破砕機に投入した。

処理した結果、条件1では未破砕物が20wt%程度発生した。未破砕物が多い と、再度破砕処理が必要になるなど後工程の消費エネルギーが大きくなるため、 未破砕物がゼロになる条件である、条件2の結果を試算に用いることとした。 なお、計算においては PSの消費電力は15kWであり、CO2排出量の原単位は 0.579kg-CO2/kWhとした。

投入した筐体 1kg あたりの CO2 排出量は下記の式 5.1 で計算できる。

 $15 \text{ kW} \times 20$ 秒÷60² 秒/H ÷ 3.36kg ×0.579 (式 5.1)

=0.0144kg-CO2/kg-筐体

ここで、基板 1kg あたりの CO2 排出量に計算しなおすために、破砕後の処理 物から後工程において回収される基板量を分析した。後工程で回収できる基板 量は、後工程の選別性能が手作業と同等であると仮定し、上記条件 2 で破砕さ れた処理物から手作業により全ての基板を取り出し、重量を測定して求めた。

その結果、回収可能な基板は投入筐体量の14.9%であった。 よって、筐体を破砕して基板を回収するまでのプロセスにおける、 設備のラン ニングにおける CO2 排出量は下記の式 5.2 で表される。

0.0144 kg-CO2/kg-筐体 ÷ (14.9%)⁻¹ (式 5.2) 式 5.2 より CO2 排出量を、0.0964 kg-CO2/kg-基板 と算定した。

①-(b) 破砕物の残渣処理に必要な CO2 排出

5.2.2.1.①-(a) で得られた条件 2 の破砕物について、残渣処理に必要な CO2 排出量を評価した。

この CO2 排出量は、下記の式 5.3 で計算した。

残渣粒子数(個/kg-基板)×粒子1個の選別に必要な消費電力(kWh/個)× CO2 排出量原単位(kg-CO2/kWh) (式 5.3)

ここで、CO2 排出量の原単位は 0.579kg-CO2/kWh とした。

次に残渣粒子数について説明する。残渣は、処理後の破砕物のうち、脱落した IC などが含まれ、選別が必要になると考えられる ϕ 13.2mmの篩を通過したものを残渣と定義した。この残渣中の粒子数は、残渣をさらに篩(ϕ 1, ϕ 2, ϕ 2.8, ϕ 3.35, ϕ 4, ϕ 5.6, ϕ 6.7) にかけ、各篩に回収された重量の5wt%以上を抽出し、粒子数を手作業で計数した上で算出した。その結果、このサンプルにおける筐体1kg あたりの粒子数は13,250 個一残渣/kg一筐体であった。これを基板1kg あたりの個数に計算しなおすため、前述の5.2.2.1.①-(a)で説明した回収される基板重量比率である14.9wt%で割り、88,900 個一残渣/kg-基板と算出した。

次に粒子1個当たりに必要な消費電力について説明する。現状、小型家電の 破砕物から電子部品と基板の両方を選別する量産装置は、普及していない。そ こで、将来実現可能な装置として、近赤外線を用いる樹脂分別装置のスペック で仮定した。具体的には、3種吹き分けの樹脂分別装置のスペックを用いた。こ の装置は時間あたり 700kg の処理が可能であり、その消費電力は 43kW である。 このスペックは、厚さ 2mm、20mm 角程度の樹脂片に対しての保証値であるこ とから、粒子1個当たりの消費電力を、下記の式 5.4 で算出した。

43kW ÷ { 700kg ÷ (樹脂1個の体積×密度) } (式 5.4) ここで、樹脂の密度は 1g/cc と近似した。

上記の式から、粒子1個の選別に必要な消費電力は4.914×10⁻⁵kWh/個と計算できる。

これらの数値をもとに、式 5.3 を計算し、破砕物の残渣処理に必要な CO2 排 出量は、2.530kg-CO2/kg-筐体と計算した。

②回収した基板を再度破砕して IC を回収するプロセスの CO2 排出量

②-(a) 設備のランニングにおける CO2 排出

従来破砕として、パーツセパレータ(PS)について検証した。パーツセパレー タの詳細な説明は前述のため省略する。

PS による処理条件は以下のとおりである。

サンプル:薄型テレビ由来の基板, 2.787kg

処理条件:40秒

破砕処理の際、基板から IC が効果的に脱落するよう、φ 50mm 程度の鉄の破 材を一緒に破砕機に投入した。

以上の条件であれば、基板上の IC の 8 割以上が脱落することを確認できたため、この条件で評価を進めることとした。

サンプルとしては、本来であれば前段のプロセスで筐体(携帯電話)を破砕 して取り出した基板を用いるべきであるが、今回は最初の投入サンプルの差が 結果に影響することを防ぐため、薄型テレビ由来の基板をサンプルとした。

以上の処理結果から、基板 1kg あたりの CO2 排出量を計算した。詳細な計算 方法は、前節①—(a)と同じであるため省略する。

計算した結果、0.0346kg-CO2/kg-基板となった。

②-(b) 破砕物の残渣処理に必要な CO2 排出

上記 5.2.2.1.②-(a) で得られたサンプルについて、破砕物の残渣処理に必要な CO2 排出量を計算した。計算方法は、5.2.2.1.①-(b) と同様であり、詳細な説明は省略する。

残渣中の粒子数は、15,900 個/kg-基板となり、それを踏まえた計算の結果、 残渣の選別に要する CO2 排出量は 0.4511kg-CO2/kg-基板となった。
5.2.2.2. パルス破砕の CO2 排出量

①筐体を破砕して基板を回収するまでのプロセスの CO2 排出量

①-(a) 設備のランニングにおける CO2 排出

パルス破砕による筐体の破砕と基板回収は、前述 2.2.1(7)の実証結果を元 に算出した。すなわち、今回の実証で最も効率的に筐体を破壊して基板を取り 出すことが出来た条件である、網の上に携帯電話 5 個(0.45kg)を保持し、網 の下から 55 回放電させる処理条件を元に計算した。

なお、計算においてはパルス破砕装置の1回あたりの放電エネルギーは設備の設計値である1.8kJとし、CO2排出量の原単位は0.579kg-CO2/kWhとした。

投入した筐体 1kg あたりの CO2 排出量は下記の式 5.5 で計算できる。

1.8kJ÷3,600 秒/H×55 発÷0.45kg-筐体×0.579 (式 5.5)

=0.0354kg-CO2/kg-筐体

ここで、基板 1kg あたりの CO2 排出量に計算しなおすために、破砕後の処理 物から後工程において回収される基板量を分析した。後工程で回収できる基板 量は、後工程の選別性能が手作業と同等であると仮定し、上記の破砕物から手 作業により全ての基板を取り出し、重量を測定して求めた。

その結果、回収可能な基板は投入筐体量の 25.54%であった。 よって、筐体を破砕して基板を回収するまでのプロセスにおける、 設備のラン ニングにおける CO2 排出量は下記の式 5.6 で表される。

0.0354kg-CO2/kg-筐体 ÷ (22.54%) (式 5.6)

式 5.6 より CO2 排出量を、0.1385kg-CO2/kg-基板 と計算した。

①-(b) 破砕物の残渣処理に必要な CO2 排出

上記 5.2.2.2.①-(a) で得られたサンプルについて、破砕物の残渣処理に必要な CO2 排出量を計算した。計算方法は、5.2.2.1.①-(b) と同様であり、詳細な説明は省略する。

回収される基板量は投入量(投入した携帯電話重量)の25.54wt%であった。 また残渣中の粒子数は、4,500個/kg-筐体であった。これらを踏まえた計算の 結果、残渣の選別に CO2 排出量は0.1385kg-CO2/kg-筐体となった。 ②回収した基板を再度破砕して IC を回収するプロセスの CO2 排出量

②-(a) 設備のランニングにおける CO2 排出

パルス破砕による基板の破砕と IC 回収は、前述 2.2.2(6)の実証結果を元に 算出した。すなわち、今回の実証で最も効率的に、プリント基板から部品を剥 離(PS と同等の部品剥離率 8 割以上)できた条件である、樹脂ケースに基板を 入れた上で EHD 方式による放電処理を行い、放電エネルギー1.8kJ、電圧 150kV、 電極間距離 100mm、電極とサンプル間の距離 10mm で破砕処理を行った条件 を元に計算した。

以上の条件では、基板重量0.171kgについて放電34回でICの8割が剥離し、 処理を完了できた。この結果を元に、CO2排出量を下記の式5.7で算出した。

1.8kJ÷3,600 秒/H×34 回÷0.171kg-基板×0.579 (式 5.7) この式により、CO2 排出量を 0.0575kg-CO2/kg-筐体 と計算した。

②-(b) 破砕物の残渣処理に必要な CO2 排出

上記 5.2.2.2.②-(a) で得られたサンプルについて、破砕物の残渣処理に必要な CO2 排出量を計算した。計算方法は、5.2.2.1.①-(b) と同様であり、詳細な説明は省略する。

残渣中の粒子数は、4,100 個/kg-基板となり、それを踏まえた計算の結果、 残渣の選別に要する CO2 排出量は 0.1172kg-CO2/kg-基板となった。

5.3. 環境性/経済合理性の評価まとめ

図 5-3 に難破砕物の環境改善効果と経済合理性を、図 5-4 に小型家電の環境 改善効果と経済合理性をまとめる。

難破砕物は、下記の結論を得た。

環境改善効果に関しては、以下のことが分かった。

- ・パルス破砕において、積層鋼板に巻き付けられている銅線の分離に難航。
 放電エネルギーの大パワー化による剥離が必要となり、エネルギーの消費が大きい。
- ・樹脂/積層鋼板/銅線への単品分離は品位が高く、単一素材へ戻す工程の 簡易化が可能。
- ・回収した積層鋼板を精錬した場合、従来破砕では、絡みついた銅が不純 物として含有するため、銅濃度の希釈に大量の鉄原料の投入が必要。

経済合理性に関しては上記の環境改善効果について言及したように、パルス 破砕にて、銅線を分離する場合、大パワー出力を発生させる必要があるため設 備コスト面での課題があり、経済合理性に関しては従来破砕に劣ると推定する。 残課題として、下記が考えられる。

・さらなるパルス設備の省エネ化に向けた工法開発。

この課題は、事業終了後も検討を進める事が望まれる。

また小型家電については、下記の結論を得た。

環境改善効果に関しては、以下のことがわかった。

・パルス破砕では、破砕工程における消費エネルギーは従来破砕に比べて 大きいが、処理物が部品毎に単品分離され、細かい粒子にまで破砕され る量が少ないため、基板、電子部品・IC 選別回収工程にて、大幅な CO2 削減が可能。目論見比で約 19 倍の CO2 を削減。

経済合理性に関しては、破砕後の選別時間が大幅に短縮されるため手選別作 業に関わる人件費の削減が可能であり、今後、排出量の増加が予想される小型 家電のリサイクルに対して事業実現の可能性が高いと考える。

ただし残課題として、下記が考えられる。

・さらなるパルス設備の省エネ化に向けた工法開発。

・電子部品選別設備の実現に向けた工法開発。

これらの課題は事業終了後も検討を進める事が望まれる。

【CO2排山里削减効果、経済合理性】評価対象:DDモーダ1Kgからの銅線分離 kg-CO2/kg-DDモーダ							
		環境改善効果		소리	经这个证券		
		破砕	銅線回収	百可	推消合理性		
CO2 排出量	従来破砕	0.023	0.006	0.029			
	パルス破砕	0.173	0.003	0.176	工程簡素化/資源品位向上のメリットと 設備コスト/生産性の精査必要		
CO2 削減量	評価結果	-0.150	0.003	-0.147			
	当初目論見	0.103	0.032	0.135			

【CO2排出量削減効果、経済合理性】評価対象:DDモータ1kgからの銅線分離 kg-CO2/kg-DI

図 5-3:難破砕物の環境改善効果

【CO2排出量削減効果、経済合理性】

詊価对	象:筐体破碎	単位:kg-CO2/kg-回路基板				
		環境改善効果		A 1	经这个通知	
		筐体破砕 ⇒ 基板回収	基板破砕 ⇒ IC回収		推消首理性	
CO2 排出量	従来破砕	2.627	0.486	3.113	選別にかかる支出が大きく 収支は赤字	
	パルス破砕	0.640	0.175	0.815	選別にかかる支出が小さく 収支バランスが取れる	
CO2 削減量	評価結果	1.986	0.311	2.297 🔨	19倍の効果	
	当初目論見	_	0.118	0.118		

図 5-4:小型家電の環境改善効果

本システムの横展開の可能性として、薄型 TV の解体工程への適応が考えられ る。薄型 TV には電子部品・IC を多く積載したプリント基板が複数枚、組み込 まれている。薄型 TV の解体工程は現状、プリント基板回収までの工程が作業者 による手解体で行われることが多く、解体工数の削減による効率化が急務であ る。本事業で用いた、パルス破砕システムを解体工程の主作業となるビス外し 工程に導入することで解体工数削減の実現が可能であると考える。

実際に薄型 TV(液晶 TV)をパルス破砕装置にて破砕した検証結果については後の7章にて記述する。

自社での事業終了後は、自社開発の省エネ破砕システムを、当社社内のみで なく、他社の家電リサイクルプラントに販売することで、展開を加速すること ができると考える。例えば、自動車等の他分野のリサイクルプラントにおいて も本事業で破砕実証を行った樹脂筐体と金属部品の複合体が廃棄物として多く 排出されていると想定しており、これらを対象に省エネ破砕システムの適応が 可能と考える。

6. まとめ

【効果まとめ】

パルス破砕では、処理物が部品毎に単品分離されるため、

・回収資源の品位が高く、単一素材へ戻す工程の簡易化可能

・細かい粒子にまで破砕される量が少なく、選別工程で CO2 削減可能 であることがわかった。

【経済合理性】



図 6-1:経済合理性の評価結果

経済合理性の試算に関しては、合理性成立の可能性が高い小型家電とプリント 基板を処理した場合について試算を行った。

処理タクトは『4-1 小型家電の実証』で得られた、5個の携帯電話を55 回の放電で破砕したという結果から、5Hzの周波数で放電させた場合の破砕に 要する時間、処理物の搬送に要する時間に数秒のマージンを考慮して設定した 年間の処理量120トンは、設備の稼働時間を、24日/月×8時間/日と設定し、先 述の処理タクトにて、携帯電話1個の重量を約0.1kgと設定し処理タクトと設 備の年間稼働時間を掛け合わせて試算した。年間処理用120トンの内訳として、 回収可能な廃小型家電が90トン、プリント基板を30トンと想定した。上記の 試算条件により破砕を行い回収された資源の売却による利益から人件費電力費、 処理物の購入費等、ランニング費用の必要経費総額を減じた金額を収益として 試算した。

本試算により、年間 400 万円の収益性との試算結果となったが本試算の経費 総額には、設備償却費用も含めて試算しているため設備償却期間終了後は収益 の改善が見込まれる。

更に、本試算では年間の処理量を処理タクト、1つのリサイクルプラントに て回収可能な小型家電の量を考慮して、年間120トン処理と想定しているが今 後、小型家電の排出量は増加すると考えられており、処理量を増やすことで収 益性の改善は可能であると考える。小型家電の回収量が増えた場合でも本試算 では、設備の稼働時間を8時間/日で試算しているため、稼働時間を延長するこ とで年間処理量のアップも可能であると考える。

7. 資料編

7.1. 薄型 TV 破砕検証

パルス破砕の横展開として、薄型 TV の解体工程の解体工数削減への適応可能 性について検証する。現状、薄型 TV の解体(ナックカバーを外して回路基板を 回収まで)は、作業者による手作業であり解体工数の削減が課題である。パル ス放電を用いて、バックカバー固定ビス、プリント基板固定ビスを選択的に破 砕することで解体工数の削減が可能か検討する。

7.1.1. ED 放電による破砕検証

【実証条件】

破砕対象物:液晶 TV(16 インチ・LED バックライト) 使用装置:マルクス式パルス破砕装置(6.4kJ)

図 7-1 に示すよう液晶 TV を処理容器に丸ごと沈め破砕を行った。



図 7-1:液晶 TV セットの様子

電極の配置は図 7-2 に示すようバックカバー取付けネジ部の直上 10mmの 位置に電極を配置し放電を行った。また、GND は液晶 TV の下に取り付けた金 属製ザルに編組線を接続し装置本体のアース線と繋いだ。



図 7-2: 電極配置の図

【実証結果】

図 7-2 に示す配置にて、ネジー箇所に対して、10 回の放電を印加した結果を 図 7-3 に示す。放電によりネジ部周辺の樹脂バックカバーが大きく割れている のが確認される。

このように樹脂製のバックカバーを有する薄型 TV のパルス破砕は可能である。この結果は、3.2.1(4)の基礎実証から得られた結果と同じ傾向を示している。

つまり、樹脂製バックカバーなどの非導電性の物質の破砕に対して、パルス 破砕は効果がある事が明確になった。

しかしながら、3.2.1(5)の実証で、導電性が高い物質は破砕できな かったため、同じ薄型液晶テレビでも、金属製のバックカバーを有するものは 破砕できない可能性が高いと考えられる。そのため、薄型テレビの破砕に対す るパルス破砕の応用に対しては、電極部や放電条件の検証が必要である。



図 7-3: ED 放電後の様子(6.4kJ 10回)

7.1.2. EHD 放電による破砕検証

【実証条件】

破砕対象物:液晶 TV(16 インチ・LED バックライト)
使用装置:マルクス式パルス破砕装置(6.4kJ)

ED 放電による破砕検証と同様に図 7-1 に示すよう液晶 TV を処理容器に丸ご と沈め破砕を行った。

電極の配置は図 7-4 に示すようバックカバー取付けネジ部の直上 10mmの 位置に電極を配置し、正極と GND 極の電極間距離を 60mm に配置し放電を行った。



図 7-4: 電極配置の図

図 7-4 による電極配置にて放電を行った結果、電極先端で放電するのではな く図 7-5 中に示す電極を固定している円盤状の金属製部品(電極固定カラー)間 で放電を起こしたため、同じく図 7-5 に示すように電極先端を互いに近接する 方向に曲げて、電極間距離を 60mm から 25mm に変更して配置した。



図 7-5: 電極配置の図

【実証結果】

図 7-5 に示す配置にて、ネジー箇所に対して、10 発の放電を印加した結果を

図 7-6 に示す。放電によりネジ部周辺の樹脂バックカバーが大きく割れているのが確認される。

このように樹脂製のバックカバーを有する薄型 TV のパルス破砕は可能である。



図 7-6: EHD 放電後の様子(6.4kJ 10回)

しかしながら、先述の ED 放電による破砕実験と同様にバックカバー固定自体 を固定しているネジ部(メネジ部)は金属製の板金部品で作られているため、 ネジ部の破砕には至っていない。

ED/EHD 放電による薄型 TV 破砕実験のまとめとして

- ・樹脂製バックカバーの破砕は可能であるが、バックカバーを固定している ネジ及びメネジ部の破砕は困難
- ・ネジ近傍の樹脂製バックカバーを破砕することでバックカバーの取り外しは可能となるが、ネジ部の近傍で放電を発生させる必要がある。
 現在、作業者により行われているネジ外し工程をパルス破砕装置にて自動化する場合、電極または薄型 TV 自体のどちらかを移動させてネジ部と電極を近接させる必要がある。

以上のことから、パルス破砕の横展開として、薄型 TV 解体工程の 解体工数削減について検証を行ったが、バックカバー固定ネジ、あるいは 回路基板固定ネジの近傍で放電を起こすためには、電極もしくは TV 本体の どちらかを移動させる位置合わせ機構を持つ、自動化設備が必要となり 設備コスト面から経済合理性の確保は困難と想定される。

7.2. 破砕物の組成分析

パーツセパレータによる破砕の特徴は、均一な大きさに破砕はされるが 破砕時間等の破砕条件を適切に出す必要がある。破砕時間が短いと、未破砕物 が多く残り、例えば携帯電話のような処理物の場合、樹脂筐体とプリント基板 が分離されていない状態のまま回収される結果となる。一方、破砕時間が長す ぎると、分離は進むが処理物のサイズが細かくなり過ぎて、プリント基板自体 も破砕され回収が困難となる。 パルス破砕の特徴としてはこれまでの章でも 述べたように、樹脂筐体とプリント基板の結合部で分離されるため、比較的大 きなサイズで樹脂筐体とプリント基板が分離され回収される。

図 7-7 は、携帯電話をパーツセパレータ、パルス破砕のそれぞれで破砕した 場合の破砕物の大きさと粒度分布を比較した図である。

図中の粒度分布に示すよう、パーツセパレータによる破砕物は過破砕が進行したため、1~6.7mm サイズの破砕物の量がパルス破砕の約3倍もある。一方、パルス破砕による処理物は、37.5mm 以上の破砕物の量がパーツセパレータの約2倍となっている。破砕後のサイズが大きいというとは、破砕後に有価性の高いプリント基板を回収する場合に篩などの簡易な選別方法で回収が可能なことを意味する。

処理方法	パーツセパレータ	パルス破砕		
処理量	3.75kg 破砕時間20秒	10台 放電回数30回		
破砕後 の状態				
構成部品 の状態	原形無し(過破砕)	原形あり		
粒度 分布	100 80 重 60 量 40 % 20 0 1 6.7 篩目	ッセハ [°] レータ ス破砕 13.2 22.4 37.5 目開き(mm)		

図 7-7:破砕方法の違いによる破砕物の粒度分布比較の図

7.2.1. パーツセパレータによる破砕物の組成分析

上述の図 7-7 に示す、処理条件(携帯電話 3.75kg 破砕時間 20 秒)にて破砕された破砕物の粒度分布と回収物に含まれる銅の重量を図 7-8 に示す。

篩サイズ (mm) (破砕物サイズ)	37.5以上	22.4~ 37.5	13.2~ 22.4	6.7 ~ 13.2	6.7以下	合計
プリント基板 (g)	309	99	51	43	0	301
プリント基板以外 (g)	459	485	577	651	1077	3249
プリント基板の Cu含有率 (g/kg)	0. 44	0. 55	0. 52	0. 34	0. 14	-
プリント基板の Cu含有量 (g)	136	54	26	14	0	231 (6%)

図 7-8: パーツセパレータ破砕物の Cu 含有量

図 7-8 は、携帯電話 3.75kg を 20 秒間 破砕した時の破砕物に関するデー タである。 先ず破砕物を、篩により、37.5mm 以上、22.4~37.5mm のサイズ、 13.2~22.4mm のサイズ、6.7~13.2mm のサイズ、6.7mm 以下の5つのサイズ に分類した。そして、それぞれのサイズに分類された回収物の中から、プリン ト基板と確認される破砕物だけを手選別でピックアップして、それぞれの重量 を測定した。パーツセパレータの場合、過破砕により、6.7mm 以下の破砕物の 量が多いことが判る。また、Cu 含有量の ICP-MS 分析の結果によると 6.7mm 以下のサイズの破砕物の中にはプリント基板も含まれている値であるが、手選 別による回収は困難と判断し、6.7mm の破砕物に含まれるプリント基板の重量 は、0g とした。

次に、回収されたプリント基板に含まれる銅の比率を、ICP-MS 法により分析した。近年のプリント基板は、銅箔の回路層とフェノール樹脂等の絶縁層が何層にも重ねられた多層構造となっているため、銅の重量比率は比較的高い分析結果となった。 携帯電話の総重量 3.75kg に含有する銅の重量は、各篩サイズにて回収された、プリント基板の重量に銅の比率を掛け合わせた重量の総和で求められ、その重量は、231g となりこれは、携帯電話総重量 3.75kg の約6%となった。

121

7.2.2. パルス放電による破砕物の組成分析

次に、図 7-7 に示す、処理条件(携帯電話 1.1kg 放電回数 30 回)にて破 砕された破砕物の粒度分布と回収物に含まれる銅の重量を図 7-9 に示す。

篩サイズ (mm) (破砕物サイズ)	37.5以上	22.4~ 37.5	13.2~ 22.4	6.7~ 13.2	6.7以下	合計
プリント基板 (g)	251	102	9	5	3	279
プリント基板以外 (g)	227	199	147	123	117	813
プリント基板の Cu含有率 (g/kg)	0. 47	0. 48	0. 44	0. 14	0. 19	_
プリント基板の Cu含有量 (g)	118	49	4	0. 7	0. 6	128 (12%)

図 7-9: パルス破砕による破砕物の Cu 含有量

破砕物の選別方法、および回収物の Cu 重量の求め方は先述の、パーツセパレ ータによる破砕の場合と同じ方法にて求めたのでその詳細については割愛する。 図 7-9 からも判る様に、パルス破砕により回収された破砕物は、銅の含有率が 投入量の約 12%と、パーツセパレータに比べて 2 倍の高い回収率となることが わかった。これは、図 7-7 に示す、破砕後の処理物の写真や、粒度分布の結果 からも推察できるよう、大きなサイズでプリント基板が回収されるため銅の回 収率が高いことを示した結果と合致すると考える。