

最終報告会資料 3K153009

中間処理技術の体系化を通じた リサイクルの高効率化のための研究

東京大学 村上進亮 (研究代表者)

早稲田大学 所千晴 (研究分担者)

累積予算額14,064千円

研究目的（申請書からの抜粋）

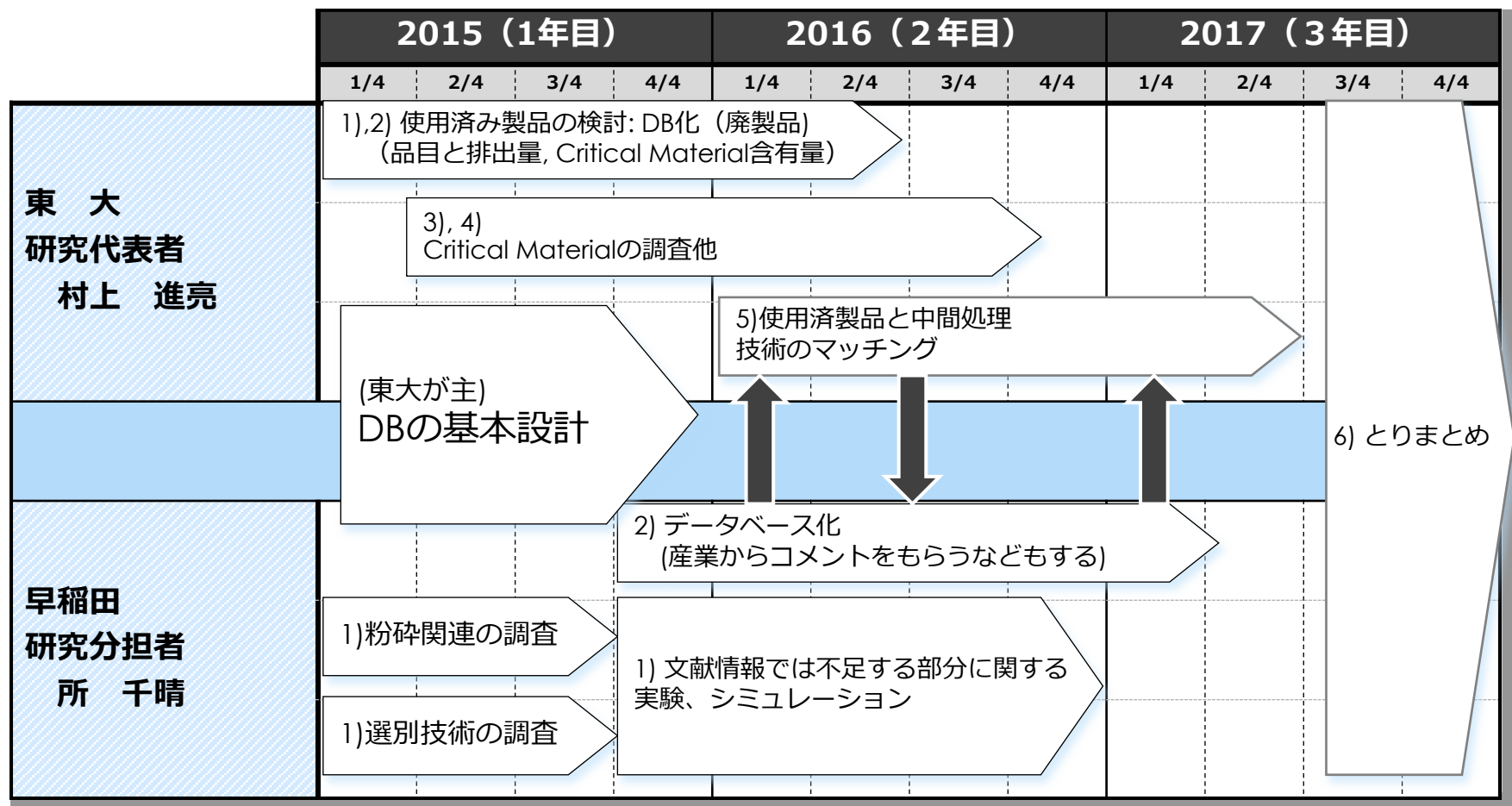
今後のリサイクルにとっての処理対象物の排出動向を推計した上でそれぞれに対して適切な中間処理技術をマッチングさせることでシステム全体の高効率化を目指すサブテーマ(1)と、そこで用いられる中間処理技術の技術的側面からのデータベース化を担当するサブテーマ(2)からなる。

初年度においては、(1)については、今後の処理対象物の排出動向を、品目の多様化とそれぞれの排出量の推計という2点から明らかにしていく。また回収すべき素材、すなわち Critical Materialについて調査を行い、今後の動向を把握する。(2)については、既に実用化の済んでいるものだけではなく、現在研究中のものまで含め中間処理技術を調査した上で、そのデータベース化に取り組む。調査では明らかにならないものについては、実験やシミュレーションを援用する。

2年目では、(1)については、初年度において得られた知見と(2)の初年度の成果を組み合わせることでマッチングの試行を行うとともに、回収から収集・運搬、中間処理をへて素材回収・残渣の最終処分に至るマテリアルフローを推計する枠組みを設計する。(2)については(1)のマッチングの試行の結果を受け、データベース化の在り方を検討、より望ましい形での整理を進めるとともに、現時点では基礎研究段階にある技術についての中間処理に対する応用についての検討を進める。

最終年度において、これまでの両サブテーマの成果を取りまとめ、互いにフィードバックすることで不足している作業を補うとともに最終的なリサイクルシステム設計を行う。また、今後の中間処理技術の発展について、様々なシナリオを描きこれをシステム設計に取り込むことで、どのような中間処理技術が現れることで、システム全体の効率がどの程度向上するかを明らかにする。

当初予定スケジュールと体制



実施項目

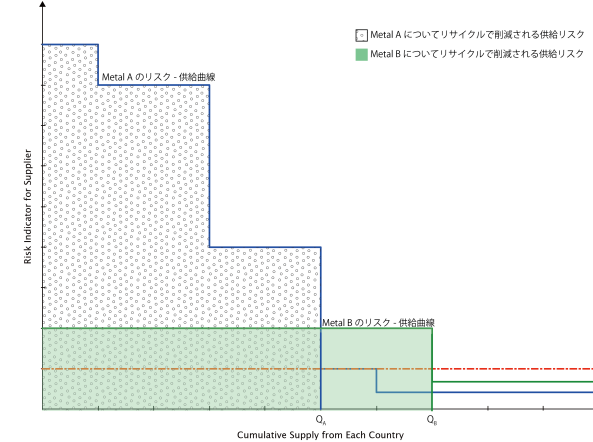
1. リサイクルすべき、という意味でのCritical Materialの同定（東大）
2. DBの設計（東大・早大）
3. DBデータの収集
 - i. 使用済製品発生量関連（東大）
 - ii. 中間処理技術（既存データ・実データ）（早大）
 - iii. 実験シミュレーションによる補填（早大）
4. DBの利用例：小型家電（東大・早大）

中間評価で頂いたコメント

- 無駄にスコープを広げない方が良くはないか？
 - データ収集としては頂けるものは全て頂きつつ、応用の対象としてはコデンに絞り、そのために必要なデータは重点的に収集しました。
- ソースセパレーションを含められるか？
 - まず消費者行動の要因分析は実施しました
 - また、DBの応用の中で間接的ではありますがその重要性を示唆するような結果があります。
- 体系化のイメージが捉えにくい
 - 最後のまとめにて

1. Critical Material

リサイクルで重視すべき Critical Materialの同定



<手法：検討項目>

1. リサイクルによる供給リスク削減が強く望まれる（天然資源の供給リスクが高い）
2. 今回考えているリサイクルプロセスの採算を支えている
3. 今回考えているリサイクルプロセスの採算の足を引っぱっている

<結果>

1. Ni, PGM, Ag, & Co
2. Cu, Au
3. プラスチック類



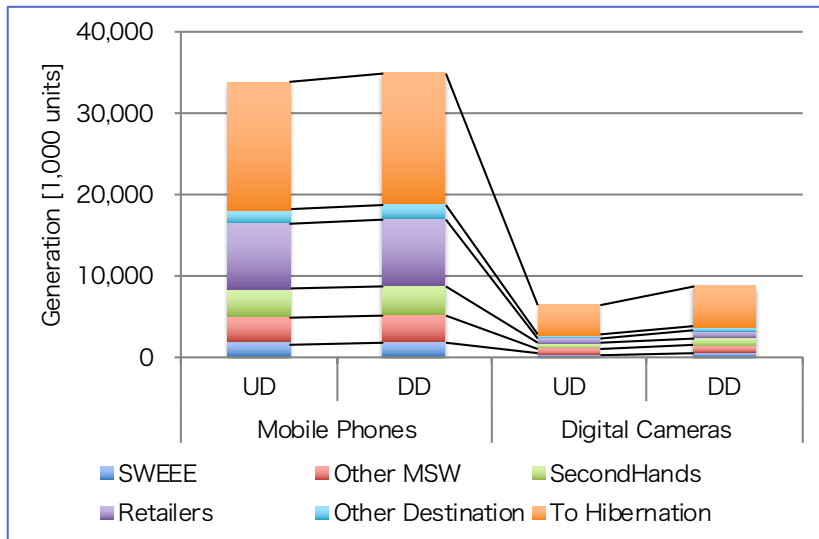
- 中間処理プロセス評価の際にこれらの収率を検討する
 - 但し今回のケーススタディーからはNi, Coは(基本的には) 評価対象外とする。

3. DBデータの収集

消費者行動：発生量と ソースセパレーション

これまで既に製品使用期間を推計するような研究の情報を集計すると共に、これらのデータの信頼性とそれが発生量推計に与える影響について考察を行った。

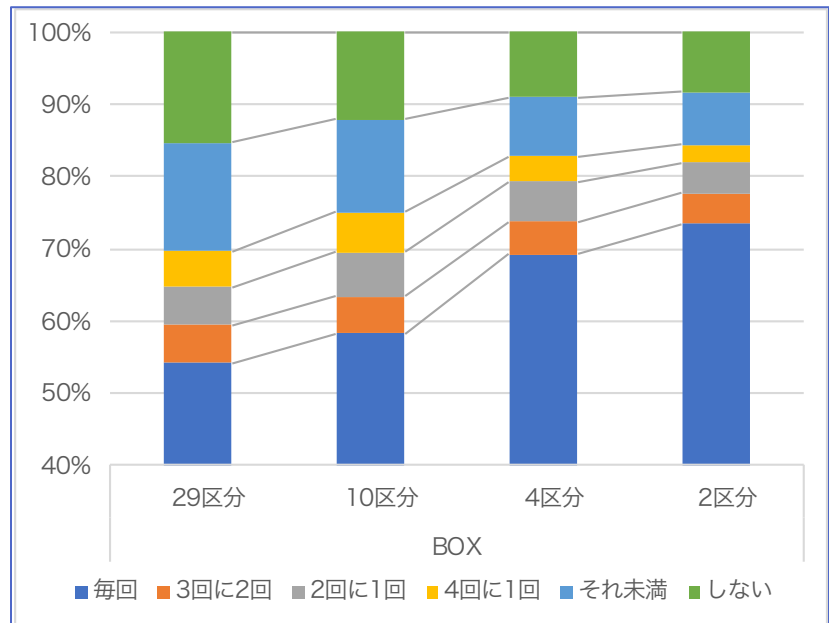
ソースセパレーションに関連して、分別区分数と意欲を調査した。（背景要因等は詳細分析中）



購入年別の使用年数(DD)と10年間不変の使用年数(UD)では発生台数の変化は携帯では小、DCではやや大

不確実性は DD >>> UD

携帯ならばUD, デジタルカメラは要検討



29を10区分に減らしても余り意欲は変わらずこれを4に減らした段階では実施者が増える。

DBの設計（イメージ図）

Item List

Item ID	名前	Item Type
I00000001	携帯電話	製品
I00000002	太陽光発電機	製品
I00000003	PC	製品
..		
I00000101	基板	パーツ
..		
I00010001		

中間処理プロセステーブル

投入物ID	中間処理技術ID	産物ID	大分類
I00000101	T00000002	I00000101	手解体

技術リスト

Tech ID	名前	Tech Type	Target
T00000001	CFS	特殊粉碎	基板
T00000002	PS	特殊粉碎	パーツ
T00000005	磁選	選別	鉄系

組成情報テーブル

Item ID	主要	Fe	Cu	Zn	Pb	Cr	Mn
I00010001	ブラ	0.080254261	0.384867868	0.081115445	0.090199166	0.003125338	0.007013433
I00000101	銅	6.348079968	9.143093937	2.726924067	0.704115938	0.411483719	0.111458043

中間処理技術DB

製品出荷台数テーブル

Item ID	名前	出荷年	出荷台数
I00000001	携帯電話	2015	30,000,000
I00000001	携帯電話	2014	35,000,000
I00000001	携帯電話	2013	25,000,000

使用期間DB

Item ID	名前	出荷年	Weibull 形状	Weibull 尺度	Weibull 位置	ノンパラメトリック情報？
I00000001	携帯電話	2015	3			
I00000001	携帯電話	2014	2.9			
I00000001	携帯電話	2013	2.8			

発生動向予測

東大に設置したサーバーで早稲田ー東大間での
オンライン運用可能であることを確認

CentOS リリース6.7 64bit

カーネル Linux2.6.32

メモリ：16G IntelCorei5-4460@3.2GHz * 4コア HDD 2T

使用ソフトウェア状況（2016/06/13時点）

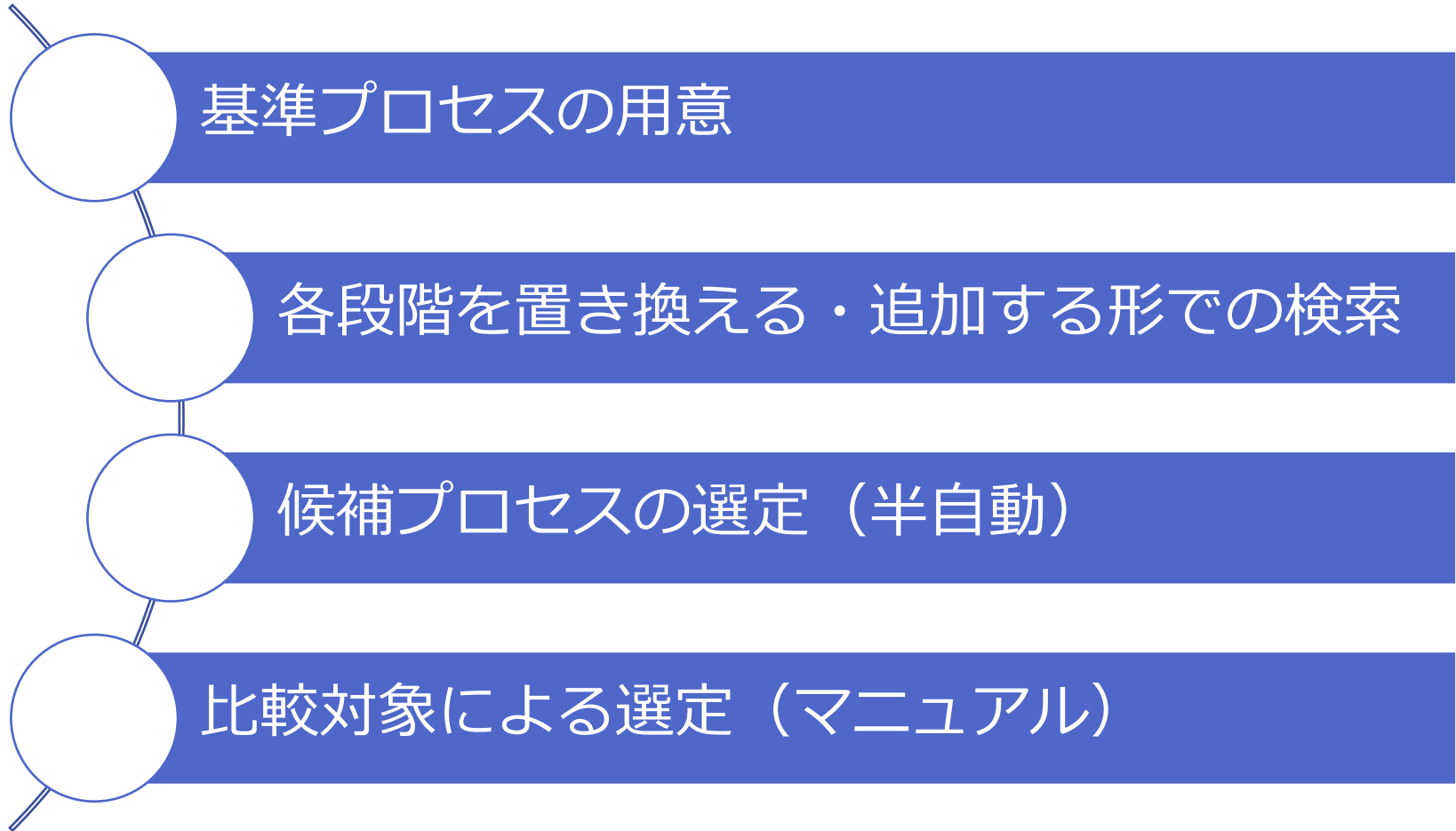
データベース及びバージョン：MySQL 5.3.3

3. DBデータの収集

既存（文献、研究室）データ並びに実操 業データ: データの分類

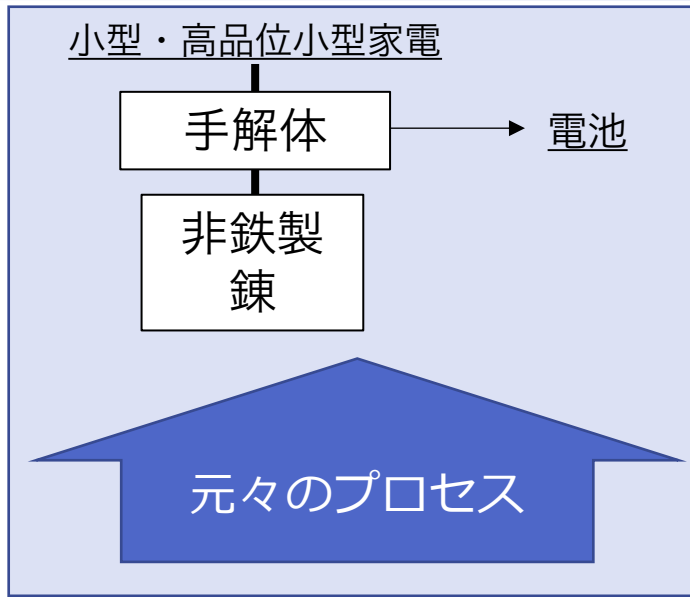
モノ:使用済製品	モノ:処理後の産物	技術:大分類	技術:利用機械・手法
実操業系(4)	篩分けによるもの(15)	手解体(1)	手解体(1)
小型・高品位小電	-0.25 [mm]	一般粉砕(14)	手解体
中型・高品位小電	0.25-0.5 [mm]	特殊粉砕(11)	
ケーブル類	0.5-1 [mm]	選別(12)	一般粉砕(14)
中大型・低品位小電	⋮		縦型破碎機
			プレシュレッダー
焼却系(1)	手解体産物(6)		シュレッダー
都市ごみ焼却主灰	基板		パーツセパレータ
	電池		ボールミル
実験系(11)	⋮		クロスフローシュレッダ SD-1000
携帯電話			⋮
ルーター基板	一般粉砕産物(1)		
PCサーバ	破碎物		特殊粉砕(11)
デジカメ			パーツセパレータ
電子レンジ	特殊粉砕産物(4)		クロスフローシュレッダ SD-1000
炊飯器	筐体(その他)		⋮
デスクトップPC	基板		選別(12)
ハードディスク	⋮		フェライトドラム型磁選機
ビデオカメラ			渦電流選別機
ゲーム機(試験)	選別産物(10)		⋮
スマートフォン	磁着物		
	導体		
	⋮		

DB利用方法



4. DBの利用例：小型家電

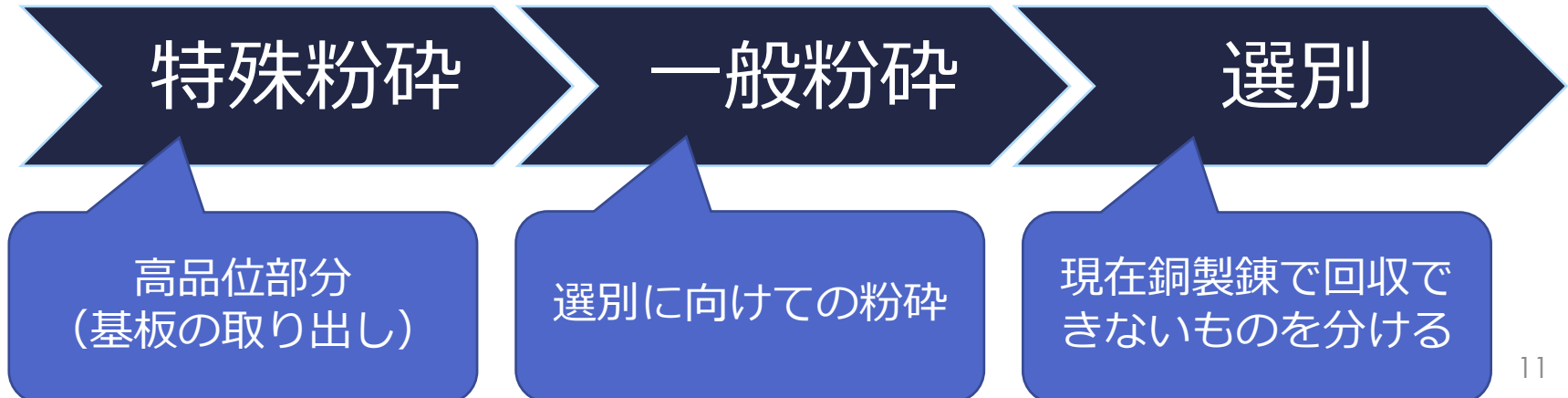
高品位小電の電池取り外しが不要になったら？



仮に左図が現状プロセスだとする。電池の取り外しが必須のため手解体にてこれを取り外した後は高品位故に全量そのまま銅製錬へ投入している。

ここで、電池の取り外しが保証されているならば機械化の可能性が出る。そのプロセスをDBの格納データを使って導いてみる。

基本的に考えられる流れは以下のようなものになる。



新しい技術のデータ不足を補う

CFS（クロスフローシュレッダー）についてはデータ不足で基板脱離に使った際の基板回収率が予測できない

基板脱離率

$$S = 100(1 - \exp(-k_S E))$$

k_S : 脱離定数

基板破壊率

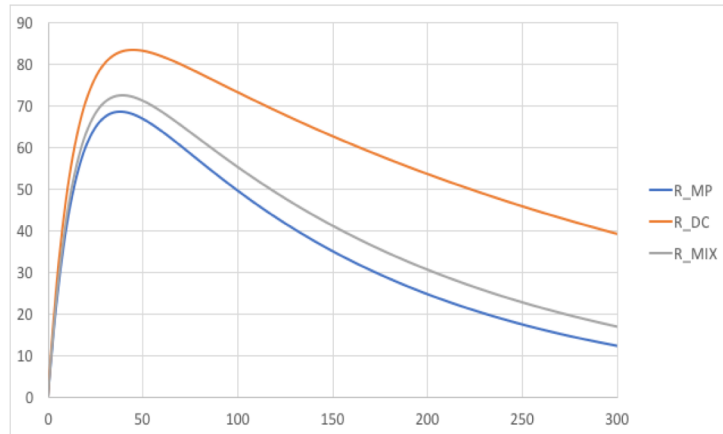
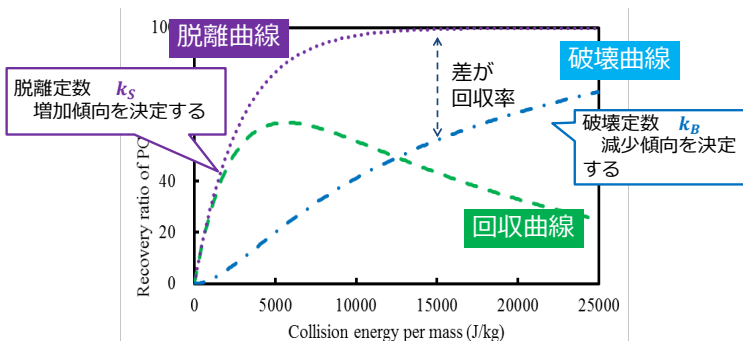
$$B = S(1 - \exp(-k_B E))$$

k_B : 破壊定数

E : 衝突エネルギー

基板回収率

$$R = 100(1 - \exp(-k_S E)) \exp(-k_B E)$$



実験と粉体シミュレーションの結果から、基板回収率（実験値）とCFSの中で発生している衝突エネルギーの間に左図の緑色の線のような関係を見出した。

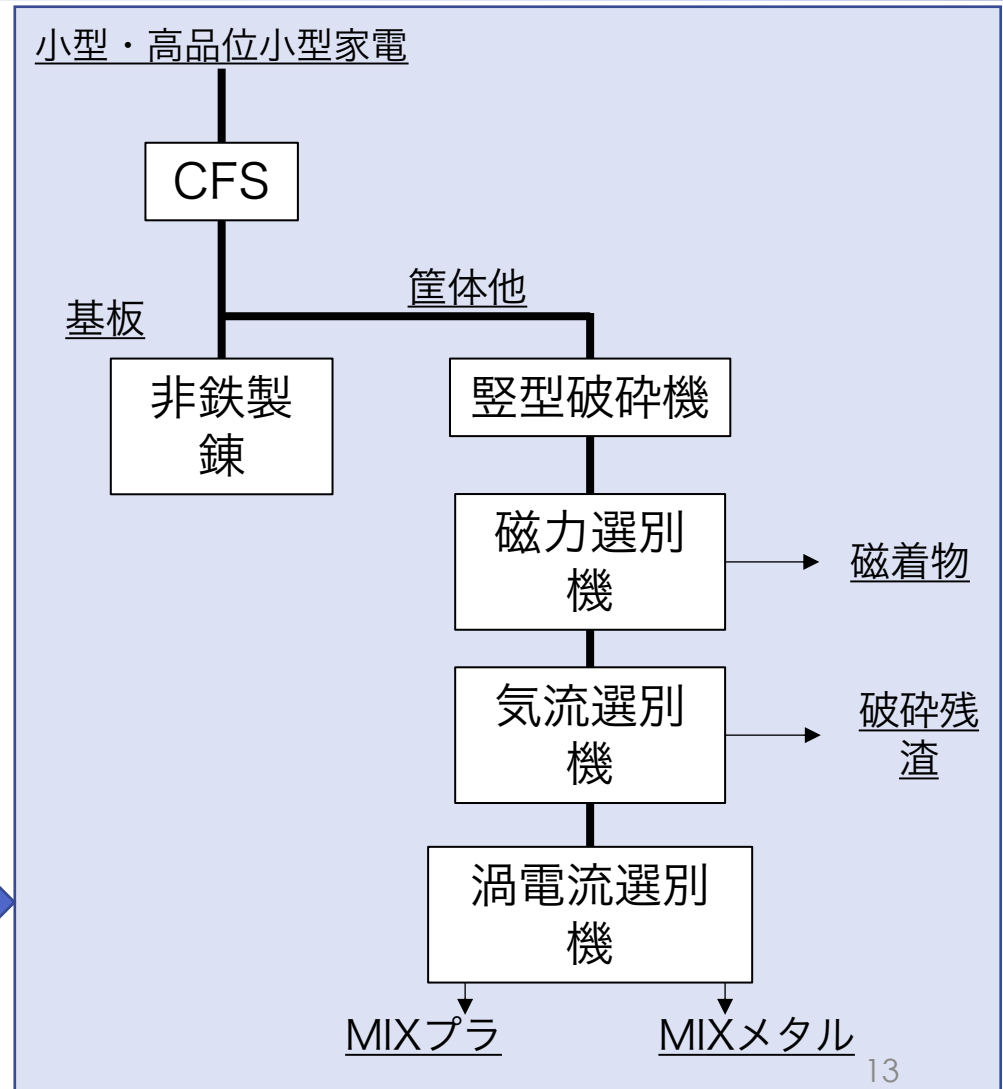
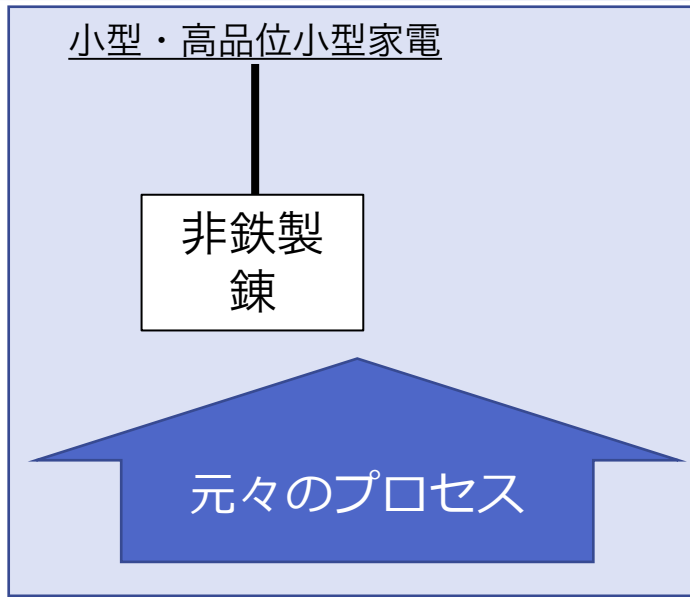
そこで起きている現象を整理し、基板が脱離する過程（紫）とやり過ぎて基板が粉々になる過程（青色）の二つの現象が起こる結果回収率の予測式を構築、実験した様々な製品に対して曲線を得た。



これら単一の製品に対して得られた曲線から混合物（この場合は携帯(MP) + デジカメ(DC)）の回収曲線を決定、最適化された場合の基板回収率を求めた。

4. DBの利用例：小型家電

高品位小電の電池取り外しが不要になったら？



結果の評価

	回収量[kg]		実収率		TMR[kg-TMR]		素材の価値[¥]	
	元	提案	元	提案	元	提案	元	提案
銅	132.51	131.90	93%	93%	47,703	47,484	107,331	106,838
銀	0.46	0.45	95%	93%	2,218	2,178	27,720	27,226
金	0.16	0.15	97%	95%	171,143	168,090	715,689	702,921
鉄	0.00	22.30	0%	95%	0.00	178	0.00	1,784
アルミ	0.00	18.40	0%	95%	0.00	883	0.00	5,520
マテ_プラ	0.00	459.89	0%	75%	0.00	4,383	0.00	0.00
合計	133	633	13%	63%	221,063	223,196	850,740	844,290

プロセス全体としては

回収量、実収率、TMRで重み付けした回収量：提案プロセスが良い

素材価値：元プロセスの方が良い

費用：元プロセスは電池が外れていれば何もかからない。但し提案プロセスの費用は元々電池取り外しにかかっている人件費の1/10以下。

売上げ：元 > 提案

学術的な成果

- 発生量推計関係
 - 推計された寿命分布の不確実性とそれによる発生量推計への影響を分析
 - 廃棄行動（分別への協力、そもそもの排出先、退蔵の選択など）と使用期間、その他のパラメタとの関係进行分析 → 排出先ごとのポテンシャル推計へ
- 中間処理技術DB関連
 - 実験にシミュレーションを組み合わせることで、選択的破砕(CFS)の解明が進んだ。

実用・政策的な成果

- 中間処理技術を体系的に整理するに当たって
 - 必要な分類要件が以下の二つであること
 - 大分類：手解体、破碎・粉砕（一般&特殊）、選別
 - 何を取るためのプロセスなのか（すなわちどのようなインプットに対して適用するのか）
 - 収集すべき情報が、投入、産出、組成、費用（エネルギー消費なども含む）であること共に上の2点にかかる情報を整理することが必要
 - 情報を収集した結果これらを満たす情報はそれほど無いことが分かった
- 使用済製品発生量の推計精度が向上した
- 高品位品の混ざる小型家電に限って言えば、比較的重要であると考えられる選択的な粉砕に関する知見が集約され、人件費を下げる可能性の検討の余地が進んだ。

对外発表他

- 学術論文(査読有)

1. Yuki Tsunazawa, Chiharu Tokoro, Mitsuaki Matsuoka, Shuji Owada, Hiroyuki Tokuichi, Masamichi Oida and Hirobumi Ohta: "Investigation of Part Detachment Process from Printed Circuit Boards for Effective Recycling Using Particle-Based Simulation" Materials Transactions, 57 (12), 2146-2152, (2016).
2. Shinsuke Murakami, Haruhisa Yamamoto, and Masahiro Oguchi; "Uncertainty in lifespan estimation and its potential impacts on our social system" Procedia CIRP, 61, 140-145, (2017).

- 口頭発表

1. C. Tokoro.: "Physical concentration of tantalum from WEEEs".2nd World Congress and Expo on Recycling (Jul. 25-27, Berlin, Germany). 2016, p. 58.
2. C. Tokoro.: "DEM Simulation for Investigation of Appropriate Disintegration Process for Tantalum Recovery From WEEEs (Invited Lecture)".The 14th Korea/Japan International Symposium on Resources Recycling and Materials Science (Jul. 7-8, Incheon, South Korea). 2016, pp. 114-120, I-3.
3. Chiharu Tokoro, Yuki Tsunazawa, Shuji Owada: "A Smart Recycling Process for Tantalum Recovery from WEEEs by selective grinding" HTC-MC-9 & GFMAT 2016 (June 27, Toronto). 2016
4. 所 千晴.: "循環型社会構築に寄与する固体分離技術"(招待講演). 第29回環境工学連合講演会 (5月13日, 東京) . 2016, pp. 73-76, P-10.
5. Shinsuke Murakami, Haruhisa Yamamoto and Masahiro Oguchi: "Uncertainty in lifespan estimation and its potential impacts on our social system " The 24th CIRP Conference on Life Cycle Engineering 2017
6. H. Yamamoto: "Consumer behaviors of small-size WEEE use and disposal" ISIE SEM-AP Abstract Book, p. 103-104. (Third Prize in Poster Competition)
7. 福井将、網澤有輝、松岡光昭、所千晴、村上進亮 : 「DEMシミュレーションを用いた破碎による廃小型家電からの基板回収挙動の予測」, エコデザイン・プロダクト&サービスシンポジウム2016, 2016年12月7日, p.163-164, P-16. (優秀賞受賞)
8. 高橋裕也、村上進亮 : 「供給障害事象に基づく鉱物資源の供給リスク指標開発」, 第 12 回日本LCA学会研究発表会, p. 72-73
9. Mei NAGASE, Giuseppe GRANATA, Sho FUKUI, Chiharu TOKORO, Shinsuke MURAKAMI: Prediction formula for determination of the best condition to remove printed circuit boards from home appliances using DEM simulation, IUMRS-ICAM 2017 (<http://www.iumrs-icam2017.org/>), p.231
10. Mei NAGASE, Shinsuke MURAKAMI, Giuseppe GRANATA, Chiharu TOKORO, Yuichiro KANEMATSU, Yasunori KIKUCHI: Development of a new database for the design of efficient recycling processes: the case study of tantalum, EcoDesign2017 (<http://ecodesign2017.ncku.edu.tw>) Award for encouragement of research
11. 永瀬萌、山本悠久、村上進亮 : 「使用済み電気・電子機器リサイクル技術データベースの設計と運用に係る検討」 第13回日本LCA学会研究発表会, P2-041

社会貢献他

- 国民との科学・技術対話

1. 国際ワークショップ “Stockpile for Supply Chain Resilience ” 共催予定 （2016年10月7日、京都）
2. 所千晴 “スマートフォンから有用金属を回収する” 日本化学会関東支部、化学への招待-講演会 「スマートフォンをささえる化学」（11月5日、東京）
http://kanto.csj.jp/?page_id=171
3. 所千晴（企画コーディネーター、パネルディスカッション司会）日本学術会議公開シンポジウム“資源循環型社会を構築するための技術とその社会実装への取り組み”（2017年1月17日、東京）

- 審議会

1. 中央環境審議会循環型社会部会小型電気電子機器リサイクル制度及び使用済製品中の有用金属の再生利用に関する小委員会 委員 並びに関連の検討会委員
2. 産業構造審議会産業技術環境分科会廃棄物・リサイクル小委員会自動車リサイクルWG 座長/委員 並びに関連の検討会委員
3. 産業構造審議会産業技術環境分科会廃棄物・リサイクル小委員会電気・電子機器リサイクルWG 委員 並びに関連の検討会委員

ご清聴ありがとうございました