



# リチウムイオン電池・太陽光パネルの 高度リサイクルのための 革新的分離技術の重要性

2020年2月21日(金) 13:45~14:30

早稲田大学 理工学術院  
創造理工学部 環境資源工学科  
所 千晴

[tokoro@waseda.jp](mailto:tokoro@waseda.jp)

# 資源循環型社会構築に向けた課題認識

現状の解体技術には、破碎・粉碎または手解体しか実用化されておらず、リユース/高度リサイクルに柔軟に対応できる高度分離技術が確立されていない。



- **破碎・粉碎**：機械的弱部を利用した選択性の低い処理法。
- **人力解体**：リサイクル技術が労働集約的で、高効率化されておらず、大量処理に対応できない。

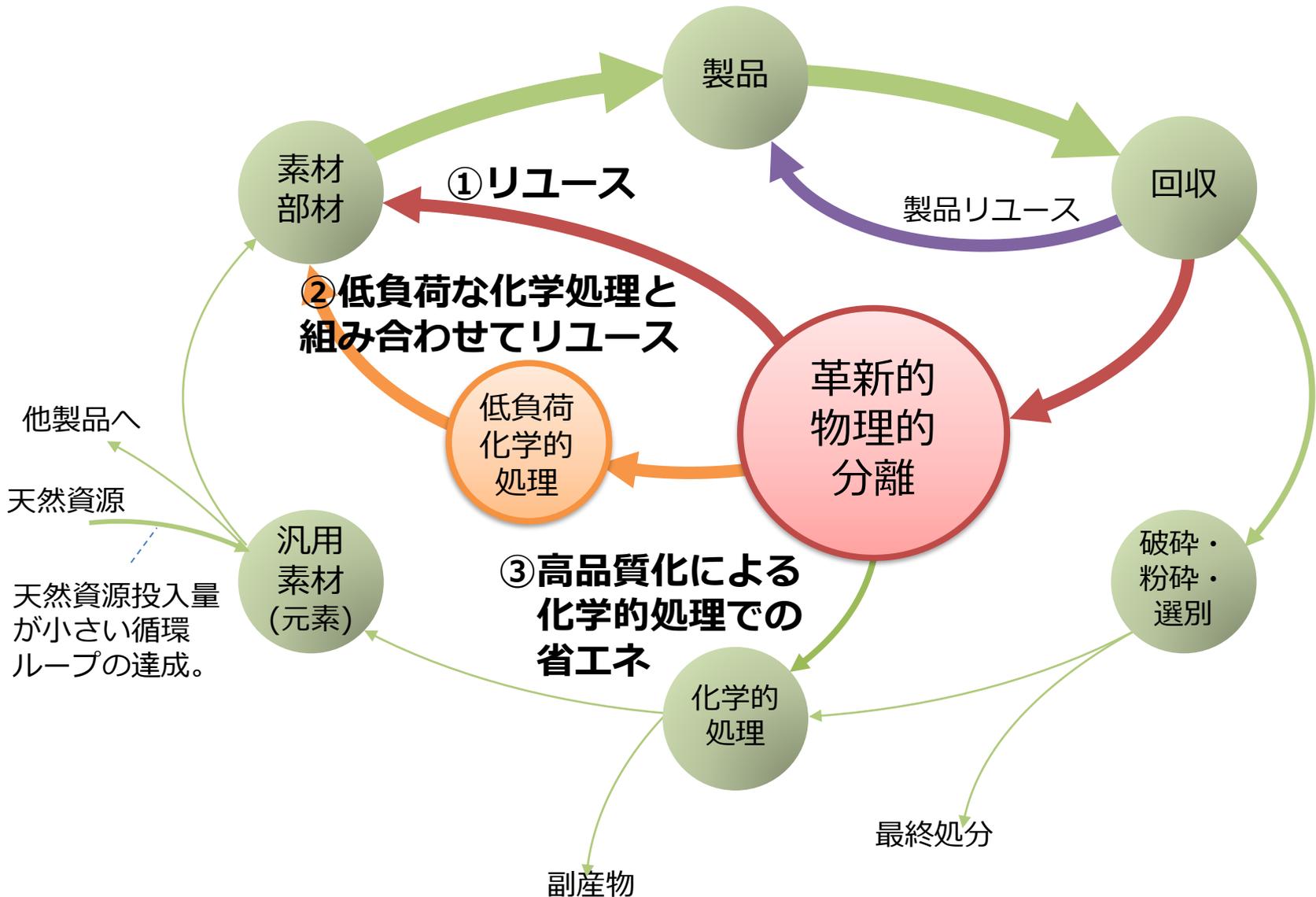
製品から得たい部位を選択的に取り外すことを可能とする  
**革新的な物理的分離技術の確立**





# 目指すべき資源循環型社会

## 太く短い多重ループによる循環生産システムの構築





# 自己紹介



氏名: 所千晴

所属: 早稲田大学

部署: 理工学術院

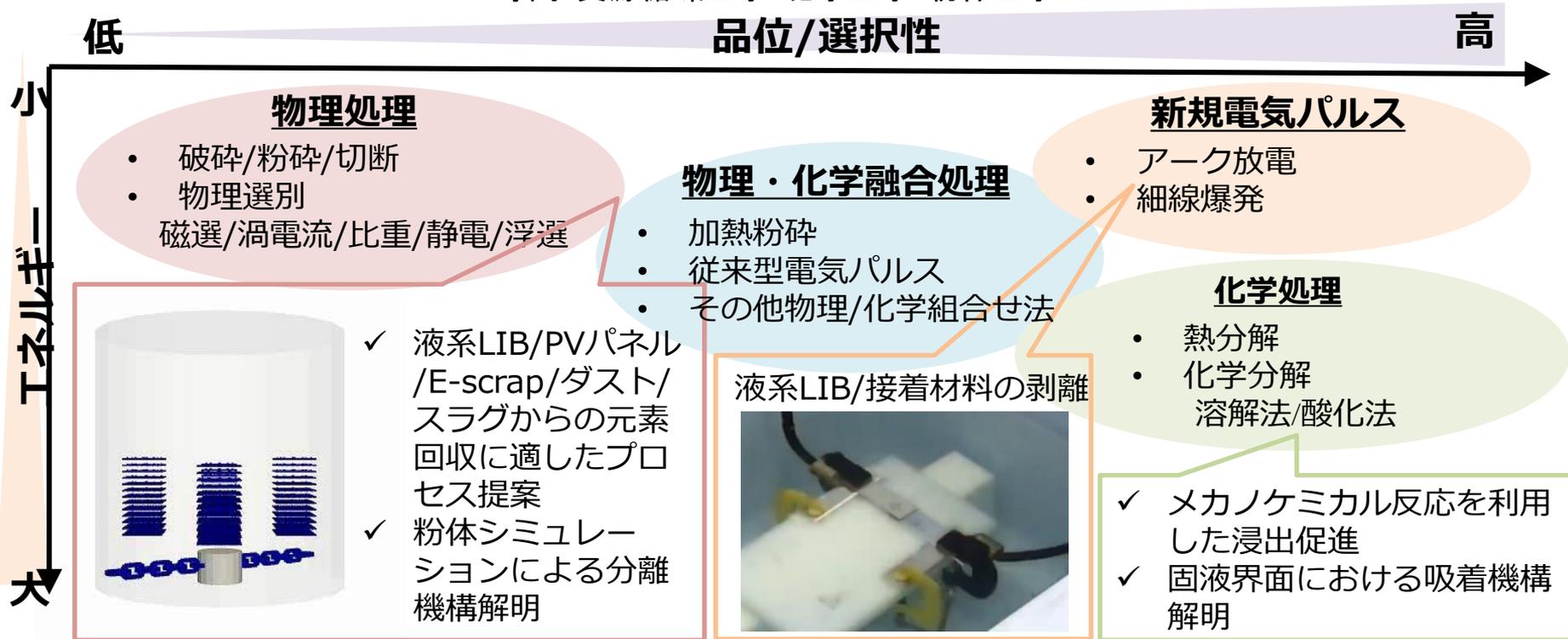
職名: 教授

学位: 博士(工学) (東京大学)

ホームページ: <http://www.tokoro.env.waseda.ac.jp/index.html>

## 【資源循環のための低環境負荷・高選択性な分離濃縮技術の開発】

専門: 資源循環工学・化学工学・粉体工学





# 未利用資源を利活用するために

## 未利用資源

- ✓ 使用済み製品(多種多様、製品サイクル早)
- ✓ 難処理鉱石(品位低、忌避元素濃度高、グレインサイズ小)

## 単体分離(有用vs不要成分の分離)が主目的

(基本的には)微粉碎することが目的ではない。

- ✓ 従来型粉碎: 圧縮粉碎(鉱石)、衝撃粉碎(使用済み製品)
- ✓ 特殊粉碎: カutting、表面粉碎、高圧粉碎
- ✓ 次世代型粉碎: 電気パルス、マイクロウェーブ粉碎

## 対象物が $10\mu\text{m}$ 以下の場合、物理選別は困難

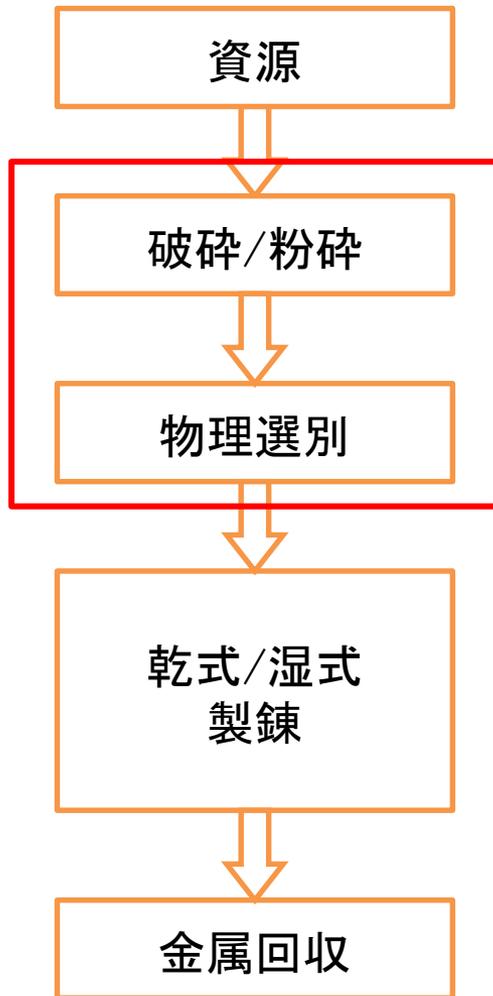
- ✓ 分級、比重選別、磁選
- ✓ 浮選
- ✓ ソーティング

## 乾式製錬

- ✓ 大規模で経済的
- ✓ 多くのレアメタルは回収困難
- ✓ 受け入れ濃度と形態、共存元素の割合に制限

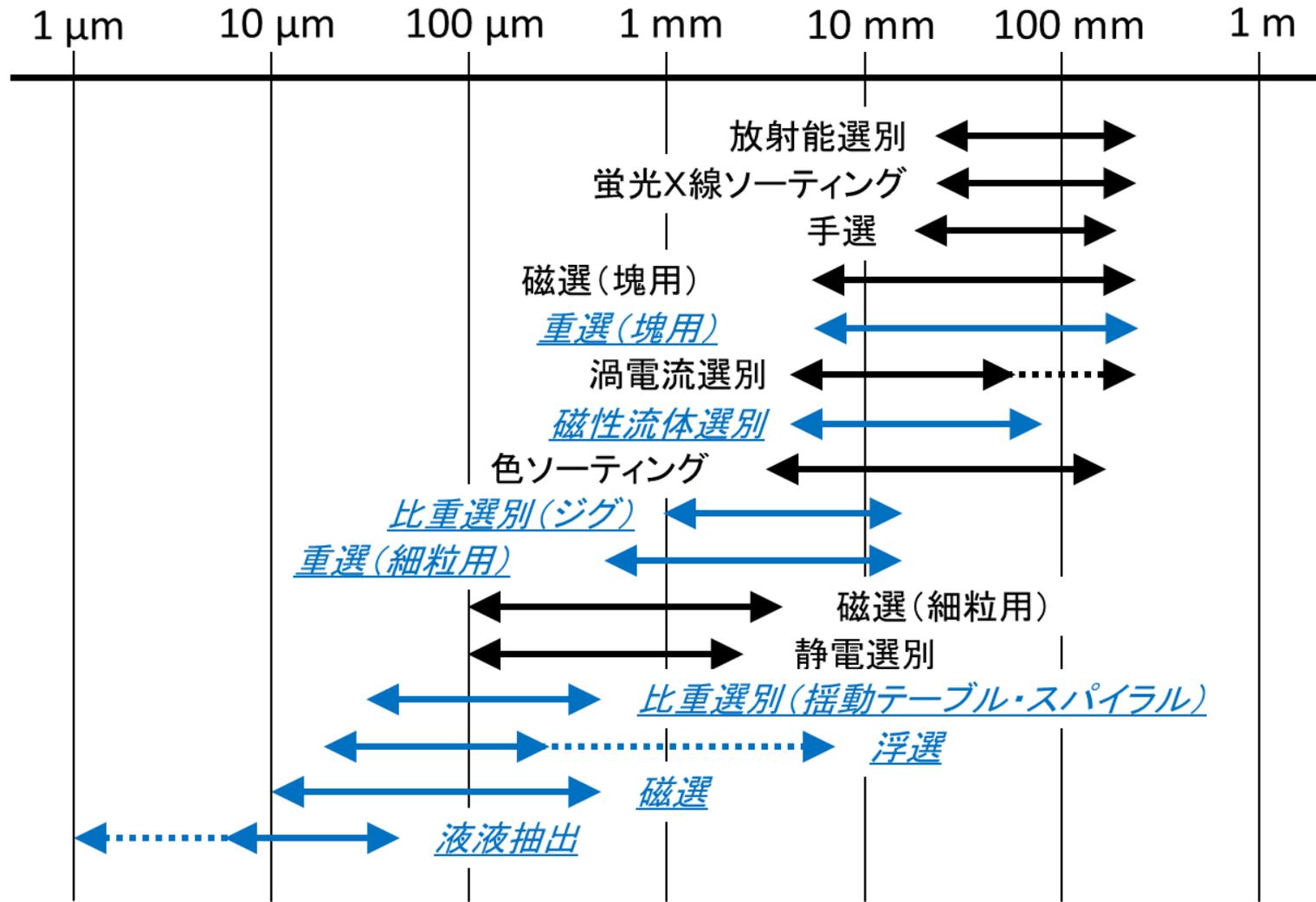
## 湿式製錬

- ✓ 多様な選択性を創出できる
- ✓ 経済性の向上が課題





# 物理的分離濃縮技術開発の方向性



各種選別技術の適用粒度範囲



# 固体どうしの分離技術が必要な理由

## 【携帯電話】



金属	含有量
Au	0.034 %
Cu	19 %
Ag	0.1 %
Pd	0.1 %
Co	7.5 %



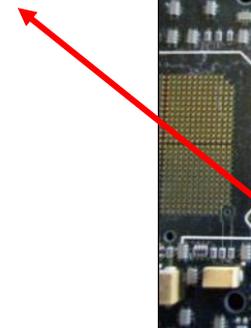
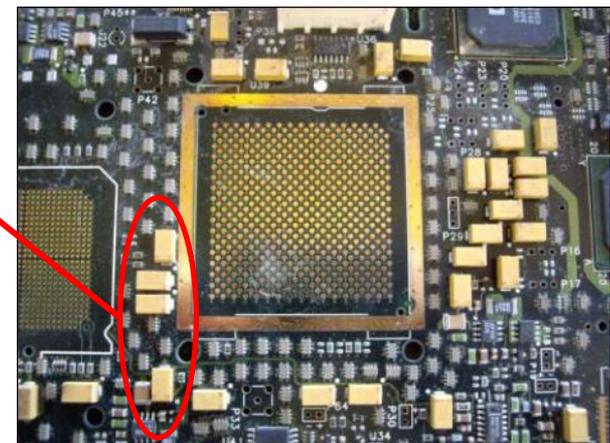
## 【基板】

金属	含有量
Au	0.14 %
Cu	33 %

白鳥, 中村(2007)



タンタル: 銅製錬では回収できない。



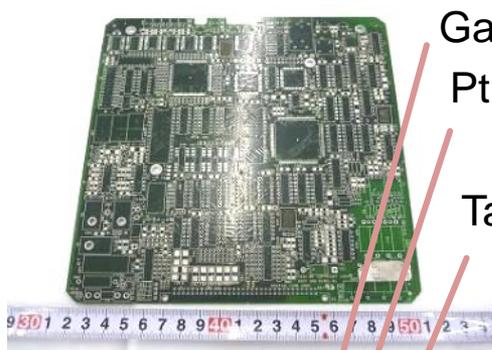
## 【バッテリー】



金属	含有量
Co	19 %
Cu	10 %

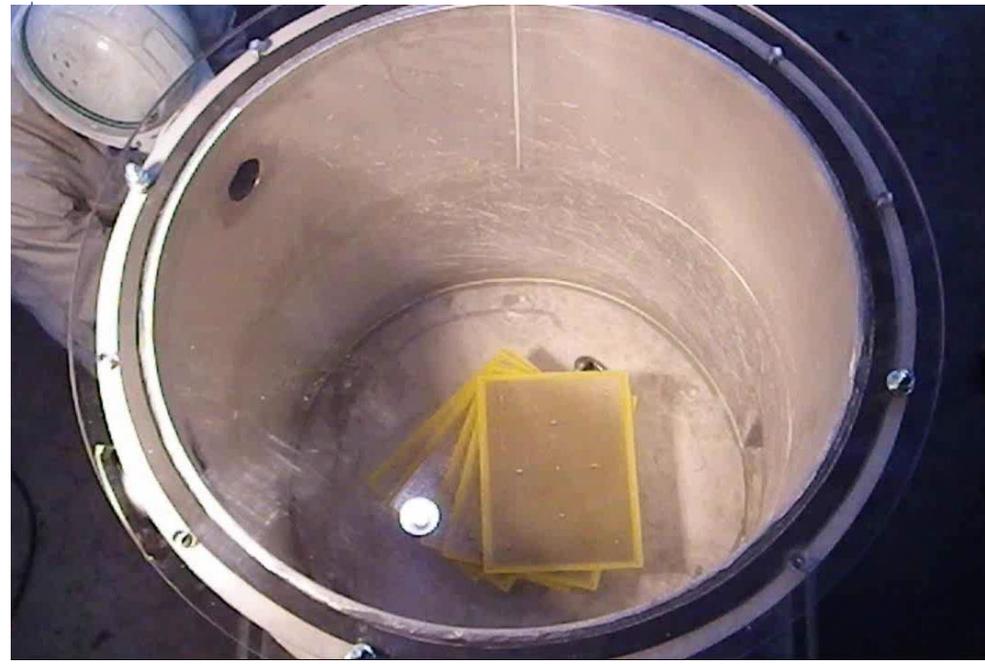
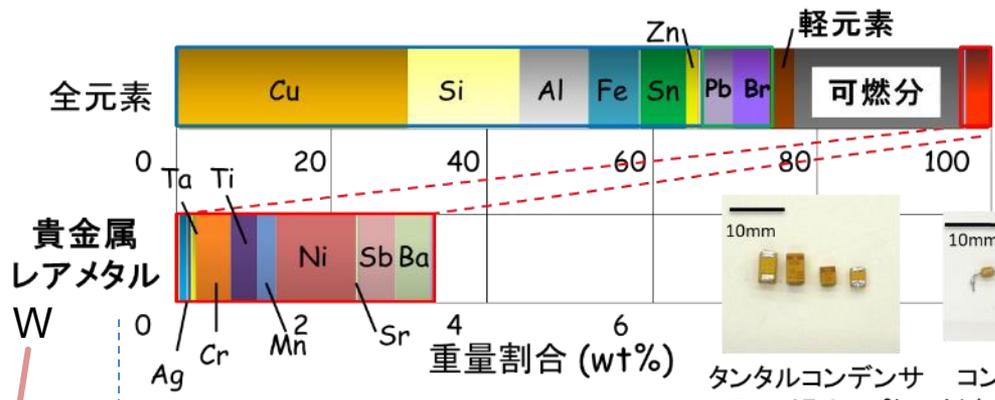
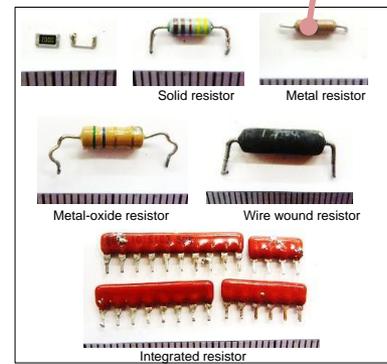
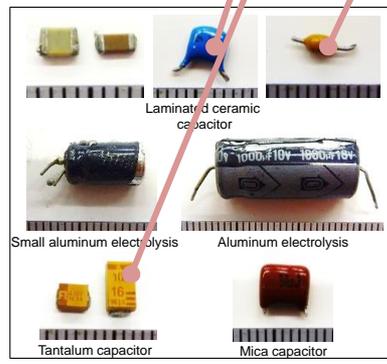
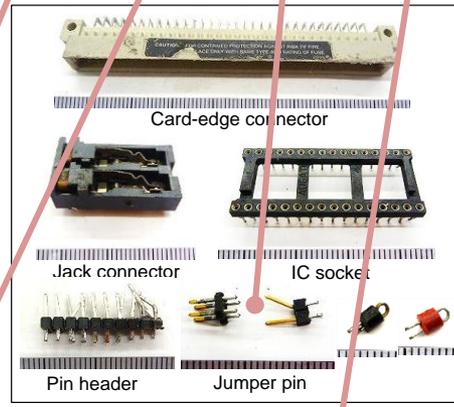
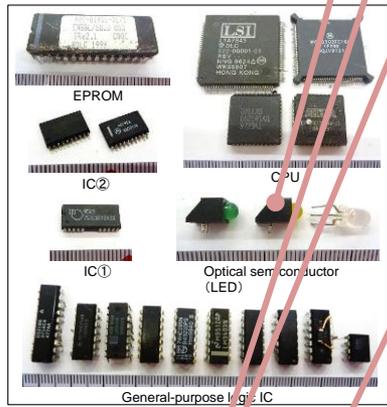


# 特殊機械粉碎による基板からのレアメタル等回収



Ga  
Pt  
Ta

Nd  
Au  
W





# 特殊機械粉碎による基板からのレアメタル等回収

Number of parts to be recovered in order to obtain 80% recovery for each element

Dy	Nd	W	Ta	Zn	Pd	Cr	Co	Fe	Sr	Mn	Cu	Zr	Pb	Au	Ni	Pt	Ag
0.9	2.5	2.6	3.1	3.2	4.4	6.5	6.5	7.0	9.6	10.1	12.3	13.4	13.7	14.0	15.6	19.0	19.1

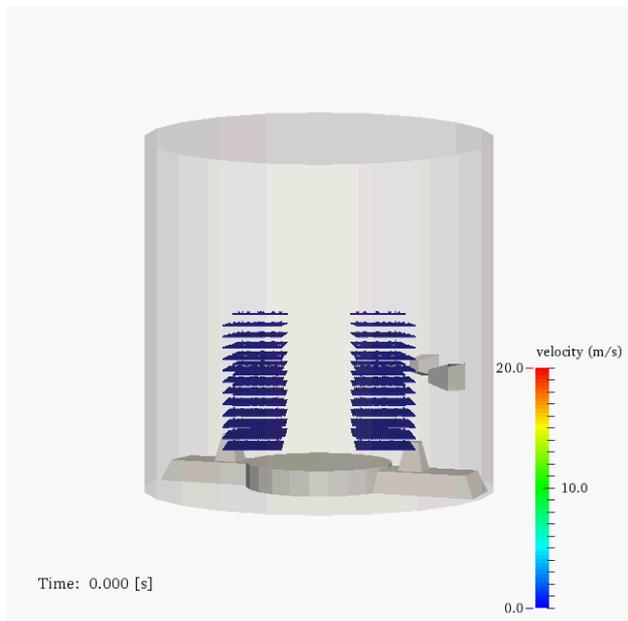
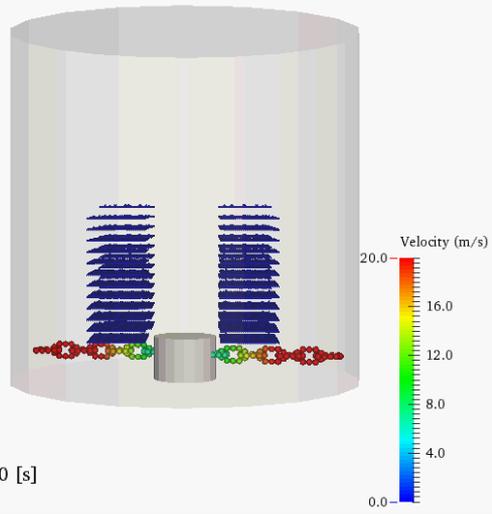
'Concentrated type'



'Dispersed type'

To exist in specific parts  
as functional materials

To exist in various kinds of parts  
as structural materials

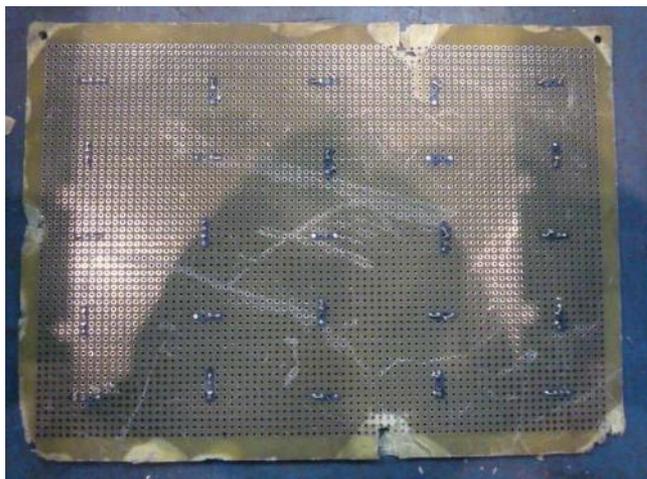
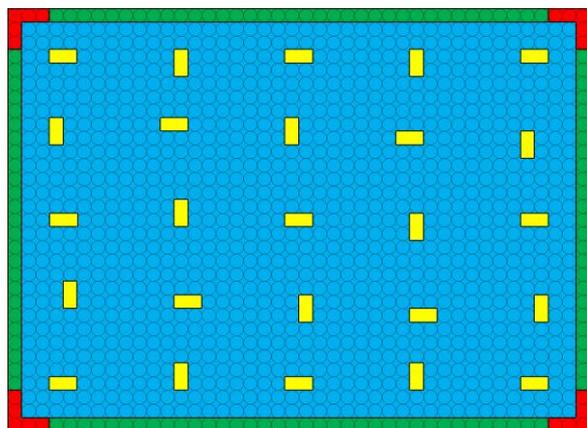


回転速度: 750.0 rpm, 基板投入枚数: 50枚

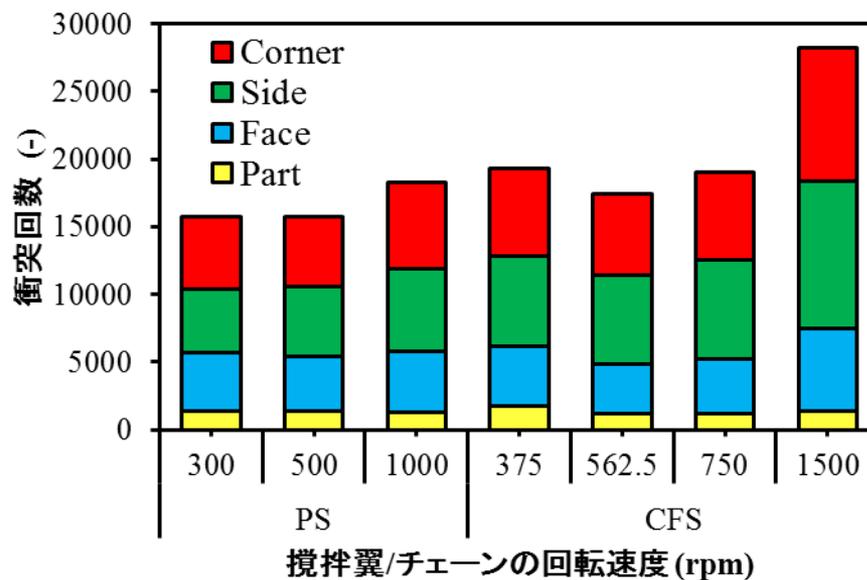


# 基板の衝突回数の比較

基板1枚を4つの領域に分けて、それぞれの衝突回数を比較



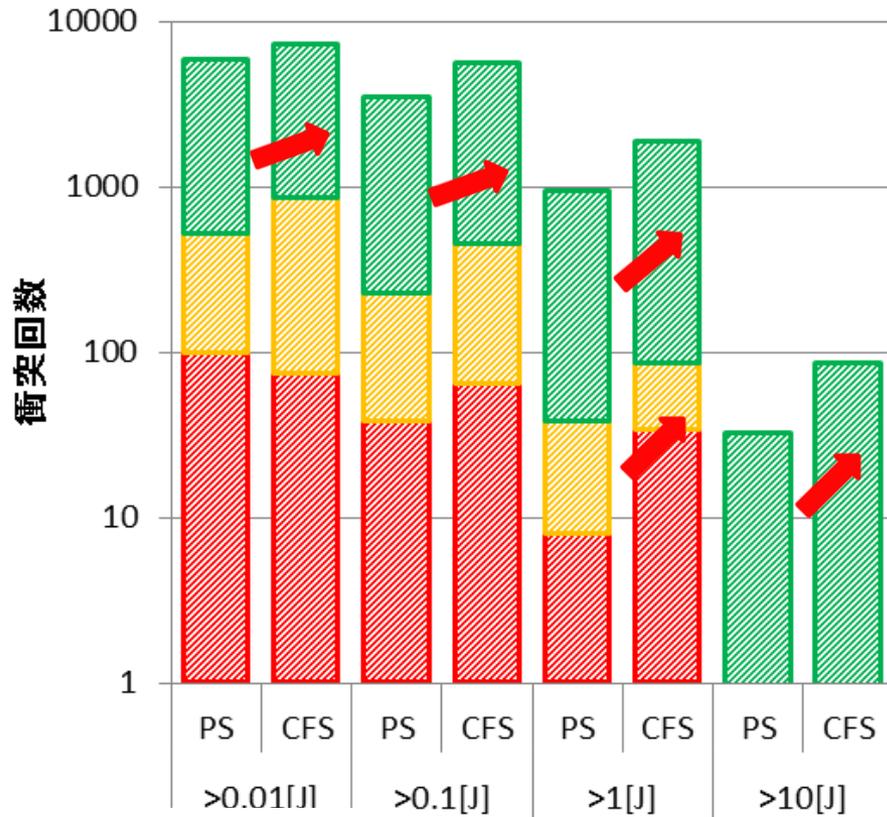
- 基板の四隅
- 基板の辺
- 基板の面
- 部品



角や辺を構成する粒子の衝突点数が多い  
⇒ 粉碎産物の端部での破損が多い

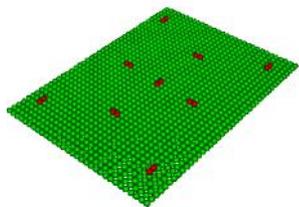


# 破碎機内の衝突機構の考察



- 基板(部品以外との衝突)
- 基板-部品
- 部品(基板以外との衝突)

- 基板粒子・部品粒子のエネルギーを比較
- 部品に対する衝突(赤・オレンジ)  
いずれのエネルギー領域においても  
CFSの方がPSよりも頻度が多い
- 基板に対する衝突(緑)  
10 J以上の大きなエネルギー領域で  
CFSの方がPSよりも頻度が多い  
小さいエネルギー領域では  
CFSとPSの頻度の差はあまりない



基板粒子

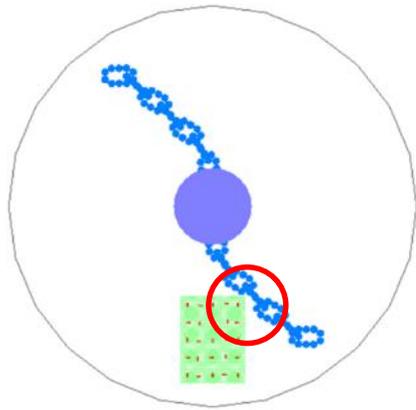
部品粒子

PS: 500 rpm, CFS: 565 rpm  
投入枚数: 50枚

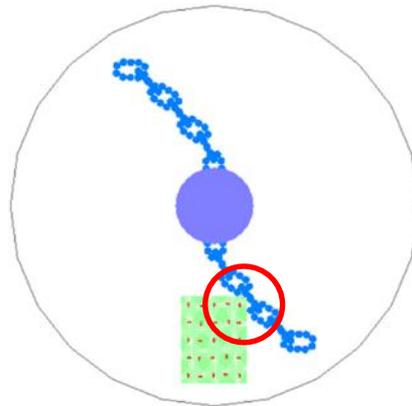


# 基板と攪拌体の衝突過程の比較

## クロスフローシュレッダー(CFS)

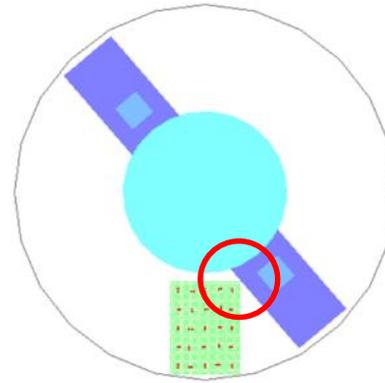


Time = 0.0 s

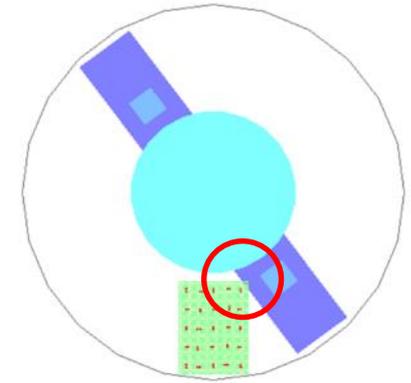


Time = 0.2 s

## パーツセパレータ(PS)



Time = 0.0 s



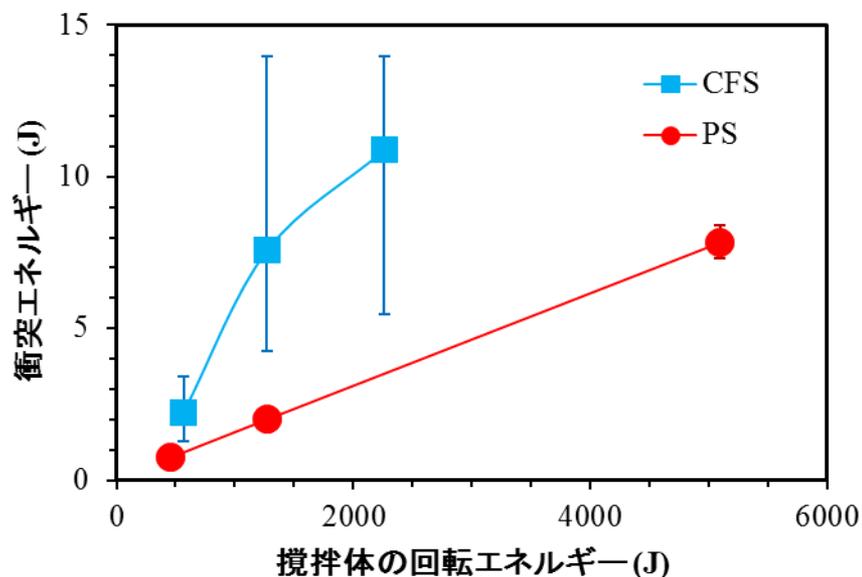
Time = 0.2 s

- PSにおいては、基板は攪拌翼の1点でのみ衝突しているのに対し  
CFSにおいては、基板はチェーンの複数のリングと衝突している
- このような衝突は、基板の姿勢に依存するが  
とくに基板の四隅での衝突において多く生じると予測される

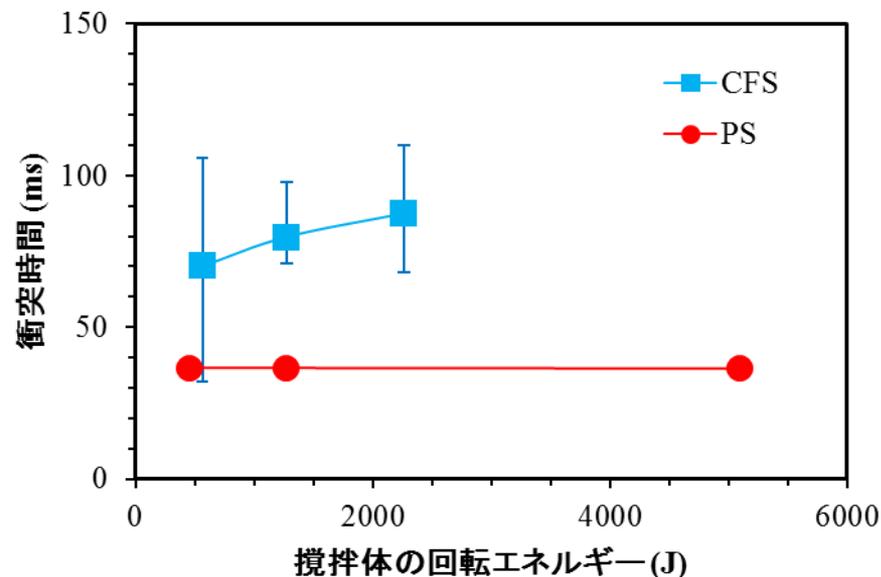


# 基板1枚と攪拌体の衝突エネルギーと衝突時間

## 衝突エネルギー



## 衝突時間



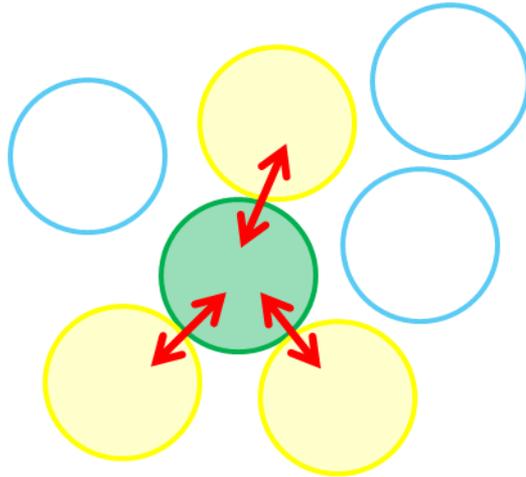
- CFSの方がPSよりも衝撃エネルギー，衝突時間ともにばらつきが大きい
  - ⇒ 基板の姿勢によって得られるエネルギーにばらつきがある
  - ⇒ 衝突後には基板同士に速度差を生じる可能性がある
  - ⇒ より大きな衝突エネルギーが得られる場合がある



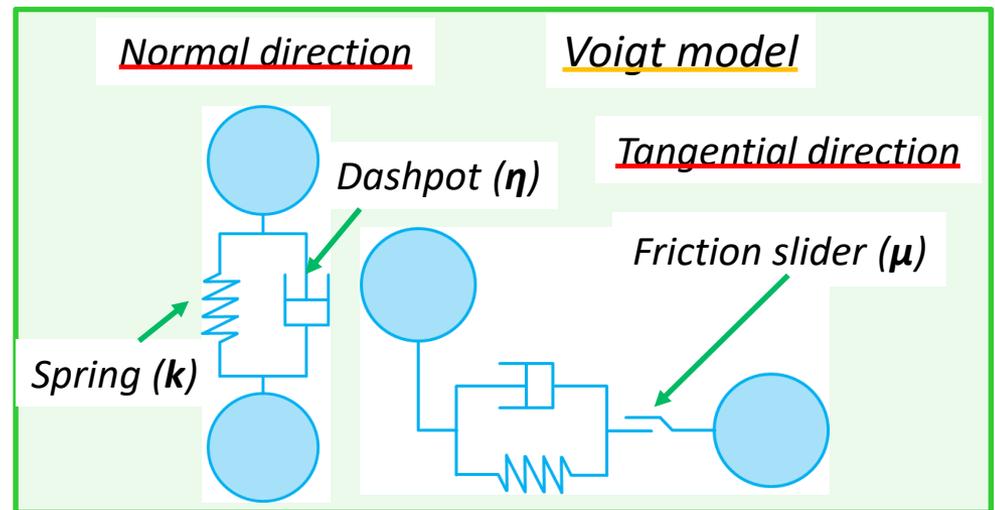
# 離散要素法(Discrete Element Method)

個々の粒子の運動方程式を解くことにより  
粒子群の挙動をシミュレーションする方法

P. A. Cundall & O. D. L. Strack(1979)



細かい時間刻みで計算すれば、  
近接粒子との相互作用を考えるだけでよい



Newton's laws of motion

$$\begin{cases} m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \sum \mathbf{F}_c + \mathbf{F}_g \\ \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = \frac{\mathbf{T}}{\mathbf{I}} \end{cases}$$

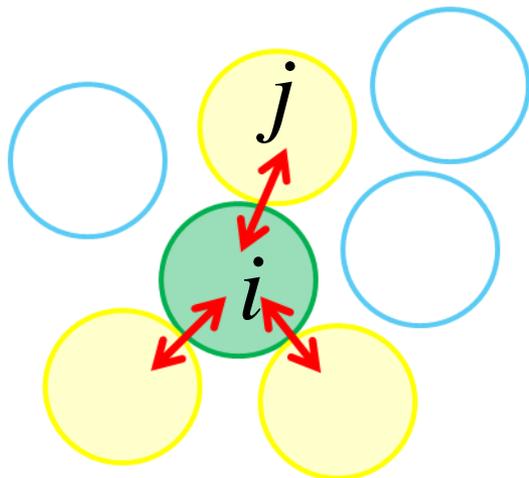
Calculation of contact force

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_c &= \mathbf{F}_{c_n} + \mathbf{F}_{c_t} \\ \begin{cases} \mathbf{F}_{c_n} = -k\delta_n - \eta\mathbf{v}_n \\ \mathbf{F}_{c_t} = \begin{cases} -k\delta_t - \eta\mathbf{v}_t & (|\mathbf{F}_{c_t}| \leq \mu|\mathbf{F}_{c_n}|) \\ -\mu|\mathbf{F}_{c_n}|\frac{\mathbf{v}_t}{|v_t|} & (|\mathbf{F}_{c_t}| > \mu|\mathbf{F}_{c_n}|) \end{cases} \end{cases} \end{aligned}$$



# 離散要素法 (Discrete Element Method)

## ■ 粒子に働く力



$$F_i = \sum_j F_{ij} + \sum_n F_n$$

周囲の粒子*j*との接触力

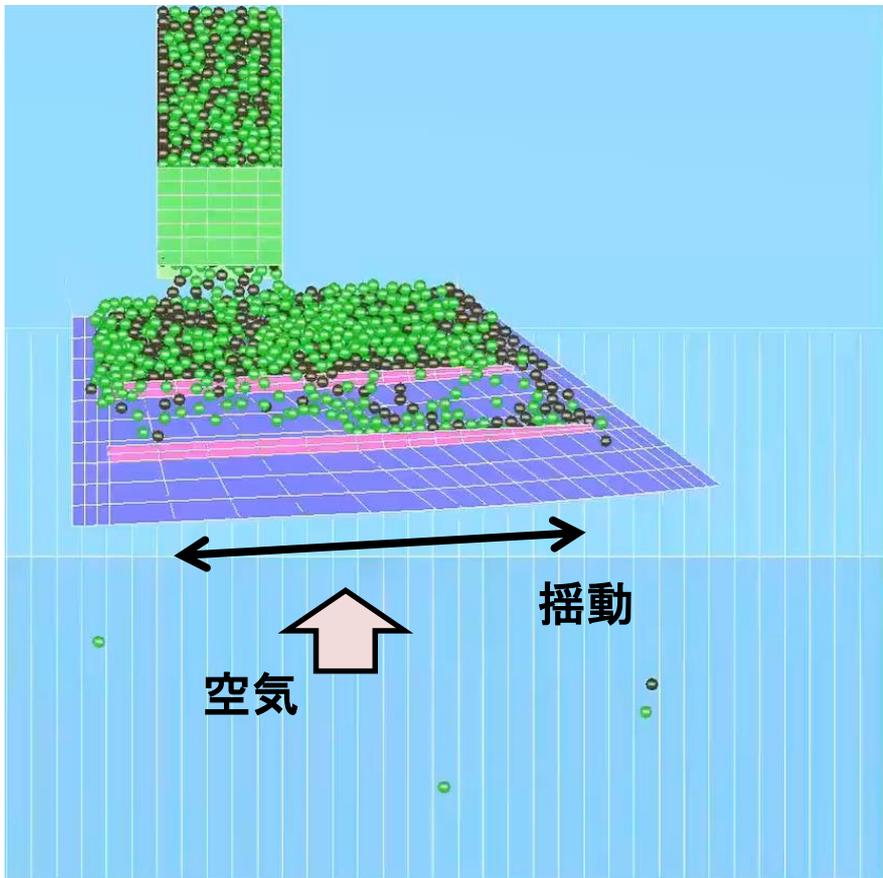
外力

- 重力
- 遠心力
- 静電気力
- 流体から受ける力
- 磁界から受ける力
- ...



# DEMシミュレーション応用例：比重選別

DEM + 流体 (空気)



テーブル型比重選別機  
テーブルの揺動と下からの空気  
で重粒子と軽粒子を選別する

- 軽粒子(比重1)
- 重粒子(比重10)

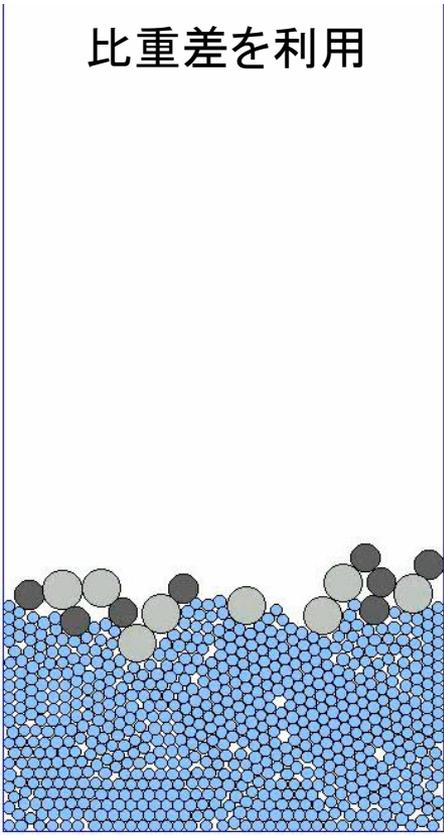
重粒子が右方向へ  
軽粒子が左方向へ  
選別される様子が確認

粒子の比重や大きさ  
テーブルの振動数や角度  
を変えたシミュレーションから  
最適条件の検討が可能



# DEMシミュレーション応用例：比重選別

DEM + 流体 (空気)



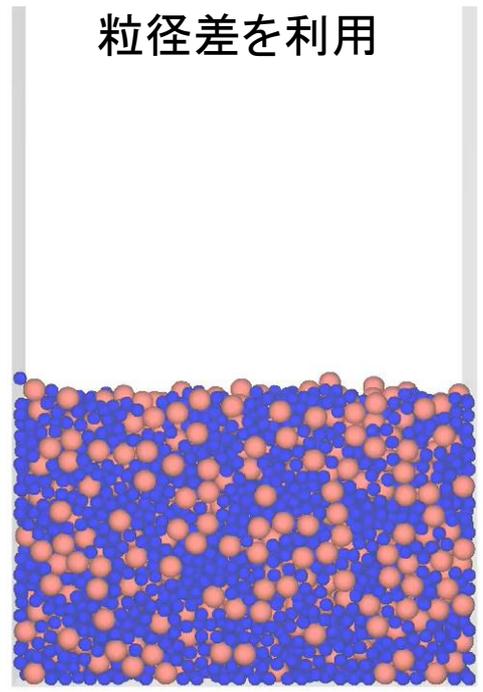
空気 ↑

流動層選別機  
粉体を流動化させた流動層を  
選別媒体として用いた乾式比重分離装置

- 重粒子
- 軽粒子
- 媒体粒子
- 大粒子
- 小粒子

重粒子・大粒子が下方へ  
軽粒子・小粒子が上方へ  
選別される様子が確認

粒子の比重や大きさ  
空気の流量を変えた  
シミュレーションから  
最適条件の検討が可能



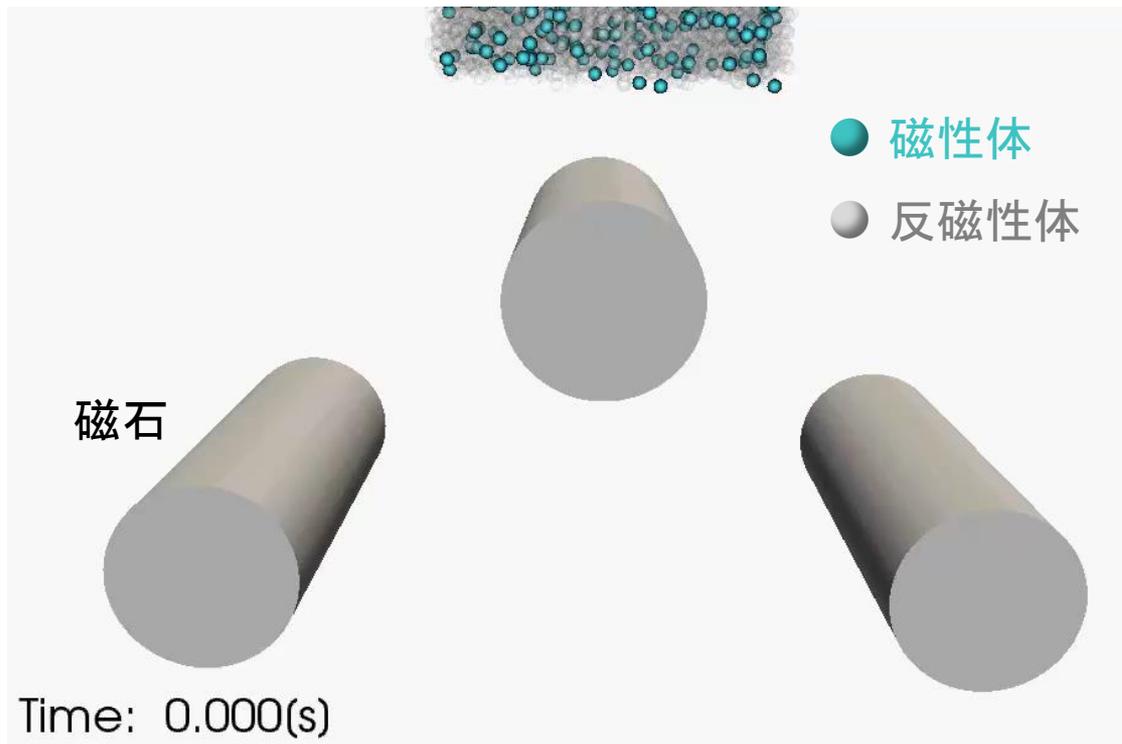
空気 ↑

所 千晴ほか, J. MMIJ. (2004)



# DEMシミュレーション応用例：磁選

DEM+磁力



粉体材料内の金属異物を  
マグネットバーを用いて除去

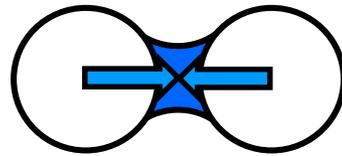
磁性の違いによる分離挙動  
や除去量の違いを検討

磁性体は磁石に引き寄せられ、  
反磁性体は落下する  
様子が確認



# DEMシミュレーション応用例：造粒

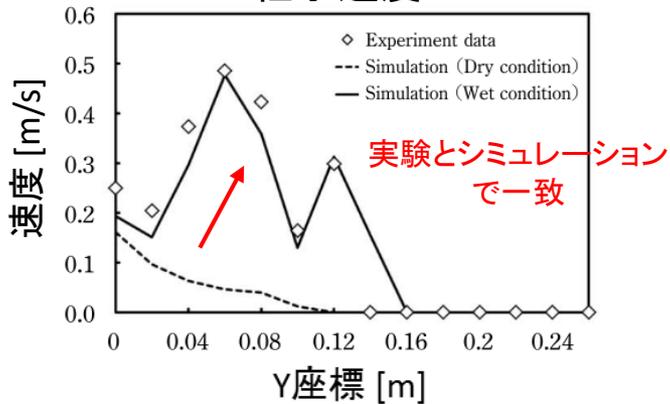
DEM + 液架橋力



液架橋力  
湿潤状態の粒子に働く付着力



粒子速度



藤橋大輝ほか, J. Soc. Powder Technol. Japan. (2014)

Y. Tsunazawa et al., Adv. Powder Technol. (2016)

液架橋モデルを考慮し、  
粒子の崩落挙動や造粒粒径を再現可能



# DEMシミュレーション応用例：混合

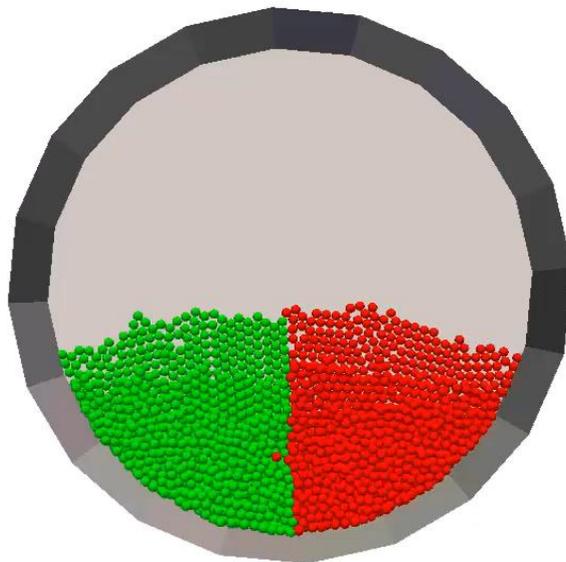
DEM

実験

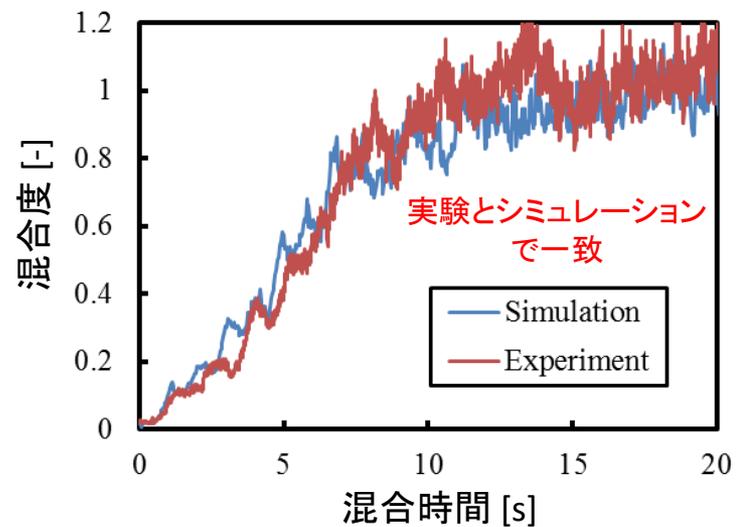


Time: 0.00

シミュレーション



混合度の経時変化



混合度の経時変化を再現  
混合度や混合終了時間の予測が可能



# 車載用リチウムイオン電池の解体

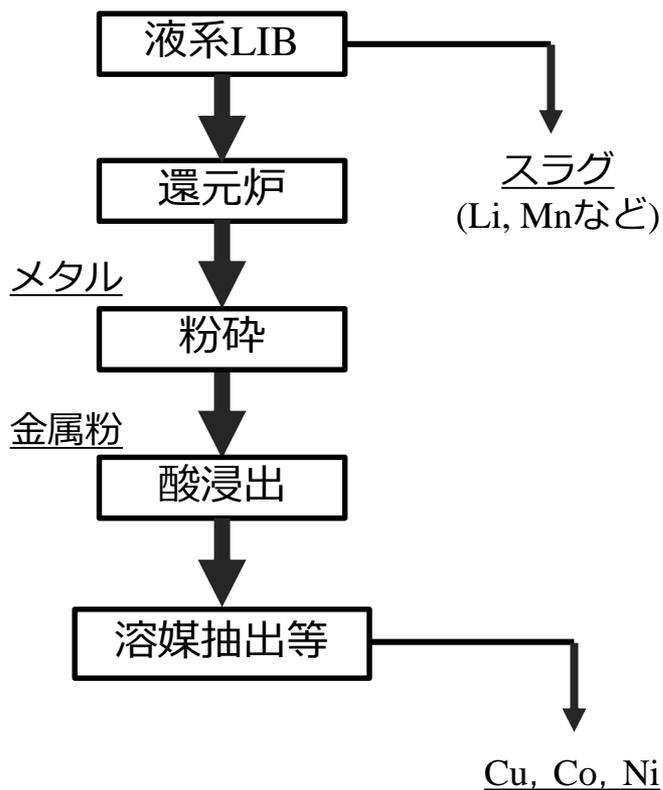


- ✓ 現状は手解体が主であるが、今後の廃棄量の増加や、安全性を考えると、自動解体技術が開発されることが強く望まれる。
- ✓ ネジはほとんどが金属部に装着されており、現状ではネジ外しロボットによる自動化が妥当。現状では、1種類のドライバーで外すことができるが、5方向かつ多層になっており、さらなる易解体設計が望まれる。

解体手順	時間
①ネジ外し	2分40秒
②スナップフィット外し	30秒
③ワイヤーハーネス切り	1分10秒
④姿勢制御	2分40秒
⑤絶縁処理	1分20秒
⑥部品外し後、箱への投げ入れ	2分50秒
⑦その他部品外し（制御盤/コンタクタ等）	50秒
合計	約12分 ※熟練作業者

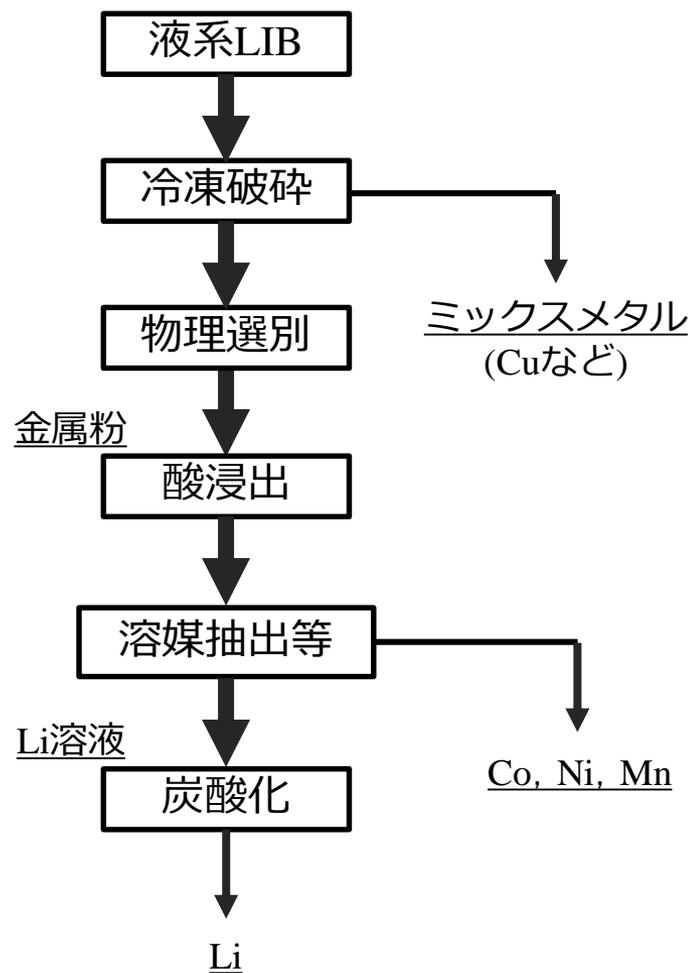


# 国外におけるリチウムイオン電池リサイクル事業



## (UMICOREプロセス)

- ・ 2011年度に商業プラントの建設を発表
- ・ 解体を必要としない
- ・ Li, Mnは回収できない

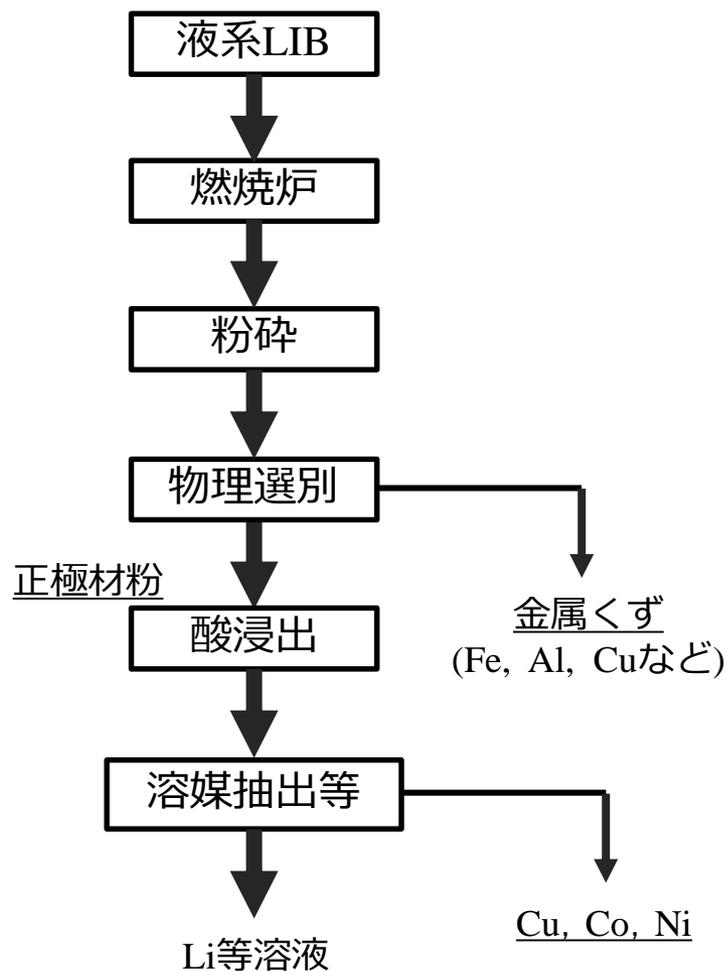


## (TOXCOプロセス)

- ・ Liを回収する唯一の（小規模）商業プラント
- ・ 冷凍破碎の省エネルギー化が鍵
- ・ Recupylは冷凍破碎の代わりに不活性ガス下粉砕を採用

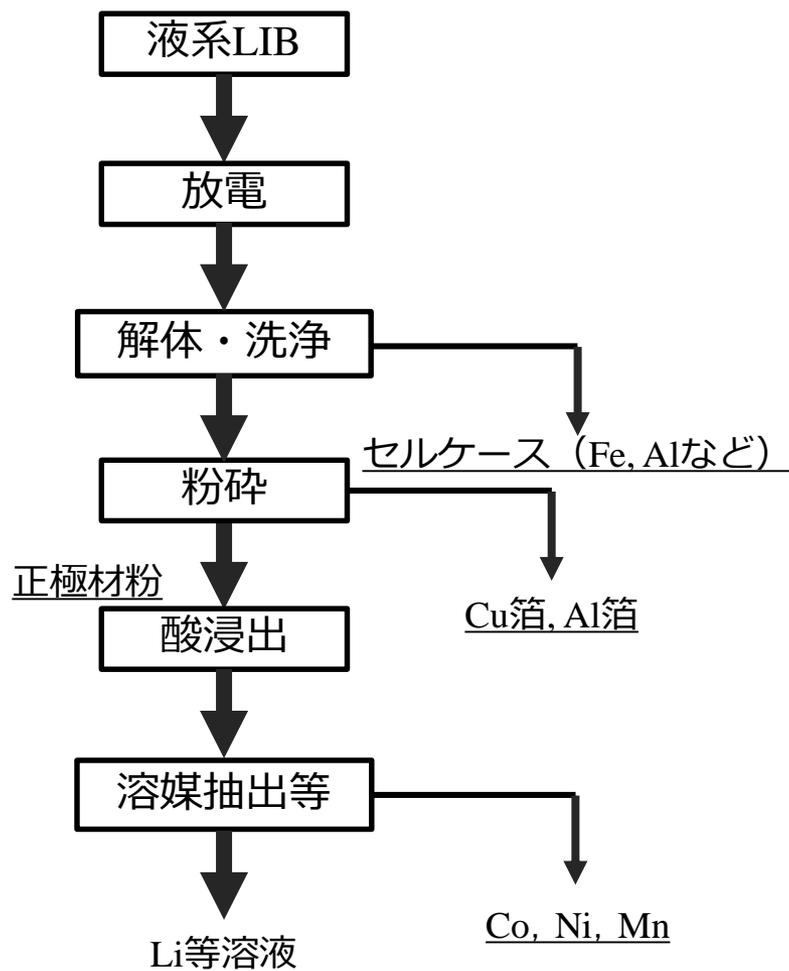


# 国内におけるリチウムイオン電池リサイクル事業



## (焙焼プロセス)

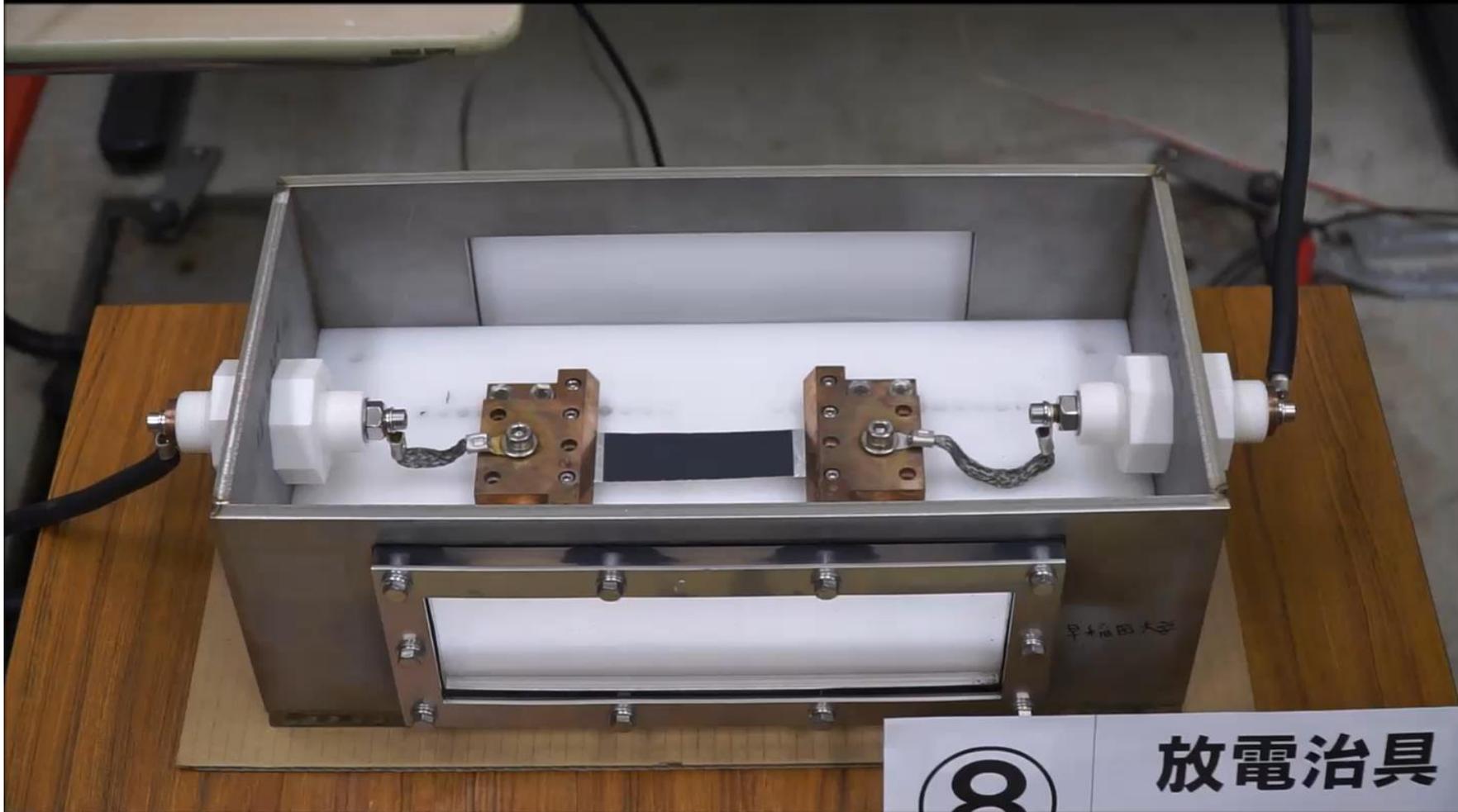
- ・ 解体を必要としない
- ・ Liは現状では回収していない



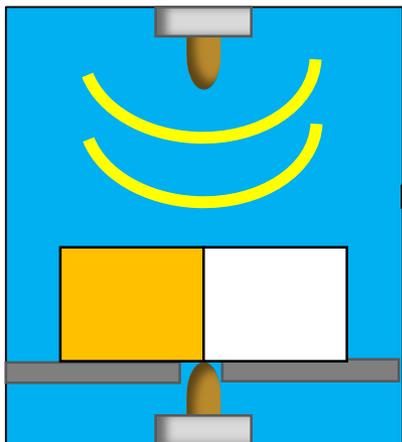
## (解体・洗浄プロセス)

- ・ 潜在的に高度リサイクルを可能とするプロセス

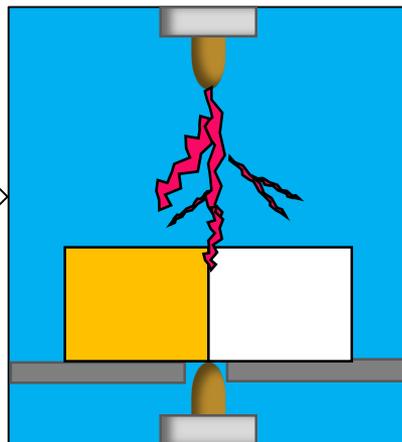
# 新規電気パルス法によるLiB正極材分離



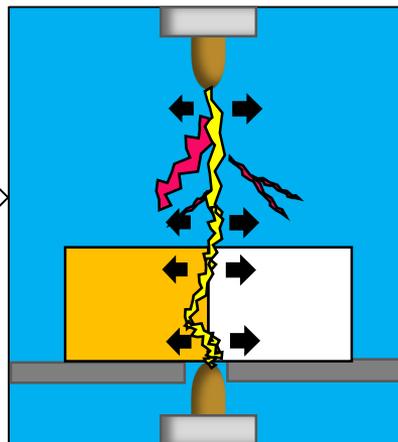
# 電気パルス分解/破碎のメカニズム



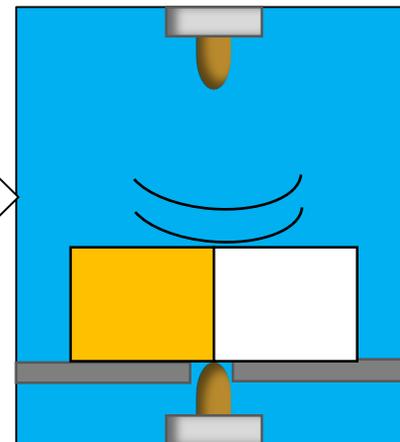
試料に高電圧を印加  
→電極間に試料を置き、  
高電圧を印加して強電解  
をかける。



ストリーマ放電の発生  
→強電解によって、スト  
リーマと呼ばれるプラズマ  
柱が発生する。電気力線  
に沿って陰極に進展して  
いく。陰極に到達すると、  
絶縁破壊を引き起こす。



アーク放電に伴うマイクロ爆発  
の発生  
→到達したストリーマ経路に  
アーク放電が生じる。アーク放  
電によって生じたジュール熱  
による昇華で、電流付近にマイク  
ロ爆発が発生し、界面での  
引っ張り力が粉碎に寄与する。



水の衝撃波の発生  
→アーク放電による水中  
でのマイクロ爆発によって、  
衝撃波が発生。試料に衝  
突し、圧縮力として粉碎に  
寄与する。

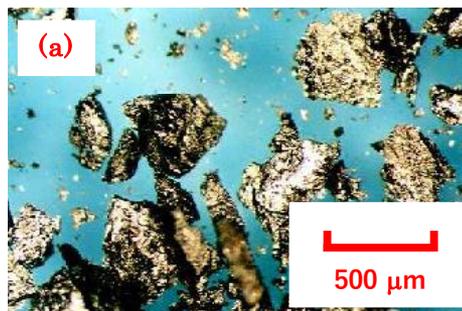
**破壊**



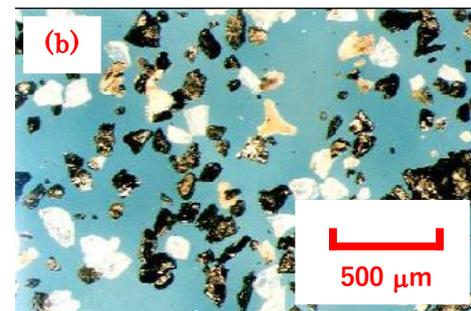
製造：SELFRAG AG  
輸入販売：  
ハルツォク・ジャパン



10t/hの連続機



石炭  
(a)ジョークラッシャー粉碎

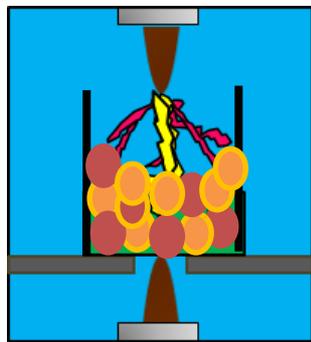


(b)電気パルス粉碎

# 新規電気パルス法の提案

新規電気パルス法による高選択性・高効率な部品・素材分離

## 従来電気パルス法



衝撃波の影響大

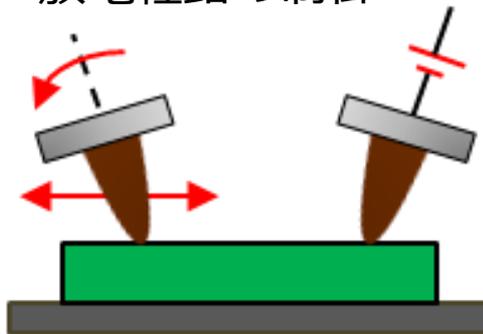
集合破碎的

衝撃波だけでなく、大電流やプラズマ化によるジュール熱の機能も最大限活用

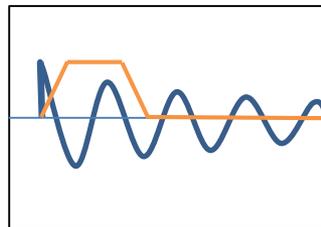
選択的な加熱  
選択的な反応  
選択的な剥離 を可能に！  
選択的な破壊

## 新規電気パルス法

放電経路の制御



波形の制御



精緻な制御

- ・放電経路
- ・電流・電圧波形
- ・繰り返し回数・頻度

ジュール熱と衝撃波の発生割合と場所を制御

多種多様なリユース/リサイクルの目的に合わせた**選択的**な**剥離**を可能に



# PVパネルリサイクル技術開発の現状

対象と目的に応じた技術開発が多方面で実施されている

## 大量の集合処理を目的としたシュレッダー＋種々の物理選別技術

代表例:

- ・従来型シュレッダーと比重分離、**攪拌型表面粉碎**、**電気パルス**等の物理技術を組み合わせた物理処理
- ・PVパネルの破碎の有無に応じたPVクラッシャーによる集合粉碎プロセス



### メリット

- ・安価
- ・大量処理

### デメリット

- ・低い分離精度

## 環境負荷の低減を目指した高精度なガラス・金属分離処理

代表例:

- ・**ホットナイフ分離法**によるガラスとEVA/セルシートの分離
- ・PVスクラッチャーによる樹脂側からの削ぎ落としによる選択粉碎



### メリット

- ・低環境負荷
- ・やや高い分離精度
- ・販路拡大

### デメリット

- ・低い処理量

## より高精度なりサイクル処理を目的とした化学的手法

代表例:

- ・**燃焼ガス加熱方式**を用いたEVAの連続式熱処理
- ・その他化学処理→酸や界面活性剤など薬品や溶剤によりEVA膜を溶解、分離



### メリット

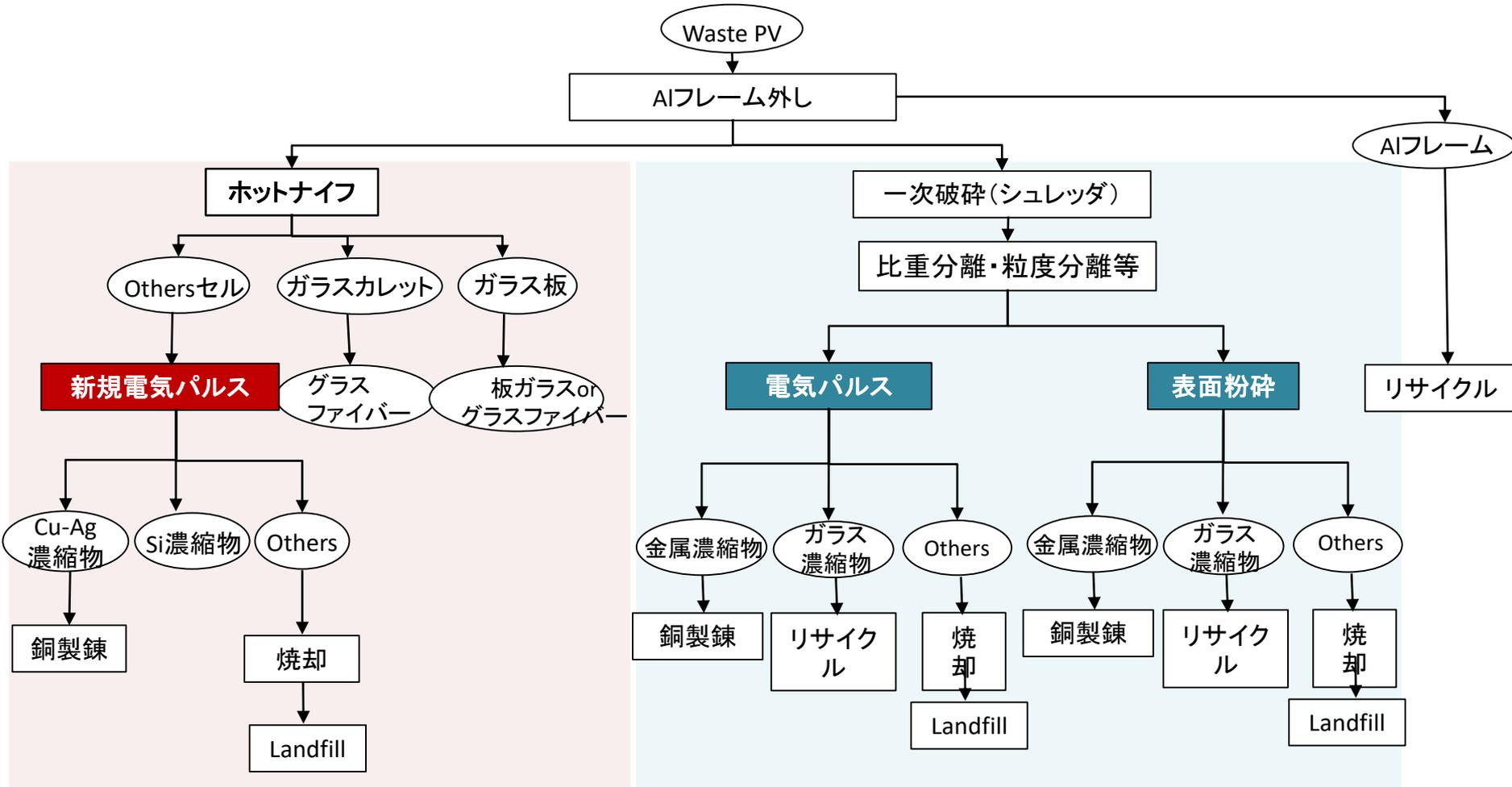
- ・高い分離精度

### デメリット

- ・高環境負荷



# 使用済み太陽光パネル高度循環利用のための 早稲田大学での取り組み



環境負荷の低減を目指した高精度分離

大量の集合処理を目的

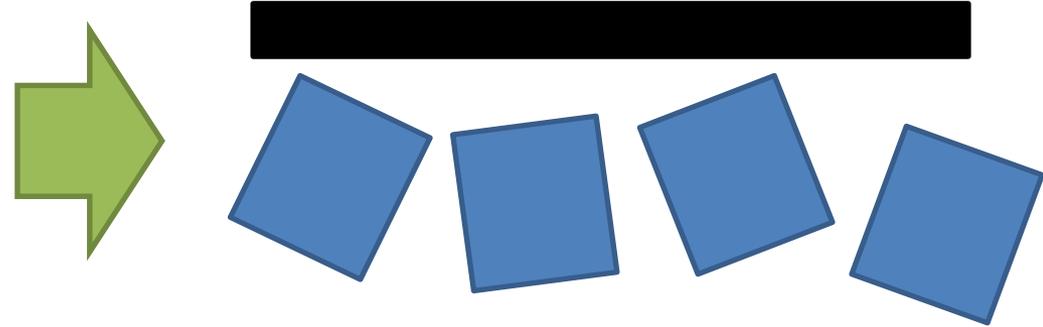


# 攪拌型ミルによるガラス/EVA分離

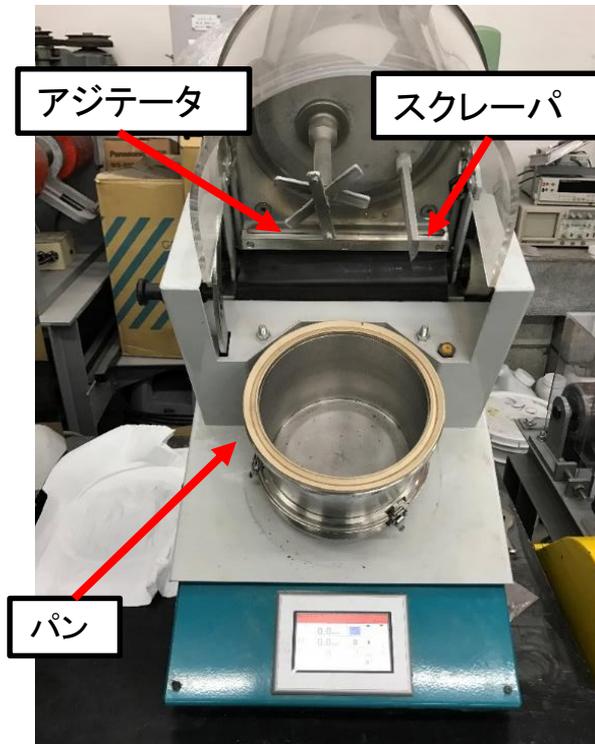
EVA



ガラス部分を選択的に粉砕



ガラスが選択的に細くなり、剥離し、EVA部分とガラスを分級により分離可能

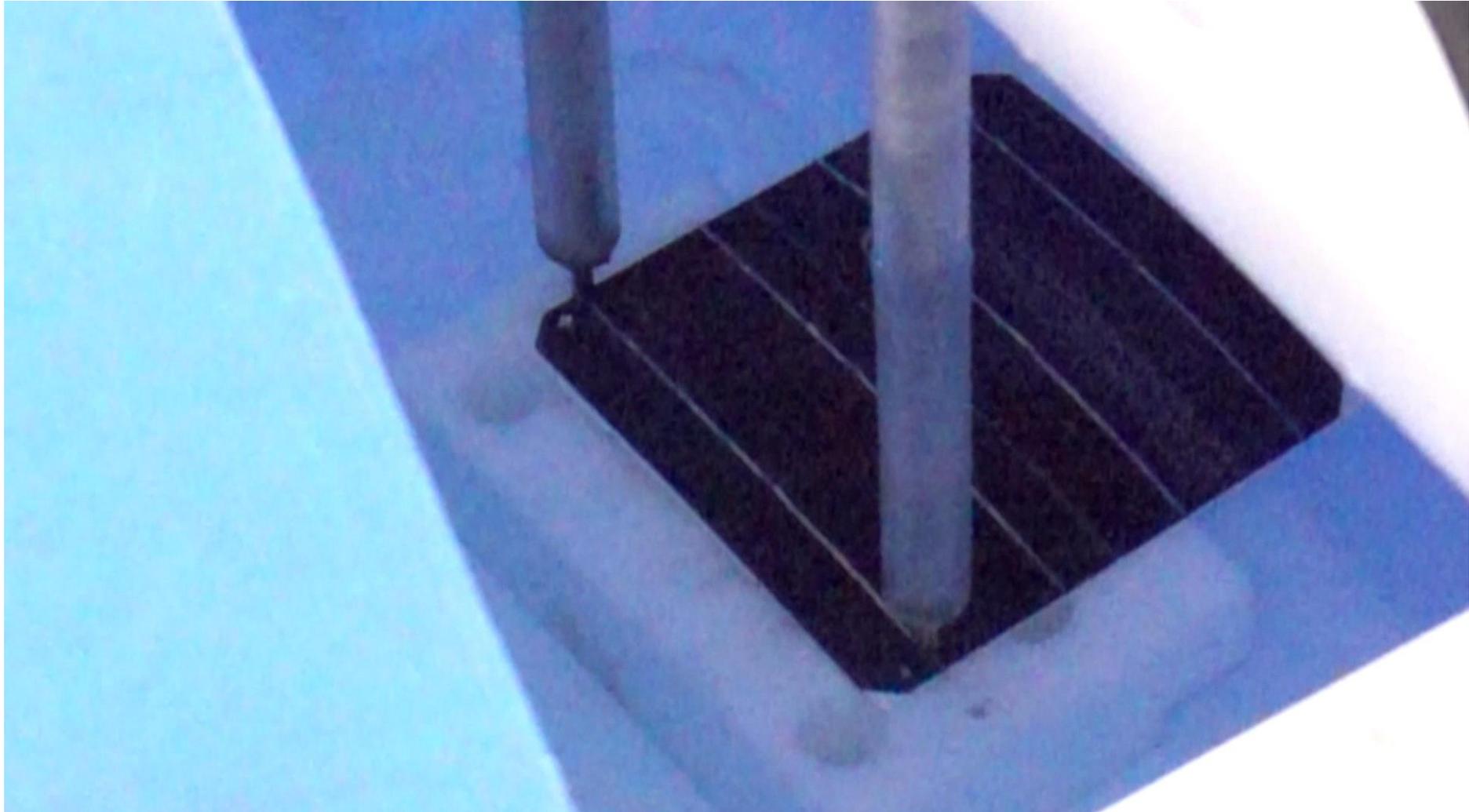




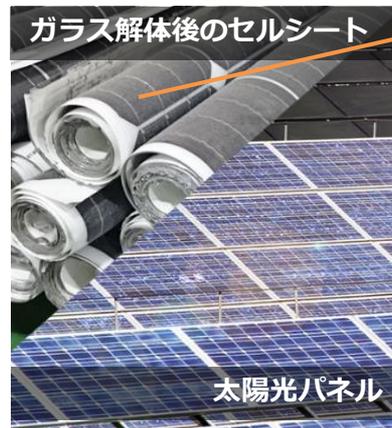
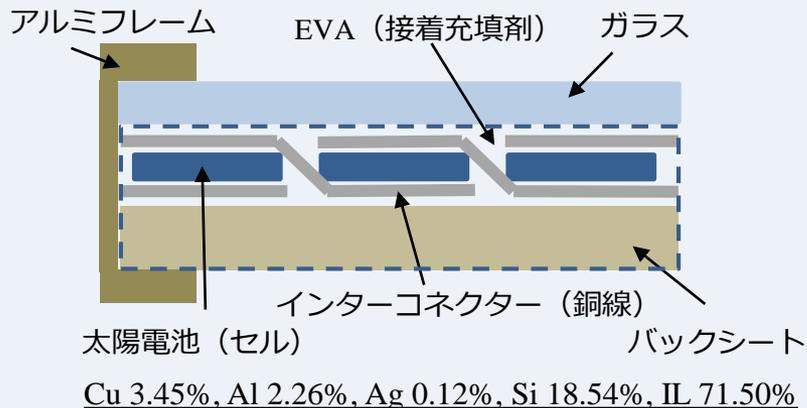
# 新規電気パルス法による金属分離



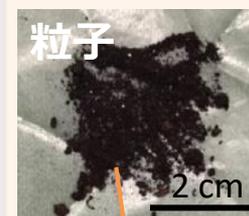
早稲田大学  
WASEDA University



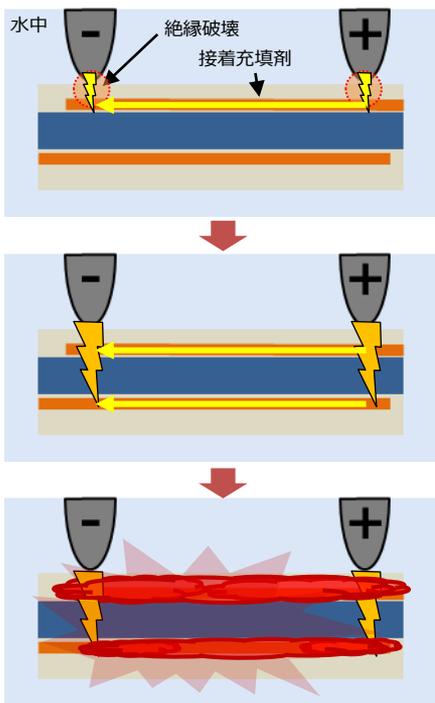
# 太陽光パネルセルシートからの金属分離



新規電気パルス法による  
金属分離 (15 kV)



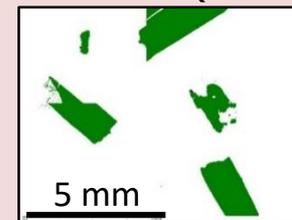
樹脂⇒サーマルリサイクル  
粒子⇒素材リサイクル



## 分離機構

- ①高電界によって、電極接触部の接着充填剤層の絶縁破壊
- ②プラズマ発生
- ③大電流通電による温度上昇  
→プラズマ領域拡張
- ④下部に位置するCu線まで導通
- ⑤ 1 $\mu$ s以内に銅線が沸点2835 K以上へ加熱
- ⑥銅線の昇華・プラズマ化  
→爆発

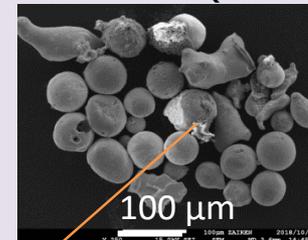
## ● 粗粒群(～1.2mm)



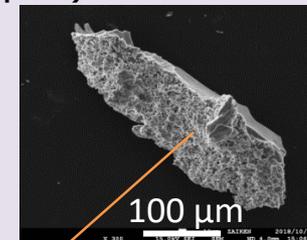
Cu 98.78%

⇒太陽光パネル用  
Cuリボンへ再生可能

## ● 中粒群(>150 $\mu$ m)



Cu 91.48 wt%  
昇華により球形



Si 99.18 wt%  
衝撃波剥離により不定形

比重・形状分離可能  
⇒Cuリボン再生またはCu製錬へ

# 新たな資源循環サイクルを可能とするものづくりプロセスの革新

製品ライフサイクル管理とそれを支える革新的解体技術による統合循環生産システムの構築

研究開発代表者： 所 千晴 早稲田大学 理工学術院 教授

研究開発期間：  
2017-2023(予定)

共同研究機関： 熊本大学、東京大学、東北大学、東京工業大学 ほか



## 目的：

製品を構成する異種材料を簡単に分離可能な新規電気パルス法の技術開発に取り組み、製品ライフサイクル管理のもとで当該技術を有効に活用することが新規資源循環ループ創出に有効であることを実証。また、分解が容易な設計・製造プロセスの提案につなげ、新しい統合循環生産システムの構築を目指す。

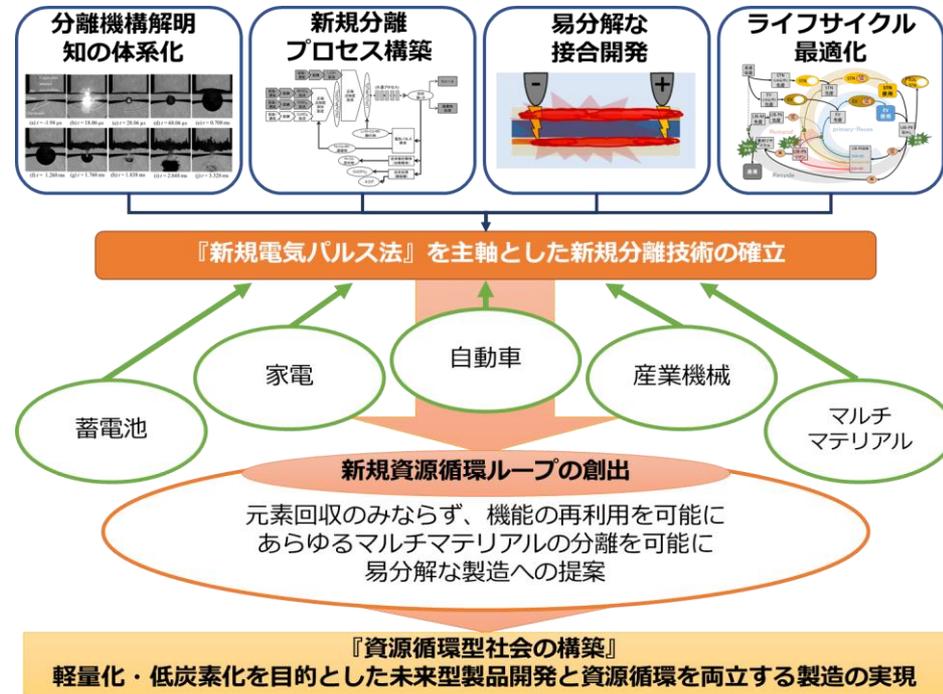
## 研究概要：

### 【ハイインパクト性】

- 資源循環が保証されることによる自由な設計と製造を可能に。
- 国内に乏しい金属資源の一定の確保を可能に。
- 欧州版循環経済モデルにかわる我が国発ものづくり主体の新規モデルの創出によって、我が国の産業競争力強化に直結。

### 【ハイリスク性】

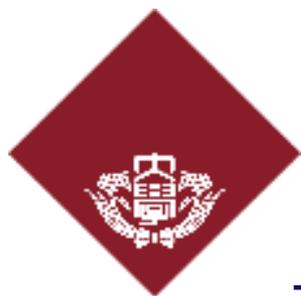
- 資源効率最大化に有用である新しいビジネスモデルとして成立することが鍵。
- 新規電気パルス法を主体とした解体技術で得た再生品が新規循環ループ創成に十分な価値を維持していることが重要。



# 太陽光パネル高度循環利用に対する 「東京モデル」の提案 -技術と社会システムの最適パッケージの追求-

## 2019年度－2021年度(予定)

1. 世界に先駆けた高度循環利用モデルの提案。
2. 先進的な高度分離濃縮技術の確立。
3. 太陽光パネル再生品、再生材料のサプライチェーン構築。
4. 理想的な社会システムを実現するための都政策の方向性の明確化。



環境負荷低減型の再生可能エネルギーを利用する  
「環境先進都市・東京の実現」



東京都

# 選別技術の未来

電気パルス法による解体・選別を用いれば、従来の破碎・選別方法よりも、使用済み製品からの金属類の回収率を上げる事ができる。電気パルス法とは、両端にある電極から一気放出する高出力エネルギーを利用し、電導率の異なる材料同士を剥がし、取り出す技術。第2回は、従来ある電気パルス法をさらに



所教授

## 電気パルス法

高度化する研究を行っている早稲田大学理工学術院・所千晴教授に話を聞いた。

### 直接放電させ部分破碎

#### 5年後めど実用化目指す

し、放電によりマイクロ爆発を生じさせる。水の衝撃破も利用し、異相境界面に引く張りの力を生じさせ、絶縁体と金属を引き剥がし、部品を効率よく回収できる。

ル粒子を接着して構成されている。間接アーク放電法ではうまく剥がすことができなかったが、直接アーク放電法を用いれば、その接着部分である絶縁層を破壊し、ニッケル・コバルト・アルミを分離、放電爆発により全て微粒子や箔として取り出すことが可能になった。

子基板からの部品剥離によるレアメタル回収に対して有効だ。現在、間接アーク放電法という方法を用い、電気パルス破碎を行うのが一般的。水中で、対象物である廃電子基板に電極を離して設置

砕が主で部分的に破碎することには難しかった。そこで、所教授はさらなる用途拡大のため研究し、新たに直接アーク放電法を生み出した。この方法を用いれば、リチウムイオン電池の物理選別に利用できる。リチウムイオン電池の正極材は、アルミ箔にコバルト・ニッケル

一方、細線爆発法は、金属細線や箔を爆発させ、その衝撃破で破壊し、金属を回収する方法。この方法を使用済み太陽光パネルに用いれば、電線に電気パルス破碎を行い、銅・銀を局所的に破壊、昇華させ、粒子として回収できる。衝撃でシリコン粒子も剥離され、それぞれ原料としてリサイクルできる。従来のシュレッダーラインを使った破碎・選別よりも金属濃度が上がっている。また、この方法を応用すれば、電線から銅と被覆材を分けることも可能だと所教授は話す。

現在、試作している間接アーク放電法を用いた電気パルス法の装置では、小規模で使用済み金属製品を大量に処理することは難しい。そのため、所教授は新しい放電法について研究を重ねることももちろん、大型の試作機なども製作する予定。実際のリサイクル現場での実用化を、5年後をめどに目指している。所教授は、「金属同士など素材として似ているものを引きはがすのは難しいため、それも今後の課題の一つ」と話す。（太田 祐一）

粉砕や選別によって有用金属とそうでないものを選り分ける選鉱(ミナラルプロセッシング)などの技術を用いて、環境シネスやリサイクルリソースに関する研究を20社以上の企業と共同で取り組む気鋭の研究者がいる。早稲田大学の所長階級教授は、廃水・汚泥処理、レアメタルの選別など、環境問題と関連する多種多様な研究を展開し、学界だけでなく経済界や行政からも注目されている。同大学の西原稲田キヤンパスにある所教授の研究室で、金属リサイクルと環境シネスについて話を聞いた。

—何故この研究の道を選んだのか。

「ずっと、環境に関することに関わりたいと思っていました。また私が高校生だった1982年に、リオ・デ・ジャネイロで『環境と開発に関する国際連合会議』が開催され、これを一つの契機として、当時の大人たちが『これからは環境の時代だ』と思っていていたのを覚えています。学生時代は、理系教科書得意だったけど、歴史や政治経済なども好きだった。理系一辺倒ではない自分は、理系の技術を生かしながら、現在の社会システム・社会問題を直接的に解決することができるとは思っていました。環境問題に関する仕事をしたいという選択をした。しかし、今にして思えばそのころは、環境が何なのか、よく分かっていなかったように思ふ。当時は地球温暖化やオゾン層のことがわかり、環境に関するものだとはいえなかった。だが大学に入って学んでみると、省エネプロセスや資源開発も、環境に関するものではあり、すべてのものが環境問題につながっているように思ふようになった。早稲田大学入学後、最初に所属した研究室は水環境研究室だった。そこで廃水処理について物理化学的なアプローチで研究し、その後、東京大学大学院に入り、選鉱と鉱山分野の面白さに気付いた。一見

「廃水の処理技術と固体(金属)の分離技術である選鉱はまったく違う分野のように思ふかもしれないが、資源開発という観点で見れば、どちらも鉱山で行う工程で、関連性はある」

—具体的に、金属に関するどのような研究をしているのか。

「固体を粉砕して単体分離するというプロセスのなかにも、学術的な理論立てがある。現場で働いている方は感覚的に分かっていることであっても、学術的にそれを研究することで社会的に共有できる。たとえば、現場では『こうした刃の形状で何分砕けばよい』というノウハウはあるかもしれないが、その理由が明らかにされていないことが多い。そこで研究者の出番である。物の砕かれ方によって粉砕機の刃の形状を変えたり、容

—と共同で展開している。また、いろいろな材料を製するプロセスでは液体に固体が混ざった状態のスラリーという形態に使用する場面もある。しかしスラリーは金属面でもエネルギー面で非常にコストがかかり、固体のまま材料化できれば省エネになる。このプロセスを最適化する研究も展開している」

—資源循環型社会の実現に向けて、何が重要か。

「資源循環型社会の実現に大事なものの一つは、バランスだと思ふ。先進的な技術だけが歓迎されるわけではなく、ある程度大量な物を処理する能力や、コストパフォーマンスも大事で、そういったバランス感覚が必要だ。さらに、全体のリサイクルのプロセスのなかで、前段と後段には含まれた自身のプロセスの役割をきちんと把握し、自分(自社工場など)の役割を俯瞰的に把握するという意識でのバランス意識が大事。金属、プラスチック、ガラスなどの多種多様な素材を社会全体でゴミにしないというバランスなどももちろん肝要で、なにか一

「研究者の自分の一つは、研究分野の活性化にある。その一助になればいいと思ふ多様な企業と仕事をしたい。一般企業の方と共通の目的に向かってともに努力する過程で、私が学生かともある。研究と企業は自分だけの研究だけ、あるいは自社の利益だけを追求しても良くないもので、結局は両者ともに人材育成が大事。良質な人材が多量に育たるか否かはその分野(企業)がどれほど活性化するかが決まるといふように、もちろんそのためには資金も必要だということも共通している」

—金属製品の業界に思うところは。

「わが国の金属素材は高レベルにある。現在のテクノロジーを支えている。もっと前に出てきてほしいのではない。金属業界の産業構造が消費者に見えにくいのが難点で、卓越した技術を持っていることを消費者にアピールできないかと思ふ。われわれ研究者も協力ながら協力しているつもりだが、一層の努力を要すると思ふ」

—金属リサイクル業界に対してメッセージを。

「解体・粉砕・選別の技術は、欧米諸国に負けない技術を持っていてほしいと願っている。ほとんど鉄で構成される鉱山汚泥などが、前例がないなどの理由で受け入れられにくいケースがある。と聞くと、リサイクルに携わる企業の方々には、今後、多種多様な品物の積極的な受け入れに注力してほしいと願っている。さらに言えば、リサイクル業界に携わる企業は単なる受け身の処理ではなく、メーカー側への影響力を持つていかなるべきだと感じている。具体的にはこの素材はリサイクル処理できないから使わないでほしい」といったことをメーカーに意見してよいと思ふ。メーカー側も製品生産前にそうした声を傾聴する姿勢を持つべきだ。徐々にならぬように思ふ。リサイクル業界が受け身の処理をする時代はもう終わりに向かっている、と信じたい」

## スペシャリストに聞く 多種多様な環境関連研究を展開

早稲田大学 教授 所千晴氏



# 資源循環のバランスが大切

## リサイクル側へ意見をメーカー側へ意見を

器の形状を変えたり、一緒に混ぜるものを変えたりすると、リサイクルの効率があがるため、実証実験を繰り返している。そしてその先にイノベーションがあるかもしれない。ほかにも、製鉄の過程でも私たちの研究要の素材は均一性が保てなかったり、輸送の過程で総量が減少してしまったりすることがある。そういった問題を粉末工学を用いて解決する研究を高炉メーカー

▽所千晴(とことろ・ちはる)氏=1998年早稲田大学理工学部卒業。03年東京大学大学院工学系研究科修了。04年早稲田大学助手。15年早稲田大学創造理工学部教授。博士(工学)。専門領域は環境浄化やリサイクル分野における分離技術。日本学術会議第三部会員(内閣府)、中央鉱山保安協議会委員、産業構造審議会自動車リサイクルWG委員(共に経済産業省)など、中央行政と連携しての活動も行う。ピアノの腕前は折り紙付きで、99年日本アマチュアピアノコンクール第1位、ならびに審査員特別賞受賞。「長らく弾いていなかったが、最近になってまた弾きはじめている」と笑う姿は屈託がない。2人の男子の母。75年生まれ、兵庫県出身。

(松井 健人)



## 参考文献

- 堀内 健吾, 松岡 光昭, 所 千晴, 大和田 秀二, 薄井 正治郎. "磁選による使用済みリチウムイオン電池からのコバルト回収に適した加熱条件の検討". 化学工学論文集. 2017, 第43巻 (第4号), pp. 213-218.
- 松岡 光昭, 堀内 健吾, 所 千晴, 大和田 秀二, 薄井 正治郎. "使用済みリチウムイオン電池からの分級によるコバルト回収に適した加熱プロセスおよび粉碎プロセスの検討". スマートプロセス学会誌. 2016, Vol. 5, No. 6, pp. 358-363.
- 所 千晴, 大和田 秀二, 薄井 正治郎. 第23章 "リチウムイオン電池のリサイクル技術" (吉野 彰, 佐藤 登 監修. "車載用リチウムイオン電池の高安全・評価技術"). シーエムシー, 2017, pp. 277-284.
- 所 千晴. "資源循環における固体分離濃縮技術の概要". 材料の科学と工学, 2017, Vol. 54, No. 2, pp. 6-9.
- 所 千晴. "都市鉱山のリユース/リサイクルを支える解体技術". 化学工学, 2018, Vol. 82, No. 8, pp. 418-420.
- 所 千晴. "循環型社会におけるLIBリサイクルのこれから". クリーンテクノロジー, 2019, vol. 29, No. 9, pp. 22 - 25.
- 所 千晴. "蓄電池リサイクル高度化のための物理的分離技術の進展". 工業材料, 2019, vol. 67, No. 11, pp. 75 - 79.



# 自己紹介（所 千晴）

1998年3月 早稲田大学 理工学部 資源工学科 卒業  
2000年3月 東京大学大学院 工学系研究科 地球システム工学専攻 修士課程修了  
2003年3月 同上 博士課程 修了（博士（工学））

2004年4月 早稲田大学 理工学部 助手（環境資源工学科）  
2007年4月 同 理工学術院専任講師（創造理工学部 環境資源工学科）  
2009年4月 同 准教授（創造理工学部 環境資源工学科）  
2015年4月 同 教授（創造理工学部 環境資源工学科） 現在に至る

2016年9月 早稲田大学創造理工学部/研究科 教務主任 現在に至る  
2016年10月 日本学術会議 第三部会員 現在に至る  
2016年11月 東京大学生産技術研究所 特任教授 現在に至る  
2018年9月 早稲田大学ダイバーシティ推進室長 現在に至る

所属学会： 資源・素材学会・環境資源工学会・粉体工学会・化学工学会・日本金属学会  
日本エネルギー学会・廃棄物資源循環学会・日本化学会

委員歴： 経済産業省・環境省・JOGMEC・東京都・横浜市・川崎市等  
Advanced Powder Technology・Minerals  
粉体工学会誌・資源・素材学会誌等

主な研究テーマ： 新規資源循環創出のための分離技術の高度化および分離機構解明  
界面工学に基づく廃水・汚染水からの有害金属イオン除去メカニズムの解明  
粉体シミュレーションによる粉体プロセスの機構解明および高度化  
プロセスミネラロジーに基づく環境浄化・資源循環プロセスの高度化