

レアメタル資源戦略と回収技術

廃棄物・資源循環学会
「レアメタルリサイクルに関する合同講演会」

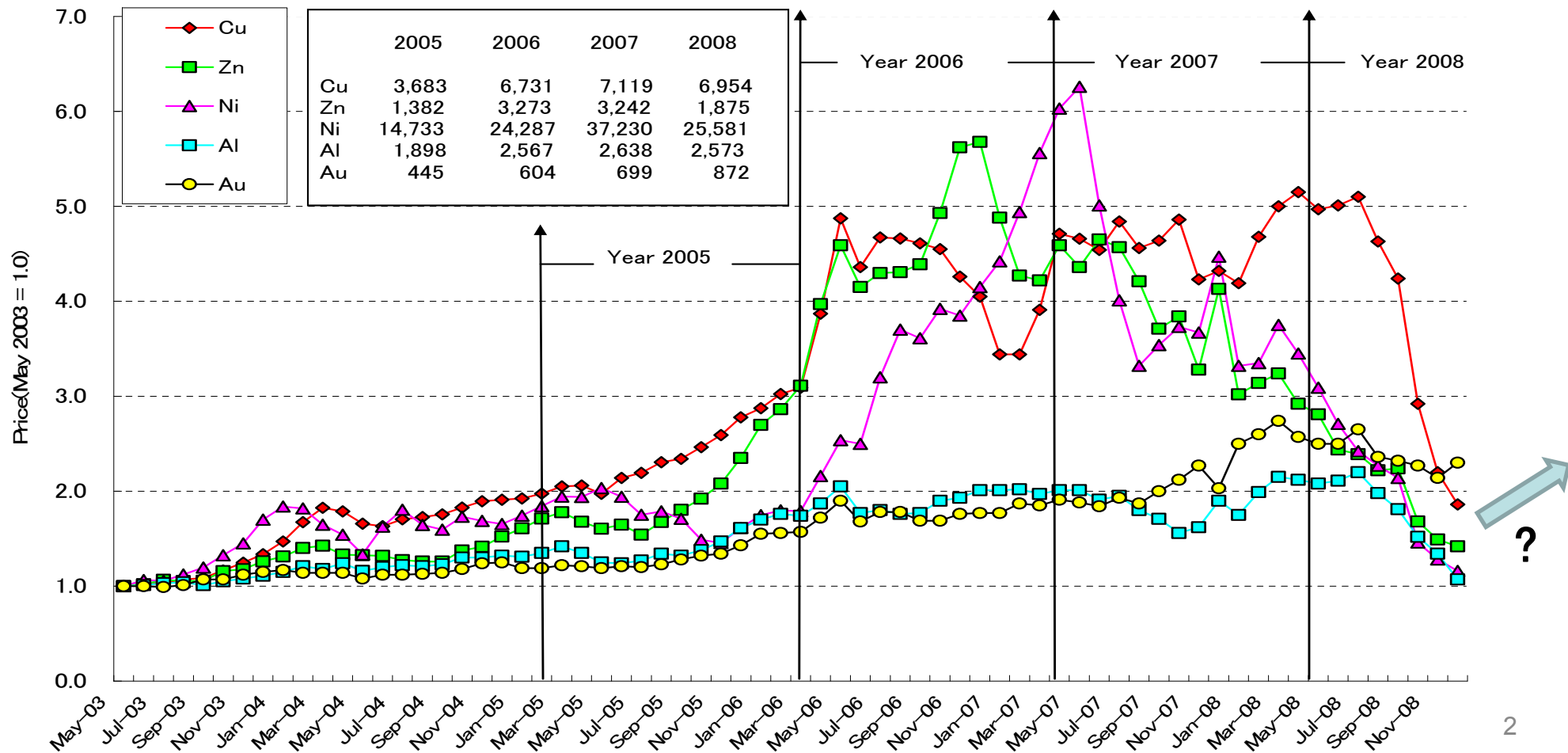
2010年7月9日

@ 日本大学理工学部駿河台校舎

早稲田大学理工学術院・大和田秀二
東北大学多元物質科学研究所・中村崇

鉱物資源価格の変動（2003年5月～2008年12月）

- ・ 金属価格の高騰が始まった2003年5月(=1.00)から2008年12月までの価格の推移を検討した。対象金属はLMEで決定される銅, 亜鉛, ニッケル, アルミ, 金とした。
- ・ 2003年の価格に比較して、ニッケル・銅・亜鉛価格のピーク時には5～6倍にも高騰し、アルミや金は2倍程度となっている。
- ・ 2008年10月以降には金融危機を背景に、金を除いて、価格が急落。



レアメタルの定義

レアメタル31 鉱種
(希土類は17元素で1 鉱種)

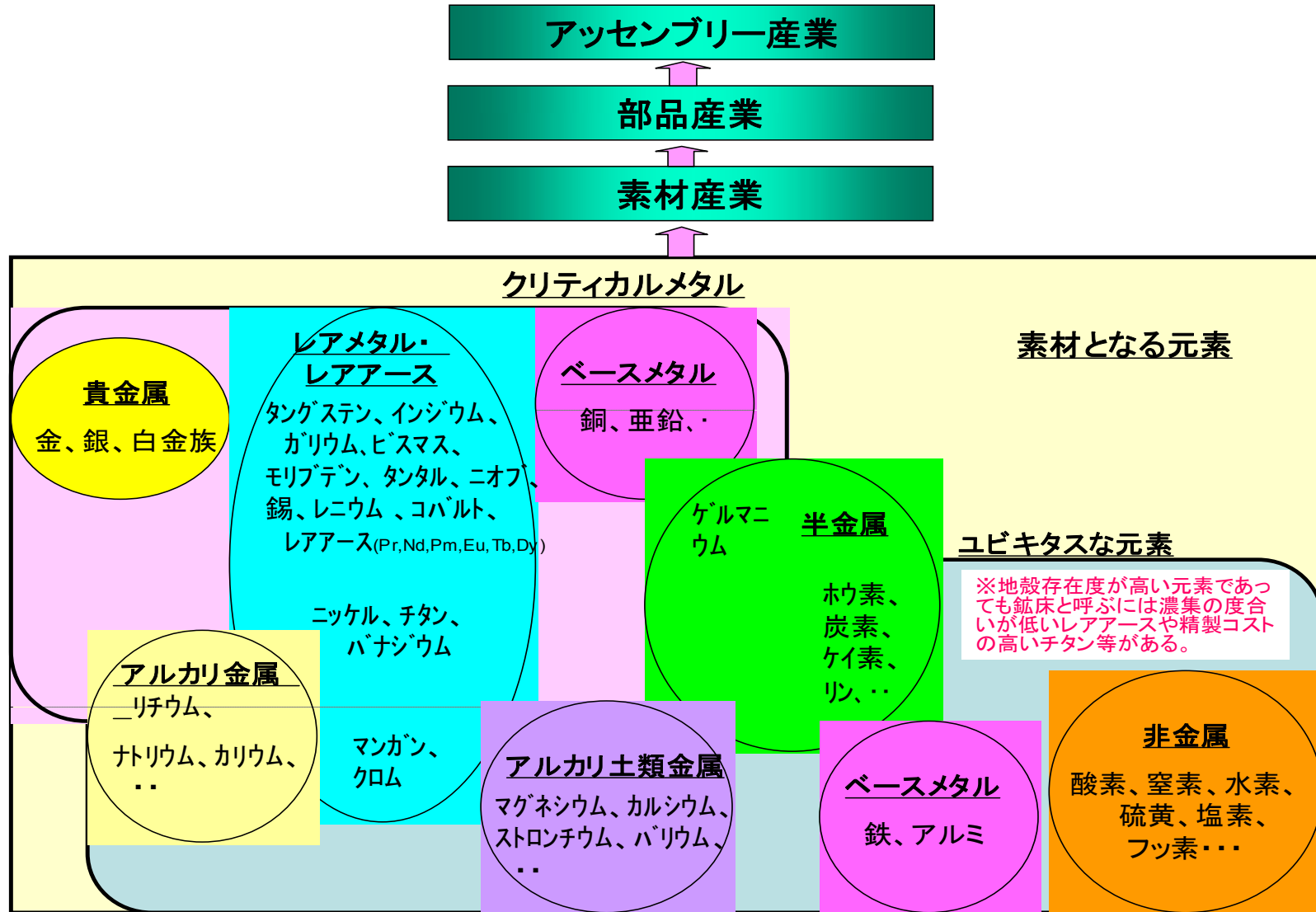
族 周期	I A	II A	III B	IV B	V B	VI B	VII B	VIII	I B	II B	III A	IV A	V A	VI A	VII A	O		
	アルカリ族	アルカリ土族	希土族	チタン族	バナジウム族	クロム族	マンガン族	鉄族(4周期) 白金族(5・6周期)	銅族	亜鉛族	アルミニウム族	炭素族	窒素族	酸素族	ハロゲン族	不活性ガス族		
1	1 H 水素															2 He ヘリウム		
2	3 Li リチウム	4 Be ベリリウム	希土類(RE)								5 B ホウ素	6 C 炭素	7 N 窒素	8 O 酸素	9 F フッ素	10 Ne ネオン		
3	11 Na ナトリウム	12 Mg マグネシウム									13 Al アルミニウム	14 Si ケイ素	15 P リン	16 S イオウ	17 Cl 塩素	18 Ar アルゴン		
4	19 K カリウム	20 Ca カルシウム	21 Sc スカンジウム	22 Ti チタン	23 V バナジウム	24 Cr クロム	25 Mn マンガン	26 Fe 鉄	27 Co コバルト	28 Ni ニッケル	29 Cu 銅	30 Zn 亜鉛	31 Ga ガリウム	32 Ge ゲルマニウム	33 As ヒ素	34 Se セレン	35 Br 臭素	36 Kr クリプトン
5	37 Rb ルビジウム	38 Sr ストロンチウム	39 Y イットリウム	40 Zr ジルコニウム	41 Nb ニオブ	42 Mo モリブデン	43 Tc テクネチウム	44 Ru ルテニウム	45 Rh ロジウム	46 Pd パラジウム	47 Ag 銀	48 Cd カドミウム	49 In インジウム	50 Sn スズ	51 Sb アンチモン	52 Te テルル	53 I ヨウ素	54 Xe キセノン
6	55 Cs セシウム	56 Ba バリウム	57~71 ランタノイド	72 Hf ハフニウム	73 Ta タンタル	74 W タングステン	75 Re レニウム	76 Os オスミウム	77 Ir イリジウム	78 Pt 白金	79 Au 金	80 Hg 水銀	81 Tl タリウム	82 Pb 鉛	83 Bi ビスマス	84 Po ポロニウム	85 At アスタチン	86 Rn ラドン
7	87 Fr フランシウム	88 Ra ラジウム	89~103 アクチノイド															

(経済産業省・資源エネルギー庁・総合資源エネルギー調査会・鉱業分科会・レアメタル対策部会)

クリティカルメタルとは

- ① 材料，素材としてなくてはならない**必須金属**（必要な機能・性能を持たせ，高める）
であり，かつ，
- ② 需要の伸びが大きく，資源量や回収・精製の困難性など**供給上の不安**がある金属
あるいは，
- ③ 価格が高騰し，ユーザーにとってコスト面から**代替を望みつつも出来ない**金属である。

クリティカルメタルのイメージ



クリティカルメタル

(金属鉱物, フェロアロイ, 銅, 鉛, 亜鉛, アルミニウム, その他の非鉄金属地金)

クリティカルメタルを直接的・間接的に
使用する産業部門の生産額



912.8兆円

直接的には大きくないが
波及効果は非常に大きい

クリティカルメタルを含む2次製品部門の生産額
(電線・ケーブル, 伸銅品, アルミ圧延製品,
非鉄金属素形材, その他の非鉄金属製品)

4.2兆円

クリティカルメタル部門の生産額

1.5兆円

廃棄される金属量の予想

EUにおけるWEEEの廃棄量は1998年のデータで国民一人当たり年間14 kg, EU
総計で約600万tであり, 毎年3~5%増加していると報告
→ 現在では一人あたりの年間廃棄量は20kgに迫るものと推定

我が国の廃電気・電子機器に含まれる金属量推定※
(廃棄ポテンシャル2005生産量ベース)

※ 白鳥・中村：資源と素材, vol.123, p.171-178,(2007)

総量 約250万t, 国民一人あたり19.4kg

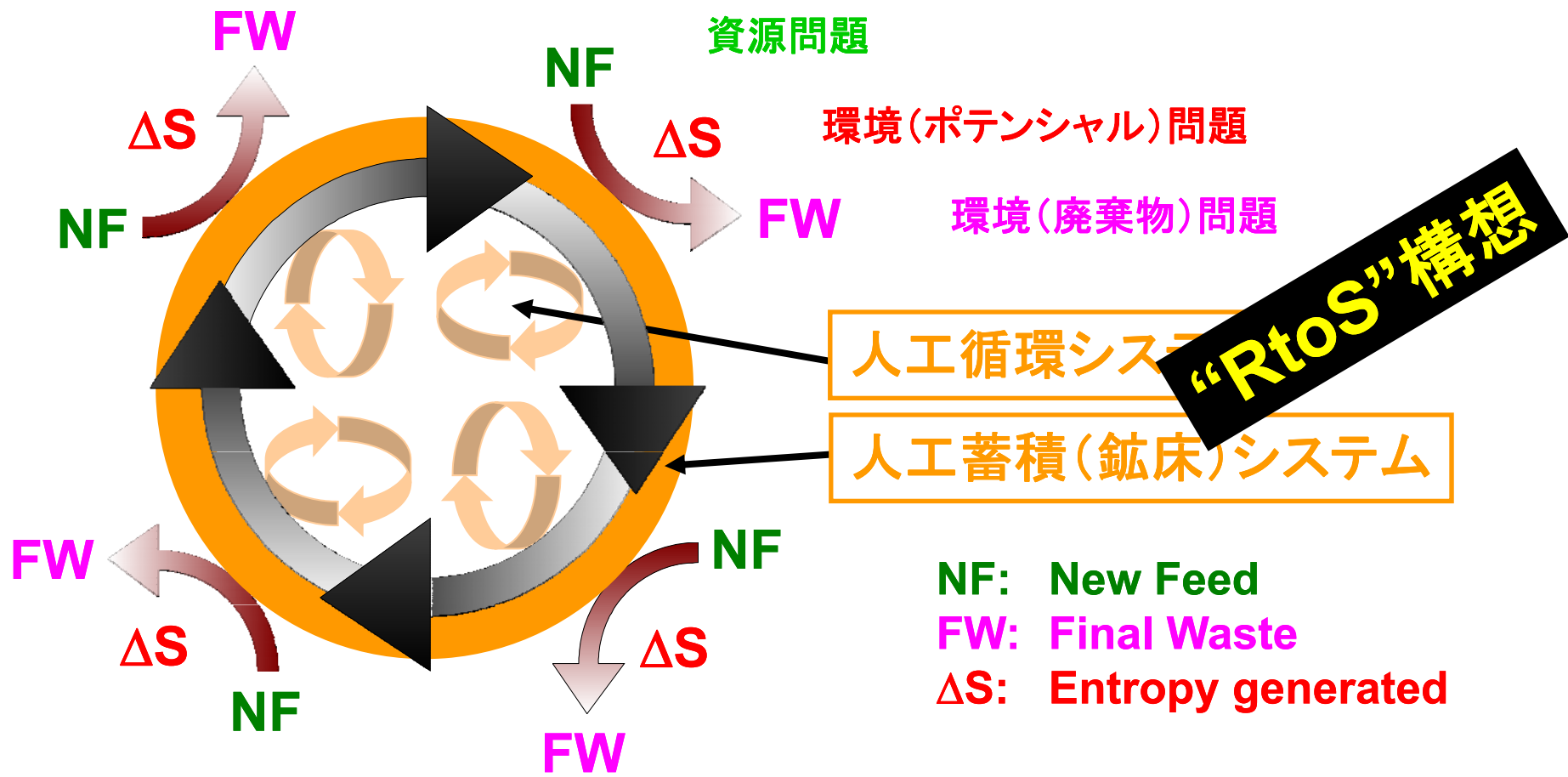
廃棄される可能性のある機器中の金属量は以下

Cuは約110,000t, Pbは約10,000t, Snは約5,300t

貴金属類も使用量が少ないが, SDAでは含有量が高いため, 数10t以上, レアメタル類も同等

(Ga・Ge・In・Ta・Ndなどについては, 使用用途は明らかだが, 工程スクラップで回収される以外, 一般使用品からはほとんど回収されない)

将来も資源と考えられない形になってしまう可能性がある。



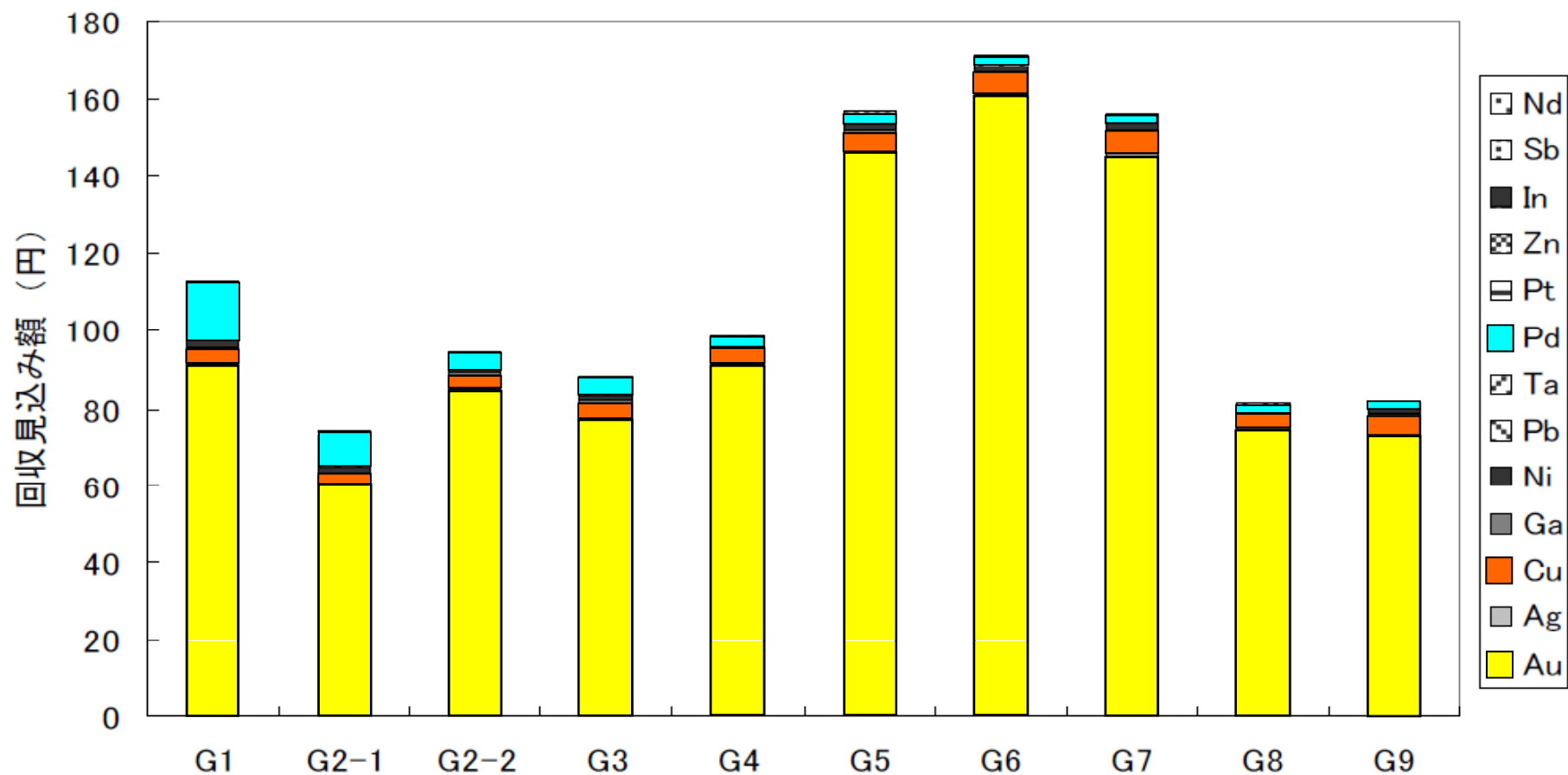
環境調和型資源循環(人工循環)システムのあり方

レアメタル資源確保に関する対策

- ① 探鉱開発の推進： レアメタル探査の強化を中心とした
(海外)資源の確保, 海底熱水鉱床
- ② **リサイクリングの推進**： いわゆる「都市鉱山」の開発
- ③ 代替材料開発： 特殊な希少金属を使用しなくても機能を
出現させる材料の開発
- ④ レアメタル備蓄： 鉄鋼添加元素にIn, Gaが追加
V, Cr, Mn, Co, Ni, Mo, W, **In, Ga**

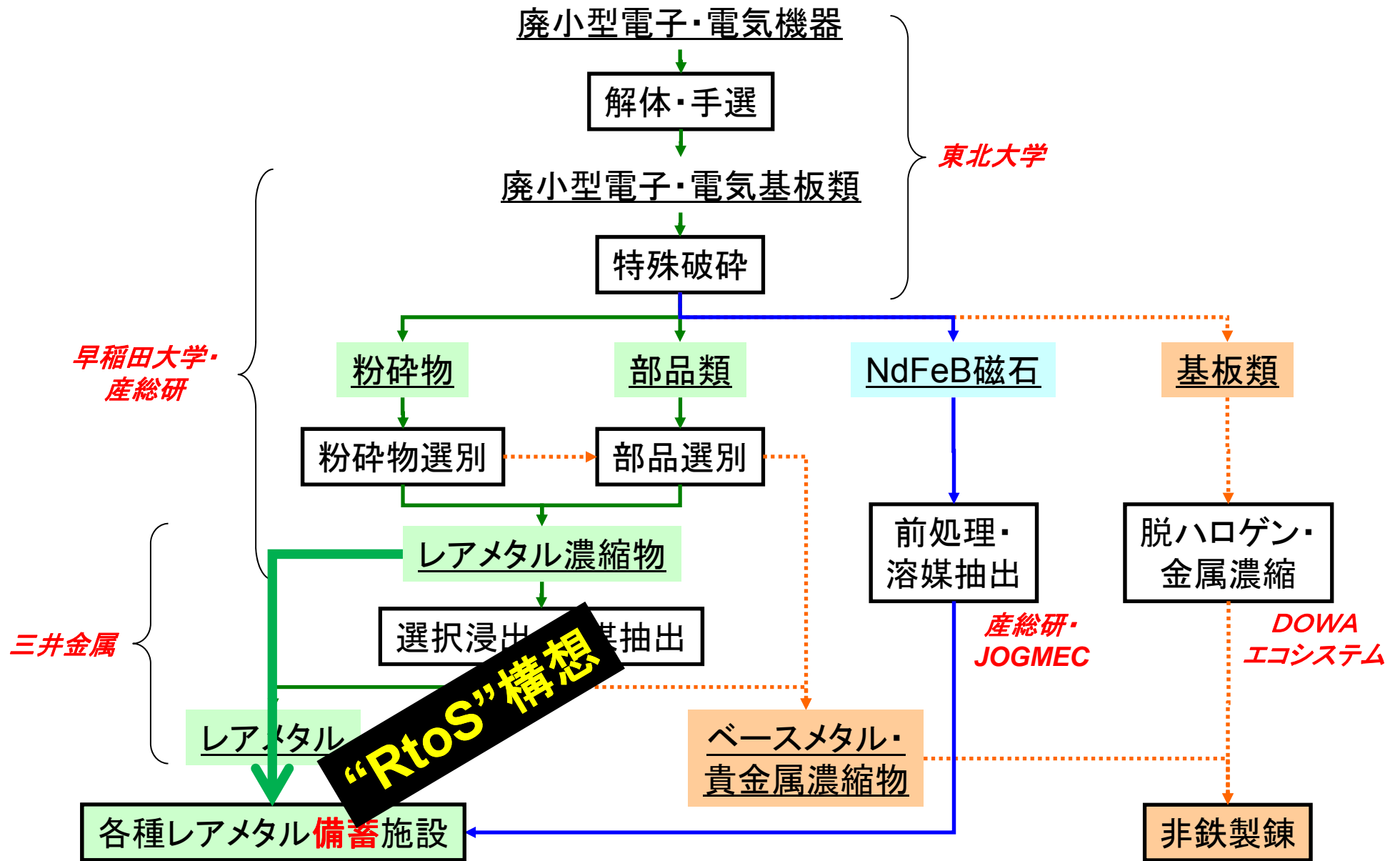
(経済産業省・資源エネルギー庁・総合資源エネルギー調査会・鉱業分科会・レアメタル対策部会)

廃電子機器からのレアメタル回収



各種携帯電話中の素材経済評価
 (横軸: 携帯電話の種類)

松野, 2009



JOGMECにおける廃小型電子・電気機器のレアメタルリサイクル技術フロー

主な着目元素類

➤ 回収対象元素：

Co, Pd, Ag, In, Nd, Dy, Ta, W, Pt, Au

➤ 有害元素： **As, Br, Hg, Pb, (Cd)**

▪ レアメタル備蓄9鉱種：

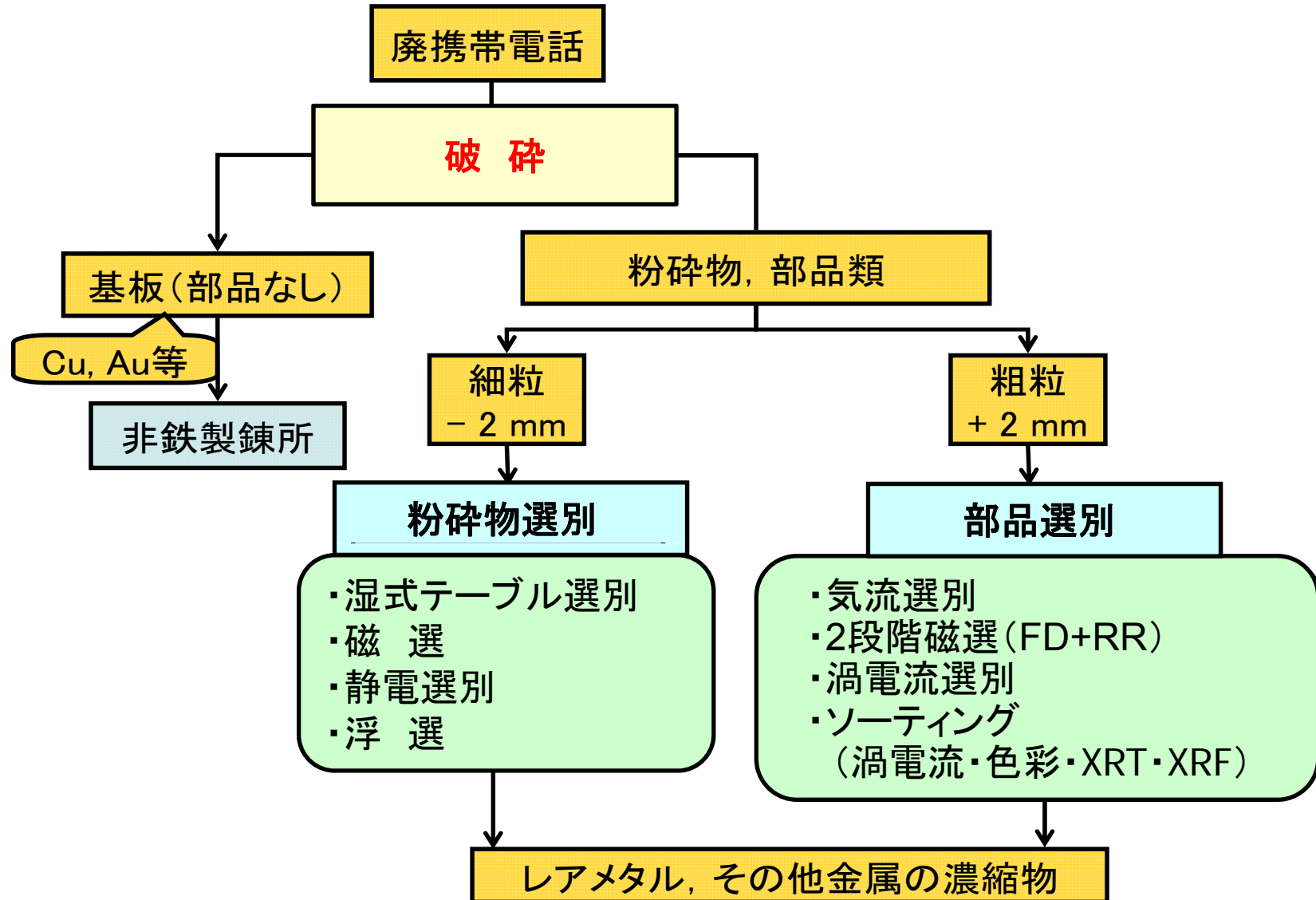
V, Cr, Mn, Co, Ni, Mo, W, In, Ga

▪ Sr, Nb, Ta, Pt, REE, , ,



Stockpiling warehouses in Ibaraki

レアメタル濃縮の基本フロー



3段階の「既存粉砕」プロセス

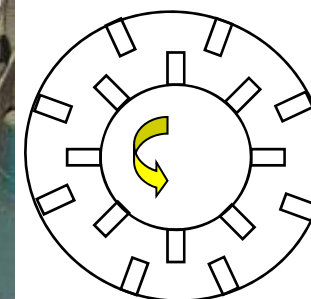
携帯電話本体

①2軸せん断式破砕機
(産物: -50 mm)

②1軸衝撃式破砕機
(産物: -20 mm)

③せん断式破砕機
(産物: -2 mm)

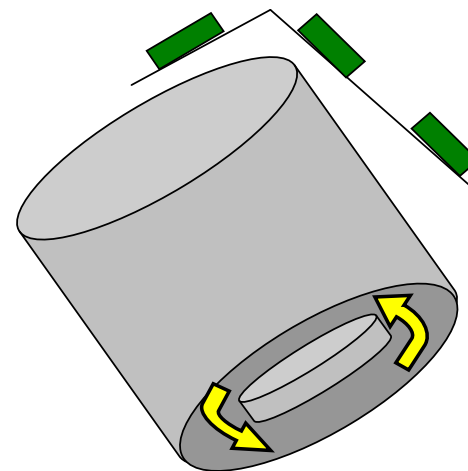
「既存粉砕物」試料



内部構造

「新規破碎物」試料

2段階の「新規破碎」



衝撃式「新規破碎」装置概要



携帯電話本体

破碎

手選

電子基板

液晶

破碎

手選

基板

携帯電話基板破碎物
(部品, 粉碎物粒子)

携帯電話本体破碎物
(ボディ片, 部品,
粉碎物粒子)





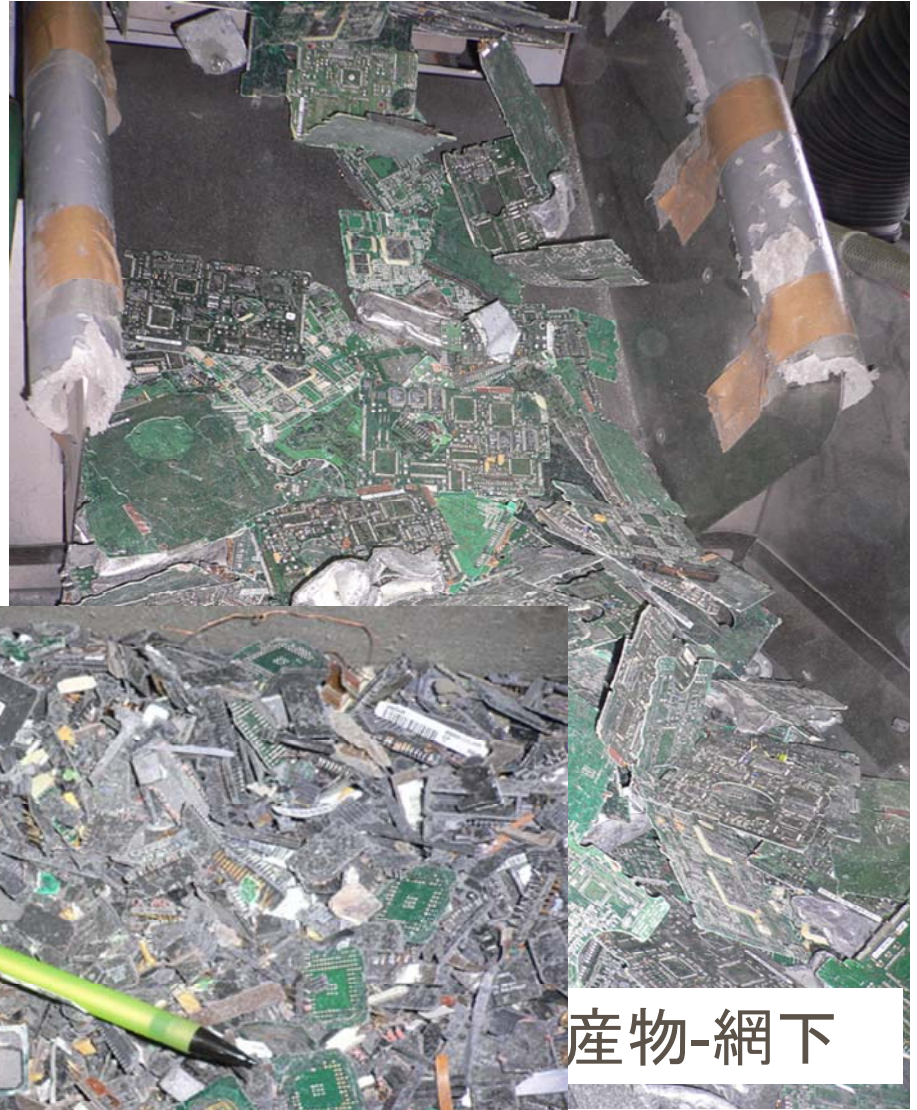
ハ



産物の手選



の排出



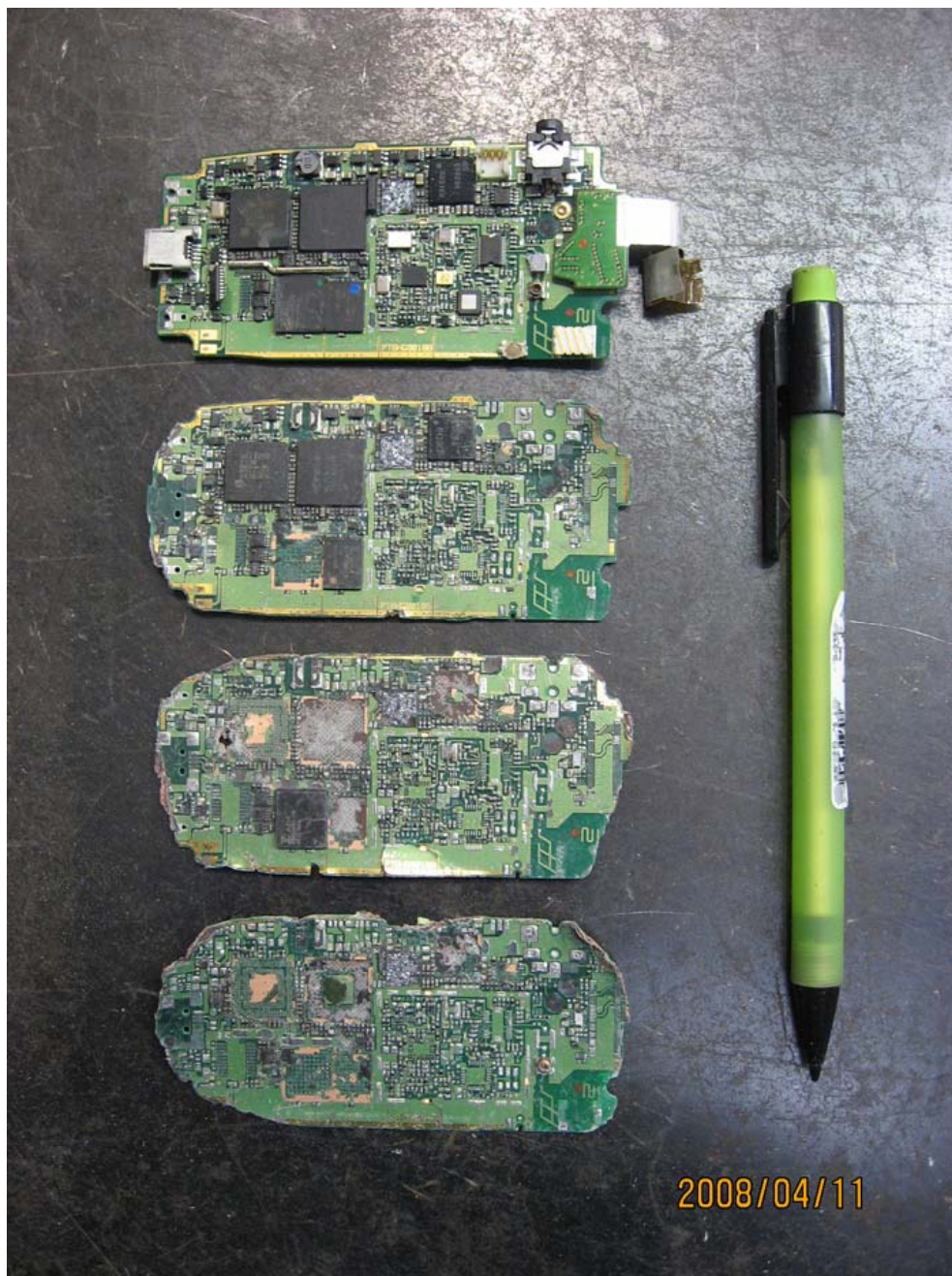
產物-網下

PC基板產物-網上



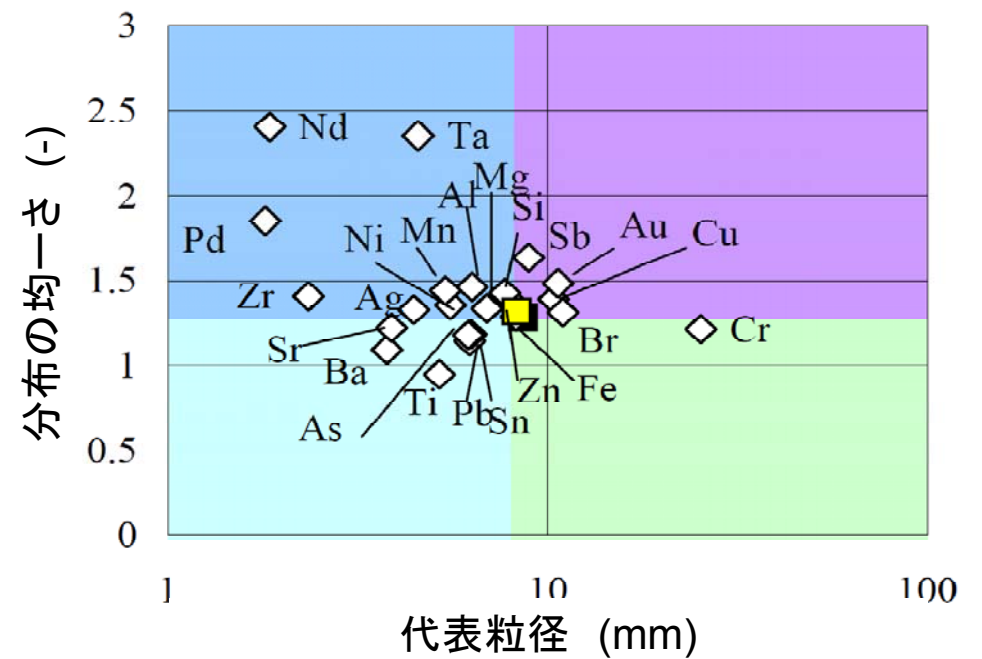
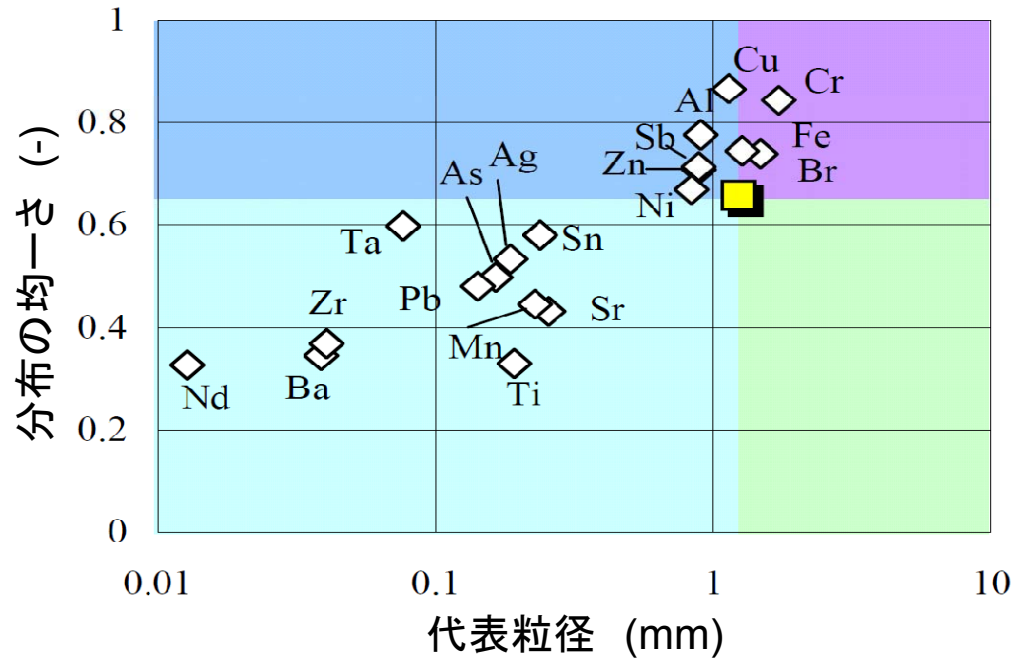
携帯電話産物

携帯電話網下産物2



各種条件下での破碎
にける基板と実装部
品の剥離状況

異なる破碎法による産物特性の把握



低速回転二軸破碎 + 高速回転衝撃破碎

ドラム型衝撃破碎

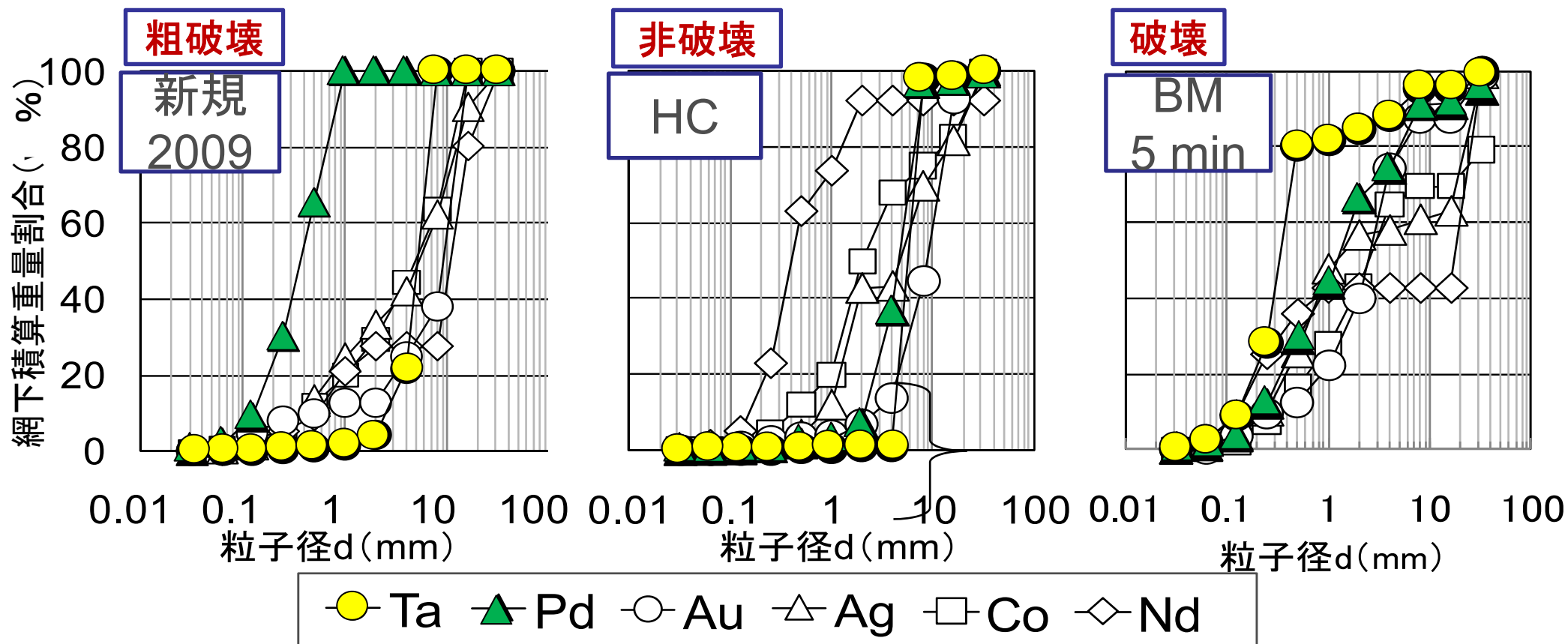
多くのレアメタルは細粒側に分布

細粒になるほど分布が広くなる
→ 選別**困難**

細粒になるほど分布が狭くなる
→ 選別**容易**

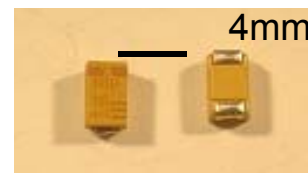
本研究での破碎機：ドラム型衝撃破碎機，ハンマクラッシャ，ボールミル，……

微量元素分配率の粒度依存性(通信基板)

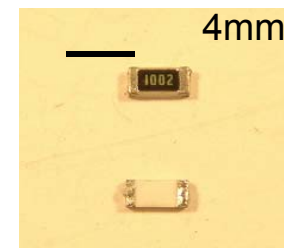


・ 粒度依存性は新規・HCで顕著

新規・HC ⇒ 特定粒群に集中(Ta)
 新規・HC ⇒ 特定粒群に集中(Pd)

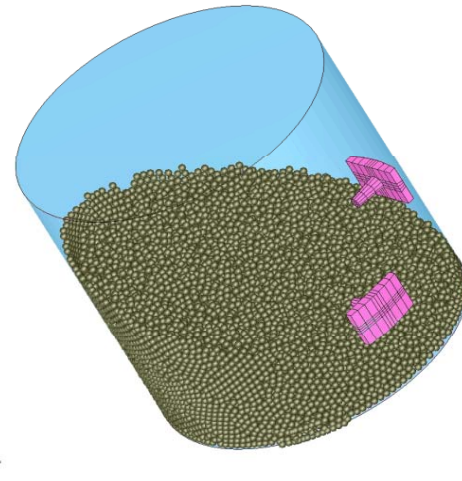
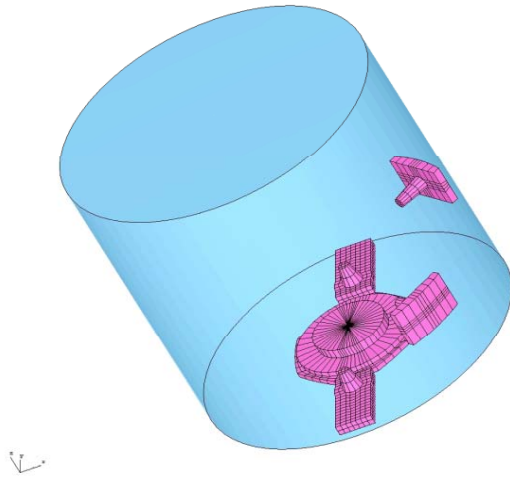


タンタルコンデンサ

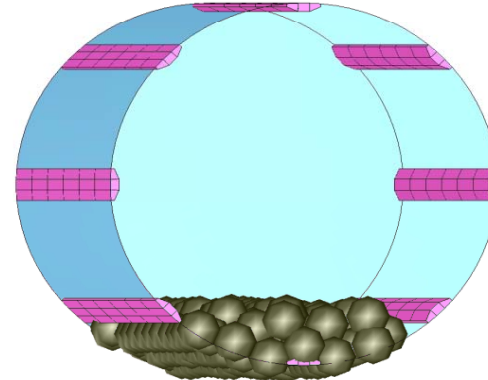
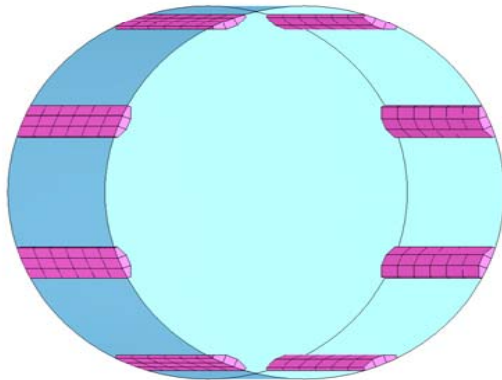


チップ抵抗

DEMシミュレーションによる破碎機構の解明

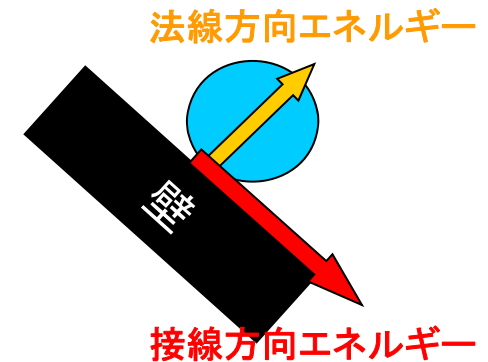
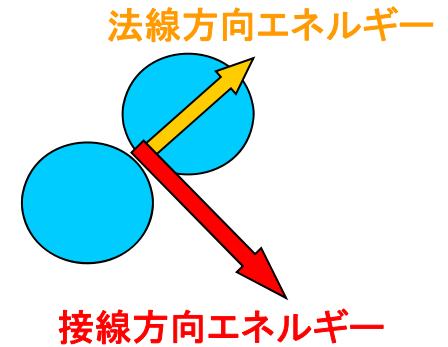
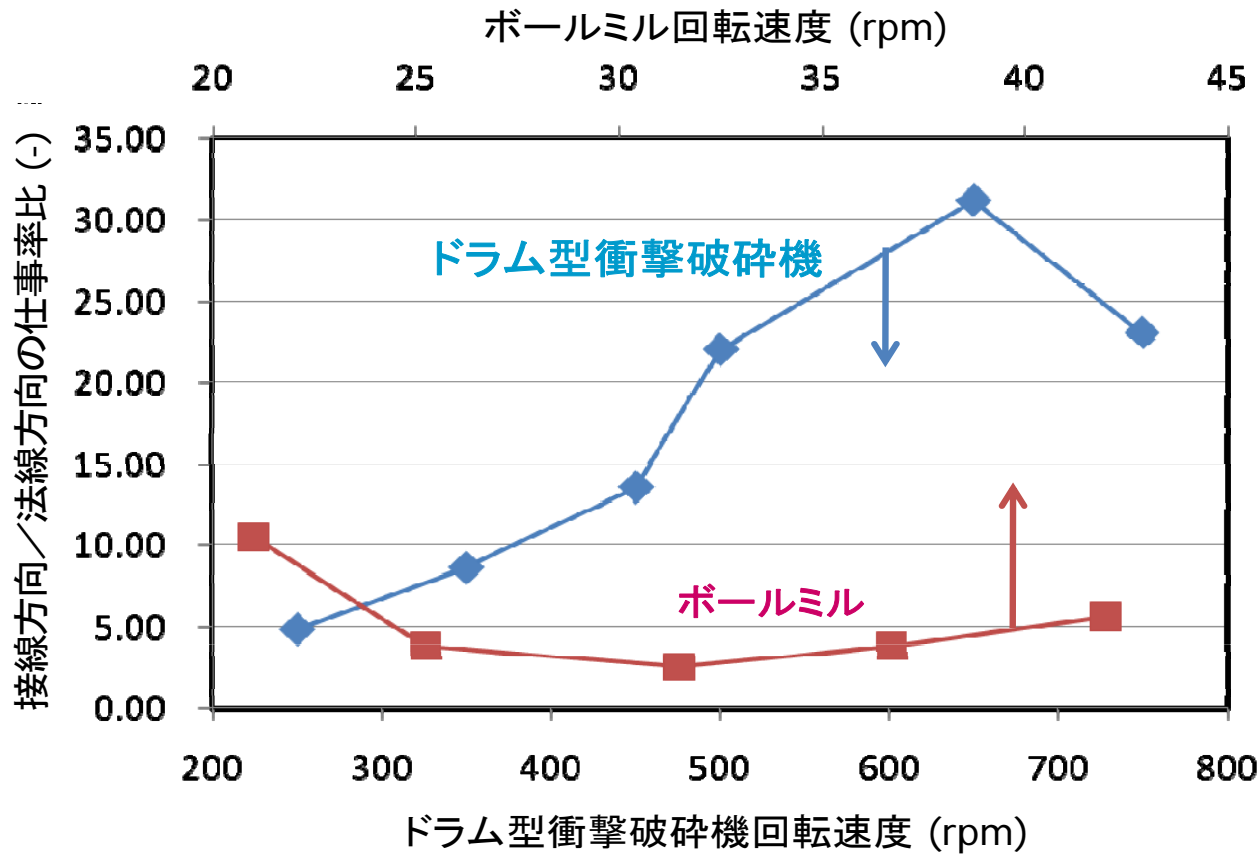


ドラム型衝撃破碎機



ボールミル

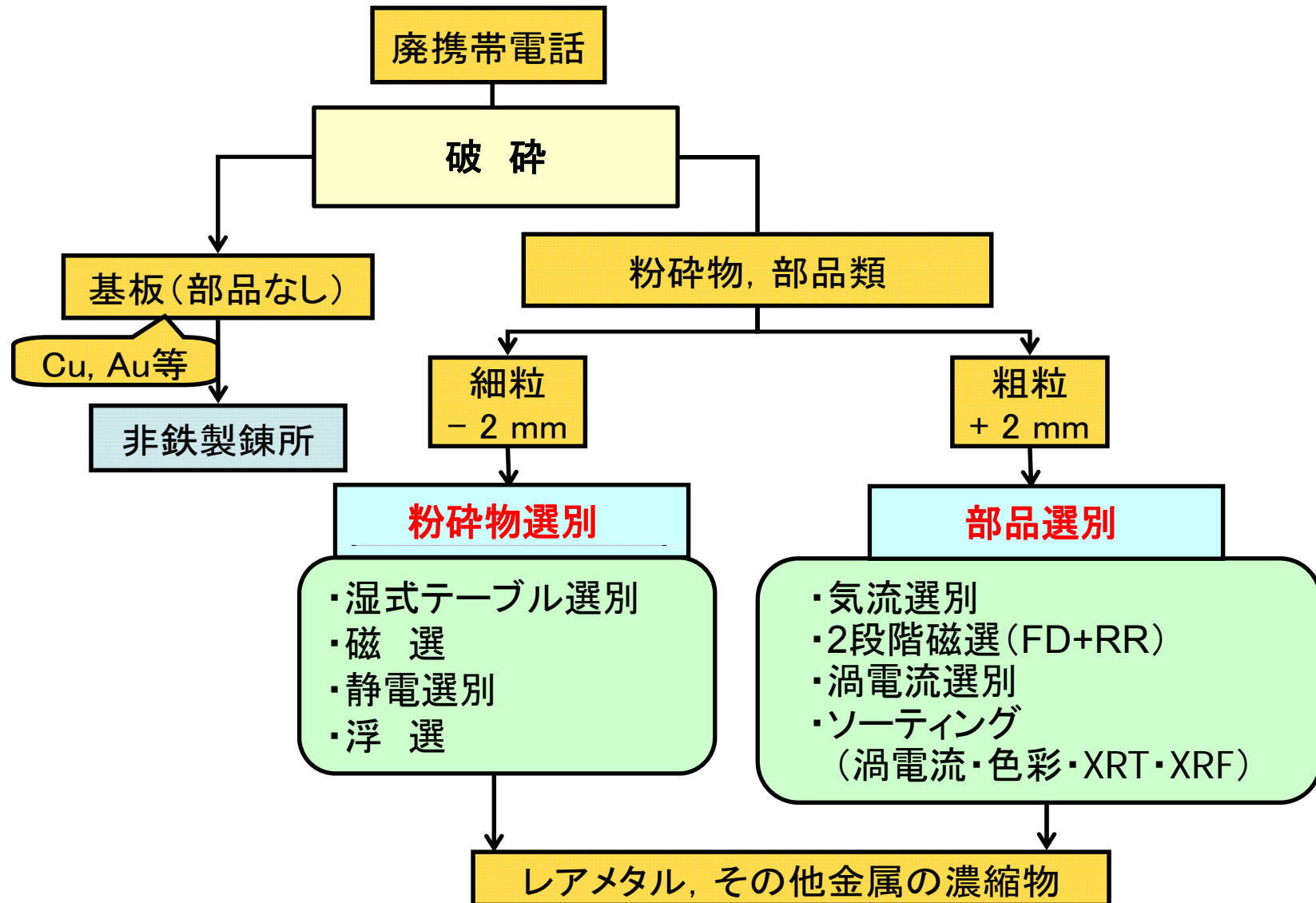
破碎時に発生するエネルギー分布



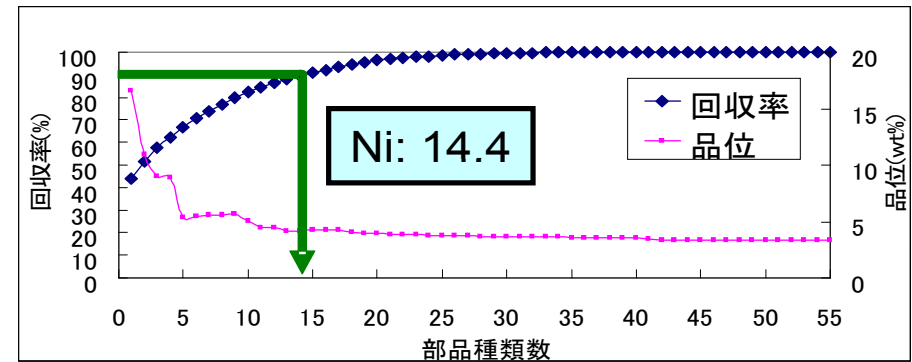
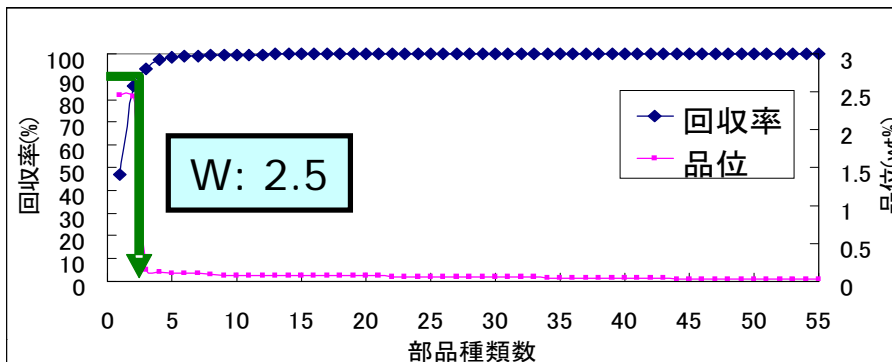
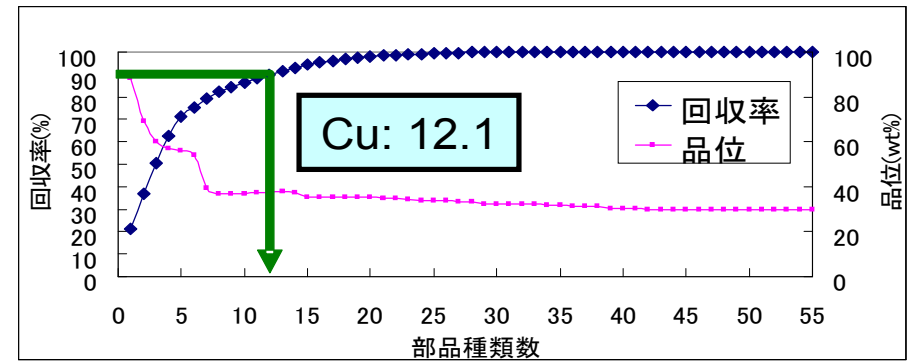
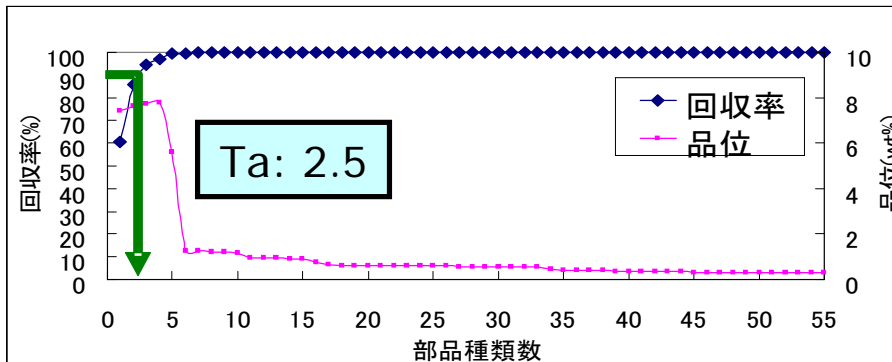
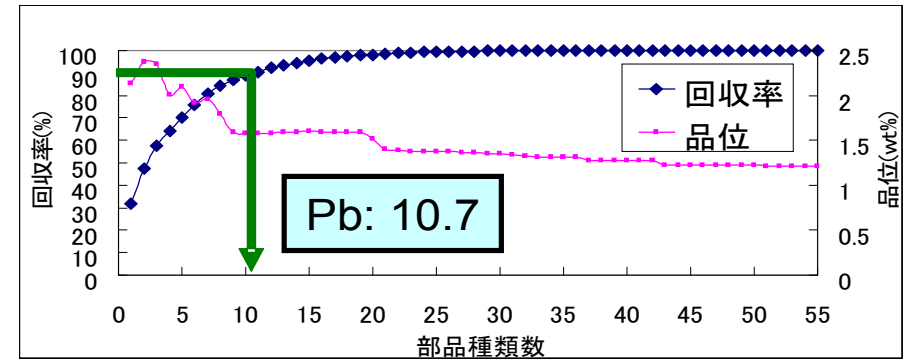
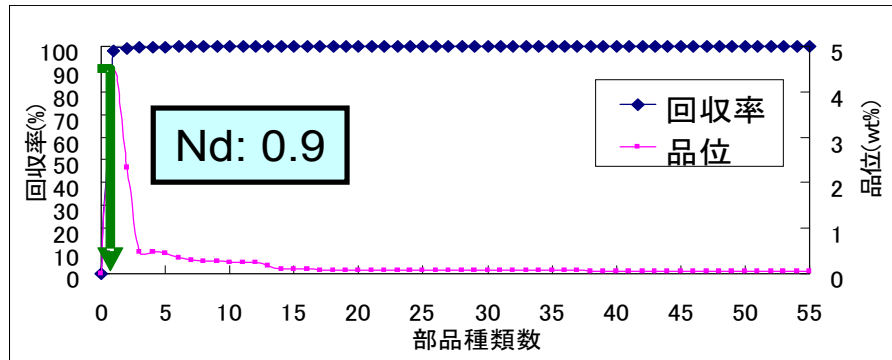
接線／法線方向の平均仕事率比と回転速度との関係

ドラム型衝撃破碎機では、ボールミルよりも**接線方向優位**
 → 実装部品類の**表面剥離**が促進

レアメタル濃縮の基本フロー



部品選別の有効性の指標



部品選別容易元素

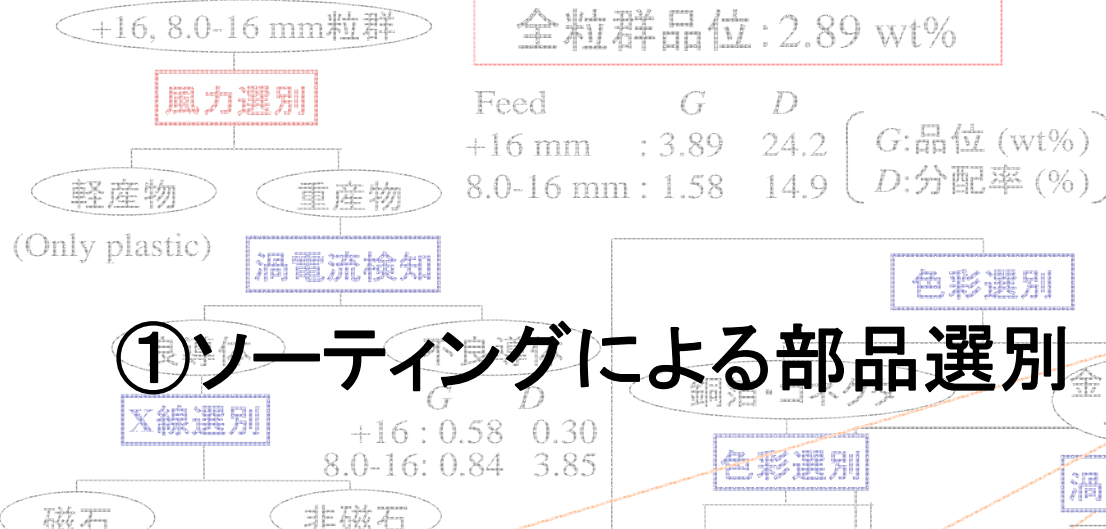
部品選別困難元素

部品選別・粉砕物選別の
組み合わせによる
物理選別処理フローの提案

物理選別処理フローにおける
Niの濃縮挙動
(携帯電話基板破砕物)

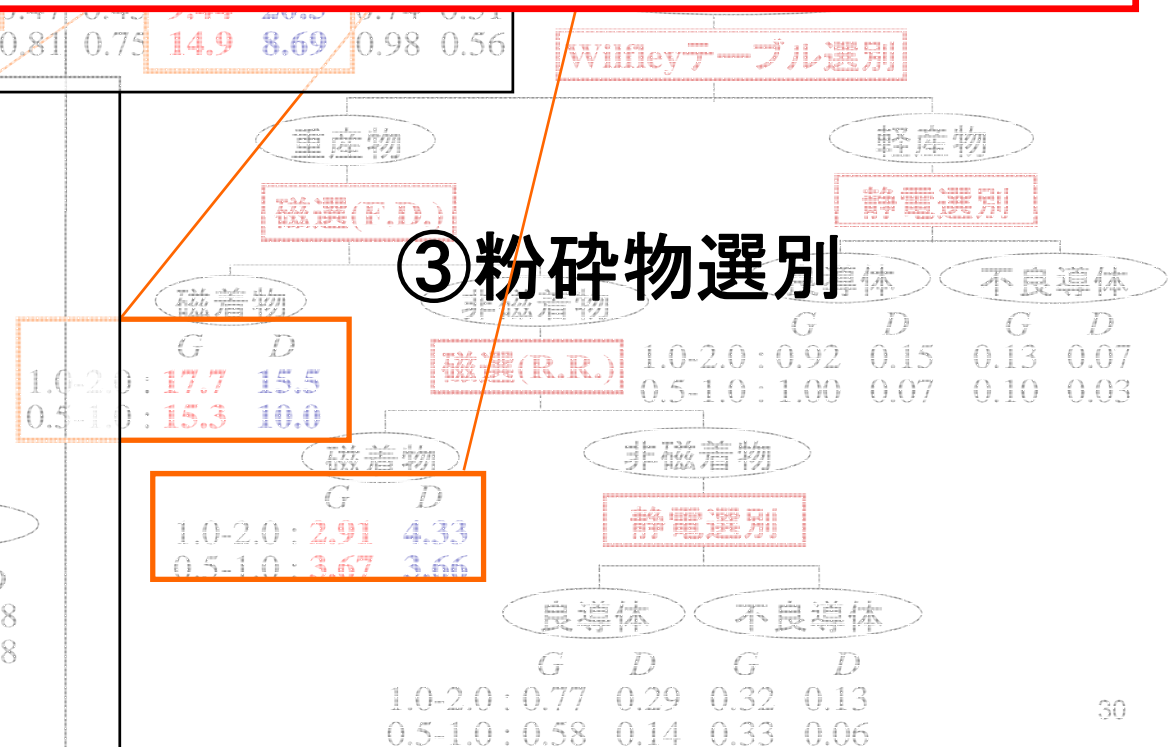
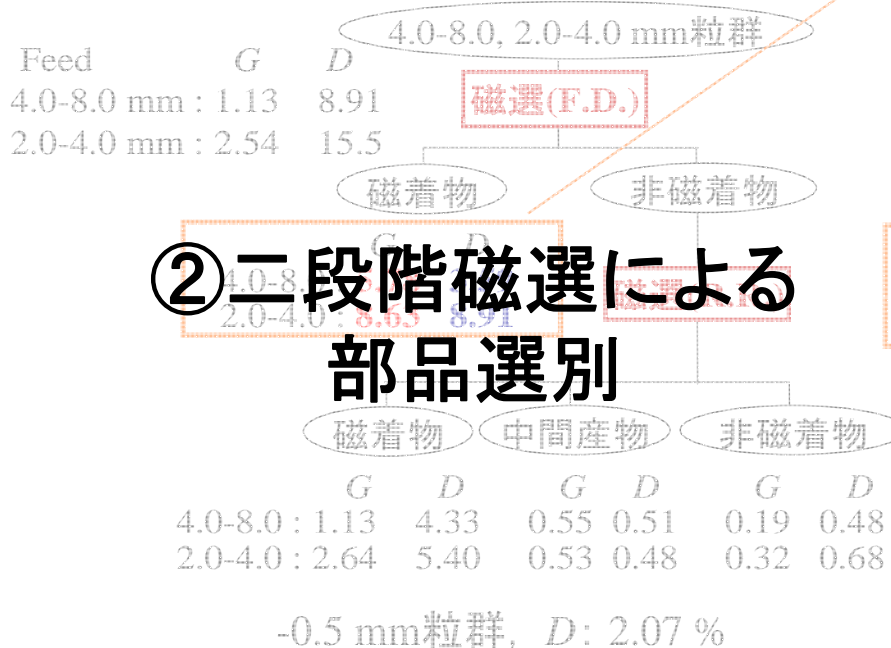
鉱石中のNi品位
1.90 wt%
(Lynn Lake 原鉱:
選鉱便覧, 1966)

全粒群品位: 2.89 wt%



部品選別・粉砕物選別により元素濃縮が可能

②二段階磁選による
部品選別



Feed	G	D
4.0-8.0 mm	3.47	74.7
2.0-4.0 mm	1.31	21.7

全粒群品位: 1.00 wt%

物理選別処理フローにおける
Taの濃縮挙動
(携帯電話基板破碎物)

4.0-8.0, 2.0-4.0 mm粒群

磁選(F.D.)

磁着物 非磁着物

Feed	G	D
1.0-2.0 mm	0.32	3.26
0.5-1.0 mm	0.03	0.21

鉱石中のTa品位
0.37 wt% (タイ国産
Sn 廃砂: 選鉱便覧, 1966)

Feed	G	D
4.0-8.0	0.35	0.59
2.0-4.0	1.06	1.41

①二段階磁選による

1.0-2.0, 0.5-1.0 mm粒群

部品選別のみにより元素濃縮が可能

	磁着物		中間産物		非磁着物	
	G	D	G	D	G	D
4.0-8.0	0	0	1.47	3.71	10.2	70.4
2.0-4.0	0	0	0	0	1.35	7.75

磁選(F.D.)

静電選別

②粉碎物選別

	磁着物		非磁着物		良導体		不良導体	
	G	D	G	D	G	D	G	D
1.0-2.0	0.93	2.21	0	0	0	0	0	0
0.5-1.0	0.11	0.19	0	0	0	0	0	0

磁選(R.R.)

静電選別

	G	D
1.0-2.0	0.24	0.98
0.5-1.0	0.01	0.02

良導体 不良導体

	良導体		不良導体	
	G	D	G	D
1.0-2.0	0	0	0.07	0.08
0.5-1.0	0	0	0	0

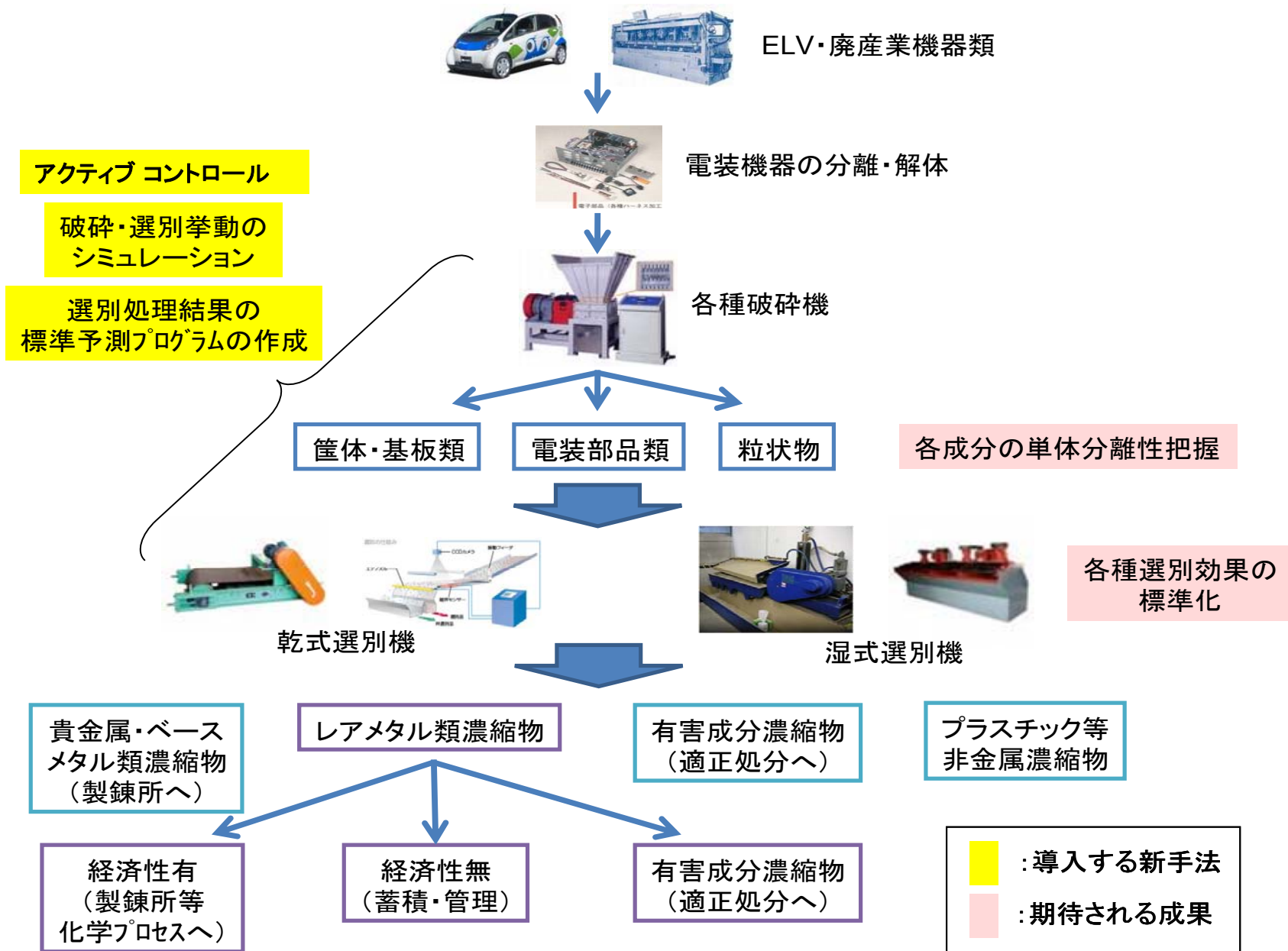
(+8 mm 粒群, D: 0 %
-0.5 mm 粒群, D: 0.16 %)

バルク産物への各元素の濃縮状況

元素	Cu	Zn	Sn	Ba	Ti
品位 (wt%)	26.8	6.10	4.60	29.9	10.3
回収率 (%)	98.6	80.4	99.7	47.0	44.1

元素	Cr	Ni	Ta	W	REE
品位 (wt%)	8.73	8.34	4.87	0.80	2.55
回収率 (%)	56.2	83.2	98.0	92.4	81.0

レアメタル濃縮プロセスの流れ



レアメタル濃縮の全体像

