

「リサイクル優先レアメタルの回収技術開発」 研究開発プロジェクトの概要

平成29年3月23日

資源エネルギー庁資源・燃料部

鉱物資源課

目 次

1. 事業の概要
2. 事業アウトカム
3. 事業アウトプット
4. 当省(国)が実施することの必要性
5. 事業アウトカム達成に至るまでのロードマップ
6. 研究開発の実施・マネジメント体制等
7. 費用対効果
8. 外部有識者の評価等
9. 提言及び対処方針

1. 事業の概要

概 要	使用済小型家電製品等からのリサイクル優先5鉱種のうち、タンタル及びコバルトについて製錬事業者等が当該鉱種を回収するための技術開発を行い、持続的な循環型社会の形成を目指すとともに我が国のレアメタル資源確保に資することを目的とし、レアメタルを含む部品を細かく粉砕することなく分離・剥離・回収する技術や、回収後にレアメタル濃縮物を得るための酸化焙焼・乾留、物理選別等による元素濃縮技術など、レアメタル原料として回収する経済性のあるリサイクル技術の開発を実施する。
実施期間	平成24年度～平成27年度 （4年間）
実施形態	国からの直執行 （独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構への委託事業）
予算総額	4.9億円 （平成24年度：1億円 平成25年度：1.7億円 平成26年度：1.4億円 平成26年度補正：0.8億円）
実 施 者	独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構
プロジェクト リーダー	神谷 太郎 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 金属資源技術部 生産技術課課長

本事業の目的及び目標値

- リサイクル優先鉱種(Ta,Co,W,Nd,Dy)のうち、使用済小型家電製品等に含まれるレアメタル(**Ta,Co**)のリサイクルを行うことを目的とした技術開発(**H24～H27の4年計画**)
- H25年に成立した「**小型家電リサイクル法**」を受け、**廃小型家電の回収方法の整備**が進むことで、上記**リサイクル技術の早期実用化**が望まれる。

タンタル(Ta)

★鉱石主要生産国は、モザンビーク、ブラジル、コンゴ民主共和国(DRC)、ルワンダであり、4カ国で世界の生産量の約8割を占める。

★紛争鉱物に指定されている。(2010年)

★日本は、アメリカ、タイ、ドイツからタンタルコンデンサ等の原料(タンタルフッ化物)を輸入。

★国内需要

国内におけるタンタルの需要量(720トン/年)の内、**タンタルコンデンサ用**が**40%**程度を占めると推計される。



★技術開発目標

廃小型家電の電子基板(プリント基板)に含まれるタンタルのうち、**75%**を回収するプロセスを開発する。

コバルト(Co)

★供給リスクが存在(主要生産国であるDRCの政情が不安定)

世界の鉱石生産の55%をコンゴ民主共和国が占めており、他に中国、カナダ、ロシア等の国が生産。

★日本は、フィンランド、豪州、カナダ、ザンビア、ノルウェー等から原料(中間製品)を輸入。

★国内需要

国内におけるコバルトの需要量(11,000～12,000トン/年(推計値))の内、**リチウムイオンバッテリー(LIB)**用が**70%**程度を占めると推計される。



★技術開発目標

廃小型家電のリチウムイオンバッテリー(LIB)に含まれるコバルトのうち、**72%**を回収するプロセスを開発する。

2. 事業アウトカム

事業アウトカム指標 (妥当性・設定理由・根拠等)	目標値(計画)	達成状況 (実績値・達成度)
【アウトカム指標】 小型家電に使用されているタンタルコンデンサ及びリチウムイオン電池向け需要量に対するリサイクルによる供給量の向上 【アウトカム指標設定の根拠】 エネルギー基本計画において、「金属鉱物の安定供給確保のためには、供給源の多角化に加え、使用済製品から金属鉱物の回収を着実に進める」と記載されているため、リサイクルによる供給量の向上をアウトカムとして設定。	(事業開始時) 要素技術の確立 タンタル回収率:75% コバルト回収率:72%	—
	(事業終了時) 要素技術の確立 タンタル回収率:75% コバルト回収率:72%	達成 タンタル回収率: 95.8% コバルト回収率: 78%
	(事業目的達成時) 小型家電に使用されているタンタルコンデンサ及びリチウムイオン電池向け需要量に対するリサイクルによる供給量の向上	—

3. 事業アウトプット

事業アウトプット指標 (妥当性・設定理由・根拠等)	目標値(計画)	達成状況 (実績値・達成度)
実施する研究テーマ数として9テーマをアウトプット指標として設定した。 研究テーマの設定に当たっては、使用済小型家電製品等からの具体的なレアメタル回収フローを検討したうえで、必要な個別技術開発要素を抽出した。 I タンタル回収技術開発 ①廃小型家電製品等からの基板分離・回収技術の開発 ②基板からのタンタルコンデンサ剥離技術の開発 ③タンタルコンデンサ濃縮技術の開発 ④タンタルコンデンサからのタンタル回収技術の開発 ⑤経済性評価の実施及び全体プロセスの確立 II コバルト回収技術開発 ①物理選別によるコバルト濃縮技術の開発 ②コバルト濃縮物からのコバルト回収技術の開発 ③ラミネート型リチウムイオン電池からのコバルト回収技術の開発 ④経済性評価の実施及び全体プロセスの確立	(事業開始時) 9テーマ タンタル回収目標 ①90% ②93% ③90% ④99.5% ⑤75%(総合回収率) コバルト回収目標 ①80% ②90% ④72%(総合回収率)	—
	(事業終了時) 9テーマ タンタル回収目標 ①90% ②93% ③90% ④99.5% ⑤75%(総合回収率) コバルト回収目標 ①80% ②90% ③—(設定せず) ④72%(総合回収率)	達成 9テーマ タンタル回収実績 ①+②100% ③96.8% ④99.0% ⑤95.8%(総合回収率) コバルト回収実績 ①85% ②92% ③— ④78%(総合回収率)

個別要素技術のアウトプット指標・目標値及び達成状況

個別要素技術	アウトプット指標・目標値	達成状況(実績値・達成度)	原因分析 (未達成の場合)
I.廃小型家電製品等からのタンタル回収技術開発			
①廃小型家電製品等からの基板分離・回収技術の開発	基板を壊すことなく分離・回収する技術を開発し、目標値をタンタル回収率90%とする。	複数の破砕機について検討した結果、ハンマクラッシャやシュレッダ等と比べて、CFS(クロスフローシュレッター)は破砕だけでなく、部品剥離も同時にできる点で優れていた。CFSを用いて、プラスチックルータを室温で一段目破砕をした後、200℃で加熱しながら二段目破砕をすることで、実績値としてタンタル回収率100%を達成した。また同様にPCサーバを原料として回収率96.5%を達成した。	達成
②基板からのタンタルコンデンサ剥離技術の開発	基板からタンタルコンデンサを剥離する技術を開発し、目標値をタンタル回収率93%とする。		達成

I タンタルの回収

- ① 廃小型家電製品等からの基板分離・回収技術の開発
- ② 基板からのタンタルコンデンサ剥離技術の開発

廃小型家電

PCサーバ



一段目破碎

15°C

二段目破碎

200°C

プリント基板

部品



実証試験設備



個別要素技術のアウトプット指標・目標値及び達成状況

個別要素技術	アウトプット指標・目標値	達成状況(実績値・達成度)	原因分析 (未達成の場合)
I .廃小型家電製品等からのタンタル回収技術開発			
③タンタルコンデンサ濃縮技術の開発	I の①、②で得られたタンタルコンデンサをさらに濃縮し、目標値を回収率90%とする。	CFSの二段目破碎後の産物を原料として、トロンメル、振動スクリーン、傾斜弱磁力磁選機、四管式気流選別機で選別することで、全行程の合計で、実績値として実証プラントで回収率96.8%を達成した。 トロンメルでは微粒子の除去、振動スクリーンではTaコン濃縮群のみ回収、傾斜磁力磁選機では強磁性素子、円筒形素子などの除去、四管式気流選別機では比重選別によるTaコン濃縮が可能である。	達成

I タンタルの回収

③タンタルコンデンサの濃縮技術の開発



クロスフロシュレッダー
二段目破碎

トロンメル

振動スクリーン

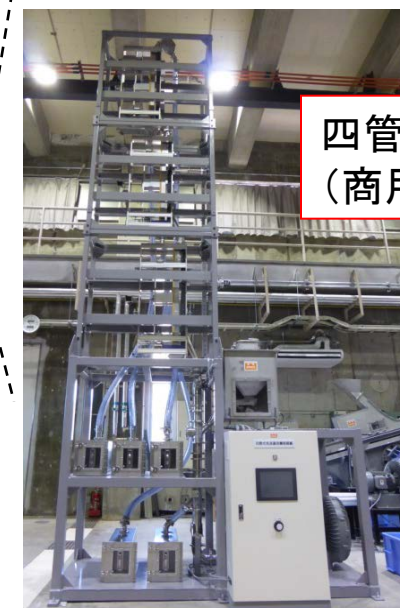
傾斜弱磁力磁選機

四管式気流選別機

Taコン濃縮物



強磁性素子
(水晶振動子)
円筒形素子
(アルミ電解コンデ
ンサなど)
の除去



比重選別によ
るTaコン濃縮

振動スクリーン
(Taコン濃縮粒群のみ回収)

個別要素技術のアウトプット指標・目標値及び達成状況

個別要素技術	アウトプット指標・目標値	達成状況(実績値・達成度)	原因分析 (未達成の場合)
I.廃小型家電製品等からのタンタル回収技術開発			
④タンタルコンデンサからのタンタル回収技術の開発	I の③で得られたタンタルコンデンサからタンタルを回収する技術を開発し、目標値を回収率99.5%とする。	焙焼炉を用いてタンタルコンデンサを酸化焙焼して得られた焼結体を表面洗浄、粉碎、二酸化マンガンの除去をすることで高純度五酸化ニタンタルを得ることができ技術を開発した。 実証試験で簡易焙焼炉を用いたとき、回収率99.0%、品位99%以上と目標値には届かなかったものの、総合回収率を考えると十分な実績値であると考えられる。	達成

I タンタルの回収

④ タンタルコンデンサからのタンタル回収技術の開発

タンタルコンデンサ

酸化焙焼

焼結体

表面清浄

粉砕

二酸化マンガンの除去

(溶液のろ過)

高純度五酸化タンタル

(銀と二酸化マンガンの除去。
使用した硝酸溶液をろ過して、銀回収。)

(金属Taによる還元浸出。
ガルバニック反応。)

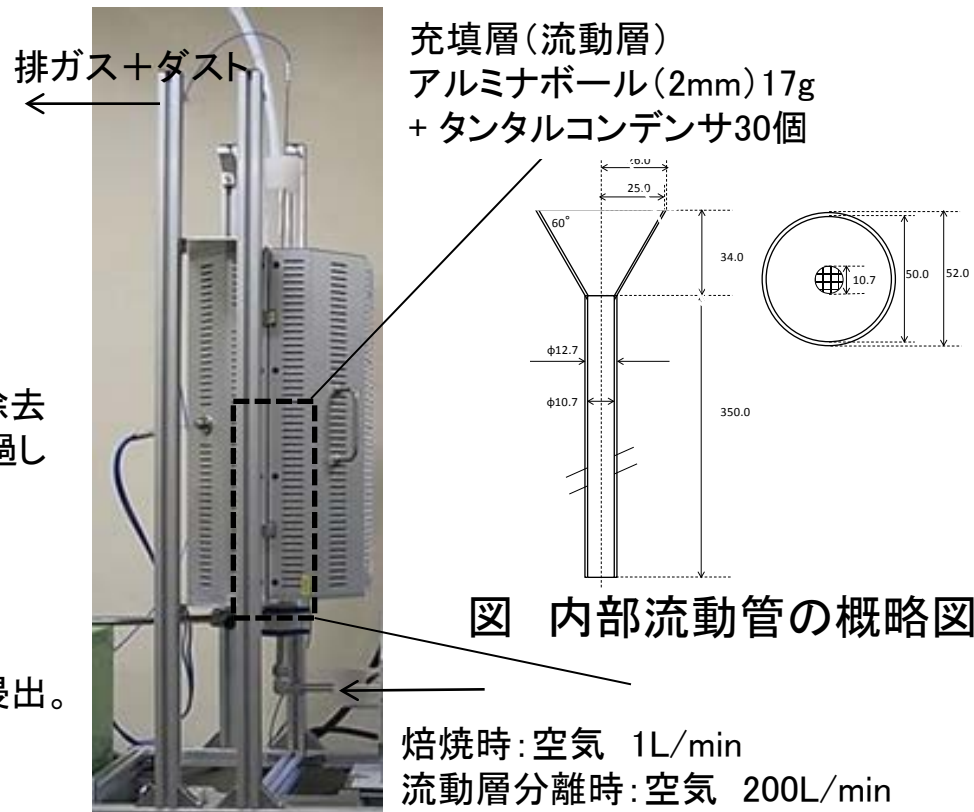


図 小型焙焼炉の外観写真

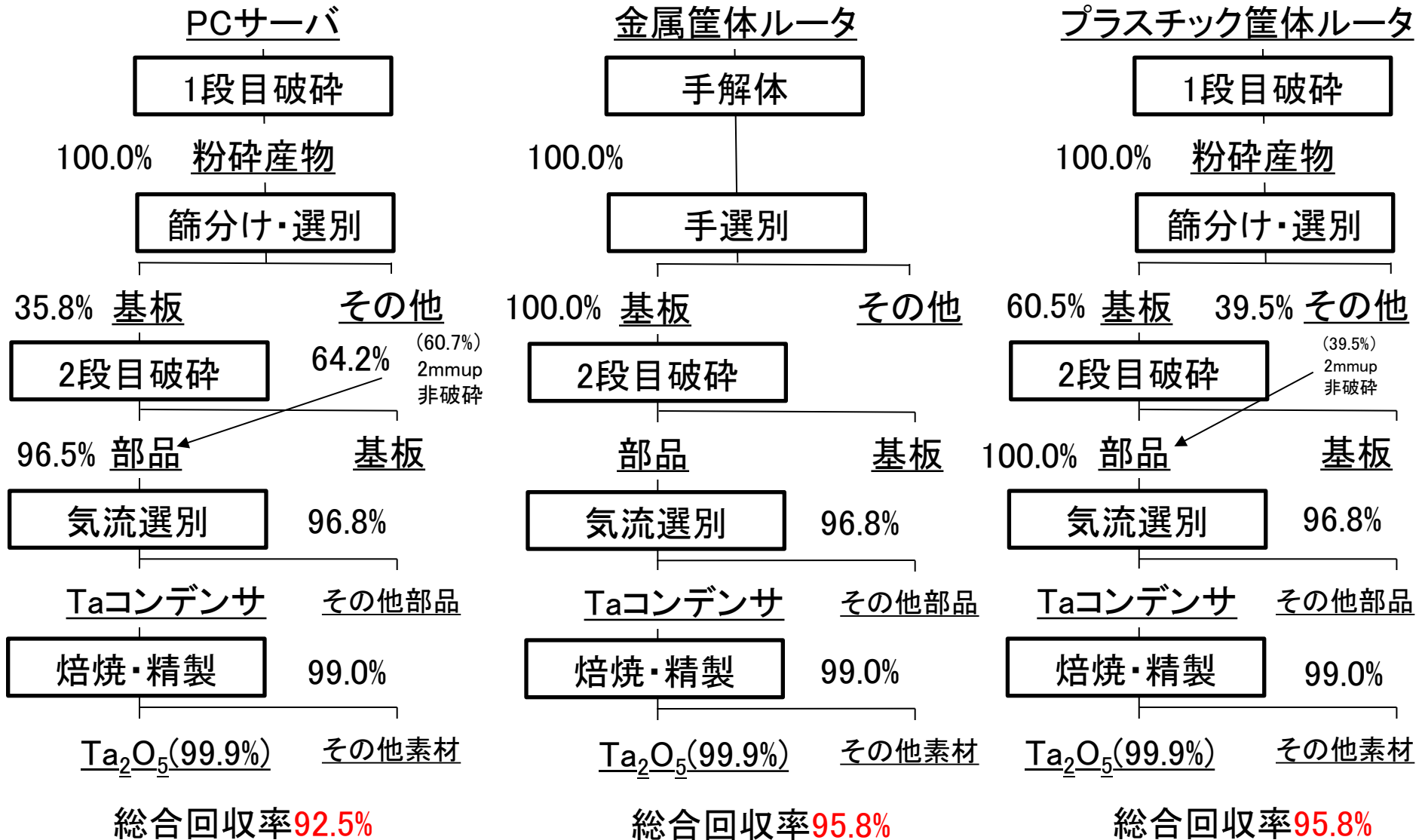
最適条件の初期焙焼400℃で30min、続いて460℃で180minにより、焙焼およびタンタル焼結体の分離が可能となった。

個別要素技術のアウトプット指標・目標値及び達成状況

個別要素技術	アウトプット指標・目標値	達成状況(実績値・達成度)	原因分析 (未達成の場合)
I .廃小型家電製品等からのタンタル回収技術開発			
⑤経済性評価の実施及び全体プロセスの確立	廃小型家電製品等からタンタルを回収するプロセスを確立し、目標値を総合回収率75%とする。	I の①から④までを組み合わせで確立したプロセスにおいて、実績値としてプラルータからのタンタル総合回収率95.8%を達成した。またPCサーバにおいては総合回収率92.5%、金属ルータにおいては総合回収率95.8%の結果を得た。	達成

I タンタルの回収

⑤全体プロセスの確立(回収率は分配率ベース)



個別要素技術のアウトプット指標・目標値及び達成状況

個別要素技術	アウトプット指標・目標値	達成状況(実績値・達成度)	原因分析 (未達成の場合)
Ⅱ.廃小型家電製品等からのコバルト回収技術の開発			
①物理選別によるコバルト濃縮技術の開発	最適な前処理(物理選別)プロセスを確立し、後段の湿式処理でのコストを削減し、目標値を回収率80%とする。	物理選別による携帯電話用廃リチウムイオンバッテリー(LIB)からのCo濃縮を行った。 廃LIBを二段焙焼+浮選+湿式勾配磁選または単段焙焼+浮選+湿式テーブル選別により、回収率85%、Co-Al分離効率64%でCoを濃縮分離する技術を確立した。	達成

Ⅱ コバルト回収

①物理選別によるコバルト濃縮技術開発：焙焼・浮選・磁選フローの検証

焙焼条件+浮選+湿式高勾配磁選の4フローで試験を検討した。

- ①単段焙焼→湿式高勾配磁選→浮選
- ②単段焙焼→浮選→湿式高勾配磁選
- ③2段焙焼→湿式高勾配磁選→浮選
- ④2段焙焼→浮選→湿式高勾配磁選

試験結果

Co回収率85.0%

Co品位59.4%

Al品位5.5%

Co-Al分離効率66.7%

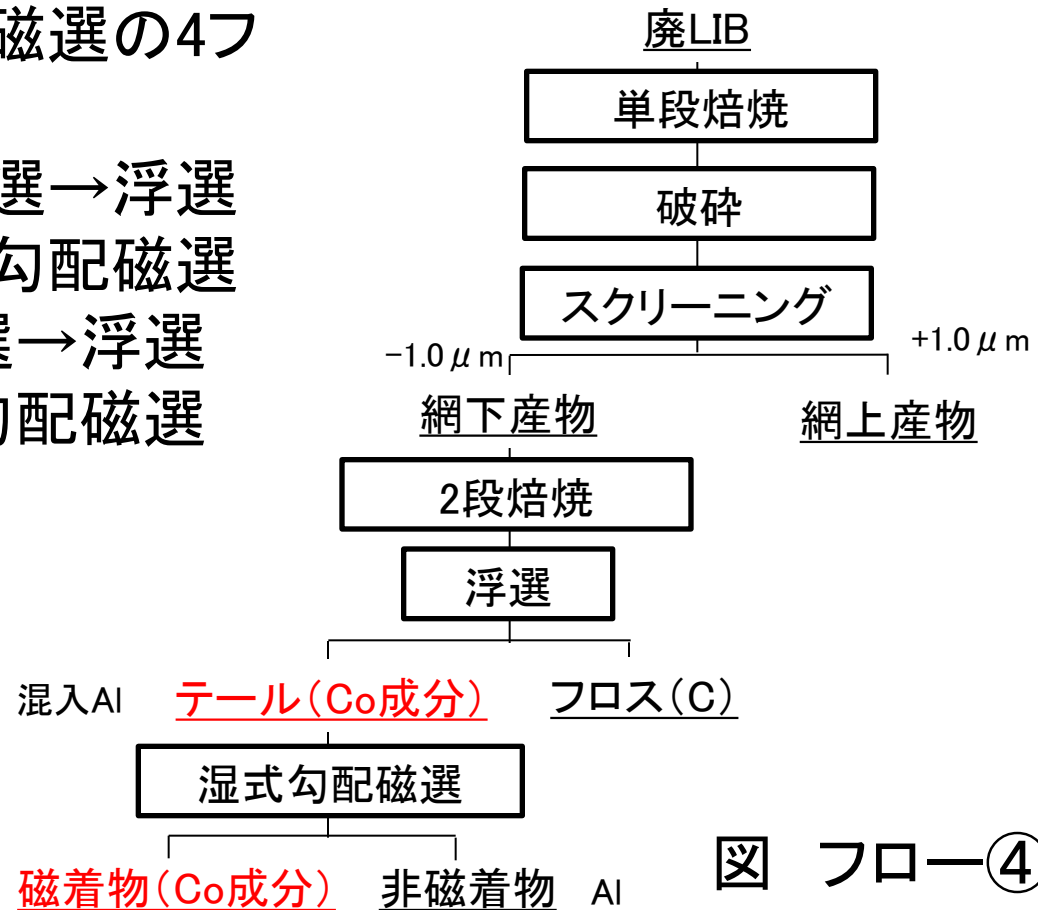
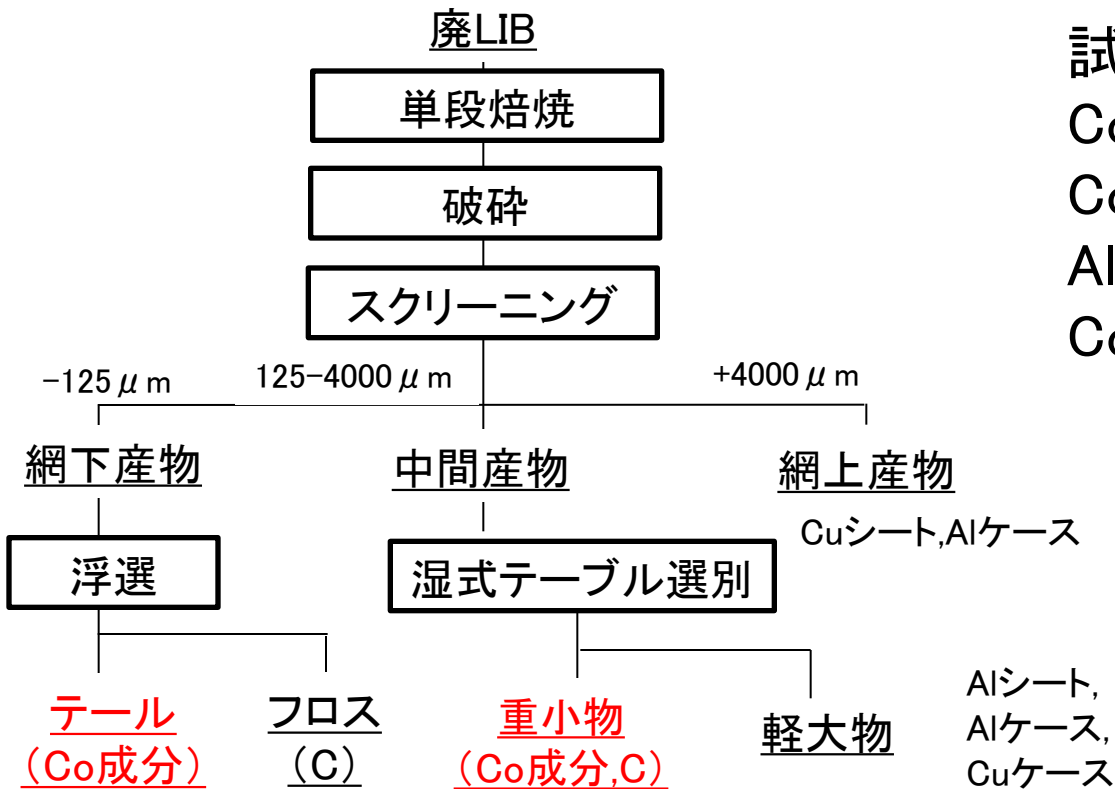


図 フロー④

フロー④2段焙焼→浮選→湿式高勾配磁選で最も良好な結果を得た。

Ⅱ コバルト回収

①物理選別によるコバルト濃縮技術開発：単段焙焼・湿式テーブルとの比較



試験結果

Co回収率85.2%

Co品位47.7%

Al品位5.4%

Co-Al分離効率64.1%

試験条件

スクリーニング: 125, 500, 4000 μm

浮選: 自然pH、

ケロシン $1.0 \times 10^{-3} \text{mol/L}$

テーブル (500-4000 μm)

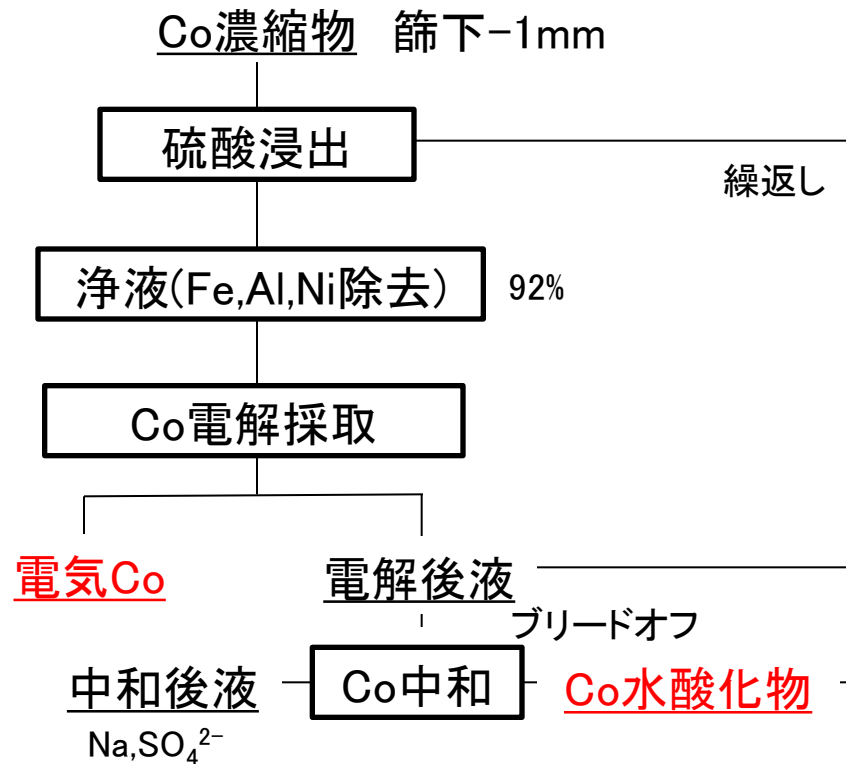
単段焙焼+浮選+湿式テーブルで、2段焙焼+浮選+湿式高勾配磁選と同等の回収率を達成した。

個別要素技術のアウトプット指標・目標値及び達成状況

個別要素技術	アウトプット指標・目標値	達成状況(実績値・達成度)	原因分析 (未達成の場合)
Ⅱ.廃小型家電製品等からのコバルト回収技術の開発			
②コバルト濃縮物からのコバルト回収技術の開発	低コストおよび高回収率を達成するプロセスを開発し、目標値を回収率90%とする。	Co濃縮物を硫酸浸出、脱Fe、脱Al、脱Ni吸着除去、Co電解採取により、回収率92%を達成した。硫酸浸出液の酸化・中和による脱Fe、脱Al工程では、脱Alした後、FeとAlを中和沈殿させることで、Coロスを低減できる。	達成

Ⅱ コバルト回収

②コバルト濃縮物からのコバルト回収技術の開発:コバルト電解採取の結果



試験結果

電気Co回収率**92%**

ブリードオフ分配率**27%**

Co濃縮物品位

Co(%)	Fe(%)	Al(%)	Na(%)
37	0.04	4.6	0.1

脱Fe,脱Al中和後液

Co(g/L)	Fe(g/L)	Al(g/L)	Na(g/L)
69	<0.01	<0.01	45.0

電解液を繰り返すと、中和後液中Na濃度が上昇する。(Naは45g/L以下で管理)
Na増分見合いでブリードオフが必要。

Coは水酸化物として回収。NaおよびSO₄²⁻は中和後液として廃棄。

個別要素技術のアウトプット指標・目標値及び達成状況

個別要素技術	アウトプット指標・目標値	達成状況(実績値・達成度)	原因分析 (未達成の場合)
Ⅱ.廃小型家電製品等からのコバルト回収技術の開発			
③ラミネート型リチウムイオン電池からのコバルト回収技術の開発	Ⅱの①、②で得られた条件で処理を行い、ラミネート型に同様の技術が適用できるか調査する。	Ⅱの①、②で検討したLIBの処理を、ラミネート型のLIBに適用しても問題ないことが分かった。	達成



写真：ラミネート型LIB



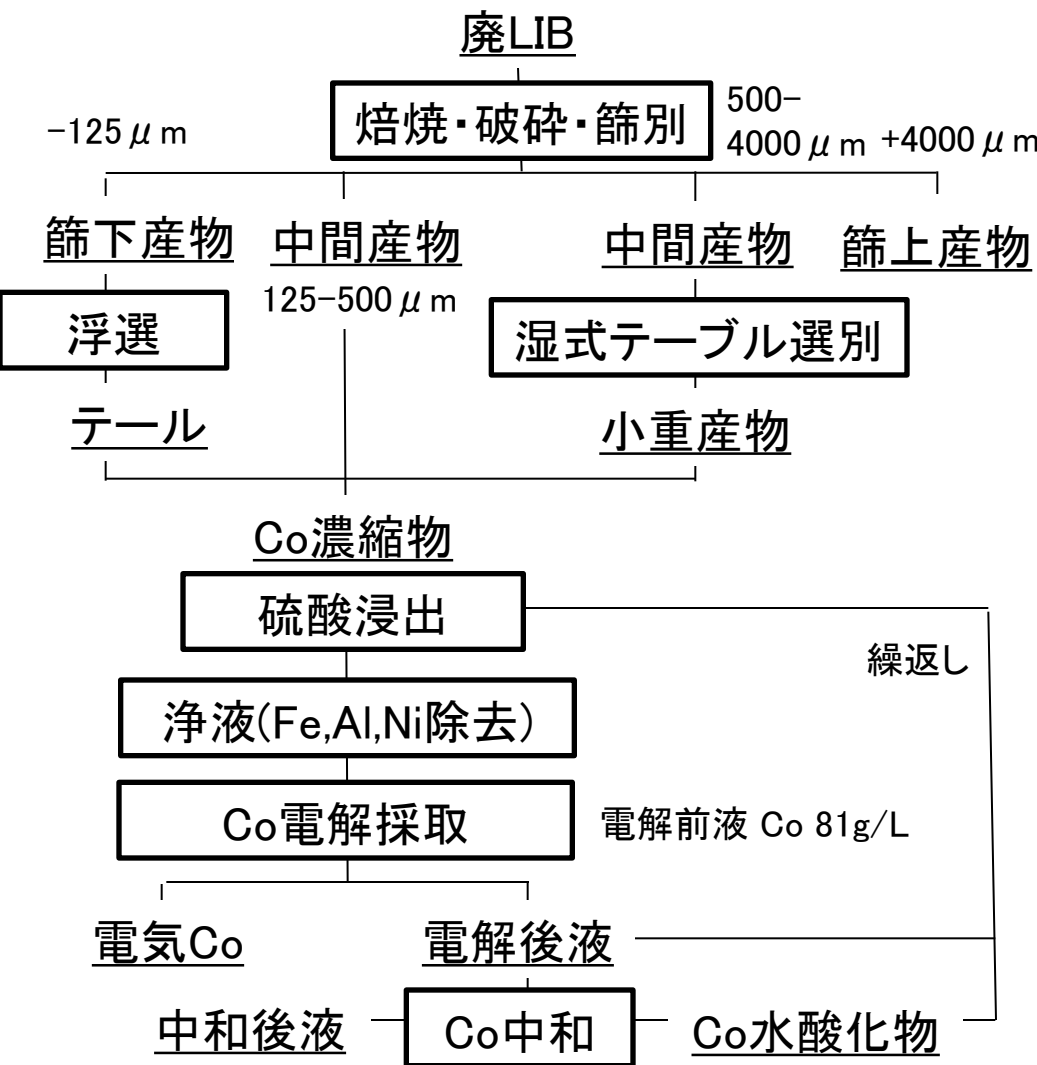
写真：AI箔体LIB

個別要素技術のアウトプット指標・目標値及び達成状況

個別要素技術	アウトプット指標・目標値	達成状況(実績値・達成度)	原因分析 (未達成の場合)
Ⅱ.廃小型家電製品等からのコバルト回収技術の開発			
④経済性評価の実施及び全体プロセスの確立	廃小型家電製品等からコバルトを回収するプロセスを確立し、目標値を総合回収率72%とする。	物理選別工程と湿式処理工程の連携により、Co回収率78%を達成した。 このとき、物理選別工程では、二段焙焼+浮選+湿式勾配磁選または単段焙焼+浮選+湿式テーブル選別により、Co回収率85%である。 また湿式処理工程では、硫酸浸出、浄液(Fe、Al、Ni除去)、電解採取することでCo回収率92%である。	達成

Ⅱ コバルト回収

④コバルト濃縮物からのコバルト回収技術の開発：経済性評価の実施及び全体プロセスの確立



物理選別方法	2段焙焼+浮選+ 湿式勾配磁選	単段焙焼+浮選+ 湿式テーブル磁選
Co回収率(%)	85	85
Co-Al分離効率(%)	67	64
濃縮物Co品位(%)	59	48
Al品位(%)	5.5	5.4

	湿式処理工程
Co回収率(%)	92
ブリードオフ率(%)	30
電気Co品位(%)	>99.9
電流効率見込(%)	71

Co回収率78%

不純物品位の低いCo濃縮物を使用し、電解前後Co濃度を高くすることで電流効率改善が見込める。

研究開発成果及び成果の公表状況

特許等件数 (出願を含む)	論文発表件数	学会発表件数	学術講演数
8	5	56	59

※ 学会発表件数・学術講演件数には研究開発成果の一部の引用を含む。

<国民との科学・技術対話の実施などコミュニケーション活動>

JOGMECが実施している成果報告会において、事業実施状況を報告した。

- ・平成25年9月5日 平成25年度第4回金属資源関連成果発表会
- ・平成26年7月8日 平成26年度第4回金属資源関連成果発表会
- ・平成28年5月23日 平成28年度第1回JOGMEC金属資源セミナー

また、各研究機関による学会などでの研究内容の発表、各事業者による論文発表やシンポジウム等での本研究成果を含む学術講演などを行っている。

- ・平成28年 9月27日 E-scrapシンポジウム2016(東京大学生産技術研究所)
- ・平成28年12月12日 サステナブル理工学研究センターシンポジウム(東北大学多元物質科学研究所)

4. 当省(国)が実施することの必要性

レアメタルは、自動車、IT製品をはじめとする高付加価値・高機能製品に必須の素材であり、その安定供給は、我が国製造業の国際競争力の維持・強化において極めて重要である。しかし、資源国の資源ナショナリズムの台頭や一部の国による輸出抑制等国家管理が強化される等、我が国のレアメタル等の鉱物資源の供給確保を巡る環境は激変しており、レアメタルの安定的な供給確保は我が国にとって急務の課題となっている。

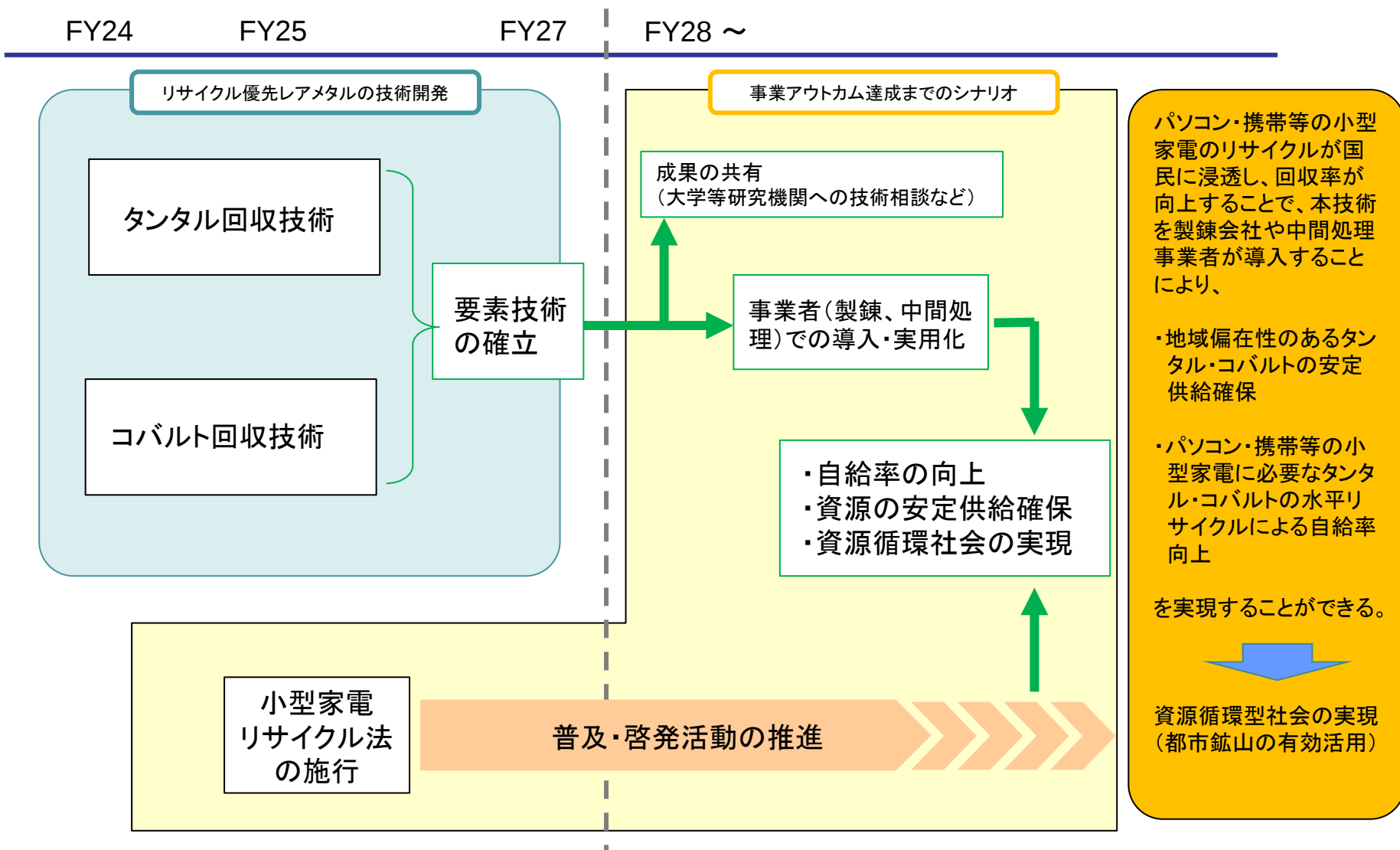
そのような中、「使用済み小型家電からのレアメタルの回収及び適正処理に関する研究会」(平成20年～22年)において、リサイクルの検討優先鉱種として14鉱種、うち小型家電からリサイクルすべき鉱種として5鉱種(タンタル、コバルト、タングステン、ネオジム、ジスプロシウム)を選定したところ。特にタンタルやコバルトは、コンゴなどカントリーリスクの高い地域からの輸入が多く、資源の安定供給確保の観点から、小型家電からのレアメタル回収技術の確立が重要となっている。

また、使用済家電の処理は、社会構造的な理由もあり処理場が自治体ベースに分割されているため、大規模な機材を導入することが出来ず、手解体での処理となっているのが現状であり、民間企業では技術開発が進まない状況にある。

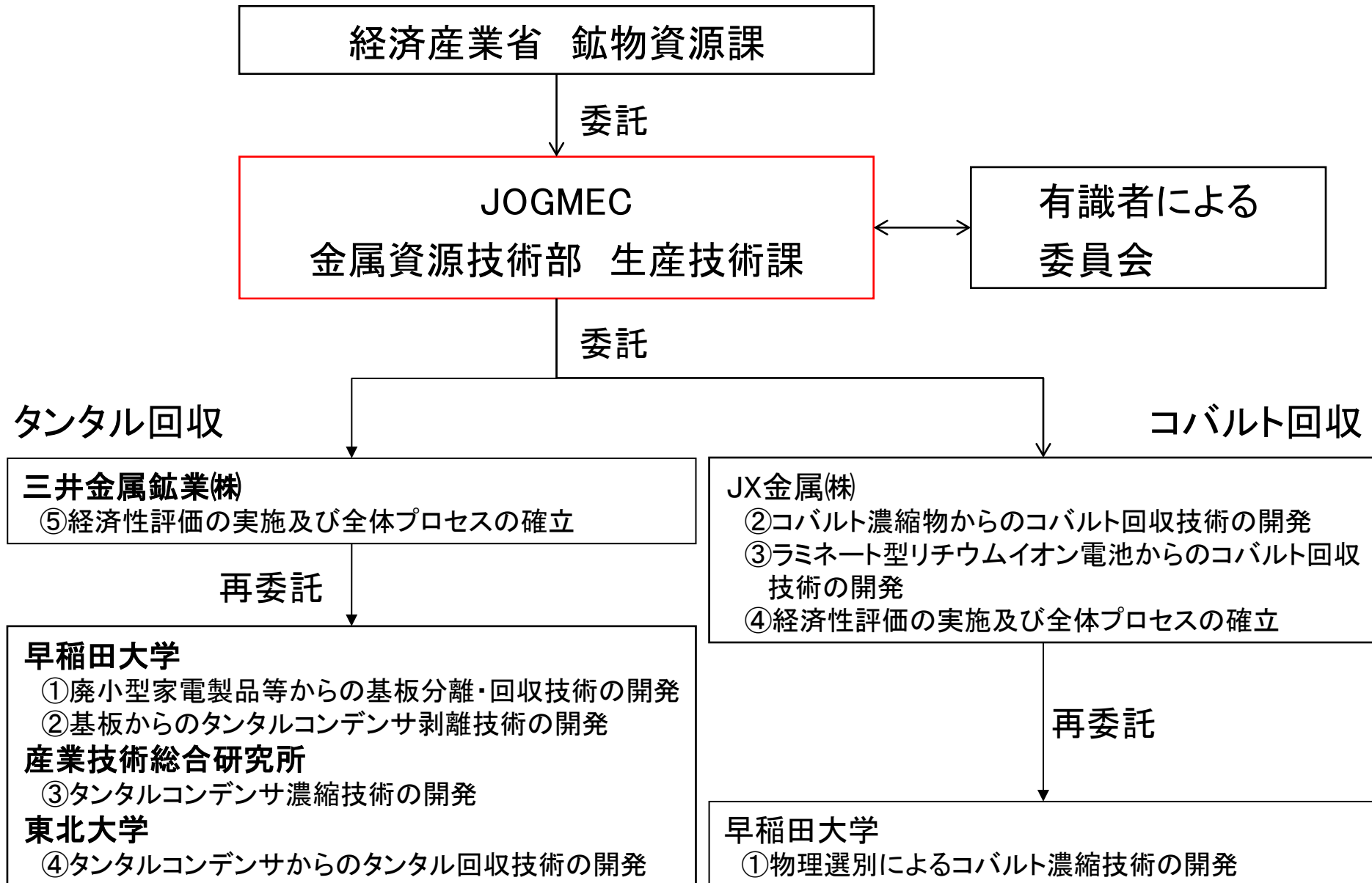
そのため、大規模な回収・処理システムを確立するためにも、国が率先して汎用性の高い回収・処理技術を構築することが、効率的なリサイクル制度の確立のために必要であり、また、資源の安定供給の観点からも重要である。

なお、小型家電のリサイクルについては、「使用済小型電子機器等の再資源化の促進に関する法律」が平成25年4月に施行となり、より一層のリサイクルが期待されているところ、その回収・処理技術の確立の重要性は増しているところである。

5. 事業アウトカム達成に至るまでのロードマップ



6. 研究開発の実施・マネジメント体制等



7. 費用対効果

I タンタル回収

- ・ パソコン・移動電話に使用されているタンタル量の推定
 - － タンタルは、パソコンで 2.32 g/台、移動電話で 0.081 g/台の使用(※)
 - － 2014年度の国内出荷台数は、パソコン 919万台、移動電話 2192万台。使用されたタンタルは 21トン及び 2トンで計23トンと推計
 - － 回収実績は、使用済みパソコン 59万台(出荷台数に対する割合は 6%)、移動電話 619万台(同 28%)。使用されたタンタルは 1.4トン、移動電話で 0.5トンで計 1.9トンと推計
- ・ したがって、回収された使用済小型家電を本技術開発によりタンタル回収した場合のタンタル回収量は、 $1.9\text{トン} \times 95.8\% (\text{技術開発実績}) = 1.8\text{トン}$ となり、パソコン・移動電話の国内需要量の8%程度に相当
- ・ 小型家電リサイクル法の施行に伴い、使用済小型家電の回収率が上がれば、更なるタンタル回収が見込まれる
- ・ 本技術開発で得られたフローはタンタルコンデンサだけでなく、他の電子素子の回収にも応用できるものであるとともに、廃電子基板を銅製錬に投入するに際して、銅製錬忌避元素の低減にも応用が可能である。したがって、本技術開発の成果は使用済小型家電からの金属回収に非常に効果的なものである。

II コバルト回収

- ・ リチウムイオン電池に使用されているコバルト量の推定
 - － 移動電話のリチウムイオン電池の重量は 40 g/個、コバルト含有量は 12.1%/個(※)
 - － 国内移動電話出荷台数と同数のリチウムイオン電池が出荷されているとすると、2014年度の移動電話向けリチウムイオン電池用のコバルト需要量は $2192\text{万個} \times 40\text{ g/個} \times 12.1\% = 106\text{トン}$
 - － 移動電話の電池回収実績は994万個、コバルト量は $994\text{万個} \times 40\text{ g/個} \times 12.1\% = 48\text{トン}$
- ・ 回収されたリチウムイオン電池を本技術開発により回収した場合のコバルト回収量は $48\text{トン} \times 78\% (\text{技術開発実績}) = 37\text{トン}$ となり、リチウムイオン電池のコバルト需要量の35%程度に相当する。
- ・ リチウムイオン電池は携帯電話等以外にもデジタルカメラなどにも使用されており、使用済小型家電の回収率が上がれば、更なるコバルト回収が見込まれる。

8. 外部有識者の評価等

8-1. 評価検討会

評価検討会名称	リサイクル優先レアメタルの回収技術開発事業終了時評価検討会		
評価検討会委員	座長	藤田 豊久 東京大学大学院工学系研究科 教授	
	委員	柴山 敦 秋田大学大学院国際資源学研究科 教授 白鳥 寿一 イー・アント・イー ソリューションズ株式会社 代表取締役社長 高島 由布子 株式会社三菱総合研究所 主任研究員 山口 勉功 岩手大学工学部マテリアル工学科 教授	

8. 外部有識者の評価等

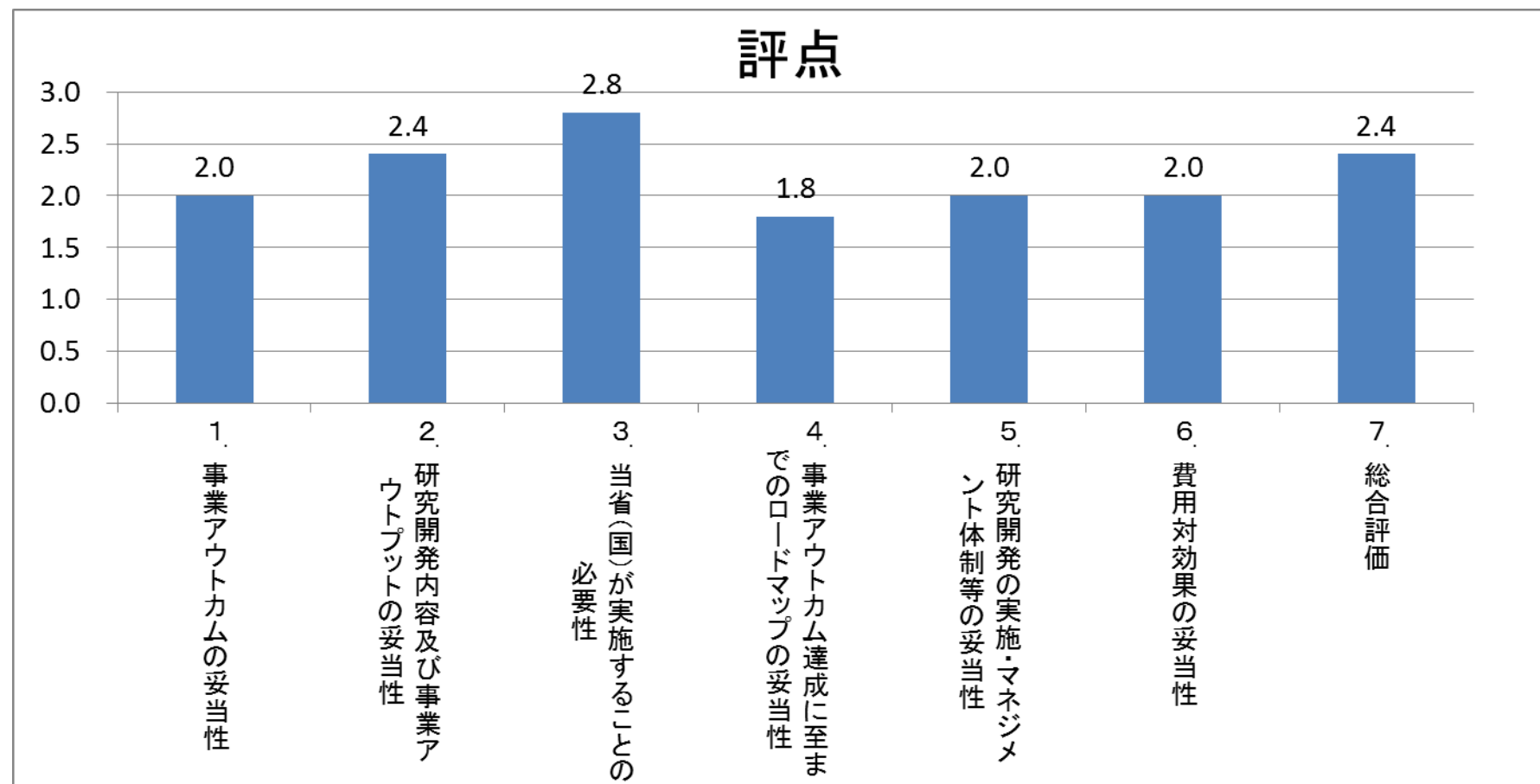
8-2. 総合評価

これまで回収されていなかったタンタルとコバルトに着目し、回収技術を確立することは、鉱物資源の安定供給確保の観点からも重要であり、事業開始当時の世界的なレアメタルショックに対して技術的な解決にトライし、具体的なプロセス提案まで至った点は高く評価できる。また、市況等の影響が大きいため社会実装までのロードマップが不透明ではあるものの、こうした技術の確立による外部環境変化への対応力強化は有益である。

一方、事業開始当時に比べてレアメタルの価格は低下しており、対象物だけでは回収インセンティブがないため、小型家電に含まれる貴金属や銅などの他の有価金属の価値も踏まえたアウトカムを考える必要がある。また、リチウムイオン電池の成分や構造が多様化するなど、今後とも回収技術の革新は必要で有り、一過性の研究開発事業に留めることなく、事業としての実現性、社会実装を視野に入れた継続的な取組や、高度なリサイクル体制の構築が必要である。

8. 外部有識者の評価等

8-3. 評価点による評点



【評価項目の判定基準】

<評価項目1.~6.>

3点: 極めて妥当
 2点: 妥当
 1点: 概ね妥当
 0点: 妥当でない

<評価項目7. 総合評価>

3点: 実施された事業は、優れていた。
 2点: 実施された事業は、良かった。
 1点: 実施された事業は、不十分なところがあった。
 0点: 実施された事業は、極めて不十分なところがあった。

9. 提言及び対処方針

今後の研究開発の方向等に関する提言	提言に対する対処方針
将来に向けては、リチウムイオン電池の成分変化や経年劣化などに対応した、現在の焙焼方式に変わる処理方法の検討が必要であるなど、潜在的な可能性を持った研究が埋没しないよう継続的な技術開発が必要である。 また、技術の経済性を評価するうえでは、タンタルとコバルトのみを対象とする評価だけでなく、小型家電に含まれる他の有価金属の回収も行った場合も含めて経済性を評価することも考えるべきである。 さらに、市況の変化といったプロジェクト内ではどうすることもできない問題が起こることについて、あらかじめ国や関係者により長期的なビジョンとして検討する、あるいは、事業途中で情勢が変わった際に柔軟にプロジェクトを修正するなどの点について、プロジェクトの開始前に十分に議論をしておくことが有効である。	本技術開発の成果については、学会発表や講演会等を通じて大学や産業界での認知度を広めていくことで、その成果技術が埋没することなく普及するよう努めてまいりたい。 また、本技術開発の成果も踏まえ、動脈から静脈までが一体となったリサイクルプロセスを実現するための技術開発を平成29年度から実施する予定であり、リサイクル全体での経済性の評価や、市況の変化等の外的要因への対応を踏まえた長期的なビジョンについて議論していく予定。