

# LiBI / サイクルの世界の 最新動向

260326

(一社)サステイナビリティ技術設計機構 代表理事

(国研)物質・材料研究機構 名誉研究員

原田幸明

# リサイクルはどのくらい進んでいるか

(2010年 vs 2025年)

地域	LiB生産シェア 2010	LiB生産シェア 2025	正極物質としての循環割合 2010	正極物質としての循環割合 2025
中国	約24%	約80%	ほぼ0%	<b>20-30%</b>
韓国	約27-39%	約6-8%	ほぼ0%	<b>5-10%</b>
欧州	ほぼ0-1%	約4-6%	ほぼ0%	<b>3-6%</b>
米国	ほぼ0-1%	約4-6%	ほぼ0%	<b>2-5%</b>
日本	約38-48%	約2-4%	ほぼ0%	<b>3-7%</b>

	広がり	input	output
中国	30社を超える企業、完全に湿式冶金学的、廃電池と製造廃棄物の両方を扱う	企業の3分の1以上は材料の生産者と関係。大量の生産スクラップや新製品の廃棄を対象	NCMまたはNCAカソード、いわゆる前駆体を製造するための完全なブレンドを製造。
韓国	主に湿式冶金であり、主な製品は前駆物質および電池化学物質。	リサイクル業者と資材会社と緊密に連携 北米から材料を輸入してきた会社の変化	数社は、韓国のバッテリーメーカー向けのバッテリー薬品を製造
欧州	約10社ある。乾式および湿式もしくは組み合わせ。既存のプラントは小さな容量が多い。	回収効率が良くない、これは量が少なくすべての物質を抽出することが利益を生まないため	バッテリー材料市場向けの完成品を生産せず、いわゆるブラックマスや化合物を販売。これで欧州の廃電池の価値をかなり低くしさらにマイナスになっている
北米	いくつかの新興企業はカナダでプロセスを開始しようとしている。	輸出量が最も多いため、その数量は限られている	残りの方法は、機械的方法と組み合わせた湿式冶金学的方法のみである
日本	日本カソード材料の大きな市場にもかかわらず、あつかう量が小さい	この数十年間リサイクルがゆっくりと開発されたことを意味している	

	中国・韓国	欧米
主体	電池メーカー、機能化材メーカー	製錬会社
対象	工場屑、在庫落、+ 使用済	使用済
目的	原材料利用	廃棄物処理
方式	湿式中心	乾式中心
回収品	機能化材原料	汎用金属
品質に対する意識	中品質に合わせた適用	高品質高価格期待
注目技術	直接リサイクル(中品質)	湿式の高品質材
対象組成	LMO,LFPを含む	LCO,LCMを希望
市場性・経済性	大	小

**日本**  
中国・韓国に吸収?

[回収・物流]

使用済み電池（セル/モジュール/パック）

↓〔危険物物流・保管〕

[安全化]

放電/不活性化（ $N_2/CO_2$ ）・開封

↓〔熱暴走リスク低減〕

[前処理]

解体 → 破碎/粉碎（shredding）

↓

[物理選別]

磁選（Fe）/渦電流（Al,Cu）/ふるい・風選（プラ）

↓〔Black mass（正極+負極粉）を濃縮〕

[熱処理]

低温熱処理（ $\sim 200-600^\circ C$ ）/脱溶媒・脱フッ素前処理

↓〔電解液分解・PVDF/有機物低減〕

[浸出（Leaching）]

酸浸出（ $H_2SO_4/HCl + H_2O_2$ 等）または有機酸浸出

↓〔Ni,Co,Mn,Liを溶液へ〕

[固液分離]

ろ過/洗浄

↓

[不純物除去]

pH調整で  $Al(OH)_3, Fe(OH)_3$  等除去

↓

[Ni/Co/Mn 回収（NMC系の場合）]

溶媒抽出（SX）/沈殿（硫化物/炭酸塩/水酸化物）

↓〔 $NiSO_4, CoSO_4, MnSO_4$  / 前駆体原料〕

[Li濃縮・精製]

残液（Li+主体）→濃縮（蒸発/RO/膜/吸着等）

↓〔Na,K,Ca,Mg,B,Al,Fe,F のppm管理が核心〕

[ $Li_2CO_3$ 化]

ソーダ灰（ $Na_2CO_3$ ）添加 →  $Li_2CO_3$ 沈殿

↓

[仕上げ]

再溶解→再結晶（電池級純度狙い）→乾燥→包装

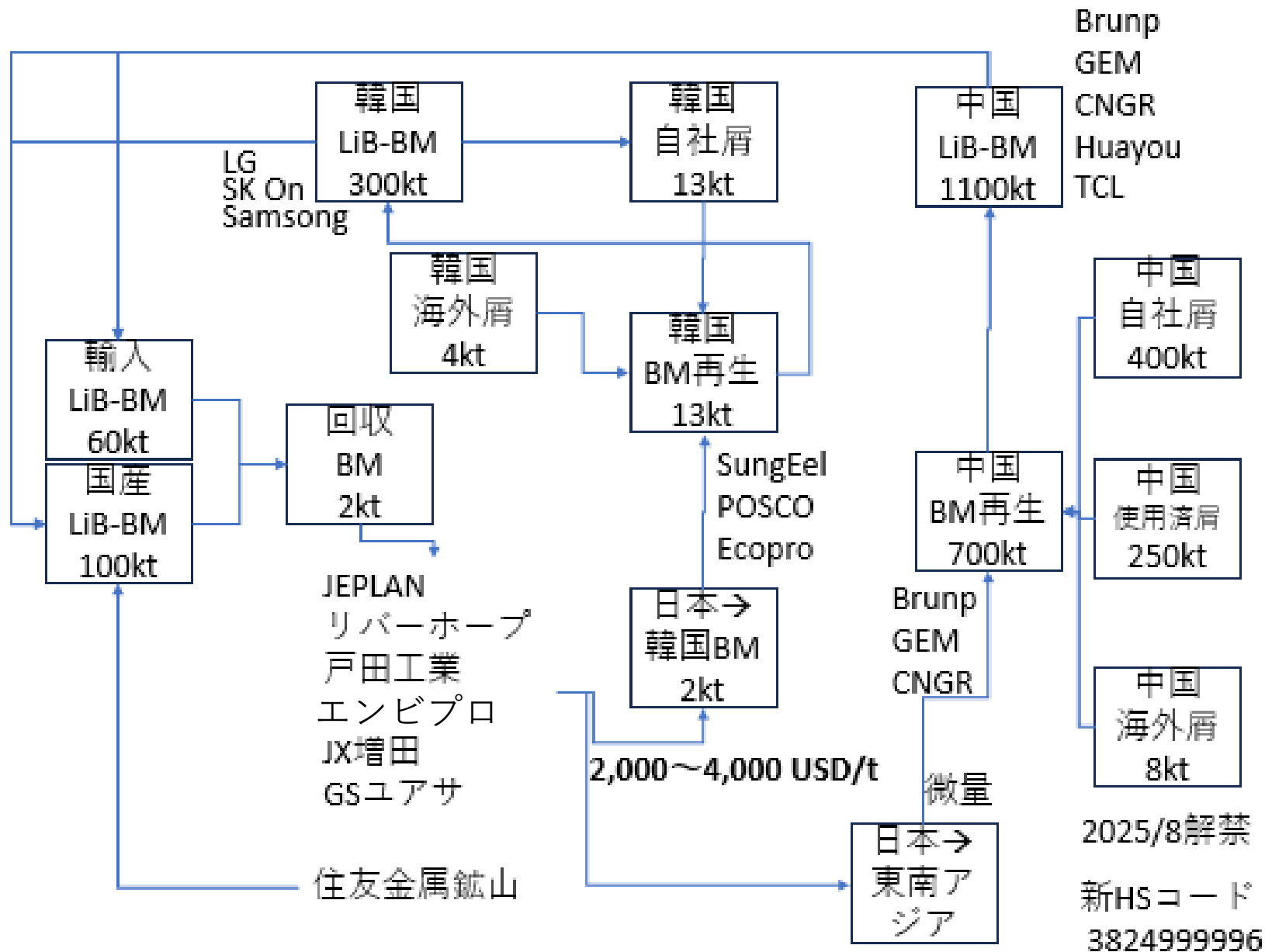
↓

[製品]

電池級  $Li_2CO_3$ （または  $LiOH$  へ転換）

# LiBリサイクル工程のコスト分布 (EV電池1トン処理の概算) ー

工程	コスト比率	主な内容
回収・輸送	10-20%	回収物流、危険物輸送
前処理 (放電・解体・破碎)	<b>20-30%</b>	放電、解体、破碎、分級
湿式浸出	15-25%	酸浸出、溶解
SX / 精製	10-20%	溶媒抽出、沈殿
廃水处理	5-10%	中和、廃液処理
残渣処理	5-10%	スラグ、廃棄物
一般管理費	5-10%	人件費、エネルギー



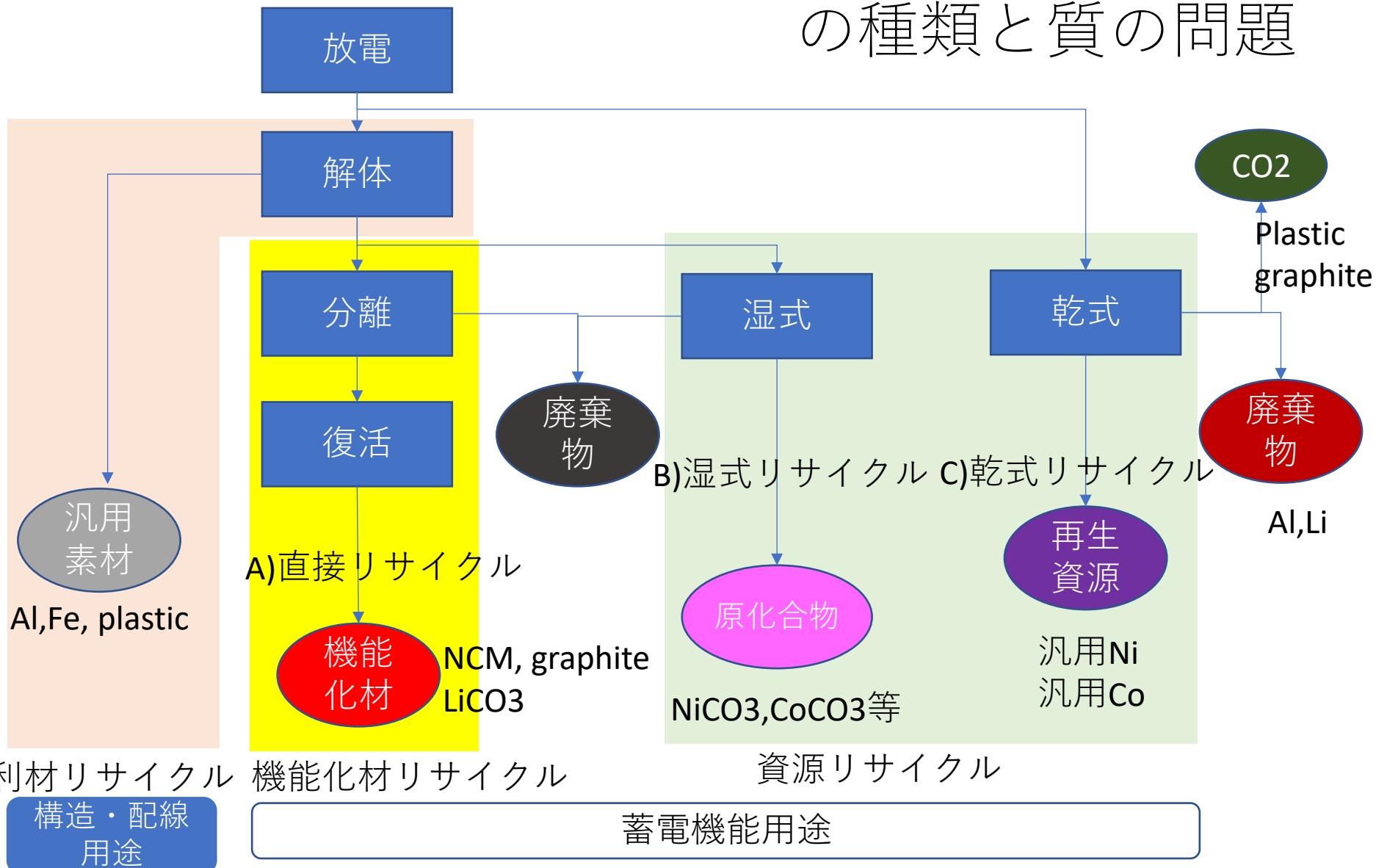
# LiB正極材料におけるリサイクル含有率（1980年代～2025）

単位：％（正極材料中の金属のうちリサイクル由来）

年代	Co	Ni	Mn	Li	背景
1980	0	0	0	0	LiB実用化前
1990	0	0	0	0	LiB初期
2000	2-3	1-2	1	0	小型電池回収
2005	5-8	2-4	2	<1	Co回収中心
2010	10-15	5-8	3-5	1-2	EV初期
2015	15-20	8-12	6-8	3-5	中国リサイクル拡大
2020	20-25	12-18	10-15	5-8	CAM循環開始
2025	<b>25-35</b>	<b>15-25</b>	<b>12-20</b>	<b>8-15</b>	電池循環産業化

プロセス	シェア	主用途	技術成熟度	企業
湿式（ブラックマス→金属）	約70-80%	NMC	9	GEM中 Brunp (CATL)中 Huayou中 Redwood米 Li-Cycle米
乾式 + 湿式	10-20%	混合電池	8	Umicore欧 Glencore欧
Direct recycling	<5%	NMC/LFP	3-5	Ascend Elements米 ReCell米 Northvolt欧
その他	数%	リパーパス		CATL・GEM・BYD

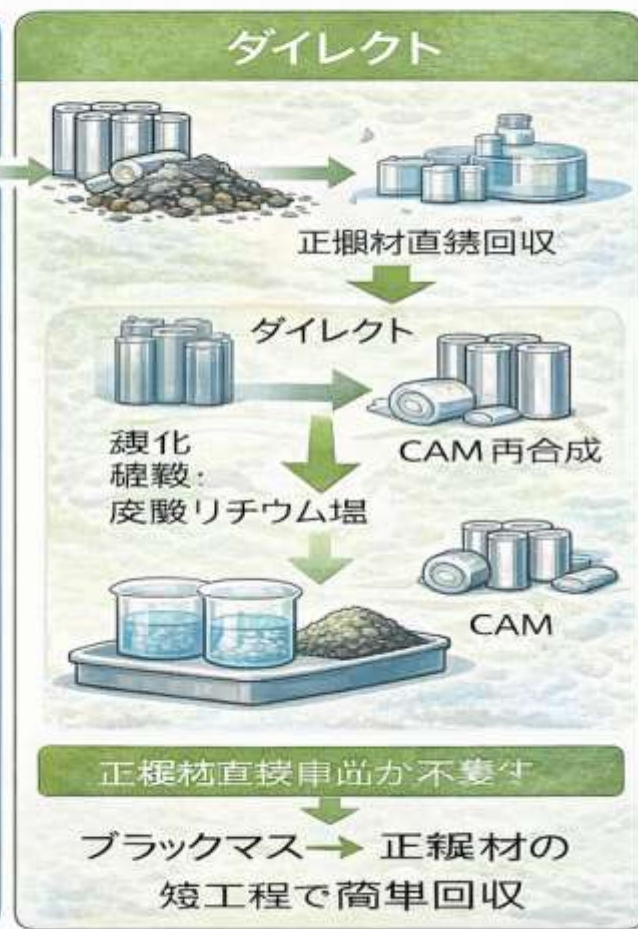
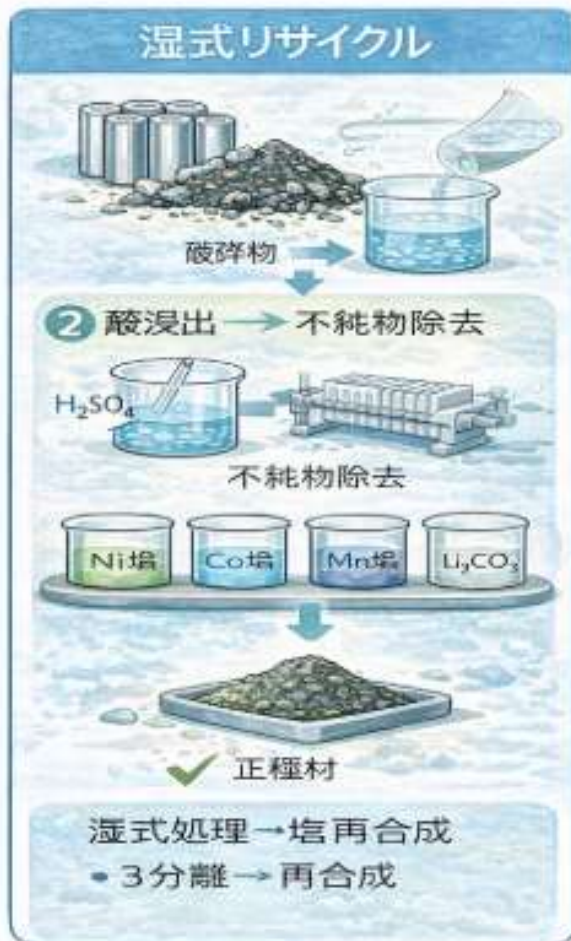
# 物質リサイクルプロセス の種類と質の問題



(再生量) x (同一品質物の製造段階までの負荷) を控除することで質を表す

# LiBリサイクル 3方式の比較

電池 → ブラックマスの工程は共通



非LiB用途へ

現在の主流

脱Coでも高付加価値

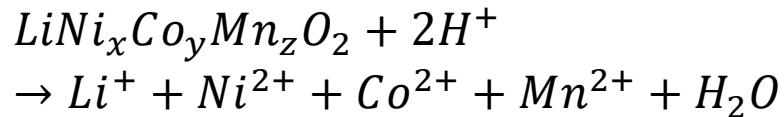
# Li回収のプロセスによる差異

技術	代表企業	Li回収率	特徴
湿式冶金	GEM, Li-Cycle, Brunp	80-95%	現在の主流
乾式冶金	Umicore	Li回収低	Ni/Co優先
ハイブリッド	Ascend	90%超	材料再合成
Direct	一部スタートアップ	高潜在	実装途上

### 1 ブラックマス浸出（部分溶解）

酸で正極材を溶解する。

例（NCM）



使用酸

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

有機酸

還元剤

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

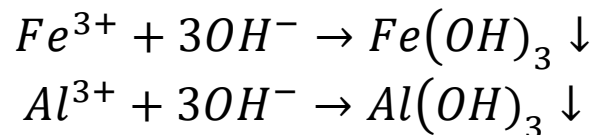
目的

**Ni / Co / Mn を同時溶解**

### 2 不純物除去（選択沈殿）

Cu・Al・Feなどを除去

例

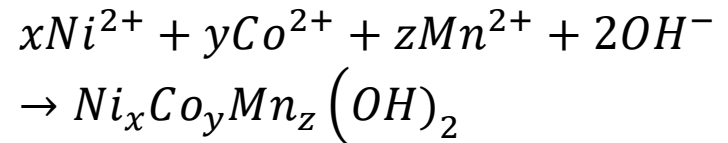


この工程で

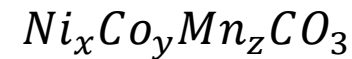
**Ni / Co / Mn 溶液を保持**

### 3 pCAM共沈（共沈反応）

Ni・Co・Mnを同時に沈殿



または

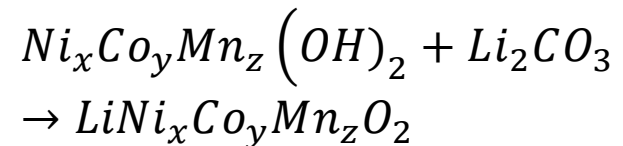


これが

**pCAM（前駆体）**

### 4 リチウム再導入（リチエーション）

工程内で回収したLiを加える。



焼成

700–900°C

現在の主流

# SX

## 溶媒抽出

水相 (Aqueous phase)

金属イオン  
Li+, Co<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>,  
etc.

有機相 (Organic phase)

抽出剤+ 溶媒  
(organic)

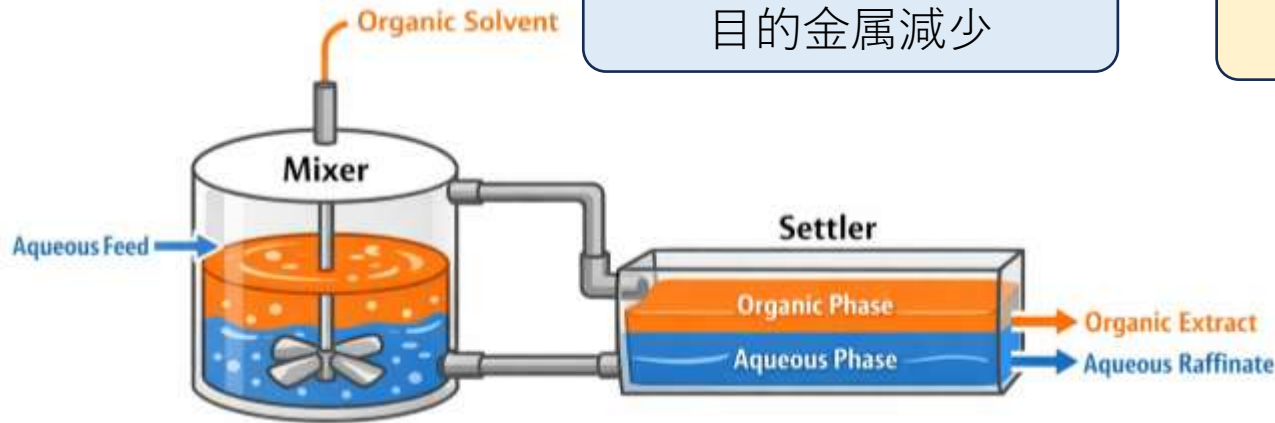
撈拌・接触

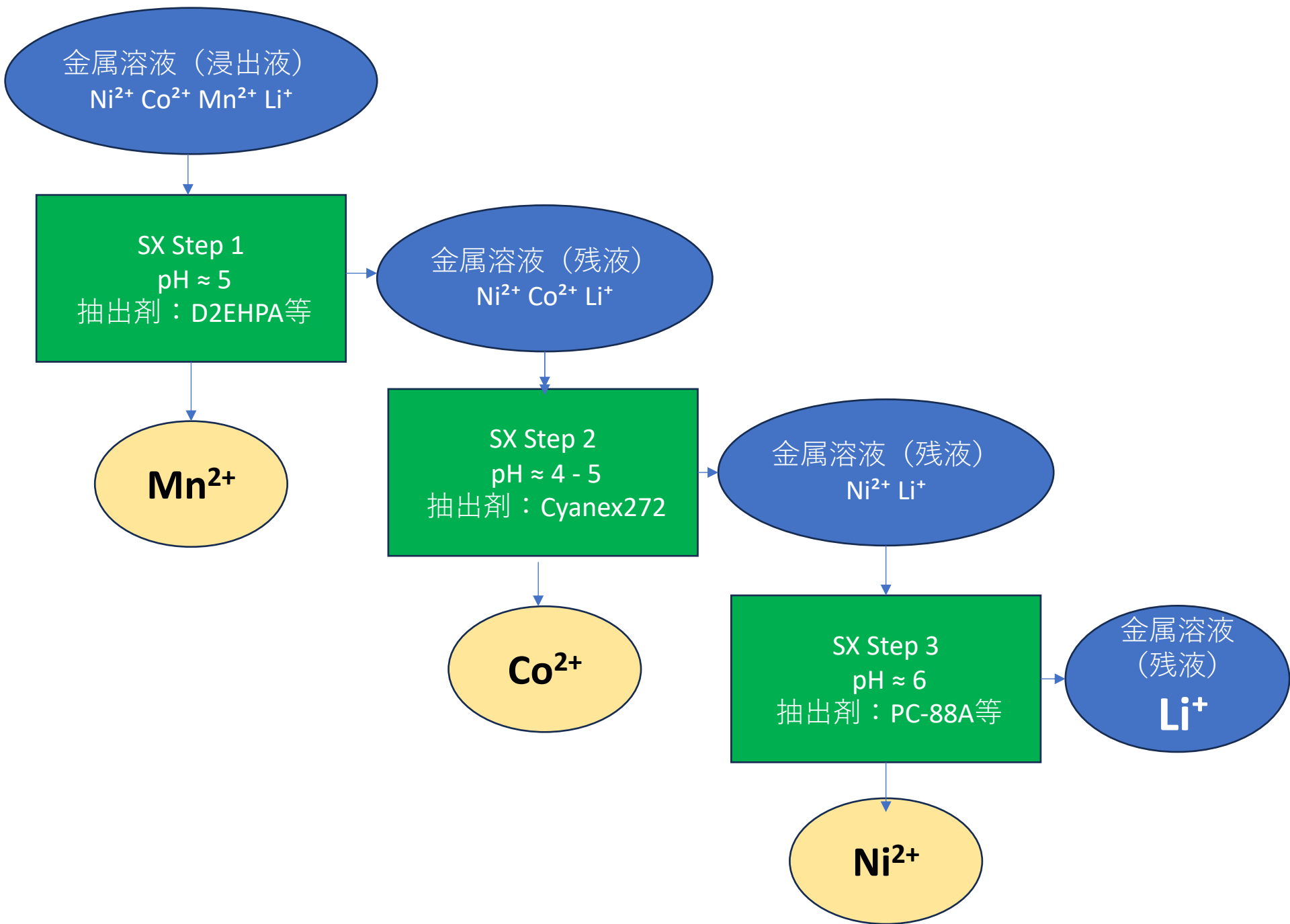
混合状態  
(金属が移動)

分離

水相 (raffinate)  
目的金属減少

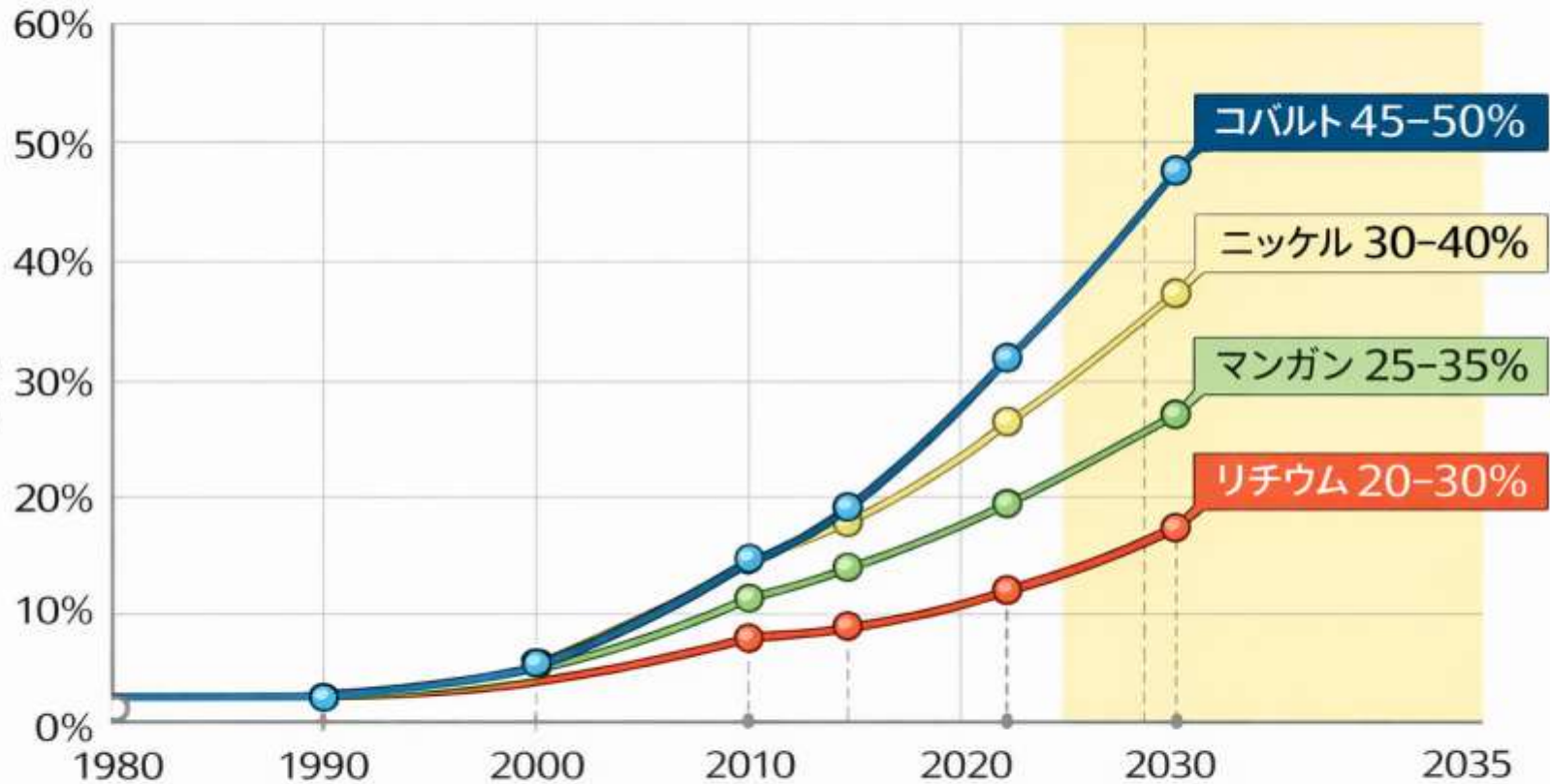
有機相 (loaded)  
目的金属濃縮減少





# LiB 金属循環の歴史 (1980-2035)

● Co ● Ni ● ニッケル ● マンガン ● リチウム



リサイクル含有率 (%)

LiB 初期    小型電池循環    -- EV循環    → 小売循環

# 金属別リサイクル量過去と未来

単位：kt/年

年	Co	Ni	Mn	Li
1990	~0	0	0	0
2000	1	0.5	0.3	0
2010	5	3	2	1
2015	10	8	6	3
2020	18	15	12	6
2025	35	40	30	15
2030	45	90	60	40
2035	50	<b>160</b>	90	<b>120</b>

# Li: 肥料の副産物から電池需要へ

年	生産量 (Li含有量 t)	備考/推定	リサイクル比率	Li価格 (\$ / t Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , 年平均)	用途の主流
1980	約15,000	初期産業段階	≈0%	約2,660	初期工業, セラミック等
1985	約18,000	需要堅調化	≈0%	約3,000	セラミック + 電池徐々増
1990	約24,000	電池用途が成長	≈0%	約4,030	可搬機器用電池増加
1995	約35,000	充電電池普及	<0.3%	約4,200	携帯機器中心
2000	約46,000	Li-ion 市場成熟前	~1%	約4,470	リチウムイオン増
2005	約65,000	EV/ノート増	~1-2%	約5,000	Li-ionが主要
2010	約84,000	EV前夜	~2%	約4,350	Li-ion急伸
2015	約132,000	EVリード開始	~3-4%	約6,000	EV/ESS用途増
2020	約82,700	ブーム前高値	~10-12%*	~6,400	EV/ESSが主流
2021	~107,000	生産急増	~10-11%	~14,200	EV/蓄電が圧倒
2022	~130,000	供給逼迫	~11-12%	~71,100	EV/蓄電中心
2023	~180,000	供給追上げ	~11%	~41,300	EV/ESS最主役
2024	~220,000	供給増強	~11-12%	~14,000	EV/ESS中心 (87%用途)

# Liリサイクルを行っている有力会社

企業	国	主プロセス	Li回収方法	Li単独収益	特徴
Redwood Materials	米国	湿式 + CAM合成	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 沈殿	×	Ni・CoとCAM製造で収益
Ascend Elements	米国	Hydro-to-Cathode	Li工程内再利用	×	pCAM合成で価値化
Li-Cycle	カナダ	湿式 (SX + 沈殿)	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 回収	×	Ni・Co主体
Umicore	ベルギー	乾式 + 湿式	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 副産物	×	Ni・Co中心
GEM	中国	湿式	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 回収	-	NCM材料製造と統合
Brunp (CATL系)	中国	湿式 + 材料製造	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 再利用	-	電池材料循環
邦普 (Brunp)	中国	湿式	Li塩再利用	-	電池メーカー統合
Huayou Recycling	中国	湿式	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 回収	-	CAM生産と一体

# Liリサイクルが経済的に厳しい理由

- Li含有量は電池重量の **1–3 wt% 程度** と小さい
- NCM電池1トンから回収できるLiは **約15–25 kg**
- $\text{Li}_2\text{CO}_3$  価格は2023年ピーク **70,000 USD/t** → 2024年 **10,000–15,000 USD/t** に低下
- Li価値は電池1トンあたり **150–400 USD程度**
- 一方、湿式リサイクルコストは **1,000–2,000 USD/t**
- 回収価値の多くは **Ni・Co** が占める
- LFP電池では **Ni・Coがゼロ** で収益源が消失
- LiはSX分離が困難で **蒸発・沈殿など追加工程が必要**
- Li回収工程だけで **\*\*全処理コストの20–30%\*\*** を占める場合がある

# Li抽出の原理的困難性



水素



トリチウム



リチウム



- ① 水和エネルギーが大きい  
→ 有機相へ移行しない
- ② 1価で錯体形成力が弱い  
→ 強いキレート形成が困難
- ③ Na/Kと性質が似すぎている  
→ 選択性が出にくい

NiやCoは“有機相に行きたがる”が、Liは“水相から出たがらない”。Liは最後に残る = 最後の精製（濃縮・再結晶・ppm管理）が重い

# 技術別にみるLi回収の難易度

技術	Li回収	技術的難易度	経済性
乾式	低	揮散・スラグ 損失	低
湿式	高	選択分離が難	中
Direct	材料内保持	組成管理困難	高ポテン シャル

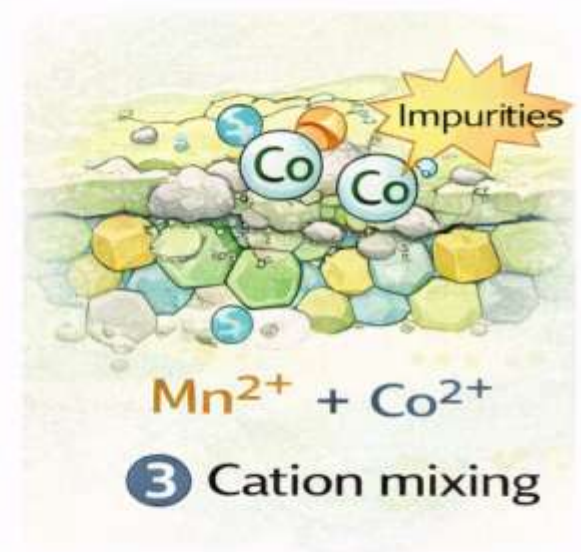
## リチウム欠損 (Li Loss)



## 表面劣化層 (Surface Reconstruction)



## カチオン混入 (Cation Mixing)



結晶構造は保たれているが、電気化学的活性が低下している状態をどう回復するか

chemicalよりphysicalのアプローチが必要

# ダイレクトリサイクル=「劣化した正極結晶を、再合成せずに再機能化する」技術

## ① リチウム欠損 (Li Loss)

### 劣化メカニズム

充放電サイクルによりLiがSEI形成や副反応で消費  
層状構造内のLi空孔増加  
LFPでは $Fe^{2+}/Fe^{3+}$ サイト不均衡

### 問題点

単純に $Li_2CO_3$ を添加して焼成しても：  
Liの拡散が不均一  
表面のみ回復バルクは欠陥残存

### 専門的課題

Li拡散係数の回復制御  
焼成温度と粒成長のトレードオフ  
表面コーティングの再形成  
→ **再リチウム化の均質性が最大の材料科学的課題**

## ② カチオン混入 (Cation Mixing) 特にNMC系で深刻。

### 現象

$Ni^{2+}$ がLiサイトに侵入  
層状構造の秩序低下  
Li拡散経路阻害

### 問題

一度発生したカチオン混入は：熱処理だけでは完全回復しない  
再秩序化には高温が必要、高温は粒成長を促進  
→ 粒径増大 → レート性能低下

### 技術的ジレンマ

秩序回復 vs 粒径制御

## ③ 表面劣化層 (Surface Reconstruction)

### NMCでの問題

高電圧運用で岩塩相形成  
表面が不活性化

### LFPでの問題

Fe溶出  
電解液分解生成物堆積

### ダイレクトの課題

表面層を除去しつつ：  
バルク結晶を壊さない粒界を維持する  
→ 選択的エッチング・洗浄が難しい

## ④ 不純物混入 (Al, Cu, Fe)

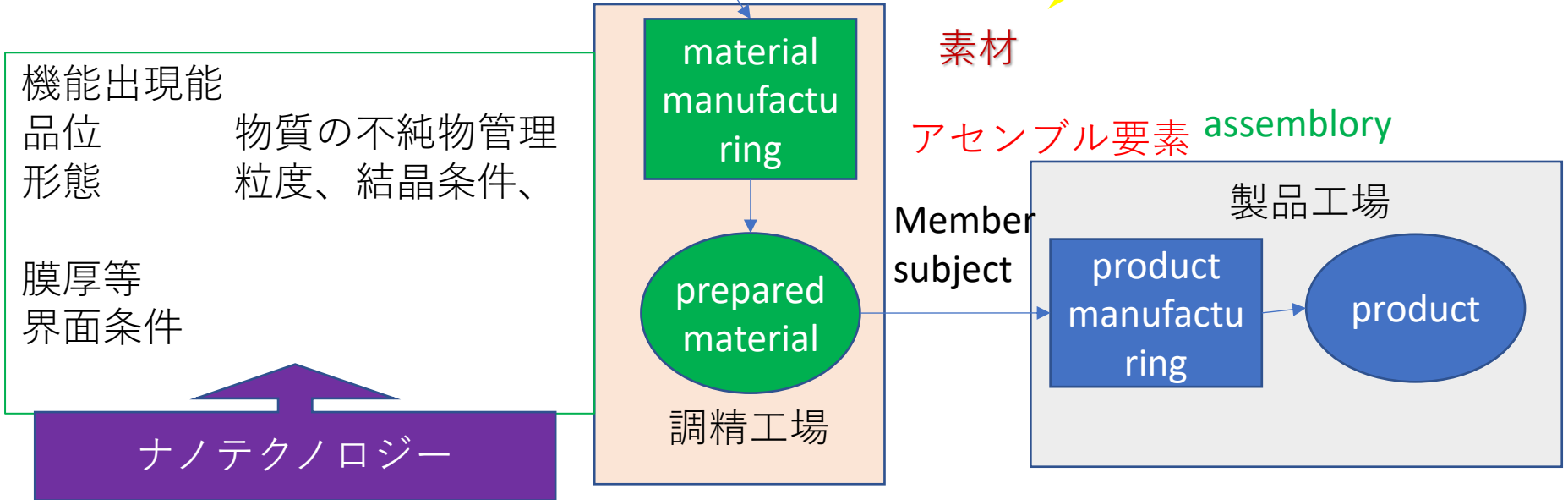
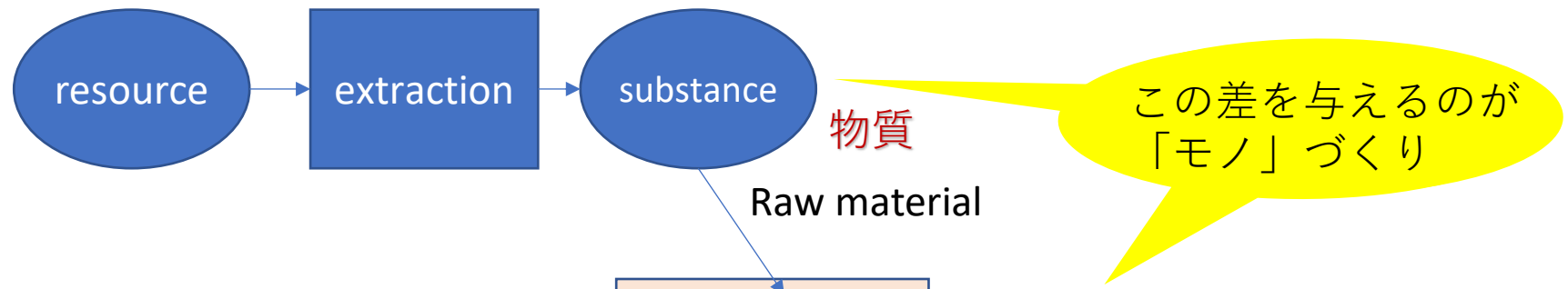
解体・粉砕時に：集電体由来Al/Cu混入、微量Fe混入、ppmレベルでも：層状構造の相安定性変、サイクル寿命低下、ダイレクトは元素精製工程を通さないため：→ 不純物許容範囲が狭い。これが湿式との決定的違い。

## ⑤ 混合化学組成問題

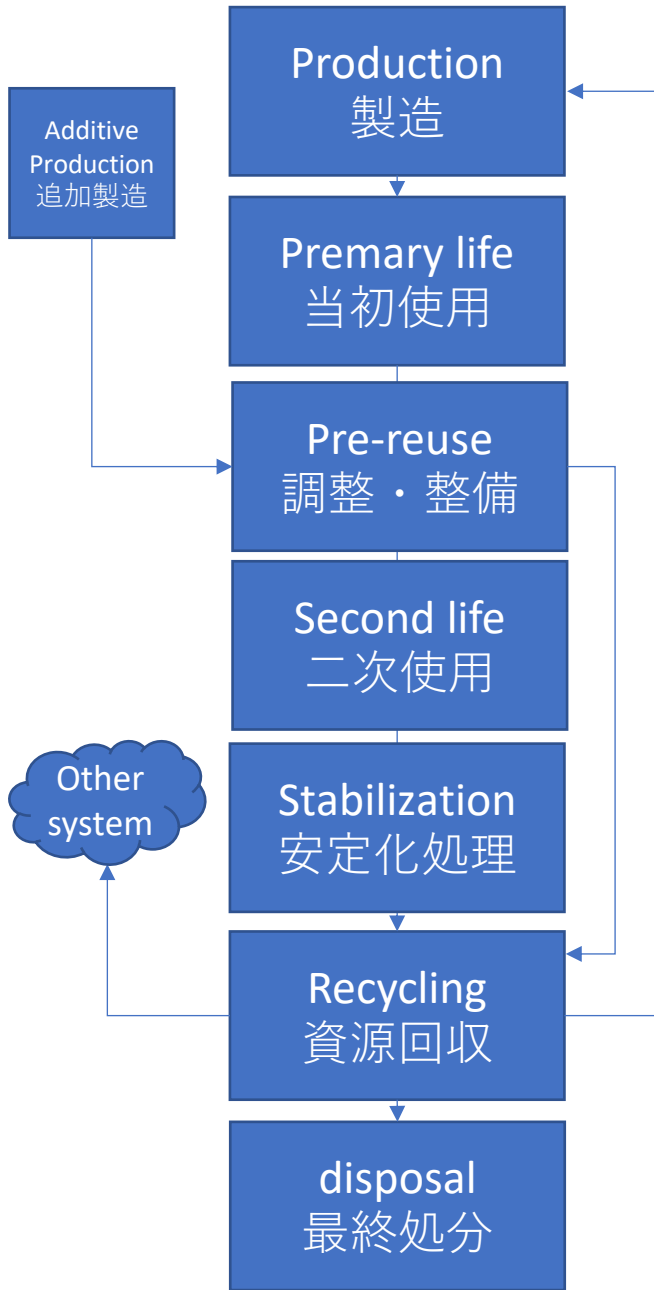
回収電池は：NMC111/622/811混在、LFP混入、異メーカー混合  
ダイレクトは：同一組成が前提  
→ 選別精度が材料科学の前段で決定的

## ⑥ 機械的損傷

粉砕時：二次粒子崩壊、一次粒子露出、比表面積増大  
→ 副反応増大  
→ 再活性化後も寿命短縮



- 資源・物質のリサイクルから  
乾式、湿式
- 素材機能のリサイクルへ  
ダイレクトリサイクル
- さらには  
製品機能の循環へ  
リパーパスによるライフサイクル管理



1台当  
重量当  
容量当



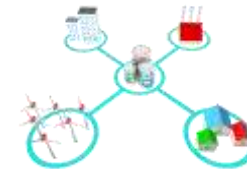
走行距離



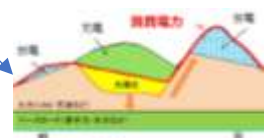
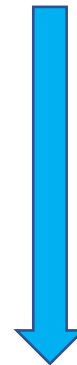
Co-purpose



Re-use



Re-purpose



充放電量



供給電力

# AIの予想するEV電池の運命2035

2035年 退役EV電池 (100%)

Recycling (金属回収)  65-70% 350-450GWh

Repurpose (定置蓄電等)  20-25% 120-180GWh

Reuse (モビリティ再使用)  5-10% 30-70GWh

地域	Repurpose比率
----	-------------

中国	<b>25-30%</b>
----	---------------

欧州	15-20%
----	--------

米国	15-20%
----	--------

日本	10-15%
----	--------

年	Repurpose割合
---	-------------

2020	<5%
------	-----

2025	10-15%
------	--------

2030	15-20%
------	--------

2035	<b>20-25%</b>
------	---------------

# リパーパスに求められる主要技術

- **高精度SOH診断技術**（容量・内部抵抗・劣化モードを短時間で評価）
- **セルばらつき評価アルゴリズム**（セル間性能差の検出・分類）
- **電池履歴データ活用**（BMSログ・温度履歴・充放電履歴の解析）
- **安全性評価技術**（熱暴走リスク・内部短絡の診断）
- **モジュール再構成設計**（異なるセルを組み合わせる再パッケージ技術）
- **リパーパス専用BMS**（不均一セル管理・劣化追跡）
- **用途別性能マッチング**（定置蓄電・低負荷用途などへの最適配置）
- **劣化補償制御技術**（セルバランシング・出力制御）
- **標準化された電池データID**（電池パスポート・トレーサビリティ）
- **寿命予測モデル**（AI・劣化モデルによる残寿命推定）

リパーパスは「材料技術」よりも **診断・情報・制御技術の体系化**が成立条件になる

LiB循環は「金属回収」から  
「材料再生」と「機能再利用」へ進化する。

## これからのLiBリサイクル

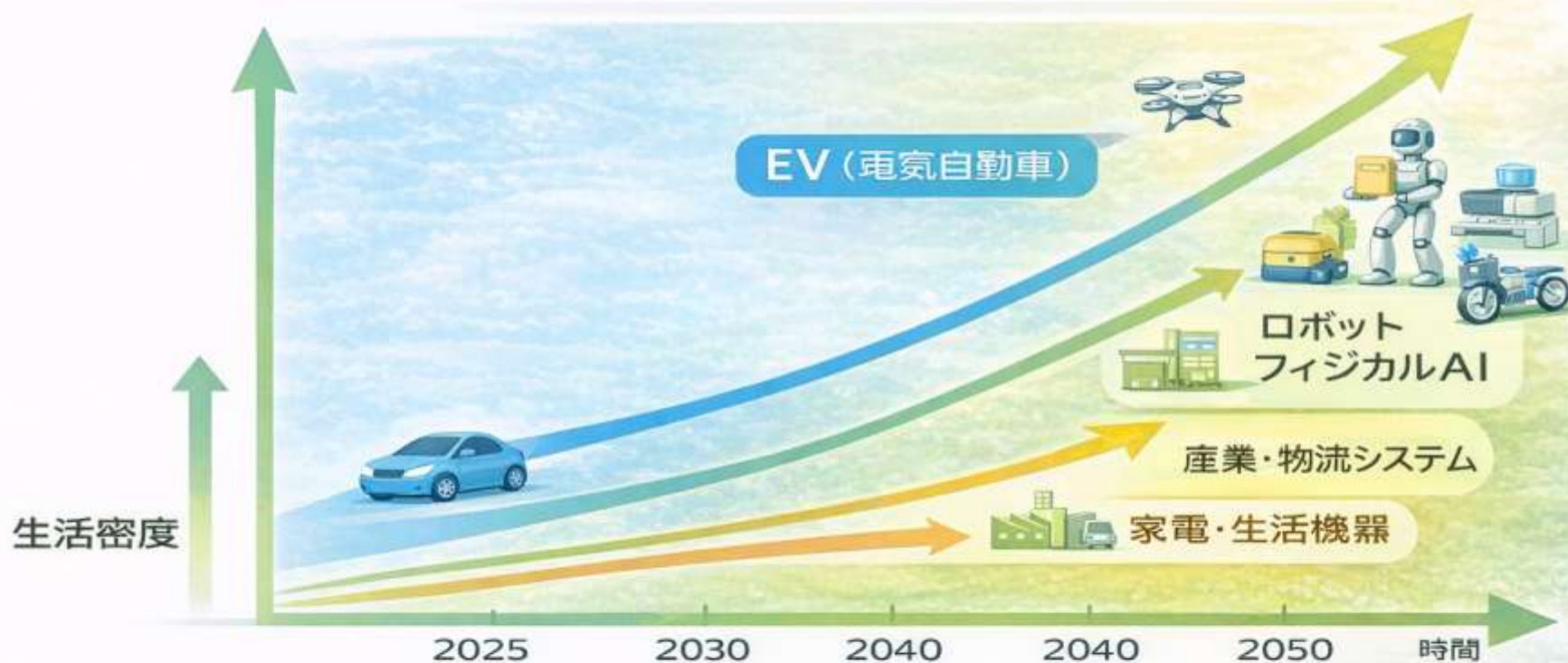
- **材料科学に基づく Direct Recycling**  
(活物質構造を理解し再活性化する材料再生技術)
- **電池材料循環 (CAM循環) の確立**  
(金属回収から正極材料再生へ)
- **信頼情報に基づく Repurpose 産業**  
(電池履歴・診断データを活用した機能循環)

# 10万人都市のエネルギーフロー



# LiBの生活密度の伸び予想 (2050年まで)

稼働個体数/人 or 接続密度などを示す相対指数



フィジカルAIやドローンが2040年以降急成長。  
分散小型電源システムとしてLiBが生活に浸透すると予測します。

# 提言

- **1. 資源リサイクルの位置づけの転換**
- リチウムイオン電池の資源回収は、コバルト時代とは異なり、**経済合理性のみで成立させることは困難**
- とりわけ、電池産業の海外シフトおよび**LFP系の拡大**により、採算性は今後さらに低下
- 一方で、リチウムイオン電池は、日常生活にも重要なエネルギーの集約体の一つであり、そのエネルギーが必然的にもたらず発火リスクは社会的に対応できる体制が必要である。
- よって、リチウムイオン電池の資源リサイクルは
  - 「資源ビジネス」ではなく
  - **発火性・有害性を持つ廃棄物の適正処理事業**として位置づけるべきである
- 水銀処理と同様もしくはそれ以上の力を入れて、
  - **国として制度的・財政的に保護・維持すべきインフラ事業**とすること

# 提言

- **2. 活物質リファーマービッシュ（Direct Recycling）とリパーパスの戦略的育成**
- 一方で、
  - **活物質リファーマービッシュ（Direct Recycling）**
  - **リパーパス（再用途化）**  
は、資源回収とは異なり、**将来的な産業競争力の源泉**となり得る領域である
- これらは単なる再利用ではなく、
  - 状態評価
  - 劣化診断
  - 機能再構築
  - 用途最適配置を伴う、**高度な技術集約型ビジネス**である
- 国は以下に対して重点的に投資すべきである
  - 計測技術（SoH/SoC推定、内部診断）
  - 材料再生技術（結晶・界面制御）
  - 評価・標準化技術
  - データ基盤・情報流通システム
  - トレーサビリティと品質保証体系

# 提言

- **3. 国際展開を前提とした循環システムの構築**
- 電池の循環は国内で完結しない
- 発展途上国を含む**グローバルな再配置・再利用市場**が拡大する
- 日本は
  - 「モノの輸出」ではなく
  - **管理・評価・最適配置の“仕組み”の輸出**を志向すべきである
- そのために
  - 国際標準の策定主導
  - データ連携基盤の国際化
  - 安全・品質認証制度の確立を戦略的に進める

# 提言

- **4. 「機能循環」への産業構造転換**
- リサイクルの本質は、
  - 物質回収ではなく
  - 機能の再構築（機能循環）である
- 電池における価値は
  - 元素量ではなく
  - 構造化された状態（機能）に宿る
- よって政策は
  - 素材産業中心から
  - **機能材料・機能管理産業への転換**  
を明確に志向する必要がある

# 提言

- **5. 産業基盤としての「電池管理技術」の確立**
- 今後の競争力の中核は、
  - 製造能力ではなく
  - **電池の状態を把握し制御する能力**に移行する
- 必要となるのは
  - BMSの高度化
  - デジタルツイン
  - AIによる劣化予測
  - ライフサイクルデータ統合
- これらを支える基礎研究から実装まで、**長期的かつ一体的な投資枠組み**を構築すべきである

# 提言

- **6. 制度設計（EPR・トレーサビリティ）の強化**
- **拡大生産者責任（EPR）の明確化**
- **電池単位でのライフサイクル追跡制度の導入**
- **回収・再利用・再生の各段階における**
  - 責任分担
  - データ共有
  - 安全基準の明確化
  
- **7. 人材・研究基盤への長期投資**
- **材料科学、電気化学、情報科学、システム工学を横断する複合領域人材の育成**
- **大学・研究機関・企業を横断した循環技術研究拠点の形成**
- 「製造」ではなく「循環と管理」を担う新たな技術者像の確立

# 提言

- **8. 国家産業としての明確な位置づけ**
- リチウムイオン電池の循環・再生・管理は、
  - エネルギー安全保障
  - 産業競争力
  - 環境対応  
を同時に支える基盤である
- よって本領域を、  
**日本産業の将来を担う中核分野として明確に位置づけること**
- 短期の採算ではなく、  
**数十年単位の国家戦略として推進すること**

## 結語

- 資源は枯渇しても、機能は再構築できる。  
そして、その機能を管理し、循環させる能力こそが、次の産業競争力を規定する。
- 我が国が目指すべきは、資源の回収国ではなく、  
**エネルギー機能を循環させる技術とシステムを支配する国**である。