

『休廃止鉱山のグリーン・レメディ  
エーションに関する研究の最前線』

2021年9月7日(火) Webシンポジウム

## カーボンニュートラルと 資源循環と休廃止鉱山

早稲田大学 理工学術院

東京大学大学院 工学系研究科

所 千晴

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

<http://www.tokoro.env.waseda.ac.jp/>



# 2015年 環境に関する3つの大きな動き

## 2015年9月 SDGs 採択

国連サミットにて

Sustainable Development Goals

持続可能な開発目標

ビジョン

## 2015年11月 パリ協定 採択

国連気候変動枠組条約締約国会議(通称COP)にて

世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて2°Cより十分低く保ち、1.5°Cに抑える努力をする

ミッション

ジャスティス

## 2015年12月 サーキュラーエコノミー

EUがパッケージ発表

循環(型)経済

製品・部品・資源を最大限に活用するビジネスモデル

バリュー

オペレーション

# 日本の動き



我が国は、2050年までに、温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指すことを、ここに宣言いたします。  
(2020年10月26日所信表明演説)

新型コロナウイルス後は、持続可能で強靱な経済社会への再設計に向け、「脱炭素社会」「分散型社会」への移行と共にサーキュラー・エコノミーへの移行が重要。  
(2021年1月20日経団連懇談会)



# ● 革新的な技術開発

## 1. エネルギー転換

- 再生可能エネルギー（革新的太陽光、次世代地熱、洋上風力）
- メタネーション
- 火力+CCU（微細藻類培養技術、CCS）
- 革新的原子力技術、核融合
- 水素サプライチェーン（製造、輸送・貯蔵、ステーション、水素発電）
- 電力ネットワーク（ネットワーク、次世代パワーエレクトロニクス、次世代定置用蓄電池）

## 2. 運輸

- 電動化、軽量化（自動車、航空機、次世代車載・航空機用蓄電池開発）
- 水素利用
- バイオ燃料・合成燃料等

## 3. 産業

- 金属（ゼロカーボン・スチール、金属リサイクル）
- 化学（人工光合成、フロー合成、プラ循環）
- セメント、その他産業（CCUS、バイオ燃料）

## 4. 業務・家庭・その他

- 定置用燃料電池
- 熱利用
- 社会システム・ライフスタイル（シェアリング）
- 資源循環のスマート化
- スマートシティ
- グリーン冷媒

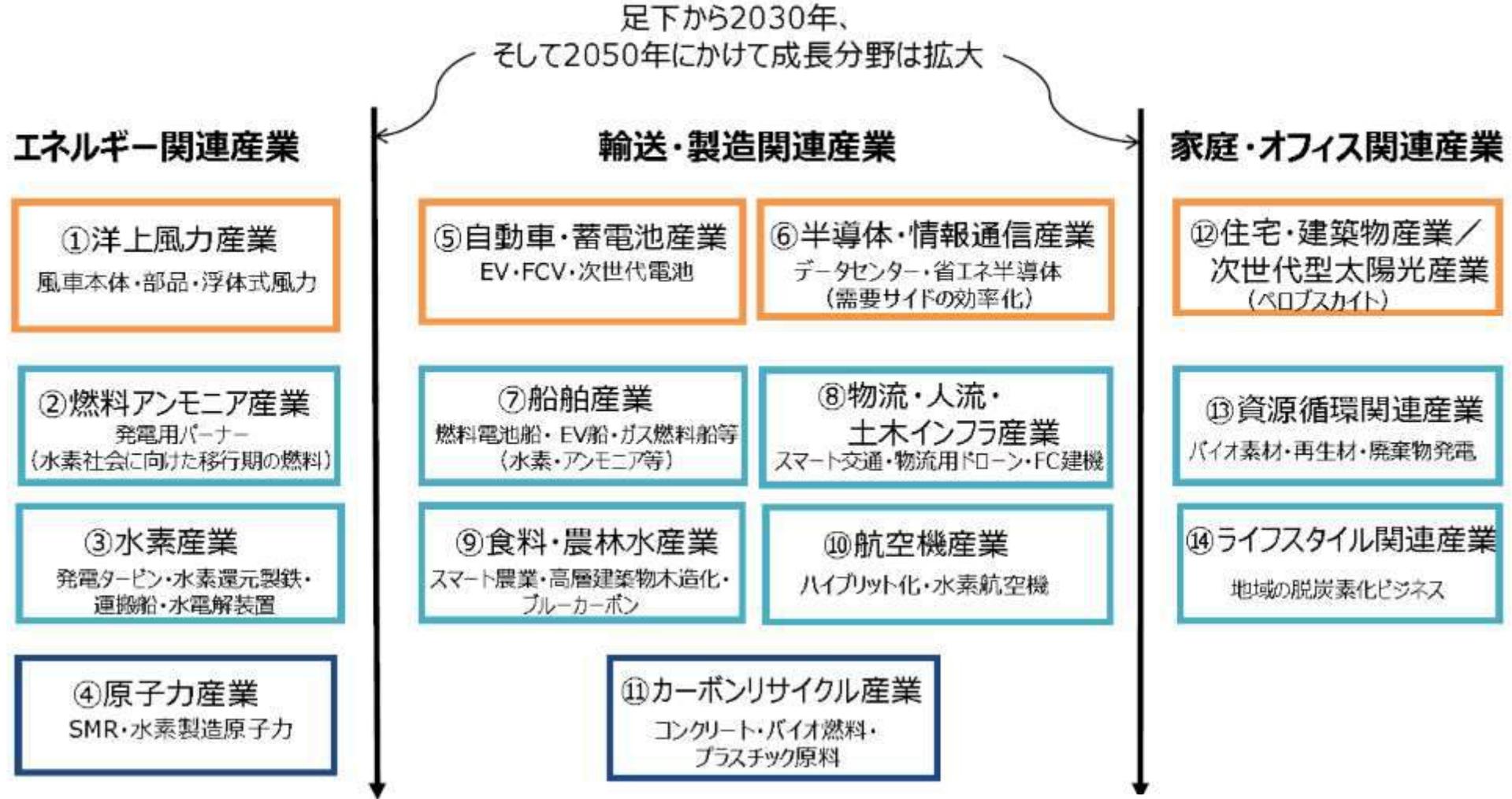
## 5. 非エネルギー部門

- 農林水産業
- 吸収源（農地、林業関係、ブルーカーボン）
- バイオ利用（ゲノム編集、スーパー植物、微生物開発）
- 高機能バイオ素材

経済産業省（2019年10月29日）：革新的環境イノベーション戦略提案書

[https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/kankyoinnovation/pdf/003\\_04\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/kankyoinnovation/pdf/003_04_00.pdf)

※来春のグリーン成長戦略の改定に向けて  
目標や対策の更なる深掘りを検討。  
(自動車・蓄電池産業など)



出展：内閣官房 成長戦略会議「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」/2020年12月  
<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/seicho/seichosenryakukaigi/dai6/siryou1.pdf>

徹底的な省エネ

基礎検討

- ・銅製錬へのリサイクル材利用率向上  
樹脂/ハロゲン等、不純物分離技術開発  
レアメタル等、分離・利活用技術開発
- ・難処理鉱石の高効率選鉱製錬  
ヒ素/水銀/レアメタル等、分離技術開発

CN・CEに独自に貢献

基礎検討

- ・難リサイクル原料の利活用  
樹脂/ハロゲン等の亜鉛・鉛製錬への利活用

基礎検討

- ・新サプライチェーン構築  
新規レアメタル材供給による分離回避

創エネとCNに独自に貢献

基礎検討

- ・水素エネルギーの製造・利用  
金属廃棄物利用/酸素利用

基礎検討

- ・休廃止鉱山廃水を利用した中小水力発電  
スケール・酸腐食抑制技術開発

CO2固定

基礎検討

- ・休廃止鉱山を利用した緑化  
酸性土壌に適した緑化技術開発

- ・休廃止鉱山充填材へのCO2固定  
Ca含有廃棄物の利活用

LCA/MFA/トレーサビリティ

# 不純物制御に「CO<sub>2</sub>」を追加して再検討



…溶液中で溶解度積を満たし、沈殿を生成する。

…バルク溶液中では溶解度積を満たしていないにもかかわらず、固液界面において局所的に溶解度積を満たし、沈殿を生成する。

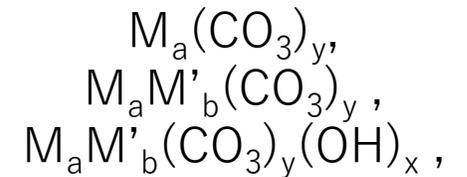
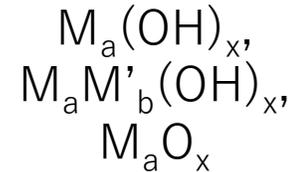
…溶液中のイオンが、固液界面上に濃縮される。

## 表面錯体形成

…金属(水)酸化物や粘土鉱物のエッジにて生じる。  
静電的な力で固液界面上に濃縮したイオンが固相表面との化学的な結合力により表面に収着し、自身も電位決定イオンとなる。

## イオン交換

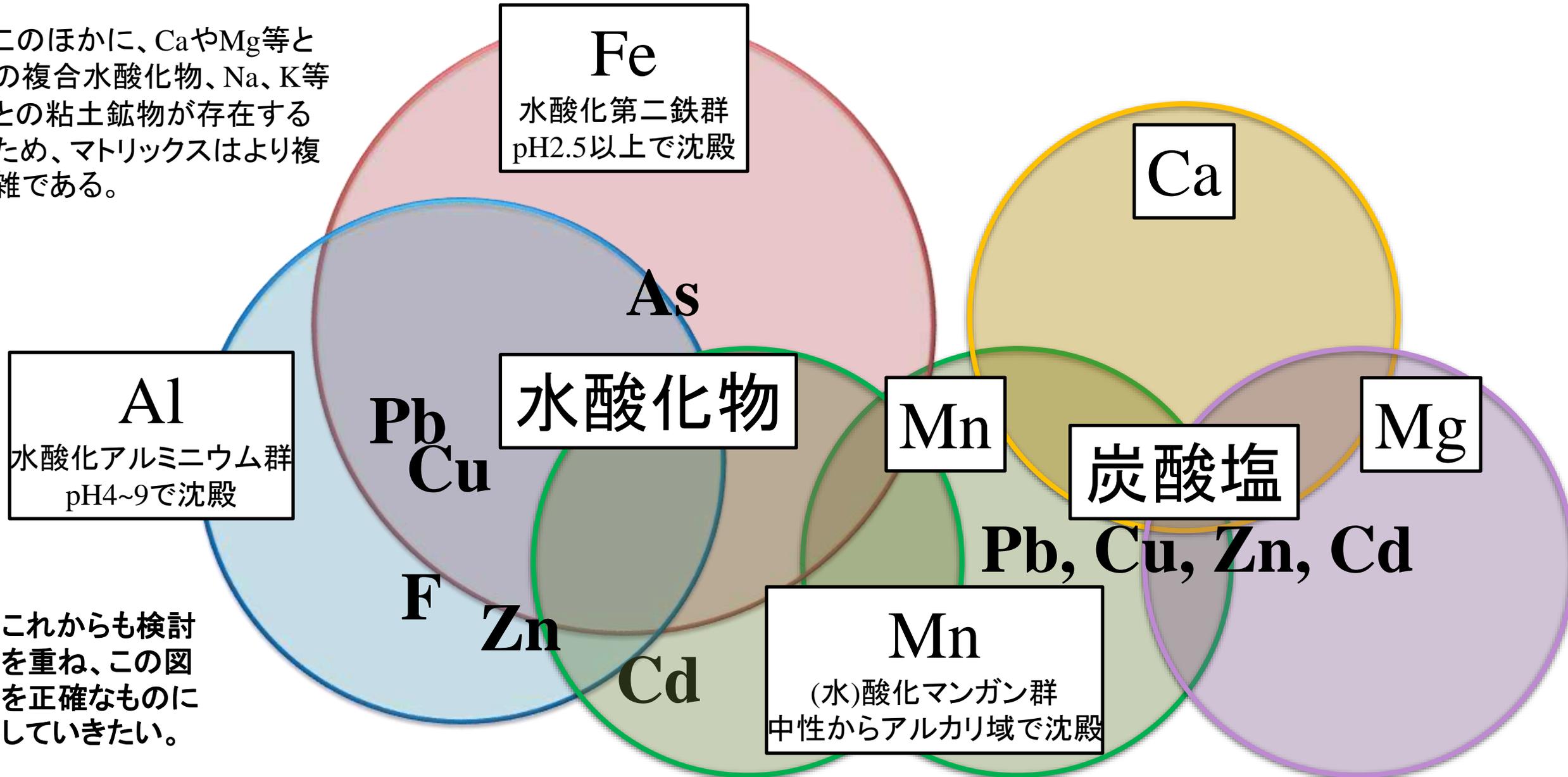
…主に粘土鉱物にて生じる。  
結晶構造中の原子の同型置換により生じた電荷を打ち消すためにイオンを収着する。



1つ1つの鉱物への  
収着 (吸着)

# 坑廃水処理に関するマトリックス群

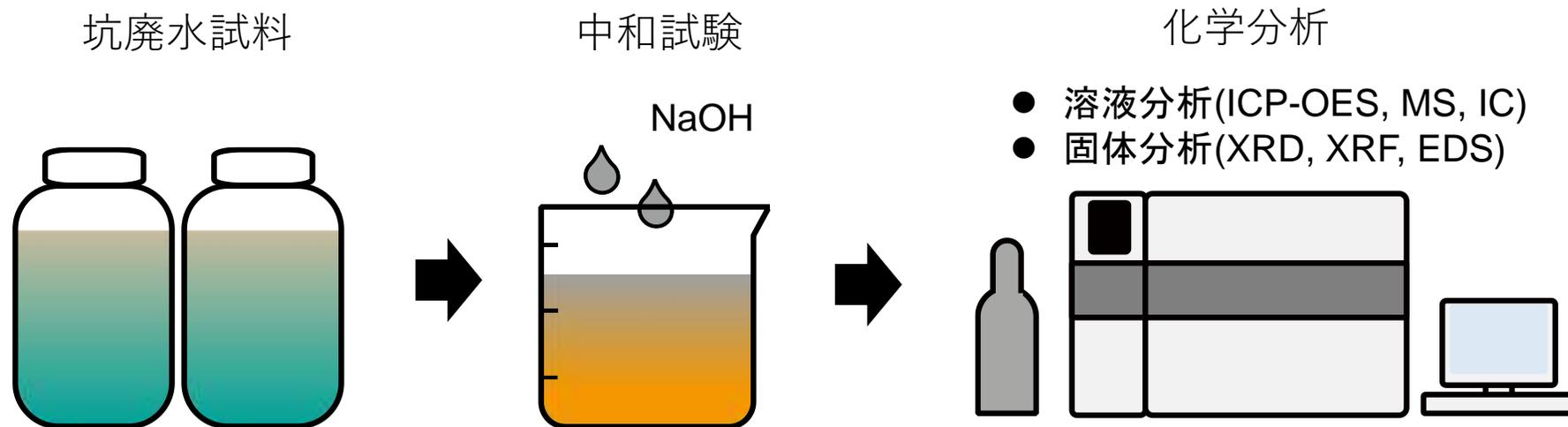
このほかに、CaやMg等との複合水酸化物、Na、K等との粘土鉱物が存在するため、マトリックスはより複雑である。



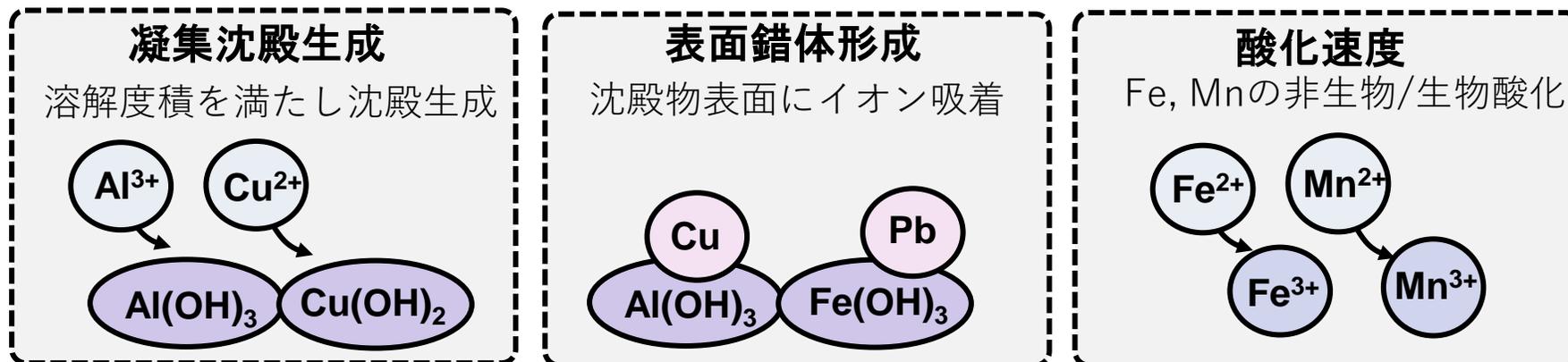
これからも検討を重ね、この図を正確なものにしていきたい。

# 坑廃水の中和モデルの構築

## ■ 実廃水を使用した中和試験や現場での試料採取



## ■ PHREEQC(ver.3, USGS)による中和モデル構築



# 沈殿平衡計算（水酸化物・硫酸塩）

## 計算に考慮した沈殿種

Solid phases	Chemical formula
Al(OH) <sub>3</sub> (gibbsite)	$\text{Al(OH)}_3 + 3\text{H}^+ \rightleftharpoons \text{Al}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O}$
Fe(OH) <sub>3</sub> (ferrihydrite)	$\text{Fe(OH)}_3 + 3\text{H}^+ \rightleftharpoons \text{Fe}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O}$
Pb(OH) <sub>2</sub>	$\text{Pb(OH)}_2 + 2\text{H}^+ \rightleftharpoons \text{Pb}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$
Manganite	$\text{MnOOH} + 3\text{H}^+ \rightleftharpoons \text{Mn}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$
Zn(OH) <sub>2</sub>	$\text{Zn(OH)}_2 + 2\text{H}^+ \rightleftharpoons \text{Zn}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$
Mg(OH) <sub>2</sub> (brucite)	$\text{Mg(OH)}_2 + 2\text{H}^+ \rightleftharpoons \text{Mg}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$
Cu(OH) <sub>2</sub>	$\text{Cu(OH)}_2 + 2\text{H}^+ \rightleftharpoons \text{Cu}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$
Cd(OH) <sub>2</sub>	$\text{Cd(OH)}_2 + 2\text{H}^+ \rightleftharpoons \text{Cd}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$
Ca(OH) <sub>2</sub>	$\text{Ca(OH)}_2 + 2\text{H}^+ \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$
CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O (Gypsum)	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O}$

# 表面錯体形成モデル

- 水酸化第二鉄に対する表面錯体形成  
交換容量：0.205 [mol / mol-Fe]

	反応種
≡Fe	H <sup>+</sup> , OH <sup>-</sup> , Zn <sup>2+</sup> , AsO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , Cd <sup>2+</sup> , H <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Cu <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Mn <sup>2+</sup>

- 水酸化アルミニウムに対する表面錯体形成  
交換容量：0.58 [mol / mol-Al]

	反応種
≡Al	H <sup>+</sup> , OH <sup>-</sup> , Zn <sup>2+</sup> , AsO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , Cd <sup>2+</sup> , H <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Cu <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Mn <sup>2+</sup> , K, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>

- マンガナイトに対する表面錯体形成  
交換容量：0.205 [mol / mol-Mn]

	反応種
≡Mn	H <sup>+</sup> , OH <sup>-</sup> , Zn <sup>2+</sup> , Cd <sup>2+</sup>

# 鉄およびマンガン酸化速度モデル

- 鉄酸化速度

$$\frac{d[\text{Fe(II)}]}{dt} = -(k_1 + k_2[\text{OH}^-]^a P_{\text{O}_2})[\text{Fe(II)}]$$

$$k_1=2.9 \times 10^{-9}, \quad k_2=1.3 \times 10^{12}, \quad a=2 \quad (\text{Singer and Stumm, 1970})$$

- マンガン酸化速度

$$\frac{d[\text{Mn(II)}]}{dt} = -(k_3 + k_4[\text{OH}^-] P_{\text{O}_2})[\text{Mn(II)}]$$

$$k_3=4.9 \times 10^{-7}, \quad k_4=2.1 \times 10^5 \text{ (fitting)}$$

# 炭酸塩による凝集沈殿モデル検討

2020年度に炭酸塩生成による凝集沈殿を新たに考慮し、より高精度な中和モデルの構築

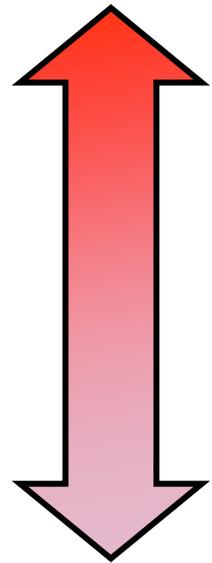
Solid phases	Chemical formula
MnCO <sub>3</sub> (rhodochrosite)	$\text{MnCO}_3 \rightleftharpoons \text{Mn}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$
CdCO <sub>3</sub> (otavite)	$\text{CdCO}_3 \rightleftharpoons \text{Cd}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$
CuCO <sub>3</sub>	$\text{CuCO}_3 \rightleftharpoons \text{Cu}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (malachite)	$\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3 + 2\text{H}^+ \rightleftharpoons 2\text{Cu}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_3^{2-}$
MgCO <sub>3</sub> (magnesite)	$\text{MgCO}_3 \rightleftharpoons \text{Mg}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$
PbCO <sub>3</sub> (Cerrusite)	$\text{PbCO}_3 \rightleftharpoons \text{Pb}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$
Pb <sub>3</sub> (OH) <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (Hydrocerrusite)	$\text{Pb}_3(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2 + 2\text{H}^+ \rightleftharpoons 3\text{Pb}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_3^{2-}$
ZnCO <sub>3</sub> (Smithsonite)	$\text{ZnCO}_3 \rightleftharpoons \text{Zn}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$
ZnCO <sub>3</sub> :H <sub>2</sub> O	$\text{ZnCO}_3:\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Zn}^{2+} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_3^{2-}$
CaCO <sub>3</sub> (calcite)	$\text{CaCO}_3 \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$

# 国内鉱山の酸性坑廃水処理への対策

坑廃水処理にかかる費用削減を達成するために、現在～将来の環境負荷量変化を把握し、最適な処理方法を選択する必要

## 高負荷廃水

金属濃度高  
流量大



## 低負荷廃水

金属濃度低  
流量小

### ● 発生源対策

- 土木工事による鉱山周辺地下水流系の制御
- 発生源となる鉱石・尾鉱の除去

### ● 高効率な処理法

- 添加薬剤の選択による中和処理最適条件の検討
- 中和処理施設の維持・改良

### ● 持続可能な処理法(=パッシブトリートメント)

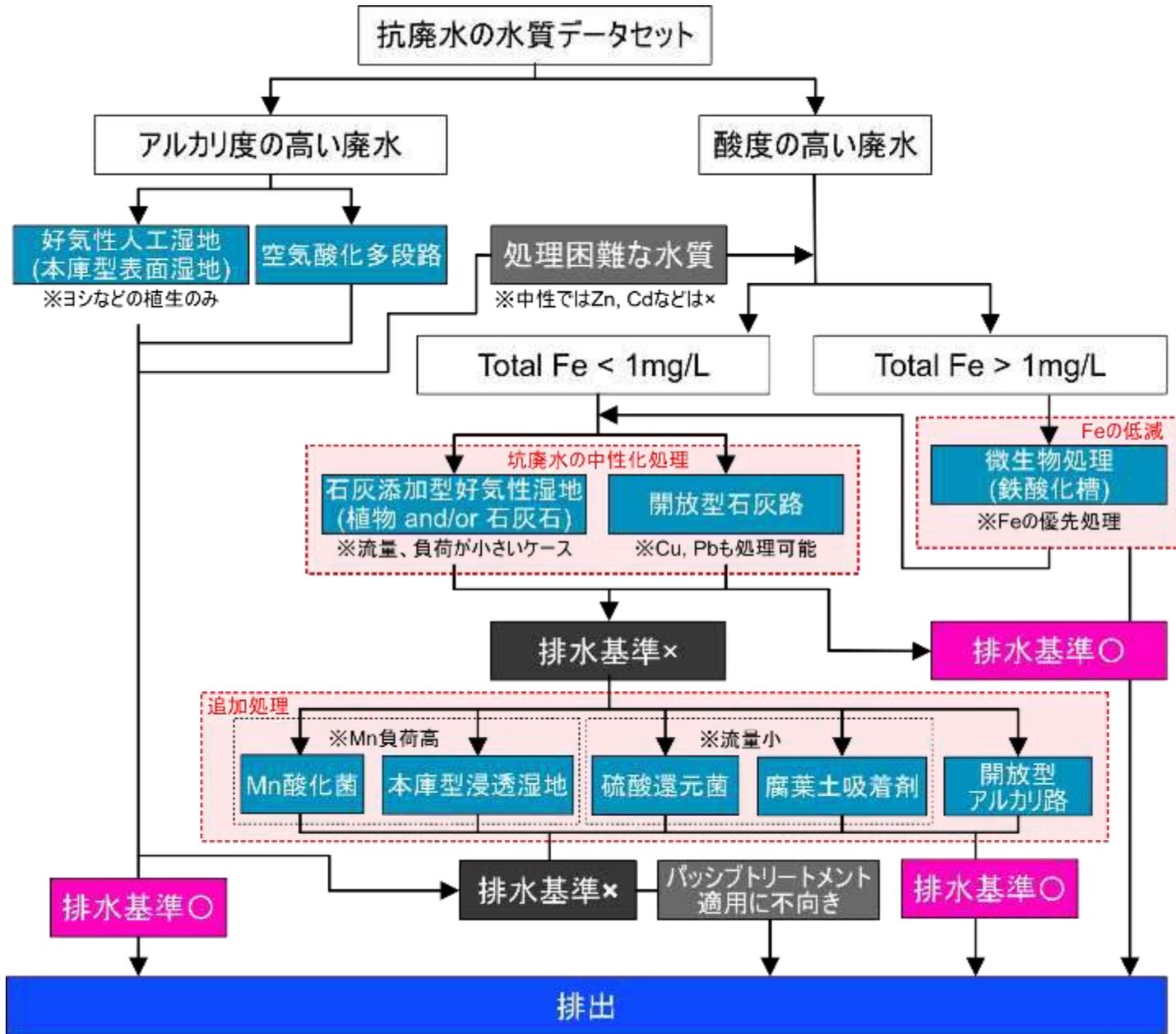
- 石灰石水路や人工湿地を利用
- 植物や微生物等の生物を活用した処理法

### ● 柔軟な管理（利水点管理等）

- リスクガバナンスに基づいたリスクコミュニケーション
- そのためのデータ取得

- ・ 植林  
(発生源対策 + CO2固定)
- ・ 再生エネ導入  
(太陽光・水力)
- ・ 炭酸塩化学  
(不純物除去 + CO2固定 + 発生源対策)
- ・ 凝集剤等回収
- ・ 遠隔監視  
(レジリエント + 省エネ)

# パッシブトリートメント 検討フローシートの改訂



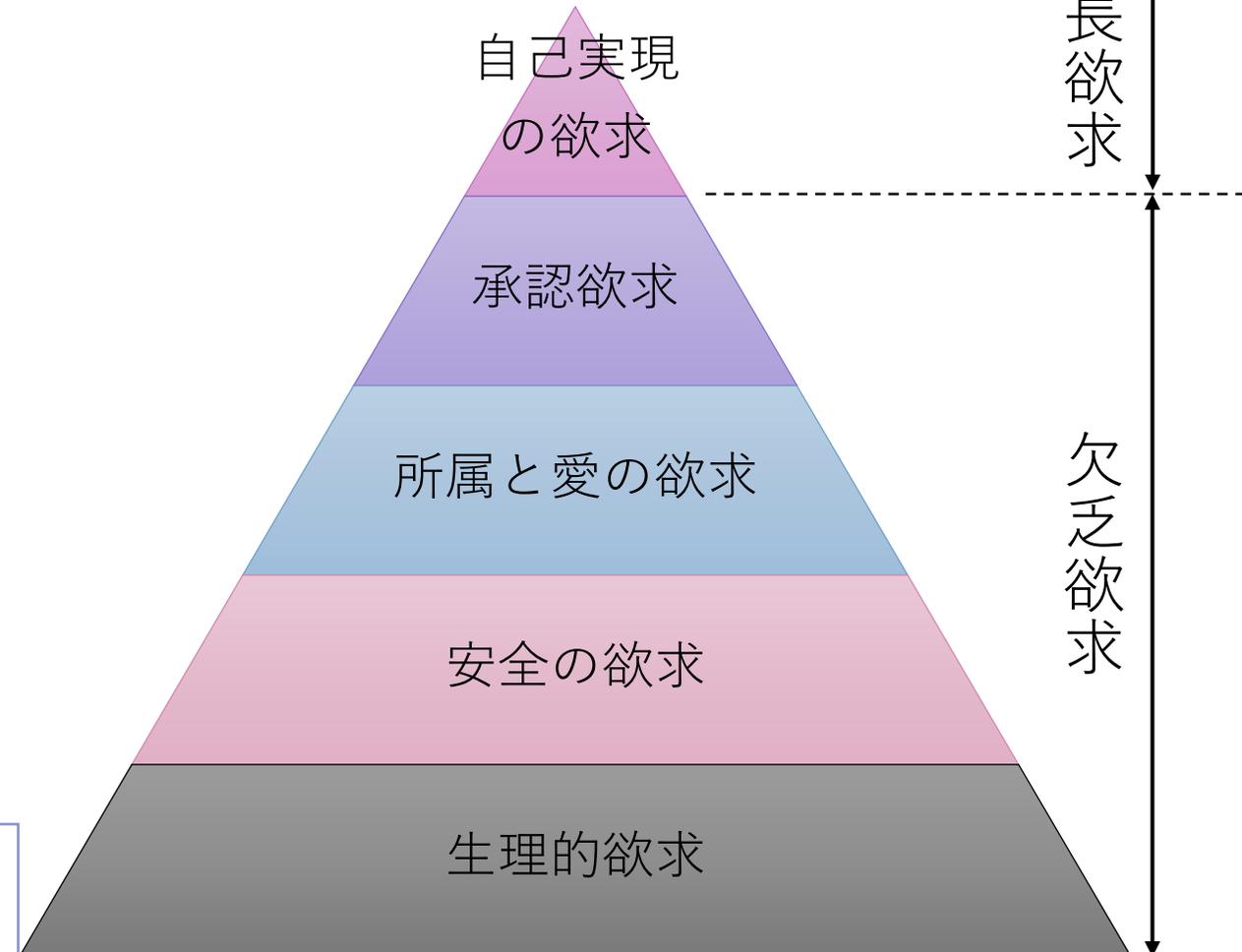
# SDGsとWell-Beingへの探求

文化、芸術、地域、育ち、・・・  
 個の価値観に合った「刺激的な」「自己実現」  
 (ポストSDGs)

マズローの欲求5段階説

成長欲求

欠乏欲求



グローバルな課題と個のWell-beingを  
 どのように両立するか、よい相互作用を構築できるか

# まとめ

- カーボンニュートラルには、スコープ1（事業者自らによる温室効果ガスの直接排出）、スコープ2（他社から供給された電気、熱・蒸気の使用に伴う間接排出）、スコープ3（その他事業者の活動に関連する他社の排出）があり、その範囲設定はこれからである。したがって、すべての活動が関係し得る。
- カーボンニュートラルという新しい評価軸が導入されることによって、これまで検討された省エネルギー、不純物制御技術の一部に再度、実用化の可能性が出てくるかもしれない。
- これまで、無機有害元素の分離に対して培われてきた技術に、CO2という観点を入れて再構築すべきである。
- これまでの分離技術を、カーボンニュートラルという軸でも再評価すべきである。

# 謝辞

本研究の一部はJOGMECならびに資源環境センターの補助を受けたものであり、ここに感謝申し上げます。

また、本研究の一部は、早稲田大学理工学術院・淵田茂司講師、東京大学大学院工学系研究科・高谷雄太郎准教授と共に実施したものです。

さらに、本研究に協力していただいた早稲田大学所研究室のスタッフ、学生の皆さんに感謝申し上げます。