

# パン酵母を活用する 貴金属（金、白金族金属）のバイオ分離・回収

大阪府立大学 名誉教授・理学系研究科 客員研究員

小西 康裕

## 1. はじめに

天然鉱物資源に乏しい我が国が、都市鉱山からの有用金属リサイクルシステムの高度化を図るために、低コスト・高効率な金属精錬技術等のリサイクル技術を開発することは、重要なテーマである。著者の研究グループでは、従来型の化学的方法や物理的方法とは異なり、常温・常圧下での微生物機能を活用する生物的方法によって、都市鉱山から貴金属・レアメタル（Au, Pd, Pt, Rh, In等）を分離・回収するバイオ技術について工学的視点から探究してきた<sup>1-4)</sup>。最近、低コストで大量入手できるパン酵母（食品分野の普及品）には、酸性溶液中の金・白金族金属イオン（Au(III), Pd(II), Pt(IV)）を吸着する機能と、中性溶液中の貴金属イオンを金属ナノ粒子に還元する機能が備わっていることを見出した<sup>5-7)</sup>。

本稿では、パン酵母を金属イオン分離剤として活用する実液（使用済み電子部品の王水溶解液、めっき廃液）からの貴金属イオン（Au(III), Pd(II)）の高効率・選択的回収について解説するとともに、パン酵母を利用する金・白金族金属リサイクルシステムについて説明する。

## 2. 貴金属イオン分離剤パン酵母の実液への応用

### 2.1 使用済み電子部品溶解液からの金のバイオ回収

使用済み家電品から選別された金属スクラップには、10～440 mg/kgの貴金属（Au, Pd）<sup>8)</sup>が含まれており、その溶解液には貴金属に比べて卑金属（Cu, Ni, Fe）が相対的に高濃度で共存することになる。このような溶解液からの貴金属の分

離操作では、強酸性溶液中の希薄な貴金属イオンに対する選択性が、分離剤に求められる機能である。例えば、使用済み電子部品の粉碎物を50%王水によって溶解処理すると、その溶解液（pH 0）の化学組成はAu濃度197 mg/L、Cu濃度191 mg/L、Ni濃度704 mg/L、Fe濃度1057 mg/Lとなる。

この強酸性溶解液にパン酵母を添加して各種貴金属イオン回収実験を回分方式で行った（図1）。なお、溶解液に対するパン酵母の添加量（液相細胞濃度）は16 g-乾燥細胞/L-溶液（ $5.0 \times 10^{11}$  cells/L）、室温、空気雰囲気下である。図1に示すように、パン酵母による吸着分離によってAu(III)回収率が急速に増加し、10 min以内の回分操作で吸着平衡に達する。一方、パン酵母による卑金属イオン（Cu(II), Ni(II), Fe(III)）の回収率は非常に低く、パン酵母を分離剤として用いて、溶解液中のAu(III)イオンだけを選択的に吸着分離できる。また、電子部品の溶解液をpH 0からpH 1に調整（NaOH溶液を使用）することにより、パン酵母によるAu(III)回収率（平衡値）が58%から98%に著しく増加する。強酸性溶解液からAu(III)イオンを迅速・高効率かつ選択的に回収できる点は、貴金属イオン分離剤としてパン酵母を実用化の上で好材料となる。

電子部品の溶解液を大量処理する工業操作では、バイオ回収装置の操作方式としては回分操作ではなく、連続操作のほうが有利である。例えば、図2に概略を示す連続操作では、溶解液およびパン酵母（顆粒状の乾燥細胞）を攪拌槽に連続的に供給すると同時に、槽内の固液懸濁液を連続的に排出する方式となる。電子部品の溶解液（Au濃度

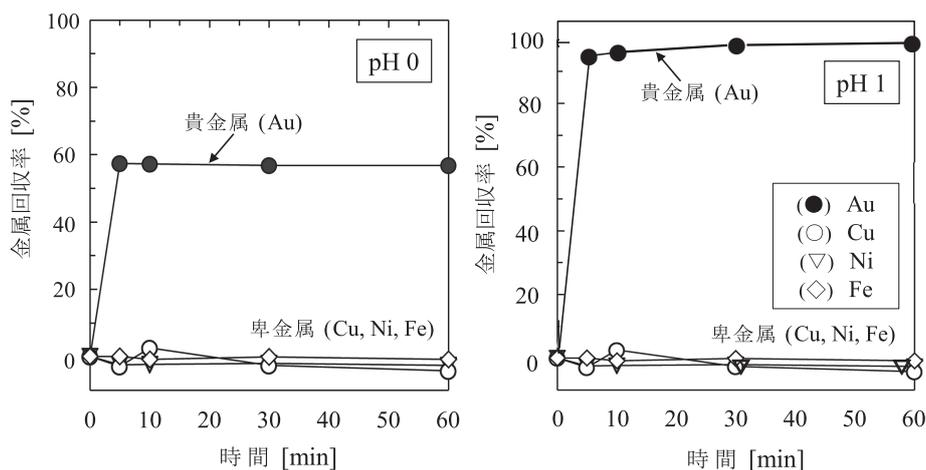


図1 パン酵母を利用する使用済み電子部品溶解液 (Au濃度 197 mg/L, Cu濃度 191 mg/L, Ni濃度 704 mg/L, Fe濃度 1057 mg/L) からのAu(Ⅲ)イオン回収 (室温, 酵母添加量 16 g/L)

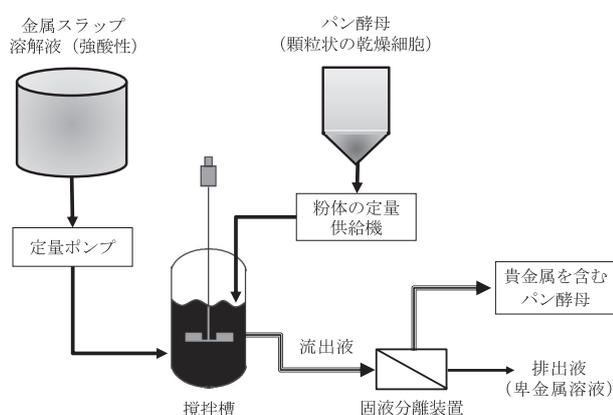


図2 連続操作による電子部品溶解液からの貴金属バイオ回収システム

197 mg/L) をパン酵母添加量 16 g-乾燥細胞/L-溶液の一定条件下で連続処理した場合、定常状態における平均滞留時間 (槽体積/供給液の体積流速) を 30 min と短い時間に設定しても、パン酵母による Au(Ⅲ)イオン吸着分離が迅速に進行するため、排出液 Au濃度は 3.9 mg/L (供給液 Au濃度の 2% に相当) 以下にまで低下することがわかった。すなわち、パン酵母による Au(Ⅲ)回収率が 98% 以上となり、Au(Ⅲ)回収速度は 0.39 kg/(h·m<sup>3</sup>) 以上となる。この数値は、体積が 1.0 m<sup>3</sup> のバイオ回収装置を用いて連続操作を実施した場合には年間 (300 日操業) の Au 生産性が 2.8 トンに到達することを表している。国内における Au 年間需要が 59.5 トン (2017 年度)<sup>9)</sup> であるという事実を踏まえて考

えると、強酸性溶解液に対してパン酵母は高効率・選択的 Au 回収を実現する貴金属イオン分離剤であると結論づけることができる。

## 2. 2 めっき廃液からのパラジウムのバイオ回収

めっき廃液 (Pd濃度 90 mg/L, Sn濃度 8000 mg/L, pH 0) を対象に、パン酵母による Pd(Ⅱ)イオン回収実験を室温で行った。その結果、酵母細胞への Pd(Ⅱ)イオンの吸着により、液相 Pd(Ⅱ)濃度は急速に減少し、60 min の回分操作によって吸着平衡に到達した。Pd(Ⅱ)回収率に比べて共存する重金属 (Sn) イオン回収率は大幅に低くなり、パン酵母を分離剤として用いて強酸性めっき廃液中の Pd(Ⅱ)イオンを選択的に回収できることがわかった。また、パン酵母の添加量が増加するに伴って Pd(Ⅱ)回収率も増加し、パン酵母の添加量が 16 g-乾燥細胞/L-溶液 (5.0 × 10<sup>11</sup> cells/L) の場合には Pd(Ⅱ)回収率は 85% に達することも明らかになっている。

## 2. 3 リサイクル中間処理液からの貴金属 (金、パラジウム、白金) のバイオ回収

あるリサイクル工場の中間処理液 (5.7 g/L Au, 0.75 g/L Pd, 13.3 g/L, pH < 0) に対して、64 g/L のパン酵母を添加して 10 min 間のバイオ回収実験を室温で行った。その後、処理液中のパン酵母を固液分離し、残液に対して新たな乾燥酵母を接

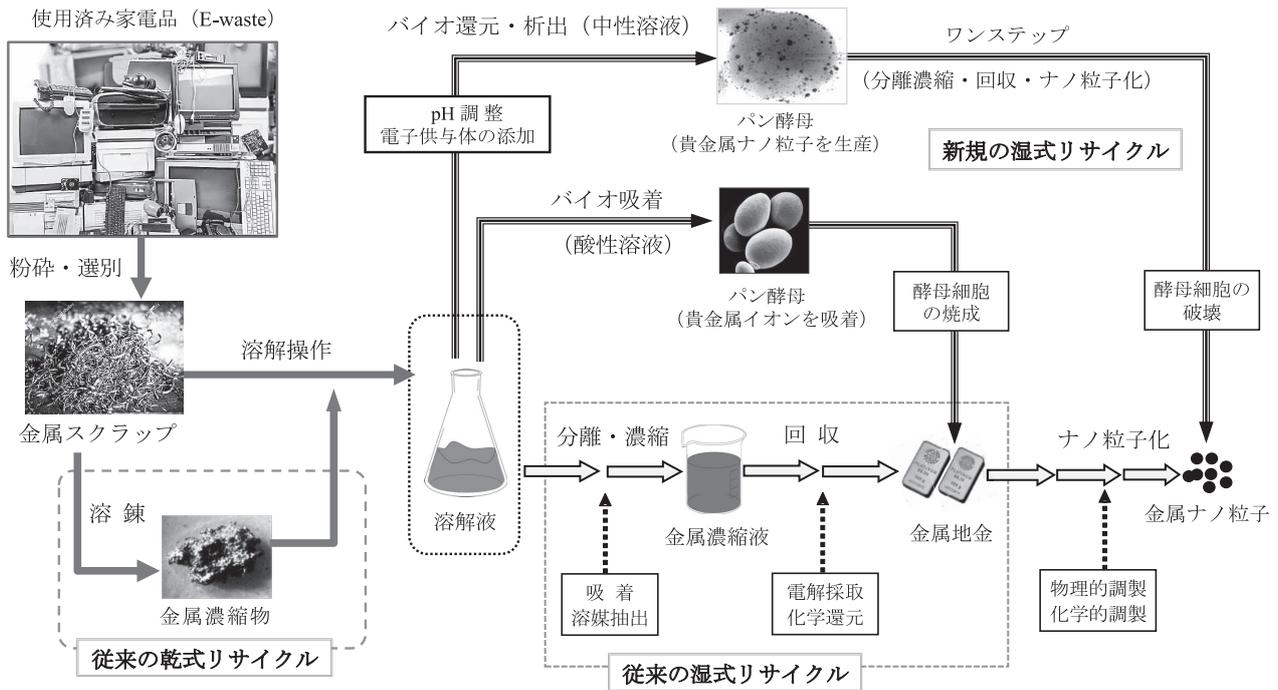


図3 都市鉱山（使用済み家電品）からの金・白金族金属のリサイクルフロー

種してバイオ回収実験を繰り返す反復回分操作を行った。

1回目の回分操作では、Au(Ⅲ)回収率が50%、Pd(Ⅱ)回収率が30%、Pt(Ⅳ)回収率は10%となり、パン酵母による貴金属回収量は66 mg 貴金属/g-乾燥細胞であった。ところが6回の反復回分操作を行うことによって、Au(Ⅲ)総括回収率およびPd(Ⅱ)総括回収率は100%に到達し、Pt(Ⅳ)総括回収率は50%に増加した。このように貴金属が20 g/L程度と高濃度レベルの場合には、パン酵母を分割して添加する回分操作を繰り返すことにより、貴金属回収率を大幅に高めることができる。

### 3. バイオ分離技術をベースにした貴金属リサイクル

都市鉱山（使用済み家電品）からの金・白金族金属リサイクルのフローチャートを図3に示す。従来プロセスでは、貴金属含有率が高い固形物に対して、高エネルギー型乾式溶錬法（1000°C付近の高温炉を用いて金属含有物を溶融・還元して粗金属を得る操作）が使われる。また、乾式溶錬法で得られた粗金属の精錬、また都市鉱山の溶解液や鉱工業廃液からの貴金属・レアメタル回収には、

処理液中のターゲット金属濃度に応じて、各種の湿式法（吸着法、イオン交換法、電解採取法、溶媒抽出法、化学還元法、沈殿法等）が使われている。

これに対して新規バイオプロセスでは、常温・常圧下における微生物反応を利用するため、金属回収操作に投入されるエネルギー量や物質量が少なく、必然的に副生する廃熱や廃棄物も少ない低エネルギー・低環境負荷型回収プロセスとなる。また、バイオ吸着の下流工程では、貴金属イオンを吸着分離・濃縮した微生物細胞を処理液から固液分離した後、湿潤細胞を乾燥・焼成することによって金属塊（地金）が得られる。この新規バイオ吸着プロセスには、従来湿式プロセスに比べて、貴金属イオンの高速・高効率な分離・濃縮・回収を少ない工程数でシンプルに達成できるメリットがある。

さらに別プロセス（バイオ還元・析出）では、金属スクラップ溶解液のpH調整と電子供与体の添加が必要になるが、液中の貴金属イオンをバイオ還元して酵母表面に貴金属ナノ粒子を生産することができる。これは、溶解液中の貴金属イオンを機能性ナノ粒子として付加価値を持たせてアッ

ブグレード回収できる斬新なりサイクルとなる（紙幅の都合で詳細を割愛）。

このような貴金属イオン分離剤としての特長に加えて、パン酵母は食品分野の普及品として販売されており、大量かつ安価に入手できる。したがって、パン酵母の貴金属イオン分離剤としての利用はバイオ技術をベースにした金・白金族金属リサイクルシステムの創出・普及に弾みをつけることになる。このバイオベース金・白金族金属リサイクル技術は、「①シンプル」、「②低コスト」、「③大量処理・生産」の全ての要素を備えており、先進国・発展途上国の技術レベルに区別なく実用化できそうであり、SDGs達成に向けて技術面での貢献が期待できる。

#### 4. おわりに

パン酵母を分離剤として利用する金・白金族金属の新しい分離・回収方法について紹介した。その一方で、現行の貴金属・レアメタル分離・回収技術を否定しているわけではない。国内外の都市鉱山に存在する貴金属・レアメタルを完全に掘り起こすためには、従来技術だけでは不十分であり、希薄状態に在るターゲット金属を高効率に、経済的にリサイクルできる分離・回収技術の研究開発が必要になる。今後も、微生物機能を活用する貴金属・レアメタル資源循環システムの創出・普及

に向けて、産学官の良き理解者の協力を得ながら研究開発を進めていく所存である。

#### 謝 辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 (JP18H03846) の助成を得て行われた。深く感謝の意を表す。

#### 【付記】

〈都市鉱山〉パソコンや携帯電話など各種製品には貴金属やレアメタルが含まれていることから、その使用済み製品を市中にある金属鉱物資源に見立てて、これを都市鉱山と呼ぶ。日本国内の都市鉱山に蓄積されている有用金属の埋蔵量は、世界有数の資源国に匹敵すると試算されている。例えば、国内の都市鉱山に含まれている金は世界の埋蔵量の約16%に相当する。わが国にとって、海外資源に依存する貴金属・レアメタルの供給・価格リスクを払拭するために、都市鉱山に含まれる有用金属を低コストで高効率にリサイクルできる技術の開発は重要な課題である。

〈王水〉濃硝酸と濃塩酸とを体積比で1対3に混合した溶液で、強力な酸化剤である。通常の酸では溶けない金や白金などの貴金属も、この混合溶液には溶解することから、“水の王”の意味で名づけられたといわれている。

#### 〈参考文献〉

- 1) 小西康裕：環境資源工学, 60 (2013), 90-95.
- 2) 小西康裕：水環境学会誌, 37 (2014), 61-65.
- 3) 小西康裕 (監修)：バイオベース資源確保戦略－都市鉱山・海底鉱山に眠る貴金属・レアメタル等の分離・回収技術, シーエムシー出版 (2015).
- 4) 小西康裕：金属, 87 (2017), 39-47.
- 5) N. Saitoh, R. Fujimori, M. Nakatani, D. Yoshihara, T. Nomura, Y. Konishi : Hydrometallurgy, 181 (2018), 29-34.
- 6) 小西康裕, 斎藤範三, 岸田正夫：特許第6230033号 (2017.10.27登録).
- 7) 小西康裕, 斎藤範三, 岸田正夫：特許第6586690号 (2019.9.20登録).
- 8) J. Lee, R.R. Srivastava : Leaching of Gold from the Spent/End-of-Life Mobile Phone-PCBs using Greener Reagents. In S. Sabir (Ed.), The Recovery of Gold from Secondary Sources (pp.7-56), Imperial College Press (2016).
- 9) JOGMEC 鉱物資源マテリアルフロー2018 6. 金 : [http://mric.jogmec.go.jp/wp-content/uploads/2019/03/material\\_flow2018\\_Au.pdf](http://mric.jogmec.go.jp/wp-content/uploads/2019/03/material_flow2018_Au.pdf)