



## 酵素反応を取り入れたグラファイト質難処理金鉱石の バイオミネラルプロセッシング

### Biomineral Processing of Graphitic Refractory Gold Ores Using Enzymatic Reactions

笹木 圭子<sup>1</sup>, コジョ トワム コナドウ<sup>2</sup>  
Keiko SASAKI<sup>1</sup>, Kojo Twum KONADU<sup>2</sup>

<sup>1</sup>九州大学大学院工学研究院 教授

<sup>2</sup>九州大学大学院工学府 博士後期課程

<sup>1</sup> Professor, Graduate School of Engineering, Kyushu University, JAPAN

<sup>2</sup> Postgraduate Student, Graduate School of Engineering, Kyushu University, JAPAN

#### 抄 録

金鉱石から金を取り出すには、アルカリ性シアン水溶液にて、安定な金シアン錯体として抽出して濃縮する。ところが、グラファイト質金鉱石では、鉱石に数%のグラファイト質が混ざっているために、シアン錯体の形成段階で、錯イオンがグラファイト質に吸着するために、30–70%の金回収率のロスが生じる。このために、グラファイト質金鉱石は超難処理とされ、開発対象から外れているのが現状である。本稿では、酵素処理をくみこむことによって、グラファイト質金鉱石の金回収率を20%台から90%以上に向上させるバイオプロセスを紹介する。

#### ABSTRACT

Graphitic refractory gold ore was sequentially pretreated to oxidize sulfides by thermophilic archaeon *Acid-ianus brierleyi* and then to decompose carbonaceous matters using the cell-free spent medium (CFSM) from a white-rot fungus *Phanerochaete chrysosporium*. The pretreatment by *A. brierleyi* significantly improved the gold recovery from 25% to 77%. Additionally, the crude lignin-degrading enzymes in the CFSM converted the carbonaceous matters into more easily degradable substances, which were removed by alkaline washing, leading to a final gold recovery of 92%. These mineralogical alterations were confirmed by differential thermogravimetric analysis and quantitative evaluation of minerals with scanning electron microscopy. Based on the results, gold grains were mostly liberated after bio-oxidation of sulfides, and in following CFSM treatment, large particles of carbonaceous aluminosilicate were formed from the aggregation of clay minerals, gold grains and with partially decomposed carbonaceous matters acting as binders.

#### 1 はじめに

超難処理型金鉱石 (double refractory gold ores, DRGO) は、一般金鉱石よりも金品位が高いにもかかわらず、硫化鉱物と炭素質頁岩を含み、微細な

金粒子はこれらの中に閉じ込められている (locked type) 上、シアン浸出工程においては、金シアン錯体が炭素分に吸着し (preg-robbing)、現行の処理方法での金回収率は30–70%の損失が生じている (Cook and Chryssoulis, 1990)。このような DRGO は

ガーナ, ブラジル, 米国, カナダ, カザフスタン, ロシア, マレーシア, インドネシア, 中国など世界各地に産出されており, DRGO からの金生産量は, 世界中の全金生産量の約 1/3 を占めるようになっている (Yang et al., 2013). DRGO は, 炭素質と硫化鉱物の単体分離性が乏しいために一般的な浮遊選鉱法に向かず (Marsden and House, 2006), preg-robbing 効果もあいまって超難処理とされている。DRGO からの金回収率向上の技術開発には, いまや世界規模でのニーズがあるといつて過言ではない。

超難処理金鉱石には, 微細な金粒子をその結晶中に閉じ込めている黄鉄鉱および硫と鉄と石炭に類似した多環芳香族性を発達させた炭素質頁岩が共存している。前者は金粒子を露出させるために酸化分解する必要があり, 後者はシアン金錯体を形成したときに, 吸着剤として作用し, 金回収率を数 10% 下げってしまうため, こちらも環境負荷を低減しつつ, 酸化分解する必要がある。

DRGO に対して, シアン抽出の前段階で取られてきた古典的方法は, 直接焙焼であった。しかし, 硫化鉱物に含まれる  $SO_x$  や  $As_2O_3$  など有害なガスを発生し大気汚染をもたらすことから, この方法は採用されなくなった (Arriagada and Osseo-Asare, 1984)。そこで現在南アフリカの金鉱山などで行われている方法は, イオウ酸化細菌を主とした mixed culture に

より, 硫化鉱物を酸化分解する方法である (BIOX システム, 図 1)。BIOX タンクで処理された鉱石は炭素分を含み, これを分解するために, 焙焼法が取られている。焙焼温度が  $400\text{--}500^\circ\text{C}$  では脱炭酸反応が主で, かなりの炭素分は未燃分として残留し,  $950\text{--}1000^\circ\text{C}$  では炭素分の細孔分布がより細孔側に発達し,  $Au(CN)_2^-$  の吸着面積を増やす方向に働くことから, 金回収率の低下を導くふたつの焙焼温度帯が存在し, その間での温度制御は困難を極めてい

本研究は, この DRGO の金回収率を向上させるための新しいプロセスとして, 白色腐朽菌が産生するリグニン分解酵素の反応を組み込み, 硫化鉱物のみならず炭素分も同時に, マイルドな条件下で分解させ, 微細な金粒子を単体分離すること, 炭素質の分解により preg-robbing 効果を解消し, 金回収率を 90% 以上にまで向上させることを目的とする。DRGO からの金回収率が 20% 向上した場合には年 1 兆 4300 億円相当の経済効果をもたらす。代表的リグニン分解酵素であるリグニンペルオキシダーゼ (LiP) およびマンガンペルオキシダーゼ (MnP) は  $C=C$  および  $C=O$  結合の酸化分解を加速する (Tien and Kirk, 1988; Wariishi et al., 1991)。これらの酵素は白色腐朽菌から大量生産され, ダイオキシンのような有害多環芳香族の分解やバイオ燃料生産にも活用されはじめているにもかかわらず, 鉱業への応用研

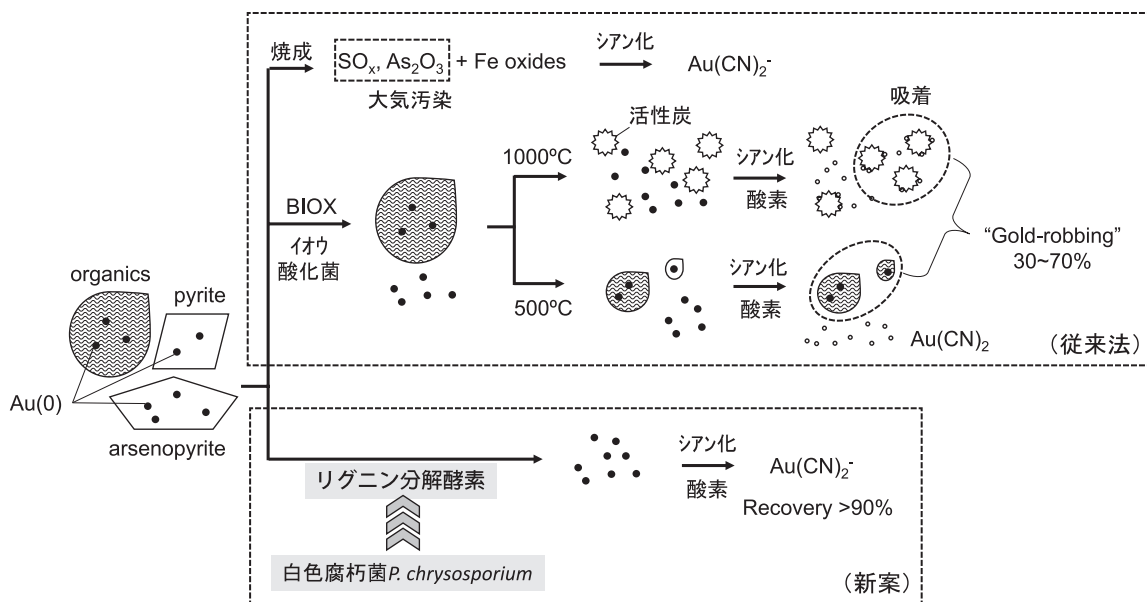


図 1 グラファイト質超難処理金鉱石からの金回収プロセスの従来法と新規提案法  
Fig. 1 Conventional and novel methods in mineral processing of graphitic carbonaceous gold ores.

究は皆無である。

そこで本研究が提案するのは、常温にて硫化鉱物の分解と多環芳香族系炭素質の分解を両方できるリグニン分解酵素反応をプロセスの中に適切に導入し、金回収損失を10%以下とすることである。酵素反応を組み込むことによって、省エネルギーかつ環境汚染物質を排出しないバイオ処理が可能となる。この酵素反応は常温かつpH 4-5のマイルドな条件で進み、環境負荷の小さいプロセスである。

## 2 リグニン分解酵素の固体基質への利用

リグニン分解酵素の固体基質への応用には、パルプ廃液の処理などの例があるが、鉱物のような結晶性の高い固体にはあまり例が見られない。そこで、筆者らは、まず活性炭をグラフィティックカーボンのモデルとして、白色腐朽菌である *Phanerochaete chrysosporium* の使用済み培養液で反応させてみた。この使用済み培養液には、リグニン分解酵素である LiP, MnP が含まれていることは、キャピラリー電気泳動法により確認されたので (Harada et al., 2016; Kudo et al., 2017), 粗酵素液とみなすことができる。活性炭の分解産物である可溶性炭化水素を直接溶液分析から観測することは難しく、固体側からのアプローチを試みた (Konadu et al., 2017)。図2は試薬の活性炭に白色腐朽菌である *Phanerochaete chrysosporium* からの分泌性粗酵素液を作用させた前後の SEM 像と比表面積である。反応前には SEM 像では非常に平滑な表面を呈しているように見えるが、比表面積は 1480 m<sup>2</sup>/g, 酵素反応後には、数 μm 径の孔が多数みられ、激しい固体表面の破壊が起きている

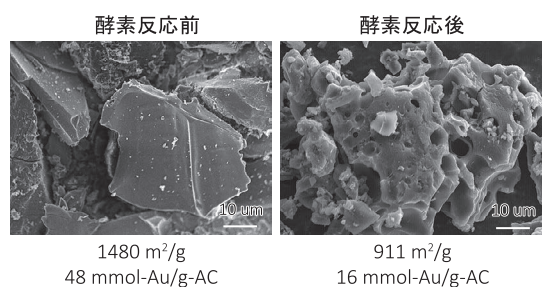


図2 リグニン分解酵素反応前後の活性炭の SEM 像, BET 比表面積, Au(CN)<sub>2</sub> 吸着量の比較。図中のスケールバーは 10 μm を示す

Fig. 2 SEM images of powdery activated carbon before and after enzyme treatment by lignin peroxidase.

ことがわかる。しかし、その比表面積は 911 m<sup>2</sup>/g まで減少している。Au(CN)<sub>2</sub><sup>-</sup> の吸着容量を求めると、比表面積の減少割合以上の減少がみられる。これは単なるマイクロポアの潰れだけではなく、結合状態の変質を意味している。

またこれらの固体 <sup>13</sup>C-NMR スペクトルからも、*P. chrysosporium* からの粗酵素抽出液による反応によって、芳香族炭素 C=C の相対強度は減少し、芳香族炭素 C-H や脂肪族炭素 C-H の相対強度が増大していることがわかる (図3)。このように、これらの酵素は固体基質でも分解することを示唆している。そのほか、*Physisporinus vitreus*, *Pseudomonadaceae* sp., *Streptomyces setonii* からこれらの分泌性酵素が得られる (Liu et al., 2019)。

## 3 バイオプロセスを鉱物処理に

### 3.1 鉄・イオウ酸化菌による硫化鉱物の分解

DRGO では、金 (Au(0)) は主に硫化鉱物、とくに arsenopyrite (FeAsS) や pyrite (FeS<sub>2</sub>) に閉じ込められているため、これを分解しなければならない。DRGO 中に存在する硫化鉱物は数% しかないため、これを浮選によって、10~20% に濃縮する。そのほかの主な鉱物成分としては、石英、粘土鉱物のような硫

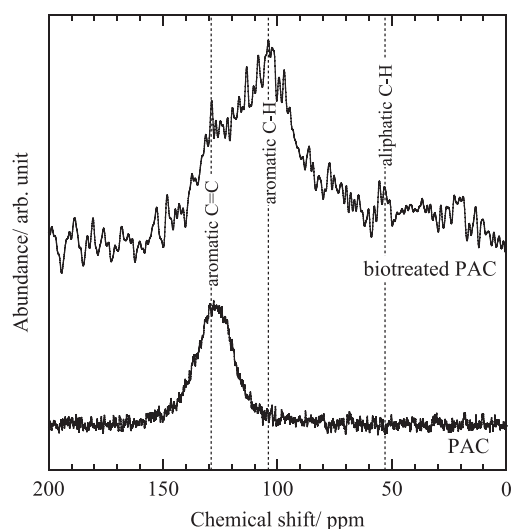


図3 リグニン分解酵素反応前後の活性炭の <sup>13</sup>C-NMR スペクトル。(下) 反応前の活性炭, (上) 白色腐朽菌の使用済み培養液と反応後の活性炭

Fig. 3 <sup>13</sup>C-NMR spectra for powdery activated carbon before and after enzyme treatment by lignin peroxidase.



化鉱物分解反応には関与しないものが大半である。

この工程は通常の銅 (Cu) のバイオリーチングで見出されている化学独立栄養細菌 *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans*, 従属栄養細菌 *Sulfolobus acidocaldarius*, *Sulfolobus* sp., *Sulfo-bacillus* sp., などによって、強酸性溶液中の  $Fe^{2+}$  イオンを  $Fe^{3+}$  イオンに酸化することにより、 $Fe^{3+}$  イオンを酸化剤として硫化物を酸化溶解、すなわち分解する (Mahmoud et al., 2009)。金鉱石の場合、これをバイオリーチングと呼ばないのは、このバイオ処理によって金 (Au(0)) は浸出されないためである。このバイオ処理は、Au(0)として表面に露出、あるいは単体分離することに働くため、バイオオキシデーション (biooxidation) と呼ぶ。好熱菌 *Acidianus brierleyi* (70°C) を用いると、数ヶ月かかる反応が2週間程度で硫化鉱物が分解される。しかし、このプロセスだけでは、グラファイト質は分解されない。

### 3.2 白色腐朽菌分泌性酵素によるグラファイト質の分解

本来、白色腐朽菌は褐色腐朽菌とともに、樹木を腐らせる真菌として、木材化学ではその性質、反応、分子レベルでの酵素の研究などが詳細に進められてきた。白色腐朽菌 *Phanerochaete chrysosporium* の生育 pH 範囲が広いこと、リグニン分解酵素の基質特異性が低いこと、マンガネロオキシダーゼ (MnP) やリグニペルオキシダーゼ (LiP) の実用レベルでの大量生産も試みられていることから (Fujiwara, 2008), このような鉱石には本酵素の適用可能性が期待できると着想した。金鉱石からの金回収はシアン金錯体として抽出し、これを活性炭粒子に吸着させ濃縮するのが、従来の金の湿式冶金学の王道である。シアンイオンは毒性が高いが定量的に金と錯体  $Au(CN)_2^-$  を形成し、これにとってかわる高い回収率を導くものはいまだ見出されていない (Yang et al., 2016)。バイオリーチングでは、鉄・硫黄酸化細菌により、硫化鉱物を酸化分解するが、これらの菌は芳香族炭化水素を分解することはできない。*P. chrysosporium* からの粗酵素抽出液に含まれる LiP や MnP の酵素反応開始時に  $H_2O_2$  が生成し、これが硫化鉱物の強力な酸化剤となる (Kersten and Kirk, 1987)。

### 3.3 グラファイト質金鉱石のシークエンシャルバイオ処理

実際のグラファイト質金鉱石には数%の炭素分として入っており、活性炭と比較すると、より不均一な構造をもち、分解しやすいと考えられる。また、鉱石によって炭素質の分解のされやすさの程度も異なるはずである。図4に産地の異なるグラファイト質金鉱石の Raman スペクトルを比較した。1580  $cm^{-1}$  付近にみられる連続的なグラファイト質炭素の C=C 結合振動と、1320  $cm^{-1}$  付近にみられるグラファイト質の欠陥に隣接する C-C 結合振動とは区別され、相対強度  $I_D/I_G$  を欠陥の度合いの指標とすることができる。相対強度  $I_D/I_G$  は鉱石により変動し、非芳香族性の指標となるだけでなく、積層性の指標にもなる。つまり、グラファイトに欠陥が生ずると、平面構造が乱れ、積層性が崩れるためである。世界各地のグラファイト質金鉱石では、欠陥が非常に多い豪州の Paddington 鉱山の DRGO から、非常に芳香族性の高いニュージーランドの Macraes 鉱山の DRGO までグラファイト質の分解性は連続的に存在していることから、それぞれの鉱石に対して、ミネラルプロセッシングの方法を改変していく

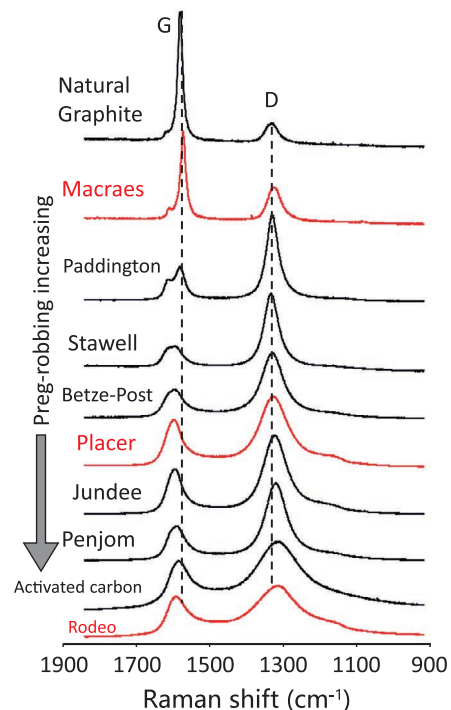


図4 各産地のDRGOのラマンスペクトル  
Fig. 4 Raman spectra for DRGO from different mines (personal communications).

必要があることがわかる。

筆者らは、Rodeo 産に近い相対強度  $I_D/I_G$  をもつ DRGO に対して、このふたつのバイオ処理を二通りの順序で逐次的に行い、それぞれの中間体、最終固体残渣に対して、金のシアン錯体抽出を行い、金回収率を比較した。その結果を図 5 に模式的に表す (Konadu et al., 2019)。図中の試料名の後のカッコ内の数字はシアン金錯体抽出による金の回収率を示している。

金回収率は、グラファイト質分解→硫化物分解の順序では 45% にまでしか上がらないのに対して、硫化物分解→グラファイト質分解の順序では 76% になる。これはグラファイト質分解では、粗酵素液の中にいろいろな培地成分や真菌の代謝産物も混ざっており、pH 4 での酵素反応中にこれらが鉱石の表面を被覆して、次の段階の硫化物分解の妨げになっているためと思われる。それに対して、硫化物分解→グラファイト質分解の順序では、最初に pH 1.5 の強酸性で好熱性鉄酸化菌が硫化鉱物を分解し、グラファイト質粒子の表面は酸洗浄された状態になっている。さらに酵素反応で阻害効果があるとされるヒ素成分も硫化物の酸化溶解により、固相から抜ける。

このあと、酵素反応によってグラファイト質を分解させるが、常温常圧の酵素反応では、可溶化までは達していないとみえる。これをアルカリ洗浄すると金回収率は 92% にまで上昇している。ちなみに、好熱性鉄酸化菌処理だけをしたものを同様にアルカリ洗浄しても金回収率は上昇しない。つまり、酵素

反応は、グラファイト質を可溶化しやすい形に変化させる効果があったといえる。このときの洗浄液の三次元蛍光分光スペクトルから可溶化したものは腐植物質に近い特徴をもっているものといえる。

図 5 の鉱物相の変化には、Quantitative Evaluation of Minerals using Scanning Electron Microscopy (QEMSCAN) の観測に基づいて模式化されている (Goodall et al., 2005)。鉱物処理だけではなく、石炭の脱硫処理プロセスの検討にも QEMSCAN は用いられている (Liu et al., 2005)。QEMSCAN の解像度は、装置によって異なるが、現在のところ 1-4 μm である。従って、サブミクロンの金粒子を直接観測するのは困難である。本鉱石の場合は、もとの DRGO 中に約 6% の有機炭素が含まれており、これは carbonaceous illite (有機炭素が混じりあっている粘土鉱物 illite) と分類される粒子が主として受けもっていることがわかった (図 6 上段)。金粒子を主として包含している硫化物 (硫化鉄および硫ヒ鉄鉱) は 53 μm 以上に偏っており、全体の 17% を占めている。

これを 2 段階のバイオ処理をすることにより、硫化鉱物はほとんど分解して消失していること、最初は存在していなかった C-Al-Si に富む数 100 μm 径の巨大粒子が生成していることがわかる。この巨大粒子は、酵素処理の過程で、グラファイト質炭素が欠陥型炭素に変質したときに、10 μm 径以下の illite を中心とした粘土鉱物を静電的に凝集した結果生じたものと推定される。酵素処理が行われる pH 4.0 の条件では、illite の表面は負に帯電している (等電

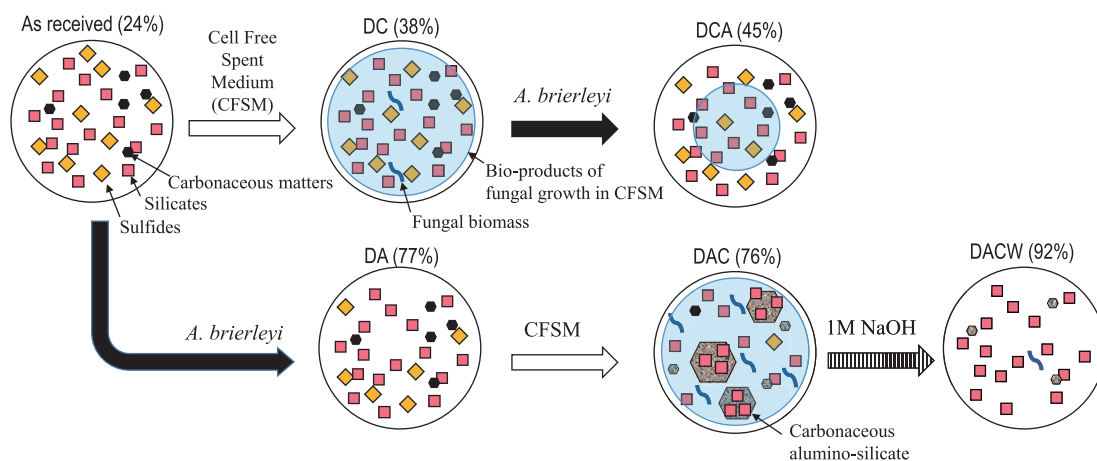


図 5 シークエンシャルバイオ処理の工程とそれぞれの処理残渣からの金回収率  
Fig. 5 Sequential biotreatment of DRGO and gold recovery in each step.

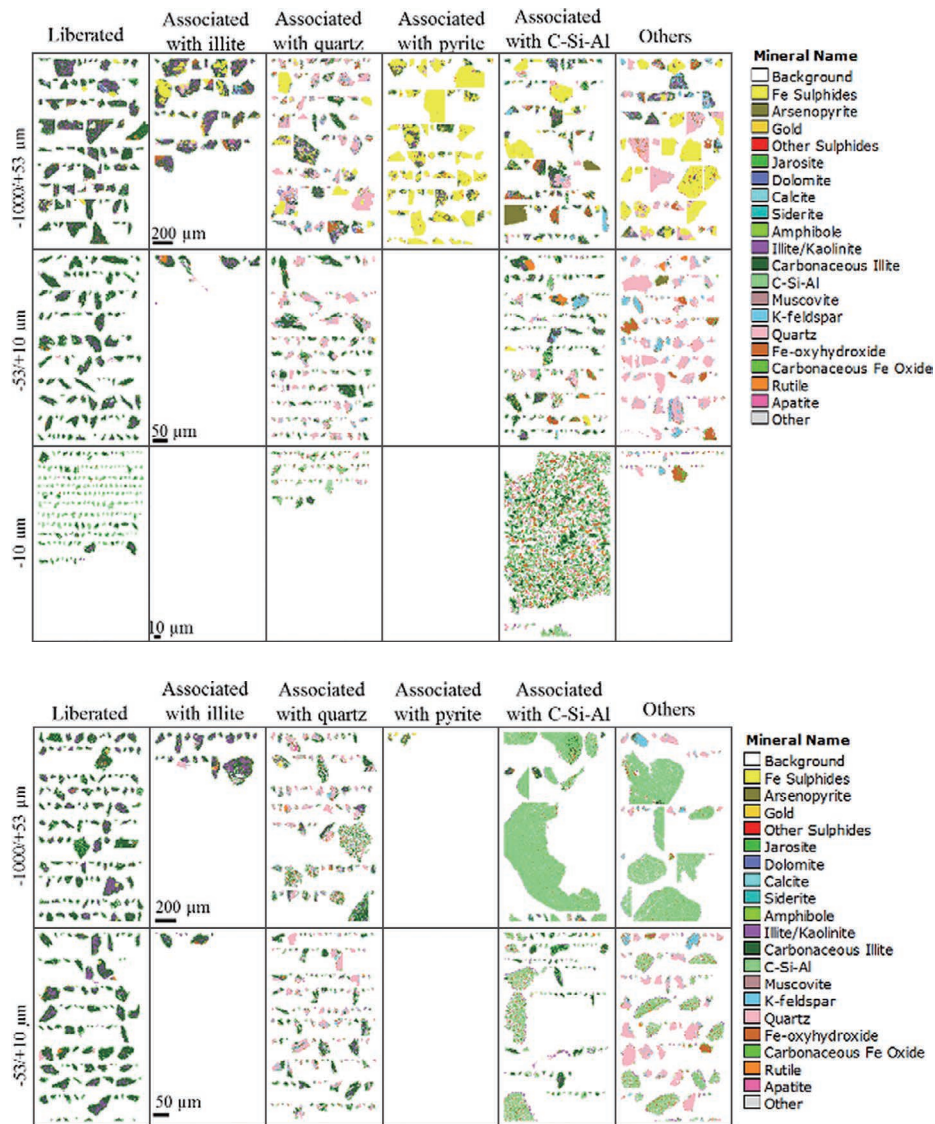


図6 DRGO (上段) および DAC (下段) のQEMSCAN マップ: carbonaceous illite として単体分離しているもの、一定以上のサイズの illite と結合しているもの、石英と結合しているもの、黄鉄鉱と結合しているもの、C-Al-Si と結合しているもの、その他に分類して、粒度区分ごとに分けてある。DRGO から DCA への大きな変化は、黄鉄鉱粒子がほとんど無くなったこと、数 100 μm 径もある C-Al-Si に分類される巨大粒子が形成されていることである

Fig. 6 QEMSCAN maps for DRGO (top) and DAC (bottom): particles are classified into liberated carbonaceous illite, associated with illite, associated with quartz, and others according to particle sizes. Notable changes from DRGO to DCA are disappearance of pyrite and formation of larger particles than 100 μm which are categorized to C-Si-Al.

点 3.0)。一方、グラファイト質炭素が欠陥型炭素はアルカリ処理によって一部溶解し、その溶離液を、芳香族系炭化水素化合物を特徴づける三次元蛍光分光スペクトルによって分析すると、腐植物質に非常に近い位置にピークを示す。このことから、表面が負に帯電した illite 粒子をつなぎ合わせているのは、腐植物質である可能性が高いことがわかる。腐植物質は天然の多環芳香族炭化水素で、巨大分子量をもちながら、電解質である。不規則な構造をもつために、酸解離定数は画一的な値とならず、2.9-5.5 の

幅をもつ。pH 4.0 の条件で腐植物質が正に帯電していれば、illite 粒子と直接静電的に結合しやすく、腐植物質が負に帯電していたとしても、Fe<sup>3+</sup> などの系内の重金属イオンを介して、illite 粒子のバインダーとなって数百倍の巨大粒子となっていくことがわかる。

#### 4 おわりに

以上のことを踏まえて、本 DRGO のバイオ処理の工程を図 7 のように提案することが可能である。



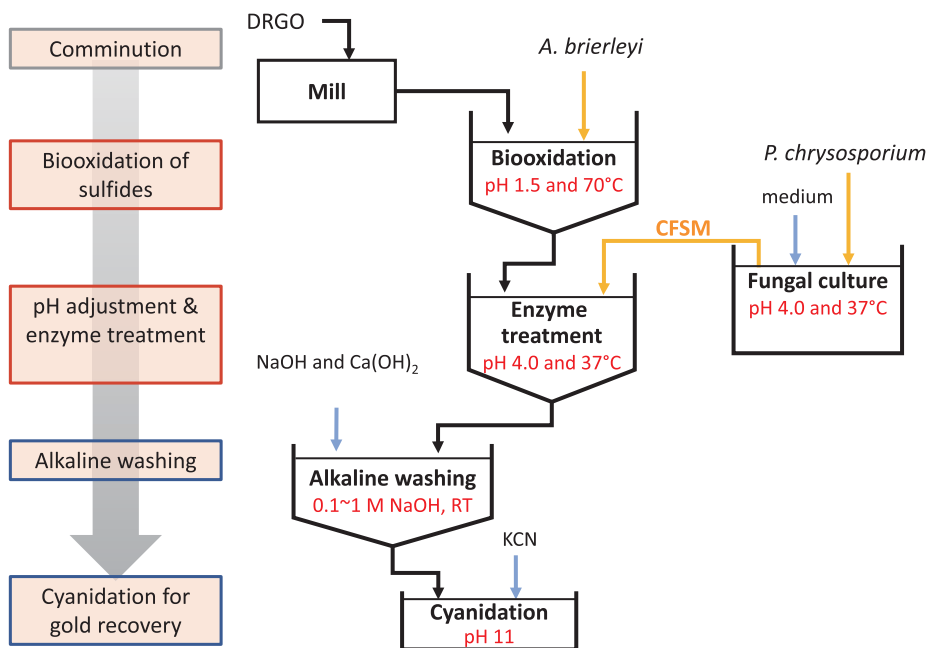


図7 DRGOのシークエンシャルバイオ処理プロセスの提案例  
 Fig. 7 Proposal of sequential biotreatment process of DRGO.

粉碎後、最初に硫化鉱物酸化工程のバイオ処理を強酸性条件下で行う。この工程によって金粒子を単体分離させる。別リアクターに白色腐朽菌を培養しておき、その上澄み液を、1段目の固体残渣に対してpH 4.0で反応させるこの工程でもともと存在していた欠陥型炭素を溶解させる。その固体残渣をアルカリ洗浄して、溶出しきれていない不安定になった腐植物質炭素を溶出させ凝集体中にトラップされている金粒子を単体分離させる。

この工程は、金鉱石中の金の含有量および局在性、炭素の芳香族性、系内の溶解性鉄成分の濃度に応じて、見直す必要がある。先のバイオ処理およびアル

カリ洗浄後の固体残渣のRaman分光スペクトルから、CFSM処理は欠陥型グラファイトを可溶化することにより効果的で、アルカリ洗浄はグラファイト質炭素を欠陥型に変換することにより効果的であることがわかっているので、芳香族属性の高いDRGOは先にアルカリ処理をしてからバイオ処理に持ち込むのが有利であると推定できる。今後、様々なタイプの炭素質金鉱石の処理プロセスがバイオ処理と化学処理の特徴を活用することによって、整理確立され、開発の対象として取り扱われ、金の生産に貢献していくようになることを期待している。

### References

Arriagada F.J., Osseo-Asare K., Gold extraction from refractory ores: Roasting behaviour of pyrite and arsenopyrite. In: V. Kudryk, D.A. Corrigan and W.W. Liang (Editors), *Precious Metals - Mining, Extraction, and Processing*, TMS-AIME, Warrendale, PA., (1984) 367–385.

Cook N.J., Chrystosoulis S.L., Concentrations of invisible gold in the common sulfides, *The Canadian Mineralogist*, 28 (1990) 1–16.

Goodall W.R., Scales P.J., Butcher A.R., The use of QEMSCAN and diagnostic leaching in the characterisation of visible gold in complex ores, *Minerals Engineering*, 18 (2005) 877–886. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.01.018>

Harada A., Sasaki K., Kaneta T., Direct determination of lignin peroxidase released from *Phanerochaete chrysosporium* by in-capillary enzyme assay using micellar electrokinetic chromatography, *Journal of Chromatography A*, 1440 (2016) 145–149. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2016.02.062>

Kersten P.J., Kirk T.K., Involvement of a new enzyme, glyoxal oxidase, in extracellular H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> production by

*Phanerochaete chrysosporium*, Journal of Bacteriology, 169 (1987) 2195–2201. <https://doi.org/10.1128/jb.169.5.2195-2201.1987>

Konadu K.T., Sasaki K., Kaneta T., Ofori-Sarpong G., Osseo-Asare K., Bio modification of carbonaceous matter in gold ores: Model experiments using powdered activated carbon and cell-free spent medium of *Phanerochaete chrysosporium*. Hydrometallurgy, 168 (2017) 76–83. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.08.003>

Konadu K.T., Huddy R.J., Harrison S.T.L., Osseo-Asare K., Sasaki K., Sequential pretreatment of double refractory gold ore (DRGO) with a thermophilic iron oxidizing archaeon and fungal crude enzymes, Minerals Engineering, 168 (2019) 76–83. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.04.043>

Kudo S., Harada A., Kubota H., Sasaki K., Kaneta T., Simultaneous determination of manganese peroxidase and lignin peroxidase by capillary electrophoresis enzyme assays, ACS Omega, 2 (2017) 7329–7333. <https://doi.org/10.1021/acsomega.7b00998>

Liu J., Zhang S., Shi Q., Wang L., Kong W., Yu H., Ma F., Highly efficient oxidation of synthetic and natural lignin-related compounds by *Physicorinus vitreus* versatile peroxidase, International Biodeterioration & Biodegradation, 136 (2019) 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.10.009>

Liu Y., Gupta R., Sharma A., Wall T., Butcher A., Miller G., Gottlieb P., French D., Mineral matter–organic

matter association characterisation by QEMSCAN and applications in coal utilisation, Fuel, 84 (2005) 1259–1267. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.07.015>

Mahmoud A., Cezac P., Hoadley A.F., Contamine F., D’Hugues P., A review of sulfide minerals microbially assisted leaching in stirred tank reactors, International Biodeterioration & Biodegradation, 119 (2017) 118–146. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.09.015>

Marsden J., House I., Chapter 6: Leaching, The Chemistry of Gold Extraction, Second Edition, SME, Englewood, 2006, pp.233–295. ISBN-10: 0873352408

Mettam G.R., Adams L.B., How to prepare an electronic version of your article, in: Jones B.S., Smith R.Z. (Eds.), Introduction to the Electronic Age, E-Publishing Inc., New York, 2009, pp.281–304.

Tien M., Kirk T.K., Lignin peroxidase of *Phanerochaete chrysosporium*, Methods in Enzymology, 161(1988) 238–249. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(88\)61025-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(88)61025-1)

Wariishi H., Valli K., Gold M.H., In vitro depolymerization of lignin by manganese peroxidase of *Phanerochaete chrysosporium*, Biochemical and Biophysical Research Communications, 176 (1991) 269–275. [https://doi.org/10.1016/0006-291X\(91\)90919-X](https://doi.org/10.1016/0006-291X(91)90919-X)

Yang H.Y., Qian L.I.U., Song X.L., Dong J.K., Research status of carbonaceous matter in carbonaceous gold ores and bio-oxidation pretreatment, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 23 (2013) 3405–3411. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(13\)62881-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62881-2)

〈著者紹介〉



笹木 圭子 Keiko SASAKI

〔経歴〕 1982年北海道大学理学部卒業。1997年博士（工学）、小樽商科大学助教授、九州大学助教授を経て、2010年から現職。2017年より日本学術会議連携会員（第三部会）

〔専門〕 資源処理工学および環境修復工学。最近は、環境材料の研究に取り組んでいる。

〔連絡先〕 keikos@mine.kyushu-u.ac.jp



コジョ トワム コナドウ Kojo Twum KONADU

〔経歴〕 2013年ガーナ鉱山工科大学卒業。2016年九州大学工学府修士修了、2019年博士（工学）取得見込、2018年より日本学術振興会特別研究員。

〔専門〕 鉱物処理工学、バイオハイドロメタラジー。

〔連絡先〕 kojo@mine.kyushu-u.ac.jp