

Au(III) への抽出能力と工業的な物性要件を両立する
抽出溶媒の網羅的探索

大島 達也

「環境資源工学」第70巻 第1号（通巻第243号）別刷

2023年6月

Au(III) への抽出能力と工業的な物性要件を両立する 抽出溶媒の網羅的探索

大島 達也*

A Comprehensive Research of Extraction Solvents That Satisfy both Au(III) Extractability and Requirements of Properties for Industrial Operation

Tatsuya OSHIMA*

Department of Applied Chemistry, Faculty of Engineering, University of Miyazaki

Abstract

Ion solvation extraction has been used as a separation techniques for gold (Au(III)) from various metal ions in a hydrochloric acid media. Dibutyl carbitol (DBC) has been used as the most popular solvent to extract Au(III), while no better solvent has been found for many years. In the present review, the results of recent investigations by the authors to find valid solvents for ion solvation extraction are summarized. Ethers and ketones are suitable in view of the high extractability for Au(III) as well as the good properties including chemical stability. Ethers and ketones which have a smaller side chains and relatively higher polarity showed higher extractability, however, polar solvents would leak into the aqueous phase. Therefore suitable solvents with moderate polarity are narrowed down based on the balance between high extractability and low aqueous solubility. As the polarity affects the extractability, the $\log P$ value (octanol/water partition coefficient) and the Hansen solubility parameter would be one of the indexes for the Au(III) extractability. Solvents used in industrial processes are required to have not only high extractability but also good properties such as a low aqueous solubility and a high flash point. The comprehensive research revealed the requirements for solvents to extract Au(III) based on ion solvation. Additionally, several potential solvents which might replace DBC were suggested.

Key words: Ion solvation extraction, Gold, Hydrometallurgy, Solvent, 2-Nonanone

1. はじめに

最近の世界的な政情不安も影響し、金の価格は2022年11月時点で1グラム8000円前後の過去最高値の水準で取引されている。金は宝飾品・資産としての価値のみならず、優れた電気伝導性、耐腐食性といった特性から電子部品に欠かせない金属として広く用いられている。世界での年間生産量が3,000トン強であるのに対して、約1割の年間300トン程度の金が電気電子材料に用いられる¹。結果的に廃電子機器は金の資源として有望視されている。国内では2013年に小型家電リサイクル法が施行され、都市鉱山ともよばれる廃棄物からの貴金属・希少金属の回収・再利用が期待されている^{2,3}。使用済みの電子機器類のうち金の含有量が多いものは、解体後、

粉碎・焼成などの前処理後に酸浸出され、湿式精錬にて金を回収することが多い⁴。この際、塩酸系で浸出された金の精製法に利用されるのが溶媒和抽出と呼ばれる方法である。

2. 溶媒和抽出による塩酸系からの Au(III) の抽出

酸化してイオン種として浸出した金属を水相と混じり合わない有機相へと選択的に抽出することで他金属と分離する溶媒抽出は、高度な分離性と高い処理量などの長所から有力な湿式精錬技術として広く用いられている。溶媒抽出プロセスとしてよく知られるのは、キレート抽出剤であるヒドロキシオキシム化合物による銅 (Cu(II)) の抽出やリン酸系抽出剤によるアクチノイド、ランタノイド、各種遷移金属の抽出などのイオン交換反応に基づく抽出、およびトリ-n-オクチルホスフィンオキシド (TOPO) のような金属配位性の中性抽出剤を用いて、電氣的に中性となった金属錯体を抽出するイオン対型の抽出である^{5,6}。一方、金の精錬に用いられる有力な方法

キーワード: イオン溶媒和抽出, 金, 湿式精錬, 溶媒, 2-ノナンオン

宮崎大学工学教育研究部応用物質化学プログラム担当
2023年3月30日受理

*e-mail: oshimat@cc.miyazaki-u.ac.jp

はこれらと異なる溶媒和抽出（イオン溶媒和抽出）といわれる手法である。

溶媒和抽出で抽出されるのは、式（1）で示されるような塩化法で浸出された Au(III) の塩化物錯体（塩化金酸、 HAuCl_4 ）である。



溶媒和抽出では1価の陰イオンであるこの Au(III) のテトラクロロ錯体 (AuCl_4^-) が抽出されると考えられる⁷。抽出相での電荷収支のためプロトンも付随しており、結果的には HAuCl_4 として抽出される。

Au(III) の溶媒和抽出に最も用いられるのがジブチルカルビトール（ビス(2-ブトキシエチル)エーテル、DBC (Fig. 1)) である⁸⁻¹²。1970年代にはカナダの INCO 社（現 Vale 社）の貴金属精錬プロセス (Fig. 2)^{12,13} において DBC による Au(III) の抽出が採用され、現在、世界的に広くこの溶媒和抽出が用いられている。その抽出機構を明らかにするために、Au(III) の抽出に寄与す

る DBC の分子数を求める試みも散見されるが¹⁴、決定的といえる報告は筆者の知る限り見当たらない。ただし、Au(III) 一つの抽出には DBC 相への水 6 分子の抽出を伴うとの報告があり¹⁰、これについては正確な分析と見受けられる。他方、比較的低分子量で汎用的な脂肪族ケトンであるメチルイソブチルケトン（4-メチル-2-ペンタノン、MIBK）も Au(III) の抽出溶媒として Matthey Rustenburg Refinery 社の貴金属精錬プロセスに導入されている^{7,15,16}。

溶媒和抽出による Au(III) の抽出には多くの利点がある。第一に多くの金属から選択的に Au(III) を抽出することができる。Fe(III) などの一部の金属も共に抽出されるが、次段の洗浄操作にて除去できる。第二に抽出が非常に迅速で短時間で平衡に達する。第三に抽出容量が極めて大きく、それほど大きくない装置で処理が可能である。さらに、抽出された Au(III) は還元反応によって定量的かつ高純度に回収できる。DBC をはじめとした溶媒和抽出は鉱石由来の金の精錬にも廃棄物等の二次資源からの金の回収にも採用されている。一方で、溶媒和抽

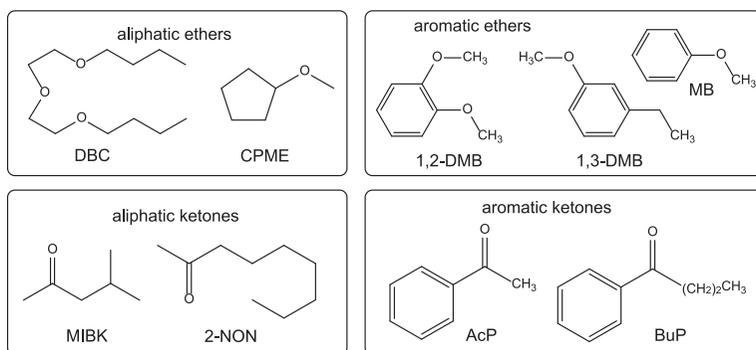


Figure 1. Structures of organic solvents used for the Au(III) extraction tests.

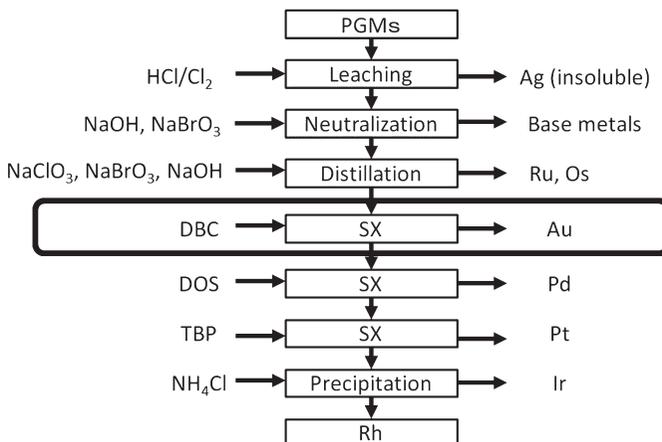


Figure 2. INCO (currently Vale) flow sheet for extraction of precious metals.^{6,12}

出の研究はキレート抽出剤の開発と比較すると活発でなく、近年まで新規溶媒の開発研究は非常に乏しい。溶媒和抽出は明確な抽出反応を提示することが難しく、学術的な関心を集めにくいこと、50年前に見いだされたDBCが抽出溶媒として十分優れており、工業的には新たな溶媒の必要性が少なかったことが理由と考えられる。ただし、DBCが欠点の無い溶媒というわけではない。DBCの水への溶解度は 3 g/dm^3 とされ、連続操作にて水相に漏出して目減りすることが最大の短所と考えられる。筆者らはDBCに置き換わりうる新規抽出溶媒を見出すこと、およびAu(III)の抽出に適した溶媒の構造的要件を明らかにすることを目的に、様々な溶媒によるAu(III)の抽出について検討してきた。

3. 各種化合物によるAu(III)の抽出

3.1 溶媒和抽出に適さない溶媒

前項で示したように、Au(III)の溶媒和抽出にはエーテル、ケトン等の含酸素有機溶媒が適している。TOPOなどの中性リン化合物もAu(III)を抽出することが知られるが、環境負荷の観点から本稿ではC、H、Oの3元素から構成される有機溶媒についてのみ議論する。酸素原子を含まない飽和脂肪族炭化水素、芳香族炭化水素ではAu(III)は抽出されない¹⁷。なお、3価のヒ素(As(III))は高濃度塩酸条件下にてトルエンなどの芳香族炭化水素によって例外的に抽出される^{18,19}。ヒ素は高濃度塩酸条件下での存在化学種が中性のAsCl₃であるために、Au(III)とは異なる抽出性を示すと考えられる。不飽和炭化水素はその反応性から抽出溶媒に用いるのは現実的ではないと考えられ、検討対象にしていない。

アルコール類は塩酸条件下において非常に高いAu(III)への抽出性を示すが、一方で高塩酸濃度条件下でアルコール類は水相と著しく混ざり合う。ヘキサノール、シクロヘキサノール、ドデカノールを用いたAu(III)の抽出について検討しているが、その水相への溶解性から抽出溶媒としては適さないと判断している²⁰。アルデヒド、エステル類は塩酸条件下で抽出溶媒に用いるには化学的安定性に欠けると考えられる。いくつかのカルボン酸化合物によるAu(III)の抽出を検討しているが、これまでに抽出できる化合物は見つかっていない¹⁷。これらを踏まえると、抽出溶媒として現実的なのは抽出性が期待でき、かつ塩酸条件下で化学的に比較的安定なエーテルおよびケトン類であり、次項からは化合物群ごとに検討結果を紹介する。

3.2 脂肪族エーテル

工業用溶媒として近年に生産量が増加したシクロペンチルメチルエーテル(CPME)は、Au(III)を抽出できる

ことを見出している^{20,21}。CPMEはMIBKの異性体に相当し、化学的な安定性が高い。Au(III)の溶媒和抽出の特性として、CPMEを用いた場合も塩酸濃度の増加とともにAu(III)の抽出率が増加する。また、DBCなどの既往の溶媒と同様に、CPMEでもAu(III)を選択的に抽出することができる。また、抽出が速い、抽出容量が大きいなどの溶媒和抽出の特長を備えている。ただし、CPMEは引火点が低い(-1°C)ために安全性に不安があるほか、水への溶解度(11 g/dm³)がDBCよりも高いために抽出操作における漏出量が多い。より炭素数・分子量の大きい脂肪族モノエーテルは引火点が高く、水への溶解度は低下するが、Au(III)の抽出能力も失われる。具体的にはジブチルエーテルはAu(III)を抽出できないことを確認している¹⁷。二つ以上のエーテル酸素を有するエーテル類はDBCのように高い抽出能力と高引火点を兼ね備える可能性を有するが、構造が複雑になると製造コストが上がり予想され、試験研究用にも入手が容易ではない。

3.3 芳香族エーテル

過去に芳香族エーテル類によるAu(III)の抽出特性の報告が見当たらないことから、筆者らは各種の芳香族エーテルによるAu(III)の抽出特性について検討した。各種の芳香族モノエーテル、芳香族ジエーテルを合成して抽出特性を検討したところ、当初の検討では様々な化合物がAu(III)を抽出した一方で、抽出容量が乏しいという不可解な挙動がみられた^{22,23}。そこで合成物の純度を高めて再度試験を行ったところ、アルキル側鎖の短い芳香族ジエーテルがAu(III)の抽出に優れることが見いだされ²⁴、初期のAu(III)の抽出特性は不純物による影響を受けていることが示唆された。結果的にこれらの化学種で最も抽出率・抽出容量が大きかったのは側鎖の炭素数が最小の1,2-ジメトキシベンゼン(1,2-DMB)である。アルキル側鎖の炭素数が大きく、より低極性の芳香族ジエーテルほど抽出能力・抽出容量が低下する。他方、芳香族モノエーテルでは最も炭素数が小さいメトキシベンゼン(アニソール, MB)でもAu(III)はほとんど抽出されない。さらに興味深いことに、1,2-DMBの位置異性体で二つのメトキシ基がメタ位に位置する1,3-ジメトキシベンゼン(1,3-DMB)もAu(III)を全く抽出しなかった。有機化合物の疎水性/親水性バランスの指標に水・オクタノール分配係数(log*P*)があるが、1,2-DMB, 1,3-DMB, MBのlog*P*の理論値は1.79, 1.79, 1.92で類似している。類似した極性にもかかわらず1,2-DMBのみが高い抽出性を示した理由として、二つのエーテル酸素が近傍に位置していることが関係していると考えられる。

3.4 脂肪族ケトン

MIBK が Au(III) への極めて高い抽出能力を示すことから脂肪族ケトンは Au(III) の抽出に適すると予想されるが、これまでに脂肪族ケトンを用いた抽出特性の体系的な評価は報告例が見当たらなかった。筆者らは炭素数の異なる脂肪族ケトンにおける Au(III) の抽出特性を比較した²⁵。低塩酸濃度条件から高い抽出率を示す MIBK には劣るものの炭素数 8 の 2-オクタノンから炭素数 12 の 2-ドデカノンまでいずれも塩酸濃度の増加とともに抽出率が増加した。芳香族ジエーテルの挙動と同様に、炭素数が多くより低極性の脂肪族ケトンほど抽出能力・抽出容量が低下することが確認された。カルボニル基の位置は抽出特性に影響を及ぼすというより、抽出系の安定性に関わり、4-ノナン、5-ノナンを用いて抽出試験を行ったところ溶液が変色した。これについては詳しい分析を行っていないが、Au(III) の還元反応が生じている、あるいはケトン側の塩酸系における副反応が生じているとみられ、これらのケトン類はいずれにしても抽出操作に適さない。これらのケトンによる Au(III) の抽出容量を評価するために Au(III) の初濃度を変えた 5.0 mol/dm³ の塩酸からの各溶媒への抽出量を調べており、MIBK、DBC と 2-ノナン (2-NON) の挙動を比較したものを Fig. 3 に示す。この実験では水相と抽出相の体積比を 10:1 で試験しており、抽出溶媒中の Au(III) 濃度は 10 倍に濃縮されている。いずれの溶媒も水相の初濃度増加に伴って飽和することなく抽出溶媒中での Au(III) 濃度が増加している。溶媒への抽出量が高すぎると比重が上がり水相等との相の反転も起こりうることから、抽出溶媒中の Au(III) 濃度は 40 g/dm³ あれば十分と考えられている⁷。2-NON への抽出量はこの値を大幅に超えており、DBC などと十分に競合する処理量を備えている。2-NON に抽出した Au(III) をシュウ酸による還元反応で定量的に回収できることも確認できており、DBC に近い Au(III) への抽出能力を示し、かつ後述の物性面でも優れる 2-NON は、DBC に置き換わりうる優れた抽出能力を兼ね備えた溶媒の一つである。

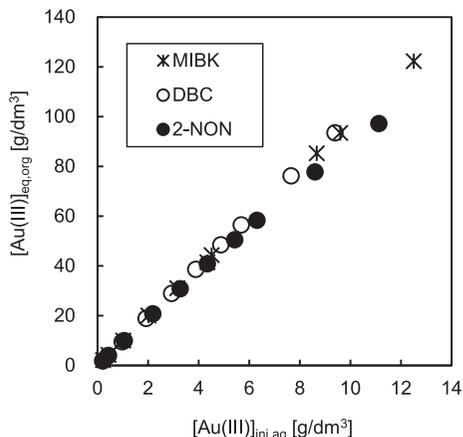


Figure 3. Au(III) concentration in MIBK, DBC, and 2-NON as a function of initial concentration of Au(III) in HCl media.²⁵

3.5 芳香族ケトン

脂肪族ケトンの好例に倣い、アルキル側鎖の炭素数の異なる一連の芳香族ケトン類による抽出試験を行った²⁶。予想されたように芳香族ケトン類を用いても、迅速かつ高い抽出率で Au(III) が抽出された。脂肪族ケトンと同様に、側鎖の炭素数が増加し低極性の芳香族ケトンほど抽出率・抽出容量が低下した。最も高い抽出能力を示したアセトフェノン (AcP) による抽出率は MIBK よりも高く、広範囲の塩酸濃度で Au(III) が定量的に抽出された。ただし、AcP の水への溶解度 (6.1 g/dm³) は DBC よりも高いうえ、高すぎる抽出能力は抽出後の Au(III) の還元回収の難しさをもたらすことから必ずしも望ましくない。抽出能力と物性のバランスからはブチロフェノン (BuP) の方が抽出に望ましいと考えられる。

2-NON および BuP による各種金属の抽出率を Fig. 4 に示す^{25,26}。工業的に用いられる DBC や MIBK、さらに筆者らが検討した CPME、1,2-DMB などと同様、2-NON および BuP による Au(III) の抽出率は塩酸濃度の増加とともに上昇し、貴金属類の中では選択的に Au(III) が抽

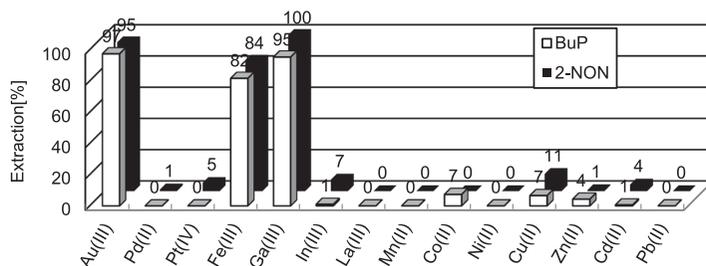


Figure 4. Extraction of various metal ions using BuP in HCl media.^{24,25}

出される。その他の遷移金属の大半が BuP ではほとんど抽出されないため、Au(III) を多くの金属から選択的に抽出分離することができる。Fe(III) と Ga(III) は例外的に高濃度塩酸 (5 mol/dm³) において高い抽出率を示す。これらの金属は高濃度塩酸条件で Au(III) と同じく 1 価の陰イオン種であるテトラクロロ錯体 (FeCl₄⁻, GaCl₄⁻) として存在するため、Au(III) と同様の機構で抽出されると考えられる。ただし、Fe(III) と Ga(III) は塩酸濃度が低下すると抽出率が大幅に低下するため、洗浄 (スクラビング) 操作にて除去して Au(III) と分離することができる。溶媒によって多少の抽出率の差はあるが、これらの抽出選択性はこれまでに検討してきた抽出溶媒に共通するものである。

4. Au(III) の抽出能力に影響する溶媒の物性

前項で示したように、溶媒の極性は Au(III) の抽出能力に大きく影響を及ぼす。そこで、極性の指標として脂肪族ケトン、芳香族ケトン、および DBC の log*P* 値 (理論値²⁷) を横軸に、その溶媒による 0.10 mol/dm³ 塩酸からの Au(III) の抽出率を縦軸に取ったグラフを Fig. 5 に示す²⁶。図に示されるように両者には明確な相関があり、log*P* が低く、より高極性の溶媒であるほど Au(III) の抽出率が高い。log*P* 値が 4 を超える溶媒では、Au(III) の抽出がほとんど期待できないことがこの結果から読み取れる。

溶媒の物性と抽出能力についてより詳しく検討するために、ハンセン溶解度パラメータ (HSPs) を導入した²⁸。HSPs は溶解度パラメータを極性項 (δ_p)、水素結合項 (δ_H)、分散力項 (δ_D) に分割したもので、溶質の HSPs と近い HSPs を有する溶媒は良溶媒となる傾向を示すことから、ポリマー、塗料、医薬品などの様々な化学物質の良溶媒予測に利用されている。そこで、各種溶媒の HSPs と、その溶媒を用いての 5.0 mol/dm³ の塩酸からの Au(III) の抽出率との相関を調査した^{17,29}。 δ_H 、 δ_D と Au(III) の抽出率との関係性は判然としない。一方、log*P* から予想されるように δ_p と抽出率には明確な相関が確認され、 δ_p が 4.5 を境界値としてそれ以上の溶媒は高い抽出特性を示した。これらの結果は極性の高い有機溶媒であるほど Au(III) の抽出能力が高いことを意味している。ところが、高極性の溶媒は原料相である金属水溶液に溶けだすため、工業的な溶媒抽出操作には適さない。すなわち、溶媒和抽出に適した溶媒は高い抽出能力を示すための高い極性と低い水への溶解性という矛盾する物性を両立する必要がある。そこで、抽出に適する溶媒を HSPs 値に基づいて絞り込む手段として、水に混和する溶媒 (例えばエタノール、アセトン、酢酸) は「溶

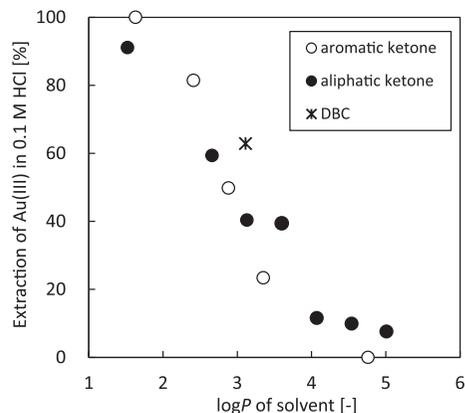


Figure 5. Relationship between log*P* of solvents and the extraction of Au(III).²⁶

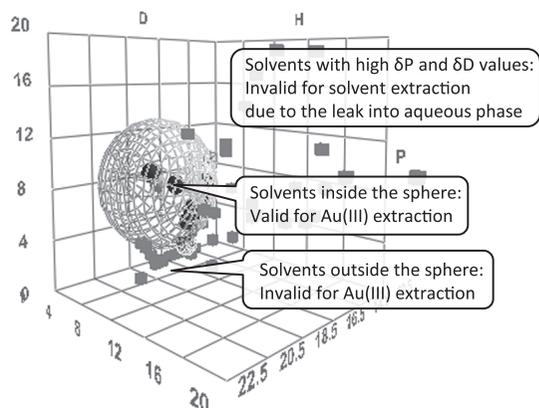


Figure 6. Three-dimensional Hansen solubility parameter (HSP) diagrams of solvents based on Au(III) extractability.¹⁷

媒抽出操作に不適)として、その溶媒の HSPs は排除した。5.0 mol/dm³ 塩酸における Au(III) の抽出率が 80% を超えた 9 種の溶媒の HSPs の座標が球内部に位置し、一方で抽出率が 80% 以下の 17 種の溶媒ならびに水混和性の 25 種類の溶媒が球の外側に位置するように専用のソフトウェア (HSPiP, Hansen Solubility Parameters in Practice software ver. 5) で解析することで、Au(III) の抽出に適した溶媒の HSPs の範囲を特定するハンセン溶解度球を得ることができた (Fig. 6)。得られた溶解度球の中心座標は $\delta_D = 17.73$ 、 $\delta_p = 7.82$ 、 $\delta_H = 2.48$ 、半径は 5.5 で、DBC、MIBK の HSPs 座標は球の内部に位置した。抽出実験を行った 25 種の溶媒のうち 24 種がこの溶解度球において適切に分類されたことから、HSPs は Au(III) に適した溶媒の選抜に有効な手段であると言える。一方で例外的に 1,2-DMB は抽出率が高いにもかかわらずその HSPs は溶解度球の外側に位置した。1,2-DMB は 2 つの

Table 1 Physical properties of organic solvents for the extraction of Au(III)

	DBC	MIBK	CPME	1,2-DMB	2-NON	BuP
molar mass [g mol ⁻¹]	218.3	100.2	100.2	138.2	142.2	148.2
solubility in water [g dm ⁻³]	3	19.1	11.0	6.7	0.5	0.51
density [g dm ⁻³]	0.88	0.80	0.86	1.08	0.82	0.98
viscosity [mPa·s]	2.4	0.61	0.55	3.3	1.3	2.2
boiling point [°C]	256	116	106	206	195	221
flash point [°C]	118	17	-1	87	76	88
log <i>P</i> ^a [-]	3.11	1.52	1.65	1.79	3.13	2.88

a The log*P* values were estimated using MarvinSketch 6.2.1 software (ChemAxon Ltd., Budapest, Hungary) and the KLOP (Klopman's) method²⁷

エーテル酸素が近傍に位置し、かつ構造的自由度が小さい(エントロピー損失が小さい)。すなわち、HSPsでは網羅できない溶媒の立体化学的な要因も抽出に適した溶媒の付加的な因子として寄与しうると考えられる。

5. 工業的な抽出プロセスに求められる溶媒の物性

前項にて Au(III) の抽出に適した溶媒の物性を絞り込むことができたが、優れた抽出溶媒が実際の抽出操作においても実用性が高いとは限らない。比較的極性の高い溶媒が Au(III) の抽出に優れているが、一方で水に溶解する溶媒は抽出操作にて水相に漏出して失われる。他にも溶媒には安全性、操作容易性などが求められる。

Table 1 にこれまでに挙げられた溶媒の物性値をまとめる。DBC の水への溶解度は 3 g/dm³ で、これより溶解度が大きい MIBK、CPME、1,2-DMB は抽出操作における溶媒の損失が大きい。2-NON、BuP の溶解度は DBC よりも小さく、連続操作においてより優れると期待される。安全な抽出操作のためには溶媒の引火点が高いことが望ましい。MIBK、CPME は引火点が低いために使用に制約が多い。国内で MIBK が Au(III) の抽出に採用されない理由は高い水への溶解度と低い引火点が原因と思われる。DBC、1,2-DMB、2-NON および BuP の引火点は 70°C 以上 200°C 未満であり、第三石油類に分類され、これらは比較的安全に使用できる。溶媒の粘度は低い方が取り扱いやすいと考えられる。1,2-DMB 以外の溶媒は DBC よりも粘度が低く、この点で不利はない。溶媒の密度が水に近いと相の反転が起こりやすく、抽出操作に困難をきたす懸念があるため、1,2-DMB および BuP はこの観点からは使いづらい。

これらを総合すると最も用いられる DBC よりも水への溶解度が低く、適正な引火点、粘性、密度を有する 2-NON は工業的な利用のために有望な物性を備えているといえる。

6. おわりに

金の採掘では 2000 年代まで南アフリカ共和国が有力だったが近年では生産量が減り、中国、オーストラリア、ロシアが生産国の上位に位置している。当面は適正量の金が市場に供給されると見込まれるが、高騰する金の供給は政情にも振り回されるリスクがあり、消費財等からの金のリサイクルは我が国において特に重要と考えられる。こうした背景下で、廃棄された電子機器等に含まれる希少金属の再資源化を目論んで小型家電リサイクル法が近年施行された。その後小型家電の回収量は増加傾向にはあるが、当初目標とされた 14 万トンには 2018 年時点では達成していない²。同法は製造業者や消費者に義務を課さない促進型の法令であり、回収量の向上には一層の工夫が必要と思われる。

電気電子機器廃棄物は多種の希少金属を含有し魅力的な金属資源と捉えられているが、一方で金属種が多いためその相互分離は容易ではなく、全ての金属を採算の合う条件で分離回収することは現時点では困難である。そうした状況で、高価でリサイクルの採算性が高い金は最有力の回収対象であり、そのプロセスの改善は今後も重要と考えられる。DBC を用いた Au(III) の抽出分離は広く導入されているが、溶媒の損失があるなど改善の余地は残されている。本稿では体系的な研究が進んでいない Au(III) などの塩化物錯体の溶媒和型の抽出について筆者らの近年の成果を紹介した。2-NON など、DBC に置き換わりうる幾つかの溶媒を見出したほか、抽出に適した溶媒の条件の絞り込みについて一定の進歩が得られており、さらに調査を継続している。

溶媒和型の抽出は溶媒の種類による金属選択性の変化はほとんどみられないが、迅速、高処理量などの優れた特性を備え、抽出対象も金のみでなくガリウムやセレン等の分離にも展開しうる、魅力的なプロセスであるといえる。

References

1. C. Hageluku and C.W. Corti: *Gold Bulletin*, **43**, pp. 209–219 (2010)
2. 環境省編：令和4年版 環境白書 / 循環型社会白書 / 生物多様性白書, p. 147 (2022)
3. 原田幸明：化学工学, **82**, pp. 410–413 (2018)
4. 奥田晃彦：化学工学, **82**, pp. 428–430 (2018)
5. 井上勝利, 中塩文行：化学工学, **46**, pp. 164–172 (1982)
6. 井上勝利, 中塩文行：化学工学, **46**, pp. 700–706 (1982)
7. J.O. Marsden and C. House: *The chemistry of gold extraction*, 2nd edition. Society for Mining, Metallurgy & Exploration (2006)
8. 鈴木平, 目黒謙次郎：貴金属の科学：基礎編, 田中貴金属工業, (1985)
9. 大島達也：機能材料, **40**, pp. 13–19 (2020)
10. I.V. Mironov: *Hydrometallurgy*, **33**, pp. 15–22 (2013)
11. D.F.C. Morris and M.A. Khan: *Talanta*, **111**, pp. 231–233 (1968)
12. J.E. Barnes and J.D. Edwards: *Chemistry and Industry*, **10**, pp. 151–155 (1982)
13. 黒川晴正：Journal of MMIJ, **134**, pp. 74–80 (2018)
14. S. Javanshir, M. Abdollahy, H. Abolghasemi, A. Khodadadi Darban: *International Journal of Mineral Processing*, **98**, pp. 42–47 (2011)
15. J. Rydberg, M. Cox, C. Musikas, G.R. Choppin: *Solvent Extraction Principles and Practice*, Revised and Expanded, 2nd edition. CRC Press (2004)
16. A. Diamantatos: *Analytica Chimica Acta*, **131**, pp. 53–62 (1981)
17. T. Oshima, Y. Iwakiri, A. Inada: *Hydrometallurgy*, *submitted* (2023)
18. C. Sella, R. Navarro Mendoza, D. Bauer: *Hydrometallurgy*, **27**, pp. 179–190 (1991)
19. N. Matsuo, T. Oshima, K. Ohe, N. Otsuki: *Solvent Extraction Research and Development Japan*, **26**, pp. 81–89 (2019)
20. T. Oshima, N. Ohkubo, I. Fujiwara, T. Horiuchi, T. Koyama, K. Ohe, Y. Baba: *Solvent Extraction Research and Development Japan*, **24**, pp. 89–96 (2017)
21. T. Oshima, T. Koyama, N. Otsuka: *Solvent Extraction and Ion Exchange*, **39**, pp. 477–490 (2021)
22. T. Horiuchi, T. Oshima, Y. Baba: *Hydrometallurgy*, **178**, pp. 176–180 (2018)
23. T. Oshima, T. Horiuchi, K. Matsuzaki, K. Ohe: *Hydrometallurgy*, **183**, pp. 207–212 (2019)
24. T. Oshima, K. Matsuzaki, A. Inada, K. Ohe: *Separation and Purification Technology*, **258**, 118008 (2021)
25. T. Oshima and K. Miyake: *AIChE Journal*, **67**, e17214 (2021)
26. T. Oshima, K. Miyake, M. Hashizume, A. Inada: *Solvent Extraction Research and Development Japan*, *in press* (2023)
27. G. Klopman, J.-Y., Li, S. Wang, M. Dimayuga: *Journal of Chemical Information and Modeling*, **34**, pp. 752–781 (1994)
28. C.M. Hansen: *Hansen Solubility Parameters: A User's Handbook*, Second Edition. CRC Press (2007)
29. 大島達也, 岩切雄飛, 三宅晃太, 松尾直樹, 大榮薫, 稲田飛鳥：化学工学会第51回秋季大会要旨集, R120 (2020)