

## 無機分析における固相抽出の応用

近年、ICP 質量分析法に代表される高感度分析法の発達に伴って、分析装置に合った新たな前処理手法が必要となり数多くの分離・濃縮手法が開発されてきた。その中でも、固相抽出法は最も広く用いられており、近年では、特定の元素に特化した様々な高機能樹脂が市販されるようになった。本稿では、これらの高機能樹脂を中心に、各樹脂毎の過去約 10 年間における分析応用例を紹介する。

高久 雄 一

## 1 はじめに

近年では、循環型社会形成推進基本法（リサイクル基本法）、土壤汚染対策法、EU 諸国における廃電気電子機器リサイクル指令（WEEE 指令）、電気電子機器に含まれる特定有害物質の使用制限指令（RoHS 指令）、廃自動車に関する指令（ELV 指令）の施行に伴い、電気製品、電子基板、製品素材に含まれる有害重金属、関連工場・施設土地履歴に関連する汚染物質の分析の需要が急激に高まっている<sup>1)2)</sup>。ICP 発光分析法や原子吸光法などの方法によって試料中の重金属を定量しようとした場合、検出感度の不足や、共存成分の影響で、直接分析を行うことができない場合が少なくない。また、検出感度的には、十分な能力を持っている ICP 質量分析法を用いた場合でも、海水や生体試料のように、Na や Ca 等のマトリックス成分を多く含む試料では、サンプリングコーンの詰まりや、マトリックス効果による感度低下のために直接分析が困難な場合がある。このような際には、目的元素の濃縮やマトリックス成分の除去を行う必要があり、試料前処理として化学分離を行う必要がある。固相抽出法は、その操作が比較的簡便であることから急速に利用が進んでいる。固相抽出は大きく三つに分類される。一つ目は、金属酸化物（活性アルミナ等）を含めたイオン交換剤<sup>3)~5)</sup>、二つ目は、試料をカラムに通す前にキレートを形成させ、その後固相抽出を行う逆相吸着剤である<sup>6)</sup>。三つ目は、官能基を樹脂又はシリカ上に固定させたキレート樹脂である。それに加えて最近では、ある特定の元素を選択的に吸着する高機能樹脂が数多く市販されるようになってきている。本稿では固相抽出剤として従来から広く用いられているキレート樹脂と元素選択性高機能樹脂を取り上げ、環境試料中の微量元素分析の分離濃縮の現状について紹介する。なお、これらの樹脂については、著者によって 2004 年に<sup>1)</sup>、古

庄氏によって 2010 年に<sup>2)</sup>進歩総説として本誌にすでに詳しくまとめられているので、本稿では 2010 年以降の動向について主に紹介する。

## 2 主な応用例

表 1 に、現在、国内で比較的容易に入手可能な分離用樹脂の一覧を示す。これらの樹脂は、大きく分けて、陽・陰イオン交換樹脂、キレート樹脂、元素選択樹脂に分けることができる。

## 2・1 キレート樹脂

キレート樹脂を用いた方法でよく使われる官能基には、イミノ二酢酸基、8-キノリノール基<sup>7)</sup>、ジチオカルバメート基<sup>8)</sup>がある。このうち 8-キノリノール基は市販品がなく、使用者自身が合成する必要があり、手間とコストがかかるという欠点がある。又、ジチオカルバメート基は、元素の吸着力が非常に強く溶離しにくいために元素を吸着させた後、樹脂ごと酸分解等で溶液化してから分析する必要がある。それに対してイミノ二酢酸基系に関しては、Chelex-100 (Biorad)、Muromac A-1 (室町化学)などのキレート樹脂に加えて、元素選択性を高めた Nobias (日立ハイテクノロジー)、InertSep<sup>®</sup> IC-ME (ME-2) (GL Science)、Presep<sup>®</sup> ポリキレート (MCM) (富士フィルム和光) などの高機能キレート樹脂が市販されている。これらの樹脂は、比較的容易に手に入れることができることから最近一般的に広く用いられるようになってきている。

図 1 に各樹脂の構造式を<sup>9)</sup>、図 2 に代表例として IC-ME の元素吸着特性を示す<sup>10)</sup>。これらのキレート樹脂は、試料の pH により、各元素の吸着特性が変化する。この特性を利用して、試料の pH を 3.5~5.6 に調整し、樹脂に通すことにより、遷移金属などの多くの重金属元素とアルカリ・アルカリ土類元素を分離することができる。この特性を利用して、環境試料を中心として多くの分析例が報告されている。主な対象試料としては、海水

表1 市販されている主な分離樹脂

| 樹脂タイプ    |                           |                |   |
|----------|---------------------------|----------------|---|
|          | 樹脂名                       | メーカー           | 対象元素  |
| 陰イオン交換樹脂 |                           |                |   |
|          | ダウエックス™ 1×2               | 富士フィルム和光純薬     |   |
|          | DIAION™ SA                | 三菱ケミカル         |   |
| 陽イオン交換樹脂 |                           |                |   |
|          | ダウエックス™ 50W×8             | 富士フィルム和光純薬     |   |
|          | DIAION™ SK                | 三菱ケミカル         |   |
| キレート樹脂   |                           |                |   |
|          | Chelex 100                | Bio-Rad        | 遷移金属一般, ランタノイド, アクチノイド  |
|          | Muromac A1                | 室町ケミカル         | 遷移金属一般, ランタノイド, アクチノイド  |
|          | ダイヤイオン CR11               | 三菱ケミカル         | 遷移金属一般, ランタノイド, アクチノイド  |
|          | NOBIAS                    | 日立ハイテクフィールディング | 遷移金属一般, ランタノイド, アクチノイド  |
|          | MetaSEP CH-1              | GL Science     | 遷移金属一般, ランタノイド, アクチノイド  |
|          | InertSep® IC-ME (ME-2)    | GL Science     | 遷移金属一般, ランタノイド, アクチノイド  |
|          | Presep® ポリキレート (MCM)      | 富士フィルム和光純薬     | 遷移金属一般, ランタノイド, アクチノイド  |
| ホウ素選択樹脂  |                           |                |   |
|          | Amberlite IRA743          | オルガノ           | ホウ素   |
|          | MetaSEP CH-2              | GL Science     | ホウ素   |
| 高機能選択樹脂  |                           |                |   |
|          | MetaSEP AnaLig AM-03      | GL Science     | Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , Rb <sup>+</sup> , Li <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Sr <sup>2+</sup> , Ba <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup>  |
|          | MetaSEP AnaLig HA-01      | GL Science     | ハロゲン  |
|          | MetaSEP AnaLig PD-01      | GL Science     | Pd <sup>2+</sup>  |
|          | MetaSEP AnaLig PM-02      | GL Science     | Au <sup>3+</sup> , Ag <sup>+</sup> , Pd <sup>2+</sup> , Pt <sup>2+</sup> , Pt <sup>4+</sup> , Ru <sup>3+</sup>  |
|          | MetaSEP AnaLig PM-08      | GL Science     | Ir <sup>3+</sup> , Rh <sup>3+</sup> , Ru <sup>3+</sup>  |
|          | MetaSEP AnaLig CR-02      | GL Science     | CrO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>  |
|          | MetaSEP AnaLig HG-01      | GL Science     | Hg <sup>2+</sup>  |
|          | MetaSEP AnaLig PB-01      | GL Science     | Pb <sup>2+</sup>  |
|          | MetaSEP AnaLig As-01PA    | GL Science     | As (V)  |
|          | MetaSEP AnaLig TE-02      | GL Science     | Ag <sup>1+</sup> , Au <sup>3+</sup> , Cd <sup>2+</sup> , Co <sup>2+</sup> , Cu <sup>2+</sup> , Fe <sup>2+</sup> , Hg <sup>2+</sup> ,  |
|          | MetaSEP AnaLig TE-04      | GL Science     | Au <sup>3+</sup> , Co <sup>2+</sup> , Cu <sup>2+</sup> , Hg <sup>2+</sup> , Ni <sup>2+</sup> , Pd <sup>2+</sup> , Zn <sup>2+</sup> , Ag <sup>+</sup> , Cd <sup>2+</sup> , Pb <sup>2+</sup> (pH > 3), Cu <sup>2+</sup> |
|          | MetaSEP AnaLig TE-08      | GL Science     | Fe <sup>2+</sup>  |
|          | MetaSEP AnaLig Sr-01      | GL Science     | Sr <sup>2+</sup>  |
|          | MetaSEP AnaLig Cs-01      | GL Science     | Cs <sup>+</sup>   |
|          | MetaSEP AnaLig Tc-01      | GL Science     | TcO <sub>4</sub> <sup>-</sup>   |
|          | MetaSEP AnaLig Ra-01      | GL Science     | Ra <sup>2+</sup>  |
|          | MetaSEP AnaLig U-02PA     | GL Science     | U (VI), U (IV)  |
|          | MetaSEP AnaLig Pu-01      | GL Science     | Pu <sup>4+</sup>  |
|          | Actinide レジン              | 桑和貿易           | アクチノイド  |
|          | DGA レジン                   | 桑和貿易           | Pu, Th, Am  |
|          | LN レジン                    | 桑和貿易           | ランタノイド, Ra <sup>2+</sup>  |
|          | MnO <sub>2</sub> レジン      | 桑和貿易           | Ra <sup>2+</sup>  |
|          | Nickel レジン                | 桑和貿易           | Ni <sup>2+</sup>  |
|          | Pb レジン                    | 桑和貿易           | Pb <sup>2+</sup>  |
|          | Sr レジン                    | 桑和貿易           | Sr <sup>2+</sup>  |
|          | RE レジン                    | 桑和貿易           | 希土類元素, Th, U, Np, Pu, Am, Cm  |
|          | TEVA レジン                  | 桑和貿易           | Tc, Th, Np, Pu, Am, ランタノイド  |
|          | TRU レジン                   | 桑和貿易           | Fe, Th, Pa, U, Np, Pu, Am, Cm   |
|          | UTEVA レジン                 | 桑和貿易           | Th, U, Np, Pu   |
|          | CL レジン                    | 桑和貿易           | ハロゲン  |
|          | Cs レジン                    | 桑和貿易           | Cs <sup>+</sup>   |
|          | MnO <sub>2</sub> -PAN レジン | 桑和貿易           | Ra <sup>2+</sup>  |
|          | TK-201 レジン                | 桑和貿易           | Tc, Cu, Pu, Re  |
|          | TK-202 レジン                | 桑和貿易           | Tc  |
|          | TK-400 レジン                | 桑和貿易           | Pa, Nb, Mo, Ga  |
|          | Zr レジン                    | 桑和貿易           | Zr, Ga, Ge, Ti  |

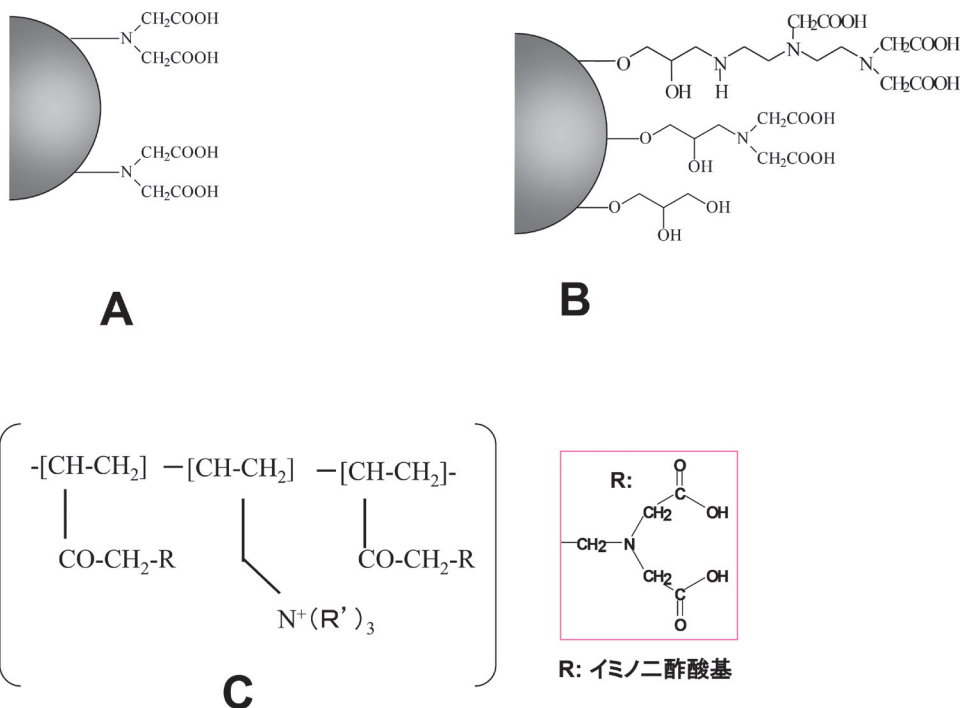


図1 キレート樹脂の官能基の比較

A: イミノ二酢酸導入型, B: ポリアミノカルボン酸導入型, C: イミノ二酢酸+陰イオン交換基導入型

等の環境水<sup>11)~29)</sup>, 岩石・土壌<sup>30)31)</sup>, 煤塵溶出液<sup>32)</sup>, 生体試料<sup>33)34)</sup>, 工業材料<sup>35)</sup>などである。環境水試料においては, 公定法<sup>36)</sup>にキレート樹脂が取り入れられたことから, 広く利用されている。この中でも, 藤森他<sup>19)</sup>及び著者のグループ<sup>22)</sup>は ICP-MS による Cd の定量の際に妨害となる Mo を, それぞれ異なった樹脂を用いて分離する手法を開発した。

## 2・2 高機能選択性樹脂

1980年代後半に米国, アルゴンヌ国立研究所の Horwitz とそのグループによって放射性核種のバイオアッセイ用に開発された元素選択吸着性の非常に強い樹脂<sup>37)</sup>が Eichrom 社より 1990 年に初めて市販された。この樹脂の開発により, 従来は分離濃縮に数日を要していた放射性核種の前処理時間が格段に短縮されると共に用いる試薬量が大幅に減少した。これ以降, 数多くの企業からさまざまな元素に対応した高機能樹脂が市販されている。これらの樹脂の変遷及び機能については, Ismail ら<sup>38)</sup>によって詳しく紹介されているので参考にさせていただきたい。なお, 初期の環境中の長半減期核種の分析全般については, 本進歩総説において, 2001 年に関により<sup>39)</sup>, 2010 年に古庄により<sup>2)</sup>詳しく紹介されているので, 本稿では 2010 年以降の動向について, 対象元素ごとに紹介する。

### 2・2・1 放射性核種

2011 年の福島第一原子力発電所事故以降, 放出された放射性核種の日本国内の濃度分布を測定するために,

各種の放射性核種 (Cs, Sr, U, Pu 他) の分析が数多く行われ, それに伴って高機能選択樹脂が広く使われるようになった。

### 2・2・2 Sr 及び Cs

Eichrom 社製の Sr resin は, 放射性核種である <sup>90</sup>Sr の濃縮分離の為に開発されたクラウンエーテル環とオクタンの混合液を不活性ポリマーに保持させたもので, Sr を選択的に吸着する<sup>40)</sup>。Dietz らは<sup>41)</sup>, この樹脂を用いて環境試料中の <sup>90</sup>Sr を分離濃縮した。濃縮後の <sup>90</sup>Sr の測定には, 一般的には, 液体シンチレーションカウンターやガス比例計数管が用いられている。現在では, 複数の企業から同様の性能を持つ樹脂が市販されている。各樹脂の特性については, Alam ら<sup>42)</sup>によって, 2011 年以前の分析例については, Vajda ら<sup>43)</sup>によって, 詳しく紹介されているので参考にしてほしい。2011 以降は, 福島第一原子力発電所事故に伴って, 報告例が大幅に増加した<sup>44)~60)</sup>。<sup>90</sup>Sr の測定法に関しても, 従来からの β 線測定に加えて, コリジョン・リアクションセルを用いた IC-MS も用いられるようになってきている<sup>53)55)59)</sup>。放射性 Cs に関しては, フェロシアン化鉄 (II) コバルトカリウムを用いた濃縮法が, 古くから持いられてきたが<sup>61)</sup>, チェルノブイリ原発事故以降のニーズの高まりに合わせ, 複数の高機能樹脂が開発される<sup>62)63)</sup>とともに, 放射性 Sr 同様に, 報告例が増えて来ている<sup>64)~69)</sup>。



図2 回収率の pH 依存性  
IC-ME (ME-2) (GL Science)



### 2・2・3 ランタノイド及びアクチノイド

ランタノイド及びアクチノイドの相互分離を行うための樹脂が、現在、Eichrom社、及びIBC社より市販されている。溶離条件及び用いる樹脂の組み合わせを変えることにより、ほとんどすべてのアクチノイドを相互に分離することができることから、現在ではアクチノイドの標準的な分離法となっている。加えて、Sr、Cs同様に、福島第一原子力発電所事故に伴って、福島関連のアクチノイドの報告例が大幅に増加した<sup>70)~95)</sup>。これらの樹脂は、環境試料分析以外の工業材料の不純物分析にも用いられている<sup>96)97)</sup>。

### 2・2・4 Ra

放射性核種であるRaをターゲットとした樹脂がEichrom社、及びIBC社より市販されている。前者は、MoO<sub>2</sub>をベースとした樹脂であり<sup>98)</sup>、後者は、クラウンエーテル環をもちいた樹脂である。主な分析対象試料としては、環境試料が中心であるが<sup>99)</sup>、一部工業材料中の不純物分析に関する報告例もある<sup>100)101)</sup>。測定手法としては、放射能測定が中心であるが、最近では、ICP-MSも用いられるようになってきている。

### 2・1・4 その他の金属

放射性核種以外の元素についても多くの高機能選択性樹脂が工業目的でEichrom社他で開発されている。例えば、Pb用の樹脂は、本来は放射性核種である<sup>210</sup>Pbの濃縮分離の為に開発された樹脂で、Pbに対して強い選択性を持つ<sup>102)103)</sup>。熊井らは<sup>30)</sup>、この樹脂を用いて、液体電極プラズマ発光分析法により土壌中のPbの定量を行った。これ以外にもCu<sup>104)</sup>やハロゲン元素<sup>105)</sup>に特化した樹脂が開発されている。また、白金族に特化した樹脂を用いて、In<sup>106)</sup>やPt<sup>107)</sup>を分析した報告例もある。また、柳沢らは<sup>108)</sup>、ホウ素に特化した樹脂を用いて、環境試料からホウ素を分離し、同位体比の測定を行った。

## 3 ま と め

ICP-MSの登場以来、比較的容易に環境試料中の超微量元素を測定できるようになって来てはいるものの、マトリックス成分の多い試料やより正確な濃度を求めるためには、どうしても化学分離は不可欠である。固相抽出は今後も大幅な需要の伸びも予想されることから、その発展が大いに期待される。

謝辞 本総説を執筆するに当たり、資料の転載を許可していただいた、GLサイエンス㈱、桑和貿易㈱及び日立ハイテクノロジーに感謝致します。

## 文 献

- 1) 高久雄一：ぶんせき (*Bunseki*), **2004**, 604.
- 2) 古庄義明, 長谷川博：ぶんせき (*Bunseki*), **2010**, 34.
- 3) M. Sperling, S. Xu, B. Welz : *Anal. Chem.*, **64**, 3101 (1992).
- 4) E. Vassileva, N. Furuta : *Fresenius J. Anal. Chem.*, **370**, 52 (2001).
- 5) 奥村 稔, 藤永 薫, 清家 泰, 永田美香, 松尾修志 : 分析化学 (*Bunseki Kagaku*), **52**, 1147 (2003).
- 6) K. Akatsuka, T. Suzuki, N. Nobuyama, S. Hoshi, K. Haraguchi, K. Nakagawa, T. Ogata, T. Kato : *J. Anal. At. Spectrom.*, **13**, 271 (1993).
- 7) J. W. McLaren, J. W. H. Lam, S. S. Berman, K. Akatsuka, M. A. Azeredo : *J. Anal. At. Spectrom.*, **8**, 279 (1993).
- 8) M. R. Plantz, J. S. Fritz, F. G. Smith, R. S. Houk : *Anal. Chem.*, **61**, 149 (1989).
- 9) 日立ハイテク, GL Science, 富士フィルム和光の営業資料より許可を得て転写.
- 10) GL Science の営業資料より許可を得て転写.
- 11) 宗林由樹, 鄭臨潔 : 現代化学, **2019**, 18.
- 12) S. Watanabe, S. Watanabe, J. Liang, H. Hanaoka, K. Endo, N. S. Ishioka : *Nucl. Med. Biol.*, **36**, 587 (2009).
- 13) 経遠 篤, 鈴木美成, 古庄義明, 古田直紀 : 分析化学 (*Bunseki Kagaku*), **58**, 623 (2009).
- 14) S. Wada, S. Suzuki : *Aquat. Microb. Ecol.*, **63**, 47 (2011).
- 15) 林 明夫, 渡辺哲哉, 金子諒子, 鷹野 明, 高橋克則, 宮田康人, 松尾章子, 山本民次, 井上 亮, 有山達郎 : 鉄と鋼, **98**, 57 (2012).
- 16) I. M. M. Rahman, Z. A. Begum, Y. Furusho, S. Mizutani, T. Maki, H. Hasegawa : *Water Air Soil Pollut.*, **224**, 1526 (2013).
- 17) 山本和子, 三浦和代, 坂元秀之, 米谷 明, 白崎俊浩 : 日本海水学会誌, **67**, 52 (2013).
- 18) 関 庸之, 小島隆志, 安藤裕友, 千田哲也, 香西一樹, 島田 守 : マリンエンジニアリング, **50**, 247 (2015).
- 19) 藤森英治 : 分析化学 (*Bunseki Kagaku*), **65**, 275 (2016).
- 20) 新矢将尚, 西尾孝之 : 水環境学会誌, **39**, 71 (2016).
- 21) 山本民次, 清田忠志, 河尻義孝, 中原真哉, 竹田一彦, 中川 光 : 水産工学, **53**, 81 (2016).
- 22) 高久雄一, 石塚香織, 長岡亜矢子, 皆川昌幸, 森田貴己, 藤本 賢 : 分析化学 (*Bunseki Kagaku*), **65**, 399 (2016).
- 23) 白崎俊浩, 山本和子 : 日本海水学会誌, **71**, 271 (2017).
- 24) S. Kagaya, Y. Aoki, Y. Saeki, T. Goto, M. Ohki, I. Obata : *Bull. Soc. Sea Water Sci.*, **71**, 282 (2017).
- 25) 安曇涼花, 和田明香里, 坂上寛敏, 南 尚嗣, 深澤達矢, 五十嵐聖貴, 田中 敦, 武内章記, 大八木英夫, 神 和夫 : 分析化学 (*Bunseki Kagaku*), **68**, 877 (2019).
- 26) E. Fujimori, S. Nagata, H. Kumata, T. Umemura : *Chemosphere*, **214**, 288 (2019).
- 27) 古庄義明, 小野壮登, 国枝 巧, 高柳 学 : *Bull. Soc. Sea Water Sci.*, **74**, 3 (2020).
- 28) 八井田朱音, 大塚理子, 山田安咲紀, 中野和彦, 松井久美, 関本征史, 稲葉一穂, 伊藤彰英 : 分析化学 (*Bunseki Kagaku*), **69**, 341 (2020).
- 29) T. Kato, Y. Kawasaki, M. Kadokura, K. Suzuki, Y. Tawara, Y. Ohara, C. Tokoro : *Minerals*, **10**, 475 (2020).
- 30) 熊井みゆき, 中山慶子, 古庄義明, 山本 保, 高村 禪 : 分析化学 (*Bunseki Kagaku*), **6**, 561, (2009).
- 31) A. P. G. Fowler, R. A. Zierenberg, M. H. Reed, J. Palandri, F. Oskarsson, I. Gunnarsson : *Geochim. Cosmochim. Acta*, **244**, 129 (2019).
- 32) 山本和子, 坂元秀之, 白崎俊浩 : 分析化学 (*Bunseki Kagaku*), **68**, 497 (2019).
- 33) G. Giakissikli, A. A. Quezada, J. Tanaka, A. N. Anthemidis, H.

- Murakami, N. Teshima, T. Sakai : *Anal. Sci.*, **31**, 383 (2015).
- 34) Y. Shimoda, Y. Endo, N. Sawada, S. Tsugane, G. Endo, K. Yamanaka : *Biomed. Res. Trace Elem.*, **24**, 1 (2013).
- 35) M. Ueda, N. Teshima, T. Sakai, Y. Joichi, S. Motomizu : *Anal. Sci.*, **26**, 597 (2010).
- 36) JIS K 0102, 工場排水試験方法 (2013).
- 37) P. Horwitz, M. L. Dietz, D. M. Nelson, J. J. Larosa, W. D. Fairman : *Anal. Chim. Acta*, **238**, 263 (1990).
- 38) I. M. M. Rahman, Z. A. Begum, H. Hasegawa : *Microchem. J.*, **110**, 485 (2013).
- 39) 関 季紀 : *ぶんせき (Bunseki)*, **2001**, 684.
- 40) P. E. Horwitz, M. L. Dietz, D. E. Fisher : *Solvent Extr. Ion Exch.*, **10**, 313 (1992).
- 41) M. L. Dietz, P. E. Horwitz, D. M. Nelson, M. Wahlgren : *Health Phys.*, **61**, 871 (1991).
- 42) M. F. Alam, Y. Furusho, N. Kavasi, S. K. Sahoo, L. Pirnach, Z. A. Begum, K. Nanba, I. M. M. Rahma : *J. Chromatogr. A*, **1658**, 462125 (2021).
- 43) N. Vajda, C. K. Kim : *Appl. Radiat. Isot.*, **68**, 2306 (2010).
- 44) J. Ometáková, S. Dulanská, L. U. Mátel, B. Remenec : *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **290**, 319 (2011).
- 45) S. Dulanská, B. Remenec, L. Mátel, D. Galanda : *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **288**, 705 (2011).
- 46) S. Dulanská, I. Antalík, M. Labaška, B. Remenec : *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **295**, 1635 (2012).
- 47) S. Dulanská, B. Remenec, J. Bilohuštín, M. Labaška, D. Galanda : *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **295**, 2189 (2013).
- 48) J. J. Surman, J. M. Pates, H. Zhang, S. Happel : *Talanta*, **129**, 623 (2014).
- 49) J. M. Olfert, X. Dai, S. Kramer-Tremblay : *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **300**, 263 (2014).
- 50) M. Tayeb, X. Dai, S. Sdraulig : *J. Environ. Radioact.*, **153**, 214 (2016).
- 51) S. Dulanská, B. Remenec, L. Mátel, L. Darázová, D. Galanda : *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **311**, 29, (2017).
- 52) J. Pan, K. Emanuele, E. Maher, Z. Lin, S. Healey, P. Regan : *Appl. Radiat. Isot.*, **126**, 214 (2017).
- 53) 高貝慶隆, 古川 真, 亀尾 裕, 松枝 誠, 鈴木勝彦 : *分析化学 (Bunseki Kagaku)*, **66**, 223 (2017).
- 54) Y. Shao, G. Yang, H. Tazoe, L. Ma, M. Yamada, D. Xu : *J. Environ. Radioact.*, **192**, 321 (2018).
- 55) M. Furukawa, M. Matsueda, Y. Takagai : *Anal. Sci.*, **34**, 471 (2018).
- 56) Ž. Grahek, S. Dulanská, G. Karanović, I. Coha, I. Tucaković, M. Nodilo, L. Mátel : *J. Environ. Radioact.*, **181**, 18 (2018).
- 57) 鍋師裕美, 堤 智昭, 松田りえ子, 蜂須賀暁子, 穂山浩, 池田 智, 倉岡正次 : *食品衛生学雑誌*, **60**, 7 (2019).
- 58) M. Furukawa, K. Takagi, H. Matsunami, Y. Komatsuzaki, T. Kawakami, T. Shinano, Y. Takagai : *ACS Omega*, **4**, 11276 (2019).
- 59) N. Kavasi, S. K. Sahoo, T. Aono : *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **328**, 1383 (2021).
- 60) A. L. Boni : *Anal. Chem.*, **38**, 89 (1966).
- 61) D. M. Beals, W. G. Britt, J. P. Bibler, D. A. Brooks : *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **236**, 218 (1998).
- 62) D. M. Beals, B. S. Crandall, P. D. Fledderman : *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **243**, 495 (2000).
- 63) B. Besson, L. Pourcelot, E. Lucot, P.-M. Badot : *J. Dairy Sci.*, **92**, 5363 (2009).
- 64) 永野哲志, 三田村久吉, 柳瀬信之, 長縄弘親, 安田健一郎, 山口裕顕 : *放射線安全管理学会誌*, **11**, 139 (2012).
- 65) J. L. Steeb, C. J. Mertz, G. Sandi, ; D. A. Bass, D. G. Graczyk, M. M. Goldberg : *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **292**, 757 (2012).
- 66) S. A. Binnie, T. J. Dunal, E. Voronina, T. Goral, S. Heinze, A. Dewald : *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, **361**, 397 (2015).
- 67) J. Zheng, L. G. Cao, K. Tagami, S. Uchida : *Anal. Chem.*, **88**, 8772 (2016).
- 68) I. M. M. Rahman, Y. Ye, M. F. Alam, H. Sawai, Z. A. Begum, Y. Furusho, A. Ohta, H. Hasegawa : *J. Chromatogr. A*, **1654**, 462476 (2021).
- 69) V. Jobbágy, N. Kávási, J. Somlai, P. Dombóvári, R. Kardos, T. Kovács : *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **286**, 41 (2010).
- 70) N. Vajda, C.-K. Kim : *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **283**, 203 (2010).
- 71) J. Qiao, X. Hou, P. Roos, M. Miró : *Anal. Chem.*, **83**, 374 (2011).
- 72) S. L. Maxwell, B. K. Culligan, A. Kelsey-Wall, P. J. Shaw : *Anal. Chim. Acta*, **701**, 112 (2011).
- 73) N. Vajda, C. K. Kim : *Anal. Chem.*, **83**, 4688 (2011).
- 74) P. Thakur, G. P. Mulholland : *Appl. Radiat. Isot.*, **70**, 1747 (2012).
- 75) H. Dulaiova, K. W. W. Sims, M. A. Charette, J. Prytulak, J. S. Blusztajn : *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **296**, 279 (2013).
- 76) M. Casas-Ruiz, L. Barbero : *Procedia Earth Planet. Sci.*, **13**, 72 (2015).
- 77) B. L. Rosenberg, K. Shozugawa, G. Steinhauser : *Anal. Chem.*, **87**, 8651 (2015).
- 78) F. Monroy-Guzman, F. J. Barreiro, E. J. Salinas, A. L. V. Trevino : *World J. Nucl. Sci. Tech.*, **5**, 111 (2015).
- 79) F. L. H. Tissot, N. Dauphas : *Geochim. Cosmochim. Acta*, **167**, 113 (2015).
- 80) R. Walczak, S. Krajewski, K. Szkliniarz, M. Sitarz, K. Abbas, J. Choiniński, A. Jakubowski, J. Jastrzębski, A. Majkowska, F. Simonelli, A. Stolarz, A. Trzcińska, W. Zipper, A. Bilewicz : *EJNMMI Phys.*, **2**, 33 (2015).
- 81) Z. Wang, G. Yang, J. Zheng, L. Cao, H. Yu, Y. Zhu, K. Tagami, S. Uchida : *Anal. Chem.*, **87**, 5511 (2015).
- 82) B. S. Matteson, S. K. Hanson, J. L. Miller, W. J. Oldham : *J. Environ. Radioact.*, **142**, 62 (2015).
- 83) J. Zheng : *J. Nucl. Radiochem. Sci.*, **15**, 7 (2015).
- 84) Z. Wang, J. Zheng, L. Cao, K. Tagami, S. Uchida : *Anal. Chem.*, **88**, 7387. (2016).
- 85) Z. Wang, J. Zheng, K. Tagami, S. Uchida : *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **312**, 151 (2017).
- 86) Z. T. Wang, J. Zheng, T. Imanaka, S. Uchida : *J. Anal. At. Spectrom.*, **32**, 2034 (2017).
- 87) Z. Wang, J. Zheng, Y. Ni, W. Men, K. Tagami, S. Uchida : *Anal. Chem.*, **89**, 2221 (2017).
- 88) S. L. Maxwell, B. Culligan, J. B. Hutchison, R. Sudowe, D. R. McAlister : *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **314**, 1103 (2017).
- 89) Z. Wang, W. Wen, W. Quan, L. Du, P. Wang, J. X. Lin, Y. Xie, Z. Tan : *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **316**, 411 (2018).
- 90) T. Kerry, A. W. Banford, W. Bower, O. R. Thompson, T. Carey, J. F. W. Mosselmans, K. Ignatyev, C. A. Sharred : *Ind. Eng. Chem. Res.*, **57**, 3957 (2018).
- 91) Z. Wang, J. Lin, S. Li, Q. Guo, W. Huang, G. Dan, Z. Tan. : *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **315**, 103 (2018).
- 92) Y. Ohtsuka, M. Aoyama, Y. Takaku, Y. Igarashi, M. Hattori, K. Hirose, S. Hisamatsu : *Sci. Rep.*, **9**, 8105 (2019).
- 93) Z. Huang, Y. Ni, H. Wang, J. Zheng, S. Yamazaki, A. Sakaguchi, X. Long, S. Uchida : *Microchem. J.*, **148**, 597 (2019).
- 94) H. Wang, Y. Ni, J. Zheng, Z. Huang, D. Xiao : *Anal. Chim. Acta*, **1050**, 71 (2019).
- 95) G. Yang, J. Zheng, E. Kim, S. Zhang, H. Seno, M. Kowatari, T. Aono, O. Kurihara : *Anal. Chim. Acta*, **1158**, 338431 (2021).

- 96) S. Ito, Y. Takaku, M. Ikeda, Y. Kishimoto : *Prog. Theor. Exp. Phys.*, **2017**, 113H01.
- 97) S. Ito, Y. Takaku, M. Ikeda, Y. Kishimoto : *AIP Conference Proceedings*, **1921**, 030003 (2018).
- 98) D. S. Moon, W. C. Burnett, S. Nour, P. Horwitz, A. Bond : *Appl. Rad. Isot.*, **59**, 255 (2003).
- 99) U. S. Environmental Protection Agency : “Rapid Radiochemical Method for Isotopic Uranium in Water for Environmental Remediation Following Homeland Security Events” ([https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/uranium\\_in\\_water\\_rev\\_0\\_1\\_epa\\_402-r-10-001e.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/uranium_in_water_rev_0_1_epa_402-r-10-001e.pdf)), (accessed 2022.03.23).
- 100) S. Ito, K. Ichimura, Y. Takaku, K. Abe, M. Ikeda, Y. Kishimoto : *Prog. Theor. Exp. Phys.*, **2018**, 091H01.
- 101) S. Ito, K. Ichimura, Y. Takaku, K. Abe, M. Harada, M. Ikeda, H. Ito, Y. Kishimoto, Y. Nakajima, T. Okada, H. Sekiya : *Prog. Theor. Exp. Phys.*, **2020**, 093H02.
- 102) N. H. Gale : *Anal. Chim. Acta*, **332**, 15 (1996).
- 103) T. Miura, K. Hayano, K. Nakayama : *Anal. Sci.*, **15**, 23 (1999).
- 104) C. Dirks, B. Scholten, S. Happle, A. Zulauf, A. Bombard, H. Jungclas : *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **286**, 671 (2010).
- 105) A. Zulauf, S. Happle, B. M. Mokili, A. Bombard, H. Jungclas : *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **286**, 539 (2010).
- 106) H. Hasegawa, I. M. M. Rahman, Y. Umehara, H. Sawai, T. Maki, Y. Furusho, S. Mizutani : *Microchem. J.*, **100**, 113 (2013).
- 107) H. Hasegawa, S. Barua, T. Wakabayashi, A. Mashio, T. Maki, Y. Furusho, I. M. M. Rahman : *Microchem. J.*, **139**, 174 (2018).
- 108) 柳沢直哉, 高久雄一, 中井 泉 : 分析化学 (*Bunseki Kagaku*), **668**, 569 (2017).



高久雄一 (Yuichi TAKAKU)

筑波大学アイソトープ環境動態研究センター (〒305-0006 茨城県つくば市天王台1-1). 茨城大学理学研究科地球科学専攻. 博士 (工学). 《現在の研究テーマ》主に環境試料を対象とした, 微量元素の分析法の開発. 《主な著書》“*ICP Mass Spectrometry Handbook*”, Edited by Simon M. Nelms, Chapter 9 ICP-MS Applications 9.5 Measurement of Environmental and Biological Radionuclides, (Blackwell Publishing). 《趣味》写真.

E-mail : takaku.yuichi.fp@u.tsukuba.ac.jp

### 『ぶんせき』再録集 vol. 1 出版のお知らせ

ぶんせき誌の過去記事の有効利用の一環として、『ぶんせき』再録集 vol. 1 が出版されました。2011年から2020年まで、10年間分の〈ミニファイル〉の記事が詰まっています。

下記10章からなり、それぞれ12から14の話題が集められています。

1. 実験器具に用いられる素材の特徴, 2. 分析がかかわる資格, 3. 顕微鏡と画像データ処理, 4. 最新のweb文献検索データベース, 5. ポータブル型分析装置, 6. 分析化学と材料物性, 7. 分析化学者のための多変量解析入門, 8. 土壌分析, 9. サンプルング, 10. 前処理に必要な器具や装置の正しい使用法。

本書はアマゾンオンデマンド出版サービスを利用して出版した書籍ですので、書店には並びません。アマゾンサイトからのネット注文のみとなりますので、ご注意ください。詳しくは「ぶんせき」誌ホームページをご確認ください。