

## 2-7 微量元素の分析

### 概要

学部で行っている分析化学実験では、様々な元素の性質を学ぶことも視野に入れているため、ある程度の濃度を持った元素を対象にし、重量分析や容量分析などが行われている。しかし、実際の試料の分析では微量にしか含まれていない元素を測定する必要がある。この場合は、機器分析法を用いることが多い。一口に機器分析法といっても様々な方法がある。微量分析に用いられている主な方法を以下に示す。

- ICP 質量分析法 (ICP-MS: Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry)
- ICP 発光分析法 (ICP-AES: Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry)
- 原子吸光分析法 (AAS: Atomic Absorption Spectrometry)
- 蛍光 X 線分析法 (XRF: X-ray Fluorescence Analysis)
- 中性子放射化分析法 (NAA: Activation Analysis)

これらのうち、最初の3つは、基本的には溶液または溶液に溶かした試料を用いる。最後の2つは通常固体試料を分解せずに直接測定できる。

ここでは、主として、ICP 質量分析法、ICP 発光分析法、原子吸光法などの微量分析法についてその概要を紹介する。

また、微量元素の分析を行うにあたっては、試料の前処理法が重要となってくる。どのような試料を対象とするか、また、どのような分析法を用いるかによって前処理の方法は異なる。例えば、液体試料、岩石試料、生物試料、工業材料、土壌試料などによってそれぞれに応じた処理法を行う必要がある。

ここでは、最初に微量元素について簡単に述べ、試料の前処理法や分解法を説明する。次に、試料の測定方法の概要を紹介する。

### 1. はじめに

現在知られている元素は 111 種類あるが、自然界に存在する元素は 92 番元素（ウラン）までであり、それ以降は人工的に作られた元素である。地殻に含まれる元素を濃度順に並べ全体として 100%になるように表示する(表 1)。これら表に示した値は、クラーク数と呼ばれ、アメリカ地質調査所の Clark 博士が数多くの地殻の岩石を分析してまとめたものである。地殻における元素の存在度と呼ぶこともある。これら元素の存在度ベスト 10 は、O、Si、H、Al、Na、Ca、Fe、Mg、K、Ti の順である。これらの合計は 99%以上であり、通常、主要元素といわれる。それ以外の元素濃度は非常に少なく、足しても 1%未満である。これら少量しか存在しない元素は微量元素 (trace elements) と呼ばれる。しかし、分析対象とする物質によって元素濃度も異なるので、一概にどの元素を微量元素と呼ぶかは決まっていないが、

通常は、0.1%またはそれ以下の濃度しか含まれていない元素を指す。

表1 クラーク数（地殻における元素の存在度）

順位	元素	存在度 (%)	順位	元素	存在度 (%)
1	O	49.5	16	N	0.03
2	Si	25.8	17	F	0.03
3	Al	7.56	18	Rb	0.03
4	Fe	4.7	19	Ba	0.023
5	Ca	3.39	20	Sr	0.02
6	Na	2.63	21	Cr	0.02
7	K	2.4	22	V	0.015
8	Mg	1.93	23	Ni	0.001
9	H	0.83	24	Zn	0.008
10	Ti	0.46	25	Cu	0.007
11	Cl	0.19	26	Li	0.006
12	Mn	0.09	27	Co	0.004
13	P	0.08	28	Sn	0.004
14	C	0.08	29	Pb	0.0015
15	S	0.06	30	Mo	0.0013

微量元素の濃度を表す場合に良く用いられる単位である、ppm、ppb、ppt について、表2にまとめる。

表2 濃度に関する単位

単位	英語表示	割合	固体中の濃度	液体中の濃度
ppm	part per million	$10^{-6}$	mg/kg	mg/L
ppb	part per billion	$10^{-9}$	$\mu$ g/kg	$\mu$ g/L
ppt	part per trillion	$10^{-12}$	ng/kg	ng/L

微量元素は少量しか含まれていないが、重要な役割を担っている場合が多い。例えば、工業材料に含まれる微量成分はその物性に大きく影響を与えることが多い。地球化学的には、微量元素のパターン（例えば希土類元素のパターン）を調べることで、岩石の成因や地球の歴史について様々な情報を得ることができる。また、食品中に微量しか含まれない元素（亜鉛、銅、セレン、ヨウ素など）でも人間や動物にとって必須なものもある。

以下に、微量元素を分析する場合の概要を述べる。単に分析法だけでなく、試料の前処理方法や分解法についても紹介する。

## 2. 試料の前処理方法と分解法

試料はそのままの形で分析できる場合は限られている。水試料（雨水、湖沼水、飲料水、工業用水、廃水など）においては、濾過操作が必要である。また、金属元素を溶液中で安定に保つには、酸を加える必要がある。植物などの生物試料は、通常の前処理として乾燥し、均一にする。ICP-MS、ICP-AES、原子吸光法などの機器分析法を用いる場合は試料を分解し

溶液に溶かす必要がある。その場合、主に酸分解が行われている。しかし、ヨウ素などについては酸性溶液を用いると揮発してしまうので、加熱分離法が用いられている。

以下に、試料調整や分析に当たっての注意点、及び、試料の分解法について述べる。

## 2.1 前処理方法

### 2.1.1 ろ過方法

河川水、雨水、海水、廃水、飲料水、温泉水などの水試料には、溶存成分以外にも、ゴミ、浮遊粒子、微生物などが含まれている。そのため、分析に先立ち濾過をする必要がある。この目的のためには、通常、 $0.22\mu\text{m}$  のメンブランフィルター（ミリポアフィルター）を用いることが多い。このフィルターは目が細かいので、試料溶液を自然落下させるだけでは時間がかかるため、吸引濾過を行う必要がある。吸引には小型の真空ポンプやアスピレーターを使用する。（写真 1 a, b）  $0.22\mu\text{m}$  のフィルターは目詰まりしやすく、濾過に時間がかかるので、その代わりに、目的に応じて  $0.45\mu\text{m}$  のフィルターやグラスファイバーフィルターを使うこともある。但し、僅かながら極微粒子が通り抜ける可能性もあり、精度の良い測定を行う場合は注意が必要である。



写真 1a と b 吸引濾過器

また、液量がそれほど多くないときは、50mL 程度のシリンジ（注射器）に試料溶液を入れ、その先にフィルターを組み込んだカートリッジを取り付け、押し出すことにより濾過することができる。

試料溶液中に沈殿や浮遊物の量が多い場合は、最初に、グラスウールフィルターなどを用い濾過した後、更に、 $0.22\mu\text{m}$  フィルターで濾過する方法をとるほうが濾過時間は速い。

ICP-MS、ICP-AES、原子吸光法で金属元素分析を行う場合は、濾過した試料溶液に硝酸を 1% 程度になるよう添加する。酸を加えないで長時間保存すると、容器の壁面に吸着したり懸濁物が出たりすることがある。特に鉛などは溶液中に酸を入れないと容器の壁面に吸着し易い。なお、ヨウ素の場合は酸性にすると酸化され化学形が  $\text{I}^-$  から  $\text{I}_2$  に変化し揮発しやすくなる。そのため、ヨウ素の分析については塩基性にする必要がある（詳しくは後述）。

## 2.1.2 乾燥方法

乾燥方法としては、風乾、加熱乾燥、凍結乾燥などの方法がある。次に、幾つかの物質についての例を示す。

土壌：バットにペーパータオル（キムタオルなど）を敷きその上に採取した土壌をのせ上をペーパータオルなどで覆い、埃が少ない場所に置く。3～7日位放置するとかなり乾燥する。なお、1日に1回くらい軽くかき混ぜると乾燥が速い。風乾だけだと水分が保持されているので、乾燥機に入れ、100℃で数時間乾燥させる。

生物試料（植物、動物、菌類など）：生物試料は風乾や加熱乾燥すると変質してしまうことがあるので、凍結乾燥を行う。まず試料を冷凍庫で氷らせ、凍結乾燥器に入れ、真空ポンプで排気し、揮発する水分は途中の冷却トラップ（-40℃以下）で捕集し、乾燥させる。

## 2.1.3 粉碎方法

岩石・鉱物試料：厚さ1cm位の大きさにダイヤモンドカッターを用い切った後、ステンレスの乳鉢中で砕く。ある程度小さくなったところでメノウのボールミル（写真2）に入れすりつぶし、粉末状にする。なお、材質としてメノウを用いるのは、堅くまた金属などの混入（汚染）が少ないからである。少量の試料を扱う場合は、ボールミルでは大きすぎるので、メノウの乳鉢（写真3）を用い、一つ一つ手作業ですりつぶす。



写真2 メノウのボールミル



写真3 メノウの乳鉢

土壌：乾燥させた土壌をフルイ（1mmまたは2mm）でふるい、大きな砂粒やゴミなどを除く。その後は、岩石試料と同様に、メノウのボールミルを用いてすりつぶし、粉にする。少量の試料を扱う場合は、メノウの乳鉢を用いる。

生物試料（植物、動物、菌類など）：乾燥させた生物試料を小型のミキサーに入れ粉碎する。カッターの刃からの汚染があるので、材質等に気をつける必要がある。刃の材質としては、ステンレス製や表面をチタンでコーティングしたものなどがある。

## 2.2 分解方法

### 2.2.1 酸分解

岩石、土壌試料等：ケイ酸塩はフッ化水素酸を用いないと溶けない。また、鉱物によって

は、硝酸や過塩素酸を用い溶かす必要がある。そこで、フッ化水素酸・硝酸・過塩素酸の混合溶液を用いる。フッ化水素酸を使用する場合、容器はガラス製では溶解するので、テフロン製のものを用いる。蓋付き（スクリュウ式）のテフロン容器（写真4）に試料と酸の混合物を入れる。酸の混合割合は試料の種類によっても異なるが、試料量 50mg を 20mL のテフロン容器を用いて分解する場合は、例えば、HF: 3mL、HNO<sub>3</sub>: 3mL、HClO<sub>4</sub>: 0.5mL の割合で酸を加える。これはあくまでも目安であり、試料によって変える必要がある。テフロン容器に蓋をして5時間から12時間程度ホットプレート上で加熱する。温度の目安としては、120℃～150℃程度である。このとき、蓋をしているので内部の圧力が高くなっており、注意を要する。但し、蓋は軽く閉めているので、中の空気は少しずつ漏れるので内圧が異常に高くなることはない。また、過塩素酸を有機物に添加すると爆発することがあるので注意を要する。



写真4 分解に用いるテフロン容器

分解しやすいサンプルの場合は、テフロンビーカーを用い、上をテフロン時計皿で覆い、ホットプレート上で加熱する方法も可能である。但し、加圧していないので分解に時間がかかり、加熱中に蒸発する酸の量も多い。

分解しにくい試料は、次に示すような完全に密閉した容器を用いる必要がある。1つ目の方法は、テフロン容器が内部に密閉できる構造になっているステンレス加圧容器である。テフロン容器に試料と酸を入れテフロン製の蓋をかぶせる。次に、周りを覆ったステンレスの容器の蓋を閉める（スクリュウ式）。このように完全に密閉した容器を乾燥器に入れ、150℃で3～6時間程度加熱する。加圧されているので、内部の温度も100℃以上になり、分解が進む。2つ目の方法は、マイクロウェーブオーブン（電子レンジ）を用いたものである。但し、家庭用の電子レンジではなく、排気装置が備わった専用機である。また、テフロンの密閉容器のまわりはステンレスではなく、非金属の耐熱性材質でできている。加熱時間は試料の種類によっても異なるが、数十分程度である。電子レンジを使う場合は、安全装置がついているものの、加熱時間に注意が必要である。

分解操作が終わった後は、ホットプレート上で加熱し、酸を飛ばし、ドライアップする。（そのとき大気中からホコリが入らないように細心の注意が必要である。）ドライアップ後、残渣を硝酸で溶かす。硝酸の量は0.5～1mL程度であり、その後の希釈の程度によって異なる。



る。最終的には2%硝酸溶液になるように調整するが、原液は5%位の硝酸溶液にしておいた方が元素の溶存状態はよい。これを適宜希釈し、ICP-MS、ICP-AES、原子吸光法などを用い、元素の濃度分析を行う。

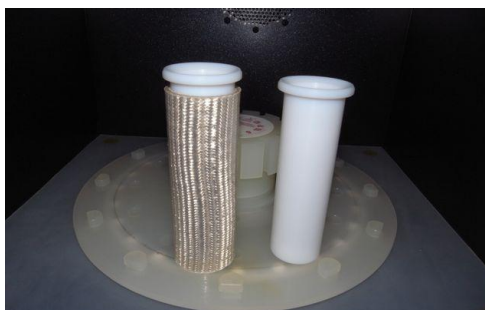


写真5 マイクロウェーブ用テフロンルツボ



写真6 マイクロウェーブオーブン

**注意点：** 以上述べた分解方法は強い酸を加熱するので、安全面で十分に気をつける必要がある。特に、加圧する場合は細心の注意が求められる。

### 2.2.2 加熱分離

通常固体試料中の金属元素を ICP-MS 法や原子吸光法を用いて測る場合、上で述べたように、その前処理として試料に硝酸を加え、マイクロウェーブオーブンなどで加熱し分解する方法がとられている。しかし、ヨウ素の分析では、酸で分解する方法は好ましくない。というのは、酸で加熱することによりヨウ素が揮発するからである。どの程度揮発するかは、試料の組成、酸の濃度、加熱条件などにより異なる。

そこで、ヨウ素や臭素が揮発し易い性質を逆に利用し、試料からヨウ素と臭素を分離する方法を検討した。つまり、試料を石英管中で加熱しヨウ素と臭素を揮発させ、それをトラップ溶液で捕集する方法をとった。その概要を図1示す。また、操作は以下の通りである。

試料(100~500mg)を燃焼ボートに秤量し、それに、五酸化バナジウムを混ぜる。五酸化バナジウムは酸化剤及び溶融剤の役目を果たしている。試料をのせた燃焼ボートを石英管に入れ、水蒸気を含んだ酸素気流を流す。試料は電气管状炉(1000℃)の端にセットし、徐々に石英管を中心部に向け動かしながら、加熱を続ける。(一気に加熱すると不完全燃焼しタールがトラップ溶液に混ざってしまう。)揮発してきたヨウ素は、有機アルカリである TMAH(tetramethyl ammonium hydroxide)溶液(0.6%)入りのトラップで捕集する。(還元剤である亜硫酸ナトリウムを少量加えておくと、I<sup>-</sup>として保たれ安定性が良い。)試料溶液を必要に応じて希釈する。

Combustion apparatus for iodine separation from solid samples.

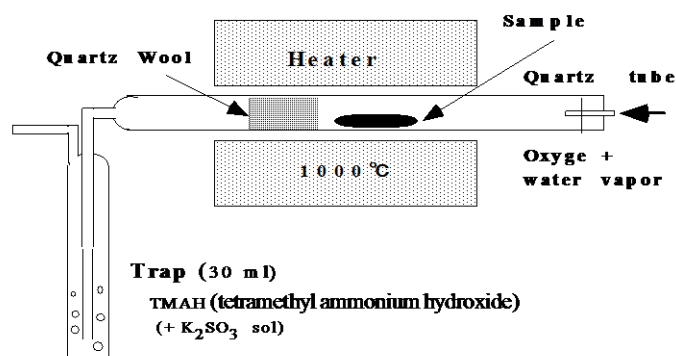


図1 加熱分離法に用いる装置の概略。

### 2.2.3 アルカリ溶融

上述したように、岩石試料などケイ酸塩を主成分とする物質を酸で分解する場合は、フッ化水素酸を用いないと溶かすことはできない。もう一つの方法として、炭酸ナトリウムや水酸化ナトリウムを用いて高温に加熱し溶かす。

粉末試料を白金るつぼに入れ、試料の約10倍量の炭酸ナトリウムを加え、充分に混合する。白金るつぼに蓋をして、マッフル内に置き徐々に加熱し、最終的には、炭酸ナトリウムの融点である850°Cより充分高くなるようにする。加熱時間は、溶けた状態で、30～60分間程度である。冷えてから純水と硝酸を徐々に加え溶かす。また、水酸化ナトリウムを用いる場合は、白金るつぼでは白金が変質してしまうので、ニッケルるつぼを使う。アルカリ溶融法では、フッ化水素酸を使っても溶けにくい化合物や鉱物、例えば、CaF<sub>2</sub>（ホタル石）、などを分解するのに有効である。

### 2.3 試料調整に当たっての注意点など（特に、汚染に関する注意）

微量元素分析のための試料調整で気をつけなくてはならない重要な点は、汚染（contamination）である。ごく低濃度の元素を測定するため、容器、試薬、ホコリ、使用する器具、人の手などから元素が混入すると、正しい分析結果を得られない。

容器の洗浄： 購入した新品の容器でも微量元素的に見ると、表面に色々な元素がついている。そこで、次のように洗浄することを勧める。クリーンエース（界面活性剤を含む無磷の洗浄用液体）を50倍程度に希釈したものに、ポリ瓶やビーカーなどの器具を数時間から1日程度浸しておく。この操作で、一般的な汚れは取れる。軽く水で濯ぎ、次に、1%硝酸溶液に数時間から1日程度浸す（酸バス）。この操作で、クリーンエースで落ちなかった汚れも、酸により溶かすことができる。この洗い方で通常は大丈夫であるが、更にきれいにしたい場合は、1%硝酸溶液ではなく、濃い濃度の硝酸を加え、ホットプレート上で暖める。（特殊な汚染物質がついている場合は、それにあつた酸、アルカリ、有機溶剤などを適宜用いて洗浄する。）最後に、純水で良く濯ぎ、ドライイングシェルフ（ホコリ除けのカバーがついた乾燥棚）に入れ、乾燥させる。乾いたら速やか

にビニール袋に入れ、ホコリなどによる汚染がないようにし、保管する。ドライイングシェルフの中に器具を何日も入れっぱなしにしておくと汚染の原因になる。

**試薬：** 試薬の中の不純物が原因となる汚染もある。特に、試料の分解用に多量の酸を用いるので、その中の不純物による汚染は常に注意する必要がある。硝酸などは、普通の特級では充分でなく、例えば、多摩化学の AA シリーズや関東化学の Ultrapur-100 シリーズを用いると良い。

**純水：** 微量元素の分析では、通常のイオン交換水では充分でなく、に比抵抗値  $18.2\text{M}\Omega \times \text{cm}$ 、TOC 値 1ppb 以下の超純水が必要である。村松研で用いているのは、ザルトリウス・アリウム イージーワン 611 シリーズである。(ミリポア製の超純水製造装置が先駆けであり、ミリ Q と呼ばれ超純水の代名詞となっている。)

### 3. スタンドアードの調整

#### 3.1 検量溶液の作成

機器分析で元素濃度を決める場合、目的元素濃度が分かっているスタンダードを用いる必要がある。乾燥させた試薬を秤量した後、水溶液に溶かし既知濃度に調整して作ることができる。すでに既知濃度に調整された市販のスタンダード(標準溶液)も販売されている。化学分析用の標準液(1000ppm)が関東化学や和光純薬で販売されており、元素の種類も多い。また、複数の元素を加えた混合スタンダードも販売されている(米国 Spex 社製)。但し、混合スタンダードを更に混ぜ合わす場合は、溶液中の元素の安定性が変化し、濃度が変わる可能性があるので注意が必要である。

これらの溶液を適宜希釈し、目的濃度の検量溶液を作る。その場合、金属元素では硝酸酸性としておくと濃度が変化しにくい。しかし、ヨウ素など酸性では不安定な元素は、TMAH などを加えアルカリ性にしておくと良い。なお、検量溶液の濃度や種類は、試料溶液中の濃度によっても異なるが、ブランク(0ppb)も含め 4~5 点あると良い。

#### 3.2 比較標準物質

元素分析の信頼性を検証し、分析結果の質を高めるために、比較標準物質を試料と同時に処理し、分析する必要がある。比較標準物質の選定には、測定しようとするサンプルと同様なものであり、目的とする元素についてのデータが載っていることが必要である。

比較標準物質(比較標準試料)は、NIST や IAEA などの海外の機関で作成されているばかりでなく、産総研や環境研など国内の機関でも作っている。リストはそれぞれの機関から入手することが可能であるが、環境試料や生物試料については、IAEA がまとめたものがある。

### 4. 測定法

#### 4.1 ICP-MS

ICP-質量分析法は最近ハード及びソフトの面で急速に発展してきた元素分析法である。特徴としては多くの元素に対し高感度であることと、多元素の同時測定が可能であることがあ



げられる。

試料溶液はペリスタルティックポンプでネブライザに送られ噴霧されエアロゾルとなる。それがスプレイチェンバー部で粒径別に分けられ、小形のエアロゾルのみがアルゴンガスと共に ICP トーチに送られる。プラズマの温度は 6000~7000K であるため、試料は蒸発、原子化、そしてイオン化が起こる。(ヨウ素や他のハロゲン元素のイオン化率は金属元素に比べて悪い傾向にある。) イオンはサンプリングコーンから真空チェンバーに吸い込まれる。真空系はロータリーポンプと油拡散ポンプにより保たれる。イオンレンズによりイオンの集束、偏向等のコントロールがなされる。四重極マスフィルターでは、印加電圧により決まる重さのイオンのみが通過できる。そして、この印加電圧を掃引することにより質量スペクトルを見ることができる。検出器は二次電子増管を用いており、パルスカウント方式で一個一個計数することにより、高い感度が可能である。

ICP-MS の信号強度は、機器の状態にもよるが、時間に伴い変動する。測定時間内での変動は、測定値の信頼性を減少させる要因となる。そこで、その変動を補正するために、内部標準 (Internal standard) として既知量の元素を試料溶液及びスタンダード溶液に添加しておく。よく使われるものとしては、In, Rh, Bi であり、目的元素と近い質量のものが使われる。

金属元素の ICP-MS 分析に関しては文献も少なくないが、ヨウ素や臭素の分析をやっている機関はごく限られている。そのため、ヨウ素や臭素の分析条件を書いたものはあまり見られない。そこで、以下に、ICP-MS を用いたヨウ素の分析について概要を述べる。

まず、ヨウ素の化学形をヨウ化物イオン (I<sup>-</sup>) にそろえるため還元剤として亜硫酸ナトリウム溶液を加える。(濃度としては 100ppm 程度。) 種々の元素について内部標準としての適性を検討したところ、Cs-133 が適当であることが分かった。中性溶液であるため、In-115 などは安定性で問題がある (酸性にするとヨウ素は揮散し易い)。ヨウ素のスタンダード溶液は、予め 100ppm ヨウ化カリウム溶液を用意し、それを希釈して作成する。通常 0.3、1、3、10、30ppb の濃度に調整する。しかし、試料溶液の濃度に合わせ必ずしもこの濃度でないこともある。(注意としては、濃すぎてしまうとメモリー効果により、次に測定する試料の濃度が高くなる。) また、0 (ゼロ) 点としてブランク (純水に内部標準と亜硫酸ナトリウムを加えた溶液) を用意する。塩素、臭素とも複数の同位体が存在するが、測定では、妨害が少ないものとして、Cl-35 と Br-79 を用いた。フッ素は妨害が大きく ICP-MS では測定が難しかった。塩素及び臭素の内部標準は、近い質量では適当なものが見つからなかったため、今回はヨウ素の場合と同じ Cs-133 を用いた。

塩素と臭素のスタンダードは通常以下の通りである (塩化カリウム及び臭化カリウムより調整)。また、ヨウ素の濃度も記す。

Cl : 0、1、3、10、30 ppm

Br : 0、10、30、100、300 ppb

I : 0、0.3、1、3、10、30 ppb

ICP-MS による測定時の感度は、ヨウ素 > 臭素 > 塩素の順であった。また、測定時の繰り返し誤差 (RSD) もヨウ素が一番良く、続いて臭素、塩素の順であった。特に塩素の場合はバックグラウンドが高いため安定性が悪い。

## 4.2 ICP-AES

ICP-AES は、ICP を熱源とした発光分光分析法の一つである。アルゴンガスを流したトーチ管に高周波をかけ、トーチ管内に生成される電磁場によりアルゴンガスを電離しプラズマを発生される。分析をしようとする試料溶液を 6000K 以上の高温アルゴンプラズマ中に導入し、成分元素を励起される。その励起された原子が低いエネルギー準位に戻るときに発光する。発光する光の波長は元素に特有であり光の強度は試料中の元素の量に比例する。発光線の波長から元素の種類を同定し、その強度から各元素の濃度を感度良く求めることができる。

また、化学干渉、イオン化干渉が少なく共存主要元素濃度（マトリックス）が高い試料の分析もが可能である。一般に測定可能な元素の定量下限値は元素にもよるが、数 100～数 10ppb 程度である。

この ICP-AES 法は感度的にはフレイム原子吸光法より良いが、フレイムレス原子吸光法と比べると同等か元素によっては劣る。しかし、多元素同時分析が可能である点は原子吸光法に比べて大きな利点である。また、ICP-MS 法と比べると、同じく多元素同時分析ができるものの感度的には劣る。しかし、ICP-MS 法では測定しにくい、Na、K、Ca、Mg、Al、P などの元素分析にはこの ICP-AES 法が適している。高マトリックス試料の分析には威力を発揮する。

ICP-AES 法による実際の分析では、ICP-MS 法と同様に調整した試料溶液を用いることができる。試料溶液と目的元素を含んだ検量溶液を測定し、濃度を求める。機器のウォーミングアップも ICP-MS 法に比べ速く、装置のメンテナンス等もやりやすい。

### 4.3 原子吸光

原子吸光法はアセチレンなどのフレイム中や黒鉛炉（高電流を流す）など高温状態下に試料溶液を噴射し、元素を原子化し、そこに光を透過して吸収スペクトルを測定することで元素の濃度を測定する方法である。原子化された状態に、目的元素の波長の光を入射すると、その元素の濃度に応じてそれが吸収されるので、元素の同定および定量が可能になる。この方法は、個々の元素に対し高い選択性をもっており、装置もそれほど複雑ではないので広く利用されている。しかし、一度に 1 元素の定量しかできなく、また、ICP-MS 法や ICP-AES 法と比べると、フレイム法においては分析感度的の点で劣る。

実際の分析法は、ICP-MS の試料調整法と同様の方法が使える。検量溶液も同様なものを使用できるが、感度的には大きく違うので、適切な濃度の溶液を作成する必要がある。

### 参考文献

- [1] Y. Muramatsu, S. Yoshida: Determination of I-129 and I-127 in environmental samples by NAA and ICP-MS. J. Radioanal. Nuclear Chemistry, 197 (1995) p.149-159.
- [2] S. Yoshida, Y. Muramatsu, et al.: Determination of major and Trace elements in Japanese rock reference samples by ICP-MS. Int. J. Environ. Anal. Chem., 63 (1996) p.195-206.
- [3] 村松康行、吉田聡: ICP-MS による環境試料の多元素分析 放射線科学、40 (1997) p.164-170
- [4] 平井昭司: 現場で役立つ 化学分析の基礎、(オーム社、2006 年)
- [5] 上本道久 (監修): ICP 発光分析・ICP 質量分析の基礎と実際 - 装置を使いこなすために、(オーム社、2008 年)