

放射能利用による公害物質の元素分析

大阪府立放射線中央研究所管理室長 真 室 哲 雄

1. はじめに

“放射能”という言葉が、われわれのように放射能を日常扱っている者にとってさえときとして不快な響きをもって聞えることがあるのは、この言葉が“死の灰”，“核爆発”，“原子炉事故”などいまわしい事件に関連してしばしば登場してきたからであろうか。原爆エレジーにかかっているといわれる日本人がこの言葉に神経をとがらせるのも無理はないであろう。確かに、放射能を野放しにすれば大混乱が起る。そのうえ、致死量の放射線を沿びていても五感に感じないというような不気味な事情もある。しかし、原子力発電についてはいうに及ばず、各種の放射性同位元素の放射能が純粹の学術研究にのみならず、工業生産を中心として多方面にわたって利用され、GNP 増進の一役を買っており、しかも利用の伸びがきわめて急速であることを考えれば、放射能という言葉の響きは一般社会人にとってももっと明るくあるべきものであろう。現にラジウム温泉の名につられて勇んでバカンスを楽しみに出かける人もいるし、X線は病気をなおしてくれるものと思込んでいる人もいるから妙である。

われわれが喜んでよいことは、放射能取扱いに対する規制法がその利用が盛大となるはるか以前にきわめて手まわしよく出来てしまっていたということであろう。このため、放射線関係の技術者は常に安全を念頭に置いて仕事を進めてこなければならなかった。当初、かれらのなかに、ときとして他種産業の低い安全基準や規制のルーズさと比較して不公平をかこつ声が聞えないわけではなかったけれども、今となつては法律の早期制定、公布や、神経質過ぎると思われる世論に感謝せざるをえないといえよう。

このようなことは技術史上でまったく珍しいことなのである。現代人のもっとも大きな関心事である種々の公害問題に見られる一朝一夕で克服できない困難さは、ほとんど例外なく企業活動などに対する規制が後手にまわった点にその原因を求めるべきであろう。

さて、油断すれば公害の元兇となりかねない放射能を、現在はなばなくまき散らされている環境汚染の解決に利用しようという試みがいくつもある。上水あるいは下水処理における汚染物質無害化、有毒排気ガスの減少、スラッジの沈降、汙過の促進、殺菌などの積極的利用とともに、多彩な分析測定への利用がある。 ^{241}Am などを線源として用いるX線吸収利用のイオウ計は燃料重油のイオウ濃度の迅速測定に広汎に使用されている。小型の放射性同位元素線源を用いた濁水濃度計もある。汚染物質の元素分析に特に有望なのは放射化分析と蛍光X線分析であろう。他にトレーサーとしての利用もある。

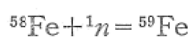
本稿では、放射能が利用される元素分析法として放射化分析と蛍光X線分析をとりあげ、前者については、原子炉による試料の放射化、Ge(Li)半導体検出器とマルチチャンネル波高分析器によるガンマ線スペクトルの測定、電子計算機によるスペクトルの解析を組み合わせる“機器分析的放射化分析”にスポットライトをあて、後者については、適当な放射性同位元素の密封線源による試料の励起、Si(Li)半導体検出器とマルチチャンネル波高分析器による蛍光X線スペクトルの測定、電子計算機によるスペクトルの解析を組み合わせる“エネルギー分散型蛍光X線分析”に若干言及したい。いずれの方法も、分離分析化学的手法を大幅に簡略化するか、あるいはまったく省略して多数の元素を機器測定的に分析することができるという点に共

通の特徴を有している。

2. 機器分析的放射化分析

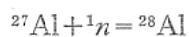
“放射化分析”という言葉に余り馴染みのない方のために簡単な説明をしておきたい。放射化分析とは、ごく簡単にいえば、分析試料に放射線を照射することによって放射能を帯びさせ、生じた放射能を調べて試料中の諸元素の分析を行なう分析法のことである。照射用の放射線としてもっともよく用いられるのは原子炉の熱中性子であるが、その他に加速器で発生させた高速中性子、陽子線、高エネルギーのX線などもある。

例えば、鉄の放射化分析の場合について考えてみよう。自然の鉄元素は ^{54}Fe 、 ^{56}Fe 、 ^{57}Fe 、 ^{58}Fe という4種の同位体がそれぞれ5.82、91.66、2.19、0.33%の存在比で混合したものである。このうち熱中性子による放射化分析に通常利用されるのは ^{58}Fe であり、 ^{58}Fe は中性子(1_0n)を捕獲して ^{59}Fe になる。



ところが、生成した鉄の同位元素である ^{59}Fe は放射性であって、半減期46日でベータ線を放出して壊変し、その際エネルギーが192.5、1100、1292 keVなどの特徴的なガンマ線を放出する。このガンマ線の強度を測定すれば、試料中の鉄の量が推算できるわけである。普通には、分析試料と同一条件で既知質量の鉄を照射し、これに生じる ^{59}Fe の放射能と比較することにより、試料中の鉄の量が決定される。 ^{59}Fe のように半減期が比較的長い放射性元素が目当となる場合には、ある程度の冷却期間を置いて試料が帯びた半減期の短い放射能を減衰させた後にガンマ線の測定を行なう方が測定上の妨害を減らし、測定者の放射線被曝を減らす意味において合理的である。

しかし、例えばアルミニウムの分析を行なう場合には、中性子照射により



なる中性子捕獲反応で生じる ^{28}Al は半減期が僅か2.27分に過ぎないので、中性子照射後手早

くガンマ線の測定を行なわなければならない。そうしなければ放射能はみる間に減衰して微弱になってしまう。

さて、放射化した試料には大抵 ^{28}Al や ^{59}Fe のような放射性核種が多数生じている。これらを化学的手法により純粋に分離し、それぞれの放射能をガンマ線あるいはベータ線を頼りに測ればよいわけであるが、これでは大変な労力が必要となる。ここ数年来、Ge(Li)半導体検出器とマルチチャンネル波高分析器を組合わせたガンマ線スペクトロメータを利用して測定したスペクトルを解析することにより、化学的分離法を簡略化するか、あるいはまったく省略して、放射性核種の分析を行なうことがほぼ常識となってきている。

近時、Ge(Li)半導体検出器およびその電気系の性能が急速に進歩し、 ^{60}Co のガンマ線に対する検出効率がNaI(Tl)検出器の10%にも達し、しかも分解能が ^{60}Co 1.33 MeVのガンマ線に対し、2.3~2.7 keV(FWHM)であるものが市販されるようになった。Ge(Li)検出器はこのように分解能が良好であるので、きわめて接近したエネルギーを持つ2つのガンマ線を分離識別することができ、数多くの放射性核種が混在する場合のガンマ線スペクトロメトリーにきわめて有用である。ここ数年前までは、放射化試料のガンマ線スペクトルの測定にはNaI(Tl)検出器がよく利用されていたが、この検出器の分解能はGe(Li)検出器に比べて1桁以上低いので、大抵化学分離操作の必要があった。Ge(Li)検出器は、液体窒素の補充という面倒なメンテナンスを必要とするのであるが、その良好な分解能のために、ついにガンマ線スペクトロメトリーにおける従来のNaI(Tl)検出器の座を完全に奪ってしまった感がある。

大容積高分解能のGe(Li)検出器とマルチチャンネル波高分析器を組合わせたガンマ線スペクトロメータの利用により、放射化分析が機器測定的となり、そのため利用範囲が急速に拡大している。事実、岩石、水、生物組織、大気浮遊塵、金属材料など種々様々の試料の元素分析

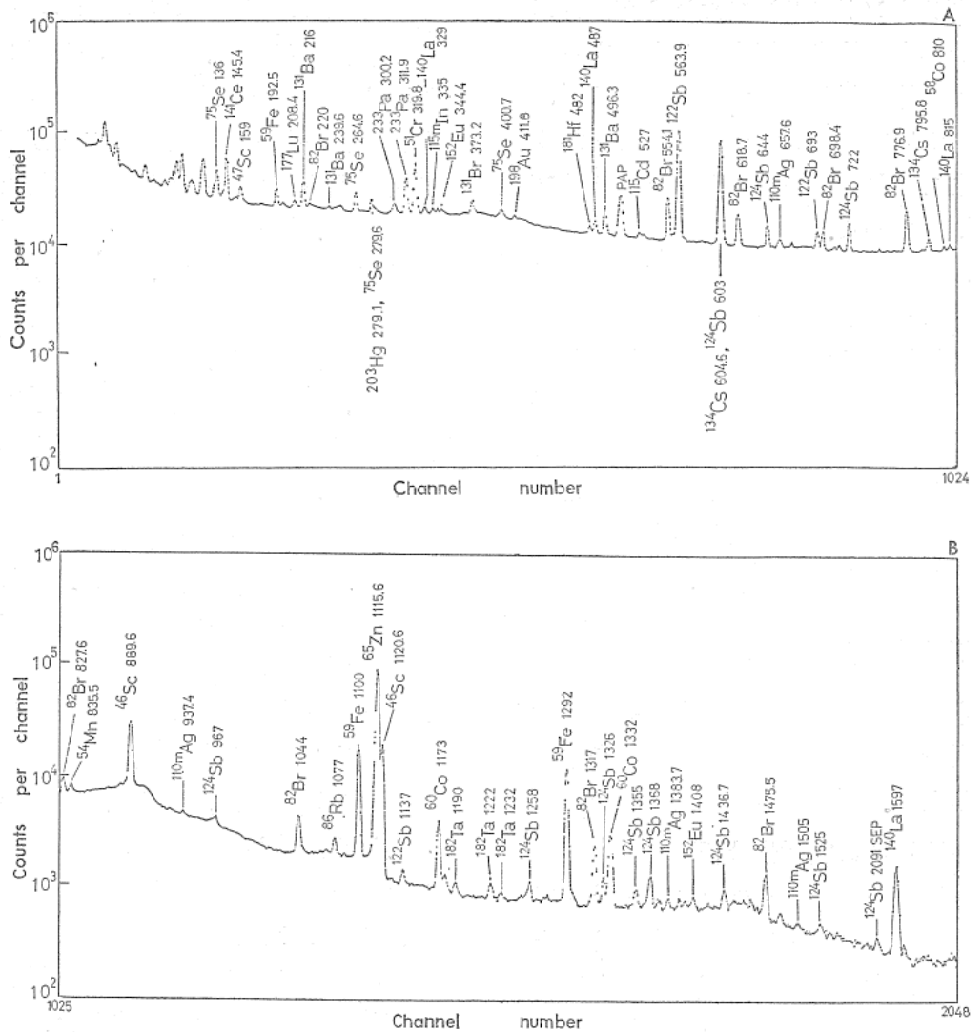


図1 大気浮遊塵の1時間照射, 15日冷却後のガンマ線スペクトル

に利用され, 微量の試料からも20ないし40種という多数の元素の定量が可能であることが示されている¹⁾。

図-1は放射化された大気浮遊塵のガンマ線スペクトルの例である。このようなスペクトル図に現われるピークの位置がガンマ線のエネルギーに対応する。特定の放射性核種からは特定のエネルギーのガンマ線が放出されるので, スペクトルに現われたピークのエネルギー値を横軸から読みとれば核種の判定がつく。一方, ピークの面積はそのガンマ線の強度, すなわち対応する放射性核種の放射能に比例する。換言すれば, 対応する元素の量に比例する。

ところで, ガンマ線スペクトルを手計算によって満足に解析しようとするれば著しい労力が要求される。分析すべき元素の数が少ない場合は

ともかく, スペクトルに含まれる情報を最大限に利用してできるだけ多数の元素の分析を行いたい場合には手計算には頼れない。さらにまた, 手計算は複合ピークに対してほとんど無力であり, 誤差を評価することもはなはだ困難である。さらにまた, 数多くの元素を対象とする場合には, 中性子照射時間と冷却時間の適当な組合わせをいくつか選ばなければならず, 他に標準比較試料のガンマ線スペクトルも測定しなければならないので, 解析すべきスペクトルの数は多くなる。

ガンマ線スペクトルの電子計算機による自動解析については多くの報告がある²⁻⁶⁾。自動解析における中心課題は, ピークの検出とピークの面積計算である。われわれは別報のようなプログラムを用い⁴⁾, ピーク曲線を Gauss 分布

に、バックグラウンドを2次または3次曲線に適合させ、最小自乗法を適用することによってピーク面積の計算を行なっている。目下の所、複合ピークについては、tailの重なり合った4個のピークまでそれぞれの面積が計算できるプログラムを用いている。

ルーチンに類似の試料の分析を行なう場合には、ガンマ線スペクトロメータと電子計算機をオンラインで使用するのが望ましい。しかし、未知の放射性核種が放射化試料中に混在する場合には、波高分析器にたくわえられたデータを電子計算機にかける前に、XYプロッタなどによって描いたスペクトル図により定性分析を完了しておくのがよいと考えられる。

3. 機器分析的放射化分析の応用例

以下に、本分析法の応用例を、大阪府立放射線中央研究所での最近2、3年間の経験を中心として紹介しよう。

(1) 大気浮遊塵の放射化分析⁷⁾

大気汚染物質のうち、亜硫酸ガス、一酸化炭素、窒素酸化物などのガス状物質は大きく取上げられているが、大気浮遊塵はどちらかというと比較的軽視されているようである。しかし、大気汚染に関する諸研究が進むにつれて、浮遊塵中の金属元素のあるものは、きわめて微量であっても連続吸入すれば人体に重大な障害を及ぼすことがありうると考えられ始めている。有名なロンドンにおけるスモッグ事件も、単にガス状物質によるものではなくて、むしろ微細な煤塵の影響が大きかったのではないかと反省されている。わが国でもブルースカイ計画と称してもっぱら亜硫酸ガス濃度の低減につとめているが、文字通りのブルースカイを実現しようと思ったら、浮遊塵発生源をおさえなければならぬ。浮遊塵が数十 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ までに減少して、東京から富士山が見えることが珍しくなくなれば、人々は文句なく環境改善の実を讃えるであろう。それには、高い煙突を立てて煙を遠くに拡散させるということも姑息な手段に過ぎず、各排出源において徹底的に集塵するか、あるいは根本的には煤塵が発生しないような生産工程

や処理法を講じることが肝要であろう。

わが国では通常、Be, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Pbなどのうちの数種のものの中濃度が定期的に測定されることが多い。この際よく利用されているのは発光分析と原子吸光分析である。機器分析的放射化分析によれば、数多くの元素が定量でき、そのなかには従来の分析法では分析が困難であった多くの元素が含まれている。しかし、放射化分析にも苦手の元素があり、Pb, Beなどはその例である。なお、放射化分析は原子炉による照射という手続きを必要とし、放射化分析に利用できる原子炉が少ない現在では、即答性が要求される日常観測用の分析法としては適当でない。むしろ、大気汚染現象に関する基礎研究、長期間にわたる大気汚染観測調査、他の分析法による結果のチェックなどに威力を発揮するものであろう。

都市居住者の健康問題に関連して大気汚染を調査する場合には、ある程度の長い期間にわたって昼夜連続して集塵し、その間の平均濃度を測定するのが目的にかなっていると考えられる。そこで1カ月間10~20 l/minの低速度で連続サンプリングして得た塵試料を分析して月間平均濃度を求めることとした。直径4.7 cm、孔径1.2 μ のメンブレン・フィルタ (Millipore RA) 上に集められた約100 m³の空気に含まれていた浮遊塵を標準比較試料とともに京都大学原子炉の5 MW 運転時において圧気送管 No. 1 を用いて照射した (熱中性子束 2×10^{13} n/cm²·sec, 高速中性子束 3×10^{12} n/cm²·sec)。照射時間は5分間および1時間の2種類とし、5分間照射試料については、照射終了後2分および15分の2回測定し、これら2回の測定の間同時に照射した標準比較試料の測定を行なった。この際、波高分析器のデータは磁気テープに速かに移す。1時間照射試料については、2~3日、6~7日および15日程度の3種の冷却時間において測定する。図-1は1時間照射、15日冷却後のガンマ線スペクトルの例である。5分間照射試料のスペクトルから、Al, V, Ti, Ca, Cl, In, Mnが分析され、1時間照射試料のスペクトルから K, Zn, Na, W, As, Br, La,

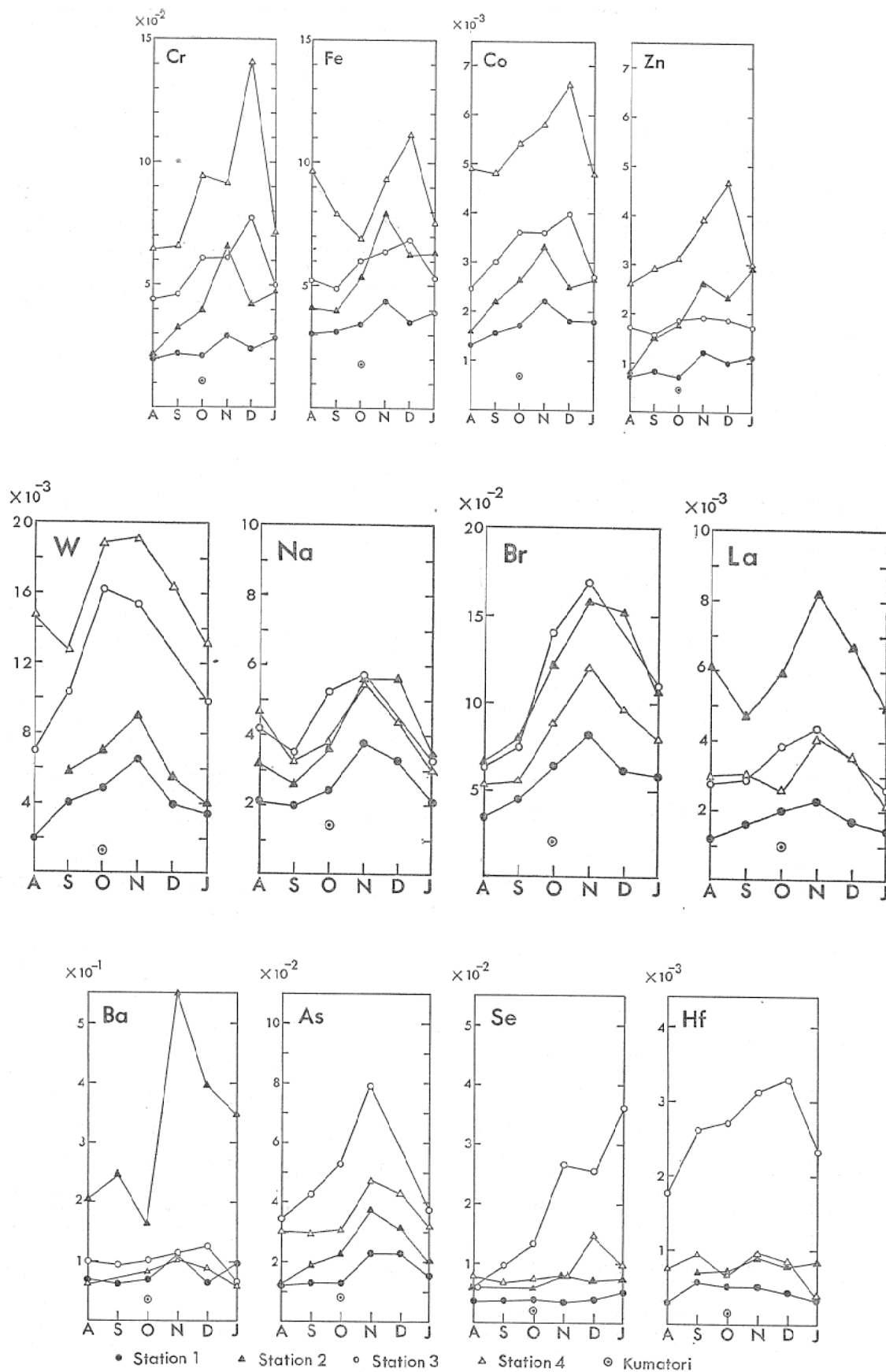


図-2 1970年8月より1971年1月までの期間における大気中元素濃度の変化，
縦軸の単位は $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

Sm, Cd, Au, Yb, Lu, Ba, Rb, Th, Cr, Ce, Hf, Fe, Hg, Sb, Ni, Sc, Ta, Se, Ag, Cs, Co, Eu が分析される (以上の元素の記載順序は、定量に用いた放射性核種の半減期の順である)。

図-2は1970年8月ないし1971年1月の半年間における濃度変化観測結果の一部を示す。ただし、Station 1は堺市東部郊外本研究所、Station 2は堺市市街地、Station 3は大阪市東成区、Station 4は大阪市西淀川区にあり、図中10月のところの2重丸は人工汚染がまだまだ少ないとみられる熊取町京都大学原子実験所構内での測定値である。(横軸につけてある記号について、例えば、AはAugustを意味する。)

Station 2, 3, 4の測定値は、Zollerら⁸⁾およびDamsら⁹⁾によって報告された米国の高汚染地域における濃度測定値に比べると同程度あるいはそれ以上のものが多い。一般に8~9月に比べて11~12月に濃度が高い。Fe, Co, Cr, Znの図を見ると、濃度のピークが大阪市の2点では12月に現われているのに反して、堺市の2点では11月に現われているのに気がつく。As, Se, HfについてStation 3の濃度が、Ba, LaについてはStation 2の濃度が異常に高く、特殊な排出源の所在を示している。Br, Na, La, W, Asは大体11月に濃度のピークがみられる。BrはStation 2および3の市街地の方が高い。現在のところ、いまだデータの蓄積が不足し、検討も不十分であるので明確な結論を出すことができないが、以上のような季節変化や地域差に着目して気象条件を考慮に入れて詳しく検討すれば、大気汚染の特質を理解する何らかの手がかりが得られそうである。なお、測定点を増加し(例えば、大阪府下で30箇所程度)、同時期にサンプリングした試料についての分析結果を比較検討すれば、大気汚染物質排出源の追求がかなり適確なものとなるであろう。

(2) 汚染河川水の放射化分析¹⁰⁾

ある鉾山の廃水が流入する川の水の分析例について紹介する。試料水を蒸発乾固し、1 lあたり384 mgの蒸発残渣を得た。このなかから約10 mgを正確に秤量してとり、標準比較試料とともに中性子照射した。分析手順は上記大

気浮遊塵の場合とほぼ同様に行なった。Na, Mg, Al, Cl, K, Ca, Sc, V, Cr, Mn, Fe, Co, Cu, Zn, As, Br, Rb, Ag, Cd, In, Sn, Cs, La, Ce, Sm, Eu, Lu, Ta, W, Au, Thの31種の元素の濃度が決定された。

ガンマ線スペクトル中に $^{238}\text{U}(n, \gamma)^{239}\text{U} \xrightarrow{\beta} ^{239}\text{Np}$ の反応で生じた ^{239}Np のピークが明白に認められ、Uの存在も確認されたが、標準比較試料中にUを入れてなかったために定量することができなかった。なお、Mo, Srの存在も認められたが、ピークが顕著でなく定量するには至らなかった。

この分析に先立って行なった準備的な通常の蛍光X線分析により、Mn, Fe, Cu, Zn, As, Rb, Sr, Mo, Cd, SnおよびWの11元素が明白に検出された。

W, Snなどを採取する鉾山の廃水流入の影響を受けてW, Sn, Zn, Cu, Asなどの濃度が高かった。検出されたCd, As, Sn, Crなどは環境汚染元素として重要であるが、本分析法が鉾山廃水による河川水の汚染分析にきわめて有効であることが確かめられた。

本分析では、試料水を簡単に蒸発乾固して放射化用試料を作ったが、揮発性の形態をとっていた元素は大なり小なり逸散したおそれがある。Hg, As, Seなどはそのおそれの大きいものである。このような元素に対しては、有機試薬の利用など、特殊な化学的手法を利用して捕捉することが必要であろう。

(3) 淀川水系の水の放射化分析¹¹⁾

淀川は大阪地方における主要な上水道源であるが、近時迅速に進みつつある汚染が憂慮されている。しかし、金属元素による汚染状況についてはまだ測定資料が十分とはいえないようである。1970年9月に淀川水系の数箇所採取した試料について準備研究的な分析を行なった結果、Na, Al, Cl, K, Ca, Sc, V, Cr, Mn, Fe, Co, Zn, Se, Br, Rb, Ag, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Sm, Eu, Yb, Lu, Hg, Ta, W, Au, Thの30種の元素の濃度を測定することができた。

表-1に測定結果の一部を掲げる。表中の括弧内の数値は、宇治川で採取された試料No. 2

表-1 各種元素の濃度 ($\mu\text{g/l}$), 除染係数, 計算濃度, 蒸発残渣など

元素	試料 No.1 木津川 C_1	試料 No.2 宇治川 C_2	試料 No.3 桂川 C_3	試料 No.4 淀川枚方大橋 C_4	試料 No.5 庭窪取水口 C_5	試料 No.6 庭窪浄水 C_6	除染係数 $D = \frac{C_6}{C_5}$ (%)	$C = \frac{pC_1 + qC_2 + rC_3}{p+q+r}$
Na	7400(0.97)	7600	50000(6.6)	15000(2.0)	15000(2.0)	17000(2.2)	120	13000
Al	8400(7.6)	1100	890(0.81)	2500(2.3)	3100(2.8)	210(0.19)	6.8	2500
Cl	7500(0.90)	8300	47000(5.7)	12000(1.4)	12000(1.4)	32000(3.9)	280	14000
Cr	1.8(1.2)	1.5	110(73)	91(61)	43(29)	9.0(6.0)	21	17
Mn	110(2.3)	48	250(5.2)	92(1.9)	120(2.6)	25(0.53)	20	89
Fe	1900(4.6)	410	860(2.1)	950(2.3)	1400(3.4)	41(0.10)	2.9	780
Co	0.99(4.3)	0.23	1.5(6.5)	0.60(2.6)	0.69(3.0)	0.16(0.70)	23	0.56
Zn	ND	60	170(2.8)	73(1.2)	53(0.88)	32(0.53)	60	64
Br	21(0.81)	26	200(7.7)	76(2.9)	53(2.0)	36(1.4)	68	49
Ag	ND	0.15	1.2(8.0)	0.74(4.9)	0.21(1.4)	0.22(1.5)	110	0.27
Sb	0.17(0.3)	0.54	2.4(4.4)	1.3(2.4)	1.2(2.2)	0.84(1.6)	70	0.73
Th	1.0(3.4)	0.29	0.21(0.72)	0.49(1.7)	0.65(2.2)	ND		0.43
蒸発残渣 (mg/l)	113.6 (1.69)	67.3 (1.00)	221.1 (3.29)	108.7 (1.62)	106.0 (1.58)	105.2 (1.56)	100	98.4

について得られた値を基準とした相対値であり, 比較の便のために記した. 上水道のための取水所が多く存在する淀川中流および下流において検出される元素のうち, Na, Cl, Ca, Cr, Mn, Co, Zn, Br, Ag, Sbなどは人工汚染の影響を強く受けており, 一方, Al, K, Sc, Fe, Rb, Cs, Ba, La, Ce, Sm, Eu, Yb, Lu, Hf, Thなどは天然の存在に強く依存していると思われる.

淀川は木津川, 宇治川, 桂川がほぼ同一地点で合流している. この合流地点より下流において淀川に流入する小河川がいくつかあるが, それらの流量は上記3川のものに比べて無視できるほどに小さい. 3川合流後の各元素濃度 C は, 木津川, 宇治川, 桂川からの寄与の比を $p:q:r$ として次式で表わされよう.

$$C = \frac{pC_1 + qC_2 + rC_3}{p+q+r}$$

ただし, C_1, C_2, C_3 は試料 No. 1, No. 2, No. 3 についての濃度値である. 試料 No. 1, No. 2, No. 3 はいずれも流心で採取され, また試料 No. 4 も下流の淀川枚方大橋付近の流心で採取された. したがって, No. 4 の濃度測定値 C_4 はほぼ C に等しくなると期待される. 明確な測定値が得られた20種の元素について

$$C_4 = \frac{pC_1 + qC_2 + rC_3}{p+q+r}$$

とにおいて, 電子計算機を利用して最小自乗法により p, q, r の比を求めると, $p:q:r=1.4:4.7:1.0$ となった. これは近畿地方建設局河川管理課の調査による試料採取当日の3川の流量比 $1.4:5.5:1.0$ と比較的良好に一致する. 前者の p, q, r の比を用いて計算した C の値を表-1の最右欄に示す. 大抵の元素について C と C_4 の一致はほぼ良好であるが, Cr, Br, Ag, Sb の4元素については明らかな不一致が認められる. この4元素については3川合流地点と採取点 No. 4 との間にかんがりの流入源があるか, あるいは流れが定常的でなかったなど, 何らかの異常性があることがわかる.

試料 No. 5 と No. 6 について得られた濃度値 C_5 と C_6 を比較すれば, 浄化工程による除染度

$$D = \frac{C_6}{C_5}$$

が元素によってかなり大幅に異なることがわかる. Al, Sc, Fe, Cs, La, Ce, Sm, Eu, Yb, Lu, Ta, W, Th などについては D の値が小さく, 浄化がよく行なわれている. これらの元素は主として粒状物質の形で水中に浮遊していたもの

であろう。これに反して、主としてイオン状で存在していたと考えられる Na, K, Ca, Zn, Br, Ag, Sb, Ba などについては、浄化の効果はあまりない。

ある河川の水系について、適当に選ばれた試料採取点において測定された数多くの元素の濃度値に基づき、流れの物質収支を検討することは、人工汚染の現況を把握し、汚染流入源を追求するのに役立つものと考えられる。したがって必ずしも有害であると考えられない元素も含めて、数多くの元素の濃度について情報を得ることが有用であると思われる。

4. エネルギー分散型蛍光X線分析

従来の波長分散型蛍光X線分析では全スペクトルを順次スキャンしなければならないが、Si(Li) 半導体検出器とマルチチャンネル波高分析器を組合わせたX線スペクトロメータを利用するエネルギー分散型蛍光X線分析では、短時間内に全スペクトルを測定することができる。しかも、後者は前者に比べて少なくとも100倍以上の検出効率を持つようにできるので、試料励起用の線源として数 mCi の放射性同位元素が使用できる。すでに RCC などからも適当な密封線源が発売されている。分析対象とする元素に応じて適切な励起放射線を出す放射性同位元素を選ぶことができる。Si(Li) 半導体検出器も近時急速に分解能が向上し、例えば 4 mm 径のものでは ^{56}Fe の 5.6 keV X線に対して 160 eV(FWHM) 程度の分解能を持つものが市販されるようになった。多数元素の同時分析を目的とする場合には 5.9 keV において少なくとも 170 eV 以下の分解能を示すものが望ましい¹²⁾。

放射性同位元素を励起用線源として用いるエネルギー分散型蛍光X線分析は、蛍光X線スペクトルのバックグラウンドが低く、アウトプットがデジタル化されていて電子計算機にかけやすく、励起線源の強度変動の心配がなく、測定時間が短いなどの種々の長所を有している。図-3は Annular 型の線源を用いた場合の試料、検出器、線源の配置例を示す。線源、試

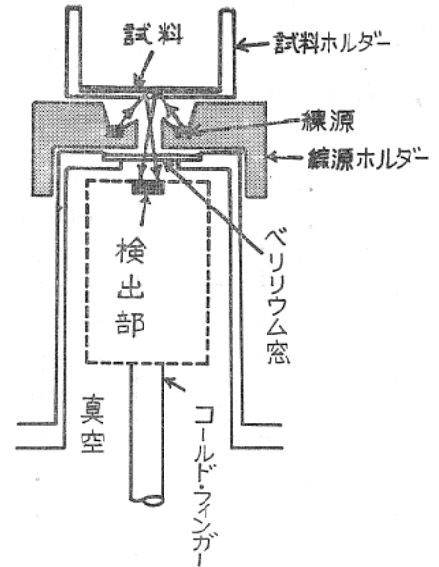


図-3 Annular 型線源を用いた場合の配置例

料、検出器の間の空間を真空にすると低原子番号の元素の分析に有効である。

このような分析法を環境物質の元素分析に適用するにあたっては、対象物によって、試料の調製法、matrix 効果を考慮したスペクトル解析法を検討しなければならない。なお、一般的にいうと、放射化分析ほどの感度は得られず、分析可能な元素は試料の主要成分元素に限られる。しかし、機器分析的放射化分析が苦手とする Pb, Si, S などについてはもちろんのこと、Cu, Mg, Ti, Sr, Mo, Sn などについても場合によってはより適確な分析が期待される。機器分析的放射化分析とエネルギー分散型蛍光X線分析の組合わせによって、環境衛生上問題となる金属元素は Be などを除いてほとんどすべて機器分析的に分析可能となると考えられる。

5. おわりに

本稿では主として環境物質の機器分析的多元素分析の立場から熱中性子放射化分析とエネルギー分散型蛍光X線分析を考えてみた。しかし、場合によっては、簡単な化学的手法による group separation でも分析可能元素数の増加にきわめて効果的なことがある。また、どうしても化学的手法に頼らざるをえない場合もある。例えば、放射化生体組織の強過ぎる ^{24}Na を HAP などを用いて分離する場合がある^{13,14)}。

さらにまた、水試料中の Hg, Se, As などのような揮発性の元素については、有機試薬などによって分離捕捉して照射用試料を作製するのが合理的であると考えられる。このように機器分析的分析法の限界点を理解してその活用をはかる必要がある。

参 考 資 料

- 1) J. R. DeVoe and P. D. LaFleur: Modern Trends in Activation Analysis, National Bureau of Standards Special Publication 312, Vol. 1 (1969)
- 2) *ibid.*, Vol. 2 (1969)
- 3) T. Takeuchi and T. Hayashi: Ann. Rep. Research Reactor Institute, Kyoto University, **3**, 9 (1970)
- 4) A. Mizohata and T. Mamuro: Ann. Rep. Radiation Center of Osaka Pref., **11**, 25 (1970)
- 5) M. A. Mariscotti: Nucl. Instr. Methods, **50**, 309 (1967)
- 6) J. T. Routti *et al.*: *ibid.*, **50**, 109 (1969)
- 7) 真室哲雄, 松田八東, 溝畑朗, 武内孝之, 藤田晃: Radioisotopes, **20**, 27 (1971)
- 8) W. H. Zoller and G. E. Gordon: Anal. Chem., **42**, 257 (1970)
- 9) R. Dams *et al.*: *ibid.*, **42**, 861 (1970)
- 10) 真室哲雄, 松田八東, 溝畑朗, 武内孝之, 藤田晃: Radioisotopes, **20**, 21 (1971)
- 11) 真室哲雄, 松田八東, 溝畑朗, 松並忠男: 水処理技術, **12**, No. 9, 33 (1971)
- 12) R. S. Frankel and D. W. Aitken: Applied Spectroscopy, **24**, 557 (1970)
- 13) S. F. Peterson *et al.*: Modern Trends in Activation Analysis, Vol. 1, 624 (1969)
- 14) T. Ishiyama, Y. Matsuda and T. Mamuro: Ann. Rep. Radiation Center of Osaka Pref., **10**, 24 (1969)