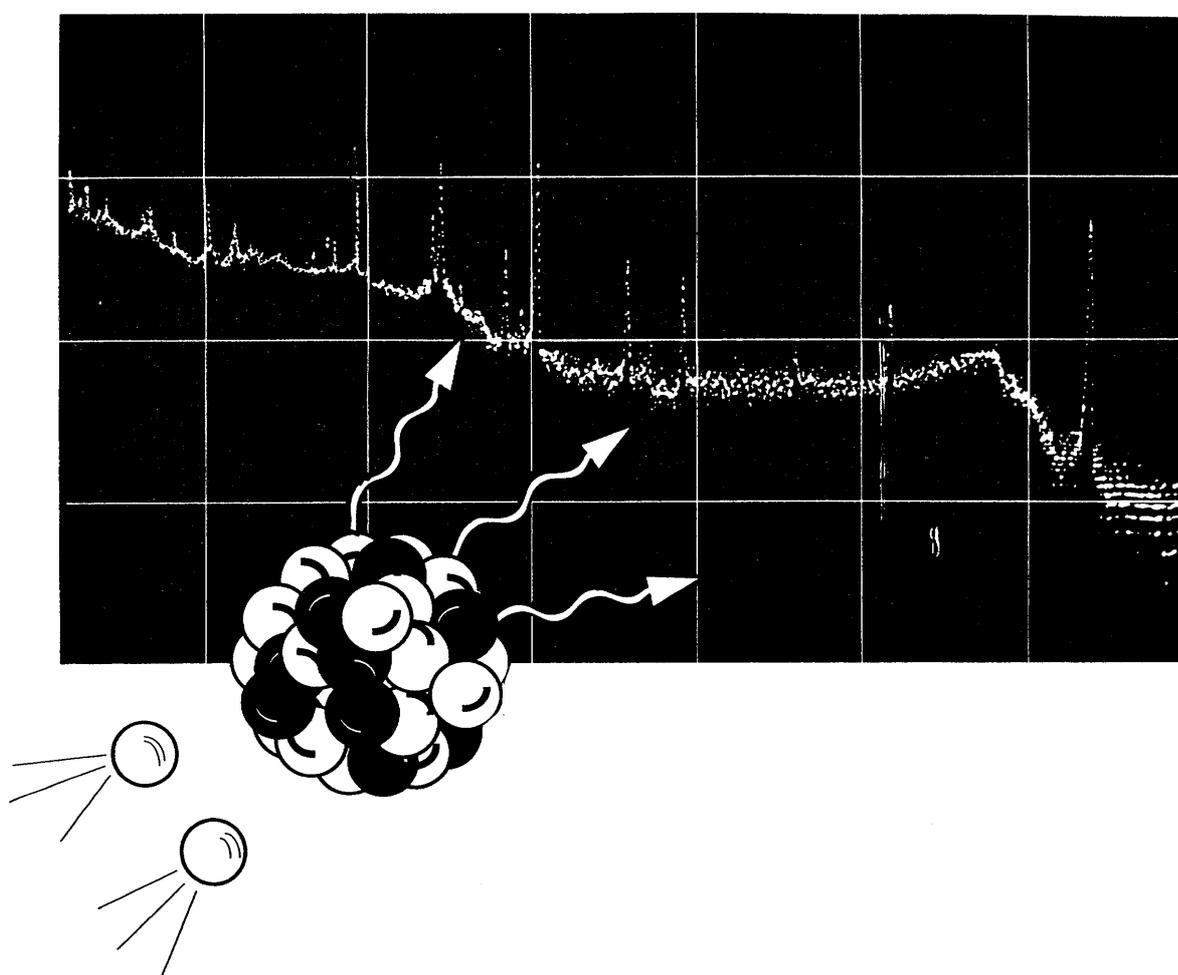


1997年5月

# 放射化分析

No. 5



放射化分析研究会

放射化分析研究会  
Japan Association of Activation Analysis (JA<sup>3</sup>)

会誌「放射化分析」  
Activation Analysis

題字は 真室 哲雄 先生によるものです。  
表紙は 岡田往子さん（武蔵工大原研）によるものです。

# 放射化分析 No. 5

## 目次

特別寄稿	1
Is Activation Analysis Still Active ?	柴 之芳
講座 荷電粒子放射化分析と光量子放射化分析	5
I. 荷電粒子放射化分析	重松 俊男
II. 電子加速器による光量子放射化分析	榎本 和義
研究紹介	29
放射化分析による植物葉中の元素の特異集積について	高田 實彌
地球化学図による地球環境評価と放射化分析	田中 剛
解説	49
国際放射能計測委員会 (ICRM) について	源河 次雄
若い声	56
放射化分析について思うこと	玉田 真弓
談話室	57
データフォーマットの統一化の私案	鈴木 章悟
施設だより	58
東北大学原子核理学研究施設	
武蔵工業大学原子力研究所	
原研施設利用共同研究	
立教大学原子力研究所	
京都大学原子炉実験所	
研究会報告	66
第2回 $k_0$ 法利用者の国際ワークショップ	
第9回捕獲ガンマ線分光学と関連トピックスの国際シンポジウム	
放射化分析支援システム研究会	
環境科学における放射化分析	
中性子即発ガンマ線分析研究会	
MARC-IV	
研究集会案内	76
お知恵拝借	78
アナウンスメント	79
放射化分析研究会申し合わせ	80
会員名簿	81
1997年次の事務局・幹事交代について	86
立教大学研究用原子炉の共同利用継続に関する要望の活動	95

## Is Activation Analysis Still Active?

中国科学院高能物理研究所 柴 之芳

Over sixty years have passed since Hevesy and Levi first utilized a neutron source to analyze gadolinium in a mineral containing rare earth elements by neutron activation analysis technique (NAA) in 1936. No doubt, the NAA has played a very important role in science and technology, especially at its early development stage as a unique analytical arsenal characteristic of nuclear properties. Its extremely high sensitivity for most elements in the periodical table, good accuracy and precision, non-destructiveness, less matrix effect and multi-elemental analysis ability, etc. are so fascinating that the NAA has become an authorized method in the field of trace elemental analysis, even the sole selection in some cases, e.g. activable stable isotope tracing, in vivo analysis, etc. However, with the development of other non-nuclear analysis methods in recent years, e.g. ICP-AES, ICP-MS, LAPIS, the NAA seems to lose the past eminence. Naturally, a question arises: Is Activation Analysis Still Active?

### 1. Instrumental Neutron Activation Analysis (INAA)

With the advent of high purity Ge detector, the INAA has become a main member in the nuclear analysis field. Due to its simplicity and good accuracy, it has been accepted as a recommended method in certifying the reference materials and applied in multidisciplinary studies, from extraterrestrial matter to deep-sea sediment, from large archeological relics to very fine atmospheric particles, etc. However, some major obstacles are still present which hinder its development as follows:

- a. Sophisticated hardware. Most reactors used for INAA in the world are so huge and expensive that it is very difficult to access for non-nuclear scientists
- b. Radiation damage and radioactive waste.
- c. Time-consuming and relatively expensive..

To overcome the first obstruction, a compact reactor, like the Canadian SLOWPOKE and Chinese MNSR (Miniature Neutron Source Reactor), should be exploited. In fact, they can be more or less regarded as a neutron source instead of a reactor, which are so safe that they are permitted to be installed at hospitals, universities,

even in the downtown area. Their price is comparable with other analytical facilities, at least not much more expensive than others. For example, the Chinese MNSR costs about USD 600000 to 800000.

To solve the second and third problems, the INAA based on short-lived radioactive nuclides should be thoroughly studied. As an alternative, it can be combined with simple preconcentration procedure to improve its sensitivity and selectivity.

Consequently, the INAA is still a unique analytical tool in the fields of major, minor, trace and ultratrace elements.

## 2. $k_0$ method

In the past twenty years a number of NAA groups, mostly in Europe, are involved in establishing this method, which is regarded to hold the following merits:

a. The troublesome preparation of chemical standards can be avoided.

b. The radioactivity counting time for standards can be saved.

c. Quantitative results for elements, but absent in chemical standards can be obtained.

d. Some nuclear parameters, e.g. the cross section of neutron capture reaction and the photon abundance of the gamma-ray emitted by the radioactive nuclide, can be re-evaluated.

In fact, the main purpose of the  $k_0$  research is to simplify the routine INAA steps without any special sense of science. Moreover, nowadays the NAA is very hard to serve a routine analysis due to a few reactors available for NAA. In addition, it is not very complicated to prepare the chemical standard for the comparative method of INAA with good accuracy. Thus, there are still different opinions about the  $k_0$  method.

## 3. Prompt gamma-ray neutron activation analysis (PGNAA)

Although its poor sensitivity for most elements, high radioactive background and complicated gamma spectrum, the PGNAA is developing rapidly due to the improvement of the facility, use of cold neutron and alleviation of background level, which has made it as a unique supplement to the conventional INAA, especially for analysis of H, B, Cd, Sm and some others. It is worthwhile to mention the related work in USA, Japan and Germany. The very fascinating feature of PGNAA is to be able to non-destructively analyse large samples, and this method will find

a broad application in archaeology. Another potential application field of PGNAA will be in radiotherapy via a boron-containing complex selectively absorbed by cancer tissue.

#### 4. Radiochemical Neutron Activation Analysis (RNAA)

The use of RNAA is unlikely to expand significantly in near future, but will remain in specialized areas, e.g. determination of platinum group elements (PGEs) and biologically essential trace elements at low level. Up to now the RNAA is still the only way to be able to analyse all 6 PGEs in various matrices, although the ICP-MS and NTIMS are constituting a true threat to RNAA

The role of RNAA in the analysis of rare earth elements is fading, but it is still superior to other techniques in the analysis of REE in small samples, e.g. in human tissues and serum.

The determinations of some essential trace elements, e.g. Cr, I, V, Mn Co, etc. highly rely on RNAA, especially at ultratrace level(e.g. in serum and sub-cell fractions).

#### 5. Molecular activation analysis (MAA)

The term of MAA refers to an activation method that is able to give information about the chemical species of trace elements in systems of interest, though its definition has remained to be assigned. Its development is strongly stimulated by the urgent need to know the chemical species of elements. Total concentrations or contents are often without any meaning when assessing health or environmental risks or in the explanation of geochemical processes. The wildest meaning of the species, applied to chemistry of trace elements, would be their ionic or molecular forms in systems of interest. Another related word, speciations, means their transition, transformation or alteration of one species into another. Recently, the study of the chemical species is implicitly increasing.

The MAA is able to play a particular role in the species studies. But the critical point in the MAA is that it is not permitted to change the original chemical species of elements in systems, or the change has to be under control; in the meantime not allowed to form the "new artifact" originally not present in systems.

Some latest practical examples of the MAA are in the studies of the essential elements (Cr, Fe, Co, Se, I), toxic elements(Hg, As) and unknown elements (REE and PGEs) in life science.

The important biological effects of chemical species of essential and toxic elements in environmental and biological systems have given a strong impetus to develop the MAA and will further enhance its necessity, and for the foreseeable future it is difficult to imagine how such studies can be pursued without a heavy reliance on the MAA. The major reason is that the sample amount used in the studies of chemical species is usually quite small.

#### 6. Comparison of NAA with other analytical techniques

Comparing analytical methods for trace elements is always very difficult. In fact, each coin has two sides and every method has its own merits and drawbacks. One has to take account of the following factors while doing this comparison:

- a. sample matrix (solid, liquid, particle, soft tissue, etc.);
- b. sensitivity, accuracy and precision;
- c. contamination danger and blank correction;
- d. available sample amount;
- e. speed and cost;
- f. multi-elemental analysis ability;
- g. possibility of chemical species study, etc.

Another important factor in the selection of analytical methods is the personnel expertise.

Anyhow, the NAA is a valuable technique due to its nuclear-oriented character, unlike other techniques based on the atomic behaviors. Thus, as an independent arsenal, it will continue to occupy a reasonable position in the analytical kingdom. As K. Heydorn pointed out, the field of activation analysis will remain as active as ever, even though it has reached maturity.

Acknowledgement: Author thanks Prof. Y. Ito for his encouragement in writing this note and Prof. H. Nakahara for his thoughtful comments and careful revisions.

Chifang Chai<sup>1,2</sup>

1. Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, P.O.Box 2732, Beijing 100080, China

2. Department of Chemistry, Faculty of Science, Tokyo Metropolitan University, Tokyo 192-03, Japan



## 荷電粒子放射化分析と光量子放射化分析

荷電粒子放射化分析及び光量子放射化分析はサイクロトロンや電子線加速器など加速器を使用して行なわれる。これまで放射化学実験室を備えて放射化分析向けに設計された施設が少なく、またマシンタイムや研究者が限られていたこともあり、中性子放射化分析に較べるとあまり知られていない。

中性子源として原子炉を使用する中性子放射化分析の持つ魅力は、多くの利用者がよく知るところであるが、加速器を利用するこれら二つの放射化分析の魅力もかなりのものがある。この機会に荷電粒子放射化分析及び光量子放射化分析を知っていただき、中性子放射化分析と相補的に利用していただければ幸いである。

### 1. 荷電粒子放射化分析 (Charged Particle Activation Analysis, CPAA)

#### 1. はじめに

荷電粒子放射化分析は、原子炉中性子放射化分析と較べて遜色ない優れた分析法である。新しい研究用原子炉の建設が次第に難しくなりつつある状況を考えれば、本分析法の重要性は増していくと思われる。

ところで、筆者らはこれまで、原子炉中性子放射化分析では感度が悪く適用が難しいホウ素、炭素、窒素及び酸素に限定して荷電粒子放射化分析を適用してきた。このような進め方の利点は、設備に係る経費が安く、運用も容易なことにある。材料開発が絡む軽元素分析では、特性と元素濃度との関連の有無が議論できる正確さで元素を定量することが不可欠である。幸い、比較的短い時間で期待された分析法の開発が進められたと考えている。

荷電粒子放射化分析の特徴などは、すでに創刊号で講座「IV. 荷電粒子放射化分析」に述べている。ここでは重複を避け、荷電粒子放射化分析を進めるうえで留意すべき事柄を中心に紹介する。したがって分析法の特徴や使用されている用語は創刊号などを参照していただきたい。

#### 2. 原理と解析法

入射する荷電粒子は、物質中で主に電子との相互作用によりエネルギーを失い、入射粒子の飛程は物質により異なる。また核反応断面積は粒子のエネルギーに依存するため、単一エネルギーの粒子が入射した場合でも、生成する放射性核種の分布は深さ方向に一様でない。例えば、定量では一般に比較法が用いられるが、比較標準と分析試料でマトリックス元素や組成が異なると阻止能や飛程の補正が必要になるなど、解析法は中性子放射化分析に較べて複雑になる。

## 2. 1 原理

入射エネルギーの飛程 (R) に較べて厚い物質に荷電粒子を衝撃して得られる生成核の放射能 A は、標的核の原子数を n、粒子束を i、核反応断面積を  $\sigma$  とすると (1) 式となる。

$$\begin{aligned} A &= n i S \int_0^R \sigma(x) dx \\ &= n i S \int_{E_0}^0 \sigma(E) (dx/dE) dE . \end{aligned} \quad (1)$$

ここで S は飽和係数、また x は表面からの深さ、 $E_0$  は入射エネルギー、E は深さ x における粒子のエネルギー、 $dE/dx (=S(E))$  は阻止能である。

反応確率 P を (2) 式と置くと、生成放射能 A は、(3) 式で表すことができる。

$$P = \int_{E_0}^0 (\sigma(E)/S(E)) dE \quad (2)$$

$$A = n i S P . \quad (3)$$

比較法で定量する場合、比較標準試料の標的核の数を  $n_s$  とすれば分析試料中の標的核の数  $n_x$  は、次式より算出される。

$$\begin{aligned} n_x &= (A_x i_x S_x P_x) / (A_s i_s S_s P_s) \cdot n_s \\ &= k (A_x/A_s) F . \end{aligned} \quad (4)$$

ただし、

$$F = P_s / P_x \quad (5)$$

$$k = n_s (i_s S_s / i_x S_x) .$$

なお、k は分析の条件が決まれば定数となる。

## 2. 2 F 値の算出

(2) 式から明らかなように、反応確率 P を励起関数と阻止能の数値積分により求め F 値を算出することができる。また励起関数あるいは阻止能などの物理定数が不備で数値積分法が適用できない場合は近似法として Average Cross Section 法<sup>1)</sup> あるいは Average Stopping Power 法<sup>2)</sup> が用いられる。

### 2. 2. 1 数値積分法

(5) 式で比較標準試料の構成元素や組成比が分析試料と異なる場合は、目的核種の励起関数と分析試料および比較標準試料の阻止能から数値積分により F 値を算出する。最近では、複数の励起関数および阻止能の中から最も正確なデータが選ばれて用いられている。またそれら物理定数のデータベース化が進み、パーソナルコンピューターを用いて容易に F 値が算出される。

### 2. 2. 2 Average Cross Section 法

① Average Cross Section 法による近似<sup>1)</sup>

(2) 式で、

$$P = \int_{E_0}^0 (\sigma(E)/S(E)) dE = \sigma R \quad (6)$$

$$\bar{\sigma} = \left[ \left( \int_{E_0}^0 \sigma(E)/S(E) dE \right) \right] / \left[ \int_{E_0}^0 (1/S(E)) dE \right] \quad (7)$$

として、平均断面積 $\bar{\sigma}$ を定義する。

核反応を起こす非相対論的エネルギー領域では、 $I$ をイオン化ポテンシャル、 $\kappa$ を入射粒子と電子の質量の比とすれば、阻止能は(8)式で表わすことができる。

$$-S(E) = (k/E) \ln(4E/\kappa I) \quad (8)$$

$\ln(4E/\kappa I)$ の変化が $E$ に比べて緩やかであれば、 $\bar{\sigma}$ は近似的に次式で表され、

$$\bar{\sigma} = \left( \int_{E_0}^0 \sigma(E) E dE \right) / \left( \int_{E_0}^0 E dE \right) \quad (9)$$

マトリックスによらず一定になる。その結果、 $F$ 値は入射エネルギーにおける比較標準試料と分析試料の飛程を比較して容易に算出できる。

$$F = P_s/P_x = R_s/R_x \quad (10)$$

また $n_x$ は(10)式を(4)式に代入して得られる次式より求めることができる。

$$n_x = k(A_x/A_s)(R_s/R_x) \quad (11)$$

このように、Average Cross Section法では励起関数が必要ない。

なお化合物の飛程 $R$ は、構成元素 $j$ の飛程を $R_j$ 、その濃度を $\eta_j$ とすると次式より算出される。

$$(1/R) = \sum (\eta_j/R_j) \quad (12)$$

## ② Average Cross Section法の選択条件

Average Cross Section法は簡便な近似法であるが、適用範囲を的確に把握して用いる必要がある。表1に示す軽元素の主要な核反応のうち、酸素の組成が既知の化合物に $^3\text{He}$ を衝撃しZieglerの飛程<sup>3)</sup>を用いてAverage Cross Section法の適用条件を確認した結果を表2に示す<sup>4)</sup>。なお表2の平均原子番号 $z$ は(13)式で定義される。

$$z = \sum z_i \tau_i \quad (13)$$

ここで $z_i$ 、 $\tau_i$ は構成元素 $i$ の原子番号とモル分率である。

入射エネルギーが15.2 MeVでは、いずれの化合物も1%以内の誤差で理論値と一致する。しかし溶融石英に比べて平均原子番号が大きいチタン酸ストロンチウムやチタン酸バリウムでは、入射エネルギーが11.6 MeVから8.5 MeVと低くなるにつれて酸素濃度が低く見積もられる。一方溶融石英と平均原子番号が等しいサファイアでは、入射エネルギーに関係なく1.2%以内で理論値と一致する。

したがってAverage Cross Section法を使用する場合の比較標準試料は、平均原子番号が分析試料と等しいか近いものを用意する。適切な比較標準試料がない場合は、比較的高い入射エネルギーで衝撃する。

表1 軽元素の主要核反応

主要核反応	Q値 (MeV)	妨害核反応	Q値 (MeV)
$^{10}\text{B} (d,n) ^{11}\text{C}$	[ 6.78 ]	$^{12}\text{C} (d,t) ^{11}\text{C}$	[-12.46]
$^{12}\text{C} (d,n) ^{13}\text{N}$	[ -0.28 ]	$^{14}\text{N} (d, \alpha n) ^{11}\text{C}$	[ -5.15 ]
$^{12}\text{C} (^3\text{He}, \alpha) ^{11}\text{C}$	[ 1.86 ]	$^{14}\text{N} (d,t) ^{13}\text{N}$	[ -4.30 ]
		$^{16}\text{O} (d, \alpha n) ^{13}\text{N}$	[ -7.44 ]
		$^9\text{Be} (^3\text{He},n) ^{11}\text{C}$	[ -7.56 ]
		$^{10}\text{B} (^3\text{He},d) ^{11}\text{C}$	[ -3.20 ]
		$^{11}\text{B} (^3\text{He}, \alpha d) ^{11}\text{C}$	[ -8.42 ]
$^{14}\text{N} (p, \alpha) ^{11}\text{C}$	[ -2.92 ]	$^{16}\text{O} (^3\text{He}, 2\alpha) ^{11}\text{C}$	[ -7.44 ]
		$^{11}\text{B} (p,n) ^{11}\text{C}$	[ -2.77 ]
$^{14}\text{N} (^3\text{He}, \alpha) ^{13}\text{N}$	[ 10.02 ]	$^{12}\text{C} (p,d) ^{11}\text{C}$	[ -16.56 ]
		$^{11}\text{B} (^3\text{He},n) ^{13}\text{N}$	[ -10.18 ]
$^{18}\text{O} (p,n) ^{18}\text{F}$	[ -2.44 ]	$^{12}\text{C} (^3\text{He},d) ^{13}\text{N}$	[ -3.55 ]
$^{16}\text{O} (t,n) ^{18}\text{F}$	[ 1.27 ]	$^{19}\text{F} (p,n) ^{18}\text{F}$	[ -8.21 ]
$^{16}\text{O} (^3\text{He},p) ^{18}\text{F}$	[ 2.03 ]	$^{19}\text{F} (t,tn) ^{18}\text{F}$	[ -10.43 ]
		$^{19}\text{F} (^3\text{He}, \alpha) ^{18}\text{F}$	[ -10.47 ]

表2 Average Cross Section 法による近似の正確さ<sup>4)</sup>  
(比較標準試料: SiO<sub>2</sub>)

試料	(理論濃度)	平均 原子番号	近似の正確さ*		
			8.5 MeV**	11.6 MeV**	15.2 MeV**
SiO <sub>2</sub>	(0.533)	10.0	100.0	100.0	100.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(0.471)	10.0	101.2	100.5	100.0
SrTiO <sub>3</sub>	(0.262)	16.8	97.8	99.0	99.9
BaTiO <sub>3</sub>	(0.206)	20.4	97.2	98.2	99.5

\* : (分析値/理論濃度) x 100、 \*\* : <sup>3</sup>He エネルギー、

### 2. 2. 3 Average Stopping Power法

#### ① Average Stopping Power法による近似<sup>2)</sup>

反応確率 P は励起関数で重みづけられた平均阻止能に逆比例し、平均阻止能を

示す平均エネルギーが物質によらず一定であると近似する。(2)式で、

$$P = U \int_{E_0}^0 \sigma(E) dE \quad (14)$$

$$U = \left[ \int_{E_0}^0 (\sigma(E)/S(E)) dE \right] / \left[ \int_{E_0}^0 \sigma(E) dE \right] \quad (15)$$

として核反応における阻止能の逆数の平均Uを用いる。ここで1/Uと等しくなる阻止能(=S(E<sub>m</sub>))のエネルギーを平均エネルギー(E<sub>m</sub>)とすると、

$$E_m / \ln(4 E_m / \kappa I) = \left[ \int_{E_0}^0 (E \sigma(E) / \ln(4 E / \kappa I)) dE \right] / \left[ \int_{E_0}^0 \sigma(E) dE \right] \quad (16)$$

であり、

$$E_m = \left[ \int_{E_0}^0 E \sigma(E) dE \right] / \left[ \int_{E_0}^0 \sigma(E) dE \right] \quad (17)$$

と近似できる。すなわちE<sub>m</sub>はマトリックスによらず一定になり、(14)式は

$$P = (1/S(E_m)) \int_{E_0}^0 \sigma(E) dE \quad (18)$$

で表すことができる。この結果を(5)式に代入すると(19)式となり、

$$F = P_s / P_x = S(E_m)_x / S(E_m)_s \quad (19)$$

F値はE<sub>m</sub>における比較標準試料と分析試料の阻止能を比較して算出できる。

これよりn<sub>x</sub>は(20)式から求めることができる。

$$n_x = k (A_x / A_s) (S(E_m)_x / S(E_m)_s) \quad (20)$$

なお化合物の阻止能S(E)は、構成元素jの阻止能S(E)<sub>j</sub>およびその濃度η<sub>j</sub>から次式より算出される。

$$S(E) = \sum S(E)_j \cdot \eta_j \quad (21)$$

最近では、平均エネルギーをThick Target Yield から求める方法も提案されている<sup>5)</sup>。

### 2. 3 解析法の正確さの比較

数値積分法は、F値を求めるうえで最も信頼性が高い。近似法で算出したF値は数値積分法のF値と比較して正確さを確認して用いられる。

#### ① 励起関数にともなう誤差<sup>6)</sup>

励起関数の正確さは数値積分法の正確さにそのまま関係する。そこで、複数の励起関数の中から誤差の最も少ない励起関数が選択される。例えば炭素に重陽子(d)を衝撃する<sup>12</sup>C(d, n)<sup>13</sup>N反応についてWilkinson<sup>7)</sup>、Jaszczakら<sup>8)</sup>、Wohllebenら<sup>9)</sup>およびClemensonら<sup>10)</sup>の励起関数が報告されている。3 MeVのdをヒ化ガリウムに衝撃し、それぞれの励起関数を使用してF値を算出した結果を

表3 種々の励起関数を用い数値積分法で算出したF値の比較  
(d: 3 MeV, 比較標準試料: グラファイト, 分析試料: ヒ化ガリウム)

	励起関数			
	Jaszczak <sup>8)</sup>	Wohlleben <sup>9)</sup>	Clemenson <sup>10)</sup>	Wilkinson <sup>7)</sup>
F 値	0.465	0.468	0.464	0.485
平均値	0.466 ± 0.002			
相対標準偏差(%)	-0.15	0.52	-0.36	4.10

表3に示す。比較標準試料はグラファイトである。Jaszczakら、Wohllebenら及びClemensonらの励起関数より算出したF値は互いによく一致している。それら三つのF値の平均値を求め、WilkinsonのF値と比較すると相対誤差は4.1%に達する。

② 阻止能、飛程の選択にともなう誤差<sup>4)</sup>

軽元素の化学組成が明確な化合物に荷電粒子を衝撃し、数値積分法および近似法によりF値を算出して比較すると解析法の正確さが明らかになる。

表4は化学組成が明かな酸化物に15.2 MeVの<sup>3</sup>Heを衝撃し、熔融石英を比較標準として数値積分法、Average Cross Section法およびAverage Stopping Power法でF値を算出した結果である。阻止能と飛程は、最も使用頻度の高いZiegler<sup>3)</sup>とWilliamsonら<sup>11)</sup>のデータを使用し、Zieglerの数値積分法のF値を100として相対比較した。

表4 異なる阻止能を用い算出したF値\*の比較<sup>3)</sup>  
(<sup>3</sup>He: 15MeV, 比較標準試料: SiO<sub>2</sub>)

解析法	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		SrTiO <sub>3</sub>		BaTiO <sub>3</sub>	
	Z	W	Z	W	Z	W
数値積分	100.0	100.6	100.0	99.5	100.0	98.7
ASP-励起関数	100.1	100.6	99.5	99.6	100.0	98.8
ASP-TTY	100.1	100.6	100.0	99.6	100.0	98.7
ASC	100.0	100.6	99.7	98.2	99.6	97.0

\* : Zieglerの阻止能を用い算出した数値積分の値を100.0とする相対値

Z : Zieglerの阻止能<sup>3)</sup>を使用、W : Williamsonらの阻止能<sup>11)</sup>を使用

Average Stopping Power法のF値は、ZieglerあるいはWilliamsonらのどちらの阻止能を用いて算出した値も数値積分法のF値とほぼ一致しており、優れた近似法といえる。またThick Target Yieldを用いる方法はAverage Stopping Power法

と0.5%以内の誤差で一致することから、優れた近似法の一つと判断できる。励起関数の測定に比べてThick Target Yieldの測定は容易であり、励起関数が不備な核反応への荷電粒子放射化分析の適用が容易になると考えられる。

Average Cross Section法のF値は、Zieglerの飛程を使用すると数値積分法の値と0.5%以内の誤差で一致する。一方、Williamsonの飛程を使用すると2%程度の誤差が生じる。

このように物理定数の正確さは定量値の正確さを決定する大きな要因の一つになる。荷電粒子放射化分析の正確さや信頼性が明らかにされるにつれて、軽元素分析における他分析法の基準となる方法として扱われるようになっていく。

これまでThick targetを例に原理など述べたが、Thin targetの解析法については文献<sup>1,2)</sup>を参照されたい。

### 3. 施設と装置

ここでは分析専用が開発されたN T Tの超小型サイクロトロンを例に紹介する。当所は日本原子力研究所東海研究所の原子炉利用が容易であり、Naより重い元素は照射試料を当所放射化学実験施設に搬入し、機器及び放射化学的中性子放射化分析ができる。したがって荷電粒子放射化分析では軽元素が対象になる。

荷電粒子放射化分析に用いられる加速器は、小型でも10 MeV以上に容易に加速できるサイクロトロンが有効である。当所には医療用に開発された自己遮蔽型の超小型サイクロトロンを改良して設置した。表1から明らかなように軽元素から生成する放射性核種は最も半減期の長い<sup>18</sup>Fで109.6分と短い。サイクロトロン施設はサイクロトロン室、コントロール室、放射化学実験室及び放射能計測室から構成された荷電粒子放射化分析専用の施設であり、軽元素を高感度・高精度で分析するために設計されている。すなわち試料搬送、荷電粒子衝撃及び照射試料の搬出はリモートコントロールで行われ、照射終了後2～3分以内に放射化学実験室に戻ることができる。さらに迅速な化学処理、放射能計測が行われる。

サイクロトロンは本体と3本のビームラインから構成される(図1)。本体は平均磁場が15.4 kGで、引き出し半径は375mmと小型である。47MHzおよび31.3 MHzの加速周波数を選択することによりp、d、<sup>3</sup>Heおよびα粒子をホウ素、炭素、窒素及び酸素の放射化に適した最大加速エネルギーに加速できる。現在では、手動ではあるがエネルギー可変に改造されており、pでは、16MeVから1.8MeVのエネルギーが選択できる。

3本のビームラインの内、放射化分析用ラインはビーム・トランスポート系、ターゲット系および試料搬送系から構成されている。隣接する放射化学実験室でセットされた試料はロボットを介してターゲット部に運ばれる。荷電ビームで衝撃された試料は再び搬送系を経て放射化学実験室に戻される。散乱分析ラインは磁場を微調整してイオンチャネリング計測ができる平行ビームが得られている。7MeV前後のα線による<sup>16</sup>O及び<sup>12</sup>Cの共鳴弾性散乱及び中重元素のラザフォード弾性散乱分析に加え、エネルギー分散及び波長分散型PIXEを行うことができる。

μ-PIXE用のビームラインは10 μmφまでビームが細径化されている。

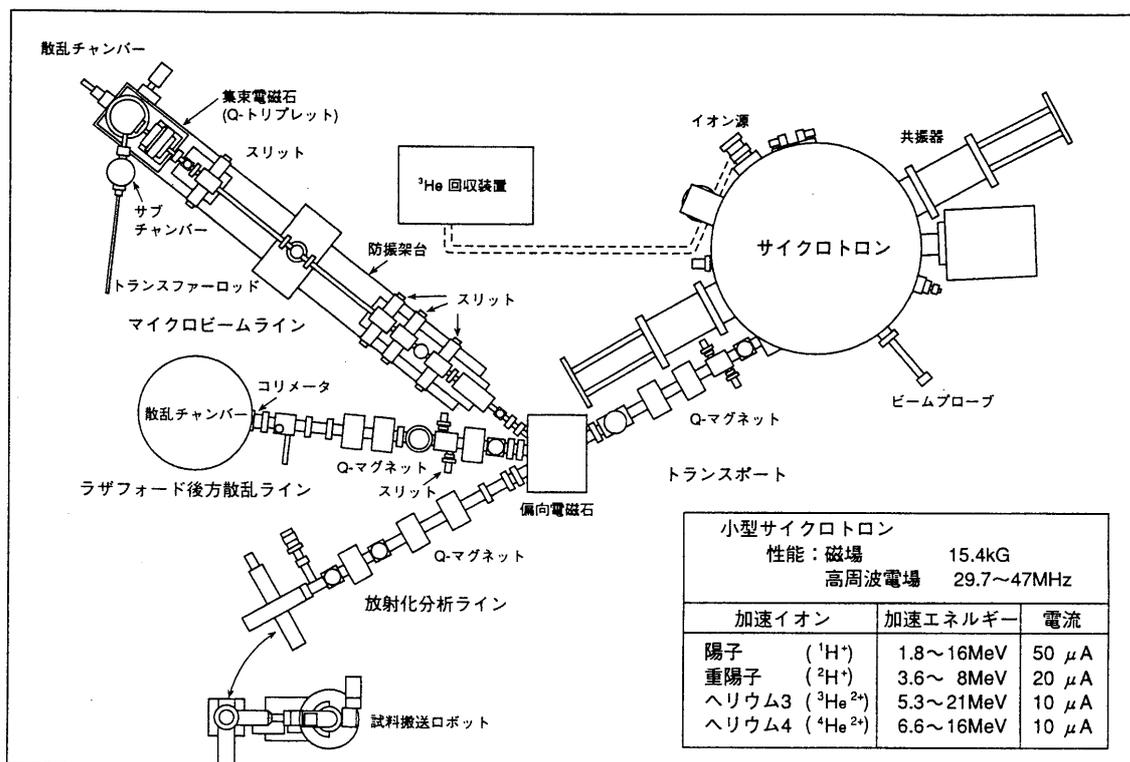


図1 分析専用サイクロトロンと性能

なお、サイクロトロン室は厚さが 1.8m のコンクリートに囲まれており、サイクロトロン運転時の測定室およびコントロール室の放射能レベルはバックグラウンドレベルに抑えられる。

#### 4. 定量法

##### 4. 1 試料の取扱い

分析試料の表面は炭素及び酸素に汚染され易い。例えば半導体表面を予め化学洗浄した試料でも  $0.1\text{--}1\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$  の酸素の表面汚染がある<sup>13)</sup>とされる。このように表面に汚染した軽元素は、核反応で反跳エネルギーを得て試料内部に入り込む ((22) 式<sup>15)</sup>)。

$$E_r = A_a A_b E_a / (A_a + A_b)^2 \quad (22)$$

軽元素の濃度が低くなるほど定量誤差が大きくなるため、衝撃後の試料表面は十分に化学エッチし、汚染元素に起因する放射能を徹底して除去する。ただし試料表面の粗さは化学エッチにより増幅され、表面汚染元素の除去を不完全にする。また入射エネルギーはエッチング深さの分だけ補正されるが、表面が粗くなると入射エネルギーの補正にともなう誤差が大きくなる。それらを防ぐため試料両面を鏡面研磨する。

反跳粒子の飛程は入射エネルギーや核反応あるいはマトリックス元素により異なるが、おおむね数  $\text{mg}/\text{cm}^2$  程度である。

## 4. 2 定量操作

### ① 分析試料と比較標準試料

薄膜試料のうち表面汚染が無視できる試料は荷電粒子放射化分析が適用できる。一般には、炭素や酸素は試料表面に汚染され易く、軽元素の荷電粒子放射化分析は金属や半導体などのバルク試料に多用されている。粉末状の試料はペレット状に成形される。

分析試料の形状はビーム径より大きく（NTTでは、15～20mm□前後）、厚さが1-2mm程度の寸法がよい。定量に先立ち、分析試料の両面は鏡面研磨される。

物質中で失われる入射粒子のエネルギーは熱に変わり試料温度を上げる。荷電粒子衝撃中の試料は、表面がヘリウムガスにより、背面はホルダーを介して水あるいは液体窒素により冷却されるが、基本的には発熱で破損したり変質する試料あるいは脆弱な試料は適用が困難である。

また軽元素の比較標準試料として、ホウ素はホウ素焼結体、炭素はグラファイト、窒素は窒化ケイ素、そして酸素は熔融石英などが代表的な物質である。

### ② 定量操作

荷電粒子放射化分析における定量操作は以下の通りである。試料はホルダーに装着され、遠隔操作により放射化学実験室からロボットを介してターゲット位置に搬送される。試料室をヘリウムガスで置換して荷電粒子が衝撃され、衝撃後数分で放射化学実験室に戻される。なお試料ホルダーには4試料が装着可能で、比較標準試料と分析試料をセットして同一の条件で連続して衝撃できる。続いて衝撃試料の表面エッチにともなうエッチング深さが測定される。機器的な方法では一対のGe-NaI検出器を用いて同時計数装置により放射能が測定され、任意の解析法を用いて濃度が求められる。

入射粒子の電流は定量する元素の濃度や試料の種類および冷却の状況に応じて異なる。目安は、ng/g 台の濃度で1-5 $\mu$ A程度である。また衝撃時間は生成放射性核種の1半減期以内である。なお必要に応じて放射化学的方法が用いられる。

## 4. 3 放射能計測

軽元素の荷電粒子反応で主要な核反応の生成核はいずれも陽電子崩壊核種であり、消滅の際に指向性のよい一対の消滅 $\gamma$ 線を放出する。その消滅 $\gamma$ 線を対向する一対の検出器で同時計数測定を行う。機器的な方法では、目的の放射性核種の陽電子消滅 $\gamma$ 線その他、多重 $\gamma$ 線放出核種が起こす偽同時計数や他放射性核種の計数率が大きい場合の偶然同時計数を低減するため、エネルギー分解能が高いゲルマニウム（Ge）半導体検出器とヨウ化ナトリウム（NaI(Tl)）シンチレーション検出器を組み合わせ使用される。一方、放射化学分離した放射性核種の計測では、検出効率が高いビスマスゲルマネイト（BGO、 $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ）シンチレーション検出器を一対用意して用いる。

## 5. 分析結果

### 5. 1 機器的な方法

機器的荷電粒子放射化分析は簡便な操作で多数の試料が自動処理できる利点がある。

ある。検出下限は共存元素の種類や濃度に大きく左右され、以下の条件が満たされる場合に可能になる。

- 1) マトリックスや共存する不純物元素から放射性核種が生成しないか、生成する放射性核種の半減期が目的放射性核種の半減期に比べて十分短い、
- 2) 生成する放射性核種が陽電子崩壊核種でなく、また半減期が目的放射性核種の半減期に比べて十分に長い。

例えば高純度化されたケイ素に $^3\text{He}$ を衝撃した試料ではマトリックスから生成する放射性核種の半減期が短く ( $^{30}\text{P}$ : 半減期、2.50分)、同時計数した全計数率の減衰曲線から最少二乗法を用いて半減期解析を行い、10 ppbの炭素 ( $^{11}\text{C}$ : 20.38分) 及び酸素 ( $^{18}\text{F}$ : 109.8分) が同時に定量できる<sup>14)</sup>。

## 5. 2 放射化学的分析法

放射性核種を放射化学的に純粋に分離する必要がある場合は、化学分離が行われる。放射性核種を分離の対象とする利点は、以下の通りである。

- 1) 目的の放射性核種は痕跡量であるが、非放射性的の同位元素を担体として大量に加えることができる。担体を加えても放射能は変わらない、
- 2) 担体の化学種は同位元素の放射性核種と揃え、化学挙動を同じくする。この結果、化学反応が容易に進む条件で痕跡量の放射性核種を定量的に分離できる。このように化学操作を主成分と同じ容易さで扱うことができる、
- 3) ブランクなど化学操作にともなう汚染は加える担体に比べて無視できる。

ただし軽元素から生成する放射性核種はいずれも短半減期であり、迅速かつ簡便な化学操作が必要である。また核反応で生成する放射性核種の化学種は必ずしも均一でない。

これまで用いられている軽元素の化学分離法は幾つかある<sup>15) - 18)</sup>。特に不足当量沈澱分離法は、化学分離操作にともなう化学収率補正が不要であり、化学収率の補正が難しい軽元素の定量には極めて有効である。表5に、これまでに確立されている軽元素の不足当量沈澱分離の化学系を示す<sup>18)</sup>。また不足当量沈澱分離に先だち、蒸留により前分離されるが、その化学種を合わせて表5に示す。

表5 蒸留と不足当量沈澱分離<sup>17)</sup>

目的元素	核反応	蒸留	不足当量沈澱分離		
		化学種	化学種	試薬	反応生成物
ホウ素	$^{10}\text{B}(d,n)^{11}\text{C}$	$\text{CO}_2$	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{Ba}^{2+}$	$\text{BaCO}_3$
炭素	$^{12}\text{C}(d,n)^{13}\text{N}$	$\text{NH}_3$	$\text{NH}_4^+$	TPB* <sup>*</sup>	$\text{NH}_4(\text{TPB})$
窒素	$^{14}\text{N}(p,\alpha)^{11}\text{C}$	$\text{CO}_2$	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{Ba}^{2+}$	$\text{BaCO}_3$
酸素	$^{16}\text{O}(^3\text{He},p)^{18}\text{F}$	$\text{H}_2\text{SiF}_6$	$\text{F}^-$	$\text{La}^{3+}$	$\text{LaF}_3$

\*TPB: テトラフェニルホウ酸

### 5. 3 ニオブ中のホウ素、窒素、炭素及び酸素の逐次定量<sup>1)9)</sup>

超高真空電子ビーム浮遊帯域溶融法は超高真空溶融による精製効果と帯域溶融によるゾーン偏析効果を利用した精製法である。この精製法で高純度化された高融点金属ニオブ中の侵入型不純物の酸素、窒素および炭素の精製効果を軽元素の逐次定量により確認した。

分析試料のニオブは純度が市販レベルの5mmφ x 200mmの棒状試料で、中心部を超高真空電子ビーム浮遊帯域溶融法により5回パスさせて精製した。棒状試料は数mm間隔で切断して洗浄し、加圧して約10mmφに成形し、両面研磨し使用した。

衝撃した荷電粒子、エネルギー、電流値及び衝撃時間は以下の通りである。

重陽子	6.3MeV	4μA	10分
陽子	6.7MeV	1μA	1分
<sup>3</sup> He	15.9MeV	1μA	20分

はじめに、重陽子衝撃して試料表面を硝酸/フッ化水素酸/蒸留水で20μm前後の

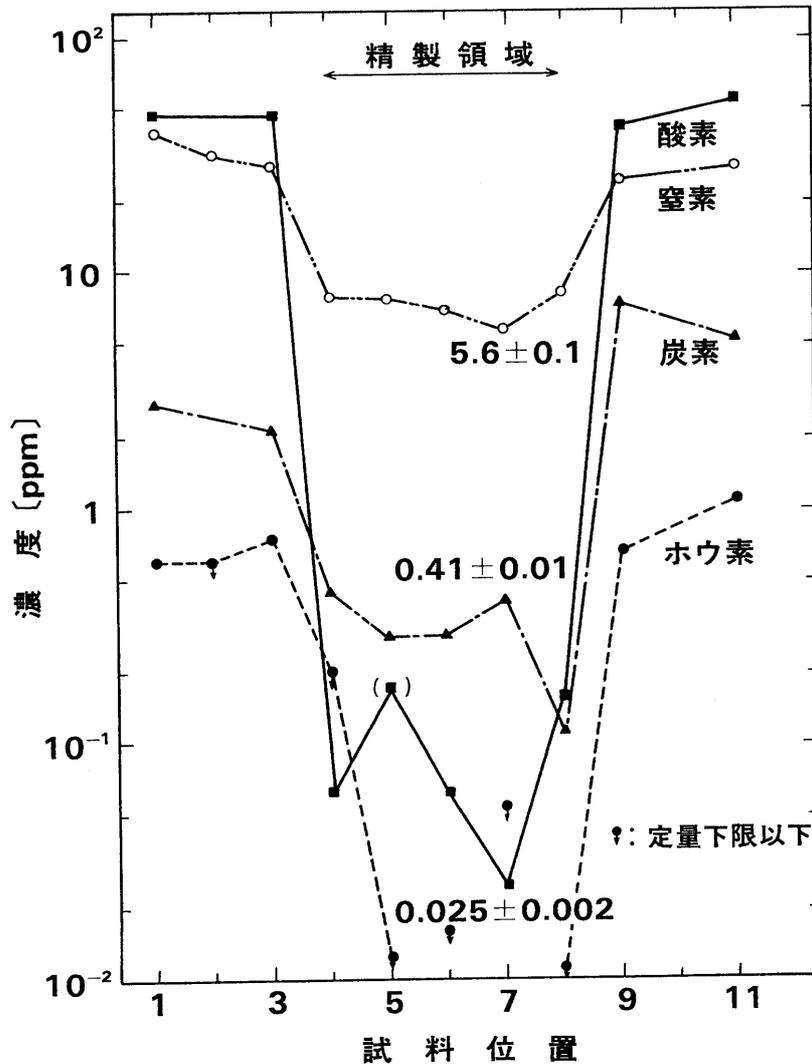


図2 高純度化ニオブの軽元素濃度の分布  
(超高真空電子ビーム浮遊帯域溶融の精製効果確認)

エッチングを行い、Ge検出器-NaI(Tl)検出器を用いて同時計数した。得られた減衰曲線について $^{13}\text{N}$  ( $^{12}\text{C}$  (d, n)  $^{13}\text{N}$ ) と $^{11}\text{C}$  ( $^{11}\text{B}$  (d, p)  $^{11}\text{C}$ ) の半減期解析を行い、炭素とホウ素を定量した。続いて陽子を衝撃して窒素を定量し、最後に、 $^3\text{He}$ を衝撃して、不足当量分析により酸素を定量した。すなわち、試料にフッ化アンモニウムをフッ素担体 ( $^{16}\text{O}$  ( $^3\text{He}$ , p)  $^{18}\text{F}$ ) として加え、酸に溶解した。水蒸気蒸留を行い、 $^{18}\text{F}$ を前分離した後、ランタンを加えて不足当量沈澱分離した。

比較標準試料は、炭素がグラファイト、ホウ素がホウ素焼結体、窒素がチッ化ケイ素そして酸素が熔融石英である。濃度は、表面エッチングの深さを補正して数値積分法により算出した。図2に、棒状ニオブの長手方向のホウ素、炭素、窒素および酸素の濃度分布を示す。侵入型不純物の酸素、窒素および炭素が超高真空電子ビーム浮遊帯域熔融法により精製される効果は、窒素、炭素、酸素の順に大きくなる。特に酸素では、3桁以上の精製効果があることが分かる。

#### 5. 4 荷電粒子放射化分析によるヒ化ガリウム中の炭素の定量<sup>6)</sup>

ヒ化ガリウム (GaAs) 高速集積回路用の半絶縁性基板では、極低濃度の炭素が電気特性に大きな影響を与えることが知られている。この炭素を簡便に分析する方法として赤外吸収測定がある。GaAs結晶中で、炭素がヒ素と置換して現れる局在振動モード ( $17\mu\text{m}$ ) を測定し炭素濃度が求められるが、予め炭素濃度と赤外吸収の換算係数を決定しておく必要がある。

原理的に系統誤差が少ない放射化分析であるが、さらに考え得る全誤差要因の詳細を詰めると赤外吸収測定などの標準化を進めるうえで代替のない有効な分析

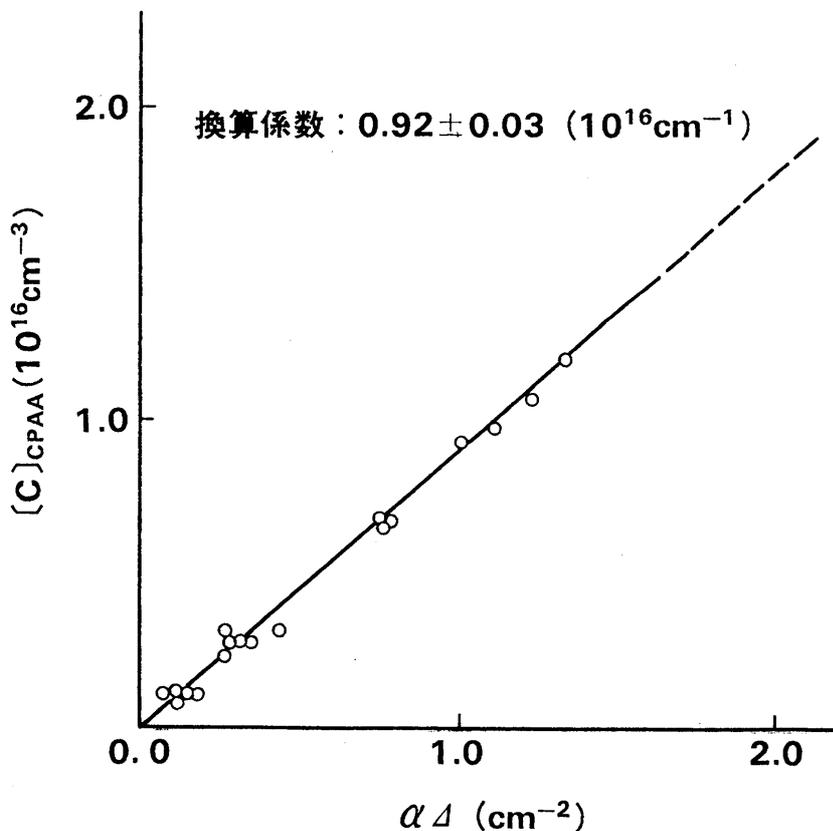


図3 赤外吸収法の校正曲線

法になる。

分析試料のGaAsは、炭素濃度が異なる単結晶で、液体封止引き上げ法(LEC)で育成した。試料は面積が $15 \times 20 \text{ mm}^2$ 、厚さが $0.8 \sim 1.0 \text{ mm}$ のウエハーで、両面を鏡面研磨して使用した。使用した核反応は $^{12}\text{C}(d, p)^{13}\text{C}$ である。

6.3 MeVのdを $\sim 6 \mu\text{A}$ で10分衝撃した後、表面を硫酸/過酸化水素/蒸留水で約 $20 \mu\text{m}$ をエッチングした。エッチング深さを測定し、続いて担体の硝酸アンモニウムを加えて溶解した。化学系をアンモニアに揃え水蒸気蒸留でマトリクス元素から分離し、さらに不足当量のテトラフェニルホウ酸を加えて沈澱分離した。放射能はBGO-BGO検出器で同時計数した。

得られた炭素濃度と液体窒素温度で測定した赤外吸収量の関係を図3に示す。赤外吸収測定結果の一部には国内17社のラウンドロビンで測定された結果も含まれている。直線の勾配より換算計数として $(0.92 \pm 0.03) \times 10^{16} \text{ cm}^{-1}$ が得られるが、この値はGaAs中の炭素濃度定量に広く用いられている。

## 6 まとめ

酸素、炭素及び窒素はガス成分として環境に当たり前に存在する。それだけに固体試料中のガス成分を正確に求めようとするのが難しい。核反応を利用して放射性元素に変えて扱うことができる荷電粒子放射化分析は、これまで述べたように微量のガス成分の動きを把握するうえで極めて有効な方法である。手段がなく、ともすれば“仕方ない”で済まされてきたガス成分が絡む問題も解決に道がつけられたものと考えている。

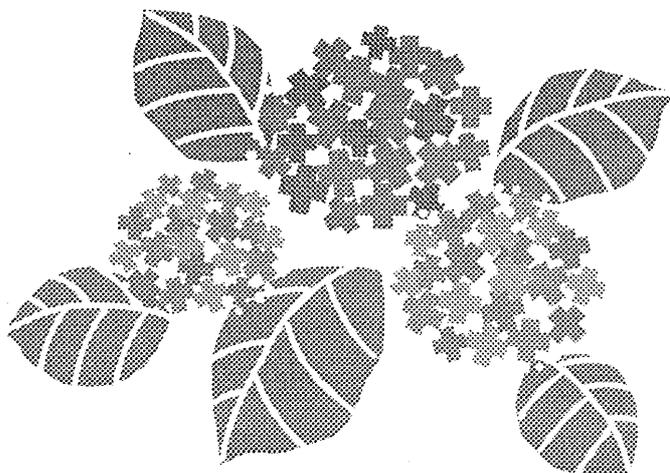
なお詳細を知りたい方は、文献<sup>20-21)</sup>を参照いただきたい。

## 参考文献

- 1) E. Ricci, R. L. Hahn, *Analytical Chemistry*, vol. 37, p742-748 (1965)
- 2) K. Ishii, M. Vallandon, J. L. Debrun, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, Vol. 150, p213-219 (1978)
- 3) J. F. Ziegler, "The Stopping and Ranges of Ions in Matter", Pergamon Press, New York, 1977-1985, Vol. 1-5
- 4) 重松俊男, 米沢洋樹, 鹿野弘二. *加速器科学*. Vol. 2, p45-56 (1988)
- 5) K. Ishii, M. Vallandon, J. L. Debrun, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, Vol. 153, p507-509 (1978)
- 6) K. Shikano, T. Shigematsu, *Proceedings of International Symposium on Advanced Nuclear Energy Research*. Oh-arai, JAERI, 1989, p457-463
- 7) D. H. Wilkinson, *Physical Review*, Vol. 100, p32-36 (1955)
- 8) R. J. Jaszczac, R. L. Macklin, J. H. Gibbons, *ibid.*, Vol. 181, p1428-1430 (1969)
- 9) K. Wohlleben, E. Schuster, *Radiochimica Acta*, Vol. 8, p78-82 (1967)
- 10) M. Clemenson, T. Novakov, S. S. Markowitz, *Analytical Chemistry*, Vol. 52, p1758-1761 (1980)

- 11) C. F. Williamson, J. P. Boujot, J. Picard, "Tables of Range and Stopping Power of Chemical Elements for Charged Particles of Energy 0.05 to 500, 1966, CEA-R 3042, 370p
- 12) H. Yonezawa, K. Shikano, T. Shigematsu, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 216, (1997), to be published
- 13) M. Vallandon, J. L. Debrun, Journal of Radioanalytical Chemistry, Vol. 39, p385-395 (1977)
- 14) A. O. Sanni, N. G. Roche, H. J. Dowell, E. A. Schweikert, T. H. Ramsey, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 81, p125-129 (1984)
- 15) T. Nozaki, Journal of Radioanalytical Chemistry, Vol. 72, p527-535 (1982)
- 16) P. Debeve, H. P. Do, C. Friedli, P. Lerch, Journal of Radioanalytical Chemistry, Vol. 64, p213-223 (1981)
- 17) M. L. Bottger, D. Birnstein, W. Helbig, S. Niese, *ibid.*, Vol. 58, p173-181 (1980)
- 18) k. Shikano, H. Yonezawa, T. Shigematsu, *ibid.*, Vol. 167, p81-88 (1993)
- 19) 重松俊男, 鹿野弘二. "レアメタルの高純度化による新機能創製のための基盤技術に関する研究 (第II期) 成果報告書" 科学技術庁研究開発局, 1992, p153-172
- 20) C. Vandecasteele, "Activation Analysis with Charged Particles", ELLIS HORWOOD LIMITED, Chichester, 1988
- 21) 重松俊男, "高純度化学大系, 第1巻分析技術, 荷電粒子放射化分析", フジ・テクノシステム, 1996

(NTT光エレクトロニクス研究所 重松俊男)



## II. 電子加速器による光量子放射化分析 (Photon Activation Analysis, PAA)

### 1. 電子加速器の分析利用

電子加速器では電子線そのものよりも高エネルギー電子から発せられる光（シンクロトロン放射光）や制動放射線のほうが分析に利用される場合が多い。

シンクロトロン放射光はシンクロトロン内を周回する電子から放射される赤外からX線領域までの連続光であり、光電子分光法、EXAFS、蛍光X線分析のための強力な光源として化学結合の状態の研究や元素分析などに活用されている。

制動放射線は高エネルギー電子が物質を衝撃する際にそのクーロン場で制動を受けて発せられるものであり、電子の加速エネルギーを最大エネルギーとする連続X線である。このような高いエネルギーの光子による原子核との相互作用を光核反応と言う。光核反応によって生成した放射性核種を検出することで試料中に含まれている元素を分析する方法を光量子放射化分析(Photon Activation Analysis, PAA)と呼んでいる。

PAAは1950年代の中ごろから利用され始め、当初は中性子放射化分析では分析の難しい軽元素の分析手段と考えられ、炭素、窒素などの軽元素の分析に適用された。しかし、光核反応の特徴が理解されるとともに、特色ある多元素分析法として地球化学的試料、環境試料、生物試料などに適用されるようになってきた。

### 2. 光核反応の特徴

光核反応の特徴をまとめると以下のようなになる。

光核反応は光子の波長が丁度原子核の大きさに近くなると双極子共鳴によって光エネルギーを吸収する”巨大共鳴”によって特徴付けられている。共鳴が起きるエネルギーは原子核が大きくなるにつれて低くなり、軽核では20数MeV、重核では10数MeV程度である。この共鳴励起によって励起された原子核からは中性子や陽子が1～2個放出される。ここで生成した残留核は放射性である場合が多い。

30MeVを越えると、より多くの中性子や陽子が放出され易くなるが、巨大共鳴領域から外れるため反応は起こりにくい。60MeVからは原子核内の陽子・中性子対が光を吸収する擬重陽子過程や直接過程が起こるようになり、さらに百数十MeVからは核破碎反応、中間子生成反応も起こるようになり、生成する核種も次第に複雑になっていく。

先に述べたように制動放射は電子の加速エネルギーを最大エネルギーとする連続スペクトルである。その強度は $\Phi(E_{\max}, k)$ で表され、エネルギーが高い場合にはほぼ一定値を示すことが知られている。光核反応の起こりやすさは、反応収率(Y)で表され、励起関数 $\sigma(k)$ と各エネルギーでの光子数 ( $\Phi(E_{\max}, k)/k$ ) の積を制動放射の最大エネルギー ( $E_{\max}$ ) まで積分したもので、以下のようにあらわされる。

$$Y = \int_0^{E_{\max}} \sigma(k) \Phi(E_{\max}, k) dk / k$$

図1は30MeVを最大エネルギーとする制動放射線照射での反応収率（単位： $\text{mol}^{-1}\text{R}^{-1}$ ）を質量数に対してプロットしたものである<sup>1)</sup>。光核反応の反応収率は系統的であり、中性子捕獲反応のように特定の同位体について極端に反応断面積が大きくなるということはない。通常、光量子放射化分析では $(\gamma, n)$ 反応が最も多く利用され、軽元素では $(\gamma, p)$ 反応も用いられる。 $(\gamma, n)$ 反応は重核ほど起きやすく、その反応収率は軽核に比べ2桁以上も大きくなる。 $(\gamma, p)$ 反応ではCa近傍で収率は最大となり、それより重い核ではクーロン障壁によって反応が抑えられる傾向が見られる。

30MeV以上では、 $(\gamma, n)$ 、 $(\gamma, p)$ および $(\gamma, \alpha)$ 反応といった単純な反応の収率はほぼ一定で、 $(\gamma, pn)$ 、 $(\gamma, xn)$ などの多粒子放出反応の収率が次第に増加する。このため、放射化分析では20~30MeV程度のエネルギーまでが、反応も単純で利用しやすい。

### 3. 光量子放射化分析の特徴

光量子放射化分析の特徴をまとめると以下のようなになる。

a) 高エネルギーの光子（制動放射線）は試料中での透過性が大きい。このため、種々の組成を有する試料であっても試料全体を放射化できる。また、同時に多数の試料が照射できる。

b) 重い元素ほど反応が起きやすいことから、天然物試料のように多量の軽元素と微量の重金属を含む試料に対し、存在比に見合ったバランスのとれた感度で多元素分析が行える。

c)  $(\gamma, n)$ 反応の生成核は中性子不足であるために陽電子放出や電子捕獲を伴って壊変するものが多い。特に、軽元素では炭素、窒素、酸素、フッ素の検出には迅速化学分離法を併用し、陽電子壊変からの511keV消滅放射線を検出することで高感度分析が行われている。電子捕獲壊変では特性X線が放射されるため検出にLEPSが利用されている。

d) 中性子放射化分析と比較すると、中性子捕獲反応では反応断面積が著しく大きい元素が共存すると、自己遮蔽が生じたり、強い放射能が生成し微量元素の分析の妨げとなる場合がある。また、U、Thが含まれる場合、その核分裂生成物が定量の妨害となる場合もあるが、光量子放射化分析ではこのような問題は少ない。

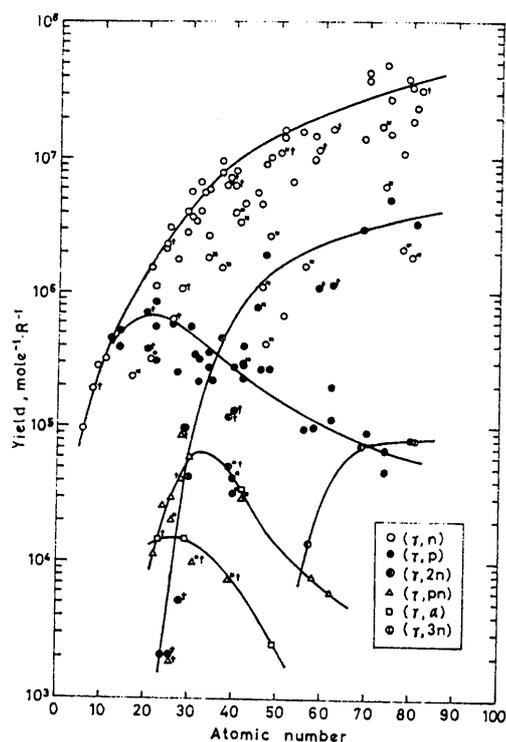


図1. 30MeV照射における光核反応収率。  
横軸：原子番号、縦軸：/単位/mol/R



e) この他、中性子放射化分析では定量の難しいとされる、Mg、Ti、Ni、Y、Zr、Nb、I、TlおよびPb等の分析が可能である。岩石、環境試料では20数元素程度が非破壊分析されている。軽元素をマトリックスとする試料中の重金属を定量する際、照射エネルギーを20MeV程度に下げると軽元素からの生成放射能を抑えることができ効果的である。

表1にPAAに利用される主な光核反応について示した。また、表2には環境試料分析の機器光量子放射化分析(IPAA)における平均的な定量下限を濃度を示した。これらは、照射後最適なSNが得られる時点でGe検出器で測定した場合のピーク面積がバックグラウンド計数の3 $\sigma$ を与える量を濃度として表したものである。

表2. 環境試料のIPAAにおける主な元素の定量下限

定量下限( $\mu\text{g/g}$ )	定量元素 (核種)
400 -	K( $^{38}\text{K}$ ) Fe( $^{56}\text{Mn}$ ), Ti( $^{46}\text{Sc}$ ), Cl( $^{34\text{m}}\text{Cl}$ )
100 -	Ti( $^{48}\text{Sc}$ ), Ca( $^{43}\text{K}$ ) Ba( $^{135\text{m}}\text{Ba}$ ), Ca( $^{47}\text{Ca}$ )
40 -	Zn( $^{67}\text{Cu}$ ), Na( $^{22}\text{Na}$ ) Mg( $^{24}\text{Na}$ ), Br( $^{77}\text{Br}$ )
10 -	Zn( $^{65}\text{Zn}$ ), Pb( $^{203}\text{Pb}$ )
4 -	Mn( $^{54}\text{Mn}$ ), Cr( $^{51}\text{Cr}$ ) Ni( $^{57}\text{Ni}$ ), Sr( $^{87\text{m}}\text{Sr}$ ) Co( $^{58}\text{Co}$ )
1 -	Sb( $^{122}\text{Sb}$ ) Zr( $^{89}\text{Zr}$ )
0.4 -	Rb( $^{84}\text{Rb}$ ), Tm( $^{168}\text{Tm}$ ), Tl( $^{202}\text{Tl}$ ) As( $^{74}\text{As}$ ), Y( $^{88}\text{Y}$ ), Ce( $^{139}\text{Ce}$ ), U( $^{237}\text{U}$ ) Mo( $^{99}\text{Mo}$ ), Cs( $^{132}\text{Cs}$ ), I( $^{126}\text{I}$ )
0.1 -	Nb( $^{92\text{m}}\text{Nb}$ )

#### 4. 照射と照射試料調製

分析を行うには20~30MeVの電子を高出力（平均電流100 $\mu\text{A}$ 程度）で取り出せる施設が必要で、電子リニアックやマイクロトロンが利用されている。

東北大学理学部附属原子核理学研究施設（核理研）での照射方法<sup>2)</sup>の概要を図2に示した。

加速電子は一旦空気中に取り出し、白金板などのコンバータに照射される。コンバータからはビーム前方に強い指向性をもって制動放射線が放射される。試料はコンバータ後方に置かれる。ビーム方向から直角方向に少し外れるとビーム強度は著しく変化するため、ビーム中心に合わせて試料を照射する必要がある。このため、電子ビームのプロファイルを見るためのベリリア(BeO)モニタ、ビーム中心を試料位置に合わせるための白

金モニタがある。コアモニタはビーム強度をモニタするものである。また、制動放射線の強度は距離とともに指数関数的に減衰するため、多数個の試料を同時に照射する場合にはそれぞれの試料でのビーム強度をモニタする必要がある。

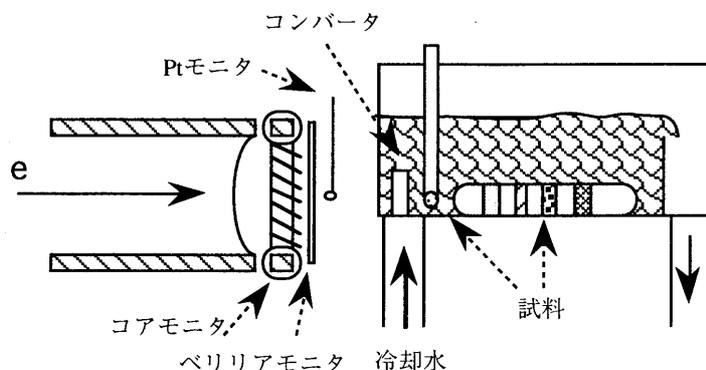


図2. 照射の概要

照射の際に注意すべき点は、コンバータを透過した電子線の影響である。電子線が試料に照射されると著しい発熱により分解や損傷が生じる。そこで、試料は石英管に封入され、水冷下で照射される。

コンバータを厚くすると、電子線の透過は減少するが、制動放射線は広がることになる。また、後に述べるがコンバータで発生する中性子の強度も増加する。核理研ではPtコンバータの厚さを2mmにしているが、この場合50%の電子が透過する。そこで、照射損傷が生じやすい試料では、透過電子数を少なくするためコンバータ直後にグラファイト・ブロック（厚さ10~20mm程度）を置いて照射されている。

比較法では、濃度の分かった標準試料を同時に照射し、目的元素からの生成放射能の比から定量する方法がとられる。中性子放射化に比べて、照射の際のジオメトリには注意が必要である。通常は多数の試料を分析することになるため、個々の試料をペレット状に成型し、アルミフォイルで包装したものを石英管にスタック状に詰め込むことになる。この際、等間隔に標準試料も挟み込み、目的核種の比放射能をコンバータからの距離の関数として求めるようにする。標準試料を数多く使えない場合には、金属箔を試料や標準試料の前後に挟み込み、その生成放射能の変化をモニタすることで、個々の試料に照射された線量を推定することになる。短寿命核種を定量に利用する場合には、1試料毎に照射管に封入し、短時間照射を繰り返すことになる。その際、それぞれの照射管にフラックスモニタを取付ける必要がある。

## 5. 誤差要因

放射化分析では試料調製→照射→（化学分離）→測定→解析といった手順で行われる。照射と測定が分離しているのが通常の分光分析と異なる点である。精度良く、正確に定量を行うには、上記の手順に含まれる誤差の要因を極力除くことが不可欠である。

試料調製による誤差要因としては、適切な標準試料が必要である。照射条件による誤

差要因としては、照射線量や妨害核反応について正しい評価が行われていなければならない。測定では $\gamma$ 線の重なりによる妨害や測定のジオメトリに注意する必要がある。

#### a) 比較試料

比較標準には環境研、地質調査所、NIST、USGS、IAEAなどの機関で調製された標準物質がしばしば利用されている。しかし、各機関から出されている保証値は幾つかの定量法によって得られたものの平均値であり、誤差を含んでいる。また、定量目的とする元素が適当な濃度で含まれていない場合や保証値が与えられていない場合もある。そこで、定量目的元素が定量に適した濃度で含まれ、しかもその元素含有量が正確に分かった合成標準試料を利用することが推奨される。これまで、生物試料類似の組成の合成標準試料としてアクリルアミドゲルの共重合反応を利用して、各種元素を含む水溶液を固化させ、凍結乾燥法により粉末化したもの<sup>3)</sup>、岩石類似のものとしてはテトラエチルシリケートの酸加水分解反応で元素標準溶液を固化、シリカゲル中に均一に保持させたものが利用されている。<sup>4)</sup>

#### b) 比較試料を必要としない定量法

実際に試料に照射された線束は試料内部でモニターするのが理想的である。また、標準試料の検定といった正確さを要求される場合には、比較試料を必要としない定量法が望まれる。この二つの条件を満たすものとして、1) 安定同位体希釈放射化分析法<sup>5)</sup>、2) 標準添加内標準法<sup>6)</sup>がある。

前者は、放射化分析法は元素分析法でありながら、実際には同位体分析法であるという特徴を利用したものである。たとえば、Ceには主な安定同位体として<sup>140</sup>Ce(88.48%)、<sup>142</sup>Ce(11.08%)があり、光核反応でそれぞれ放射性同位体<sup>139</sup>Ce、<sup>141</sup>Ceが生成する。そこで、<sup>142</sup>Ce濃縮同位体を試料に一定量加えたものと試料そのものを放射化し、二つの放射性同位体の生成比の変化を測定すれば、照射線束の補正なしに生成比だけから直ちに定量できることになる。これまで、Ca、Rb、Sr、Znなどの定量を行われてきた。この方法は化学的に同じ挙動をする同位体を内標準にしているため、照射前や照射後に化学分離を行った場合でも、その化学収率の補正が不要であるという特徴もある。以上の方法は、定量目的元素に安定同位体が複数存在すること、測定に適した放射性同位体が生成することが条件となる。

標準添加内標準法は、試料中に含まれる元素を内標準にし、定量目的元素を試料に均一に一定量 (yg) 添加したものと試料そのものを放射化し、内標準元素と定量目的元素から生成する二つの放射性同位体の生成比 ( $R$ 、 $R^*$ 、\*は添加試料) を測定することで定量する方法である。定量式は  $x=y/(R^*/R-1)$  と簡便である。

生物、岩石、環境試料等を分析試料とする場合には、試料中に比較的多く含まれるNa、Mg、Ca、Ti、Feといった複数の元素を同時に内標準に利用し、微量金属元素が定量されている<sup>7)</sup>。この方法では、 $R^*$ のバラツキから標準添加が均一に行われたか、 $R$ のバラツキから分析試料自体は均一か、さらには内標準元素や定量目的元素それぞれの均一性も同時に知ることができる。また、標準添加を行わずに同様の試料処理を行い  $R^*/R$  を求

めると、 $R^*/R < 1$ であれば試料処理の際にロスが生じており、 $R^*/R > 1$ では汚染が生じたことを確認できる。濃度が正確に求められた標準試料を定量すると、どの内標準元素で求めた定量値も+の誤差を与える場合には、定量に利用した核種が他の元素からの妨害反応で生成していることになり、妨害反応のチェックにも利用することができる。このように、生成放射能の比をとることで放射化分析に伴う系統誤差の要因が極力除かれるとともに、自己診断機能を持つ定量法であるため、より多くの元素を正確に同時定量する必要がある場合に適している。

### c) 照射線量の評価

制動放射線は電子ビームの進行方向前方に強い指向性をもって発生する。また、物質内を通過すると指数関数的に減衰する。通常は多数の試料をペレット状にしたものをビーム軸に添って並べて照射するため、試料の前後をフラックスモニタや比較標準試料で挟むことで試料に照射された線量を評価することになる。生成放射能(A)はコンバータからの距離(X)に対してプロットされ、最小二乗法により

$$\log(A) = a + bX + cX^2$$

で表される。試料数が少ない場合には、1次式でも十分である。

この式のbやcは定量に利用する核反応によって異なることも考えられる。このため、1元素のフラックスモニタで照射線量の変化を求めるよりも、多元素標準試料を用いて個々の生成核種について求めたほうがより正確であるといえる。

### d) 妨害核反応

東北大の300MeVライナックの低エネルギー部では30MeV以下、60MeV以上では出力は低下し、30MeVから60MeVまではエネルギーを上げると出力も向上するという特性がある。このため、感度の点からはエネルギーが高い方がよいが、同時に妨害となる核反応も生じることになる。また、京大原子炉の電子ライナックではもともと中性子発生を目的に設計されているため、中性子発生量が多い。このように、個々の加速器で感度良く、しかも妨害を低く抑える条件を検討しておく必要がある。

妨害反応では、光核反応による妨害と中性子反応による妨害を考慮する必要がある。生物、環境試料のPAAでみられる妨害核反応の典型的な例を表3に示した。生物、環境試料中に比較的多く存在するAl、Na、Mg、Ti、Fe、Mnなどはしばしば定量の際の妨害となることがあり、それらの化合物（高純度でなければならない）を同時に照射して妨害の程度を見積っておくことが必要である。とくに、中性子による妨害の程度は、照射環境に大きく影響されるためその都度モニターしておくことが望ましい。

### e) 測定時の問題点（ジオメトリ、 $\gamma$ 線の重なりによる妨害）

測定の際の誤差の問題は放射化分析全般に共通することである。測定時の試料形状には注意が必要で、とくに検出器に密着させて測定する場合には試料厚みなどが検出効率に影響する場合がある。また、陽電子壊変の場合には511keVとのサムコインシデンス、EC壊変の場合には特性X線とのサムコインシデンスにも注意が必要である。

標準添加内標準法や安定同位体希釈法では試料と添加試料の生成放射能に大きな差がないこと、2つの $\gamma$ 線のピーク面積比をもとに定量するためジオメトリの影響は受けにくい。

$\gamma$ 線の重なりによる妨害の例として表4に幾つかの例を挙げた。Tiは照射後早い時点で、Co、As、Iは妨害核種が減衰してから測定するのが望ましい。Zn、Nb、Csでは妨害する核種が2本以上の $\gamma$ 線を放出するため、そのピーク面積比を使って妨害の寄与を差し引くことができる。

表3. 生物、環境試料のIPAAでみられる妨害核反応の例

	定量目的元素	定量に利用する反応	妨害元素	妨害反応
光核反応	Na	$^{23}\text{Na}(\gamma, n)^{22}\text{Na}$	Mg Al	$^{24}\text{Mg}(\gamma, pn)^{22}\text{Na}$ $^{27}\text{Al}(\gamma, \alpha n)^{22}\text{Na}$
	Sc	$^{45}\text{Sc}(\gamma, n)^{44}\text{Sc}$	Ti	$^{46}\text{Ti}(\gamma, pn)^{44}\text{Sc}$
	Mn	$^{55}\text{Mn}(\gamma, n)^{54}\text{Mn}$	Fe	$^{56}\text{Fe}(\gamma, pn)^{54}\text{Mn}$
	Cr	$^{52}\text{Cr}(\gamma, n)^{51}\text{Cr}$	Fe	$^{56}\text{Fe}(\gamma, \alpha n)^{51}\text{Cr}$
中性子反応	Mg	$^{25}\text{Mg}(\gamma, p)^{24}\text{Na}$	Na Al	$^{23}\text{Na}(n, \gamma)^{24}\text{Na}$ $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$
	Fe	$^{57}\text{Fe}(\gamma, p)^{56}\text{Mn}$	Mn	$^{55}\text{Mn}(n, \gamma)^{56}\text{Mn}$

表4. 生物、環境試料のIPAAでみられる $\gamma$ 線の重なる例

定量元素	定量に利用する反応	$\gamma$ 線(keV)	妨害元素	妨害反応	$\gamma$ 線(keV)
Ti	$^{48}\text{Ti}(\gamma, p)^{47}\text{Sc}$	159.4	Ca	$^{48}\text{Ca}(\gamma, n)^{47}\text{Ca} \rightarrow ^{47}\text{Sc}$	159.4
Co	$^{59}\text{Co}(\gamma, n)^{58}\text{Co}$	810.8	Ca	$^{48}\text{Ca}(\gamma, n)^{47}\text{Ca}$	807.9
Zn	$^{68}\text{Zn}(\gamma, p)^{67}\text{Zn}$	184.6	Ga	$^{69}\text{Ga}(\gamma, 2n)^{67}\text{Ga}$	184.6
As	$^{75}\text{As}(\gamma, n)^{74}\text{As}$	595.9	Ca	$^{44}\text{Ca}(\gamma, p)^{43}\text{K}$	593.4
Nb	$^{93}\text{Nb}(\gamma, n)^{92m}\text{Nb}$	934.5	Fe	$^{54}\text{Fe}(\gamma, pn)^{52}\text{Mn}$	935.5
I	$^{127}\text{I}(\gamma, n)^{126}\text{I}$	388.6	Y	$^{89}\text{Y}(\gamma, 2n)^{87}\text{Y} \rightarrow ^{87m}\text{Sr}$	388.4
Cs	$^{133}\text{Cs}(\gamma, n)^{132}\text{Cs}$	667.7	I	$^{127}\text{I}(\gamma, n)^{126}\text{I}$	666.4

## 6. 軽元素の定量

PAAは軽元素の分析にも威力を発揮している。ここでは、炭素<sup>8)</sup>とフッ素<sup>9)</sup>の分析について紹介する。いずれも、511keV消滅放射線を測定することになるため、化学分離の併用が不可欠である。

### a) 炭素の定量

GaAs結晶中の微量炭素のルーチン分析には赤外吸収法が利用されているが、従来使用されてきた検量線を確認するため標準物質の濃度検定を実施した。照射後、生成する<sup>11</sup>C（半減期20分）を燃焼法によってCO<sub>2</sub>として捕集し、BaCO<sub>3</sub>として沈殿分離した。照射から測定までの20分で完了し、感度は10<sup>15</sup> atom/cm<sup>3</sup>であった。この結果、従来の赤外吸収強度と濃度の換算係数は1.7倍であることが分かった。荷電粒子放射化分析では試料表面の情報を与えるのに対し、光量子放射化分析は試料の平均濃度を出すのに適していた。

### b) フッ素の定量

フッ素の分析法としては、通常イオン電極法が用いられているが、低濃度の試料の定量は難しい。そこで光量子放射化分析で高感度に定量するための方法を検討した結果、20MeVで照射後パイロリシス法によってフッ素を分離し、LaF<sub>3</sub>沈殿で捕集分離する方法をとることにした。定量感度は0.06ppmであり、フッ素濃度が10ppm以下の強塩基性岩石なども容易に定量出来た。

軽元素分析では荷電粒子放射化分析(CPAA)が利用されることが多い。CPAAは試料の表面から数10μm程度の情報を与える。試料内を荷電粒子が進むにつれて減速するため、生成放射線の強度分布は深さと共に変化する。このため、試料中での入射粒子の飛程や阻止能を求めなければならない、表面の汚染が定量に著しく影響する、等の点に注意する必要がある。これに対し、PAAは試料全体を放射化できるため、バルク分析に適した方法といえる。

## 7. 光量子放射化分析が行える共同利用施設

### a) 東北大学理学部附属原子核理学研究施設設置の300MeV電子ライナック

東北大学理学部附属原子核理学研究施設設置の300MeV電子ライナックは多目的利用を主眼に設計され、加速エネルギーが70MeVまでで、高い電流値を得ることを目的とするA部とエネルギーを300MeVまで上げることを目的とするB部からなっている。放射化分析やラジオアイソトープ製造等を目的とする研究は主にA部で加速された電子を第一実験室に導いて行われており、学内にとどまらず他大学、公立研究所、民間企業の研究者に幅広く利用されてきた。照射設備は固定されている。照射後の試料の開封、測定は別棟の第三実験室（RI実験室）で行う。

### b) 京都大学原子炉実験所の中性子発生装置（電子ライナック）

京都大学原子炉実験所の中性子発生装置はその名称のように、中性子発生を目的に設

置された電子ライナックである。このため加速エネルギーは低いが、出力が大きいという特徴がある。照射エネルギーが20MeV程度でも高い電流値が得られるため、軽元素を主成分に含む天然物試料（岩石、植物）等の中の重金属元素の分析にも適している。放射化分析を行うにはその都度照射設備を設置する必要がある。照射後の試料の開封、測定はKURのホットラボで行うことになるため、原子炉運転期間を避けた方がよい。

実験は1週間単位の採択となるので、数グループがまとまって1課題を申し込むのがいいと思われる。

## 8. まとめ

最近核理研を利用して行われた分析には、1) 材料：[銅などの非鉄金属中の炭素の定量、タンゲステンシリサイド中の炭素の定量、石英ガラス中のフッ素の定量など]、2) 生物試料：[家畜から採取された各種臓器の分析など。低エネルギー $\gamma$ 線を検出し定量するため、LEPSの利用も試みられた]、3) 環境試料：[土壌、フライアッシュ、大気浮遊塵、沈積物など]、4) 岩石試料：[国内外から採取された火山岩、堆積岩、地質調査所配付の標準岩石]などが挙げられる。

このような光量子放射化分析の特徴を生かして種々の試料を分析してみようという方々があれば是非利用していただきたい。

## 参考文献

- 1) T. Kato, Y. Oka : Talanta 19(1972)515.
- 2) M. Yagi, K. Kondo : J. Radioanal. Chem. 36(1977)247.
- 3) K. Masumoto, N. Suzuki : Radiochem. Radioanal. Lett. 42(1980)99.
- 4) J.W. Mitchell, L.D. Blitzer, T.Y. Kometani, T. Gills, L. Clark, Jr.: J. Radioanal. Chem. 36(1977)335.
- 5) K. Masumoto, M. Yagi : J. Radioanal. Chem. 79(1983)57.
- 6) M. Yagi, K. Masumoto : J. Radioanal. Chem. 83(1984)319.
- 7) K. Masumoto : J. Radioanal. Nucl. Chem. 203(1996)37.
- 8) A. Yoshioka, K. Nomura, O. Kawakami, K. Shimura, K. Masumoto, M. Yagi : J. Radioanal. Nucl. Chem. 148(1991)201.
- 9) H.Sakurai, M.Fukuda, Y. Hayashibe, Y.Sayama, K.Masumoto, T.Ohtsuki : J. Radioanal. Nucl. Chem. (1997)in press.

## 参考図書

- 1) C. Segebade, H.-P. Weise, G.J. Lutz : "Photon Activation Analysis" (Walter de Gruiter, 1988)

(高エネルギー加速器研究機構・田無分室 榎本 和義)

# 放射化分析による植物葉中の 元素の特異集積について

京都大学原子炉実験所

原子炉安全管理部門 高田 實彌

### 緒論

中性子放射化分析法の具体的な応用分野は多岐にわたっている。それは大気、水、地殻試料を対象とする地球・宇宙科学にはじまり、地球環境汚染物質、微生物、植物、動物体中の組織を対象とする生物学、さらに半導体、高純度物質、核融合炉材料等を対象とする材料科学、および考古遺物を対象とする考古学など、自然科学から人文科学にまで及んでいる。

環境試料の一つである高等植物の葉は、その中に含まれる微量元素が生育環境をどのように反映しているかを推定するのによく用いられる。生物圏における元素の存在量動態の情報を得ることは環境問題の上からも重要であり、固体のまま非破壊で一試料平均20元素の定量ができる放射化分析法こそが最適な方法であると考えて、高等植物の元素の分析を始めた。

### 実験

試料とその調製：植物葉はイオン交換水で洗浄し、ガーゼを用いて葉面に付着した塵埃等を拭き取り、蒸留水中で濯ぎ洗いをした。つぎに、葉面に残った水分を濾紙で拭き取り、80℃で24時間乾燥した。また、土壌試料は風乾後、ふたたび80℃で24時間乾燥した後、50メッシュの篩にかけ、通過分を分析試料とした。植物の葉は短時間の照射用に50～100 mg、土壌試料は30～50 mgを、長時間用には200～500 mgを秤量し、清浄なポリエチレン袋に封入し照射試料として調整した。

放射化と測定：試料の中性子照射はKURの圧気輸送管（熱中性子束密度：約 $2.2 \sim 2.7 \times 10^{13} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ ）を用いた。10～20秒間照射後、直ちに $\gamma$ 線を測定すると、Al, V, Ca, Mg, Mn, Clそして希にDyのような短寿命核種が定量できた。Na, K, Brを定量するためには1日冷却したのち、 $\gamma$ 線を測定した。Fig. 1には照射直後に測定したシラキ（*Sapium japonicum*）の $\gamma$ 線スペクトルを示す。横軸は $\gamma$ 線のエネルギーを、縦軸はチャンネルごとの $\gamma$ 線の計数値の対数値を示す。中・長寿命核種の場合には試料を1時間照射した後、7～30日間冷却後に測定した。検出されたすべての核種の定量は、試料と同時に封入したモニター用標準試料と同時

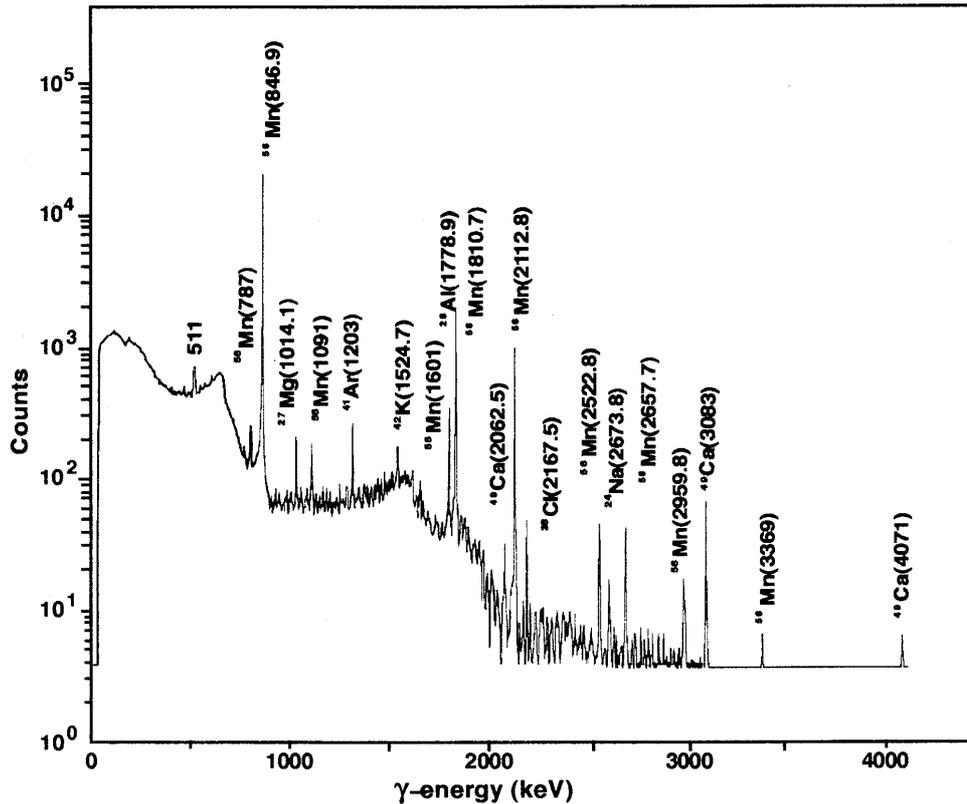


Fig. 1  $\gamma$ -ray Spectrum of Shiraki (*Sapium japonicum*) measured 3 minutes after irradiation.

に照射し、これらの放射化率と核データ及び検出器の検出効率とから値を相対的に計算するKoyama *et al* (1987) が開発した所謂コンパレーター法によって行った<sup>1)</sup>。標準試料としては、短寿命測定用に Na (200 ~ 500  $\mu$ g), Mn (5  $\mu$ g) を、長寿命測定用に Co (25  $\mu$ g), Sb (10  $\mu$ g) を、それぞれ水溶液として一定量をミリポアフィルター(HAWP)に滴下し、蒸発乾燥させたものを用いた。

## 結果

花崗岩、安山岩、蛇紋岩、石灰岩等を母岩とする、それぞれ異なった土壤に生育する 400 種以上の植物種について、3,000 件以上の試料を採集し、放射化分析を行った。得られた測定値のすべては国立環境研究所資料<sup>3)</sup>に網羅されている。データの一部を Table 1 に示す。

### 1. 植物による特定元素の集積について

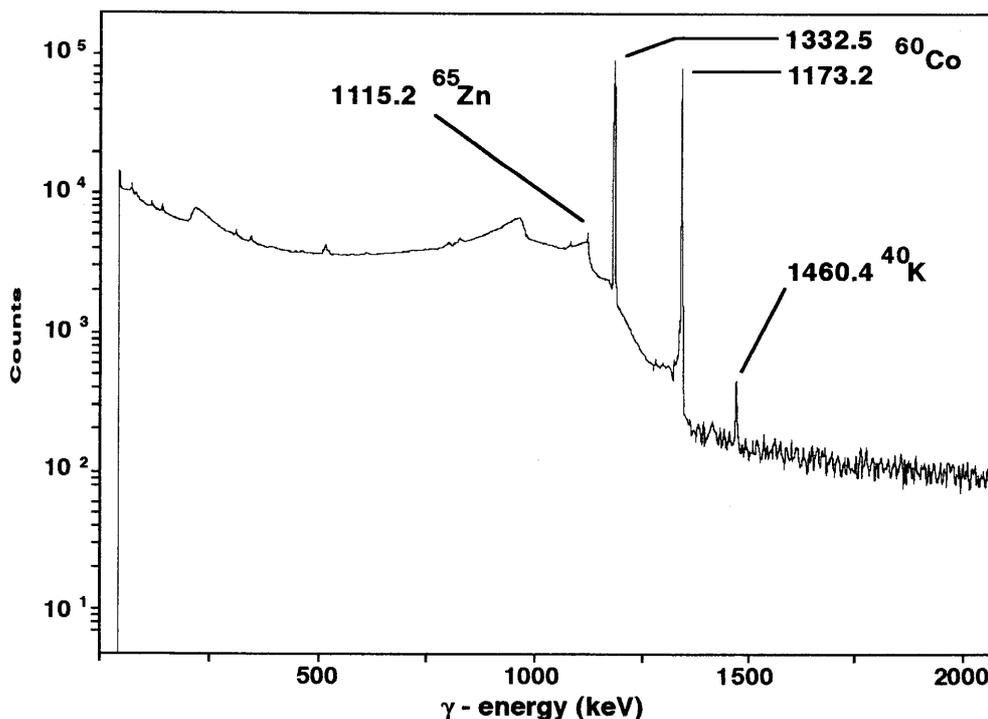
Coが高濃度で見いだされる植物は、すでにいくつか知られている。たとえば、1958年 Yamagata and Murakami によって発見されたりヨウブ (*Clethra barbinervis*)<sup>4)</sup> が有名である。リョウブの発見はしかし、たまたま重金属類を多く含む鉱床周辺で発見されたものであって、一般の土壤環境中に生育する植物については本格的な調査がなされていなかった。集積植物探査の一環として、Co 集積植物の検索に重点を

**Table 1 Concentrations of particular elements in accumulators and concentration ranges of those elements in plants in general**

Elements	Accumulator		Concentration		Conc. in Ordinary Plants	
	Plant Name	Family Name	in Accumulator	Present Work	Present Work	Bowen's Value*
Al	<i>Eurya japonica</i>	Teaceae	15,800	10-800	10-800	90-530
Sc	<i>Camellia sinensis</i>	Teaceae	1.06	0.002-0.1	0.002-0.1	0.01-0.03
R.E.(La)	<i>Gleichenia dichotoma</i>	Gleicheniaceae	740	0.003-5	0.003-5	0.003-15
(Lu)	<i>Alnus forma</i>	Beturaceae	1.52	0.0005-0.1	0.0005-0.1	0.03
V	<i>Sphagnum palustre</i>	Munsi	6.19	0.015-1.0	0.015-1.0	0.001-0.5
Cr	<i>Alnus forma</i>	Beturaceae	3.7	0.02-1.0	0.02-1.0	0.03-10
Mn	<i>Acanthopanax sciadophyloides</i>	Araliaceae	25,300	10-2,000	10-2,000	20-700
Fe	<i>Alnus pendula</i>	Beturaceae	820	20-200	20-200	70-700
Co	<i>Sapium japonicum</i>	Euphorbiaceae	100	0.001-1.0	0.001-1.0	0.005-1
Zn	<i>Ilex crenata</i>	Aquifoliaceae	850	2-100	2-100	20-400
Cd	<i>Bensoin umbellatum</i>	Lauraceae	19	0.5-2	0.5-2	0.1-2.4
Rb	<i>Benzoin umbellatum</i>	Lauraceae	220	2-100	2-100	2-50
Ba	<i>Gleichenia glauca</i>	Gleicheniaceae	880	10-200	10-200	8-150
Br	<i>Metasequoia glyptostroboides</i>	Taxodiaceae	180	0.2-20	0.2-20	15?
I	<i>Metasequoia glyptostroboides</i>	Taxodiaceae	8	0.0005-0.1	0.0005-0.1	3-5?

\* ; Reference 2)

置いた。その結果、沖縄本島にある琉球大学農学部演習林で採取したトウダイグサ科のシラキには、周辺に金属鉱床がないにもかかわらず 100 ppmもの Co が含まれていることを見い出した。一般に、Co 集積植物でない普通の植物の Co 含量は 0.001~1.0 ppmの範囲にあるので、琉球大学演習林で採集したシラキは特異的に高濃度のCoを含んでいることがわかった。Fig. 2に照射試料として実際に測定したシラキ葉の $\gamma$ 線スペクトル図を示す。このスペクトラムは長寿命の測定であるが、Coの $\gamma$ 線エネルギーが強すぎるために、他の長寿命核種の $\gamma$ 線ピークがCoのコンプトン散乱によって妨害され、定量できなかった事実を示している。すなわち、シラキの葉にはCoが顕著に集積していたことが明らかである。また、トウダイグサ科植物の一連の測定結果<sup>5)</sup>からシラキ以外の植物のCoの分析結果をTable 2-1, 2-2に示す。この表からもトウダイグサ科の植物は一般の植物よりもCoを多く含み、Coの集積特性はトウダイグサ科の植物に共通した固有の性質であることがあきらかとなった。



**Fig.2**  $\gamma$  -ray spectrum of Shiraki (*Sapium japonicum*) measured 50 days after irradiation.

Co 以外にも分析した元素の中には、特定の植物が通常の植物に含まれているよりもはるかに高い濃度で見いだされた例があった。これらの例をあげてみると、ヤマナラシ(*Populus sieboldii*)やヤナギ類が Zn を集積しており、モチノキ科のイヌツゲ(*Irex crenata*)も Zn の集積植物であった。Mnの集積植物は、これまでツバキ科のツバキ(*Camerllia japonica*), ヒサカキ(*Eurya japonica*), チャ(*Camerllia sinensis*), サザ

Table 2-1 Concentrations of Cobalt in *Euphorbiaceae*  
except for *Sapium japonicum*

Sample I		Co Conc. (ppm)	Site
Japanese Name	Botanical Name		
Urajiro kankonoki	<i>Glochidion acuminatum</i>	64.0	a
		47.5	a
Yamahihatsu Kankonoki	<i>Antidesma japonicum</i>	26.5	a
	<i>Glochidion obovatum</i>	21.1	a
Shina aburagiri	<i>Vernicia fordii</i>	2.72	c
		15.6	a
		2.63	h
Kakiba kankonoki	<i>Glochidion zeylanicum</i>	13.4	a
		13.2	a
		2.37	c
Hirami kankonoki	<i>Glochidion rubrum</i>	6.71	f
Akahada kobannoki	<i>Nargaritaria indica</i>	5.70	a
Nankinhaze	<i>Sapium sebiferum</i>	5.62	g
		2.24	a
Akagi	<i>Bischofia javanica</i>	3.05	b
		2.12	a
		1.83	a
		1.83	a
		1.45	a
		1.18	a
		0.881	c
		0.431	d
		0.413	d
		0.388	c
Akamegashiwa	<i>Nallotus japonicus</i>	0.366	d
		0.179	d
		2.66	e
		0.102	c
		0.102	a
		0.0427	i
		0.0306	c
		0.0257	c

- a : Experimental Plantation of Faculty of Agriculture, Univ. of the Ryukyus, Okinawa Prefecture (Pareozoic)  
b : Okinawa Prefectural Forestly Experimental Station, Okinawa Prefecture  
c : Iriomote Island, Okinawa Prefecture (Sandstone)  
d : Mt. Heto, Okinawa Prefecture (Sandstone)  
e : Miyako Island, Okinawa Prefecture (Limestone)  
f : Ishigaki Island, Okinawa Prefecture (Granite and Andesite )  
g : Research Reactor Institute, Kyoto University, Osaka Prefecture  
h : Experimental Field in Kyoto Univ. Campus (Granite)  
i : Yamanaka Pass, Kyoto Prefecture (Granite)

ンカ(*Camerllia sasanqua*), などが知られている。これらの他に、ウコギ科でコシアブラ(*Acanthopanax siadophylloides*)がツバキ科よりも高い含量のMnを集積していることが判明した。たとえばコシアブラが 25,000 ppm もの Mn を集積していた場合があった。またコシアブラより含量は低いが、タカノツメ(*Evodipanax innovans*)がツバキ科と同様Mnを集積していたことが新たに判明した。このほか、ランタニド元素を高含量に集積していた植物の例として、コシダ(*Dicranpteris dichotoma*)、ウラジロ(*Gleichenia japonica*)が見いだされた。

Table 2-2 Concentrations of Cobalt in *Euphorbiaceae*  
except for *Sapium japonicum*

Sample		Co Conc.	Site
Japanese Name	Botanical Name	(ppm)	
Midori sango	<i>Euphorbia tirucalli</i>	1.94	e
Kuroton	<i>Codiaeum variegatum</i>	0.0983	b
		0.845	e
		0.621	b
		0.462	b
		0.354	b
Iriomote nishikiso	<i>Euphorbia thymifolia</i>	0.622	c
Sango aburagiri	<i>Jatropha podagrica</i>	0.461	e
Kyassaba	<i>Manihot esculenta</i>	0.425	a
		0.186	c
		0.0619	c
Komikanso	<i>Phyllanthus urinaria</i>	0.389	a
Enokigusa	<i>Acalypha australis</i>	0.388	b
Syjoboku	<i>Euphorbia pulcherrima</i>	0.238	e
		0.224	g
		0.109	g
Amami hitotsubahagi	<i>Securinega suffruticosa</i>	0.211	d
Urajiro akamegashiwa	<i>Mallotus paniculatus</i>	0.211	d
		0.0961	c
		0.0613	c
Oobagi	<i>Macaranga tanarius</i>	0.177	a
		0.161	e
		0.144	c
		0.0675	f
Shima yamahihatsu	<i>Antidesma pentandrum</i>	0.164	d
Maruba akarifa	<i>Acalypha wilkesiana</i>	0.120	e
Akarifa		0.0531	b
Sankakukirin	<i>Euphorbia neriifolia</i>	0.0924	b
Shima shiraki	<i>Excoecaria agallocha</i>	0.0508	c
		0.0262	c
Kobano nishikiso	<i>Euphorbia makinoi</i>	0.0507	g
Teikinzakura	<i>Jatropha hastata</i>	0.0227	b

- a : Experimental Plantation of Faculty of Agriculture, Univ. of the Ryukyus, Okinawa Prefecture (Pareozoic)  
b : Okinawa Prefectural Forestry Experimental Station, Okinawa Prefecture  
c : Iriomote Island, Okinawa Prefecture (Sandstone)  
d : Mt. Heto, Okinawa Prefecture (Sandstone)  
e : Miyako Island, Okinawa Prefecture (Limestone)  
f : Ishigaki Island, Okinawa Prefecture (Granite and Andesite)  
g : Research Reactor Institute, Kyoto University, Osaka Prefecture  
h : Experimental Field in Kyoto Univ. Campus (Granite)  
i : Yamanaka Pass, Kyoto Prefecture (Granite)

一般に集積植物の定義は、通常の植物に見いだされる元素含量の範囲を越える量の当該元素を含んでいる植物とされている。しかし、この定義は曖昧で、後述するように植物の元素含量はそれが生育している土壌やその母材である岩石の元素含量の影響を受ける。したがって、土壌の元素含量が異なれば植物に含まれる元素含量にも差異が生じるため、異なる元素組成を持つ土壌から採取した植物試料を比較検討しないと集積性を示す基準も明確には定義できない。そこで、統計的に集積植物を検索する方法を検討することにした。各種の元素組成の異なる土壌から採取・分析した多数の植物から、集積植物を見いだすための基準として以下のような方法を採用した。すなわち、植物の元素含量をいったん対数に変換し、この変換値から平

均値および標準偏差をもとめ、再びこの数値から逆対数をもとめた。つぎにこの平均値に標準偏差の2倍の値を加算し、これよりも高い元素含量を示した植物とその元素の例を抽出した。こうして検索した植物種の中には、先にあげた Mn や Zn の集積性を示す植物が例外なく抽出されたので、集積植物の検索方法として有効であるとおもわれる。しかし、集積植物そのものの定義を明確にするには、さらに多数の植物について分析例を検討しなければならないし、異なった土壤に生育する植物を、この検索方法で同等に処理してよいか、さらに検討する必要がある。

あきらかとなった集積植物に集積される元素には、植物の必須元素と、必須ではない元素とがあった。例えば Mn や Zn は植物の必須元素であるが、Co やランタニド元素は非必須元素である。こうした元素が特定の植物に多量に吸収される根拠となる生理的意義はまだ未解明のままである。Mn や Zn のような微量必須元素は、植物体内では酵素活性の中心的な役割を果しているが、それに必要な量は微量必須元素と言われるように、多くを必要とはしない。こうした元素が必要以上に高濃度で植物体内に濃縮される意義については、今後の研究を待たねばならない。

## 2. 植物の生育環境と元素組成の関係

岡山県での採取事例を Fig. 3 に示す。すなわち母材（岩石）の異なる複数の地域で母材、土壤及びそこに生育する植物の葉を採取・元素分析を行った結果の一部をまとめたものである。採取地（玄武岩・蛇紋岩・花崗岩；ウラン鉱ズリ）ごとに岩石・土壤と植物の分析値からもとめた最大値・中央値・最小値を元素ごとに表示した<sup>6)</sup>。岩石・土壤の元素組成で比較するともっとも特徴的だったのは蛇紋岩の例で、他の岩石や土壤では Ca 含量が Mg 含量よりも高い値を示したのに対し、蛇紋岩では Mg 含量が Ca よりも高い含量を示していた。しかし中央値で比較した植物の Mg, Ca 含量は岩石や土壤の含量が異なってもよく似た値を示していた。

Mg, Ca は植物の必須元素であるため、根系からの吸収や地上部への移行に関して制御されていると考えられる。このことは K にも該当し、これらの多量必須元素では範囲すなわち最大値と最小値との幅が、分析した他の元素に比べて狭いことから植物の制御が働いていることを示唆している。この図に示した他の Zn, Mn, Fe などの必須元素は、K, Mg, Ca よりも含量は少なく、しかも岩石や土壤の含量よりも小さい値を示していたが、これは植物の要求量が少ないこと、過剰に吸収した場合には過剰傷害が起こるために吸収量が制御されていると考えられる。とくに Fe, Mn は土壤中における可給度（植物が吸収可能な土壤中の元素の量）が小さいことも影響している。これらの元素では溶解度の大きい原子価がともに還元状態の2価であるため、通常酸化的雰囲気にある土壤中では溶解度が大きくても相対的に可給態で存在する量が小さい。このために Fe, Mn では植物の範囲が狭くなっている。Zn は Fe, Mn よりも範囲が広がっていたが、これは採取した植物の中に Zn の集積植

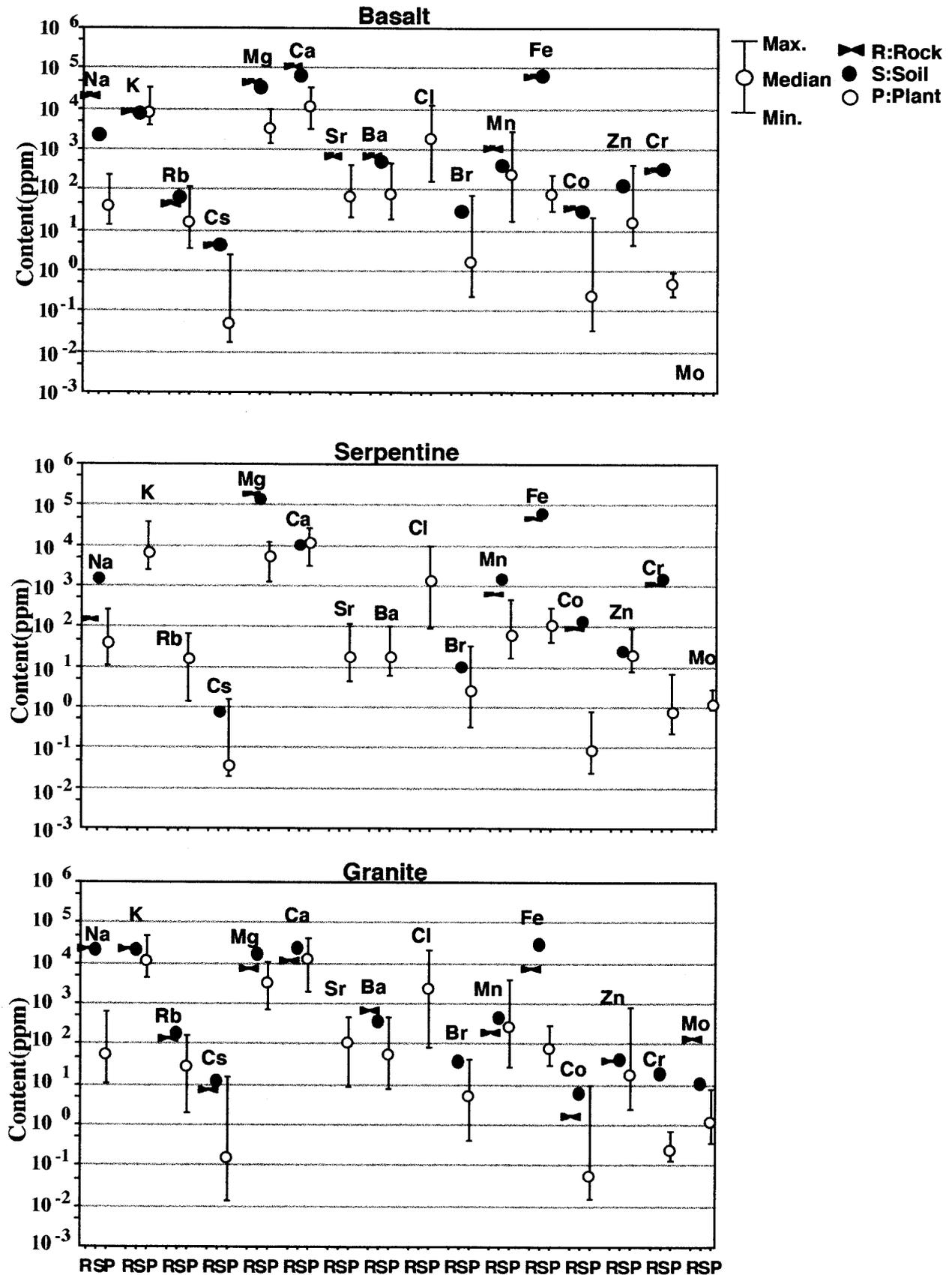


Fig. 3-1 16 element contents in basalt, serpentine and granite and their weathered soils and ranges of element contents in plant, collected at Okayama Prefecture.

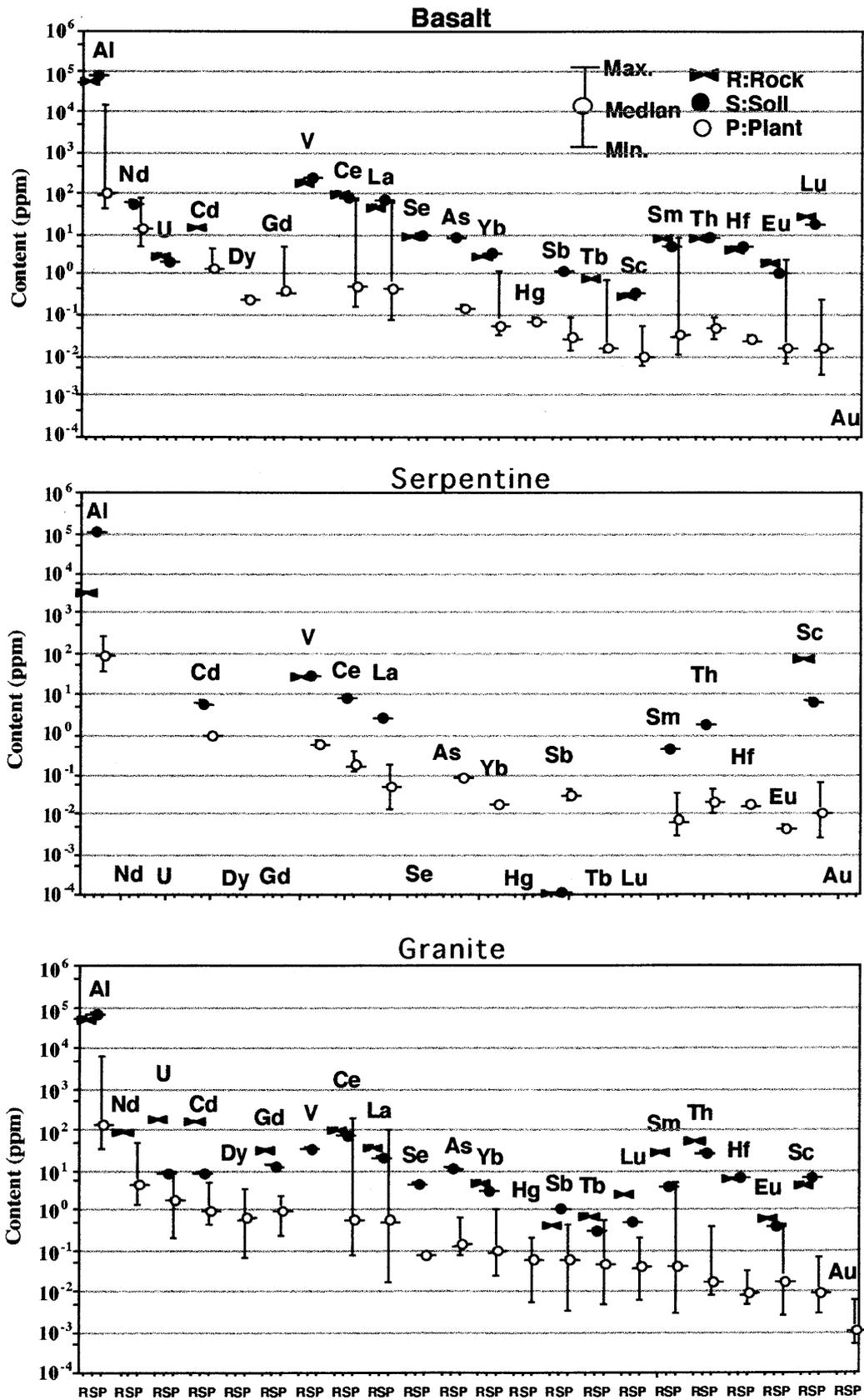


Fig. 3-2 22 element contents in basalt, serpentine and granite and their weathered soils, and ranges of element contents in plant, collected at Okayama prefecture.

物が含まれていたためである。採取したなかに集積植物が含まれていたかどうかは、Co の場合をみるとあきらかである。集積植物が含まれていなかった採取地ではCoの範囲が狭いが、含まれていた場合には範囲が広がっていた。Fig. 3-2 は非必須元素のみを表示してあるが、蛇紋岩地帯の岩石・土壌で特徴的であったのはランタニド元素の含量が低く、アクチニド元素も Th が分析されたのみであった。これは花崗岩でランタニドやアクチニド元素含量が高かったのと対照的であった。また、母材や土壌が蛇紋岩・花崗岩の中間の組成を持っていた玄武岩では、植物の元素組成も両者の中間の値を取り、植物が生息地の元素組成を反映していることがあきらかであった。

Fig. 4に花崗岩・その風化土壌及びそこで採取した植物葉のランタニド元素含量を抜き出して、原子番号順に並べて図示した。岩石・土壌のランタニド元素組成は原子番号が奇数のものより偶数番号の方が高い含量を示していた。これも岩石や土壌の元素含量が植物に反映していることの証拠と考えられる。

以上のように、植物の元素組成は母材・土壌の元素組成を反映しており、その傾向は必須元素よりも非必須元素でより明瞭に示された。必須元素ではこの傾向があまり見られなかった理由として、植物が必須元素を土壌中から吸収する際に能動的な吸収を示すため、植物に含まれる必須元素の量は吸収に際して厳密な制御を受けている事実を示唆するものと結論した。

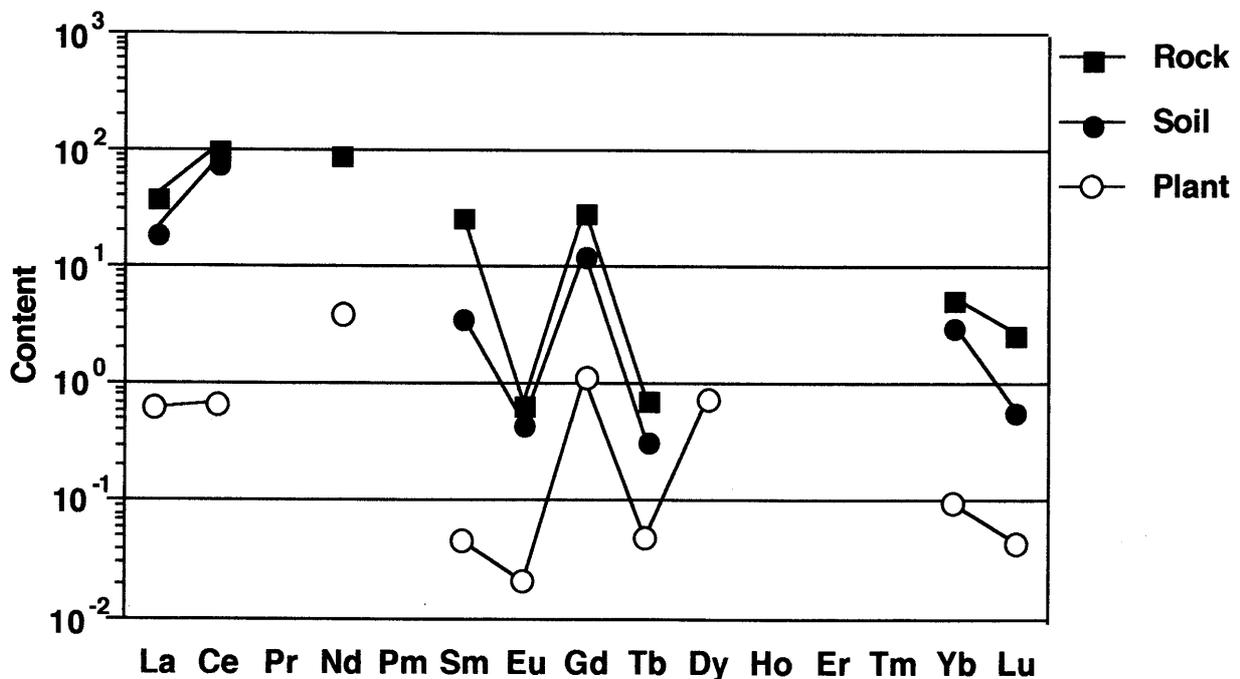


Fig. 4 Representative scheme for abundances of rare-earth elements in rock, soil and plant samples collected at a granite area in Okayama Prefecture.

### 3. 植物群の違いに基づく元素分布の特徴

前節では岩石・土壌の元素含量と植物の元素組成との関係に注目して考察したが、土壌の元素組成を植物が反映しているとはいっても植物の種類によって元素含量に大きな違いのあることが示されていた。これは種によって各種元素の吸収特性が異なるためと考えられる。そこで分類学上の大きな群に採集した植物をまとめ、元素組成の違いを検討することにした。

採取植物を双子葉・単子葉・裸子および羊歯植物に大別し、それぞれの植物群ごとに基本統計量をもとめ図に示した。Fig. 5にその結果を示した。中央値で比較すると K, Cl, Br, Fe 以外の元素では単子葉類と裸子植物の元素含量は低い傾向にあり、双子葉植物と羊歯植物の方は高い値を示した。また、比較した植物群の中では羊歯植物はほとんどの元素含量が高い傾向にあることがわかった。この結果はNishimura *et al* (1989) の報告<sup>7)</sup> とよく一致しており、単子葉・裸子植物は双子葉植物よりもやや低い元素含量を示すこと、羊歯植物には元素含量がきわめて高いものとそうでないものがあり、これが羊歯植物で範囲が広がっていた理由である。この結果からは明確な結論を導き出すことはできないが、双子葉・羊歯植物では、植物の種類によって元素含量に特徴的な種が存在することを示唆しており、種単位あるいは属やその上の科単位でまとめた元素組成の特徴を示す可能性を示唆するものと考えられる。

### 結語

環境汚染の指標として植物体内に濃縮された各種元素の量やその植物種による違い、さらに植物の生長する環境の影響等を総合的に調べる事を目的とした(故)小山教授の研究テーマで、植物を環境の指標として使用するためには元素の濃度レベル特異集積性等に関する基礎データを集めることが必要である。現在、これらの集積を基にして植物に含まれる元素量とその分布、生育環境との関係、植物種としての固有の元素含量、分布として明確に断定できる値があるかどうか等々の問題に関する規則性を引き出すための努力を続けている。小山教授が生存されていたら今年3月には退官のはずだったが、故人となられて9年、ようやくその果実が少しずつ実りかけてきたところである。

植物葉の放射化分析のデータは膨大である。ここに取り上げたのはほんの一部であるが、特定の元素を集積する植物が、分析した中から見いだされた。元素では Al, Mn, Co, Cr, Zn, 希土類元素などになるが、それぞれ元素を集積する植物の種

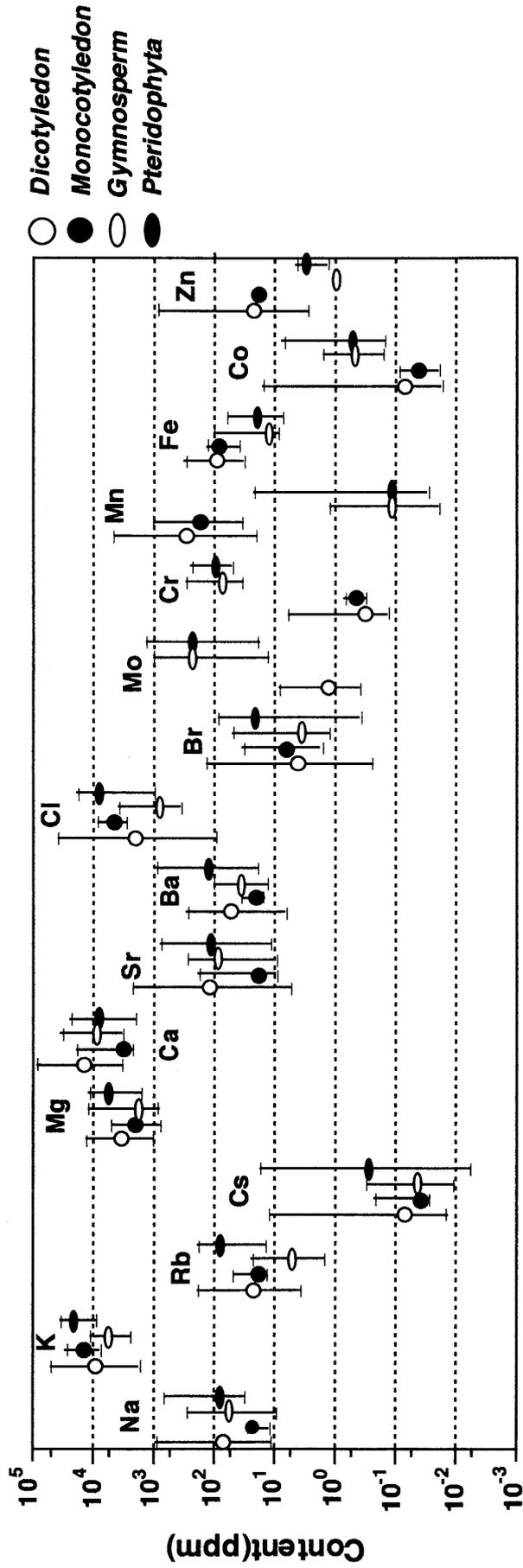


Fig. 5 Ranges and median values of 16 element contents in leaves divided to four major plant groups collected from some sampling sites in Okayama Prefecture.

類が異なる事実が明かとなった。また、土壌によって差の出る元素とそうでないものがあった。植物の元素含量は種によって異なっており、それぞれ、特有の元素含量を示すと考えられる。従って、植物の吸収・集積特性を組み合わせると生育土壌の環境指標として有効なことが明らかとなった。

集積が当該植物の種としての固有の性質によるものである事が確定された場合に、なおその性質が遺伝子の介在を含むものかどうかと云う疑問が残る。それについては、集積に関与する蛋白質等の単離や同定等の生化学的なアプローチも必要となるであろう。また、集積の生理学的意義についても明らかにしなければならない。そうした研究の進展はただ特定の元素を集積する植物種の枚挙や集積のメカニズムを明らかに出来るのみに留まらず、生物進化の長い道程において、土壌と植物との間で培われ、或る時は耐性を得て適応し、また或る時には積極的に利用する等々両者間で果てしなく繰りひろげられてきたであろう相互作用の歴史をも明らかにするものと考えられる。近年、急速に発達してきた放射化分析の技術がこうした方面の研究にも大いに役立つ事であろう。

#### 文献

1. M. Koyama, R. Matsushita and J. Takada : *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **113**, 199-207 (1987).
2. H. J. M. Bowen : *Environmental Chemistry of the Elements*, Academic Press. Inc., London 333pp (1979).
3. 高田実弥、高松武次郎、佐竹研一、佐瀬裕之 : 陸上植物葉の元素濃度—中性子放射化分析データ集 (I) —, 国立環境研究所資料, F-58-'93/NIES 260pp (1993).
4. N. Yamagata and Y. Murakami : *Nature*, **181**, 1808-1809 (1958).
5. 高田実弥、松原丘、片山幸士、西村和雄、赤星光彦、小山睦夫 : *Viva Origino*, **21**, 207-212 (1993).
6. J. Takada, K. Nishimura, M. Akaboshi, T. Matsubara, Y. Katayama and (late) M. Koyama : *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **217** (1996) in press.
7. K. Nishimura, Y. Miyake and E. Takahashi : *Mem. Coll. Agric. Kyoto Univ.*, **133**, 23-43 (1989).

# 地球化学図による地圏環境評価と放射化分析

名古屋大学大学院 理学研究科 田中 剛

### 1. はじめに

大気中の二酸化炭素の増加による地球温暖化の危惧を契機として始まった地球環境への関心の高まりは、我々自然科学の研究にたずさわる者にとって大変ありがたいことです。しかし、この関心は専ら大気圏や水圏（すなわち地球の気体や液体部分）の変化に寄せられ、地圏（地球の固体部分）に注がれることはまれです。それは化学反応と同じで、液体や気体部分では全地球的反応（汚染・拡散）が速く、認識・注目されやすいのに比べ、固体部分では拡散や反応が遅く、目立たないことと共通したことです。ところが、大気圏や水圏の汚染はその原因が除かれれば元の状態への回復は早いものの、地圏の汚染は、固体の反応が遅いように、いったん発生すると原状回復に地質学的な時間が必要なことは水俣の例が示していることです。

私たちはまた、「汚染！汚染！」といますが、そのまえに地圏におけるその元素のバックグラウンドがどれほどあるのか、地域による違いはどれほどなのかについて、ほとんど知識も情報も持っていません。以下の小文は、汚染を見いだすのではなく自然界のバックグラウンドとその変動がどれほどあり、その変動を規制する要因が何であるかを見いだす手法の提案です。もちろん研究の過程で人為的な所作を評価できれば望外の成果です。

### 2. 地球化学図とは

皆さんは中学や高校で理科を学ばれたことと思います。理科は物理、化学、生物、地学に分けられており、地圏に見られるさまざまな情報もこの物理、化学、生物、地学に対応した形で整理されています。山に登るときには地形図をもって行きます。地形図は高低・方向・距離など地球の物理情報を示したものです。同様に地質図は岩石の種類や断層など地圏の地学情報を表すもので、植生図は地圏の生物情報を表すものです。では、地圏の化学情報を表すものは何でしょうか？ それが地球化学図です。

地球化学図はもともと有用な資源元素を胚胎する鉱床探査を目的として発達したものです[1,2]。欧米先進国では環境評価を目的とし、全国土をカバーする地球化学図をもつイギリスやドイツなどがありますが[3]、日本国内における研究は数えるほどしかありません[4,5,6]。研究の少ない理由として、地圏の環境を面的に評価しようと思えばたくさんの試料についてたくさんの元素を分析しなければならず、これはとても大変な事だったからです。しかし、発光分光、ICP発光分光、ICP-MS、蛍光X線、中性子放射化など近年の分析手法の発達のおかげでこの大変なことが少し容易になり、やっと地球化学図の全国カバーが現実味を帯びて来ました。

### 3. 試料

試料として何が最もよくその地域の元素存在度を代表するかについては、試料の採集しやすさとも関連して、さまざまな考えがあります。私たちの研究では川床堆積物 (Stream Sediments) を用います。これは図1のように小さな沢毎にその出口近くで川砂を集め、それがその集水域の地表の化学組成を表すと考えるものです。通常の分析には数百mg程度の少量の試料しか用いられませんから、大きな砂粒が一個入って化学組成が偏ることを避けるため、現場で180 $\mu\text{m}$  (80メッシュ) 程度のふるいを用い、細かい粒子だけを集めます。ふるいの目の粗さを変えてみたり[7], 実際流域に分布する露岩を分析したり[8]して川床堆積物がどれほどよく地面の化学組成を代表しているかを調べた研究もあります。資源元素の地球化学探査ではあらかじめ磁性鉱物を取り除いた試料を分析することもあります。

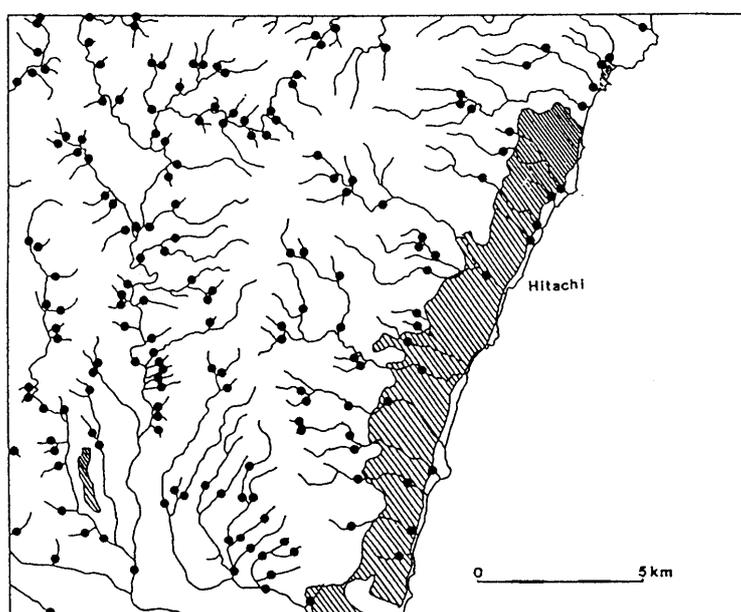


図1：河床堆積物試料の採集地点と川の関係例 [6]。結果的に約1 km<sup>2</sup>に1試料が採集されている。斜線部分は市街地を示す。

土壌が試料として用いられることもあり、土壌は人間生活に密接に関連する環境評価試料として優れているものの、日本では個人の所有地から採集せざるを得ない事が多く、所有者の許可を得るなどの繁雑さを伴います。外国では湖の堆積物[9]や氷縞粘土などが用いられることがあります。特別な元素を選択的に濃縮する植物を分析する方法[10]は生物地球化学の方面からも興味あることでしょう。

川床堆積物の場合、4名の採集者(学生やアルバイト)が職員の運転する車一台に乗り、2名が一組となって作業をします。場所や熟練の程度により異なりますが二人一組の作業班が一日に10試料余りの試料を採取できます。名古屋大学の筆者らの研究室ではここ4年ほど続けて地球化学図づくりをしています。毎年6名の職員と20名ほどの学生が2日掛で150~200試料を採取します。案外に時間と手間がかかるものです。

#### 4. 試料の均質性と分析精度

解析の項でも議論しますが、地圏の化学環境評価には一つの元素の絶対的多少ではなく、多くの元素の地球化学的挙動のなかで、ある元素の相対的多少を論ずることが必要です。したがって、たくさんの試料のたくさんの元素を分析することがその解析精度を上げることとなります。

また通常の実験では、試料が均質である事を前提として繰り返し分析精度の向上をめざすものですが、地球化学図では分析した値がどれほど地面を代表しているかを考え、その代表性を上げるような操作が必要となります。筆者らは同じ河原で複数のチームが試料を採集し、分析を繰り返しました。標準岩石なら同じ分析手法を用いて2～3%の繰り返し誤差で分析できるものが、川床堆積物では30%を超える元素もあります[12]。これは川砂中に含まれる希元素鉱物の偏在によると考えられ、ボールミルでの粉碎で少し改善されるようですが[13]、標準試料の均質性には遠く及びません。というわけで今のところ高精度分析より、一度にたくさんの元素の存否を見ることが出来る機器中性子放射化分析はもっとも研究に適した手法と言えましょう。

#### 5. 分析

実際の分析は、多くの試料の多元素が速く簡便に分析できる方法が使われます。椎川ら[4]による秋田県の地球化学図では、発光分光分析、蛍光X線分析、ICP発光分光分析を、伊藤ら[5]による北関東の地球化学図では、ICP発光分光分析と中性子放射化分析が用いられ、地質調査所での中性子放射化分析は主な岩石標準試料や試薬標準物質のファイルを持った専用の計測・解析装置を用いて行われました[13]。

以下に述べる愛知県の地球化学図では、ICP発光分光、中性子放射化分析、原子吸光分析が用いられています。それぞれの分析手法では第1表に示す元素が分析可能です。ここには白金族元素のように通常の地殻中では検出されるはずもない元素も含まれてますが、環境評価では上限値もまた意義のある値となります。

第1表：名古屋大学での地球化学図プロジェクトで用いられている分析機器とモニターされる元素

原子吸光	Na, K, Mg, Ca, Fe, Mn
ICP-AES	Al, Ti, P, Ce, Co, Cr, Cu, Ni, Sr, V, Zn
I N A A	Na, K, Sc, Cr, Fe, Co, Ni, Zn, As, Se, Br, Rb, Sr, Zr, Ru, Ag, Sb, Cs, Ba La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Dy, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Th, U

#### 6. 解析

愛知県での分析結果の内、カルシウムとクロムの地域分布を図2に示します[12]。両元素は地域的に対照的な分布をしめし、図の東側にはCa、西側にはCrが高濃度に分布します。Caと同様な地域分布を示す元素として、Sr, Al, Na, Kなどがあり、Crと同じ分布を示す元素として、Co, P, Fe, Ni, V, Mn, Znなどがあります。この第一近似的区分は元素分布を規定する自然要因のひとつである地質によるものです。同じ図2に載せたこの地域の地

質図と見比べてみると、Caの多い地域が花崗岩の分布する地域に対応し、第三紀層など堆積岩の分布する地域では相対的にCaが少なく、Crが多いことがわかります。第三紀層の源になった物質の多くは花崗岩だと考えられていますが、花崗岩の風化ではCaやSrを含む斜長石の風化が他の鉱物より速いことから、花崗岩が真砂化した場所の直下ではまだCaが多いものの、十分に長い時間水と反応した堆積岩では斜長石の溶解により、Caが少なくなったと考えられます。逆に堆積岩の中では風化に強い雲母などが相対的に多くなったと考えられます。実際の雲母を分析して、その中にMg, Fe, Ti, Co, V, Znなどの元素が多く含まれる事からも、雲母が堆積岩の分布する地域の元素存在度の多くを規定していることがわかります。

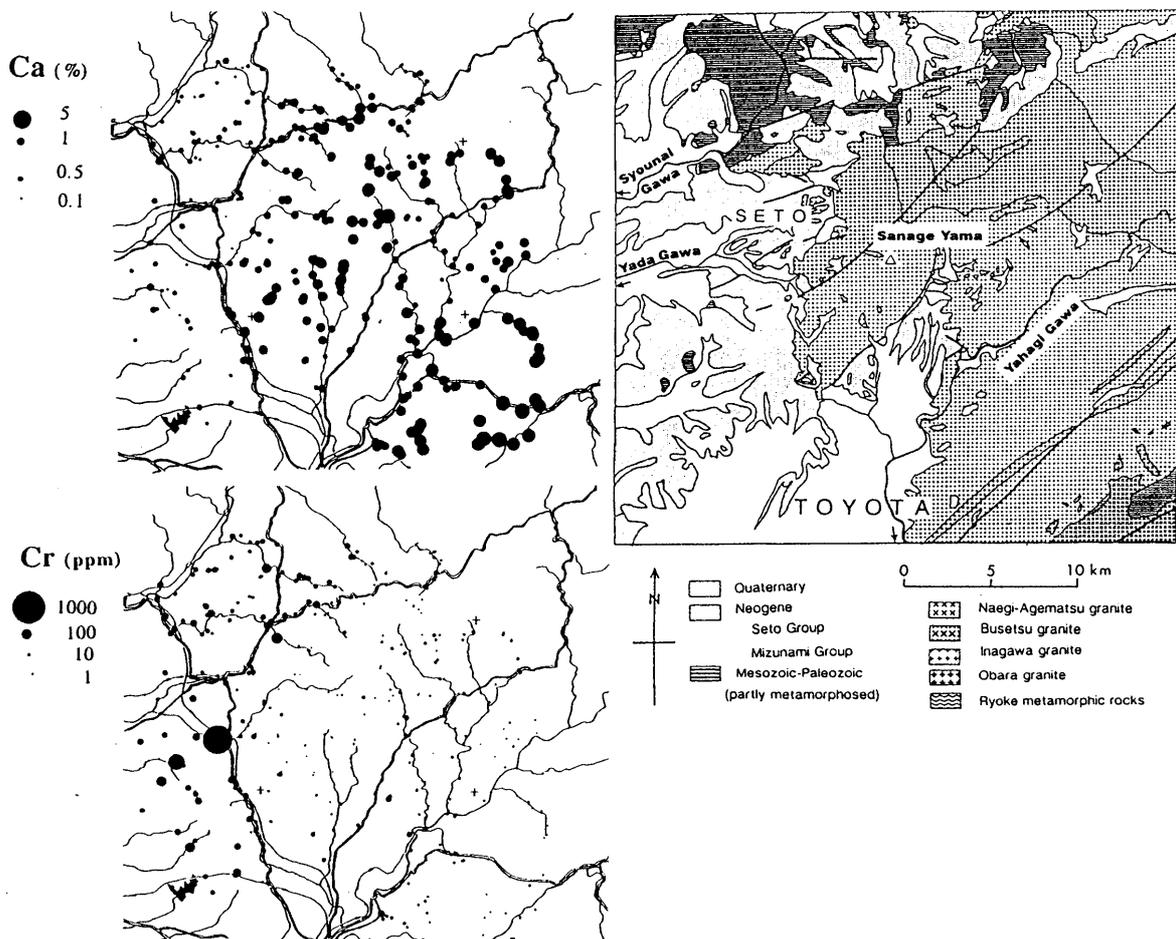


図2：愛知県中央部丘陵地帯のカルシウムとクロムの分布[12]。ほぼ同じ範囲を表す地質図と比較すると花崗岩の分布する地域にCa，堆積岩の分布する地域にCrが多いことがわかる。地質（自然界のバックグラウンドのひとつ）を無視して単純に元素の多少だけでは汚染を議論できない。

元素の存在度パターンをさらに定量的に解析するためには元素濃度をパラメータとする因子分析があります。因子分析は各元素濃度間の相関の強さに基づいて、数学的な手法により元素濃度の大小を支配する少数の共通因子を抽出します。その結果、各因子ごとに、因子負荷量と因子得点が求められます。因子負荷量は各元素毎に算出され、値が大きいほどその因子がある元素に及ぼす影響が強いことを、また、因子得点は、各試料毎に算出され、値が大きいほど因子とその試料との関係が強いことを、意味します。図3は北関東の地球化学図作成に用いられた4000個の試料と30元素の濃度を変数として解析された因子のうち、固有値の大きい6個の因子の各元素への因子負荷量を示したものです[6]。それぞれの因子の地球化学的解釈は次のようになります。

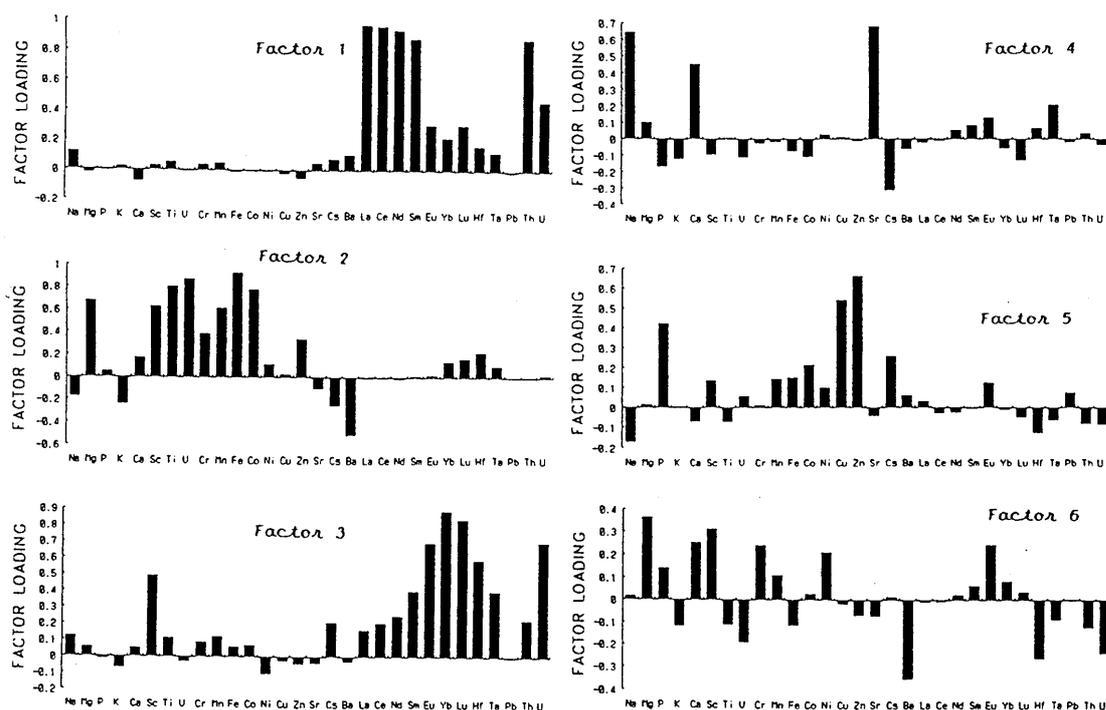


図3：北関東の地球化学図における各元素の因子負荷量[6]。ここで第六因子はあいまいな因子を表すが、分析される元素の数が増えるほど因子の特定は正確になる。

第一因子：La, Ce, Nd, Sm, Th, Uへの因子負荷量が大きく、因子得点は笠間および阿武隈の花崗岩の一部で高い。これは、その化学組成からモナズ石を表す因子と考えられる。  
第二因子：Mg, Sc, Ti, V, Mn, Fe, Coとの相関が高い。因子得点は、第四紀洪積層および阿武隈の塩基性岩や変成岩の露出域で高い。この因子は磁鉄鉱やチタン鉄鉱などの不透明鉱物や雲母などに対応するものと考えられる。  
第三因子：Sc, Eu, Yb, Lu, Hf, Uへの負荷量が大きく、因子得点は、花崗岩が露出する地域で高いが、第一因子得点の分布と比較すると、特に阿武隈地域で異なる。化学組成からはジルコンを表す因子と考えられる。  
第四因子：Na, Ca, Sr への負荷量が大きく、斜長石を表す因子と考えられる。因子得点は花崗岩地域で高く、八溝層群の露出域で低い。  
第五因子：Cu, P, Zn への因子負荷量が大きく、因子得点は市街地や平野部で高く、人為的要因を表している可能性もある。  
第六因子：因子負荷量の元素による差は他の因子ほど顕著でない。数値的なあいまいさが拡大されているものと思われる。

さて、因子分析にはもっと夢のある事も含まれます。戸上ら[8]は3年がかりで愛知県東部で武田信玄の時代から稼働していたと言われる廃鉱津具鉱山周辺の地球化学図を作りました。因子分析からは金、ヒ素、アンチモンなどに強い相関が現れました。それは金の鉱化作用に関係した熱水作用に伴う元素の移動を示す因子と解釈されます。図4に示すように金そのものの異常値分布は津具鉱山周辺にしか現れていませんが、ヒ素の異常値分布はその南部大峠付近にも大きく現れています。大峠は陥没カルデラの構造をもち、金の鉱脈が形成される格好の場所と見られます。地上だけでなく地下深部の探鉱もしてみたいものです。

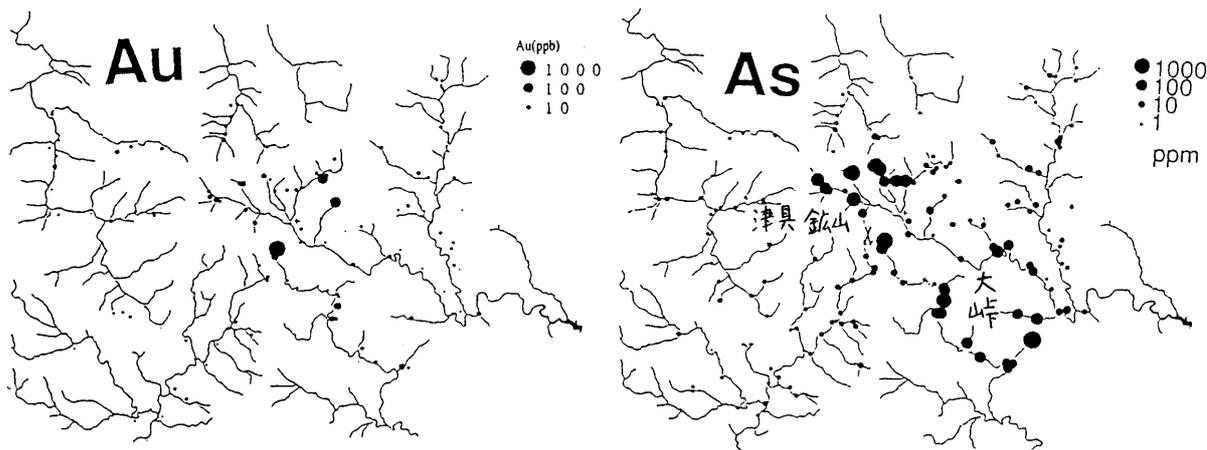


図4：熱水鉱床では金とヒ素が強い相関をもって分布する。愛知県北東部津具はかつての金山として知られている。大峠周辺では金の濃集はないがヒ素の異常濃集が見られる[8]。ここに新しい金の鉱脈が見つかるだろうか？

## 7. 放射化分析とこれからの地球化学図

私たちはこれからも地球化学図による地圏環境評価の研究を大きくしていきたいと思っています。たくさんの試料のたくさんの元素を速く正確に、という欲張った考えからは、主要化学成分と一部の微量元素は蛍光X線分析、酸に溶解し揮散しない元素はICP-MS、全体はINAAと言うのが最も能率のよい方法のようです。INAAは難分解鉱物にもつかえるし、常に全元素をモニターできるからです。INAAで数百個以上のたくさんの試料を扱おうとしたとき、一番問題なのは照射試料のひきとりです。名古屋から横須賀や東海村は年に2～3回のドライブは楽しいのですが、それ以上は苦痛になります。一度に多数の試料を照射して一度にひきとって測定前に大事な核種が壊変します。原子炉の近くで検出器をお借りすることもできますが、学生の研究として行う場合、学生がほとんど自動でなされる計測装置を見張ります。そしてその学生を教官が見張らねばなりません。仕事量は少ないものの、結局時間が取られます。

確実なデータが得られ、しかも教育上も効果のあるINAAをもっとたくさんの試料につかえないものか。東京大学原子力研究総合センター東海の澤幡さんにコンテナ表面で  $5\mu\text{Sv/hr}$  以下なら照射試料の郵送が可能なことを教えていただき、実試料を用いた実験をお願いしました。地質調査所岩石標準試料 JG-1(花崗岩) 1.6 g をポリエチレン袋にいれ、JRR-3M PN-1照射孔 ( $6.0 \times 10^{13} \text{n/cm}^2 \text{s}$ ) で5分照射後6日冷却しました。7日目に鉛セル20mm厚を使った215mm×215mm×240mmのコンテナで十分な余裕をもって郵送できるとのことです。

た。この照射線量はほぼ立教炉6時間分に相当します。かつて地質調査所では50mgの試料25個を1カプセルとしてJRR-4のTパイプで40分照射し、相対効率23%のGe検出器で測定していました。サンプルチェンジャーがあれば1試料200mgの試料(大きな試料のほうが良い)10個を束ねたカプセルを毎日一個ずつ5分照射して郵送していただき、年間1000試料の処理も夢では無いようです。

#### 8. おわりに

地圏の環境評価には“地球化学図”とよばれる元素分布情報が基礎となることを分かっていただけたと思いますが、評価にかかわる大切なことは単純に元素濃度の高い低いではなく、他の元素とのかかわりあいがある元素の由来を知る判断の材料となります。精度のよい解析のためには一見むだに見えるたくさんの元素数が必要です。バックグラウンドレベルはその地域の地質によります。自然のバックグラウンドを正しく評価するため、さまざまな地質の地域を調べることが必要です。環境評価に止まらず、地形図や地質図のような国土基本図の一つとしても、地球化学図による全国カバーが望まれます。

#### 参考文献

- [1] 島 誠 (1955) 地球化学探鉱法 丸善出版 245p.
- [2] Rose, A. W. et al. (1979) Geochemistry in Mineral Exploration. Academic Press
- [3] Webb, J. S. et al, (1978) The Wolfson Geochemical Atlas of England and Wales. Imperial College of Science and Technology 69p.
- [4] 椎川 誠 ほか (1984) 秋田県の地球化学図. 秋田大学教育学部 29p.
- [5] 伊藤司郎 ほか (1991) 地球化学アトラスー北関東ー. 地質調査所出版物 35p.
- [6] 上岡 晃 ほか (1991) 元素の地表分布パターンとその解析ー北関東の地球化学図. 地球化学 25巻 81-99.
- [7] 今井 登 (1987) 誘導結合プラズマ発光分光法による河川堆積物の分析. 分析化学 36巻 T41-T45.
- [8] 戸上 薫 ほか (1997) 愛知県北東部津具地域の元素濃度分布とその規定要因. 資源地質 投稿中.
- [9] 伊藤司郎 (1991) 欧米諸国における地球化学アトラスの作成とその成果. 地球化学 25巻 73-80.
- [10] 一國雅巳 (1991) 緒言-地球化学における地球化学図の役割. 地球化学 25巻 69-71.
- [11] 田中 剛 ほか (1995) 愛知県瀬戸市周辺における河川堆積物中の元素分布と地圏環境評価の試み. 地球化学 29巻 113-125.
- [12] Tanaka, T. et al. (1996) Geochemical mapping of the northern area of Toyota City, Aichi Prefecture, central Japan: Distinct chemical characteristics of stream sediments between granitic and sedimentary rock areas. Jour. Earth Planet. Sci. Nagoya University. vol. 43, 27-47.
- [13] 田中 剛 ほか (1988) 放射化分析用放射線自動計測・解析システムの開発と岩石標準試料の分析. 地調月報 39巻 537-557.

# 解説

## 国際放射能計測委員会（ICRM）について

放射線利用振興協会 国際原子力技術協力センター 源河次雄

### 1. はじめに

国際放射能計測委員会（International Committee for Radionuclide Metrology）は、1972年8月にユーゴスラビアの Herceg Novi で開催された第1回国際放射能計測夏の学校を端緒として設立された。この時のプロシーディングスは Nuclear Instruments and Methods の特集号（Vol. 112, No. 1, 2 1973）として刊行され、その豊富な内容はいまだに放射能計測関連の論文に引用されるほどである。ICRMの第1回目の会議は1976年10月パリにおいて開催され今日に及んでいる。ここでは、放射化分析の仕事を進めていく上で必要な放射能計測技術に関する情報源としてのICRMの概略を紹介し会員諸氏の参考に供したい。

### 2. 目的及びメンバーの構成

規約によると、ICRMは放射能計測関連の研究室（所）の代表または放射能の研究及び利用にたづさわっている個人で構成される国際的な団体である。現在世界33ヶ国から42研究室が加盟している。わが国からは、放射能の国家標準を掌る電子技術総合研究所量子技術部放射線研究室（檜野良穂博士）の他、名古屋大学工学部原子核工学教室（森千鶴夫教授）と日本原子力研究所アイソトープ部計量技術課の加入が認められており、それぞれ代表者が委員として登録されている。もっとも1991年スペインのCIEMAT（エネルギー環境技術研究センター）で開催されたICRM'91 総会において規約が改定されるまでは国家標準機関のみが正式メンバーとして認められていた。したがって当初は電総研の放射線研究室長であった河田燕博士（現成蹊大教授）が唯一の日本代表であった。河田教授は現在も准会員（associate member）として活躍されている。本会の目的とするところは放射能計測技術の進歩発展を国際的に推進するというもので、計測に関する新技術情報の流布、核データその他の放射能計測関連事項の評価、収集等を含む。なお、ICRMは会費の徴収は行わない。会員の義務としては、毎年、前年度の成果報告と次年度の研究計画を全会員に配布することである。また、会員が放射能計測に関連する論文、書籍等を公刊した場合は役員会に通知することが奨励されている。ICRMの基本的な活動方針は隔年ごとに開かれる総会において決定される。

### 3. 役員会の構成

役員任期は2年間で再任を妨げない。但し副会長の任期は継続性を保証するため、時期をずらせて交替するようになっている。役員に対する報酬はない。1997年3月現在の役員会の構成は以下の通りである。

会長	G. Winkler	IRK	オーストリア
副会長	F. Amoudry	CEA/LPRI	フランス
同	J.M.R. Hutchinson	NIST	米国
同	源河 次雄	原研（就任時）	日本
前会長	P. Christmas	NPL	英国
書記	H. Schrader	PTB	ドイツ

#### 4. ワーキンググループ

会の目的を効果的に達成するために、1975年以来ワーキンググループをおいている。事実ICRMの活動はワーキンググループ幹事のイニシアチブに負うところが大きい。これまでにワーキンググループの内容に多少の変遷はあったが、現時点でのグループ名と担当幹事名は下記の通りである。

ワーキンググループ	幹 事
(1) アルファ粒子スペクトロメトリ	E. Garcia-Torano
(2) ガンマ及びベータ線スペクトロメトリ	J.M. Los Arcos
(3) ライフサイエンス	D.F.G. Reher
(4) 低レベル測定技術	E. Holm
(5) 非中性子核データ	A.L. Nichols
(6) 放射能計測技術	T. Radoszewski

それぞれのワーキンググループについて活動内容の概略を述べる。

##### (1) アルファ粒子スペクトロメトリ ワーキンググループ

ピークフィッティング等解析プログラムの改良、アルファ放出率データの検討、検出器内における物理現象の計算機シミュレーション等。

幹事連絡先: Dr. E. Garcia-Torano

Metrologia de Radiaciones Ioniz., CIEMAT,

Avda. Complutense 22, E-28040 Madrid, Spain

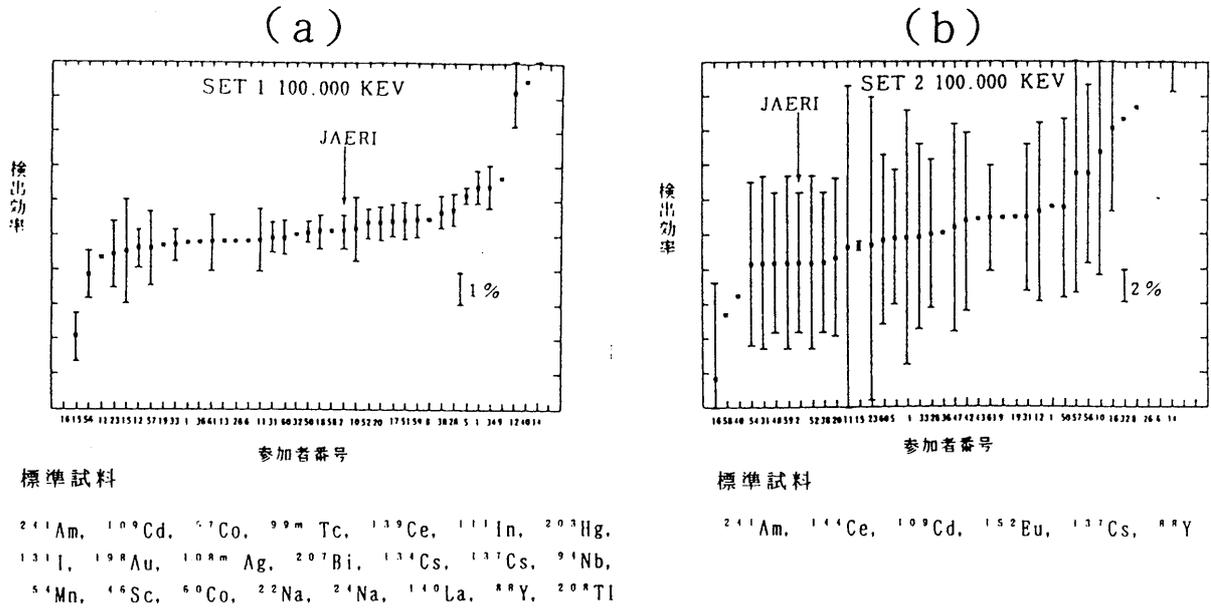
Fax: 34(1)346 6005, E-mail: e.garciatorano@vm.ciemat.es

##### (2) ガンマ及びベータ線スペクトロメトリ ワーキンググループ

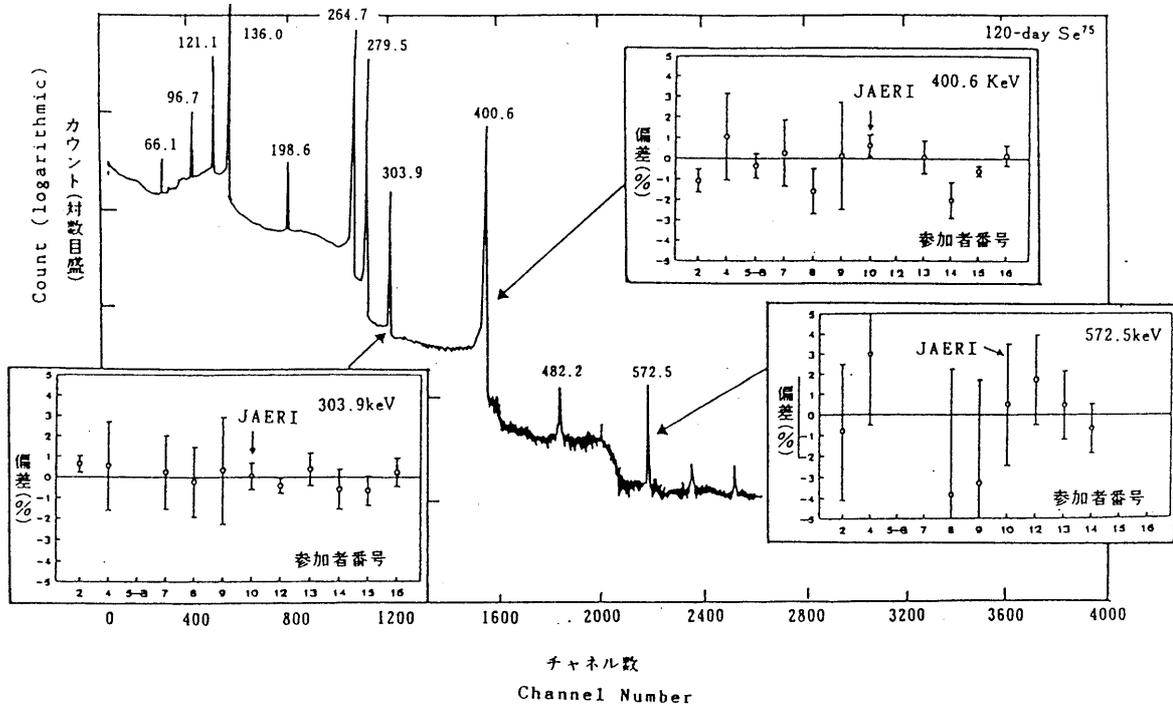
種々の形状の線源に対するゲルマニウム検出器の計算による効率決定、低エネルギー領域の効率校正、体積線源に対するコインシデンス・サム補正法、ピークフィッティング計算コードの評価、スペクトロメトリの検出限界の決定等。

放射化分析といえば、技術的にはガンマ線スペクトル解析技術そのものといっても過言ではない。従って本ワーキンググループの活動について、やや詳しく紹介したい。例えば、1977年の $^{152}\text{Eu}$ の $\gamma$ 線強度に関する国際比較では、PTBのDr. K. Debertinを幹事として世界各国から26機関が参加し、主要な10本のピークについて絶対強度を $\pm 5\%$ の不確かさ( $1\sigma$ )で決定するなど先進的な役割を果たしてきた。1984年には少し変わった国際比較が行われた。これは配布された未知試料を測定した放射能値についての比較ではなく、或るスペクトロメータによって得られた生のデータセットを配り、各自のデータ処理技術によって解析して(1)検出効率とその不確かさ、(2)ピーク面積から求めた放射能値とその不確かさを比較するというものである。各参加者からの結果を集計してグラフに表した例を第1図(a)(b)に示す。(a)は22核種の標準線源 (b)は6核種の標準線源を測定して得られたデータから求めた100keVに対する検出効率であるが、前者の場合は殆どの参加者の結果が $\pm 1\%$ 以内に納まっているのに対し後者では大きくバラつく結果となった。1987年にはローマ

# 第1図 ガンマ線スペクトルの解析技術に関する国際比較



# 第2図 <sup>75</sup>Se ガンマ線強度決定に関する国際比較



で開催されたICRM年会でハンガリー国立計量局(OMH)から $^{75}\text{Se}$ の $\gamma$ 線強度に関する国際比較が提案され実施された。 $^{75}\text{Se}$ は $\gamma$ 線スペクトロメータ用標準線源として有用な核種であるが、その $\gamma$ 線強度の測定では幾つかの困難がある。例えば、ピークの或るものはコンプトンエッチや後方散乱ピークの影響を受けてスペクトル解析の精度に悪影響を及ぼす。その他、基底状態( $^{75}\text{As}$ )に直接遷移する確率が十分に解明されていない等崩壊データにも未確定な部分がある。第2図は参加各研究室による $^{75}\text{Se}$ の相対 $\gamma$ 線強度を重み付き平均値からの偏差として示したものである。強度も充分で妨害ピークの影響もない303.9 keVのピークから求めた値は当然のことながらバラつきも少ない。本国際比較の成果として各ピークの $\gamma$ 線強度の不確かさを大幅に減少させることができた。最近の例では、計算によるGe検出器効率算出法の有効性に関するテストを参加者(17研究室)所有の26個の検出器と25個の体積線源を使って行われた。合計38通りの検出器と線源の組み合わせについて計算と実測の比較を60-1800 keVのエネルギー範囲で行い、検出器の構造及び各部寸法を正確に知ることができれば、殆どの検出器について良い一致が得られることが立証された。

幹事連絡先: Dr. J.M. Los Arcos

Metrologia de Radiaciones Ioniz., CIEMAT,  
Avda. Complutense 22, E-28040 Madrid, Spain  
Fax: 34(1)346 6005, E-mail: arcos@vm.ciemat.es

### (3) ライフサイエンス ワーキンググループ

がん治療用 $^{192}\text{Ir}$ 線源に対する電離箱校正、病院における放射能測定器の品質保証、食品及び飼料の放射能検出等。

幹事連絡先: Mr. D.F.G. Reher

CEC-JRC, Institute for Reference Materials and Measurements,  
Steenweg op Reite, B-2240 Geel, Belgium  
Fax: 32(14)584 273, E-mail: reher@linaco.irmm.jrc.be

### (4) 低レベル測定技術 ワーキンググループ

純ベータ核種( $^{63}\text{Ni}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ )及び電子捕獲壊変核種( $^{59}\text{Ni}$ ,  $^{55}\text{Fe}$ )の低レベル測定、 $^{90}\text{Sr}$ 測定法の改善等。

幹事連絡先: Dr. Elis Holm

Dept. of Radiation Physics, Lund University Hospital  
Lund University  
S-221 85 Lund, Sweden  
Fax: 46(46)127249, E-mail: elis.holm@radfys.lu.se

### (5) 非中性子核データ ワーキンググループ

3ND(Non-Neutron-Nuclear Data) ワーキンググループともよばれる。壊変データの矛盾、偏差等の検討又は連絡、不一致の解決と不確かさの評価、データ評価法の推奨、内部転換係数データベースの確立等。

幹事連絡先: Dr. Alan L. Nichols

Environmental & Process Engineering, AEA Technology,  
353 Harwell, Didcot, Oxfordshire OX11 0RA, UK  
Fax: 44(1235)432997, E-mail: alan.nichols@aeat.co.uk

(6) 放射能計測技術 ワーキンググループ

国際度量衡局(BIPM)との協同による、液体シンチレーション計数法及び気体計数法を使用した純ベータ粒子、低エネルギー光子に対する国際標準システム(SIR)の拡張、内部ガス計数法によるトリチウム水放射能の相互比較、液体シンチレーション計数法による $^{63}\text{Ni}$ 及び $^{55}\text{Fe}$ の相互比較、ラジオカロリメトリによる放射能絶対測定、イメージングプレートその他の放射能計測技術。

幹事連絡先: Dr. Tomasz Radoszewski  
Radioisotope Centre Swierk,  
PL-05-400, Swierk-Otwock, Poland  
Fax: 48(22)7798880

5. 国際シンポジウムの開催

隔年毎に「放射能計測及びその応用技術に関する国際シンポジウム」と銘打ってこれまでヨーロッパ各地で開催してきた。次回(1997年)はヨーロッパ以外で開催される初のケースとして米国のNISTがホストを引き受けることになった。会期は5月19日より23日までワシントン D.C. に近いGaithersburgで行われる。さらにその次の1999年の開催はチェコ共和国のプラハで行いたい旨CIM(Czech Metrological Institute)から正式に立候補の届け出がなされている。国際シンポジウムのプロシーディングスは、Applied Radiation and Isotopes (International Journal of Radiation Applications and Instrumentation, Part A, Pergamon Press) 又は Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A (North Holland) いずれかの特集号として刊行されるのが慣わしとなっているが、1997年は前者から刊行されることになった。過去14年間の開催地とプロシーディングスの一覧を以下に示す。

1983年 "Applied Radionuclide Metrology" ICRM Scientific Meeting  
held at Geel, Belgium in May 1983. Proceedings published  
in Int. J. Appl. Radiat. Isot., 34:1039-1324, 1983.

1985年 ICRM Scientific Meeting held at Grenoble, France in June  
1985.

1987年 "Techniques in Radionuclide Metrology" ICRM Scientific  
Meeting held at Rome, Italy in June 1987. Proceedings  
published in Appl. Radiat. Isot. (Int. J. Appl. Radiat.  
Isot. Part A) 38: 763-910, 1987.

1989年 "Nuclear Decay Data, Spectrometric Methods, Measurements and Evaluations" ICRM Scientific Meeting held at Braunschweig, FRG in June 1989. Proceedings published in Nucl. Instr. and Meth., A 286:357-622, 1990.

1991年 "Radionuclide Metrology and Its Applications" ICRM Scientific Meeting held at Madrid, Spain May 1991. Proceedings published in Nucl. Instr. and Meth., A 312: 1-396, 1992.

1993年 "Radionuclide Metrology and Its Applications" ICRM Scientific Meeting held at Teddington, UK in June 1993. Proceedings published in Nucl. Instr. and Meth., A 339: 1-414, 1994.

1995年 "Radionuclide Metrology and Its Applications" ICRM Scientific Meeting held at Paris, France in May 1995. Proceedings published in Nucl. Instr. and Meth., A 369: 333-740, 1996.

1997年 "Radionuclide Metrology and Its Applications" ICRM Scientific Meeting held at Gaithersburg, Md., U. S. A. in May 1997. Proceedings will be published in a special issue of Applied Radiation and Isotopes.

#### 6. ICRMニュースレターの発行

ICRMの重要な活動の一環として1987年以降、毎年ニュースレターを発行して会員に配布している。編集者は現在ライフサイエンス ワーキンググループ幹事であるD. F. G. Reher氏(BURATOM, Institute for Reference Materials and Measurements, IRMM)があたっている。ニュースレターの内容は、各会員毎の研究活動の現状と計画中の事項を簡潔にまとめたものである。1996年版では、24ヶ国から34研究室の分が掲載されており世界の放射能計測技術の動向を把握するための貴重な資料となっている。配布部数は会員外の希望者も含め 200部以上に達している。経費については郵送量を含む全額についてIRMMの協力を仰いでいる。

#### 7. 関連出版物 (モノグラフ)

会員又は会員の密接な協力によった著作の一覧を以下に掲げる。

- (1) W. B. Mann, R. L. Ayres and S. B. Garfinkel, (1980) "Radioactivity and Its Measurement" 2nd Edition (SI Units). Pergamon Press Oxford U.K.

- (2) NCRP (1985) "A Handbook of Radioactivity Measurements Procedures" NCRP Report No.58, National Council on Radiation Protection and Measurements. Bethesda, Maryland 20814, U.S.A
- (3) K. Debertin and R.G. Helmer (1988) "Gamma- and X-Ray Spectrometry with Semiconductor Detectors" North Holland, Amsterdam, Netherlands.
- (4) W.B. Mann, A. Rytz and A. Spornol (1990) "Radioactivity Measurements, Principle and Practice" Pergamon Press Oxford U.K. (An earlier version of this book was published in Appl. Radiat. Isot. (IJARI-A) 39(8):717-937, 1988).
- (5) ICRU(1995) "Particle Counting in Radioactivity Measurements" ICRU Report No.52, International Commission on Radiation Units and Measurements.

## 8. 関連団体

- (1) CCEMRI (Consultative Committee for Standards of Measurement for Ionising Radiation)

国家標準の機関のみから構成された委員会で日本からは電総研が会員となっている。当委員会は、X線、 $\gamma$ 線、電子線部会(CCEMRI-I)、放射能測定部会(CCEMRI-II)、中性子測定部会(CCEMRI-III)からなっており、ICRMはとりわけCCEMRI-IIと縁が深い。

- (2) IAEA (International Atomic Energy Agency)

とくにIAEAの Nuclear Data Section とICRMの非中性子核データワーキンググループはこれまで数多くの核種の $\gamma$ 線強度の評価等を協力して行ってきた。また低レベル測定技術ワーキンググループはIAEAの協力を得て「緊急時及び定常時における迅速放射能測定」に関する会議を本年10月英国のNPLで開催することにしている。

- (3) EUROMET (European Collaboration in Measurement Standards)

ヨーロッパ諸国内の計測標準に関する研究者集団であるが、設立以来9年になる。電離放射線・放射能分野では、ヨーロッパ20ヶ国の30研究所から約200名の技術者、研究者が参加しており、中性子測定、線量測定、放射能測定に関する26項目のプロジェクトが現在進行中である。この組織の運営はかなり柔軟性があり、ヨーロッパ以外の研究者であっても関心があれば参加を拒まれることはない。筆者は医療用 $^{192}\text{Ir}$ 金属線源の放射能測定プロジェクトに放射線自己吸収の影響のないカリメトリ法を適用することを条件に参加を要請されたことがある。EUROMETプロジェクト連絡会議は関連技術の研究者、専門家が集まるICRM年会と時期を合わせて開かれることもある。

## 放射化分析について思うこと

東京大学大学院農学応用生命科学研究科 玉田真弓

私は、昨年4月北里大学から卒業研究生として東京大学大学院農学応用生命科学研究科の中西友子先生のところに来ました。この1年の間に、立教大学、東海村、高崎の原研などの放射線を扱う施設に入ることができ、良い経験をさせて頂いたと思っています。

私の卒業研究は放射化分析を用いたものであったため、主に立教大学の原研に通いました。立教大学の施設は他のところと比べて静かでこぢんまりとしています。中は広く落ちついた気分で実験ができるように感じました。私は炉や放射線施設について詳しい事情はよく分かりませんが、作業を行うスペースは、できるだけ広く機械音が少ない方が落ちついて実験を行うことができると思います。

それから、もう一つ解析プログラムについて思うところがあります。現在の解析プログラムがさらに発展していると良いと思います。今回私の用いた解析プログラムソフトは、測定後のピークからピークとBGを選ぶと net count が算出されるというものでした。算出された net count を濃度 (ppm) に換算するまでには、あと時間や測定器までの距離の補正、重量換算値として求めること、標準試料との比較から ppm に換算することという作業が残っています。これらの作業は試料数が多くなると思っていたよりも非常に時間のかかる作業です。これらを自動化して測定条件と測定結果を打ち込めば濃度まで算出してくれるような解析プログラムソフトが出来れば、放射化分析が以前よりも行いやすくなるものと考えます。

私の卒業研究は、アサガオの各生育段階における各元素の動態解析に関する基礎研究と題して、植物中の9元素 (Na, Mg, Al, Cl, K, Ca, V, Mn, Br) について元素量を短期放射化分析によって測定するものでした。アサガオの種の段階から、4日、6日、13日、18日、23日、25日 (つぼみ期)、30日 (開花期)、47日 (種子期) のものを各組織に切り分け、各々の各元素量を求め元素の動きを1枚の図にまとめました。各元素は各々独自の動態分布を示しました。傾向としては、全体的に同族元素間で類似の傾向を示したほか、部分的には、根、茎、葉柄、葉等で、大きいところでは4~10倍もの濃度差が示されました。また元素によっては、47日まで一方的に増加するものもありましたが、多くはつぼみ期付近を境に減少する傾向を示しました。

私は北里大学での学生実験では人の髪を毛を用いて含まれる元素の同定・定量をしました。このときには放射化分析によって、ある物質の中に含まれる元素を非破壊で同定・定量できることを学びましたが、今回植物での実験を通して放射化分析の利用方法が様々な分野の研究に有効で、考え次第で多くの利用方法があることを学びました。私が今回作製した0~47日のアサガオの照射用試料についても放射能が冷えた後更に長期放射化分析を行うことで、Fe, Znなど多くの元素についても同様の研究を行えるものと考えています。

これから先更に放射化分析が安全に普及することを願っています。以上、私が1年間放射化分析の研究に仲間入りさせていただいて思ったことを述べさせていただきました。ありがとうございました。

データフォーマットの統一化の試案

「放射化分析」第3号の講座でも述べたように、 $\gamma$ 線スペクトルデータのファイルフォーマットはマルチチャンネルアナライザのメーカーごとにバラバラである。そのため共同利用施設ごとに、場合によっては施設内でも機械ごとに違っており、 $\gamma$ 線スペクトルの解析を行う際に、変換を行わなければならないのが現状である。しかし、共同利用施設でも変換プログラムが整備されているわけではなく、放射化分析の利用をしにくくしている一因となっている。1996年3月に、東北大核理研で行われた「放射化分析支援ネットワーク」検討会（第4号参照）でも規格化のことが話し合われた。

そこで、全国の共同利用施設で放射化分析用のフォーマットの規格化を提案したい。具体的なファイルの構造は次のように考えている。もし、このようなフォーマット統一化の合意がとれれば、各メーカーに放射化分析用としてこのようなフォーマットで保存できるようなオプションを追加するように要求していきたい。

ファイルの構造：

最初に、1024バイトの測定条件等のヘッダー部（アスキー文字型）、  
 続いてスペクトルデータ部（チャンネル数×3バイト）  
 （スペクトルサイズにより長さは変化）

測定条件等のヘッダー部には、試料名（18バイト）の他、試料重量（12）、照射時間（4）、照射場所（4）、照射終了日時（16）、検出器番号（4）、チャンネル数（4）、測定位置（6）、測定時間（True Time）（8）、測定時間（Live Time）（8）、測定開始日時（16）、測定終了日時（16）、ファイル名（20）、分析元素数（4）、分析元素（2×元素数）等が記録されていることが、解析をする上で望ましいと考える。

データは1チャンネルがバイナリー形式の3バイトなので約1678万カウントまで記録できる。4096チャンネルのスペクトルであればファイルサイズは13kバイトとなり、1枚のフロッピディスクに約100個のスペクトルが保存できることになる。このフォーマットに合った $\gamma$ 線スペクトル解析プログラムを作ることにより、ヘッダー部に測定と解析の条件がすべて入っているので、解析時に入力項目がなく自動解析ができるようになる。

以上

武蔵工業大学 鈴木章悟

suzuki@atom.musashi-tech.ac.jp

## 施設だより

### 東北大学 原子核理学研究施設

核理研ではストレッチャーブースターリング建設が急ピッチで行われている。このため、現在行われている共同利用はRI 関係共同利用 (RI 製造、放射化分析、同位元素標識、ホットアトム化学、その他) のみとなっている。平成8年度に引き続き平成9年度もRI 関係共同利用継続は決まっています、すでに13課題を採択している。実験日程については現在調整中であるが、8月の夏期を除いては月平均2日程度の実験を予定している。今後、実験を希望される方は所内世話人(大槻)まで。ちなみに平成8年度後期に実施された実験は以下のようなものである。

(東北大核理研 大槻勤)

#### 平成8年度後期共同利用マシンタイム割当

申込責任者	所属	実験種目	実施日
荘司 準	(筑波大学)	ホットアトム化学	11/28
関根 勉	(理学部)	RI 製造	11/29
大槻 勤	(核理研)	同位元素標識	12/13 1/24 3/17
榊本和義	(核理研*現在KEK)	同位元素標識	12/13 1/24 3/17
秋葉健一	(素材研)	RI 製造	12/16
坂本 浩	(金沢大理)	核化学	1/10 1/13
鍛冶東海	(理学部)	核化学	1/27
福島美智子	(石巻専修大)	放射化分析	2/21
藤川辰一郎	(工学部)	RI 製造	2/24
三頭聡明	(金研)	RI 製造	3/14

### 武蔵工業大学 原子力研究所

残念ながら、武蔵工大炉は1989年12月に起こった原子炉タンクの漏水に係わる事象のため、現在も停止しています。一日も早い再開に向けて日夜努力しております。

本年4月に、本学工学部に新エネルギーや原子力エネルギーに関連する問題を学ぶための「エネルギー基礎工学科」が新設され、60名の新入生が入学しました。原子力研究所からは平井昭司教授(新学科研究室名:放射線応用工学)、岡田往子講師(放射線応用工学)、鈴木章悟助教授(原子炉工学)の3名が新学科に移りました。3名は原子力研究所は兼任となり、本会員で原子力研究所に残るのは本多照幸講師のみとなります。

(武蔵工業大学 鈴木章悟)

## 施設だより

### 東北大学 原子核理学研究施設

核理研ではストレッチャーブースターリング建設が急ピッチで行われている。このため、現在行われている共同利用はRI 関係共同利用 (RI 製造、放射化分析、同位元素標識、ホットアトム化学、その他) のみとなっている。平成8年度に引き続き平成9年度もRI 関係共同利用継続は決まっています、すでに13課題を採択している。実験日程については現在調整中であるが、8月の夏期を除いては月平均2日程度の実験を予定している。今後、実験を希望される方は所内世話人(大槻)まで。ちなみに平成8年度後期に実施された実験は以下のようなものである。

(東北大核理研 大槻勤)

#### 平成8年度後期共同利用マシンタイム割当

申込責任者	所属	実験種目	実施日
荘司 準	(筑波大学)	ホットアトム化学	11/28
関根 勉	(理学部)	RI 製造	11/29
大槻 勤	(核理研)	同位元素標識	12/13 1/24 3/17
榎本和義	(核理研*現在KEK)	同位元素標識	12/13 1/24 3/17
秋葉健一	(素材研)	RI 製造	12/16
坂本 浩	(金沢大理)	核化学	1/10 1/13
鍛冶東海	(理学部)	核化学	1/27
福島美智子	(石巻専修大)	放射化分析	2/21
藤川辰一郎	(工学部)	RI 製造	2/24
三頭聡明	(金研)	RI 製造	3/14

### 武蔵工業大学 原子力研究所

残念ながら、武蔵工大炉は1989年12月に起こった原子炉タンクの漏水に係わる事象のため、現在も停止しています。一日も早い再開に向けて日夜努力しております。

本年4月に、本学工学部に新エネルギーや原子力エネルギーに関連する問題を学ぶための「エネルギー基礎工学科」が新設され、60名の新入生が入学しました。原子力研究所からは平井昭司教授(新学科研究室名:放射線応用工学)、岡田往子講師(放射線応用工学)、鈴木章悟助教授(原子炉工学)の3名が新学科に移りました。3名は原子力研究所は兼任となり、本会員で原子力研究所に残るのは本多照幸講師のみとなります。

(武蔵工業大学 鈴木章悟)

## 原研施設利用共同研究

東京大学原子力研究総合センターで毎年公募している原研施設利用共同研究は、平成9年度も例年のごとく多数の課題によって行われています。下記に一般共同研究と一般協力研究の課題一覧から、放射化分析関係およびその周辺のものを抜き出して記載します。

(東大原子力研究総合センター 伊藤泰男)

### 一般共同研究

#### 1. 原子核をプローブとする物理・化学研究

- |      |  |       |      |
|------|--|-------|------|
| 7101 | メスバウアー分光法による無機化合物の研究 (II)                | 東邦大学  | 高橋 正 |
| 7102 | EC壊変を用いたX線状態分析 (III)                     | 宮城教育大 | 玉木洋一 |
| 7103 | $^{59}\text{Fe}$ をプローブとした強磁性体の超微細相互作用の研究 | 新潟大学  | 大矢 進 |
| 7104 | 大環状金属錯体における照射効果の微視的研究                    | 筑波大学  | 荘司 準 |
| 7105 | 中性子放射化核種のカン線エネルギー - 精密測定の開発              | 熊本大学  | 岸川俊明 |
| 7106 | 超冷中性子磁気ボトルによる中性子寿命の研究                    | 茨城大学  | 吉城 肇 |

#### 2. 放射線とイオンビームによる物質構造の研究と改質・合成

- |      |   |        |       |
|------|---|--------|-------|
| 7107 | 石英中の酸素空格子の $\gamma$ 線による生成の線量率依存性の研究                                    | 大阪大学   | 豊田 新  |
| 7108 | 電子機能性材料の放射線照射効果 (II)  | 東京大学   | 寺井隆幸  |
| 7109 | 量子ビーム光学・記録材料の改質と創製  | 京都工繊大  | 川面 澄  |
| 7110 | 陽電子消滅及び電子スピン共鳴測定法によるシリカガラス及びシリコン照射欠陥研究                                  | 東北大学   | 長谷川雅幸 |
| 7111 | 高エネルギー粒子線による半導体デバイスの劣化と導入格子の欠陥に関する研究                                    | 熊本電波高専 | 大山英典  |
| 7112 | $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$ ジェネレータシステムのためのN-メチルグルタミン型樹脂の開発とその放射線耐久性 | 熊本大学   | 中山守雄  |
| 7113 | 放射線反応による共役キレート金属環におけるラジカル反応   | 上智大学   | 杉森 彰  |
| 7114 | 宇宙物質のイオン照射効果  | 大阪大学   | 池谷元伺  |
| 7115 | アモルファス $\text{SiO}_2$ のイオンビームによる電子励起効果                                  | 名古屋大学  | 松波紀明  |
| 7116 | 半導体中の照射誘起欠陥と不純物の相互作用  | 東北大学   | 末澤正志  |
| 7117 | NIおよびFe中の照射欠陥の陽電子消滅寿命測定法による研究   | 九州大学   | 蔵元英一  |
| 7118 | 高速及び熱中性子照射による鉱物結晶中の点欠陥生成と物性研究   | 山口大学   | 福地龍郎  |
| 7119 | 配向分子集合系における機能性単量体の放射線重合 (II)  | 埼玉大学   | 柴崎芳夫  |
| 7120 | $\gamma$ 線照射法による炭素材料の開発と炭素材料の金属元素濃度                                     | 愛媛大学   | 中山祐輔  |
| 7121 | 機能性界面活性剤の界面配向性と $\gamma$ 線重合による表面金属鑄型樹脂の合成                              | 熊本大学   | 小出善文  |
| 7122 | 有機硫黄ラジカルのスピントラッピング  | 山口大学   | 谷口 仁  |
| 7123 | 絶縁材料の高線量照射効果  | 高エ研    | 沖 雄一  |
| 7124 | リンの酸素酸基を有するキレート樹脂の耐ガンマー線性の評価と改善に関する研究                                   | 熊本大学   | 城 昭典  |
| 7125 | 放射線化学的に生成する補足活性種の蛍光スペクトル  | 京都工繊大  | 荒井重義  |
| 7126 | 宇宙用光学ガラス材料の放射線劣化の研究   | 東京大学   | 常田佐久  |

#### 3. 生物に対する放射線効果

- |      |                                      |      |       |
|------|--------------------------------------|------|-------|
| 7127 | 悪性脳腫瘍に対する中性子捕捉療法のための基礎的・臨床的研究 (II)   | 筑波大  | 能勢忠男  |
| 7128 | 原子炉生産短半減期核種による放射性医薬品の製造法の確立          | 金沢大学 | 安東 醇  |
| 7129 | 肝臓内銅結合蛋白と $^{64}\text{Cu}$ 銅との反応性の解析 | 北教育大 | 岡安多香子 |
| 7130 | 穀類および園芸植物の育種への放射線照射の有効性              | 鹿児島大 | 坂田祐介  |

#### 4. 中性子利用元素分析

- |      |                    |      |      |
|------|--------------------|------|------|
| 7131 | カエル卵成熟における亜鉛イオンの作用 | 静岡大学 | 石川勝利 |
| 7132 | 放射化による金属フラーレンの研究   | 都立大学 | 末木啓介 |

7133	植物固体における A I および B の分析	東京大学	中西友子
7134	バイカル湖 399 m コア試験中のイリジウムの放射化分析	北大	豊田和弘
7135	放射化分析による海藻由来の含ハロゲン化合物の生合成研究	北大	鈴木 稔
7136	環境試料中の微量元素の存在形態	武蔵大学	薬袋佳孝
7137	中性子放射化分析法を用いた環境モニタリング法の研究 (II)	宇都宮文星短	伊澤郡藏
7138	ヒト血清中有機態ハロゲン (Cl, Br, I) の性および年齢による変動	横浜市大	鹿島勇治
7139	胎児期および成長期における亜鉛欠乏がその後の発育に与える影響	静岡大学	矢永誠人
7140	金属材料中の極微量元素の分析法の開発 (II)	武蔵工業大	平井昭司
7141	中国地方の白亜鉛～第三紀花崗岩類の希土類元素組成 (II)	山形大学	中島和夫
7142	中国地方の白亜紀～第三紀花崗岩類の希土類元素組成 (II)	山口大学	今岡照喜
7143	熱蛍光年代測定のための石英中の Al 量の測定	北教育大	雁沢好博
7144	環境広葉樹の放射化分析とオートラジオグラフィ	東京大学	斉藤秀雄
7145	レアアースの多座配位子による協同効果抽出	東北大学	中村重人
7146	宇宙物質の中性子放射化分析 (II)	都立大学	海老原充
7147	隕石試料の放射化分析 (III)	日本大学	永井尚生
7148	隕石中の微小構成粒子の同位体・化学組成とその形成環境の研究	名大	田中 剛
7149	食餌中の S e 含量とリンパ腫発病に関する研究	北里大学	伊藤伸彦
7150	植物の葉に含まれるコバルトの分布図の作成	北大	増子捷二
7151	海洋生物に含まれる重金属微量元素の放射化分析	北大	大西俊之
7152	生体類似多元素合成標準物質の開発と普及 (II)	秋田大	岩田吉弘
7153	大気中のエアロゾルの起源と滞留時間	九州大	大崎 進
7154	バルト海産ネズミイルカ (Phocoena Phocoena) の有機態ハロゲン (Cl, Br, I)	愛媛大	脇本忠明
7155	黒曜石フィッシュン・トラック年代測定値の標準化	鹿児島大	鈴木達郎
7156	中性子放射化分析による宇宙・火山起源物質の研究	学習院大	福岡孝昭
7157	新規な抽出試薬による金属元素の放射化分析	山形大学	阿部重喜

## 一般協力研究

### 1. 原子核をプローブとする物理・化学研究

7201	熱核融合プラズマ温度診断のための中性子エネルギー精密測定法の開発	名大	森千鶴夫
7202	新規なテクネチウム及びレニウム化合物の合成とその構造、電子状態の解明	東北大学	工藤博司
7203	14MeV 中性子照射により生成される放射能の崩壊特性	名大	河出 清
7204	4 π NaI (TI) γ線検出器による <sup>166</sup> Ho の放射能精密測定法の開発	名大	宮原 洋
7205	核反応の微視的シミュレーションによる研究	京大	堀内 昶
7206	放射性レニウム標識化合物の合成と体内動態の研究	東大	巻出義紘
7207	中性多座配位子を用いるランタニド (III) の抽出選択性	茨城大	井村久則

### 2. 放射線とイオンビームによる物質の研究と改質・合成

7208	高純度アルミニウム合金の電顕内イオン照射による損傷の形成・回復の動的過程	愛媛大	神垣信生
7209	プレセラミック・ハイブリットポリマーの放射線架橋の研究	大阪府大	岡村清人
7210	セラミックスの 14MeV 中性子照射効果	大阪大	飯田敏行
7211	Bi 系酸化物超伝導体における磁束状態の照射効果	筑波大	吉崎亮造
7212	イオン伝導性ホウ酸塩系ガラス及びカルコゲン系半導体ガラスの γ線照射効果	千葉大	岩館泰彦
7213	LiAl の電氣的性質の中性子照射効果の研究	青森大学	矢萩正人
7214	電界放射型電顕によるイオン照射損傷動的過程の高分解能観察	島根大学	小野興太郎

7215	磁性金属合金材料中の微小欠陥の磁氣的X線的方法による研究	岡山大学	小野文久
7216	黒鉛およびセラミックスの照射効果 (II)	茨城大学	仁平 猛
7217	放射線照射による高分子物質のモルホジェネシス	京都大学	西本清一
7218	添加物入りウラン酸化物の高温での局所構造解析	名古屋大	松井恒雄
7219	高エネルギー粒子照射した金属中の格子欠陥	広島大学	山川浩二
7220	酸化物高温超伝導体の構造と物性の放射線照射効果	北海道大学	中山恒義
7221	放射線化学における励起ラジカルの解離	大阪府立大	早川滋雄

### 3. 生物に対する放射線効果

7222	イオン注入法による放射活性ステントの開発と動脈再狭窄予防法への応用	群馬大学	永井良三
------	-----------------------------------	------	------

### 4. 中性子利用元素分析

7223	即発ガンマ線分析の大型試料への適用	都立大	中原弘道
7224	中性子ガイドビームを用いた中性子吸収応用の核・放射化学への応用 (II)	熊本大学	岸川俊明
7225	隕石試料の即発ガンマ線分析	都立大学	海老原充
7226	即発 $\gamma$ 線分析を用いた生命起源の鉄の同位体分析 即発 $\gamma$ 線分析による $^{54}\text{Fe}$ の定量不可能性の原因について	秋田大学	中村 彰
7227	中性子即発ガンマ線分析と放射化分析の統合・系統化	東京大学	伊藤泰男
7228	X線・低エネルギー $\gamma$ 線検出による即発ガンマ線分析	武蔵大学	薬袋佳孝
7229	即発ガンマ線測定による非破壊状態分析法の開発	大同工大	酒井陽一
7230	固体環境試料および地球化学的試料の即発ガンマ線分析	東大	松尾基之

### 5. 中性子ラジオグラフィによる構造解析

7231	中性子ラジオグラフィの電池研究への応用	学芸大学	鎌田正裕
7232	JRR-3M冷・熱中性子を用いたラジオグラフィ技術の高度化 II	京都大学	三島嘉一郎
7233	JRR-3MのTNRF2を用いた電子撮像法によるNRGの高解像度化	武蔵工大	持木幸一
7234	Cf中性子源を用いたNRG法の開発研究	武蔵工大	持木幸一
7235	植物試料の中性子ラジオグラフィ	東大	中西友子
7236	JRR-3M高速中性子NRシステムによる熱流動現象の可視化と計測に関する研究	神戸大学	竹中信幸
7237	TNRF2およびC2-3中性子ラジオグラフィ用照射場の定量化 (III)	立教大学	小林久夫
7238	JRR-3M冷中性子を利用するラジオグラフィ高度化技術の開発応用	名大	久木田豊

## 立教大学 原子力研究所

立教大学原子力研究所では本年3月に教員3名、職員1名が定年退職になったのに関わらず、その補充が行われませんでした。今後は廃炉に向かって作業が進められるわけですが、それには大変面倒な手続きを必要とし、かなりの年月と労力がかかるものと思われます。さしあたって1997年度は前年度の約半分の日数の原子炉運転が行われます(1997年度立教大学原子力研究所原子炉運転改革参照)。原子炉照射と放射線測定器の利用を円滑有効に行うためのスケジュール調整を早めに行うことにより、従来と余り変わらずに放射化分析にも利用していただけるものと思います。従って、利用申込期限が前年度よりかなり早くなりましたので、立教大学原子力研究所と連絡を取り、申込みに遅れないようにして下さい。なお、高見保清教授は原子炉主任技術者として、原沢進、戸村健児両教授は非常勤嘱託として残ることが決まり、週何日か出所しています。

(立教大学原子力研究所 戸村健児)

7215	磁性金属合金材料中の微小欠陥の磁氣的X線的方法による研究	岡山大学	小野文久
7216	黒鉛およびセラミックスの照射効果 (II)	茨城大学	仁平 猛
7217	放射線照射による高分子物質のモルホジェネシス	京都大学	西本清一
7218	添加物入りウラン酸化物の高温での局所構造解析	名古屋大	松井恒雄
7219	高エネルギー粒子照射した金属中の格子欠陥	広島大学	山川浩二
7220	酸化物高温超伝導体の構造と物性の放射線照射効果	北海道大学	中山恒義
7221	放射線化学における励起ラジカルの解離	大阪府立大	早川滋雄

### 3. 生物に対する放射線効果

7222	イオン注入法による放射活性ステントの開発と動脈再狭窄予防法への応用	群馬大学	永井良三
------	-----------------------------------	------	------

### 4. 中性子利用元素分析

7223	即発ガンマ線分析の大型試料への適用	都立大	中原弘道
7224	中性子ガイドビームを用いた中性子吸収応用の核・放射化学への応用 (II)	熊本大学	岸川俊明
7225	隕石試料の即発ガンマ線分析	都立大学	海老原充
7226	即発 $\gamma$ 線分析を用いた生命起源の鉄の同位体分析 即発 $\gamma$ 線分析による $^{54}\text{Fe}$ の定量不可能性の原因について	秋田大学	中村 彰
7227	中性子即発ガンマ線分析と放射化分析の統合・系統化	東京大学	伊藤泰男
7228	X線・低エネルギー $\gamma$ 線検出による即発ガンマ線分析	武蔵大学	薬袋佳孝
7229	即発ガンマ線測定による非破壊状態分析法の開発	大同工大	酒井陽一
7230	固体環境試料および地球化学的試料の即発ガンマ線分析	東大	松尾基之

### 5. 中性子ラジオグラフィによる構造解析

7231	中性子ラジオグラフィの電池研究への応用	学芸大学	鎌田正裕
7232	JRR-3M冷・熱中性子を用いたラジオグラフィ技術の高度化 II	京都大学	三島嘉一郎
7233	JRR-3MのTNRF2を用いた電子撮像法によるNRGの高解像度化	武蔵工大	持木幸一
7234	Cf中性子源を用いたNRG法の開発研究	武蔵工大	持木幸一
7235	植物試料の中性子ラジオグラフィ	東大	中西友子
7236	JRR-3M高速中性子NRシステムによる熱流動現象の可視化と計測に関する研究	神戸大学	竹中信幸
7237	TNRF2およびC2-3中性子ラジオグラフィ用照射場の定量化 (III)	立教大学	小林久夫
7238	JRR-3M冷中性子を利用するラジオグラフィ高度化技術の開発応用	名大	久木田豊

## 立教大学 原子力研究所

立教大学原子力研究所では本年3月に教員3名、職員1名が定年退職になったのに関わらず、その補充が行われませんでした。今後は廃炉に向かって作業が進められるわけですが、それには大変面倒な手続きを必要とし、かなりの年月と労力がかかるものと思われます。さしあたって1997年度は前年度の約半分の日数の原子炉運転が行われます(1997年度立教大学原子力研究所原子炉運転改革参照)。原子炉照射と放射線測定器の利用を円滑有効に行うためのスケジュール調整を早めに行うことにより、従来と余り変わらずに放射化分析にも利用していただけるものと思います。従って、利用申込期限が前年度よりかなり早くなりましたので、立教大学原子力研究所と連絡を取り、申込みに遅れないようにして下さい。なお、高見保清教授は原子炉主任技術者として、原沢進、戸村健児両教授は非常勤嘱託として残ることが決まり、週何日か出所しています。

(立教大学原子力研究所 戸村健児)

4 April (4日)	5 May (4日)	6 June (9日)	7 July (7日)	凡例
日 月 火 水 木 金 土 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30	日 月 火 水 木 金 土 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	日 月 火 水 木 金 土 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30	日 月 火 水 木 金 土 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	<p>—— 6時間運転日</p> <p>----- 5時間運転日</p> <p>----- 学生講習会</p> <p>○ 所内自主検査日</p> <p>□ 定期検査期間</p> <p>■ 立会検査日</p> <p>× 留止日</p> <p>○ 保安教育日</p> <p>○ 保安訓練日</p> <p>△ 年度末記録整理</p> <p>○ 祝祭日(含調整日)</p> <p>[運転日合計56日+α]</p>
8 August (2日)	9 September (3日)	10 October (0日)	11 November (7日)	
日 月 火 水 木 金 土 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	日 月 火 水 木 金 土 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30	日 月 火 水 木 金 土 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	日 月 火 水 木 金 土 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30	
12 December (8日)	1 January (4日)	2 February (4日)	3 March (4日)	
日 月 火 水 木 金 土 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	日 月 火 水 木 金 土 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	日 月 火 水 木 金 土 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	日 月 火 水 木 金 土 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31	

なお、東京大学原子力研究総合センターを窓口とする「立教大学原子炉利用共同研究」課題は下記のとおりで。  
(東京大学原子力研究総合センター 伊藤泰男)

### 平成9年度 立教大学原子炉利用共同研究 課題一覧

#### 1. 放射化分析 A (環境科学・宇宙地球科学)

7901 環境試料の放射化分析	継	大妻女子大	大森佐興子
7902 環境中の微量元素の分布と挙動の解析 (II)	継	愛知医科大	小島 朗
7903 岩石の酸性変質に伴うランタノイド並びにアクチノイド元素の移動	継	上智大学	大井隆夫
7904 地球科学における指示元素に関する研究 (III)	継	群馬大学	赤岩英夫
7905 堆積物と鉱床の放射化分析	継	東大	松本 良
7906 熱中性子捕獲反応を利用した環境化学の研究 (II)	継	大同工業大	酒井陽一
7907 熱中性子・熱外中性子を用いた地球環境試料の放射化分析	継	東大	松尾基之
7908 カザフスタン共和国の内陸閉鎖湖の塩湖化と脱塩機構	継	京都大学	片山幸士
7909 方解石仮像の微量成分と続成作用について	継	北教育大	伊藤俊彦
7910 湖水環境での物質循環に関する研究 (II)	継	金沢大学	山本政儀
7911 カーボナタイト中の微量元素の放射化分析	継	班球大学	大出 茂
7912 隕石試料等の放射化分析 (III)	継	日本大学	永井尚生
7913 第四紀黄砂の地球化学的性質と TL 年代測定	継	北教育大	雁沢好博
7914 天然・人造ガラス質の放射化分析	継	武蔵大学	薬袋佳孝
7915 微量元素組成による火山灰の対比と年代測定 (II)	雑	学習院大学	福岡孝昭
7916 ブナ林表層土壌の環境化学的研究	継	弘前大学	鶴見 実
7917 地球化学・宇宙化学的試料中の中性子放射化分析 (2)	継	都立大	海老原充

- 7918 環境試料の放射化分析による環境動態解析 新 大阪府大 溝畑 朗  
 7919 臭化メチルくん蒸における防除効果に及ぼす影響 新 北里大学 田中 茂  
 7920 地球化学図作成を目的とする河川堆積物の多試料多元素分析 (II) 新 名古屋大学 田中 剛  
 7921 マントル-地殻物質の希土類元素分布 新 北教大 池田保夫  
 7922 バイカル湖湖底堆積物のコア試料の放射化分析 (II) 新 北大 豊田和弘  
 7923 森林育成土壌の樹種への影響の調査 新 大妻女子大 寺井 稔

## 2. 放射化分析 B (ライフサイエンス)

- 7924 ラット臓器中微量元素の放射化分析 (Cu 投与の影響) 継 城西大学 万里輝男  
 7925 機器中性子放射化分析による未利用試料資源の開発研究 継 麻布大学 松原利光  
 7926 マウス肝臓中の微量元素の濃度と総量 継 静岡大学 矢永雅人  
 7927 各種疾病ラット臓器中の微量元素の定量 (II) 継 昭和薬科大 遠藤和豊  
 7928 歯科材料の放射化分析 -米国製陶器のウランの定量 継 日本大学 森脇一成  
 7929 汚染米中の微量元素の不足当量中性子放射化分析 新 静岡大 吉岡瑞江  
 7930 植物体における元素のダイナミクス 新 東大 中西友子  
 7931 放射化分析による食品中微量元素の定量 (II) 新 大妻女子大 櫻井四郎

## 3. 放射化分析 C (材料・他)

- 7932 微量成分元素存在量に基づく文化財資料の分析化学的研究 継 東京学芸大 二宮修治  
 7933 鉄試料の中性子放射化分析 (2) 継 武蔵工業大 平井昭司  
 7934 金属フラーレンの放射化分析とその応用 (II) 新 都立大学 末木啓介

## 4. 放射線応用・計測

### (核物理・原子核プローブ・フィッシュントラック・中性子ラジオグラフィー・放射線効果)

- 7935 強度変調型中性子検出器の較正と中性子スペクトル測定への応用 継 武蔵工大 堀内則量  
 7936 光ファイバーを用いた炉内中性子・ $\gamma$ 線強度分布測定法開発 継 名大 森千鶴夫  
 7937 核分裂生成物をマルチトレーサーとずるイオン交換体への吸着挙動 継 お茶大 富田 功  
 7938 フィッシュントラック年代による変成帯の冷却史と上昇過程の研究 継 北大 在田一則  
 7939 イメージングプレートを用いる中性子ラジオグラフィ法の基礎と応用 継 名大 玉置昌義  
 7940 金属材料のフィッシュントラック法による B の検出 継 東大 森 実  
 7941 フィッシュントラック年代測定における中性子照射場の再検討 継 鹿児島大 鈴木達郎  
 7942 中性子断面積精密測定のための基礎研究 新 岐阜医技 加藤敏郎  
 7943 中性子放射化核種のガンマ線エネルギー (II) 新 熊本大 岸川俊明  
 7944 (n,  $\gamma$ ) 反応による短寿命核種の半減期測定 新 名大 柴田理尋  
 7945 中性子線と X 線を用いた複合画像形成法の研究 新 駒沢短大 佐藤昌憲  
 7946 山陰地域下部中新統のフィッシュントラック年代測定 新 島根大 大平寛人  
 7947 フォッサマグナ地域の新生代火山岩類の FT 年代測定 新 信州大 小坂共栄  
 7948 熱中性子照射によるボロン分布観測法の材料学への応用 (II) 新 東大 柴田浩司  
 7949 活動的大陸縁辺域における地殻および熱構造の発達史 新 九州大 渡辺公一郎

## 5. その他 (ホットアトム効果・生物照射効果など)

- 7950 ポリエチレングリコール結合  $^{10}\text{B}$  化合物の中性子捕捉療法への応用 新 東大 柳衛宏宣  
 7951 水溶性大環状金属錯体における反跳現象の研究 新 筑波大 荘司 準

## 京都大学 原子炉実験所

平成9年度の共同利用研究では121件が採択されているが、そのうち約1/4が放射化分析に係っている。研究課題一覧を下に示す。

KURは6月半ばから平成10年2月半ばまでの使用計画が立てられている。平成9年度下半期のみの共同利用の申し込み締め切りは6月6日となっており、平成10年度の共同利用の申し込み締め切りは11月中旬の予定である。

詳細は<http://ku.rri.kyoto-u.ac.jp/> を参照して下さい。

(京都大学原子炉実験所 武内孝之)

### 平成9年度共同利用採択一覧（放射化分析関係）

- |   |          |       |
|---|----------|-------|
| 1. 放射性核種の地球化学的挙動に関する研究                                    | 阪大院・工    | 山本忠史  |
| 2. アクチノイド元素及び核分裂生成物の分離分析                                  | 広大・工     | 竹味広勝  |
| 3. 熱中性子放射化分析を用いた植物中の微量元素の定量に関する基礎的研究                      | 京大・農     | 片山幸士  |
| 4. 放射化分析による微量元素組成からみたガラス質火山岩類の特性に関する研究                    | 鳥取大・教育   | 吉谷昭彦  |
| 5. ラット脾臓の各種細胞におけるヒ素取り込みについての研究                            | 阪府大・農    | 片山眞之  |
| 6. 中性子放射化分析法による動植物中の微量元素の定量                               | 京薬大・薬    | 桜井 弘  |
| 7. 酸性雨が地球環境に及ぼす影響の調査・研究                                   | 都アイソトープ研 | 谷崎良之  |
| 8. ヒト組織中の各種元素の放射化分析                                       | (財)都神経研  | 佐藤武雄  |
| 9. 電子線型加速器による環境標準試料の放射化分析                                 | 東大・核研    | 梶本和義  |
| 10. 島弧火成岩及び堆積岩類中の微量元素濃度に関する地球化学的研究                        | 海技大・教養   | 藤谷達也  |
| 11. 隕石鉱物、マントル物質及び比較標準試料の放射化分析                             | 金沢大・理    | 坂本 浩  |
| 12. 導電性高分子の電子状態とドーパントの存在状態                                | 中央大・理工   | 風間重雄  |
| 13. 層状金属鉱床と関連する火成岩類の地球化学的研究                               | 秋田大・鉱山   | 水田敏夫  |
| 14. ケミカルフールアウトによるアンチモンの負荷と環境中動態に関する研究                     | 京大院・工    | 森澤眞輔  |
| 15. 紙に含まれる微量元素の分析   | 京大院・工    | 河野益近  |
| 16. 放射年代から見た島弧の進化   | 京大院・工    | 田上高広  |
| 17. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法とFT法を用いた地殻熱史解明の基礎的研究 | 姫路工大     | 松田高明  |
| 18. 放射化分析による大気水圏における沈降物の地球化学的研究                           | 名大・大気水圏研 | 加藤喜久雄 |
| 19. 放射化分析による水圏における微量元素の地球化学的研究                            | 名大・大気水圏研 | 増沢敏行  |
| 20. 放射化分析による地球化学アトラス作成のための基礎的研究                           | 岡山理大・理   | 関 達也  |
| 21. 中性子放射化分析法による動物の脳中微量元素の定量                              | 自治医大     | 野見山一生 |
| 22. 脳の病的老化と微量元素に関する研究                                     | 静岡県大     | 荒川泰昭  |
| 23. サンゴ礁・沖縄トラフ海底堆積物の微量元素含有量                               | 琉球大・理    | 平良初男  |
| 24. 医学・生物学的に興味あるゲルろ過分離試料の放射化分析                            | 金沢大・医    | 天野良平  |
| 25. 石英中のAl・Na不純物熱中性子放射化分析と $\gamma$ 線照射由来ESRルミネセンス観測      | 新潟大・理    | 橋本哲夫  |
| 26. 照射損傷を媒介とした結晶成長と拡散過程の研究                                | 大阪工技研    | 木野村淳  |
| 27. 放射化分析法による植物、特にせん苔類、羊歯類の微量元素濃縮と環境評価の研究                 |          |       |

- |                                      |            |       |
|--------------------------------------|------------|-------|
| 28. 毛髪メタルバランスによる病態把握に関する研究           | 神戸市環境研     | 今井佐金吾 |
| 29. 出土した金属と共存する繊維・織物などの調査研究          | 大妻女子大      | 大森佐與子 |
| 30. 放射化分析法による考古遺物の理学的研究              | (財)元興寺文化財研 | 増沢文武  |
| 31. 西南日本内蒙古期泥質岩の希土類元素組成              | 奈良教育大      | 三辻利一  |
| 32. 微量元素の存在度から見た中・古生代海洋性玄武岩の成因に関する研究 | 京教大・教育     | 武蔵野 実 |
|                                      | 愛媛大・教育     | 佐野栄   |

## 新刊書案内

### Practical Gamma-Ray Spectrometry

Gordon Gilmore, John Hemingway 著

John Wiley & Sons Ltd, 314p.

ISBN 0 471 95150 1

特徴：Ge検出器による $\gamma$ 線スペクトロメトリーの実用書

- 目次：
- 1 Radioactive Decay and the Origin of Gamma- and X-Radiation
  - 2 Interactions of Gamma-Radiation with Matter
  - 3 Semiconductor Detectors for Gamma-Ray Spectrometry
  - 4 Electronics for Gamma-Ray Spectrometry
  - 5 Statistics of Counting
  - 6 Spectrometer Calibration
  - 7 True Coincidence Summing
  - 8 Computer Analysis of Gamma-Ray Spectra
  - 9 Scintillation Spectrometry
  - 10 Choosing, Setting up and Checking the Specification of a Detector
  - 11 Resolution: Origin and Control
  - 12 Troubleshooting
  - 13 Low Count Rate Systems
  - 14 High Count Rate Systems
  - 15 Ensuring Quality in Gamma-Ray Spectrometry

- |                                      |            |       |
|--------------------------------------|------------|-------|
| 28. 毛髪メタルバランスによる病態把握に関する研究           | 神戸市環境研     | 今井佐金吾 |
| 29. 出土した金属と共存する繊維・織物などの調査研究          | 大妻女子大      | 大森佐與子 |
| 30. 放射化分析法による考古遺物の理学的研究              | (財)元興寺文化財研 | 増沢文武  |
| 31. 西南日本内蒙古期泥質岩の希土類元素組成              | 奈良教育大      | 三辻利一  |
| 32. 微量元素の存在度から見た中・古生代海洋性玄武岩の成因に関する研究 | 京教大・教育     | 武蔵野 実 |
|                                      | 愛媛大・教育     | 佐野栄   |

## 新刊書案内

### Practical Gamma-Ray Spectrometry

Gordon Gilmore, John Hemingway 著

John Wiley & Sons Ltd, 314p.

ISBN 0 471 95150 1

特徴：Ge検出器による $\gamma$ 線スペクトロメトリーの実用書

- 目次：
- 1 Radioactive Decay and the Origin of Gamma- and X-Radiation
  - 2 Interactions of Gamma-Radiation with Matter
  - 3 Semiconductor Detectors for Gamma-Ray Spectrometry
  - 4 Electronics for Gamma-Ray Spectrometry
  - 5 Statistics of Counting
  - 6 Spectrometer Calibration
  - 7 True Coincidence Summing
  - 8 Computer Analysis of Gamma-Ray Spectra
  - 9 Scintillation Spectrometry
  - 10 Choosing, Setting up and Checking the Specification of a Detector
  - 11 Resolution: Origin and Control
  - 12 Troubleshooting
  - 13 Low Count Rate Systems
  - 14 High Count Rate Systems
  - 15 Ensuring Quality in Gamma-Ray Spectrometry

## 第 2 回 $k_0$ 法利用者の国際ワークショップ 第 9 回 捕獲ガンマ線分光学と関連トピックスの国際シンポジウム

報告者 米沢 伸四郎(日本原子力研究所)

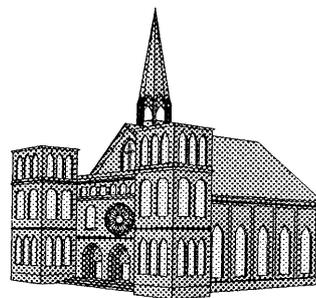
筆者は、スロベニア Ljubljana で開催された第 2 回  $k_0$  法利用者の国際ワークショップ (Second International  $k_0$  Users Work shop, "  $k_0$  法ワークショップ" と略す, 1996 年 9 月 30 日～10 月 3 日) と、ハンガリー-Budapest で開催された第 9 回捕獲ガンマ線分光学と関連トピックスの国際シンポジウム (Ninth International Symposium on Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics, "CGS9" と略す, 1996 年 10 月 8 日～12 日) に参加したので両会議の様子を報告する。

$k_0$  法ワークショップは、第 1 回目がベルギー-Gent (1992 年) で開催され、今回第 2 回目がスロベニア (旧ユーゴスラビアの 1 部) の首都 Ljubljana で Jozef Stefan 研究所の B. Smodis (現在 IAEA 勤務) を組織委員長として開催された。第 1 回目のワークショップは、主にヨーロッパ地域からの参加者で開催されたが、今回はヨーロッパのみならず米国、カナダ、ロシア、ペルー、ブラジル及び日本からの合計 18 カ国、42 名の参加のもと、42 件の研究発表が行われ、名実ともに国際ワークショップとなった。アジア地域からは、筆者が唯一の参加者であった。研究発表は、方法開発、核データ、即発  $\gamma$  線分析、ソフトウェア、検出器及び中性子スペクトルの校正、 $k_0$  法の導入、応用等に関するものとソフトウェアのデモンストレーションが行われた。また、山の上のお城での歓迎レセプション、世界第 2 位の鍾乳洞 (Postojna cave) へのエキスカーション及び夕食会も行われ、 $k_0$  法の利用者と親しく交流することができた。本ワークショップに参加することにより、ヨーロッパでは F. De Corte と A. Simonits を中心として非常に良くまとまって  $k_0$  法の研究開発が活発に行われているということを実感した。方法の開発だけではなく、核データ測定、解析プログラム製作、更に標準物質の調製等についても大学及び研究所の研究者及び民間会社 (オランダ DSM Research 社) の分析業務の実務者等も含んで、協力して開発が行われていた。さらに、 $k_0$  法の普及についてもヨーロッパ連合及び IAEA 等の機関をうまく利用して行われており、未開発国を含めた全世界中に向けられていた。次回 (第 3 回目) のワークショップは、2000 年にベルギー-Geel の IRMM で開催されることが決定された。ワークショップ終了後、Jozef Stefan 研究所の放射化分析設備の見学も行われた。同研究所の実験設備は、原研と比較して旧式で簡素なものばかりであったが、 $k_0$  法による INAA だけでなく I, As, Se, Hg 等の RNAA の研究が活発に行われていた。

CGS9 は、ハンガリー-アイソトープ研究所の G. Molnar を中心として開催され、原子核構造、原子核宇宙物理、中性子捕獲反応、原子核特性、中性子捕獲反応の応用、核データ、新技術及び設備、基礎物理等に関する合計 223 件の研究発表が行われた。これまでの本シンポジウムの研究発表は核物理に関するものばかりであったが、主催者の G. Molnar は熱中性子ガイドビームを使用した即発ガンマ線分析 (PGA) の研究を行っている関係上、今回は PGA を対象とした中

中性子捕獲反応の応用セッションが設けられた。研究発表は、講演とポスターで行われ、講演はすべて招待講演(30分と15分)で、ポスターは招待と一般応募によるものであった。シンポジウムの参加者は175名で、そのうち日本からは11名が参加した。PGAに関しては、米国 NIST の R.M.Lindstrom のレビュー講演とハンガリーアイソトープ研究所、米国 NIST, Texas 大学, Cornell 大学, スイス Paul Scherrer 研究所及び筆者らの研究発表が行われた。その他、ドイツ Munhen 工科大学に建設中の新しい原子炉(FRM-II)の紹介及びNAAの研究発表も行われた。また、会議の期間中 G.Molnar らの案内で、ハンガリー原子力研究所(KFKI)の原子炉(BRR, 熱出力10MW)とPGA装置を見学することができた。KFKIの原子炉とその周辺の実験設備は、スロベニアの Jozef Stefan 研究所と同様に数も少なく、旧式のものが目立った。G.Molnar らは、原研より遅れてPGAの実験を開始したが、豊富な人員と米国 NIST の R.M.Lindstrom らとの協力により、 $k_0$  法による多元素定量及び $\gamma$ 線スペクトル解析プログラム等に関して短期間で著しい成果を上げていた。

$k_0$  法ワークショップが行われたスロベニアは、アルプスの南側の高原に位置した自然が大変美しい小さな国であった。旧ユーゴスラビアの解体後他の地域では紛争が起きて政情が不安定な状態が続いているが、スロベニアはキリスト教徒が大部分を占め、ヨーロッパ的な文化及び習慣を持つことからいち早く旧ユーゴスラビアから独立をした。このため政情も安定し、治安の良い国であった。また、スロベニアは旧東欧圏の一つであり日本との繋がりも少なく、他のヨーロッパ諸国に比べ、日本人及び日本製品も少なく、筆者にとり見るもの全てが珍しいものばかりであった。CGS9 が行われた Budapest は、Ljubljana に比べ人口が多く、歴史的な建造物の多い大都市であった。しかし、旧ユーゴスラビアの内紛による難民の流入と経済の悪化により治安が悪く、街の汚れも目立った。なお、CGS9 に関しては、東工大北沢先生により原子力学会誌(1997年3月号 226-228頁)にもその様子が紹介されている。また、両会議のアブストラクト集及び近いうちに発行される予定のプロシーディング集をご覧になりたい方は、筆者までお申し下さい。



---

## 放射化分析支援システム研究会 報告者

井口 明（放射線利用振興協会）

---

1. 日 時 : 平成8年11月1日（金） 10:00～ 17:00
2. 場 所 : 国立教育会館（第 501 会議室）
3. 開 催 : 放射線照射振興協会・放射化分析研究会〔共催〕
4. 参 加 : 自由参加
5. 標 題 : 「中性子放射化分析と周辺の分析手法の得失の比較」

標記の研究会が共催で開催されるに至った経緯及びプログラム構築の主旨などについて概略する。

### 1. 「研究会」開催の共催に至った経緯

日本原子力研究所の委託調査として、幅広く情報を収集するために「研究会」を開催してきた。この「研究会」は委員会形式を取ってきたために、一部の委員に限定された研究会であったが、一般に門戸を開放してはとの要望に応え、自由参加とした。

研究会プログラムの設定については、「放射化分析研究会」に協力を依頼して素案をまとめていただき、「放射化分析支援システム検討会」で審議し、決定した。このような経緯により、研究会は共催で開催する運びとなった。

### 2. 「研究会」プログラム構築の主旨

標題として「中性子放射化分析と周辺の分析手法の得失の比較」を掲げ、放射化分析を専門とする研究者と放射化分析手法以外の周辺技術を主体に研究されている専門家を一同に会して、それぞれの立場で手法の得失を述べてもらい、徹底した討議を交わすことを主体としたプログラムを組み上げた。（別添－1参照）

第1部「中性子放射化分析の最近の動向について」では、中性子放射化分析の最近の動向を、手法として眺め、かつそれらが種々の研究分野でどのように役立てられているかを検討する。

第2部「周辺の分析技術」では、中性子放射化分析に対して相補的或いは競合的な手法の特徴がどこにあるのか、その得失を明らかにする。

第3部「総合討論」では、第1部、第2部の講演を背景に、参加者の討論によつて本研究会の主題「得失の比較」を掘り下げることを主眼にする。

「研究会」プログラムのなかで、ご講演下さる各先生方には上記の主旨を含めて準備を依頼した。

### 3. 「研究会」開催状況について

本研究会には約50名の参加者のもとで、プログラムに準じて進められた。各講演者には事前に上記の主旨を伝えてあったために、それぞれの講演内容は主旨に沿ったものであり、これらに対する質疑応答が交わされ有意義であった。

研究会に参加された方々に感想をお寄せいただき、以下に収録した。

#### 「放射化分析支援システム研究会」に参加して

高品質で安全な畜産食品（牛乳、肉、卵、およびそれらの加工品）の生産を目指し、牛、豚、鶏などの家畜を対象とし、家畜における微量元素の代謝の研究を行っていますが、そのためには、様々な手法を用い、多方面から検討することが必要です。分析用試料としては、家畜の飼料、飲料水、血液、臓器、排泄物（糞、尿）等があります。

今回の研究会では、機器中性子放射化分析（INAA）、即発ガンマ線分析（PGA）、放射化学放射化分析（RNAA）、周辺分析手法として、ICP-AES/MS、PIXIE等についての最新情報が得られ、大変参考になりました。

特に、汎用性複合核定数（ $k_0$ ）を用いる  $k_0$  法による INAA、また、短寿命核種を対象とした INAA が実用化されれば、多くの元素についての情報が比較的簡便に非破壊分析により得られるものと期待しています。

（農水省畜産試験場：宮本 進）

自分で研究をしていない私が、この研究会に参加しているのも妙なものです。

以前、東北大で管理のお手伝いをさせていただいたころ、外部から来られた共同研究の方に接する機会があったことが、この会に入会するきっかけになっています。

放射化分析のためには原子炉や加速器という装置が必要です。自分の研究室で出来る仕事と違い、そこに出かけると言うだけでかなりの負担になってしまうでしょう。慣れない実験室で、慣れない機械を使いながら、時間と被曝に気を使いながらの研究、そう言うところもこの分野の仕事をしている方があまり増えない理由の一つなのではないでしょうか。外部から来られる方のお世話をする部門が充実していることも、この分野の発展の一助になることと思います。原子炉を使った分析、加速器を使った分析、ICP-MS等それぞれの分析を、分析対象に応じて使い分けることにより、より正確な分析が出来るのかなと思います。精度の高い分析を、簡便な方法で行えるよう、周辺分野の充実がこの分野の一層の発展のためには必要とされているように感じます。

照射後の試薬の放射能を測り、その中の不純物の存在に驚いたところが、懐かしく思い出されます。お役に立てるとも思いませんが、今後とも参加させていただきたいと思います。よろしく願いいたします。

（日本環境調査研究所：井尾伸也）

11月1日に開催された「放射化分析支援システム研究会」では、有意義な講演を拝聴させていただきました。このような研究会は、放射化分析法を主とした研究手段とする研究者の情報交流の場として貴重であると思います。今後とも定期的な開催をお願いいたします。研究会の主旨は、放射化分析法、とりわけ、中性子放射化分析（NAA）法と他の分析法との特質を明らかにすることにあつたと思います。

私は、ICP-MSやPIXE分析法が普及している中で、微量多元素同時分析法としてのNAA法のさらなる発展を図っていくためには、その特徴を最大限に活用していくことが重要であると考えています。

NAA法では、試料を壊すことなく（溶解せずに）、簡単な操作で（化学分析の技術や知識を持たない研究者が）、信頼性の高い分析データを得ることができます。もちろん、それぞれの分析法の特質を一概に論じることは不可能です。研究目的（分析試料、目的元素）に応じて、それぞれの分析法の特徴を活かした「使い分け」が必要なのではないでしょうか。

（東京都立アイソトープ総合研究所：谷崎良之）

私は、放射化分析に携わってはいないので、詳しいことはわかりませんが、非破壊で多元素が同時に定量できるところに、とても魅力を感じています。

とくに、定量元素ごとに標準試料を使用しないで簡単に多元素の定量ができるk<sub>0</sub>法は日本ではまだそれほど多く利用されていないようですが、解析プログラムも発展し、大変有用であると思いました。

（お茶の水女子大・理学部：内田葉子）

#### 4. むすび

本研究会の詳細については「放射化分析支援システム研究会」（講演集）に収録してある。本資料の配布を「放射化分析 No.5（本号）」とともに合わせて発送を依頼した。



## 「放射化分析支援システム研究会」

「中性子放射化分析と周辺の分析手法の得失の比較」・プログラム

- ・ 開会 ..... 放射線照射振興協会
- ・ 研究会の主旨説明 ..... 「放射化分析研究会」事務局

第1部	中性子放射化分析の最新の動向について	〔座長〕	武内孝之
1.1	INAA/RNAAの最近の動向	.....	鈴木 (武蔵工大)
1.2	RNAAの超微量元素への応用	.....	岡田 (武蔵工大)
1.3	原研炉における $k_0$ 法の導入	.....	米沢 (原研)
1.4	2nd $k_0$ International Workshopの報告	.....	米沢 (原研)
1.5	日本における最近の放射化分析の動向	.....	戸村 (立教大)
第2部	周辺の分析技術 (I)	〔座長〕	岩田吉弘
2.1	即発ガンマ線分析の動向	.....	福岡 (学習院大)
2.2	CGS9の報告	.....	米沢 (原研)
	< 昼食 (1時間) >		
2.3	荷電粒子放射化分析	.....	鹿野 (NTT)
2.4	光量子放射化分析	.....	桜井 (三菱マテリアル)
☆	周辺の分析技術 (II)	〔座長〕	平井昭司
2.5	ICP-AES / ICP-MS	.....	原口 (名大)
2.6	PIXE	.....	世良 (岩手医大)
	< 休憩 (15分間) >		
第3部	総合討論	〔モデレータ〕	海老原 充

- ・ 「中性子放射化分析と周辺の分析手法の得失の比較」

3.1	機器中性子放射化分析法による標準物質中の 微量元素の定量と他の分析法との比較	.....	鈴木 (武蔵工大)
3.2	植物及び土壌中の金属元素の定量	.....	斉藤 (青山学院大)
3.3	微量試料の機器中性子放射化分析	.....	福岡 (学習院大)
3.4	地球・宇宙化学における放射化分析: 優れた点、問題と解決策	.....	田中 (名大)
3.5	地球化学ではICP分析法が普及しても 放射化分析法が必要な理由	.....	豊田 (北大)
3.6	放射化分析法における不足当量分析法の役割	.....	加藤 (NTT)
3.7	PIXEとの比較を中心に	.....	岩田 (秋田大)
	・ その他 東海研究所・研究炉の現状について	.....	桜井 (原研)
	・ 閉会		

# 環境科学における放射化分析

報告者 東大原総センター 伊藤泰男

共催 東京大学 原子力研究総合センター  
立教大学 原子力研究所  
企画 立教大学原子炉利用共同研究委員会

日時 1997年 3月 26日 (水曜日) 10:00-17:00

場所 東京大学・原子力研究総合センター 第2会議室 (3階)

10:00 開会の挨拶 原沢進 (立教大学日本原子力研究所 所長)

10:10-12:00 (座長 関 李紀)

多摩川河口域底質の放射化分析 東京大学 久野章仁・松尾基之

河川堆積物の多試料・多元素分析による地面の環境評価と問題点

名古屋大学 谷水雅治・田中 剛

シダ植物における希土類元素の濃集

東京大学・武蔵大学 尾崎卓郎・葉袋佳孝

海藻が生産する含臭素化合物の代謝研究への放射化分析の応用

北海道大学 高橋義宣・大西俊之・鈴木稔

砒素の放射化分析とICP 発光分析の比較

北海道大学 篠塚良嗣・豊田和弘

12:15-13:00 放射化分析研究会 拡大幹事会 (昼食しながら)

13:15-15:05 (座長 片山幸士)

河川水標準物質の放射化分析

武蔵工大 鈴木章悟・岡田往子・平井昭司

環境中の有機態ハロゲン(EOX)-土壌底質について

愛媛大学 河野公栄

臭化メチル燻蒸における臭素の挙動

北里大学 田中 茂

酸性雨の稲の生育に及ぼす影響

都立 RI 研 谷崎良之・前野智和

環境大気汚染調査への high volume air sampler の応用

立教大学 伊藤正樹・戸村健児

15:20-16:10 (座長 原沢 進)

立教炉における  $K_0$  法の導入

立教大学 紺野信哉・戸村健児

原研炉における  $K_0$  法の導入

東大原総センター 澤幡浩之・伊藤泰男

16:15-17:15

総合討論 (座長 戸村健児・伊藤泰男)

放射化分析による環境科学研究の位置と意義

コメンター : 伊沢郡蔵、竹内孝之、榎本和義、重松俊男、他

17:15 閉会の挨拶

小牧研一郎 (原子力研究総合センター 長)

立教大学原子炉利用共同研究委員会・原研施設利用共同研究委員会(東京大学・原子力研究総合センター付置)の企画によって、標記研究会が企画されました。プログラムの内容は、戸村健児・伊藤泰男が相談して組み立てました。今回の内容は環境科学に限定しましたが、今後色々な分野でこのような研究会をもてれば良いと願っています。当日は春の合同学会(名古屋)と重なったため、参加出来ない人も多かったのですが、それでも37名という予想外の参加を得て、原総センターの小さな会議室は溢れ出さんばかりでした。

今回の試みとして、若い人たちにこの分野の一員として主体的に関与する姿勢を強めてもらう意味で、発表等は優先的に若い人たちにしてもらうことにしました。実は、慣れない発表で要領を得ないということもあるかなと危ぶんでいたのですが、皆さん簡潔にして明快なプレゼンテーションで感心してしまいました。

また、立教大学原子炉の共同利用の継続が危うくなりかけている時期だけに、単に放射化分析研究仲間の研究会としてだけでなく、外部に発信する内容を持たなくてはならない、という視点から、最近の研究成果の報告もさることながら、放射化分析の一層の活性化に意味を見いだそうとする意図も含ませられて、「総合討論：放射化分析による環境科学研究の位置と意義」の部分も重要な役割を果たしました。討論では、文科系をも含む学生や一般の人たちの放射線との接点として環境科学の放射化分析は極めて有効であること、専門的に見ても、放射化分析の正確さと多元素同時分析性は環境試料のスクリーニングなどで他の手法に勝る面が多いこと、などが話されました。放射線取り扱いがからむために敬遠されがちな放射化分析を発展させるためには、もっと使いやすくする必要がありますが、そのためにも、今回2つのところから報告された  $K_0$  法の導入に大きな期待が寄せられます。

なお、当日は昼食をしながら放射化分析研究会の拡大幹事会も行われ、さらに研究会終了後には、立教大学原子炉の共同利用継続問題について相談会も行われました。

---

## 中性子即発ガンマ線分析研究会

報告者 米沢 仲四郎(日本原子力研究所)

---

原研と大学及び国公立等の研究所間で行われている中性子即発ガンマ線(PGA)の協力・共同研究の研究成果発表会が原研と東大原総センターの共催で3月11日(火)原研東海研で開催された。研究会の参加者は総勢約35人であった。

研究会では、“平成8年度の研究成果と平成9年度の計画”に関する研究発表とPGAの動向・話題・将来計画等の講演、及び、昼食をとりながら短期及び長期の協力・共同研究の進め方についての話し合いも行われた。“平成8年度の研究成果と平成9年度の計画”に関して、大学側から：1)内標準法による大型試料の分析と考古学研究への応用(東京都立大大浦)、2)PGAによるB定量によるアルミニウム酸化被膜の生成機構の研究(東京都立大森崎)、3)B 478keV  $\gamma$ 線のドップラー-拡がりの研究(大同工大酒井)、4)岩石中のBの定量(東大佐野)の等の研究発表と、その他、研究会を欠席等の理由により発表が行われなかった研究の成果報告が東大原総センター伊藤よりまとめて紹介された。

また、大学以外では 1)農業及び畜産試料の分析(農水省畜産試験場 宮本)、2)海洋性プランクトンのSiの分析(農水省遠水研 塩本)、3)犯罪捜査関連試料の分析(警察庁科警研 岸)、4)マトリックスによる中性子散乱の影響(原研 松江)、5)岩石標準物質中のBの定量(原研 米沢)の研究発表が行われた。

さらに、“PGAの動向・話題・将来計画等”に関して、1)PGAの世界の現状(原研 米沢)、2)中性子ミラー等の利用(原研 曾山)の講演が行われた。

今回の試みとして、若い人たちにこの分野の一員として主体的に関与する姿勢を強めてもらう意味で、発表等は優先的に若い人たちにしてもらうことにしました。実は、慣れない発表で要領を得ないということもあるかなと危ぶんでいたのですが、皆さん簡潔にして明快なプレゼンテーションで感心してしまいました。

また、立教大学原子炉の共同利用の継続が危うくなりかけている時期だけに、単に放射化分析研究仲間の研究会としてだけでなく、外部に発信する内容を持たなくてはならない、という視点から、最近の研究成果の報告もさることながら、放射化分析の一層の活性化に意味を見いだそうとする意図も含ませられて、「総合討論：放射化分析による環境科学研究の位置と意義」の部分も重要な役割を果たしました。討論では、文科系をも含む学生や一般の人たちの放射線との接点として環境科学の放射化分析は極めて有効であること、専門的に見ても、放射化分析の正確さと多元素同時分析性は環境試料のスクリーニングなどで他の手法に勝る面が多いこと、などが話されました。放射線取り扱いがからむために敬遠されがちな放射化分析を発展させるためには、もっと使いやすくする必要がありますが、そのためにも、今回2つのところから報告された  $K_0$  法の導入に大きな期待が寄せられます。

なお、当日は昼食をしながら放射化分析研究会の拡大幹事会も行われ、さらに研究会終了後には、立教大学原子炉の共同利用継続問題について相談会も行われました。

---

## 中性子即発ガンマ線分析研究会

報告者 米沢 仲四郎(日本原子力研究所)

---

原研と大学及び国公立等の研究所間で行われている中性子即発ガンマ線(PGA)の協力・共同研究の研究成果発表会が原研と東大原総センターの共催で3月11日(火)原研東海研で開催された。研究会の参加者は総勢約35人であった。

研究会では、「平成8年度の研究成果と平成9年度の計画」に関する研究発表とPGAの動向・話題・将来計画等の講演、及び、昼食をとりながら短期及び長期の協力・共同研究の進め方についての話し合いも行われた。「平成8年度の研究成果と平成9年度の計画」に関して、大学側から：1)内標準法による大型試料の分析と考古学研究への応用(東京都立大大浦)、2)PGAによるB定量によるアルミニウム酸化被膜の生成機構の研究(東京都立大森崎)、3)B 478keV  $\gamma$ 線のドップラー-拡がりの研究(大同工大酒井)、4)岩石中のBの定量(東大佐野)の等の研究発表と、その他、研究会を欠席等の理由により発表が行われなかった研究の成果報告が東大原総センター伊藤よりまとめて紹介された。

また、大学以外では 1)農業及び畜産試料の分析(農水省畜産試験場 宮本)、2)海洋性プランクトンのSiの分析(農水省遠水研 塩本)、3)犯罪捜査関連試料の分析(警察庁科警研 岸)、4)マトリックスによる中性子散乱の影響(原研 松江)、5)岩石標準物質中のBの定量(原研 米沢)の研究発表が行われた。

さらに、「PGAの動向・話題・将来計画等」に関して、1)PGAの世界の現状(原研 米沢)、2)中性子ミラー等の利用(原研 曾山)の講演が行われた。

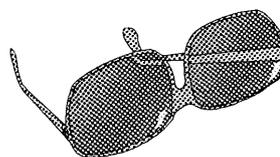
**MARC-IV (Fourth International Conference on Methods and Applications of Radioanalytical Chemistry)**

報告者 武内孝之 (京都大学)

ホノルルで飛行機を乗り継いで、朝日に輝く美しい海といくつかの島を見おろしながら約30分程でコナに到着した。コナは雨が少ないせいか植物がまだらに生えている程度で、ほとんどの部分はキレウエア火山から流れ出した溶岩がそのまま固まった状態であった。近代的ビルが立ち並ぶホノルルと比較すると、随分ひなびた町でのんびりした雰囲気である。その町の一角の海辺にキング カメハメハ ホテルがあり、そのホテルの目立たない一角で上記の国際学会が静かに開催されていた。開催期間は4月7日から11日までの5日間で、その参加国と参加者数は、表1に示すように25カ国約230名であった。研究発表はOralとPosterで下に示すようなセッションに分けて行われた。これらの発表のプロシーディングスは、約9カ月後、J. Radioanalytical and Nuclear Chemistryに掲載される予定である。研究発表の後には毎日のように海辺でレセプションが開催され、ウズベキスタンからアメリカに留学中の女性研究者や、中国からただ一人参加した女性研究者との会話を楽しむことができた。また波打ち際に腰掛けて、ヘール・ポップ彗星を眺めながら日本人研究者御夫妻と会話できたのも、忘れがたい思い出である。

表1 MARC-IVの参加国および参加者数

国名	参加者数	国名	参加者数	国名	参加者数
U. S. A.	148	フィンランド	3	イスラエル	1
日本	16	オランダ	3	スイス	1
カナダ	7	台湾	3	ポルトガル	1
イギリス	6	ブラジル	3	デンマーク	1
ドイツ	5	マレーシア	3	ハンガリー	1
ロシア	4	オーストリア	3	ユーゴスラビア	1
イタリー	4	韓国	3	中国	1
ベルギー	4	スウェーデン	3		
メキシコ	4	オーストラリア	2		



## **Oral Sessions**

Activation analysis techniques  
Quality assurance and reference materials in radioanalytical chemistry  
Non-radiometric methods for determination of long-lived radionuclides  
Actinides in biological and environmental systems  
Advances in instrumentation  
Applications of radioanalytical methods to biological and clinical systems  
Analytical and separations chemistry of actinides  
Radium and radon measurement  
Environmental radioactivity  
Advances in software routines  
Radiochemical methods and production of radionuclides  
Applications of nuclear techniques to non-proliferation treaties and weapons  
detection  
Waste and fuel cycle applications  
Application of nuclear techniques to environmental systems

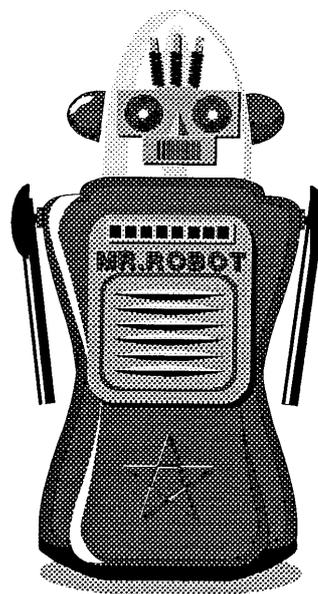
## **Poster Sessions**

Advances in instrumentation  
Field portable instrumentation  
Non-radiometric methods for determination of long-lived radionuclides  
Actinides in biological and environmental systems  
Analytical and separations chemistry of actinides  
Advances in software routines  
Activation analysis techniques  
Radiochemical methods and production of radionuclides  
Application of nuclear techniques to environmental systems  
Quality assurance and standards in radioanalytical chemistry  
Radon and radon measurement  
Environmental radioactivity  
Waste and fuel cycle applications  
Applications of nuclear techniques to non-proliferation treaties and weapons  
detection  
Applications of radioanalytical methods to biological and clinical systems

# 研究集会案内

## 13th Radiochemical Conference

1. 開催日 : 1998年4月19~24日
2. 開催地 : Marianske Lazne-Jachymov, Czech Republic
3. トピックス : Chemistry of natural radionuclides, discovery of radium and polonium  
Radionuclides in the environment, radioecology  
Activation analysis and other radioanalytical methods  
Ionising radiation in science and technology  
Chemistry of actinide and trans-actinide elements  
Separation method, speciation  
Production and application of radionuclides  
Radiochemical problems in nuclear waste management
4. アブストラクト締切り : 1997年9月15日
5. 連絡先 : 13th Radiochemical Conference  
c/o Department of Nuclear Chemistry  
Czech Technical University in Prague  
Brehova 7, 115 19 Prague 1  
Czech Republic  
FAX: (+42 2) 232 0861  
Email: radchem98@br.fjfi.cvut.cz
6. インターネットホームページ : <http://www.fjfi.cvut.cz/~john/radchem98.html>



## 第34回 理工学における同位元素研究発表会

### パネル企画

### 研究用原子炉を用いた研究の動向と新展開

日時	6月30日(月曜日) 9:30-12:00	
場所	国立教育会館	
司会 伊藤泰男 (東京大学原子力研究総合センター)		
中性子放射化分析		
・ 機器中性子放射化分析 (自動化と $K_0$ 標準化法)	鈴木章悟	(武蔵工業大学)
・ 放射化学分離操作を用いた中性子放射化分析	海老原 充	(都立大学)
・ 即発ガンマ線分析	米沢仲四郎	(原研)
フィッシュンアルファトラック		
・ フィッシュントラック年代測定法	田上高広	(京都大学)
・ アルファトラックエッチング法	柴田浩司	(東大工)
中性子ラジオグラフィー	小林久夫	(立教大学)
ホウ素中性子捕捉療法	松村 明	(筑波大学)
放射性医薬品の製造	安東 醇	(金沢大学)
新しい中性子ビーム	川端祐司	(京大原子炉)

### 趣旨

研究用原子炉はこれまで核物理・核化学を中心とする広範な研究を支えてきたが、その多くは現在成熟ないし収束しつつある。その中で、例えば放射化分析、フィッシュントラック法、中性子散乱はそれぞれ元素分析、年代測定、物性研究の重要な道具として利用の巾を広げている。また最近、即発ガンマ線分析、中性子ラジオグラフィーのように中性子ビームの品質の向上に伴って実用に向かっているもの、 $k_0$ 標準化法放射化分析のようにソフトウェアの向上によって初めて可能になったものなど、新しい展開がみられる。中性子捕捉療法やアイソトープ製造など依然として発展の余地がある。

今後の中性子利用研究は、中性子ビームの品質向上、測定法、解析法などの向上如何によって大きく進展すると考えられる一方で、研究用原子炉の社会的な位置は安泰ではない。そこで、原子炉利用研究の現状を整理し、将来の可能性と期待を浮き彫りにするパネルとする。

## お知恵拝借

NTTにおける「核・放射能に関わる研究」が、平成9年3月31日で終了した。施設の廃棄計画が進む中、国内外の利用者に向けた施設の有効活用策を考慮中である。6月末に答申を出すことになるが、ご助言などいただけたら幸いである。施設全体の概要は以下のようなものである。

施設全体は地上3階地下2階の建物で、本稿の「施設と装置」で述べたサイクロトロン施設は地下1階部分に位置し、軽元素分析専用で造られている。別に、主に中性子放射化分析用に使われる放射化学実験施設がある。正確さと精度が要求されるSiや化合物半導体の開発研究、また光ファイバーの実用化研究で有効に生かされた不足当量分析の研究で長い歴史を持つ。施設の概要を紹介すると、地下2階が廃棄物貯蔵室、貯蔵室及び配分室、地下1階に管理室、1階に高放射及び低放射実験室、さらに両実験室を合わせた大きさの測定室がある。ここには、自動試料交換装置付きGe検出装置、2台の井戸型Ge検出装置があり、これらは荷電粒子放射化分析用の測定器同様、何れも $\mu$ -VAXにぶら下がっている。自動測定後データは $\mu$ -VAXに転送される。スペクトル解析はファイルを呼び出し、別のプログラムで解析される。他に3台のガスフロー低バックグラウンド検出器などがある。2階はトレーサ実験用の低放射化学実験室及び $\alpha$ 計測用の実験室で、現在はイメージングプレート及びメスバウア分光装置が置かれている。3階は非管理区域で、居室とセミクリーンの試料調整室がある。

当研究所は日本原子力研究所東海研究所に隣接しており、原子炉を利用しやすい環境にある。本会幹事のお一人の榎本先生より、「化学者のために設計して造られた数少ない施設」とお誉めいただいたが、私もこれから益々重要性を増していく施設ではないかと密かに考えている。この施設を廃棄することなく有効に活用していくためにどのような方法があるか、模索中であるが、お知恵を拝借したいところである。問い合わせ・コメントなど下記宛お願いできれば幸いである。ご支援のほどよろしくお願ひしたい。

重松俊男 光エレクトロニクス研究所 材料研究部  
茨城県那珂郡東海村白方白根162  
NTT Opto-Electronics Labs. Materials Technology Lab.  
Tokai-mura, Ibaraki, 319-11, Japan  
Tel +81 29 287 7586 Fax +81 29 287 7875  
e-mail sigematu@iba.iecl.ntt.co.jp

## アナウンスメント

### "k<sub>0</sub> Newsletter" の発行について

k<sub>0</sub>法の情報交換誌 "k<sub>0</sub> Newsletter" が発行されました。これは、昨年9月スロベニアで開催された第2回k<sub>0</sub>法利用者の国際ワークショップ (Second International k<sub>0</sub> Users Workshop) で決定されたもので、早速第1号が4月3日のE-メールで配付されました。第1号では、Cdのk<sub>0</sub>データの更新についてとインターネットのホームページ開設に関する情報が掲載されていました。本ニュースレターは、Piotr Robouch (ベルギー, IRMM), Borut Smodis (スロベニア, Jozef Stefan 研究所, 現在 IAEA 勤務), Menno Blaauw (オランダ, Delft工科大学) の3人により編集が行われています。"k<sub>0</sub> Newsletter" の受信希望者は、Menno Blaauw に E-mail (M.Blaauw@IRI.TUDELFT.NL) で申し込むと受信することができます。また、インターネットのk<sub>0</sub>法のホームページ (<http://iriexp.iri.tudelft.nl/~rc/fmr/k0www/k0conten.htm>) には、k<sub>0</sub>法の原理、核データ、文献等k<sub>0</sub>法を利用する上で有用な情報が掲載されています。是非ご覧になって下さい。

(原研 米沢 仲四郎)

### 編集後記

風薫る5月、ビールが美味しい季節になりました。

会員の皆様のご協力により、放射化分析研究会も3年めに入り、機関誌「放射化分析」も第5号を出版できる運びとなりました。本号では、海外の著名な研究者の特別寄稿として、中国科学院高能物理研究所柴之芳教授のご寄稿を掲載しました。

現在原子力及び放射能関連分野では、動燃の事故により強力な逆風が吹き荒れています。放射化分析は、他の元素分析法と比較して“放射性物質の取扱い”という大きなハンデをもち、その利用の減少が危惧されているのですが、今回の事故によりますますその傾向が強まるのではないかと心配です。

話題をビールに戻しますが、筆者は毎日のビールの晩酌を楽しみとしている。大手メーカーのビールは、製法がほぼ同じであることから味に大差は認められないが、近年地ビールブームにより全国各地に醸造所が誕生し、個性のあるビールを楽しむことができるようになった。筆者の故郷にも“銀河高原ビール”が、また、住んでいる東海村の隣町に“常陸野ネストビール”が誕生し、大手メーカーのビールでは味わうことができない素朴な麦の味のするビールも楽しんでいる。近年ビール自作用のキットも発売されており、将来は自分のビール“自ビール”にも挑戦したいとも考えている。k<sub>0</sub>法の開発者 F. De Corte 教授も大のビール党で、学会等のレセプションなどで皆がワインを飲んでいる時でも、頑固にビールを飲んでいて。また、教授は2年前に来日の際も日本のビールを買い揃え、楽しんでいた。ベルギーはドイツと並ぶビール王国で、約120箇所 of ビール醸造所があるという。いつかベルギーを訪ね、個性あるベルギービールを楽しむことが筆者の夢である。

まあなにはともあれ、今夜は「放射化分析」第5号の発行と放射化分析の発展に“乾杯”といきたい。(C.Y.)

## アナウンスメント

### "k<sub>0</sub> Newsletter" の発行について

k<sub>0</sub>法の情報交換誌 "k<sub>0</sub> Newsletter" が発行されました。これは、昨年9月スロベニアで開催された第2回k<sub>0</sub>法利用者の国際ワークショップ (Second International k<sub>0</sub> Users Workshop) で決定されたもので、早速第1号が4月3日のE-メールで配付されました。第1号では、Cdのk<sub>0</sub>データの更新についてとインターネットのホームページ開設に関する情報が掲載されていました。本ニュースレターは、Piotr Robouch (ベルギー, IRMM), Borut Smodis (スロベニア, Jozef Stefan 研究所, 現在 IAEA 勤務), Menno Blaauw (オランダ, Delft工科大学) の3人により編集が行われています。"k<sub>0</sub> Newsletter" の受信希望者は、Menno Blaauw に E-mail (M.Blaauw@IRI.TUDELFT.NL) で申し込むと受信することができます。また、インターネットのk<sub>0</sub>法のホームページ (<http://iriexp.iri.tudelft.nl/~rc/fmr/k0www/k0conten.htm>) には、k<sub>0</sub>法の原理、核データ、文献等k<sub>0</sub>法を利用する上で有用な情報が掲載されています。是非ご覧になって下さい。

(原研 米沢 仲四郎)

### 編集後記

風薫る5月、ビールが美味しい季節になりました。

会員の皆様のご協力により、放射化分析研究会も3年めに入り、機関誌「放射化分析」も第5号を出版できる運びとなりました。本号では、海外の著名な研究者の特別寄稿として、中国科学院高能物理研究所柴之芳教授のご寄稿を掲載しました。

現在原子力及び放射能関連分野では、動燃の事故により強力な逆風が吹き荒れています。放射化分析は、他の元素分析法と比較して“放射性物質の取扱い”という大きなハンデをもち、その利用の減少が危惧されているのですが、今回の事故によりますますその傾向が強まるのではないかと心配です。

話題をビールに戻しますが、筆者は毎日のビールの晩酌を楽しみとしている。大手メーカーのビールは、製法がほぼ同じであることから味に大差は認められないが、近年地ビールブームにより全国各地に醸造所が誕生し、個性のあるビールを楽しむことができるようになった。筆者の故郷にも“銀河高原ビール”が、また、住んでいる東海村の隣町に“常陸野ネストビール”が誕生し、大手メーカーのビールでは味わうことができない素朴な麦の味のするビールも楽しんでいる。近年ビール自作用のキットも発売されており、将来は自分のビール“自ビール”にも挑戦したいとも考えている。k<sub>0</sub>法の開発者 F. De Corte 教授も大のビール党で、学会等のレセプションなどで皆がワインを飲んでいる時でも、頑固にビールを飲んでいて。また、教授は2年前に来日の際も日本のビールを買い揃え、楽しんでいた。ベルギーはドイツと並ぶビール王国で、約120箇所 of ビール醸造所があるという。いつかベルギーを訪ね、個性あるベルギービールを楽しむことが筆者の夢である。

まあなにはともあれ、今夜は「放射化分析」第5号の発行と放射化分析の発展に“乾杯”といきたい。(C.Y.)

# 放射化分析研究会申し合わせ

## 第1章 総則

第1条 本会は放射化分析研究会 (Japan Association of Activation Analysis, JA<sup>3</sup>) と称する。

第2条 会員相互の交流を行うことによって、放射化分析および関連分野の研究の進展を図り、放射化分析の発展、普及に寄与することを目的とする。

第3条 前条の目的を達成するために次の活動を行う。

- (1) 機関誌「放射化分析」およびニューズレター (不定期) の発行
- (2) 研究会、講習会等各種学術的行事の開催
- (3) 放射化分析施設の整備、将来計画及び国際交流等の放射化分析に関わる活動に対する会員の総意のまとめと提言
- (4) その他前条の目的を達成するために必要な事業

## 第2章 会員

第4条 会員は正会員および賛助会員とする。

- 1) 正会員は本会の趣旨に賛同しその活動に参加する一般個人および学生
- 2) 賛助会員は本会の主旨に賛同し、その事業を援助する組織又は団体

第5条 所定の入会申込書によって申し込みがあり、幹事会で入会が適当と認められたものを会員とする。また退会する場合には、本会事務局に届け出なければならない。

## 第3章 幹事及び幹事会

第6条 会の運営は、幹事若干名で構成される幹事会で行う。幹事は編集・行事・庶務・会計などの業務を行う。

第7条 幹事の任期は2年とし、毎年4月に半数を交替する。幹事の再任を妨げない。幹事は専門と地域の均衡を考慮して前任の幹事会で推薦して会員に周知し (会誌またはニュースによる)、特別の問題が指摘されないことをもって選出される。

## 第4章 会費および会計監査

第8条 会員は入会時および年度初頭に以下の会費を納入しなければならない。

正会員 (一般) 2,000円、 (学生) 1,000円

賛助会員 1口 25,000円

第9条 会計年度は4月1日から翌年3月31日とする。

第10条 会計監査は会員より選出される。会計監査は会の収入、支出が正しく運用されていることを監査する。

## 第5章 事務局

第11条 本会の事務一般業務を行うため事務局を置く。事務局担当幹事を幹事会代表とする。

第12条 事務局は適宜持ち回ることとし、幹事会の合議によって決める。

## 1997年次の事務局・幹事交代について

会誌 No. 4 に掲載した「放射化分析研究会・申し合わせ（案）」は会員から問題が指摘されませんでしたので、了承されたものとみなされました。今年度から発効します。以下これに基づいて、事務局・幹事の更新を試みます。

### 事務局について

東京大学原子力研究総合センター・東海分室（大学開放研究室）が事務局を担当してきましたが、2年経過したので事務局交替の可能性を検討しました。拠点施設から候補が考えられ、中でも可能性の高いとされたのが武蔵工業大学ですが、原子炉運転再開に向けて複雑な状況にあるので、運転再開まで猶予が欲しいとのことでした。従っていましばらく原子力研究総合センター・東海分室で事務局を継続します。

### 幹事交替について

申し合わせによって毎年半数を交替しますが、現幹事の大半が発足と同時に就任しており、交替の対象が既定していません。そこで今回に限り、幹事リスト（裏表紙の囲みをご覧ください）の上半分を交替の対象にするという機械的な取り扱いにしました。幹事は拠点代表・ユーザー代表によらず出来るだけ交替することが望ましいのですが、拠点施設代表はその施設内で交替する必要があります。ユーザー代表幹事も、この分野の問題が山積している現在、放射化分析を専門としている人にはもう少しがんばってもらう必要があります。このような種々の条件を考慮して、今回は大幅な交替は行わないことになりました。交替対象の幹事と交替・留任の案は下記のとおりです。

交替対象幹事	交代幹事候補	理由
井口 明	留任	放射線利用振興協会という組織としての放射化分析研究会への支援の継続が必要
伊藤泰男	留任	事務局を継続するため
海老原 充	留任	ユーザー代表幹事として続投
武内孝之	留任	拠点代表（京大炉）かつ前幹事と途中で交替したばかり
重松俊男	留任	民間拠点（NIT）代表として継続
鈴木章悟	岡田往子	拠点（武蔵工大）内での交替、鈴木幹事の積極的な申し出による

## 幹事の追加

なお、榊本幹事は東北大学・核理研から KEK に異動しました。これに伴って拠点としての核理研からの幹事を補充します。榊本幹事は今年は交替対象になっておらず、KEK で拠点を形成する期待を寄せられているという積極的な理由もあって、幹事を継続していただくことしたいと思います。また地域的には南北に幹事が欠けているので、今年は北部から1名を追加します。南部からの幹事は1年後の交替の時に視点に入れる旨現幹事会で申し合わされました。それまでに積極的に放射化分析研究会に関与できる方の自薦・他薦のあることを期待しています。

新任幹事名	理由
大槻 勤	拠点（核理研）代表、榊本幹事の後任
豊田和弘	北部（北海道）ユーザー代表

以上が、事務局と幹事交替についての幹事会案です。ご意見・コメントのある方は、同封の会員連絡表によって5月末までに事務局までお申し越し下さい。特に問題がないようでしたら、それ以降の活動を新幹事会で行います。なお、幹事会は、個人の積極的な姿勢をもとに構成するのが最善と考えますので、今の時期是非片棒かついであげよう.. という方は、積極的にお申し出いただきたくお待ちしています。



現在

立教大学原子炉の共同利用継続に関する要望の運動

を展開中です

本機関誌前号 (No. 4) にも記事がありましたように、立教炉の共同利用継続が困難になりつつあります。平成9年度は原子炉の運転日数がこれまでの半分 (52日) になり、利用停止は免れましたがそれもいつまで続くか分かりません。そこで、共同利用継続を要望する運動を展開することになりました。既に要望書の案が作られ、それをもとにした署名運動が本会会員・立教炉利用者・その他関係者の間で行われています (要望書は次ページに再録します)。そのとりまとめを、本会事務局でもある東京大学・原子力研究総合センター・東海分室で行っています。進捗状況は適宜アナウンスしていきますが、会員各位におかれては、要望や意見を事務局に集中すること、及び機会あるごとに諸方にこの問題を訴える「草の根」運動を展開していただきたいと思えます。

アンケートは、5月1日現在で大学、国公立研究所、民間、研究会など合計434名の署名が集まっています。署名の数はまだ増える見込みです。またこのアンケート活動とは別に、日本地質学会会長、日本フィッシュントラック研究会会長から立教大学総長および東京大学原子力研究総合センター長に要望書が出されています。みなさんの所属する学会や研究会からもこのような要望書が出ると一層力になるでしょう。

この問題をめぐる一般的な状況は極めて苦しいと言わざるを得ません。

ご承知のように、動燃の火災・爆発事故を契機に原子力予算の抜本的な削減が検討されており、財政的な側面からの立教大学の共同利用継続支援を引き出すことは絶望的に近い状態です。

「研究集会案内」(76ページ)にある理工学におけるアイソトープ利用研究発表会のパネル討論「研究用原子炉を用いた研究の動向を新展開」はこの立教炉の問題や武蔵工業大学原子炉の利用動向と連動させた企画です。日本原子力研究所の研究炉についても放射化分析にとっては十分でないことも当然指摘していくパネルになると思います。このパネルの参加が多いことが大きな力になりますので、各位是非参加しかつ意見を述べて下さい。

## 立教大学研究用原子炉の共同利用継続に関する要望書

立教大学原子力研究所の研究用原子炉（TRIGA-II型）は、原子力時代の幕開け初期の1961年に、私学における原子力基礎研究高揚の一環として導入され、以来30余年にわたって多くの分野で利用されてきました。初期においては核物理や核化学を中心とする広範な基礎研究を支えてきましたし、それら基礎分野の多くが成熟した現在では、実用段階に入った中性子利用研究の場として中心的な役割を果たしています。

この原子炉を用いた研究が恒常的に行われる一方で、原子炉を維持・管理する苦勞と経済的な重圧が立教大学に常に存在していたことを、私たち利用者は憂慮していました。1974年にこの研究用原子炉の有効利用促進と私学助成を目的に、文部省予算による「立教大学原子炉共同利用」が東京大学・原子力研究総合センターを窓口として開始され、研究成果も一層高まりましたが、運営支援という意味ではまだ不十分であったことを改めて認識せざるを得ません。最近、当該原子力研究所の教官の半数が定年退職するのを機に、原子炉の共同利用を停止ないし縮小する事態になり、私たちの憂慮が現実になりつつあります。

立教大学の原子炉は小型であることが大きな特徴です。それは中性子散乱のような高強度の中性子を必要とする研究には向かないものの、放射化分析やフィッシュントラック法などで絶妙な有効性を発揮します。放射化分析は、物質の主成分から極微量元素に至る定量が可能であるというダイナミックレンジの広さを持ち、正確さという点では他の分析手法に比べるものはなく、分析法としての完成度と信頼性が高いことは良く知られています。このため放射化分析は環境科学、宇宙・地球科学、医学・生物学、材料科学などの広範な分野で利用されています。最近になって原子炉内の中性子スペクトルを定量的に把握し、かつ放射化に関する物理定数のよく評価されたデータベースに基づいて、多元素を簡便にかつ正確に同時測定する手法（K0標準化法）が確立されつつあり、ますます利用が拡大するものと期待されています。

フィッシュントラック法は、ウラン238の自発核分裂飛跡（フィッシュントラック）の計数とウラン量の定量とから試料の年代を決定する手法です。測定年代幅が数千年～数億年と広く、対象となる試料は結晶・ガラス・有機物と広範であり、風化・変質した試料でも可能なため、宇宙・地球科学、考古学、環境科学分野で最も広く用いられている年代測定法の一つとして確立しています。

また、ホウ素が中性子を吸収して核分裂しアルファ線を放出することを用いたアルファトラックエッチング法も鉄鋼材料等の中のホウ素の挙動を調べる手段として最近有効性が証明されています。

このような小型原子炉を用いる研究者人口は多数にのぼります。東京大学・原子力研究総合センターが運営する立教大学原子炉利用共同研究に参加する大学の研究者数で言えば、例年ほぼ50グループありますし、その背景に放射化分析研究会（会員数およそ150）、フィッシュントラック研究会（会員数およそ50）があります。アルファトラックエッチング法も日本鉄鋼協会傘下の多くの研究者が既に実用的な利用を行っています。このような大学の利用の他に、国公立研究所や民間研究所による利用も少なくありません。このような利用に並行して各科学分野の大学院学生の教育が行われていることも重要な点です。

中性子を用いた分析が上記のように多様で、かつ優れた特徴を持つ一方で、その利用が行き渡っているとは云えません。その背景には、放射線に関する偏見とも云える社会一般の理解、規制の厳しさとそれに由来する手続き等のわずらわしさなどがあります。このような困難を克服して中性子利用分析の特徴を最大限発揮させるために一層の努力が続けられなければならない現在、安全性も確保されて立派に動いており、かつ燃料のストックもまだ十分にある原子炉そのものの運転が停止される事態は極めて好ましくありません。

放射化分析やフィッシュントラック法のような中性子利用は、日本原子力研究所の研究用原子炉、京都大学原子炉実験所、武蔵工業大学原子力研究所の原子炉でも行われていますが、TRIGA-II型程度の小型の中性子源の方が拍子回りが良く扱いやすい理由で最も便利に利用されています。現在武蔵工業大学原子炉と日本原子力研究所の一部の原子炉（JRR-4）が休止中でもあり、立教大学原子炉の共同利用が停止されることによって、放射化分析やフィッシュントラック法などの発展に大きな妨げが生ずることになり、社会的な損失は大きいと言わざるを得ません。

私たちは原子炉利用研究の有用性を以上のように認識し、立教大学原子炉の共同利用継続を強く希望しますが、同時に、それを運営する上での経済的な重圧と社会的な責任を立教大学に負わせ続けることが許されないことも理解しています。従ってこの解決のためには、なんらかの方策をもって、立教大学原子力研究所の運営を資金と人的資源の補填をもって支援することが不可欠と考えます。

ひるがえって考えると、当該原子炉もいずれは老朽化を迎えますし、老朽化に至る前に原子炉の廃止措置の条件が整うこともあると予想されます。原子炉の置かれた社会的に困難な状況を考えると、条件が整った場合には可及的速やかに原子炉を廃止することに協力せざるを得ないと思われれます。

従って立教大学原子炉の共同利用を継続するための支援は半恒久的なものとはせず、年度ごとに更新しつつ柔軟に運営することが望ましいと考えられます。このような配慮をした上で、例えば「中性子利用分析普及センター」のような組織化をはかって、比較的短期に活発に利用して燃料も出来るだけ使い切り、KO標準化放射化分析その他の実績を高めて、次世代の中性子源利用につなげるようにすることが現実的であると考えます。

このような支援を行うためにどのような方法が可能かについては、利用者である私達だけでは判断できませんので、関係諸機関において鳩首凝議の上、早急に支援対策を講じていただきたく、ここに強く要望します。

立教大学原子炉 利用者 有志一同  
放射化分析研究会 会員・有志一同

関係諸機関長、担当者殿

## 本会誌の内容および投稿募集

放射化分析研究会の情報媒体は、定期刊行機関紙「放射化分析」と不定期のニュース紙「放射化分析研究会ニュース」を主とします。

会誌「放射化分析」は下記の記事で構成されます。

### 講座・特集・解説

専門的な記事を毎号企画していきます。

記事の内容についてのご希望や提案をお寄せください。

### 研究紹介

放射化分析に関する研究、放射化分析を用いた研究を紹介していきます。研究の当事者にまとまった内容を執筆していただくものと、秀れた論文を紹介するものがあります。特に紹介したい研究についてご意見をお寄せください。

### 実験手引き Q & A

会員から質問を受けて、回答やアドバイスを掲載します。どのような質問でも結構です。回答者は幹事会が責任をもって会員の中から選定します。

### 施設・研究室紹介

放射化分析を行うことができる施設については、毎回情報を提供します。また放射化分析を行っている研究室の紹介を適宜行います。

### 談話室（要望、話題、新刊書籍紹介、その他）

会員の気軽なおしゃべりの場です。どのような内容でも結構ですので、お寄せください。

### 若い声

学生や若手研究者およびこれから放射化分析を手がけようとする方々の新鮮な声を反映させる欄です。

### 研究会報告・最近の動向等

最近開催された研究会の報告です。放射化が取り扱われている研究は広範囲な分野に顔を出している筈です。放射化が関係している研究課題が1件でもあれば、この欄に取り上げたいと思います。会員の皆さんからの情報提供をお待ちしています。

### アナウンスメント

#### 課題採択一覧

放射化分析関係の共同利用、共同研究が行われている施設で採択されている研究課題を適宜掲載します。

#### 会員名簿

以上の項目に対応する記事を積極的にお寄せください。

原稿は A4 横書き、40字×40行、上下マージン 25mm、左右マージン 20mmを標準として、そのままオフセット印刷又はコピーして使える形に清書して送付して下さい。編集の際にレイアウトを工夫させていただくこともありますので、念のためファイルをフロッピーディスク添付して下さい。（ファイルは MS-DOS のテキストモードが最適ですが、Macintosh のファイルやワープロ専用機のファイルもかなりの程度処理できます）

放射化分析研究会  
事務局

319-11 茨城県那珂郡東海村 日本原子力研究所内 大学開放研究室  
TEL 029-282-5516 FAX 029-287-2464

幹事

井口 明	伊藤泰男	海老原充	武内孝之	重松俊男	鈴木章悟
戸村健児	中西友子	増澤敏行	榎本和義	薬袋佳孝	米沢仲四郎