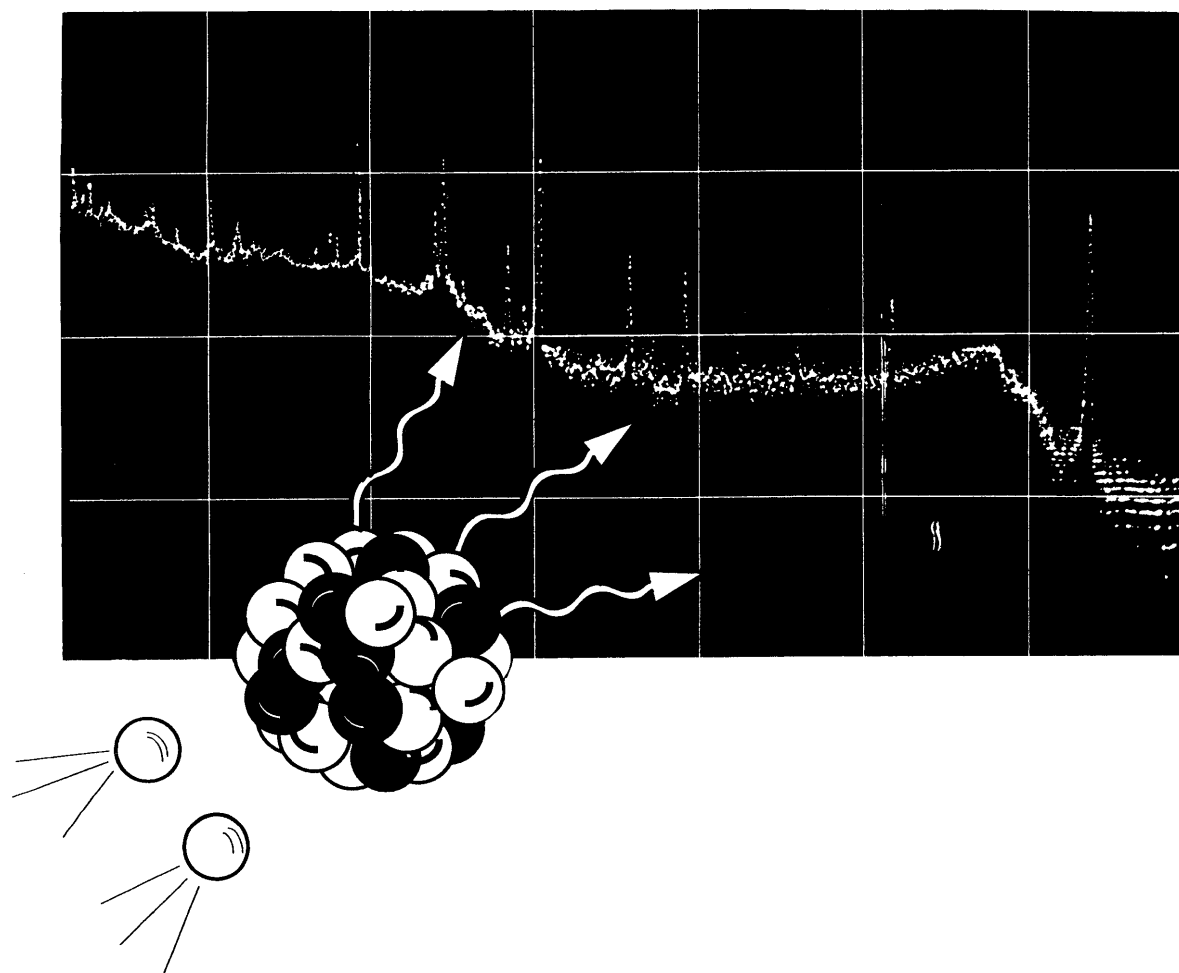


2003年3月

# 放射化分析

No. 15



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  
「Activation Analysis」

表紙図案は 岡田往子さん(武蔵工大・工学部)によるものです。

# 放射化分析 No.15

## 目次

特集 「東北大学大学院理学研究科原子核理学研究施設」		
はじめに	大槻 勤	・・・ 1
東北大学原子核理学研究施設紹介	大槻 勤	・・・ 3
研究例		
光量子および荷電粒子放射化分析	榊本和義	・・・ 20
光量子放射化分析の材料分析への応用	鹿野弘二	・・・ 28
光量子放射化分析法による隕石の非破壊分析	大浦泰嗣・海老原充	・・・ 38
学会・研究会報告		
日本放射化学会（放射化分析分科会）	大浦泰嗣	・・・ 45
日本本地球化学会	上岡 晃	・・・ 46
日本鉄鋼学会	岡田往子	・・・ 49
施設便り		・・・ 51
原研施設利用共同研究		
東北大学原子核理学研究施設		
京都大学原子炉実験所		
将来計画		
大強度陽子加速器計画	海老原充	・・・ 58
資料		
2001 FNCA 研究炉ワークショップ	海老原充	・・・ 78
談話室	川端良子	・・・ 88
カレンダー		
編集後記		
会員名簿		
広告		

# 特集

## 東北大学大学院理学研究科原子核理学研究施設

はじめに

東北大核理研 大槻 勤

現在、原子炉・加速器を用いた放射化学研究は岐路にある。放射化学利用目的の専用原子炉や加速器がないこともあって、この分野での研究環境は決して良いとは言えない。中性子利用では立教大学原子炉及び武蔵工業大学原子炉の共同利用停止から京都大学原子炉の存続問題、原研研究用原子炉の利用問題、大強度陽子加速器の中性子源の利用に関する今後の在り方など諸問題がある。一方、荷電粒子利用では高エネルギーサイクル機構田無分室（東大原子核研究所）や NTT などの施設の低エネルギー加速器（サイクロトロン）の閉鎖など、身近で RI を製造し利用できる施設がなくなっている。これらの問題は組織的な取り組みがなされてこなかったのと核物理や中性子物理分野などの施設に寄生して研究がなされてきたことにもその一因があるようにも思える。小型原子炉や加速器をこの分野が研究の柱と位置づけて存続あるいは新規設備として持つことは、放射化学的研究や RI 利用の分野から科学基礎研究や原子力の基盤を支える意味でも重要である。

近年、科学技術立国の旗のもとに大型プロジェクト（組織的、戦略的、先端的などの名の付いた組織や研究）が取り上げられ、猫の手として数多くの研究者や学生・ポスドクが集まる傾向にある。これらは研究成果を工場で生産するようなイメージである。しかし、このような大型プロジェクトではこれまで小規模な実験施設で身を粉にして実験装置を作り上げ博士論文を仕上げるといような職人的人材が育たない。良い研究者が育つには努力や無駄がつきまとう物作りや試行錯誤の過程が重要なステップであろう。放射化学分野にかぎらず原子力に係わる基礎分野に於ても小型の研究用原子炉や加速器施設はこのような役割があることを十分に理解されるべきである。特に大学に附属した原子炉や加速器施設は研究の面ばかりではなく教育的にもこの意味でも貴重なものである（であった）。学部や大学院教育には手軽に身近で利用でき、大型施設での手続きのような煩雑さもない。萌芽的な思いつきのなどのテスト実験にも適している。しかし、研究成果ばかりが求められる近年、大学等の原子炉・加速器施設では維持の為の予算や組織の見直しなどで苦しい状況になりつつある。このような状況でありながら東北大学にはまだ手軽に利用可能な二種類の加速器が存在している。原子核理学研究施設の電子ライナックとサイクロトロン RI センターのサイクロトロンである。これらの施設では学内共同利用でありながら全国の研究者・学生に利用されていて、育てる研究・教育という面の重要性は大きい。

本特集では原子核理学研究施設の電子ライナックの現状とともに、本施設を用いた光量子放射化分析などの研究を紹介する。世界的にも光量子放射化分析を行うことができる施設が数少ない中で、照射設備やロボット自動測定装置など基本的な整備が整っている本施設の維持は重要であり、さらに多くの育てる研究や教育に利用して頂きたいと願っている。

# 東北大学原子核物理学研究施設紹介

大槻 勤

東北大学大学院理学研究科原子核物理学研究施設

## はじめに

原子核物理学研究施設（核理研）は、東北大学の共同利用施設として、原子核物理学に関する学理及びその応用の研究を行い、あわせて研究者養成に資することを目的に、昭和41年に、東北大学理学部附属施設として発足した。昭和42年に完成した3億電子ボルト(300MeV)電子線形加速器(ライナック)からのパルス電子は、原子核物理学のみならず、物性物理学、放射化学、工学、生物学等の分野に広く利用されてきた。管理区域建屋の広さはライナック棟4,400m<sup>2</sup>、放射性同位元素実験棟(RI棟)330m<sup>2</sup>である。平成7、8年度には、12億電子ボルト(1.2GeV)ストレッチャー・ブースタリング(STBリング)と呼ばれる電子シンクロトロンが建設され、原子核物理学、加速器科学、核・放射化学(RI利用)の3分野での新しい研究が展開されている。平成14年にさらに新しいGeVガンマ線実験棟が完成し、1.2GeVの光子を用いた標識光子による原子核の実験が本格的にスタートしている。

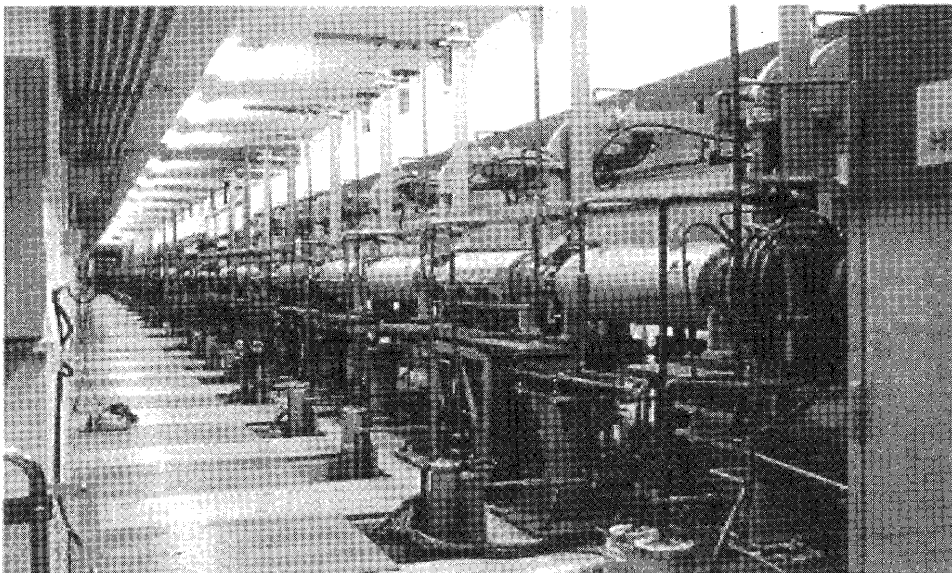


図1：300MeV電子ライナック  $2\mu/s$ の時間巾のパルス状電子が300パルス/秒で加速できる。

核理研では研究施設設置当初から電子ライナックの多目的利用をめざし、原子核物理以外にも放射性同位元素利用、中性子利用の観点から、ビームライン及び実験設備の設置、維持がおこなわれてきた。中でも、放射性同位元素の製造・利用は核理研電子ライナック利用の特徴とも言える。放射化学分野では電子ライナックによる放射性同位元素の製造及びその利用は原子炉などの利用者数に比較して少ないものの、特徴的な放射性同位元素の製造が可能なことや原子炉ほど大規模な施設が必要ないことなどの利点を生かした放射性同位元素の製造・使用がなされている。核理研電子ライナックの放射化学・材料科学分野への利用においては、国内はもとより海外含めてもこれほど多目的利用がなされている加速器は少ない。

核理研の加速器の性能及び最大運転時間を表1に示す。これは放射線発生装置使用の承認書に記載されている加速器の性能である。また、図2には核理研ビームラインの全景を示す。電子ライナック低エネルギー部では最大70MeV（現実的には60MeV程度）までの電子が第一実験室へ導かれ、放射化学関連分野での照射に用いられている（ビームコース⑥）。高エネルギー部（最大220MeV程度）では第二実験室へ電子

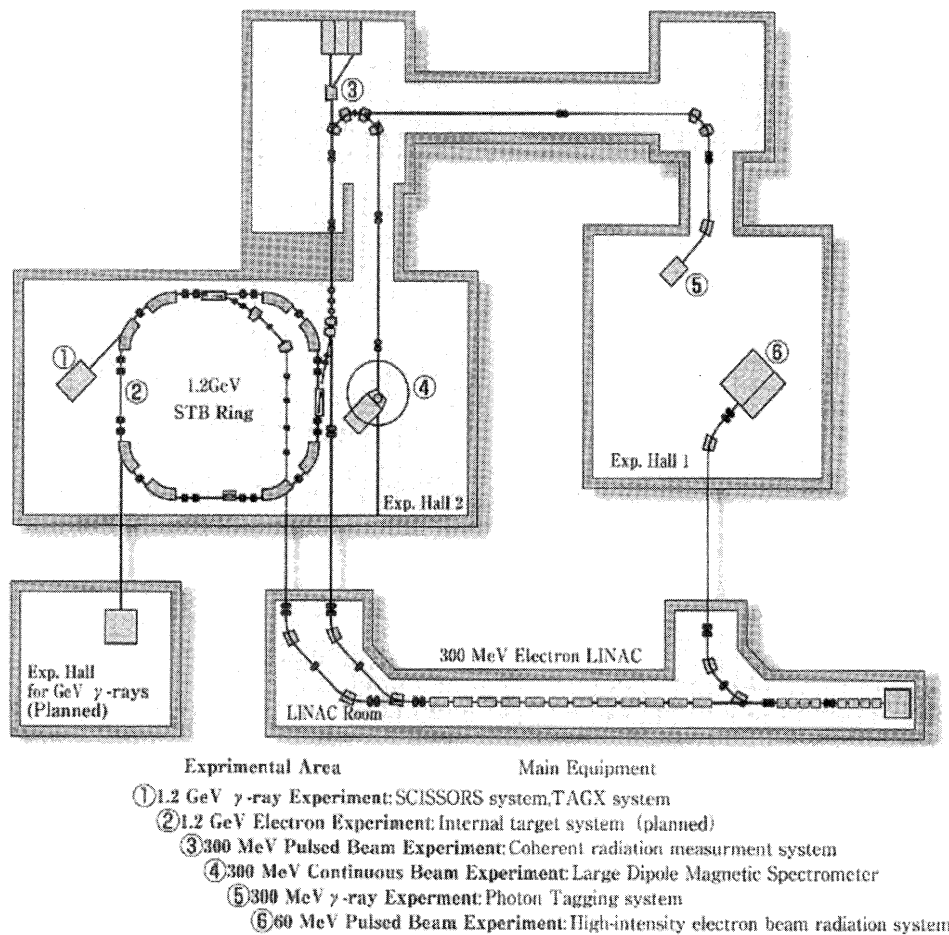


図2：原子核理学研究施設（核理研）電子加速器ビームライン全景。300MeV電子ライナック及びライナックを入射器とした1.2GeVストレッチャー・ブースタリング(STBリング)の2台の加速装置がある。主に放射化学関連分野の研究では第1実験室のビームコース⑥で行われる。

表 1 : 承認書に記載されている加速器の性能及び運転時間

加速種別 (加速モード)	エネルギー、電流、パワー	最大運転時間
直線加速装置 (A 部)	$E_{max}=70\text{MeV}$ , $I=180\mu\text{A}$ $W=12.6\text{KW}$	600 時間 / 3 月 96 時間 / 週
直線加速装置 (A+B 部)	$E_{max}=250\text{MeV}$ , $I=60\mu\text{A}$ $W=15\text{KW}$	2184 時間 / 3 月 168 時間 / 週
直線加速装置 + 電子シンクロトロン (A+B 部) + (ストレッチャーモード)	$E_{max}=250\text{MeV}$ , $I=15\mu\text{A}$ $W=3.75\text{KW}$	1500 時間 / 3 月 168 時間 / 週
直線加速装置 + 電子シンクロトロン (A+B 部) + (RF 加速モード)	$E_{max}=1.2\text{GeV}$ , $I=30\text{ nA}$ $W=36\text{W}$	1500 時間 / 3 月 168 時間 / 週

ビームが導かれる。第二実験室に設置された STB リング入射により、ライナックからの 200MeV 程度のパルスビームは連続ビームに変換され、大型スペクトロメータや標識光子を用いた原子核研究に、さらに、同 STB リングにより、1.2GeV まで加速された電子を用いて 1.2GeV までの標識光子の発生を行い、1GeV 近傍までの中間子生成や核内の共鳴状態の研究が行われている。

### 光核反応

原子核にエネルギー 10MeV から数 10MeV の  $\gamma$  線が入射すると、入射光子のエネルギー  $E_\gamma$  が原子核のサイ程度では光子を吸収し、その吸収断面積  $\sigma_{abs}(E_\gamma)$  は急激に増大する現象として巨大共鳴が知られている。その吸収断面積は (特に双極子巨大共鳴 GDR では) 原子核によっては数百 mb にも及び、光核反応に重要な役割を果たす。この巨大共鳴 (主に GDR) は質量数 A にあまり依存しない 5MeV 程度の中 ( $\Gamma$ ) をもつこ

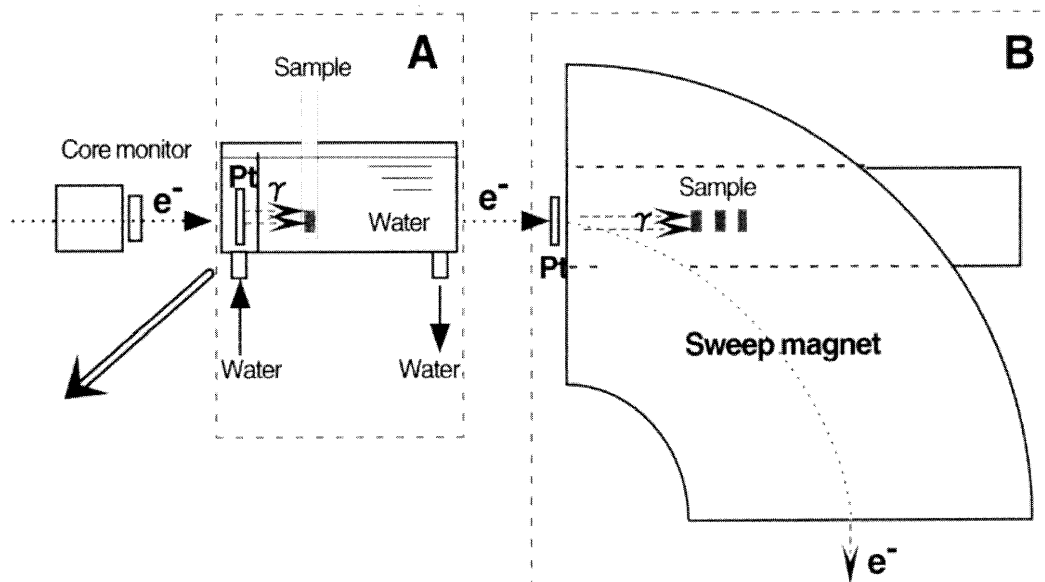


図 3 : 第 1 実験室ビームラインに設置されている照射設備 A: ビームライン末端から空気中に取り出された電子を 2mm の白金コンバータで光量子に変換し、水槽中で冷却しながら試料に照射する装置 (光量子に変換されない電子も試料に照射される)。B: Sweep magnet を用いて白金で変換されなかった電子を除去し、白金コンバータで変換された光量子のみ試料に照射する装置



表2：原子核理学研究施設を用いて行われている主なテーマ

区分	主なテーマ
放射化分析	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Photon activation analysis of carbon and nitrogen.</li> <li>• Photon activation analysis of biological samples.</li> <li>• Radiochemical photon activation analysis in meteorites.</li> <li>• Rapid chemical separations in photon activation analysis.</li> </ul>
核化学	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Search for low lying levels in light actinides.</li> <li>• Recoil properties of radionuclides in the photonuclear reaction.</li> </ul>
材料科学	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diffusion of radioisotopes in alloys.</li> <li>• Production of trace elements in chemical behavior.</li> </ul>
放射線化学	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Study on Tc(IV) colloid.</li> </ul>
同位元素標識	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formation of radioactive fullerenes.</li> </ul>
放射線照射効果	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Radiation effect in materials for the target system in RI beam</li> </ul>

とが知られており、 $^{16}\text{O}$ では24MeV程度、 $^{208}\text{Pb}$ では約13MeVというように、軽核では20MeVの領域から重核では10MeV程度までその共鳴ピークは質量数 $A^{1/3}$ に比例しながら緩やかに減少する。巨大共鳴によって光子のエネルギーが吸収された後に、統計的な崩壊現象として $(\gamma, n)$ 、 $(\gamma, 2n)$ 、 $(\gamma, p)$ 、 $(\gamma, \alpha)$ …等の粒子放出が起こる。残された残留核は放射性核種であることが多く、これらの反応で生成される放射性同位元素をプローブとして、放射化分析、放射性のトレーサー製造、核化学的研究などに利用される。光子のエネルギーが30MeV領域を越えると、準重陽子放出などの原子核反応のチャンネルが増加するが、光子の吸収は巨大共鳴領域ほど起こらなくなる。300MeVの領域において再び大きな共鳴状態( $\Delta$ 共鳴)が存在するが、これは10~25MeV領域ほど大きい共鳴状態ではない。本施設では放射化学的手法を用いてこの $\Delta$ 共鳴状態からの崩壊現象を研究するグループも活動している。

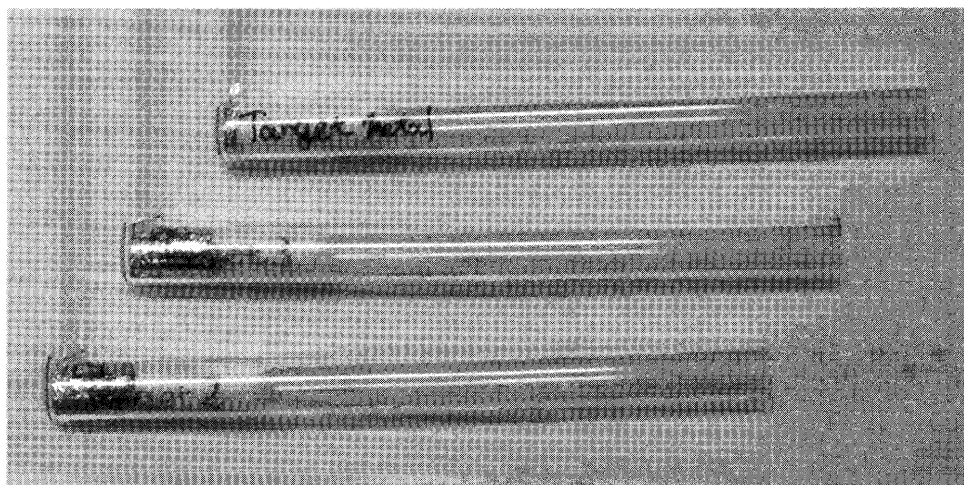


図4：石英管と照射試料：照射試料をAl箔に包んで石英管内に封入する。封入された石英管を図3の照射位置にセットし照射を行う。

表 3：整備されている主な装置

装置名	台数等
Ge 半導体検出器	8 台
ロボット（試料自動交換装置）	2 台（ $\gamma$ 線測定用）、その他 1 台
波高分析装置・CAMAC	Ge 検出器用 7 台（セイコー、Labo）、CAMAC 2 台
高速液体クロマトグラフ装置	2 台
BGO-BGO,NaI-NaI 同時計数装置等	2 台
質量分析装置	1 台
真空ライン	1 台

## 高エネルギー光子の発生及び照射設備

主に放射化学分野での電子ライナックの利用は第 1 実験室に導かれた電子ビーム照射によって行われる。加速された電子ビームはビームライン末端の Ti 窓（50 $\mu$ m 厚：図 2 の ⑥のコースで）から空气中に導かれる。電子ビームの強度は校正されたコアモニターにより読み取られ、電流に換算される。核理研ライナックの照射電流値は 100 $\mu$ A~150 $\mu$ A まで得ることができる。空气中に導かれた電子ビームはタングステンや白金などの熱的に強い重核（光コンバータ）を用いて光子に変換される。発生した光子は電子の加速エネルギー（電子の静止質量を差し引いたエネルギー）から 0 までの連続スペクトルを示す。この連続スペクトル部分の光子を有効に利用した巨大共鳴領域での反応収率は有効光子数の積分値（光子エネルギーに依存した巨大共鳴の断面積）として表わすことができる。放射性同位元素の製造では巨大共鳴吸収に対する有効光子の数が多いほど、つまり加速電子のエネルギーは高いほど、生成放射能が多くなり有効である。しかし、放射化分析などでは光核反応における崩壊のチャンネルが増えるために  $\gamma$  線測定において妨害になる放射性同位元素を生成してしまうこともある。また、高エネルギーでは光核反応 ( $\gamma, n$ ) による中性子放出量が増えるために、放出された中性子により試料中での ( $n, \gamma$ ) 反応の確率が増し、この場合でも妨害元素を生成してしまうこともある。一般的に放射化分析では 20MeV から 30MeV 程度の電子エネルギーが利用しやすい。核理研では 20MeV から 60MeV まで（第一実験室）のビームが 100 $\mu$ A 以上の電流値を用いて、多目的トレーサー製造などの放射性同位元素製造には 50MeV の電子ビームで、また、放射化分析では妨害元素などを考慮しながら 20MeV~30MeV の電子ビームで照射が行われている。図 3 に第 1 実験室の照射設備の概要を示す。主に 2 つの照射設備（図中 A 及び B）があり、実験目的によって使い分けられている。A 部では水槽中に沈められた白金コンバータ（2mm）により入射電子は制動輻射に変換され、同じ水槽の下流にセットされた試料に高エネルギー光子（制動輻射）を照射する。しかし、すべての電子が制動輻射に変換されるわけではなく白金を透過した一部の電子は試料中にも入射するため、試料が高温にさらされることになる。そこで、透過電子をできるだけ除くために、グラフィットの角棒を白金コンバータの直後に差し入れて試料中に電子ビームが入射するのを防ぐような工夫もされている。試料が電子ビームや温度による破壊に強い場合はビームをそのまま試料中に導入した方が生成放射能が大きい場合もある。これは、電子が原子核内（試料中の）まで入り込み仮想光子を発生させることにより光核反応を引き起こすことができるからである。B 部は透過電子による

影響を避けるために、Sweep 電磁石を設置して白金で制動輻射に変換されなかった電子を除去し、光子のみを利用するシステムである。A 部では白金コンバータと試料の距離を小さくできるために制動放射の強度をあげることができるが、B 部を用いると電子照射や熱での試料破壊が起きない利点はあるが白金コンバータからの距離が離れるために制動放射のフラックスが十分に得られないこともある。図 4 に石英管に入れられた試料の例を示す。例えば放射化分析では、照射試料は試料整形器により disk 状にしたものを Al 箔に包んで順次石英管に押し入れて封入し、A 部の水槽中や B 部のマグネット中に光子ビーム方向に沿ってセットされ、照射が行われる。ビーム上流側から下流へ光子フラックスは減少するので、光核反応の収率を補正するためには標準試料を適当な間隔で照射試料中に差し込んでおくことよい。電子（光子）ビーム利用の特徴としては、照射エネルギー等の条件が合致すれば便乗照射ができる点である。前に示したように照射ポート（冷却水槽）に試料をセットして照射するが、この照射ポートに合い載りできるスペースがあれば便乗照射が可能となり、放射性同位元素製造実験等には威力を発揮している。

## 放射化学分野での利用

核理研を利用した放射化学分野の研究を表 2 に示した。放射化分析ばかりでなく核化学、材料科学、放射線化学、同位元素標識、放射線照射効果等の研究が行われているが、以下にその内容を簡単に紹介する。

光量子放射化分析：光量子放射化分析では材料中の軽元素（炭素、窒素、酸素）等の分析、生物試料に着目した分析、隕石試料に着目した分析など、中性子放射化分析法で得られた定量値との比較検討、あるいは中性子放射化法では得られない元素の分析も行われている。また、光核反応を用いた軽元素分析などでは迅速化学分離法の開

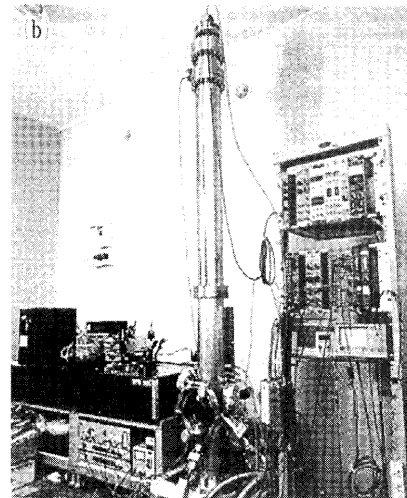


図 5：(a) 放射性同位元素実験室の測定室に設置されている 3 軸型試料交換ロボット、(b)：放射性試料のためのレーザー蒸発型飛行時間質量分析装置

発なども研究対象となっている。本稿は放射化分析研究会誌であり、光量子放射化分析の解説をすべきではあるが、光量子放射化分析の原理については梶本氏が「放射化分析 No.5」への寄稿において詳しく解説しているので本稿では簡単な紹介にとどめたい。また、本誌において核理研利用者の方々による光量子放射化分析の研究紹介を掲載してあるので、この場では詳しい記述はしないことにする。

核化学：近年、重核の崩壊現象として興味深い事実として、 $^{229}\text{Th}$  の非常に低いレベルのアイソマーが存在することが指摘されている。核理研ではこの  $^{229\text{m}}\text{Th}$  の低エネルギーレベル (3.5eV 近傍) の核励起状態の探索を  $(\gamma, n)$  反応や  $(\gamma, p2n)$  反応を用いて行っている。 $^{230}\text{Th}(\gamma, n)^{229}\text{Ac} \beta^-$  崩壊で生成する  $^{229\text{m}, 229\text{g}}\text{Th}$  の反跳捕集の実験を行い、 $^{229\text{m}}\text{Th}$  の生成及び崩壊特性について  $\alpha$  線スペクトロメトリーによって検討を進めている。また、 $^{147}\text{Sm}(\gamma, n)$  反応によって、消滅核種  $^{146}\text{Sm}$  を製造し、その半減期測定を行って、太陽系外から現在も地球に降下していると考えられる  $^{146}\text{Sm}$  を深海低に探索する準備研究がなされている。

材料科学：材料中での拡散を調べるために、各種の放射性同位元素を光核反応を利用して製造し、それをトレーサーに用いることによって金属中における拡散の研究が

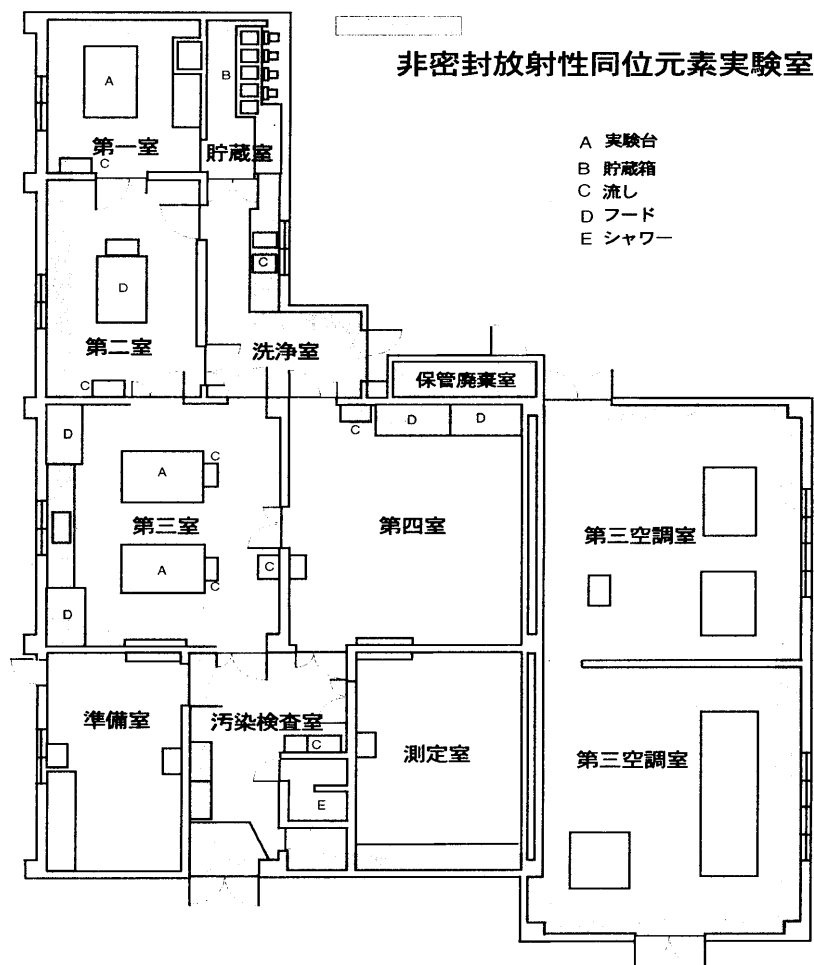


図6：非密封放射性同位元素実験室（第3実験室）の概要。第1室 試料調整室、第2室 真空ライン等、第3室 化学実験室、第4室 化学実験室、測定室 ロボット自動測定 Ge 検出器等の設置

おこなわれている。金属中における拡散の研究は基礎的にも工学的にも極めて重要であり、核理研では一般的に入手が困難な放射性同位元素が容易に製造できるのでこの種の実験には威力を発揮する。例えば  $^{44}\text{Sc}$  や  $^7\text{Be}$  などの放射性同位元素の金属中での拡散の研究が行われている。

放射線化学：放射線照射によるコロイド生成・成長についての研究も行われている。地層処分された高レベル廃棄物は、長期にわたって高線量率下にさらされるが、これらの高線量環境下におけるコロイド生成メカニズムに関してはほとんど検討されていない。ここでは核分裂核種として知られている Tc の同位体を用いて放射線照射によるナノ粒子の調製及びコロイド生成メカニズムの研究がなされたい。

溶液化学：放射性核種から有害な放射性核種を一括して除去することで、放射性廃棄物の容量の縮小化と被曝の低減化が達成される。このため多くの放射性核種を効率的に吸着する除去吸着剤の開発が進められている。本研究では各種選択性吸着剤（無機イオン交換粉末、抽出剤油滴等）を包括固定剤としてマイクロカプセルを調製し、カプセルに対する Cs、Sr、Co、Y、Eu、Am 等の吸着性に関し検討し、事故廃液及び汚染水に対する吸着効率を測定・評価する研究に、トレーサーとして有用な放射性同位元素の製造がなされている。

同位元素標識：大量に製造可能なフラーレン ( $\text{C}_{60}$  や  $\text{C}_{70}$ ) は新機能物質として注目されている。放射性同位元素で  $\text{C}_{60}$  や  $\text{C}_{70}$  を標識することはこれら新機能物質をトレースする上で重要である。フラーレンと異原子の混合物を高エネルギー  $\gamma$  線で照射した後、高速ラジオクロマトグラフ装置を用いて放射性同位元素標識フラーレンを分離精製がなされている。また、飛行時間質量分析装置を用いて質量同定を行い生成物の確認を行うことにより、異原子内包フラーレンやヘテロフラーレンの生成メカニズムやその収率の検討を行っている。

放射線照射効果：大強度加速器のターゲット駆動装置等は高放射線場にさらされるために、そのシステム設計の際に放射線に強い素材を選別して使用することが重要となる。大電流照射による熱負荷や放射線損傷のために回転装置の磁性流体やポンプ用オイル、絶縁体などの物質に MGy 程度までの高エネルギー  $\gamma$  線や中性子を照射し、その性質の変化を照射線量の関数として調べる研究が行われている。これらの結果は今後建設が予定されている大強度加速器の発展に欠かせないデータを提供するであろう。

その他、研究計画が立てられているテーマもあるが、ここでは割愛する。

## 放射性同位元素実験施設

放射性同位元素実験施設（第3実験室）建屋の平面図を図6に示す。第1室から第4室までフードが備え付けられていて、非密封同位元素の開封や調製、化学分離等に利用される。主に第1室は照射試料調製に、第2室は真空ラインによる試料の封入及び石英管の工作に、第3室及び第4室は化学実験室に用いられている。その他、測定室が2部屋（1部屋は間仕切り）確保されていて Ge 半導体検出器等の機器が整備されている。主な設備としては Ge 半導体検出器 8 台にロボット自動試料交換測定装置 2 台、

飛行時間質量分析装置、高速液体クロマトグラフ装置、BGO-BGOやNaI-NaI同時計数装置、リストモードによるデータ取得可能なCAMACシステム等の実験設備がある(表3参照)。今後、より短半減期核種の使用には照射位置からの自動試料搬送システム等の整備が必要となろう。

核理研では第1群2核種、第2群33核種、第3群72核種、第4群4核種、合計109核種の非密封放射性同位元素の使用承認と<sup>241</sup>Am-Be密封放射性同位元素(中性子校正用線源370MBq、使用場所は第1実験室及び第2実験室)の使用承認を受けた(平成14年変更申請)。非密封放射性同位元素の使用数量等を群別に表4に示す。ここでは電子線照射により( $\gamma, n$ )、( $\gamma, 2n$ )、( $\gamma, p$ )等の光核反応で生成する主な核種を網羅している。核理研の非密封放射性同位元素使用の特徴としては、必要な核種を必要分だけ電子照射により製造し、実験に使用できることである。放射性同位元素を数日~数週間保管する場合があるが、ほとんどの場合は製造した後、直ちに使用してその後廃棄、また他事業所へ搬出される場合が多い。

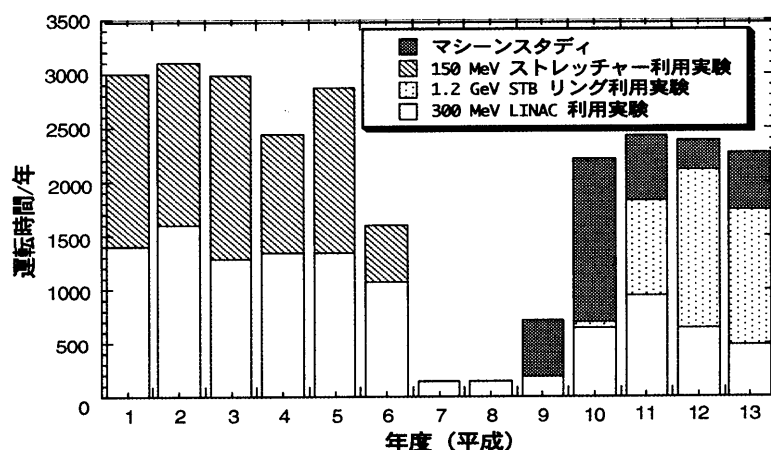


図7：年度別の加速器運転時間 平成6年度~平成9年度まではSTBリング建設及びそのマシースタディ期

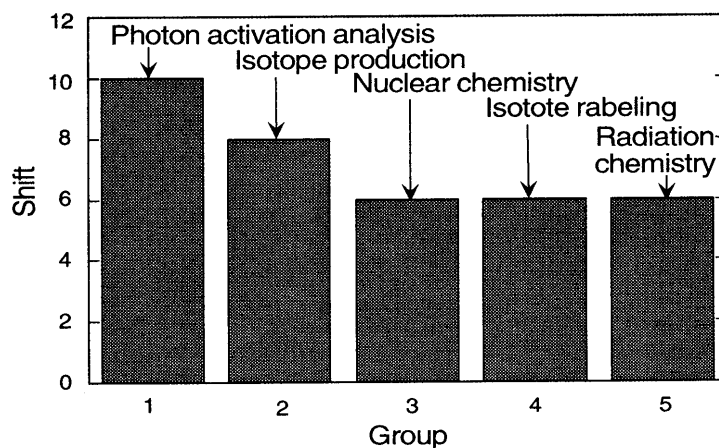


図8：平成13年度の放射化学関連分野の消化シフト数、年間36シフト消化(1シフト半日であるが実際は36日使用)

表4：非密封放射性同位元素使用数量等

核種名	群別	物理的 状態	化学形	年間 使用数量 (MBq)	1日最大 使用数量 (MBq)	群別1日 最大使用数量 (MBq)	貯蔵能力 (MBq)	群別 貯蔵能力 (MBq)
$^{252}\text{Cf}$	1	液体	全ての	0.2	0.01	0.02	0.2	0.4
2核種		固体	化学形					
$^{22}\text{Na}$	2	液体	全ての	40	2	8	40	400
33核種		固体	化学形					
$^{11}\text{C}$	3	液体	全ての	80	4	20	80	400
72核種		固体	化学形					
$^7\text{Be}$	4	液体	全ての	160	8	20	160	400
4核種		固体	化学形					

### 加速器運転時間・利用者数等

核理研の加速器運転時間を年度ごとに図7に示す。平成5年までは年3000時間に達していたが、平成6年～平成9年までSTBリングの建設に伴い放射性同位元素製造以外の実験（営業運転）はほぼ停止していた。現在年間約2500時間まで運転時間が回復してきている。今後1.2GeVの実験が本格的になれば運転時間は3000時間に達する見込みである。放射化学分野では平成6年～平成9年の間の実験停止期間に利用者が減少したが、今後平成6年以前の利用者数程度までの回復を望むものである。平成13年度（2001年度）の放射化学分野でのシフト数（1シフト半日であるが実際は1日を使用）実験項目別に図8に示す。13年度は36シフト消化し、10シフトが放射化分析に利用されている。

核理研利用者数を学内・学外別に図9に示す。図中の利用者数は延べ人数となっており、各々の実験課題に参加した人数の総和として表わされている。実際の放射線業務従事者は教職員、学生含めて約120名程度であり、学内にとどまらず、遠くは広島大学から京都大学、大阪大学、金沢大学、東京都立大学等学外利用者も多数実験に来仙している。

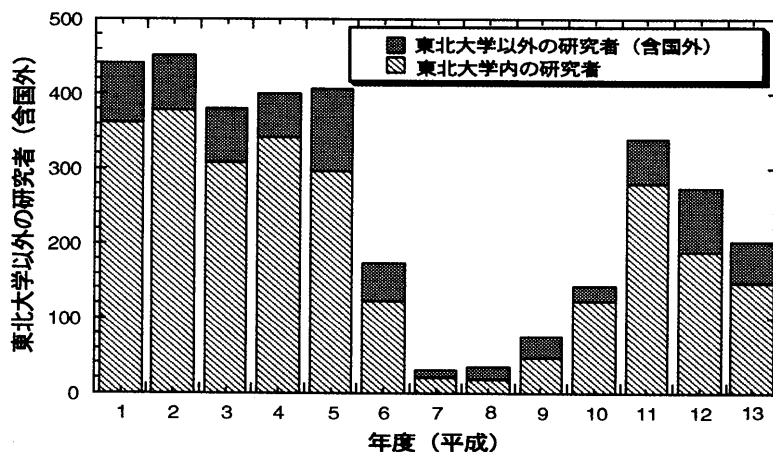


図9：年度別東北大学内外の共同利用者数；縦軸は延べ人数で各実験における参加者数の合計

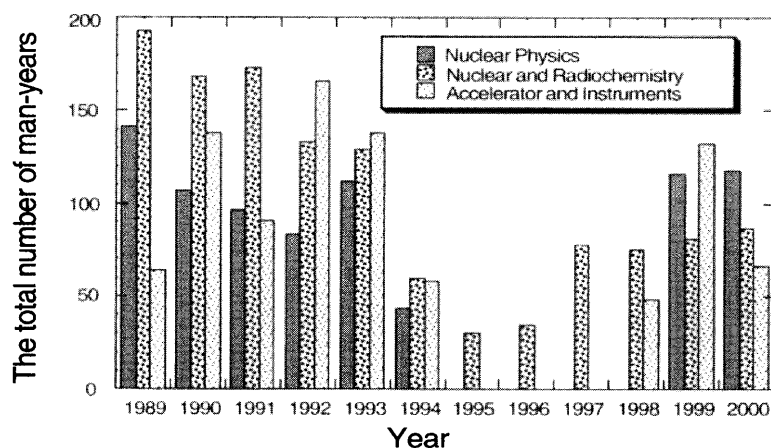


図10：年度別各分野の共同利用者数；縦軸は延べ人数で各実験における参加者数の合計

## 最後に

核理研では広大な敷地を利用して1.2GeVVSTBリングを入射器とした放射光の建設計画があり、その実現に努力している。早期に実現できれば、新たな入射用加速器が導入されることになり、放射化学関連分野にとっても十分なマシンタイムが確保できる可能性がある。本計画の早期実現が望まれるものである。

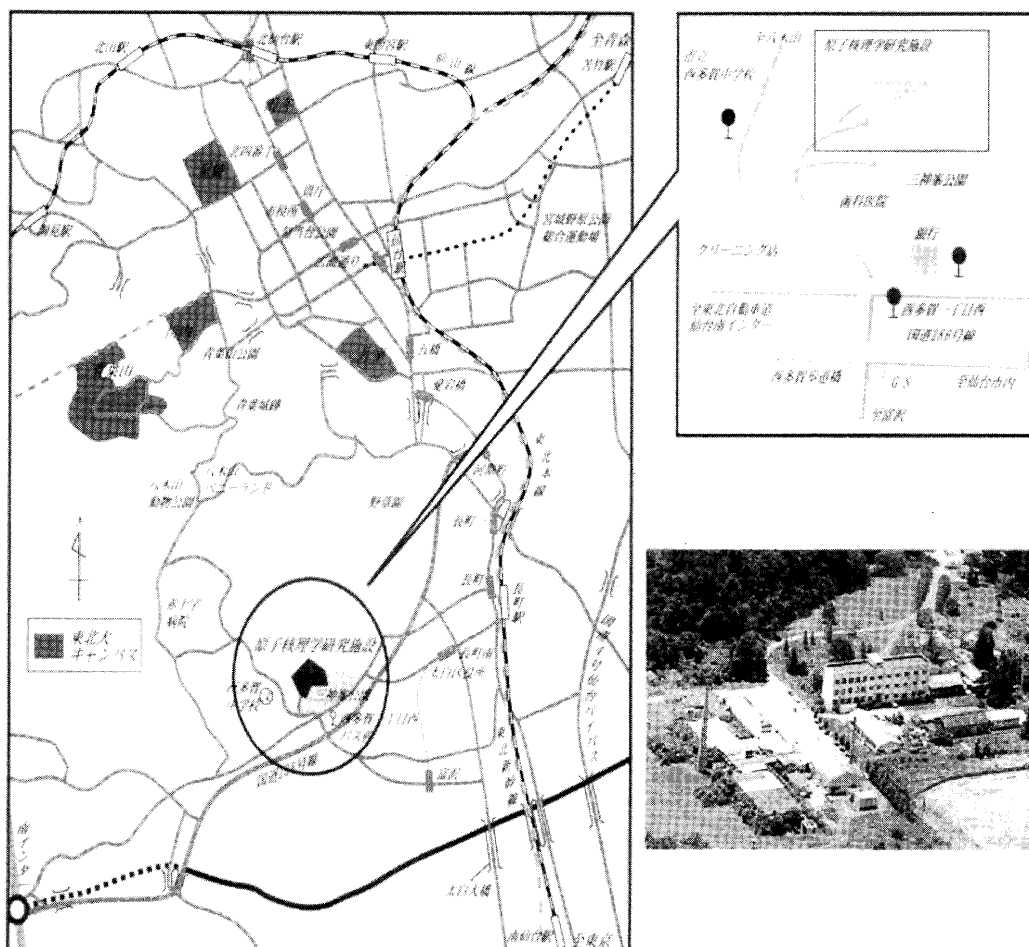
光量子放射化分析は原子炉を用いた中性子放射化分析ほど一般的に利用されていないが、その特徴を生かした研究は世界数ヶ所ではほぼそと利用がなされている。核理研では梶本らが精力的に研究を進め、多くの実績をあげてきた。梶本氏によって電子線加速器を利用した放射化分析について「放射化分析 No.5」に詳しく紹介されているので是非参考にして頂きたい [1]。その中では光量子による核反応収率、光量子放射化分析に利用する核反応と生成核種及び妨害反応、主な核種の定量限界、照射試料の調製、誤差の評価等の光量子放射化分析に必要な知識が網羅されている。また、C. Segebadeらによってまとめられた「Photon Activation Analysis」においても巨大共鳴領域の核反応の解説から詳しく紹介されているので、これらも参考にして頂きたい [2]。

核理研では毎年3月と9月の年2回課題募集及びテーマの採択が行われている。現在、光量子放射化分析の課題申込は4件程度であるが、現在さらに利用者拡大に努力しているところである。光量子放射化分析の特徴を生かして種々の試料の分析を試みたい方は是非連絡頂きたい。最後に核理研を訪れる方々のために所在地の地図及びアクセス方法等、ホームページアドレスを記しておく。

## 参考文献

- [1] 梶本：放射化分析 5, 19 (1997).
- [2] C. Segebade, H-P. Weise, G.J. Lutz, 図書”Photon Activation Analysis” Walter de Gruiter, (1988).





交通機関；JR 仙台駅から地下鉄で富沢方面行きに乗り、長町南駅下車、バスで西多賀1丁目下車徒歩5分。または東北自動車道仙台南インターから国道286号線を仙台市内方面に進み西多賀交差点を左折



〒982-0826  
 仙台市太白区三神峯 1-2-1  
 東北大学大学院理学研究科附属原子核理学研究施設  
 電話：022-743-3426, ファックス：022-743-3401  
 ホームページ；<http://www.LNS.tohoku.ac.jp>

## 光量子放射化分析データベース

日本では主に東北大核理研と京都大学原子炉電子ライナックなどの施設で光量子放射化分析が可能である。東北大学核理研では光量子放射化分析が行えるような基本的な整備がなされている。照射設備、Ge 検出器、ロボット自動測定装置や GEO による軽元素の消滅放射線同時計数装置など常に利用可能である。京都大学原子炉実験所 (KUR) はその名のとおり原子炉による中性子利用が主であるが、中性子発生を目的とした電子ライナックも設置されている。電子の加速エネルギーはやや低いが、20MeV 程度で高出力を得ることができる。このライナックを用いた光量子放射化分析は利用者が照射設備等を準備する必要がある。照射後の試料開封、測定は KUR ホットラボを用いる。また、大阪大学産研の電子ライナックを用いて光量子放射化分析に取り組んでいるグループもある。

海外での光量子放射化分析は New York の Rensselaer Polytechnic Institute(RPI) にある電子ライナック (~60MeV80 $\mu$ A 程度)、Berlin の Federal Institute for Material Research and Testing(BAM) の電子ライナック (~30MeV, 100 $\mu$ A 程度)、Czech の Institute of Mineral Raw Materials の (20MeV microtron, 10 $\mu$ A 程度) などの施設で行われているようである。詳しくは以下に論文のリストを挙げておく。

1980 年からの光量子放射化分析に関する論文はそれほど多くはない。ここに 1980 年からの主なリストを掲載するので是非参考にして頂きたい。このリストに挙げられていない論文も多数あると思うが、世界的に見て光量子放射化分析の動向を知る目安となると考える。

Kipphardt H., Dudzus T., Meier K.A., et al.  
Measurement of Oxygen and Nitrogen in High Purity Metals Used as National Standards for Elemental Analysis in Germany by Classical Carrier Gas Hot Extraction (He) and He after Activation with Photons  
Mater. Trans. **43**, 98-100(2002).

Fukushima M., Tamate H., Nakano Y.  
Trace Elements in Several Species of Crustaceans of Amami Island Group in Japan Determined by Activation Analysis.  
J. Radioanal. Nucl. Chem. **249**, 481-486(2001).

Kucera J., Randa Z.  
Possibilities of Low-Level Determination of Silicon in Biological Materials by Activation Analysis.  
Fresen. J. Anal. Chem. **370**, 241-245(2001).

Randa Z., Kucera J., Soukal L.  
Possibilities of Simultaneous Determination of Lead and Thallium in Environmental and Biological Samples by Microtron Photon Activation Analysis with Radiochemical Separation.  
J. Radioanal. Nucl. Chem. **248**, 149-154(2001).

Ni J.Z., Xu X.G., Block R.C., et al.  
Study of Sediment Samples using instrumental Photon Activation Multi-Elemental Analysis  
Int. J Environ. An. Chem. **7** 8, 117-129(2000).

Weise H.P., Gorner W., Hedrich M.  
Determination of Elements by Nuclear Analytical Methods.  
Fresen. J. Anal. Chem. **369**, 8-14 (2001).

Ni J.Z., Xu X.G., Block R.C.  
Photon Activation Analysis for River Sediment Sample using a 60 Mev Linear Electron Accelerator.  
J. Radioanal. Nucl. Chem. **245**, 501-507(2000).

Ni J., Block R.C., Xu X.G.  
Photon Activation Analysis: A Proof of Principle Using a Nist Sediment Standard and an Electron Accelerator at Rensselaer Polytechnic institute.  
Appl. Radiat. Isotopes **53**, 535-540(2000).

Schulze D., Kruger A., Segebade C.  
Stability and Mobility of Metal-Humic Complexes Isolated From Different Soils.  
J. Radioanal. Nucl. Chem. **244**, 51-53(2000).

- Ebihara M., Oura Y., Ishii T., et al.  
How Effectively Is The Photon Activation Analysis Applied to Meteorite Samples?  
J. Radioanal. Nucl. Chem. **244**, 491-496(2000).
- Miyamoto Y., Haba H., Kajikawa A., et al.  
Interferences in Neutron and Photon Activation Analysis.  
J. Radioanal. Nucl. Chem. **240**, 165-175(1999).
- Masumoto K., Ohtsuki T., Miyamoto Y., et al.  
Photon Activation Analysis of Iodine, Thallium and Uranium in Environmental Materials.  
J. Radioanal. Nucl. Chem. **239**, 495-500(1999).
- Fukushima M., Tamate H., Sato S., et al.  
Activation Analysis of Trace Metals in Several Kinds of Tissues of Even-toed Ungulates.  
J. Radioanal. Nucl. Chem. **239**, 595-599(1999).
- Gmar M., Capdevila J.M.  
Use of Delayed Gamma Spectra for Detection of Actinides (U,Pu) by Photofission.  
Nucl. Instrum. Meth. A **422**, 841-845(1999).
- Gorner W., Barger A., Jost P.  
Precise Determination of Macro Contents of Nitrogen in Titanium Carbonitride by instrumental Photon Activation Analysis.  
J. Radioanal. Nucl. Chem. **234**, 91-94(1998).
- Bartelt G., Buge H.G., Gorner W., et al.  
Determination of Chlorine and Pentachlorophenol in Wood.  
Fresen. J. Anal. Chem. **360**, 433-434(1998).
- Masumoto K., Hara M., Hasegawa D., et al.  
Photon and Proton Activation Analysis of Iron and Steel Standards using The internal Standard Method Coupled with The Standard Addition Method.  
J. Radioanal. Nucl. Chem. **217**, 247-253(1997).
- Sakurai H., Fukuda M., Hayashibe Y., et al.  
Determination of Fluorine in Standard Rocks by Photon Activation Analysis.  
J. Radioanal. Nucl. Chem. **217**, 267-271(1997).
- Sakamoto K., Aota N., Miyamoto Y., et al.  
Neutron and Photon Activation Analyses of Twenty Four Gsj and Six Kier Rock Reference Samples.  
J. Radioanal. Nucl. Chem. **215**, 69-76(1997).
- Fukuda K., Ohkuma J., Asano T., et al.  
Performance of a Ge-Bgo Compton Suppression Spectrometer and Its Application to Photon Activation Analysis.  
Nucl. Instrum. Meth. B **114**, 379-386(1996).
- Masumoto K.  
Application of The internal Standard Method Coupled with The Standard Addition Method in Photon Activation Analysis to Trace Characterization of Environmental Materials.  
J. Radioanal. Nucl. Chem. **203**, 37-46(1996).
- Satoh Y., Fukuda K., Ohkuma J., et al.  
Multielement Photon Activation Analysis of a Bulk Lanthanum Sample by a Ge-Bgo Compton-Suppression Spectrometer.  
Appl. Radiat. Isotopes. **46**, 999-1002(1995).
- Fukushima M.  
Photon-Activation Analysis of Trace Metals in The Livers and Spleens of Pigs.  
J. Radioanal. Nucl. Chem. **195**, 145-153(1995).
- Gorner W., Forster H.  
Determination of Oxide Film Thickness on Metal and Ceramic Materials Using Activation-Analysis and Beta Gas-Adsorption Method.  
J. Radioanal. Nucl. Chem. **192**, 139-145(1995).
- Segebade C.  
The Nondestructive investigation on Medieval Iron Based Weapons.  
Nucl. Instrum. Meth. A **353**, 654-657(1994).

- Thummel H.W., Segebade C., Hirsch K.  
Optimization of Irradiation Conditions for Photon-Activation Analysis of Biological and Environmental-Samples Using A High-Power Electron-Accelerator.  
Biol. Trace. Elem. Res. **43**,141-149(1994).
- Schulze D., Kupsch H., Segebade C.  
Determination of Heavy Metals in Humic Substances by instrumental Photon Activation Analysis.  
Biol. Trace. Elem. Res. **43**, 267-272(1994).
- Segebade C.  
investigation of a Medieval Sword using Photon-Activation Analysis.  
J. Radioan. Nucl. Chem. **169**, 27-37(1993).
- Gerbish S., Ganchimeg S., Sodnom N.  
Multielemental Photon Activation Analysis of Copper Molybdenum Ores and Products of Processing Using A Microtron Bremsstrahlung.  
J. Radioan. Nucl. Chem. **168**, 503-511(1993).
- Yasumura S., Jones K., Spanne P., et el.  
invivo Animal-Models of Body Composition in Aging.  
J. Nutr. **123**, 459-464(1993).
- Segebade C., Thummel H.W., Heller W.  
Photon Activation Analysis of Environmental Water Studies of Direct Sample Irradiation.  
J. Radioanal. Nucl. Chem. **167**, 383-390(1993).
- Dams R.  
A Critical Review of Nuclear Activation Techniques for The Determination of Trace Elements in Atmospheric Aerosols, Particulates and Sludge Samples - (Technical Report).  
Pure. Appl. Chem. **64**, 991-1014 (1992).
- Tonchev A.P., Gleisberg B., Christov C.G., et el.  
Gamma-Activation Analysis of Rare Earth Elements in Uranium Rocks.  
Isotopenpraxis **27**, 384-387(1991).
- Masumoto K., Yagi M.  
Instrumental Photon Activation Analysis of Coal Fly Ashes using The internal Standard Method Coupled with The Standard Addition Method.  
J. Radioanl. Nucl. Chem. **152**, 55-66(1991).
- Sato T., Mori K., Kato T.  
Self-Absorption Correction for Low Energy Photons in instrumental Photon Activation Analysis of Biological Materials.  
Anal. Sci. **7**, 217-221(1991).
- Yoshioka A., Nomura K., Kawakami O., et el.  
Determination of Carbon Impurity in Gallium-Arsenide Crystals by Photon Activation Analysis.  
J. Radioanal. Nucl. Chem. **148**, 201-209(1991).
- Sodnom N., Gerbish S., Belov A.G., et el.  
Determination of The Silver Content of Coal.  
Isotopenpraxis **26**, 488-490(1990).
- Suzuki N., Iwata Y.  
Determination of Arsenic and Other Elemental Abundances in Marine Macroalgae by Photon Activation Analysis.  
Appl. Organomet. Chem. **4**, 287-291(1990).
- Kocman V., Foley L., Landsberger S.  
Analysis of A Bulk Coal-Tar Reference Pitch Sample by Neutron and Photon Activation Analysis, X-Ray Fluorescence Spectrometry, and Atomic Absorption Spectroscopy.  
Carbon **27**, 185-190(1989).
- Schulze D., Heller W., Kupsch H.  
Photon-Activation Analysis on Building-Materials  
Isotopenpraxis **24**, 224-228(1988).
- Yoshioka A., Nomura K., Takeya M., et el.  
Determination of Carbon in Copper by Photon Activation Analysis.  
J. Radioanal Nucl. Chem. **122**, 175-182(1988).

- Masumoto K., Yagi M.  
Instrumental Photon Activation Analysis of Soil Samples using The Internal Standard Method Coupled with The Standard Addition Method.  
*J. Radioanal. Nucl. Chem.* **116**, 375-388(1987).
- Segebade C., Schmitt B.F.  
Analysis of High-purity Material: A Comparison of Photon Activation Analysis with Other Instrumental Methods.  
*J. Radioanal. Nucl. Chem.* **113**, 61-76(1987).
- Berthelot C., Eschbach H.L., Verdingh V., et al.  
The Application of Photon Activation Analysis for The Characterization of Uranium Minerals.  
*J. Radioanal. Nucl. Chem.* **113**, 259-266(1987).
- Yagi M., Masumoto K.  
Instrumental Photon Activation Analysis of Environmental Materials using The Internal Standard Method.  
*J. Radioanal. Nucl. Chem.* **109**, 237-246(1987).
- Nguyen V.D.  
An Internal Standard Method for The Determination of Tin And Tungsten in Cassiterite by Photon Activation Analysis.  
*J. Radioanal. Nucl. Chem. Lett.* **107**, 39-47(1986).
- Ulin K., Zamenhof R.G.  
Measurement of Total-body Oxygen, Nitrogen, And Carbon In vivo by Photon Activation Analysis.  
*Med. Phys.* **13**, 887-897(1986).
- Ulin K., Meydani M., Zamenhof R.G., et al.  
Photon-activation Analysis as A New Technique for Body Composition Studies.  
*Am. J. Clin. Nutr.* **44**, 963-972(1986).
- Yagi M., Masumoto K.  
Simultaneous Determination of Ca, Rb, Sr And Ce in Environmental Materials by Photon Activation Analysis using The Stable Isotope Dilution Method.  
*J. Radioanal. Nucl. Chem.* **99**, 287-297(1986).
- Rath H.J., Stallhofer P., Huber D., et al.  
Determination of Oxygen in Silicon by Photon Activation Analysis for Calibration of The Infrared Absorption.  
*J. Electrochem. Soc.* **131**, 1920-1922(1984).
- Hernandez A., Zamjatnin Y.S.  
Multielement Photon Activation Analysis using A Microtron.  
*Isotopenpraxis* **20** 272-278(1984).
- Sato T.  
The Determination of Zirconium in Biological Materials by Photon-activation Analysis.  
*J. Radioanal. Nucl. Chem.* **86**, 141-150(1984).
- Segebade C., Schmitt B.F., Fusban H.U., et al.  
Application of Photon Activation Analysis to The Determination of The Distribution of Toxic Elements in Soil of A Sewage Farm.  
*Fresen. Z. Anal. Chem.* **317**, 413-421(1984).
- Magiera V.G., Davydov M.G.  
Effect of X-ray Selective Excitation in Photon Activation Analysis.  
*Radiochem. Radioanal. Lett.* **59**, 147-155(1983).
- Davidson W.F., Landsberger S.  
Determination of Carbon in Coal by Instrumental Photon Activation Analysis.  
*Radiochem. Radioanal. Lett.* **57**, 95-102(1983).
- Kato T., Kadoya H., Kato M., et al.  
Abundance Distribution of Various Elements in Sediment Cores From The Japan Sea Determined by Photon-activation Analysis.  
*Nippon Kagaku Kaishi* **1** 49-58(1983).
- Segebade C., Kuhl M., Schmitt B.F., et al.  
Some Remarks on The State of Photon Activation Analysis and The Use of Internal Standards.  
*J. Radioanal. Chem.* **72**, 665-696(1982).
- Ulin K., Zamenhof R.G., Sternick E.S.  
Measurement of Total Body Nitrogen and Carbon by Photon Activation Analysis.  
*Med. Phys.* **9**, 627-627(1982).

- Ledingham K.W.D., Kelliher M.G., Robertson S.D.  
Multi-element Photon Activation Analysis of Coal Samples using A Compton Suppressed Ge(Li) Detector.  
J. Radioanal. Chem. **71**, 169-180(1982).
- Segebade C., Lutz G.J., Weise H.P., et al.  
Quantitative-evaluation of Interference Reactions in Photon Activation Analysis.  
J. Radioanal. Chem. **67**, 205-214(1981).
- Engelmann C.  
Charged-Particles and Gamma-Photon Activation Analysis - Examples of Applications in The Life Sciences.  
Atom. Energy. Rev. 107-149 (1981).
- Gawlik D., Gatschke W., Behne D., et al.  
The Naa System at The Reactor Ber-li Clinical Analysis of Fluorine, Calcium, Phosphorus and Aluminum in Bone Biopsies, Comparison with Photon Activation Analysis and Ion Sensitive Electrode.  
J. Radioanal. Chem. **61**, 313-322(1981).
- Gerstenberger H.  
Measurement of Isotopic Relationships of Mercury in The Range of Its Natural Frequency by Photon Activation Analysis.  
J. Radioanal. Chem. **60**, 423-428(1980).
- Berthelot C., Carraro G.  
Instrumental Photon Activation Analysis of Cd And Pb in Zinc Ores with A Rotating Device for Intermittent Irradiations.  
J. Radioanal. Chem. **60**, 435-441(1980).
- Berthelot C., Carraro G., Verding V.  
Nondestructive Multi Element Photon Activation Analysis of River Sediments.  
J. Radioanal. Chem. **60**, 443-451(1980).
- Kanda Y., Oikawa T., Niwaguchi T.  
Multi-element Determinations of Trace Elements in Glass by Instrumental Photon Activation Analysis.  
Anal. Chim. Acta. **121**, 157-163(1980).
- Yamashita M., Suzuki N.  
Photon Activation Analysis of Trace Metals in Biological-Materials via Collection of Metal Tropolone-5-Sulfonate Complexes onto Anion-Exchange Resin.  
J. Radioanal. Chem. **60**, 73-85(1980).
- Fusban H.U., Boit C., Schmitt B.F.  
Effect of Fluorine on Photon Activation Analysis of Oxygen.  
J. Radioanal. Chem. **59**, 415-421(1980).
- Kato T., Kato M.  
Multi-element Determination in Floor Sediments of The Japan Sea by Non-Destructive Photon Activation Analysis.  
J. Radioanal. Chem. **57**, 105-112(1980).
- Lindner L., Visser J., Devos M.  
Determination of Magnesium by Photon Activation Analysis.  
Radiochem. Radioanal. Lett. **42**, 271-278(1980).

# 光量子および荷電粒子放射化分析

高エネルギー加速器研究機構  
放射線科学センター  
榎本 和義

## 1. はじめに

放射化分析の主流は原子炉を利用した中性子放射化分析で、加速器による光量子および荷電粒子放射化分析 (PAA および CPAA) は利用できる施設が限られておりこの分野の研究報告の1割程度を占めるにすぎない。しかし、中性子放射化分析 (NAA) では定量の難しいとされている元素を容易に高感度に分析できるといった特徴があり、材料分析とくに軽元素の定量には欠かせないものとなっている。ここでは、東北大学の電子ライナックおよびサイクロトロンを利用して行ってきた研究例を中心に紹介することにする。PAA および CPAA は、いつでも、どこでも利用出来るという訳ではないという難点がある。そこで、1) 高精度で正確な定量の実現、2) 他では定量が難しいとされる元素の定量法の確立という課題について行ってきた研究を紹介する。また、サイクロトロンの利用については次号の特集で更に詳しく紹介することになっている。

## 2. PAA と CPAA

まず、PAA と CPAA の簡単に原理を紹介する。電子加速器を利用する場合、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制動放射線のほうを利用する。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。光子による原子核との反応を光核反応と言う。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る。共鳴エネルギーは軽核で20数MeVから重核では10数MeV程度まで変化する。この共鳴励起後、原子核からは中性子や陽子が1~2個放出され、放射性の核種が生成する。それらの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定量する方法を光量子放射化分析 (Photon Activation Analysis, PAA) と呼んでいる。照射エネルギーは20-30MeV程度が良く利用される。PAAは軽元素から重元素まで多くの元素分析に利用されている。サイクロトロンを利用する荷電粒子放射化分析

(Charged Particle Activation Analysis, CPAA) では照射粒子や照射エネルギーを変えることで定量元素の選択性が図れる。一般に、陽子、重陽子、 $\alpha$ 粒子、He-3などが放射化に利用されている。荷電粒子は試料中では元素組成に応じた飛程があるため、マトリックス組成があらかじめ分かっている必要がある。また、試料を重ね合わせて多数照射することはできない。重元素ではクーロン障壁のために高いエネルギーで照射しないと核反応が起こりにくい。このため、各種材料中の酸素、窒素、炭素など軽元素の分析に活用されることが多い。

## 2. 高精度で正確な定量

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。放射化分析が標準試料の濃度決定に関わってきたことは良く知られているが、精度良く、正確に定量を行うためには、上記の手順に含まれるさまざまな誤差の要因を極力除くことが不可欠である。実際に試料に照射された線束を正確に求めるには試料の内部でモニターするのが理想的である。また、マトリックスの影響を相殺するには比較試料を必要としない(試料そのものを比較試料に利用できる)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、2) 標準添加内標準法を考案した。これらの定量法は定量目的元素の同位体の一つを内標準に利用するか、定量目的元素以外の元素を内標準に利用するかに違いがあるが、大きな意味で内標準法に分類できる。そのため、いずれの方法も照射線量や試料中での飛程、測定の際の自己吸収、ジオメトリ、スペクトル解析の系統誤差など試料の組成に影響される効果が相殺できるため、公定値の決定といった正確さを要求される場合の定量法として推奨される。

### 2-1 安定同位体希釈放射化分析法 (SIDAA)<sup>1-7)</sup>

安定同位体希釈放射化分析法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 $^{140}\text{Ce}$ (88.48%)、 $^{142}\text{Ce}$ (11.08%)があり、光核反応でそれぞれ放射性同位体 $^{139}\text{Ce}$ 、 $^{141}\text{Ce}$ が生成する。そこで、 $^{142}\text{Ce}$ 濃縮同位体を試料に一定量( $w_x$ )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以下の式を用いて未知量( $w_x$ )を直ちに定量できることに

なる。

$$w_x = w_s (A W_x / A W_s) (\theta_{js} / \theta_{jx}) \frac{(R_m / R_x) - (\theta_i / \theta_j)_s / (\theta_i / \theta_j)_x}{1 - (R_m / R_x)}$$

ここで、 $A W$ は原子量、 $\theta$ は同位体存在比（添字  $j$  は濃縮された、 $i$  は濃縮されなかった同位体）である。また、添字  $x$ 、 $m$  は未知試料、スパイク試料、 $s$  は用いた濃縮同位体を意味する。これまで、PAA では  $Ce$ 、 $Ca$ 、 $Rb$ 、 $Sr$ 、 $Zn$  などの定量を行ってきた。CPAA の場合、陽子照射では  $Ca$ 、 $Cr$ 、 $Cu$ 、 $Ge$ 、 $Rb$ 、 $Zr$ 、 $Sb$  などの多くの元素の定量が可能である。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。

## 2-2 標準添加内標準法 (ISM-SAM)<sup>8,21)</sup>

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  $w_0$  含む試料に均一に一定量 ( $w_0$ ) 添加したものと未添加のものを同時に放射化し、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

$$w_a = w_0 / [(R^* / R) - 1]$$

といたって簡便である。

生物、岩石、環境試料等の PAA では、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、その他の微量元素の定量に利用した。この方法では、同時に、1) 分析試料自体は均質か、2) 標準添加が均一に行われたか、さらには 3) 内標準元素の均一か、4) 定量目的元素の均一かを知ることができる。また、試料処理の際のロスや汚染、定量の際の妨害の有無チェックにも利用した。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。<sup>20)</sup>

これまで、アルミニウム合金<sup>9,11)</sup>、鉄鋼試料<sup>21)</sup>、高純度ホウ素化合物、希土類化合物中の微量元素の定量にも活用してきた。ここでは鉄鋼試料の光量子および陽子放射化分析に適用した例を紹介する。<sup>21)</sup> PAA では 20 および 30 MeV 照射により定量を行った。定量に利用した核反応を表 1 に示した。20 MeV 照射では  $Ce$  を添加し、 $^{139}Ce$  の 166 keV  $\gamma$  線を内標準に利用した。30 MeV 照射では  $Fe$  から ( $\gamma$ , pn) 反応で

生成する  $^{52}Mn$  を内標準に利用した。また、30 MeV 照射では、表 2 に示すように  $Cr$ 、 $Mn$ 、 $Co$  および  $Nb$  の定量の際に、妨害を考慮する必要があった。例として、高純度鉄と低合金鋼の定量結果を表 3、4 に示した。

荷電粒子放射化分析では、試料は平滑な面を持つディスク状になっていることが必要である。そこで、試料を一旦溶解し、合成シリカゲル中にドープする方法をとった。この際に内標準として  $Y$  を添加し、(p, n) 反応で生成する  $^{89}Zr$  の 909 keV  $\gamma$  線を利用した。また、試料の一方に定量目的元素を一定量加えた。鉄からの放射能を軽減するため、標準添加後 MIBK による溶媒抽出法であらかじめ鉄を除いた。定量に利用した核反応を表 5 に示した。日本鉄鋼協会配付の微量元素シリーズを分析した結果について表 6 に示した。 $V$ 、 $Cr$ 、 $Zr$  を高感度に定量することができた。

## 3. NAA では定量が難しい軽元素の定量

### 3-1 PAA

PAA では、炭素とフッ素の 2 つの軽元素の分析について紹介する。

a) 鉄鋼、非鉄金属、半導体中の炭素の定量<sup>22,27)</sup>

炭素は  $^{12}C(\gamma, n)^{11}C$  反応を利用して感度良く定量できる。照射後、生成した  $^{11}C$  は燃焼法により  $CO_2$  とし、 $BaCO_3$  として沈殿分離した。鉄鋼試料では、担体として炭素含有量 0.915% の鉄 1g、錫 0.5g 加えて、0.5 l/min の酸素気流中で、1350°C で 5 分間燃焼させた。燃焼装置の図 1 に示した。照射から測定まで 20 分で完了し、化学収率は 90% であった。定量結果の例を表 7 に示した。

また、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換算係数を確かめるため標準物質の濃度検定を実施した。助燃剤には酸化鉛を用いた。得られた分析結果を図 2 に示した。この結果、従来の赤外吸収強度と濃度の換算係数は 1.7 倍であったことが分かった。

この他、非鉄金属（錫、ガリウムなど）、半導体（シリコン、タングステンシリサイドなど）中の炭素の定量を行った。定量感度は数 10 ppb であった。現在、より迅速、簡便な分離・測定法として、ゴールドイメージ炉で  $CO_2$  を生成後、連続抽出、放射能測定する方法を開発し、鉄鋼試料の分析を試みている。

b) 石英、岩石中のフッ素の定量

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種々検討した結果、照射後パイロリシス法によってフッ素を分離し、 $\text{LaF}_3$  沈殿で捕集分離する方法を採用した。助燃剤にタングステン酸ナトリウムを加えることで、再現性良くフッ素を回収することができることがわかった。分離装置を図3に示した。また、標準岩石試料の定量結果を表8に示した。岩石試料では、20MeV照射で定量感度0.06ppmが得られ、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。

### 3-2 CPAA

CPAAでは、より選択性があり、高感度な分析が行える。特に軽元素の分析はCPAAの最も得意とするところで、半導体のみならず高純度金属材料中に極く微量含まれる炭素、窒素、酸素などの分析が行われている。CPAAで考慮すべき点は、試料に入射した荷電粒子はエネルギーを減少し、ある飛程で停止するという点である。このため、1) 複数個の試料を重ねて一度に照射できない、2) マトリックスによって異なる飛程を計算し、補正する必要がある、3) 試料に照射された粒子数(電流値)を求めておく必要がある、4) 試料内での発熱に対する対策が不可欠である。

#### e) リン、硫黄の分析

リンは $^{33}\text{P}(\alpha, n)^{34m}\text{Cl}$ 反応を利用して定量できる。入射エネルギー17MeV、4 $\mu\text{A}$ で30分間照射した。回転照射装置を用いて同時に12個の試料を照射した。鉄鋼試料では非破壊分析が可能であった。低合金鋼中のリンの分析例を表9に示した。硫黄は $^{34}\text{S}(p, n)^{34m}\text{Cl}$ 反応を利用して定量できる。 $^{34m}\text{Cl}$ の分離法としてはパイロリシス法を採用し、塩化銀として捕集し、測定を行った。

#### f) 酸素の分析

酸素の定量には $^{16}\text{O}(\alpha, \text{He}, p)^{18}\text{F}$ 反応が最も利用されている。銅試料からの $^{18}\text{F}$ の分離法としてはパイロリシス法を採用した。定量結果を表10に示した。また、シリコン半導体では、表層から逐次エッチングすることにより酸素の深さ方向の分析を試みているところである。バルク試料および水素アニールウェハの分析結果についてそれぞれ図4、5に示した。

### 4. PAAおよびCPAAの特徴

PAAの特徴をまとめると以下のようなになる。

1) 高エネルギーの光子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。

2) 軽元素では $(\gamma, n)$ 反応の生成核は陽電子放出を伴って壊変するものが多い。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る。重元素では電子捕獲壊変が多い。この際に特性X線が出るためX線を検出することで定性、定量が行える。

3) 中性子放射化分析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、強い放射線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。光量子放射化分析ではこのような問題はない。

4) 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。

CPAAでは上記の2-4の特徴があるとともに、以下の特徴を挙げることができる。

1) 照射粒子の透過性がないため、表面近傍の情報が得られる。

2) 生成核種の原子番号が異なるために、照射後化学分離する際に、特徴ある分離系を使うことができる。

このように、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る。放射化分析は吸光度法に比べて非常に広いダイナミックレンジを持つために、極微量から主要成分までの濃度決定が行えるのも特徴である。

### 関連論文

1. M. Yagi, Stable isotope dilution activation analysis, in Activation analysis, Vol. 1, Ed. Z. B. Alfassi, CRC Press, Boca Raton, 1990, chap. 8.
2. M. Yagi, Analysis of biological samples with charged-particle accelerators, in Elemental analysis by particle accelerators, Eds. Z. B. Alfassi and M. Peisach, CRC Press, Boca Raton, 1992, chap. 10.
3. K. Masumoto, Isotope dilution analysis, in Chemical analysis by nuclear methods, Ed. Z. B. Alfassi, John Wiley & Sons, Chichester, 1994, chap. 14.
4. Stable-isotope dilution activation analysis and determination of Ca, Zn and Ce by means of photon activation.

K. Masumoto, M. Yagi

- J. Radioanal. Chem. 79, 57-68(1983)
5. Isotope dilution activation analysis for special samples in which the self-shielding effect is negligible. Determination of Sr by means of photon activation.  
M. Yagi, K. Masumoto  
J. Radioanal. Nucl. Chem. 90, 91-103(1985)
6. Determination of Sr in biological materials by charged particle activation analysis using stable-isotope dilution method.  
K. Masumoto, M. Yagi  
J. Radioanal. Nucl. Chem. 91, 369-378(1985)
7. Simultaneous determination of Ca, Rb, Sr and Ce in environmental materials by photon activation analysis using the stable isotope dilution method.  
M. Yagi, K. Masumoto  
J. Radioanal. Nucl. Chem. 99, 287-297(1986)
8. A new internal standard method for activation analysis and its application. Determination of Co, Ni, Rb and Sr in pepperbush by means of photon activation.  
M. Yagi, K. Masumoto  
J. Radioanal. Nucl. Chem. 84, 316-331(1984)
9. A new internal reference method for activation analysis and its application. Determination of Ti, Cr, Fe, Cu, Ga and Zr in aluminium alloys by means of photon activation.  
M. Yagi, K. Masumoto  
J. Radioanal. Nucl. Chem. 84, 369-380(1984)
10. Simultaneous determination of Ti, Cr, Fe, Cu, Ga and Zr in aluminium alloys by charged particle activation analysis using internal standard.  
M. Yagi, K. Masumoto  
J. Radioanal. Nucl. Chem. 91, 379-387(1985)
11. アルミニウム合金の誘導放射能およびそれに及ぼす微量成分の影響  
今野 収、藤川辰一郎、榎本和義、八木益男  
軽金属 34, 22-33(1984)
12. Highly accurate and precise multielement determination of environmental samples by means of photon activation using the internal standard method.  
K. Masumoto, M. Yagi  
J. Radioanal. Nucl. Chem. 100, 287-301(1986)
13. Simultaneous determination of P, Cl, K and Ca in several control serums by alpha-particle activation analysis using the internal standard method.  
K. Masumoto, M. Yagi  
J. Radioanal. Nucl. Chem. 109, 449-458(1987)
14. Instrumental charged-particle activation analysis of several selected elements in biological materials using the internal standard method.  
M. Yagi, K. Masumoto  
J. Radioanal. Nucl. Chem. 111, 359-369(1987)
15. A new internal-standard method coupled with the standard addition method for proton induced X-ray emission analysis and its application. Determination of Cu, Zn, Rb and Sr in biological materials.  
M. Yagi, G. Izawa, T. Omori, K. Masumoto, K. Yoshihara  
J. Radioanal. Nucl. Chem. 115, 213-222(1987)
16. Instrumental photon activation analysis of soil samples using the internal standard method coupled with the standard addition method.  
K. Masumoto, M. Yagi  
J. Radioanal. Nucl. Chem. 116, 375-388(1987)
17. Instrumental photon activation analysis of environmental materials using the internal standard method.  
M. Yagi, K. Masumoto  
J. Radioanal. Nucl. Chem. 109, 337-346(1987)
18. Reevaluation of the internal standard method coupled with the standard addition method applied to soil samples by means of photon activation.  
K. Masumoto, M. Yagi  
J. Radioanal. Nucl. Chem. 121, 131-139(1988)
19. Instrumental photon activation analysis of coal fly ashes using the internal standard method coupled with the standard addition method.  
K. Masumoto, M. Yagi  
J. Radioanal. Nucl. Chem. 152, 55-66(1991)
20. Application of the internal standard method coupled with the standard addition method in photon activation analysis to the trace characterization of environmental materials.  
K. Masumoto  
J. Radioanal. Nucl. Chem. 203, 37-46(1996)
21. Photon and proton activation analysis of iron and steel standards using the internal standard method coupled with the standard addition method.  
K. Masumoto, M. Hara, D. Hasegawa, E. Iino, M. Yagi  
J. Radioanal. Nucl. Chem. 217, 247-253(1997)
22. Determination of carbon in copper by photon activation analysis.

- A. Yoshioka, K. Nomura, M. Takeya, K. Shimura, K. Masumoto, M. Yagi  
J. Radioanal. Nucl. Chem. 122, 175-182(1988)
23. Determination of carbon impurity in gallium arsenide crystals by photon activation analysis.  
A. Yoshioka, K. Nomura, O. Kawakami, K. Shimura, K. Masumoto, M. Yagi  
J. Radioanal. Nucl. Chem. 148, 201-209(1991)
24. 光量子放射化分析法によるヒ素およびガリウム中の微量炭素の定量  
吉岡 明、川上 紀、深谷忠廣、野村紘一、榎本和義、八木益男  
核理研研究報告 22, 195-203 (1989)
25. 錫金属中の微量炭素の光量子放射化分析  
吉岡 明、川上 紀、深谷忠廣、野村紘一、榎本和義、八木益男  
核理研研究報告 23, 29-36 (1990)
26. 高純度銅表面における微量炭素の光量子放射化分析  
吉岡 明、川上 紀、深谷忠廣、野村紘一、榎本和義、八木益男  
核理研研究報告 23, 37-44 (1990)
27. 光量子放射化によるタングステンシリサイド中の炭素の定量  
桜井宏行、佐山恭正、榎本和義、大槻 勤  
核理研研究報告 27, 162-168 (1994)
28. 光量子放射化による高純度材料中のフッ素の分析  
桜井宏行、深谷忠廣、川上 紀、佐山恭正、榎本和義、八木益男  
核理研研究報告 24, 84-92 (1991)
29. 光量子放射化による高純度材料中のフッ素の分析(II)  
桜井宏行、竹谷 実、佐山恭正、榎本和義、大槻 勤  
核理研研究報告 25, 187-194 (1992)
30. Determination of fluorine in standard rocks by photon activation analysis.  
H. Sakurai, M. Fukaya, Y. Hayashibe, Y. Sayama, K. Masumoto, T. Ohtsuki  
J. Radioanal. Nucl. Chem. 217, 267-271(1997).
31. Charged particle activation analysis of phosphorus in biological materials.  
K. Masumoto, M. Yagi  
J. Radioanal. Chem. 78, 233-239(1983)
32. Determination of phosphorus in low-alloy steels by alpha-activation analysis.  
K. Masumoto, M. Yagi  
J. Radioanal. Nucl. Chem. 130, 243-250(1989)
33. Photon activation analysis of iodine, thallium and uranium  
K. Masumoto, T. Ohtsuki, Y. Miyamoto, J.H. Zaidi, A. Kajikawa, H. Haba, K. Sakamoto  
J. Radioanal. Nucl. Chem. 239, 495-500(1999).

表 1 . Nuclear data for photon activation analysis of iron and steel samples

Target nuclide (Abundance, %)	Nuclear reaction	Produced nuclide	Half-life	Gamma-ray energy, keV	-Q-value, MeV
<sup>48</sup> Ti (73.7)	(γ,p)	<sup>47</sup> Sc	3.341 d	159	11.5
<sup>52</sup> Cr (83.79)	(γ,n)	<sup>51</sup> Cr	27.704 d	320	12.0
<sup>55</sup> Mn (100)	(γ,n)	<sup>54</sup> Mn	312.2 d	835	10.2
<sup>54</sup> Fe (5.8)	(γ,pn)	<sup>52</sup> Mn	5.591 d	744	18.7
<sup>59</sup> Co (100)	(γ,n)	<sup>58</sup> Co	70.916 d	811	10.5
<sup>58</sup> Ni (68.3)	(γ,n)	<sup>57</sup> Ni	1.503 d	1378	12.2
<sup>75</sup> As (100)	(γ,n)	<sup>74</sup> As	17.78 d	596	10.2
<sup>90</sup> Zr (51.4)	(γ,n)	<sup>89</sup> Zr	3.268 d	909	12.0
<sup>92</sup> Nb (100)	(γ,n)	<sup>92m</sup> Nb	10.15 d	935	8.8
<sup>100</sup> Mo (9.6)	(γ,n)	<sup>99</sup> Mo	2.7477 d	140	8.3
<sup>123</sup> Sb (42.7)	(γ,n)	<sup>122</sup> Sb	2.70 d	564	9.0
<sup>112</sup> Sn (1.0)	(γ,p)	<sup>111</sup> In	2.807 d	171	7.0
<sup>140</sup> Ce (88.5)	(γ,n)	<sup>139</sup> Ce	137.7 d	166	10.2

表 2 . Nuclear reactions interfering with the determination of Cr, Co, Mn and Nb

Radionuclide used in the determination (γ-ray energy, keV)	Interfering reaction		Produced nuclide	-Q-value, MeV
	Target nuclide (Abundance, %)	Nuclear reaction		
<sup>51</sup> Cr (320)	<sup>56</sup> Fe (91.7)	(γ,αn)	<sup>51</sup> Cr	19.7
<sup>54</sup> Mn (835)	<sup>56</sup> Fe (91.7)	(γ,pn)	<sup>54</sup> Mn	18.2
<sup>92m</sup> Nb (935)	<sup>54</sup> Fe (5.8)	(γ,pn)	<sup>52</sup> Mn, 936 keV	18.7
<sup>58</sup> Co (811)	<sup>58</sup> Ni (68.3)	(γ,2n)	<sup>56</sup> Ni, 812 keV	22.5
	<sup>60</sup> Ni (26.1)	(γ,pn)	<sup>58</sup> Co	20.0

表 3 . Concentrations of Co, Ni, Zr and Mo in JSS 003-1, 002-2  
(in μg/g)

Element	JSS 003-1		JSS 002-2	
	This work	Standard value	This work	Standard value
Co	23.6 ± 0.9	25	29.8 ± 1.6	29
Ni	35.6 ± 3.5	33	5.9 ± 2.9	5
Zr	1.00 ± 0.06	< 1	0.39 ± 0.03	< 1
Mo	4.5 ± 0.4	4	0.79 ± 0.05	< 1

表 4 . Concentrations of several elements  
in JSS low-alloy steel standards (in μg/g)

Element	This work		Standard value		Chemical analysis
	Ni/Int. Std.	Ce/Int. Std.	Cr/Int. Std.	Mn/Int. Std.	
Ti	33 ± 6	33 ± 5	-	-	38
Cr	5000 ± 210	4980 ± 280	5000	-	-
Mn	4140 ± 160	4100 ± 160	4200	-	-
Co	153 ± 6	152 ± 6	-	-	133
As	168 ± 6	169 ± 5	-	-	166
Sb	33 ± 1	32 ± 1	-	-	31

Element	This work		Standard value		Chemical analysis
	Cr/Int. Std.	Mn/Int. Std.	Cr/Int. Std.	Mn/Int. Std.	
Ti	48 ± 7	44 ± 5	-	-	24
Co	93 ± 6	87 ± 3	-	-	76
Ni	5440 ± 450	4990 ± 100	5200	-	-
As	39 ± 1	37 ± 2	-	-	36
Mo	3730 ± 420	3720 ± 310	3700	-	-
Sb	9 ± 1	9 ± 1	-	-	9

表 5. Nuclear data for 13 MeV proton activation analysis of iron and steel samples

Target nuclide (Abundance, %)	Nuclear reaction	Produced nuclide	Half-life	Principal $\gamma$ -ray energy, keV	-Q-value, MeV
$^{48}\text{Ti}$ (73.7)	(p,n)	$^{48}\text{V}$	15.976 d	984	4.8
$^{51}\text{V}$ (99.75)	(p,n)	$^{51}\text{Cr}$	27.704 d	320	1.5
$^{52}\text{Cr}$ (83.79)	(p,n)	$^{52}\text{Mn}$	5.591 d	744	5.5
$^{56}\text{Fe}$ (91.7)	(p,n)	$^{56}\text{Co}$	77.7 d	846	5.5
$^{75}\text{As}$ (100)	(p,n)	$^{75}\text{Se}$	119.77 d	265	1.6
$^{90}\text{Zr}$ (51.4)	(p,n)	$^{90}\text{Nb}$	14.6 h	1129	3.6
$^{93}\text{Nb}$ (100)	(p,n)	$^{93\text{m}}\text{Mo}$	6.85 h	685	6.9
$^{96}\text{Mo}$ (16.68)	(p,n)	$^{96}\text{Tc}$	4.28 d	778	1.2
$^{121}\text{Sb}$ (57.3)	(p,n)	$^{121}\text{Te}$	16.8 d	573	3.7
$^{89}\text{Y}$ (100)	(p,n)	$^{89}\text{Zr}$	3.268 d	909	1.3

表 6. Analytical results of JSS low alloy steel series No. 152-9 and 154-9 (in  $\mu\text{g/g}$ )

Sample	Element	This work			PAA*	
		Average	D. L.**	Std. value	Average	D. L.**
JSS 152-9	Ti	ND	10	-	33 $\pm$ 8	6
	V	962 $\pm$ 31	12	970	ND	
	Cr	5000 $\pm$ 150	20	5000	4990 $\pm$ 350	120
	As	186 $\pm$ 7	14	-	169 $\pm$ 8	4
JSS 154-9	Ti	ND	10	-	46 $\pm$ 9	8
	V	2920 $\pm$ 90	26	3000	ND	
	As	40 $\pm$ 7	12	-	38 $\pm$ 2	3

\*The average values obtained by two internal standards (See Table 7).

\*\*Detection limit ( $3\sqrt{\text{BG}}$ ).

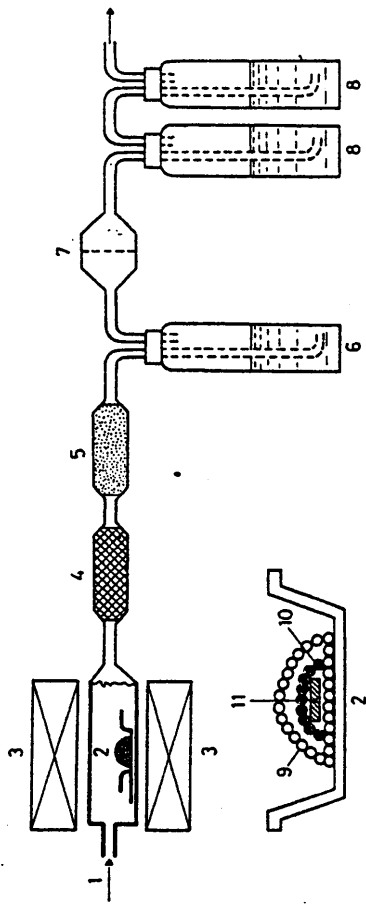


图 1. Apparatus for carbon separation by the combustion method; 1 - oxygen, 2 - alumina crucible, 3 - electric furnace, 4 - quartz wool filter, 5 - SCHUTZE reagent, 6 - bottle, 7 - teflon filter, 8 - collector bottle, 9 - iron chips, 10 - tin chips, 11 - sample

表 7. Determination of carbon in the standard iron (JSS-159-2; C content-0.004%)

Run	Recovery yield of $^{13}\text{C}$ , %	Concentration of C, ppm
1	88.9	39.8
2	91.0	40.9
3	86.7	41.7
4	83.5	41.2
Average:		40.9 $\pm$ 0.8

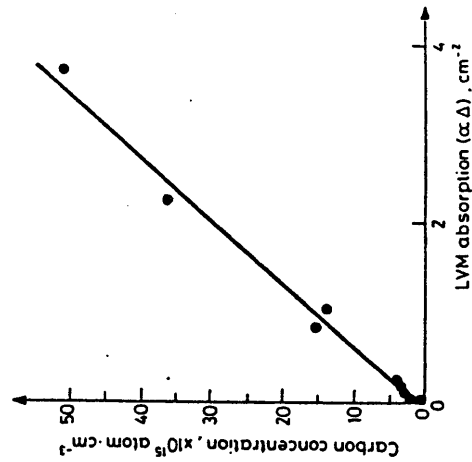


图 2. Relationship between the concentrations of carbon impurity and the LVM absorptions of carbon at room temperature

表 9.

Determination of phosphorus in several low-alloy steels

Sample	Concentration of P, %		
	Found	Average	Certified
NBS-464	0.0166	0.0160	0.0166
NBS-466	0.0117	0.0125	0.0111
JSS-150-6	0.0448	0.0430	0.0440
JSS-151-6	0.0282	0.0286	0.0280
JSS-152-6	0.0286	0.0242	0.0264
JSS-153-6	0.0072	0.0100	0.0091
JSS-154-6	0.0062	0.0064	0.0075
JSS-155-6	0.0073	0.0057	0.0066
JSS-163-3	0.0228	0.0218	0.0210
JSS-164-3	0.0581	0.0646	0.0600
			0.0164±0.0005
			0.0118±0.0007
			0.0439±0.0009
			0.0283±0.0003
			0.0264±0.0022
			0.0088±0.0014
			0.0067±0.0007
			0.0065±0.0008
			0.0219±0.0009
			0.0609±0.0033

表 10. Results for oxygen in copper samples (concentrations in  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )

Sample	Found	Av. $\pm$ S. D.	Other Method*
Cu-A	0.053, 0.013, 0.027, 0.032, 0.018	0.029 $\pm$ 0.016	0.2
Cu-B	0.35, 0.25	0.30	0.5
Cu-C	1.4, 1.3, 1.3, 1.4	1.3 $\pm$ 0.1	1.3
Cu-D	2.6, 3.1, 3.2, 2.8	2.9 $\pm$ 0.3	3.0
Cu-D**	3.1, 3.0	3.1	3.0

\*Inert gas fusion method. \*\* a high purity quartz was used as a standard.

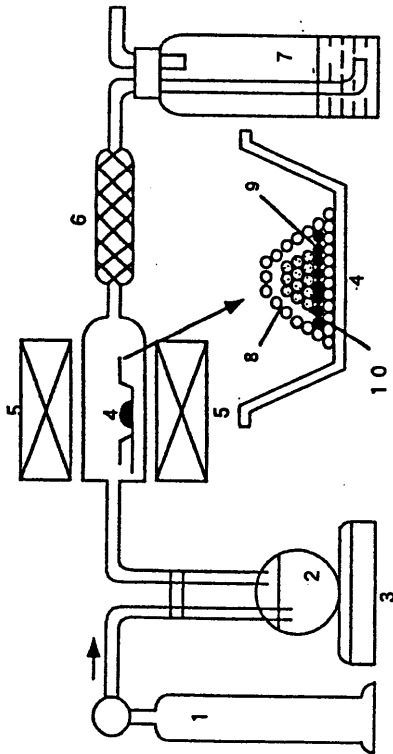


図 3. Apparatus for fluorine separation by the pyrohydrolysis:  
1-oxygen, 2- $\text{H}_2\text{O}$ , 3-heater, 4-alumina boat, 5-electric furnace,  
6-quartz-wool, 7-absorption bulb, 8- $\text{Na}_2\text{W}_2\text{O}_7$ , 9-carrier, 10-sample

表 8. Fluorine concentration ( $\mu\text{g}/\text{g}$ ) in GSI and USGS rock reference samples.

Sample	This work	Av. $\pm$ St. Dev	Reference value <sup>(1)</sup>
JG-1	507, 488, 488	488 $\pm$ 10	486*
JG-3	330, 343, 340	338 $\pm$ 7	335
JA-1	166, 165, 160	164 $\pm$ 3	170
JB-1	394, 408, 380	394 $\pm$ 14	393*
JB-2	103, 106, 96	102 $\pm$ 5	101
JB-3	276, 287, 282	282 $\pm$ 6	295
JP-1	2.5, 2.7, 2.3	2.5 $\pm$ 0.2	10
JF-1	16, 19, 15	17 $\pm$ 2	<10
JF-2	3.9, 4.4, 4.6	4.3 $\pm$ 0.4	4
JLs-1	43, 42, 43	43 $\pm$ 1	38
PCC-1	12, 9	11	13
DTS-1	9, 9	9	12

\*:recommended values.

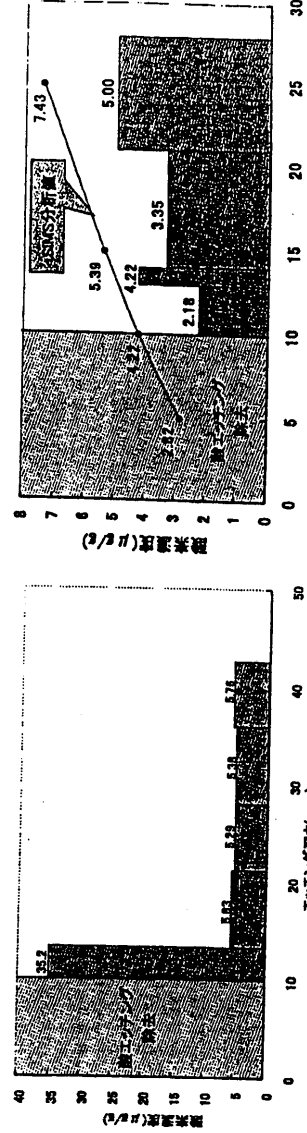


図 4. バルク試料についての定量結果

図 5. 水素アールウエーハ試料についての定量結果

## 光量子放射化分析の材料分析への応用

(NTTフォトニクス研究所) 鹿野弘二

はじめに

材料開発において材料特性を向上する方法の一つとして高純度化があげられる。すなわち、開発した材料中の不純物濃度を明らかにし、材料作製条件を改善することにより純度を高めるものである。また、半導体材料や高温超伝導材料の研究に見られるように材料の薄膜化が進み、薄膜作製用基板の表面や、作製された薄膜中ならびにその表面の不純物元素のキャラクタリゼーションの重要性がますます増大している。

放射化分析法は不純物の絶対量を高感度に分析できる方法として知られている。これまで中性子放射化分析、光量子放射化分析により半導体結晶中の遷移元素などが分析され、高純度化が進められた。一方、B、C、N、Oなどの軽元素分析法として荷電粒子放射化分析(CPAA)ならびに光量子放射化分析(PAA)が知られている。CPAAは、B、C、N、Oいずれもppbからサブppbレベルの分析が可能である<sup>1)</sup>が、分析試料と比較標準試料に対する荷電粒子の阻止能の違いを補正する必要がある。一方、PAAは荷電粒子の阻止能の違いを補正する必要がないが、C、Nに対してのみ比較的高感度である。このように、CPAAとPAAはそれぞれ一長一短がある。また、目的核種が<sup>13</sup>N、<sup>11</sup>C、<sup>18</sup>Fと共通であり、それぞれで開発した化学分離法は共用できる。このような観点から、CPAAとPAAは軽元素分析法として相補的手法といえる。ここでは、PAAによる材料中の軽元素分析の例として、近年の光通信の大容量化にともない研究、開発が進められている希土類元素を添加した光ファイバ増幅器に用いられるガラス中の炭素の光量子放射化分析について紹介する。また、CPAAとPAAが相補的關係にある例として薄膜中の炭素、窒素の非破壊光量子放射化分析について概要を紹介する。

### 1. ファイバンプ用ガラス中の炭素の光量子放射化分析

#### 1) はじめに

希土類イオンを添加したZrF<sub>4</sub>系フッ化物ガラス、InF<sub>3</sub>系フッ化物ガラス、Ga-Na-S系カルコゲナイドガラスならびにTeO<sub>2</sub>を主成分とするテルライトガラスはレーザあるいは光ファイバ増幅器の良好なホスト材料として期待されている。しかし、ガラス原料中の酸素、炭素などの不純物がガラスの光学特性に影響を与えるため、これら元素の正確な定量が望まれている<sup>2-3)</sup>。これらガラス中の酸素についてはすでに陽子放射化分析の報告例<sup>4)</sup>があるが、炭素についての報告はなかった。

炭素は、<sup>12</sup>C(d,n)<sup>13</sup>N反応を用いた荷電粒子放射化分析法で高感度定量が可能である。しかし、目的核種である<sup>13</sup>Nの半減期が10minときわめて短いこと、定量に荷電粒子の阻止能の補正が必要であるなど技術的困難がともなう。これに対し、<sup>12</sup>C(γ,n)<sup>11</sup>C反応を用いた光量子放射化分析法は<sup>11</sup>Cの半減期が20minと長く、また、阻止能の補正を必要としないなどの長所を有する。さらに、榊本らは光量子照射した炭素の鉄鋼標準試料を助燃剤とともに

酸素雰囲気下で燃焼し、発生した $^{11}\text{C}$ を一定流量でカラム中を流れる75%アミノアルコール水溶液に吸収分離するフロー法を提案した<sup>5)</sup>。種々の炭素濃度の鉄鋼標準試料に対し、化学分離した $^{11}\text{C}$ のラジオクロマトの強度が炭素濃度に対し比例関係にあることが分かり、フロー法を $^{11}\text{C}$ の迅速化学分離法とする炭素の光量子放射化分析の可能性が示された。しかし、絶対量の評価が必要なこと、化学分離した $^{11}\text{C}$ の放射化学的純度の評価が必要なことから、炭酸リチウムを比較標準試料とし、さらに、化学分離した $^{11}\text{C}$ のアミノアルコール溶液から得た減衰曲線の半減期解析により正確な $^{11}\text{C}$ の放射能強度を求める方法を考案した。そこで、フロー法を $^{11}\text{C}$ の化学分離法とするガラス中の炭素の光量子放射化分析法を検討し、フロー法が炭素の放射化分析に有効な分離法であることを示した。

## 2) 実験

分析には、 $\text{InF}_3$ を主成分とするフッ化物ガラスとGa-Na-S系のカルコゲナイド(GNS)ガラス、 $\text{TeO}_2$ を主成分とするテルライトガラスを用いた。厚さ1mmに研磨、約 $5 \times 5 \text{ mm}^2$ に切断し、フラックスモニターのCu箔とともに光量子照射した。炭素の比較標準試料として錠剤成型した炭酸リチウムを用いた。また、正確さの確認のため、鉄鋼標準試料(JSS-1201、1202)を用いた。照射は東北大学核理研の電子ライナックにより、照射エネルギー30 MeV、照射電流値100  $\mu\text{A}$ で20 min間行った。図1.1にフロー法の概略図を示す。燃焼で発生した $^{11}\text{C}$ を吸収カラムでアミノアルコールに吸収させ、順次、一對の $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  (BGO) 検出器からなる同時計数装置に送られ、 $^{11}\text{C}$ の陽電子消滅にともなう511 keV  $\gamma$ 線を計測し、ラジオクロマトを得た。その後、試験管にアミノアルコールを分取し、一對のNaI(Tl)検出器からなる同時計数装置で減衰曲線を測定した。

## 3) 結果と考察

マトリックスから $(\gamma, n)$ 、 $(\gamma, 2n)$ 、 $(\gamma, p)$ 、 $(n, \gamma)$ 反応により $^{112}\text{In}$ ( $T_{1/2}=14.4 \text{ m}$ 、 $\beta^\pm$ 、EC)、 $^{68}\text{Ga}$ (68 m、 $\beta^+$ 、EC)、 $^{129}\text{Te}$ (69.6 m、 $\beta^-$ )など17核種が生成し、フロー法による化学分離が不可欠であることが分かった。また、 $^{11}\text{C}$ を $^{11}\text{C}$ に酸化する助燃剤として $\text{Pb}_3\text{O}_4$ と $\text{B}_2\text{O}_3$ の混合物が最適であった。図1.2.aおよび図1.2.b)にフッ化物ガラス、カルコゲナイドガラス、テルライトガラスから得られたラジオクロマトグラムおよび分取した吸収液の減衰曲線を示す。図1.2.a)より、フッ化物ガラス、カルコゲナイドガラス、テルライトガラスの順に放射能強度が大きく減衰することが分かる。さらに、これら吸収液の減衰曲線を測定した結果、フッ化物ガラス、カルコゲナイドガラスでは半減期の長い成分が観察され、半減期解析から $^{18}\text{F}$ であることが分かった(図1.2.b))。これは、 $^{19}\text{F}(\gamma, n)$ 、 $^{23}\text{Na}(\gamma, \alpha n)$ 反応で生成する $^{18}\text{F}$ が $^{11}\text{C}$ と同様にアミノアルコールに吸収されたためである。一方、テルライトガラスの場合、吸収液の減衰曲線は、半減期20 minを示し、 $^{11}\text{C}$ のみ分離できたことが分かった。したがって、本法はテルライトガラス中の炭素分析に有効である。本分析法の正確さを確認するため、炭酸リチウムを比較標準とする鉄鋼標準試料中の炭素分析をした結果、分析値は保証値とほぼ一致し、フロー法における化学収率が100%に近いことが明らかになった。

今後、種々の原料で合成されたテルライトガラス中の炭素濃度を測定し、光学特性との



関係を明らかにする。さらに、本方法の課題である  $^{18}\text{F}$  の妨害について、吸収カラムを多段にし、 $^{18}\text{F}$  と  $^{11}\text{C}$  を分離する方法も検討していきたい。本方法は、試料溶解から吸収液の分取まで一工程で終わるため、操作が簡便である特徴を有する。CPAA への利用も考えていきたい。

## 2. 薄膜中の炭素、窒素の非破壊光量子放射化分析法の検討

### 1) はじめに

荷電粒子放射化分析法は、照射後の表面汚染除去が困難であること、また、比較標準として使用できる軽元素薄膜試料がないことからこれまで表面あるいは薄膜分析に適用されなかった。近年、表面、薄膜の軽元素分析を目的とした荷電粒子放射化分析の検討が進められている。すなわち、表面汚染については数  $\mu\text{m}$  の化学エッチング法の開発や照射雰囲気ならびに核反応の選択によりその妨害を抑えることが可能となってきた<sup>6-7)</sup>。一方、軽元素薄膜試料については比較標準としてあるいは正確な励起関数の測定用試料として不可欠である<sup>8)</sup>。中性子即発 $\gamma$ 線分析法で濃度を決定したホウ素膜を比較標準として用い、荷電粒子放射化分析による表面、薄膜の B の定量が行われた<sup>9)</sup>。しかしながら、C、N、O 分析の標準として使用できる薄膜試料はこれまで作製されなかった。

本研究では、荷電粒子放射化分析に用いる薄膜標準試料を作製することを目的として、Si 基板上に作製した炭化ケイ素(SiC)膜、窒化ケイ素( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )膜中の C、N の非破壊光量子放射化分析法の検討を行った。さらに、薄膜分析のための標準試料としての適用性を評価した。

### 2) 実験

分析に用いた薄膜試料は FZ-Si 基板 (100  $\phi$  x 1 mm 厚) 上にマグネトロンスパッタ法で作製した SiC および  $\text{Si}_3\text{N}_4$  で、膜厚は約 0.1、0.3、0.6  $\mu\text{m}$  である。これを、図 2.1 に示したようにウェハー中央付近より切断して分析試料 (5 x 5 mm) とした。分析試料は、 $\text{H}_2\text{SO}_4$ - $\text{H}_2\text{O}_2$  混合液、純水、エチルアルコールの順に数分間超音波洗浄した。C の比較標準試料には 5 x 5 mm に切断した厚さ 0.5 mm のグラファイト板を、N の比較標準試料には、5 x 5 mm に切断した厚さ 0.5 mm の窒化ホウ素 (BN) 焼結体を用いた。照射試料は、図 2.2 に示す方法で作製した。分析試料 2 枚の薄膜面を重ねて厚さ 8  $\mu\text{m}$  のアルミニウム箔に包み照射試料とした。これをアルミニウム箔で包んだ比較標準試料 2 枚で挟み、さらにアルミニウム箔に包み、石英管(外径 10  $\phi$ 、内径 9  $\phi$  mm)に挿入した。石英管内を真空にし、ヘリウムガスで置換する操作を繰り返した後、封入した。

制動放射線照射は東北大学理学部付属原子核理学研究施設の電子線加速器により、照射エネルギー 25~30 MeV で 10 min 行った。制動放射線照射した試料はアルミニウム箔を取り除き、Ge(Li)検出器-4096ch 波高分析装置により所定の時間間隔で繰り返し放射能測定を行い、511keV  $\gamma$  線の減衰曲線を求めた。軽元素濃度( $C_x$ ;  $\text{g}/\text{cm}^2$ )は式(1)より算出した。

$$C_x = (A_x/A_s) (W/S) \text{-----} (1)$$

ここで、 $A_x$  は減衰曲線の半減期解析により求めた  $^{11}\text{C}$  または  $^{13}\text{N}$  の生成放射能、 $A_s$  は比較標準試料の生成放射能、 $W$  は比較標準試料中の軽元素重量、さらに、 $S$  は事前に求めた分析試料の面積である。なお、分析試料の面積 ( $S$ ) は以下のようにして測定した。分析試料の薄膜面を複写機により拡大コピーし、これを切り取り、紙片の重量を測定した。同様に  $5 \times 5 \text{ mm}$  の図形を同じ倍率で拡大コピーし、切断、秤量し、分析試料の紙片重量と比較することにより面積を算出した。 $5 \times 5 \text{ mm}$  の図形を拡大コピーした紙片 21 枚の平均重量は  $28.43 \pm 0.74 \text{ mg}$  であり、相対標準偏差は 2.6 %であった。

### 3) 結果と考察

まず、薄膜の基板に用いた FZ-Si を照射し、511 keV  $\gamma$  線の経時変化を測定し、マトリックスからの妨害の程度、石英管封入時のヘリウムガス置換の効果を検討した。図 2.2 に制動放射線照射した Si からの 511 keV  $\gamma$  線の減衰曲線を示す。測定は検出器直前で行うと仮定し、照射終了直後は放射能強度が大きいので検出器から離し、放射能の減衰に対応して検出器に近づけて測定し、幾何効率を補正して減衰曲線を求めた。図より、511 keV  $\gamma$  線は半減期 6.6 min で減衰することが分かる。 $\gamma$  線スペクトルでは  $^{29}\text{Al}$  からの 1273 keV  $\gamma$  線に加え、750 keV 付近にも  $\gamma$  線が測定された。これは、1273 keV  $\gamma$  線のシングルエスケープピークと考えられ、したがって、図の 511 keV  $\gamma$  線の減衰曲線は  $^{29}\text{Al}$  から放出された  $\gamma$  線の電子対生成によることが明らかとなった。図には参考のため  $^{13}\text{N}$  の減衰曲線も点線で示した。以上の結果から、ガス置換により大気中の炭素、窒素の汚染の防ぐことができること、Si 基板中の不純物炭素、窒素からの妨害は無視できること、また、 $^{29}\text{Al}$  からの妨害が無視できる 20~30 min 後に測定を開始した方がよいことが分かった。

図 2.3 に制動放射線照射した SiC 膜、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  膜から得られた 511 keV  $\gamma$  線の減衰曲線を示す。 $^{29}\text{Al}$  の生成放射能が大きいので測定は照射終了 25~50 min 後に検出器から 5 cm 程度離れた位置で行った。図より、SiC 膜の減衰曲線の半減期は  $^{11}\text{C}$  に一致し、また、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  膜の減衰曲線の半減期は  $^{13}\text{N}$  に一致することが分かった。また、他の長半減期成分の生成は認められなかった。表 1 に定量結果を示す。炭素分析値は 4~25  $\mu\text{g}$  であり、単位面積あたりの濃度は平均  $7.9 \pm 0.6 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \sim 37.0 \pm 1.3 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  であった。一方、窒素の分析値は 4~28  $\mu\text{g}$  であり、平均濃度は  $9.0 \pm 0.8 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \sim 53.0 \pm 3.0 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  であった。図 2.4 に膜厚に対する炭素、窒素濃度変化を示した。図には、膜厚と SiC および  $\text{Si}_3\text{N}_4$  バルク密度 ( $3.2 \text{ g}/\text{cm}^3, 3.185 \text{ g}/\text{cm}^3$ )<sup>10-11)</sup> から算出した濃度も示した。図より、測定値は膜厚が増大するにしたがい増大すること、また、測定値はいずれも計算値より小さいことが分かった。これは、薄膜の密度が変化しているためと思われる、膜厚とバルク試料の密度から軽元素濃度を推測できないことを示すものである。したがって、放射化分析で濃度を明らかにした薄膜試料を標準物質に使用することは重要と考えられる。

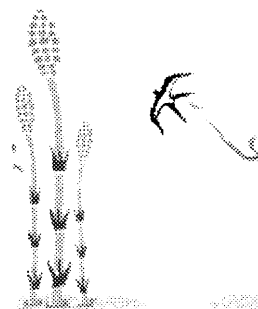
なお、照射終了 30 min 後に測定を開始するとして自然計数の標準偏差の 3 倍を検出限

界とすると本法の定量限界は、炭素で 0.3  $\mu\text{g}$ 、窒素で 3  $\mu\text{g}$  であった。

また、本研究では、膜厚分布測定法として、表面粗さ計などによる化学エッチング後の段差測定に加え、窒化膜に対しは  $^{15}\text{N}(\alpha, n)^{18}\text{F}$  反応を用い、試料面内の  $^{18}\text{F}$  強度分布から膜厚分布を推定する方法も提案した。

#### 参考文献

- 1) K. Shikano, H. Yonezawa and T. Shigematsu: J. Radioanal. Nucl. Chem., 167(1993)81
- 2) Y. Nishida, T. Kanamori, T. Sakamoto, Y. Ohishi, S. Sudo: J. Non-Crystalline Solids, **221**(1997)238
- 3) K. Fujiura, T. Kanamori, S. Sudo: in S. Sudo (Ed.), Optical fiber amplifiers, Artec House, Inc., 1997, p.200
- 4) K. Shikano, Y. Nishida, K. Kobayashi, T. Kanamori, M. Shimizu, K. Masumoto, T. Ohtsuki: J. Radioanal. Nucl. Chem., **253**(2002)25.
- 5) K. Masumoto, K. Shikano, T. Ohtsuki, Y. Itoh: Anal. Sci., 2001, Vol.17, Supplement, p.i641
- 6) M. A. Mirdaq, G. Bloddiaux, J. P. Andre, M. Hage Ali, M. Valladon, C. J. Maggiore, J. L. Debrun: Nucl. Inst. Meth. Phys. Res., B15(1986)328
- 7) S. Kataoka, Y. Tarumi, S. Tomiyoshi and T. Nozaki: J. Radioanal. Nucl. Chem., 216(1997)217
- 9) H. Yonezawa, C. Yonezawa and T. Shigematsu: J. Radioanal. Nucl. Chem., 198(1995)125
- 10) 日本化学会編、”化学便覧 応用化学編・材料編”、p959、1986、丸善
- 11) 久保、長倉、井口、江沢編、”岩波 理化学辞典第4版”、p786、1987、岩波書店



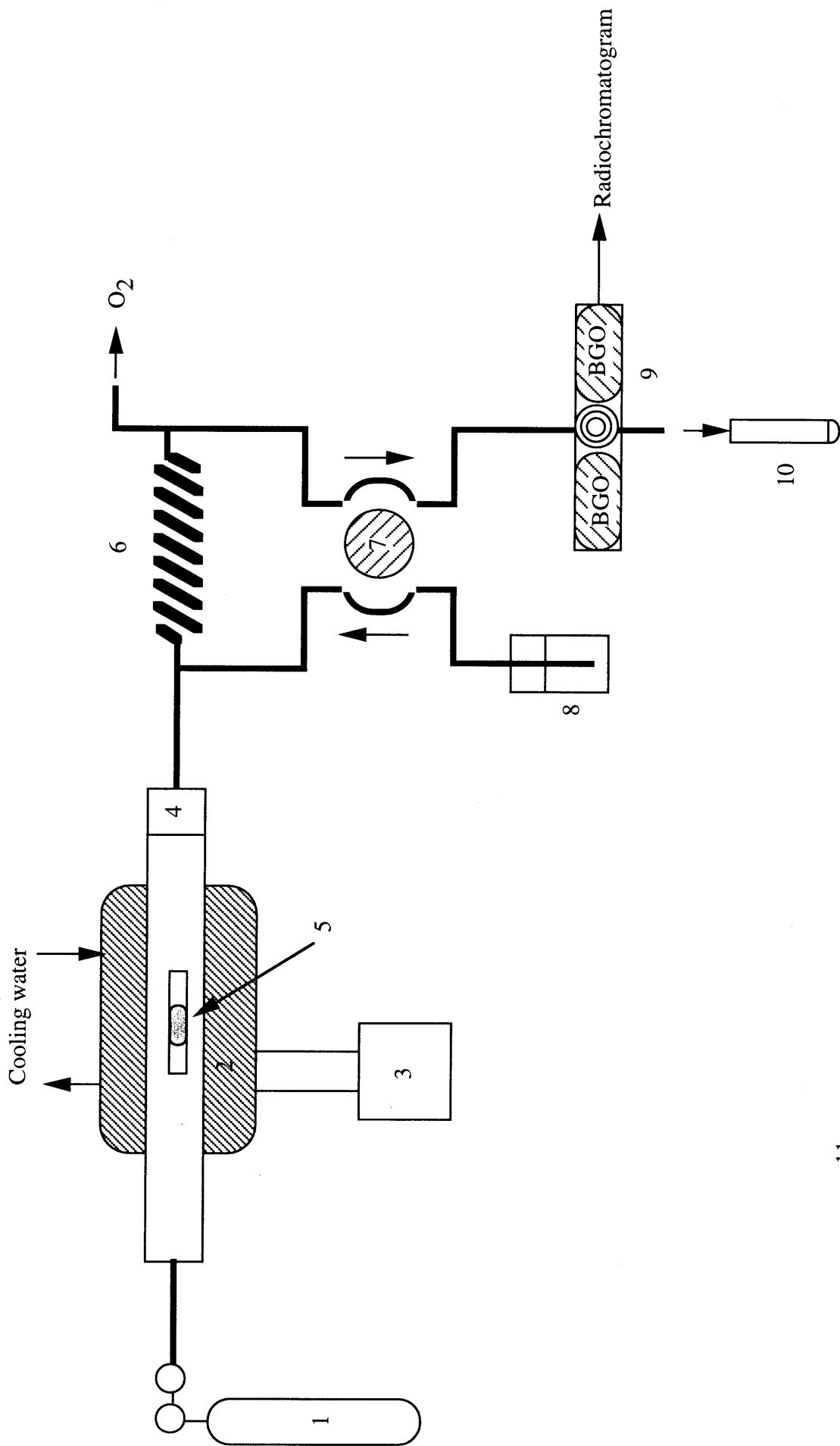


Fig.1.1 Set-up for separation of  $^{11}\text{C}$  and radiochromatography ;

1-carrier gas ( $\text{O}_2$ ), 2-furnace, 3-controller, 4-quartz wool, 5-sample and flux,

6-absorption column, 7-pump, 8-75% ethanolamine, 9-coincidence counting system,

10-test tube for collecting ethanolamine.

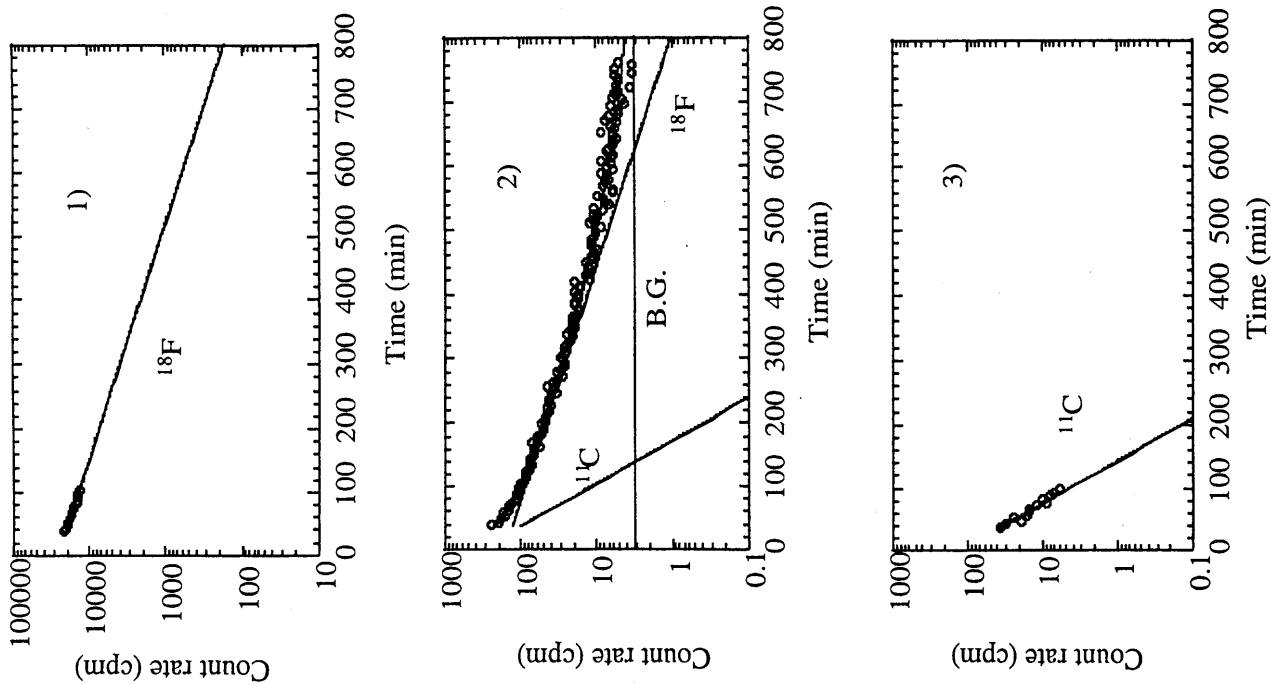


Fig.1.2.b) Decay curves of 511keV  $\gamma$ -ray obtained from 1)  $\text{InF}_3$ -based fluoride glass, 2) GNS glass, and 3) tellurite glass

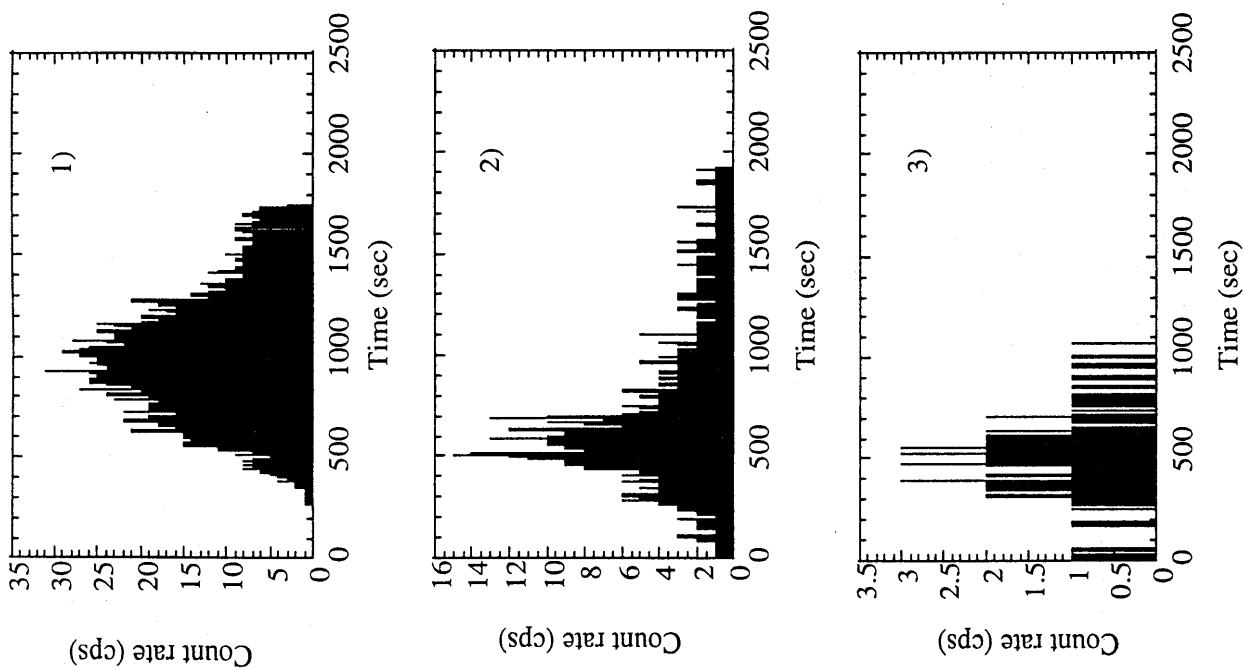


Fig.1.2.a) Radiochromatogram obtained from 1)  $\text{InF}_3$ -based fluoride glass, 2) GNS glass, and 3) tellurite glass

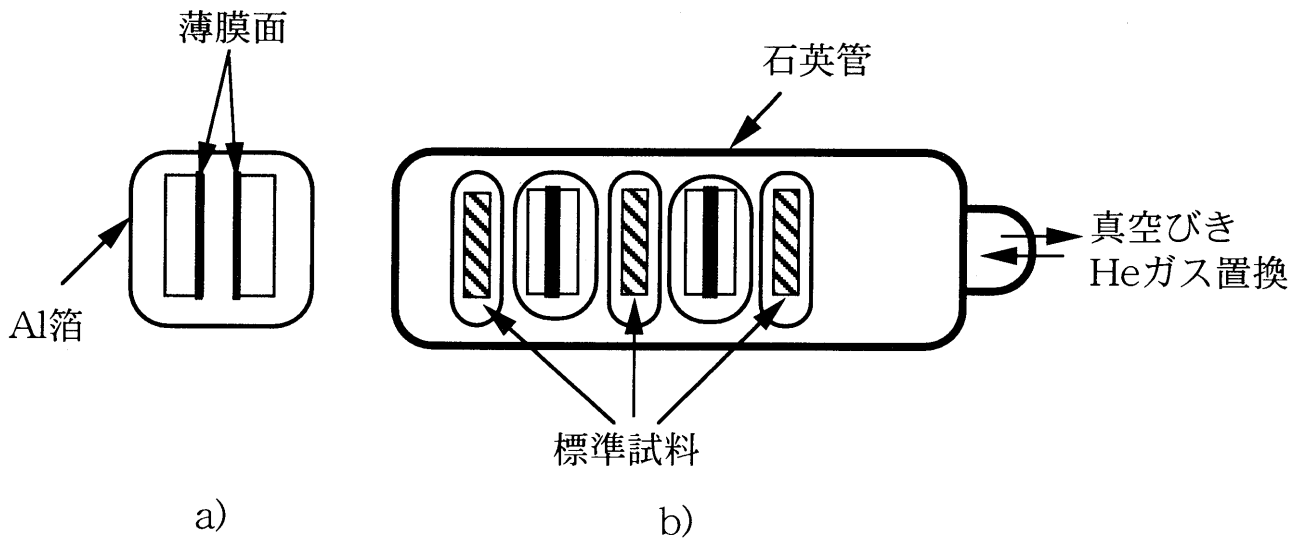


Fig.2.1 照射試料の作製方法

- a) 分析試料のAl箔による梱包（薄膜面を重ねる）
- b) Heガス置換後、石英管への封入

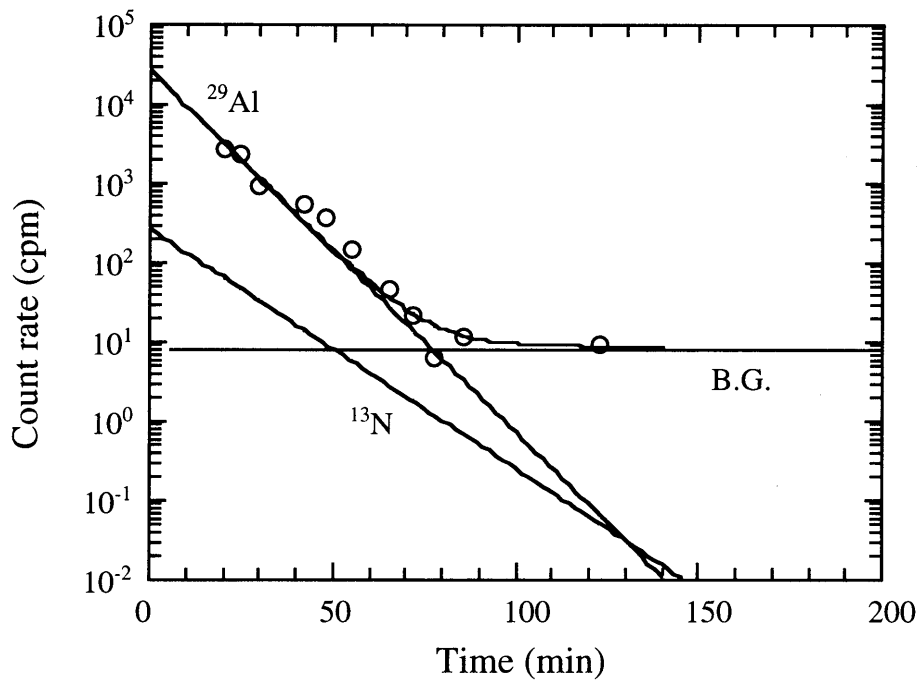


Fig.2.2 Si基板から得られた511keV  $\gamma$ 線の減衰曲線  
(検出器直前での測定を仮定)

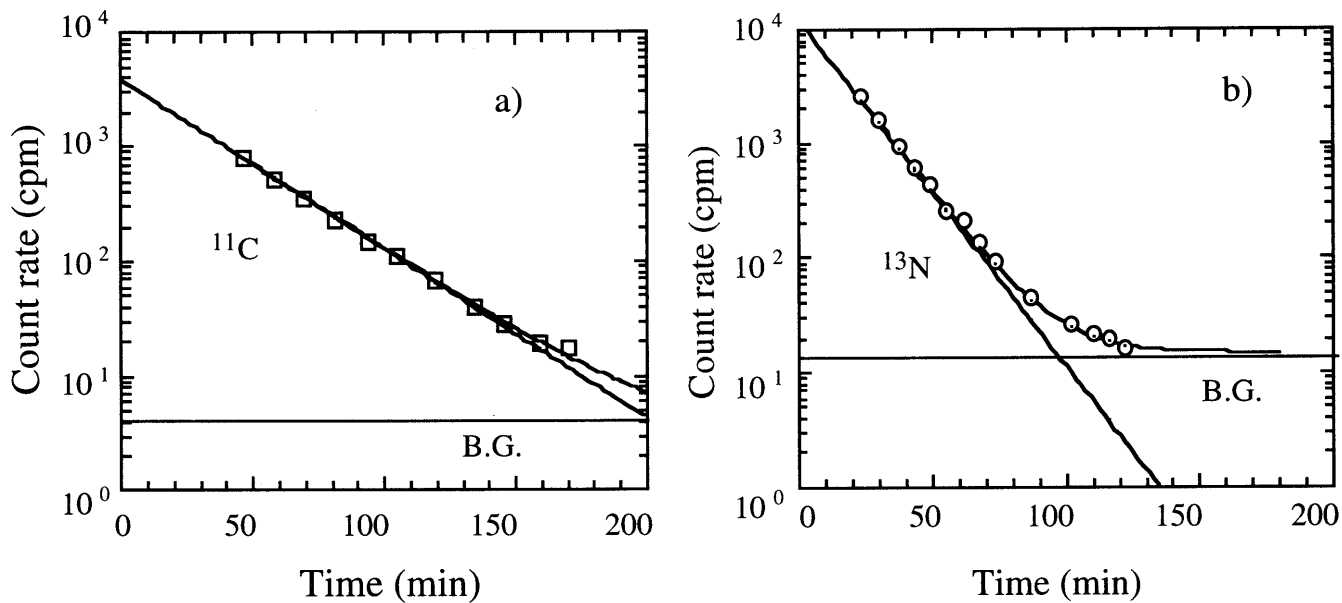


Fig.2.3 薄膜から得られた511keV  $\gamma$ 線の減衰曲線

a) 炭化ケイ素膜

b) 窒化ケイ素膜

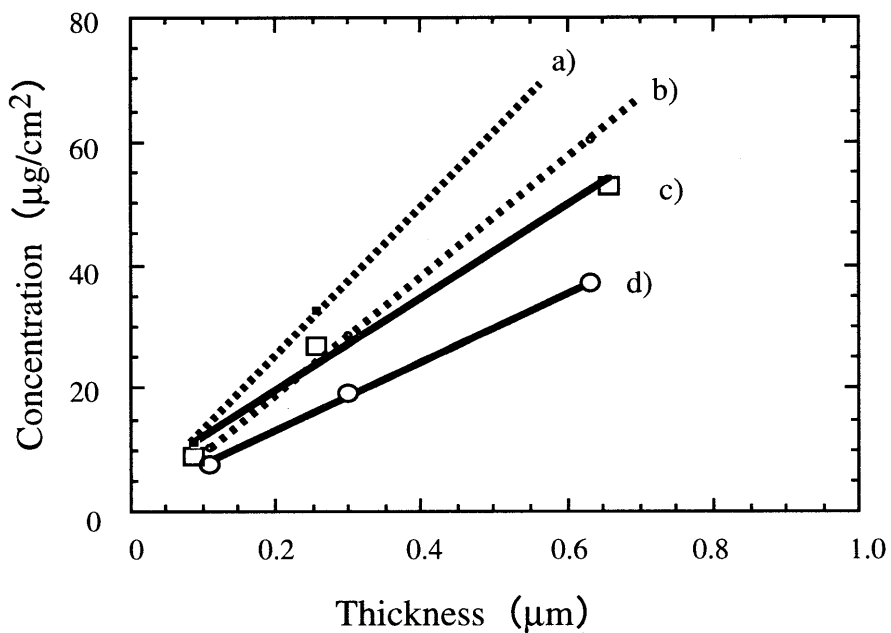


Fig.2.4 炭化膜、窒化膜の膜厚と炭素、窒素濃度

a) バルク密度から計算した窒素濃度

b) バルク密度から計算した炭素濃度

c) 測定した窒素濃度

d) 測定した炭素濃度

Table 1 種々の膜厚の炭化ケイ素膜、窒化ケイ素膜中の炭素、窒素の定量結果

Sample	Analytical result ( $\mu\text{g}$ )	Area ( $\text{cm}^2$ )	Concentration ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )	Average value ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )	Thickness ( $\mu\text{m}$ )
SC-1-1	4.04	0.502	$8.06 \pm 0.08^*$		
SC-1-2	3.90	0.506	$7.71 \pm 0.56$	$7.89 \pm 0.61$	0.1
SC-2-1	9.67	0.512	$18.9 \pm 0.08$		
SC-2-2	10.2	0.508	$20.1 \pm 0.16$	$19.5 \pm 0.6$	0.3
SC-3-1	19.5	0.531	$36.7 \pm 0.6$		
SC-3-2	24.5	0.688	$35.6 \pm 0.5$		
SC-3-3	20.9	0.541	$38.7 \pm 0.5$		
SC-3-4	18.2	0.589	$37.1 \pm 0.3$	$37.0 \pm 1.3$	0.6
SN-1-1	4.18	0.509	$8.20 \pm 0.72$		
SN-1-2	4.85	0.494	$9.81 \pm 0.35$	$9.01 \pm 0.80$	0.1
SN-2-1	13.7	0.494	$27.7 \pm 1.3$		
SN-2-2	13.3	0.502	$26.5 \pm 0.4$	$27.1 \pm 0.61$	0.3
SN-3-1	27.8	0.554	$50.2 \pm 3.5$		
SN-3-2	28.1	0.501	$56.1 \pm 0.7$		
SN-3-3	21.6	0.411	$52.6 \pm 1.6$	$53.0 \pm 3.0$	0.6

\*放射能計数誤差



# 光量子放射化分析法による隕石の非破壊分析

東京都立大学大学院理学研究科  
大浦泰嗣・海老原充

## はじめに

隕石は我々が手に入れることのできる数少ない地球外物質の一つであり、その鉱物組成、元素組成、同位体組成などを通して太陽系の歴史や惑星の進化過程を探ることができる。

隕石は、まず大きく 3 つに分類することができる。すなわち、石質隕石、石鉄隕石、ならびに鉄隕石で、それぞれ鉱物組成や元素組成が異なっている。地球上で隕石として確認された中でもっとも数の多いのは石質隕石である。石質隕石は地球上の岩石と同様にけい酸塩が主体の隕石であるが、地球岩石には見られない特徴をもつ。つまり、隕石マトリックス中にミリメートルサイズのほぼ球状のけい酸塩鉱物(球粒 chondrule と呼ばれる)が含まれている。この球粒を含む石質隕石を球粒隕石と呼ぶ。一方、この球粒が含まれない石質隕石もわずかに存在し、非球粒隕石という。隕石の鉱物組成・元素組成の違いは、隕石母天体の進化(変成)過程を反映していると考えられ、これらを調べることにより惑星の進化(変成)の様子が解明できる。とくに、球粒隕石は最も原始的な隕石とされ、地球物質には記憶されていない太陽系初期の状況を記憶している。

隕石は貴重な試料であり、様々な理由から分析に供せられる試料量には限りがあることが多い。そのため、隕石の元素組成分析において放射化分析法は少量で微量多元素を正確に定量できるため、現在まで重要な役割を担い続けている。我々は特に元素組成に注目しており、放射化分析法や ICP-MS 法などにより隕石等宇宙化学的試料の元素組成を定量している。我々は通常 3 種類の放射化分析を併用して、非破壊分析を行っている。まず、中性子誘導即発  $\gamma$  線分析を行った後、この試料を 2 分し、一つを中性子放射化分析、他方を光量子放射化分析に供している。本稿では、我々の機器的光量子放射化分析(IPAA)における実験方法を紹介し、最後に、最近日本に落下あるいは隕石であると確認された、神戸隕石、狭山隕石、ならびに十和田隕石の放射化分析法により得た化学組成を報告する。

## 試料調製・照射

粉末試料約 50mg を Al 箔(現在はニラコ社製厚み 0.0125mm, 純度 99%を使用)で二重に包み、直径 10mm の円板状に整形した。これを同様に調製した妨害反応補正用試薬試料とフラックス補正用 Au 箔(0.01mm $\times$ 10mm $\phi$ )とともに石英管内に熔封した。Au モニタは試料 2~3 個ごとに 1 枚はさんだ。分析試料は通常 10 個程度一度に照射している。

この石英管を循環水中で冷却しながら、最大エネルギー( $E_0$ )30MeV または 20MeV の制動放射線で 30 分ならびに 4~6 時間照射した。平均電流は約 100~110  $\mu$ A であった。

## 測定・解析

30 分照射後、ただちに Al 箔で包んだまま、 $\gamma$  線を測定した。100 秒測定を 2 回繰り返したのち、さらに 10 分間測定を行った。(この後、再度石英管に熔封し、4~6 時間再照射した。)6 時間照射した試料は、Al 箔から取り出し、ポリプロピレン(PP)製サンプル管 (7mm $\phi$  $\times$ 13mm)に移した。都立大 RI 研究施設にて照射終了 1 日半後から約 1 カ月後まで、適当な冷却期間をおいて 5~6 回測定を繰り返した。

$\gamma$  線スペクトルは金沢大・浜島氏による SPECanal-wPKarea.exe による自動計算と手計

算を併用して解析した。各 $\gamma$ 線ピークで壊変曲線を作成して、核種の純度を確認するとともに、照射終了後の計数率を求めて定量に用いた。

### フラックス補正

制動放射線は進行方向に強度が減少し、さらに、試料が多くなると制動放射線のエネルギー分布が変化する可能性があり、理想的には既知量の定量対象元素によりフラックスをモニターすることが望ましい。しかし、現実的には困難であり、我々は金属箔を利用している。

まず、Ni 箔、ステンレス箔、金箔をもちいて誘導放射能の試料厚に対する減衰の様子を調べた。図 1(a)に金箔とステンレス箔、図 1(b)に金箔と Ni 箔の  $E_0=30$  MeV での誘導放射能の試料の積算厚みに対する減衰の様子を示す。 $^{56}\text{Ni}$  をのぞき、Q 値が $-8.07\sim-12.2$  MeV である核反応生成物の放射能比は統計誤差範囲内でよく一致している。Q 値が $-14.4$  MeV である $(\gamma, 2n)$ で生成する  $^{56}\text{Ni}$  は総試料厚が  $1.3$  g/cm<sup>2</sup> を越えると急激に誘導放射能が減少する。これは、制動放射線のエネルギー分布が変化していることを示していると考えられる。 $^{196}\text{Au}$ 、 $^{57}\text{Ni}$ 、 $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{51}\text{Cr}$  のどれを用いてもフラックスの補正は可能であると考えられるが、半減期と生成放射能が実用的に適度である Au 箔を用いた。

従来、flux の補正は Pt コンバーターから試料までの距離に対して行われている。試料厚に対する補正と距離に対する補正を比較したが、実用上ほとんど同じであったので、我々は試料厚に対する補正を採用した。

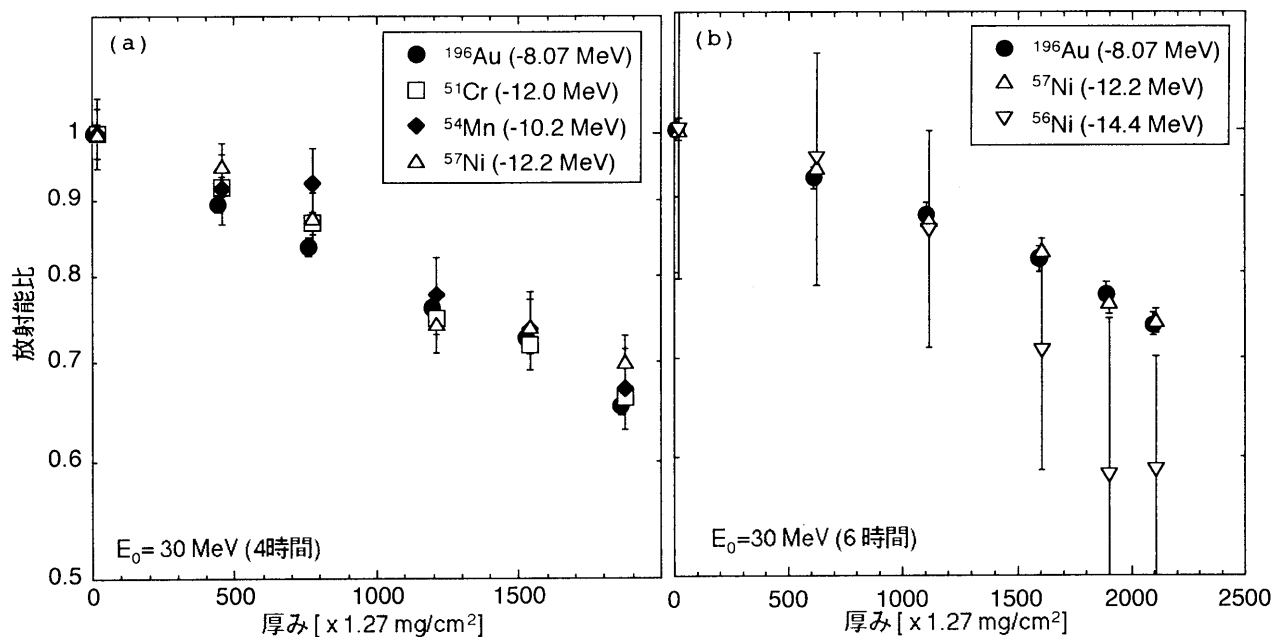


図 1 石英照射管内の光量子フラックス変動。試料の積算重量に対して、先頭位置のモニターで規格化した誘導放射能を示した。( )内に反応の Q 値を示した。

### 妨害反応

20~30MeV の制動放射線により誘導される核反応には、 $(\gamma, n)$ 、 $(\gamma, 2n)$ 、 $(\gamma, p)$ 、 $(\gamma, pn)$ 、 $(\gamma, \alpha)$  反応などがある。光量子放射化分析では、主として原子番号が変化しない $(\gamma, n)$ 反応により生成す

る核種を定量に用いるが、生成核種の原子番号が小さくなる( $\gamma, p$ ), ( $\gamma, pn$ ), ( $\gamma, \alpha$ )反応による妨害が無視できない場合がある。球粒隕石の場合、特に Cl, Co, Mn, Na の定量の際に妨害反応が無視できないと考えられるため、高純度試薬を同時に照射して妨害反応による寄与を補正した。これらの妨害の寄与率を表 1 にまとめた。妨害核反応の Q 値がおよそ 20MeV であるため、 $E_0=20\text{MeV}$  で照射すると妨害核反応を無視できるが、( $\gamma, p$ )または( $\gamma, pn$ )反応により定量する Mg, Si, Ti, Ca, Fe の定量が困難になる。また、( $\gamma, n$ )反応による誘導放射能も  $E_0=30\text{MeV}$  に比べ小さくなる。(Ni による妨害反応が 20MeV においても観測されたが、金属 Ni 試薬(純度 99.9%)中の Co 不純物による寄与であると考えられる。)

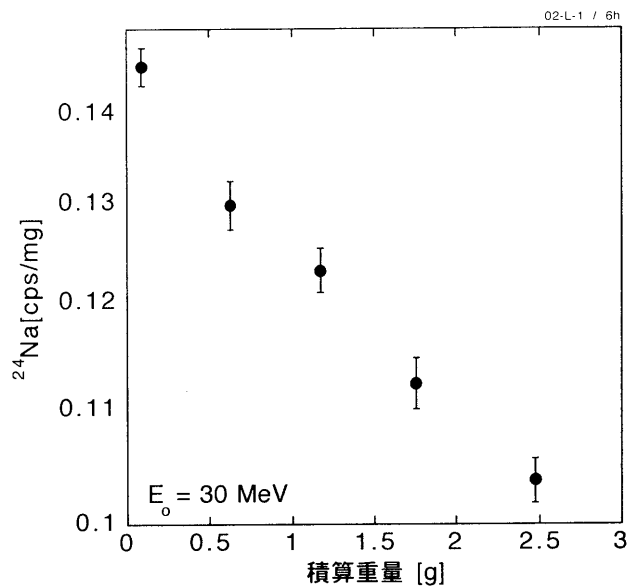


図 2 照射石英管内の二次中性子束変動。試料の積算重量に対して、 $^{24}\text{Na}$  の比放射能を示した。

Mg は( $\gamma, p$ ) $^{24}\text{Na}$  反応により定量するが、二次中性子による  $^{23}\text{Na}(n, \gamma)^{24}\text{Na}$  反応が妨害する。この補正のために NaCl を同時に照射した。二次中性子束はビーム進行方向に対し変化すると考えられるため、2~3 試料ごとに 1 つはさんだ。 $E_0=30\text{MeV}$  における二次中性子束の変動の一例を生成した  $^{24}\text{Na}$  の比放射能の変化として図 2 に示した。積算試料重量に対し指数関数的に減少した。なお、Na と Mg の定量には、 $^{23}\text{Na}(\gamma, n)^{22}\text{Na}$ ,  $^{24}\text{Mg}(\gamma, pn)^{22}\text{Na}$ ,  $^{25}\text{Mg}(\gamma, p)^{24}\text{Na}$ ,  $^{23}\text{Na}(\gamma, n)^{24}\text{Na}$  の 4 反応がお互いに関与するため二次方程式を解く必要がある。

#### 定量元素

球粒隕石で定量できた元素を表 2 に利用した核種とともに示した。太字は INAA や PGA では定量できず、IPAA でのみ定量できた元素である。日本地質調査所発行 JB-1 または Smithsonian Institution 発行 Allende 隕石(JB-1 では検出できない元素のみ)を比較標準試料として定量した。Cr は GSJ の推奨値に疑いがあるため[富樫他 1990], Allende 隕石を比較標準として定量した<sup>1)</sup>。

表 1 妨害反応の寄与率

	Q値	30 MeV	20 MeV	
$^{39}\text{K}(\gamma, \alpha n)^{34m}\text{Cl}$	-20.0 MeV	2	0.04	[ $\mu\text{gCl}/\text{mgK}$ ]
$^{60}\text{Ni}(\gamma, pn)^{58}\text{Co}$	-20.0 MeV	3.2	1.7	[ $\mu\text{gCo}/\text{mgNi}$ ]
$^{59}\text{Fe}(\gamma, pn)^{54}\text{Mn}$	-20.4 MeV	14.3	N.D.	[ $\mu\text{gMn}/\text{mgFe}$ ]
$^{24}\text{Mg}(\gamma, pn)^{22}\text{Na}$	-24.1 MeV	12.5	N.D.	[ $\mu\text{gNa}/\text{mgMg}$ ]
$^{23}\text{Na}(n, \gamma)^{24}\text{Na}$		4.2	55	[ $\mu\text{gNa}/\text{mgNa}$ ]

N.D.: 検出限界以下

30 分照射した試料は短半減期  $^{29}\text{Al}$  定量のため Al 箔で包んだまま測定した。そのため、Al 箔中の不純物を補正する必要がある。特に問題となるのは Zn で約 50%の寄与率であった。その他の元素では Fe が数%以下の寄与率があるほかは Al 箔中の不純物の寄与はほとんどなかった。6 時間照射試料は Al 箔から PP 製サンプル管に移した後、 $\gamma$  線測定した。Al 箔を取り除く作業は特に注意を払っているが、Al 箔の微小片が混入する可能性がある。キラキラ光るので、混入した場合はピンセットでつまみ出しているが、万が一、1mg の Al 箔が混入したとしても、定量には無視し得る。(1mg の Al 箔は充分除去できる。)

#### 最近日本で落下・発見された隕石の化学組成

球粒隕石の分析例として、最近日本で落下または発見された隕石の化学組成を紹介する。分析した隕石を表 3 にまとめた。これらの隕石は前述したとおり IPAA のみでなく、INAA ならびに PGA での分析も行い、定量値はこれら 3 法による値を検討して算出した。

1999 年 9 月 26 日に兵庫県神戸市に落下した神戸隕石は、日本ではじめて落下が確認された炭素質球粒隕石で、CK と呼ばれるサブグループに分類される。この CK は最近新たに分類されたサブグループ[Kallemeyn et al. (1991)] でまだ研究が進んでいない。狭山隕石は CM に分類される炭素質球粒隕石で、1986 年 4 月に埼玉県狭山市において発見されたが、チェルノブイリ事故直後であり、そのまま 2~3 日放置され、その間に雨にさらされた。その後高校で 14 年間保管され、2000 年に国立科学博物館に鑑定依頼された。図 3(a)に神戸 E, 神戸 C-3mix-3(以後神戸 C と略す), 狭山隕石, ならびに CM 球粒隕石の平均組成の各元素濃度(ただし、ケイ素濃度に対する濃度比)を最も始原的な隕石と考えられている CI 炭素質球粒隕石[Anders & Grevesse (1989)]で規格化した値をプロットした。X 軸の元素は左から右へ宇宙化学的凝縮温度が高い元素から低い元素になるように並べてある。つまり、ここにあげた元素の中で Zr が最も宇宙化学的揮発性が低く、S が最も揮発性が高い。どの隕石も Si より揮発性が低い元素は CI 隕石よりも濃縮しており、Si よりも揮発性の高い元素は CI 隕石よりも枯渇している。また、枯渇の程度は CM 隕石よりも、CK 隕石のほうが大きい。これは、CK 隕石の熱変成が CM 隕石よりも大きかったことを示唆している。神戸 E の希土類元素濃度が神戸 C よりも大きく、そのパターンも水平ではない。これは、廣田ら[Hirota et al. (2000)]により同位体希釈質量分析法によっても観測され、さらに興味深い希土類元素パターンが報告された。神戸 E は特異な希土類元素濃度をもつ担体を含有している可能性

表 2 IPAA により球粒隕石で定量できた元素

定量元素	生成核種	半減期
Na	Na-22	2.60y
Mg	Na-24	15.0 h
Si	Al-29	6.56 m
Cl	Cl-34m	32.0 m
K	K-38	7.64 m
Ca	Ca-47	4.54 d
Ti	Sc-48	43.7 h
Cr	Cr-51	27.7 d
Mn	Mn-54	312 d
Fe	Fe-53	8.51 m
Fe	Mn-52	5.59 d
Co	Co-58	70.8 d
Ni	Ni-57	35.6 h
Zn	Zn-65	244 d
<b>Rb</b>	Rb-84	32.8 d
<b>Sr</b>	Sr-87m	2.80 h
<b>Y</b>	Y-88	107 d
<b>Zr</b>	Zr-89	78.4 h
<b>Nb</b>	Nb-92m	10.2 d

IPAA でのみ定量できた元素を太字で示した。

表3 最近日本で落下または発見された隕石

名前	種類	落下または発見時期	落下場所	備考
神戸隕石 find	炭素質球粒隕石(CK)	1999年9月26日	兵庫県神戸市	日本に落下が確認された最初の炭素質隕石
狭山隕石 fall	炭素質球粒隕石(CM)	1986年4月	埼玉県狭山市	チェルノブイリ事故直後であり、発見後そのまま2~3日放置され、その間に雨にさらされた。その後高校で14年間保管され、2000年に国立科学博物館に鑑定依頼された。
十和田隕石 fall	普通球粒隕石(H)	1997年4月	青森県十和田市	落下は1985年~1992年ごろと推定される。表面の風化が進んでおり、発見までの間に風雨にさらされていたと考えられる。2001年に国立科学博物館に鑑定依頼された

がある。神戸 C のアルカリ元素 Na, K, Rb は共に神戸 E よりも濃縮しており、その程度は元素番号とともに大きくなっている。狭山隕石は CM 隕石の平均値とほぼ同じ傾向を示しているが、アルカリ金属の Na と K が大きく枯渇している。しかし、同じアルカリ金属である Rb は同様ではない。鉱物組織の観察より狭山隕石は水質変成を強く受けていることがわかっており、母天体でのアルカリ金属の移動が推定されるが、落下後雨に打たれているのでこれが原因である可能性も考えられる。一方、B と Br 濃度は非常に高くなっている。これらは落下後の汚染が原因かもしれない。

十和田隕石(H 普通球粒隕石)は、1997 年 4 月に青森県十和田市において倉庫の軒先にて発見された。落下は 1985 年~1992 年ごろと推定される。表面の風化が進んでおり、発見までの間に風雨にさらされていたと考えられる。2001 年に国立科学博物館に鑑定依頼された。図 3(b)には十和田隕石と H 普通球粒隕石の平均組成の CI 隕石規格化存在度を炭素質球粒隕石と同様に示した。十和田隕石は全体的に H 普通球粒隕石の平均値と整合しているが、Si よりも難揮発性の元素でわずかに平均値よりも大きい。また、Zn も平均値よりもおおきかった。

#### さいごに

現在は主として石質隕石の非破壊分析を中心に行っている。これまでに、ハロゲン元素の放射化学的光量子放射化分析も行ってきたが、まだ、若干工夫すべき点が残っている。年間に利用できる期間は NAA に比べると非常にわずかであるが、今後も、放射化学的方法も用いながら、加速器を用いた光量子放射化分析の特徴をいかして、特に、INAA では定量困難な元素の分析を行っていききたい。

最後になりましたが、高強度の安定した電子ビームの供給のために、加速器の調整をしていただいた核理研マシングループの方々、また、照射の際に非常にお世話になった大槻勤助教授と結城秀行氏に感謝いたします。

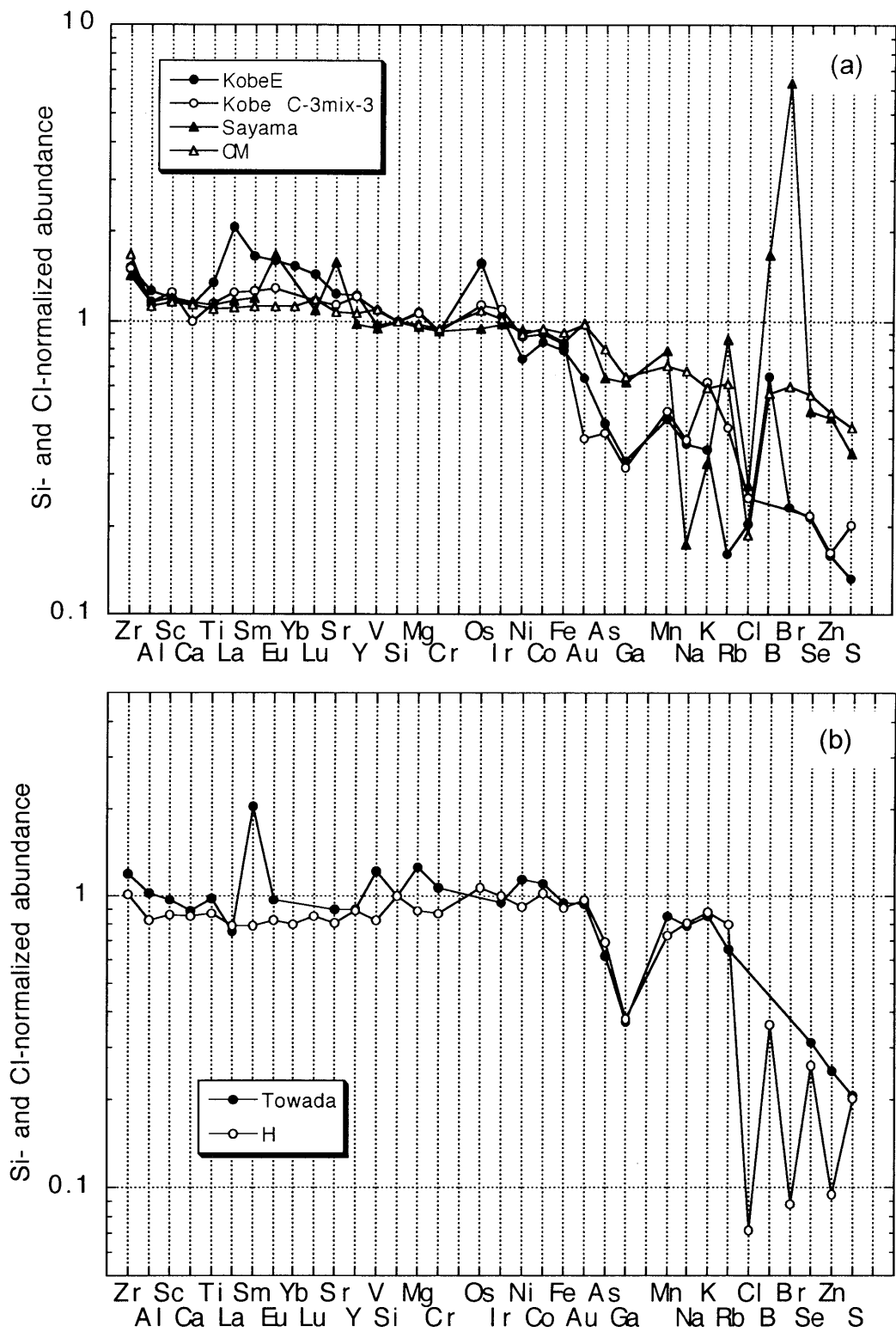


図3 CI規格化元素存在度. 元素は左から右へ宇宙での凝縮温度が高いものから低い順で並んでいる.

#### 参考文献

Anders, E. and Grevesse, N. (1989), *Geochim. Cosmochim. Acta* 53, 197-214.

Hirota, Y, et al. (2000), *Antarct. Meteorites XXV*, 16-18.

Kallemeyn, G. W. et al. (1991), *Geochim. Cosmochim. Acta* 55, 881-892.

富樫他(1990), *岩鉱* 85, 91-97.

#### 付録(1)

INAA と IPAA で Allende 隕石を比較標準とした JB-1 の Cr 濃度は 457~508ppm (10 定量値) となった。また, Cr 試薬を比較標準とした場合は, 468~483ppm (3 定量値)であった。これらを平均して, JB-1 の Cr 濃度として 493ppm を得た。GSJ の推奨値は 425ppm である。



# 学会・研究会報告

## 2002年日本放射化学学会年会・第46回放射化学討論会

東京都立大学 大浦泰嗣

標記学会が、2002年9月23日～25日に北海道札幌市「かでの2.7」において開催されました。妙な施設名だと感じる方が多いのではないかと思います。「かでの」とは北海道の方言で“仲間に入れる”という意味だそうです。ちなみに「2.7」は住所(北2条西7丁目)に由来しています。

23日に口頭発表67件、24日に招待講演・特別講演4件、25日に口頭発表22件ならびにポスター発表60件の計153件の講演がありました。また、24日に日本放射化学学会総会があり、放医研・田上恵子氏に奨励賞が授与されました。奨励賞は今年度までに核化学、メスバウア分光および環境放射能分野の若手研究者4人が受賞されています。放射化分析グループからも受賞者が選ばれるように若手の皆さん(僕自身も?)がんばりましょう。招待講演・特別講演は、初めて(だと思います)一般公開となり、ベビーカーを押した若いお母さんの姿も見られました。

放射化分析分科会は23日にあり、北大・豊田和弘氏が「堆積物コア試料の時間高分解能な放射化分析の実際」と題して講演されました。通常の学会等ではなかなかうかがうことができない放射化分析を行う実際の手順を詳しく示していただだけ、たいへん参考になりました。また、今後この分科会は放射化分析研究会で運営していくこととなりました。

以下に放射化分析に関連した講演を記します。

### 特別講演

大強度陽子加速器施設と中性子科学

(北大院工) 鬼柳善明

### 口頭発表

$k_0$ 法を利用した RNAA-岩石試料中の微量ハロゲン元素定量の試み

(東大原総セ) 尾寄大真 他

$k_0$ 標準化放射化分析法によるメダカの分析

(熊大院自然) 松下力示 他

中性子放射化分析法による海藻中のヒ素、ヨウ素、臭素の定量

(石巻専修大理工) 福島美智子 他

Determination of Arsenic in Ground Water and Food Stuffs Using Neutron Activation Analysis (NAA)

(都立大院理) Sk. A. Latif 他



- 軽度の亜鉛欠乏が生体内の微量元素濃度に及ぼす影響 (静岡大理) 小木貴憲 他
- 亜鉛欠乏マウス肝細胞の各画分における微量金属の分布 (静岡大理) 大山拓也 他
- 放射化学的中性子放射化分析による隕石・岩石中の微量 Mo と W の定量  
(都立大院理) 本橋健晴 他
- ICP-MS による岩石, 隕石試料中の微量トリウム及びウラン定量方法の検討:RNAA との比較  
(都立大院理) 柴剣宇 他
- 多重ガンマ線分析法による高感度多元素同時定量の応用 (原研) 初川雄一 他
- ポスター発表
- $k_0$  法に基づく即発  $\gamma$  線分析および中性子放射化分析による底質標準物質の多元素定量  
(原研) 松江秀明 他
- 琵琶湖における湖水・堆積物間隙水および粒子状物質への微量元素の分配  
(愛知医大) 小島貞男 他
- 荷電粒子放射化分析によるシリコン半導体中の窒素分析の標準化  
(高エネ研) 榎本和義 他
- ファイバアンプ用ガラス中の炭素の光量子放射化分析 (NTTPH 研) 鹿野弘二 他
- 南極昭和基地付近で捕獲したウェッセルアザラシにおける有機体ハロゲン(EOX)の機器  
中性子放射化分析 (愛媛大農) 河野公栄 他
- 生体への酸化的ストレス負荷による臓器中元素含量の変化 (昭和薬大) 遠藤和豊 他
- 環境条件の違いによる大気浮遊じんの元素組成変動 (原研) 宮本ユタカ 他
- 放射化分析解析プログラム Interactive NAA Windows の開発  
(東大原総セ) 伊藤泰男 他
- 脳内亜鉛の局所分布測定の検討 (金沢大院自然) 太郎田融 他
- リョウブ中の重金属分布 (北大 RI セ) 笠原茂 他
- 木材中の元素分布 (東大院農生科) 中西友子 他

- . -

## 2002年度日本地球化学会第49回年会

産業技術総合研究所 上岡 晃

2002年9月26日～9月28日の3日間、鹿児島大学郡元キャンパスにて、日本地球化学会年會が開催されました。講演数は、口頭発表155件、ポスター発表96件、招待講演および学会賞等の受賞講演6件の合計257件で、このうち、放射化分析に関わるものは8件ありました。少量の試料を用いた非破壊・多元素同時定量が可能である放射化分析

- 軽度の亜鉛欠乏が生体内の微量元素濃度に及ぼす影響 (静岡大理) 小木貴憲 他
- 亜鉛欠乏マウス肝細胞の各画分における微量金属の分布 (静岡大理) 大山拓也 他
- 放射化学的中性子放射化分析による隕石・岩石中の微量 Mo と W の定量  
(都立大院理) 本橋健晴 他
- ICP-MS による岩石, 隕石試料中の微量トリウム及びウラン定量方法の検討:RNAA との比較  
(都立大院理) 柴剣宇 他
- 多重ガンマ線分析法による高感度多元素同時定量の応用 (原研) 初川雄一 他
- ポスター発表
- $k_0$  法に基づく即発  $\gamma$  線分析および中性子放射化分析による底質標準物質の多元素定量  
(原研) 松江秀明 他
- 琵琶湖における湖水・堆積物間隙水および粒子状物質への微量元素の分配  
(愛知医大) 小島貞男 他
- 荷電粒子放射化分析によるシリコン半導体中の窒素分析の標準化  
(高エネ研) 榎本和義 他
- ファイバアンプ用ガラス中の炭素の光量子放射化分析 (NTTPH 研) 鹿野弘二 他
- 南極昭和基地付近で捕獲したウェッセルアザラシにおける有機体ハロゲン(EOX)の機器  
中性子放射化分析 (愛媛大農) 河野公栄 他
- 生体への酸化的ストレス負荷による臓器中元素含量の変化 (昭和薬大) 遠藤和豊 他
- 環境条件の違いによる大気浮遊じんの元素組成変動 (原研) 宮本ユタカ 他
- 放射化分析解析プログラム Interactive NAA Windows の開発  
(東大原総セ) 伊藤泰男 他
- 脳内亜鉛の局所分布測定を検討 (金沢大院自然) 太郎田融 他
- リョウブ中の重金属分布 (北大 RI セ) 笠原茂 他
- 木材中の元素分布 (東大院農生科) 中西友子 他

- . -

## 2002年度日本地球化学会第49回年会

産業技術総合研究所 上岡 晃

2002年9月26日～9月28日の3日間、鹿児島大学郡元キャンパスにて、日本地球化学会年會が開催されました。講演数は、口頭発表155件、ポスター発表96件、招待講演および学会賞等の受賞講演6件の合計257件で、このうち、放射化分析に関わるものは8件ありました。少量の試料を用いた非破壊・多元素同時定量が可能である放射化分析

法は、地球・宇宙化学においても非常に有用な分析手段です。中性子放射化分析で精度良く測定でき地球化学的に重要な希土類元素や白金族元素等に着目した研究や、即発ガンマ線分析、光量子放射化分析などを用いて多様な元素を分析した研究などが発表されました。以下、それらの講演の概要を報告いたします。

○本多照幸、柳下 智（武蔵工大・原研）、五十嵐康人、青山道夫、廣瀬勝己（気象研）  
「2002年長崎及びつくばにおける降下物のランタノイド元素パターン—黄砂との関係を中心に」

長崎及びつくばで2000年1月—12月に採取された降下物試料等を、原研 JRR-4（Sパイプ、気送管）で照射、中性子放射化分析によって微量元素を定量した結果が報告された。陸源物質の指標である Sc や希土類元素の分析値から、長崎では2月—5月に大陸起源物質が多量に降下したことが示された。また、3月—5月の降下物の希土類元素パターンは黄砂と類似し、この時期に黄砂の影響が強いことが明らかにされた。一方つくばでは、2月—4月に黄砂の影響が認められるが、その大きさは長崎に比べると小さいことが報告された。

○木川田喜一、三國智史、村田有美、大井隆夫（上智大・理工）  
「アルカリ金属—希土類元素—硫酸複塩の生成に伴う希土類元素相互分配現象と明礬石の希土類元素パターンとの相関性」

明礬石 ( $\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ) は、硫黄環境下などで生成する二次鉱物である。明礬石に含まれる希土類元素の相互分別のメカニズムを、アルカリ金属—希土類元素—硫酸複塩の合成実験および、希土類元素を添加したアルカリ金属—アルミニウム—硫酸系による明礬石の合成実験を通して検討した結果が報告された。合成された複塩および明礬石への希土類元素分配比は、軽希土で高く重希土でほぼ一定となるパターンを示した。これは天然の明礬石と同様な特徴であり、天然での明礬石の生成にアルカリ金属—希土類元素—硫酸複塩の生成が関与している可能性が述べられた。

○織田周平、田中 剛（名大院・地球環境）  
「岩石中の酸化鉱物に含まれる親石元素」

I-type 花崗岩、磁鉄鉱系列花崗岩、はんれい岩から分離された磁鉄鉱、赤鉄鉱、チタン鉄鉱、クロム鉄鉱などの酸化鉱物に含まれる親石元素の分配が報告された。非常に少量の試料の多元素同時分析を行うため、中性子放射化法が用いられた。酸化鉱物と全岩

との濃度比は、重希土ほど高くなる傾向があること、花崗岩中の酸化鉍物には負の Eu 異常があること、I-type 花崗岩の酸化鉍物にフッ酸・硝酸処理を行ったものも重希土が相対的に高い傾向を示すことなどが示された。

○佐野貴司（富士常葉大・環境防災）、福岡孝昭（立正大・地球）、長谷中利昭（熊本大・理）

「即発ガンマ線分析による火山岩中塩素の定量」

マグマ中の塩素濃度を推定するためには、火山噴火に伴う塩素の脱ガスの程度を明らかにする必要がある。この目的のために即発ガンマ線分析による火山岩中の塩素の定量法が確立され、報告された。照射及び測定には、原研 JRR-3M の冷中性子ガイドビームポートに設置された即発ガンマ線分析装置が用いられた。定量には 786keV+788keV 及び 1951keV の塩素ピークが用いられ、検量線は主成分元素組成によらず一定であることが示された。本手法による産総研火成岩標準試料 JB-1、JB-2、JB-3、JA-1、JA-2、JA-3 の分析結果が報告された。

大浦泰嗣、○唐牛讓、海老原充（都立大院・理）

「最近発行された G S J 岩石標準試料の放射化分析」

1996 年以降に発行された産総研岩石標準試料のうち海底質、土壌、鉍石など 8 種類につき、3 種類の放射化分析による定量結果が報告された。用いられた手法は、即発ガンマ線分析 (PGA)、機器中性子放射化分析 (INAA)、機器光量子放射化分析 (IPAA) である。照射には、PGA では原研 JRR-3M が、INAA では原研 JRR-4 (T パイプ) が、IPAA では東北大学原子核理学研究施設の電子線加速器がそれぞれ用いられた。

○田中 剛（名大院・地球環境）、仙田量子（名大院・地球惑星）、柴田信之介、南 雅代（名大院・地球環境）、谷水雅治（東工大院・地球惑星）

「同位体希釈中性子放射化分析による岩石中の白金族元素とレニウムの高確度定量への試み」

地球化学的に有用な元素であるにもかかわらず、存在度の低さなどで分析の困難な Ru、Os、Ir、Re について、同位体希釈中性子放射化法を適用した分析手法が報告された。同位体希釈法の利点は、化学操作における目的元素の回収率を求める必要がないことである。分析手順は、岩石粉末試料へのスパイク添加、NiS ファイアーアッセイによる濃縮、中性子放射化分析からなる。中性子照射には原研 JRR-4 (S パイプ) および JRR-3 (HR 孔)

が用いられた。様々なスパイク添加比率で行ったカンラン岩と玄武岩試料の分析結果は、ばらつき5%程度に収まることが示された。

○脊戸柳武彦（都立大院・理）、山口 亮（国立極地研）、海老原充（都立大院・理）  
「Fe-Ni 合金を含むユークライト Dhofar007 の化学組成」

角礫化したユークライトである Dhofar007 隕石の化学的特徴づけ及び金属相の起源の考察を目的として、即発ガンマ線分析法および機器中性子放射化分析法による 24 元素の分析結果が報告された。主成分元素及び希土類元素組成は集積岩型ユークライトと良く一致するが、親鉄元素含有量は角礫化していないユークライトより 1-3 桁高いことが示された。この結果から、Dhofar007 は集積岩型ユークライトの化学組成を持ち、その金属相は IIIAB 鉄隕石またはメソシデライトの金属相起源の可能性があると報告された。

○白井直樹、大浦泰嗣、天川裕史、海老原充（都立大院・理）  
「SNC 隕石 Y000593 の化学組成の特徴」

火星起源とされる SNC 隕石のうち、ナクライトの化学組成からその形成史を解明することを目的とし、5つの SNC 隕石についての即発ガンマ線分析、機器中性子放射化分析、機器光量子放射化分析による約 40 元素の定量結果が報告された。ナクライトである Y000593 および Nakhla の主要元素濃度及び希土類元素パターンは、これまでに報告されているナクライトのデータと一致することが確かめられた。また、ナクライトの Ca/Ti 比は、普通輝石が多いことを反映して、シャーゴッタイトより高いことが示された。

- . -

## 第 144 回日本鉄鋼協会秋季大会

武蔵工業大学 岡田往子

2002 年 11 月 2 日（土）から 4 日（月）に大阪大学吹田キャンパスで第 144 回日本鉄鋼協会秋季大会が開催され、評価・分析・解析部会に出席した。今回のテーマは鋼中の微量トランプ元素分析法である。鉄鋼のリサイクル利用拡大に伴う鋼中の不純物元素として特に注目されている元素はトランプ元素といわれる Bi, Pb, Zn, Sn, Sb, As などである。それらの元素分析法の確立が課題となっている。本大会では 8 件の関連発表が行われ、中性子放射化分析は武蔵工大工学部 岡田往子、平井昭司の発表であった。高純度鉄標準

が用いられた。様々なスパイク添加比率で行ったカンラン岩と玄武岩試料の分析結果は、ばらつき 5 %程度に収まることが示された。

○脊戸柳武彦（都立大院・理）、山口 亮（国立極地研）、海老原充（都立大院・理）  
「Fe-Ni 合金を含むユークライト Dhofar007 の化学組成」

角礫化したユークライトである Dhofar007 隕石の化学的特徴づけ及び金属相の起源の考察を目的として、即発ガンマ線分析法および機器中性子放射化分析法による 24 元素の分析結果が報告された。主成分元素及び希土類元素組成は集積岩型ユークライトと良く一致するが、親鉄元素含有量は角礫化してないユークライトより 1 - 3 桁高いことが示された。この結果から、Dhofar007 は集積岩型ユークライトの化学組成を持ち、その金属相は IIIAB 鉄隕石またはメソシデライトの金属相起源の可能性があると報告された。

○白井直樹、大浦泰嗣、天川裕史、海老原充（都立大院・理）  
「SNC 隕石 Y000593 の化学組成の特徴」

火星起源とされる SNC 隕石のうち、ナクライトの化学組成からその形成史を解明することを目的とし、5 つの SNC 隕石についての即発ガンマ線分析、機器中性子放射化分析、機器光量子放射化分析による約 40 元素の定量結果が報告された。ナクライトである Y000593 および Nakhla の主要元素濃度及び希土類元素パターンは、これまでに報告されているナクライトのデータと一致することが確かめられた。また、ナクライトの Ca/Ti 比は、普通輝石が多いことを反映して、シャーゴッタイトより高いことが示された。

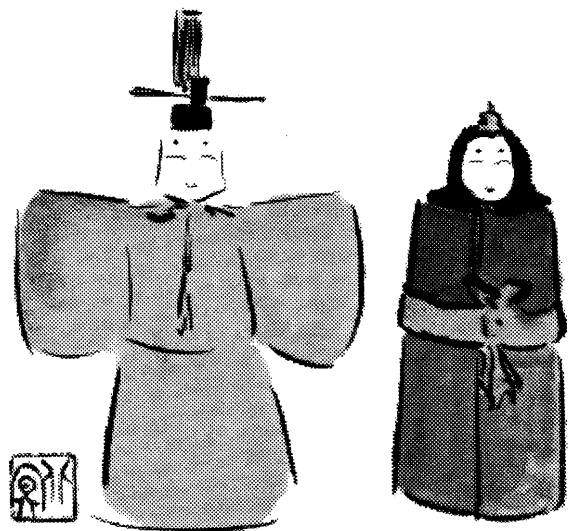
- . -

## 第 144 回日本鉄鋼協会秋季大会

武蔵工業大学 岡田往子

2002 年 11 月 2 日（土）から 4 日（月）に大阪大学吹田キャンパスで第 144 回日本鉄鋼協会秋季大会が開催され、評価・分析・解析部会に出席した。今回のテーマは鋼中の微量トランプ元素分析法である。鉄鋼のリサイクル利用拡大に伴う鋼中の不純物元素として特に注目されている元素はトランプ元素といわれる Bi, Pb, Zn, Sn, Sb, As などである。それらの元素分析法の確立が課題となっている。本大会では 8 件の関連発表が行われ、中性子放射化分析は武蔵工大工学部 岡田往子、平井昭司の発表であった。高純度鉄標準

物質を用いて Bi, Pb 以外の 4 元素の分析を行ったが、マトリックスの鉄の影響で定量下限値は数 ppm～数 10 ppm であったこと。化学分離 (RNAA) で鉄の除去が必要であることが発表された。

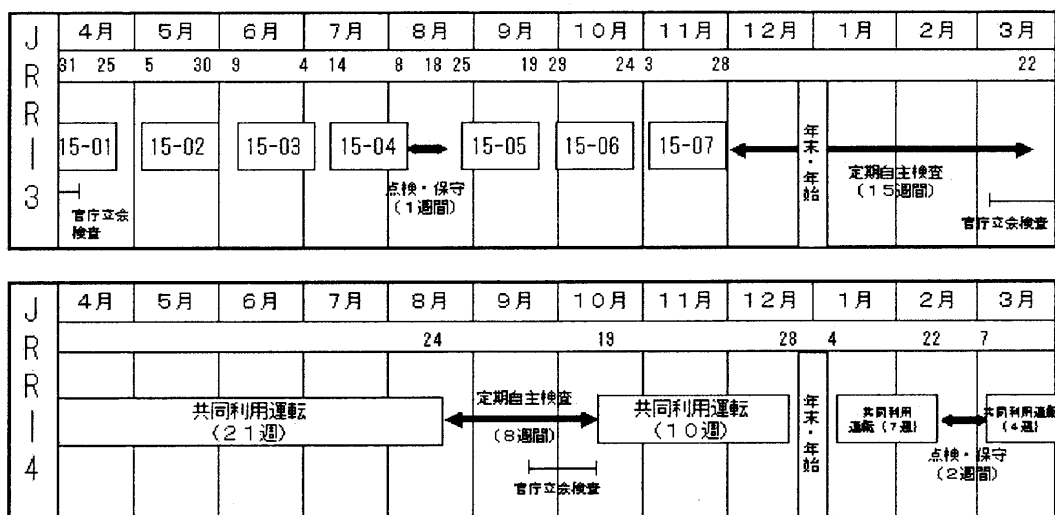


# 施設便り

## 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 大学開放研究室)

1. 平成14年度の原研東海研研究用原子炉 JRR-3 は平成14年11月29日をもって合計7サイクルの共同利用運転を無事に終了致しました。現在は平成15年度の運転再開へ向けて施設定期自主検査を行っております。また、JRR-4 は3月末までの計画で順調に共同利用運転を行っております。なお、同研究所研究炉部では先ほど平成15年度研究炉運転管理計画(案)を発表致しました。それによりますと JRR-3 は平成14年3月31日から運転を開始し、共同利用運転を平成15年11月28日までの間で35週間、それ以後から年度末までの間で施設定期自主検査を15週間行う予定です。同じく、JRR-4 も年度始めより42週間の共同利用運転を予定しており、施設定期自主検査を8月24日から10月19日の間の7週間を行う予定です。以下にその計画案を示します。どうぞ、今後の実験計画にお役立て下さい。

### 平成15年度 研究炉運転・管理計画 (案)



2. 平成15年度の共同利用に供する照射設備の特性一覧を以下に示します。また、JRR-4 ではこの他にも様々な照射設備が利用可能です。例えば、中性子ビーム設備 (NBF : Neutron beam facility) があります。これは医療照射用に用いられていますが専用のホルダーを用いることにより大型試料 (Max17cm×17cm) の照射が可能となります。ここでは3つのモードでの照射が可能であり最大熱中性子束は  $6.5 \times 10^{12} \text{n/m}^2 \cdot \text{sec}$ 、カドミ比は約 13.5 となります。また、NBF ではそれとは別に簡易均一照射設備

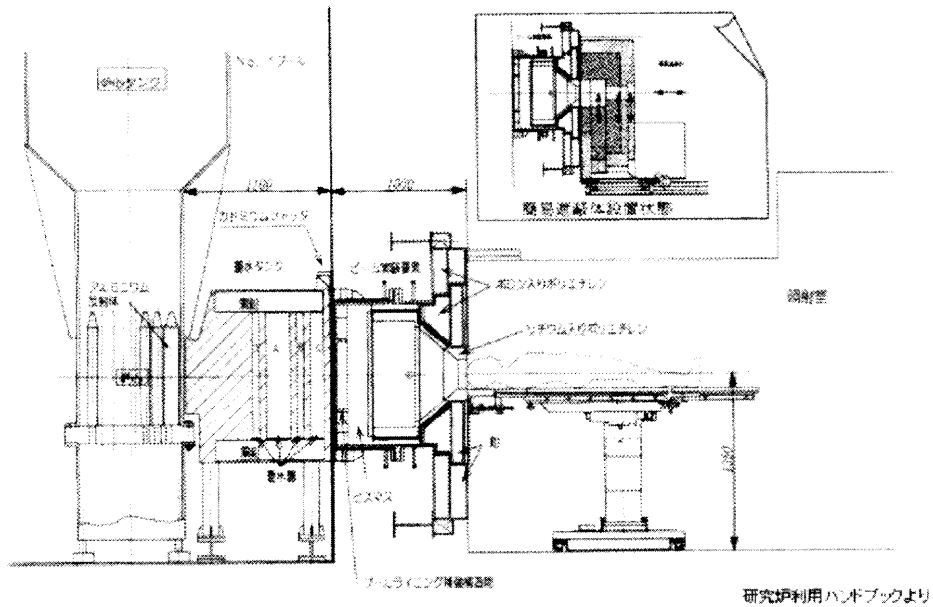


が付帯設備として利用可能です。これは照射筒内に空気を送風することによりキャプセルを回転させることが出来るため均一な中性子照射が可能です。その他に JRR-4 にはプール設備簡易照射筒 (PSF:Pool side facility) があります。この PSF の照射方法はプールにかかるブリッジからの紐吊り式となりますが最大  $2.4 \times 10^{12} \text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$  の熱中性子束で、カドミ比が約 20 での照射が可能です。また、JRR-4 には即発ガンマ線分析装置が設置されており、比較的高感度の B などの定量が可能です。ちなみにこれらの照射設備をご利用の際は事前に開放研常駐職員との打ち合わせを行うようお願い致します。

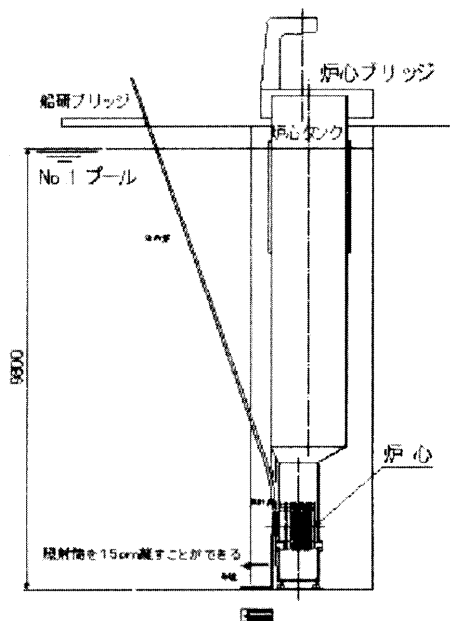
### 照射特性一覧

	照射設備	照射時間	熱中性子束 ( $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ )	速中性子束 ( $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ )	Cd比	適する半 減期	最大収 納個数
JRR-3	HR-1	10m~ 1cycle	$9.6 \times 10^{13}$	$1.7 \times 10^{12}$	8	ML	3
	HR-2		$9.8 \times 10^{13}$	$1.4 \times 10^{12}$			3
	PN-1	1m~20m	$5.2 \times 10^{13}$	$1.2 \times 10^{11}$	23	M	2
	PN-2		$4.7 \times 10^{13}$	$1.1 \times 10^{11}$			2
	PN-3	5s~20m	$1.5 \times 10^{13}$	$4.4 \times 10^9$	290	S,M	1
JRR-4	T-pipe-A	10s~6h	$5.3 \times 10^{13}$	$1.3 \times 10^{13}$	3.8	ML	1
	T-pipe-B		$4.3 \times 10^{13}$	$5.6 \times 10^{12}$	4.6		1
	Pn	6s~20m	$3.2 \times 10^{13}$	$7.8 \times 10^{12}$	3.6	S,M	1
	S-pipe	10s~6h	$4.0 \times 10^{13}$	$5.9 \times 10^{12}$	4.5	ML	S(12) L(6)
	D-pipe		$4.3 \times 10^{13}$	$5.2 \times 10^{12}$	4.8	ML	S(12) L(6)

## JRR-4中性子ビーム設備

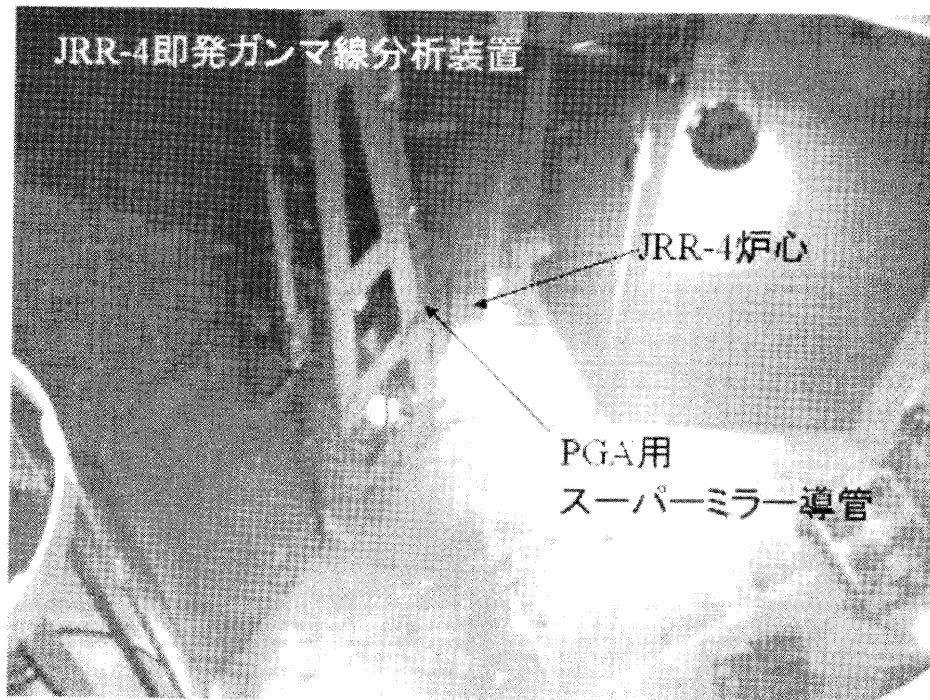
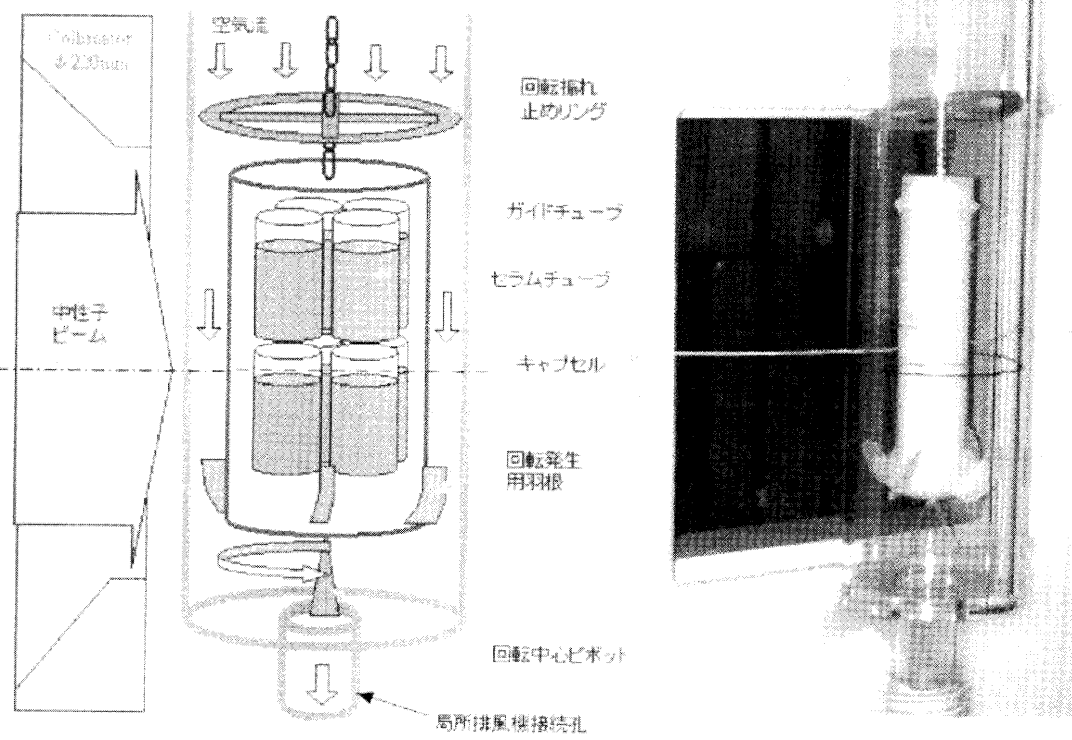


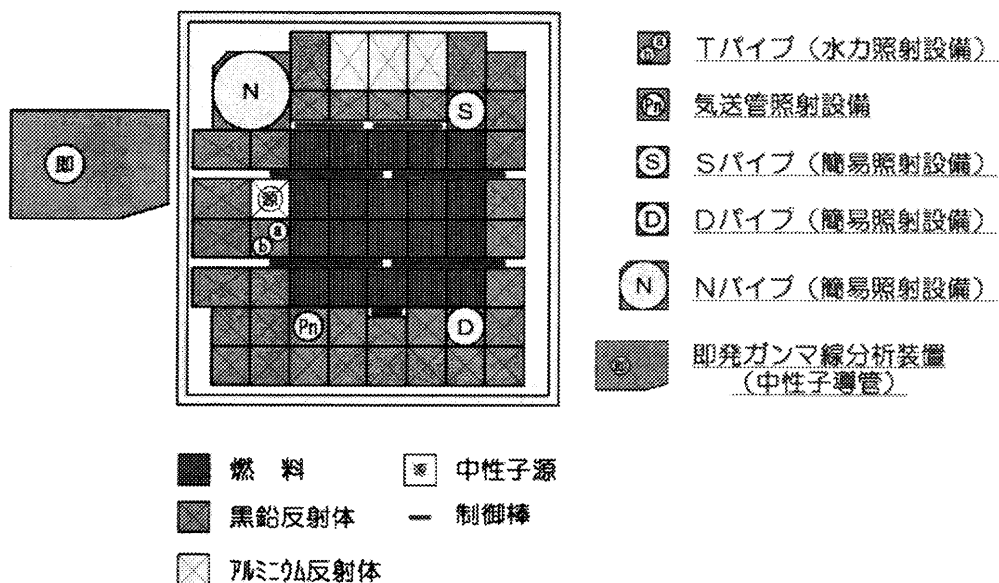
## JRR-4プール設備簡易照射筒の装置



- 照射筒は内径60mm、長さ約10mの純アルミ製パイプである。照射筒の照射位置は炉心タンク近傍の位置を定位置として、定位置から15cm離すこともできる。

簡易均一照射設備概略図





(澤幡浩之)

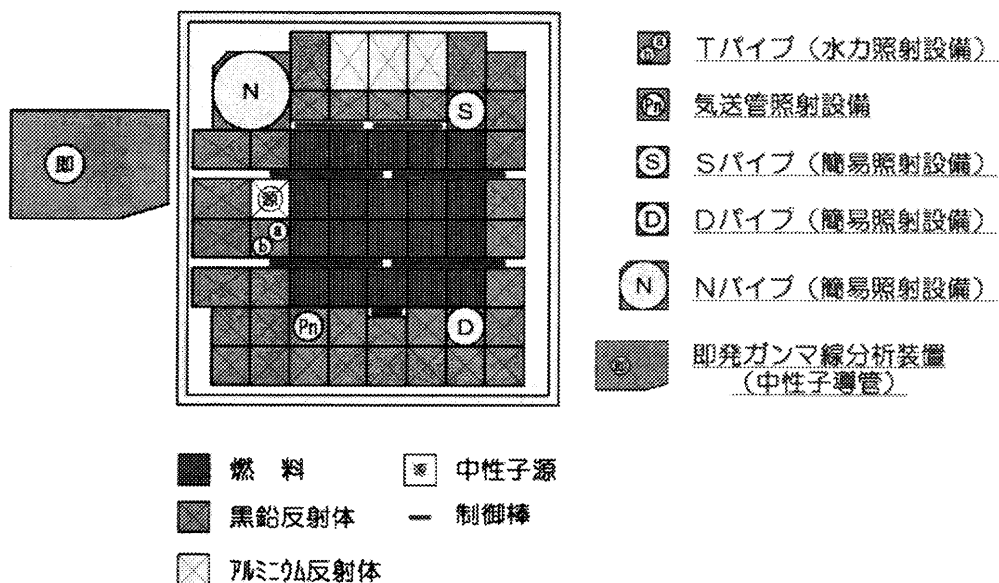
### 東北大学原子核理学研究施設

平成14年度後期の採択課題は以下の通りです。

2470	関根勉	東北大院理	長寿命放射性核種の環境中移行における基礎化学反応の研究
2471	藤川辰一郎	東北大院工	銅における拡散
2472	海老原充	都立大院理	宇宙・地球化学的試料の光量子放射化分析
2473	鹿野弘二	NTT	ファイバアンプ用ガラス中の炭素の光量子放射化分析
2474	大槻勤	東北大核理研	標識化による金属内包フラーレン及びヘテロフラーレンの研究及びその応用
2475	中西孝	金沢大	$^{230}\text{Th}(\gamma, n)$ 反応で生成する $^{229\text{m}, \text{g}}\text{Th}$ の反跳捕集と $^{146}\text{Sm}$ の製造
2476	結城秀行	東北大核理研	電子ビームによるフリーラジカル生成の研究
2477	三頭聰明	東北大金研	$^{229\text{m}}\text{Th}$ の製造とその崩壊特性
2478	榊本和義	KEK	金属及び半導体材料中の軽元素の定量のための分離、捕集法の開発
2479	秋葉憲一	東北大素材研	アルギネートマイクロカプセルによる放射性核種の一括除去
2480	吉田敦	理研	磁性流体の耐放射線強度のテスト

(大槻 勤)

### 京都大学原子炉実験所



(澤幡浩之)

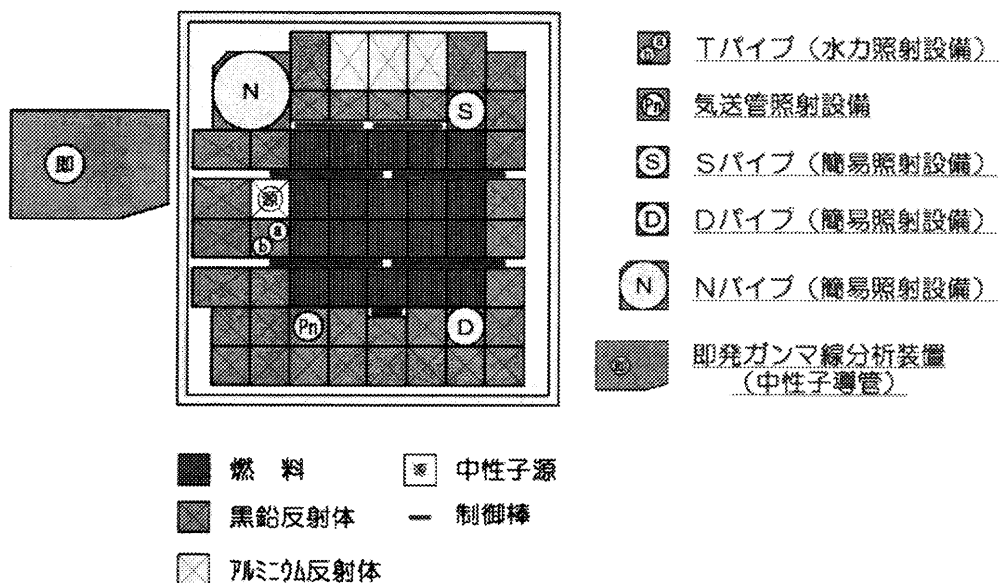
### 東北大学原子核理学研究施設

平成14年度後期の採択課題は以下の通りです。

2470	関根勉	東北大院理	長寿命放射性核種の環境中移行における基礎化学反応の研究
2471	藤川辰一郎	東北大院工	銅における拡散
2472	海老原充	都立大院理	宇宙・地球化学的試料の光量子放射化分析
2473	鹿野弘二	NTT	ファイバアンプ用ガラス中の炭素の光量子放射化分析
2474	大槻勤	東北大核理研	標識化による金属内包フラーレン及びヘテロフラーレンの研究及びその応用
2475	中西孝	金沢大	$^{230}\text{Th}(\gamma, n)$ 反応で生成する $^{229\text{m}, \text{g}}\text{Th}$ の反跳捕集と $^{146}\text{Sm}$ の製造
2476	結城秀行	東北大核理研	電子ビームによるフリーラジカル生成の研究
2477	三頭聰明	東北大金研	$^{229\text{m}}\text{Th}$ の製造とその崩壊特性
2478	榊本和義	KEK	金属及び半導体材料中の軽元素の定量のための分離、捕集法の開発
2479	秋葉憲一	東北大素材研	アルギネートマイクロカプセルによる放射性核種の一括除去
2480	吉田敦	理研	磁性流体の耐放射線強度のテスト

(大槻 勤)

### 京都大学原子炉実験所



(澤幡浩之)

### 東北大学原子核理学研究施設

平成14年度後期の採択課題は以下の通りです。

2470	関根勉	東北大院理	長寿命放射性核種の環境中移行における基礎化学反応の研究
2471	藤川辰一郎	東北大院工	銅における拡散
2472	海老原充	都立大院理	宇宙・地球化学的試料の光量子放射化分析
2473	鹿野弘二	NTT	ファイバアンプ用ガラス中の炭素の光量子放射化分析
2474	大槻勤	東北大核理研	標識化による金属内包フラーレン及びヘテロフラーレンの研究及びその応用
2475	中西孝	金沢大	$^{230}\text{Th}(\gamma, n)$ 反応で生成する $^{229\text{m}, \text{g}}\text{Th}$ の反跳捕集と $^{146}\text{Sm}$ の製造
2476	結城秀行	東北大核理研	電子ビームによるフリーラジカル生成の研究
2477	三頭聰明	東北大金研	$^{229\text{m}}\text{Th}$ の製造とその崩壊特性
2478	榊本和義	KEK	金属及び半導体材料中の軽元素の定量のための分離、捕集法の開発
2479	秋葉憲一	東北大素材研	アルギネートマイクロカプセルによる放射性核種の一括除去
2480	吉田敦	理研	磁性流体の耐放射線強度のテスト

(大槻 勤)

### 京都大学原子炉実験所

京都大学原子炉実験所は KUR（研究用原子炉）の高濃縮燃料での運転が 2006 年春で停止が決定しています。しかし、その以後の低濃縮燃料での運転は未定で再開するか、停止いわゆる廃炉するのかの結論がでていません。一方、平成 15 年度からの大学法人化に向けての準備が進む中、核エネルギー利用と放射線・粒子線利用に関する特徴的な研究を発展させるために、実験所の次期計画として加速器駆動未臨界炉概念に基づく線源の開発、新たな基礎基盤研究を推進することになっています。そういう状況で KUR の運転は未定であり、次期計画中は中性子線源の見通しはないので、小規模中性子源として電子 LINAC の使用が考えられています。このために、LINAC 本体のてこ入れを行うと共に、ターゲット室（照射機構）の改良、LINAC-Pn の設置を行う計画があります。そこで、放射化分析のユーザーの方で今後の研究と設備利用の展望・計画について意見があればどしどし申し出てください。

### 共同利用研究の採択

平成 15 年度の共同利用研究の採択が決定しました。通常利用の採択は 85 件あり、その内、放射化分析関連は 24 件でありました。以下にその研究課題を示します。KUR の高濃縮燃料での運転も後 2 年ですので、皆様方の積極的な利用をお待ちしています。

### 平成 15 年度共同利用研究(放射化分析関係)採択一覧表

3	岩本 多實 (福井工大)	閉鎖性山岳池における微量元素の堆積粒子-水間の分配挙動に関する
7	佐野 栄 (愛媛大・教育)	西南日本に分布する火成および堆積物の地球化学
8	片山 幸士 (人間環境大)	成育環境指標植物としての樹木の有効性
9	森澤 眞輔 (京大院・工)	環境中における重金属類の動態把握とリスクの低減策に関する
18	溝畑 朗 (大阪府大・先端研)	大気エアロゾル粒子のキャラクタリゼーション
21	小林 貴之 (日大・文理)	宇宙物質の放射化分析
23	小山 元子 (都立産業技術)	放射化イメージング法による微量元素の二次元分布状態に関する研究
24	石渡 明 (金沢大院・自然)	マントル起源岩石の中性子放射化分析
27	矢永 誠人 (静岡大・理)	亜鉛欠乏マウス臓器中の微量元素の分析
30	増澤 敏行 (名大院・環境)	海洋の生物生産・沈降・堆積にともなう親生物微量元素動態の研究
35	武蔵野 實 (京都教育大)	第四紀堆積物の化学組成 と環境変動
36	橋本 哲夫 (新潟大・理)	石英や長石等の $\gamma$ 線照射に伴うルミネッセンスとラ

- 37 星野 敦 (岡崎共同研究機構) ジカルの挙動  
アサガオ花の成長・開花にともなう各器官の元量変化
- 38 水田 敏夫 (秋田大・工学資) 鉱床および関連火成岩の地球化学的研究
- 39 天野 良平 (金沢大・医) 動物およびヒトにおける計測応用と脳内微量元素の放射化分析 (VI)
- 50 平良 初男 (琉球大・理) 沖縄トラフ海底堆積物及びサンゴ試料の微量元素含有量
- 51 若山 育郎 (関西鍼灸短大) 紀伊半島における神経変性疾患の環境要因分析と東洋医学的治療薬開発のための基礎的研究
- 56 関 達也 (岡山理大・総合情報) 放射化分析による陸源堆積物の研究
- 67 加藤 洋 (都立保健科学大) 生物体試料中の各種元素の放射化分析
- 70 大森 佐與子 (大妻女子大・社会情報) 毛髪含有元素濃度の基礎的・応用的研究 -摂取ミネラルと毛髪ミネラルの関係-
- 73 堀内 将人 (大同工大・工) 大気-水-土壌-植物系を通じた微量重金属の動態把握とリスク評価に関する研究
- 75 桜井 弘 (京都薬科大) 微量金属元素を含有した医薬品を投与した動物組織中の生体微量元素の定量分析
- 77 小島 貞男 (愛知医科大) 放射化分析による環境中の微量元素の分布と挙動
- 79 片山 洋子 (福岡女子大院・人間) ラット臓器のヒ素形態へ及ぼすヒジキ各画分の影響についての研究
- P1-8 尾崎 誠 (元興寺文化財研) 古文化財の放射化分析ならびに透視画像の解析Ⅱ
- P4-3 増渕 伸一 (東京医科大) 特異な形状を持つ物質中に形成されたクラスター集合体の構造と電子状態
- P4-4 松山 奉史 (京大・原子炉) 有機・無機ハイブリッドポリマーの光・電気物性と機能探索

(高田実弥)



# 将来計画

## 大強度陽子加速器計画（その後）

東京都立大学大学院理学研究科  
海老原充

「放射化分析」No. 13で「大強度陽子加速器プロジェクトの現況とそれへの対応について」と題して、KEKと原研が共同で推進している表記プロジェクトの紹介をし、放射化分析ユーザーとしても積極的に関わりを持つよう訴えました。加速器による中性子発生装置は中性子源としてみた場合、原子炉の代替となるようなものではないものの、中性子源として利用できることは間違いありません。また、パルス状に供給される中性子の特性を生かして、新しい分析への応用も考えられます。このような状況から、中性子分析グループばかりでなく、核・放射化学研究グループとも共同歩調をとり、この計画に対処するという方針で望むことになりました。本稿ではその後の進捗状況について紹介します。

昨年2月21日に配信した電子メールや「放射化分析」No. 14の拡大幹事会議事メモ6.2 (p. 65)でお知らせしたように、放射化分析研究会と放射化学会の合同ワーキンググループ（大同工大・酒井、国際基督教大・久保、都立大・大浦、都立大・海老原（代表））が結成され、原研側の代表（物質科学研究部 原子核科学研究グループ 大島真澄氏）と連携しながらビーム利用提案書をまとめることになっていました。当初、昨年4月とされていた提案書の締切が大幅に遅れましたが、昨年9月に正式な装置の募集要項（別掲資料1参照）が発表され、それに添って昨年12月に提案書が提出されました。

提案に際して、放射化分析グループと核・放射化学グループで独自案をまとめるという当初の予定を大幅に修正し、宇宙核物理および核データ測定テーマとのいわば「抱き合わせ案」を提案書（別掲資料2参照）として提出することにしました。具体的には以下の3テーマを統合した計画案が提出されました；

(ア) 速中性子反応と宇宙核物理-代表：永井泰樹（大阪大）

(イ) マイナーアクチニド及び長寿命核分裂生成物の中性子核データ-代表：井頭政之（東工大）

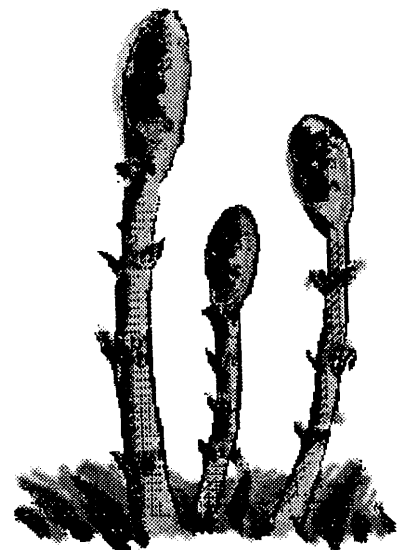
(ウ) 全元素同時・非破壊・高感度核種定量-代表：海老原充（都立大）

なお、全体の代表は東工大の井頭氏がつとめることになりました。

独自案をやめ、このような3テーマ統合の計画案を提出したのは、計画全体の予算が縮小されたことから、ビームラインの割り当てが得られても遮蔽を含めた実験装置を自前で調達することが求められ、現実問題として実現がかなり難しいと判断されたためです。こ

の「抱き合わせ案」によってもパルス中性子と検出器のスペックともに、従来考えていた独自案のものと基本的には合います。実現した場合、他のグループとビームタイムをシェアする必要がありますが、計画自体は遥かに実現しやすくなるものと予想されます。

今後提出された提案書について、大強度陽子加速器計画プロジェクトディレクターのもとに置かれた実験装置計画検討委員会が検討を行い、2つの選考過程を経て、最終候補が決まります。今後の進展に関しては随時メールや本誌でお知らせいたします。



(資料1)

平成14年9月13日

### 中性子実験装置設置の提案公募について

日本原子力研究所 (JAERI) と高エネルギー加速器研究機構 (KEK) は、平成18年度までに、大強度陽子加速器施設、世界最高性能を有するパルス中性子研究施設、ミュオン研究施設及び原子核素粒子研究施設を実現させることを目指して、その建設を進めています。また、将来には、ニュートリノ研究施設及び核変換技術開発施設の建設を予定しています。これらの研究施設群は、物質科学、生命科学、原子核素粒子科学、原子力技術開発研究等の広範な研究分野に飛躍的發展をもたらすことを目的としています。

特に、ここで実現されるパルス中性子研究施設のパルス中性子強度は、現在世界最高の英国ラザフォード研究所 ISIS 中性子施設のそれを凌駕し、米国で建設中の SNS 計画における世界最高のパルス中性子源と並ぶものです。この中性子源施設の実現は、物質科学や生命科学分野の基礎研究を飛躍的に向上させるとともに、得られる研究成果は機能材料や薬品等、生活に密着した製品開発に直結するものであり、新しい産業の創成に貢献すると期待されています。また、製品検査等の産業応用の試みや、さらに、基礎物理学や学際領域への利用も期待されています。

このような幅広い分野での期待を踏まえ、パルス中性子研究施設では、パルス中性子を利用した優秀な実験装置提案を、広く、国内外の研究者、大学等の研究機関及び企業から公募することにより、斬新でユニークな実験装置群を整備していきたいと考えております。これらの装置群から、21世紀の科学・技術の振興に寄与する研究成果を着実に産み出し、中性子を利用した科学研究や産業応用の両面で、我が国の国際的イニシアチブを確立していきたいと考えています。

実験装置提案は、添付のような実験装置募集要領で募ることと致しましたので御案内申し上げます。

大強度陽子加速器計画プロジェクトディレクター  
永宮 正治

## 実験装置提案募集要領

### I. 公募と審査

#### 1. 実験装置提案の公募

毎年1回行います。

#### 2. 平成14年度の公募締切り

平成14年12月6日（金曜日） 必着

#### 3. 実験装置提案書の作成

添付資料1「中性子実験装置提案様式」に従って「実験装置提案書」を作成して下さい。提案書はA4版10ページ以内とします。

e-mail: shoji.nagamiya@kek.jp

#### 4. 審査のプロセス（添付資料2「実験装置提案審査の流れ」参照）

プロジェクトディレクターの設置する実験装置計画検討委員会で、「実験装置提案書」について下記審査の基準に則り、審査を行い、必要な場合には、外部有識者の協力を得て審議を行います。審査の結果は、プロジェクトディレクターから提案者に通知されます。

さらに、審査の結果に応じて、獲得予定の予算の執行計画、建設計画、安全性評価、維持管理計画、利用計画等を記載した詳細な「実験装置設置詳細計画書」をプロジェクトディレクターに提出していただきます。様式は後日通知します。実験装置計画検討委員会は、プロジェクトチームの意見を参考にしながら、「実験装置設置詳細計画書」の検討を行い、必要な助言をプロジェクトディレクターに行います。また、結果はディレクターから提案者に通知されます。

#### 5. 審査の基準

審査にあたっての主な基準は以下のとおりとします。

- (1) 科学的意義
- (2) 社会的意義
- (3) 技術的妥当性
- (4) 大強度パルス中性子源の必要性
- (5) 提案グループ全体の装置建設および研究遂行能力

#### ○提案書の提出

電子メールまたは郵送により、下記のプロジェクトディレクター宛に提出して下さい。

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1, 高エネルギー加速器研究機構

大強度陽子加速器計画推進部 永宮 正治

Tel: 81-298-64-5678、Fax: 81-298-64-5258、E-mail: shoji.nagamiya@kek.jp

(電子メールの場合は CC で oyama@cens.tokai.jaeri.go.jp,

susumu.iked@kek.jp にもお願いします。)

○本件に関する問い合わせ先：

大強度陽子加速器プロジェクトチーム計画調整グループ中性子担当

大山幸夫（日本原子力研究所、大強度陽子加速器施設開発センター）

TEL:029-282-6809、FAX:029-282-5996、

E-mail: oyama@cens.tokai.jaeri.go.jp

または、

池田 進（高エネルギー加速器研究機構、物質構造科学研究所）

TEL: 0298-64-5601、FAX: 0298-64-3202

E-mail: [susumu.iked@kek.jp](mailto:susumu.iked@kek.jp)

## II. 実験装置設置の要件

- 実験装置とは、中性子源施設に設置する実験に必要な装置・器材 1 式とします（中性子ビームガイド、遮蔽体、分光器本体、試料周辺装置、データ収集装置等）。
- 実験装置提案者は、装置の建設予算獲得に努め、実験装置の建設を行ない、また、完成時に於いては、当該実験装置を用いた実験研究を推進し、実験装置の改良・維持・管理に責任を負うことのできるものを原則とします。また、実験装置は、大強度陽子加速器計画予算並びに原研、KEK、外部機関（民間及び外国を含む）の機関資金あるいは競争的資金等を用いて建設されるべきものですので、実験装置提案者は装置の建設予算獲得に努めて下さい。但し、特に優れていると認められる実験装置提案については、装置の予算・建設・維持等に関し別途考慮する場合があります。
- 実験装置設置には設置期間の期限（ $\alpha$  年）を設けます。なお、期限延長については、再審査を行なうこととします。
- 実験装置提案者は、実験装置の全マシンタイムの一定割合（ $\beta$  %）を専用時間として利用することができます。実験装置提案者は、実験装置の全マシンタイムから専用時間を差し引いた割合（ $(100-\beta)$  %）のマシンタイムを一般共同利用に供し、施設運営組織と共同して支援を行ないます。
- $\alpha$  及び  $\beta$  の値は、装置毎に、実験装置計画検討委員会で審議されます。

（注）ここに記載した要件は、大強度陽子加速器施設建設完成後の運営体制が確定されていない現時点では暫定的なものとし、プロジェクトディレクターは責任を持って、その趣

旨を将来の運営機関に尊重させるよう努めることとします。

### III. その他の留意事項

1. 実験装置の制御、安全管理系等の建設、製作および基本コンポーネントの規格は、プロジェクトチームの設置規格（別途指示）に準じていただきます。
2. 実験装置設置提案者は、建設に際しては、大強度陽子加速器プロジェクトチームと密接に情報の交換を行っていただきます。
3. 実験装置の設置に際しては、実験装置提案者は施設運営組織と別途取り決めを結んでいただくことになります。
4. ビーム利用料について有料または無料であるかは、現在、まだ確定しておりません。

#### 添付資料1 中性子実験装置提案様式

（下記にあげる項目について10ページ以内で記述すること）

1. 研究タイトル
2. 全体概要
3. 建設する中性子実験装置名称
4. 提案代表者又は連絡責任者
5. 提案するグループの構成とその役割分担
6. 研究内容の概要（研究計画、科学的意義、社会的意義、波及効果、革新性、独自性等を明記）
7. 建設する実験装置の概要（予想される性能、革新性、独自性、パルス中性子の必要性等を明記）
8. 建設する実験装置の主な仕様（概念図を添付すること、また、必要予算額、凡その寸法および重量、中性子源減速材の種類、高圧ガス等の許認可の必要の有無、施設建家外における工事の可能性の有無等を明記すること）
9. 実験装置建設年次計画（予定）及び研究年次計画（予定）
10. 建設予算及び研究予算に関する考え方
11. 装置設置期間（ $\alpha$ 年）と装置占有率（ $\beta$ ％）に対する希望
12. 参加する研究者のこれまでの研究活動（主要論文リスト等）
13. パルス中性子施設への要望

#### 添付資料2 実験装置提案の審査の流れ

「実験装置提案書」の提出	提案者 → プロジェクトディレクター	設置を希望する機関、大学等が所定の様式に従って作成し、プロジェクトディレクターに提出
↓		
「実験装置提案書」の審査	実験装置計画検討委員会	実験装置計画検討委員会において審議し、結果をプロジェクトディレクターに答申
↓		
結果の通知	プロジェクトディレクター → 提案者	要検討事項、要協議事項、要調整事項を含む
↓		
「実験装置設置詳細計画書」の提出	提案者 → プロジェクトディレクター	結果に応じて、詳細な「実験装置設置計画書」を所定の様式で作成し、プロジェクトディレクターに提出
↓		
「実験装置設置詳細計画書」の検討	実験装置計画検討委員会	実験装置計画検討委員会においてプロジェクトチームの意見を参考に検討し、結果をプロジェクトディレクターに答申
↓		
結果の通知（*）	プロジェクトディレクター → 提案者	要協議事項、要調整事項を含む。

（\*）具体的な設置に関する手続き及び取り決め等については別途定めるものとします。

(資料 2)

## 中性子実験装置提案書

### 1. 研究タイトル

宇宙核物理・加速器駆動型システム開発基礎・核種分析研究

### 2. 全体概要

本プロジェクト研究では、冷・熱領域～500keV の中性子ビーム輸送・コリメーションシステム、各種放射線検出器、及びデータ収集装置を開発・設置し、(ア) 速中性子反応と宇宙核物理、(イ) マイナーアクチニド及び長寿命核分裂生成物の中性子核データ、(ウ) 全元素同時・非破壊・高感度核種定量、の3つの研究テーマを遂行する。

(ア) 速中性子反応と宇宙核物理：ビッグバン直後の初期宇宙では Li までの軽元素が、又その後の宇宙進化で形成された恒星の内部ではより重い各種元素が合成されてきた。「これら元素の種類・存在量」は「恒星の世代に特徴的」であり、宇宙の進化の歴史を紐解く上で「史跡」として重要な鍵を握っている。このためこれら「元素の起源と恒星の進化」について妥当なモデルを構築する事がビッグバン宇宙の歴史を解明する上で重要である。重元素は恒星内で slow(s)過程及び rapid(r)過程で合成される。本研究テーマでは、s 過程元素合成に関連して、(1)低金属度恒星内元素合成の問題、(2)同位体異常の問題、(3)中性子密度の問題、(4)中性子源の問題、又 r 過程元素合成に関連して、(5) r 過程元素合成の問題、(6)宇宙年齢の問題、(7)r 過程元素合成と核分裂断面積、の中性子核反応を用いて研究されるべき重要な問題を解明する。

(イ) マイナーアクチニド及び長寿命核分裂生成物の中性子核データ：核分裂炉内で生成される長寿命核分裂生成物 (LLFP) 及びマイナーアクチニド (MA) を核変換・短寿命化することは、遠い子孫に負の遺産“放射性廃棄物”を残さないために重要である。この核変換基礎研究及び加速器駆動型システム (ADS) の核変換性能評価のためには、LLFP 及び MA の核変換・短寿命化を引き起こす中性子捕獲反応および核分裂反応の精度良い断面積データが不可欠である。また、ウランサイクルのみならずトリウムサイクルをも視野に入れたエネルギー増幅研究においても、これらのデータは不可欠である。本研究テーマではこれらの研究に関連して、0.5eV～500keV の入射中性子エネルギー領域で、(1)LLFP と MA の捕獲断面積の精密測定、(2)LLFP と MA の中性子捕獲ガンマ線スペクトルの測定、(3)MA の核分裂断面積の精密測定を行い、更に測定結果を理論解析することにより、(4)LLFP 及び MA の熱外中性子核反応の系統的研究を行い、中性子断面積の理論予測精度を向上させる。

(ウ) 全元素同時・非破壊・高感度核種定量：核種定量分析は、材料科学、環境科学、宇宙・地球科学、原子力、考古学、医療等の多くの分野で重要である。特に ppt ( $10^{-12}$ ) 以下の超微量分析は今後益々重要になる。本研究テーマでは、大強度パルス中性子源から



の冷及び熱中性子ビームによる捕獲反応等によって発生する即発ガンマ線及び生成された核種からの壊変ガンマ線を、多数の Ge 検出器と  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  (BGO) シンチレータとを組み合わせた「全立体角 Ge スペクトロメータ」を用いて測定し、(1)最高 ppq ( $10^{-15}$ ) オーダーの極微量分析手法の確立、(2)mm~cm オーダーの非破壊 3 次元元素分布分析法の開発を行う。また、前述 (ア) と (ウ) の 2 研究テーマにおける中性子断面積測定に用いる試料の核種分析及び核分裂反応生成物の分析も行う。

### 3. 建設する中性子実験装置名称

中性子核反応測定装置

### 4. 提案代表者又は連絡責任者

代表者・連絡責任者：井頭政之（東京工業大学 原子炉工学研究所）

E-mail:iga@nr.titech.ac.jp

〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1、Tel:03-5734-3378,

Fax:03-5734-2959

### 5. 提案するグループの構成とその役割分担

本提案グループは全員で 84 名の構成であり、前述の 3 つの研究テーマに強いて重複無いように役割分担すると以下ようになる。(太字は世話人)

#### (ア) 速中性子反応と宇宙核物理 (24 名)：

橋本正章 (九州大)、池田伸夫 (九州大)、大隅秀晃 (佐賀大)、宇都宮弘章 (甲南大)、秋宗秀俊 (甲南大)、永井泰樹 (大阪大)、板橋隆久 (大阪大)、嶋 達志 (大阪大)、川瀬洋一 (京都大)、大久保嘉高 (京都大)、谷口秋洋 (京都大)、谷垣 実 (京都大)、親松和宏 (愛知淑徳大)、住吉光介 (沼津高専)、本林 透 (理研)、梶野敏貴 (国立天文台)、長谷部信行 (早稲田大)、宮地 孝 (早稲田大)、岡田宏之 (早稲田大)、柴田徳思 (KEK)、片山一郎 (KEK)、篠塚 勉 (東北大)、千葉 敏 (原研)、A. Mengoni (CERN)

#### (イ) マイナーアクチニド及び長寿命核分裂生成物の中性子核データ (39 名)：

的場 優 (九州大)、石橋健二 (九州大)、渡辺幸信 (九州大)、河野俊彦 (九州大)、魚住裕介 (九州大)、桑折範彦 (徳島大)、高橋亮人 (大阪大)、村田 勲 (大阪大)、大澤孝明 (近畿大)、小林捷平 (京都大)、山名 元 (京都大)、藤井俊行 (京都大)、河出 清 (名古屋大)、井口哲夫 (名古屋大)、中沢正治 (東京大)、井頭政之 (東工大)、大崎敏郎 (東工大)、吉田 正 (武工大)、川合將義 (KEK)、佐波俊哉 (KEK)、馬場 護 (東北大)、岩崎智彦 (東北大)、高野秀機 (原研)、水本元治 (原研)、長谷川明 (原研)、中川庸雄 (原研)、柴田恵一 (原研)、深堀智生 (原研)、明午伸一郎 (原研)、甲斐哲也 (原研)、西尾勝久 (原研)、岩本 修 (原研)、原田秀郎 (サイクル)、中村詔司 (サイクル)、古高和植

(サイクル)、山野直樹 (住友原子力)、T.-I. Ro (Dong-A 大, Korea)、G. Kim (Kyungpook 大, Korea)、N. Kornilov (IPPE, Russia)

(ウ) 全元素同時・非破壊・高感度核種定量 (21 名) :

海老原充 (都立大)、大浦泰嗣 (都立大)、伊藤泰男 (東京大)、澤幡浩之 (東京大)、尾寄大真 (東京大)、松尾基之 (東京大)、久野章仁 (東京大)、松本 良 (東京大)、野口高明 (東京大)、久保謙哉 (国際基督教大)、酒井陽一 (大同工大)、大島真澄 (原研)、初川雄一 (原研)、藤 暢輔 (原研)、小泉光生 (原研)、長 明彦 (原研)、片桐政樹 (原研)、松江秀明 (原研)、木村 敦 (原研)、ホセイン (原研)、豊田和弘 (北海道大)

6. 研究内容の概要 (研究計画、科学的意義、社会的意義、波及効果、革新性、独自性等を明記)

### 【研究計画、科学的意義】

#### (ア) 速中性子反応と宇宙核物理

[背景] ビッグバン直後の初期宇宙では Li までの軽元素が、又その後の宇宙進化で形成された恒星の内部ではより重い各種元素が合成されてきた。「これら元素の種類・存在量」は「恒星の世代に特徴的」であり、宇宙の進化の歴史を紐解く上で「史跡」として重要な鍵を握っている。このためこれら「元素の起源と恒星の進化」について妥当なモデルを構築する事がビッグバン宇宙の歴史を解明する上で重要である。実際、宇宙の歴史の中では比較的新しい太陽系での元素組成は隕石の分析・太陽フレアの観測を通し高精度で明らかにされており、これらの情報をもとに我々は鉄より重い元素は中性子反応で合成されてきた事を知っている。ところで宇宙の歴史解明には太陽系よりも古く限りなく宇宙初期近くに形成された恒星内で合成された元素を観測する事が重要である。その様な恒星は低金属度の恒星と見なされるが、天文学者は観測機器の開発を精力的に進め現在ではこれら恒星内での元素組成の観測に成功しつつある。一方隕石分野では、太陽系形成以前の記憶を保持すると考えられるプレ・ソーラーグレーン (隕石) の分析が飛躍的に進み色々な元素について興味深い同位体異常が見つけ出されている。これら古い低金属度恒星中での元素合成のメカニズムを理解する事が上記モデルの構築上極めて重要になっている。

[目的] 重元素は恒星内で slow(s)過程及び rapid(r)過程で合成される。上記観点から s 及び r 過程元素合成に関連して以下の問題に取り組む。

(A) s 過程 :

(1) 低金属度恒星内元素合成の問題: 鉄の組成比が太陽系に比しはるかに少ない恒星内の元素合成では、恒星内に大量に存在する鉄より軽い原子核は中性子吸収断面積の大きさによっては原子核反応で生成された中性子を消費し重元素合成を阻害する。そのためこれら原子核の中性子誘起反応断面積を測定する事が重要である。

(2) 同位体異常の問題: プレ・ソーラーグレーンの解析から多くの同位体異常が観測

されている。この異常はこれら同位体が生成された恒星の姿を反映しており、特に漸近巨大分岐 (AGB) 星での元素合成模型構築に重要な情報を提供する。そしてこの模型構築には同位体異常を示す原子核の中性子捕獲反応断面積の高精度測定が欠かせない。

(3) 中性子密度の問題： s 過程が進行する際の恒星内の中性子密度は重要な情報である。それは比較的長寿命のベータ崩壊と中性子捕獲反応が共存する所謂分岐原子核の中性子捕獲反応断面積により抽出できる。

(4) 中性子源の問題： 質量が 60 から 90 以下の s 過程元素は  $^{22}\text{Ne}(^4\text{He},n)^{25}\text{Mg}$  反応が、又 90 以上の s 過程元素は  $^{13}\text{C}(^4\text{He},n)^{16}\text{O}$  反応からの中性子が重元素合成の中性子源と考えられている。しかし  $^{18}\text{O}$ ,  $^{21}\text{Ne}$  等との  $(^4\text{He},n)$  反応による中性子の可能性もあり、これを明らかにするにはこれら原子核の  $(^4\text{He},n)$  反応断面積を知る事が重要である。そこで我々は独自に開発する測定器系を用い逆反応  $(n, ^4\text{He})$  ( $^{16}\text{O}$ ,  $^{21}\text{Ne}$ ,  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{25}\text{Mg}(n, ^4\text{He})^{13}\text{C}$ ,  $^{18}\text{O}$ ,  $^{21}\text{Ne}$ ,  $^{22}\text{Ne}$ ) によりその断面積を測定する。

(B) r 過程：

(1) r 過程元素合成の問題： r 過程が進行する天体の場所は未解決の問題として残っている。しかし低金属度の恒星での観測から、r 過程核は元々 s 過程核の存在を必要としない 1 次過程で合成される事が明かになりつつある。そして、生誕間もない中性子星からのニュートリノ風により r 過程元素が合成されたとする案が有力である。このシナリオでは、陽子・中性子反応による重陽子生成を皮切りに、陽子捕獲、 $^4\text{He}$  捕獲反応が進行し軽・中重原子核を合成する過程が続いて r 過程による重元素合成過程が進行すると考えられている。そのため陽子捕獲、 $^4\text{He}$  捕獲反応で合成される大量の鉄より軽い原子核はそれらの中性子誘起反応断面積の大きさによっては r 過程重元素生成量に大きく影響する。

(2) 宇宙年齢の問題： r 過程核  $^{187}\text{Re}$  はその半減期が 435 億年であり、そのベータ崩壊生成物  $^{187}\text{Os}$  との太陽系における存在比から  $^{187}\text{Re}$  が合成された年代の情報が得られ、初期銀河形成までの年代、太陽系形成後の年代とあわせる事で宇宙の年代を知る事ができる。この議論では観測される  $^{187}\text{Os}$  量の中、s 過程で生成される量を補正する必要がある。そのため  $^{187}\text{Os}$  核を含め近傍核の中性子に対するレスポンスを調べることが重要である。

(3) r 過程元素合成と核分裂断面積： r 過程で合成される U, Th 等の重元素は、核分裂反応により中重原子核の生成量を増加させる一方で元の重元素量を減少させる。r 過程元素合成シナリオを考察する上でその核分裂反応断面積測定は重要である。

#### (イ) マイナーアクチニド及び長寿命核分裂生成物の中性子核データ

[背景] 現在稼働中の核分裂炉内で生成される「長寿命核分裂生成物 (LLFP :  $^{79}\text{Se}$ ,  $^{93}\text{Zr}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{107}\text{Pd}$ ,  $^{126}\text{Sn}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{135}\text{Cs}$ ) 及びマイナーアクチニド (MA :  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{242\text{m}}\text{Am}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ , etc.)」の処理・処分については、他の放射性廃棄物と共にガラス固化・一時貯蔵・地中埋設が現在の国策となっている。しかし、長寿命のため、遠い子孫に負の遺産と言うべき“放射性廃棄物”を残すことになり、倫理的な議論の対象にもなっている。この様な背

景から現在、LLFP 及び MA の分離・核変換処理研究が我が国を含め世界中で盛んに行われており、大強度陽子加速器施設における加速器駆動核変換 R&D 実験施設も当にこのための施設である。核変換基礎研究及び加速器駆動型システム (ADS) の核変換性能比較のためには、LLFP 及び MA の核変換・短寿命化を引き起こす中性子捕獲反応及び核分裂反応の精度良い断面積データが不可欠である。また、ウランサイクルのみならずトリウムサイクルをも視野に入れたエネルギー増幅研究においても、これらのデータは不可欠である。しかし、LLFP 及び MA の熱外中性子断面積測定は至難のため測定データが非常に少なく、また理論計算による現在の断面積予測精度も悪いため、現在の評価済み核データ・ライブラリに収納されている LLFP 及び MA の熱外中性子捕獲断面積及び MA の核分裂断面積の精度は悪く、例外を除けば誤差 30%程度から 100%迄にも及ぶと考えられている。このような状況から、LLFP 及び MA の熱外中性子捕獲断面積及び MA の核分裂断面積を精度良く測定し、信頼性の高いデータを供給することにより核変換処理研究等に資することは非常に重要である。また、LLFP 及び MA の精度良い熱外中性子捕獲断面積データの解析を通して中性子過剰不安定核の熱外中性子捕獲反応機構を解明することにより、測定が困難な中寿命核 ( $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , etc.) の熱外中性子捕獲断面積に対する理論計算予測精度を高める事も重要である。

[目的] 上記背景から、LLFP 及び MA の核変換処理基礎研究、ADS 研究開発、及びエネルギー増幅研究に重要な中性子核反応断面積に関連して以下の課題に取り組む。

(1) LLFP と MA の熱外中性子捕獲断面積の精密測定 ( $E_n=0.5\text{eV}\sim 500\text{keV}$ ): LLFP ( $^{79}\text{Se}$ ,  $^{93}\text{Zr}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{107}\text{Pd}$ ,  $^{126}\text{Sn}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{135}\text{Cs}$ ) 及び MA ( $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{242\text{m}}\text{Am}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ ) の中性子捕獲断面積を精度良く測定する。

(2) LLFP と MA の熱外中性子捕獲ガンマ線スペクトルの測定 ( $E_n=0.5\text{eV}\sim 500\text{keV}$ ): 中性子捕獲反応機構研究において捕獲ガンマ線スペクトルは捕獲断面積と共に重要な物理量であるが、測定例は非常に少ない。そこで本研究では上記 LLFP 及び MA について中性子捕獲ガンマ線スペクトルを測定する。

(3) MA の熱外中性子核分裂断面積の精密測定 ( $E_n=0.5\text{eV}\sim 500\text{keV}$ ): 上記 MA について、中性子核分裂断面積を精度良く測定する。核分裂反応と捕獲反応は互いに競争しており、MA の核分裂断面積は捕獲断面積研究においても重要な物理量である。

(4) LLFP 及び MA の熱外中性子核反応の系統的研究: 上記の 3 研究課題で得られた捕獲断面積、捕獲ガンマ線スペクトル、及び核分裂断面積の測定結果を総合的・系統的に理論解析し、LLFP 及び MA の熱外中性子核反応機構を解明し、不安定原子核に対する中性子誘起反応断面積の理論予測精度を向上させる。

#### (ウ) 全元素同時・非破壊・高感度核種定量

[背景] 1 台の Ge 検出器を用いる従来の放射性核種分析では、分解能 ( $E/\delta E$ ) は約 1,000 である。放射性核種は平均して 10 オーダーの数のガンマ線を放出するので、数 10

核種を含む試料ではガンマ線数は数 100 に達し、これらをすべて分離することは不可能になる。我々は多くの放射性核種が 2 個以上のガンマ線を同時放出することに注目し、この多重ガンマ線を同時計数して得られる 2 次元マトリクスを解析することにより、「従来の方法に比べ 1000 倍のエネルギー分解能 (1,000,000)」を得る「多重ガンマ線放射化分析法」を開発した。さらに Ge 検出器と BGO シンチレータとを組み合わせたアンチコンプトンガンマ線分析器からなる「多重ガンマ線検出装置」を使用することにより低バックグラウンド計測が実現でき、「最高 ppt ( $10^{-12}$ ) オーダーの高感度、%オーダーの高精度、49 元素の同時定量、照射後化学分離不要」が達成された。しかし原子炉の連続中性子を用いたため、中性子照射とガンマ線測定を別に行う必要があり、照射試料の移動のための時間がかかり、開発した分析法は短寿命核種には適用できず、このため軽元素の分析が困難であった。

【目的】 大強度陽子加速器の「冷及び熱領域パルス中性子源」を用いれば、分析試料をパルス中性子ビームライン上に置いたままで、パルス間の時間帯に壊変ガンマ線を測定することができ、短寿命核種の「多重ガンマ線放射化分析」も可能となる。更に中性子捕獲反応等によって発生する即発ガンマ線も同時に測定することにより、生成核種が安定核の場合にも分析が可能となる。具体的には以下の課題に取り組む。

(1) 最高 ppq ( $10^{-15}$ ) オーダーの極微量分析手法の確立： 多数の Ge 検出器と BGO シンチレータとを組み合わせた「全立体角 Ge スペクトロメータ」を、大強度陽子加速器の「冷及び熱領域パルス中性子源」と共に「多重ガンマ線放射化分析」及び「即発ガンマ線分析」に適用することにより、最高 ppq ( $10^{-15}$ ) オーダーの極微量分析手法を「%オーダーの高精度、全元素をその場同時定量」の条件で確立する。

(2) mm~cm オーダーの非破壊 3 次元元素分布分析法の開発： 現在、元素の 3 次元分布、特にマクロな 3 次元分布を非破壊で得る方法は殆どないが、元素分布測定の要求は高まっている。中性子は比較的透過力が大きいので、マクロな 3 次元元素分布測定に対して利用できるプローブである。また、測定する  $\gamma$  線も透過力が大きいので、試料内部からの  $\gamma$  線も容易に検出できる。本課題では、中性子レンズを開発して mm サイズに収束した中性子ビームを利用し、CT 技術を適応することによって mm~cm オーダーの非破壊 3 次元元素分布分析法を開発する。尚、ホウ素及びリチウム等の分布測定については、(n,  $\alpha$ ) 反応で発生する  $\alpha$  線等の荷電粒子を測定することによって行う。

また、前述の (ア) と (イ) の 2 研究テーマにおける中性子断面積測定に用いる試料の核種分析及び核分裂反応生成物の分析も行う。

### 【社会的意義、波及効果】

#### (ア) 速中性子反応と宇宙核物理

宇宙進化を紐解くことは人類の永遠の願望であり、この研究によって真理に近づくことができれば多くの老若男女が興味を抱き、ひいては小中校生の理科離れに一石を投じ、我

が国の科学技術立国政策に大いに貢献することとなる。尚、本研究テーマで測定する中性子断面積データは種々の分野で利用できる。

#### (イ) マイナーアクチニド及び長寿命核分裂生成物の中性子核データ

遠い子孫の負の遺産となる LLFP 及び MA の核変換技術開発及びエネルギー増幅研究に直結する中性子核データを高精度で取得することは、原子力開発の社会受容性を高めることに貢献し、その社会的意義は大きい。また、本研究テーマで測定する中性子断面積データは種々の分野で利用でき波及効果も大きい。

#### (ウ) 全元素同時・非破壊・高感度核種定量

本定量法の開発は材料科学、環境科学、宇宙・地球科学、原子力、考古学、医療等これまでになく多分野へ貢献する。例えば土壌、川水、空气中浮遊塵など環境試料の分析により重金属などの環境汚染を調べることが重要であるが、多元素同時分析では特定の元素に絞る必要がなく、原因物質の見逃しをなくすことが可能である。この様に、本研究テーマの成果の社会的意義及び波及効果は非常に大きい。

#### **【革新性、独自性等】**

#### (ア) 速中性子反応と宇宙核物理

古い世代に属する低金属度の恒星で合成された様々な元素・原子核の情報を基に「元素の起源と恒星進化の模型構築」を行うためには、これらの原子核の中性子誘起反応断面積の高精度（5%以内）測定が不可欠である。従来中性子の強度及びカバーするエネルギー領域に不足があって高精度測定が叶わなかったのが高強度パルス中性子源で飛躍的に進展する事が期待される。

#### (イ) マイナーアクチニド及び長寿命核分裂生成物の中性子核データ

本研究テーマでは、各種放射線検出器を開発し、高強度・連続スペクトルの核破砕中性子源に飛行時間（TOF）法を適用し、 $E_n=0.5\text{eV}\sim 500\text{keV}$  において、MA 及び LLFP の捕獲断面積及び核分裂断面積を誤差 10%（目標 5%）で測定する。現在の評価済み核データライブラリに格納されているこれらの断面積データの不確かさは（Np-237 等の例外を除いて）30~100%なので、本研究で得られる成果が原子力という工学研究に用いられることを考えると、本研究の革新性及び独自性は非常に高いと言える。

#### (ウ) 全元素同時・非破壊・高感度核種定量

本研究テーマでは、最高 ppq ( $10^{-15}$ ) オーダーの極微量分析手法を「%オーダーの高精度、全元素をその場同時定量」の条件で確立し、また、mm~cm オーダーの非破壊 3次元元素分布分析法を開発するので、その革新性及び独自性は非常に高いと言える。

7. 建設する実験装置の概要（予想される性能、革新性、独自性、パルス中性子の必要性等を明記）

当プロジェクト研究に用いる装置としては、下記の（1）～（5）の検出器、及び（6）

の冷・熱領域～500keV 中性子ビーム輸送・コリメーションシステムである。

- (1) アンチコンプトン NaI(Tl)スペクトロメータ (重遮蔽体付き)
- (2) アンチコンプトン Ge スペクトロメータ (重遮蔽体付き)
- (3) C<sub>6</sub>D<sub>6</sub> 検出器 (2 台)
- (4) 核分裂計数管 (5 台)
- (5) 全立体角 Ge スペクトロメータ
- (6) 冷・熱領域～500keV 中性子ビーム輸送・コリメーションシステム

#### 【予想される性能、革新性、独自性】

原子核の中性子捕獲反応断面積の高精度測定には、測定器近くに多量に存在する散乱中性子によるバックグラウンド (BG) と真の信号との明確な識別が必要である。(散乱され減速された中性子による原子核捕獲反応断面積は速中性子のその約 1000 倍。) そのため我々は上記測定系開発に当たり、中性子捕獲状態から即発的に放出されるガンマ線をエネルギー分解能良く測定できる様に設計する事に主眼を置いている。NaI(Tl)検出器や Ge 検出器が核破砕反応中性子源に対して利用された事は世界的に見てほとんど無い。しかし我々はこの様なユニークな検出器 (1) ～ (4) の原型についてグループ員が長年にわたり開発を続けてきた。その結果既に各施設において実験に用いられ (注 1)、重要な成果が得られている。当プロジェクト研究にこれらの検出器を用いるためには、本統合加速器計画の核破砕反応中性子源の特徴に合わせて更に開発・改造・最適化を行う必要があるが、それは実現可能であると考えている。(5) は現在グループ員によって設計・製作が進められている極めてユニークなスペクトロメータであり、2004 年度末迄に製作・特性試験が完了する予定である。

当プロジェクト研究の成功は、上記検出器のみならず (6) の冷・熱領域～500keV 中性子輸送・コリメーションシステムの設計・製作・据付にもかかっている (注 2)。測定対象の中性子エネルギー領域を 0.5eV 以下或いは 0.5eV～500keV と狭く限定し、核破砕ターゲット室から実験室エリア、中性子ビームダンプエリアまでを、モンテカルロ・シミュレーション結果及びこれまでの各種中性子実験経験の蓄積を全て活用して、最適設計・製作・据付を行う予定である。

この様にして最適設計・製作・据付られる (1) ～ (6) は、高強度核破砕反応中性子源と組み合わせることによりその性能を十分に発揮でき、冷・熱領域～500keV 中性子実験の新境地を開拓できると考える。

(注 1) (1) と (2) の原型装置は東工大、(3) の原型装置は京大、(4) の原型装置は東北大及び京大で用いられている。

(注 2) CERN における n\_TOF Collaboration では (CERN/INTC 2001-021, August 2, 2001)、実際の BG が当初のシミュレーション予想 BG の約 50 倍も高く、予定されていた実験の延期が余儀なくされた。

### 【高強度パルス中性子の必要性等】

宇宙核物理と LLFP&MA 中性子核データ研究では、0.5eV～500keV の領域でエネルギーの関数として中性子断面積を測定する必要があり、TOF でエネルギー決定が可能なパルス中性子を必要とする。また、中性子反応断面積測定用の試料周辺には、入射してくる熱外中性子に加えて散乱され熱化された中性子が充満していると考えられる。そして中性子反応断面積は一般に熱エネルギーに対しての値が大きく、そのためこれらによるイベントが大きな BG となるので、これらのイベントを除去するためにもパルス中性子が欠かせない。更に、高濃縮等の微量試料について keV 領域まで反応断面積を測定するためには高強度中性子束が必要であるが、それは核破碎反応でのみ得られる。

全元素同時・非破壊・高感度核種定量研究においては、冷・熱領域のパルス中性子ビームが分析試料に入射した時に即発ガンマ線を測定し、パルス間の時間帯に壊変ガンマ線を測定し、また極微量核種分析を行うので、高強度パルス中性子が必要である。

### 8. 建設する実験装置の主な仕様

本プロジェクト研究に用いる (1)～(6) の装置の配置概念図を図 1 に示す。また、各装置等の必要予算額 (総額 689,000 千円)、凡その寸法及び重量等を以下に示す。

- (1) アンチコンプトン NaI(Tl)スペクトロメータ (重遮蔽体付き) : 40,000 千円  
占有面積 : 架台込みで約 2×2m、重量 : 架台込みで約 6t
- (2) アンチコンプトン Ge スペクトロメータ (重遮蔽体付き) : 50,000 千円  
占有面積 : 架台込みで約 2×2m、重量 : 架台込みで約 6t
- (3) C<sub>6</sub>D<sub>6</sub> 検出器 (2 台) : 4,000 千円  
占有面積 : 架台込みで約 0.5×1m、重量 : 架台込みで約 20kg
- (4) 核分裂計数管 (5 台) : 10,000 千円  
占有面積 : 架台込みで約 0.3×0.5m、重量 : 架台込みで約 10kg
- (5) 全立体角 Ge スペクトロメータ : 445,000 千円  
占有面積 : 架台込みで約 3×2m、重量 : 架台込みで約 2t
- (6) 冷・熱領域～500keV 中性子ビーム輸送・コリメーションシステム : 100,000 千円  
中性子ビームをコリメータで約 2cm φ に絞る予定。占有面積等は図 1 参照。
- (7) 液体窒素自動補給システム : 40,000 千円

屋外に 5,000 ℓ 程度の液体窒素タンクを設置し、貫通孔を用いて各 Ge 検出器に補給する。

【中性子減速材の種類、高圧ガス等の許認可の必要の有無、施設建家外における工事の可能性の有無】

大強度中性子の要求は 0.5eV～500keV の領域が特に強いので、中性子減速システムについては低減速システムを要求したい。また、軽水減速システムでは 2.2MeV ガンマ線が



深刻な BG となるので、重水減速システムを要求したい。上記の様に、液体窒素自動補給システムが必要となるので、高圧ガス取扱の許認可申請が必要となり、また施設建家外におけるタンク設置工事が必要となる。更に、LLFP、MA 及び標準ウラン試料を用いるので、放射性同位元素及び核燃料の取扱施設の許認可申請が必要となる。

## 9. 実験装置建設年次計画（予定）及び研究年次計画（予定）

上記（6）の冷・熱領域～500keV 中性子ビーム輸送・コリメーションシステムの設計は、核破碎ターゲット室、それに引き続く鉄遮蔽、中性子ビームシャッター、コンクリート遮蔽等の設計とタイミングを合わせる必要がある。その他の（1）～（4）の検出器の製作・据付には1年間で充分であり、（5）については前述の様に3年間で充分である。現在考えている建設スケジュールは以下の通りである。

### （A）冷・熱領域～500keV 中性子ビーム輸送・コリメーションシステム

2002 年度：設計開始

2003 年度以降：設計・製作・据付

### （B）各種検出器

2002～2004 年度：（5）全立体角 Ge スペクトロメータの設計・製作・特性試験

2005～2006 年度：（1）～（4）の検出器の製作・据付

2007 年度：（5）の検出器の据付

研究スケジュールとしては以下を予定している。

### （ア）速中性子反応と宇宙核物理：

2007～2009 年度：軽原子核の中性子捕獲反応断面積の測定。

2010～2012 年度：重原子核の中性子捕獲反応断面積の測定。

2013～2015 年度：重原子核の非弾性散乱断面積の測定。

2016～2018 年度：中性子誘起荷電粒子放出反応断面積の測定。

### （イ）マイナーアクチニド及び長寿命核分裂生成物の中性子核データ：

本研究テーマは ADS 研究開発にタイムリーに資するため、装置完成後 5 年間で測定を終了させ、7 年間で研究を完了させる予定である。測定用試料の準備状況により多少の予定変更が予想されるが、現在計画している研究スケジュールは以下の通りである。

2007 年度：検出器特性試験、BG 低減化、中性子場特性試験、 $^{237}\text{Np}$ ,  $^{99}\text{Tc}$  の測定

2008～2009 年度： $^{241,243}\text{Am}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{107}\text{Pd}$ ,  $^{93}\text{Zr}$  の測定

2010～2011 年度： $^{242\text{m}}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ ,  $^{79}\text{Se}$ ,  $^{126}\text{Sn}$ ,  $^{135}\text{Cs}$  の測定

2012～2013 年度：測定結果の総合的・系統的な理論解析

### （ウ）全元素同時・非破壊・高感度核種定量：

2007～2008 年度：検出器特性試験、極微量分析手法の確立、3次元分析手法に必要な基礎

## データの取得

2009～2010 年度：極微量分析手法を用いた応用研究、3次元分析手法の確立と基礎データの取得

2011～2012 年度：極微量分析手法を用いた応用研究、3次元分析手法の確立とそれを用いた応用研究

### 10. 建設予算及び研究予算に関する考え方

前述の装置設置費用 689,000 千円以外に測定用試料の 20,000 千円を合わせて 709,000 千円が必要となるが、この内、(3)～(5)の検出器と測定用試料の合計経費 479,000 千円は既に他経費(文部科学省「革新炉公募研究」等)で賄うことが了承されている。残り 230,000 千円は競争的資金で調達する予定であるが、全額調達が困難な場合は、(1)と(2)の検出器(合計 90,000 千円)については東工大既設のものを改造・最適化して持ち込むとすると、最低限(6)と(7)の 140,000 千円を調達すればよい。また、液体窒素代等の実験設備の維持・管理費用が年間 10,000 千円、実験のための旅費等が年間 2,000 千円必要であり、これらの費用も競争的資金で調達すべく全力を尽くしたいが、全額調達できない場合は施設側からの補助を仰ぎたい。

### 11. 装置設置期間( $\alpha$ 年)と装置占有率( $\beta$ %)に対する希望

装置設置期間( $\alpha$ 年)は12年、装置占有率( $\beta$ %)は60%としたい。

### 12. 参加する研究者のこれまでの研究活動(主要論文リスト)

本プロジェクト研究には84名が参加しており、提案書が10頁以内と制限されているので全員の研究活動を記述することはできない。そこで3研究テーマの世話人についてのみ研究活動を記述する。

【提案代表者・LLFP&MA核データ世話人】井頭政之：東京工業大学 原子炉工学研究所 助教授

◎研究分野：原子炉物理、中性子核データ、宇宙核物理、◎主要論文：

\* M. Igashira, H. Kitazawa and N. Yamamuro: A heavy Shield for the Gamma-Ray Detector Used in Fast Neutron Experiments; *Nucl. Instr. Meth.*, A245, 432-437 (1986).

\* M. Igashira, H. Kitazawa, M. Shimizu, H. Komano and N. Yamamuro: Systematics of the Pygmy Resonance in keV Neutron Capture  $\gamma$ -Ray Spectra of Nuclei with N=82-126; *Nucl. Phys.*, A457, 301-316 (1986).

\* M. Igashira, Y. Nagai, K. Masuda, T. Ohsaki and H. Kitazawa: Measurement of the  $^{16}\text{O}(n, \gamma)^{17}\text{O}$  Reaction Cross Section at Stellar Energy and the Critical Role of Nonresonant p-Wave Neutron Capture; *The Astrophysical Journal*, 441, L89-L92 (1995).

\* S. Mizuno, M. Igashira and K. Masuda: Measurements of keV-Neutron Capture Cross Sections and Capture Gamma-Ray Spectra of  $^{161,162,163}\text{Dy}$ ; *J. Nucl. Sci. Technol.*, **36**, 493-507 (1999).

【宇宙核物理世話人】 永井泰樹：大阪大学 核物理研究センター 教授

◎研究分野：宇宙核物理、原子核構造、◎主要論文：

\* Y. Nagai, T.S. Suzuki, T. Kikuchi, T. Shima, T. Kii, H. Sato and M. Igashira: Direct Measurement of the  $^1\text{H}(n, \gamma)^2\text{H}$  Reaction Cross Section at a Comparable M1/E1 Strength; *Phys. Rev. C*, **56**, 3173-3179 (1997).

\* T. Shima, Y. Nagai, T. Kii, T. Baba, T. Takahashi and H. Ohgaki: Precision Test of Charge Symmetry of Nuclear Force via Photonuclear Reaction of  $^4\text{He}$ ; *Nucl. Phys.*, **A629**, 475c-480c (1998).

\* T. Kikuchi, Y. Nagai, T.S. Suzuki, T. Shima, T. Kii, M. Igashira, A. Mengoni and T. Otsuka: Nonresonant Direct p- and d-Wave Neutron Capture by  $^{12}\text{C}$ ; *Phys. Rev. C*, **57**, 2724-2730 (1998).

\* T. Ohsaki, Y. Nagai, M. Igashira, T. Shima, T.S. Suzuki, T. Kikuchi, T. Kobayashi, T. Takaoka, M. Kinoshita and Y. Nobuhara: An NaI(Tl) Spectrometer System for keV Neutron Radiative-Capture Reactions; *Nucl. Instr. Meth.*, **A425**, 302-319 (1999).

【核種分析世話人】 海老原充：東京都立大学 大学院理学研究科化学専攻 教授

◎研究分野：宇宙・地球・環境化学、放射化分析法、◎主要論文：

\* M. Ebihara and Y. Oura: Applicability of Prompt Gamma-Ray Analysis to the Initial Analysis of the Extraterrestrial Materials for Chemical Composition; *Earth Planet. Sc.* **53**, 1039-1045 (2001).

\* A. Yamaguchi, R.N. Clayton, T.K. Mayeda, M. Ebihara, Y. Oura, Y.N. Miura, H. Haramura, K. Misawa, H. Kojima and K. Nagao: A New Source of Basaltic Meteorites Inferred from Northwest Africa 011; *Science* **296**, 334-336 (2002).

\* Y. Oura, M. Ebihara, S. Yoneda and N. Nakamura: Chemical Composition of the Kobe Meteorite; Neutron-Induced Prompt Gamma Ray Analysis Study; *Geochem. J.* **36**, 295-307 (2002).

### 1 3. パルス中性子施設への要望

パルス幅 200ns 以下（繰り返しは 25Hz のまま、ビーム電流は 1/2~1/3 に減っても構わない。）の運転モード期間を年間 1,000 時間程度設けて欲しい。このことで TOF の短い  $E_n > 100\text{keV}$  領域のエネルギー分解能を 3 倍以上向上でき、米国の SNS 計画及び CERN の n\_TOF プロジェクトでは得られないユニークな速中性子源を得ることができ、更により一層、世界をリードする実験的研究が展開できる。

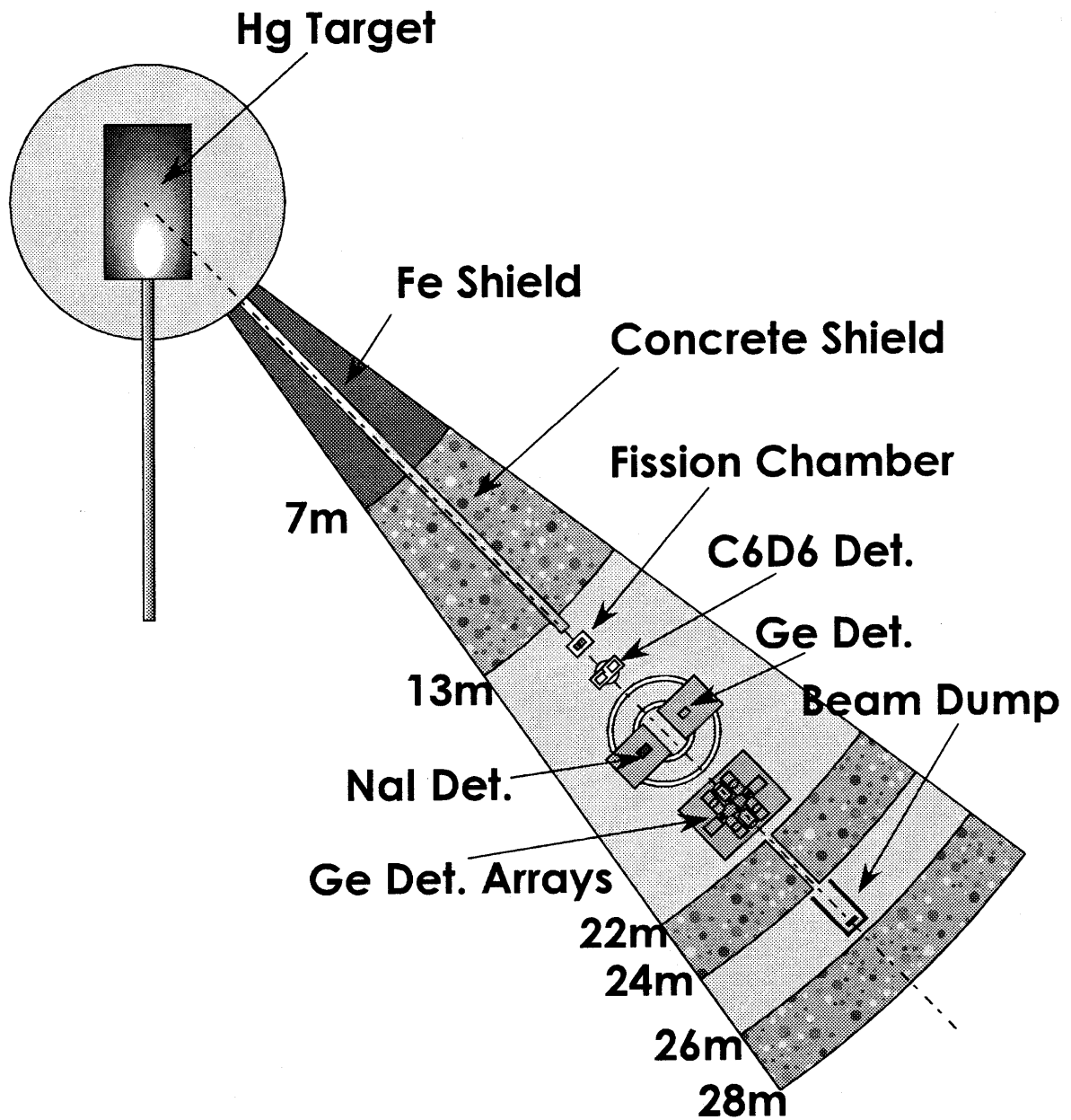


図1 建設設置する実験装置の配置概念図

# 資料

## 2002FNCA 研究炉利用ワークショップ

東京都立大学大学院理学研究科  
海老原 充

### 1. FNCA ワークショップの位置づけ

平成 15 年（2003）年、1 月 13 日から 17 日の間、インドネシアの首都ジャカルタの近郊にある原子力研究所（BATAN）において標記ワークショップが開催された。FNCA とは Forum of Nuclear Collaboration of Asia の略で、アジア（+オーストラリア）における原子力や放射線の平和利用を促進するための政府間組織である。日本では文部科学省と総務庁の管轄下におかれている。現在 9 つのグループに分かれて活動しているが、その 1 つである研究炉利用関係のグループ（主査：原研・竹下、敬称略-以下同様）は中性子放射化分析（プロジェクトリーダー：都立大・海老原）、Tc ジェネレータ（同：原産会議・源河）、中性子散乱（同：原研・濱口）の 3 つのサブグループからなり、研究炉の有効利用に関して議論している。各グループごとにワークショップが開催されるが、1 月のインドネシア BATAN では中性子放射化分析と TC ジェネレータの各グループのワークショップが同時に開催された。中性子放射化分析グループは日本をはじめとして、中国、韓国、フィリピン、マレーシア、インドネシア、タイ、ヴェトナムの 8 カ国で構成されており、今回日本からは、東北公益文化大学・大歳、都立大・大浦、原研（東海）・笹島、海老原の計 4 名が出席した。FNCA や昨年度のワークショップに関しては本誌 No. 13 で詳しく紹介されている。

中性子放射化分析のワークショップは研究用原子炉を持つアジアの国々が共通の目的をもって中性子放射化分析の利用促進を図ることを目的として開催されるもので、昨年度の北京でのワークショップで向こう 4 年間の長期的課題、及び 2002 年度の短期的課題が議論された。その結果、4 年間のテーマとして中性子放射化分析による環境試料の共同分析を柱とし、分析結果の精度・確度の向上を図るとともに、得られたデータを環境行政に役立てるための方策を探ることを目指した。環境試料としては当面、大気浮遊塵を取り上げる。2002 年度の課題は大気浮遊塵の分析に加えて、分析手段として  $k_0$  標準化法を導入する方策を具体化することであった。

### 2. 2002 年度ワークショップの概要

ワークショップ初日（1 月 13 日）はジャカルタ市内のホテルで全体会議が行われた。午前中にまず主要関係者の挨拶があり、続いて日本とインドネシアの研究者の招待講演が

行われた。日本からは東北公益文化大学・大歳が「環境問題への放射化分析の寄与」と題して、講演を行った。午後には研究炉の現状について各国の代表の報告があり、日本からは原研・竹下が日本の研究炉事情を紹介した。

2日目(1月14日)からは2つのグループに分かれて実質的な報告や議論が行われ、中性子放射化分析グループ会合では大気浮遊塵関係の進捗状況について各国から報告があった。日本以外の参加国はIAEAの大気浮遊塵プロジェクトに関わっており、サンブラー等の支給を受けている。そのような事情を反映してか、各国ともおおむね順調に推移しているとの報告がほとんどであった。日本では酒田と八王子で試料採取を行い、 $2\mu\text{m}$ 以下(PM2.5)と $2\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$ (PM10)の2つの粒径に分けて分析を実施している。日本からは東北公益文化大学・大歳が試料採取や粒度分布について、都立大・大浦が中性子放射化分析の分析結果に関してそれぞれ報告した。

3日目(1月15日)には $k_0$ 法に関する実験、及び報告が行われた。まず午前中にBATANの原子炉を利用した $k_0$ 法による実験が行われた。BATANではオランダDSM社から販売されている $k_0$ ソフトウェア(KAIZERO/SOLCOI)を数年前に購入していたが、これまで実試料への適用は先送りされてきた。今回、ワークショップ開催に先駆けて日本側の協力(原研・笹島氏)のもとに努力を重ねた結果、 $k_0$ 法を用いた初めてのデータを得ることに成功した。データの質はまだ充分とは言い難いものの、BATANの研究者にとっては大きな前進であり、ワークショップに成果として記録されるべき事項であった。同日午後には日本から2件、中国、ヴェトナムから各1件の計4件の $k_0$ 法関連の報告があった。現在 $k_0$ 法のソフトウェアとしては上記DSM社から販売されているものが製品版としては唯一のものであるが、その価格が高額であることが、特にアジアの国々での普及の妨げになっているという問題点が昨年度のワークショップで指摘されていた。ワークショップ参加者の中で中国とヴェトナムの代表がそれぞれ自前のソフトウェアを作成しており、このセッションでは中国とヴェトナムの代表がそれぞれそれら自前のソフトウェアの紹介をした。一方、原研・笹島と都立大・大浦は中国版と製品版の実質的な比較の結果を報告し、中国版(ADVNA)は実用上、製品版と比べて遜色なく、製品版にない優れた特徴を併せ持つことを示した。

4日目(1月16日)には2日目、3日目に発表された報告をもとに、今後のグループとしての活動について討論を行った。午前中は2日目の課題であった大気浮遊塵関係、午後には3日目の課題の $k_0$ 法関連の議論をそれぞれ行った。その結果、大気浮遊塵の分析に関しては今後も継続して実施するとともに、2002年度に得られたデータを参加国すべてで持ち寄り、各国ごとの特徴の比較や、地域ごとの特徴について考察し、報告書(論文)を作成することで合意した。また、それに伴う具体的なスケジュールを決定した。また大気浮遊塵以外にも海洋試料(堆積物)を環境試料として共同分析する可能性について議論し、積極的に推進することで合意した。また、中性子放射化分析に用いられる比較標準試料

(standard reference materials) (NIST SRM1632c、NIES No.8)の試料サイズを小さくした場合のデータの信頼性(再現性)を共同で調べることを合意した。 $k_0$ 法関係では、今後ワークショップ参加国がどのように $k_0$ 法を導入するかに関して議論した。昨年度のワークショップではグループ内で統一したソフトウェアを選定し、導入を図るという方針が合意されたが、当面は $k_0$ 法の導入を図るということに重点を置き、統一版を利用することは考えずに、各国の事情を考慮して、各国ごとの判断で導入するということで合意した。しかし、最終的には近い将来、ワークショップ参加グループとして、中国、ベトナム版をもとにした、FNCA版とでも呼ぶべきより使いやすい $k_0$ 法ソフトウェアを開発することで合意した。

最終日(1月17日)にはTcジェネレータと中性子放射化分析の両グループ合同で、ワークショップのまとめについての全体会議を行った。この場で参加者の合意を得て作成された報告書は2003年3月に開催されるコーディネーター会議において各国のコーディネーターに紹介され、2003年度のFNCAの活動計画に反映されることになる。日本では中性子放射化分析の中性子源として利用される研究用原子炉が減る一方であり、分析法の将来が危惧される。一方、アジアのいくつかの国においては今後も原子炉の新規建設計画が立案され、建設される趨勢にある。中性子放射化分析法は分析法として他の分析法にない優れた特徴を持つ方法であるが、原子炉という国レベルで所有されるべき大型の装置を必要とする。将来、日本という枠の中でなく、アジアという枠で実験を行う必要に迫られる事態も予想されるが、そのようなことを想定すると、このワークショップ、さらにはFNCAの活動には一層重要な意義が認められる。

### 3. ワークショッププログラム(中性子放射化分析関連)

#### ・1月13日(月)

(午前)

##### 一般講演

「環境問題における分析手段としての中性子放射化分析」

(大歳恒彦、東北公益文化大学)

#### ・1月14日(火)

(午前)

##### 招待講演

「インドネシアにおける大気環境の改善：微粒子及び粗粒子の研究」

(Puji Lestari、バンドン工科大学)

「インドネシアにおける大気汚染監視の現状」

(Iman Hendargo、Env. Impact)

一般講演(大気浮遊塵研究についての各国報告)

「PM<sub>10</sub> 粒子の中性子放射化分析法による 2002 年北京における大気汚染の研究」

(Ni Bangfa、中国原子能科学研究院)

「日本における中性子放射化分析のためのサイズ別分画粒子の収集」

(大歳恒彦、東北公益文科大学)

「日本の八王子及び酒田で収集された大気浮遊塵の機器中性子放射化分析」

(大浦泰嗣、東京都立大学)

(午前)

「バンドン及びレンバン地域における大気浮遊塵の元素定量」

(Sutisna、インドネシア原子力庁)

「韓国における中性子放射化分析を用いた大気汚染監視」

(Yong Sam Chung、韓国原子力研究所)

「クアラルンプールの大気中の微粒及び粗粒浮遊塵の特徴」

(Ab. Khalik Bin Haji Wood、マレーシア原子力庁)

「大気浮遊塵の収集及び蛍光エックス線分析」

(Flora L. Santos、フィリピン原子力研究所)

「タイの都市部における大気汚染の研究」

(W. Chueinta、タイ原子力庁)

「ヴェトナム原子核研究所での ko-INAA を使った実証実験としての大気浮遊塵」

(Ho Manh Dung、ダラト原子力研究所)

1月15日(水)

(午前)

k<sub>0</sub>法の公開実験

(午後)

招待講演

「NAA-ko 法ソフトウェア ADVNAA の紹介」

(Ni Bangfa、中国原子能科学研究院)

一般講演 (ko 法関連)

「中国とヨーロッパの k<sub>0</sub> ソフトウェアの比較」

(笹島文雄、日本原子力研究所)

「CIAE の ko ソフトウェアの評価」

(大浦泰嗣、東京都立大学)

「ベトナムダラト研究炉での INAA-ko 標準化 (ko-INAA) にかんするソフトウェア及び実験の展開」

(Ho Manh Dung、ダラト原子力研究所)

1月16日(木)



(午前)

活動報告及び将来計画に関する討議 (大気浮遊塵関連)

(午後)

活動報告及び将来計画に関する討議 (ko 法関連)

1月17日 (金)

(午前)

全体会議

円卓会議

ワークショップのまとめ

コーディネータ会合への提案

#### 4. ワークショップ報告 (中性子放射化分析関連)

ワークショップ最終日に、2002 年度の活動の総括、及び今後 1 年の活動計画に関してレポートがまとめられた。以下に放射化分析グループのワークショップ報告を転載する。研究用原子炉を保有するアジアの国々がどのような姿勢で放射化分析に取り組んでいるかを知る一助としてしていただければと思う。

\*\*\*\*\*

### WORKSHOP REPORT OF NAA GROUP

The 2002 FNCA workshop on utilization of research reactors for NAA group was held at Serpong, Indonesia on 13-17, January 2003, with participants from China, Indonesia, Korea, Japan, Malaysia, Philippines, Thailand and Vietnam. On the first day of the workshop, Prof. Tsunehiko Otoshi, Tohoku University of Community Service and Science presented a general lecture on neutron activation analysis entitled "NAA as Analytical Tool of Environmental Issue".

This reports consists of three parts, (i) summaries of invited and country reports, (ii) summaries of demonstration of ko-method experiment and reports related with ko-sofwares and (iii) future program.

#### 1. SUMMARIES OF INVITED AND COUNTRY REPORTS

(Invited speeches)

- 1) "Improving Air Quality in Indonesia Study of Fine and Coarse Particulates" by Dr. Puji Lestari of Bandung Institute of Technology, Indonesia. Fine and coarse portions of atmospheric particulates were collected in 5 locations in Bandung and their constituents were determined by NAA and other methods. Results indicate that the concentration of coarse particles increases in the daytime while there is no significant difference for fine particles between daytime and nighttime.
- 2) "Current Status of Air Pollution Monitoring in Indonesia" by Ms. Novy Farhani of Environmental Management Center of Indonesia. The ambient air pollution monitoring network has been installed since 1999 at about 10 districts in Indonesia. Automatic equipments monitor 5 parameters (SO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, CO, NO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub>) continuously, and the status of air pollution is evaluated by the Pollutant Standard Index (PSI).

(Country reports)

- 1) "Air Pollution Study in Beijing 2002 by using NAA and PM<sub>10</sub> Particulates" by Prof. Bangfa Ni of China Institute of Atomic Energy. Particulate matter samples collected at Che Gong Zhuang, Beijing are analyzed by k0-NAA method. Around 45 elements per sample are determined by this method. Multi elements data are evaluated by enrichment factors, factor analysis and so on.
- 2 "Collection of Size Fractionated Particulate Matter Sample for NAA in Japan" by Tsunehiko Otoshi, Tohoku University of Community Service and Science, Japan. At two monitoring sites in Japan, particulate matter samples are collected for NAA. While higher concentration of coarse particulates is observed during spring season, average concentration of PM<sub>10</sub> during the common sampling period is 0.031mg/m<sup>3</sup> in urban site, and 0.022mg/m<sup>3</sup> in rural site.
- 3 "INAA of Atmospheric Particulate Collected in Hachioji and Sakata", by Dr.Yasuji Oura of Tokyo Metropolitan University, Japan. Particulate matter samples collected at two sites in Japan are analyzed by NAA. For the determination of Cr, Cl, and Br, impurity of blank filter should be considered, and blank values should be subtracted in calculation. Among elements determined, concentrations of Cl, Ag, Zn, Cu in individual size fractions are different between two monitoring sites. It depends on the difference in emission sources at each site.
- 4) "Elemental Quantification of Airborne Particulate Matter in Bandung and Lembang Regions", by Mr.Sutisna, Research and Development Center for Materials Science and Technology, Indonesia. NAA is applied to particulate matter samples collected at Bandung (urban) and Lembang (rural). In rural site, fine portion of particulates is dominant. However, in urban site, higher concentrations of coarse particles are observed. Enrichment factors of elements such as V, Br, and Cl differ depending on the season.
- 5) "Recent Application of NAA in Korea" by Dr. Yong Sam Chung of Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, Korea. Regarding activities of the project, air pollution study and preliminary experiments with an application of ko-method are carried out. Air particulate samples collected at two regions (suburban and industrial area of Daejeon city) are analyzed by NAA and concentrations of 25 elements in 50 filter samples are determined. Two certified reference materials (CRMs) distributed from Japan are used for analytical quality control. Higher mass concentrations of airborne particulate matters are observed during spring season due to Asian dust. Concentrations of black carbon are measured using reflectometer. For the evaluation of emission source for multi-element data, enrichment factors and correlation coefficients are calculated for fine and coarse particulates.
- 6) "Characterization of the Finest and Coarse Airborne Particulate Matter in Kuala Lumpur's ambient air" by Dr.Khalik Haji Wood of Malaysian Institute for Nuclear Technology Research (MINT), Malaysia. Particulate samples collected at the site about 1km from Kuala Lumpur City Center are analyzed by NAA method. Average mass concentrations of fine particulates of 0.031mg/m<sup>3</sup> are higher than those of coarse particles of 0.019mg/m<sup>3</sup>. High particulate concentrations which may be caused by haze episodes are not observed during the sampling period. Quality control of NAA is carried out using NIST SRM 1633a. Some elements such as Mn and Cr in fine portion of particulates indicate the presence of anthropogenic pollution sources around the monitoring site.
- 7) "Airborne Particulate Matter Collection and Analysis by XRF" by Ms.Flora Lopez Santos of Philippine Nuclear Research Institute (PNRI), Philippines. Particulate samples collected at three monitoring sites in Manila Metropolis are analyzed by XRF method. The sampling stations designated for the FNCA program are at a commercial area close to a major highway. PNRI is considering several options to resume reactor-related activities, and it is necessary to ensure continuing availability of expertise in NAA. Obtained data indicate the decrease of Pb concentration in fine particles because of the use of unleaded gasoline in Philippines.
- 8) "Study of Urban Air Pollution in Thailand" by Dr.Wanna Chueinta of Office of Atoms for Peace, Thailand. Particulate matters collected at downtown Bangkok are analyzed by NAA and 20 elements can be determined. Black carbon is one of major constituents of fine particulates. Quality control study of NAA using SRMs indicate that too small amounts of SRM size, say less than 1mg, may yield unreliable or highly uncertain values, especially for such elements determined by using

short-lived nuclides.

- 9) "Airborne Particulate Matter as a Demonstration using ko-INAA at Nuclear Research Institute of Vietnam" by Mr. Ho Manh Dung of Nuclear Research Institute, Dalat, Vietnam. Particulate matter samples collected at two monitoring sites (industrial site in Ho Chi Minh City, and rural site in Datch) are analyzed by ko-method.

About 28 elements for both sites are determined by ko-method. The ko-method has an advantage to simplify the routine calculation process in NAA. It is insisted that ko-NAA method works better than the conventional NAA using SRMs when evaluating emission sources, considering a higher reproducibility in the relationship between elements.

#### (General Discussion)

After the presentation of the above country reports, general discussion was held as follows;

- (i) Considering the importance of QA and QC in NAA, it was confirmed that some efforts related with QA/QC (inter-laboratory comparison, laboratory round robin test and/or validation of method) would be continuously made using the two CRMs provided and their results would be included in the country report at future workshops.
- (ii) Several opinions were exchanged for sampling methodologies and sampling sites of PMs. (It was decided to adopt "PM<sub>2</sub>" or "fine particles" instead of "PM<sub>2.5</sub>", considering a poor accuracy of the cut off of a Gent SFU sampler.)
- (iii) Future visions of researches using NAA and its needs related to marketing were discussed.
- (iv) It was emphasized that the utilization of ko-method would greatly improve the performance of NAA.

## 2. SUMMARIES OF KO EXPERIMENTS AND REPORTS RELATED WITH ko SOFTWARES

### (ko-method experiments)

A demonstration experiment of NAA using ko-method was performed. Although this was the first performance of the application of ko-method to real samples at BATAN, reasonable data were finally obtained for geological standard rock powder samples after tremendous efforts of Indonesian scientists. It may be mentioned here that the success of this demonstration experiment was achieved by an excellent collaboration of Indonesian and Japanese peoples. Especially, the contribution of Mr. F. Sasajima of JAERI was highly appreciated.

### (Reports related to ko-software)

- 1) "Demonstration of NAA ko-software, ADVNAA" by NI Bangfa, China Institute of Atomic Energy, China. A ko-software developed by the speaker at CIAE, which is named ADVNAA is demonstrated. Several features which are not admitted for the European software (KAYZERO/SOLCOI) are explained.
- 2) "Comparison of Chinese and European ko-software" by Fumio Sasajima, Japan Atomic Energy Research Institute, Japan. Two kinds of ko-software (KAYZERO/SOLCOI and ADVNAA) are compared by applying these software to environmental reference standard samples (NIST 1632c, NIES No. 8 and GSJ JB-1). Basically, there is no essential difference between analytical results obtained by them.
- 3) "Evaluation of CIAE-ko software" by Y. Oura, Tokyo Metropolitan University, Japan. A ko-software developed at CIAE, China, which is mentioned as ADVNAA above, is critically evaluated in comparison with a DSM ko-software (KAIZERO/SOLCOI). Being similar to the conclusion by Sasajima, no essential difference is found between two software.
- 4) "Development of ko-standardization method of NAA (ko-NAA) regarding software and experiment in Dalat Research Reactor of Vietnam" by Ho Manh Dung, Nuclear Research Institute, Vietnam. A ko-software developed by the speaker at NRI (Dalat) is demonstrated. By applying the ko-software to several standard reference materials including NIST-1632c and NIES-8, it is shown that the ko-method using the software and experimental procedure developed by the speaker is reliable and practical for air particulate matters.

### 3. FUTURE PROGRAMS

#### (1) Air particulate study

During 2002, each country achieved a satisfactory progress, as reported in country reports of air particulate study. Up to now, no apparent problems were admitted in conducting the program of air particulate study. Following such a promising situation, we have set the following plan for 2003.

- 1) We continuously collect and analyze air particulate matters according to the agreement at the 2001 FNCA workshop.
- 2) To summarize experimental outcomes of 2002, we agreed to prepare a joint report in which all data for air particulate matters collected in 2002 are to be included. We set several stages with their deadline as follows:
  - (i) (Stage 1; June 30, 2003) (*Submission of data and experimental conditions*) All data are to be reported to a responsible person in Japan, whose name will be announced later. At most, two sampling sites per each country. Each country is required to report all necessary conditions regarding sampling in addition to all analyses data (with errors). A type of analytical uncertainties needs to be specified. A format for describing sampling conditions will be distributed to each country. Thailand is responsible to prepare and distribute the format. Earlier submission is highly advised.
  - (ii) (Stage 2; August 15, 2003) (*Submission of comment/discussion*) Once all data are accommodated in one table (probably in EXCEL file), it will be sent to all persons who have sent their analytical data. Then, they are required to send scientific comments and discussions for compiled data to a NAA group leader (M. Ebihara).
  - (iii) (Stage 3; September 30, 2003) (*Finalization of draft*) A NAA group leader is responsible to appoint an appropriate person to organize all comments and discussions sent from contributors and finalize a report (reports). Modification of the draft can be done by communicating with each contributor by email.

#### (2) QA/QC

We have agreed to conduct some experiments related with QA/QC issue at the 2001 workshop. Unfortunately, only three countries (Korea, Malaysia, and Thailand) reported this subject at this workshop. We discussed again this subject and set a new plan for the year of 2003 as follows;

In order to evaluate uncertainties involved in analyzing a small size of sample like air particulate matters, a small-sized sample is to be analyzed repeatedly. For this purpose, 1 mg of two SRM sample (NIST 1632C and NIES No.8) is to be analyzed more than ten times. Either ko method or comparison method (or both) can be applied by using either chemical standards or other standard reference materials for obtaining absolute contents of elements.

Apart from this, a concern of impurities in filter papers was stated. This issue is also important in evaluating our QA/QC. Therefore, it is desired to analyze a blank filter occasionally

#### (3) Installation and development of ko-software

Following the discussion at the last workshop in Beijing, we continuously discuss a possibility of the introduction of ko-method to our project of air particulate matters. After extensive discussion, we came to the following conclusions;

- 1) Introduction of ko method in analyzing air particulate matters is highly desired in all participating countries. Note that the introduction of ko method includes installing of ko software and performing of experiment with use of the software.
- 2) Considering advantages and disadvantages for using a common software and individual softwares among our community, it was admitted that we would choose any appropriate software from three existing ko softwares; DSM version, CIAE version and Dalat version. The last two versions are so-called home-made softwares and their developers announced that these softwares could be distributed for inspection without any charge among participating countries of the workshop. Each country who wants to install these home-made softwares may contact directly to their developers for their installation and use.
- 3) At the next meeting, each country is supposed to present INAA data for air particulate matters calculated by using ko method.

- 4) In future, it is desired that a common software of ko method, which will be shared among our community, will be developed based on CIAE and Dalat versions. Their developers agreed to make effort to complete such a software.
- 5) It is requested that a training course for ko method is held, hopefully before the next workshop. It may be considered that such a course is attached to the next workshop although earlier opening is more practical and, hence, desired.

**(4) Others**

- 1) (Future activities) For future activities of the NAA group, the following themes were raised by participants:
  - (i) INAA of marine samples for heavy metals.
  - (ii) INAA of solid waste samples.
  - (iii) Application of NAA for mining.
  - (iv) Development of prompt gamma-ray analysis (PGA).

As the study of air particulate matters is expected to be performed without any problem among all the participating countries in coming years, we may extend our activities to some of the above listed themes in (near) future. Among them, the marine sample was suggested to be the most feasible subject for co-operative analysis of the NAA group. Detailed procedures may be discussed at the next workshop. In the meanwhile, some common samples are to be analyzed and their data are desired to be presented at the next workshop. Malaysia is responsible to prepare such samples and distribute them to all participating countries.

2) (The miscellaneous)

- (i) It is aimed that our analytical data are reflected in the environmental management policy. To make this successful and effective, we must make our best efforts to find any way to approach to appropriate officials, agencies, institute, etc, which are related environmental pollution problems.
- (ii) It is encouraged that participating countries actively apply for any exchange program like the former STA fellowship program to expand our activities within the frame of FNCA. The Japanese (sub)group-leader is requested to make an appeal to MEXT that such an exchange program is essential to promote the FNCA activity.

**4. WORK PLANS AND RECOMMENDATIONS BY THE 2002 FNCA WORKSHOP ON UTILIZATION OF RESEARCH REACTORS**

**(1) Work plans of neutron activation group**

In accordance with the FNCA "Proposal on the Next three year Activity in the Field of Utilization of Research Reactors" by the FNCA coordinator meeting on March 2001, the workshop agrees to make the following work plans and recommendations for the next workshop in the area of Utilization of Research Reactor to meet needs of the FNCA countries and to achieve results with socio-economic impact to end users.

- (i) Air particulate matters are to be continuously collected and analyzed in accordance with the agreement at the 2001 FNCA workshop. To summarize experimental outcomes of 2002, a joint report in which all data of air particulate matters collected in 2002 are included is to be prepared in 2003.
- (ii) At the next workshop, each country is supposed to present INAA data for air particulate matters calculated by using ko-method. In order to put this goal into practice, it is desired for a training course for ko-method to be held, preferably prior to the 2003 workshop or in connection with the workshop.
- (iii) Each country may choose any of DSM version, CIAE version and Dalat version as a ko-software when introducing the ko-method. However, it is highly desired that a common software be used among our community for assessing INAA data effectively and efficiently. Such a software should be developed in collaboration with each other of the NAA workshop members.
- (iv) Besides air particulate matters, marine sediment samples will be included within the scope of our activities. The term of 2003 will be used for working out our new strategy.

**(2) Additional remarks**

The workshop agrees that the following countries be proposed in the FNCA Coordinators Meeting as possible venues for the next year's workshop.

- (1) Vietnam as the hosting country for the workshop. Themes: 1) Application of NAA technology to the environmental analysis. 2) Information exchange on research reactors and their applications, and discussion on related topics.
- (2) Indonesia as the hosting country for the sub-workshop. Themes: 1) Establishment of the Tc Generator technology. 2) Application of Neutron Scattering technology for the development of TPE.

## 談話室

「第4回環境放射能・放射線一夏の学校」に参加して

東京農工大学留学生センター  
川端 良子

この環境放射能・放射線一夏の学校は、既存の学会の枠組みをこえて環境放射能・放射線関係の研究や仕事に興味を持っている人たちが集まり、勉強会、討論、レクレーション、懇親会をとおして一人一人の研究の活性化と、親睦をはかることを目的に1999年に始まった。今年度は、放射線医学総合研究所の白石久仁雄先生の主催で8月1～3日に箱根で開催された。

この学校は、若手研究者を育成することも重要な目的としているため、参加者全員が現在どのような研究を行っているかを発表する機会が与えられる。そして、多くの人から様々な質問がされる。といっても、決して意地悪なものではなく、研究を進展させていくための助言が中心である。卒論、修論を進めようとしている学生にとっては、はじめてのトレーニングの場として良い機会である。そのため研究室単位で参加されるグループも多い。

環境放射能は、医学、生物学、地球科学、農学、考古学など様々な分野に応用されており、モニタリング結果から何をひきだすかは、各研究者の視点により大きく異なる。そのため、参加者の専門分野も様々である。この点は、「放射化分析一夏の学校」とよく似ている。この点がどちらの研究会にとっても最も重要なことの一つだと思し、参加する大きな目的でもある。

そして、発表後の夜の懇親会も、活発である。話題は次々と変わりながらも、この環境放射能の分野をどのように発展していくかという議論が熱心に行われる。金沢大学理学部附属低レベル放射能実験施設にいた2000年の第2回から参加しているが、この夜の懇親会がもう一つの発表の場であるといつも思う。発表時よりさらにフランクに各自の研究について意見交換が行われ、いつの間にか時間が過ぎていく。雰囲気十分に伝えられず申し訳ないが、環境放射能に興味をお持ちの方は参加して損のない学校だと思ふ。

今年は、長崎大学が主催で行われる予定である。すべて手作りのため、まだくわしいことは決まっていない。興味をお持ちの方、御連絡いただけたら、詳細がわかり次第お伝えします。

## カレンダー

2003/4/7 – 11

Sixth International Conference on Methods and Applications of Radioanalytical Chemistry (MARC VI), Kailua-Kona, Hawaii, USA

<http://www.wsu.edu/~rflby/marc6.htm>

2003/7/9 – 11

第40回 理工学における同位元素・放射線研究発表会, 東京/日本青年館

<http://www.jrias.or.jp/jrias/index.cfm/4,1066,109,html>

発表申し込み締切: 2003/2/28

2003/6/2 – 6

14th International Conference on Radionuclide Metrology and its Applications, Dublin, Ireland

<http://www.ucd.ie/~icrm2003/>

発表申し込み締切: 2002/11/18

早期参加申し込み締切: 2003/4/30

2003/6/10 – 13

International Conference on Isotopic and Nuclear Analytical Techniques for Health and Environment, Vienna, Austria

<http://www.iaea.org/worldatom/Meetings/2003/infcn103.shtml>

発表申し込み締切: 2002/12/18

2003/10/1 – 3

2003年日本放射化学会年会/第47回放射化学討論会, 泉佐野市/泉の森ホール

<http://hlweb.rri.kyoto-u.ac.jp/shibata-lab/toronkai/>

2003/11/10 – 14

International Conference on Research Reactor Utilization, Safety, Decommissioning, Fuel and Waste Management, Santiago, Chile

<http://www.iaea.org/worldatom/Meetings/2003/infcn100.shtml>

発表申し込み締切: 2003/5/1

催しの情報がありましたら大浦(oura-yasuji@c.metro-u.ac.jp)までお知らせください。



## 編集後記

○放射化分析は、よく考えると実にやっかいな分析法です。普通の機器分析法であれば主体となる機器を身近において、何か不都合があれば機器を作ったメーカーに修理を依頼できます。修理ができないとなると新しい機器を購入する算段を始めることになるでしょう。放射化分析ではそういう自由さはありません。放射化するために用いる原子炉や加速器を身近におくことはなく、共同で利用することがほとんどだからです。その様な事情から来る不自由さをさほど感じないで済むのは、言うまでもなく、共同利用に携わる人々の努力のおかげです。本号で紹介されている東北大学の原子核理学研究施設は、本来は全国共同利用施設ではありませんが、本文で記述されているとおり、広く学内外に開放されています。このような、いわば手作りともいえるべき共同利用が成り立つのは、大学当局の理解もさることながら、施設と利用者の上に立つ施設研究者の献身的な努力があったればこそです。この共同利用の一利用者として感謝するとともに、これからもこの制度が維持・継続されることを心から願うものです。

○京大原子炉実験所の原子炉の将来に暗雲が立ちこめつつあります。考えたくないことですが、万が一の場合には、中性子放射化分析に利用できる研究用原子炉は原研の2基のみとなってしまいます。原子炉と同等の使用勝手は期待できないかもしれませんが、KEK-原研の共同で建設をすすめている大強度陽子加速器は次世代の中性子源として重要な位置を占めるものです。本誌で紹介されているとおり、分析用のビームラインを確保すべく、装置提案書が提出されましたが、現状では必ずしも楽観視できるものではありません。放射化分析研究会の会員の声をもって、是非とも実現させたいところです。

○行政改革の波が、ついに原研施設共同利用に及ぼうとしています。具体的には、原研?サイクル機構の統合（いわゆる J-J 統合、あるいは原子力2法人統合）による施設側の統合問題と国立大学法人化による東大原子力研究総合センターの将来問題です。この波がこれまでの制度の澱を洗い清めてくれるものとなるのか、それともこれまで築かれてきた制度の礎を弱体化するものなのか、大学に所属する原研炉ユーザーにとっては目の離せない問題です。放射化分析研究会としても静観視できない事態と受け止め、拡大幹事会を通して意見の集約をはかりつつ、行動を開始しました。その辺の状況はメールで逐次、会員の皆さまにもご紹介しており、この件に関しても積極的な支援を切にお願い致します。

(M.E.)

## 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」、不定期の「放射化分析研究会ニュース」、および電子メールです。

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め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。

### 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、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などを掲載します。

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:

会員の気軽なおしゃべりの場です。要望、話題、新刊紹介、その他、どのような内容でも結構です。

### 若い声:

学生や着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

#### 論文紹介(発表論文アブストラクト)

会員から届けられた論文別刷りを元に、発表された学術論文のタイトルとアブストラクトが随時掲載されます。

博士・修論文の要約も掲載します。

### 会員名簿

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添付して下さい。

(ファイルはMS-DOSのテキスト又はMS-WORD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)

## 電子メーリングシステム

会員及び幹事会の電子メールアドレスが、下記のエイリアスに登録されています。  
これを用いて会員相互の交流・意見交換を促進していきます。

会 員 : [JA3@kaihoken.tokaijaeri.go.jp](mailto:JA3@kaihoken.tokaijaeri.go.jp)

幹事会 : [JA3-kanjikai@kaihoken.tokaijaeri.go.jp](mailto:JA3-kanjikai@kaihoken.tokaijaeri.go.jp)

JA3@kaihoken.tokaijaeri.go.jp に発信すれば、(電子メールアドレスが登録されている)会員全体に配信されます。幹事会・事務局への連絡・要望等は  
JA3-kanjikai@kaihoken.tokaijaeri.go.jp に発信して下さい。

メールアドレスを持っているけれど、事務局等からの電子メールを受け取ったことの無い会員は、アドレスがエイリアスに正しく登録されていない可能性があります。お心当たりの方は事務局宛ご連絡下さい。入力を修正します。

### 放射化分析研究会

事務局 319-1195 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

E-mail: [JA3-kanjikai@kaihoken.tokaijaeri.go.jp](mailto:JA3-kanjikai@kaihoken.tokaijaeri.go.jp)

Home Page: <http://kaihoken.tokaijaeri.go.jp/JA3.htm>

#### 幹事

海老原 充

大浦泰嗣

大槻 勤

岡田往子

片山幸士

上岡 晃

川端良子

中西友子

澤幡浩之

関 季紀

高田實彌

松尾基之

榎本和義

福島美智子

宮本ユタカ