

第4部 研究支援

1. 環境試料等分析技術

1.1 整備した測定装置の概要

平成3年度にGe半導体検出器、平成4年度に微量元素の分析用に質量分析装置がそれぞれ1台整備されて以降、徐々に各種分析装置を整備し、令和4年度現在、環境影響研究部では様々な分析装置を運用・管理して

いる。整備した機器は、再処理施設から排出される放射性物質の環境影響や環境中移行に係る、青森県からの受託調査のための環境・生物・食品等の放射性核種及び安定元素の分析に活用している。表1には、保有する代表的な測定器を示した。

表1 環境影響研究部が管理・運用している主な測定器（令和4年度現在）

装置名	設置場所	主な使用目的
四重極型 ICP 質量分析装置	本館 3F クリーンルーム	微量元素分析
	全天候 3F クリーンルーム	微量元素分析
	全天候 RI 区域	長半減期放射性核種
高分解能型 ICP 質量分析装置	本館 3F クリーンルーム	精密同位体比分析
ICP 発光分光分析装置	本館 2F	元素分析
Ge 半導体検出装置	本館 1F	γ線放出核種分析
	全天候 RI 区域 (4台)	
蛍光X線分析装置	全天候 2F	元素分析
X線回折装置	全天候 2F	鉱物組成
ガスクロマトグラフ質量分析装置	全天候 2F	微量有機化合物分析
イオンクロマトグラフ	全天候 2F	陽イオン・陰イオン分析
	生態系研究施設 1F	
希ガス測定用質量分析装置	全天候放射線管理区域	OBT 分析
液体シンチレーションカウンタ	全天候放射線管理区域 (3台)	β線放出核種分析
α線スペクトル分析装置	全天候放射線管理区域 (2台)	α線放出核種分析
オートウェル・ガンマシステム	全天候放射線管理区域	γ線放出核種分析
イメージングプレート	全天候放射線管理区域	b・γ線放出核種分析
ガスクロマトグラフ	生態系研究施設 1F	重水素分析
元素分析装置	生態系研究施設 1F	水素・炭素分析
	全天候 2F	
炭素同位体比分析装置	生態系研究施設 1F	¹³ C/ ¹² C (炭素同位体比) 測定
安定同位体比分析装置	生態系研究施設 1F	D/H (水素同位体比) 測定

1.2 放射性物質の測定

環境や食品試料中放射性核種の濃度レベルは極めて低いことが多く、濃縮や精製と行った様々な化学処理を行った後、 α 線スペクトル分析装置、低バックグラウンド液体シンチレーションカウンタ、Ge 半導体検出器等の放射線検出器を用いて測定している。 α 線スペクトル分析装置(図1)は、主に天然放射性核種であり、環境中に比較的高濃度で存在し、ヒトの内部被ばく線量に大きく寄与する ^{210}Po の分析に使用している。



図1 α 線スペクトル分析装置

^3H は β 線を放出する放射性核種であり、当該施設の通常稼働時に排出される主要な放射性核種の一つであることから、その測定のために平成11年度に低バックグラウンド液体シンチレーションカウンタを整備して以降、更新と増設を行い、令和4年度現在3台の測定器を保有しており、これまでバックグラウンドレベルの環境試料中 ^3H の測定を継続的に実施している。

Ge 半導体検出器(図2)は、放射性Cs等の γ 線放出核種測定に使用する装置であり、環境研に初めて整備された平成3年度以降、環境や食品試料中 γ 線放出核種の測定に利用している。令和4年現在、比較的広い範囲の γ 線エネルギーを測定できる検出器や少量の試料でも測定できる井戸型タイプなど合計5台の検出器を保有している。植物や食品などのように試料中濃度が極めて低い試料の測定の際には、全天候施設内に整備した中型灰化装置を用いて、時には数kgの試料を灰化して数十~数百倍に濃縮した試料を測定して、バックグラウンドレベルの濃度測定に対応している。



図2 Ge 半導体検出装置

放射性Cs等の γ 線を放出する核種を用いたトレーサ実験で得られる比較的高濃度の高い試料の分析には、オートウェル・ガンマシステムを用いるなど、濃度レベルに応じて測定器を使い分けている。

半減期が1,000年を超える放射性核種の分析には放射線測定よりも質量分析の方が感度が良いことから、特に低濃度の長半減期核種の分析についてはICP質量分析装置を用いている。環境研では4台所有するICP質量分析装置(図3)のうち、1台を放射線管理区域内に設置し、環境試料中の ^{99}Tc 、 ^{226}Ra 、 $^{239,240}\text{Pu}$ のほか、 ^{129}I を用いたRIトレーサ実験で得られる試料の分析に対応している。



図3 四重極型 ICP 質量分析装置

少し変わったところでは、有機結合型トリチウム(OBT)の分析の一部に希ガス測定用質量分析装置(図4)を用いている。通常OBTは、試料を燃焼させ、試料中の ^3H を燃焼水として回収した後、液体シンチレーションカウンタで測定する。環境研では、この方法の他に、試料中OBTのT(^3H)が β 崩壊した後にできる ^3He を希ガス測定用質量分析装置で測定するシステムも所有している。



図4 希ガス測定用質量分析装置

1.3 安定元素の測定

放射性物質の環境中での挙動のより深い理解や安定同位体を用いた実験のために、安定元素の分析も実施している。

前者のためにはH、C、Nといった主要元素を測定する元素分析装置、微量元素を測定する質量分析・発光分光分析装置、陽イオン・陰イオンを測定するイオンクロマトグラフ等を使用している。

後者では、放射性核種を用いることができない一般環境や室内環境における大規模な実験やヒトを対象とした代謝実験において、放射性核種の代わりに重水(D)、¹³Cをはじめ、Sr、Cs、Iなどの安定元素(安定同位体)を用いた実験を行い、そこで得られた試料の分析を安定同位体比分析装置及び質量分析装置等を使用している。

1.4 実験・測定の環境

環境・食品試料及び安定元素を用いたトレーサ実験で取り扱う放射性核種や安定元素の試料中濃度レベルは、極めて低いことが多く、前処理及び測定を通常の実験室内で行うと、空気中の塵や埃などが試料に混入する汚染が起り、正確な定量が困難になる。

これに対して、環境研では、空気中の塵や埃などの粒径0.15 μmの粒子に対して、99.9%以上除去するフィルターを通過した空気を導入する局所排気装置(クリーンドラフト)4台を本館内に整備し、試料の酸分解等の前処理のほとんどをこれらのクリーンドラフト内で実施している。前処理した試料を測定器に導入す

るために必要な試料溶液の希釈等の試料調製は本館のクリーンルーム内で実施している。さらに、試料の前処理や調製、並びに機器の洗浄には超純水を使用している。特に、最終的な調製に使用する超純水や試薬は純度の高いものが求められるため、超純水製造はクリーンルーム内で行い、使用する試薬も超高純度の製品を使用している。調製済み試料の測定には、本館及び全天候施設内のクリーンルームにICP質量分析装置を用いることで、ppt(10⁻¹² g/g)オーダーの濃度レベルの分析を可能としている。

1.5 放射性核種及び安定元素の分析例

1.5.1 α線放出核種

六ヶ所村の大型再処理施設において大量に取り扱われるプルトニウム(Pu)の当該施設稼働前のバックグラウンド濃度レベルとその分布を把握するために、平成13年度～平成23年度及び令和3年度以降、青森県や六ヶ所村内の土壌や湖沼・海洋堆積物中の²³⁹⁺²⁴⁰Pu濃度及び²⁴⁰Pu/²³⁹Pu同位体比の分析を四重極型ICP質量分析装置を用いて行っていることに加えて、当該施設の方が一事故時で放出されるPuの迅速分析法の開発も行ってきた。

U系列に属し、ヒトやヒト以外の生物種の内部被ばく線量に大きく寄与する²¹⁰Poを測定しており、ヒトに関しては、六ヶ所村で生産された食品や青森市及び六ヶ所村の調査協力者から入手した調理済み食事(日常食)を入手し、青森県における食品摂取による内部被ばく線量率の推定を行い、大型再処理施設の稼働に伴い排出される放射性核種による被ばく線量率の対照となるバックグラウンド線量の推定に役立てた(平成18年度～令和22年度及び令和3年度以降)。

1.5.2 β線放出核種

環境試料や食品試料中の³H濃度は極めて低いため、これらの試料から得られた水分中³H(自由水型トリチウム)を直接測定できないことから、平成13年度から導入した³Hの電解濃縮装置を用いて試料中³H濃度を数倍濃縮し、その試料を低バックグラウンド仕様の液体シンチレーションカウンタで測定することで、バックグラウンドレベルの環境試料中³Hの測定を年間約600

試料実施している。

地域主要農水産物への移行・残留性の調査では、魚類を対象とした放射性ヨウ素 (^{129}I) を用いたトレーサ実験を実施しており、飼育に使用した海水や得られた魚試料中の ^{129}I を全天候施設の管理区域内に整備した四重極型 ICP 質量分析装置を用いて測定している。

1.5.3 γ 線放出核種

Ge 半導体検出器による環境試料中 γ 線放出核種の測定には、1 試料あたり 1 日～数日必要であるが、環境研では複数台の測定器を使用することで年間 200～300 試料を分析している。平成 23 年 3 月に起こった福島第一原子力発電所事故では、直後から青森県、岩手県、福島県、宮城県などの自治体からの放射性 Cs 等の分析依頼があり、水道水や生乳等の試料では即日分析値を回答するなどして、各自治体からのリクエストに柔軟に対応した。さらに、弘前大学からの分析依頼、並びに研究機関 (JAEA) からの委託分析を含めると、当該事故関連の依頼分析は平成 29 年度までの約 6 年間で計 2,773 試料であった。

全天候施設内の放射線管理区域内において実施している ^{137}Cs や ^{125}I を用いた土壌・植物や魚類を対象としたトレーサ実験の試料は、これらの核種の濃度が比較的大きく、試料数も多いことから、これらの測定には、オートウェル・ガンマシステムを用いている。

1.5.4 安定元素

淡水の溶存態試料では、H から Bi までの希ガスや放射性核種を除く 77 元素中 72 元素に加えて、Th や U といった長半減期核種を測定できる体制を整えおり、極低濃度の元素分析技術を環境や食品中の元素分析に応用している。例えば、大型人工気象施設を用いた牧草、

ハツカダイコン、リンゴ等の植物における Sr、Cs 及び I の葉面吸収やウエザリング効果を調べる調査では、これらの安定同位体を植物体に降雨や霧等の状態で植物体表面に負荷し、植物体内中における残留を調査したが (平成 18 年度～)、ここで得られた試料の分析には、四重極型 ICP 質量分析装置を用いている。ヒラメ等の水産物を対象とした ^3H の移行・残留性の調査では、 ^3H の代わりに重水素 (D) を用いた海水ばく露や摂餌実験を行い、飼育に使用した海水や得られた水産物試料等の D 濃度を安定同位体比分析装置を用いて測定した。

加えて、ICRP が報告するヒトの ^3H や ^{14}C の預託実効線量係数を求める調査 (平成 27 年度～令和元年度) では、これらの放射性核種の代わりに D や ^{13}C を含有した食品を調査協力者に投与し、排泄物や毛髪中濃度を安定同位体比分析装置を用いて測定した。さらに、令和 2 年度から開始した HT 型トリチウムの酸化活性に関する調査では、環境研内圃場及び六ヶ所村内畑地において水素の土壌への沈着速度や酸化速度を得るために、重水素 (D_2) ガスをチャンバー内に通流し、チャンバー内の空気中 D 濃度をガスクロマトグラフを用いて測定している。

加えて、人材育成の一環として、主に大学院生の実習生を受け入れ、分析技術全般、即ち、試料の前処理、化学分離、ICP 質量分析装置や安定同位体比分析装置等を用いた機器分析について、手法取得や技術向上のサポートを行っている。

1.6 運用体制

これらの測定装置及び実験室の維持・運用及び分析試料の調製に係る前処理作業には、環境影響研究部に所属する研究員のほか、サポートする派遣職員により実施している。