

NMCC の PIXE を用いた問題解決型研究と そのための独自の技術開発

世良耕一郎¹、後藤祥子²、細川貴子²、齊藤義弘²、二ツ川章二³、
寺崎一典¹、佐々木敏秋¹

¹岩手医科大学医歯薬総合研究所高エネルギー医学研究部門（サイクロトロンセンター）
020-0603 岩手県滝沢市留が森 348-58

²日本アイソトープ協会滝沢研究所
020-0603 岩手県滝沢市留が森 348-1

³日本アイソトープ協会
113-8941 東京都文京区本駒込 2-28-45

1 NMCC の PIXE

仁科記念サイクロトロンセンター(NMCC)においては、1993年4月より陽電子核医学(PET)とイオン励起 X 線分析法(PIXE)が全国共同利用に供され、PIXEにおいては14万以上の試料分析が行われてきた^{1,2,3}。NMCCのPIXEの一つの特徴は、人々の生活に関わる「問題解決型研究」に広く応用され、特に環境問題の解決のための具体的対策立案に貢献してきたことである。その役割を果たす必要条件是、「全ての試料の定量分析可能」であることであり、そのための技術開発が行われてきた。一例として有害元素による広域的汚染問題を挙げよう。

まず汚染源、汚染経路の同定のため、鉱石、土、尾鉱、粉塵、灰、河川水、地下水、植物、などの多種試料の定量分析が必要だが、それが全て可能な施設は少ない。さらに人体曝露経路の同定のために、飲料水、農作物、家畜の乳・肉、魚類、エアロゾルなどの分析が要求され、また人体曝露の実態調査のために、毛髪、爪、尿、血液など、人体から採取される試料の分析が必要である。健康影響を評価するためには定性分析では意味がなく、定量的評価 = 定量分析が求められる。先進国であれば、このような多種試料の分析を複数の施設を利用して行うことも可能であるが、汚染現場である途上国においてはそれが難しく、一つの施設の協力があれば全ての試料の分析が可能となる所謂「one stop center」の協力が、問題解決のためには不可欠である。

NMCCは唯一の one stop center として global な環境問題を手掛けてきた。海洋生態系の破壊、地球規模の大気汚染、酸性雨、塩害、海洋浸食など多くの問題に携わってきたが、その中でも東・東南アジアにおける有害元素による広域的環境汚染問題に力を入れて取り組んできた。井戸水由来のヒ素汚染問題においては、中国で200万人、バングラデッシュに2000万人、インドに1000万人など、数千万人の中毒患者が存在する。我々は、中国におけるヒ素・フッ素中毒実

態調査のために毛髪を中心とした数千試料⁴、インドにおいてもヒ素曝露評価のために数百試料⁵、バングラデッシュにおいては5千を超える毛髪試料と、千以上の環境試料（水、農作物、果物、養殖魚等）の分析を行い⁶⁻¹³、実態調査と対策立案に貢献してきた。さらに中国におけるフッ素汚染問題は1億人の中毒患者を生み出していると言われている。その中の3/4はヒ素同様汚染した井戸水由来、残りの1/4が主に貴州省における粗悪な石炭燃焼に由来するものである。後者に関しPIXEで数千の毛髪試料の分析を行い、中国におけるフッ素中毒患者の大半がヒ素中毒も併発していることを確認した。質の悪い石炭中にはフッ素の他にヒ素・マンガンなどの鉱山性有害元素が多く含まれ、複合曝露となる場合が多い¹⁴。

また広域的水銀汚染の原因として問題視されているのが **Artisanal Small-Scale Gold Mining (ASGM)** である。これらは非合法の私的な小規模金鉱山であり、世界の金市場の13%がこれらから生産されていると言われている (**Black market** を通じて世界市場に流れている)。全世界で1000万人以上の貧しい人々がASGMで生計を立てていると言われており、直ちに禁止できない事情がある。**Black market** は原石のままでは買い取ってくれないため、人々は自ら精錬を行わなければならない。多の場合、コストの安い「アマルガム法」を用いるため多量の水銀が必要になる。最後の過程で金を取り出す目的でアマルガムを熱するため、発生する水銀蒸気が大気汚染の原因となる。残りの尾鉱にも多量の水銀が含まれ、土壌・河川水などを汚染させている。その現状が改善されないのは、各国政府が非合法であることを理由に対策を講じないからである。我々は、フィリピン¹⁵⁻²⁰、モンゴル²¹⁻²⁷、インドネシア^{28, 29}におけるASGMの問題を手掛け、問題解決のために貢献してきた。

これら4大 **pollutants** 以外の汚染問題にも多く携わってきた。例を上げれば、カザフスタンにおいてはアラル海の縮小問題が環境破壊をもたらし、20世紀最大の環境破壊とも言われているが、子供たちに発生した未知の風土病の原因調査のため、アラル海に近いカザリンスクの子供たち、及び同一民族でアラル海の影響を受けない地域の子供たちそれぞれ400人から毛髪を採取・分析し比較検討したところ、塩湖であるアラル海の干上がりによる塩害の影響で、体内元素バランスが大きく変化していることがわかった^{30, 31}。また東南アジアにおける森林減少の問題に関しては、マングローブの森や森林伐採の一因である岩塩精製のための塩田における塩の変色の問題³²、塩害の森林への影響³³などにも携わってきた。

このように我々が多くの国際環境協力を求められているのは、NMCCが **one stop center** の機能を備えていることによる。そのためアジアの環境問題を手掛ける国際機関 **CCOP (Coordinating Committee of Geoscience Programmes in East and Southeast Asia)** は、NMCCを唯一の公的分析機関と認めている。我々が **one stop center** と成り得たのは、今まで積み重ねてきた技術開発に負うところが大きい。共同利用開始にあたっては物理的定量法の確立と、内部標準法適用のための試料調製法の確立が急務であり、理論計算・スペクトル解析・定量解析のためのプログラム作成が求められた^{34, 1}。共同利用開始後、応用分野が医学中心から歯学・獣医学・栄養学・薬学などの **life science** 全般に広がり、さらに地質・鉱物学、材料工学、環境科学など **life science** 以外の分野に広がるにつれて、試料の性状も多様化してきた。特に地球科学系試料は重金属主体であり、従来の手法では高精度・高感度分析が不可能であった。

このような千差万別の性状の試料に対応するために、さらなる技術開発が求められた。それらは地球科学試料の高感度分析のための「特殊吸収体³⁵⁻³⁷」、さらに高精度分析のための「粉末内部標準法³⁸⁻⁴¹」、無調製の生物試料を分析するための「無標準法^{42, 37, 43}」、真空での分析が不可能な試料のための「大気PIXEにおける定量分析法^{44, 45}」の開発などである。粉末内部標準法の開発により地球科学試料の定量分析の精度が著しく改善され、特殊吸収体により重元素主体の試料中の他の微量重元素に対する感度が2桁改善された。また無標準法は毛髪・血液などの体液・臓器・筋肉、植物、微小昆虫などの定量分析に広く応用され、手を加えない1 μg ほどの

試料の定量分析を可能にした。また大気 PIXE においては、「生きたままの植物試料の定量分析⁴⁶⁻⁴⁸⁾」が可能となり、ビーム照射に伴う多数の元素の大きな経時変化が観測された。以下、それらの技術開発に関し詳しい紹介を行う。また、我々の PIXE は日常的な問題解決に関しても貢献してきた。第 3 章においてそれらを詳述する。

2 NMCC における独自の技術開発

2.1 粉末内部標準法

地球科学・環境科学試料においては、重元素が主成分の粉末試料分析需要が非常に大きい。それらは粉末化した鉱石、岩石、土、砂、堆積物、河川の不溶成分、降下物、灰、などである。粉末内部標準法³⁸⁻⁴¹⁾は粉末状の内部標準を粉末同士で均一化するもので、これらの重元素マトリクス試料から元素を抽出することなく定量分析を行うことができる。粉末内部標準としてはパラジウムカーボンが用いられるが、その利点は以下のとおりである。① 4 μm 以下の微細粉末で試料と均一になり易い、② 漆黒の粉末のため、試料との均一性が確認し易い、③ パラジウムが 5% に調整されているため、微量を正確に秤量できる。Fig.1 に、本法を用いた試料調製の手順を示す。本法は多くの粉末試料に対し、正確で再現性の良い結果をもたらすことが確認されている。

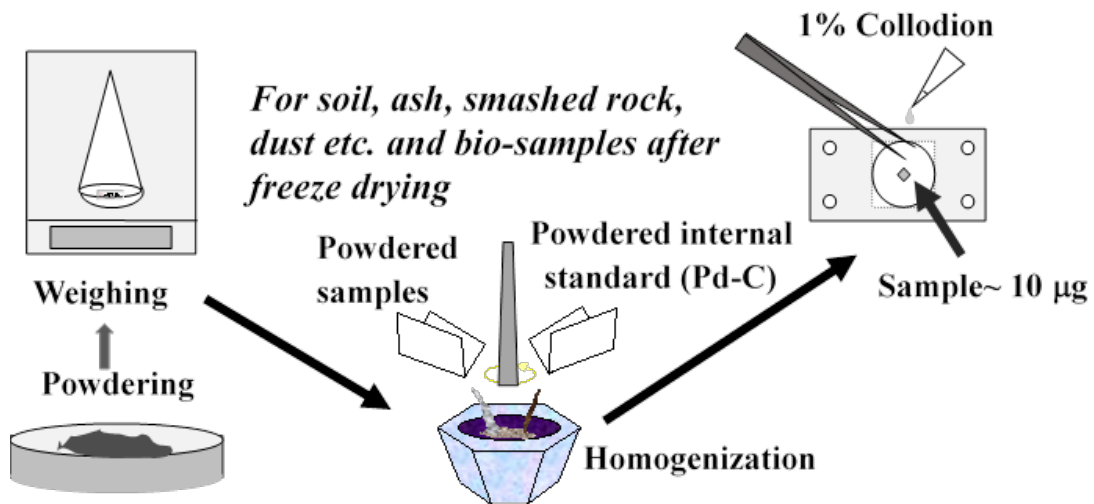


Fig.1. Procedures of the target preparation based on the powdered- standard method.

2.2 特殊吸収体と吸収体透過曲線測定法

共同利用開始当時、工学試料、鉱物・地質学試料などの高 Z マトリクス試料に対しては、主元素からの強烈なピークが計数率を支配し、またその pileup などの artifact の出現のため、他の重元素に対する感度が非常に悪かった。それが X 線 spectrometry を利用する分析手法の共通の欠点であり、化学分離などの手法を併用し主元素を除去する必要があった。しかし共同利用が進むに連れ応用分野が広がり、そのような PIXE には不利な試料の分析需要が急増した。例えば鉱物学試料の閃亜鉛鉱などは亜鉛濃度が 65% 以上であり、他の重元素の感度を著しく悪化させていた。また半導体中の不純物の測定も同様であった。特に鉄を多量に含む試料は地球化学、環境科学系試料の多くを占め、医学においても全血・血球・肝臓などの試料に対しては、突出する

鉄のために他の重金属に対する感度・精度が悪化していた。

我々は、光電効果断面積における金属の吸収端を利用し、特定の元素からの X 線ピークのみを減じ、他元素の感度を向上させる「特殊吸収体」を開発した³⁵⁻³⁷。巨大な主元素からのピークを数桁減じるためには金属吸収体の厚さも 10 mg/cm² 以上必要になり、その吸収のため K~Mn までの分析感度が悪化する。その対策として通常のプラスチック吸収体と金属膜を併用し、プラスチックには 2~3 mm の hole を、金属膜には 100 μm ほどの pinhole を空ける複雑な設計となった。この吸収体により、スペクトルの全領域において均一な感度を得ることができる。Fig.2 には、鉄主体試料に対する特殊吸収体の構造とそのスペクトル上での効果を示す。試料は湖底の堆積物であり、a) は通常の 500 μm-Mylar 吸収体により得られたもの、b) が特殊吸収体を用いて得られたものである。通常の吸収体では、Fe ピークと連続 X 線等のパイルアップのため高エネルギー領域でバックグラウンド (BG) が増加し、2~3 の元素のピークと pileup peak のみが観察されるが、特殊吸収体を用いると Fe ピーク強度を 2 桁減じることができ、高エネルギー領域における BG・アーチファクトが著しく減少し、重元素に対する感度が 2 桁改善された。その結果、多くの重元素分析が新たに可能となった。

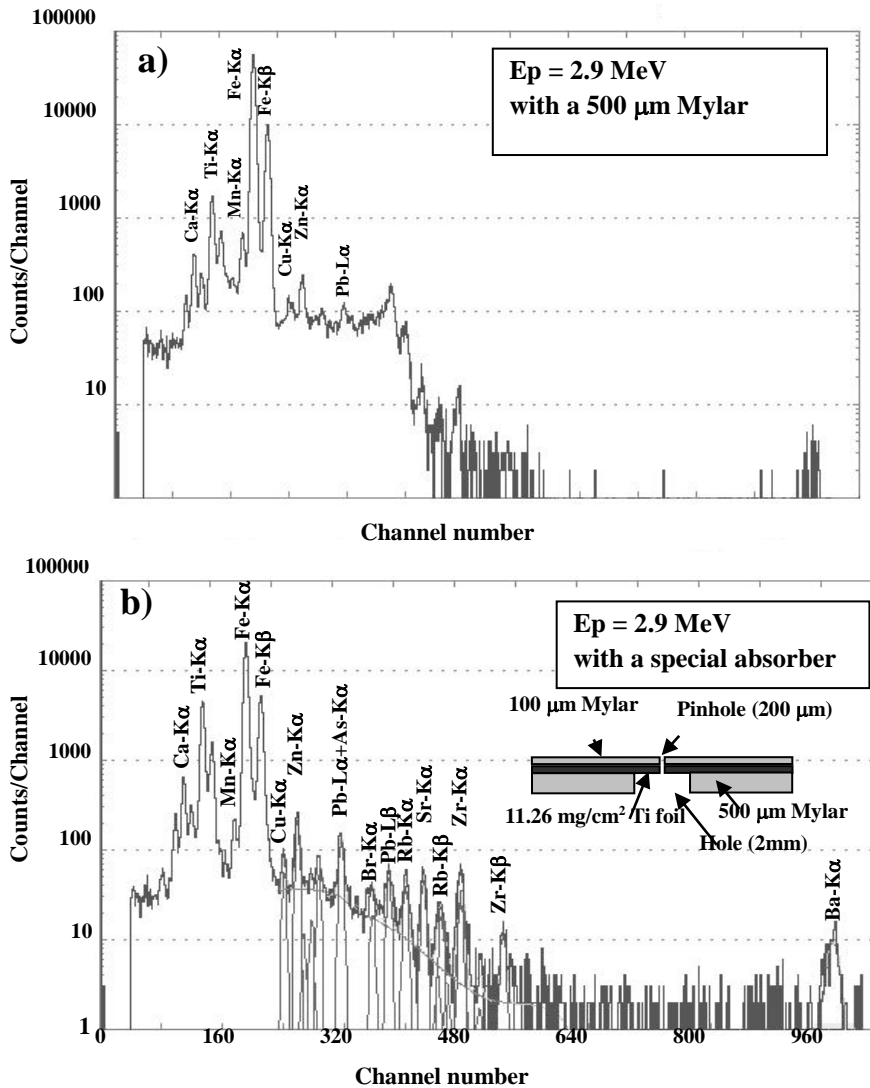


Fig.2 The effect of a specially designed absorber using a sample of a river deposit. These spectra were obtained with an ordinary 500 μm-Mylar absorber (a), and with a specialized absorber for iron-rich samples (b), with the structure of this absorber shown in the figure.

このような試みは他の施設でもなされていたが、特殊な構造を持つ吸収体の応用は定性分析に限定されている。その理由は、このような複雑な構造を持つ吸収体の透過曲線を求めることが極めて困難だったからである。我々は、いかなる複雑な構造を持つ吸収体であっても同一の簡単な手順で正確な透過曲線を求める方法、及び **computer program** を開発した⁴⁹。同法は、スペクトル上で吸収体による減弱効果のない高エネルギー γ 線の Compton 散乱に因る BG の寄与を差し引いた後、吸収体あるなしのスペクトル同士を直接除算し、全領域における透過曲線を一挙に求める方法であり、これはどのような複雑な構造を持つ吸収体にも適用可能である。Fig.3 に、鉄主体試料に用いられる特殊吸収体の構造と、上記の方法で求められた検出効率曲線を示す。この吸収体は医学・生物学試料にも日常的に応用されている。

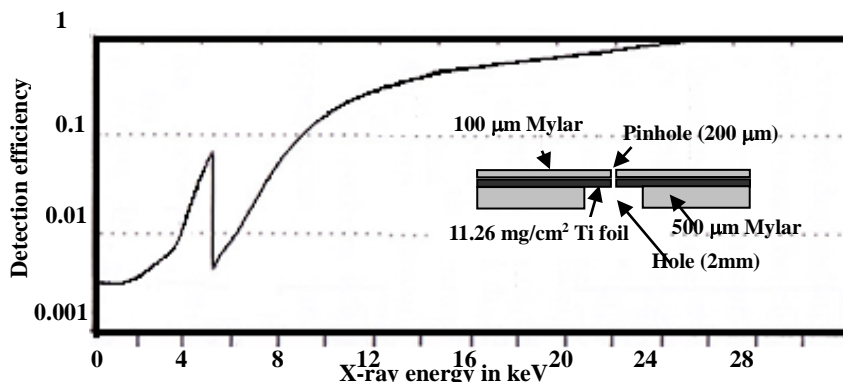


Fig.3 Transmission curve of the specially designed absorber used in Fig. 2-a).

2.3 生物試料に対する無標準法

生物試料の中には、定量分析に必要な量を確保することが難しいものも多い。生検で採取する臨床検体、小実験動物の小臓器、小動物から連続採血された微量血液、数 μg 以下の微小昆虫や微小海洋生物などがそれにあたる。これらは内部標準法を適用するための正確な秤量が難しいため、定量分析が不可能であった。しかし PIXE の絶対感度は非常に高く、 $1\mu\text{g}$ の試料中の 10 ppb の元素のピークも明確に観察されるため、問題は「如何に絶対値を求めるか」のみに絞られる。また毛髪試料など、内部標準法を適用するための試料調製に非常に手間がかかる試料も多い。毛髪の場合、多くが有害元素による体内曝露評価の環境研究のための分析需要であり、それらの試料の特徴は数が多いことである。一度の試料採取で数百という試料が採取され、それらの短期間内での定量分析が求められることが多い。さらに血液、尿などの体液試料は生のままでの国際間輸送に制約があり、それらを用いた国際環境協力も困難であった。我々は生物試料に対する **standard-free method** (無標準法) を開発し^{42, 43}、その結果これらの試料の定量分析が可能になり、試料調製の手間も著しく軽減され、試料調製に伴う不確定要素も排除され、生命科学研究の自由度を大きく広げることに成功した。また、尿などの体液試料も現地でバックリング膜上に一滴滴下し乾燥させることにより、国際間の輸送が容易になるという利点も生じる。

無標準法は、試料から発生する連続 X 線の収量を利用する。PIXE の入射エネルギー、スペクトル領域における連続 BG 成分は 4 種類あることが、石井等⁵⁰により解明されている。それらは、①二次電子制動放射線：Secondary Electron Blemstrahlung (SEB)、②疑自由電子制動放射線：Quasi-free Electron Blemstrahlung (QFEB)、③原子制動放射線：Atomic Blemstrahlung (AB)、そして④入射粒子から直接発生する制動放射線：Nuclear Blemstrahlung (NB) である。実際のスペクトル上にはこれらに加え、上述の高エネルギー γ

線による Compton tail も加わる⁵¹。低～中エネルギー領域においては①～③の寄与が大半を占め、それらの全収量は一次近似において試料数の電子数に比例し、それは試料の重量にほぼ比例する。そのため適当な領域を指定しその中の連続 X 線収量に対する特定元素（指標元素）ピーク収量の比を取れば、それはほぼその元素濃度に対応する⁴²。実際は、試料の組成に応じ平均原子番号が異なり、そのため軌道電子の速度分布が異なり連続 X 線のスペクトル上での形状が変化するため、同法は同じマトリクスを持つ試料の種類毎に確立されなければならない。我々は血液・血清^{42, 52}、毛髪^{53, 54}、尿^{55, 56}、爪^{57, 58}、髄液^{59, 60}、臓器・軟組織^{61, 62}、汗・唾液・涙などの体液^{63, 64}、に対する無標準法を次々と開発し、それらは life science や環境科学などの多くの試料に利用されている。Table1 に同法が適用可能な生物試料を一覧で示す。

Table 1 Samples able to be analyzed using the standard-free method.

Classification	Sample
Body fluids	Urine, blood, serum, plasma, saliva, sperm, sweat, tears
Human soft and hard tissues	All internal organs, brain, muscle, lymph node, skin, mucous tissue, hair (head and body), nails
Animals	The same specimens as in human, as well as hooves, feathers, down, and scales. Parts of mosquitoes and other small insects, crustacean, small eggs
Plants	Leaves, stems, seeds, roots, pollen, farm products

同法の開発により定量分析が可能となり研究に供された微小試料としては、患者から生検で採取された臨床検体^{61, 62, 65}、1～10 µg ほどの微小昆虫・微小甲殻類⁶⁶、マウスから連続採血された血清^{67, 68}等がある。また試料にまったく手を加えないため生きたままの植物試料の定量分析も可能となり⁴⁶⁻⁴⁸、代謝の変化に伴う元素濃度の経時変化も観測可能となった。

その他、共同利用を提供するために、試料調製、測定、データ解析、定量法における種々の基本的技術開発が行われたが、それらに関しては同報文集別稿、参考文献 1)「過去 25 年間にわたる NMCC の PIXE 共同利用」を参照されたい。

3 独自に開発された技術の環境科学研究への応用

共同利用開始とともに、大気環境試料の分析需要が急速に高まった。試料の大半はフィルタ一上に均一又は spot 状に採取された aerosol（大気浮遊粉塵）である。近年 aerosol を粒径別に分析する必要性が高まっているが、インパクターにより採取された試料は粒径に依存し均一又は spot 状試料となる。我々は両形状の試料に対しそれぞれ「外部標準法」の開発を行った⁶⁹。これも内部標準法と同じく 1 元素濃度の絶対量を外部標準との比較で、均一試料に対しては ng/cm²、spot 状試料に対しては ng の単位で求め、他の元素に対しては 3 つの物理量（X 線発生断面積、吸収体の透過率、検出効率）から絶対濃度を相対的に求める手法である。本外部標準法は現在まで 2 万を超える aerosol 試料分析に応用されている。さらに大気環境試料としては、雨、雪、霧、樹氷、樹幹流、地衣類、山岳における池塘の底質等、多様な試料の分析が NMCC において行われているが、これら全ての定量分析が可能なのも NMCC の PIXE の特徴である。

上述のように、一般の環境問題、例えば有害元素による広域的汚染問題に対処するためには、あらゆる試料の定量分析が必要になる。我々は be a one stop center を目標とし、以下の slogan を掲げた。1) 朝試料をお持ちになれば、夕刻には結果をお渡しします、2) 全ての試料の定量分析が可能です、の二つである。1) は、PIXE の基礎を知らない利用者気軽に使うため

にかがげ、2) は環境問題解決のために不可欠な one stop center としての機能を有することをアピールするものである。

そのため国内外の様々な環境問題を手掛けることとなった。特に東・東南アジアにおける環境問題においては上述の技術開発の成果がフルに発揮され、one stop center としての役割を果たしてきた。中でも「毛髪試料に対する無調製・無標準法^{53, 54)}」は、主に有害元素体内曝露評価の目的でアジア各国の住民から採取された 4 万以上の毛髪分析に応用されてきた。毛髪に化学的処理を加える従来の方法においては、1 日に十数試料の分析のみが可能となるが、毛髪をアセトンで洗いホルダーに直接張り付けるのみの同法を用いれば、1 日に 100 試料以上の分析が可能となる。また、試料調製に伴う元素の漏出、コンタミの危険性も無視可能で、再現性の良い結果が得られる。さらに化学的処理により失われるハロゲンも分析可能である。特に臭素などは大気環境から体内に取り込まれる注目元素であり⁷⁰⁾、栄養学・食品学の観点からはヨウ素の分析も貴重な情報をもたらすなど、無調製法の利点は大きい。

Fig.4 には、毛髪中の 26 元素濃度を 1) 中国におけるフッ素中毒患者 (n = 150) 2) 中国におけるヒ素中毒患者 (n = 91)、3) 健常日本人 (n = 491) に対して示す。毛髪中フッ素濃度は低く、我々の Ge 検出器を用いた prompt- γ 線分析⁷¹⁾ の感度以下で分析不能であったが、汚染地域住民のヒ素、マンガン濃度は健常日本人と比べて非常に高いことが分かる。中国のフッ素中毒患者は 1 億人とも言われているが、過去の公衆衛生学研究により、“フッ素中毒患者の多くがヒ素中毒のような症状も呈している”ことが確認されてきた。我々の分析により、フッ素中毒患者体内のヒ素濃度がヒ素中毒患者に近い値を示すことが明らかになり、ヒ素中毒の症状が実際のヒ素曝露のためであることが確認された。上述のように、我々の調査研究は貴州省における石炭燃焼由来のフッ素中毒患者を対象としていたが、粗悪な石炭の中にはフッ素だけではなく、ヒ素、マンガンなどの鉱山性有毒元素が多く含まれることが確認されており、それが原因と思われる。

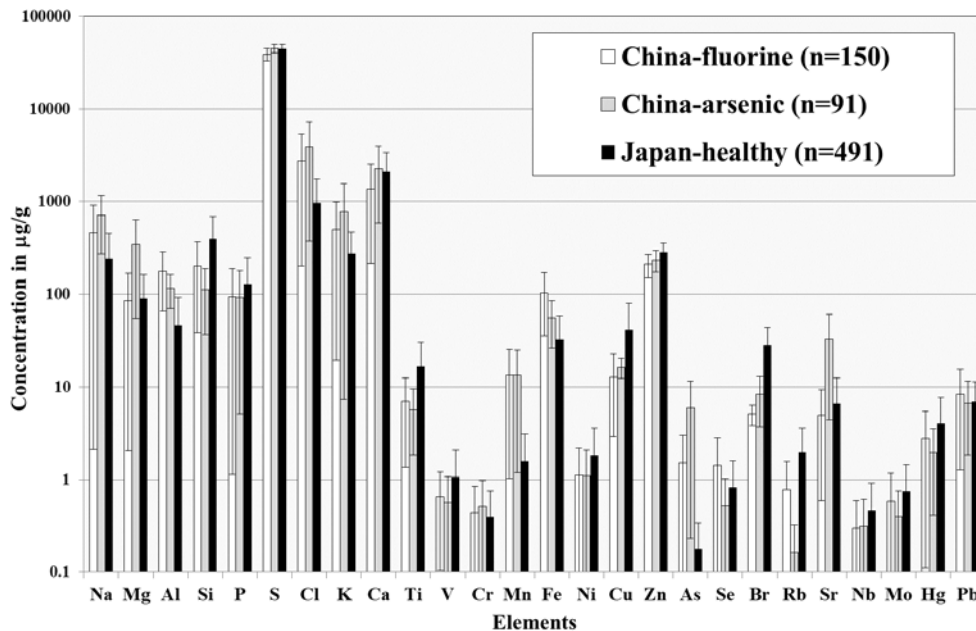


Fig.4 Elemental concentration in hairs taken from Chinese people suffering from fluorine poisoning (n=150), those suffering from arsenic poisoning (n=91), and healthy Japanese subjects (n=491).

4 独自の技術の 3.11 津波がもたらした重金属汚染問題への応用

今まで述べてきたように、我々の PIXE は多くの問題解決型研究に応用されてきたが、2011年 3.11 大津波がもたらした陸地や汽水域における重金属汚染問題にも即座に対応できた。我々はこの問題に対し以下の 3 つの観点から取り組んだ。1) 三陸地方における陸地・汽水域の重金属汚染状況の広域的把握^{72, 73}、2) 津波により壊滅した汽水域における海洋生態系再生への重金属の影響⁶⁶、3) 被災者のヘドロ粉塵吸入による健康影響と体内有害元素濃度の実態調査⁷⁴。1) に関しては、津波直後に高濃度を示した陸地や干潟における重金属^{72, 73}は、1年後には殆ど浄化され深刻なものではなくなったことが確認できた⁷⁴。2) に関しては、汽水域における海洋食物連鎖中の重金属濃度を微小甲殻類の分析により確認したところ、生食食物連鎖中には鉛が、腐食食物連鎖中にはヒ素が多量に含まれていることが確認された⁶⁶。3) に関しては、我々が以前に開発した「長い毛髪分析による体内元素濃度履歴を調べる時方法⁷⁰」を適用し、宮古、釜石、大船渡の病院に協力を求め被災者から長い毛髪を採取し、被災前後における体内元素濃度変化を調べた。その結果、必須元素の多くが震災後に濃度を減少させていることが判明し、それは避難に伴う食生活の変化によるものと推定された。一方、震災後有害元素の多くも濃度を減少させ、ヘドロ粉塵吸入の影響のないこと、やはり食生活の変化により、必須・有害元素を多く含む海産物を摂取しなくなったことで有害元素濃度も同じく減少しているものと推定された。ヘドロ粉塵吸入に関しては、被災者の大半の方々が直ちに高台にある避難所に退避され、ヘドロの堆積する地域から離れたことが幸いしたものである。

5 PIXE の生活密着型問題への応用

我々の PIXE は国際的環境問題解決のみならず、地域の人々の生活に直結する日常的問題にも広く取り組んできた。以下にそれらの中からいくつか紹介する。

- 1) ホタテ、ホヤ、ワカメ、昆布、ひじきなど、養殖海産物中の有害元素の調査研究。これらの海産物は日本人が多く摂取するものであり、1日最大許容摂取量との関係から各食品中の有害元素濃度を調べる必要がある。特に現在の日本沿岸海域は重金属に汚染されており、以前の研究においてもヒ素、鉛、水銀、カドミウムなどの有害元素が多く検出されている⁷⁵。3.11 津波がその状況をさらに悪化させた恐れがあり、今回、さらに詳しい分析と報告を行った^{76, 77}。その結果、日常的食生活においても、各有害元素の1日最大許容摂取量を大きく上回る可能性が示唆された。
- 2) 農作物に対するミネラル水散布の、収穫量や品質向上への効果。我国の農地は、化学肥料のみを与える栽培を繰り返すことにより極度のミネラル不足に陥っており、それが収穫量や農作物の品質（味・滋養など）に悪影響を与えていた。我々はミネラル不足状態の農地にミネラル水を散布することにより、稲の単位面積当たりの収穫量が 2.5 倍に、大豆のそれは 5 倍に上昇し、さらにミネラル濃度、糖度、味などの品質も明らかに改善されることを確認した⁷⁸。
- 3) 入院患者における褥瘡（床ずれ）の問題は深刻であり、中には関節が露出するような重篤な症例もあり、それが患者へ大きな苦痛を与えていた。褥瘡を発症させる患者と他の患者の血液を採取し血清中元素濃度を調べたところ、創の修復に必要な亜鉛・銅・鉄などの遷移金属不足が原因である可能性が示唆された。そのためそれらの元素を含むドリンク剤を投与した結果、血清中亜鉛濃度が 1.7 倍に改善し、それに伴い褥瘡の面積も半分以下に減少することが確認された⁷⁹。その他、NPO 法人床ずれ研究会との共同研究で、褥瘡の患部にラップ膜を

張り付け膿ませて直す療法において、膿中の亜鉛濃度と治癒の関係も調べられた。

- 4) 1500 人の健常者から採取された毛髪分析による、体内元素濃度の性差と加齢変化に関する研究⁸⁰。Ca、Zn、Fe などの元素濃度には大きな性差があり、特に女性は estrogen の分泌により Ca、Fe 濃度の加齢変化が非常に大きいことが確認された。また、過去 20 年間にわたる健常者毛髪中元素濃度の推移も調べられ、食生活や食材中元素濃度の変化が体内元素濃度に与える影響について検討された⁸¹。
- 5) 汚染された汽水域、鉱山下流域における、植物による環境浄化 (phytoremediation) の、有害元素除去効果に対する研究^{82, 83, 84}。Hyper accumulator と呼ばれる植物を用い、ヒ素・カドミウム・水銀などに汚染された土壌を浄化する試みが国内外で行われた。
- 6) シロアリ・腐食防止のためにクロム・銅・ヒ素 (CCA) を注入された建築材の安全な処理に関する研究⁸⁵。現在、バブル期に建築された家屋が建て替え時期に入り、多量の CCA 廃材の処理が各自治体で問題になっている。この問題は、ニュージーランドなど海外でも深刻化している。
- 7) 食品 (砂糖) 製品中に混入した金属片の起源解明のための分析。食品中に異物が混入することは多く報告されているが、それが金属片の場合、製造過程のどの装置から混入したものか、元素組成からある程度の情報がつかめる。Fig.5 には、砂糖製品中の 2 種の金属片 (0.5 mm 以下) のスペクトルを示す。両者ともステンレス鋼の組成であり、特に金属片-1 の方は Cu を多量に含む特殊なステンレス鋼であることから、直ちに装置が特定された。

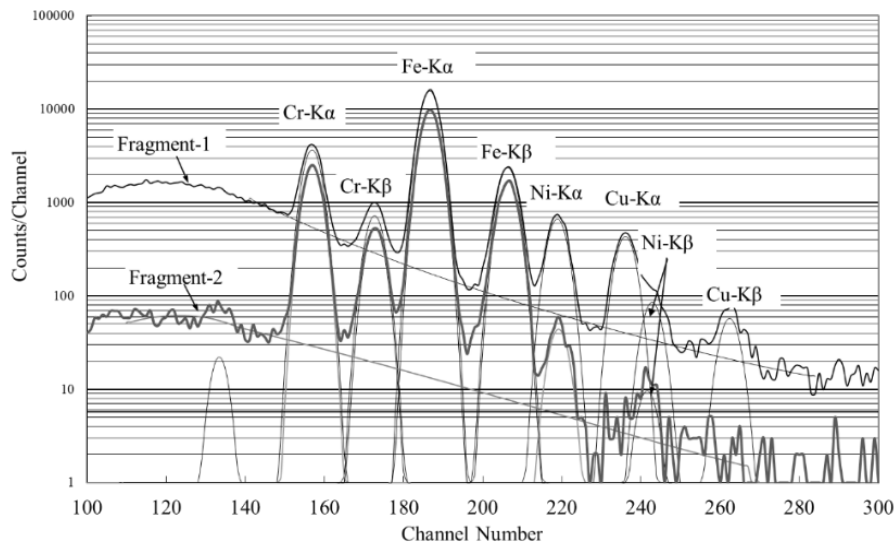


Fig.5 Spectra of two very small fragments (around 200 μm in size) intermixed in a sugar product.

- 8) 渡り鳥の大量死の原因調査。10 年ほど前の春、秋田に最初に飛来した渡り鳥 (ミヤマカラス) が八郎潟において大量死しているのが発見された。当時秋田環境センターの斉藤勝美氏から朝に連絡があり、直ちに一羽持参するよう依頼し、到着後直ちに胃中の残留物が分析された。照射開始後 10 秒で、巨大な Tl (タリウム) のピーク群が確認され、原因は殺鼠剤の摂取に因ることが判明した⁸⁶。
- 9) 一般住民の突発的な有害元素曝露の発見と、曝露経路の解明。我々は 1996 年から 22 年間、施設公開の際に一般住民の希望者に対し毛髪分析を行い、必須元素の体内バランスなどの評価を行っている。試料数はすでに 1600 以上に達しており、見学学生から採取した毛髪を含め、の体内元素濃度の性差、加齢による変化の研究にも応用されている^{80, 81}。1600 試料の中には Ge、Ag、Ba などが異常に多く含まれる事例もあったが、これらは有害元素とは言えない。

その中で 2008 年、水銀を 30 $\mu\text{g/g}$ 含む事例が発見された。健康日本人の水銀濃度の平均値は 4 $\mu\text{g/g}$ 程度であり⁸¹、NMCC で分析された試料中の今までの最高値も 15 $\mu\text{g/g}$ 程度であった。この 30 $\mu\text{g/g}$ という数値は水俣病の認定基準値：毛髪中濃度 20 $\mu\text{g/g}$ も大きく上回っており、日常の食生活で摂取される水銀のレベルではない。Fig.6 に当該毛髪中元素濃度の 5 年間にわたる推移と、健康日本人の平均値を比較して示す。

直ちに本人に連絡を取り心当たりを確認したところ、岩手山麓に土地を保有しその土地に井戸を掘り、その水を毎日飲料していることが分かった。即刻その水を分析したところ、岩手山麓の温泉水・湧水の平均値^{87,88}（通常の水道水よりも Hg 濃度が高い）と比べても 10 倍の高濃度の水銀を含む水であることが分かった。それら温泉水・湧水の平均値と、当該井戸水中の元素濃度を比較し、Fig.7 に示す。硫黄、銅、亜鉛、ストロンチウムなどの濃度も非常に高いことが分かる。その井戸水の飲料を停止し、その後も 5 年間にわたり毛髪中水銀濃度の観測を続けたが、体内水銀の生物学的半減期は非常に長く、Fig.6 から 5 年経過しても高濃度値が続いていることが分かる。ちなみに NMCC の周辺にはリンゴ農家も多く、施設公開開始（1992 年）の 10 年ほど前まで水銀を含む農薬をリンゴの木に散布することが日常的に行われていたため、高い水銀濃度を示す人が多かった。30 年近く経ち、ようやくその傾向が収まってきたところである。

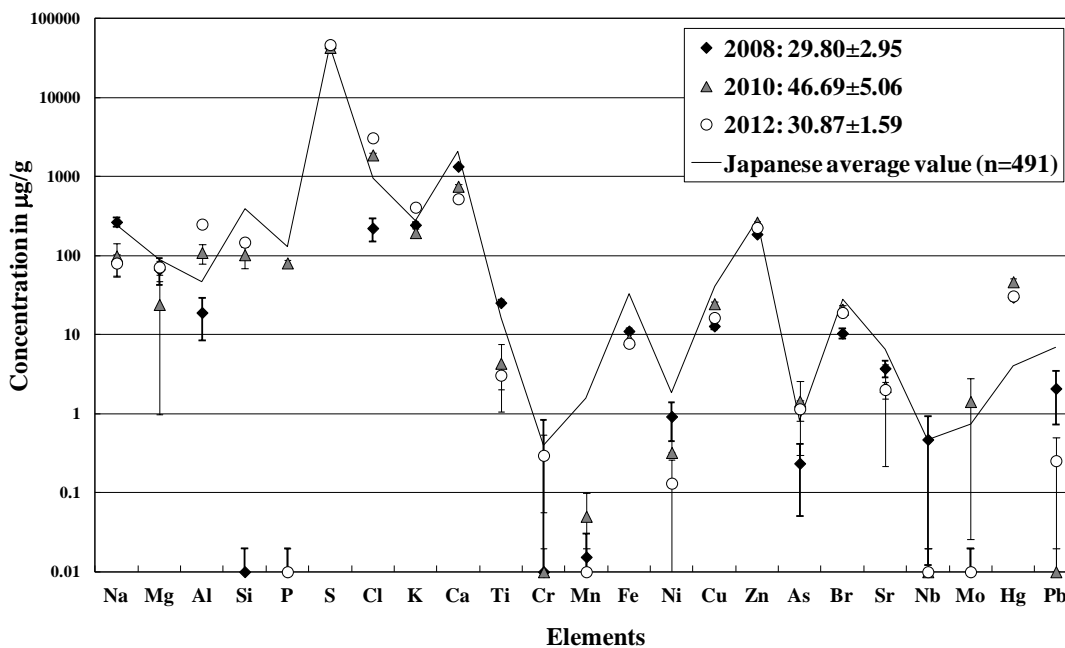


Fig.6 Elemental concentration in hairs collected from an otherwise healthy Japanese person over five years. The average values for healthy Japanese people (n=491) are also shown in the figure. The mercury concentrations in the subjects were nearly 10 times higher than the Japanese average.

- 学校給食中に混入した異物の分析。当時滝沢村の学校給食中から、動物の骨らしい硬い異物が発見された。PIXE で組成を分析したところ、Ca と P の割合が骨組織とは異なり、大型の貝の貝殻の一部である可能性が指摘された。

6 要約

- NMCC においては、PIXE が全国共同利用として多分野の・種の研究に 25 年間にわたり提供されてきた。

- 2) 多数の独自の技術が、多くの分野の研究のために開発されてきた。それらは、超微小・無調製生物試料定量分析のための「無標準法」、地球化学・工学試料高感度分析のための「特殊吸収体」、大気環境試料のための「外部標準法」、高 Z 粉末試料高精度分析のための「粉末内部標準法」、及び其々の解析のための専用プログラムである。
- 3) これら独自の方法は、東・東南アジアにおける種々の環境問題解決のために、また国内外の広域的圏・水圏・大気圏汚染の調査研究のために応用されてきた。
- 4) 大気 PIXE における無標準法は、生きたままの植物定量分析に応用され、ビーム照射による植物組織の代謝の変化に呼応するものと思われる、多元素濃度の大きな経時変化を観測することができた。
- 5) NMCC の PIXE は、3.11 巨大津波がもたらした間球問題にも素早く対処でき、広域的な重金属汚染の実態調査、海洋生態系再生に与える重金属の影響、被災者の粉塵吸入による健康影響などの調査研究が行われた。
- 6) NMCC の PIXE は、一般住民の日常生活に関わる種々の問題にも対処してきた。
- 7) 特に毛髪試料に対する無調製無標準法は、有害元素による汚染地域住民の体内曝露評価の調査研究に応用され、現在まで 4 万以上の毛髪試料分析が行われた。

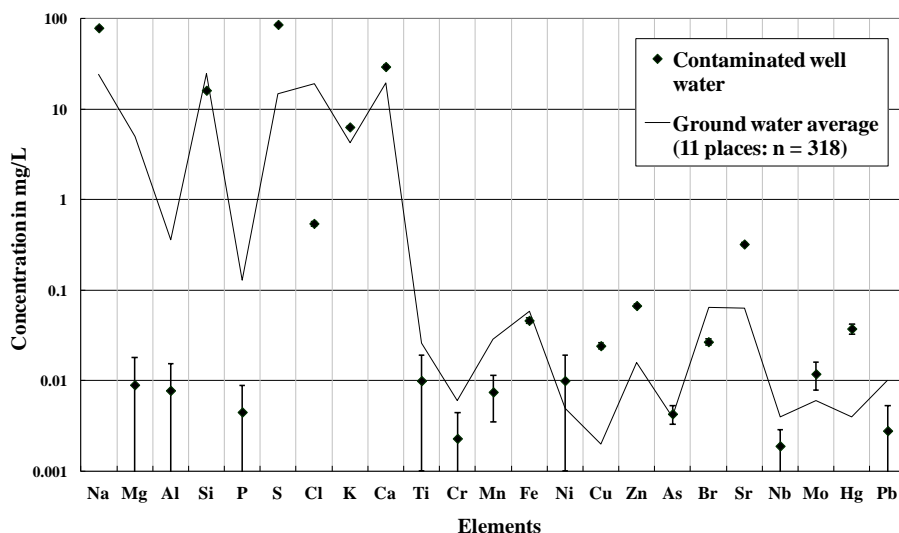


Fig.7 Elemental concentration in the water being drunk by the person whose hairs were analyzed in Fig. 6. The mercury concentration was 0.0376 ± 0.005 mg/L, which is 10 times higher than the average value of 318 ground water samples collected at the foot of Mt. Iwate.

謝辞

25 年間にわたり NMCC 全国共同利用の運営に携わってきた、公益社団法人日本アイソトープ協会、及び岩手医科大学サイクロトロンセンターのスタッフに感謝いたします。NMCC における PIXE 技術開発に協力して頂いた、三浦吉範氏、松田和弘氏、村尾智氏、櫻井四郎氏、石山大三氏、斉藤勝美氏、松政正俊氏をはじめとする多くのユーザーの方々に謝意を表します。これらの方々には、NMCC の PIXE を実学に率先して応用して下さいました。また、多分野にわたる研究、環境問題解決などの目的で NMCC を有効に活用して頂いた全てのユーザーの皆様に深く感謝いたします。

参考文献

1. 世良耕一郎、後藤祥子、細川貴子、齋藤義弘、高橋千衣子、寺崎一典、佐々木敏秋、伊藤じゅん、畠山智、二ッ川章二、“過去 25 年間にわたる NMCC の PIXE 共同利用”，本報文集掲載予定
2. K. Sera, S. Goto, T. Hosokawa, Y. Saitoh, and S. Futatsugawa, “Common Usage of PIXE at Nishina Memorial Cyclotron Center during the Past 25 Years,” Submitted to *Int. J. PIXE*. Vol.22 (1&2)
3. 世良耕一郎、二ッ川章二、畠山智、齋藤義弘、松田和弘、NMCC における PIXE 多目的共同利用, 6 年間の実績, NMCC 共同利用研究成果報文集, 第 6 巻, 159-173, (1999)
4. 山内博、網中雅仁、熊谷嘉人、世良耕一郎、中国における慢性砒素中毒の根絶に関する研究, 科学研究費研究成果報告書, 基盤研究 (B), (2003-2005)
5. J. Noda, R. Hakamada, K. Suzuki, T. Miura, and K. Sera, “Environmental Contamination by Arsenic and Lead in Some Rural Villages in India”, *Int. J. PIXE* 25(1&2), 29-37, (2015)
6. M. A. Habib, S. Miono, K. Sera, and S. Futatsugawa, “PIXE Analysis of U in Arsenic Pollution, Bangladesh,” *Int. J. PIXE*, Vol.12 (1&2), 19-34, (2002)
7. J. Khandakar, Md. Shafiqul Islam, T. Nakamura, K. Sera, T. Takatsuji, and Y. Kitamura, “Health Risk Assessment of Arsenic and Other Heavy Metals from Vegetables Grown in Banglish Village, Bangladesh,” *Int. J. PIXE*, Vol.22 (3&4), 287-298, (2012)
8. Md. Shafiqul Islam, K. Sera, T. Takatsuji, Md. Anwar Hossain, T. Nakamura, “Estimation of Hair Arsenic and Statistical Nature of Arsenicosis in Highly Arsenic Exposed Banglish Village in Comilla District of Bangladesh,” *Int. J. PIXE*, Vol.21 (3&4), 101-118, (2011)
9. Md. Shafiqul Islam, J. Khandakar, T. Takatsuji, T. Nakamura, and, K. Sera, “Influence of Demographic Factors on Arsenic Accumulation in Human Population Cases of Two Arsenic Affected Villages in Bangladesh,” *Int. J. PIXE*. Vol.22 (1&2), 131-137, (2012)
10. K. Sera, Md Shafiqul Islam, T. Takatsuji, T. Nakamura, S. Goto, C. Takahashi, and Y. Saitoh, “Investigative Studies on Water Contamination in Bangladesh. – Preliminary Treatment of Water Samples at the Sampling Site.”, *Int. J. PIXE*. Vol.20 (3&4), 109-118, (2010)
11. M.A.Habib、三尾野重義、二ッ川章二、世良耕一郎、“PIXE によるバングラディッシュ地下水砒素汚染の研究 I”, NMCC 共同利用研究成果報文集, 第 8 巻,166-172, (2001)
12. 三尾野重義、M.A.Habib、世良耕一郎、二ッ川章二、“PIXE によるバングラディッシュ地下水砒素汚染の研究 II”, NMCC 共同利用研究成果報文集, 第 10 巻, 96-102, (2003)
13. 世良耕一郎、MD. Shafiqul Islam、高辻俊宏、中村 剛、後藤祥子、高橋千衣子、齋藤義弘、“Bangladesh における水系汚染と食のリスク評価”, NMCC 共同利用研究成果報文集, 第 16 巻, 187-196, (2010)
14. T. Watanabe, T. Kondo, S. Asanuma, M. Ando, K. Tamura, S. Sakurai, and R. L. Chaoke, “Skeltal Fluorosis from Indoor Burning of Coal in Southwestern China.”, *Fluoride*, Vol.33 (3), 123-127, (2000)
15. E. Clemente, K. Sera, S. Futatsugawa, and S. Murao, “PIXE Analysis of Hair Samples from Artisanal Mining Communities in the Acupan Region, Benguet, Philippines.”, *Nucl. Instr. Meth.* B219-220, 161-165, (2004)
16. K. Sera, S. Futatsugawa, S. Murao, K. Tanno, E. B. Daisa, V. B. Maglambayan, and H. Cabria, “Preliminary PIXE Measurement of Human Hairs from Small-Scale Mining Sites of the Philippines.”, Proceedings on the 12th Annual Geological Convention “Geology Challenges in the 21st Century”, Manila, December, (1999)
17. S. Murao, S. Futatsugawa, K. Sera and V. B. Maglambayan, “Trace Element Analysis of Tailings from an Indigenous Mining Community Benguet, Philippines.”, *Int. J. PIXE* 12(1&2), 61-69, (2002)
18. S. Murao, E. Daisa, Sera, K., V. Maglambayan and S. Futatsugawa, S., “PIXE Measurement of Human Hairs from a Small-scale Mining Site of the Philippines.”, *Nucl. Instr. Meth.*, B189, 168-173, (2002)
19. Maglambayan, V. B., Murao, S., Rytuba, J., Daisa, E., Sera, K., Futatsugawa, S. Jerome, T. and Corpus, C., “Mercury Contamination Associated with Small-Scale Gold Mining in the Upper Ambalanga River, Benquet, Philippines.”, Proceedings of International Symposium Celebrating 55th Anniversary of the Geological Society of Korea, October, (2002)
20. 村尾智、後藤祥子、小野恭子、世良耕一郎、Myline Macabuhay、Evelyn Cubelo、Arlene B. Galvez、Sarah Marie P. Aviado、“フィリピンの金鉱採掘地周辺から産したコメに含まれる金と水銀について”

- NMCC 共同利用研究成果報文集, 第 21 卷, 101-106, (2015)
21. S. Murao, B. Tumenbayar, K. Sera, S. Futatsugawa, and T. Waza, "Finding of High Level Arsenic for Mongolian Villagers' Hair.", *Int. J. PIXE* 14(3&4), 125-131, (2004)
 22. T. Tumenbayar, S. Murao, T. Maider, J. Uramгаа, and K. Sera, "Anthropogenic Mercury Contamination and Geology of Mongolia.", Proceedings of the 23rd Symposium on Geo-Environments and Geo-Technics, 109-112, (2013)
 23. S. Murao, K. Sera, B. Tumenbayar, N. Sajiaa, and J. Uramгаа, "High Level of Arsenic Reaffirmed for Human Hairs in Mongolia.", *Int'l Journal of PIXE* Vol.21 (3, 4), 119-124, (2011)
 24. トウメンバイヤル パータル、村尾智、世良耕一郎、二ッ川章二、温品廉三、グレイソン ロビン、マイダー トウメンバイヤル, "モンゴル国におけるスモールスケールマイニング -速報-", 地質ニュース, 564号, 49-51, (2001)
 25. 村尾智、世良耕一郎、二ッ川章二、トメンバイヤル、温品廉三, "モンゴル国のスモールスケールマイニング調査報告", NMCC共同利用研究成果報文集, 第十巻, 108-113, (2004)
 26. 村尾智、川辺能成、世良耕一郎、後藤祥子、高橋千衣子、Tumenbayar Baatar, Uramгаа Jambardorj, "モンゴル国北部における重金属汚染とリスク管理 -予報-", NMCC共同利用研究成果報文集, 第18巻, 102-107, (2012)
 27. 村尾智、後藤祥子、Jambardorj Uramгаа, Baatar Tumenbayar, Sainbileg Minjin, 世良耕一郎, "水銀使用を中止したモンゴル国の人力小規模採掘地における環境監査" (*本文英語), NMCC共同利用研究成果報文集 第22巻, 145-151 (2016)
 28. Y. I. Arifin, M. Sakakibara, and K. Sera, "Impacts of Artisanal and Small-Scale Gold Mining (ASGM) on Environment and Human Health of Gorontalo Utara Regency, Gorontalo Province, Indonesia.", *Geosciences*, Vol. 5, No. 2, 160-176, (2015)
 29. Yuyu Indriati Arifin, 榎原正幸、世良耕一郎, "インドネシア・ゴロンタロ州北ゴロンタロ県における人力小規模金採掘地域における鉱山労働者と住民の毛髪中のひ素、鉛、水銀濃度" (*本文英語), NMCC共同利用研究成果報文集 第 21 巻, 133-138 (2015)
 30. M. Chiba, K. Sera, and K. Shimomura, "Element Concentrations in Hair of Children Living in the Environmentally Degradated District of the East Aral Sea Region.", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry (JRNC)*, 259 (1), 149-152 (2004)
 31. 千葉百子、世良耕一郎、橋爪真弘、佐々木敏、下田妙子、國井修、稲葉裕, "アラル海東側(カザフスタン)に住む学童の毛髪中元素濃度—アラル海からの距離による比較—", NMCC 共同利用研究成果報文集, 第 10 巻, 87-95, (2003)
 32. S. Murao, C. Kirdmanee, K. Sera, S. Goto, C. Takahashi, and R. Limsuwan, Application of PIXE to "Monitor the Quality of Salt from Salt Farming Areas in Thailand.", *Int. J. PIXE* 22(1&2), 195-200, (2012)
 33. 酒井正治、世良耕一郎、後藤祥子、S. Sukchan、岡田直紀, "PIXE 法による塩害激害地の郷土樹種材中の元素濃度—東北タイにおける塩害発生前後の比較—", NMCC 共同利用研究成果報文集, 第 21 巻, 200-207, (2015)
 34. K. Sera, and S. Futatsugawa, "Personal Computer Aided Data Handling and Analysis for PIXE.", *Nucl. Instr. Meth. B* 109/110. 99-104, (1996).
 35. K. Sera and S. Futatsugawa, "Effects of X-ray Absorbers Designed for Some Samples in PIXE Analyses.", *Int. J. PIXE* 5, (2&3), 181-193, (1995)
 36. K. Sera and S. Futatsugawa, "Design of Absorbers for Metal-rich Samples in PIXE Analysis. (Application of PIXE to Various Research Fields at NMCC)", *Int. J. PIXE*, 6 (1&2), 71-88, (1996)
 37. 世良耕一郎、二ッ川章二、畠山智、齊藤義弘、松田和弘、三浦吉範、斎藤勝美, "無標準定量法の開発 (PIXE の多目的利用のための測定・解析・定量法の開発)", NMCC 共同利用研究成果報文集, 第 4 巻, 149-166, (1996)
 38. K. Sera and S. Futatsugawa, "Quantitative Analysis of Powdered Samples Composed of High-Z Elements.", *Int. J. PIXE* 8(2&3), 185-202, (1998)
 39. K. Sera, S. Futatsugawa, and D. Ishiyama, "Application of a Powdered-Internal- Standard Method Combined with Correction for Self-Absorption of X-rays to Geological, Environmental and Biological Samples.", *Int. J. PIXE* 9(1&2), 63-81, (1999)
 40. 世良耕一郎、二ッ川章二、畠山智、齊藤義弘, "高 Z 元素マトリクス粉末試料の定量分析法の開発", NMCC 共同利用研究成果報文集, 第 6 巻, 142-158, (1999)
 41. 世良耕一郎、二ッ川章二、齊藤義弘、畠山智、石山大三, "試料内 X 線自己吸収補正法を併用した粉末内部標準法の地質学、環境学、生物学試料への応用", NMCC 共同利用研究成果報文集, 第 7 巻,

- 218-236, (2000)
42. K. Sera, S. Futatsugawa, K. Matsuda and Y. Miura, "Standard-free method of quantitative analysis for bio-samples.," *Int. J. PIXE*, Vol.6 (3&4), 467-481, (1996)
 43. 世良耕一郎、二ツ川章二、畠山智、齋藤義弘、松田和弘、三浦吉範, "無標準定量法の開発 - 第2報-", NMCC 共同利用研究成果報文集, 第5巻, 223-249, (1997)
 44. K. Sera, K. Terasaki, J. Itoh, Y. Saitoh, and S. Futatsugawa, "Physical Quantitative Analysis in In-Air PIXE.," *Int. J. PIXE*, Vol.17, (1&1), 1-10, (2007)
 45. 世良耕一郎、後藤祥子、齋藤義弘、寺崎一典、佐々木敏秋、伊藤じゅん、二ツ川章二, "大気PIXEにおける物理的定量法の開発", NMCC共同利用研究成果報文集, 第14巻, 213-221, (2008)
 46. K. Sera, S. Goto, C. Takahashi, and Y. Saitoh, "Standard-Free Method for Living Plants in In-Air PIXE.," *Int. J. PIXE*, Vol. 21 (1&2), 13-23, (2011)
 47. K. Sera, K. Terasaki, T. Sasaki, S. Goto, C. Takahashi, and Y. Saitoh, "Movement of Heavy Elements in Plants by Means of a Standard-free Method for Living Plants in In-Air PIXE.," *Int. J. PIXE*, Vol.22 (1&2), 149-155, (2011)
 48. K. Sera, S. Goto, C. Takahashi, and Y. Saitoh, "Movement of Light Elements in Living Plants Measured by Means of a Standard-free Method in In-air PIXE.," *Int. J. PIXE*, Vol.23 (3&4), 77-91, (2013)
 49. K. Sera, S. Futatsugawa, S. Hatakeyama, and Y. Saitoh, "Determination of Physical Quantities for PIXE by Means of PIXE 1 -Absorption Curve-", *Int. J. PIXE*, Vol.4 (2&3), 165-179, (1994)
 50. K. Isii, and S. Morita, "Continuous Backgrounds in PIXE.," *Int. J. PIXE*, Vol.1 (1), 1-29, (1991)
 51. K. Ishii, H. Orihara, S. Iwasaki, K. Sera, S. Futatsugawa, and Y. Iwata, "Compton Tail Background Due to Sodium Element in Biological Samples.," *Int. J. PIXE*, Vol.4 (3&3), 137-145, (1994)
 52. K. Sera, S. Futatsugawa, S. Hatakeyama, Y. Saitoh and K. Matsuda, "Quantitative Analysis of Biomedical Samples of Very Small Quantities by the Standard-free Method.," *Int. J. PIXE*, Vol.7 (3&4), 157-169, (1997)
 53. K. Sera, S. Futatsugawa and K. Matsuda, "Quantitative Analysis of Untreated Bio-samples.," *Nucl. Instr. Meth. B* 150, 226-233, (1999)
 54. K. Sera, S. Futatsugawa and S. Murao, "Quantitative Analysis of Untreated Hair Samples for Monitoring Human Exposure to Heavy Metals.," *Nucl. Instr. Meth. B* 189, 174-179, (2002)
 55. K. Sera, Y. Miura, and S. Futatsugawa, "Application of a Standard-free Method to Quantitative Analysis of Urine Samples.," *Int. J. PIXE*, Vol.11 (3&4), 149-158, (2001)
 56. 世良耕一郎、二ツ川章二、三浦吉範, "重元素による環境汚染・体内暴露モニタリングのための無調製定量分析法 I - 無調製尿試料のための定量分析法の開発 -", NMCC 共同利用研究成果報文集, 第9巻, 185-194, (2002)
 57. K. Sera, S. Futatsugawa, Y. Miura, S. Murao, and E. Clemente, "Quantitative Analysis of Untreated Human Nails for Monitoring Human Exposure to Heavy Metals.," *Int'l Journal of PIXE*, *Int. J. PIXE*, Vol.12 (3&4), 125-136, (2002)
 58. 世良耕一郎、二ツ川章二、村尾智、E. Clemente, "重元素による環境汚染・体内暴露モニタリングのための無調製定量分析法 II - 無調製爪試料のための定量分析法の開発-", NMCC 共同利用研究成果報文集, 第9巻, 195-206, (2002)
 59. K. Sera, Y. Miura, and S. Futatsugawa, "Application of a Standard-Free Method to Quantitative Analysis of Cerebrospinal Fluid (CSF) Samples.," Proceedings on 10th International Conference on Particle-induced X-ray Emission and its Analytical Applications, Portoroz, Slovenia, 704.1-704.3, (2004)
 60. 世良耕一郎、三浦吉範、伊藤じゅん、二ツ川章二, "無標準法の髄液試料への応用", NMCC共同利用研究成果報文集, 第12巻, 141-145, (2005)
 61. K. Sera, J. Itoh, S. Goto, Y. Saitoh, A. Fujimura, Y. Nosaka, Y. Noda, S. Nishizuka, and G. Wakabayashi, "Quantitative Analysis of Very Small Quantity of Organs Taken from Patients and Experimental Animals; Standard-free Method for Organ Samples.," *Int. J. PIXE*, Vol.18 (3&4), 11-122, (2008)
 62. 世良耕一郎、寺崎一典、佐々木敏秋、後藤祥子、齋藤義弘、伊藤じゅん、二ツ川章二、藤村朗、野坂洋一郎、野田芳範、西塚哲、若林剛, "微小臓器試料に対する無標準定量分析法の開発", NMCC 共同利用研究成果報文集 第15巻, 178-190, (2009)
 63. K. Sera, K. Terasaki, J. Itoh, Y. Saitoh, S. Futatsugawa, and Y. Miura, "Standard-Free Method for

- Body Fluid Samples such as Saliva, Sweat, Snivel and Tear.”, *Int. J. PIXE*, Vol.15 (1&2), 47-57, (2005)
64. 世良耕一郎、寺崎一典、伊藤じゅん、齋藤義弘、二ツ川章二、藤村朗、“無標準法の体液（汗、唾液、鼻汁、涙）及び歯科試料（歯、顎骨、歯石）への応用とフッ素を含む多元素同時分析 一有害元素人体暴露評価の観点から-“, NMCC共同利用研究成果報文集, 第12巻, 123-139, (2005)
 65. 柿坂啓介、佐々木登希夫、米澤美希、秋山剛広、岡田洋平、藤原裕大、佐藤寛毅、阿部珠美、鈴木悠地、吉田雄一、及川隆喜。黒田英克、宮坂昭生、世良耕一郎、滝川康裕、“微量元素からみた非アルコール性脂肪性肝疾患での血清フェリチンの意義”, 本報文集掲載予定
 66. K. Sera, S. Goto, C. Takahashi, Y. Saitoh., K. Kinoshita, M. Matsumasa, “Quantitative Analysis of Small Bio-Samples of nearly 1 □g.”, *Int. J. PIXE*, Vol.24 (3&4), 161-175, (2014)
 67. 矢永誠人、岩間基訓、篠塚一典、吉田勉、若狭仁、野口基子、大森巍、世良耕一郎、二ツ川章二、“PIXE および中性子放射化分析法による亜鉛欠乏マウス肝臓及び血清中の微量元素の定量”, NMCC 共同利用研究成果報文集, 第 5 巻, 68-76, (1998)
 68. 矢永誠人、岩間基訓、吉田努、若狭仁、野口基子、大森巍、世良耕一郎、二ツ川章二、“PIXE 分析法および機器中性子放射化分析法によるマウス肝臓中および血清中の微量元素の定量”, NMCC 共同利用研究成果報文集, 第 6 巻, 234-238, (1999)
 69. K. Sera, S. Futatsugawa, and K. Saitoh, “Method of Quantitative Analysis Making Use of Bromine in a Nuclepore Filter.”, *Int. J. PIXE*, Vol.7 (1&2), 71-85, (1997)
 70. K. Sera, K. Terasaki, T. Sasaki, S. Goto, Y. Saitoh, and J. Itoh, “Studies on Changes of Elemental Concentration in a Human Body by Means of Analyses of Long Hairs on the Basis of the Standard-Free Method.”, *Int. J. PIXE*, Vol.19 (1&2), 17-27, (2009)
 71. K. Sera, K. Terasaki, Y. Saitoh, J. Itoh, and S. Futatsugawa, S. Murao, and S. Sakurai, “Method of Quantitative Analysis of Fluorine in Environmental Samples Using a Pure-Ge Detector.”, *Int. J. PIXE*, Vol. 14 (1&2), 9-18, (2004)
 72. F. Baba, K. Sera, S. Goto, C. Takahashi, and Y. Saitoh, “Analysis of Contaminated Sludge Deposited on the Land Attacked by Great Tsunami following Tohoku Great Earthquake Disaster.”, *Int. J. PIXE*, Vol.22 (1&2), 231-239, (2012)
 73. K. Sera, F. Baba, S. Goto, C. Takahashi, and Y. Saitoh, “Analysis of Plants and Sediment from the Tidelands of the Coastal Regions of the Tohoku District Following the 2011 Tsunami.”, *Int. J. PIXE*, Vol.22 (1&2), 139-147, (2012)
 74. K. Sera, S. Goto, C. Takahashi, Y. Saitoh, and M. Matsumasa, “Effects of Heavy Elements in the Sludge Conveyed by the 2011 Tsunami on Human Health and the Recovery of the Marine Ecosystem.”, *Nucl. Instr. Meth.* B318, 76-82, (2014)
 75. J. Itoh, S. Futatsugawa, Y. Saitoh, F. Ojima, and K. Sera, “Application of a Powdered-internal-standard Method to Plant and Seaweed Samples.”, *Int. J. PIXE*, Vol.15 (1&2), 27-39, (2005)
 76. K. Sera, S. Goto, T. Hosokawa, and Y. Saitoh, “Analyses of marine products containing a large quantity of toxic elements.”, *Int. J. PIXE*, (in press)
 77. 世良耕一郎、後藤祥子、細川貴子、齋藤義弘、“有害元素を多量に含む海産食品の分析”, 本報文集掲載予定
 78. T. Sasaki, K. Sera, S. Goto, T. Hosokawa, Y. Saitoh, and Y. Matsumoto, “Effects of Spraying Mineral Water onto Farm Products on Their Growth and Nutrition.”, *Int. J. PIXE*, Vol. 25 (1&2), 39-52, (2015)
 79. 三浦吉範、遠藤龍人、世良耕一郎、諏訪部章, “NST における微量元素の動態や栄養評価指標としての有用性”, NMCC 共同利用研究成果報文集, 第 18 巻, 183-192, (2011)
 80. K. Sera, S. Goto, T. Hosokawa, C. Takahashi, J. Itoh, Y. Saitoh, and S. Futatsugawa, “Elemental Concentration in the Hair Taken from Healthy People for the Past 20 Years — 2. Sex-specific differences and changes with age.”, *Int. J. PIXE*, Vol.26 (1&2), 29-43, (2016)
 81. K. Sera, S. Goto, T. Hosokawa, C. Takahashi, J. Itoh, Y. Saitoh, and S. Futatsugawa, “Elemental Concentration in the Hair Taken from Healthy People for the Past 20 Years — 1. Long-term changes over 20 years.”, *Int. J. PIXE*, Vol.26(1&2), 15-28, (2016)
 82. 大谷真司、藤巻宏和、世良耕一郎, “宮城県中部七北田川河口域の植物に含まれる重金属元素濃度と土壌中の重金属元素濃度”, NMCC 共同利用研究成果報文集, 第 14 巻, 69-80, (2008)
 83. N. T. H. Ha, M. Sakakibara, S. Sano, S. Hori, and K. Sera, “The Potential of *Eleocharis* for Phytoremediation : Case Study at an Abandoned Mine Site.”, *CLEAN Soil, Air, Water*, Vol. 37 (3),

- 203-208, (2009)
84. M. Sakakibara, Y. Ohmori, N. T. H. Ha, S. Sano, and K. Sera, “Phytoremediation of heavy metal-contaminated water and sediment by *Eleocharis acicularis*.”, *CLEAN – Soil, Air, Water*, **39** (8), 735-741, (2011)
 85. K. Chiba, S. Uchida, Y. Honma, K. Sera, and K. Saitoh, “Extant Chromium, Copper and Arsenic in Waste CCA-Treated Timber.”, *Int. J. PIXE*, Vol.19 (1&2), 103-109, (2009)
 86. K. Saitoh, T. Kobayashi, K. Sera, M. Yasuda, and J.Kakino, “Presumed Cause of Mass Deaths of Rooks (*Corvus Frugilegus Pastinator*) Using PIXE Analysis.”, *Int. J. PIXE*, Vol.17 (1&2), 47-52, (2007)
 87. 齊藤義弘、土井幸一、畠山智、二ッ川章二、世良耕一郎、齊藤徳美、土井宣夫, “岩手山麓の湧水および温泉水中に含まれる微量元素の PIXE 分析”, NMCC 共同利用研究成果報文集, 第 6 巻, 191-196, (1999)
 88. 齊藤義弘、土井幸一、畠山智、二ッ川章二、世良耕一郎、齊藤徳美、土井宣夫, “岩手山麓の湧水および温泉水中に含まれる微量元素の PIXE 分析 (II)”, NMCC 共同利用研究成果報文集, 第 7 巻, 243-247, (2000)

Problem-based studies using PIXE and technical developments at Nishina Memorial Cyclotron Center (NMCC)

K. Sera¹, S. Goto², T. Hosokawa², Y. Saitoh² and S. Futatsugawa³

¹Cyclotron Research Center, Iwate Medical University
348-58 Tomegamori, Takizawa, Iwate 020-0603, Japan

²Takizawa Laboratory, Japan Radioisotope Association
348-1 Tomegamori, Takizawa, Iwate 020-0603, Japan

³Japan Radioisotope Association
28-45 Honkomagome 2 chome, Tokyo 113-0021, Japan

Abstract

At Nishina Memorial Cyclotron Center (NMCC), a large number of studies in various research fields have been pursued under nation-wide common usage since 1993. One of the features of NMCC's PIXE is the performance of many problem-based studies in order to determine effective measures against a range of issues. Various samples must be quantitatively analyzed quickly and accurately to cope with environmental issues. We have developed several original methods for analyzing a variety of samples with good sensitivity. Specially designed absorbers were developed for sensitive analyses of samples composed of heavy elements. In addition, a powdered-internal-standard method was established for the accurate quantitative analyses of powdered samples whose matrixes are heavy elements. The standard-free method for bio-samples allowed us to quantitatively analyze untreated samples, micro samples of nearly 1 μ g, and live bio-samples. We have been tackling a number of environmental problems in many countries in Southeast and East Asia using these original methods. We also wrestled with environmental problems caused by the massive tsunami that struck the Sanriku district of Japan in March 2011.