

Fig.11 には、本大気 2 検出器測定システムによる GBW 標準試料 Tibet soil の分析結果を、保証値と比較して示す。Ca を含めそれ以上の原子番号の元素は検出器 1 で測定を行い、Al~K までの 3 元素は検出器 2 により測定された。Fig.から分かるように、本大気 2 検出器システムによる結果は、保証値とほぼ一致している。

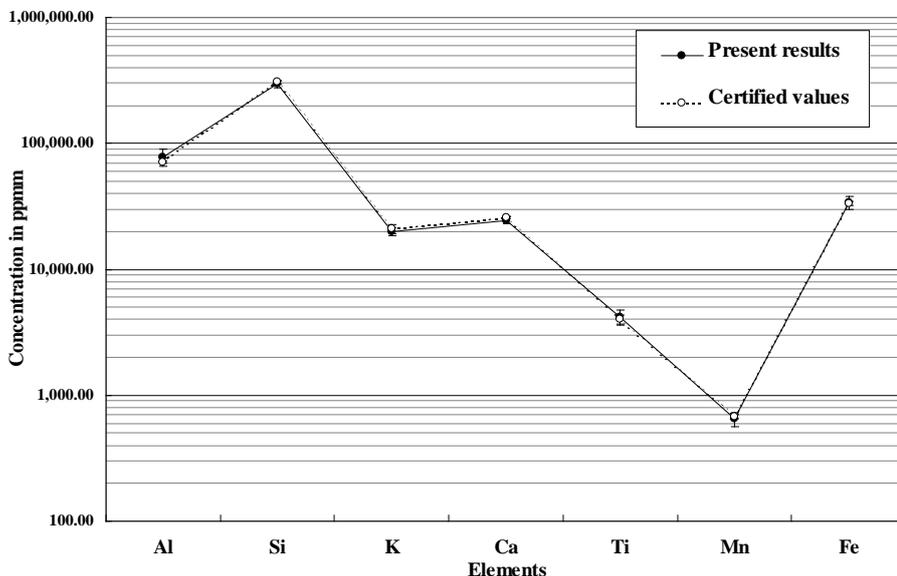


Fig.11 Results of analysis of Tibet soil sample, where the present results are shown in open circles and the certified values are indicated in closed circles.

Fig.12 には、Fig.6 にスペクトルを示した土試料中に対し、真空 PIXE システム・大気 2 検出器測定システムの両方で分析を行った結果を対比して示す。Al、Si を含む軽元素から Sr などの重元素まで、本大気 2 検出器同時測定システムによる結果は真空 PIXE と同等の精度を有していることが確認できる。

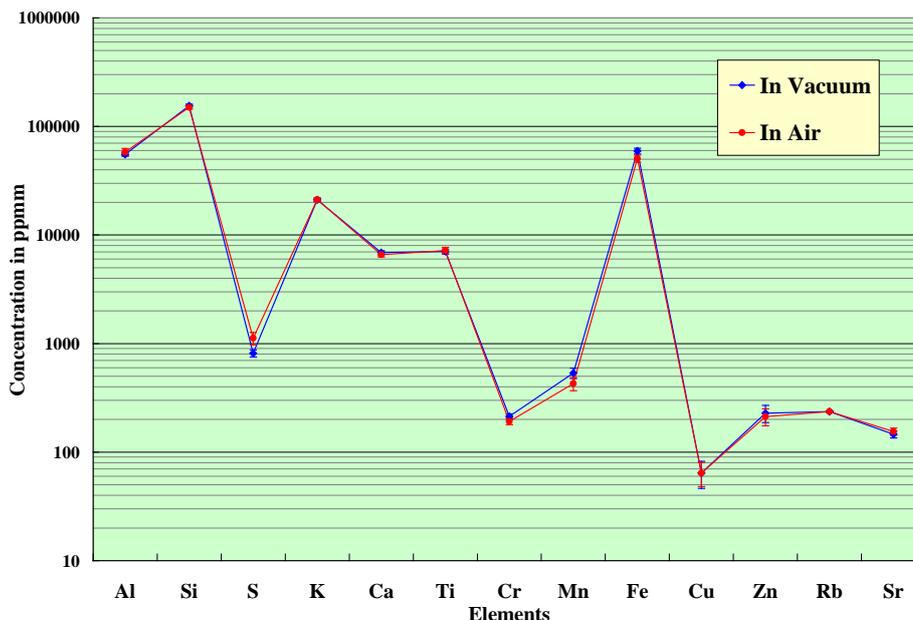


Fig.12 Results of analyses of 13 elements in practical soil sample whose spectrum is shown in Fig. 3 obtained with both in-air and in-vacuum PIXE.

5 議論

大気 PIXE において全元素同時分析のための 2 検出器同時測定システムを構築することは長年求められていたことであったが、科学研究費補助金基盤 (B) において二台目の検出器を購入し、同時測定システムを構築することができた。しかし大気 PIXE の場合、吸収体を外して測定を行った場合でも低エネルギー領域における感度は著しく悪く、この問題が解決されない限り、大気 2 検出器同時測定システムの構築は実質的に意味のあるものとは言えなかった。本研究において、Fig.1 に示される先端キャップの開発によりその問題はほぼ解決され、「大気 2 検出器同時測定システム」が実質的な意味を持つようになった。

大気 PIXE の真空 PIXE に対する利点は、非破壊分析が可能と言う点である。しかしある程度のダメージはビーム照射に伴う熱の上昇により受けるため、He ガスの吹き付けによる冷却などの手法も有効と期待される。その場合空気中の energy loss は軽減され、さらなる感度の向上が期待される。また植物のような生きたままの試料に関しては、ビーム照射によるアポトーシスの誘導に伴うと思われる代謝の変化が観測される^{10,11)}。そのため重元素変動の測定を行った後、軽元素変動の測定を行うことには意味がなく、元素変動の観測のためには同時に全ての元素の変化を観測する必要がある。本法の開発により、Al 以上の全元素動態の同時観察が可能となった。

また、本法により得られた元素濃度値は精度も十分に高いことが確認された。実試料でも Fig.9、10、12 に示されるように、真空 PIXE と同等の精度を有することが確認され、標準試料の測定においても Fig.11 に示すように保証値を高い精度で再現することが確認された。本法はすでに、生きた農作物中の Si、P、S、Cl などの軽元素動態を、重元素と同時に観察する研究に応用されている。

6 要約

1. 大気 2 検出器測定システムが構築され定量分析法が開発されたことにより、軽元素を含む全ての元素の定量分析を同時に行うことが可能となった。
2. 軽元素に対する感度向上のため、検出器に装着する「先端キャップ」が開発され、軽元素に対する感度が 2 桁ほど改善された。その結果、Al 以上の軽元素を、中・重元素と同時に測定することが可能となった。
3. 大気 2 検出器同時計測時の条件下において、両検出器に対する検出効率曲線が決定された。実験値は化合物の結晶粉末・標準液を用いて測定され、我々の開発したコード EFF を用い最終的な検出効率曲線が決定された。
4. 確立された定量分析法を用い、実試料及び標準試料が、本大気 2 検出測定システム及び真空 PIXE システムにより計測され、両方法で得られた定量値・保証値と比較することにより本法の精度・信頼性が確認された。
5. 本法は、生きた植物中の軽元素と重元素の同時動態観察に有効であることが期待される。

謝辞

本研究は、科研費基盤 (B) 研究補助金により推進されました。また、共同利用の運営に携わる他の岩手医科大学サイクロロンセンター、日本アイソトープ協会仁科記念サイクロロンセンターのスタッフの方々に謝意を表します。

参考文献

1. K. Sera, K. Terasaki, J. Itoh, Y. Saitoh, and S. Futatsugawa, "Physical Quantitative Analysis in In-Air PIXE.", *Int'l Journal of PIXE*, Vol.17 -1,2, 1-10 (2007)
2. 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 第十四巻, 213-221 (2008)
3. W. Brandt and G. Lapicki, "Energy -Loss Effect in Inner-Shell Coulomb Ionization by Heavy Charged Particles.", *Phys. Rev.*, A23, 1717 - 1729 (1981)
4. K. Sera and S. Futatsugawa, "Personal Computer Aided Data Handling and Analysis for PIXE.", *Nucl. Instr. and Meth.*, B 109/110, 99-104, (1996)
5. W. Bambynek, B. Crasemann, R. W. Fink, H. U. Fleund, H. Mark, C. D. Swift, R. E. Price and P. Venugopala Rao, "X-ray fluorescence Yields, Auger, and Coster-Kronig Transition Probabilities.", *Rev. Mod. Phys.*, Vol. 44, No. 4, 716-813 (1972)
6. J. H. Scofield, "Exchange Correlations of K X-ray Emission Rates", *Phys. Rev.*, A9 No.3, 1041-1049 (1974)
7. J. H. Scofield, "Hartree-Fock Values of L X-ray Emission Rates.", *Phys. Rev.*, A10 No.5, 1507-1510 (1974)
8. K. Sera, S. Futatsugawa, and K. Matsuda, "Determination of Physical Quantities for PIXE by Means of PIXE 2. Efficiency Curve", *Int'l Journal of PIXE*, Vol. 4-2, 3, 181-191 (1994)
9. 世良耕一郎、二ツ川章二、松田和弘、畠山智、齋藤義弘、“PIXE の定量解析のための物理量の決定方法 (データハンドリング及び解析のためのコンピュータープログラム) ”、NMCC 共同利用研究成果報文集, 第二巻, 97-119 (1994)
10. K. Sera, S. Goto, C. Takahashi, and Y. Saitoh, "Standard-Free Method for Living Plants in In-Air PIXE.", *Int'l Journal of PIXE*, Vol.21-1, 2, 13-23 (2011)
11. 世良耕一郎、後藤祥子、高橋千衣子、齋藤義弘、“大気 PIXE による生きた植物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, 第 17 巻, 69-80 (2011)
12. 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'l Journal of PIXE*, Vol.22-1-2, 149-155, (2012)
13. 世良耕一郎、寺崎一典、佐々木敏秋、後藤祥子、高橋千衣子、齋藤義弘、“生きた植物試料に対する無標準定量分析法を用いた植物内元素変動の観察”、NMCC 共同利用研究成果報文集, 第 18 巻, 108-116 (2012)
14. C. A. Baker, C. J. Batty and S. Sakamoto, "Efficiency of Si(Li) X-ray Detectors at Low Energies", *Nucl. Instr. Meth.*, A259, 501-505 (1987)
15. E. Storm and H. I. Israel, "Photon Cross Sections from 1 keV to 100 MeV for Elements Z=1 to Z=100.", *Nucl. Data Tables*, A7, 565-681 (1970)
16. K. Sera, T. Yanagisawa, H. Tsunoda, S. Futatsugawa, S. Hatakeyama, Y. Saitoh, S. Suzuki, and H. Orihara, "Bio-PIXE at the Takizawa Facility. (Bio-PIXE with a Baby Cyclotron).", *Int'l Journal of PIXE*, Vol. 2-3, 325-330 (1992)
17. K. Sera, T. Sasaki, J. Itoh, Y. Saitoh, and S. Futatsugawa, "Simultaneous Measurement of Two Different Targets by Means of Vacuum and In-Air PIXE.", *Int'l Journal of PIXE*, Vol.18 -1,2 1-12 (2008)
18. K. Sera, and S. Futatsugawa, "Quantitative Analysis of Powdered Samples Composed of High-Z Elements.", *Int'l Journal of PIXE*, Vol.8-2,3, 185-202 (1998)

Quantitative analysis with a two-detector measuring system in in-air PIXE

K. Sera¹, S. Goto², C. Takahashi², Y. Saitoh² and K. Yamauchi³

¹Cyclotron Research Center, Iwate Medical University
Tomegamori, Takizawa, Iwate 020-0173, Japan

²Nishina Memorial Cyclotron Center, Japan Radioisotope Association
348-58 Tomegamori, Takizawa, Iwate 020-0173, Japan

Abstract

A two-detector measuring system in in-air PIXE system composed of two Si(Li) detectors has been developed for simultaneous measurement from low- to high-Z elements. In order to improve detection sensitivity at the low energy region, a new device which is attached at the tip of the detector has been designed. As a result, it exhibited a miraculous effect in improving detection sensitivity at low energies and it became possible to detect K-X rays of aluminium. In order to perform quantitative analysis in in-air system, we have measured detection efficiencies for the two Si(Li) detectors including the effect of X-ray absorption in air on the basis of the method that we developed. Concerning the beam energy at the target and corresponding X-ray production cross sections, the same values as were reported in the previous paper could be used since the same conditions in the irradiating system was employed. It was confirmed that the present method allows us to quantitatively analyze all the elements heavier than aluminum and almost the same results as those obtained by in-vacuum PIXE were obtained for various kinds of samples. It is also confirmed that the present method gives accurate results from light to heavy elements in the analyses of a standard material.