

# γ線照射による水及び土壌中に含まれる重金属イオンの 変化及びその除去に関する基礎的研究

呉 行正<sup>1)</sup>、高見 孝幸<sup>1)</sup>、染川 憲一<sup>2)</sup>、原田 雅章<sup>3)</sup>、西尾 繁<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> 福井大学工学部  
910-8507 福井市文京 3-9-1

<sup>2)</sup> 日本アイソトープ協会甲賀研究所  
520-3043 滋賀県甲賀郡甲賀町鳥居野 121-19

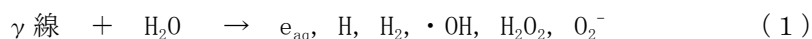
<sup>3)</sup> 福岡教育大学  
811-4192 福岡県宗像市赤間文教町 1-1

<sup>4)</sup> (財) 若狭湾エネルギー研究センター  
914-0192 福井県敦賀市長谷 64-52-1

## 1. はじめに

現在、国内においては地下水に至るまで、人体にとって有害な物質であるトリクロロエタンが検出されるようになった。このように、水環境で有機塩素系化合物、環境ホルモン、重金属などの有害物の汚染がますます深刻になっている。これらの水質汚染物の分解や除去方法の一つに放射線を用いた方法があるが、放射線を用いた分解や除去方法は世界的にも実用的な報告例は少なくまだ基礎的な研究段階である。

実際に水を放射線（例：γ線）で照射した場合には様々な化学反応が誘起され、水和電子（ $e_{aq}$ ）、OHラジカル、過酸化水素などの活性種を生成することが知られている<sup>1)</sup>。



これら活性種の中に OH ラジカルは反応性が非常に高く水中の有害有機物を分解することが知られている。我々は今までに、水中のクロロホルム、トリクロロエチレン、芳香族化合物等の有機塩素系化合物の分解除去に関する研究を行ってきた<sup>2-3)</sup>。

一方、γ線で水に照射するとき生成した電子が水中重金属イオンと結合すれば、重金属イオンが重金属に還元されると考えられる。今回、この考えに基づいて、γ線照射により、水および水-土壌試料中の重金属イオンの除去について基礎的な研究を行うことを目的とした。水中重金属イオンとして  $\text{Co}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Ag}^+$ を用いた。

## 2. 実験

CoCl<sub>2</sub>、CuSO<sub>4</sub>、ZnSO<sub>4</sub>、AgSO<sub>4</sub>を水に溶解し、それぞれの濃度を 10<sup>-4</sup>mol/l、10<sup>-3</sup>mol/l、10<sup>-2</sup>mol/l に調整した。これらの金属イオン水溶液をバイアル瓶（体積 70ml）に 50ml 入れ、ゴム栓で封をし、試料を含有するバイアル瓶をγ線で約 1kGy、10kGy、30kGy と段階照射した（線源：<sup>60</sup>Coからのγ線、日本アイソトープ協会甲賀研究所）。また、水 500ml に土壌試料（福井大学キャンパス内から採集）8グラムを添加し、攪拌した。この土壌-水混合物 50ml を同様にバイアル瓶にいれ、同様にγ線照射を行った。

γ線照射した重金属水溶液の分析については、はじめに 0.45 μm のフィルターでろ過した。そのろ液を 0.1 mol/l の硝酸で必要な倍数まで希釈し、ICP 原子発光法（若狭湾エネルギー研究センター）で測定した。ICP 発光分析の装置は Optima 3300RL で、使用したキャリアガスはアルゴンガスで、測定波長はそれぞれ Co が 228.616 nm、Cu が 324.752 nm、Zn が 213.857 nm、Ag が 328.068 nm であった。土壌-水混合試料中の金属イオンについては PIXE 法で測定した（日本アイソトープ協会滝沢研究所）。試料作成については、土壌-水混合試料を遠心分離し、その上澄みと土壌沈殿物中の金属をそれぞれ測定した。また、土壌-水混合試料をろ過処理し、ろ液と土壌沈殿中の金属イオンもそれぞれ測定した。尚、PIXE の測定方法及びその試料作成方法は日本アイソトープ協会滝沢研究所の二ツ川章二様、岩手医科大学サイクロトロンセンターの世良耕一郎先生らが開発した方法で行った。

## 3. 結果と考察

### 3.1 ガンマ線照射による水中重金属イオンの影響

まず、金属イオンを含む水溶液をそのままγ線で照射した。Fig. 1 にγ線で照射した 10<sup>-4</sup> mol/L Co<sup>2+</sup>水溶液中の Co<sup>2+</sup>の残留率とγ線照射線量との関係を示した。測定誤差を考慮すれば、Co<sup>2+</sup>の残留率は 100%であることを明らかにした。また、その他の濃度の Co<sup>2+</sup>水溶液も同様な結果となった。

すなわち、Co<sup>2+</sup>水溶液をそのままγ線で照射した場合、照射後 Co<sup>2+</sup>の濃度は変化しないことを意味する。また、Cu<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>、Ag<sup>+</sup>も同様な結果を得た。

(1) 式に示すように、水にγ線照射すると水和電子は発生するが、重金属イオンの濃度に変化が無いということはその電子と金属イオンとが結合しなかったことを意味する。この理由は、水中で水和電子がより速い反応に参与して、消えていくことが考えられる。従って、γ線照射により生成された水和電子を重金属イオンと結合するためには、何らかの工夫が必要である。現在、この研究は進行中で成果は次回で発表する。

### 3.2 ガンマ線照射による水-土壌混合試料中の中重金属イオンの影響

無照射の土壌-水混合物中の土壌を少量取り出し、乾燥した後、PIXE 分析を行った。結果は Table 1

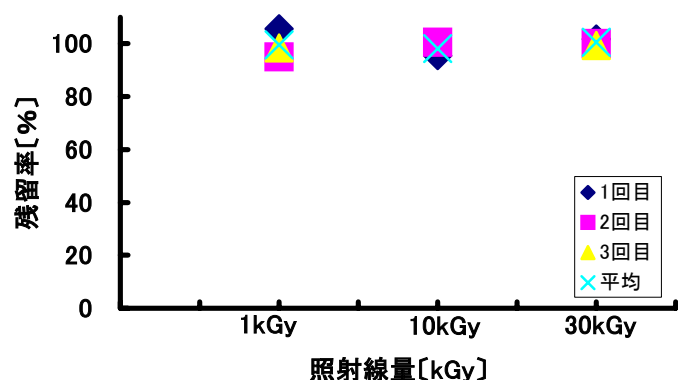


Fig. 1 γ線の照射線量と Co<sup>2+</sup>の残留率との関係

に示す。Table 1 から分かるように、金属元素 Na、Mg、Al、K、Ti、Cr、Mn、Fe、Cu、Zn、Ga、Pb、Se、Rb、Sr、Nb、Ag、Y、Zr、As、V などが測定された。また、 $\gamma$  線で照射した土壌-水混合物中の土壌を同様に少量取り出し、乾燥した後の PIXE 分析結果は Table 2 に示す。Table 1 と Table 2 を比較すると、 $\gamma$  線照射後、Rb、Nb、V、Pd、Ag、Ba の濃度が数割から数倍程度高くなった。非金属元素の中に、P と Cl の濃度も高くなった。一方、Zr、Ca の濃度は低くなった。その他の元素の濃度は殆ど変化しなかった。

また、無照射及び  $\gamma$  線照射した土壌-水混合物の遠心分離の上澄み溶液も PIXE 分析を行った。その結果は Table 3 及び Table 4 に示す。Table 3 と Table 4 を比較すると、大部分の元素が  $\gamma$  線照射により上澄み中の濃度が高くなっていることが分かった。これは恐らく元々不溶な化合物が  $\gamma$  線照射により何らかの反応で、可溶性成分になったことから、上澄み溶液中の元素の濃度が増加したと考えられる。一方、Se は照射後濃度が低くなった。また、V と As は無照射試料の上澄みでは検出されたが、照射後の試料の上澄みでは検出されなかった。

$\gamma$  線照射処理により、Rb、Nb、V、Pd、Ag、Ba などの金属元素及び幾つかの非金属元素が沈殿物及び上澄み両方ともに濃度が高くなった原因は不明であるが、 $\gamma$  線照射処理により土壌中の植物、微生物が分解され、それらの元素の濃度が高くなった可能性がある。今後、 $\gamma$  線照射線量を変えて、水-土壌混合物中の水及び土壌沈殿物中の金属イオンの濃度変化を詳しく検討したい。

## 謝辞

本研究は日本アイソトープ協会滝沢研究所平成 15 年度研究助成を受けたもので、感謝の意を表したい。また、試料の PIXE 測定は日本アイソトープ協会滝沢研究所の二ツ川章二様及び岩手医科大学サイクロترونセンターの世良耕一郎先生が行ってくださったもので、深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 「放射線化学」、近藤正春、篠崎善治著、コロナ社、1980.
- 2) Xing-Zheng Wu, Takeshi Yamamoto, Masanori Hatashita, Bull. Chem. Soc. Jpn., 75, 2527-2532 (2002)
- 3) Masanori Hatashita, Takeshi Yamamoto, Xing-Zheng Wu, Anal. Sci., 17, Suppl., i123-i1625 (2001).

Table 1 無照射の水-土壌混合物中の土壌のPIXE分析結果

Run No.	: 81865	Date	: 1/ 2/27		
Live Time	: 535 sec	Coulomb Num	: 48000 nC		
Detector No.:	< 1 >	Absorber	: 12:2Tiph+300		
Standard		ug/g	Standard Error	Peak Count	Error
4611 Pd K $\alpha$		10,000.00000	$\pm$ 0.00	10,345.8	$\pm$ 102.3
Samples		ug/g	Error	Peak Count	Error
1 :2611 Fe K $\alpha$		75,934.15610	$\pm$ 2,410.8040	109,659.5	$\pm$ 351.8
2 :2612 Fe K $\beta$		63,318.00789	$\pm$ 2,051.9039	27,317.6	$\pm$ 197.9
3 :2911 Cu K $\alpha$		28.36723	$\pm$ 6.2586	149.4	$\pm$ 32.6
4 :3011 Zn K $\alpha$		159.02311	$\pm$ 8.0458	1,091.9	$\pm$ 43.2
5 :2912 Cu K $\beta$		18.38043	$\pm$ 23.5309	20.0	$\pm$ 25.6
6 :3111 Ga K $\alpha$		22.49088	$\pm$ 3.7306	170.2	$\pm$ 27.7
7 :3012 Zn K $\beta$		243.10353	$\pm$ 24.8769	315.5	$\pm$ 30.7
8 :8021 Hg L $\alpha$		10.28177	$\pm$ 11.0332	21.5	$\pm$ 23.1
9 :8221 Pb L $\alpha$		125.49736	$\pm$ 13.1862	266.2	$\pm$ 26.7
10 :3511 Br K $\alpha$		18.69680	$\pm$ 2.9721	142.2	$\pm$ 22.2
11 :8222 Pb L $\beta$		58.07334	$\pm$ 11.2907	102.0	$\pm$ 19.6
12 :3512 Br K $\beta$		490.19941	$\pm$ 29.5555	635.1	$\pm$ 32.6
14 :3811 Sr K $\alpha$		186.22089	$\pm$ 9.0381	940.0	$\pm$ 34.6
15 :3712 Rb K $\beta$		159.12316	$\pm$ 17.9959	170.9	$\pm$ 18.6
16 :4011 Zr K $\alpha$		231.29233	$\pm$ 22.0868	851.4	$\pm$ 76.7
17 :3812 Sr K $\beta$		284.97021	$\pm$ 78.4417	265.9	$\pm$ 72.7
18 :4111 Nb K $\alpha$		6.29513	$\pm$ 3.5687	19.0	$\pm$ 10.7
20 :4012 Zr K $\beta$		235.65947	$\pm$ 26.9357	163.3	$\pm$ 17.
23 :4611 Pd K $\alpha$		10,000.00000	$\pm$ 330.9631	10,345.8	$\pm$ 102.3
24 :4711 Ag K $\alpha$		26.41193	$\pm$ 11.6279	22.4	$\pm$ 9.8
26 :5211 Te K $\alpha$		35.48961	$\pm$ 28.6079	9.2	$\pm$ 7.4
28 :5611 Ba K $\alpha$		161.24373	$\pm$ 89.4839	13.9	$\pm$ 7.7
<Calculation of Overlapping Peaks>					
:3711 Rb K $\alpha$		105.66807	$\pm$ 6.5553	610.9	$\pm$ 32.6
:3911 Y K $\alpha$		9.93194	$\pm$ 3.2259	57.4	$\pm$ 18.6
:8221 Pb L $\alpha$		58.07334	$\pm$ 12.7093	123.2	$\pm$ 26.7
:3311 As K $\alpha$		17.49614	$\pm$ 3.3099	143.0	$\pm$ 26.7
Run No.	: 81869	Date	: 1/ 2/27		
Live Time	: 478 sec	Coulomb Num	: 48000 nC		
Detector No.:	< 2 >	Absorber	: Off		
Standard		ug/g	Standard Error	Peak Count	Error
2611 Fe K $\alpha$		63,318.00000	$\pm$ 2050.00	17,246.4	$\pm$ 138.3
Samples		ug/g	Error	Peak Count	Error
1 :1111 Na K $\alpha$		10,550.14960	$\pm$ 422.0038	9,477.7	$\pm$ 239.0
2 :1211 Mg K $\alpha$		5,744.66155	$\pm$ 289.7969	9,010.9	$\pm$ 358.2
3 :1311 Al K $\alpha$		97,996.09273	$\pm$ 3,068.4790	174,170.9	$\pm$ 699.6
4 :1411 Si K $\alpha$		320,141.92855	$\pm$ 9,952.3816	669,251.8	$\pm$ 970.1
5 :1511 P K $\alpha$		908.06908	$\pm$ 157.7078	1,840.3	$\pm$ 314.5
6 :1611 S K $\alpha$		612.35372	$\pm$ 82.0033	1,154.2	$\pm$ 150.4
7 :1711 Cl K $\alpha$		615.30936	$\pm$ 153.6776	957.6	$\pm$ 237.3
8 :1911 K K $\alpha$		22,824.50736	$\pm$ 731.6242	28,063.3	$\pm$ 223.0
9 :1912 K K $\beta$		18,268.42995	$\pm$ 1,078.9338	2,750.4	$\pm$ 138.2
10 :2011 Ca K $\alpha$		7,176.55115	$\pm$ 263.4819	7,487.4	$\pm$ 146.6
11 :2012 Ca K $\beta$		7,713.09368	$\pm$ 664.7458	1,053.3	$\pm$ 84.7
12 :2211 Ti K $\alpha$		4,993.52409	$\pm$ 194.9036	3,236.8	$\pm$ 76.5
14 :2212 Ti K $\beta$		6,353.53857	$\pm$ 586.6317	540.9	$\pm$ 47.0
16 :2411 Cr K $\alpha$		195.62955	$\pm$ 70.9218	83.6	$\pm$ 30.2
17 :2511 Mn K $\alpha$		1,034.78230	$\pm$ 117.8845	346.3	$\pm$ 38.0
18 :2611 Fe K $\alpha$		63,318.00000	$\pm$ 2,030.7722	17,246.4	$\pm$ 138.3
19 :2612 Fe K $\beta$		66,402.32767	$\pm$ 2,582.0288	2,429.7	$\pm$ 56.9
<Calculation of Overlapping Peaks>					
:2011 Ca K $\alpha$		6519.09665	$\pm$ 246.4542	6,801.4	$\pm$ 146.6
:2311 V K $\alpha$		223.01277	$\pm$ 90.8553	115.8	$\pm$ 47.0
:2511 Mn K $\alpha$		1002.64700	$\pm$ 117.6164	335.5	$\pm$ 38.0

Table 2  $\gamma$ 線で照射した水-土壌混合物中の土壌の PIXE 分析結果

Run No.	: 81863	Date	: 1/ 2/27		
Live Time	: 464 sec	Coulomb Num	: 44000 nC		
Detector No.	: < 1 >	Absorber	: 12:2Tiph+300		
Standard		ug/g	Standard Error	Peak Count	Error
4611 Pd K $\alpha$		15,000.00000	$\pm$ 0.00	17,244.6	$\pm$ 131.8
Samples		ug/g	Error	Peak Count	Error
1 :2611 Fe K $\alpha$		73,516.02872	$\pm$ 2,287.3021	117,974.9	$\pm$ 365.0
2 :2612 Fe K $\beta$		60,340.40839	$\pm$ 1,916.1590	28,928.2	$\pm$ 204.5
3 :2911 Cu K $\alpha$		28.98566	$\pm$ 6.1430	169.7	$\pm$ 35.6
4 :3011 Zn K $\alpha$		180.39441	$\pm$ 8.7135	1,376.4	$\pm$ 51.0
5 :2912 Cu K $\beta$		112.70040	$\pm$ 28.7924	136.3	$\pm$ 34.6
6 :3111 Ga K $\alpha$		30.28143	$\pm$ 4.2613	254.6	$\pm$ 34.9
7 :3012 Zn K $\beta$		245.25181	$\pm$ 25.4474	353.6	$\pm$ 35.0
8 :8021 Hg L $\alpha$		0.51933	$\pm$ 11.0919	1.2	$\pm$ 25.8
9 :8221 Pb L $\alpha$		119.84096	$\pm$ 13.7751	282.5	$\pm$ 31.3
10 :3511 Br K $\alpha$		16.26908	$\pm$ 2.9395	137.5	$\pm$ 24.5
11 :8222 Pb L $\beta$		72.52864	$\pm$ 13.2557	141.5	$\pm$ 25.5
12 :3512 Br K $\beta$		463.45572	$\pm$ 27.8908	667.2	$\pm$ 34.4
14 :3811 Sr K $\alpha$		170.52795	$\pm$ 8.1682	956.5	$\pm$ 35.0
15 :3712 Rb K $\beta$		233.27995	$\pm$ 19.2787	278.4	$\pm$ 21.3
16 :4011 Zr K $\alpha$		147.91047	$\pm$ 17.3392	605.0	$\pm$ 68.4
17 :3812 Sr K $\beta$		223.91305	$\pm$ 63.6093	232.2	$\pm$ 65.6
18 :4111 Nb K $\alpha$		15.80852	$\pm$ 4.0544	52.9	$\pm$ 13.5
19 :4012 Zr K $\beta$		148.03569	$\pm$ 22.5783	114.0	$\pm$ 17.0
22 :4611 Pd K $\alpha$		15,000.00000	$\pm$ 478.3318	17,244.6	$\pm$ 131.8
23 :4711 Ag K $\alpha$		87.75320	$\pm$ 14.5403	82.7	$\pm$ 13.5
24 :5111 Sb K $\alpha$		30.22591	$\pm$ 23.8749	12.1	$\pm$ 9.5
25 :5211 Te K $\alpha$		79.35014	$\pm$ 36.2135	23.0	$\pm$ 10.5
26 :5611 Ba K $\alpha$		712.94191	$\pm$ 90.7688	68.1	$\pm$ 8.4
<Calculation of Overlapping Peaks>					
:3711 Rb K $\alpha$		100.21864	$\pm$ 6.1933	643.8	$\pm$ 34.4
:3911 Y K $\alpha$		24.72275	$\pm$ 3.4082	158.8	$\pm$ 21.3
:8221 Pb L $\alpha$		72.52865	$\pm$ 13.4548	171.0	$\pm$ 31.3
:3311 As K $\alpha$		12.27727	$\pm$ 3.4634	111.5	$\pm$ 31.3
Run No.	: 81867	Date	: 1/ 2/27		
Live Time	: 410 sec	Coulomb Num	: 44000 nC		
Detector No.	: < 2 >	Absorber	: Off		
Standard		ug/g	Standard Error	Peak Count	Error
2611 Fe K $\alpha$		60,340.40000	$\pm$ 1920.00	18,164.1	$\pm$ 143.5
Samples		ug/g	Error	Peak Count	Error
1 :1111 Na K $\alpha$		10,304.16026	$\pm$ 407.9951	10,230.4	$\pm$ 251.7
2 :1211 Mg K $\alpha$		5,488.51597	$\pm$ 276.9907	9,514.7	$\pm$ 378.7
3 :1311 Al K $\alpha$		90,590.66929	$\pm$ 2,832.8162	177,945.3	$\pm$ 699.4
4 :1411 Si K $\alpha$		312,854.02561	$\pm$ 9,715.5907	722,811.3	$\pm$ 1,021.7
5 :1511 P K $\alpha$		1,328.75426	$\pm$ 170.7245	2,976.2	$\pm$ 371.1
6 :1611 S K $\alpha$		520.63856	$\pm$ 84.4023	1,084.6	$\pm$ 172.6
7 :1711 Cl K $\alpha$		1,160.90380	$\pm$ 169.1007	1,996.7	$\pm$ 284.2
8 :1911 K K $\alpha$		22,147.44013	$\pm$ 708.2000	30,095.2	$\pm$ 233.3
9 :1912 K K $\beta$		14,509.79539	$\pm$ 1,002.3730	2,414.3	$\pm$ 149.0
10 :2011 Ca K $\alpha$		6,432.55195	$\pm$ 238.5354	7,417.1	$\pm$ 150.7
11 :2012 Ca K $\beta$		7,659.43312	$\pm$ 684.8956	1,156.0	$\pm$ 96.9
12 :2211 Ti K $\alpha$		4,933.27767	$\pm$ 192.8804	3,534.1	$\pm$ 84.1
14 :2212 Ti K $\beta$		6,986.69597	$\pm$ 619.7467	657.4	$\pm$ 54.6
16 :2411 Cr K $\alpha$		219.61613	$\pm$ 74.1381	103.7	$\pm$ 34.9
17 :2511 Mn K $\alpha$		1,051.27926	$\pm$ 119.1779	388.8	$\pm$ 42.4
18 :2611 Fe K $\alpha$		60,340.40000	$\pm$ 1,931.6411	18,164.1	$\pm$ 143.5
19 :2612 Fe K $\beta$		62,996.14367	$\pm$ 2,456.4825	2,547.5	$\pm$ 60.2
<Calculation of Overlapping Peaks>					
:2011 Ca K $\alpha$		5330.41915	$\pm$ 210.7659	6,146.2	$\pm$ 150.7
:2311 V K $\alpha$		336.71578	$\pm$ 95.7787	193.2	$\pm$ 54.6
:2511 Mn K $\alpha$		1015.20378	$\pm$ 118.8766	375.5	$\pm$ 42.4

照射線量 : 30 KGy

Table 3 無照射の水-土壌混合物を遠心分離した上澄みの PIXE 分析結果

Standard	In	K $\alpha$	ug/g	Standard Error	Peak Count	Error
4911	In	K $\alpha$	20.00000	± 0.00	2,822.3	± 53.5
Samples			ug/g	Error	Peak Count	Error
1	:1911	K K $\alpha$	11.47889	± 0.5204	2,518.8	± 71.1
2	:1912	K K $\beta$	6.66189	± 1.1875	740.4	± 129.3
3	:2011	Ca K $\alpha$	4.51433	± 0.1928	5,524.5	± 131.2
4	:2012	Ca K $\beta$	2.68611	± 0.1996	1,422.7	± 92.9
7	:2211	Ti K $\alpha$	0.12898	± 0.0120	918.4	± 79.2
9	:2212	Ti K $\beta$	0.20827	± 0.0415	408.9	± 80.1
10	:2411	Cr K $\alpha$	0.00371	± 0.0042	56.5	± 64.1
11	:2511	Mn K $\alpha$	0.42700	± 0.0165	7,030.2	± 107.4
12	:2611	Fe K $\alpha$	2.67262	± 0.0962	45,893.1	± 277.9
13	:2512	Mn K $\beta$	0.59773	± 0.0685	1,733.4	± 189.0
14	:2612	Fe K $\beta$	2.69418	± 0.1013	7,871.3	± 98.1
15	:2811	Ni K $\alpha$	0.00042	± 0.0017	6.5	± 26.9
16	:2911	Cu K $\alpha$	0.01128	± 0.0016	151.1	± 20.9
17	:3011	Zn K $\alpha$	0.03265	± 0.0023	389.2	± 24.4
18	:2912	Cu K $\beta$	0.00559	± 0.0060	11.7	± 12.6
19	:3012	Zn K $\beta$	0.02684	± 0.0068	49.9	± 12.6
20	:8021	Hg L $\alpha$	0.00006	± 0.0034	0.1	± 8.9
21	:8221	Pb L $\alpha$	0.09404	± 0.0085	206.7	± 17.2
22	:3411	Se K $\alpha$	0.00157	± 0.0016	7.9	± 8.2
23	:3511	Br K $\alpha$	0.08189	± 0.0057	347.8	± 21.0
24	:8222	Pb L $\beta$	0.07251	± 0.0117	87.0	± 13.7
26	:3711	Rb K $\alpha$	0.02351	± 0.0044	63.4	± 11.5
27	:3811	Sr K $\alpha$	0.00855	± 0.0035	18.5	± 7.6
28	:3712	Rb K $\beta$	0.02781	± 0.0126	14.7	± 6.6
29	:3812	Sr K $\beta$	0.00416	± 0.0123	1.8	± 5.3
30	:4111	Nb K $\alpha$	0.00561	± 0.0049	6.2	± 5.5
31	:4211	Mo K $\alpha$	0.01204	± 0.0075	10.5	± 6.5
32	:4711	Ag K $\alpha$	0.10537	± 0.0289	26.1	± 7.1
33	:4911	In K $\alpha$	20.00000	± 0.8047	2,822.3	± 53.5
<Calculation of Overlapping Peaks>						
	:2011	Ca K $\alpha$	4.07685	± 0.1801	4,989.1	± 131.2
	:2311	V K $\alpha$	0.01366	± 0.0070	155.7	± 80.1
	:2511	Mn K $\alpha$	0.42638	± 0.0165	7,020.0	± 107.4
	:8221	Pb L $\alpha$	0.07251	± 0.0082	159.4	± 17.2
	:3311	As K $\alpha$	0.00720	± 0.0026	47.3	± 17.2
Run No. : 81731 Date : 1/ 2/26						
Live Time : 681 sec Coulomb Num : 23000 nC						
Detector No. : < 2 > Absorber : Off						
Standard		K K $\alpha$	ug/g	Standard Error	Peak Count	Error
1911		K K $\alpha$	11.47880	± 0.52	5,274.1	± 88.7
Samples			ug/g	Error	Peak Count	Error
1	:1111	Na K $\alpha$	2.97419	± 0.3068	998.4	± 97.1
2	:1211	Mg K $\alpha$	0.98629	± 0.1897	578.1	± 109.4
3	:1311	Al K $\alpha$	7.43305	± 0.3249	4,936.8	± 133.2
4	:1411	Si K $\alpha$	15.95508	± 0.5831	12,464.0	± 154.2
5	:1511	P K $\alpha$	0.23568	± 0.1111	178.5	± 83.9
6	:1611	S K $\alpha$	1.64897	± 0.1126	1,161.5	± 68.5
7	:1711	Cl K $\alpha$	3.09388	± 0.1711	1,799.2	± 77.9
9	:1911	K K $\alpha$	11.47880	± 0.4394	5,274.1	± 88.7
10	:1912	K K $\beta$	11.68979	± 1.1361	657.7	± 59.8
11	:2011	Ca K $\alpha$	4.36330	± 0.2181	1,701.1	± 61.7
12	:2012	Ca K $\beta$	2.55102	± 0.5030	130.2	± 25.3

Table 4  $\gamma$ 線照射した水-土壌混合物を遠心分離した上澄みの PIXE 分析結果

Standard		ug/g	Standard Error	Peak Count	Error
4911	In $K\alpha$	20.00000 $\pm$	0.00	542.7 $\pm$	23.3
Samples		ug/g	Error	Peak Count	Error
1 :1911	K $K\alpha$	33.24154 $\pm$	2.1608	1,402.7 $\pm$	53.9
2 :1912	K $K\beta$	23.22136 $\pm$	4.4601	496.3 $\pm$	91.7
3 :2011	Ca $K\alpha$	13.71738 $\pm$	0.8300	3,228.2 $\pm$	97.7
4 :2012	Ca $K\beta$	11.97401 $\pm$	0.8839	1,219.6 $\pm$	63.4
5 :2211	Ti $K\alpha$	2.88999 $\pm$	0.1655	3,957.2 $\pm$	91.3
7 :2212	Ti $K\beta$	2.78681 $\pm$	0.2223	1,052.1 $\pm$	63.3
8 :2411	Cr $K\alpha$	0.11304 $\pm$	0.0193	331.1 $\pm$	53.8
9 :2511	Mn $K\alpha$	2.48816 $\pm$	0.1354	7,877.9 $\pm$	115.8
10 :2611	Fe $K\alpha$	51.31395 $\pm$	2.6937	169,448.8 $\pm$	521.4
11 :2512	Mn $K\beta$	7.87246 $\pm$	0.7336	4,390.3 $\pm$	338.3
12 :2612	Fe $K\beta$	52.49332 $\pm$	2.7701	29,492.7 $\pm$	182.6
13 :2911	Cu $K\alpha$	0.05501 $\pm$	0.0102	141.7 $\pm$	25.1
14 :3011	Zn $K\alpha$	0.27855 $\pm$	0.0208	638.4 $\pm$	34.1
15 :2912	Cu $K\beta$	0.01077 $\pm$	0.0485	4.3 $\pm$	19.6
16 :3111	Ga $K\alpha$	0.01593 $\pm$	0.0101	30.2 $\pm$	19.0
17 :3012	Zn $K\beta$	0.18935 $\pm$	0.0553	67.7 $\pm$	19.4
18 :8221	Pb $L\alpha$	0.09277 $\pm$	0.0418	39.2 $\pm$	17.6
19 :3411	Se $K\alpha$	0.00972 $\pm$	0.0172	9.4 $\pm$	16.6
20 :3511	Br $K\alpha$	0.19900 $\pm$	0.0296	162.5 $\pm$	22.7
21 :8222	Pb $L\beta$	0.33418 $\pm$	0.1001	77.1 $\pm$	22.8
23 :3711	Rb $K\alpha$	0.33629 $\pm$	0.0398	174.3 $\pm$	18.5
24 :3811	Sr $K\alpha$	0.11562 $\pm$	0.0222	48.1 $\pm$	8.9
25 :3712	Rb $K\beta$	0.06930 $\pm$	0.0537	7.0 $\pm$	5.4
26 :3812	Sr $K\beta$	0.18891 $\pm$	0.0690	15.8 $\pm$	5.7
27 :4111	Nb $K\alpha$	0.01455 $\pm$	0.0211	3.1 $\pm$	4.5
29 :4711	Ag $K\alpha$	0.24473 $\pm$	0.0908	11.6 $\pm$	4.3
30 :4911	In $K\alpha$	20.00000 $\pm$	1.3554	542.7 $\pm$	23.3
<Calculation of Overlapping Peaks>					
:2011	Ca $K\alpha$	12.80734 $\pm$	0.7891	3,014.1 $\pm$	97.7
:2511	Mn $K\alpha$	2.46942 $\pm$	0.1345	7,818.5 $\pm$	115.8
:3711	Rb $K\alpha$	0.27731 $\pm$	0.0385	143.7 $\pm$	18.5
:8221	Pb $L\alpha$	0.09277 $\pm$	0.0418	39.2 $\pm$	17.6
Run No.	: 81732	Date	: 1/ 2/26		
Live Time	: 530 sec	Coulomb Num	: 5700 nC		
Detector No.	: < 2 >	Absorber	: Off		
Standard		ug/g	Standard Error	Peak Count	Error
1911	K $K\alpha$	33.24150 $\pm$	2.16	3,669.7 $\pm$	71.5
Samples		ug/g	Error	Peak Count	Error
1 :1111	Na $K\alpha$	12.46793 $\pm$	1.0631	1,005.6 $\pm$	77.8
2 :1211	Mg $K\alpha$	9.68018 $\pm$	0.8152	1,363.3 $\pm$	103.9
3 :1311	Al $K\alpha$	153.42768 $\pm$	5.6714	24,483.7 $\pm$	228.1
4 :1411	Si $K\alpha$	220.68602 $\pm$	8.0190	41,421.8 $\pm$	264.5
5 :1511	P $K\alpha$	2.94712 $\pm$	0.4980	536.3 $\pm$	88.6
6 :1611	S $K\alpha$	8.02310 $\pm$	0.4487	1,357.8 $\pm$	58.4
7 :1711	Cl $K\alpha$	3.17729 $\pm$	0.3385	444.0 $\pm$	44.6
8 :1911	K $K\alpha$	33.24150 $\pm$	1.3540	3,669.7 $\pm$	71.5
9 :1912	K $K\beta$	28.27407 $\pm$	3.4399	382.2 $\pm$	44.4
10 :2011	Ca $K\alpha$	12.84669 $\pm$	0.6989	1,203.4 $\pm$	49.3
11 :2012	Ca $K\beta$	10.79248 $\pm$	1.7190	132.3 $\pm$	20.5
<Calculation of Overlapping Peaks>					
:2011	Ca $K\alpha$	12.12988 $\pm$	0.6823	1,136.3 $\pm$	49.3

照射線量 : 30 KGy