

福島第一原子力発電所事故によって 汚染された土壌の減容化



生活環境早期復旧技術研究センター

東北大学 流体科学研究所 第2回公開講座『今、エネルギーを考える』

日時：平成27年11月7日（土）場所：片平さくらホール
東北大学大学院工学研究科
生活環境早期復旧技術研究センター
石井慶造

内容

- § 1 福島第一原子力発電所事故による放射能汚染
- § 2 水洗浄による減容化
- § 3 減容化を取り入れた除染
- § 4 更なる減容化に向けて粘土粒子のCs汚染構造解析

§ 1 福島第一原子力発電所事故による放射能汚染



東日本大震災が平成23年
3月11日14時46分に
発生



震災後、大津波

NHKより

大津波が福島第一原子力
発電所を襲う。



福島第一原子力3・4号機の排気筒（左から3本目、高さ約120メートル）に迫る大津波（3月11日撮影、東京電力提供）



原子炉建屋が水素爆発
福島中央テレビより

発電所から飛来し検出された放射性同位元素

- | | | | |
|-----------|-----|------|-----------|
| 1. Cs-137 | 半減期 | 30年 | ベータ線、ガンマ線 |
| 2. Cs-134 | 半減期 | 2年 | ベータ線、ガンマ線 |
| 3. Te-132 | 半減期 | 77時間 | ベータ線、ガンマ線 |
| 4. I-131 | 半減期 | 8日 | ベータ線、ガンマ線 |
| 5. Sr-90 | 半減期 | 28年 | ベータ線 |
| 6. Sr-89 | 半減期 | 50日 | ベータ線 |

$$A = \frac{0.69}{T} N$$

当初は、寿命の短いI-131が空間線量の主な成分であったが、現在はCsが主である。一方、ガンマ線測定では同定できないSr-90などの放射性同位元素も原子炉で生成されるが、これらの元素は、蒸発点が高いため、多く飛来して来なかったと思われる。実際、文科省の測定によると、福島市近辺ではSrは微量しか検出されなかった。

半減期が長すぎて観測にかからないもの。（飛来したかどうか分からない。）

- | | | | | |
|----------|-----|--------|------|------------------|
| Rb - 87 | 半減期 | 492億年 | ベータ線 | （すでに天然に存在 27.8%） |
| Zr - 93 | 半減期 | 153万年 | ベータ線 | |
| Zr - 96 | 半減期 | 2400京年 | ベータ線 | （すでに天然に存在 2.8%） |
| Mo - 100 | 半減期 | 850京年 | ベータ線 | （すでに天然に存在 9.67%） |
| I - 129 | 半減期 | 1570万年 | ベータ線 | |
| Cs - 135 | 半減期 | 230万年 | ベータ線 | |

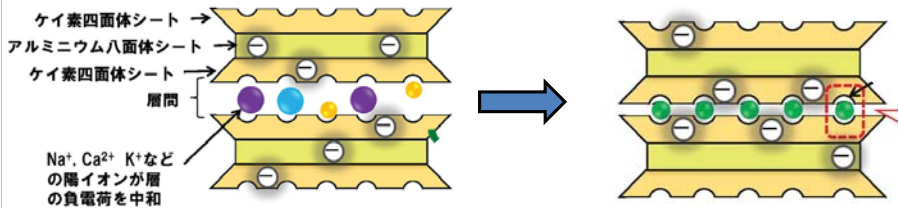
粘土が福島・宮城を救った！

Csの土壌中の挙動

- 粘土等の強固な結合体：70% (植物へ移行困難)
- イオン交換体：10% (植物へ移行しやすい)
- 有機物との結合体：20% (植物へ移行しやすい)

ケイ素四面体シートを上から見た模式図

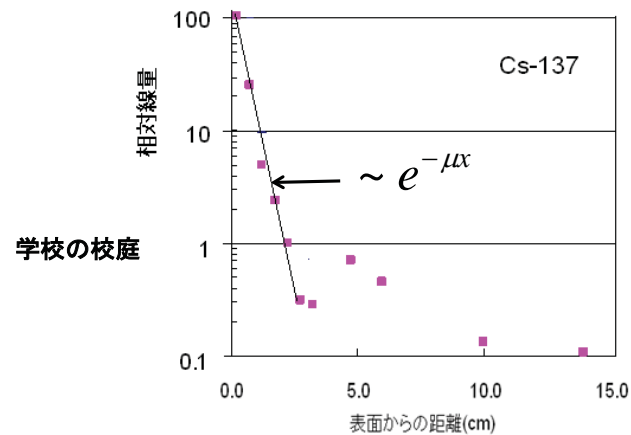
セシウムは粘土質にしっかり吸着された。



日本土壌肥料学会

事故当初、放射性セシウムは、ほとんど地面の表面に分布していた。

表面から約5mmの厚さにほとんど放射能は分布していた。分布は表面からの距離の指数関数で減少していた。



§ 2 水洗浄による減容化

福島市聖心三育保育園の要請を受け、園庭の除染を実施。
2011年4月



5mmの層を取った土



除染前の土
(30,000Bq/kg)

水を加えて、かき回し、粘土が沈殿する前に、そして荒い粒子が先に沈殿した後（約30秒後）に上澄み液を取り去った土は、放射能が、元の土の4分の1になった。

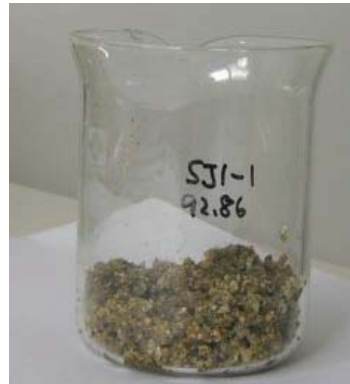
さらに、2回洗浄したところ、25分の1になった。



攪拌5分

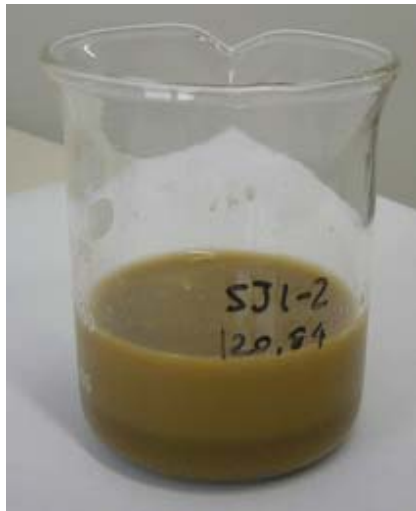


ろ過
210 μ mメッシュ使用



洗浄土 → 元に戻せる

上澄み液とそれに解けていた粘土



放置中

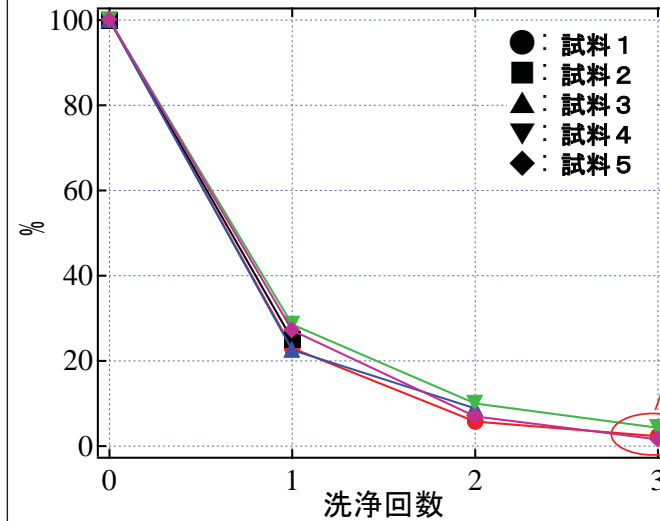


15分放置

粘土が沈殿して分離した上澄み液には、放射能は含まれて居なかった。

土壤の水洗浄の除染効果

相対線量率



土壤の放射能 : 100%
1回洗浄後 : 28%
2回洗浄後 : 10%
3回洗浄後 : 3.9%

土壤の重量 : 100.06g
1回洗浄後 : 90.57g
2回洗浄後 : 88.5g
3回洗浄後 : 87.14g
粘土重量 : 16.12g

分離された粘土の重量は、元の汚染土壌の量の約100分の8になった。



更に減容



105 $^{\circ}$ Cで乾燥させた粘土の量が2分の1になった。

ペレット化 (小型化)

保管が容易

§ 3 減容化を取り入れた除染

汚染土壌の除染+減容の実践

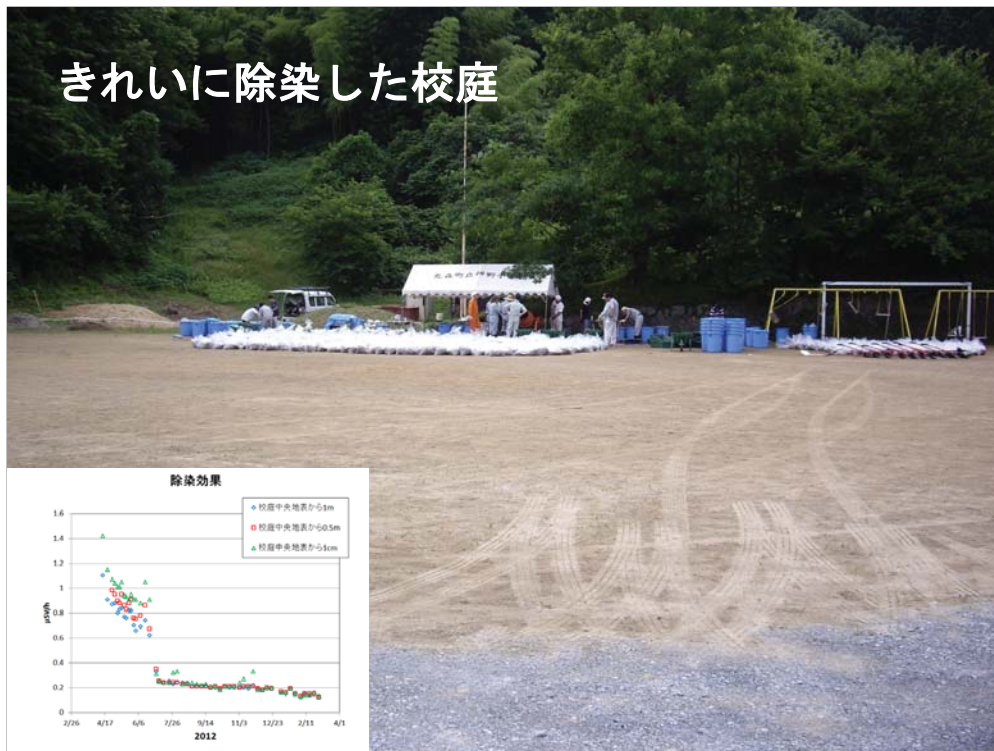
2011年6月29日～7月14日

丸森町長の要請により、丸森町の2小学校、2保育園の校庭の除染をこの除染方法で行った。

学校名	校庭面積(約)
耕野小学校	2,500㎡
耕野保育園	400㎡
筆甫小学校	3,500㎡
筆甫保育所	400㎡



除染作業

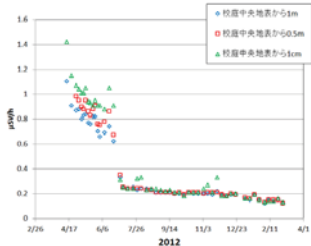


きれいに除染した校庭



汚染土壌から粘土を分離

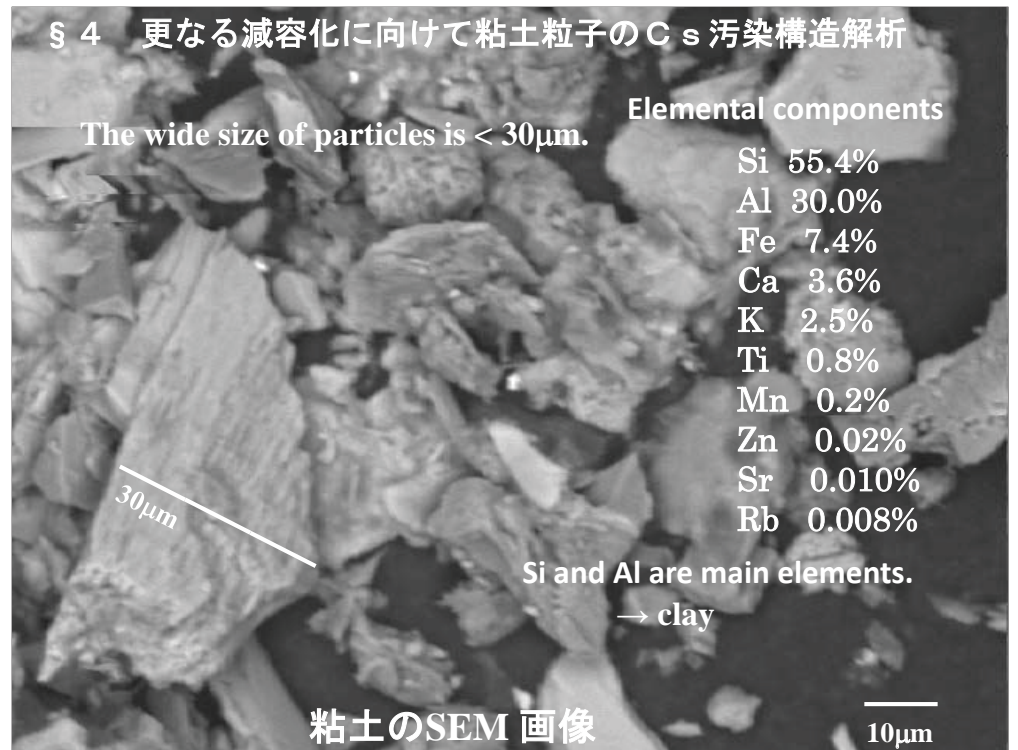
除染効果







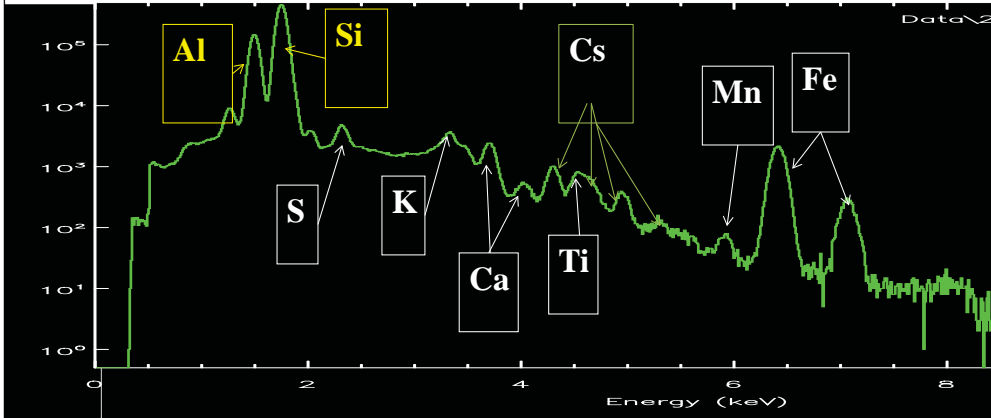
この方法のミニプラント化
汚染土壌を水で洗浄し、粘土を分離するシステムを開発



PIXEによる解析

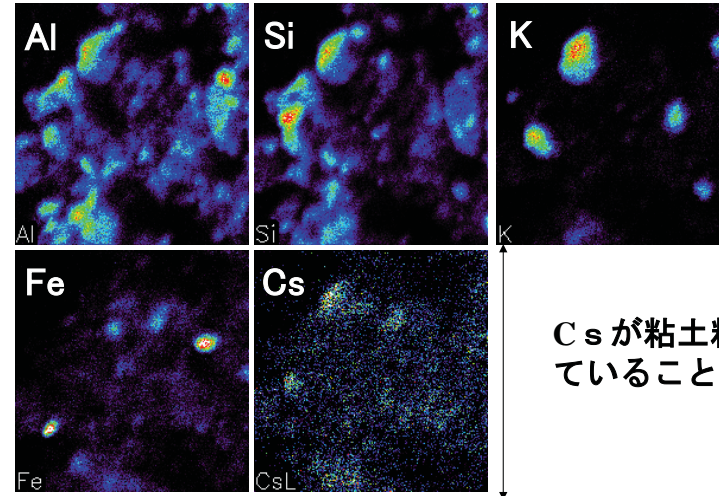
Silt of Vegetable Field

Detector for Low Energy X-ray (PGT LS10129)



Experimental Condition
 Particle : H⁺
 Beam Energy : 3 MeV
 Scanned Area : 50 μ m * 50 μ m
 Dose : [uC]

25 μ m 以下に分級した土の元素分布図



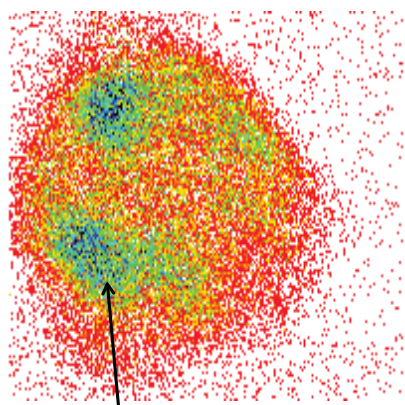
Csが粘土粒子に着いていることが分かる。

スキャン範囲 150 × 150 μ m²

畑のシルト

PIXE 画像

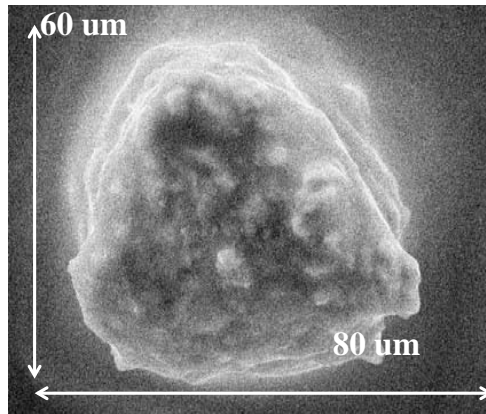
陽子 3 MeV 飛程:92 μ m
 50 μ m * 50 μ m 0.58 uC Cs



スメクタイト又はパーミュキュライト

EPMA-EDXRF

電子エネルギー: 15 keV

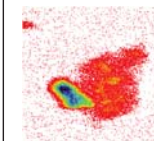
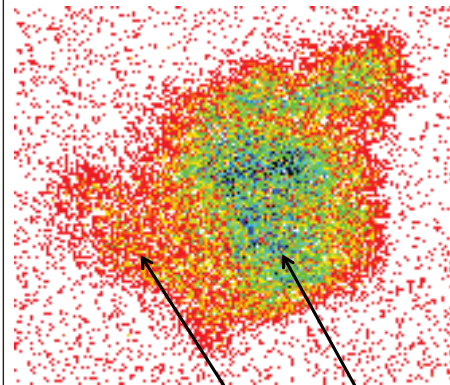


2次電子画像

水田のシルト

PIXE 画像

陽子 3 MeV 飛程:92 μ m
 50 μ m * 50 μ m 1.59 uC Cs



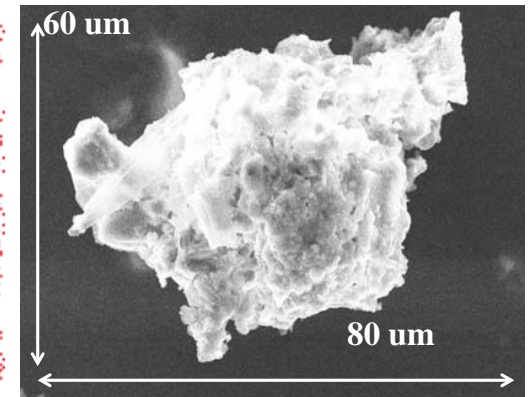
マイカ

スメクタイト又はパーミュキュライト

K

EPMA-EDXRF

電子エネルギー: 15 keV



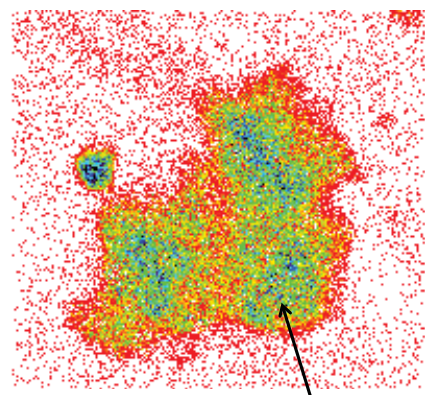
2次電子画像

山のシルト

PIXE 画像

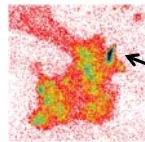
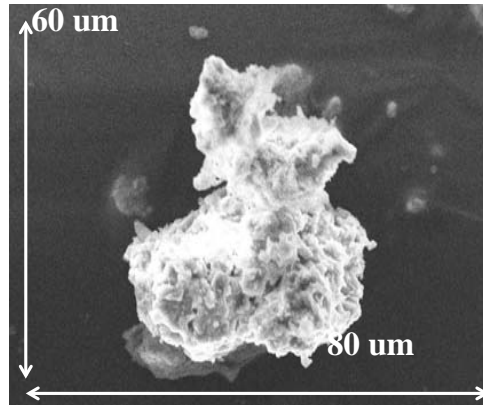
陽子 3 MeV 飛程: 92 μm

50 μm * 50 μm 1.1 μC Cs



EPMA-EDXRF

電子エネルギー: 15 keV



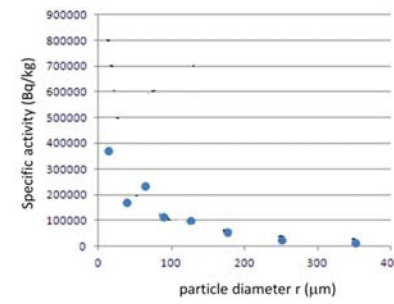
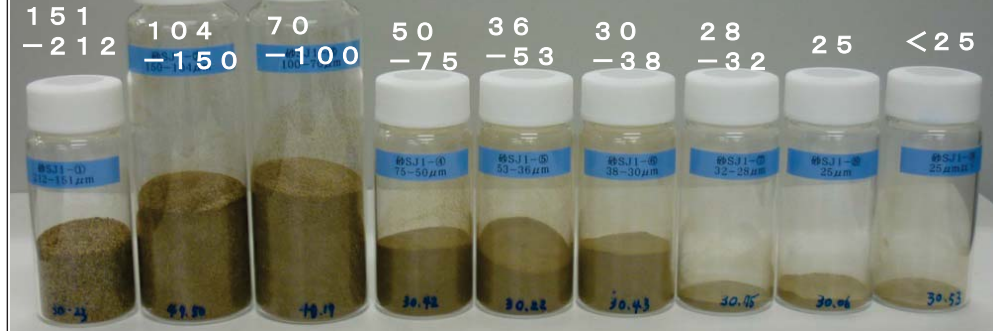
スメクタイト又はパーミュキュライト

マイカ

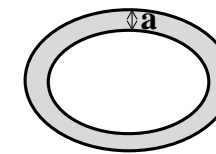
K

2次電子画像

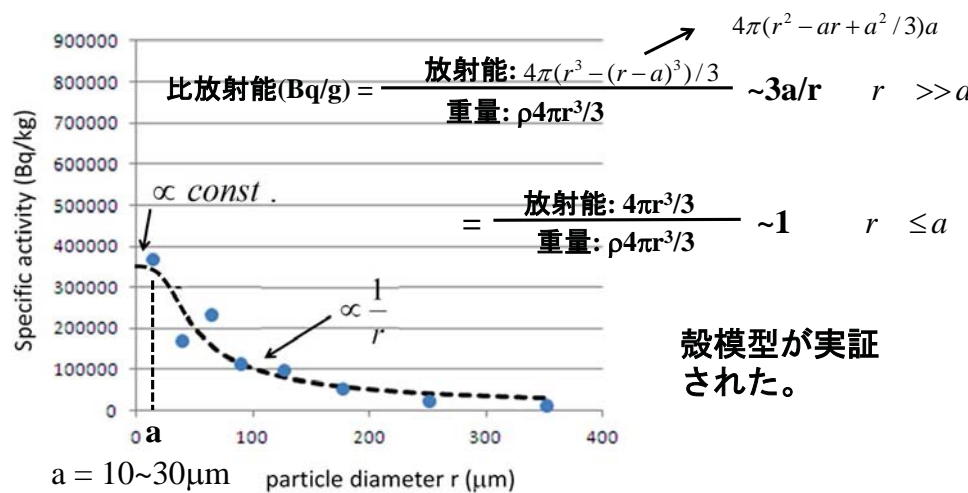
汚染粘土の分級(μm)



比放射能の粒径依存性

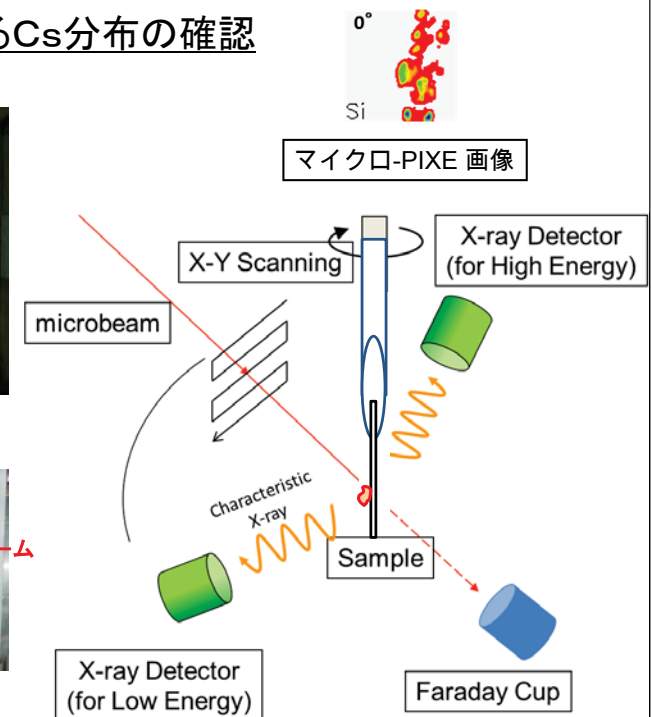
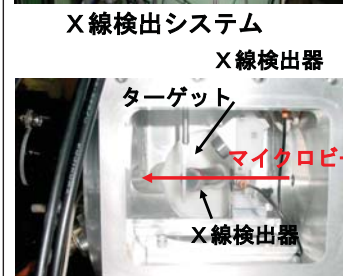


土壌の汚染に対して殻模型を仮定



殻模型が実証された。

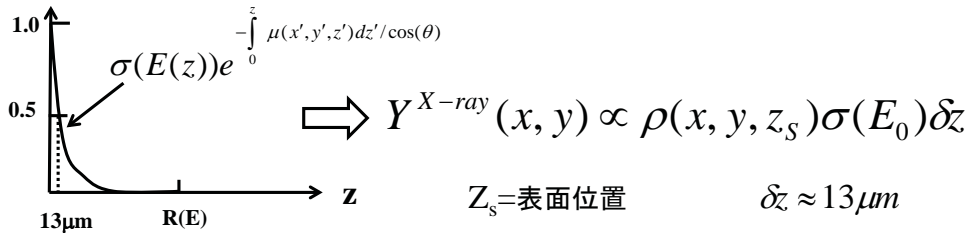
Micro-PIXE CTによるCs分布の確認



X線発生断面積

$$Y^{X-ray}(x, y) \propto \int_0^{Z_{max}} dz \rho(x, y, z) \sigma(E(z)) e^{-\int_0^z \mu(x', y', z') dz' / \cos(\theta)}$$

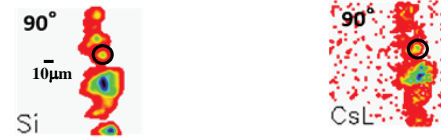
$$\left[\frac{\sigma(E(Z_{max}))}{\sigma(E_0)} (\approx 0.45) \times e^{-\mu z} (= 0.35) \right] = 0.15 \quad Z_{max} \sim 30 \mu\text{m} \text{ の場合}$$



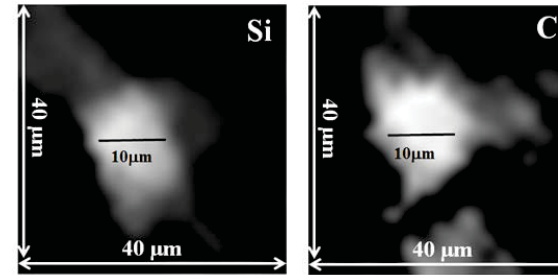
13 μm 径以下の粒子しかPIXE-CTは可能でない。

micro-PIXE CTの結果

2D 投影データ



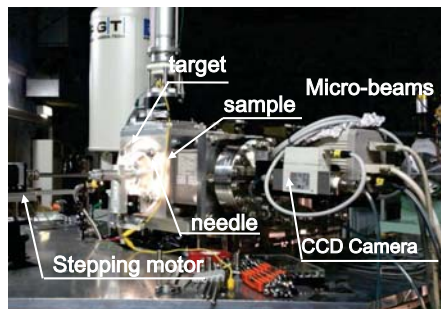
円内における粒子のCsとSiの断面図



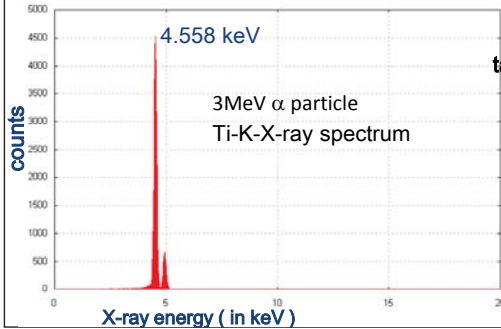
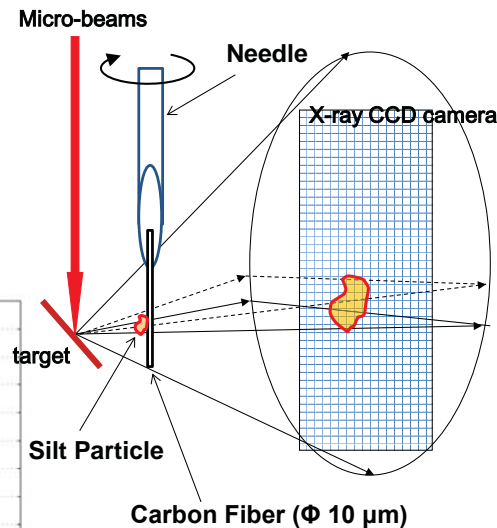
- Si 画像は粘土粒子の断面を反映
- Cs 原子が粘土粒子内で一様に分布していることが分かる。これは、放射能分布からの類推結果と一致する。

径が10 μm 以上の場合はMicron-CTの応用

Micron CT System @Tohoku University

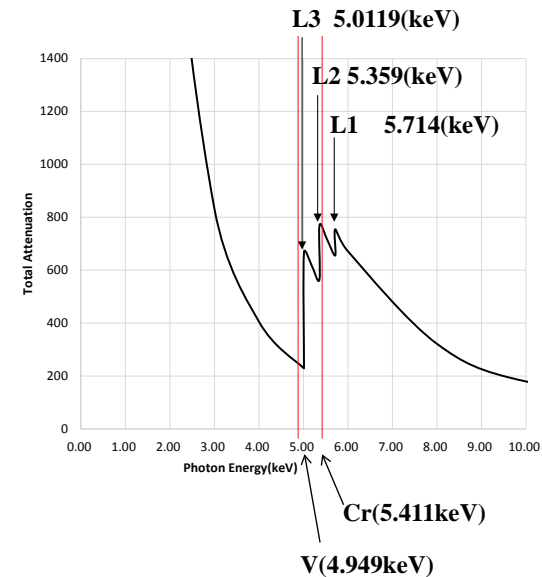


Micron-CT の原理

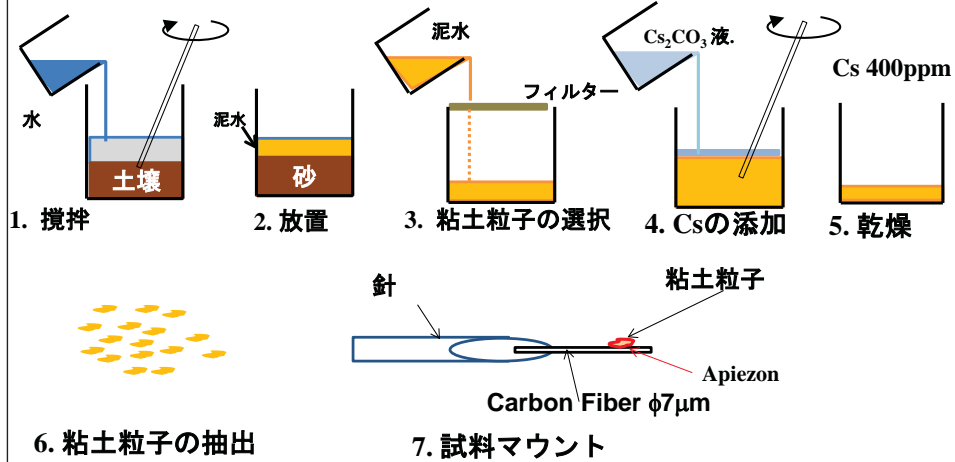


Cs L 殻の吸収端の利用

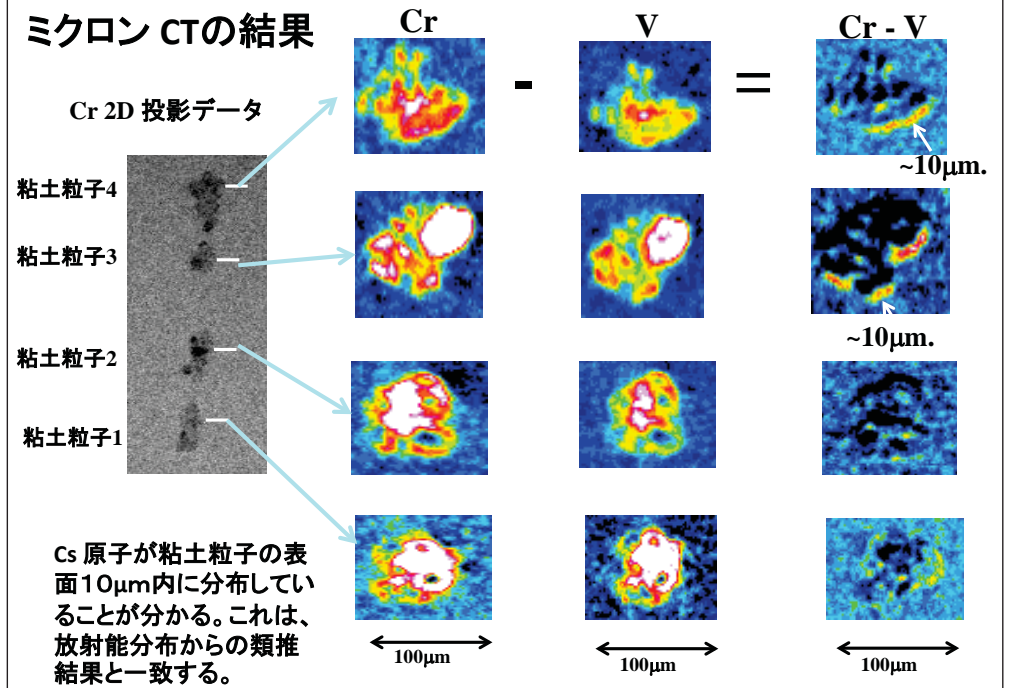
Cs の質量吸収係数



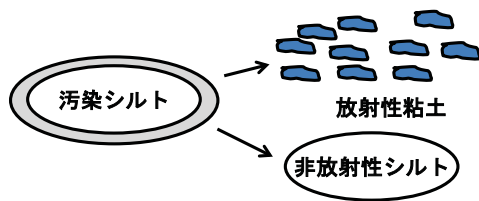
ターゲット作成



ミクロン CTの結果



シルト粒子の殻破碎 → 更なる減容化



粒度別振動篩い機 (Vibrating sieve machine by particle size)



汚染粘土の破碎と分級による減容化 (Reduction of volume by fragmentation and classification of contaminated clay)

ご清聴ありがとうございました。