

ICRPボクセルファントムとPHITSを用いた 福島原発事故による被ばく線量の推定評価

佐藤隆文¹⁾ 阪間稔²⁾ 井原智也¹⁾ 井本尚吾¹⁾

1) 徳島大学大学院 保健科学教育部

2) 徳島大学大学院医歯薬学研究部保健科学部門

背景

- 2011年3月11日の東日本大震災により福島第一原子力発電所でメルトダウンが始まり、放射性物質の放出事故が発生
- 外気に放出された放射性物質はエアロゾルに付着し、大気中を流れ、雨などに打たれて降下し、周囲が放射能汚染
- 放射性物質は土の表面に分布し、エアロゾルとして大気中に移行
- 現在の放射能は半減期の短いRIは消滅し、ほぼ¹³⁴Csと¹³⁷Cs
- 近年、新たに吸い込んだ場合、体内に長期間留まる可能性のある不溶性放射性粒子が確認

徳島大学と白河市

- 2012年5月より徳島大学は福島県白河市と協定を結び、住民支援だけでなく、公用車を提供をし、汚染調査も行った。
- 現在白河市は住宅地域における自治体主導の除染作業が完了し、その効果もあって空間線量率は減少している。
- 2018年3月に公用車も役目を終え、徳島大学に帰還した。

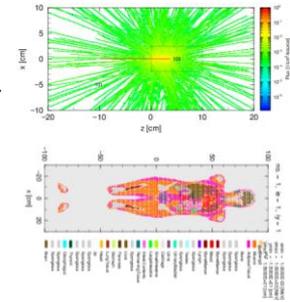
- しかし空間線量率が0.1～0.2μSv/hと全国と比べると、まだ高い地点もある。
 - 線量率が高い原因としては放射性セシウムにより汚染された土壌が考えられる。
- 測定車の汚染検査を試みたところ
 - エアエレメントフィルタから放射能の検出された。

内容

- 白河市から空間線量率が高い地点から土壌を採取し、放射能の測定を行う。
- 測定車のエアエレメントフィルタの汚染の解析をする。
- 地面からの放射性セシウムによる被ばくと不溶性放射性粒子が肺に入ってしまった場合の被ばくの影響の推定評価を行う。

PHITS、ICRPボクセルファントムとは

- PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System: 粒子・重イオン輸送計算コード)とは任意の体系中における様々な放射線の挙動を、核反応モデルや核データを用いて模擬するモンテカルロ計算コード
- ICRPボクセルファントムとはICRP Publ.110に記載されている人体のデータから人体の構成情報、組織、臓器の位置情報、立体情報をPHITSの計算体系に組み込むことができるように変換したデータ



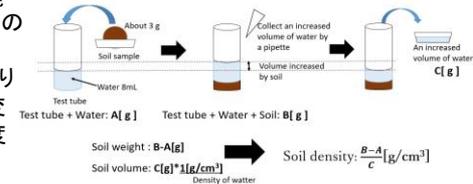
土壌の測定

- 福島県白河市で空間線量率が比較的高い地点3か所から土を採取 (空間線量率: 0.12~0.164 μ Sv/h, 0.172~0.209 μ Sv/h, 0.111~0.208 μ Sv/hの地点)
- Ge半導体検出器で放射能を1日測定
- 土壌の密度を計算し、放射能濃度を算出

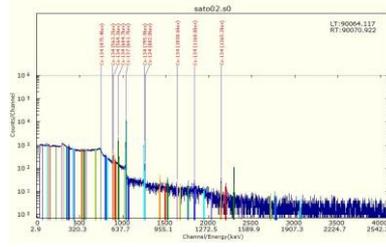


密度の計算方法

1. 15ml用試験管(9本)に水8mlを入れる。
2. 1つの試料につき、3g(×3)ずつ土壌を採取し、試験管に入れる。
3. 土を加える前後の質量を量る。(前A[g], 後B[g], B-A≈3g)
4. 体積が増加した分の純水をピペットで取り、その質量も量る。(C[g])
5. 純水の密度(1g/cm³)より純水の質量を体積に変換し、土壌重さより密度を計算する。



測定結果



ID:sato02の試料のγ線スペクトル

それぞれの試料の密度と放射能濃度

ID	重量 [kg]	密度 [g/cm ³]	比放射能 error [Bq/kg]	放射能濃度 [MBq/m ³]
sato01	0.089	2.082	Cs-134 65.37	0.136
			Cs-137 599.70	1.249
sato02	0.074	1.600	Cs-134 220.20	0.352
			Cs-137 2036.00	3.259
sato03	0.059	1.416	Cs-134 196.30	0.278
			Cs-137 1833.00	2.596

エアエレメントフィルタ(測定車)の解析

- エアエレメントフィルタを24のパーツに裁断し、途中出たちりを上半分、下半分に分け、ポリ袋に入れる。
- それぞれのパーツをGe半導体検出器で測定する。
- D-1~8と上半分の塵、D-9~12とU-1~4と下半分の塵、U-5~12を一枚のIPにそれぞれ入れ、24時間弱露光する。



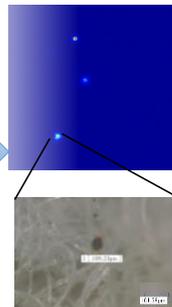
分析結果



Cs-137(662keV)



Cs-134(605keV)

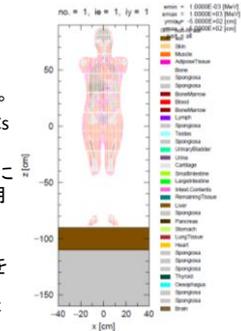


フィルタに付着した粒子

シミュレーションの体系

- 3m × 3m × 0.7m(灰色、茶色)の地面の上に男性を模擬したICRPボクセルファントムを置いた。
- 地面の上部3m × 3m × 0.2mは汚染土壌(茶色)とした。
- 地面の放射能濃度は実際に採取した土壌より、137Csは3.26[MBq]、134Csは0.352[MBq]とした。
- PHITSでは物質の構成元素、体積、密度を計算コードに与えるため、土壌の構成元素は一般的なもの¹⁾を使用した、密度は測定結果より1.6g/cm³与えた
- 不溶性放射性粒子の方は右肺の気管支の高さに66Bq(筑波大学 末木啓介氏より)の137Csの点線源を設置した。

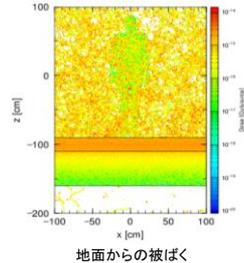
1) 日本の農耕地土壌の全粒径及び細砂画分の元素構成による土壌大群の推定と地理的起源のスクリーニング 伊藤遼(京都府立大)



土壌からのシミュレーション結果

- 放射性Csからはガンマ線及び、ベータ崩壊に伴う電子が放出された

- ① 吸収されたエネルギーは人体より空気の方が高い。
- ② 電子ではセシウムから出たベータ線は土壌自体で遮蔽され人体までには届かなかった。
- ③ ガンマ線は人体にまで届き、被ばくの要因になっていた。



臓器ごとの被ばく線量

- 線源(点線源1箇所)が置いてある右肺(左肺線源なし)では、吸収線量が地面からより肺に線源がある方が高かった。
- 他の臓器は肺からの方が低く、特に肺から離れた臓器はかなり低かった。

		地面:5.87MBq	不溶性放射性粒子:66Bq
		[μ Gy/h]	[μ Gy/h]
肺	左	血液	0.0136
		組織	0.0131
	右	血液	0.0134
		組織	0.0118
胸腺		0.0114	0.0114
甲状腺		0.0100	0.0008
心臓	壁	0.0116	0.0011
	血液	0.0092	0.0010
頭椎		0.0155	0.0003
気道(喉頭より下)		0.0215	0.0002
食道		0.0131	0.0010
精巣	左	0.0154	0.0000041 (0.0041nGy/h)
	右	0.0174	0.0000021 (0.0021nGy/h)

組織障害の閾値との比較

- 地面からの仮に1年間被ばくし続けた場合の吸収線量と、1つの粒子からの被ばくでの線源がある右肺の年間被ばく線量を出した。
- ICRPの2007年勧告に載っている精巣(一時的不妊)、骨髄(造血機能低下)、皮膚(紅斑)、胃腸(障害死)、肺(間質性肺炎死)の1回被ばくで1%が発症するしきい線量と年間被ばく線量を比べると、いずれも被ばく線量は低かった。

- しきい線量まで達する年数を計算してみたところ、数百~数十万年となり、確定的影響は無いといえるレベルだった。

線源	臓器	閾値	[mGy/年]	[年後]
地面	精巣	0.1Gy	0.144	696
	骨髄	0.5Gy	0.129	3879
	皮膚	3~6Gy	0.147	20446
	胃		0.117	51082
	腸	6Gy	0.098	61021
粒子	肺		0.114	52686
	右肺	6Gy	0.278	21563

まとめ

- エアエレメントフィルタの放射能が高い部分に放射性粒子が付着していた。
- 土壌中の放射性セシウムによる被ばくはベータ線の影響は少なく、ほぼガンマ線が要因となる被ばくである。
- 不溶性放射性粒子による被ばくは肺の局所被ばくが問題となる。しかしその被ばく線量は組織障害しきい値よりかなり低かった。
- 地面からの被ばくも粒子(1箇所)からの被ばくも自然放射線より低く、そして確定的影響を及ぼすレベルでは無い。