

4.00~6.00%、Crが24.00~28.00%、Mnが1.00%以下使用されているものである。当該の耐熱鋳鋼における元素比Ni:Cr:Mn = 5:26:1に着目する。残灰に関して、A-2では0.04:0.16:0.02 = 2:8:1、Bでは0.05:0.13:0.02 = 5:13:2、A-1では0.01:0.07:0.03 = 1:7:3であった。これより残灰におけるNi:Cr:Mn比は炉の耐熱鋳鋼の組成由来の影響で、NiおよびCrがMnより相対的に高値になったものと考えられる。一方、Mnが相対的に多く含まれているA-1に関しては、異なる材料の影響によるものと推察される。

飛灰に関して、A-2では0.05:0.15:0.03 = 5:15:3、Bでは0.02:0.14:0.01 = 2:14:1、A-1では0.01:0.04:0.03 = 1:4:3であった。この結果からも、残灰における考察と同様にA-2およびBとA-1では異なる材料の影響があるものと考えられる。

以上から、火葬炉で使用されている材料が残灰および飛灰中における元素組成に影響を与えている可能性が示された。とりわけセラミック材料を使用している場合は、残灰や飛灰中におけるクロム濃度の増加が懸念される。

表5-2 残灰の元素組成 (%)

残灰									
施設	A-1			A-2			B		
元素	検出数	平均	標準偏差	検出数	平均	標準偏差	検出数	平均	標準偏差
C	93/93	5.40	3.11 b	98/98	7.08	6.46 ab	136/136	6.32	1.44 a
O	93/93	42.29	1.25 a	98/98	40.95	3.70 b	136/136	40.34	1.14 b
Na	93/93	4.45	1.66 a	98/98	3.60	1.50 b	136/136	3.28	1.12 b
Mg	93/93	2.00	0.95 b	98/98	1.65	1.10 b	136/136	6.32	5.63 a
Al	93/93	9.17	5.35 a	98/98	5.28	3.21 b	136/136	0.40	0.41 c
Si	93/93	1.30	0.71 a	98/98	0.99	0.85 b	136/136	1.02	0.85 b
P	93/93	8.97	3.02 c	98/98	11.67	3.32 a	136/136	10.60	3.14 b
S	93/93	0.21	0.13	98/98	0.22	0.45	136/136	0.22	0.11
Cl	93/93	0.19	0.21	96/98	0.50	2.23	136/136	0.23	0.25
K	92/93	1.51	0.60 b	98/98	1.23	1.31 b	136/136	1.86	0.87 a
Ca	93/93	22.80	3.12 c	98/98	25.29	5.68 b	136/136	28.00	6.25 a
Ti	91/93	0.73	0.66 a	96/98	0.45	0.35 b	134/136	0.48	0.48 b
Cr	93/93	0.07	0.17 b	98/98	0.16	0.12 a	136/136	0.13	0.11 a
Mn	88/93	0.03	0.08	84/98	0.02	0.02	123/136	0.02	0.02
Fe	93/93	0.64	0.54 ab	98/98	0.70	0.38 a	136/136	0.56	0.40 b
Ni	41/93	0.01	0.02 b	98/98	0.04	0.02 a	136/136	0.05	0.04 a
Cu	90/93	0.03	0.04 b	97/98	0.05	0.06 a	111/136	0.02	0.05 b
Zn	93/93	0.07	0.10	98/98	0.08	0.15	136/136	0.06	0.10
Sr	93/93	0.02	0.01 a	96/98	0.01	0.00 b	135/136	0.02	0.00 ab
Pb	5/93	0.05	0.08	7/98	0.02	0.01	2/136	0.10	nc

Games-Howell検定, nc: 計算不可, a > b > c の順に有意差有り(p < 0.05), 空欄: 有意差なし

表 5-3 飛灰の元素組成 (%)

飛灰									
施設	A-1			A-2			B		
元素	検出数	平均	標準偏差	検出数	平均	標準偏差	検出数	平均	標準偏差
C	46/46	17.11	7.05 b	49/49	32.37	4.97 a	34/34	17.89	5.88 b
O	46/46	26.14	3.46 a	49/49	22.98	1.85 b	34/34	25.09	1.82 a
Na	46/46	10.80	1.43 a	49/49	8.94	0.77 b	34/34	11.20	0.90 a
Mg	46/46	0.81	0.43 a	49/49	0.42	0.13 b	34/34	0.32	0.11 c
Al	46/46	1.57	1.25 a	49/49	1.01	0.24 b	34/34	0.15	0.11 c
Si	46/46	0.70	0.14 ab	49/49	0.81	0.31 a	34/34	0.67	0.21 b
P	46/46	1.05	1.37	49/49	0.70	0.10	34/34	0.76	0.14
S	46/46	3.03	0.54 c	49/49	3.54	0.30 b	34/34	3.83	0.31 a
Cl	46/46	18.24	3.61 b	49/49	13.76	1.90 c	34/34	21.66	2.25 a
K	46/46	10.78	2.04 b	49/49	8.62	1.11 c	34/34	15.11	1.77 a
Ca	46/46	6.88	3.81 a	49/49	3.13	1.07 b	34/34	1.47	0.90 c
Ti	46/46	0.34	0.10 a	49/49	0.25	0.06 b	34/34	0.15	0.11 c
Cr	46/46	0.04	0.02 c	49/49	0.15	0.03 a	34/34	0.14	0.02 b
Mn	46/46	0.03	0.01 a	49/49	0.03	0.01 a	34/34	0.01	0.01 b
Fe	46/46	1.68	0.90 b	49/49	2.47	1.70 a	34/34	0.73	0.74 c
Ni	44/46	0.01	0.01 c	49/49	0.05	0.01 a	34/34	0.02	0.01 b
Cu	46/46	0.03	0.01 a	49/49	0.02	0.00 b	34/34	0.02	0.00 c
Zn	46/46	0.59	0.14 b	49/49	0.65	0.13 ab	34/34	0.68	0.09 a
Sr	46/46	0.01	0.00 a	49/49	0.01	0.00 b	15/34	0.01	0.00 b
Pb	45/46	0.04	0.01 a	49/49	0.03	0.00 b	34/34	0.02	0.00 c

Games-Howell検定, a > b > c の順に有意差有り(p < 0.05), 空欄: 有意差なし

2.3 放射性物質の種類及び濃度

表 5-4 残灰および飛灰の放射性核種濃度

残灰						
施設	A			B		
放射性核種	検出数	平均	標準偏差	検出数	平均	標準偏差
Cs-134(Bq/kg)	0/29	nd	nc	0/21	nd	nc
Cs-137(Bq/kg)	0/29	nd	nc	0/21	nd	nc
K-40(Bq/kg)	10/29	590	183	17/21	758	575

nd: 不検出, nc: 計算不可

飛灰						
施設	A			B		
放射性核種	検出数	平均	標準偏差	検出数	平均	標準偏差
Cs-134(Bq/kg)	3/27	3.54	0.717	4/9	22.1	4.72
Cs-137(Bq/kg)	5/27	65.5	22.4	9/9	248	67.0
K-40(Bq/kg)	25/27	4348	1591	9/9	9443	1589

施設	A-1			A-2		
放射性核種	検出数	平均	標準偏差	検出数	平均	標準偏差
Cs-134(Bq/kg)	2/9	3.89	nc	1/9	2.83	nc
Cs-137(Bq/kg)	4/9	70.6	22.2	1/9	45.1	nc
K-40(Bq/kg)	9/9	3838	1934	7/9	4005	953

nc: 計算不可

残灰および飛灰の放射性核種濃度を表 5-4 に示す。残灰の放射性物質濃度は低いため、A-1 炉と A-2 炉も合わせて分析した。Cs-134、Cs-137 とともに A、B 両施設から検出されず、カリウム 40 のみ検出された。このことから、混合による 100 検体ほどの分析においても Sr や I といった医療用の放射性物質の検出はなかった。

A 施設の飛灰試料の内、1 サンプルを用いて A-1 炉および A-2 炉が区別できるものがそれぞれ 9 サンプルあったため、それらについても表 5-4 中に示した。これら以外は A-1 炉および A-2 炉の複数サンプルが混合した状態で分析した。飛灰については、ごくわずかに Cs-134、Cs-137 が検出された。しかしながら、合わせて 300Bq/kg 以下であった。都市ごみ焼却灰等では現在、Cs-134 は Cs-137 に対して 1/4 程度あるが、本調査ではやや Cs-134 が低い結果であった。検出下限に近いレベルであることも影響していると考えられる。残灰と同様、医療用の放射性物質の検出はなかった。K-40 のレベルは A 施設で 4400Bq/kg 程度、B 施設で 9400Bq/kg 程度であった。K-40 は天然に存在する代表的な放射能で、太陽系がつくられた時から存在している。同位体存在比は 0.0117% で、カリウム 1g に放射能強度が 30.4 ベクレルの K-40 が入っている<sup>1)</sup>。つまり、この計算では残灰には 300~470Bq/kg 程度、飛灰には 2670Bq/kg ~2950Bq/kg 程度含まれることになる。測定値はやや大きいと同じオーダーであった。なお、A 施設の K-40 の検出数は 25 であり、A-1 炉および A-2 炉合計の検出数 16 よりも 9 サンプル多い。これは上記理由で A-1 炉と A-2 炉の区別がつかない試料によるものである。K-40 の平均値、標準偏差の違いも同様の理由による。

本研究では、医療用の放射性物質が検出されなかったが、事故が起こりうることを想定すると、サーベイメータなどによりスキャンすることはありうる。放射性物質のモニタリングポストが反応することもあることから、サーベイメータで十分検出されうるものであると考えられる。

#### 2.4 六価クロム含有濃度および溶出濃度

六価クロムの含有濃度（含有）、六価クロム溶出濃度（溶出）の結果を表 5-5 に示す。各サンプルを 3 回測定し、平均値および標準偏差を同表に示す。溶出濃度は、残灰の 1 サンプルのみ <0.05mg/L となり、環境基準（0.05mg/L）を満たしたが、残りのサンプル 19 サンプルはすべて環境基準を超えるデータが検出された。飛灰と残灰を比べると、残灰でばらつきが大きい傾向が見られた。

表 5-5 六価クロム含有量及び溶出濃度

炉	性別	年齢(才)	溶出試験(mg/L)			含有試験(mg/kg)			
			平均	標準偏差	変動係数(%)	平均	標準偏差	変動係数(%)	
残灰	A-1	男	71	14	1.7	12	130	10	7.7
		男	82	36	1.2	3.2	257	64	25
		女	95	0.18	0.11	63	570	36	6.3
		女	74	61	3.6	5.9	440	96	22
		男	66	0.22	nc	nc	5.3	0.91	17
	A-2	女	80	36	3.5	9.6	427	38	8.9
		男	79	<0.05	nc	nc	147	15	10
		女	60	0.05	nc	nc	107	32	30
		男	81	2.3	0.12	5.1	200	10	5.0
		女	86	0.14	0.08	53	44	13	29
飛灰	A-1			2.1	0.64	30	29	12	40
				5.6	0.42	7.4	48	10	21
				1.1	0.0	0.0	12	1.2	9.9
				2.6	0.15	5.8	34	12	34
				3.6	0.80	22	9.1	2.5	28
	A-2			36	3.1	8.6	187	47	25
				33	1.2	3.5	227	31	13
				13	1.0	7.7	210	36	17
				21	2.1	10	170	10	5.9
				17	1.7	10	101	25	25

nc: 計算不可

全量 VS 含有、全量 VS 溶出、含有 VS 溶出の関係を図 5-1 に示す。全量 VS 含有、含有 VS 溶出の相関係数は  $R^2=0.30$  で正の比例関係があった。相関係数は高くないが、六価クロム量は大きくはクロム全量に比例することを示している。つまり、その変換割合が濃度によらず、ほぼ同じであることを示している。また、含有 VS 溶出についても同様で、六価クロムとして含有されるとある比例関係で溶出することを意味している。しかしながら、全量 VS 溶出では相関係数は小さく、関係性は薄かった。

また、よく見ると、飛灰については六価クロムが含有されるとほぼ溶出すると言えるが、残灰については必ずしもそうではなく、六価クロムとして飛灰同様にほぼ全量が溶出するものがあるが、逆に数%以下の溶出というサンプルもあった。

そこで、B 炉の残灰 20 サンプルについて 2 mm のふるいで分級し、それぞれ元素組成を分析した。粒径別の結果を表 5-6 に示す。Mg や P は 2 mm より大きい粒径で有意に高く、Cr や Fe は 2 mm より小さい粒径で有意に高い値を示した。上述の通り飛灰中の六価クロムは溶出性が数%~30%と高いが、残灰中の六価クロムは検出下限値以下のものから 30%程度のものまでばらつきが大きくなっていった。この原因として、残灰中の粒径の小さな粒子中に含まれる Cr は溶出しやすく、逆に粒径の大きな粒子中の Cr は溶出しにくくなっているため、飛灰中の Cr は一様に溶出性が高く、残灰中 Cr の溶出性にばらつきが出たものと考えられる。今回の測定結果では、残灰中では粒径の小さなものの Cr 濃度が高かったため、残灰を取り扱う作業員の吸引リスクについても留意する必要があると考えられる。

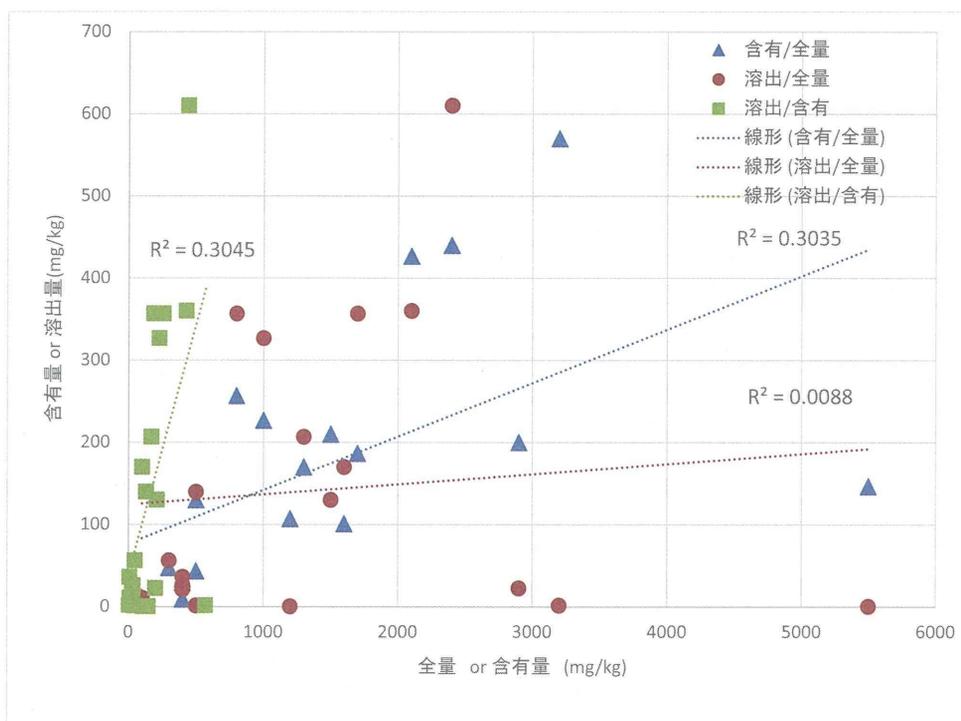


図5-1 クロム全量、含有量、溶出量の関係

表5-6 施設B 残灰の粒径別の元素組成

残灰

施設 元素	B, < 2 mm			B, > 2 mm			有意差
	検出数	平均	標準偏差	検出数	平均	標準偏差	
C	20/20	8.19	3.12	20/20	4.94	1.15	#
O	20/20	41.99	1.43	20/20	40.45	1.04	*
Na	20/20	4.40	1.50	20/20	1.84	1.19	*
Mg	20/20	5.30	7.15	20/20	14.18	9.15	#
Al	20/20	0.70	0.37	20/20	0.32	0.41	*
Si	20/20	2.08	1.40	20/20	1.23	1.42	ns
P	20/20	7.73	2.38	20/20	12.58	2.96	*
S	20/20	0.32	0.10	20/20	0.14	0.10	*
Cl	20/20	0.25	0.17	20/20	0.13	0.11	#
K	18/20	2.45	1.26	20/20	1.16	0.98	*
Ca	20/20	24.02	4.55	20/20	22.34	6.17	ns
Ti	20/20	1.30	1.17	19/20	0.32	0.98	*
Cr	20/20	0.22	0.19	20/20	0.06	0.04	#
Mn	20/20	0.04	0.03	15/20	0.03	0.04	ns
Fe	20/20	0.78	0.41	19/20	0.20	0.15	#
Ni	20/20	0.06	0.04	20/20	0.03	0.02	#
Cu	18/20	0.01	0.00	10/20	0.04	0.04	#
Zn	20/20	0.07	0.06	20/20	0.03	0.02	*
Sr	20/20	0.02	0.01	20/20	0.01	0.00	#
Pb	1/20	0.01	nc	0/20	nd	nc	

t検定, nd: 不検出, nc: 計算不可, ns: 有意差なし, 空欄: 検定不可

\*: 等分散で有意差有り, #: 等分散なしで有意差あり(p < 0.05)

### 3. 結論

火葬場における放射性物質及び六価クロムについて、残灰、飛灰中の実測を行った結果、以下の知見が得られた。

2 施設において、残灰および飛灰中の放射性物質の調査を行ったところ、残灰 327、飛灰 129 検体において、医療用器具や投与薬に起因する放射性物質は検出されなかった。一方で事故由来放射性物質である Cs-134、137 及び天然由来の K-40 が検出される施設はあった。Cs-134 と Cs-137 の濃度は合わせて 300Bq/kg 以下であった。

2 施設における調査では、残灰、飛灰ともにクロムはすべての試料で検出された。炉内の架台について、ステンレス鋼が使用されている炉はセラミック素材の炉に比べて有意に 2 倍以上残灰及び飛灰中クロム濃度が高かった。

残灰 10 サンプル及び飛灰 10 サンプルについて、六価クロムの含有量及び溶出濃度を測定すると、残灰の 4 サンプルが含有量の環境基準 (250mg/kg) を超え、溶出試験では、全 20 サンプル中 19 サンプルが環境基準 (0.05mg/L) を超えた。飛灰の場合、六価クロムが含まれるとほぼすべてが溶出する傾向があったが、残灰は必ずしもそうではなかった。

#### 参考文献

- 1)江口正司、火葬炉の燃焼制御と環境負荷低減に関する研究、京都大学博士論文、2007
- 2)原子力資料情報室、カリウム-40、<http://www.cnrc.jp/knowledge/2584> (2015.3 閲覧)

### 第3節 火葬場作業者の放射線被ばく量に関する検討

#### 1. シード線源からの被ばく量の再評価

「シード線源による前立腺永久挿入密封小線源治療の安全管理に関するガイドライン」(日本放射線腫瘍学会、日本泌尿器科学会、日本医学放射線学会、平成23年)(以下、ガイドライン)では、火葬場作業者の前立腺永久挿入密封小線源に含まれる I-125 (病院退出時 1,300MBq) による被ばく量を、 $1.87 \mu\text{Sv}/\text{年}$ と評価している<sup>1)</sup>。これは以下の仮定に基づく値である。

仮定1) 永久挿入線源 (ヨウ素 125 : 1,300MBq (退出時)、半減期 59.4 日) を挿入された患者が、挿入されてから 1 年後に死亡し、即日火葬される場合を考える。(永久挿入密封小線源治療を受けて 1 年以内に患者が死亡した場合、剖検にてシード線源を取り出し、病院の貯蔵施設にて保管しておく必要がある。このことについて、あらかじめ患者や家族の同意を文書で得ておき、これが必ず守られる。)

仮定2) 線源は、火葬により燃えまた飛散することなく、密封性を保ったまま骨壺にすべて納められるものとする。または、火葬場での骨灰は火葬場作業者により、骨灰の回収業者に渡され、もう一度骨灰業者により再び焼かれ埋設されることとする。この場合、線源は上記密封性等を保ったまますべて骨灰中に存在しているものとする。

これらの結果、火葬場作業者の被ばく量は以下のように計算される。

(1年に1回遭遇すると仮定)

$$E=18.4 \times 0.0124 \times 2.0 \div 0.5^2 = 1.83 \mu\text{Sv}$$

E : 実効線量 ( $\mu\text{Sv}$ )

18.4 : 永久挿入線源 (I-125 : 1,300MBq (退出時)) の 1 年後の放射能 (MBq)

0.0124 : 実効線量率定数 ( $\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ )

2.0 : 作業時間 (h)

0.5 : 永久挿入線源から作業員までの距離 (m)

この計算条件を「標準条件」と呼ぶこととし、上記の仮定が崩れた場合についての被ばく量を評価してみる。まず、仮定1が崩れた場合の被ばく量は表5-7のようになる。(ここでは、作業時間、作業距離については標準条件としている。)

表5-7 患者がI-125線源を取り出さずに火葬された場合の火葬場作業者の被ばく量( $\mu\text{Sv}$ )

退院後火葬までの期間→ 1年間に遭遇する回数↓	退院1ヶ月後	退院6ヶ月後	退院1年後
1回	90.9	15.4	1.83
2回	182	30.8	3.66
3回	273	46.2	5.49

また、仮定2が崩れた場合の被ばく量として、表5-7での被ばくに加え、火葬後、密封小線源が床に落ち、1週間程度、作業場に留まっていた場合を考える。これはガイドラインが対象とする密封小線源は「I-125が米粒大のカプセル(直径約1mm×長さ約4.5mm)に密

封されたもの」であることから、灰清掃作業などにおいて、床などに落下したまま見逃してしまう事態が発生する可能性があると考えたことによる。このとき、1週間内での放射線壊変による減衰を無視し、作業者は1週間に48時間作業し、線源から1mの距離で1日に8時間被ばくし続ける場合を仮定すると、被ばく量は表5-8のようになる。

表5-8 I-125線源が床などに落ち、1週間被ばくし続ける場合の火葬場作業者の被ばく量 ( $\mu\text{Sv}$ )

退院後火葬までの期間→ 1年間に遭遇する回数↓	退院1ヶ月後	退院6ヶ月後	退院1年後
1回	636	108	12.8
2回	1270	215	25.6
3回	1910	323	38.3

このように、いささか可能性が低い仮定ではあるが、線源が挿入されたまま、患者が1年以内に火葬され、なおかつ線源が骨灰中からきちんと回収されなかった場合は1mSv/年を超える被ばく量となる場合もあり得なくはない。これらの値は放射線業務従事者の年実効線量限度(50mSv/年)よりもずっと低い値ではあるが、火葬場作業者が放射線被ばくを想定した作業者ではないことから、一般公衆に対する年実効線量限度(1mSv/年)を適用する方が妥当だと考えると、この線量限度を超える可能性もあり得なくはない、という結果となったことから、退院後1年間は火葬されない、という条件が厳密に守られる必要があることがわかる。

なお、ここではガイドライン同様、密封小線源は火葬場作業において、密封が破壊されることはなく、I-125が外気中に出ることはないとは仮定している。これは一般に密封小線源がチタン(融点: 1,668°C)製のカプセルに密封されており、高温化でもカプセルの密封が破壊されることはない、と仮定しているためであるが、もし密封が破壊された場合は体内被ばくの可能性も考慮する必要が生じるため、密封小線源の耐熱性については、十分な検証が求められる。

## 2. 耐火レンガからの被ばく量評価

ジルコン( $\text{ZrSiO}_4$ )サンドにはU-238で0.5Bq/g以上、Th-232で0.5Bq/g以上の放射性物質が含まれており、ジルコンサンドは耐火レンガの原料等として用いられる<sup>2)</sup>。また、人形峠のウラン残土が耐火レンガに加工され、一般に販売されていることも有名な話である(人形峠レンガ加工場におけるレンガ製造運転報告書, JAEA-Technology 2012-049, 日本原子力研究開発機構, 2013)。これらのことから、耐火レンガにはウラン・トリウム系列の放射性物質が含まれることが多いと考えられ、実際に、A斎場において耐火レンガを積んだ場所、および主燃焼炉の周囲は図5-2のような空間線量分布であった(測定装置、Aloka TCS-172)。図5-2で灰色四角は主燃焼炉、白色四角は前室、黒色四角は耐火レンガを積んだものである。炉や前室の壁の上の数字は、炉や前室の外側壁表面での1m高さでの空間線量( $\mu\text{Sv/hr}$ )、前室内の数字は炉内台車上10cmでの空間線量( $\mu\text{Sv/hr}$ )、ただし、耐火レンガを積んだ場

所で、 $0.24 \mu\text{Sv/hr}$  はレンガを積んだ上表面での値、 $0.38 \mu\text{Sv/hr}$  はレンガで囲まれた隙間に測定プローブを入れた時の値である。

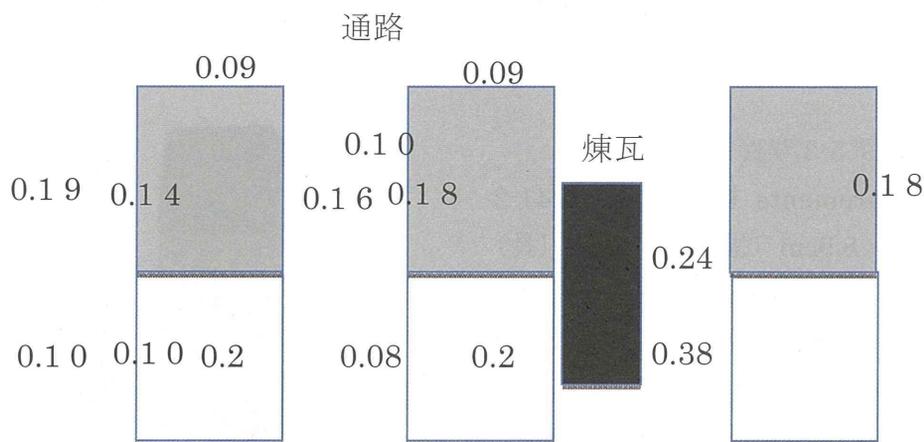


図5-2 A 斎場の主燃焼炉周辺の空間線量分布 ( $\mu\text{Sv/hr}$ )

バックグラウンドの空間線量が  $0.07 \mu\text{Sv/hr}$  程度であるとすると、耐火レンガ周辺における火葬場作業に伴う追加線量は、主燃焼炉周辺での作業において、 $0.02 \mu\text{Sv/hr}$  (図 5-2 において、通路側主燃焼炉壁近辺での値からバックグラウンドを引いたもの)、主燃焼炉壁周辺や炉内台車近辺での作業による追加線量として、 $0.10 \mu\text{Sv/hr}$  (図 5-2 において、主燃焼炉壁側面や炉内台車近辺での代表値を  $0.17 \mu\text{Sv/hr}$  と仮定し、この値からバックグラウンドを引いたもの) を仮定し、主燃焼炉周辺で年間 2,085 時間 (変形労働時間制における 1 年間の総労働時間の上限) 労働するとして、その内、主燃焼炉周辺での労働が 9 割、主燃焼炉壁近辺や炉内台車近辺での労働時間が 1 割だとすると、火葬場作業による年間追加線量は次のように見積もられる。

$$0.02 \times 2085 \times 0.9 + 0.10 \times 2085 \times 0.1 = 58.4 \mu\text{Sv/年}$$

これは一般公衆に対する年実効線量限度 ( $1\text{mSv/年}$ ) と比べても 1 桁以上小さい値であり、健康上問題となる値ではないと考えられる。また、実際の作業者の年間被ばく量は「1. シード線源からの被ばく量の再評価」で評価した値と、ここで評価した耐火レンガによる被ばく量を合計して評価する必要があるが、退院後 1 年間は火葬されない、という条件が厳密に守られる場合は、一般公衆に対する年実効線量限度を超えることはないと推定される。

ただし、ここでも耐火レンガの摩耗や劣化によるレンガ含有放射能の飛散を考慮しておらず、よって、体内被ばくについては考慮していない。耐火レンガ周辺での火葬場作業に起因するウラン・トリウム系列核種による体内被ばくの可能性の有無については、別途調査する必要がある。

### 3. 火葬炉におけるご遺体近傍での空間線量変化のモニタリング

昨年度の分析結果では、対象とする物質の放射性物質の検知はなかったため、ご遺体からの放射性物質の未取り出しに関する事故はめったにない可能性があり、この方法では検知す

るのが難しい可能性が高いと判断される。したがって、比較的火葬件数の多い施設において、施設内に個人線量計を複数箇所設置し、累積増加量をモニターすることにより、放射性物質の存在可能性について当初検討しようとしたが、それでは検知が難しいと判断し、下記に示す装置を火葬炉の前室に設置して、ご遺体を連続的にモニターすることとした。

使用機器：

- ・ スケーラー（図 5-3 写真左）：

Ludlum Measurements 社製 Model 2241-2

16.5cm（高）×8.9cm（幅）×21.6cm（長）

- ・  $\gamma$ 線検出プローブ（図 5-3 写真中央）：Model 44-2

5.1cm（径）×18.5cm（長）

- ・ 検出器コリメータ（図 5-3 写真右）：Model

L-4002-227

6.0cm（径）×7.6cm（長）

- ・ ノートパソコン

スケーラーと RS-232C-USB ケーブルで接続



図 5-3 用いた測定装置

様々な医療用 RI の使用が考えられるが、ここでは前立腺癌治療の永久挿入線源として使用する I-125 と Pd-103 を仮定。これらから放出される主たる光子は、I-125 が 27.4keV、31.1keV、35.5keV、Pd-103 が 20.1keV と 22.8keV なので、低エネルギーの X 線が測定できるプローブを使用することが必要だが、Model 44-2 型はエネルギー測定範囲が X 線・ $\gamma$ 線 20keV~1.5MeV なので、使用可能である。なお、バックグラウンドを抑えるために、Model 44-2 型プローブの先端に検出器コリメータ（Model L-4002-227 型）を接続する。測定プローブは図 5-4 に示すように、前室に炉内台車を置いた時、炉内台車の真上に位置する排気口内に、前室の扉口からは見えないように設置し、排気口に穴を開けてケーブルを出し、スケーラー、そしてパソコンへと接続した。Model 2241-2 スケーラーが持つ RS232C への測定値ダンピング機能を用い、2 秒ごとの計数値をパソコンに転送し、記録していった。測定は 2015 年 11 月 30 日から 2016 年 1 月 7 日まで実施したが、ダンピングデータ記録ソフトの容量オーバーや電池の電圧低下などがあり、合計で 22 のご遺体からの放射線量を記録するにとどまった。

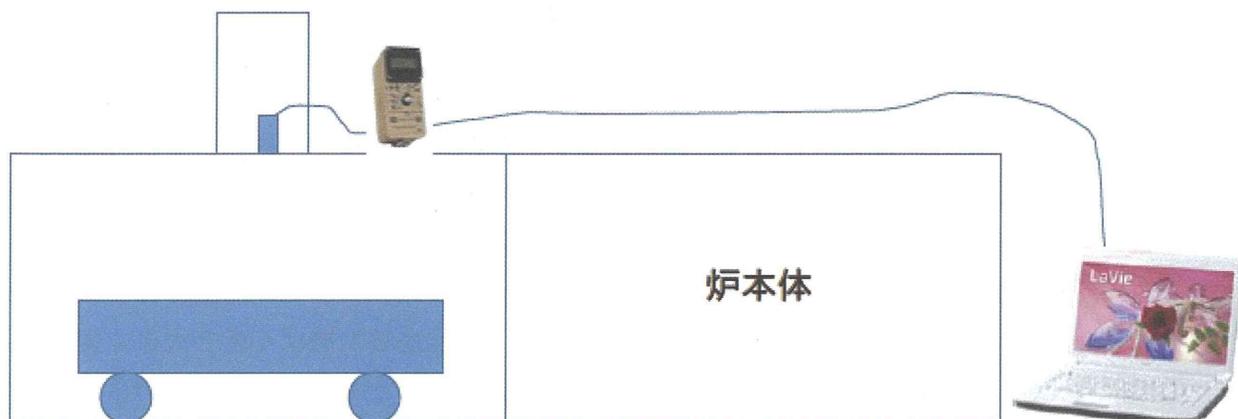


図 5-4 測定装置の設置状況

習得阪神違う

測定結果を全モニタリング期間について図 5-5 に、各連続したモニタリング期間について図 5-4～図 5-10 に示す。これらの図では 2 秒毎の測定値を 1 分間での平均値に変換してプロットしている。なお、この線量値については、ご遺体からの異常放射能を検出するために排気口にコリメーターを付けたプローブを設置して測定した値であり、作業者の被ばく管理における線量値として用いる性質のものではなく、被ばく量評価においては、あくまでも参考値程度に考える性質のものであることに注意する必要がある。各図において多くの時間帯は  $0.3\sim 0.4\ \mu\text{Sv/h}$  の放射線量を示しているが、時々 30 分から 1 時間ほど放射線量が  $0.1\ \mu\text{Sv/h}$  程度に低下するときがある。これは不定形耐火材を打った炉内台車が炉本体に入ったため、あるいは前室から外に出されたため、耐火物からの放射線が低下した時間帯である。A 斎場では毎朝 7 時頃に始業前点検と清掃のため炉内台車を前室から出すので、この時間帯にも放射線量が低下するが、それ以降の作業時間内の放射線量の低下は、ご遺体の焼却のための炉内台車の移動によるものであり、この低下の前後に異常な放射線量の上昇があれば、ご遺体からの線量によるものと考えられる。「1. シード線源からの被ばく量の再評価」の計算過程で示したように、退出時に  $1,300\text{MBq}$  の I-125 の永久線源の 1 年後の放射能である  $18.4\text{MBq}$  の I-125 線源から  $0.5\text{m}$  の距離での実効線量は、 $0.91\ \mu\text{Sv/h}$  程度、 $1\text{m}$  の距離でも  $0.23\ \mu\text{Sv/h}$  程度となるので、このような条件でご遺体中にシード線源などが残されていた場合は、ご遺体からの異常な放射線を検出することは可能であったと考えられる。

上述した炉内台車の動きと放射線量との関係から、ご遺体が乗せられた炉内台車が炉本体に入れられ、放射線量がほぼ一定値に減少した時の前 5 分間の放射線量の平均値  $A_b$ 、炉内台車が炉本体に完全に入れられ再び出されるまでの期間の放射線量の平均値  $A_d$  とその標準偏差  $S_d$ 、燃焼後に炉内台車が炉本体から出されて前室で冷却していると考えられる最初 10 分間の放射線量の平均値  $A_a$ 、そして、各測定日において最後にご遺体を焼却した 30 分後から翌日の始業前点検の 30 分前までの期間での放射線量の平均値  $A_n$  と標準偏差  $S_n$ 、加えて、 $A_d$  と  $S_d$  それぞれの平均値とその平均値から求めた変動係数 (=標準偏差/平均値)、 $A_n$  と  $S_n$  それぞれの平均値とその平均値から求めた変動係数を表 5-9 に示す。これらの結果より、まず、 $A_b$  や  $A_a$  には特に  $A_n$  に比べて大きな値が観測されなかったことから、今回測定した

22のご遺体には、問題となるような放射線源は含まれていなかったと考えられる。また、燃焼中で炉内台車が無いときの前室の放射線量  $A_d$  は  $0.11\sim 0.12\ \mu\text{Sv/h}$  程度で安定しており、炉内台車が静置されている時の放射線量である  $A_n$  の値も  $0.34\sim 0.35\ \mu\text{Sv/h}$  程度の値で安定している。それぞれの場合の変動係数は放射線量の値が小さい焼却中については 6%程度であり、放射線量値が比較的高くなる炉内台車が静置されている時間帯では 13%と高くなるが、この違いは使用した測定器の特性によるものと考えられる。

今回、前室で測定された放射線量は  $0.3\sim 0.4\ \mu\text{Sv/h}$  程度であり、この前室に毎日短時間入ったとしても、「2. 耐火レンガからの被ばく量評価」で推定した被ばく量と大きく変わるものではなく、一般公衆に対する年実効線量限度 ( $1\text{mSv/年}$ ) と比べて1桁以上小さい値と考えられるため、耐火レンガからの放射線は問題となるレベルではないと考えられる。

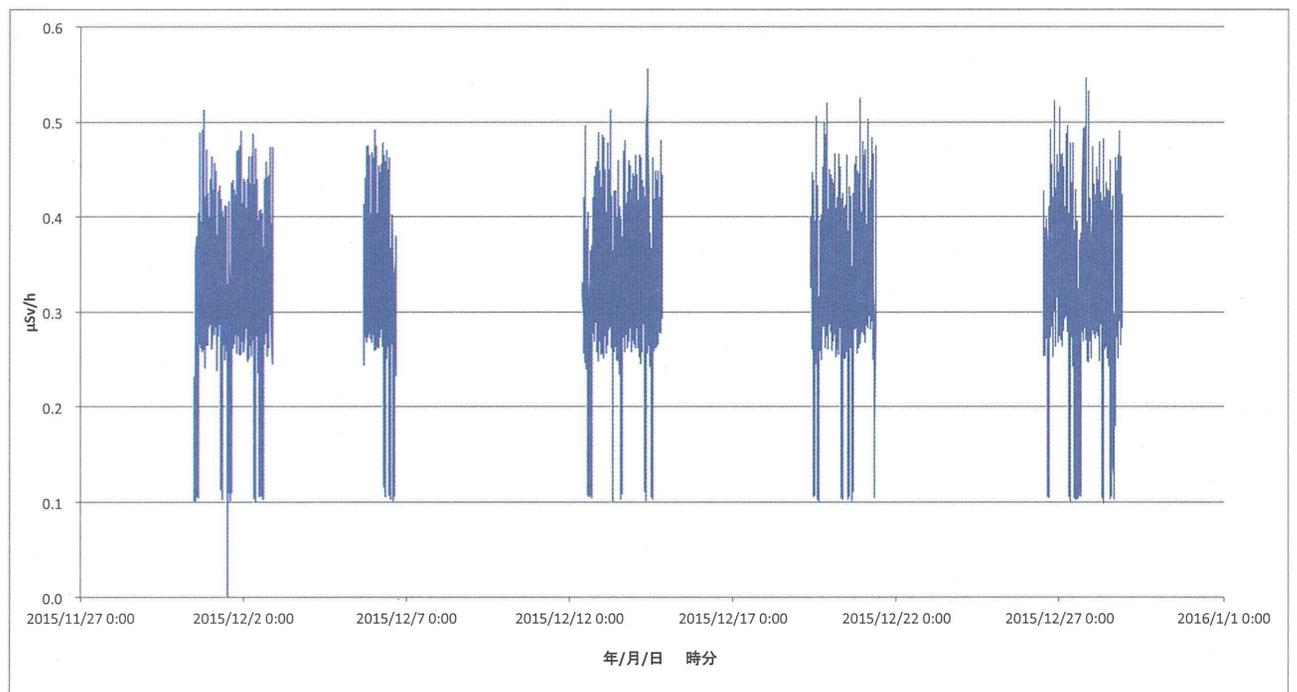


図5-5 11月30日～12月29日の前室モニタリング結果

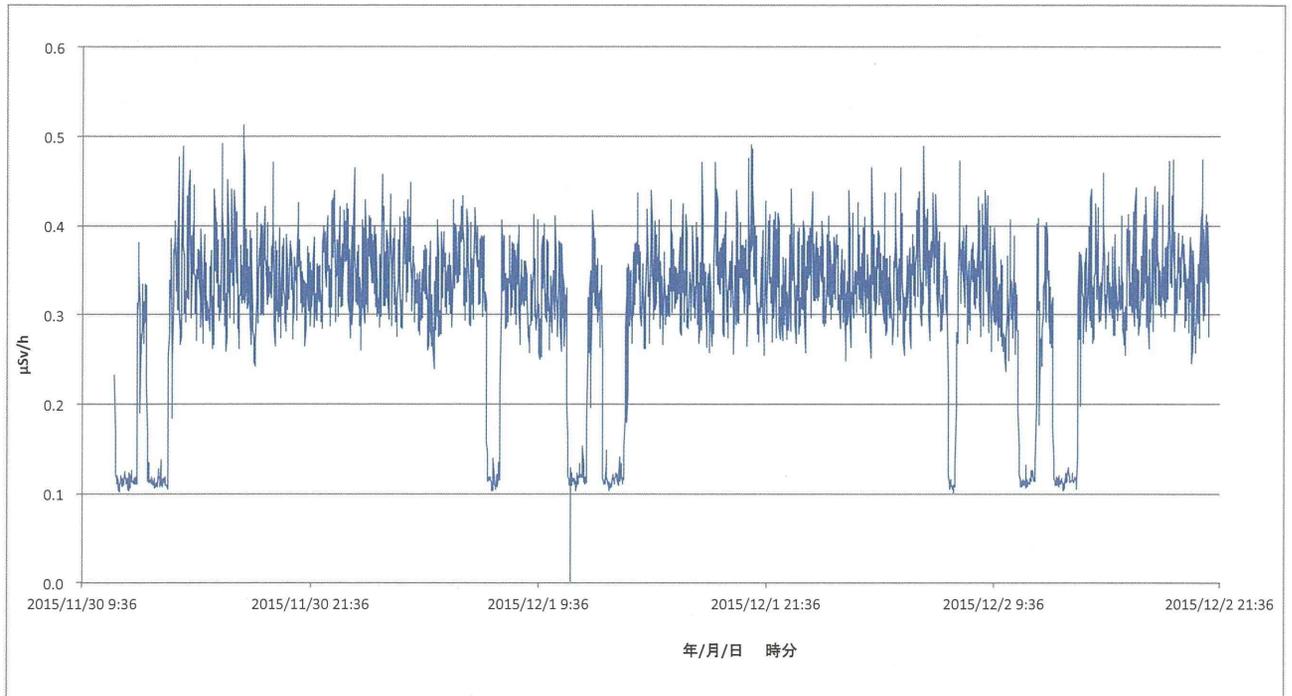


図5-6 11月30日～12月2日の前室モニタリング結果

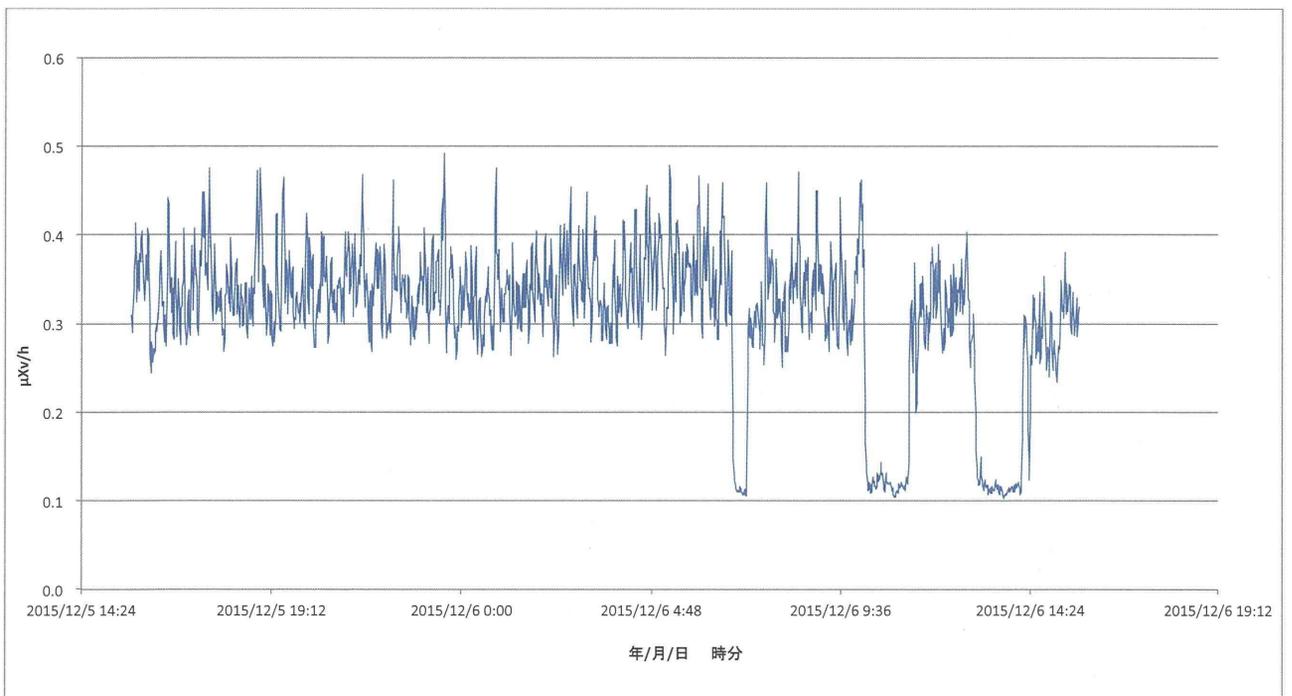


図5-7 12月5日～12月6日の前室モニタリング結果

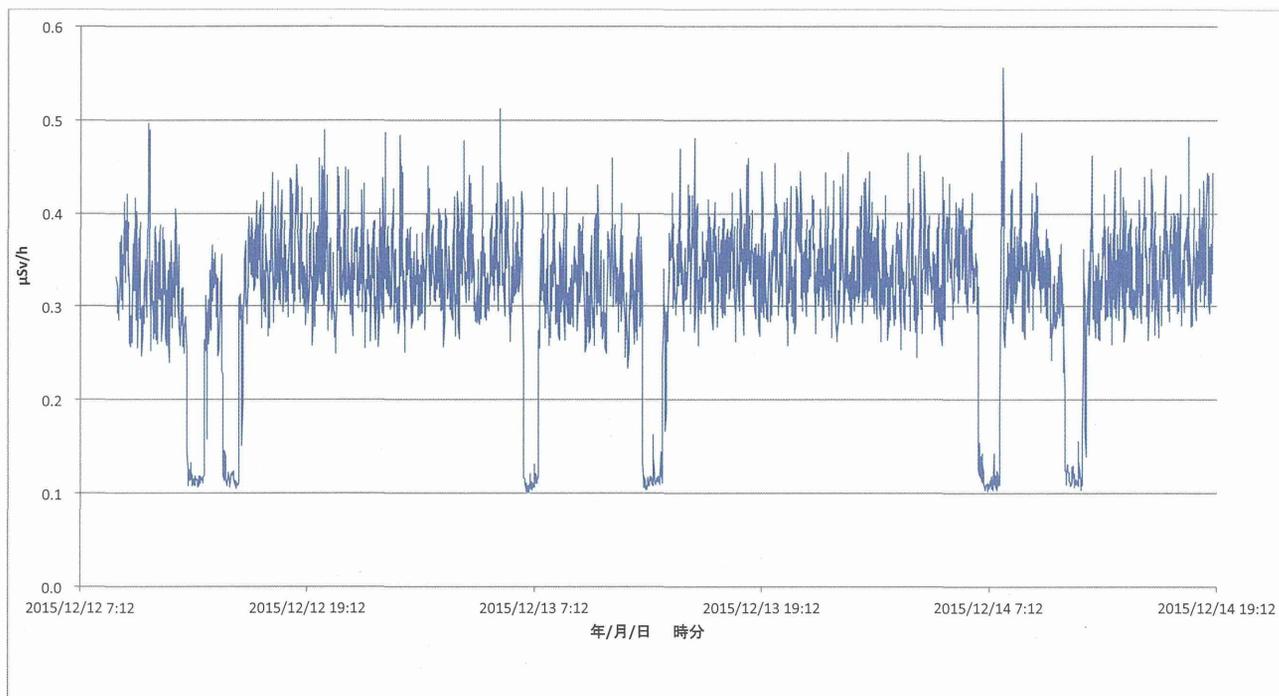


図 5-8 12月12日~12月14日の前室モニタリング結果

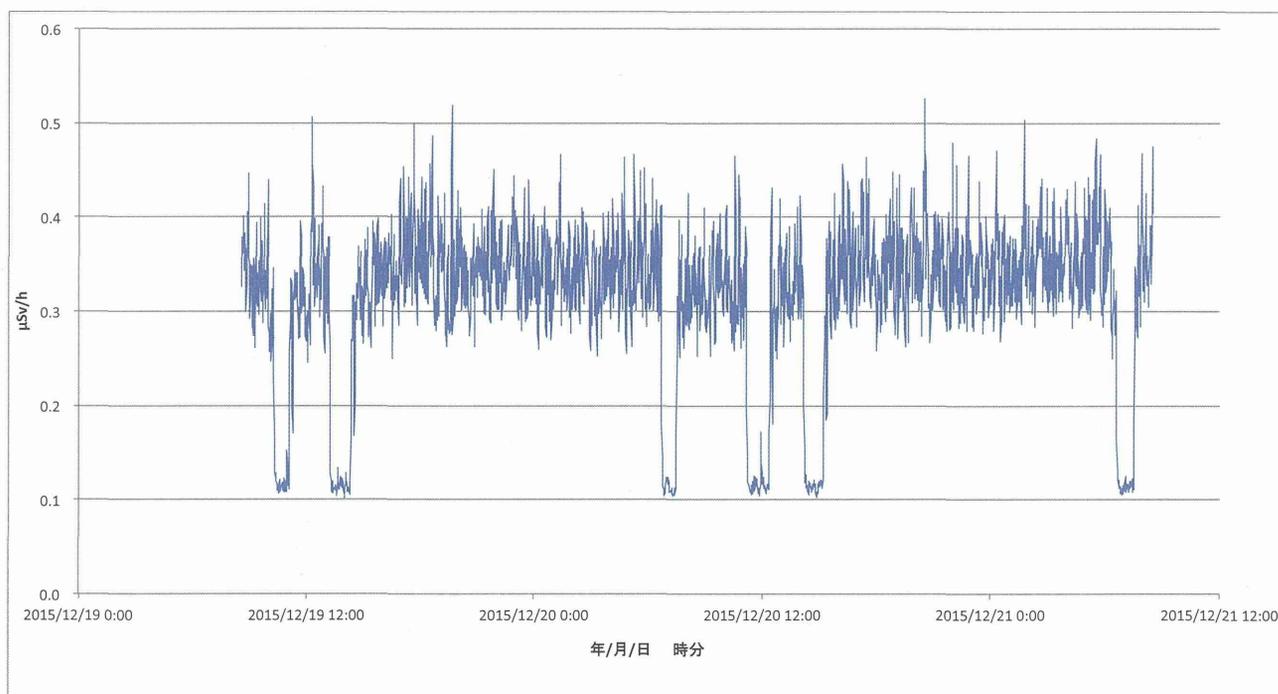


図 5-9 12月19日~12月21日の前室モニタリング結果

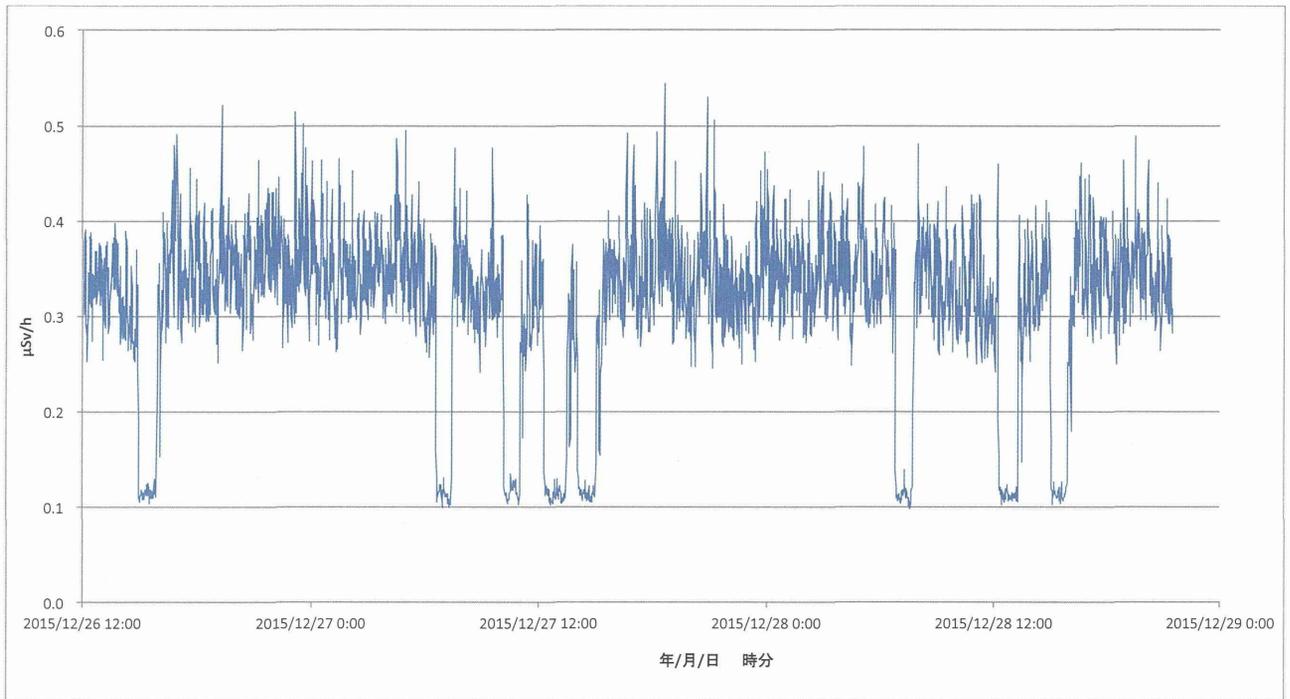


図5-10 12月26日～12月29日の前室モニタリング結果

表5-9 前室モニタリング結果の統計値（表中の線量の単位は $\mu\text{Sv/h}$ ）

ご遺体番号	観測日	燃焼前5分間の線量平均値	燃焼中線量の平均値	燃焼中線量の標準偏差	燃焼後10分間の線量平均値	時間外の線量平均値	時間外の線量標準偏差
1	11/30	0.156	0.112	0.005	0.296		
2		0.126	0.113	0.006	0.304	0.336	0.058
3	12/1	0.178	0.116	0.008	0.285		
4		0.209	0.116	0.008	0.244	0.339	0.041
5	12/2	0.131	0.113	0.005	0.321		
6		0.158	0.113	0.005	0.292		
7	12/6	0.194	0.117	0.008	0.210		
8		0.171	0.114	0.007	0.258	0.342	0.043
9	12/12	0.185	0.114	0.005	0.238		
10		0.205	0.116	0.008	0.268	0.342	0.042
11	12/13	0.210	0.115	0.010	0.274	0.342	0.041
12	12/14	0.202	0.116	0.009	0.273		
13	12/19	0.138	0.115	0.009	0.284		
14		0.255	0.113	0.006	0.258	0.343	0.040
15	12/20	0.209	0.113	0.005	0.130		
16		0.203	0.114	0.005	0.275	0.350	0.041
17	12/26	0.238	0.114	0.005	0.304	0.353	0.045
18	12/27	0.223	0.117	0.008	0.256		
19		0.207	0.114	0.006	0.271		
20		0.220	0.114	0.005	0.270	0.344	0.044
21	12/28	0.213	0.112	0.005	0.300		
22		0.232	0.113	0.006	0.275		
		平均＝	0.114	0.007	平均＝	0.343	0.044
		変動係数＝	0.057		変動係数＝	0.128	

#### 4. 結論

シード線源からの被ばく量を再評価するとともに、耐火レンガからの追加線量も評価した結果、前立腺永久挿入密封小線源治療患者が退院後1年間は火葬されない、という条件が厳密に守られる場合は、一般公衆に対する年実効線量限度を超えることはないとは推定され、特段の処置をとる必要はないと考えられる。しかし、この条件が厳密に守られない場合は、放射線作業従事者ではない火葬場作業者の被ばく量が一般公衆に対する年実効線量限度を超える場合も考えられることから、できれば、骨灰の放射能をモニタリングすることが望ましい。なお、I-125 から放出される光子のエネルギーは比較的 low (27.4keV, 31.1keV, 35.5keV)、一般によく用いられるシンチレーションサーベイメータでは測定できない場合があるので注意が必要である。また、これらの評価においては体内被ばくの可能性が無視されていることから、その可能性の有無について、さらなる調査が必要だと考えられる。

A 斎場の前室でご遺体を連続測定した結果、測定された 22 のご遺体からの異常な放射線は検出されなかったが、主燃焼炉や炉内台車に用いられている耐火レンガからと推定される放射線のため、通常環境の放射線量の数倍程度の放射線量が前室において観測された。この耐火レンガ近くにおいて、毎日作業することによる追加被ばく線量は、数十  $\mu$ Sv/年程度であり、これは一般公衆に対する年実効線量限度 (1mSv/年) と比べても 1 桁以上小さい値であることから、健康上問題となる値ではないと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 日本放射線腫瘍学会、日本泌尿器科学会、日本医学放射線学会：シード線源による前立腺永久挿入密封小線源治療の安全管理に関するガイドライン 第五版 (2011)
- 2) 平成 15 年度文部科学省委託調査研究「自然起源の放射性物質等を含む物に関する調査報告書」原子力安全技術センター，平成 16 年，p.10 (2004)

## 第4節 火葬場における作業環境測定

### 1. 調査方法

#### 1.1 サンプルング

単位作業場所\* での計測を実施した。

##### 1.1.1 炉の裏側でご遺族が不在時のみに連続運転

- (i) ハイボリュームサンプラーによる\*\* 全粒径の粒子状物質の捕集を、就労時間に実施した。
- (ii) ロープレッシャーインパクトによる粒径毎の粒子状物質の捕集を、就労時間に実施した。

##### 1.1.2 炉の表側でご遺族が不在時のみに連続運転

- (i) デジタル粉じん計により、作業環境測定法による A 測定を実施した。同一測定箇所にて、温湿度計を設置した。
- (ii) 単位作業場における作業中に、粒度分布計測器 (SMPS+OPS) にて個数濃度をモニタリングした。

##### 1.1.3 炉の表側でご遺族が不在時に随時測定

- (i) 作業場での気流を調査するために、発煙装置、熱線風速計を用いて風向や風速を測定した。
- (ii) 作業者の行動範囲、従事時間、作業内容を調査、ヒアリングした。

\* 単位作業場所は、粒子状物質が高いと予測される炉の周辺を想定している。

\*\* 「作業環境測定ガイドブック 2 電離放射線関係」(社団法人日本作業環境測定協会)、「廃棄物等の放射能調査・測定法暫定マニュアル」(独立行政法人国立環境研究所)に従い測定を行った。

#### 1.2 持込み装置

主な大型装置は下の7項目で、これに加え温湿度計などの小型機器を持参した。

- (i) ハイボリュームサンプラー (HVS:HVC-500N、柴田科学)、1点

全粒径の粒子状物質を石英フィルターに捕集する。捕集時間と積算流量が記録できるため、これらの値から体積当たりの重量濃度を求める。

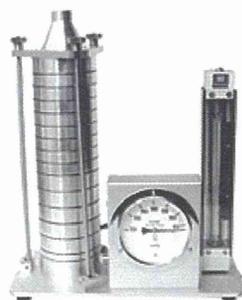


【サイズ・容量】

W530×D160×H230 mm、質量：9.5 kg

(ii) ロープレッシャーインパクター (LP-20、東京ダイレック)、1点

全粒径粒子をインパクターで分級し、各ステージで一定の粒径幅の粒子をフィルターに捕集する。分級範囲は、粒子径が 0.06~12 $\mu$ m。



【サイズ・容量】

W350×D177×H450mm、質量：12.5 kg

(iii) LP-20 用真空ポンプ (MSV-380、東京ダイレック)、1点

上のインパクターに接続されるオイルフリーポンプ。計測時にポンプ稼働の騒音が発生する。



【サイズ・容量】

W600×D235×H300mm、質量：34 kg

(iv) SMPS3910 (TSI)、1点

粒子径が 10~300 nm の個数濃度を、一定の粒径毎に測定する。約 1 分間で個数濃度を計測可能。バッテリー駆動により電源は不要。



【サイズ・容量】

W450×D230×H390 mm、質量：8 kg

(v) OPS3330 (TSI)、1点

粒子径が 0.3~10  $\mu$ m の個数濃度を、一定の粒径毎に測定する。約 30 秒間で個数濃度を計測可能。バッテリー駆動により電源は不要。



【サイズ・容量】

W210×D220×H130 mm、質量：2 kg

(vi) デジタル粉じん計 (LSDC:LD-3、柴田科学)、3点

サブミクロンからミクロンサイズの粒子数をカウント値として計測する装置。カウント値は換算計数（K 値）を用いて、質量濃度に変換できる。



【サイズ・容量】

W70×D105×H185 mm、質量：1.2 kg

(vii) FMPS3091 (TSI)、1 点

粒子径が 5.6nm～560nm の個数濃度を、一定の粒径毎に測定する。約 1 秒間で個数濃度を計測可能。



【サイズ・容量】

W704×D343×H439mm、質量：32 kg

### 1.3 調査地点

#### 1.3.1 A調査地

##### 1.3.1.1 見取図と調査エリアの状況

A調査地の見取図と測定項目とその場所を図 5-11 に示す。また、調査地の状況や作業環境に関する情報を下に記す。

- a タイプの異なる 2 系統が 10 炉稼働。
- b 冷却および整骨を行うための前室がある。
- c 炉と前室を格納している対象作業場は換気システムが整備された室内。
- d 燃烧に従事していた作業者は 2 名。
- e 保護メガネ、保護面の着用がなされていた。
- f 飛灰を回収するフィルターが設置されており、これらのメンテナンス業務も行っている。

##### 1.3.1.2 調査スケジュールと状況

調査内容と炉の運転スケジュールを図 5-12 に示す。HVS、LPI は観測の始めから終わりまで上図の位置に固定し、サンプリングを実施した。粉じん計は時間と作業工程を踏まえた上で 15 分間の観測を各粉じん計毎に 7 回ずつ、炉の奥と手前とで前後に移動させて行なった。粉じん計の設置高さは人の呼吸時の高さに相当する 120～150 cm

に設定した。

また、FMPS と OPS は発生源近くで測定を行うため、単位作業中に近傍へ移動させ、台座の冷却および整骨、清掃作業時における飛散粒子を測定した。炉の燃焼が終わると台座は局所排気装置であるコンパートで仕切られた前室に移動し、冷却後の整骨作業時には、前室の扉を開けて作業を開始する。作業が終わると前室の扉を閉じ、収骨へと移行する。その後、前室の扉を再び開けて清掃作業を行った後、台座は再び炉へと戻る。清掃作業時には、マグネットによる金属の回収、ステージの回収、骨などの回収が行なわれ、掃除機をかけた後に台座の保護材としてアルミナを撒く。

整骨作業と清掃作業はそれぞれ数分間で行うため、平均粒度分布としては炉ごとに一括して求めた。また作業別の濃度の経時変化も示す。炉の作業は同時並行で行われるため、計測は整骨のみを観測した炉と整骨と清掃を通して観測した炉とに分かれた。図の数字の順に計測を行った。

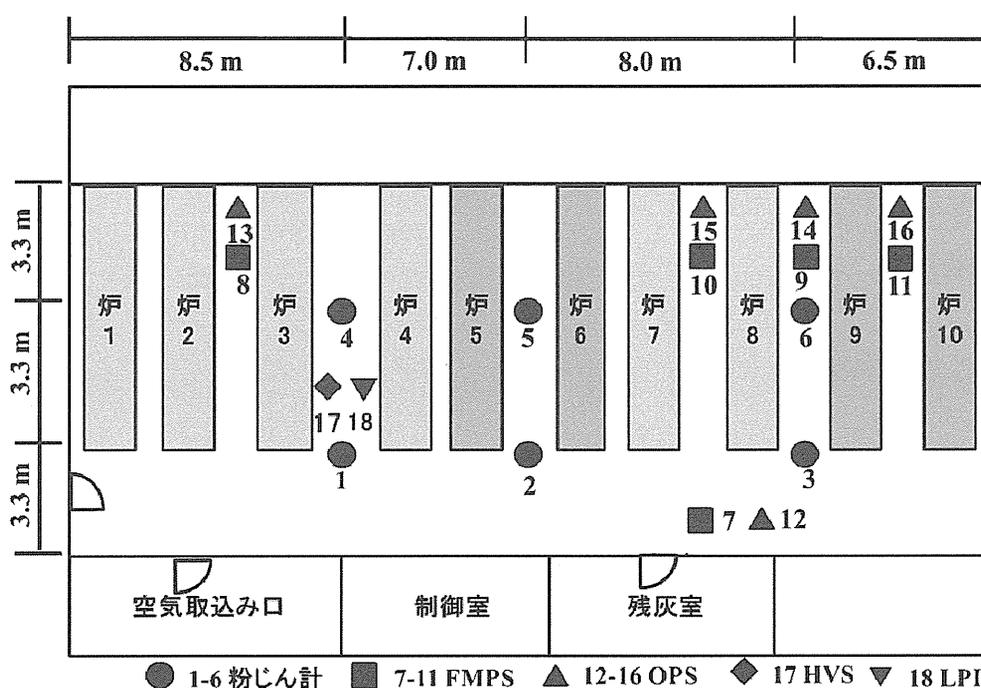


図5-11 A調査地の見取図と測定項目とその場所

番号：炉の番号、青：新型炉、他：旧型炉



図5-12 炉の運転スケジュール