

〈論文〉

被災地の一般廃棄物焼却施設における作業者の放射線被ばく量評価

小山 陽介¹⁾, 松井 康人¹⁾, 塩賀 淳平¹⁾, 西岡 和久¹⁾
 島田 洋子¹⁾, 高岡 昌輝¹⁾, 米田 稔¹⁾

¹⁾京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻

(〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C クラスター E-mail: koyama@risk.env.kyoto-u.ac.jp
 ymatsui@risk.env.kyoto-u.ac.jp, shioga@risk.env.kyoto-u.ac.jp, nishioka@risk.env.kyoto-u.ac.jp
 shimada@risk.env.kyoto-u.ac.jp, takaoka.masaki.4w@kyoto-u.jp, yoneda@risk.env.kyoto-u.ac.jp)

概要

東日本大震災による原発事故から3年以上が経ち、一般住民の放射線被ばくによるリスクは低減した。一方で除染により発生した廃棄物は焼却などによる減容が急務となっており、これにともなう焼却施設における作業者のリスク評価が求められている。本調査では焼却施設内における外部被ばくおよび内部被ばくによるリスクの評価方法の提案、および被災地の焼却施設においてリスク評価に必要なデータの測定を行い、作業者の曝露評価を試みた。一般廃棄物処理施設における今回の調査結果からの推算によると実効線量は最大でも15.5 mSv/5年程度であり、ICRP 勧告の線量限度100 mSv/5年を下回る値であった。

キーワード：焼却施設，放射線被ばく，セシウム，微小粒子状物質，吸入曝露

原稿受付 2013. 12. 24 原稿受理 2014. 6. 10

EICA: 19(2・3) 176-181

1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災における福島第一原子力発電所の事故により、周辺地域に大量の放射性物質が放出された。事故から3年以上が経った2014年現在、除染作業の取り組みや¹³⁴Csの低減などにより、原発付近の特定の地区を除くと、被災地域に暮らす住民の放射線被ばくによるリスクは事故直後に比べると低減した。一方で、除染作業により発生する汚染廃棄物は、福島県では約1500万～約2800万m³、福島県以外では約140万～約1300万m³に及ぶと試算されており¹⁾、焼却による減容が必要となっている。また、物質に吸着した放射性セシウムは、焼却による減容を行う際に、焼却灰、特に飛灰中に高濃度に濃縮されることが知られている²⁾。したがって、炉内作業者は放射性物質に曝露される可能性が最も高く、作業者に対する放射線被ばく量評価が必要不可欠である。一般廃棄物中の放射能はほとんど無いと考えられるが、事故により一般環境中にも放射性物質が放出されていることから、作業者のリスク管理は必要課題である。

そこで、本研究では、被災地焼却炉内で作業する労働者の外部被ばく量および吸入による内部被ばく線量の調査を行い、作業者に対する曝露量の評価を行うことを目的とした。

2. 測定方法

2.1 測定場所

本研究では、東日本大震災被災地域にある一般廃棄物焼却施設A（福島県）とB（茨城県）で働く作業者を対象とした測定を行った。焼却炉と灰溶融炉の両方を備えた施設として施設A（Fig. 1）、焼却炉のみを持った施設として施設Bを選定した。施設Aにおけるごみ処理の流れとして、まず近隣地域から集荷した可燃ごみを約850℃の高温で焼却する。そして、このとき発生する焼却主灰を、周辺焼却炉から搬入される灰とともに溶融炉で1300℃以上の高温で溶融し、減容化・無害化を行う。焼却炉および溶融炉で発生する飛灰は飛灰処理設備に集められ固化される。

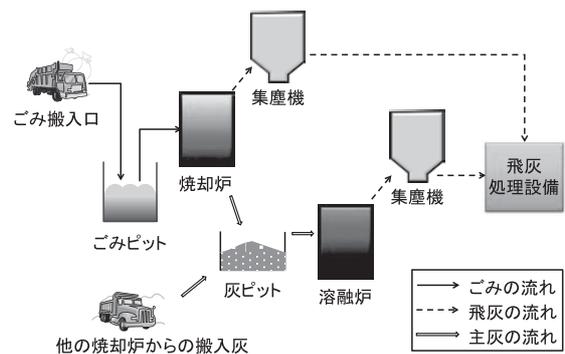


Fig. 1 Flow diagram of municipal waste, fly ash and bottom ash in incineration plant A.

2012年12月28日に文部科学省により発表された空間線量率の航空機モニタリングの結果³⁾において施設Aは0.2~0.5 $\mu\text{Sv/h}$ 、施設Bは、0.1~0.2 $\mu\text{Sv/h}$ の範囲に位置した施設である。

外部被ばくは、あらゆる場所での影響が考えられるため、施設全域において調査を行った。

内部被ばくについては、作業者が粒子状物質に曝露される可能性が高い単位作業場所を3箇所選定し調査を行った。

2.2 施設全域についての調査

(1) サーベイメータによる汚染ポイントの調査

高濃度汚染箇所が存在すると仮定し、デジタル式サーベイメータ (Model 2241-2, Ludlum Measurements 社製) を用いて、施設屋外および施設屋内全域について調査を行った。検出器には NaI シンチレーション γ 線検出器 (Model 44-2, Ludlum Measurements 社製) を用いて各箇所ですurveiを実施し、比較的高濃度の場所では、20分間計測を行った。測定時、時定数は Slow にし1箇所につき、20分間計測し続け、安定した代表値を採用して測定値とした。

(2) 個人線量計による空間線量率の測定

本来、個人線量計は使用者が身に付け、その間の積算線量を測定するものであり、空間線量率はサーベイメータを用いて30秒間以上測定することにより評価するのが一般的である⁴⁾。しかしながら、サーベイメータを用いた方法では時間帯による変動の評価が難しく、また多数の場所の測定を同時に行うのは困難である。

個人線量計を用いれば、特定の場所に固定して積算線量を測定し、その値を測定時間で除することによりその場所における空間線量率を求めることができる。個人線量計で測定される個人線量当量は、地表に広く ¹³⁴Cs および ¹³⁷Cs が分布していると仮定した場合、サーベイメータで測定される周辺線量当量を0.69倍した値とほぼ等しいことが報告されている⁶⁾。本研究では、これを適用することにより空間線量率の算出を行った。

施設の作業者が、実際に作業で頻繁に通過する場所を中心として、施設内の33箇所に個人線量計 (マイドーズミニ PDM-112, 日立アロカメディカル社製) を2週間設置し、各設置場所の空間線量率の測定を行った (Fig. 2)。

2.3 単位作業場所についての調査

(1) 単位作業場所の選定

労働安全衛生法に基づき、ごみ焼却施設で働く労働者が主に作業を行うエリアを単位作業場所として選定した。選定した場所は、①ごみピット、②灰ピット、

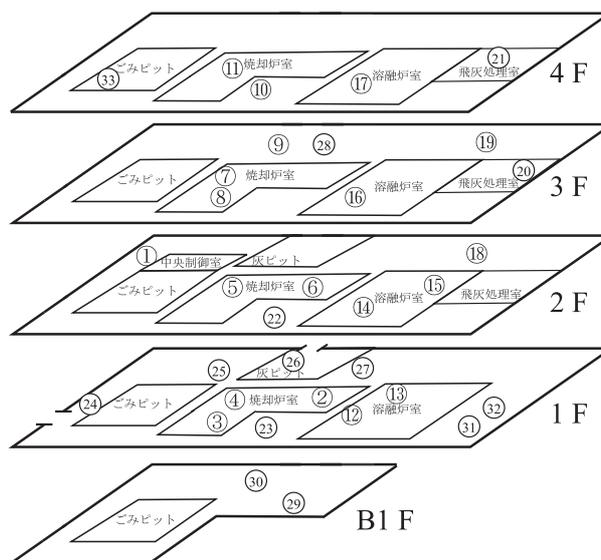


Fig. 2 Personal dosimeter setting points.

③ 飛灰処理設備であり、どの場所でも粉塵濃度が高いことが予想された。

(2) 汚染源からの放射線測定

3箇所の単位作業場所では、汚染源と想定されるものを仮定して、「放射線測定に関するガイドライン³⁾」に基づき、1 cm および 1 m の距離における空間線量率の測定を行った (Photo 1)。デジタル式サーベイメータの時定数を SLOW (線量率により 4~60 秒の間で自動設定) に設定し、60 秒間以上の測定を行った。

(3) 単位作業場所における粒子数濃度および粒度分布測定

単位作業場所における粒子数濃度と粒度分布を NanoScan SMPS (Model 3910, TSI 社製, 以下 SMPS) および Optical Particle Sizer (Model 3330, TSI 社製, 以下 OPS) を用いて測定した (Photo 2)。一般的なナノレベルの粒度分布測定装置は、精密性や大きさの観点から移動が困難であるため、作業環境におけるナノ粒子の暴露評価を行うには不向きである。本研究で用いた SMPS および OPS は軽量で小型かつ、バッテリーやデータロガーを内部に搭載しているため、電源確保の困難な場所においても測定することが可能



(a) 1 m from the source

(b) 1 cm from the source

Photo 1 Measurement of air dose rate assuming radiation source.

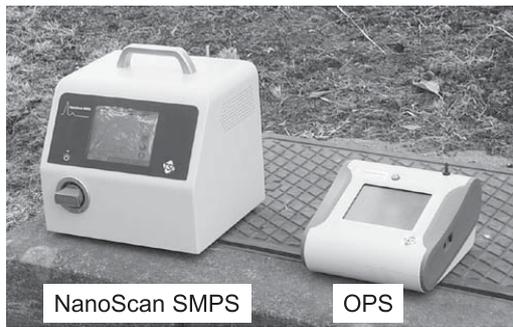


Photo 2 Particle size distribution and number concentration measurement devices.

である。SMPS と OPS の検出可能な粒径範囲は、それぞれ $10\sim 420\text{ nm}$, $0.3\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ であり、粒子数濃度は、それぞれ 10^6 cm^{-3} , 3000 cm^{-3} まで測定可能である。これらの装置を同時に利用することにより、ナノからマイクロオーダーまでの粒度分布を得ることが可能である。また、これらの装置は、1分毎に測定範囲の粒子をそれぞれ 13 および 16 分割して個数濃度および粒度分布を測定することができる。今回の測定では、各作業場所で約 20 分間測定を行い、その平均値から粒度分布を求めた。また、バックグラウンド測定として、施設屋外（玄関前）においても測定を行った。

(4) 粒子捕集実験

大気中の粒子に含まれるセシウムの量を調べるために、ハイボリュームエアサンプラー（HV-500R 型、柴田化学社製、以下 HVS）により粒子のフィルター捕集を行った。また、粒径毎のセシウムの吸着量を計測するため、ロープレッシャーインパクター（LP-20、東京ダイレック社製、以下 LPI）により $0.06\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ の粒径範囲で粒子の分級捕集を行った。それぞれの吸引流量は、HVS が 500 L/min 、LPI が 20 L/min であり、捕集時間は HVS が 24 時間、LPI が 2 週間とした。

HVS で全粒径の粒子を捕集した結果と LPI の結果を比較することにより、セシウムの全量に対して LPI で捕集可能な各粒径範囲に含まれるセシウムの割合を求めることができ、セシウムの吸着の粒径依存性の調査が可能となる。

捕集したフィルターについては、重量濃度あたりのセシウム量がわかるよう捕集前後に秤量を行った。温度 21.5°C 、相対湿度 35% の条件下で 24 時間以上維持した後、秤量した。これらの捕集フィルターに含まれるセシウムの定量を、ゲルマニウム半導体検出器（GX3018、CANBERRA 社製）により行った。

3. 結果と考察

3.1 サーベイメータによる空間線量率の測定

施設全域について高濃度汚染ポイントの有無の調

査をサーベイメータにより行った。A 施設の外気における空間線量は $0.507\text{ }\mu\text{Sv/h}$ で、B 施設では $0.211\text{ }\mu\text{Sv/h}$ であり、各施設屋内における空間線量はどの測定箇所においてもその値を下回るものであった。これは建物による遮蔽効果などにより低くなっていることが予想される。A 施設の屋内では 20 分間の測定で最も高い空間線量は $0.354\text{ }\mu\text{Sv/h}$ 、最も低い空間線量は $0.176\text{ }\mu\text{Sv/h}$ であった。B 施設の屋内では最も高い空間線量は $0.156\text{ }\mu\text{Sv/h}$ 、最も低い空間線量は $0.117\text{ }\mu\text{Sv/h}$ であった。したがって、A、B いずれの施設においても施設屋内で特定の場所で値が大きく変動することは無く、高濃度汚染ポイントは発見されなかった。

「個人住宅を対象とするホットスポット発見／除染マニュアル⁵⁾」においては、周囲より相対的に高い線量率を示す狭い範囲をホットスポットとしており、目安とする線量率については以下のように分類している。
① 地域全体の線量率が高い場合、地域の空間線量率と比較して数倍から数十倍高い線量率を示す場所とし、
② 地域全体の線量率が低い場合、空間線量率が $0.6\text{ }\mu\text{Sv/h}$ 以上である場所を示す。

今回の調査では A、B いずれの施設においても地域全体の線量率は低く、施設内では空間線量率が $0.6\text{ }\mu\text{Sv/h}$ 以上の場所は発見できなかったため、施設内にホットスポットは無かったと考えられる。

3.2 個人線量計による空間線量率の測定

線量の値は B 施設に比べると A 施設の方が全体的に高い線量を示したため、本稿では A 施設についての設置場所および周辺線量当量率を **Table 1** に示す。周辺線量当量率は、個人線量計の積算線量値を、個人線量当量と周辺線量当量の換算値である 0.69 および測定期間 (336 h) で除することにより求めた。線量が比較的高い場所として、ごみ搬入口 ($0.181\text{ }\mu\text{Sv/h}$)、白煙防止用空気加熱器前 ($0.190\text{ }\mu\text{Sv/h}$)、灰ピット ($0.181\text{ }\mu\text{Sv/h}$)、冷却塔前 ($0.224\text{ }\mu\text{Sv/h}$) の 4 箇所が挙げられる。ごみ搬入口および灰ピットは、搬入車の出入用に外に開かれており、冷却塔も屋外に設置されているため、これらの箇所は施設の周辺環境からの線量が主な原因だと考えられる。しかし、これらの場所においても、線量は航空機モニタリングの結果 ($0.2\sim 0.5\text{ }\mu\text{Sv/h}$) やサーベイメータで測定した外気における空間線量 ($0.507\text{ }\mu\text{Sv/h}$) よりも低い値であった。これらのことから、建築構造物による遮蔽効果で施設内での外部被ばく線量は低くなっていることが想定される。

3.3 単位作業場所における粒子数濃度および粒度分布の測定

A 施設の施設屋外（玄関前）および 3 箇所の単位

Table 1: Air dose rate in each setting place of personal dosimeter in incineration plant A.

測定場所		線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	
中央制御室	2F	ごみクレーン操作室	0.121
		復水タンク前	0.099
1F		集塵機制御盤前	0.138
		炉下コンベヤ前	0.086
		焼却炉覗き窓前	0.095
2F		白煙防止用空気加熱器前	0.190
		炉内噴霧流量計前	0.116
		集塵機上部	0.125
3F		押込送風機室 送風機前	0.125
		誘引送風機室 送風機前	0.155
4F		ボイラドラム主蒸気弁前	0.168
		溶融炉集塵機操作盤前	0.104
1F		溶融機器冷却水ポンプ前	0.099
	2F	バーナ制御盤前	0.082
		磁選機前	0.121
3F		溶融炉集塵機上部	0.142
	4F	気水分離機前	0.125
2F		磁選コンベヤ前	0.125
	3F	振動コンベヤ前	0.116
3F		混練機前	0.125
	4F	貯留槽上部マンホール	0.125
2F		破碎機前	0.121
	1F	不適物選別コンテナ前	0.125
1F		投入扉操作盤	0.181
1F		薬品タンク前	0.138
1F		灰受入室場外余熱流量計前	0.181
1F		コンプレッサ前	0.134
3F		冷却塔前	0.224
地下		ボイラ薬注ポンプ前	0.125
地下		灰汚水槽前	0.129
1F		バンカ室操作盤前	0.134
1F		バンカ室操作盤前	0.134
最上階		クレーン格納位置付近	0.147

作業場所における個数基準の粒度分布の測定結果を **Fig. 3** に示す。 D_p (nm) は粒径, N (cm^{-3}) は単位体積あたりの粒子数濃度を表す。施設屋外では約 20~30 nm の位置にピークがあり, ピーク粒径の個数濃度は約 3000 cm^{-3} であった。ごみ搬入口の粒子数濃度は全体的に施設屋外以下のレベルであり, ピーク値でも, 1000 cm^{-3} であった。飛灰処理装置においては 20 nm 以下の粒径範囲が屋外に比べて 5 倍程度高くなっていったがそれ以上の粒径では屋外とほぼ同程度であった。灰ピットの粒子数濃度は 100 nm 以下の範囲で全体的に高く, 屋外の 10 倍程度の粒子数を示した。

同様に B 施設についての粒度分布の測定結果を **Fig. 4** に示す。施設屋外の濃度は A 施設とあまり変わらず, ピークは 10~20 nm にあり, 個数濃度は約 4000 cm^{-3} であった。A 施設の場合と異なり, 灰ピットの粒子数濃度は屋外とほぼ同程度であった。一方, ごみピットと飛灰処理装置前は全体的に屋外よりも粒子数濃度が高く, 約 30 nm の粒径ではそれぞれ 3 倍, 30 倍程度の個数濃度であった。飛灰にセシウムが, 高濃度に吸着される¹⁾ことだけでなく, 他の場所に比べて高濃度のナノ粒子に曝露されることから考えても, B の飛灰処理装置前は, 粒子の吸入による内部被ばく量は高くなると考えられる。SMPS, OPS での A, B の 2 箇所での粒度分布測定から, 同様の焼却炉でも必ずしもナノレベルの粒子数濃度が高い場所は一様ではなく, また, 同一施設内でも作業箇所により粒子数濃度は大きく異なる結果であった。一般的な粒度分布測定装置は, 移動が難しく, 今回の計測のように焼却施設の複数箇所において測定結果を得るのは困難であるが, 今回用いたような持ち運びが容易な測定装置の利用が,

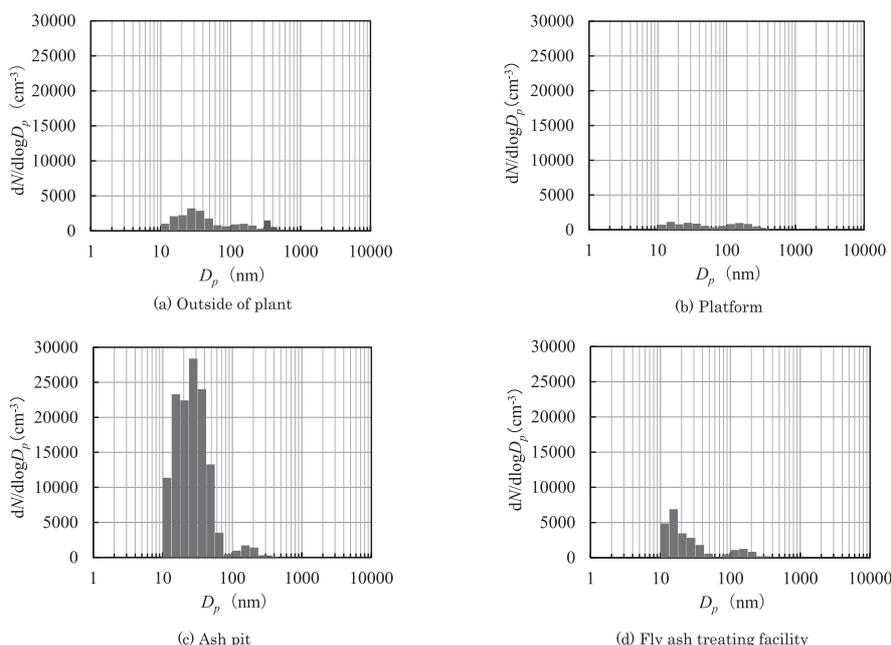


Fig. 3: Particle size distribution in each working environment in incineration plant A.

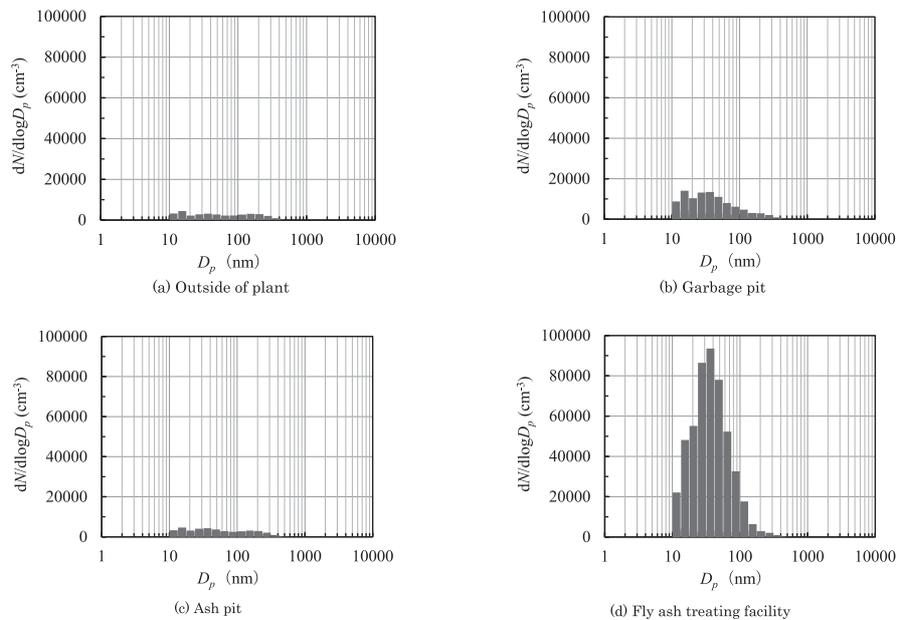


Fig. 4 Particle size distribution in each working environment in incineration plant B.

作業環境における粒度分布測定において有用であると考えられる。

3.4 捕集した粒子の重量濃度および放射線量

HVSはA,Bそれぞれ3箇所, LPIはAではごみ搬入口と灰ピット, Bではごみピットと飛灰処理装置前のそれぞれ2箇所の単位作業場所で捕集を行った。Aの灰ピットでLPIにより捕集した粒子によるフィルターの重量変化をTable 2に示した。LPIの吸引流量は20 L/minで, 捕集期間が2週間であり, 約403.2 m³中に含まれる各粒径の粒子重量となる。

ゲルマニウム半導体検出器によるセシウムの測定では, 検出時間を2週間として測定を行った結果, HVSによる捕集フィルターの施設Bの飛灰処理装置前でのみ検出され, HVSの吸入空気量である720 m³あたり¹³⁷Csが0.26 Bqであった。今回の測定時間における検出下限値は0.007 Bqであり, 他のHVSおよ

びLPIの捕集フィルターでは2週間の測定では検出されなかった。

以下に内部被ばく量の推算方法について示す。ここでは, ¹³⁷Csに着目して実効線量を算出した。吸入粒子の放射能 I_0 は以下の式⁷⁾により計算される。

$$I_0 = C_A t B$$

ここで, C_A は空気中の放射性物質濃度(Bq/m³), t は曝露時間(h), B は呼吸率(m³/h)である。ICRP勧告(1990年)の放射線作業に従事する作業者に対する線量限度は100 mSv/5年であり⁸⁾, この値と比較するために, 5年間この濃度の粒子を吸引し続けたと仮定する。成人男性の軽い労働時の呼吸率 $B=1.57^7)$ を用いて計算を行うと I_0 は約23.7 Bqとなる。さらに¹³⁷Csを吸入摂取した場合の実効線量係数 6.7×10^{-6} (mSv/Bq)⁹⁾を乗じると実効線量は約 1.6×10^{-4} mSvとなり, 線量限度よりもはるかに低い値となった。本来, 正確な曝露評価を行うためには, 作業時間外における曝露量の変動も含めて計算する必要がある。それを仮定するのは困難であるため, 本報告では施設内における最大曝露量を意味するこの方法で計算を行った。

Table 2 Weight variation of filter before and after trapping with LPI in ash pit of incineration plant A

50% カットオフ径 (μm)	重量変化 (mg)
12 μm 以上	79.07
8.5	59.56
5.7	37.21
3.9	16.58
2.5	4.06
1.25	0.30
0.76	0.00
0.52	-0.16
0.33	5.60
0.22	3.66
0.13	2.27
0.06	7.27
0.06 μm 以下	31.44

4. 結 論

今回の調査結果から, 現状の一般の廃棄物焼却施設内での外部被ばくは屋外よりも低いレベルであった。施設内におけるサーベイメータによる測定で, 最も高い空間線量は0.354 $\mu\text{Sv/h}$ であったが, 5年間この環境にいたとしても, 15.5 mSvであり, ICRP勧告の線量限度100 mSv/5年を下回る値であった。また, 内

部被ばくによる5年間の実効線量は約 1.6×10^{-4} mSvであり外部被ばくと比較してもはるかに低い値であった。

今回の測定により、現状の被災地の廃棄物焼却施設における作業員の放射線被ばくのリスクは外部被ばく、内部被ばくともに低いことが予想される結果となった。ただし、今回の調査では日変動や時間帯による変化については十分に考慮されておらず、さらに調査を続けていくことにより一般性を高めていくことが必要になる。今後進められていくであろう高濃度の除染廃棄物の減容処理を行う際にも、本稿で示したような方法により、作業員の放射線被ばくのリスク評価を継続していくことが重要であると考えられる。

謝辞

本研究は、環境省の環境研究総合推進費(K122106)の支援により実施された。測定場所の提供および測定機器については、日立造船(株)、東京ダイレック(株)にご協力頂いた。

参考文献

- 1) 環境省：東京電力福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質による環境汚染の対処において必要な中間貯蔵施設等の基本的考え方について、2012。
- 2) 環境省：災害廃棄物の広域処理の推進について（東日本大震災により生じた災害廃棄物の広域処理の推進に係るガイドライン）、2012。
- 3) 文部科学省：①第6次航空機モニタリングの測定結果、及び②福島第一原子力発電所から80 km圏外の航空機モニタリングの測定結果について、2013。
- 4) 文部科学省、日本原子力研究開発機構：放射線測定に関するガイドライン、2011。
- 5) 西澤邦秀：個人住宅を対象とするホットスポット発見/除染マニュアル、日本放射線安全管理学会誌、Vol. 11, No. 1, pp. 92-101 (2011)。
- 6) 平山英夫：地表に広く分布した ^{134}Cs および ^{137}Cs を対象とする個人線量計の評価、to be published in RADIOISOTOPES.
- 7) ICRP, 1994. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66. Ann. ICRP 24 (1-3).
- 8) ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1-3).
- 9) 科学技術庁：放射線を放出する同位元素の数量等を定める件、別表第2。

Measurement of Radiation Exposure in Municipal Waste Incineration Plants of Disaster Areas

Yosuke Koyama^{1)†}, Yasuto Matsui¹⁾, Junpei Shioga¹⁾, Kazuhisa Nishioka¹⁾

Yoko Shimada¹⁾, Masaki Takaoka¹⁾ and Minoru Yoneda¹⁾

¹⁾ Dept. of Urban and Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University

† Correspondence should be addressed to Yosuke Koyama :

(Dept. of Urban and Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University

E-mail : koyama@risk.env.kyoto-u.ac.jp)

Abstract

Three years have passed from the Great East Japan Earthquake and the risk of radioactive exposure for the local resident has decreased. On the other hand, large amount of wastes has generated by decontamination work and the volume needs to be reduced by incineration. Therefore, the risk assessment of waste incineration plant is needed. In this paper, an assessment method of the risk from external exposure and internal exposure by inhalation in waste incineration plants was proposed, and data for the risk assessment were measured in actual incineration plants of disaster areas. In the present incineration process, which is treating municipal waste, the contamination level in plants was lower than the outdoor environment, and the risk of the plant workers from radioactive exposure is thought to be very low.

Key words : incineration plant, radiation exposure, cesium, particle matter, inhalation