

大洗研究開発センター燃料研究棟における汚染に係る 作業員の被ばく評価について

平成 29 年 7 月 19 日
日本原子力研究開発機構

(1) 外部被ばくによる実効線量の評価（詳細は添付 6.3.1 参照）

① OSL（光刺激蛍光）線量計による測定

大洗研究開発センターでは放射線業務従事者の日常モニタリング用の基本線量計として OSL 線量計を使用している。作業員の着用していた OSL 線量計は、表面汚染が認められたためグリーンハウス内で保管され、平成 29 年 6 月 13 日に回収された。回収時に行われた表面汚染検査の結果、線量計ケース外側には最大で 1.0×10^3 Bq/cm² の汚染が確認されたが、ケースに収納された線量計本体には汚染はなかった。

平成 29 年 6 月 15 日に OSL 線量計の測定を実施した結果、作業員 A、B、C、D の 1 cm 線量当量は検出下限値（0.1 mSv）未満であった。しかし、作業員 E の OSL 線量計については、表面に付着していた汚染からの放射線が長時間にわたって線量計に局所的に入射したために指示値異常が発生したと考えられることから、評価不能と判定した。

また、OSL 線量計に同梱された中性子用の固体飛跡中性子線量計の測定も実施した結果、中性子による有意な被ばくは認められなかった。

② 電子式ポケット線量計（EPD）による測定

作業員 5 名のうち 3 名が補助線量計として EPD を着用しており、その読取値は 2 μ Sv（作業員 B）、3 μ Sv（作業員 D）、60 μ Sv（作業員 E）であった。

③ 実効線量の評価

以上の結果から、5 名の作業員の外部被ばくによる実効線量は、作業員 A、B、C、D については OSL 線量計、作業員 E については EPD をもとに評価を行い、全員記録レベル（0.1 mSv）未満であると評価した（表 6.3.1 参照）。なお、平成 29 年 6 月 7 日に測定した 108 号室内の線量当量率は最大で 2 μ Sv/h であった（図 4.2.10）ことから、同室内に 8 時間滞在したとして計算しても外部被ばくは記録レベル（0.1 mSv）未満と評価できる。

(2) 体表面汚染による皮膚被ばく線量の評価（詳細は添付 6.3.1 参照）

108 号室からの退室時のグリーンハウスにおける身体汚染検査において、作業員全員の特殊作業衣に、うち 4 名には皮膚に汚染が確認されたことから、これらの汚染による皮膚被ばく線量について評価を行った。（添付 6.3.1 参照）

この評価においては、作業員に関連する種々の測定データの中で最も汚染密度の高い、OSL 線量計のケース表面の測定結果（スミヤ法での測定結果に基づく保守的な評価で 1.0×10^3 Bq/cm²）を用い、この値の汚染が直接皮膚に付着し、事象発生時刻から管理区域から退出する時刻まで皮膚被ばくが継続していたとの仮定により皮膚の等価線量を評価した。その結果、最大で 83 μ Sv であった。

また、量研 放医研が受入時に実施した体表面汚染検査時に検出された汚染（最大 140 cpm）についても上記と同様保守的な仮定により評価した結果、最大で 0.11 μ Sv であった。

これらの結果から、体表面汚染による皮膚の等価線量は、全員記録レベル（0.1 mSv）未満であることを確認した。

(3) 内部被ばくによる実効線量の評価

保安規定に基づき、原子力機構は放射線業務従事者が体内汚染を受けたと認められる場合には体内汚染の検査及び内部被ばくに係る線量の評価を行うことにしている。

今回、原子力機構は作業員の内部被ばくに対する診察、処置を受けさせるため、事象が発生した翌日の平成 29 年 6 月 7 日から量研 放医研へ作業員を入院させた。そのため、原子力機構は内部被ばく線量の測定・評価について、量研 放医研が診察、処置の一部として実施する内部被ばく線量の測定・評価に協力する形で行うこととした。この一環として原子力機構はバイオアッセイ試料（便）の分析を実施し、平成 29 年 7 月 5 日、量研 放医研にその結果を報告した。

このように内部被ばく線量の測定・評価の結果は全て量研 放医研の管理する医療情報となっているため、原子力機構は、今後適切な手続きのもと必要な情報を入手し、原子炉等規制法等の法令に基づく放射線業務従事者の被ばく線量の報告・記録を行う。

量研 放医研は、バイオアッセイ検査等の結果を詳細に検討し、内部被ばく線量の評価を行った。量研 放医研が平成 29 年 7 月 10 日に公表した作業員 5 名の内部被ばくによる実効線量（預託実効線量）は、表 6.3.2 のとおりである。

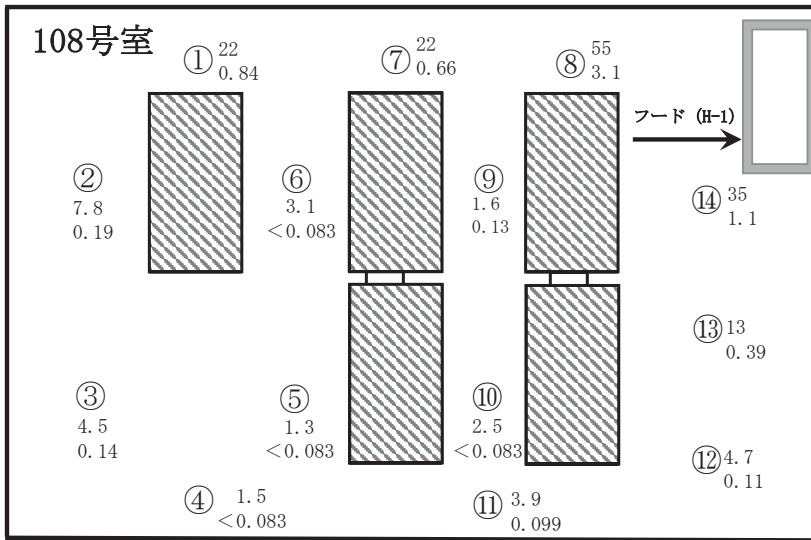
なお、平成 29 年 6 月 6 日の事象発生当日に行った肺モニタ測定では、Pu-239 と Am-241 について、最大でそれぞれ 2.2×10^4 Bq、 2.2×10^2 Bq が確認された¹が、翌日量研 放医研で実施された肺モニタ測定では Pu-239 は検出されなかった。量研 放医研に受け入れ後実施された体表面汚染の測定では、数か所から最大 140 cpm の体表面汚染が検出されていることから、肺モニタ測定における相違は、原子力機構の測定では皮膚に付着していた Pu-239 等による影響があったためと考えられる。今後、肺モニタで測定された値と皮膚に付着した汚染との関係を明らかにしていく。

以上

¹ 全量が肺中放射能であると仮定した場合、預託実効線量は 12 Sv に相当する。

上段：α線
下段：β(γ)線

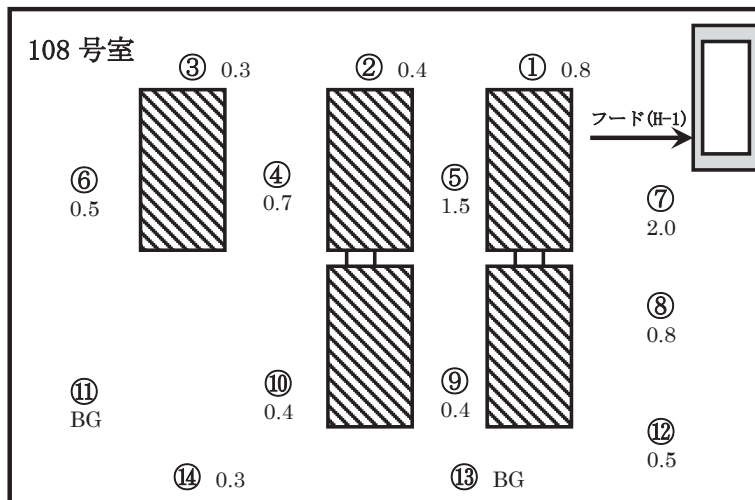
▨ : グローブボックス



表面密度測定記録	
建家名	燃料研究棟
測定日時	平成29年6月7日 18:36~18:55
測定線種	■ α線 ■ β(γ)線
測定器	放射能計測装置 (ES-7284)
測定方法	スミヤ法
単位	Bq/cm ²
測定条件	拭取効率: 10%
備考	
記事	①~⑭: 測定ポイント

図4.2.9 表面密度測定結果

▨ : グローブボックス



線量当量率測定記録	
建家名	燃料研究棟
測定日時	平成29年6月7日 16:41~17:09
測定線種	γ線
測定器	GM管式サーベイメータ (GM-137)
BG	0.2 μSv/h
測定方法	サーベイ法(床上約1m)
単位	μSv/h
備考	
記事	①~⑭: 測定ポイント

図 4.2.10 線量当量率測定記録

表 6.3.1 作業員の外部被ばくによる実効線量

実効線量	人数
記録レベル(0.1mSv)未満	5名

表 6.3.2 作業員の内部被ばくによる実効線量（預託実効線量）

実効線量	人数
100 mSv 以上 200 mSv 未満	1名
10 mSv 以上 50 mSv 未満	2名
10 mSv 未満	2名

7月10日 量研 放医研の発表による。

外部被ばく線量（実効線量及び皮膚の等価線量）の評価について

本文 6.3 項「(1) 外部被ばくによる実効線量の評価」及び「(2) 体表面汚染による皮膚被ばく線量の評価」において記載した被ばく線量評価の詳細を以下に示す。

1. 外部被ばく線量の評価

(1) OSL（光刺激蛍光）線量計による測定

大洗研究開発センターでは放射線業務従事者の日常モニタリング用の基本線量計として OSL 線量計を使用している。この OSL 線量計では、4 個の OSL 素子の上に、それぞれ材質及び厚さの異なるフィルタ（フィルタなし、プラスチック、アルミニウム及び銅）を配置することにより γ 線と β 線の弁別及び入射放射線エネルギーの推定を行い、被ばく線量の評価に必要な精度を担保できるよう設計されており、外部からの放射線が線量計に一樣に入射することが正しい測定の前提条件となる。 γ 線のエネルギーの推定にはアルミニウム (Al) フィルタと銅 (Cu) フィルタに対する透過率の違いを利用しており、本被ばく事象における主要な外部被ばく源と考えられる Am-241 の γ 線 (59.5 keV) やそれより低いエネルギーにおいては、両フィルタ下の OSL 素子の読取値の比が約 1.5 以上となる。

作業員の着用していた OSL 線量計は、表面汚染が認められたためグリーンハウス内で保管され、平成 29 年 6 月 13 日に回収された。回収時に行われた表面汚染検査の結果、線量計ケース外側には最大で 1.0×10^3 Bq/cm² の汚染 (2. (2) 参照) が確認されたが、ケースに収納された線量計本体には汚染はなかった。

平成 29 年 6 月 15 日に OSL 線量計の測定を実施した結果、作業員 A、B、C 及び D の 1cm 線量当量は検出下限値 (0.1 mSv) 未満であった。しかし、作業員 E の OSL 線量計では、Al フィルタ下と Cu フィルタ下の OSL 素子の読取値の比が約 0.5 となっており、前述した、今回の被ばく状況で想定される約 1.5 以上という値とは大きく異なっていた。これは、表面に付着していた汚染からの放射線が長時間にわたって線量計に局所的に入射したためと考えられる。したがって作業員 E の OSL 線量計については、評価不能と判定した (表 6.3.1-1)。

また、OSL 線量計に同梱された中性子用の固体飛跡中性子線量計の測定も実施した結果、中性子による有意な被ばくは認められなかった。

(2) 電子式ポケット線量計 (EPD) による測定

平成 29 年 6 月 19 日付報告で既報のとおり、作業員 5 名のうち 3 名が補助線量計として EPD を着用しており、その読取値は 2 μ Sv (作業員 B)、3 μ Sv (作業員 D)、60 μ Sv (作業員 E) であった (表 6.3.1-1)。

この EPD の読取値についても EPD 表面の汚染による寄与が含まれていると考えられるが、各作業員の退域時に読み取られた値であることから、回収までの約 7 日間汚染下にあった OSL 線量計に比べて読取値に対する汚染の寄与は小さいと考えられる。ただし、EPD は 40 keV 以下のエネルギーの光子に感度を持たないため、108 号室の光子エネルギースペクトル (波高分布) を測定した。

(3) 108 号室の線量率及び光子エネルギーの測定

平成 29 年 7 月 4 日に 108 号室の光子エネルギースペクトル (波高分布) を測定した。その結果を図 6.3.1-1 に示す。この結果から 108 号室については Am-241 からの γ 線 (59.5 keV) が支配的であり、

EPD の測定値が過小評価である可能性は低いことが確認された。

(4) 実効線量の評価

以上の結果から、5名の作業員の外部被ばくによる実効線量は、作業員 A、B、C、D については OSL 線量計、作業員 E については EPD をもとに評価を行い、全員記録レベル (0.1 mSv) 未満であると評価した。(表 6.3.1-1)。

なお、平成 29 年 6 月 7 日に測定した 108 号室内の線量当量率は最大で 2 μ Sv/h であったことから、同室内に 8 時間滞在しても外部被ばくを評価すると最大で 16 μ Sv であり、上記の評価と矛盾しない。

表 6.3.1-1 OSL 線量計及び EPD による外部被ばく線量の測定・評価結果

作業員	A	B	C	D	E
測定値 (OSL 線量計)	<0.1mSv	<0.1mSv	<0.1mSv	<0.1mSv	評価不能 ^{*1}
測定値 (EPD)	着用なし	2 μ Sv	着用なし	3 μ Sv	60 μ Sv
実効線量評価結果	X ^{*2}	X ^{*2}	X ^{*2}	X ^{*2}	X ^{*2}

*1 線量計表面汚染の影響があり評価不能

*2 X;記録レベル (0.1mSv) 未満

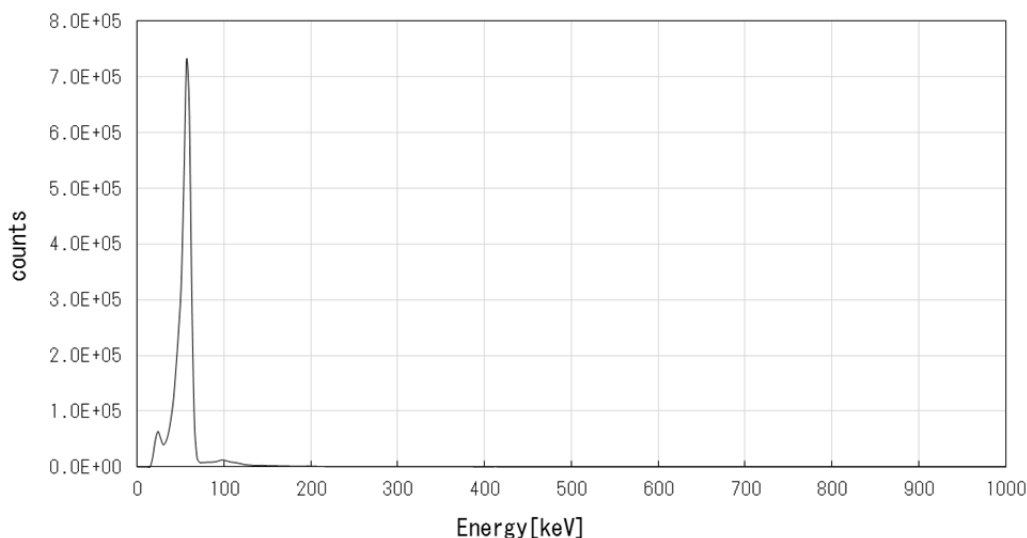


図 6.3.1-1 LaBr₃ スペクトロメータによる 108 号室内の光子エネルギースペクトル測定結果 (平成 29 年 7 月 4 日 約 3 時間測定)

2. 皮膚の等価線量の評価方法

2.1 計算方法

皮膚の等価線量の評価は、表面汚染の測定結果から以下の計算方法を用いて評価した。

(1) 表面汚染の測定結果から表面密度の算出 (出典: JIS Z 4504:2008¹)

¹ JIS Z4504:2008 放射性表面汚染の測定方法— β 線放出核種 (最大エネルギー0.15MeV 以上) 及び α 線放出核種 より。

①直接法で単位面積当たりの放射能 A_s ($\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-2}$) を求める場合

$$A_s = \frac{n - n_B}{\epsilon_i \times W \times \epsilon_S} \dots\dots\dots (1)$$

- ここに、
- n : 総計数率 (s^{-1})
 - n_B : バックグラウンド計数率 (s^{-1})
 - ϵ_i : β 線又は α 線に対する機器効率
 - W : 放射線測定器の有効窓(入射窓)面積 (cm^2)
 - ϵ_S : 放射性表面汚染の線源効率

②間接法で遊離性表面汚染の単位面積あたりの放射能 A_{sr} ($\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-2}$) を求める場合

$$A_{SR} = \frac{n - n_B}{\epsilon_i \times F \times S \times \epsilon_S} \dots\dots\dots (2)$$

- ここに、
- n : 全計数率 (s^{-1})
 - n_B : バックグラウンド計数率 (s^{-1})
 - ϵ_i : β 線又は α 線に対する機器効率
 - F : ふき取り効率
 - S : ふき取り面積 (cm^2)
 - ϵ_S : ふき取り試料の線源効率

(2) 核種別の放射能の算出

対象となる混合物中の各核種の重量から放射能を求める。

質量数 M 、半減期 $T_{1/2}(\text{sec})$ の核種 ^MN が W (g) ある場合、その核種の放射能 $A_{N-M}(\text{Bq})$ は

$$A_{N-M} = W \cdot \frac{\ln(2)}{T_{1/2}} \cdot \frac{A_0}{M} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 A_0 : アボガドロ数 (6.02×10^{23})

となる。前項で求めた表面密度の値は、全ての α 線放出核種の放射能の密度であることから、この値から皮膚の線量を評価する場合は、核種組成(放射能比)を用いて核種別の表面密度を算出する。

(3) 皮膚の等価線量の算出

表面汚染による皮膚の被ばく線量は、表面密度に単位時間あたりの線量換算係数 ($[\text{mSv/h}]/[\text{kBq/cm}^2]$) 及び被ばく時間を乗じて算出した核種ごとの被ばく線量を合計することにより評価する。今回の評価で対象とした核種の情報を表 6.3.1-2 に示す。

表 6.3.1-2 評価で対象とした核種の情報

核種	半減期 ² (year)	線量換算係数 ³ ([mSv/h]/[kBq/cm ²])	α線放出率 (%)
Pu-238	8.770E+01	3.70E-03	99.9
Pu-239	2.41E+04	1.43E-03	99.7
Pu-240	6.564E+03	3.70E-03	99.9
Pu-241	1.435E+01	0.00E+00	0.0023
Pu-242	3.75E+05	3.70E-03	100
Am-241	4.322E+02	1.95E-02	99.3

2.2 今回の評価

(1) 汚染の核種組成 (放射能比)

現時点では実際の表面汚染の同位体比等に係る情報は得られていないことから、これまでに調査された、破裂した容器に収納されたことが確認されている試料の情報 (本文 表 6.4.1 の 5 種類の同位体組成) を開封時 (平成 29 年 6 月) までの崩壊を考慮した放射能組成に換算し、皮膚被ばく線量が最大となる同位体比を評価し使用した。

(2) OSL 線量計ケースの表面密度

OSL 線量計ケースの表面 (身体に密着した背面部分を除く五面) を拭き取ったスミヤロ紙の測定結果は、バックグラウンド計数を減じた正味値で $27,756 \text{ min}^{-1}$ であった。

また、ケースの外形は $3.5 \text{ cm (W)} \times 7 \text{ cm (H)} \times 1 \text{ cm (L)}$ であることから、拭き取った表面積は 45.5 cm^2 とした。この場合、表面密度 (Bq/cm^2) は、式 (2) より以下の値となる。なお、機器効率及び線源効率は、このときの測定に使用した $\alpha \beta$ シンチレーション測定装置: JREC ES-7284A について、大洗研究開発センターの通常の放射線管理で使用している値を適用した。

$$A_{sr} = \frac{n - n_B}{\varepsilon_i \times F \times S \times \varepsilon_s} = \frac{27756 / 60}{0.416 \times 0.1 \times 45.5 \times 0.25} = 1.0 \times 10^3$$

(3) 量研 放医研で測定された身体汚染の表面密度

量研 放医研の受け入れ時のサーベイメータによる体表面汚染検査では、最大 140 min^{-1} の汚染が身体の一部に検出されたと発表されている。この場合、表面密度 (Bq/cm^2) は、式 (1) より以下の値となる。なお、機器効率及び線源効率は、量研 放医研が当該測定で使用した測定器 (α 汚染サーベイメータ: Aloka TCS-232) と同型の測定器について、大洗研究開発センターの通常の放射線管理で使用している換算係数 (Bq/cpm)、すなわち機器効率 \times 線源効率に 60 を乗じた値の逆数を適用した。

² 日本アイソトープ協会、アイソトープ手帳 11 版 (2011) より。

³ D. Delacroix et. al., “Radionuclide and Radiation Protection Data Handbook 2002”, Radiation Protection Dosimetry, Vol.98, No.1, 2002 より。ただし、ここでは Pu-240 に対する係数が 0、Pu-242 については記載なしのため、Pu-238 での値を代用し保守的評価となるようにした。

$$A_s = \frac{n - n_B}{\varepsilon_i \times W \times \varepsilon_s} = \frac{140}{71.5} \times 0.225 = 0.44$$

(4) OSL 線量計ケースの表面密度を用いた事象発生から管理区域退域までの線量

OSL 線量計ケースの表面密度の最大値 (1.0×10^3 Bq/cm²) と同じレベルの汚染が身体表面に直接付着したと仮定し、事象発生（平成 29 年 6 月 6 日 11 時 15 分）から 5 名全員の除染が完了し管理区域を退出した時刻（同日 18 時 55 分）までの 7.67 時間を最大の被ばく時間として皮膚の線量を評価した。その結果、各核種の合計で約 83 μSv となった。

(5) 量研 放医研の測定結果（公表値）を用いた管理区域退域から放医研での除染完了までの線量

量研 放医研での受入時に検出された汚染 (0.44 Bq/cm²) が、管理区域退域時から残存していたと仮定し、燃料研究棟の管理区域退域時（平成 29 年 6 月 6 日 18 時 55 分）から本情報が公表されたプレス発表の開始時刻（平成 29 年 6 月 7 日 17 時）までの約 22 時間を最大の被ばく時間として皮膚の線量を評価した。その結果、各核種の合計で約 0.11 μSv となった。