

2023年10月25日に発生した 増設ALPS配管洗浄作業における身体汚染に 関わる作業員の線量評価結果について

2023年12月18日

東京電力ホールディングス株式会社

1. 発生概要

- 2023年10月25日 10時30分頃、点検停止中であった増設ALPSのクロスフローフィルタ出口配管（B系）内の洗浄作業を実施していたところ、洗浄廃液を移送していた受入タンク内から仮設ホースが外れ、近傍で作業を実施していた協力企業作業員2名（A,B）に洗浄廃液が飛散した。
- 外れたホースを速やかにタンク内に戻した上記作業員1名（A）の電子式線量計（以下「APD」）のβ線の警報が鳴動した。
- 近傍で同作業にあたっていた作業員は身体汚染の可能性があることから、構内の救急医療室（以下「ER」）にて汚染測定を実施した結果、5名のうち洗浄廃液が飛散した2名（A,B）および飛散水の清掃にあたった2名（D,E）に身体汚染を確認し、1名（C）は身体汚染なしを確認した。
- その後、身体汚染を確認した4名（A,B,D,E）の除染を実施し、飛散水の清掃を実施した2名（D,E）は除染が完了。洗浄廃液が飛散した2名（A,B）については、汚染レベルは下がったものの、退出基準（4Bq/cm²）以下までの除染が困難であったことから、福島県立医科大学附属病院（以下「FMU」）へ搬送した。
- なお、汚染測定を実施した5名については鼻腔スミアを実施し、内部取り込みがないことを確認。また、ER医師の診察の結果、薬液による熱傷はなく、放射線障害による熱傷の可能性は低いと判断された。
- FMUへ搬送された2名（A,B）については、診察後に入院し、病院での処置を受けた後、10月28日に退院。11月16日にFMUにて、2名（A,B）共に汚染が4 Bq/cm²以下であることが確認された。

2. 福島第一原子力発電所における線量管理と今回の線量評価

<通常の線量管理について>

(1) 個人線量計の着用

福島第一原子力発電所（以下「1F」）の管理対象区域に立入る際は、原則、受動形個人線量計及びAPDを着用する。APDは作業管理用である。

(2) 個人線量計の装着位置

個人線量計の装着位置は、男性又は妊娠する可能性がないと診断された女性の場合は胸部に、その他の女性は腹部に線量計を装着する。最も多く放射線にさらされるおそれのある部位がそれ以外の場合は、当該部にも線量計を装着する。

(3) 累積線量の管理

毎月1日を始期とする1か月単位で受動形個人線量計の測定を行い、月間、年度、5年間の累積線量（実効線量、等価線量）を管理する。

<今回の事象を踏まえた線量評価について>

皮膚に付着した放射性核種の表面汚染密度と経過時間から、皮膚の等価線量を評価し、各累積線量（実効線量、等価線量）に反映する。なお、実効線量への反映は、厚生労働省の定める「東京電力福島第一原子力発電所における安全衛生管理対策のためのガイドライン」に基づき、皮膚の等価線量に組織荷重係数（0.01）を乗算した値が0.1mSv以上の場合とする。

3. 等価線量の評価値を算出するための基本となる計算式

洗浄廃液付着による皮膚の等価線量の評価値は、IAEA-TECDOC-1162の計算式に基づき算出する。

➤ 前提条件

皮膚または衣服上の放射性核種の平均表面汚染密度 $[\bar{C}_{s,i}]$ (Bq/cm²)

- ・ GM管式サーベイメータや体表面モニタで測定した最大値を採用する。
- ・ 放射性核種は、洗浄廃液の分析結果*からSr-90/Y-90(放射平衡)とする。

*γ核種 (Cs-134,137等) および全αは検出限界値未満のため

➤ 計算式

$$H_s = \sum_i H_{s,i}$$

$$H_{s,i} = \bar{C}_{s,i} \cdot CF_{8,i} \cdot SF_{\beta} \cdot T_e$$

H_s = 皮膚等価線量 [mSv]

$H_{s,i}$ = 放射性核種*i*由来の皮膚等価線量 [mSv]

$\bar{C}_{s,i}$ = 皮膚または衣服上の放射性核種*i*の平均表面汚染密度 [Bq/cm²]

$CF_{8,i}$ = 放射性核種*i*についての皮膚β線量率換算係数 [(mSv/h)/(Bq/cm²)]
Sr-90/Y-90 : 3.5×10^{-3}

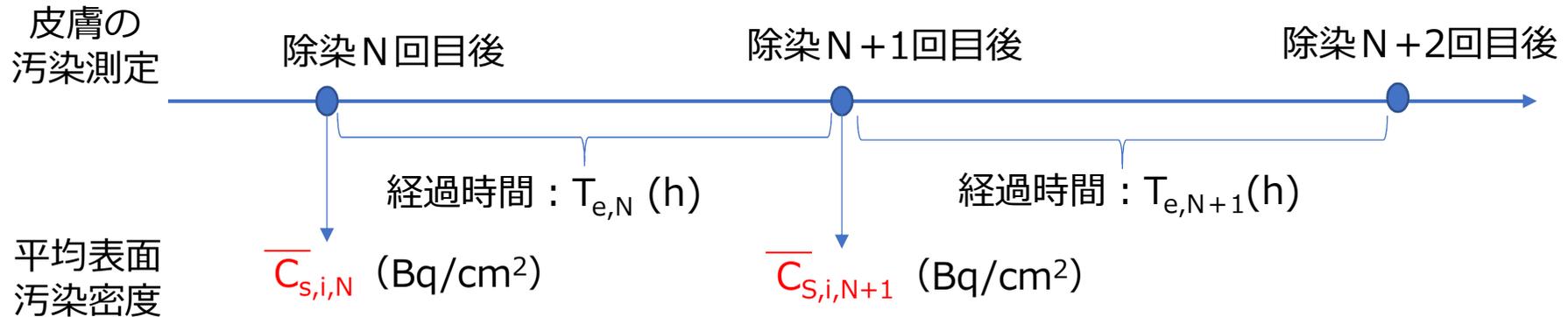
SF_{β} = 衣服等による遮蔽を考慮した遮蔽係数。衣服のみを考慮した場合 (夏、春秋、冬)、遮蔽係数の代表値はそれぞれ約0.2~0.3、0.001である

T_e = 被ばくの時間 [h]

なお、被水した洗浄廃液はカバーオールを透過し、皮膚まで浸透しているため、衣服の遮蔽は考慮せず、被水時から皮膚に直接付着していたと想定 ($SF_{\beta} = 1$ とした)。

4. 皮膚への汚染付着時間と等価線量の累積の考え方

皮膚への汚染付着時間【 T_e 】は、GM管式サーベイメータや体表面モニタで測定した時間から次に測定した時間までの経過時間とする（下図を参照）。



$$H_{s,i} = \bar{C}_{s,i} \cdot CF_{s,i} \cdot SF_{\beta} \cdot T_e$$

除染後に測定した皮膚の汚染が次の除染後まで付着していたとして、その間の等価線量を計算

$$\text{皮膚等価線量} = (\bar{C}_{s,i,N} * 3.5 \times 10^{-3} * T_{e,N}) + (\bar{C}_{s,i,N+1} * 3.5 \times 10^{-3} * T_{e,N+1}) + \dots$$

- ✓ 等価線量の累積は、皮膚の汚染測定の最大値が、「電離放射線障害防止規則」、「東京電力株式会社福島第一原子力発電所原子炉施設の保安及び特定核燃料物質の防護に関する規則」に定める表面汚染に関する限度の10分の1 (4 Bq/cm²)以下になるまで実施。
- ✓ 除染後の皮膚表面汚染の最大値は、経時的に低下し、基本的に $\bar{C}_{s,i,N} > \bar{C}_{s,i,N+1}$ になると想定されるが、 $\bar{C}_{s,i,N} < \bar{C}_{s,i,N+1}$ となった場合は、除染N回目後の皮膚表面汚染の最大値を $\bar{C}_{s,i,N}$ から $\bar{C}_{s,i,N+1}$ に変更して計算。

5. GM管式サーベイメータ及び体表面モニタの機器効率と換算係数

GM管式サーベイメータや体表面モニタの校正線源は、1FではCo-60、FMUではCl-36を使用している。

- ✓ 1Fで実施した測定については、洗浄廃液の主要核種がSr-90/Y-90であることを考慮し、Sr-90/Y-90線源で校正した換算係数（下表参照）を用いて、平均表面汚染密度を算出する。
- ✓ FMUで実施した測定については、Sr-90/Y-90線源で校正した換算係数がないため、Cl-36線源で校正した換算係数を用いて、平均表面汚染密度を算出する（Sr-90/Y-90線源で校正した換算係数よりも保守的）。

表 1Fにおける各校正線源による機器効率及び換算係数

| | | | 校正線源 | | |
|-----------------|------|--|----------|----------|----------|
| | | | Co-60 | Cl-36 | Sr/Y-90 |
| GM管式 サーベイメータ | 機器効率 | (%) | 28.0 | 49.1 | 60.1 |
| | 換算係数 | (Bq/cm ² ・min ⁻¹) | 7.59E-03 | 3.46E-03 | 2.83E-03 |
| 体表面モニタ | 機器効率 | (%) | 18.6 | - | 45.2 |
| | 換算係数 | (Bq/cm ² ・s ⁻¹) | 1.34E-01 | - | 4.42E-02 |

6. GM管式サーベイメータがオーバースケールした際の平均表面汚染密度の算定

10月25日の1Fにおける除染前の汚染測定では、作業員AとB共にGM管式サーベイメータがオーバースケールしたため、洗浄廃液の全β放射能濃度に皮膚表面の液体厚み（下表参照）を乗じて平均表面汚染密度を算出する。

表 実験条件を変えた液体種類によるフィルム厚み値[※](10^{-3} cm)

| | 天然オイル | 調理用オイル | バスオイル | オイル/水 | 水 ^a | 水/エタノール |
|--|-------|--------|-------|-------|----------------|---------|
| 初回接触 ^b 拭き取りなし ^c | 1.56 | 2.25 | 1.74 | 2.03 | 2.34 | 3.25 |

a 濃度 = 0.9989 g/cm^3

b 初回接触 = 液体を染み込ませた布を、被ばく事象中に初めて、清潔で乾いた両手の表裏にこすりつけた。

c 拭き取りによる液体の意図的な除去を行わずに、皮膚への液体の滞留を推定した。

※ EPA's Exposure Factors Handbook (EFH) の表7-24より抜粋

<https://www.epa.gov/expobox/about-exposure-factors-handbook>

$$\begin{aligned} & \text{平均表面汚染密度(Bq/cm}^2\text{)} \\ & = \text{全}\beta\text{放射能濃度(Bq/cm}^3\text{)} \times \text{皮膚表面の液体厚み(cm)} \\ & = 4.38\text{E}+06 \times 2.34\text{E}-03 \\ & \div \mathbf{1.02\text{E}+04} \end{aligned}$$

7. ERで汚染測定を行った5名の等価線量の評価値及び年間累積線量

ERで汚染測定を行った5名について、3.～6.に示した線量評価方法に基づき、皮膚の等価線量を評価し、2023年度の累積線量を算出した。皮膚の等価線量は線量限度である年間500mSvを超えないことを確認した。

| | 洗浄廃液付着による皮膚の等価線量の評価値※ (mSv) | 2023年度 (4月～10月) の累積線量 (mSv) | | |
|----------|-----------------------------|-----------------------------|---------|------------|
| | | 実効線量※ | 皮膚の等価線量 | 眼の水晶体の等価線量 |
| 作業員 A | 76.6 | 2.9 | 88.3 | 2.3 |
| 作業員 B | 51.2 | 2.1 | 55.8 | 1.9 |
| 作業員 C | 皮膚汚染なしのため評価対象外 | 3.5 | 7.0 | 3.7 |
| 作業員 D | <0.1 | 2.4 | 4.9 | 3.2 |
| 作業員 E | 0.2 | 0.7 | 1.4 | 0.8 |

※作業員A,Bの洗浄廃液付着による皮膚の等価線量は、4 Bq/cm²以下となった11月16日までの累積値であるが、2023年10月分の皮膚の等価線量として算定。また、作業員A,Bの2023年10月分の皮膚の等価線量は、組織荷重係数 (0.01) を乗算した値が0.1mSv以上となるため、実効線量に加算。

8. ERで汚染測定を行った5名の10月25日の実効線量

7.に示した皮膚の等価線量の評価値に基づき、当該作業（10月25日）における実効線量を算出した結果、5mSvを超えないことを確認した。

| | APD 測定値 (mSv) | 皮膚の等価線量 (mSv) [※] | | 当該作業（10月25日） における実効線量 [※] (mSv) |
|----------|----------------------------------|------------------------------|---|--|
| | | 洗浄廃液付着による 皮膚の等価線量の 評価値 | APD測定値($\gamma + \beta$)と 洗浄廃液付着による皮膚の 等価線量の評価値の合算値 | |
| 作業員 A | $\gamma : 0.11$ $\beta : 6.6$ | 76.6 | 83.3 | 0.9 |
| 作業員 B | $\gamma : 0.07$ $\beta : 1.6$ | 51.2 | 52.9 | 0.6 |
| 作業員 C | $\gamma : 0.16$ $\beta : 2.0$ | 皮膚汚染なしの ため評価対象外 | 2.2 | 0.2 |
| 作業員 D | $\gamma : 0.02$ $\beta : 0.2$ | <0.1 | 0.2 | 0.02 |
| 作業員 E | $\gamma : 0.02$ $\beta : 0.3$ | 0.2 | 0.5 | 0.02 |

※作業員A,Bの洗浄廃液付着による皮膚の等価線量は、4 Bq/cm²以下となった11月16日までの累積値であるが、当該作業（10月25日）の皮膚の等価線量として算定。また、作業員A,Bの当該作業（10月25日）の皮膚の等価線量は、組織荷重係数（0.01）を乗算した値が0.1mSv以上となるため、実効線量に加算。

【参考】洗浄廃液の放射能濃度

洗浄廃液を移送していた受入タンク内から採取した試料の放射能濃度の分析結果（下表参照）は、全βのみ検出されたこと、増設ALPS入口の運転中の系統水は、H-3を除くと純β核種であるSr-90の濃度が最も高いことから、洗浄廃液の核種組成は、Sr-90/Y-90（Sr-90の放射平衡を考慮）が支配的であると考えられる。

尚、Sr-90/Y-90は、増設ALPS入口水にて検出されているβ核種の中では、β線の平均エネルギーが最も高く、皮膚のβ線量率換算係数が最も大きい。

表 タンク内より採取した洗浄廃液の分析結果

| 核種 | 濃度 (Bq/L) |
|-------------|------------|
| Cs-137※1, 2 | <7.22 E +4 |
| Cs-134※1, 2 | <6.24 E +4 |
| 全β | 4.38 E +9 |
| 全α※2 | <9.68 E +3 |

※1 Ge半導体検出器での分析の結果、検出されたγ核種はない。

※2 β線の線量率が高く10,000倍に希釈を行ったため、検出限界値が通常の実験結果より高くなっている。

【参考】「東京電力福島第一原子力発電所における安全衛生管理対策のためのガイドライン」からの抜粋

6 ベータ線被ばくの評価

発電所長及び元方事業者は、次に掲げる事項を実施すること。

(1) ベータ線による被ばくがガンマ線による被ばくの10 倍以上になるおそれがある場合は、電離則第8条第3項第一号に定める部位に装着する測定器は、1センチメートル線量当量及び70 マイクロメートル線量当量を測定できる測定器とすること。

(2) (1)に加え、処理済み廃液を取り扱う場合等、同条同項第三号に該当する場合は、最も多く放射線を被ばくするおそれのある部位に70 マイクロメートル線量当量を測定できる測定器を装着して測定を行うこと。

(3) ベータ線による被ばく線量の実効線量への加算について

(1) によって測定された日ごとの**70 マイクロメートル線量当量が日ごとの1センチメートル線量当量の10 倍以上ある場合であって、以下のア又はイで算定された値が積算線量計の測定下限値（0.1 ミリシーベルト）以上となる場合**は、それぞれの場合に応じ、ア又はイの値を**月間の累積1センチメートル線量当量に加算して月間の実効線量を算定**すること。

ア (2)の測定が行われていないときは、(1)で測定された月間の累積70 マイクロメートル線量当量に皮膚の組織加荷重係数（0.01）を乗じた値

イ (2)の測定が行われた場合は、(1)の測定器と(2)の測定器でそれぞれ測定された月間の累積70マイクロメートル線量当量を皮膚の面積で加重平均した値に皮膚の組織荷重係数（0.01）を乗じた値