

放射線工学部会セッション

福島原発事故後 10 年間の放射線工学分野における活動と今後の展望

Activities in the field of radiation engineering for 10 years after the 1F accident and future prospects

(3) 放射線遮蔽の知見による線源推定

(3) Radioactive source estimation based on radiation shielding knowledge

*平山 英夫^{1,2}¹ 高エネルギー加速器研究機構, ² 原子力規制庁

1. はじめに

福島第1原子力発電所（以下、「1F」という。）の事故後の対応で重要な課題の一つに、原子炉建屋内の線源の推定（様々な場所に沈着している Cs-137 を中心とする放射性核種の場所と放射能を把握すること）がある。前の二人の講演で紹介されているように、様々な手法で原子炉建屋内部の状況把握が試みられているが、線源の原因・状況は多様であり、放射能の推定は難しい。特に、大量の Cs-137 等を含む線源の場合は、遮蔽となる物質の外部から取得可能な線量率等の情報から推定することが必要である。1F の事故時の状況は現在でも十分には解明されていないこと、場の線量当量率が非常に高い場合が多いことから、可能な測定方法が限られている。このような状況での放射能の推定では、把握が難しい「詳細な情報」ではなく、大まかな状況を得るといった観点から取り組むことが必要である。そのためには、「放射線測定器」に関する知識を基に、使用可能な測定器の選定や特性の評価を行った上で、放射線遮蔽計算の知見を活用して入手出来た波高分布や線量当量率等から線源の状態を推定することが必要となる。

以下では、原子炉格納容器上部の3層のシールドプラグの隙間に沈着していると考えられる大量の Cs-137 の沈着量の推定の取り組みを通じて、このような活動を紹介する。

2. シールドプラグ隙間の Cs-137 沈着放射能の推定

2-1. 3号炉

3号機は、水素爆発によりオペレーションフロア（以下、「オペフロ」という。）の天井や壁が破壊され、床についても一部が崩落する状況になっていた。東京電力ホールディング株式会社（以下、「東電」という。）は、使用済み燃料の取り出し作業を進めるために、オペフロ上部の周辺線量当量率分布の測定を行い、がれきの撤去を行と共に、オペフロ床面の汚染が主要な線源であるとして遠隔で高圧洗浄等により、コンクリートを5mm程度削除した。しかし、当初から線量率が高かったシールドプラグ上の空間では、5m位置での最大線量率は第1図のように、200 mSv/h と除染前の半分程度のレベルまでにしか低減しなかった。コンクリート表面に付着した Cs-137 は深い位置まで浸透することはないことから、シールドプラグ表面の汚染が主要な線源であったならば、表面を5mm程度の削除により、線量率は大幅に減少するはずである。このことから、除染後のシールドプラグ上部の高い線量当量率の線源がシールドプラグ表面の汚染ではないと考えるのが最も自然である。

事故時には、第2図に示す圧力容器、格納容器とその上部のシールドプラグの関係から、格納容器に出た放射性核種を含む高温・高圧の蒸気がシールドプラグの隙間に充満し、オペフロに達したと思われる。このことを踏まえ、それぞれ60cmのコンクリートで構成されている3層のシールドプラグの上段と中段の隙間に大量の Cs-137 を中心とする放射性核種が沈着しており、それがシールドプラグ上の空間の高線量当量率の主要な線源である可能性が高いと推測した。この推測が正しければ、最低60cmのコンクリートを透過した放射線場であることから、Cs-137 等から放出されるγ線よりもコンクリート中で散乱されたよりエネルギーの低い散乱線の寄与が大きいことになる。このことは、シールドプラグ表面の散乱線を含む光子の波高分布を

* Hideo Hirayama^{1,2}¹ High Energy Accelerator Research Organization., ² Nuclear Regulation Authority.

測定することができれば確認できると考えた。

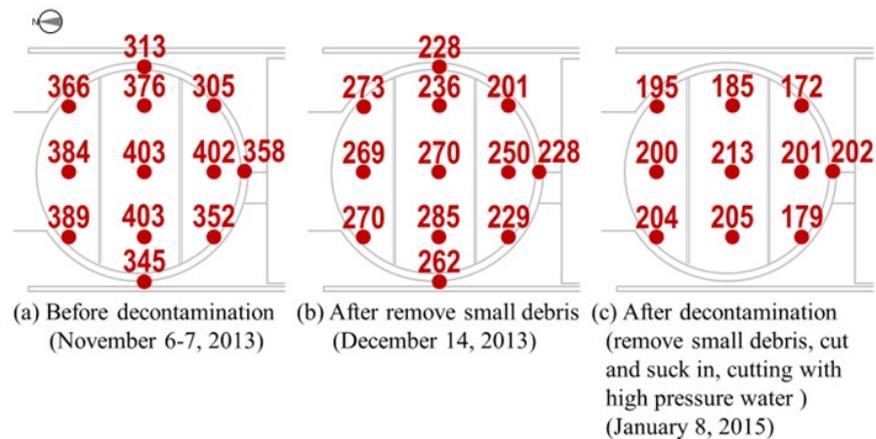


Figure 1. Ambient dose equivalent rates in mSv/h above the shield plugs

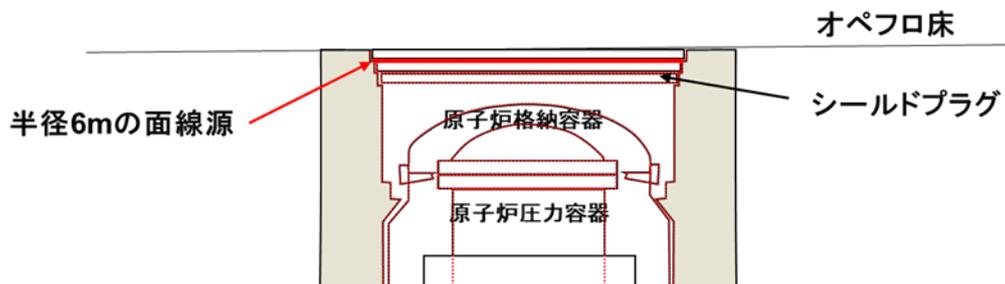


Figure 2. Structure around the shield plug

シールドプラグ表面の汚染は除かれたが、崩落部で除染が出来ない箇所など線量当量率が高い場所が周辺に存在していたので、シールドプラグ表面での波高分布を測定するためには、それらの線源からの光子が寄与しない構造のコリメータが必要である。シールドプラグを含む3号機オペフロ上部での波高分布の測定は、2015年11月19日に東電、東芝及び鹿島JVの関係者の協力で第3図に示す高エネルギー加速器研究機構のコリメータを大型クレーンにより測定点に移動することにより行われた。

第4図に示すシールドプラグ上部の測定点での波高分布は、第5図に示す様にCs-137の全エネルギー吸収ピークに比べて散乱線が遙かに多いという想定通りの結果であった。測定点No.1からNo.5の間でも、全エネルギー吸収ピークの計数率が異なることから、場所により汚染密度にばらつきがあることが分る。

使用したCdZnTe検出器のCs-137γ線に対する全エネルギー吸収ピーク計数率と60cmのコンクリートを透過してシールドプラグ表面から50cm位置の検出器の達する非散乱線数から求めた汚染密度を第1表に示す。5箇所の平均の汚染密度は 2.7×10^{10} Bq/cm²で半径6mの隙間全体では30 PBq (測定点によるばらつきから、9.2~64 PBq) という結果が得られた。

上記の3号機の測定結果は、2016年にパリで開催された第13回遮蔽国際会議で発表した。

2-2.2 号機²⁾

2号機では水素爆発が起きなかったことから、オペフロの天井・壁・床は健全である。しかし、事故に伴い大量の放射性核種を含む高温・高圧の蒸気がオペフロに達したことは3号機の場合と同じである。シールドプラグを含む広い領域に養生シートが敷かれており、事故後もそのシートが破損していなかったとみられることから、オペフロ内部全体に汚染が存在していると考えられる。東電がロボットを使ってオペフロ内の残置物を移動・片付後に実施したオペフロ空間での線量当量率では、第6図に示す様に3号機の場合と同様にシールドプラグ上部が他の場所に比べて高いという結果が示されている³⁾。同様に、コリメータ付きのγ線

線量計を用いて測定した表面 γ 線線量率でも第7図に示す様に同様の傾向であることが報告されている³⁾。

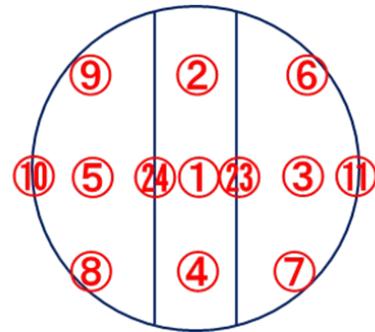
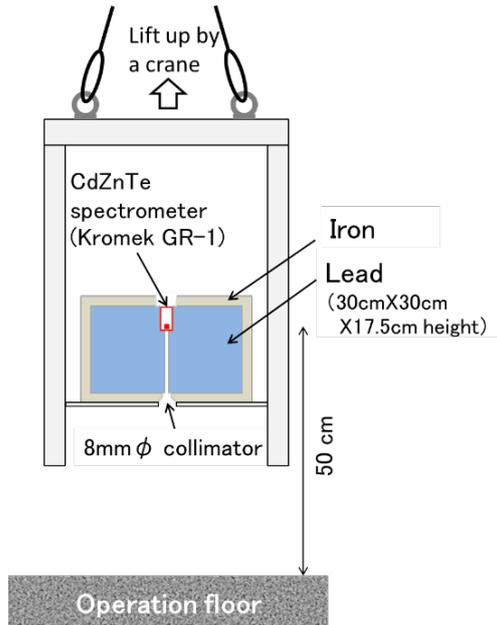
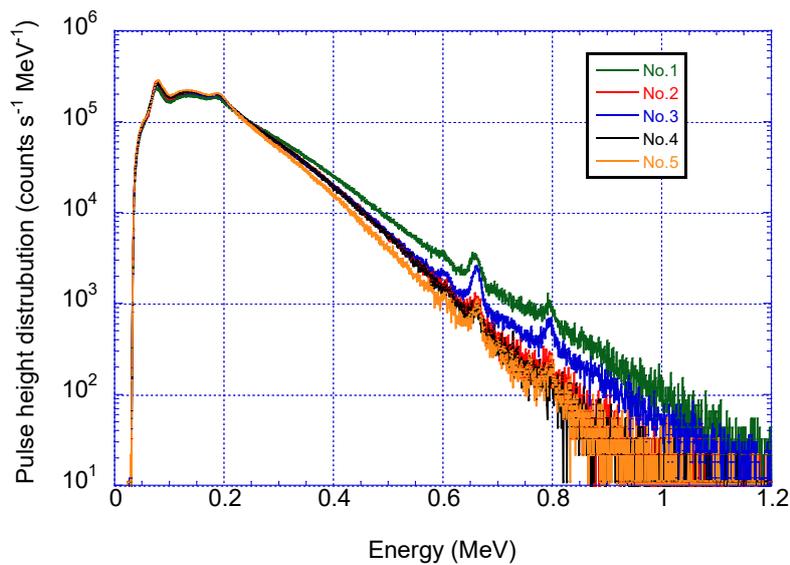


Figure 3 Schematic drawing of the collimator system

Figure 4 Measurement points above the shield plug



(a) Above the shield plugs (1)

Figure 5 Measured pulse height distributions above the shield plug

Table 1 Estimated Cs-137 concentration at the gap under 60 cm of the shield plug

Point	Peak count rates (cps)	Concentration (Bq/cm ²)
No. 1	32.8 ± 13.4	5.7E+10
No. 2	7.19 ± 8.13	1.2E+10
No. 3	23.4 ± 10.7	4.0E+10
No.4	4.72 ± 7.46	8.1E+09
No. 5	8.67 ± 7.46	1.5E+10
Average concentration		2.7E+10

2号機では、オペフロの床、壁及び天井が健全なので、それぞれにCs-137等の汚染が存在している。第2表に示すように、床の汚染密度は、スミア測定、ピンホール型ガンマカメラによる測定、2台の70マイクロメートル線量当量測定用の線量計を用いた表面β線による測定で、ファクター2程度の分布はあるが、シールドプラグ上の床面と他の床面でほぼ同様の汚染密度である。それぞれの測定方法にはそれぞれ異なった不確かさが存在するが、汚染密度そのものも概略似たような値となっている。このことを踏まえ、ファンネル部等の汚染がたまりやすい個所を除いたシールドプラグ以外の場所での空間線量当量率あるいは表面γ線線量当量率が、シールドプラグ表面での表面汚染によるそれぞれの線量当量率としてシールドプラグ上の空間での測定値から除くことにより、シールドプラグ上段と中段の隙間に蓄積しているCs-137等による寄与を推定することができる。

Table 2 Comparison of surface contamination density measured at the operation floor of the Unit-2

測定点		NRF54	スミア	ガンマカメラ	
		(NRA2021.0414測定)	(東電2019.5.20報告)	(NRA2020.1.30測定)	
Cs-137汚染密度					
Bq/cm ²					
No. 1	西側床	3.3E+04	3.3E+05 位置(8)	-	
No. 3		1.2E+04		-	
No. 4		3.7E+04		-	
No. 6		6.2E+04	6.5E+05 位置(1)	7.00E+04	
No. 7	シールドプラグ	8.3E+04	6.7E+05 位置(11)	1.70E+05	
No. 8		1.2E+04	6.4E+05 位置(12)	8.00E+04	
No. 9			9.7E+05 位置(12)	1.70E+05	
No. 10			5.1E+05 位置(15)	1.00E+05	
No. 11			1.6E+05	8.2E+05 位置(13)	1.70E+05
No. 12			1.0E+05	1.0E+06 位置(16)	-
No. 13		東側床		2.0E+05 位置(17)	1.70E+04
No. 14	3.6E+04		2.9E+06 位置(18)	1.70E+05	
			()は引用資料内位置番号	東西に長いピクセル内平均の測定値	
				[-]は視野外	

(1) オペフロ床から1.5 mでの周辺線量当量率からの推定

オペフロ床面から150 cmでの周辺線量当量率は、床面、天井及び側壁の汚染による寄与の合計である。第5図の測定結果では、ファンネル部、隙間及びシールドプラグに近傍以外の場所は場所により17から40 mSv/hとなっている。以下では、シールドプラグ上部の線量当量率中30 mSv/hが周辺(床面、天井及び側壁)に寄与とする。シールドプラグ上部の測定結果は、79-148 mSv/hである。平均の114 mSv/hをシールドプラグ上部での線量当量率とすると、シールドプラグ上段と中段の隙間に沈着していると思われるCs-137, Cs-134及びSb-125による線量当量率は84 mSv/hとなる。半径6 mの一樣な密度の面線源が60 cmのコンクリート下部にある場合に、線源の中心軸上で表面から150 cm位置での線量当量率を、電磁カスケードモンテカルロ計算コードegs5⁴⁾に「面等方線源と単位球検出器形状を点等方線源と面検出器に変換する手法⁵⁾」を適用し、Cs-134, Cs-137及びSb-125の汚染密度が1 Bq/cm²の場合の周辺線量当量率を計算した。床面のスミア測定で得られているCs-134とSb-125の汚染密度は、Cs-137の汚染密度の10%であることから、Cs-137 1 Bq/cm²当たりのシールドプラグ中心での150 cm高さでの周辺線量当量率は、1.26E-06 μSv/hとなり、シールドプラグ隙間の汚染密度は、6.6E+10 Bq/cm²(隙間全体では約70 PBq)と推定される。

(2) 表面γ線線量当量率からの推定

第6図に示す表面γ線線量当量率は、鉛遮蔽により測定対象がコリメータの開口領域に限定されることから、床面のみを対象とした評価が可能であると考えられる。シールドプラグ以外の場所の測定結果は、0.1~数 mSv/hとばらつきがあるものの、1 mSv/h程度であることから、シールドプラグ上の空間でも床面の汚染による寄与が同じ1 mSv/hであるとする。シールドプラグ上では、プラグ継ぎ目以外の場所では、7.1~12 mSv/hであるので、シールドプラグの上段と中段の隙間の汚染による寄与は6.1~11 mSv/hとなる。「面等方線源と単位球検出器形状を点等方線源と面検出器に変換する手法」を拡張して、コリメータに対応して平面検出器への入射角度の制限をつけることにより、コリメータ内面での散乱の寄与を無視した条件で、61 cm(最近の情報)のコンクリート下部の面線源からの表面γ線線量当量率を計算した。(1)と同様に、Cs-134とSb-125は、Cs-137の10%であるとした場合、Cs-137の汚染密度が1 Bq/cm²の時の表面γ線線量当量率は0.352E-

06 μSv/h となる。この結果と、上段と中段の隙間の汚染による寄与が 6.1~11 mSv/h ということから、汚染密度は 2.0E+10~3.3E+10 Bq/cm² で、半径 6 m の領域全体では、23~39 PBq と推定される。

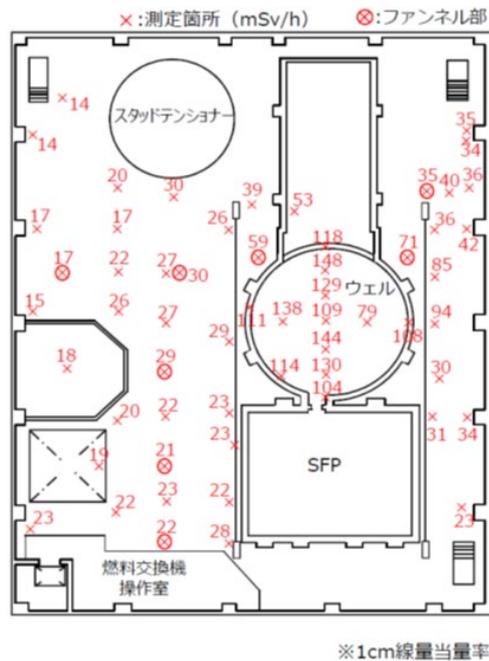


Figure 5. Ambient dose equivalent rate at 1.5 m from the surface of the operation floor

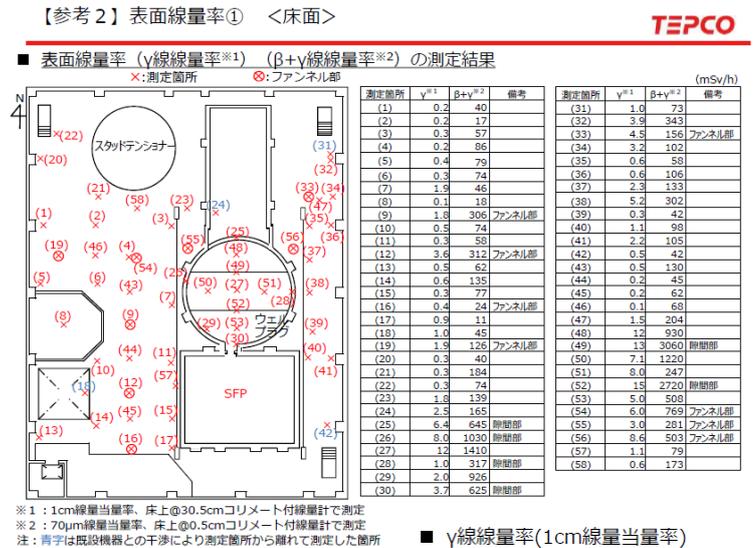


Figure 6 Surface γ-ray dose of the operation floor measured with collimator

3. まとめ

放射線工学分野における活動の例として、放射線遮蔽と放射線測定器の知見を用いて行った「シールドプラグ隙間の Cs-137 沈着放射能の推定」を紹介した。1F では、今後とも原子炉建屋内を含め様々な箇所と同様の「放射能」の推定が必要である。対象となる場所は、状況が不明な箇所が多く、得られる情報(可能な測定法)も限られている。具体的な対応策については様々な制約があると思われるが、放射線工学分野の研究者が、その経験を生かして、貢献することが望まれる。

References

- H. Hirayama, K. Kondo, S. Suzuki, Y. Tanimura, K. Iwanaga, H. Nagata, "Investigation of Main Radiation Source above Shield Plug of Unit 3 at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station", Presented at 13th International Conference on Radiation Shielding & 19th Topical Meeting of the Radiation Protection and Shhielding Division, 03-06 Oct 2016, Paris, France.
- 東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会, "東京電力福島第一原子力発電所 事故の調査・分析に係る中間取りまとめ~2019年9月から2021年3月までの検討~". 2021年3月5日
- 東京電力ホールディングス株式会社, "2号機原子炉建屋オペフロの放射線等調査結果について~残置物移動・片付後~", 経済産業省 廃炉・汚染水対策チーム会合/医務局会議(第63回)資料3-2-4, 2019年5月20日。
- H. Hirayama, Y. Namito, A. F. Bielajew, S. J. Wilderman, W.R. Nelson, "The EGS5 Code System", SLAC-R-730 (2005) and KEK Report 2005-8 (2005).
- Y. Namito, H. Nakamura, A. Toyoda, K. Iijima, H. Iwase, S. Ban and H. Hirayama, "Transformation of a system consisting of plane isotropic source and unit sphere detector into a system consisting of point isotropic source and plane detector in Monte Carlo calculation", J. Nucl. Sci. Technol, 49, 167-172 (2012)
- 波戸 芳仁、平山 英夫, "線源と検出器の形状変換の拡張", 1D01, 日本原子力学会 2021年春の年会, 2021年3月17-19日