

2号機シールドプラグ上段と中 段の隙間に沈着している Cs-137放射能の推定

2021年7月8日

1F事故対策室

平山英夫 近藤健次郎 鈴木征四郎 林克己
吉田善行 岩永宏平

これまでの測定で 明らかになっていること

- 東京電力ホールディングン株式会社（以下、「東電」という。）が実施した測定結果で、シールドプラグ上部の線量当量率が他の床面より1桁程度高い（3ページ掲載東電資料より）
 - オペフロ空間での周辺線量当量率
 - コリメータ付 γ 線線量計による床面の表面 γ 線線量率
- 一方、オペフロ床表面の汚染密度は、シールドプラグ上部と他の床面で大きな違いは無い
 - 東電によるスミア測定結果：ロボットで採取した濾紙を、Ge検出器で測定し、Cs-137の汚染密度を評価
 - 東電の協力を得て行った規制庁による β 線個人線量計(NRF54)による測定結果：表面 β 線線量当量率（ β 線による70マイクロメートル線量当量率）から汚染密度を評価

【参考1】 **空間線量率①**

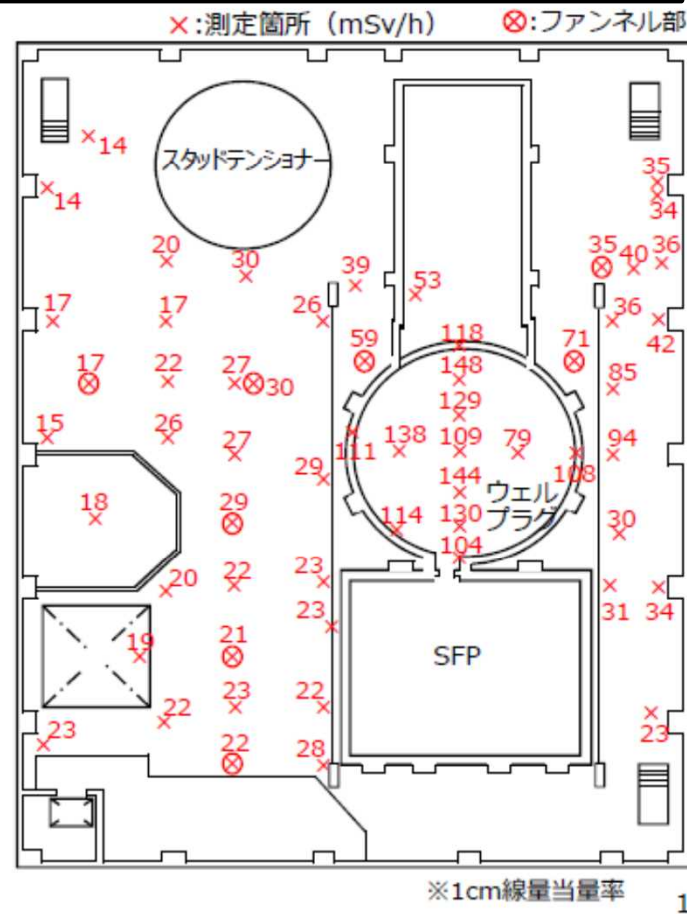
■ **空間線量率 (γ線線量率※) の測定結果**

- 測定高さ：床面から1.5m高さ
- 線量分布：右図参照
- 主要線源：

ウェルプラグ上の線量率が高く、離れるにしたがって線量が低くなる傾向があるため、主な線源はウェルプラグと推定。

2012年度の調査では、ウェルプラグ上で880 mSv/hを確認しており、当時より空間線量率が大幅に低下している状況。線量率が低下している要因としては自然減衰のほか、建屋に流入した雨水の影響、残置物の移動・片付実施による影響も要因の一つとして推測される。

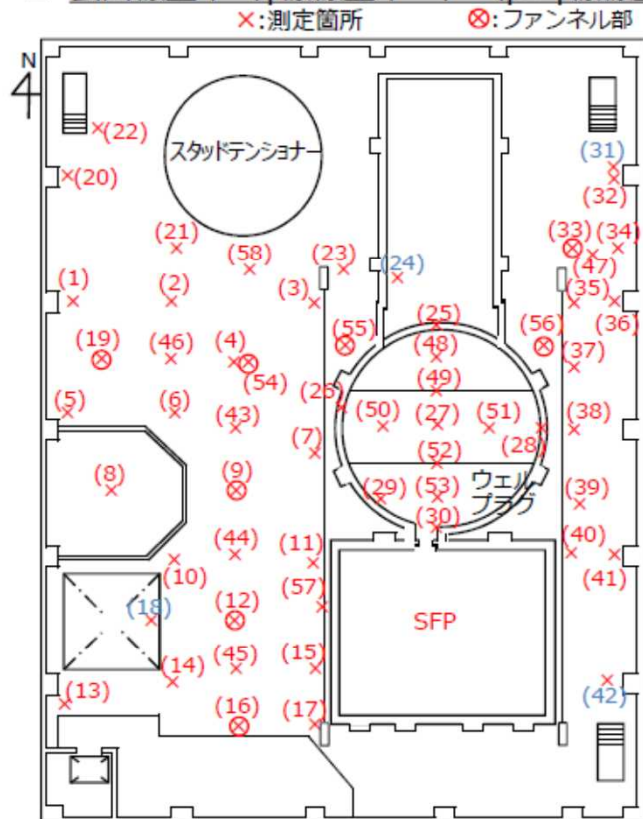
シールドプラグ床面とそれ以外の床における線量率



2号機原子炉建屋オペフロ内残置物移動・片付け後調査の結果について
 東京電力ホールディング株式会社 (2019年2月28日)

【参考2】表面線量率① <床面>

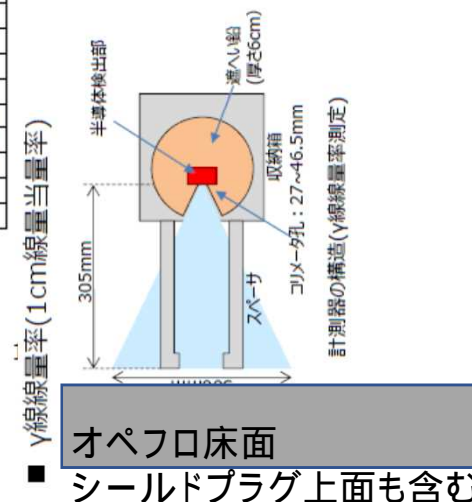
■ 表面線量率 (γ線線量率※1) (β+γ線線量率※2) の測定結果



| 測定箇所 | γ ^{※1} | β+γ ^{※2} | 備考 |
|------|-----------------|-------------------|--------|
| (1) | 0.2 | 40 | |
| (2) | 0.2 | 17 | |
| (3) | 0.3 | 57 | |
| (4) | 0.2 | 86 | |
| (5) | 0.4 | 79 | |
| (6) | 0.3 | 74 | |
| (7) | 1.9 | 46 | |
| (8) | 0.1 | 18 | |
| (9) | 1.8 | 306 | ファンネル部 |
| (10) | 0.5 | 74 | |
| (11) | 0.3 | 58 | |
| (12) | 3.6 | 312 | ファンネル部 |
| (13) | 0.5 | 62 | |
| (14) | 0.6 | 135 | |
| (15) | 0.3 | 77 | |
| (16) | 0.4 | 24 | ファンネル部 |
| (17) | 0.9 | 11 | |
| (18) | 1.0 | 45 | |
| (19) | 1.9 | 126 | ファンネル部 |
| (20) | 0.3 | 40 | |
| (21) | 0.3 | 184 | |
| (22) | 0.3 | 74 | |
| (23) | 1.8 | 139 | |
| (24) | 2.5 | 165 | |
| (25) | 6.4 | 645 | 隙間部 |
| (26) | 8.0 | 1030 | 隙間部 |
| (27) | 12 | 1410 | |
| (28) | 1.0 | 317 | 隙間部 |
| (29) | 2.0 | 926 | |
| (30) | 3.7 | 625 | 隙間部 |

| 測定箇所 | γ ^{※1} | β+γ ^{※2} | 備考 |
|------|-----------------|-------------------|--------|
| (31) | 1.0 | 73 | |
| (32) | 3.9 | 343 | |
| (33) | 4.5 | 156 | ファンネル部 |
| (34) | 3.2 | 102 | |
| (35) | 0.6 | 58 | |
| (36) | 0.6 | 106 | |
| (37) | 2.3 | 133 | |
| (38) | 5.2 | 302 | |
| (39) | 0.3 | 42 | |
| (40) | 1.1 | 98 | |
| (41) | 2.2 | 105 | |
| (42) | 0.5 | 42 | |
| (43) | 0.5 | 130 | |
| (44) | 0.2 | 45 | |
| (45) | 0.2 | 62 | |
| (46) | 0.1 | 68 | |
| (47) | 1.5 | 204 | |
| (48) | 12 | 930 | |
| (49) | 13 | 3060 | 隙間部 |
| (50) | 7.1 | 1220 | |
| (51) | 8.0 | 247 | |
| (52) | 15 | 2720 | 隙間部 |
| (53) | 5.0 | 508 | |
| (54) | 6.0 | 769 | ファンネル部 |
| (55) | 3.0 | 281 | ファンネル部 |
| (56) | 8.6 | 503 | ファンネル部 |
| (57) | 1.1 | 79 | |
| (58) | 0.6 | 173 | |

※1: 1cm線量当量率、床上@30.5cmコリメート付線量計で測定
 ※2: 70μm線量当量率、床上@0.5cmコリメート付線量計で測定
 注: 青字は既設機器との干渉により測定箇所から離れて測定した箇所



2号機原子炉建屋オペフロ内残置物移動・片付け後調査の結果について
 東京電力ホールディング株式会社 (2019年2月28日)

NRF54による表面汚染密度の測定



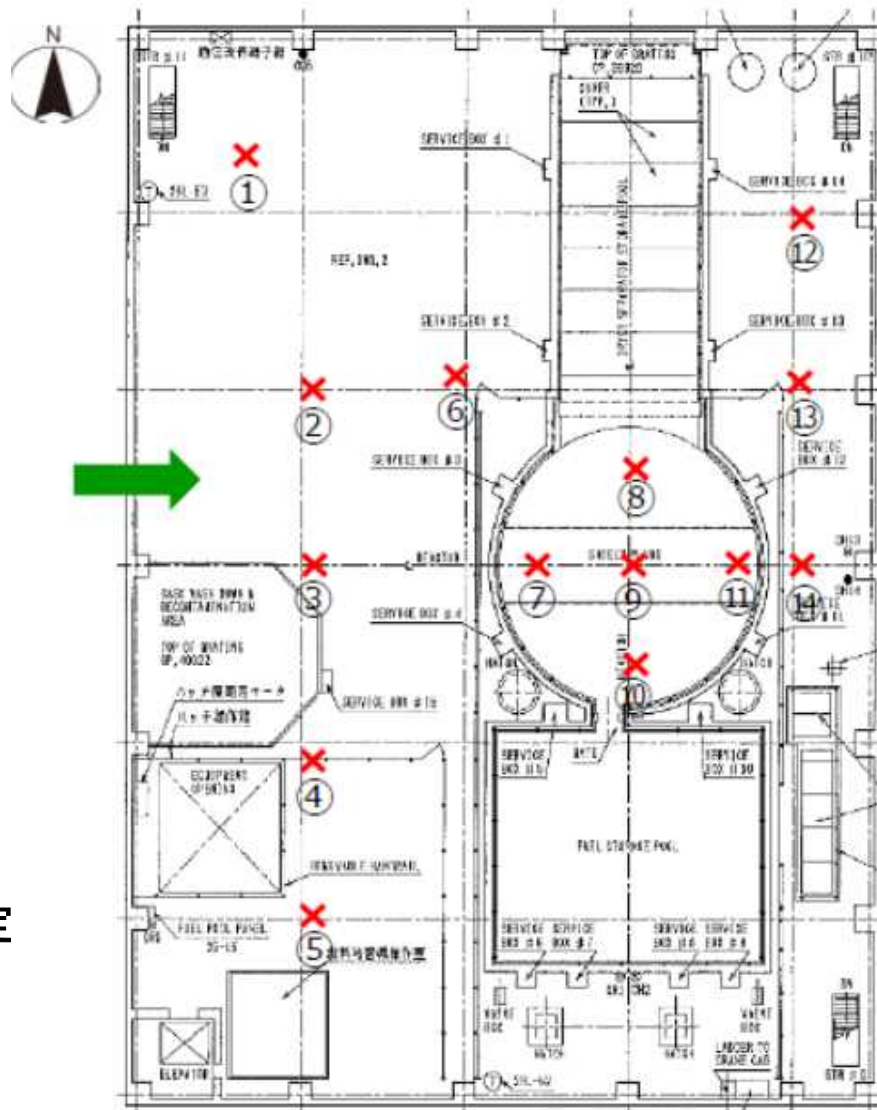
70マイクロメートル線量当量率用個人線量計 NRF54

カバー無しの測定: $\beta+\gamma$

2mmのプラスチックカバー付測定: γ

両者の差: β 線による表面線量当量率

原子力規制庁が東京電力の協力を得て測定
(2021.4.14)



 : ロボットアクセス位置
  : 測定点

オペフロ床表面汚染密度の測定結果の比較

| | | NRF54 | スミア |
|--------|---------|--------------------|-----------------|
| | | (NRA2021.0414測定) | (東電2019.5.20報告) |
| 測定点 | | 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) |
| No. 7 | シールドプラグ | 8.3E+04 | 6.7E+05 位置 (11) |
| No. 8 | | 1.2E+04 | 6.4E+05 位置 (12) |
| No. 9 | | | 9.7E+05 位置 (12) |
| No. 10 | | | 5.1E+05 位置 (15) |
| No. 11 | 東側床 | 1.6E+05 | 8.2E+05 位置 (13) |
| No. 12 | | 1.0E+05 | 1.0E+06 位置 (16) |
| No. 13 | | | 2.0E+05 位置 (17) |
| No. 14 | | 3.6E+04 | 2.9E+06 位置 (18) |
| | | ()は引用資料内位置番号 | |

NRF54:表面β線線量当量率から評価

スミア：ろ紙をGe検出器で測定で、遊離性の汚染(拭き取り効率は、一律0.1)

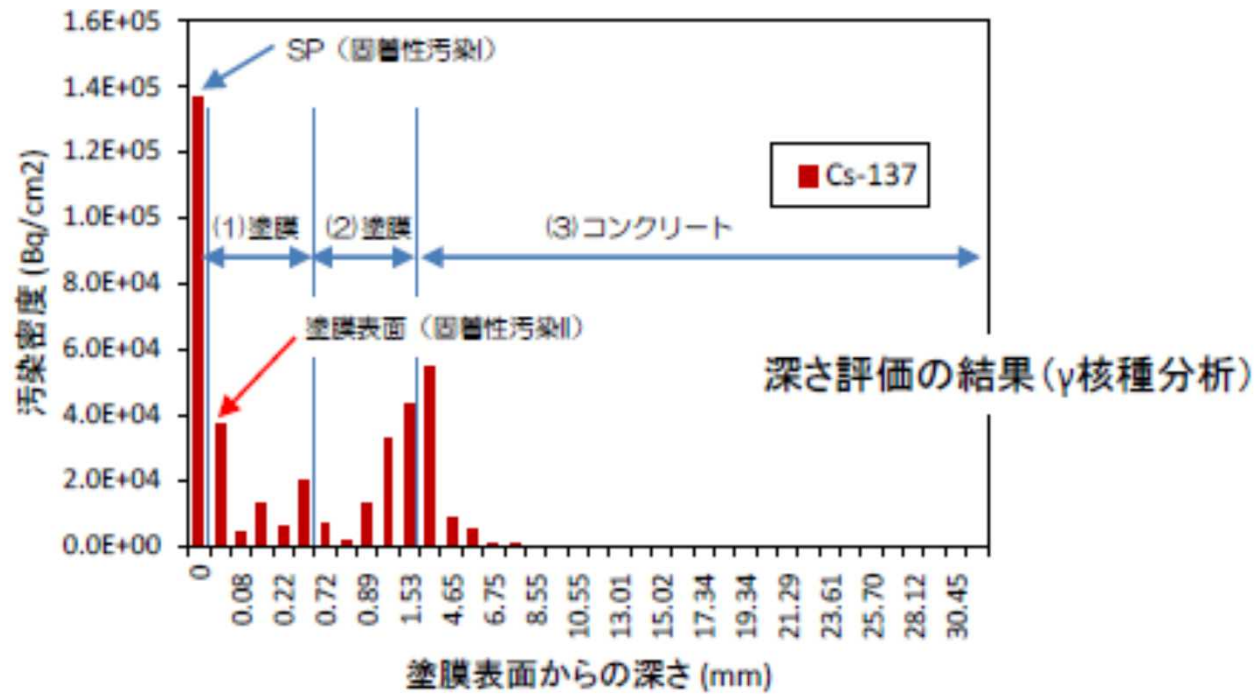
これまでに行なった推定

- 3号機の場合と異なり、シールドプラグ以外の床面の情報を使うことができる
 - 床表面の汚染による線量当量率は、シールドプラグ上とほぼ同じ
- シールドプラグ上での測定結果から、他の場所での測定結果を引いた線量当量率は、「シールドプラグ上段と中段の隙間 (61 cm のコンクリート下部) で上段の下面と中段の上面に沈着しているCs-137等による線量当量率とする
- オペフロでの周辺線量当量率からの推定
 - $5.1\text{E}+10 \sim 7.8\text{E}+10 \text{ Bq/cm}^2$ (58 ~ 88 PBq)
- コリメータ付 γ 線表面線量計の測定結果からの推定
 - $3.2\text{E}+10 \sim 4.0\text{E}+10 \text{ Bq/cm}^2$ (36 ~ 45 PBq)

3号機での測定結果から

- 3号機のシールドプラグ表面の汚染については、当時の除染作業において、シールドプラグ上部の主要な線源がシールドプラグ等の床表面の汚染であると想定して、表面5 mm程度をハツリ等により除去することでCs-137、Cs-134を除去した。この点については、その後の2号機のシールドプラグ表面汚染に対するIRIDが行った表面の汚染調査において、抜いたコアの観察から汚染は表面から5 mmより深いところには到達していないことからも確認されており、表面の除染は十分に行われた
- しかし、シールドプラグ上の線量率だけは大きく低減しなかった。
- シールドプラグ上部の線量当量率が下がらなかったことから、「3層のシールドプラグの上部と中間部の隙間に大量のCs-137、Cs-134が沈着しており、主要な線源となっている可能性が高い」と考えた
 - 60 cm程度のコンクリートを透過することから、Cs-137から放出される0.662 MeV 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と推測した除染されていない領域からの寄与を除く厚い鉛遮蔽内部で、波高分布を測定することにより確認できる
 - 波高分布の全エネルギー吸収ピーク計数率からCs-137の放射能を推定できる可能性がある

シールドプラグ上部のCs-137汚染は表面から 5 mm まで

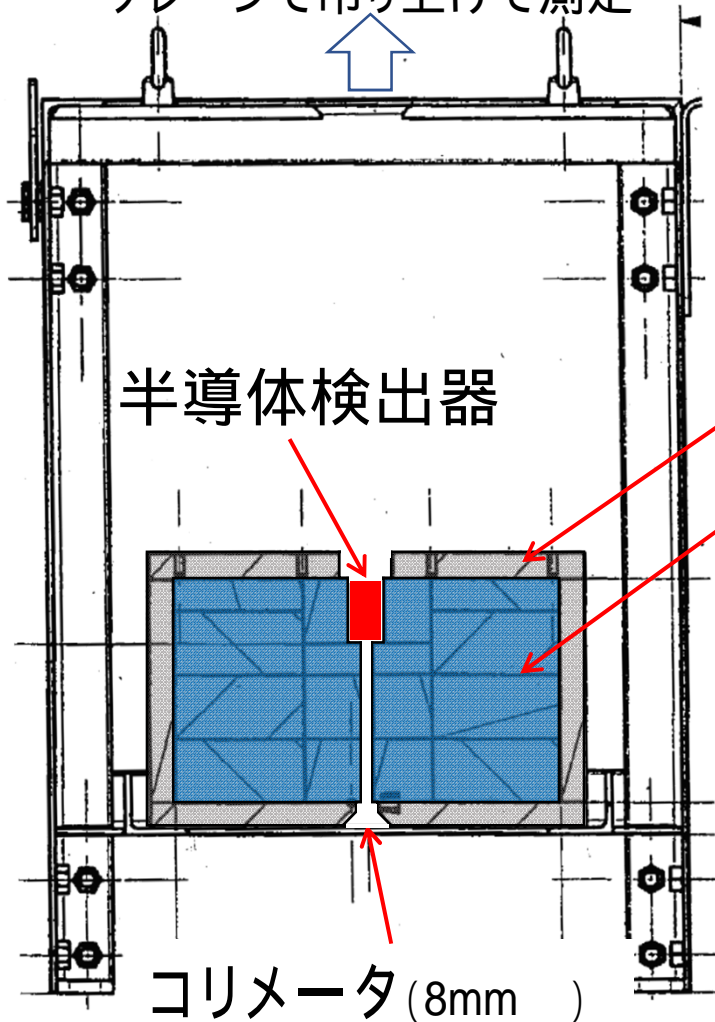


エポキシ塗膜には、採取時のものを除いて顕著な損傷はみられなかった。塗膜が剥離した部分に汚染がみられたが、コンクリート内部への有意な汚染の浸透はみられなかった。（塗膜の部分的な剥離は、コアサンプル採取時に生じたものと推定）。塗膜表面には固着性汚染が付着（固着性汚染II）。

原子炉建屋内汚染サンプルの分析、平成27年3月11日
 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構

高エネルギー加速器研究機構製作
のコリメータ

クレーンで吊り上げて測定



鉄(2cm厚)

鉛
(30cm × 30cm
× 17.5cm高)

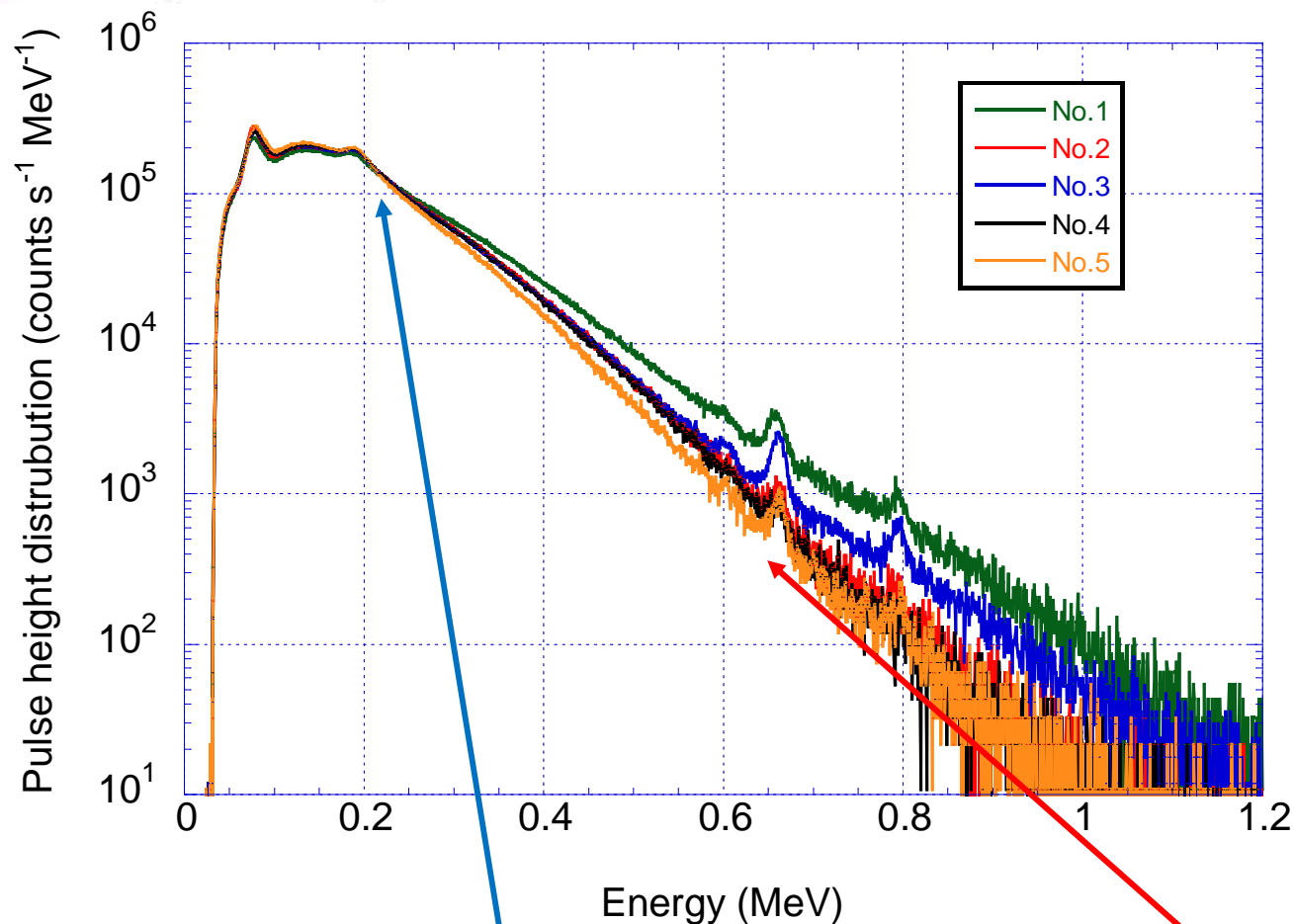
大型クレーンにより測定点に
移動し、オペフロ上の様々な
場所で測定

東京電力、東芝及び鹿島JVの関
係者の協力で、2015年11月19日
に実施

下方からきた 線のみ
のスペクトルを測定可能

重量: 約300kg



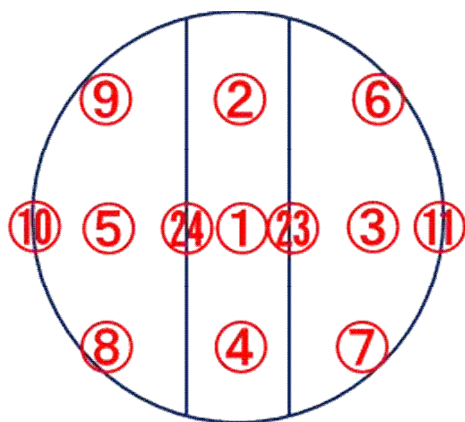


場所により、直接線に
 対応したピークの高さ
 が変わっているのは、
 シールドプラグ隙間の
 汚染密度にばらつき
 があるためと思われる

(a) Above the shield plugs (1)

Cs-137から放出されコンクリート中で散乱されなかった(直接線)に
 対応した全エネルギー吸収ピークは、
 エネルギーの低い散乱線に対応した領域に比べて遙かに少なく
 予想通りの結果であることを確認

直接線に対応した「全エネルギー吸収ピークの検出効率」を用いて、上部と中間部の隙間のCs-137放射能を推定



| 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 |

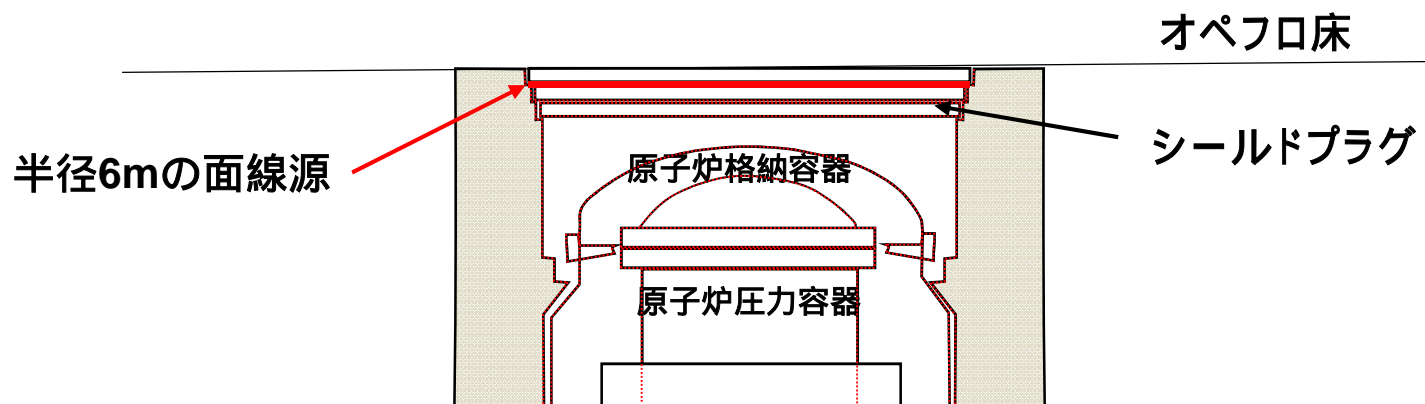
3つに分割されたコンクリートの隙間や端の部分を除いた からの 5箇所の平均は、 2.7×10^{10} Bq/cm²
 半径6 mの隙間全体での Cs-137 は、30 PBq (9.2 ~ 64 PBq)

2号機と3号機の比較

- 2号機では、3号機のように水素爆発は起きなかったが、原子炉格納容器からシールドプラグの隙間を経由して放射性核種を含む高圧・高温の蒸気がオペフロに出たという状況は同じであると推定される。
- オペフロ上部の建屋が水素爆発により破損した3号機では、水素爆発後はシールドプラグは雨ざらしの状況に加え、表面を掘削し除染を行っている。
- 2号機ではオペフロ上部の屋根や壁が健全であったので、シールドプラグが雨ざらしとなることもなく、掘削するような除染は行っていない。
- よって、2号機ではシールドプラグ上部を含め床面に汚染が残っているため、仮に3号機と同じ様な測定が出来たとしても、床面とシールドプラグ下部からの寄与を分けることができない
- シールドプラグ上部と中間部の隙間のCs-137放射能を知るためには、シールドプラグ表面の汚染や、他の床面や壁と天井の汚染の寄与を見積もることが不可欠

シールドプラグ周辺の構造

- シールドプラグは、61cm厚さのコンクリート製の上段、中段、下段の3層構造であり、線源としては、上段と中段の隙間(上段の下面と中段の上面)、中段と下段の隙間(中段の下面と下段の上面)、ウエル内面を含む下段の下部表面が考えられる
 - 上段と中段の隙間から床面の間には61 cm、中段と下段の隙間から床面の間には122 cm、下段表面から床面の間には183 cmのコンクリートが存在する
 - 61 cmのコンクリートは、Cs-137の0.663 MeV 線による線量当量率を3桁近く減衰させる遮蔽能力を持っている
 - 今回の東電のウエル調査により、下段の下部表面近くでの線量当量率が、オペフロ上部と同等以下であることが確認されたので、中段と下段と隙間の線源がオペフロ上部へ寄与することは無い
 - 「上段と中段の隙間と床面の間」と「中段と下段の隙間と下段下部の間」には同じ厚さのコンクリートが存在している

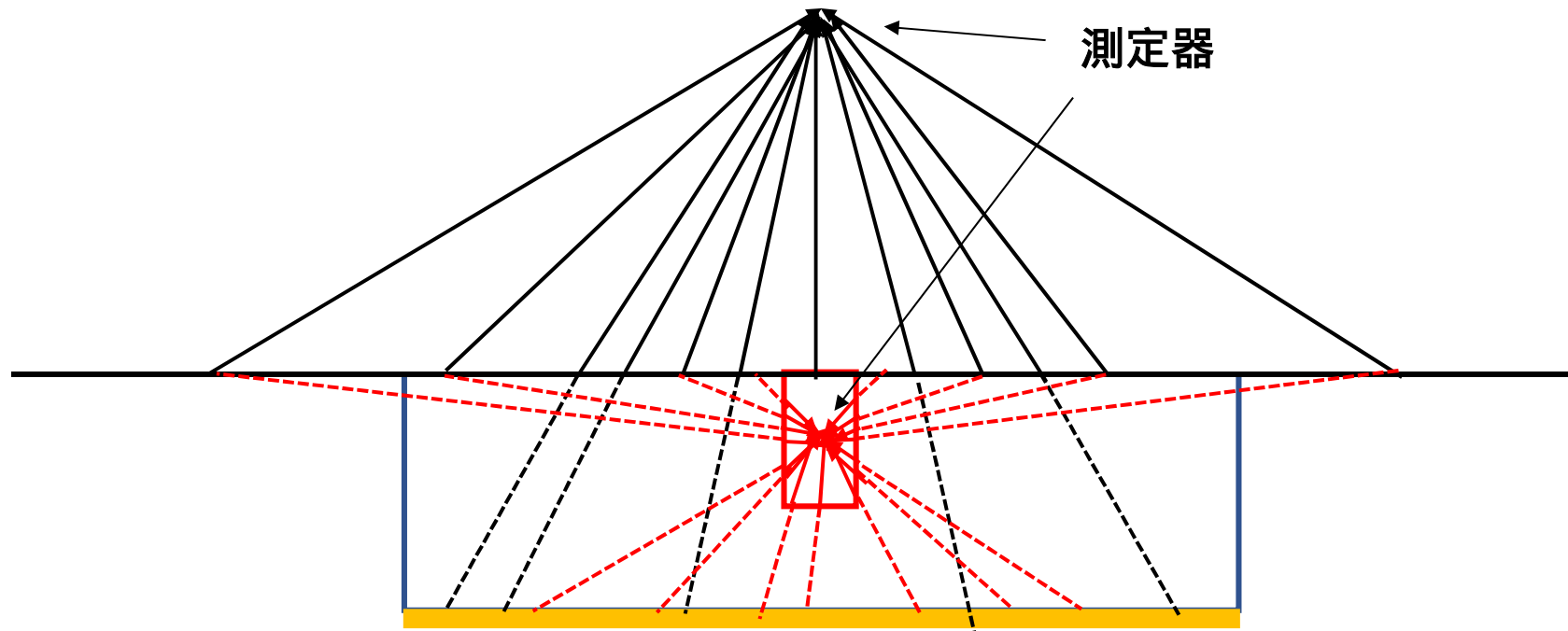


2号機においてこれまで行った推定と課題

- 床表面の汚染による寄与を考慮しなければならない
 - 3号機のように、Cs-137が付着しているコンクリート表面を5 mm削除して、除染する工程は、考えられていない
- 推定に使用されるシールドプラグ以外の場所での測定結果は場所により変動しており、その扱いが推定結果の不確かさに直接影響する

床表面の汚染による寄与を除く方法

- シールドプラグにドリリングにより細い穴を開け、その内部で周辺線量当量率を測定する手法
- オペフロ床面の汚染の寄与
 - 床面上部での測定では、表面汚染がある広い領域が線量当量率に寄与する
 - ドリリングで空けた穴の中では、周囲のコンクリートが遮蔽となり、床面上部での測定より床汚染による線量当量率の寄与が減少する
 - シールドプラグ床面の汚染は、シールドプラグの表面近くに限定されており、内部まで到達していないことはIRIDの測定で確認されている
- シールドプラグの上段と中段の隙間の汚染による寄与
 - 床面での測定では、最小でも61 cmのコンクリート遮蔽がある状況
 - ドリリングで空けた穴の中では、測定点がシールドプラグ内となるので、線源からの距離と遮蔽の役割をしている線源から評価点までのコンクリートの厚さが減少し、その分線量当量率が増加する
- 穴の内部の測定では、両者の寄与の違いが増大し、床表面の汚染による寄与が無視できる可能性がある



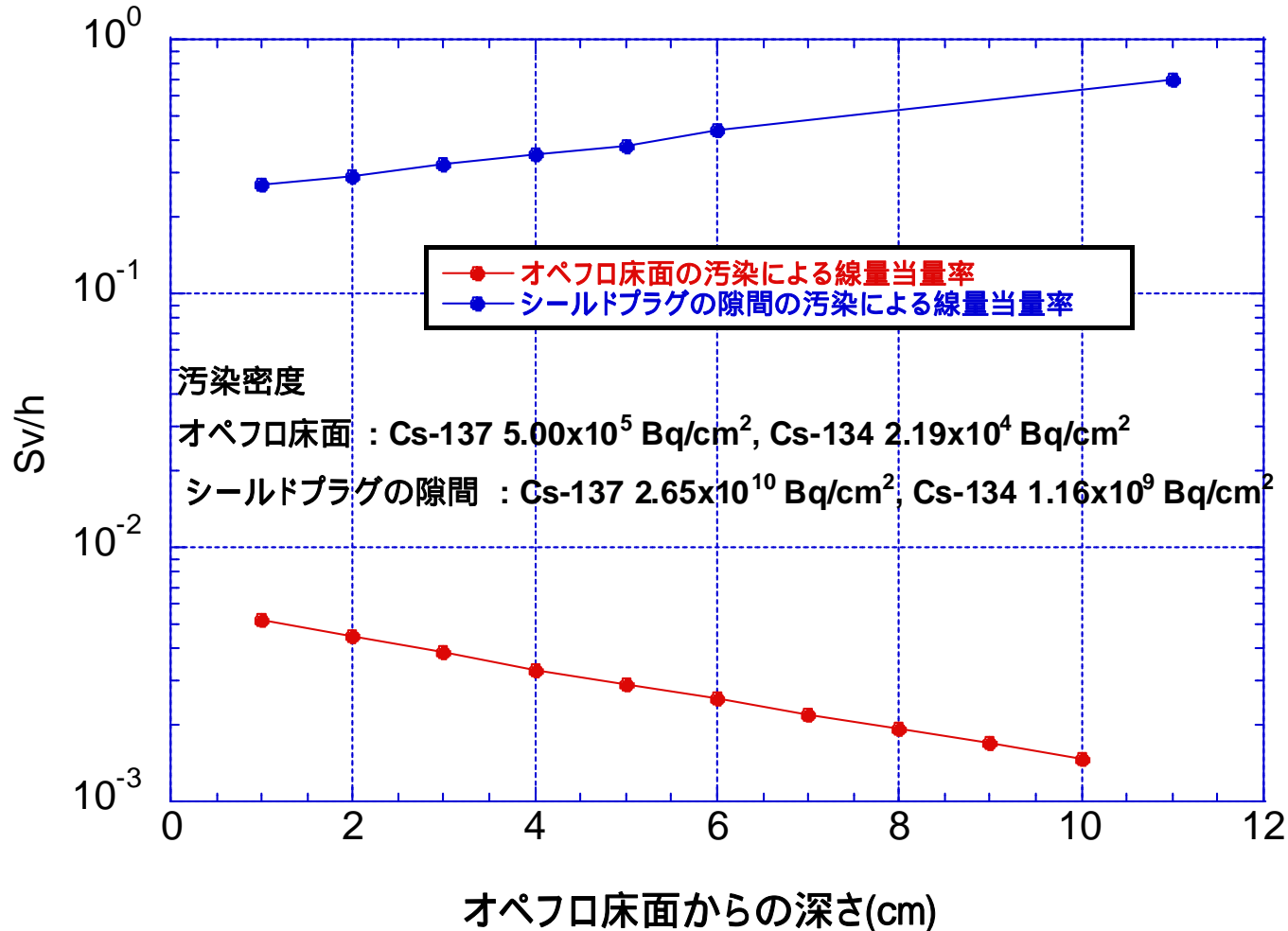
実線：空气中を透過・散乱
点線：コンクリート中を透過・散乱

床面上部：床面の線源から遮蔽無しで寄与
シールドプラグ隙間からは、最低61 cmのコンクリート
穴内部：床面の線源は、穴中心からの距離と共にコンクリートの厚さが増大
シールドプラグ隙間からは、距離と透過・散乱するコンクリートの厚さが減少

egs5を使った計算による検討

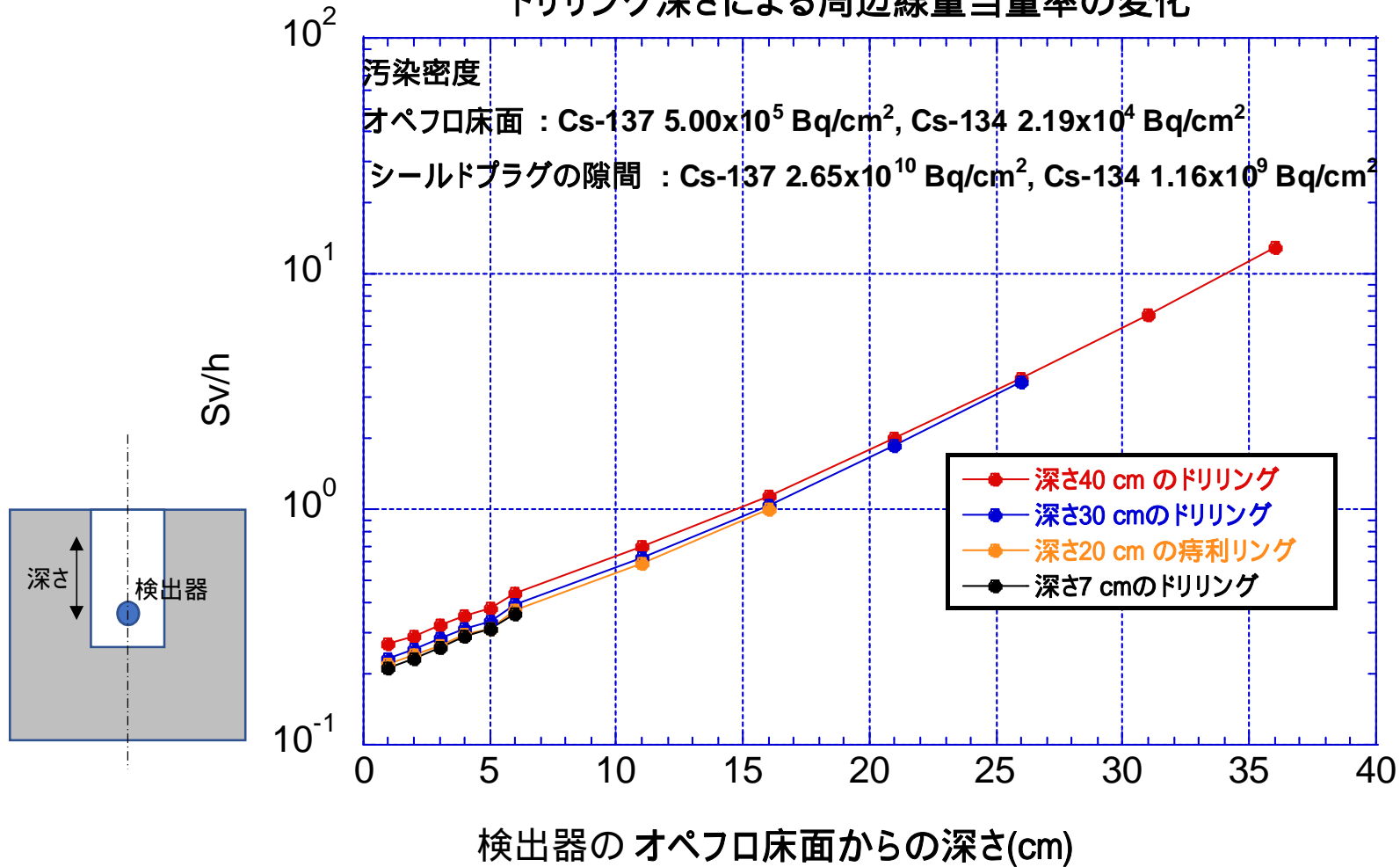
- 上段シールドプラグに開けられる円筒状の穴の直径は 5 cm とする
- 床面及び上段と中段のシールドプラグ隙間共に、汚染は一様な密度であるとして、上段下面と中段上面を合計した 1 Bq/cm^2 当たりの周辺線量当量率を計算する
 - オペフロ床面からの各深さで、直径 5 cm の円盤内での平均線量当量率
 - 計算結果から、穴の中心から半径 1 m 以内の汚染（床表面汚染、シールドプラグ隙間の汚染）が線源として寄与している - > 穴の中心から半径 1 m の領域の状況を反映
- 事故時は、Cs-134とCs-137の放射能は同じであったとして、現在のCs-134放射能は、Cs-137放射能の 4.4 % であるとする
- 床面でのCs-137の汚染密度は平均値より高い $5 \times 10^5 \text{ Bq/cm}^2$ で、シールドプラグ隙間は推測値の最小より低い $2.65 \times 10^{10} \text{ Bq/cm}^2$ (30 PBq) として、両者の寄与を比較する

直径5cmで深さ 20 cm のドリリングを行った場合の
オペフロ床間面からの深さによる線量当量率の変化



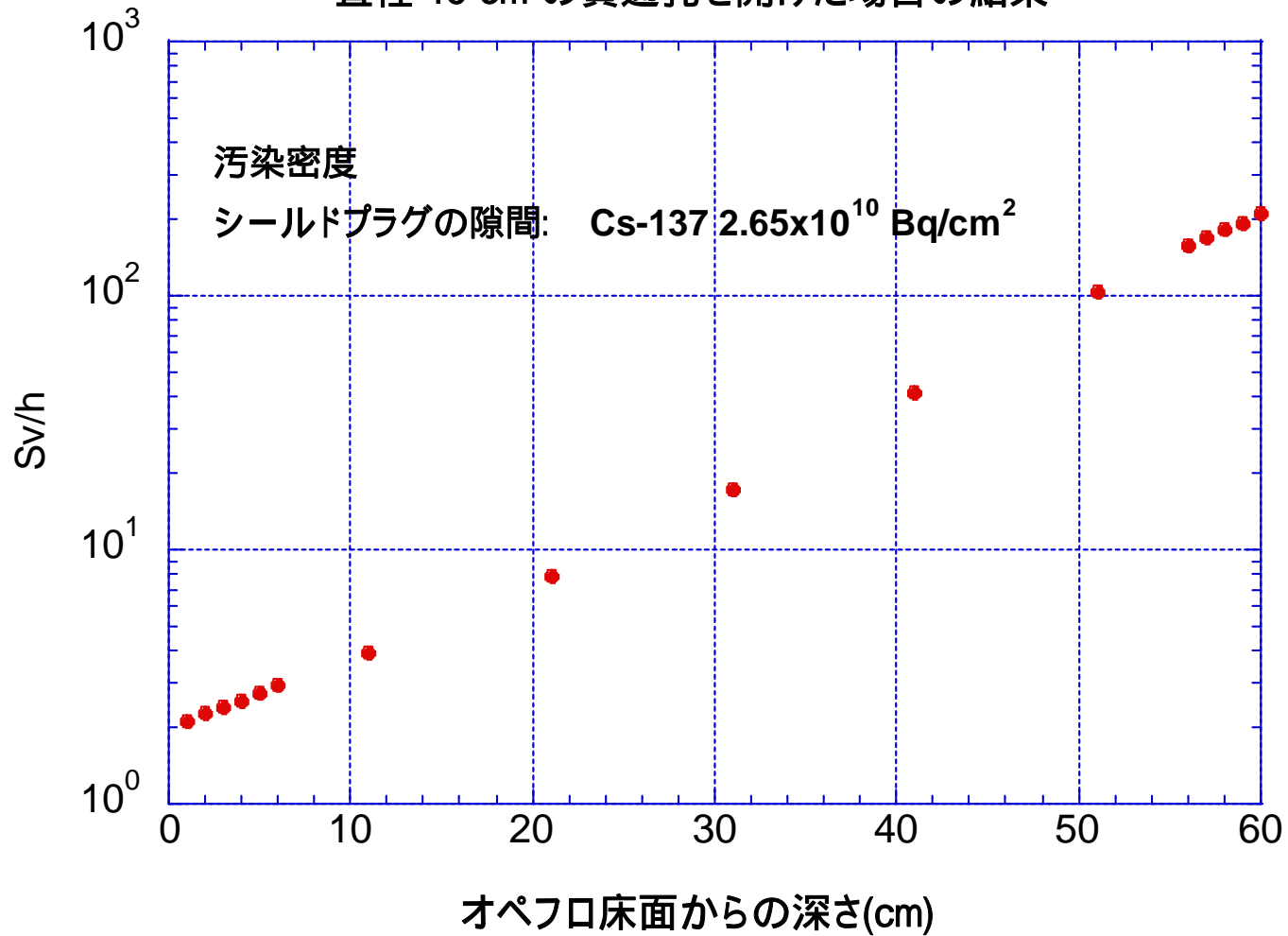
シールドプラグ隙間からの寄与がオペフロ床面からの深さにより増加するのは、深くなると共に、評価点までのコンクリートの厚さが減少するため
床面からの寄与は、オペフロ床面から1 cm の深さでは上段と中段の隙間からの寄与の1.9%、4 cm より深い位置では1%以下で、床面からの深さと共に寄与の割合は減少する

直径5 cmのドリリング
ドリリング深さによる周辺線量当量率の変化



ドリリングの深さが浅くなると除去されるコンクリートが少なくなるので、同じ深さでも線量当量率は低くなるが、深さによる線量当量率の変化傾向はほぼ同じ

シールドプラグ上段(61 cm) に
直径 15 cm の貫通孔を開けた場合の結果



穴の部分では、オペフロ床面でも Cs-137 だけで 2 Sv/h となる

まとめ

- 2号機オペフロでのこれまでの測定結果から
 - シールドプラグ上部の線量当量率が他の場所より1桁程度高い
 - 床面での表面汚染密度は、シールドプラグ上部と他の場所で大きな違いはない
 - 壁や天井の表面汚染による線量当量率は、シールドプラグ上部と他の場所で大きな違いはない
 - 従って、シールドプラグ上部の高線量率は、下部の線源によるものである
- シールドプラグは、上段、中段、下段の3層構造となっている
 - それぞれ61 cm厚さのコンクリート製である
 - 線源となる可能性のある場所は、上段と中間の隙間(上段の下面と中段の上面)、中段と下段の隙間(中段の下面と下段の上面)、ウエル内面を含む下段の下部表面がある
 - 今回の東電のウエル調査で、下段の下部近くでの線量当量率が、オペフロ上部と同等か低いことが確認されたので、中段と下段と隙間の線源がオペフロ上部へ寄与することは無い
 - 中段と下段の隙間からオペフロ上部の間には120 cmのコンクリートが存在する
- 以上のことから、シールドプラグ上部の高線量率は、3号機の場合と同じ様に、3層のシールドプラグの上段と中段の隙間に沈着したCs-137等によるとしか考えられない

まとめ

- シールドプラグ上部の高線量率は、3層のシールドプラグの上段と中段の隙間(上段の下面と中段の上面)に沈着したCs-137等によるとして、これまでにオペフロ空間での周辺線量当量率及びコリメータ付き線量計による表面 γ 線線量当量率の測定結果から、隙間に沈着しているCs-137放射能を推定してきた
 - これまでの推定では、シールドプラグ以外の場所での測定値を、シールドプラグ上部での床面の汚染による線量当量率として使用していた
 - シールドプラグ以外の床面でも、場所による測定値のばらつきがかなりあり、結果の不確かさに直接影響していた
 - 床面の汚染の影響が無い測定が望ましい
- シールドプラグにドリリングで直径5 cmの穴を開け、その中で測定を行なうことにより、床面汚染の寄与を無視した測定ができる可能性が高い
 - 穴の深さは、可能な限り深い方が望ましい
 - 上部のシールドプラグに直径15 cmの貫通孔を空ける工法は、オペフロ床面での線量当量率が2 Sv/h以上となる可能性が高いので、実施しない方が良いと考えられる