

2号機シールドプラグ トップカバー下面の汚染密度について

2022年9月6日

東京電力福島第一原子力発電所事故対策室

目 次

- はじめに
- 1. 床表面から150 cm位置での周辺線量当量率を用いた推定
- 2. コリメータ付き 線線量計による30.5 cm高さ測定結果を用いた推定
- 3. 穴内部の周辺線量当量率分布を用いた推定
 - 3-1 IRID穴と新穿孔穴の測定値
 - 3-2-1 穴内分布への影響(鉄筋)
 - 3-2-2 穴内分布への影響(室内汚染)
 - 3-3-1 穴内分布測定値から汚染密度へ
 - 3-3-2 測定値と再構築された穴内分布の比較
 - 3-3-3 穴内線量率分布から得られた汚染密度
 - 3-4 床上線量率とトップカバー下汚染密度
 - 3-5 穴内測定のとまとめ
- 4. 3種類の測定による推定の比較と検討

はじめに

- 2号機シールドプラグのトップカバー下面のCs-137推定においては以下のことを考慮する必要がある
 - 2号機ではオペレーションフロア(以下、「オペフロ」という。)の建物構造が健全であることから床・天井・壁にCs-137で汚染した線源が存在する
 - 現時点でもオペフロ内部、特にシールドプラグ上部の線量当量率が高く、作業者が立ち入って測定することができない
 - 建物が健全であることから大型の重機による作業や測定はできない
 - 結果として、可能な手段は、小型のロボットで操作可能な手法に限定される
- 入手可能な限られた情報からの推定では、これらの状況を考慮し、異なった手法による結果を相互比較し、総合的に考えることが必要である

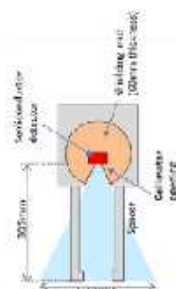
はじめに

- トップカバー下面のCs-137汚染密度の推定に使用できる測定には、以下の3種類のものがある
 - (1) オペフロ床面から150 cm 高さで測定された周辺線量当量率分布
 - (2) コリメータ付 線線量計による床表面の「線量率」分布建物が健全であることから大型の重機による作業や測定はできない
 - (3) トップカバーに穿孔された穴内部の周辺線量当量率分布
- (1)と(2)については、測定そのものは2019年に行なわれたものであり、推定方法についての検討を中心に実施した
- (3)は、この間に行なった主要な測定であり、測定結果の解釈についても検討が必要なことが多かった
 - 以下では、測定結果の検討、計算結果との比較及びトップカバー下面の汚染密度の推定方法を検討した
- 最後に、上記3種類の結果の比較検討を行なった

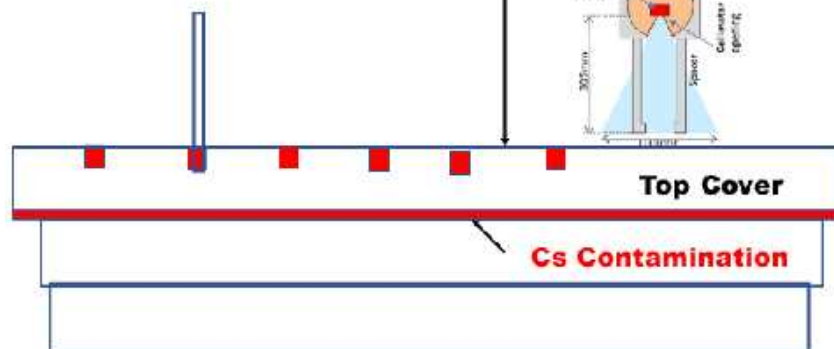
(1) 床表面から150 cm での
周辺線量当量率分布



(2) 床表面から30.5 cm での
コリメータ付きγ線線量計
による「線量率」分布



(3) トップカバーの穴内部での
周辺線量当量率分布



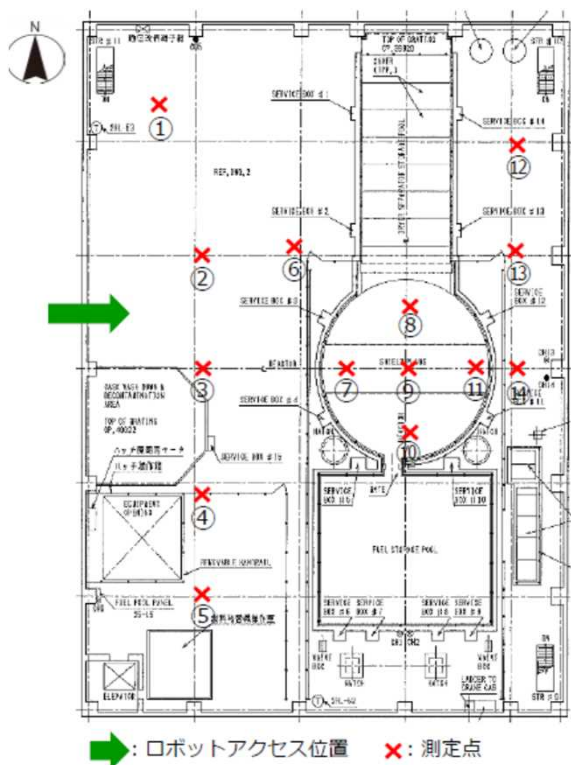
トップカバー下面のCs-137汚染 密度の推定に用いた3種類の測定

(3)の測定に関連して、床面から3 cmでの周辺線量当量率のマッピング、穴内部の測定時の床面から1.5 cm での穴上部及び東西南北の周辺線量当量率の測定が併せて実施された

オペフロ床表面の汚染密度

これまでに、「ガンマカメラによる測定」、「スミア測定」、「線個人線量計(NRF54)を用いた測定」により、「シールドプラグ上部」と「他の床面」で大きな違いがないことを確認している。

オペフロ床表面汚染密度の測定結果の比較

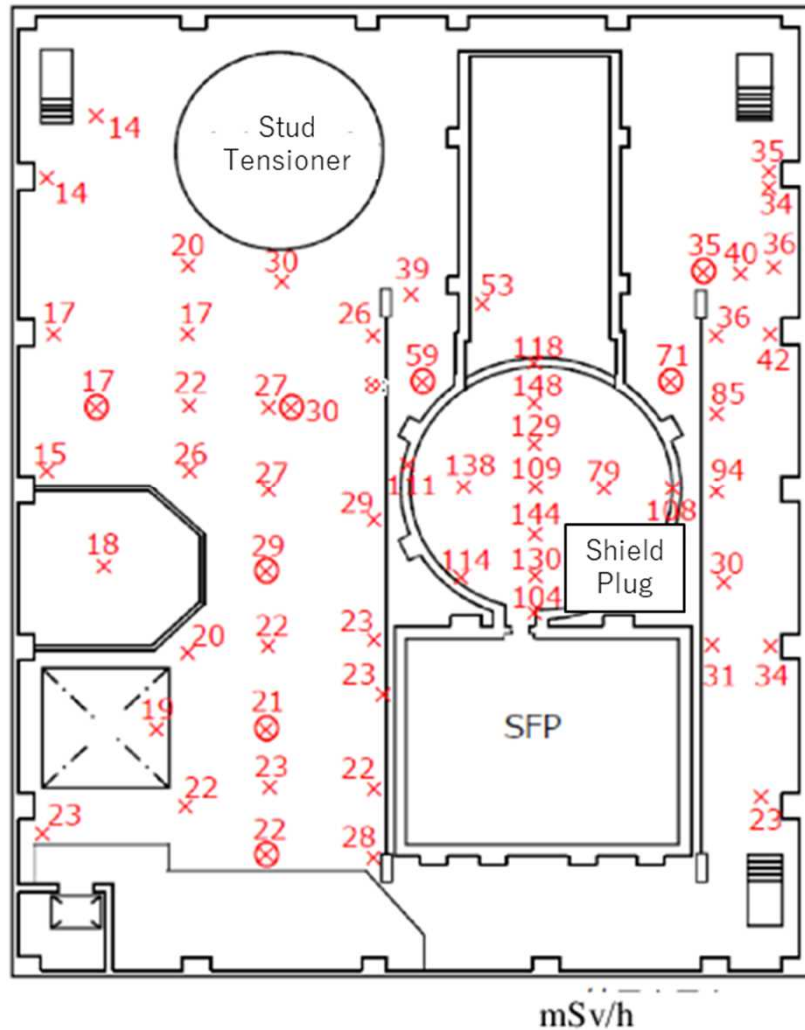


測定点		NRF54 (NRA2021.0414測定)	スミア (東電2019.5.20報告)	ガンマカメラ (NRA2020.1.30測定)	
		Cs-137汚染密度			
		Bq/cm ²			
No. 1	西側床	3.3E+04	3.3E+05 位置(8)	-	
No. 3		1.2E+04		-	
No. 4		3.7E+04		-	
No. 6	シールドプラグ	6.2E+04	6.5E+05 位置(1)	7.00E+04	
No. 7		8.3E+04	6.7E+05 位置(11)	1.70E+05	
No. 8		1.2E+04	6.4E+05 位置(12)	8.00E+04	
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		東側床	1.0E+05	1.0E+06 位置(16)	-
No. 13			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. 床表面から150 cm位置での周辺線量当量率を用いた推定

- 東電が2019年5月に2号機のオペレーションフロアの片付け後に実施された床面から150 cm 位置での周辺線量当量率の測定結果で、シールドプラグ上部が他の領域に比べて明らかに高いという結果が得られていた
- この原因として、3号機と同様にシールドプラグのトップカバー下面に高濃度の汚染があり、その影響でシールドプラグ上部の周辺線量当量率が高くなったとして、測定値から汚染密度の推定を行った
- 測定値には、オペフロ内壁の汚染による周辺線量当量率が含まれているために、測定値からトップカバー下面の汚染密度を推定した
- 過去の推定では、シールドプラグの厚さを60cmとし、「シールドプラグ東側の一部を除いた測定値別にすると20から30 mSv/hなる」として、シールドプラグ上部でのオペフロ内壁の汚染による寄与として30 mSv/hを使用した
- 内壁の汚染密度の検討から、東壁は他の領域より汚染密度が高い可能性があり、東壁に近い領域では線量率が同様に高い可能性があることが判った
 - この状況から「シールドプラグ東側の一部を別にして内壁の寄与を推定する」よりも、「東側の測定結果を基に内壁の寄与を推定する」方が適切と考えた
 - シールドプラグの東側の4箇所の平均 **61 mSv/h** を内壁の寄与とする

× : Measurement point ⊗ : Funnel part



床表面から150 cm位置での周辺線量当量率の測定結果

2019年5月に東電により測定された床表面から150 cm高さでの周辺線量当量率

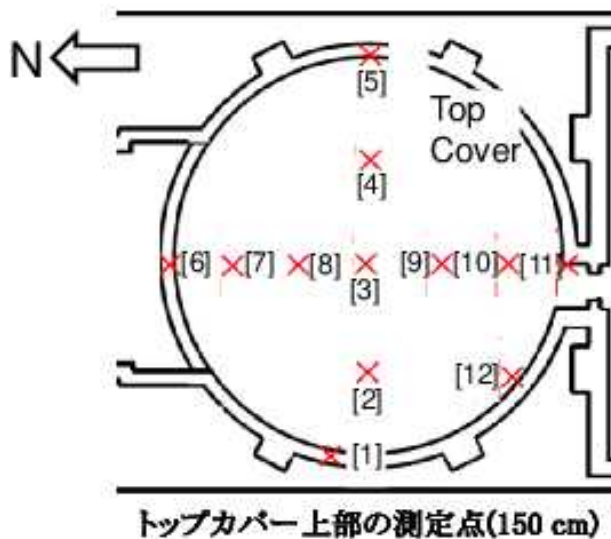
^{134}Cs 及び ^{125}Sb の汚染密度は ^{137}Cs の 10 % であるという結果が報告されている

1. 床表面から150 cm位置での周辺線量当量率を用いた推定

- トップカバー下面の汚染が一様 (1 Bq/cm^2) であるとして、トップカバー下面の半径6 mの面線源による床面から150 cm 位置での ^{137}Cs , ^{134}Cs 又は ^{125}Sb による周辺線量当量率をegs5で計算した
- 計算では、トップカバーは密度 2.1 g/cm^3 で厚さ 61 cmであるとした.
- ^{137}Cs が 1 Bq/cm^2 で ^{134}Cs と ^{125}Sb が 0.1 Bq/cm^2 の場合の周辺線量当量率として、 $1.03\text{E}-6 \text{ } \mu\text{Sv/h}$ が得られた
 - ^{134}Cs と ^{125}Sb の汚染密度が ^{137}Cs の10%というのは、オペフロ床面のスミアろ紙の測定で得られた
- シールドプラグ上部の12箇所での測定結果は、79 mSv/h から 148 mSv/hで、平均は119 mSv/hであった
 - オペフロ内壁の表面汚染による周辺線量当量率を 61 mSv/hとすると、トップカバー下面の汚染による周辺線量当量率は18 mSv/h から 87 mSv/hになる
- 従って、トップカバー下面の ^{137}Cs 汚染密度は、 1.7×10^{10} から $8.4 \times 10^{10} \text{ Bq/cm}^2$ となる
 - 平均の汚染密度は $5.7 \times 10^{10} \text{ Bq/cm}^2$ で、半径 6 m の領域全体では 65 PBq に相当する

床表面から150 cm位置での周辺線量当量率の測定結果

密度 2.1 g/cm³ のコンクリート



トップカバー上部の測定点

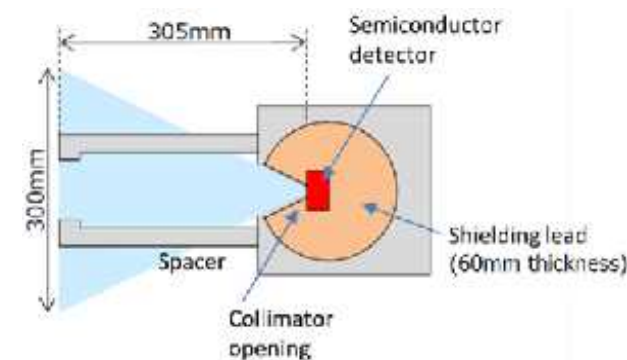
測定点	測定値 ¹⁾	トップカバー下部寄与	トップカバー下部汚染密度
	mSv/h		Bq/cm ²
[1]	111	50	4.85E+10
[2]	138	77	7.46E+10
[3]	109	48	4.65E+10
[4]	79	18	1.74E+10
[5]	108	47	4.56E+10
[6]	118	57	5.53E+10
[7]	148	87	8.43E+10
[8]	129	68	6.59E+10
[9]	144	83	8.05E+10
[10]	130	69	6.69E+10
[11]	104	43	4.17E+10
[12]	114	53	5.14E+10
Average			5.65E+10

¹⁾2019.2.28 東電測定

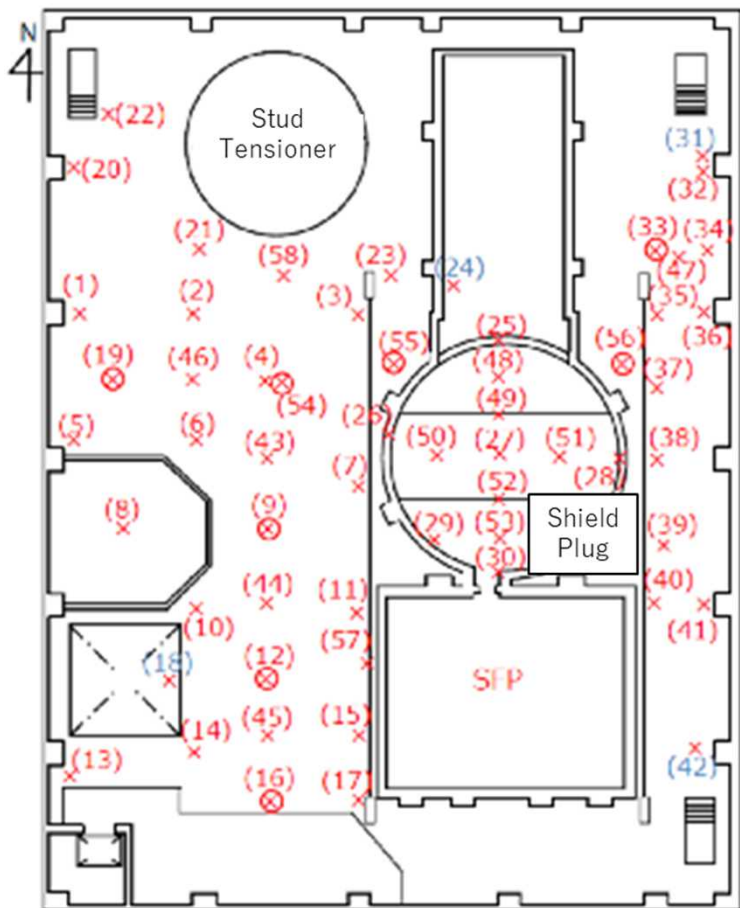
²⁾ 測定値-61 mSv/h (評価値)

2. コリメータ付き 線線量計による30.5 cm高さ測定結果を用いた推定

- コリメータ付き 線線量計は、鉛で作られたコリメータにより測定領域がコリメータの設定領域に限定されていることから天井や壁の汚染の影響を受けない
- 2021年3月の中間取りまとめでは、測定された線量率が「周辺線量当量率」であるとして解析を行い、 2.16×10^{10} から 3.95×10^{10} Bq/cm² という結果を出していた
- しかしながら、その後の調査により使用された線量計は、ファントムに着用して構成された「個人線量計」であることが分かった
- この線量計を鉛のコリメータ内部で使用した場合、得られた「線量」は、周辺線量当量率と異なる
 - 東電の資料に基づき床表面汚染に適用した場合に、得られた「線量率」は「周辺線量当量率」の**1/1.69**であることが分かった
 - トップカバー下面汚染の場合、エネルギーが低い散乱線が中心になるので「周辺線量当量率との比」がより大きくなる可能性があるが、線量計の詳細な情報が分からないので床表面汚染の場合と同じとした。
- コリメータ付き 線線量計を床面から30.5 cmに設置した場合の61 cmコンクリート下面の1 Bq/cm²の一様な面線源による「線量率」をegs5で計算した
 - 床表面又はトップカバー下面の1 Bq/cm²の¹³⁷Cs と 0.1 Bq/cm² の¹³⁴Cs と ¹²⁵Sb による「線量率」は、それぞれ 6.25E-4 又は 1.02E-7 μSv/h となった



コリメータ付き 線線量計による30.5 cm高さ測定結果

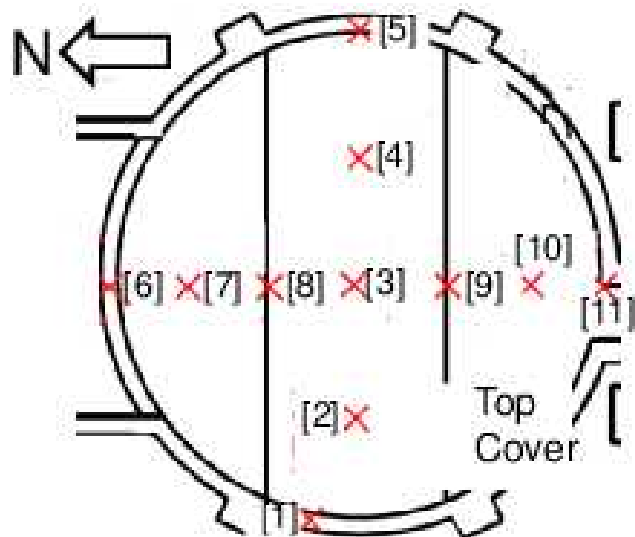


Measure-ment point	γ-ray dose rate (mSv/h)	Remarks	Measure-ment point	γ-ray dose rate (mSv/h)	Remarks	Measure-ment point	γ-ray dose rate (mSv/h)	Remarks
(1)	0.2		(21)	0.3		(41)	2.2	
(2)	0.2		(22)	0.3		(42)	0.5	(e)
(3)	0.3		(23)	1.8		(43)	0.5	
(4)	0.2		(24)	1.8	(d)	(44)	0.2	
(5)	0.4		(25)	6.4	(b)	(45)	0.2	
(6)	0.3		(26)	8.0	(b)	(46)	0.1	
(7)	1.9		(27)	12	(c)	(47)	1.5	
(8)	9.8		(28)	1.0	(b)	(48)	12.0	(c)
(9)	1.8	(a)	(29)	2.0	(c)	(49)	13.0	(b)
(10)	0.5		(30)	3.7	(b)	(50)	7.1	(c)
(11)	0.3		(31)	1.0	(d)	(51)	8.0	(c)
(12)	0.5	(a)	(32)	3.9		(52)	15	(b)
(13)	0.5		(33)	4.5	(a)	(53)	5.0	(c)
(14)	0.6		(34)	3.2		(54)	6.0	(a)
(15)	0.3		(35)	0.6		(55)	3.0	(a)
(16)	0.4	(a)	(36)	0.6		(56)	8.6	(a)
(17)	0.9		(37)	2.3		(57)	1.1	
(18)	1.00	(e)	(38)	5.2		(58)	0.6	
(19)	1.9	(a)	(39)	0.3				
(20)	0.30		(40)	1.1				

- (a) Funnel to collect floor drain
(omitted from average because these do not represent floor contamination density)
- (b) Gap
- (c) On shield plug
- (d) Measured from a distance due to interference with existing equipment.

コリメータ付き 線線量計による30.5 cm高さ測定結果

密度 2.1 g/cm³ のコンクリート



トップカバー上部の測定点
(コリメータ付きγ線線量計)

測定点	γ線線量当量率 ¹⁾	トップカバー下部寄与 ²⁾	トップカバー下部汚染密度
	(mSv/h)		(Bq/cm ²)
[1]	6.4	5.5	2.7E+10
[2]	7.1	6.2	3.1E+10
[3]	12	11.1	5.5E+10
[4]	8.0	7.1	3.5E+10
[5]	1.0	0.14	6.9E+08
[6]	6.4	5.5	2.7E+10
[7]	12	11.1	5.5E+10
[8]	13	12.1	6.0E+10
[9]	15	14.1	7.0E+10
[10]	5	4.1	2.1E+10
[11]	3.7	2.8	1.4E+10
Average			3.6E+10
Average (外周部の[1], [5], [6], [11]除く)			4.68E*10

¹⁾2019.2.28 東電測定

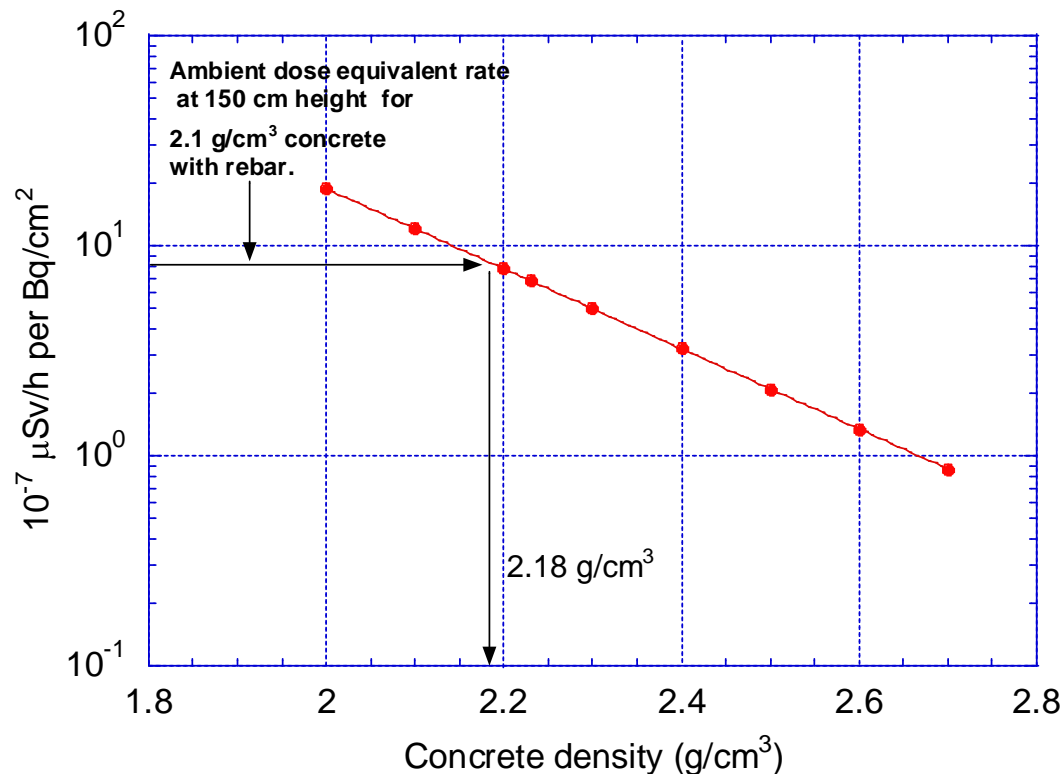
²⁾測定値 - 0.86 mSv/h (評価値)

シールドプラグ以外の平坦な床面の測定値の平均0.86 mSv/hを、シールドプラグ床の表面汚染の寄与とした

外周部を除いた7箇所平均である 4.7×10^{10} Bq/cm² は、床面から150 cmでの周辺線量当量率から推定した 5.7×10^{10} Bq/cm² とほぼ同じである

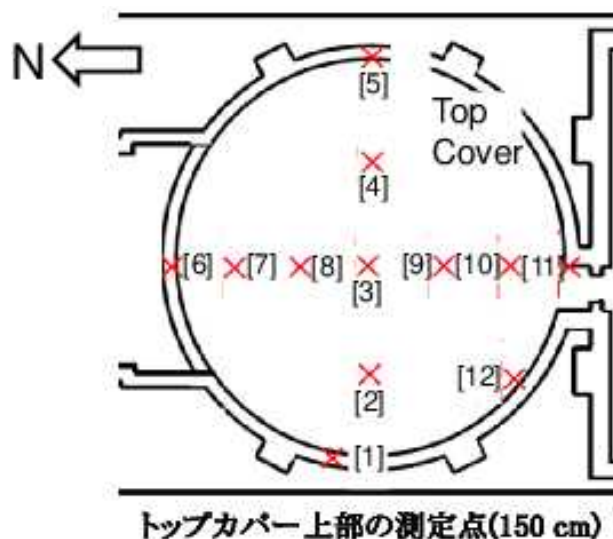
鉄筋の影響

- 穴内部の測定で説明されているようにトップカバーの表面から10 cm と下部から10 cmに鉄筋がある
- QAD-CGGP2の計算結果から、鉄筋を含むシールドプラグに透過がコンクリートの実効的な密度は 2.18 g/cm^3 である。
- コンクリートの密度を 2.18 g/cm^3 とすると、推定したトップカバー下面の ^{137}Cs 汚染密度は、
 - 2.2×10^{10} to $1.1 \times 10^{11} \text{ Bq/cm}^2$ (床面から150 cm位置での周辺線量当量率から推定した場合)
 - 3.6×10^{10} to $8.3 \times 10^{10} \text{ Bq/cm}^2$ (コリメータ付き線線量計による周回部を除いた測定結果から推定した場合)



(1) 床表面から150 cm位置での周辺線量当量率を用いた推定

鉄筋の影響を含む実効 2.18 g/cm³ のコンクリート



トップカバー上部の測定点

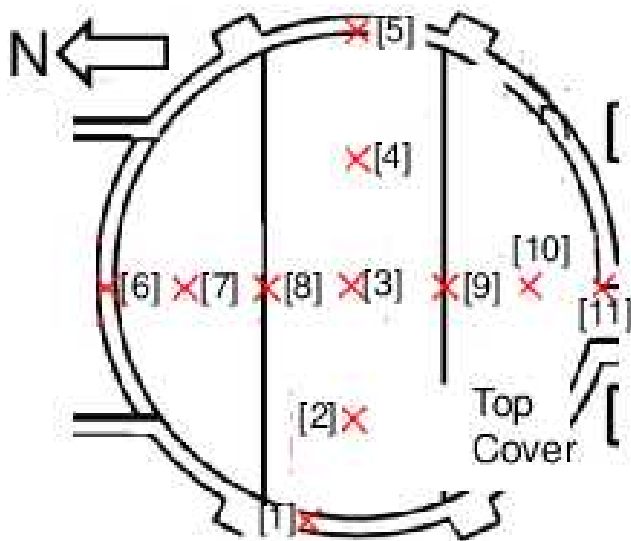
測定点	測定値 ¹⁾	トップカバー下部寄与	トップカバー下部汚染密度
	mSv/h		Bq/cm ²
[1]	111	50	6.11E+10
[2]	138	77	9.40E+10
[3]	109	48	5.86E+10
[4]	79	18	2.20E+10
[5]	108	47	5.74E+10
[6]	118	57	6.96E+10
[7]	148	87	1.06E+11
[8]	129	68	8.30E+10
[9]	144	83	1.01E+11
[10]	130	69	8.43E+10
[11]	104	43	5.25E+10
[12]	114	53	6.47E+10
Average			7.12E+10

¹⁾2019.2.28 東電測定

²⁾測定値-61 mSv/h (評価値)

(2) コリメータ付きγ線線量計 (30.5cm高さ) を用いた推定

鉄筋の影響を含む実効密度 2.18 g/cm³ のコンクリート



トップカバー上部の測定点
(コリメータ付きγ線線量計)

測定点	γ線線量当量率 ¹⁾	トップカバー 下部寄与 ²⁾	トップカバー下部 汚染密度
	(mSv/h)		(Bq/cm ²)
[1]	6.4	5.5	3.2E+10
[2]	7.1	6.2	3.6E+10
[3]	12	11.1	6.5E+10
[4]	8.0	7.1	4.2E+10
[5]	1.0	0.14	8.2E+08
[6]	6.4	5.5	3.2E+10
[7]	12	11.1	6.5E+10
[8]	13	12.1	7.1E+10
[9]	15	14.1	8.3E+10
[10]	5	4.1	2.4E+10
[11]	3.7	2.8	1.7E+10
Average			4.3E+10
Average (外周部の[1], [5], [6], [11]除く)			5.51E*10

¹⁾2019.2.28 東電測定

²⁾測定値 - 0.86 mSv/h (評価値)

3. 穴内部の周辺線量当量率分布を用いた推定

1. 測定されたIRID穴、新穿孔穴の穴内線量率分布の違い

Q1:なぜ分布形状が異なるのか

(IRID穴は出口に向かって減衰、新穿孔穴は増加)

Q2:なぜ新穿孔穴は全体に線量率が低いのか

2. 何が穴内線量率分布に影響する可能性があるか

Q1:鉄筋は？

Q2:穿孔深さは？

Q3:室内汚染(壁・床・天井)は？

一つずつその影響を解析して確認

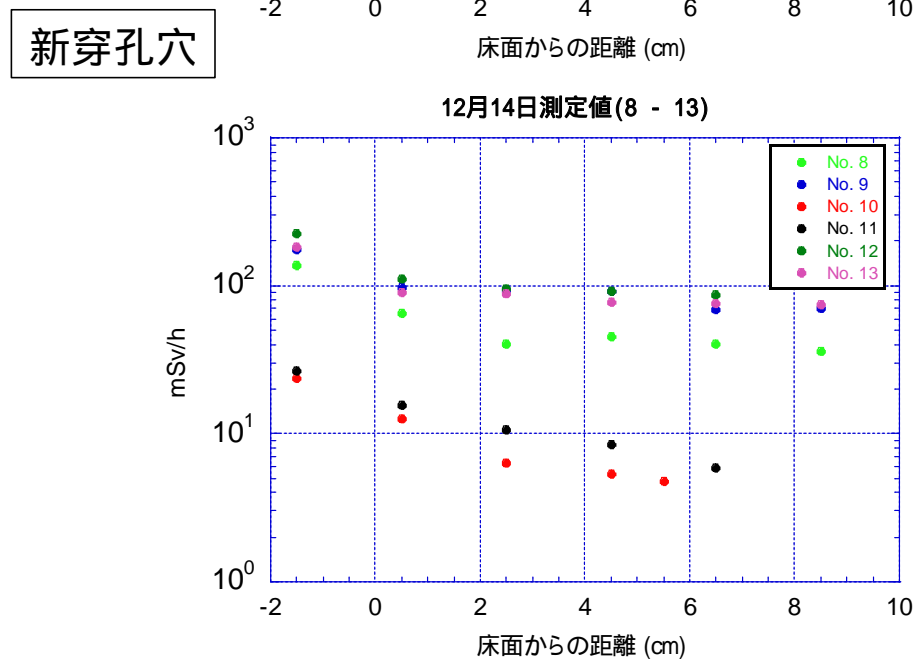
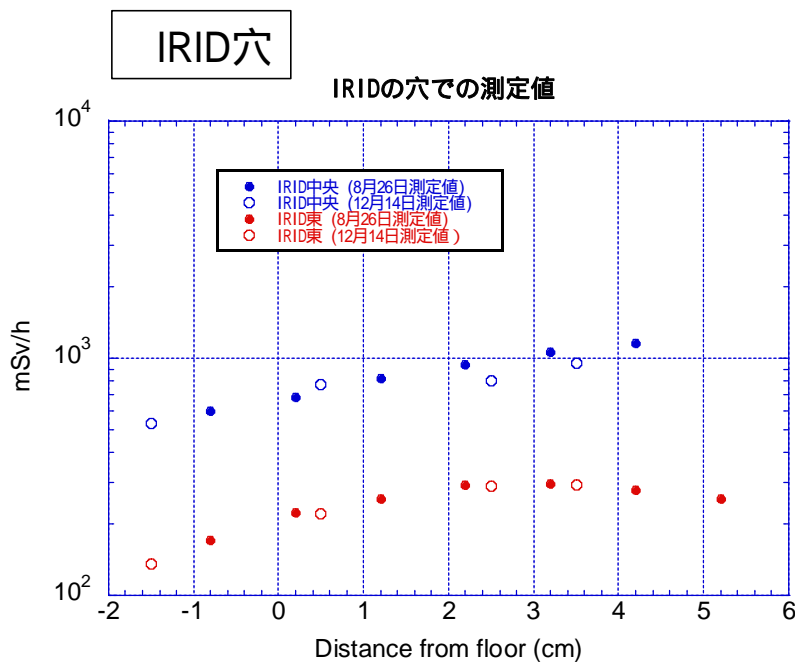
まずはQADで先行解析、必要な部分はegs5で詳細解析

3. それらの影響を考慮すると穴内分布を再現できるか

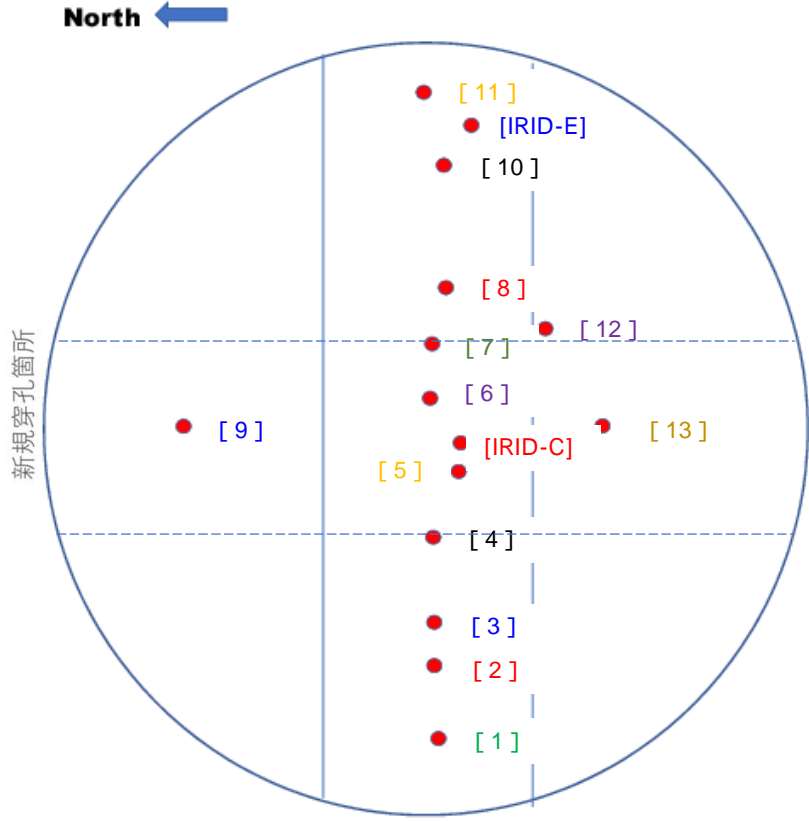
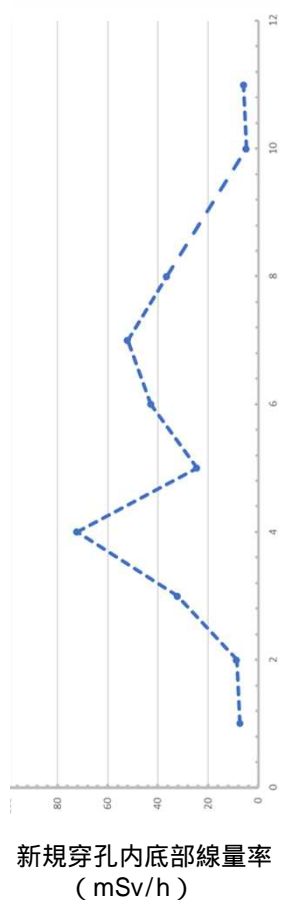
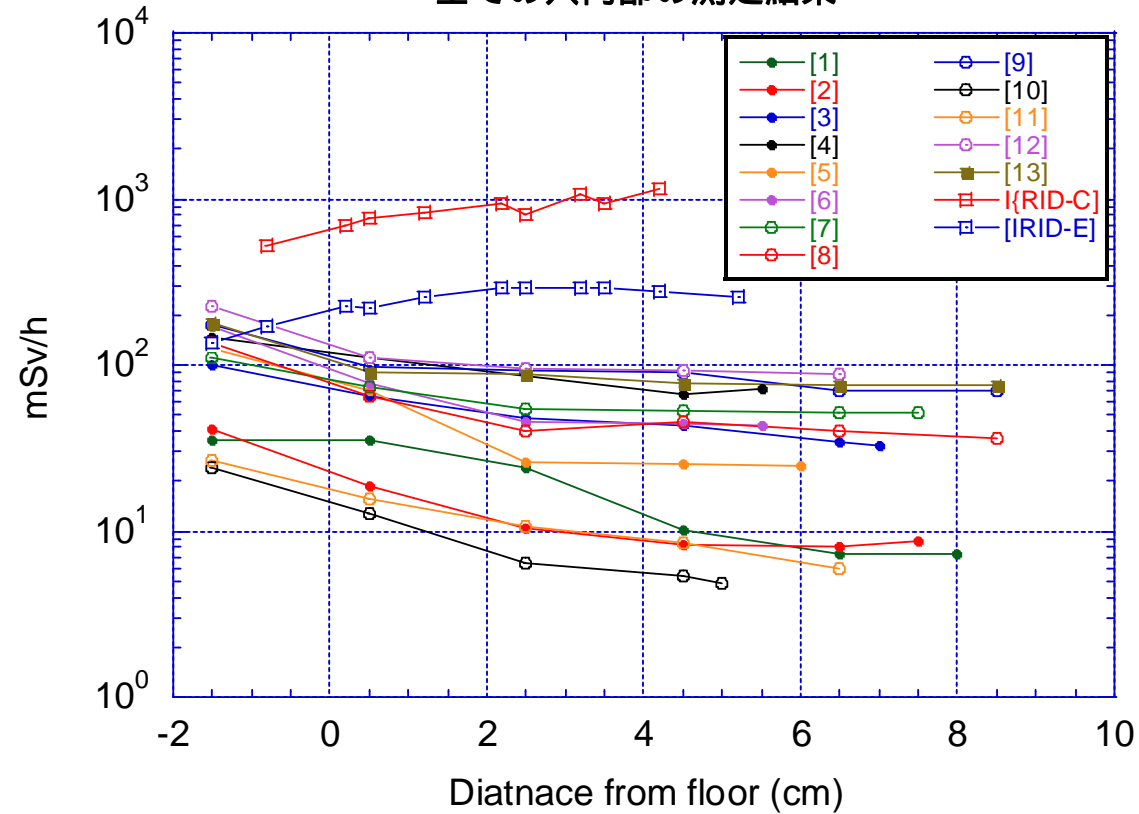
再現したとき、穴直下のトップカバー下面の汚染密度は？

3-1 IRID穴と新穿孔穴 の測定値

- ・IRID穴は出口に向かって減衰
- ・新穿孔穴は出口に向かって増加
- ・新穿孔穴は全体に線量率が低い



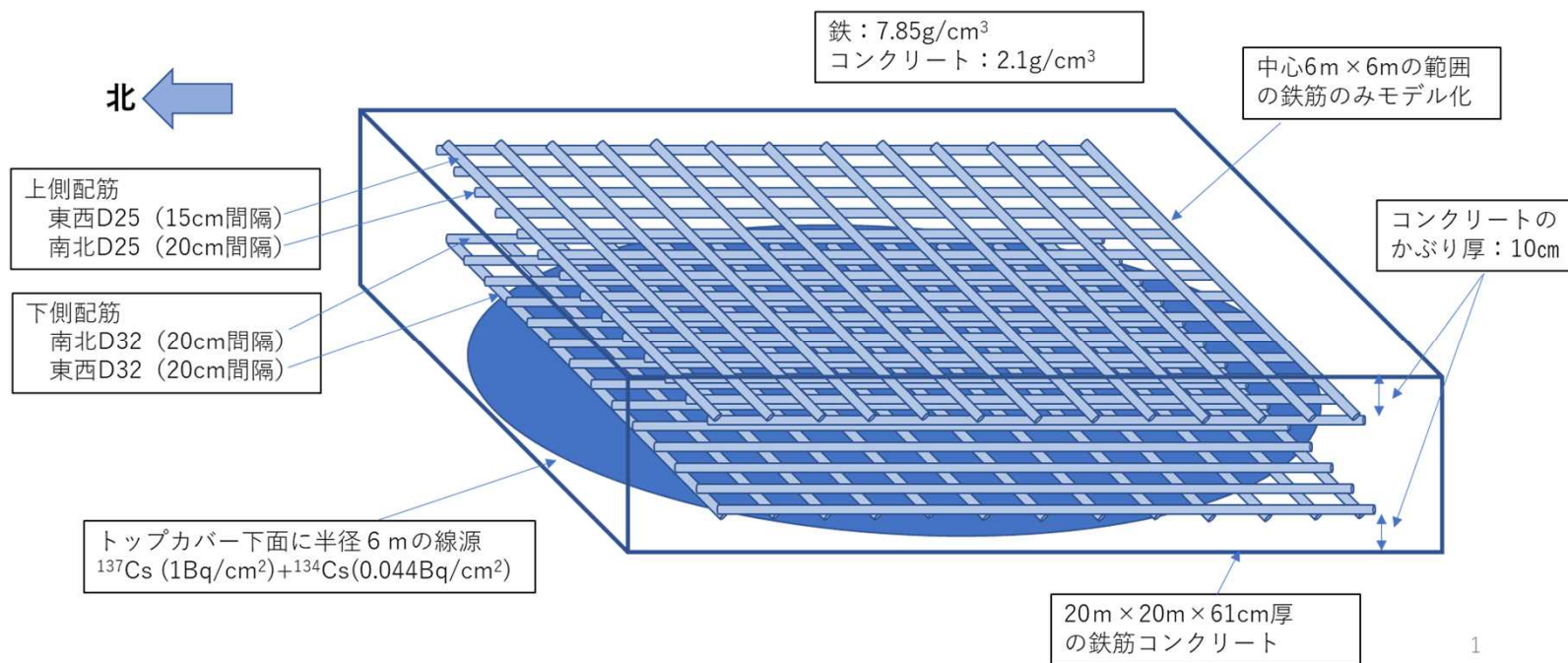
全ての穴内部の測定結果



3-2-1 穴内分布への影響(鉄筋)

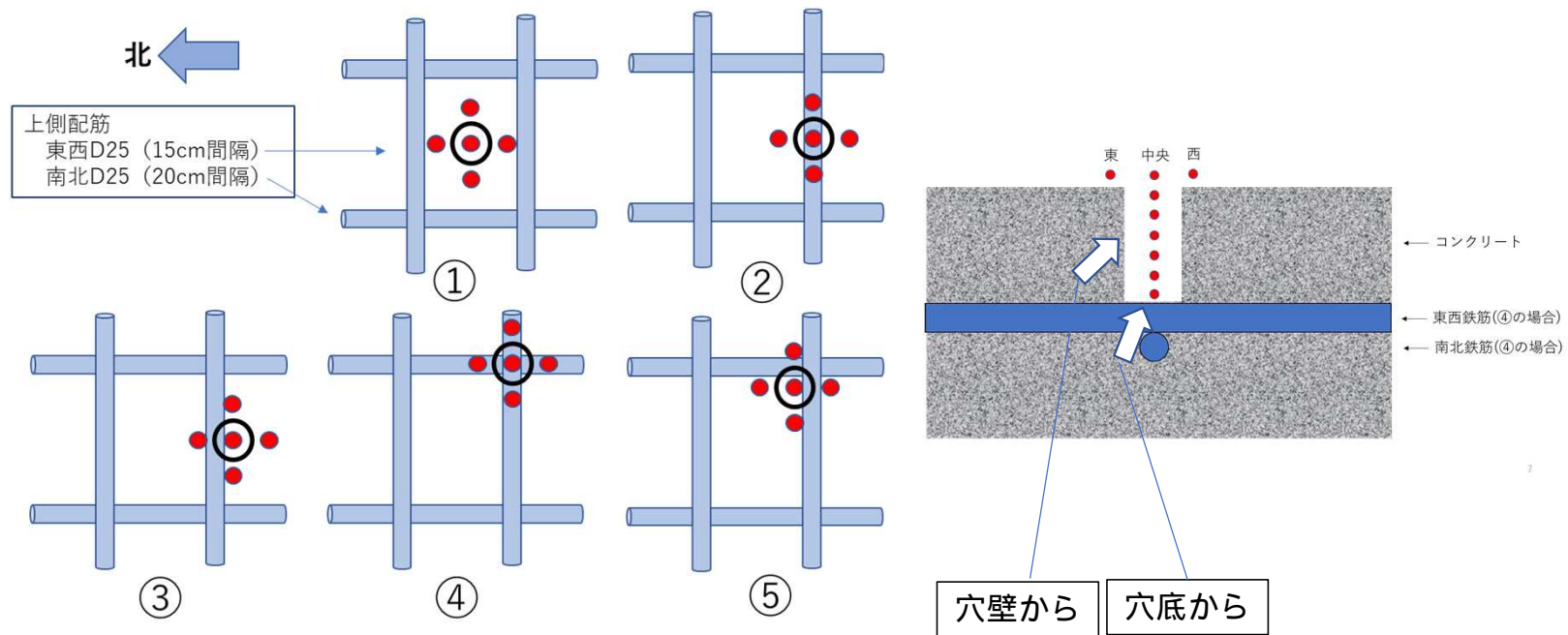
トップカバーの配筋

- ・太い配筋が密に入っている
- ・表面近くや穴の中では鉄筋と穴との位置関係が影響



3-2-1 穴内分布への影響 (鉄筋)

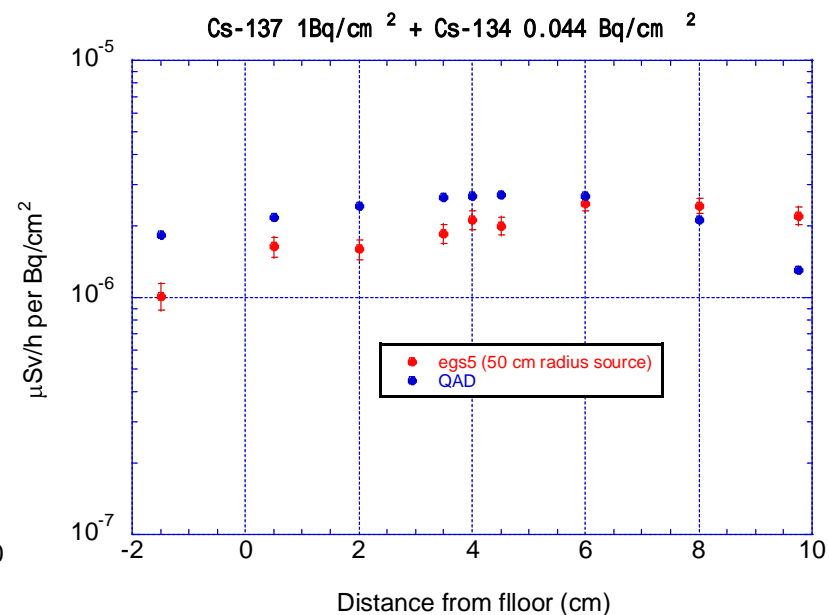
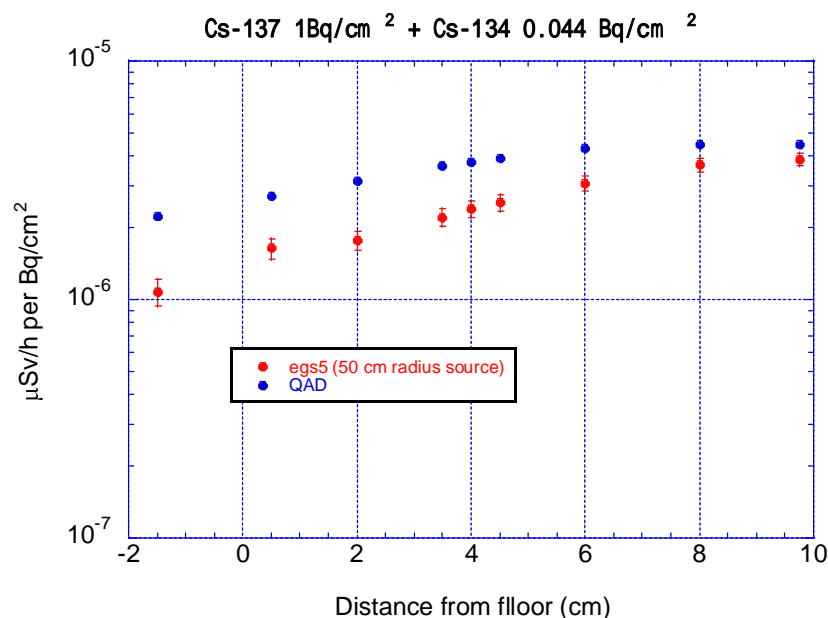
- 鉄筋と穴の位置関係
- ・鉄筋位置は施工誤差がある
 - ・穿孔位置も正確に測れない
 - ・そこで典型的な5つの位置関係 ~ で影響の違いを見る



3-2-1 穴内分布への影響 (鉄筋)

どんな穴内線量率分布になるか (egsとQAD比較)

- ・この体系ではQADの計算法の弱点がそのまま現れた
(無限媒質ビルドアップ係数、線源と計算点を結ぶ直線上の計算の積分)
- ・egsの統計精度を上げるための種々の工夫を重ね、結果が揃ったので
鉄筋の影響はegsベースで検討を進める

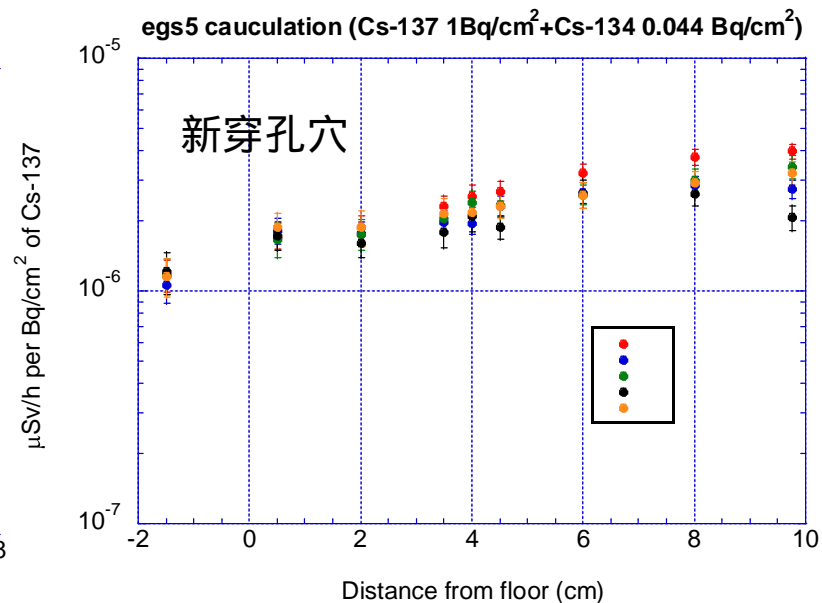
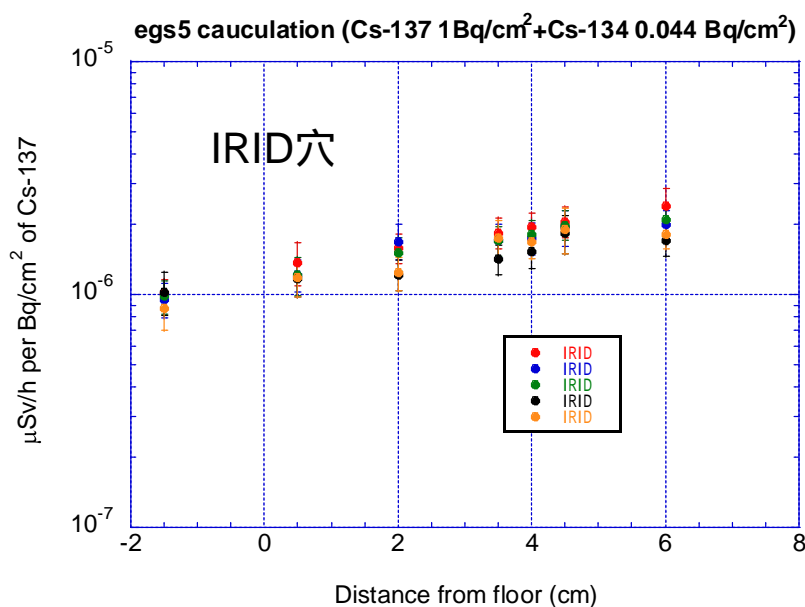


3-2-1 穴内分布への影響(鉄筋)

どんな穴内線量率分布になるか(egs5による計算)

鉄筋と穴の位置関係 ~ の穴内分布を比較すると、

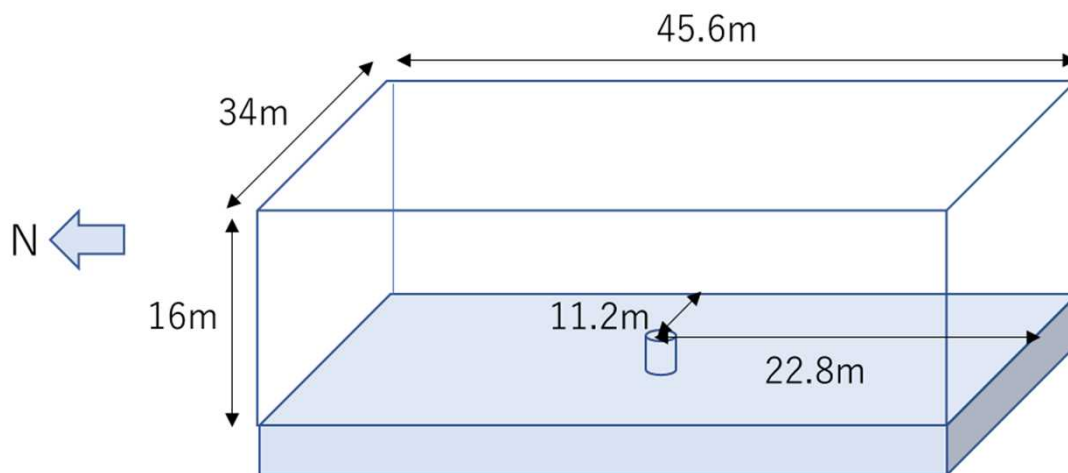
- (1) 深い位置では、IRID穴は4.5cm、新穿孔穴では6cm近辺が鉄筋影響の違いが小
- (2) 浅い位置では、IRID穴、新穿孔穴共通して0.5cm近辺が鉄筋影響の違いが小



3-2-2 穴内分布への影響 (室内汚染)

室内汚染(天井・壁・床)によりどんな穴内線量率分布になるか
(QAD)

- ・この体系ではQADの計算法の弱点はほぼ現れない
(egsと床上計算点で比較し10%以内で一致)
- ・天井・壁・床のうち、特に床と東壁の寄与が大きいことが判明
- ・25cmの鉄板を敷いた後の測定(NRA、東電)と良く一致
(床汚染の寄与以外が確認された)



3-2-2 穴内分布への影響(室内汚染)

室内汚染による穴内線量率分布(QAD)

汚染密度 (MBq/cm ²) 【Cs ¹³⁷ +4.4%Cs ¹³⁴ 】					
天井	床	東壁	西壁	南壁	北壁
0.36	0.25	1.4	1.1	0.41	0.89

計算点		線量率(mSv/h)							合計
No.	位置	(cm)	汚染面						
		床上高さ	天井	床	東壁	西壁	南壁	北壁	
1	穿孔穴上部	150	1.611E+00	5.143E+00	4.273E+00	1.329E+00	4.023E-01	8.733E-01	1.363E+01
2		100	1.548E+00	5.918E+00	4.186E+00	1.318E+00	3.986E-01	8.653E-01	1.423E+01
3		3	1.435E+00	1.218E+01	4.010E+00	1.294E+00	3.909E-01	8.485E-01	2.016E+01
4		1.5	1.433E+00	1.274E+01	4.007E+00	1.294E+00	3.908E-01	8.483E-01	2.071E+01
5		0	1.431E+00	1.300E+01	4.004E+00	1.293E+00	3.906E-01	8.480E-01	2.096E+01
6	穿孔穴内部	-0.5	1.367E+00	3.490E+00	3.620E+00	1.126E+00	3.419E-01	7.423E-01	1.069E+01
7		-2	1.363E+00	2.820E+00	2.990E+00	8.239E-01	2.533E-01	5.499E-01	8.801E+00
8		-3.5	1.320E+00	2.275E+00	2.407E+00	5.815E-01	1.811E-01	3.930E-01	7.157E+00
9		-4	1.296E+00	2.115E+00	2.230E+00	5.162E-01	1.614E-01	3.503E-01	6.669E+00
10		-4.5	1.269E+00	1.966E+00	2.064E+00	4.576E-01	1.436E-01	3.117E-01	6.211E+00
11		-6	1.170E+00	1.585E+00	1.627E+00	3.169E-01	1.005E-01	2.182E-01	5.017E+00
12		-8	1.017E+00	1.200E+00	1.171E+00	1.923E-01	6.187E-02	1.343E-01	3.777E+00
13		-9.75	8.813E-01	9.473E-01	8.718E-01	1.234E-01	4.013E-02	8.711E-02	2.951E+00

測定(東電) : 9mSv/h
計算(床を除く) : 8.5mSv/h

測定(NRA) : 8mSv/h(中心)
計算(床を除く) : 8.3mSv/h

↑
25cm遮蔽鉄板
設置後の測定
(床寄与無)で
よく一致

3-3-1 穴内分布測定値から汚染密度を推定する試み

穴内線量率分布の指数関数式へのフィッティング

- (1) トップカバー下面汚染からの線量率 (mSv/h) 寄与

$$D_B = Q_B \times 1.36E-06 \times \exp(0.113 \times t) / 1000 \text{ (新しい10cmの穴)}$$

$$D_B = Q_B \times 1.13E-06 \times \exp(0.113 \times t) / 1000 \text{ (IRIDの7cmの穴)}$$

ここで D_B : トップカバー下面からの線量率

Q_B : トップカバー下面の汚染密度 (Bq/cm²)

t : 床からの深さ(cm)

- (2) 床汚染からの線量率 (mSv/h) 寄与

$$D_s = Q_s \times 0.0149 \times \exp(-0.141 \times t) / 1000$$

ここで D_s : 床汚染からの線量率

Q_s : 床汚染の汚染密度 (Bq/cm²)

t : 床からの深さ(cm)

- (3) 穴内部の線量率は、(1)と(2)の和なので、

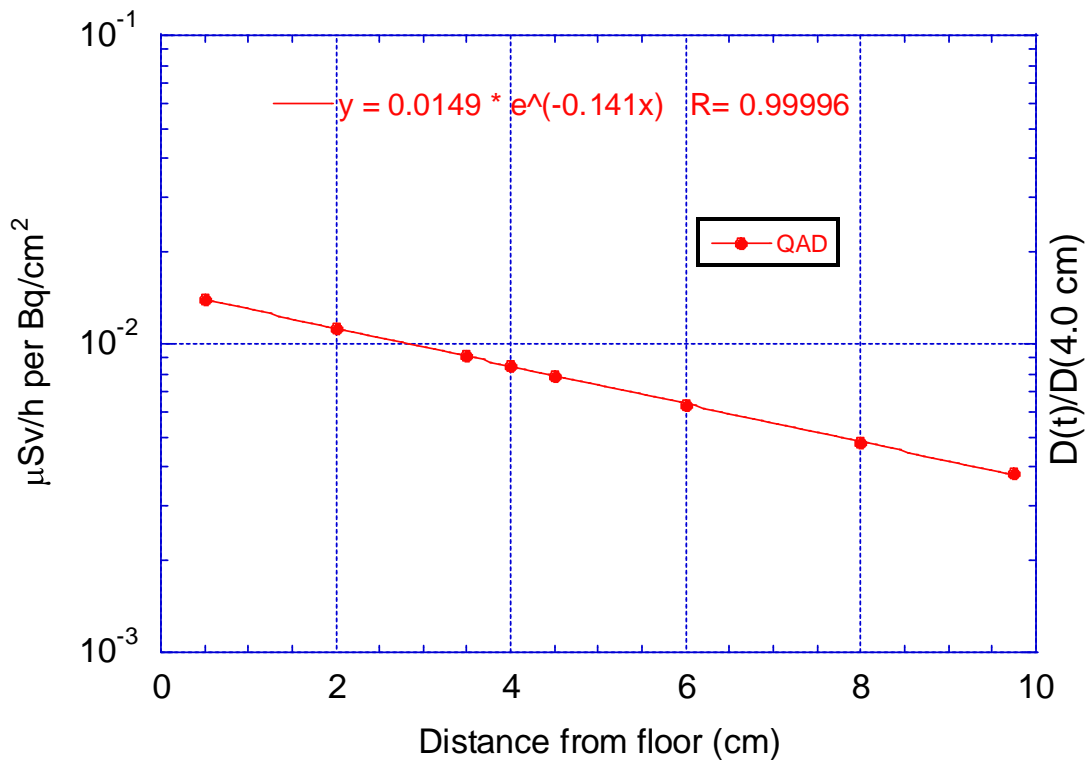
$$D(t) = a \times \exp(-0.141 \times t) + b \times \exp(-0.113 \times t)$$

となる。

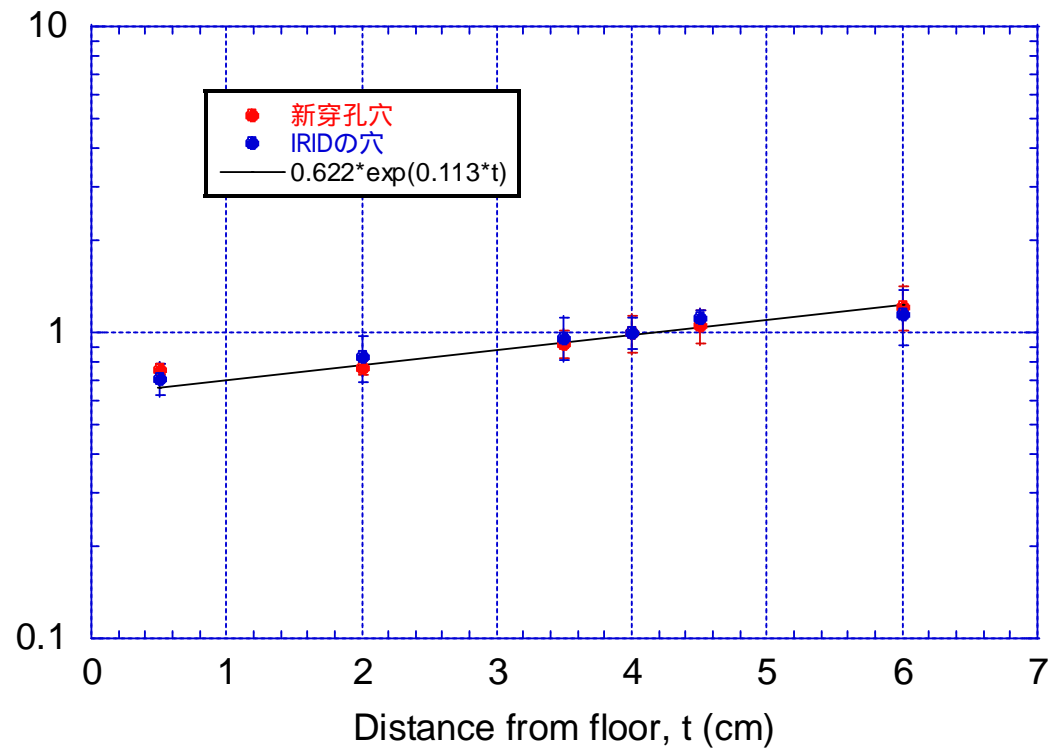
- (4) 測定値 a と b を最小二乗法により求める(非線形最小二乗問題)

グラフ作成・データ解析ソフトウェアアカレイダグラフを用いた

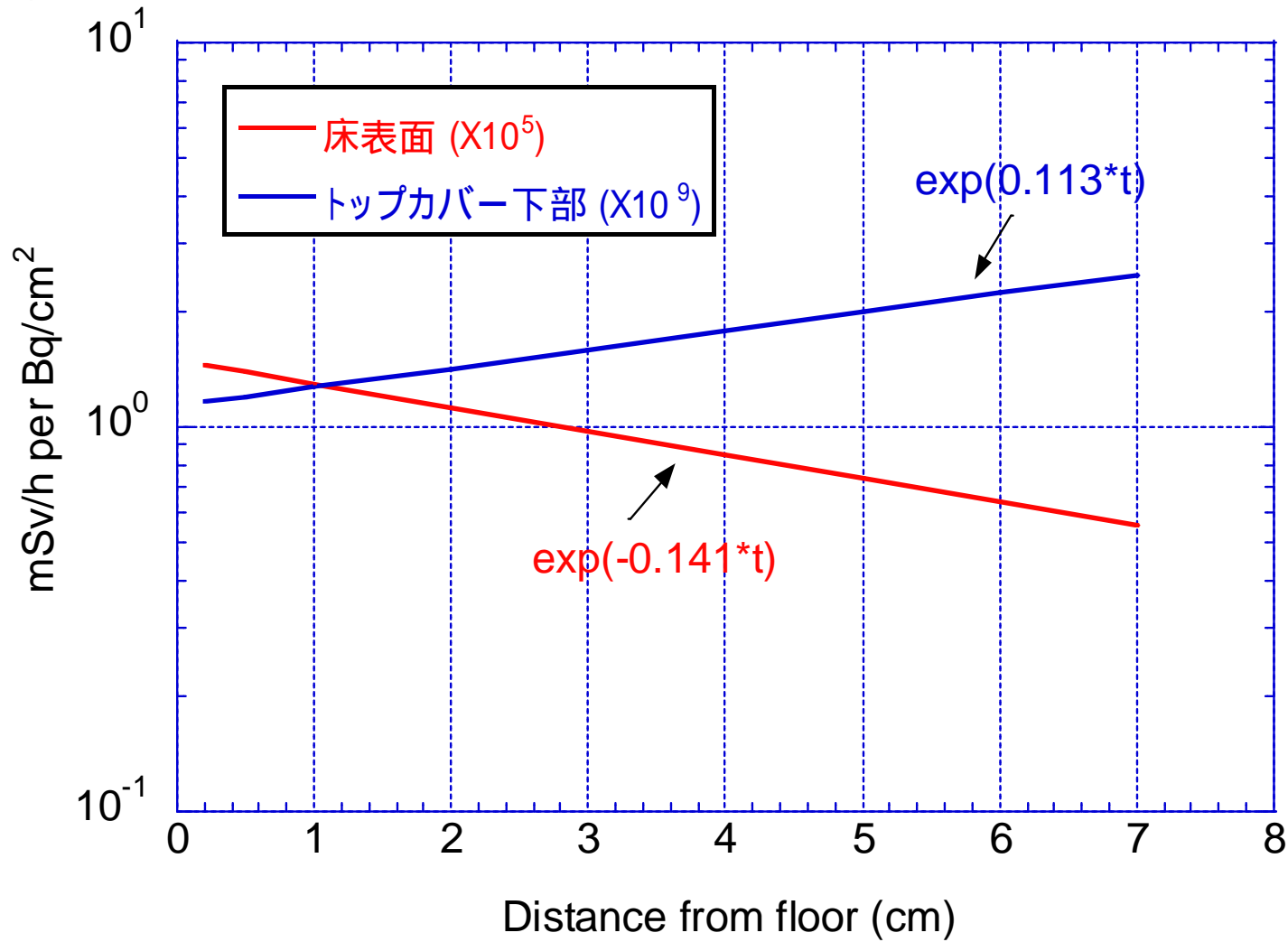
Levenberg-Marquardt法の適用



床表面汚染による周辺線量当量率(QAD計算)



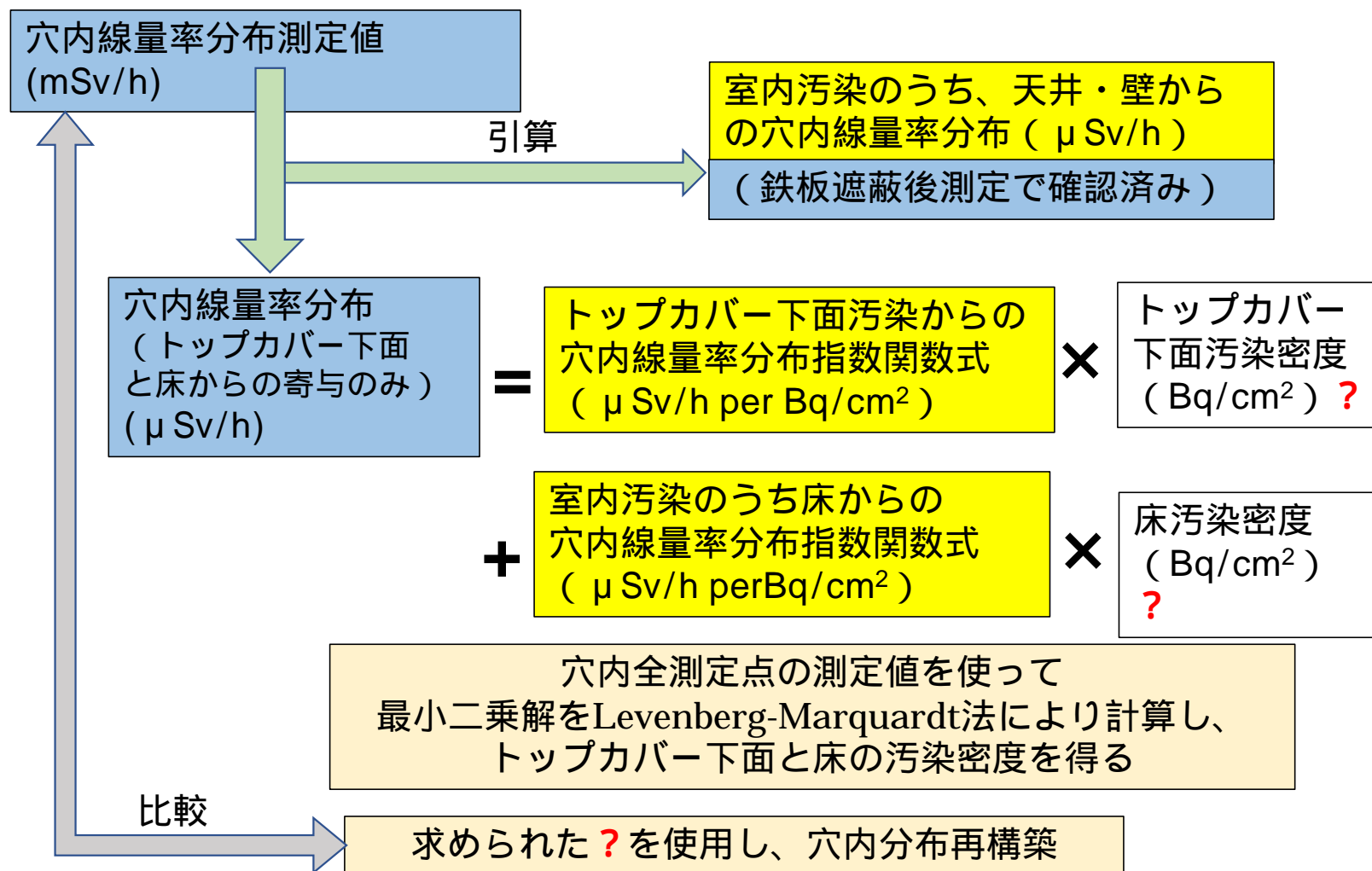
トップカバー下面汚染による周辺線量当量率(egs5計算)



2つの指数関数による穴内部の周辺線量当量率

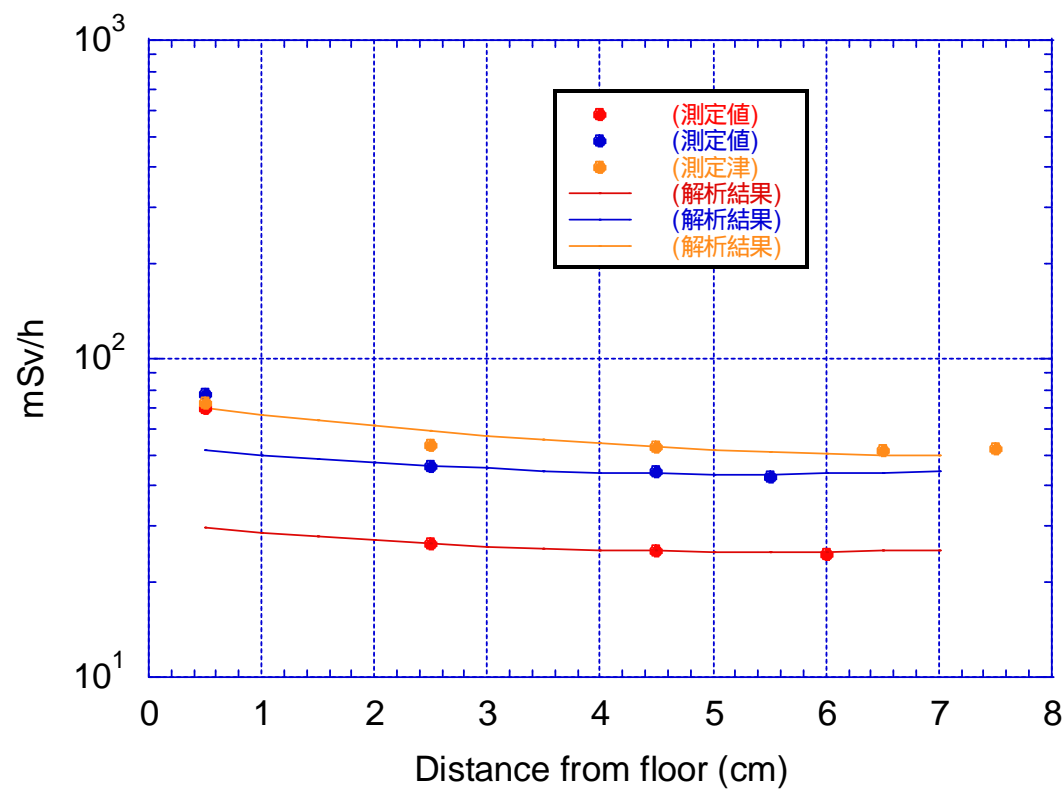
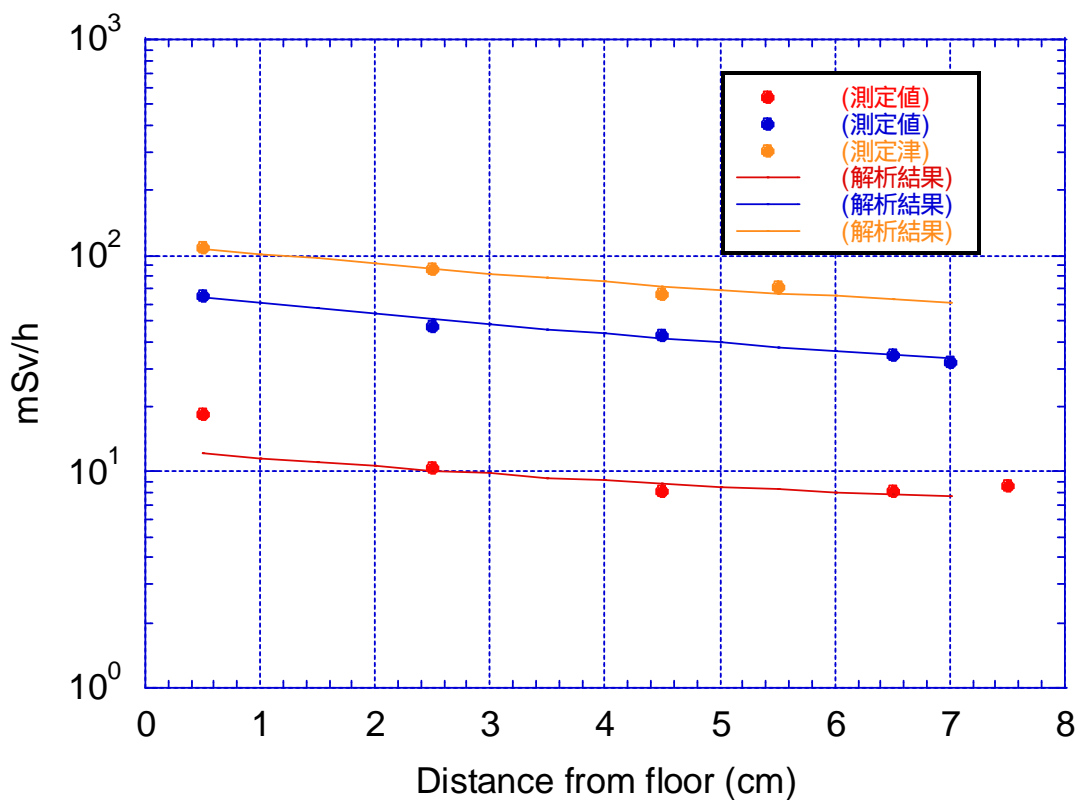
3-3-1 穴内分布測定値から汚染密度へ

トップカバー下面と床の汚染密度の求め方



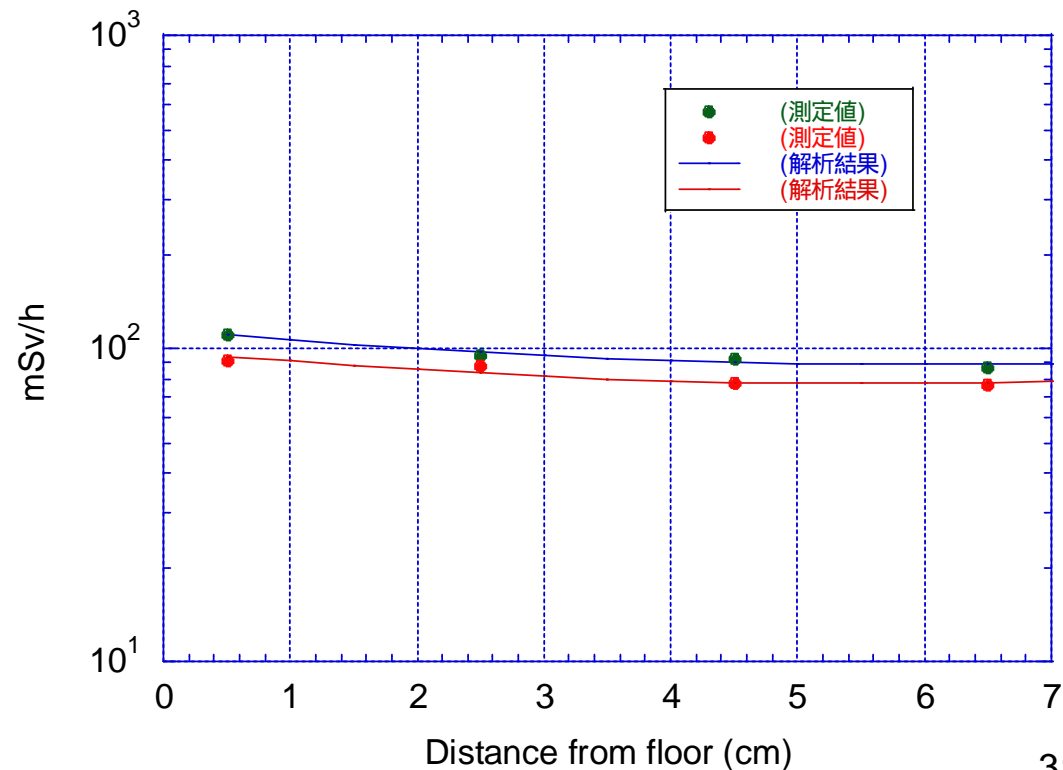
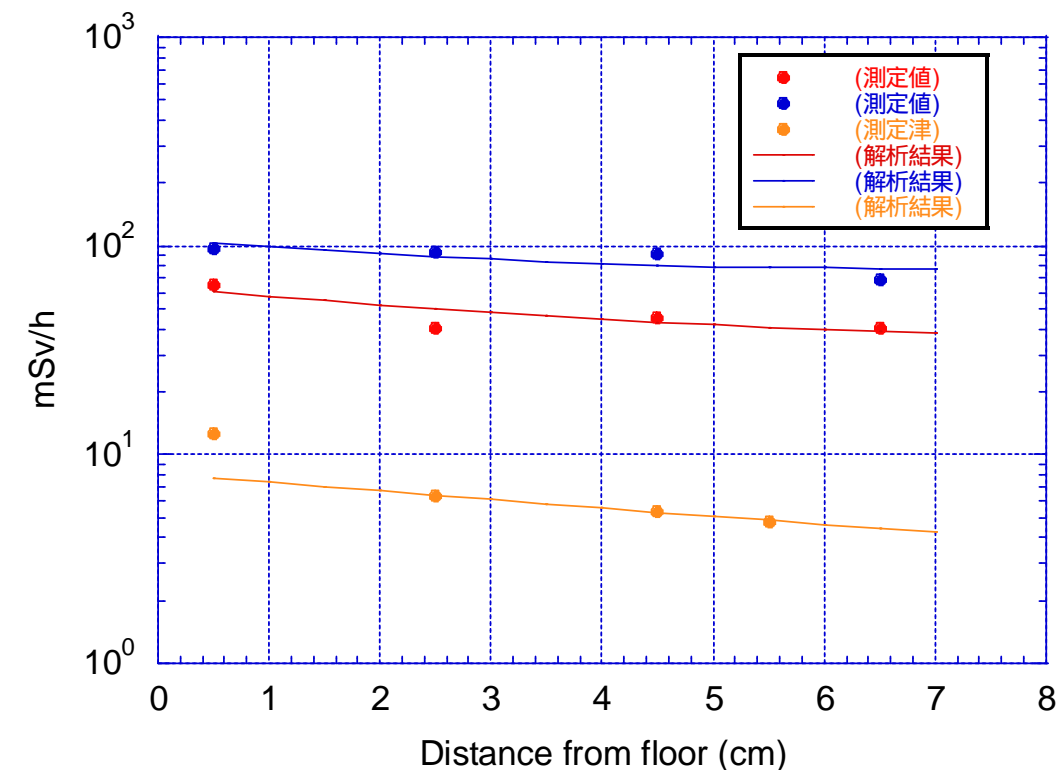
3-3-2 測定値と再構築された穴内分布の比較 (新穿孔穴 その1)

の各穴では、解析結果と測定値は概ね良く対応している。



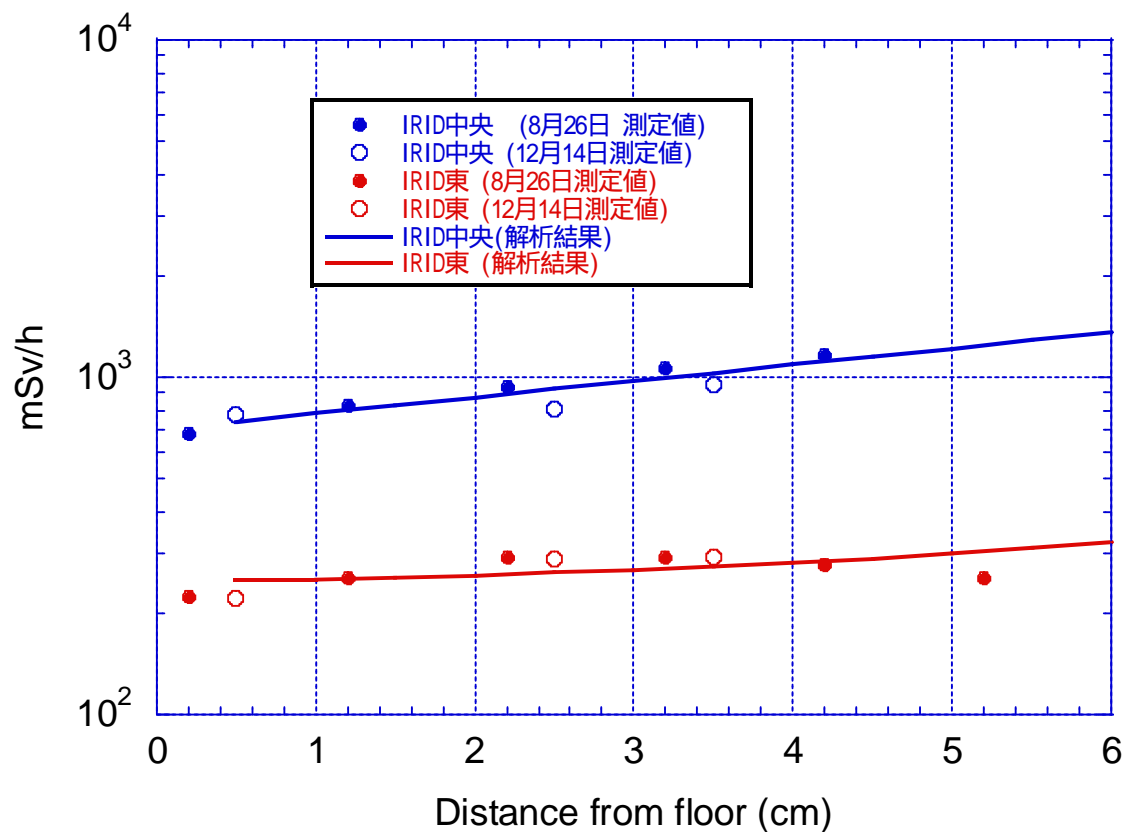
3-3-2 測定値と再構築された穴内分布の比較 (新穿孔穴 その2)

- ・ の各穴では、解析結果と測定値は概ね良く対応している。
- ・ は線量率が低いうえ床を含む室内汚染寄与がほとんどであるため、解が得られなかった(評価した室内汚染の精度も影響している可能性あり)

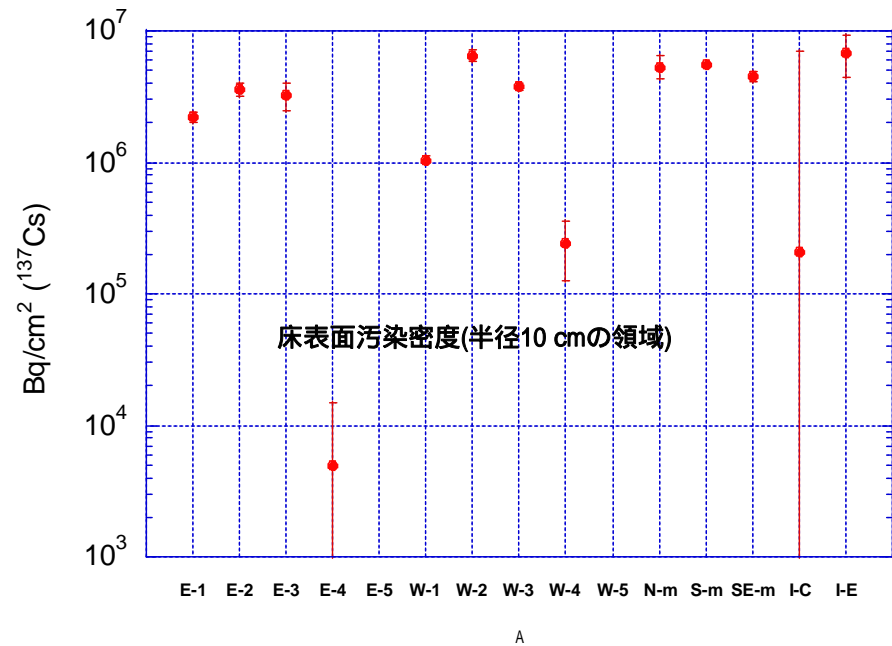
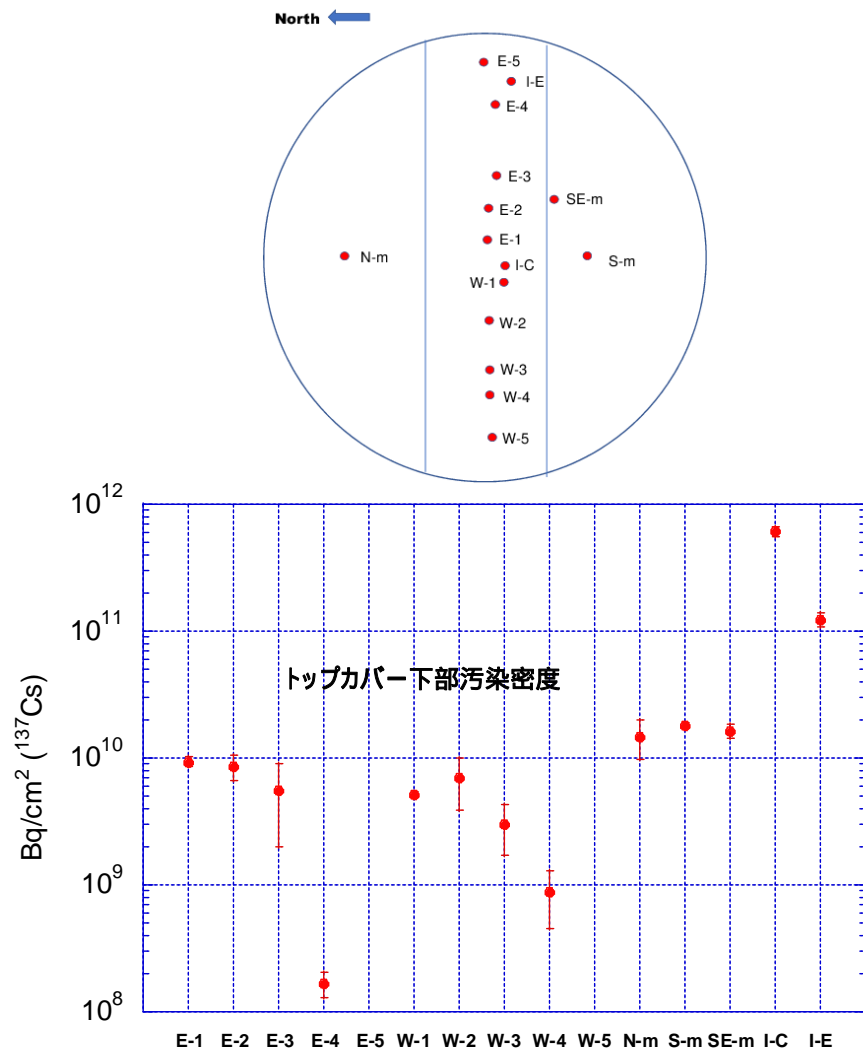


3-3-2 測定値と再構築された穴内分布の比較 (IRID穴)

中央穴では、解析結果と測定値は概ね良く対応している。
東穴では、分布の形に若干の違いがある



3-3-3 穴内線量率分布から得られた汚染密度



- E: 南北の中心近くで東西の中心から東方向 (E1が中心近く)
- W: 同様に西側
- N-m: 東西の中心での北で中心近くの測定穴
- S-m: 同様に南側で中心近くの測定穴
- SE-m: 中心から南西方向
- I-C: IRIDの中央近くの穴
- I-E: IRIDの東側の穴

3-3-3 穴内線量率分布から得られた汚染密度

- 1つの指数関数の合成として、最小二乗法によって求めた「トップカバー下面汚染密度」と「測定穴周辺の床汚染密度」により、穴内部の実測値を再現することができた
- しかしながら、得られた穴周辺の床汚染密度は、これまで各種の測定を基に推定されたシールドプラグ床表面の「平均汚染密度」と比べると高い値となっている
 - シールドプラグ床面の汚染密度に場所によるばらつきがあることは、取り出したコア表面での周辺線量当量率に、コアにより30 倍以上の分布があることから明らかである
 - 床表面の汚染密度のばらつきの反映である可能性も考えられるが、シールドプラグ表面全体から見ると情報が得られている領域は限られており、定量的な検討は難しい
- 今回用いた手法の検討を含めて、更に検討が必要である

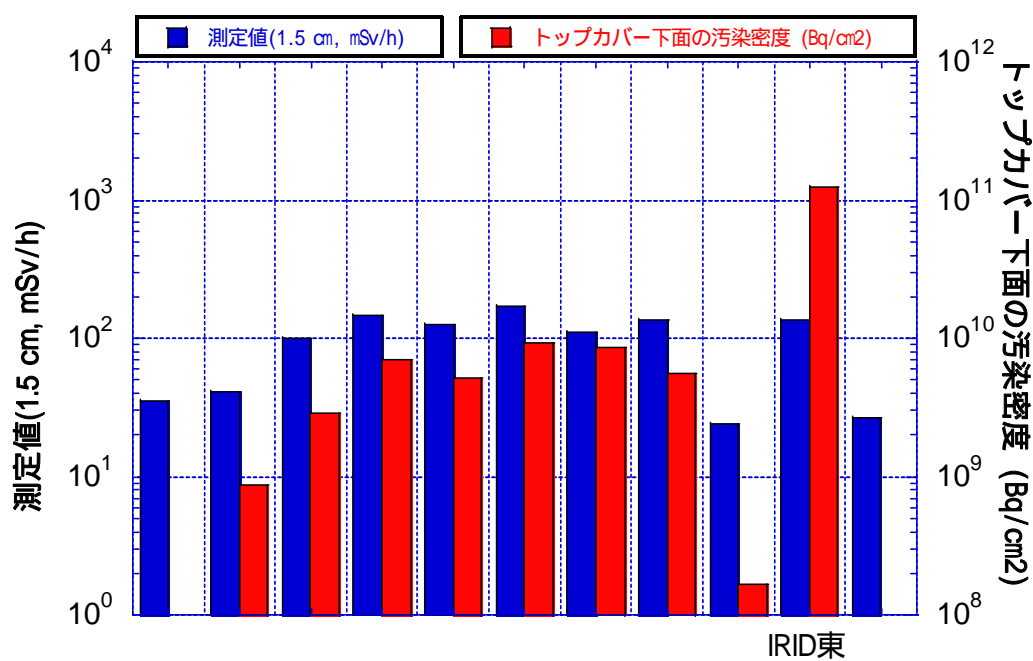
3-4 床上線量率とトップカバー下汚染密度

南北中心付近、東西中心付近の穴に分けて、床上1.5cmの線量率とトップカバー下面汚染密度の相関をみた

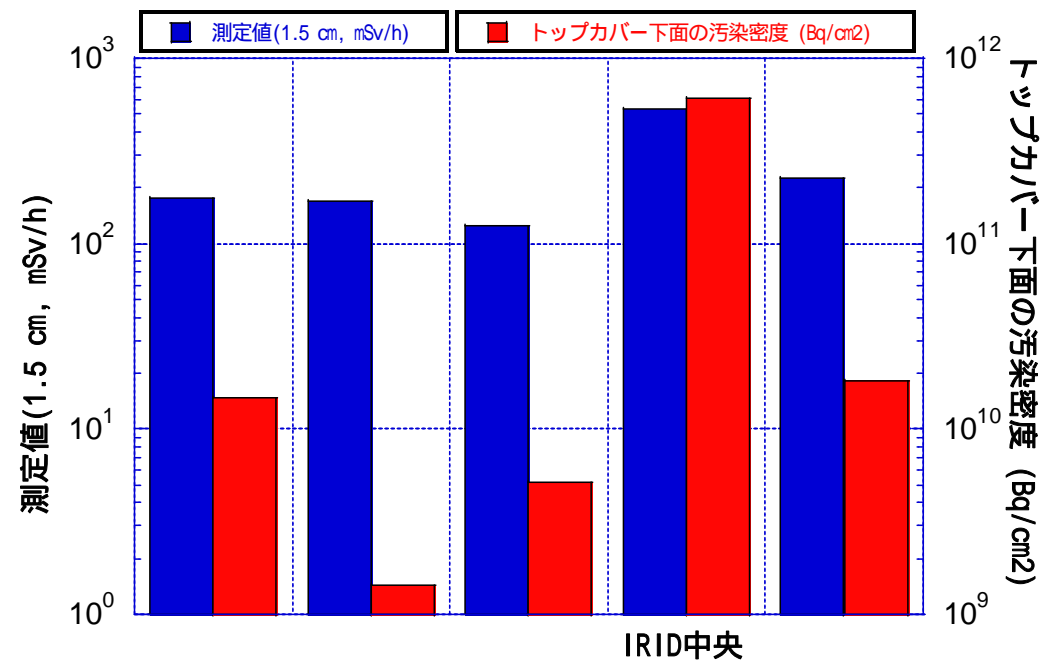
大まかには、南北の中心付近の東西の穴では、大まかには床表面での周辺線量当量率とトップカバー下面の汚染密度と対応している様に見える

東西の中心の南北方向では穴の位置により、両者の関係に違いがある

床上3cm測定(64点)結果からトップカバー下面汚染密度を定量的に推定することは難しいが、トップカバー下面の汚染密度分布の検討には活用できると思われる

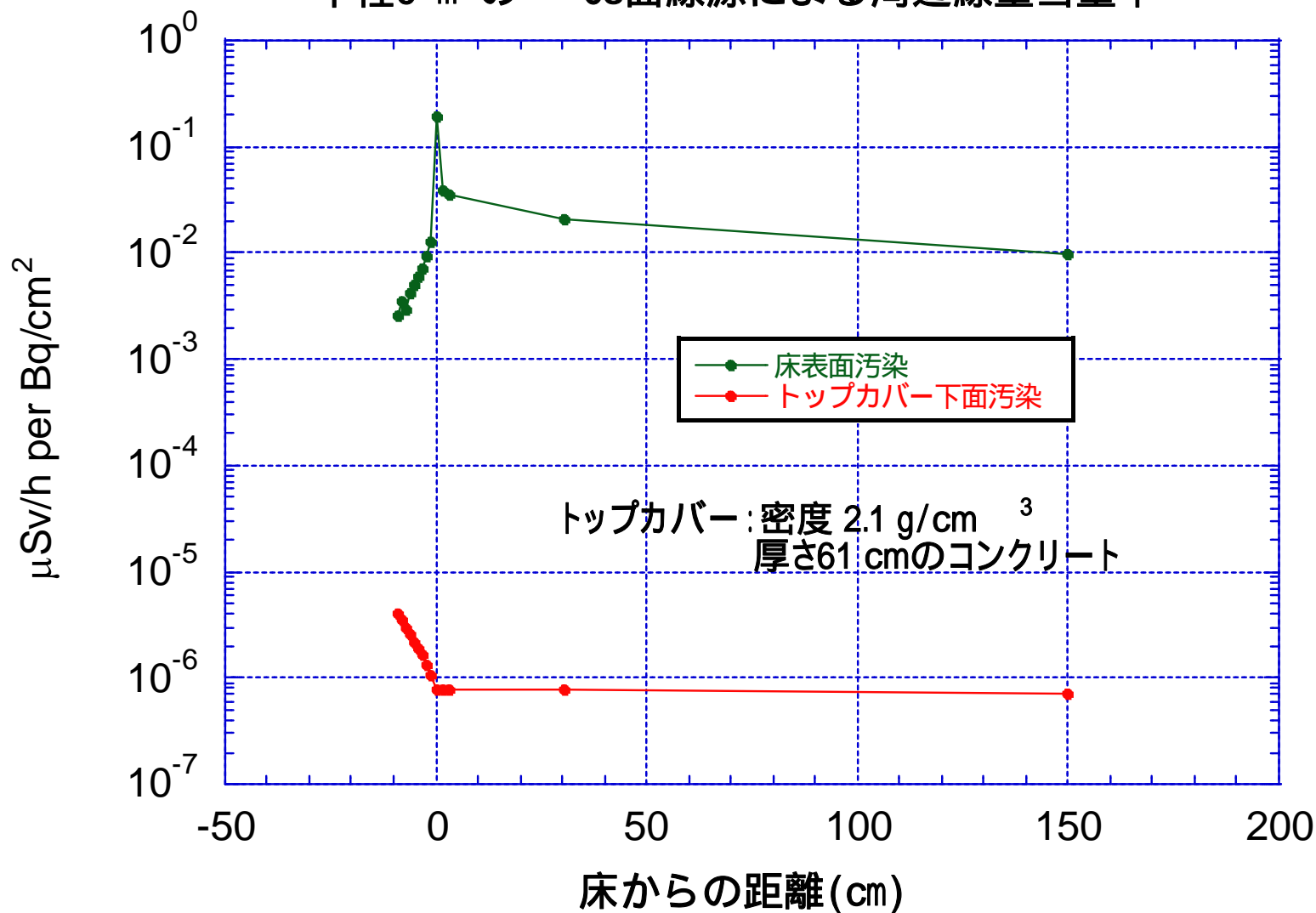


穴番号 (南北中心付近)



穴番号 (東西中心付近)

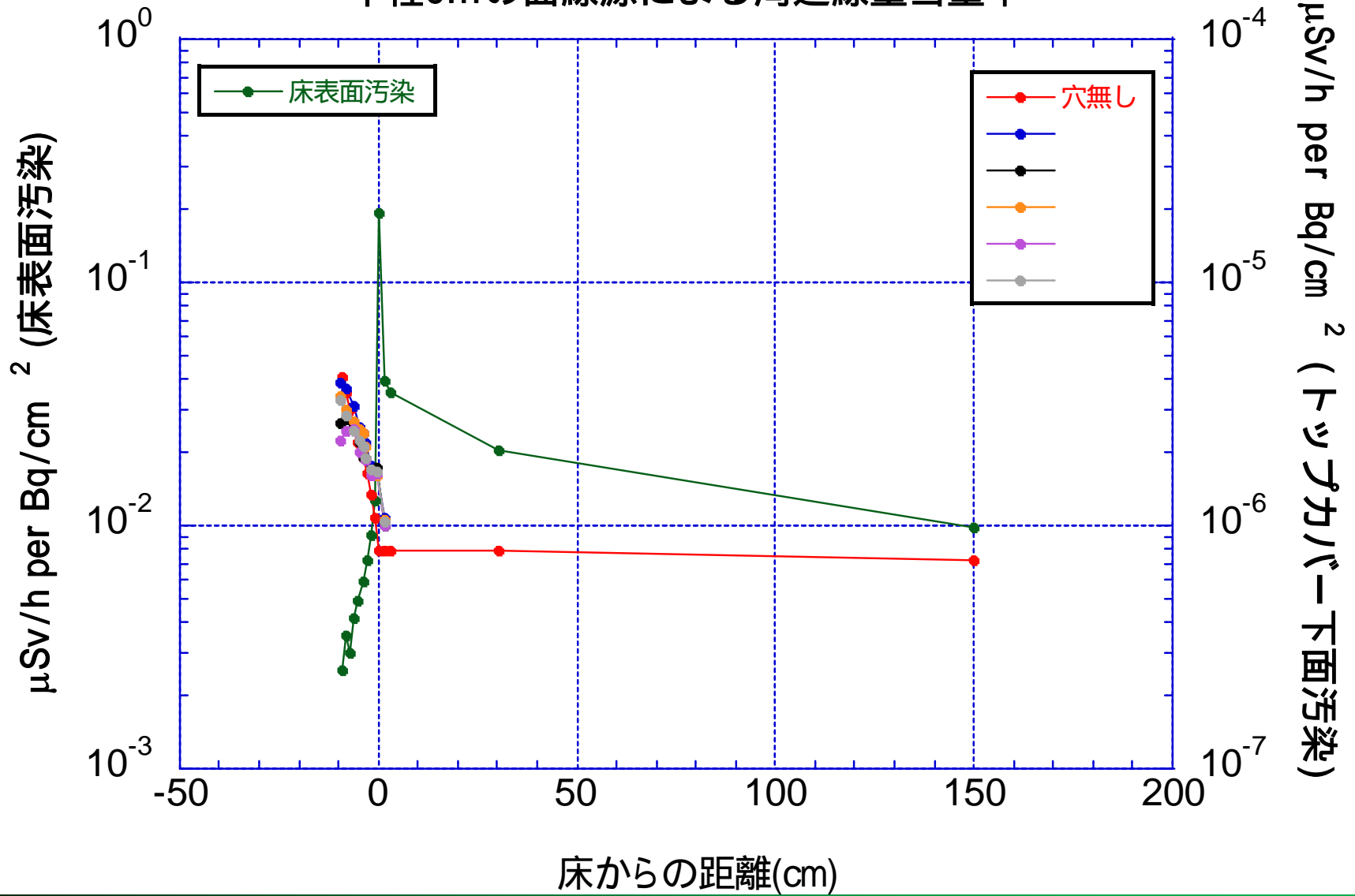
半径6 m の ^{137}Cs 面線源による周辺線量当量率



トップカバー下面汚染:
穴内部では床に近づくに伴い減少し、床面より上では床からの高さによりほとんど変化しない。ただし、本解析では、下面汚染のプラグ表面から上部への散乱状況は再現出来ていない。

床表面汚染:
穴内部では床に近づくに伴い増加し、床面より上になると、直視出来る線源領域が増えるため急激に増加し、湯からの高さにより緩やかに減少する

半径6mの面線源による周辺線量当量率



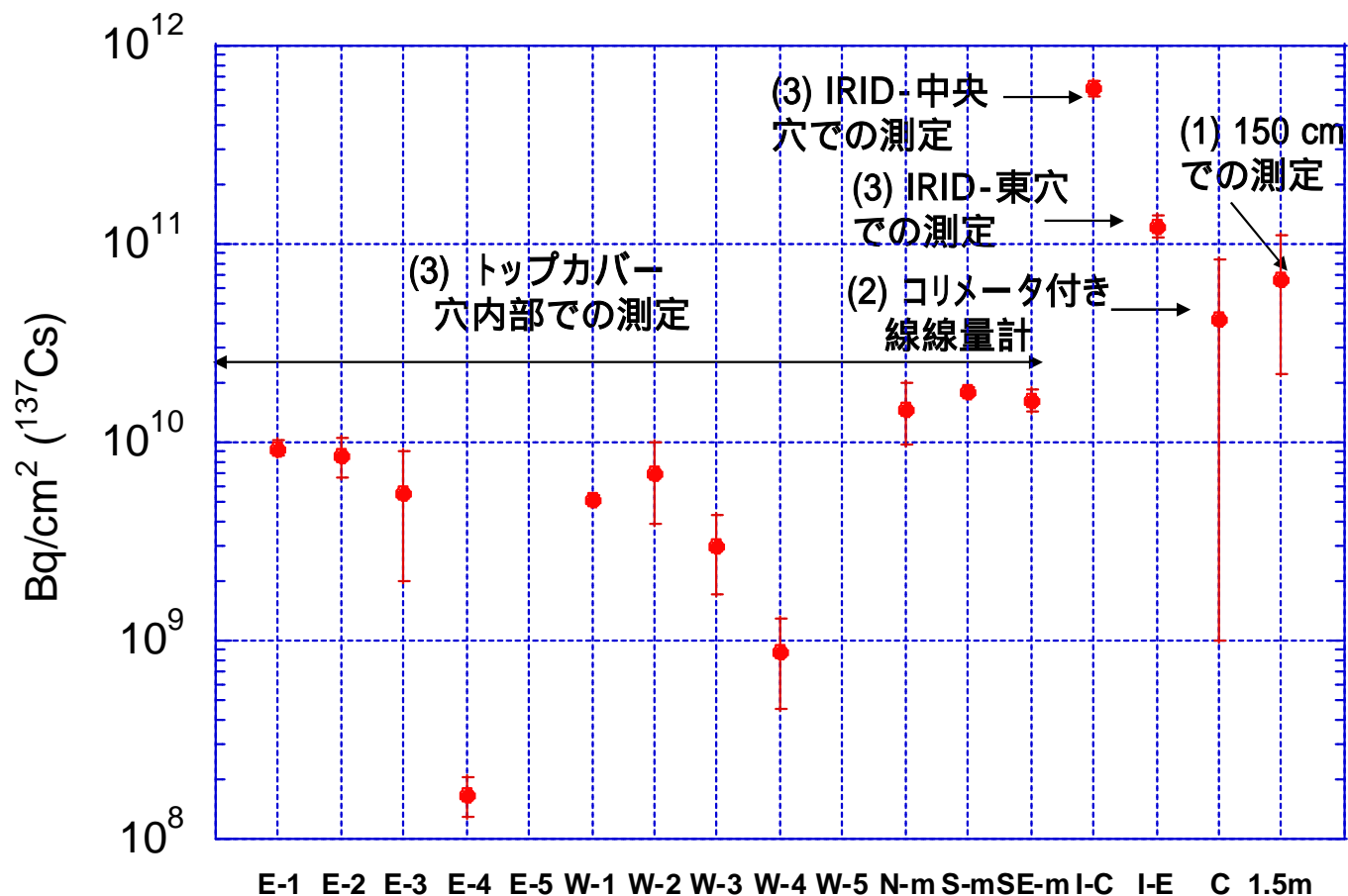
3-5 穴内測定のとまとめ

1. 測定されたIRID穴、新穿孔穴の穴内線量率分布の理解
室内汚染とトップカバー下面汚染の穴内線量率分布の組合せで決まる。
トップカバー下面汚染が大きいとき 出口に向かって減衰
床汚染が大きいとき 出口に向かって増加
2. 室内汚染とトップカバー下面汚染による周辺線量当量率をそれぞれ指数関数で近似
穴内部の測定結果を用いて最小二乗法により両面の汚染密度の推定を試みた
得られた汚染密度により、測定値を再現することが出来た
穴周辺の床の汚染密度が従来の測定から推定されていた汚染密度より高い結果に
汚染密度ばらつきが原因の可能性はあるが、得られている限られた情報だけでは、定量的な検討は難しい
使用した方法についての検討を含め、引き続き検討が必要である
解明されていない課題があるが、得られた結果からトップカバー下面汚染密度の理解
床上1.5mでの測定での汚染密度のばらつきより大きい
穴内測定では狭い範囲で見るのでさらに濃淡が大きいことが判明
床上線量率とトップカバー下面汚染密度の比較から
床上の線量率から、トップカバー下面の汚染密度を推定することは困難
床上3cmの測定は、トップカバー下面の汚染分布の大まかな推定には使用
3. これらの理解ができたことは穴内測定を行なった成果

4. 3種類の測定による推定の比較と検討

- 3種類の測定に基づく推定には特徴がある
 - 150 cm 高さでの周辺線量当量率による推定は、トップカバー下面の汚染全体の汚染状況を反映している
 - コリメータ付 線線量計は、床以外のオペフロ内壁汚染の影響を受けない測定で、床表面汚染の影響も半径15 cmという限られた領域で、トップカバー下面の大凡半径45 cm の領域の汚染状況を反映している
 - 穴内部の測定は、上記2つの平面での測定と異なり、垂直方向の分布であり、大凡トップカバー下面の半径50 cm の領域の汚染状況を反映している
- 新たに穿孔した穴内部の測定が行なわれたことは、新たな手法による測定を加えたという点から有益なものであった
- 3種類の測定とも、オペフロ内壁汚染の寄与の見積もりが必要であり、そのことが評価結果に影響している
 - 線量率が高くロボットによるリモートの対応によらざるを得ないことから、精密な位置や詳細な分布情報を得ることが難しい

3種類の測定によるトップカバー下面の汚染密度の比較



誤差表示

(1)の150cmでの周辺線量当量率と(2)のコリメータ付き線線量計のプロットは、シールドプラグ上の全推定値の最大と最小の中心値及び最大と最小

(3)の各穴での結果は、最小二乗法の推定と誤差

4. 3種類の測定による推定の比較と検討

- 穴内部の測定からの推定から、トップカバー下面の汚染密度のばらつきは、非常に大きいことが分った
- コリメータ付 線線量計による測定位置と穴の位置関係は明確ではないが、穴内部と同様に汚染密度にばらつきが大きいことを示している
- シールドプラグ全体を対象としている150 cm 位置での推定値が全体の推定値の範囲内にあることから、3種類の測定結果からの推定値間には整合性があると考えられる
- いずれの推定でも、オペフロ内壁の寄与の推定にはかなりの「不確かさ」があり、従って得られた汚染密度にも当然「不確かさ」があるが、トップカバー下面に大量の¹³⁷Csが存在していることは間違いないと言える
- 床表面近く(1.5 cmと3.0 cm)での周辺線量当量率がトップカバー下面の汚染密度と関係があることを前提にマッピングを行なった
 - 床表面の汚染密度のばらつきが大きく、また影響が想定以上に大きかったことも影響し、床表面近くの周辺線量当量率からトップカバー下面の汚染密度を推定することは難しい
 - マッピング結果は、トップカバー下面の汚染密度の大凡の状況を知る目的に使用

福島第一原子力発電所 2号機 シールドプラグの変形について

2022年9月6日

東京電力福島第一原子力発電所事故対策室

< 検討の背景 >

- 東京電力福島第一原子力発電所事故時の福島第一原子力発電所2号機（1F2号機）における放射性物質の放出経路の推定（シールドプラグのパーツ間のすき間が放射性物質の放出経路となりうるか）に係る検討を行うため、シールドプラグの形状測定及び測定結果に対する分析を実施した。

< 検討内容 >

- 1F2号機のシールドプラグの形状測定を実施し、シールドプラグの変形の有無等を確認する。
- 比較検討のため、同発電所5号機（1F5号機）、島根原子力発電所1号機（島根1号機）及び敦賀発電所1号機（敦賀1号機）（以下、これら3つをまとめて「他の3プラント」という。）のシールドプラグの形状測定を実施し、同様にシールドプラグの変形の有無等を確認する。
- 1F2号機と他の3プラントとのシールドプラグの形状測定結果を比較し、1F2号機のシールドプラグの変形の特異性等を分析する。

< 検討方法 >

- 3Dレーザースキャナ（FARO社製「Focus S350」）を用いて、各プラントのシールドプラグの形状に関するデータ（点群データ）を取得する。
- 取得したデータは、点群データ処理ソフト（FARO社製「SCENE」）により3Dモデルを構築した上で、点群データ解析ソフト（富士テクニカルリサーチ社製「Galaxy-Eye Modeler」）により、シールドプラグ上（4プラントとも同様の高さ位置）に仮想平面を作成し、仮想平面とシールドプラグ上の各位置との高低差を差分コンター図により示す。
- 各プラントの差分コンター図から、各プラントのシールドプラグの変形の有無等を確認する。
- 1F2号機の差分コンター図と他の3プラントの差分コンター図を比較して、1F2号機のシールドプラグの変形の特異性の有無等を確認・分析する。

< 誤差 >

- 今回用いたデータについて、3Dレーザースキャナの測定誤差は最大3.5mm（25m先での誤差）、点群データの合成時に生じた誤差は最大約5mm（点群データ内の最大値）であったため、cmオーダーの変形は有意な変形であると言える。

シールドプラグの変形の有無等(次ページ以降の図に関する補足)

- シールドプラグは、図1の黒点線(赤色の円部分の内側)が端部である。
- 図1の黒点線の外側(赤色の円部分)は、シールドプラグ周りの堰である(図2)。

シールドプラグ周りの堰は、シールドプラグよりも100mm程度高いため、差分コンター図では赤色(シールドプラグ上の基準点よりも50mm以上高い箇所)で示されている。

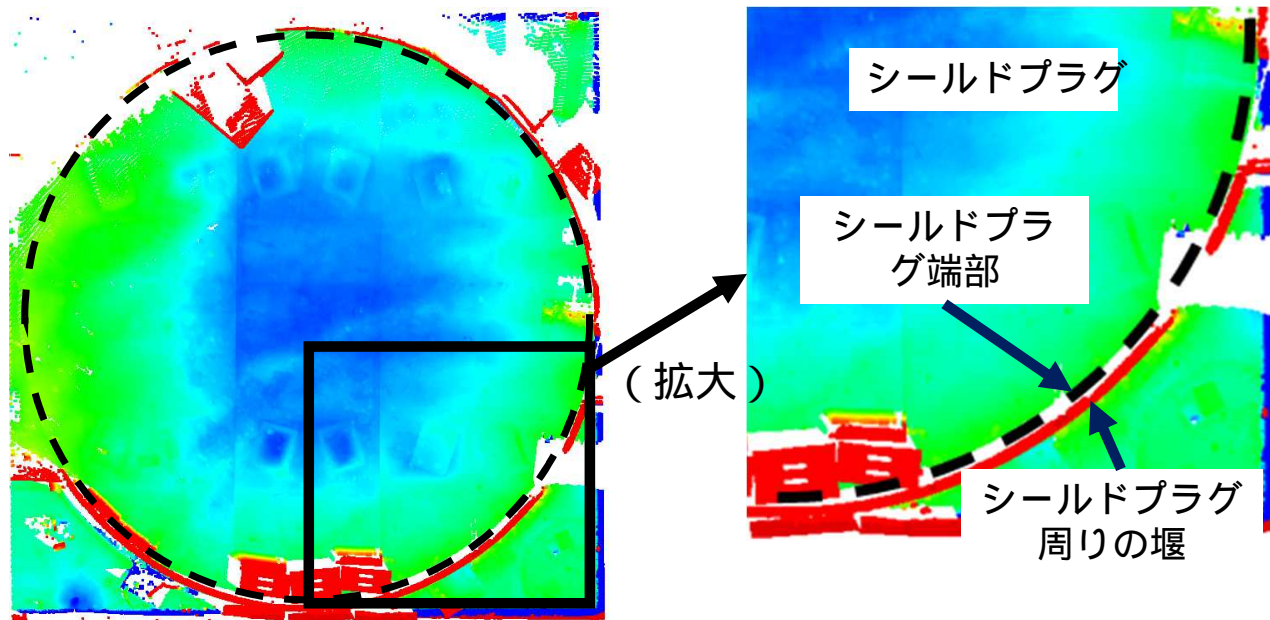


図1 差分コンター図のイメージ

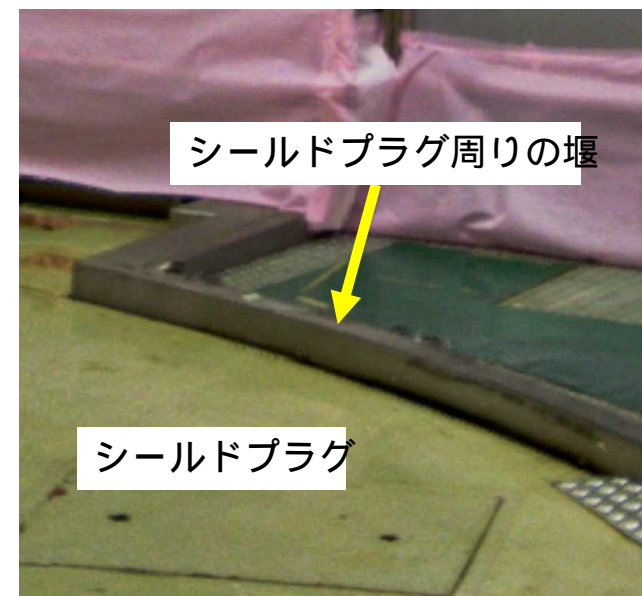
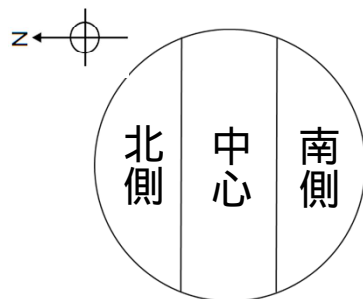


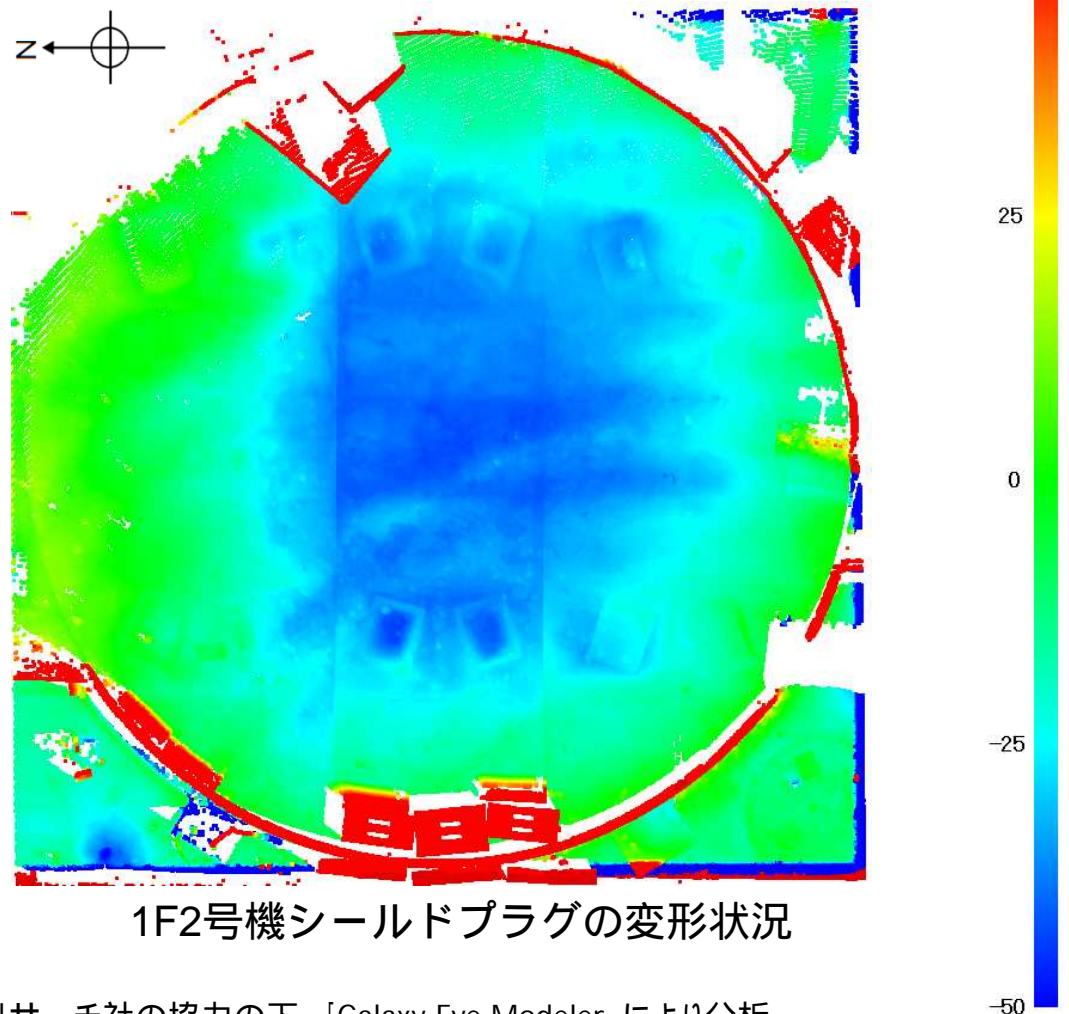
図2 シールドプラグ周りの堰(1F5号機の例)

シールドプラグの変形の有無等 (1F2号機)

- 端部から中心部に向けて落ち込みが見られる。
- 中心のパーツに加えて南側のパーツの一部の落ち込みが大きい。
- 東西方向よりも南北方向の方が落ち込みの程度が大きい。
- 北端から中心への落ち込みが最も大きい(最大60mm程度)。



頂部カバーの分割イメージ



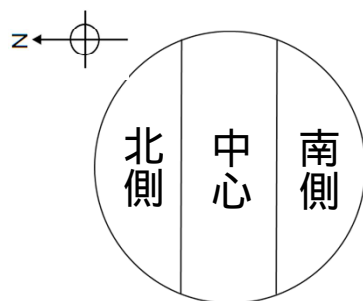
1F2号機シールドプラグの変形状況

2021年12月14日に原子力規制庁にて取得したデータを基に、富士テクニカルリサーチ社の協力の下、「Galaxy-Eye Modeler」により分析

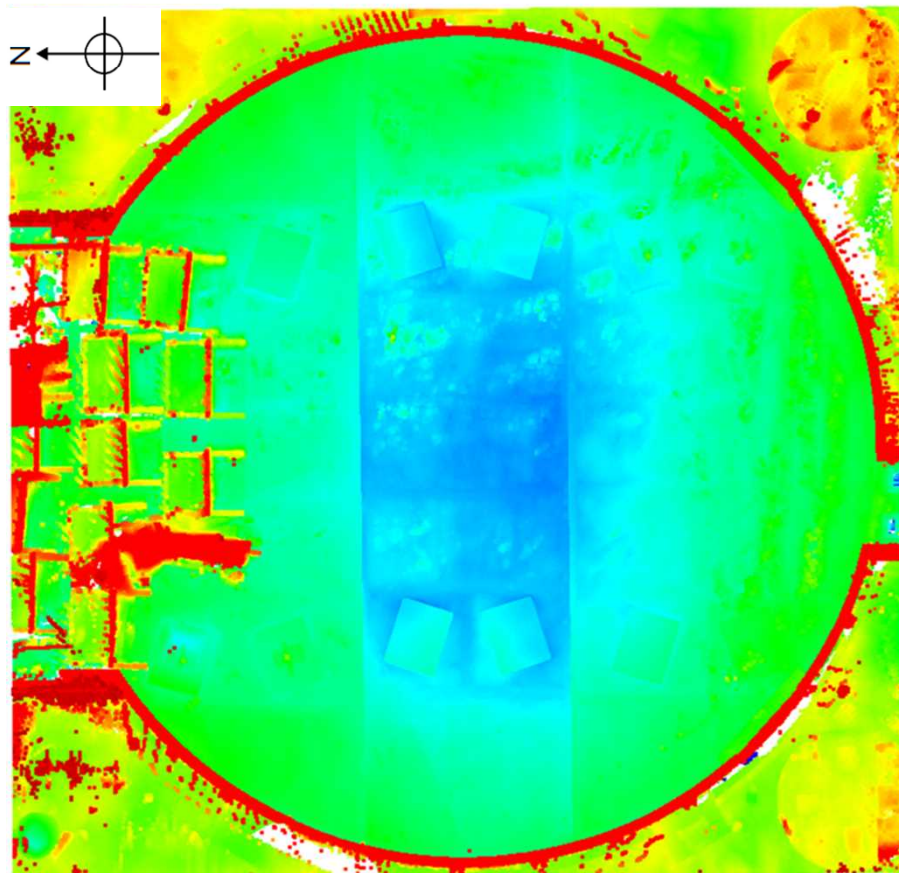
シールドプラグの変形の有無等 (1F5号機)

(単位: mm)

- 端部から中心部に向けて落ち込みが見られる。
- 中心のパーツの落ち込みが大きい。
- 東西方向よりも南北方向の方が落ち込みの程度が大きい。
- 南端から中心への落ち込みが最も大きい(最大45mm程度)。



頂部カバーの分割イメージ



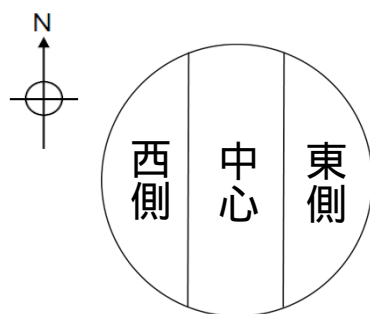
1F5号機シールドプラグの変形状況

2022年1月13日に原子力規制庁にて取得したデータを基に、富士テクニカルリサーチ社の協力の下、「Galaxy-Eye Modeler」により分析

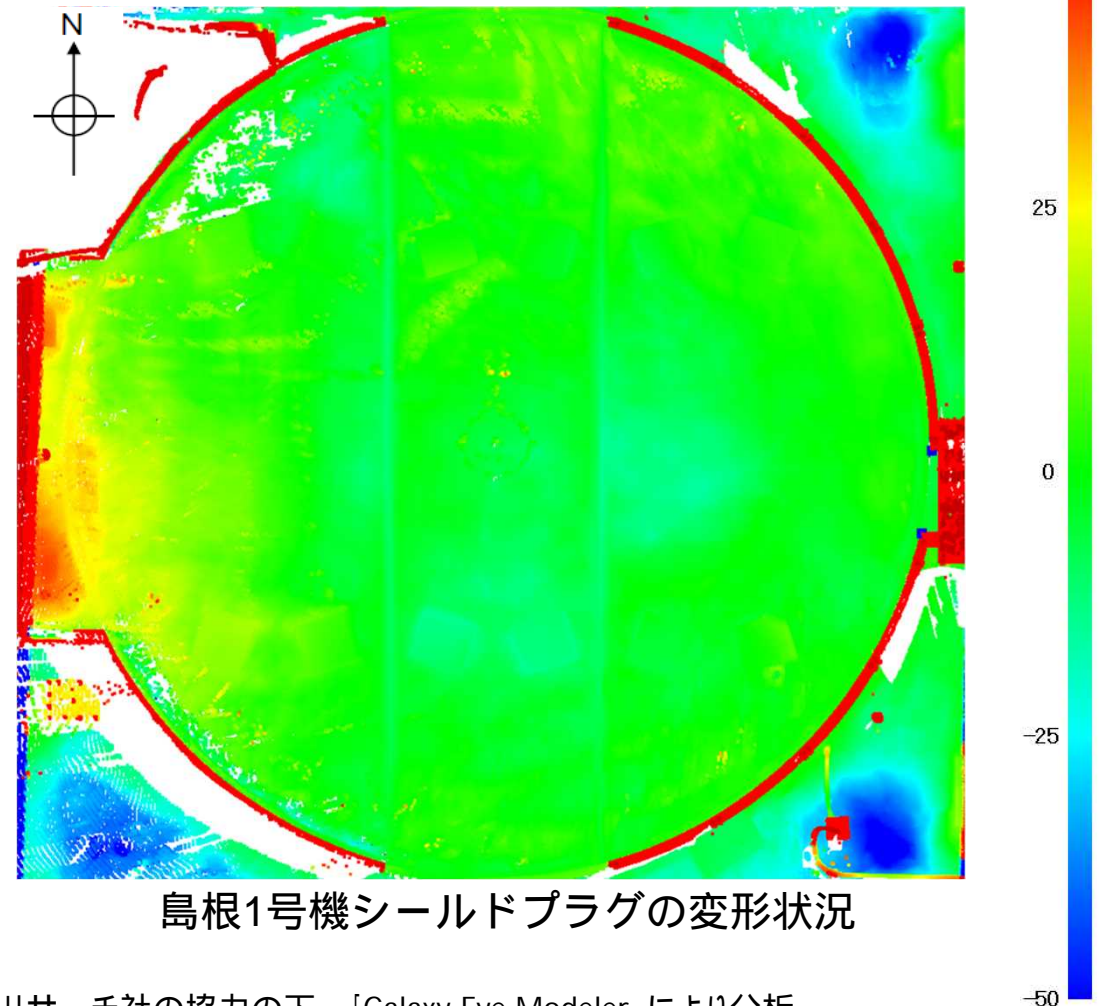
シールドプラグの変形の有無等 (島根1号機)

(単位: mm)

- DSピット側 (西側) 付近は中心付近に比べて最大30mm程度高くなっている。
- DSピット側付近以外は、概ね10mm程度以内の範囲に変形が収まっており、平坦である。
- パーツ間の高低差はほとんどない。



頂部カバーの分割イメージ



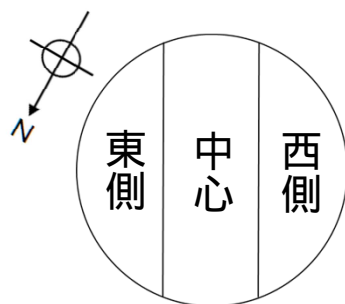
島根1号機シールドプラグの変形状況

2022年2月22日に原子力規制庁にて取得したデータを基に、富士テクニカルリサーチ社の協力の下、「Galaxy-Eye Modeler」により分析

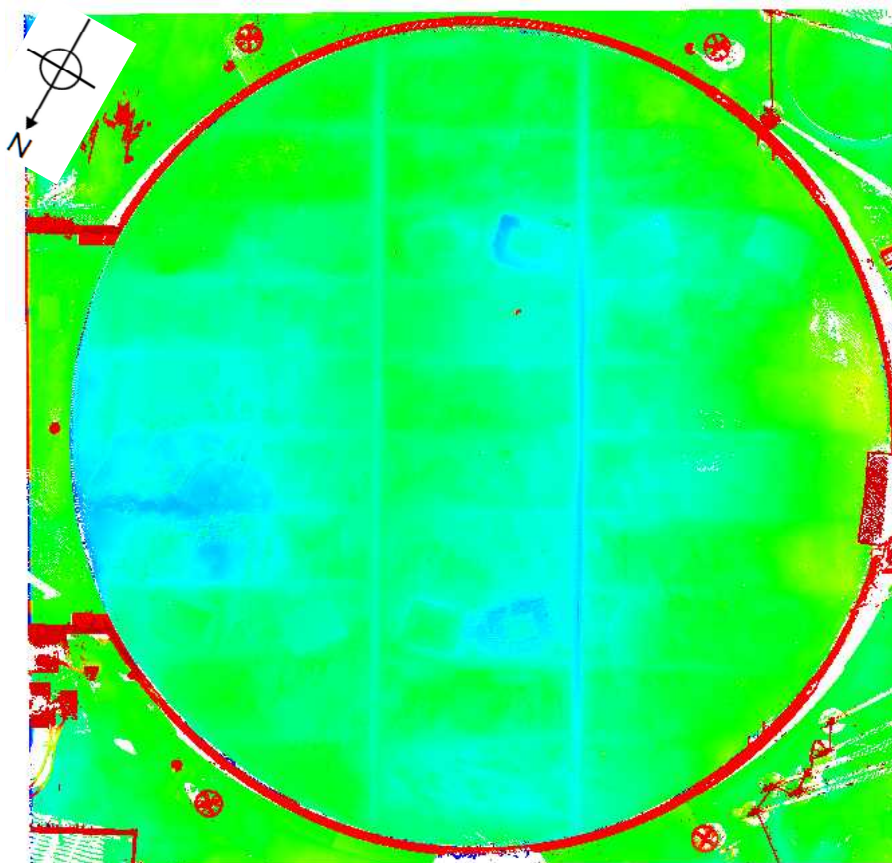
シールドプラグの変形の有無等 (敦賀1号機)

(単位: mm)

- DSピット側 (東側) 付近は中心付近に比べて最大40mm程度低くなっている。
- DSピット側付近以外は、概ね10mm程度以内の範囲に変形が収まっており、平坦である。
- パーツ間の高低差はほとんどない。
- パーツ間のすき間は、最大15mm程度。



頂部カバーの分割イメージ



敦賀1号機シールドプラグの変形状況

2022年4月8日に原子力規制庁にて取得したデータを基に、富士テクニカルリサーチ社の協力の下、「Galaxy-Eye Modeler」により分析

-50

-25

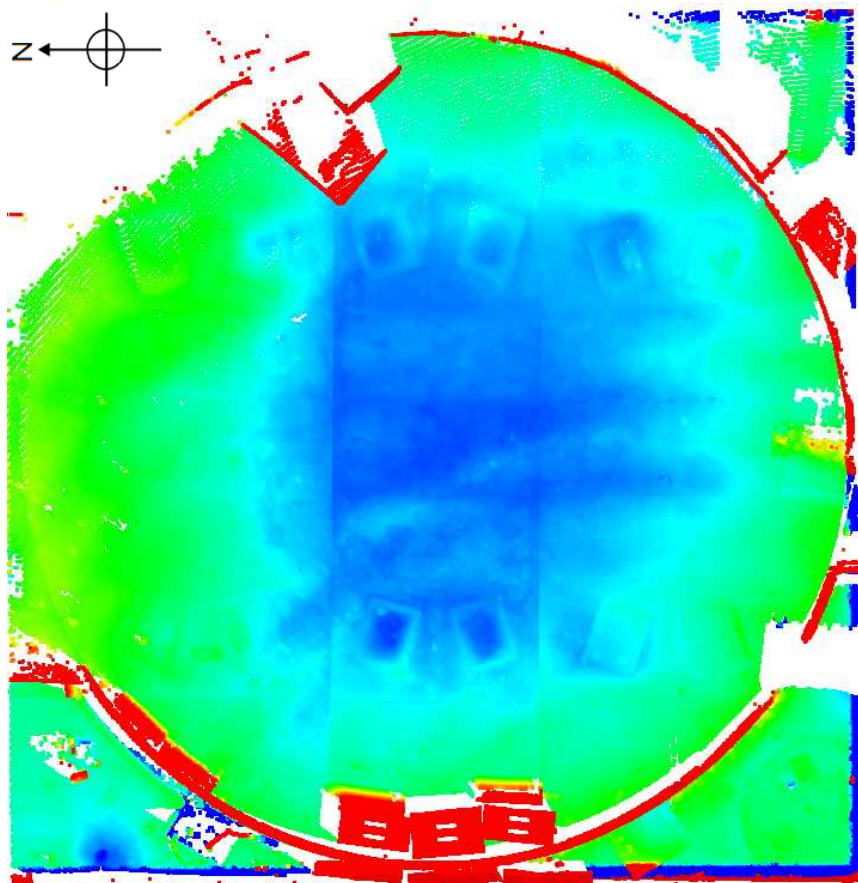
0

25

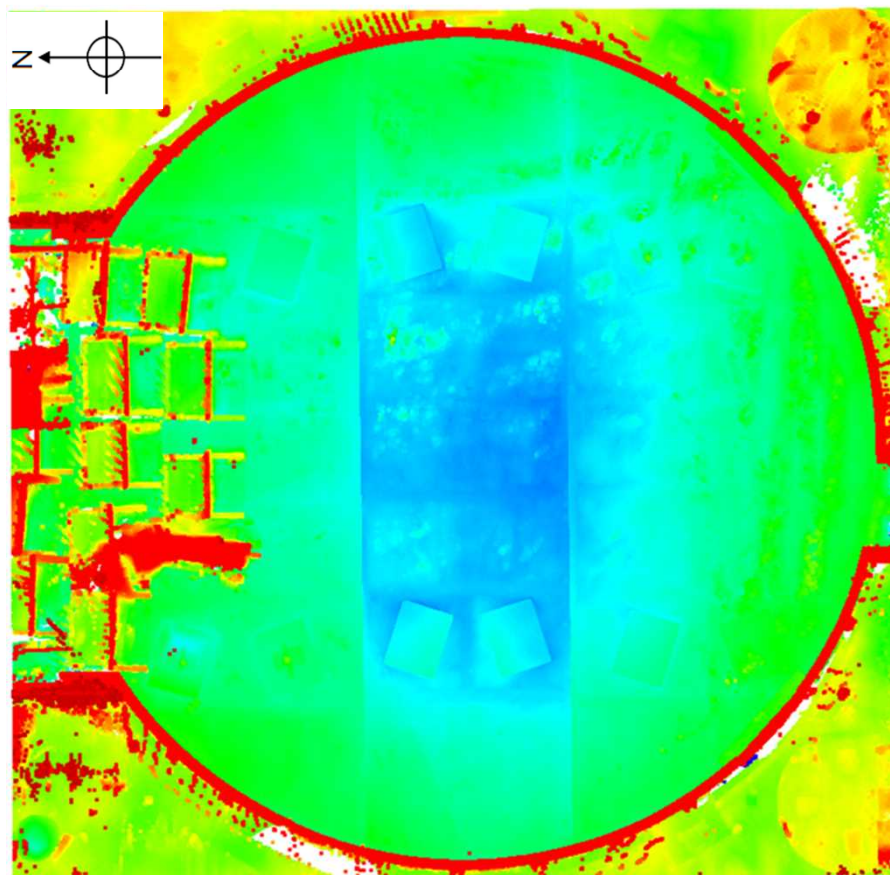
50

シールドプラグの形状比較 (1F2号機と1F5号機の比較)

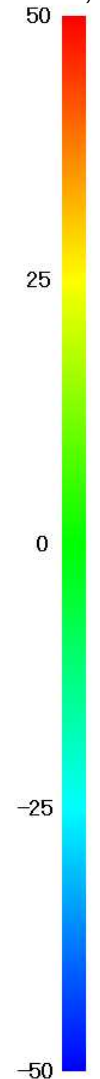
(単位: mm)



1F2号機シールドプラグの変形状況



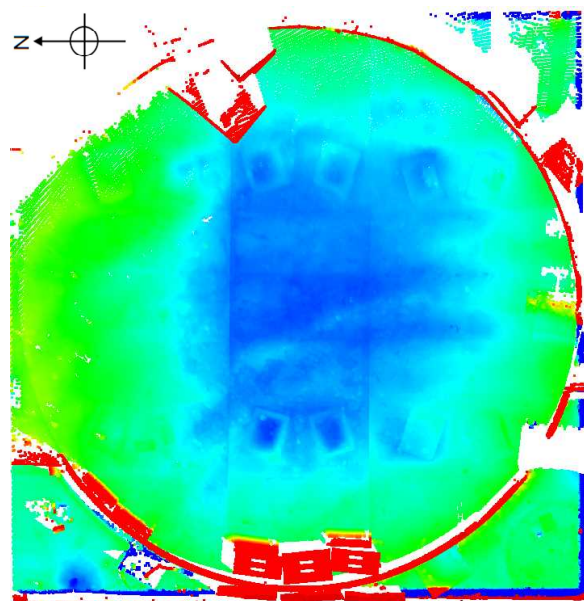
1F5号機シールドプラグの変形状況



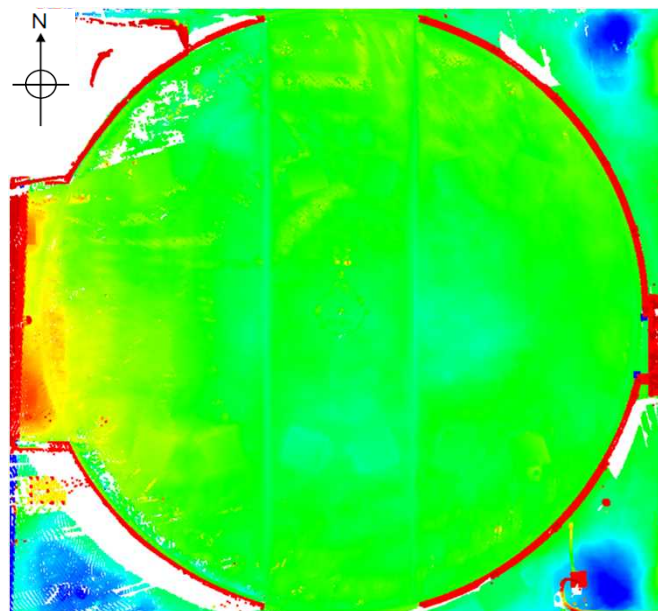
50

シールドプラグの形状比較 (1F2号機、島根1号機及び敦賀1号機の比較)

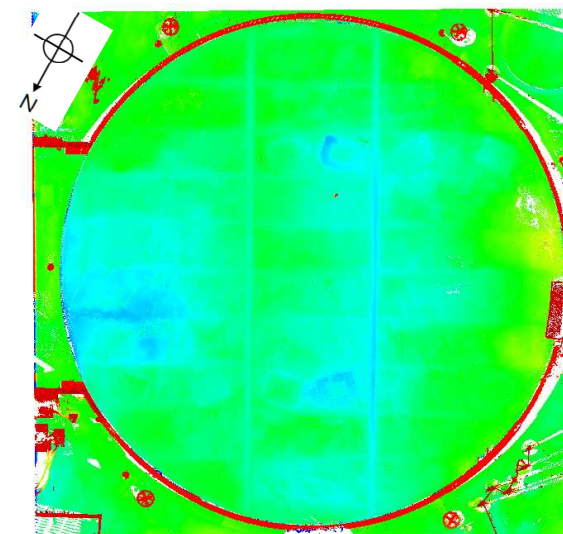
(単位: mm)



1F2号機シールドプラグの変形状況



島根1号機シールドプラグの変形状況



敦賀1号機シールドプラグの変形状況

図の大小関係 = シールドプラグの大小関係 (各プラントのシールドプラグの大きさは後述「シールドプラグ等の設計情報」を参照のこと)。

-50

-25

0

25

50

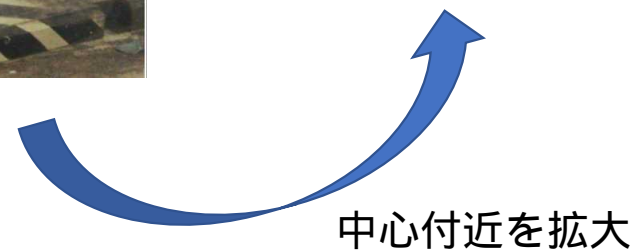
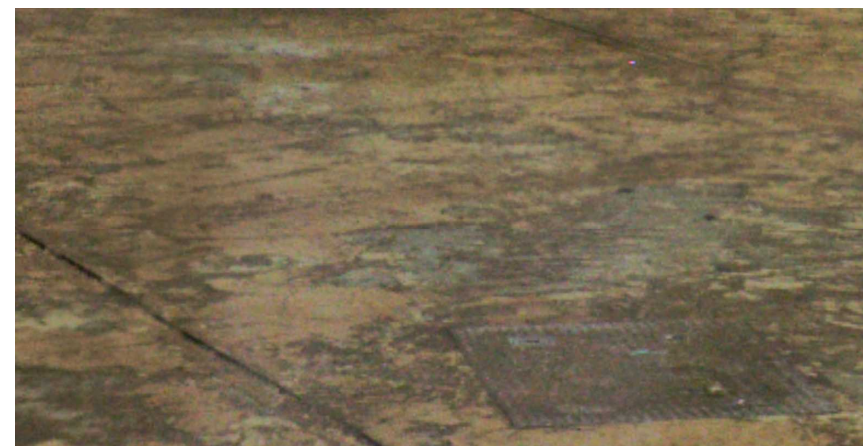
<シールドプラグの形状比較（1F2号機のシールドプラグの変形の特異性）>

- 1F2号機及び1F5号機のシールドプラグは、端部から中心部に向かって落ち込んでいる形状となっており、また、中心のパーツの落ち込みが両端（北側及び南側）の2つのパーツよりも大きくなっている。特に1F2号機のシールドプラグは、1F5号機よりもその程度が大きい。
- 島根1号機及び敦賀1号機のシールドプラグは、端部（特にDSピット側）で高低差が生じているが、シールドプラグのパーツ間のすき間部分も含めて、全体的には概ね平坦である。

<シールドプラグの形状比較を踏まえた考察>

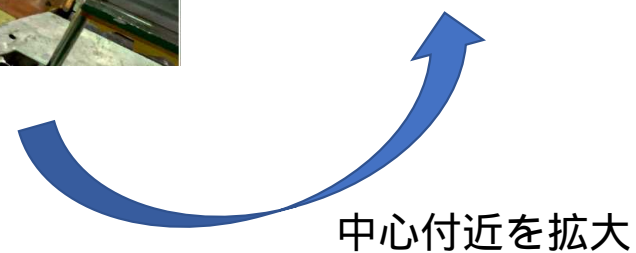
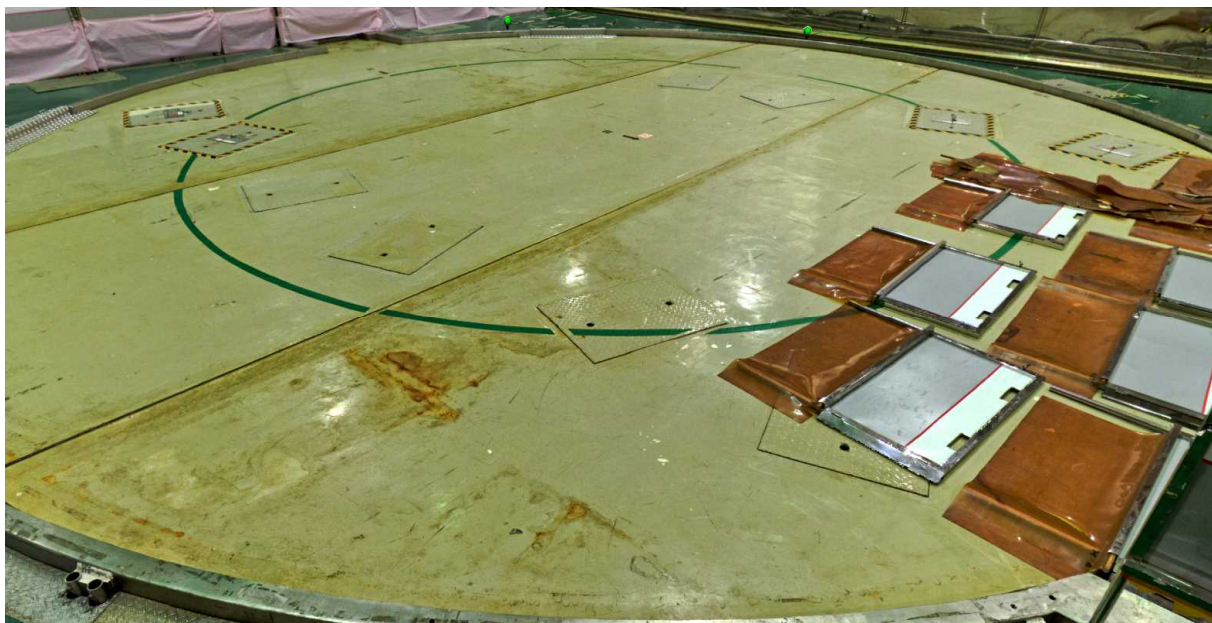
- 1F2号機のシールドプラグは、中心のパーツの落ち込みが両端の2つのパーツよりも大きく、この種の変形により、シールドプラグのパーツ間のすき間に流路が生じ、当該箇所が放射性物質の放出経路になったと考えられる。
- 形状測定を実施したいずれのプラントのシールドプラグともに、表面には目立ったひび割れは確認されなかった（各プラントのシールドプラグ表面の状況は、次ページ以降を参照のこと）。そのため、形状測定により確認された変形は、シールドプラグ施工後に生じうる外力（熱的影響、物理的影響等）により生じたものでないと考えられるが、シールドプラグの変形要因は、はっきりしていない。

シールドプラグ表面の状況（1F2号機）



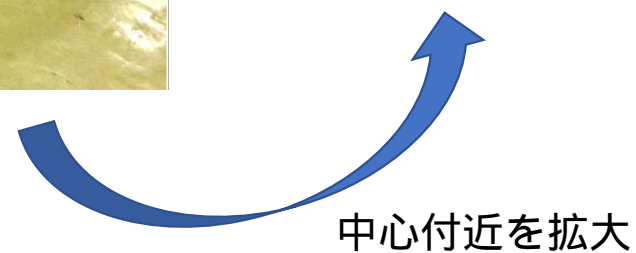
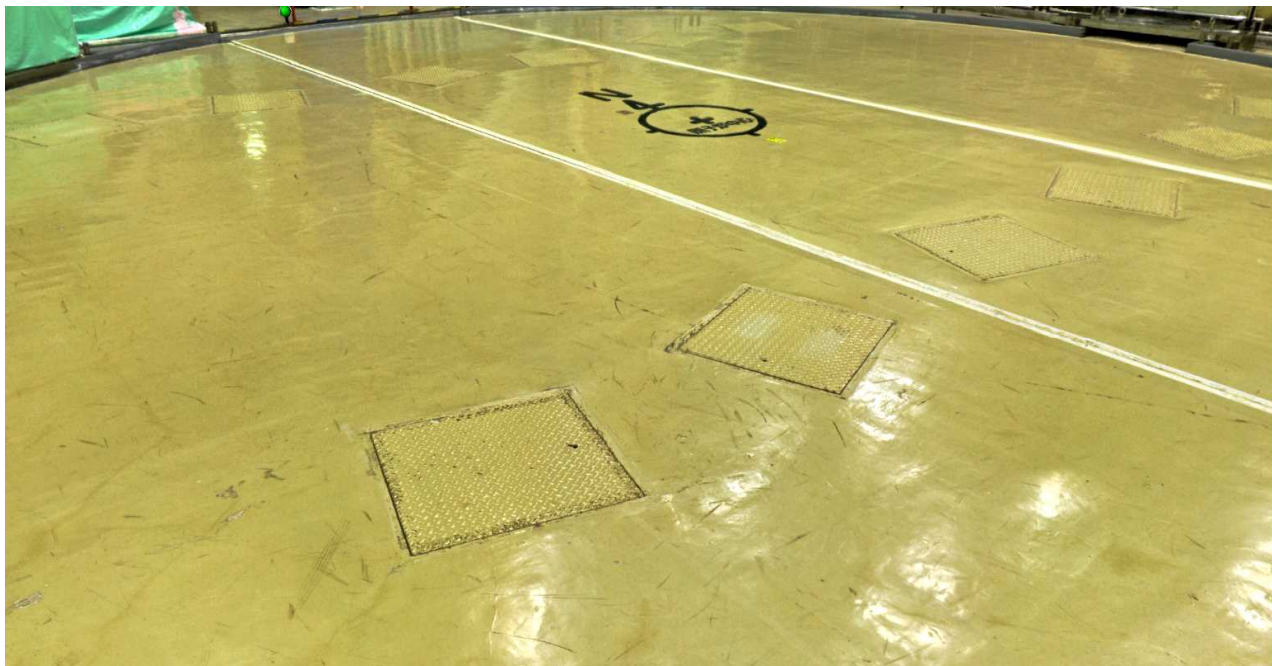
写真は、いずれも2021年12月14日に原子力規制庁撮影

シールドプラグ表面の状況（1F5号機）



写真は、いずれも2022年1月13日に原子力規制庁撮影

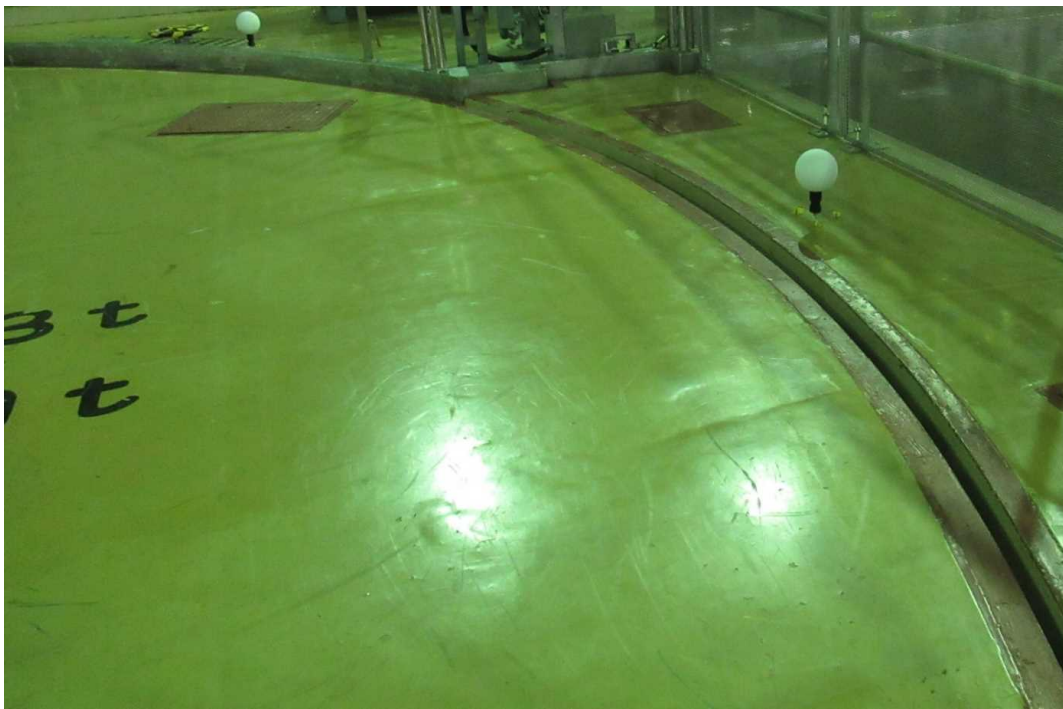
シールドプラグ表面の状況（島根1号機）



中心付近を拡大

写真は、いずれも2022年2月22日に原子力規制庁撮影

シールドプラグ表面の状況（敦賀1号機）



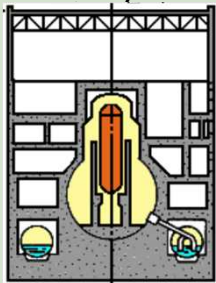
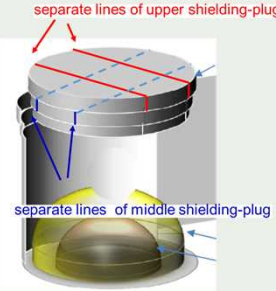
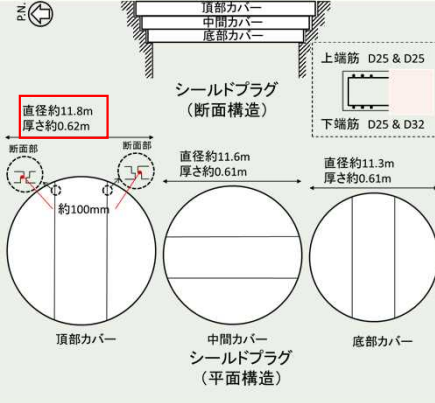
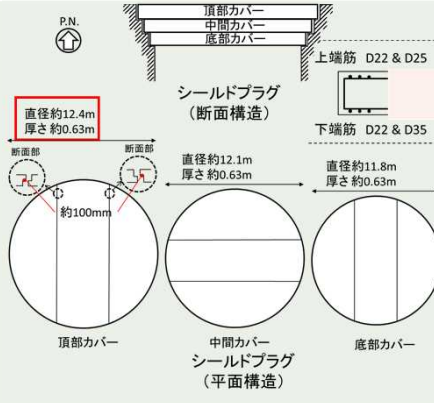
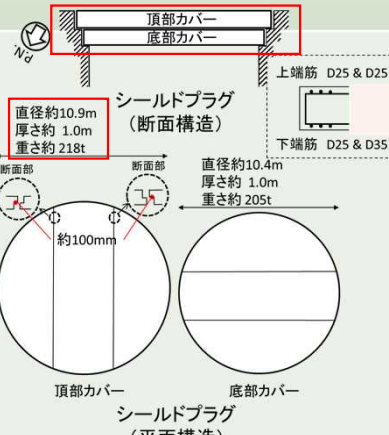
2022年4月8日の原子力規制庁調査時に日本原子力発電が撮影



2022年4月8日に原子力規制庁撮影

表面を拡大

シールドプラグ等の設計情報

	福島第一 2号機	福島第一 5号機	島根 1号機	敦賀 1号機
電気出力 (MWe)	784	784	460	357
原子炉形式	BWR-4	BWR-4	BWR-3	BWR-2
格納容器形式		マーク	マーク	マーク
シールドプラグ構造等	 <p>直径約11.8m 厚さ約0.62m 重さ約165t</p> <p>シールドプラグ (断面構造)</p> <p>上端筋 D25 & D25 下端筋 D25 & D32</p> <p>直径約11.6m 厚さ約0.61m 重さ約155t 直径約11.3m 厚さ約0.61m 重さ約145t</p> <p>頂部カバー 中間カバー シールドプラグ (平面構造) 底部カバー</p>	 <p>直径約11.8m 厚さ約0.62m</p> <p>シールドプラグ (断面構造)</p> <p>上端筋 D25 & D25 下端筋 D25 & D32</p> <p>直径約11.6m 厚さ約0.61m 直径約11.3m 厚さ約0.61m</p> <p>頂部カバー 中間カバー シールドプラグ (平面構造) 底部カバー</p>	 <p>直径約12.4m 厚さ約0.63m</p> <p>シールドプラグ (断面構造)</p> <p>上端筋 D22 & D25 下端筋 D22 & D35</p> <p>直径約12.1m 厚さ約0.63m 直径約11.8m 厚さ約0.63m</p> <p>頂部カバー 中間カバー シールドプラグ (平面構造) 底部カバー</p>	 <p>直径約10.9m 厚さ約1.0m 重さ約218t</p> <p>シールドプラグ (断面構造)</p> <p>上端筋 D25 & D25 下端筋 D25 & D35</p> <p>直径約10.4m 厚さ約1.0m 重さ約205t</p> <p>頂部カバー シールドプラグ (平面構造) 底部カバー</p>

ECCSはBWR-4の設計

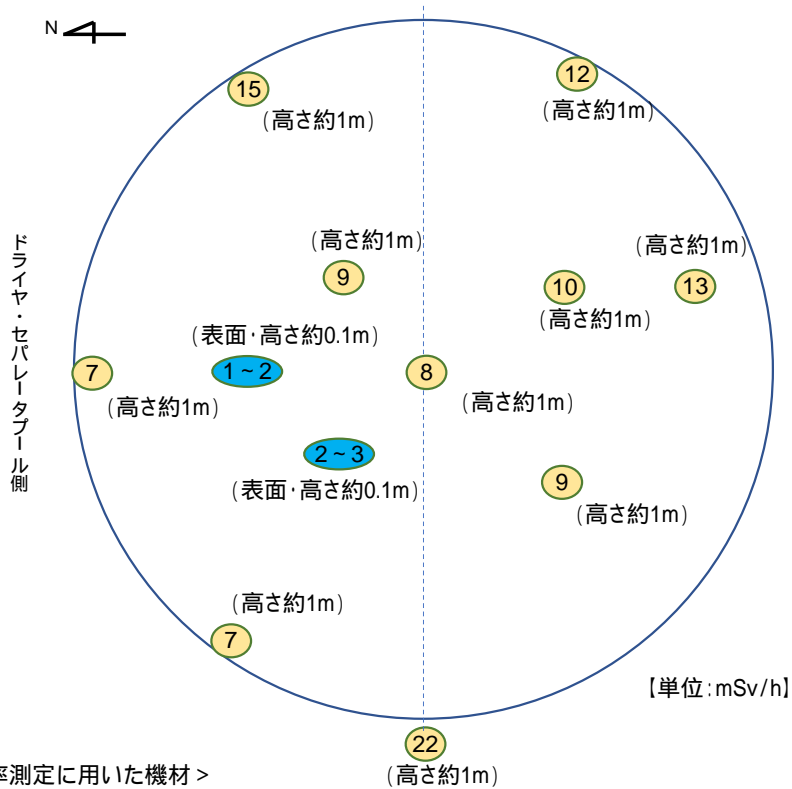
出典：原子力安全研究協会（編）：軽水炉発電所のあらし（改訂版）（平成4年10月）、

遮へい措置後のシールドプラグ上の 線量率測定結果

2022年9月6日

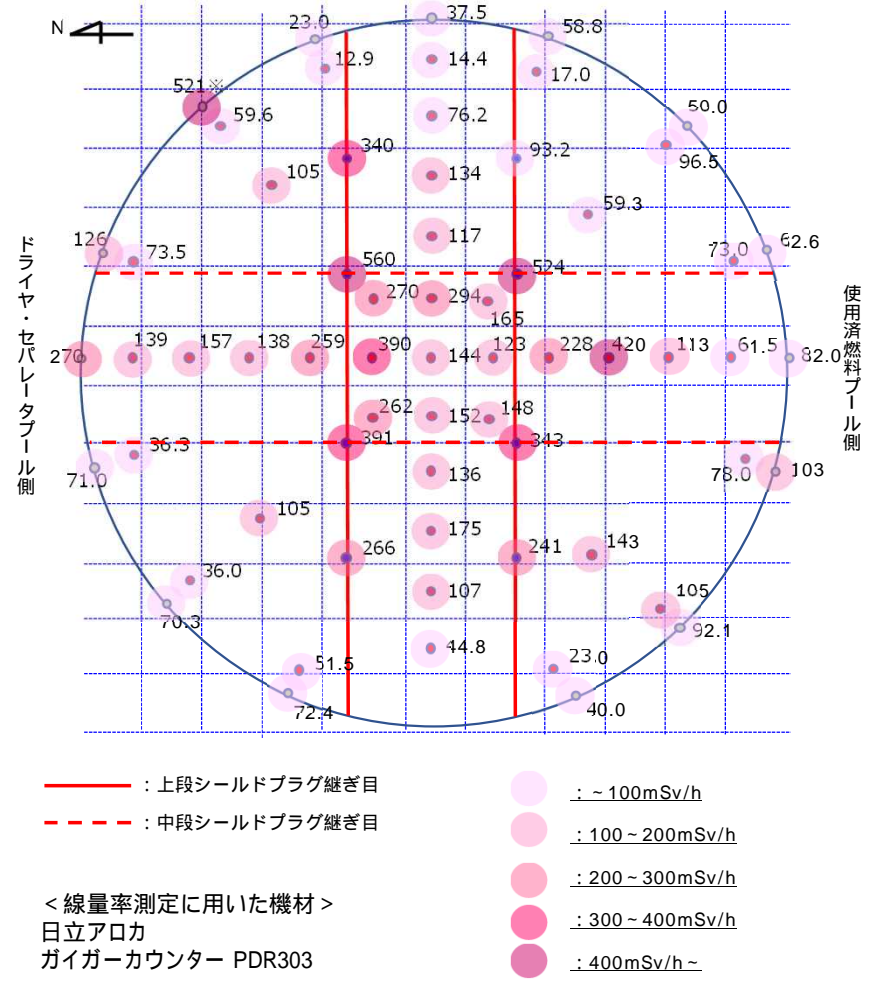
東京電力福島第一原子力発電所事故対策室

遮へい措置後のシールドプラグ上の線量率測定結果
(2022年5月12日、原子力規制庁による測定)



<線量率測定に用いた機材>
日立アロカ
電離箱式サーベイメータ ICS-1323

(参考)シールドプラグ表面の線量率測定結果
(2021年10月7日、東京電力HDによる測定)



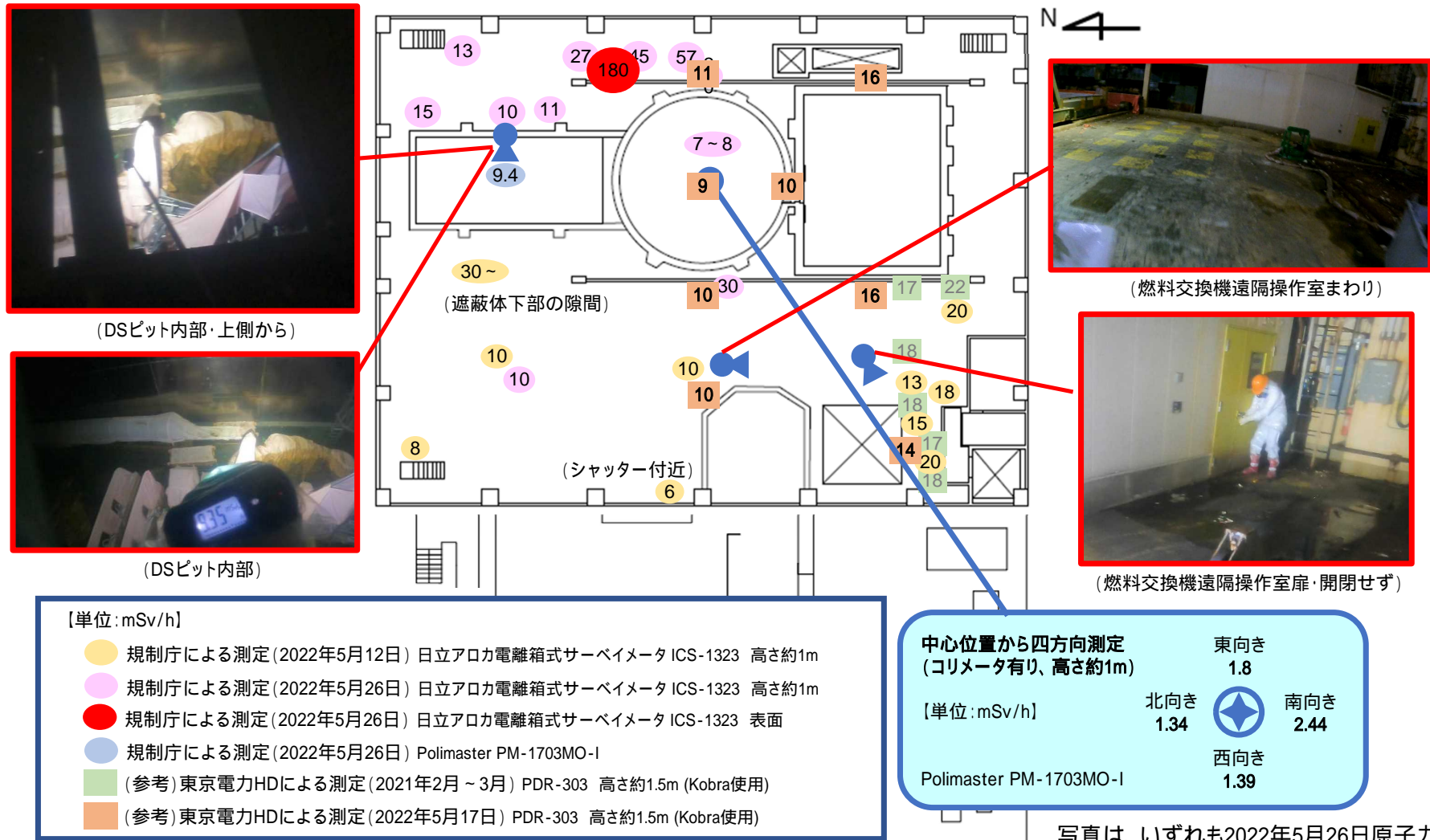
— : 上段シールドプラグ継ぎ目
- - - : 中段シールドプラグ継ぎ目

<線量率測定に用いた機材>
日立アロカ
ガイガーカウンター PDR303

○ : $\sim 100\text{mSv/h}$
○ : $100 \sim 200\text{mSv/h}$
○ : $200 \sim 300\text{mSv/h}$
○ : $300 \sim 400\text{mSv/h}$
○ : $400\text{mSv/h} \sim$

出典: 現地調査の実施状況について(2022年6月30日、東京電力福島第一原子力発電所
事故対策室(第30回事務分析検討会資料3-1))(一部加筆修正)

2号機原子炉建屋5階の状況（線量率測定結果）



写真は、いずれも2022年5月26日原子力規制庁撮影

出典: 現地調査の実施状況について (2022年6月30日、東京電力福島第一原子力発電所事故対策室 (第30回事故分析検討会資料3-1))