

# 1号機オペレーションフロアに充満した 放射性同位元素による周辺への線量の検討

2023年10月30日

東京電力福島第一原子力発電所事故対策室

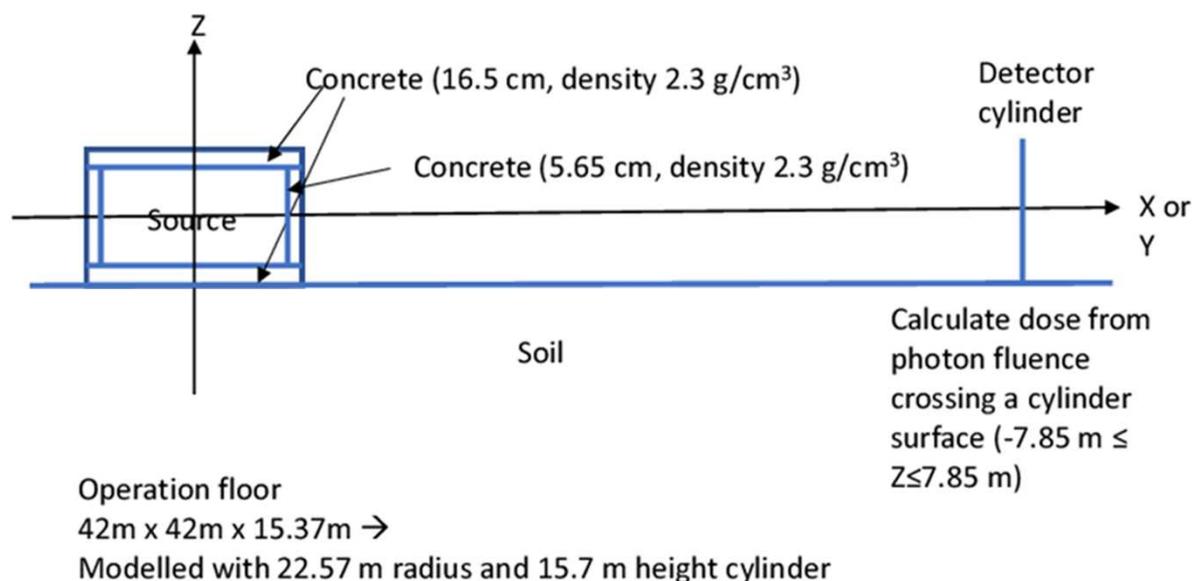
# 検討内容

- 東京電力ホールディングス株式会社は、MP-8や3号機SGTSモニタのように、2～4号機の原子炉建屋の影響を受ける場所を含めた計算を実施している。
  - ・放射性希ガス、放射性ヨウ素、放射性セシウム及び放射性テルルによる周辺線量当量率を計算
  - ・核種毎の移行割合は、原子力規制委員会の審査ガイドを基に、希ガス:100 %、ヨウ素とセシウム:18 %、テルルとアンチモン:9 %に設定
  - ・線量率に支配的に寄与するヨウ素・セシウムの移行量は炉心インベントリーの0.43 %程度という結果を得、事故進展の推定と整合しているとしている
  
- 原子炉建屋の影響を受けない場所を対象に簡単な形状で計算\*
  - ・放射性核種毎の寄与を調べる
  - ・東京電力の計算で用いられたMCNPと異なるモンテカルロ計算コードegs5を使用し、比較検討する
  - ・敷地外の福島県MPへの影響を調べる
    - ・遠方での計算では、崩壊当たりの放出率が小さくてもエネルギーの高い $\gamma$ 線の寄与が重要なので、放出 $\gamma$ 線の情報としてICRP-107のデータを使用

\*H. Hirayama, "Skyshine Calculation with egs5 code due to  $\gamma$ -rays from Radionuclides Distributed Uniformly Inside Operation Floor of Unit-1 of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station", KEK Report 2018-3, March, 2019.

# 計算方法

- 正門付近やMP-7から見た場合に、1号機のオペレーションフロアは、地面上に体積線源が存在する状態に近いことに着目し、地面上に円柱状の線源（オペレーションフロアと同体積）がある形状とし、円環帯状の検出領域での平均値を使うことにより計算を効率化し、egs5を用いて放射性核種毎の計算を行なった。
  - ・ 直接線・スカイシャイン線の核種毎の寄与の違いを明確にするために、核種毎に計算を行なった
  - ・ 各核種から放出される $\gamma$ 線のエネルギーについては、放出率の小さい $\gamma$ 線まで網羅しているICRP-107のデータを使用



号機	対象	厚さ[cm]	密度 [g/cc]
1号機	天井	14	2.71
	壁	5.14	2.53
2号機	天井	16	2.59
	壁	20	2.40
3号機	天井	16	2.56
	壁	30	2.40
4号機	天井	16	2.48
	壁	25	2.40

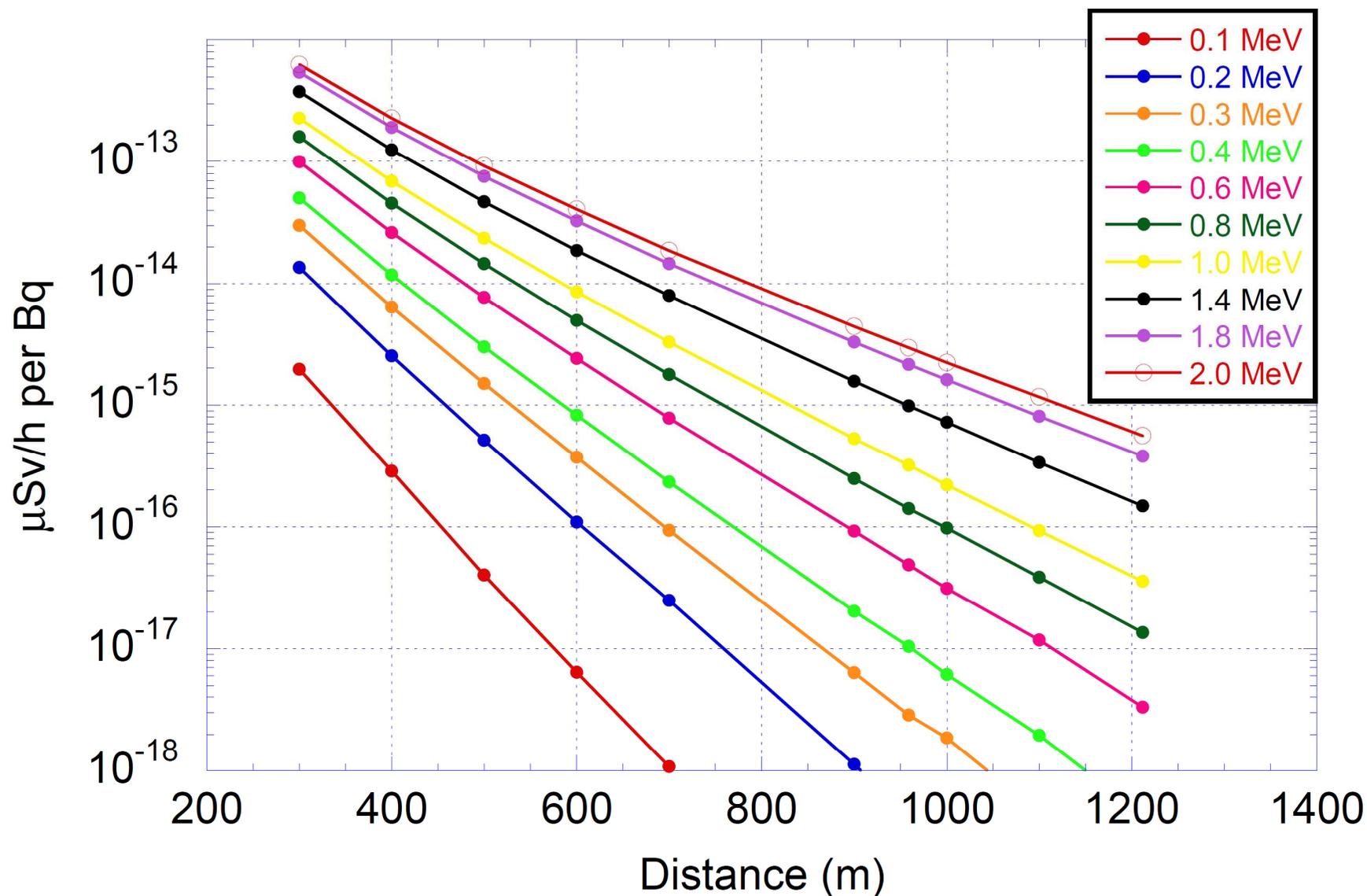
壁・天井は、TEPCOの計算で使用した上記の値と同じ重量(g/cm<sup>2</sup>)になる密度2.3 g/cm<sup>3</sup>のコンクリートとした。

# 東京電力HDの計算結果との比較

- 崩壊当たりの $\gamma$ 線情報の影響
  - ・ 東京電力HDが使用した情報とICRP-107の情報に基づく結果をegs5で比較
  - ・ 放射性ヨウ素、放射性テルルで違いが大
- 正門付近での合計周辺線量当量率の比較
  - ・ 東京電力HDのコア中放射能データを使用
  - ・ コア中の放射能の、希ガス：2.37 %、ヨウ素：0.43 %、セシウム：0.43 %、アンチモン：0.22 %、テルル：0.22 %
  - ・ egs5形状での結果は、東京電力HDが用いた形状での結果の79 %で概ね一致

Aound main gate at 959 m	$\mu\text{Sv/h}$			
	egs5 calculation		TEPCO	Measured
	Use ICRP-107 data	use TEPCO source	MCNP	
Rare-gas	0.290 $\pm$ 0.010	0.296 $\pm$ 0.022		
I	5.08 $\pm$ 0.17	3.47 $\pm$ 0.07		
Cs	0.543 $\pm$ 0.022	0.538 $\pm$ 0.010		
Te	0.117 $\pm$ 0.008	0.0621 $\pm$ 0.0033		
Sb	0.0427 $\pm$ 0.0015	0.0306 $\pm$ 0.0005		
Total	6.07	4.40	5.6	5.5

# γ線のエネルギーによる散乱線・スカイシャイン線による周辺線量当量率の違い (崩壊に伴い当該エネルギーのγ線が1個放出されとした場合)



# 正門付近での2011年3月12日午前7時での比較

コアインベントリーとしてJAEAデータ\*を使用

Aound main gate at 959 m	% of Bq/core	Avtivity in floor (Bq)	μSv/h	
			egs5 results	Measured
Kr-88	2.37	7.08E+13	0.213 ± 0.002	
Xe-135	2.37	1.75E+16	0.0431 ± 0.0031	
Xe-135m	2.37	8.72E+14	0.0208 ± 0.0006	
I-130	0.43	2.16E+13	0.0058 ± 0.0001	
I-131	0.43	5.42E+15	0.0647 ± 0.0058	
I-132	0.43	6.97E+15	3.59 ± 0.09	
I-133	0.43	5.63E+15	0.414 ± 0.018	
I-135	0.43	9.20E+14	0.954 ± 0.013	
Cs-134	0.43	8.17E+14	0.196 ± 0.006	
Cs-136	0.43	2.21E+14	0.121 ± 0.003	
Cs-137	0.43	8.69E+14	0.0538 ± 0.0020	
Sb-124	0.22	1.12E+12	0.0014 ± 0.00001	
Sb-125	0.22	2.40E+13	0.0006 ± 0.00003	
Sb-126	0.22	1.43E+12	0.0005 ± 0.00001	
Sb-127	0.22	2.04E+14	0.0150 ± 0.0004	
Sb-128	0.22	5.85E+12	0.0029 ± 0.0001	
Sb-129	0.22	2.14E+13	0.0123 ± 0.0002	
Te-131	0.22	8.93E+13	0.0054 ± 0.0004	
Te-131m	0.22	3.96E+14	0.171 ± 0.0040	
Te-132	0.22	3.45E+15	0.0043 ± 0.0014	
Total			5.89	5.5

コアインベントリーとしてTEPCOのデータを使用

Aound main gate at 959 m	% of Bq/core	Avtivity in floor	μSv/h	
			egs5 results	Measured
Kr-88	2.37	7.73E+13	0.226 ± 0.002	
Xe-135	2.37	1.79E+16	0.0441 ± 0.0032	
Xe-135m	2.37	8.48E+14	0.0203 ± 0.0006	
I-130	0.43	4.38E+13	0.0117 ± 0.0003	
I-131	0.43	5.45E+15	0.0651 ± 0.0059	
I-132	0.43	6.98E+15	3.60 ± 0.093	
I-133	0.43	5.63E+15	0.413 ± 0.018	
I-135	0.43	9.56E+14	0.991 ± 0.014	
Cs-134	0.43	1.19E+15	0.285 ± 0.009	
Cs-136	0.43	3.75E+14	0.206 ± 0.005	
Cs-137	0.43	8.46E+14	0.0524 ± 0.0019	
Sb-124	0.22	3.68E+12	0.0044 ± 0.0000	
Sb-125	0.22	5.12E+13	0.0013 ± 0.0001	
Sb-126	0.22	2.94E+12	0.0010 ± 0.0000	
Sb-127	0.22	2.68E+14	0.0197 ± 0.0006	
Sb-128	0.22	6.86E+12	0.0034 ± 0.0001	
Sb-129	0.22	2.21E+13	0.0127 ± 0.0002	
Te-131	0.22	6.02E+13	0.0036 ± 0.0003	
Te-131m	0.22	2.51E+14	0.1082 ± 0.0025	
Te-132	0.22	3.46E+15	0.0043 ± 0.0014	
Total			6.07	5.5

\*西原 健司、岩元 大樹、須山 賢也、“福島第一原子力発電所の燃料組成評価”、JAEA-Data/Code 2012-018, Japan Atomic Energy Agency (2012)

# MP-7での2011年3月12日午前7時での比較

コアインベントリーとしてJAEAデータ\*を使用

MP-7 at 1000 m	% of activity in core	Activity in floor (Bq)	μGy/h	
			egs5 results	Measured
Kr-88	2.37	7.08E+13	0.137 ± 0.0014	
Xe-135	2.37	1.75E+16	0.0198 ± 0.0019	
Xe-135m	2.37	8.72E+14	0.0091 ± 0.0003	
I-130	2.37	2.16E+13	0.0028 ± 0.0001	
I-131	0.43	5.42E+15	0.0320 ± 0.0032	
I-132	0.43	6.97E+15	2.10 ± 0.07	
I-133	0.43	5.63E+15	0.226 ± 0.012	
I-135	0.43	9.20E+14	0.560 ± 0.009	
Cs-134	0.43	8.17E+14	0.0953 ± 0.0040	
Cs-136	0.43	2.21E+14	0.0670 ± 0.0018	
Cs-137	0.43	8.69E+14	0.0266 ± 0.0015	
Sb-124	0.22	1.12E+12	0.0008 ± 0.00001	
Sb-125	0.22	2.40E+13	0.0003 ± 0.00001	
Sb-126	0.22	1.43E+12	0.0002 ± 0.00001	
Sb-127	0.22	2.04E+14	0.0068 ± 0.0003	
Sb-128	0.22	5.85E+12	0.0015 ± 0.0001	
Sb-129	0.22	2.14E+13	0.0071 ± 0.0001	
Te-131	0.22	8.93E+13	0.0050 ± 0.0004	
Te-131m	0.22	3.96E+14	0.0969 ± 0.0031	
Te-132	0.22	3.45E+15	0.0008 ± 0.0003	
Total			3.40	1 - 2

コアインベントリーとしてTEPCOのデータを使用

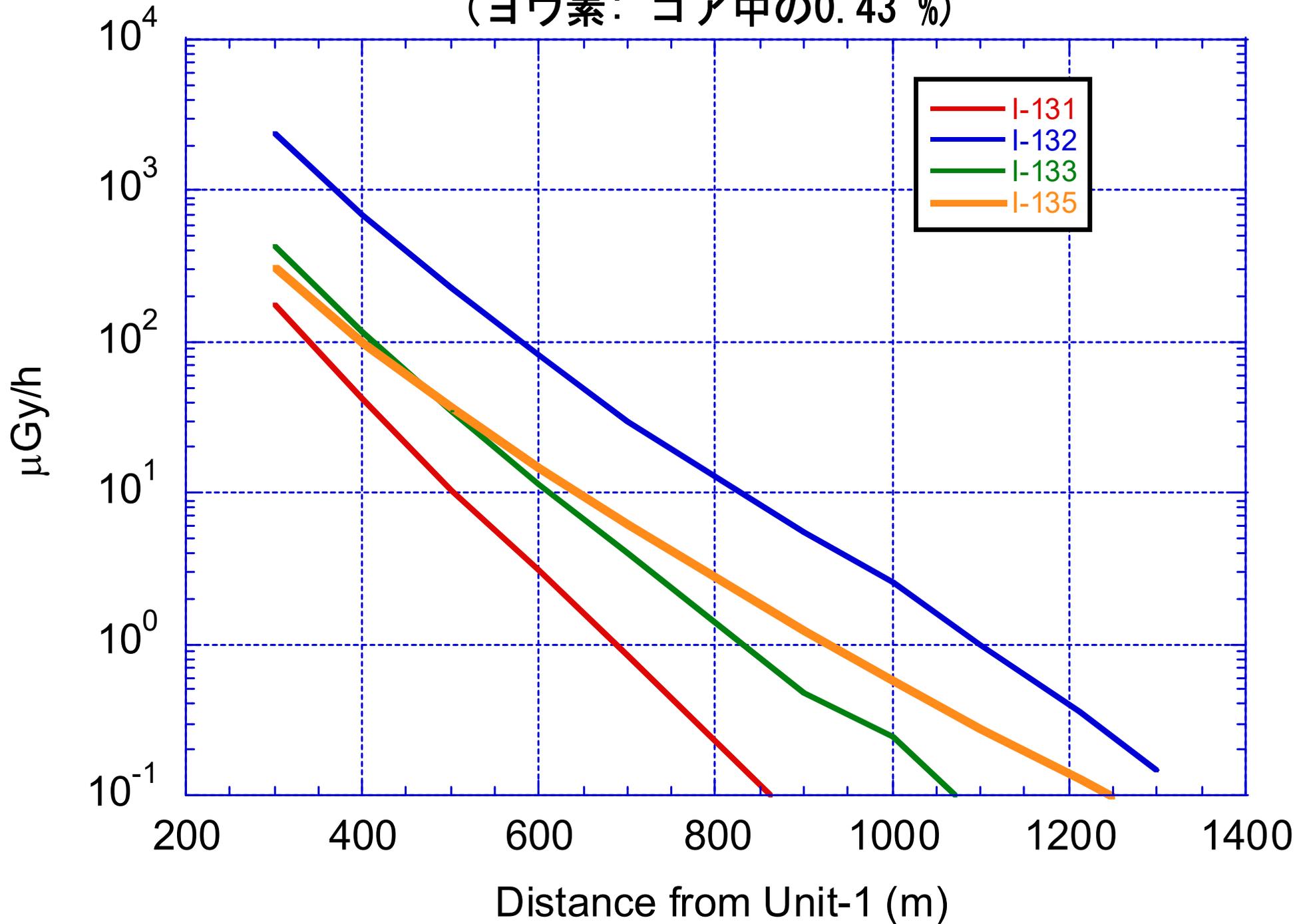
MP-7 at 1000 m	% of activity in	Activity in floor	μGy/h	
			egs5 results	Measured
Kr-88	2.37	7.73E+13	0.145 ± 0.0015	
Xe-135	2.37	1.79E+16	0.0203 ± 0.0019	
Xe-135m	2.37	8.48E+14	0.0088 ± 0.0003	
I-130	0.43	4.38E+13	0.0057 ± 0.0002	
I-131	0.43	5.45E+15	0.0322 ± 0.0032	
I-132	0.43	6.98E+15	2.11 ± 0.07	
I-133	0.43	5.63E+15	0.226 ± 0.012	
I-135	0.43	9.56E+14	0.582 ± 0.009	
Cs-134	0.43	1.19E+15	0.138 ± 0.006	
Cs-136	0.43	3.75E+14	0.114 ± 0.003	
Cs-137	0.43	8.46E+14	0.0259 ± 0.0014	
Sb-124	0.22	3.68E+12	0.0027 ± 0.00003	
Sb-125	0.22	5.12E+13	0.0006 ± 0.00003	
Sb-126	0.22	2.94E+12	0.0005 ± 0.00001	
Sb-127	0.22	2.68E+14	0.0090 ± 0.0003	
Sb-128	0.22	6.86E+12	0.0017 ± 0.0000	
Sb-129	0.22	2.21E+13	0.0073 ± 0.0001	
Te-131	0.22	6.02E+13	0.0033 ± 0.0000	
Te-131m	0.22	2.51E+14	0.0613 ± 0.0020	
Te-132	0.22	3.46E+15	0.0008 ± 0.0003	
Total			3.49	1 - 2

\*西原 健司、岩元 大樹、須山 賢也、“福島第一原子力発電所の燃料組成評価”、JAEA-Data/Code 2012-018, Japan Atomic Energy Agency (2012)

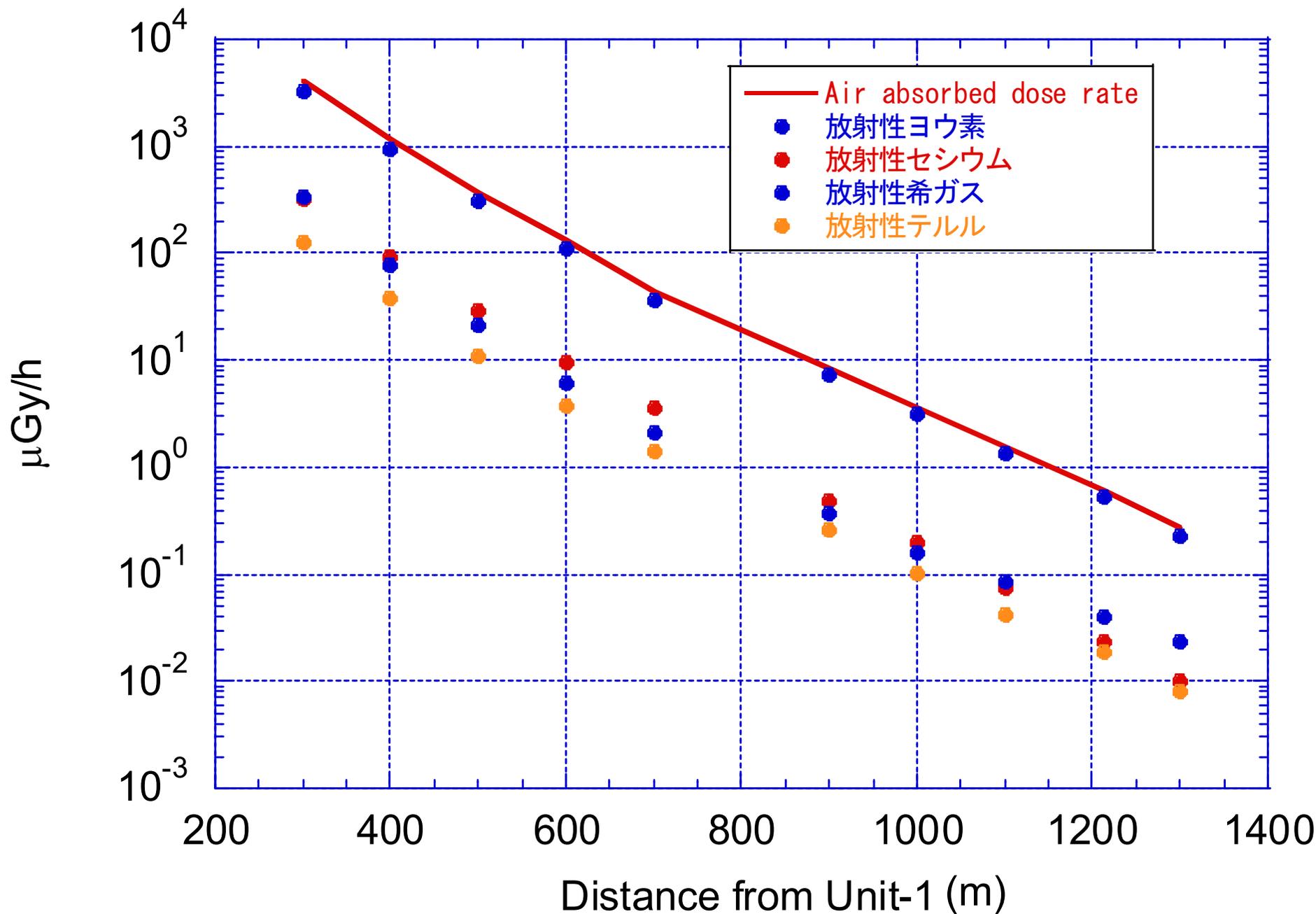
# 2011年3月12日午前7時での比較

- 東京電力HDの推定した移行量（コア中の放射能のうち、希ガス：2.37 %、ヨウ素とセシウム：0.437%、アンチモンとテルル：0.22 %）を仮定
  - ・ 正門付近は良い一致が得られたが、MP-7の空気吸収線量率は計算結果が過大になった
    - ・ 1号機からMP-7の途中に地面が高くなっている箇所があり、MP-7を直視出来ないためと思われる
  - ・ 正門付近で、周辺線量当量率の85 %は放射性ヨウ素
    - ・ I-132の寄与が61 %
    - ・ I-132はエネルギーの高い $\gamma$ 線を多く放出することによる
    - ・ 希ガス中最も多いXe-133は東京電力HDのインベントリーを用いると、60.3 PBqとなるが、 $\gamma$ 線のエネルギーが低いため評価点に到達しないので寄与はない

# 1号機オペフロの放射性核種からの直接線・スカイシャイン線 (ヨウ素: コア中の0.43%)



1号機オペフロの放射性核種からの直接線・スカイシャイン線  
(コア中の希ガス2.7%、ヨウ素とセシウム0.43%, テルル0.22%)



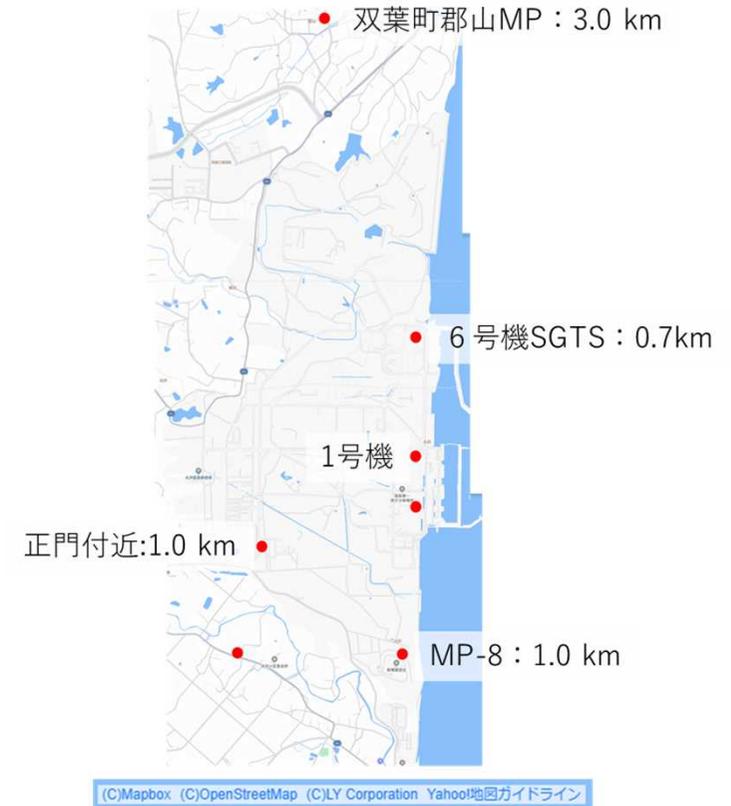
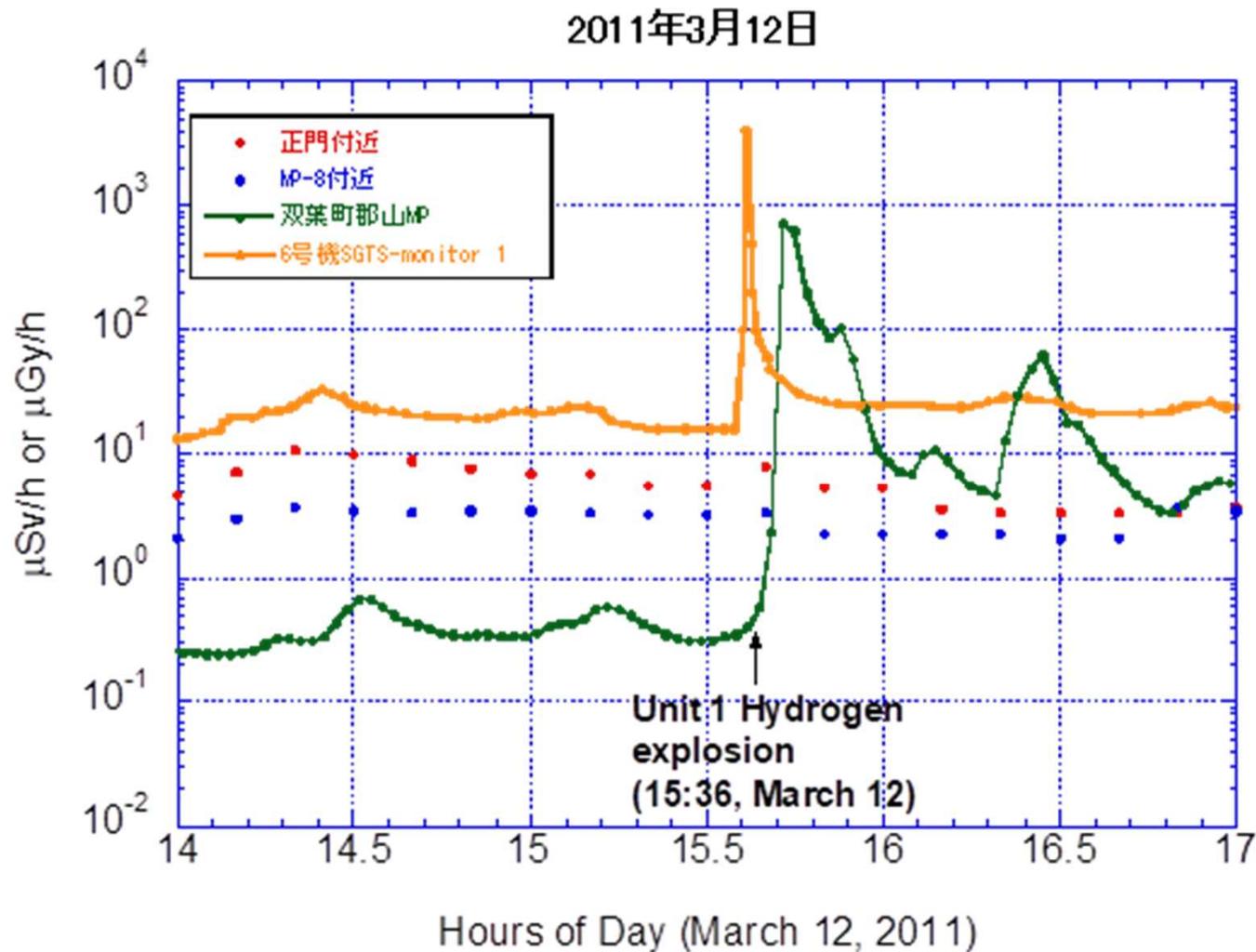
# 大熊町夫沢MPへの寄与

- 空気吸収線量率の距離依存を指数関数で近似すると
  - ・  $D(\mu\text{Gy/h}) = 45297 * \exp(-0.00938 * d)$ 
    - ・  $d$ : 1号機からの距離 (m)
  - ・ 大熊町夫沢MPは $d=1800$  mなので  $D=0.002 \mu\text{Gy/h}$
  - ・ 大熊町夫沢MPでの自然放射能によるBGレベルは、 $0.04 \mu\text{Gy/h}$ なので、このレベルはBGの  $1/10$ 以下であり、検出できるレベルではない
- 1号機オペレーションフロアに充満した放射性核種が線源の場合、影響は1Fに最も近い大熊町夫沢MPでは検出下限以下のレベルとなる

# 解明が必要な課題

- 核種毎の移動割合とオペフロに充満した各核種の放射能の妥当性
  - ・ 東京電力HDは、原子力規制委員会の設置許可申請の審査ガイドを基に核種毎のオペフロへの移行割合を求めているがこのことの妥当性及び推定した核種毎の放射能の妥当性を検討する必要がある
  
- 1号機の水素爆発に伴う変化
  - ・ 1号機の水素爆発により1号機のオペフロに充満していた放射性核種がすべて外部に放出したとすると、散乱線・スカイシャイン線の線源が無くなることになるので、正門付近等の線量率が大幅の減少するはずである
  - ・ しかし水素爆発前後で正門付近とMP-8付近の周辺線量率はほとんど変化していないし、6号機のSGTSモニターでは水素爆発のプルーム飛来による沈着によると思われる影響でむしろ若干上昇しているが、大幅な減少は見られない
  
- オペフロに充満したI-132の減衰
  - ・ I-132が主要な寄与をしている核種とすると、オペフロへの漏洩が少ない時間帯ではI-132の減衰に伴う線量率の減少が見られると考えられるが。正門付近とMP-8付近では2時間近く線量率の変化があまりない時間帯がある

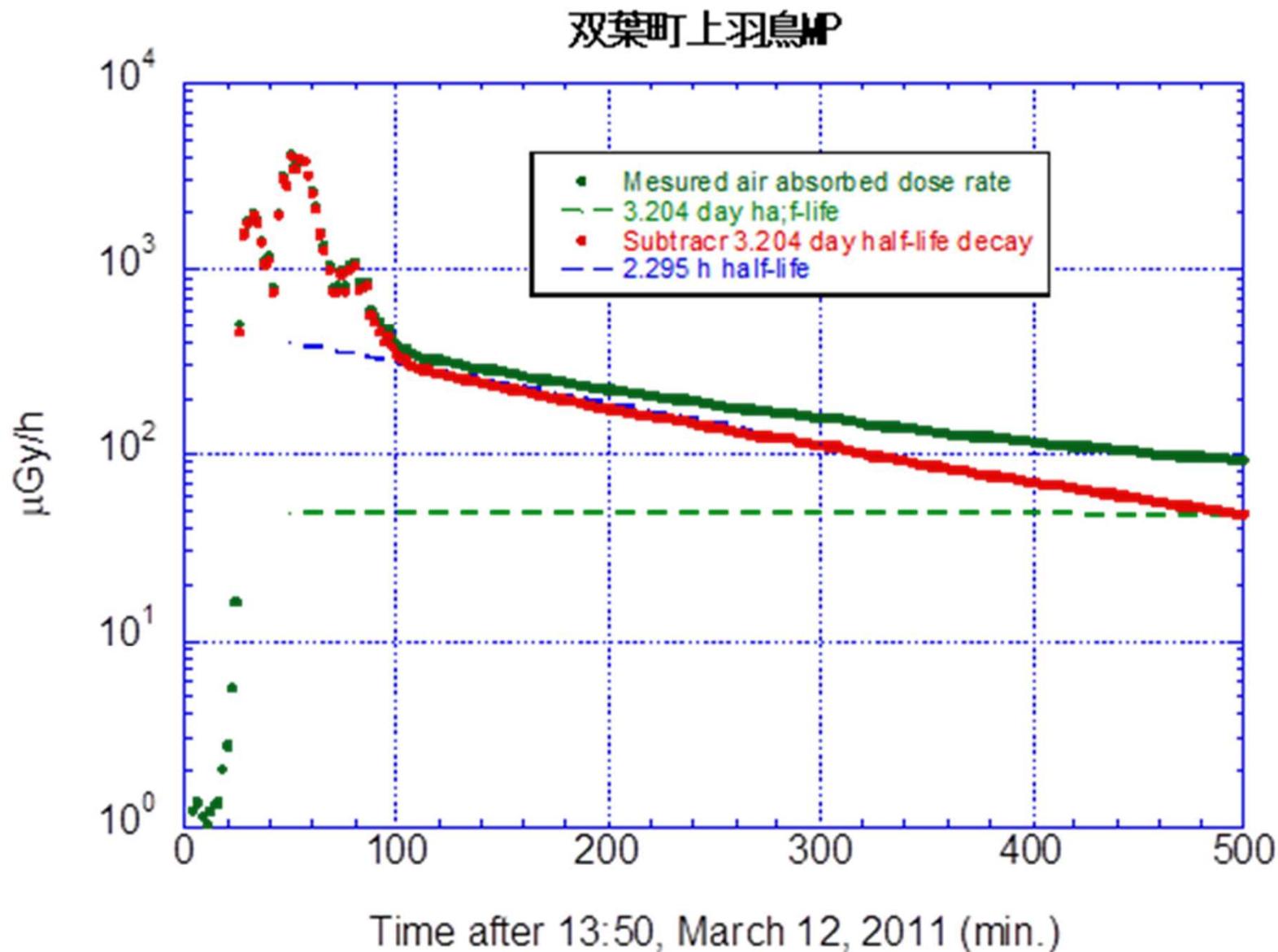
# 2011年3月12日のMPデータ



# 解明が必要な課題

- オペレーションフロアに充満した放射性核種は、ガス状とエアロゾルの成分があると考えられる
  - ・ 希ガス以外の核種の場合、オペレーションフロアに数時間のオーダーで存在している間に、オペレーションフロアの内壁に付着し、崩落したコンクリート等と共に飛散しないで残っていた可能性が考えられる
    - ・ 水素爆発した1号機や3号機の瓦礫が高度に汚染していることと対応している様に思われる
    - ・ 放射性ヨウ素の大部分がエアロゾルとして付着していたとすることは妥当か
  
- オペレーションフロアへの流入が無くなった場合、散乱線
  - ・ スカイシャイン線への主要な寄与であるI-132の減衰により、線量率は半減期2.295時間で減衰する
  - ・ 線量率が一定になるということは、I-132の減衰に対応する流入が継続していたと考えられる

# 双葉町上羽鳥MPでのプルーム飛来により周辺に沈着した放射性核種による空気吸収線量率



→I-132の半減期（2.295時間）により減衰していることがわかる

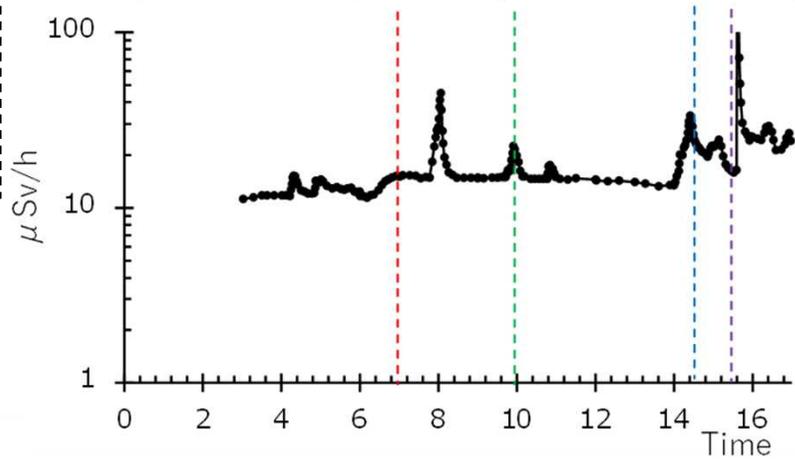
## まとめ

- いろいろな角度から検証する必要があるが、東京電力HDが求めた1号機のオペレーションフロアに充満した放射性核種の放射能を用いることにより、2011年3月12日の正門付近等の「プールの飛来で説明出来ない線量率の変化」は説明することができる。
  - ・ I-132が線量率に寄与する主要な核種
  - ・ 影響が1F敷地内に限定されることも確認
- このことが確認できれば、事故の進展状況を検討する上で有用な情報の一つとなると思われる。

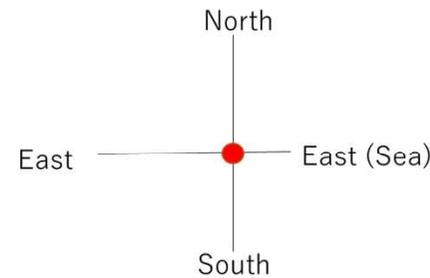
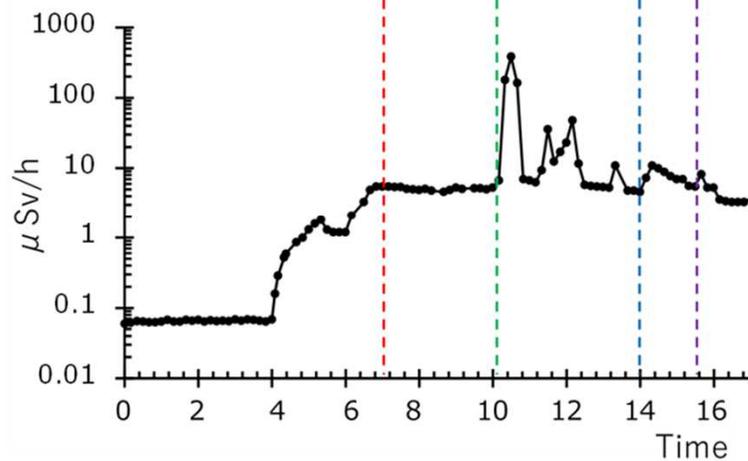
# (参考)2011年3月12日のMPデータと主な事象との関係

- - - 正門付近で5.5  $\mu\text{Sv/h}$  (07:00頃)
- - - 1号機ベント開始 (10:17頃)
- - - 1号機ベント (PCV圧力低下) (14:30頃)
- - - 1号機水素爆発 (15:36)

6号機SGTS配管モニタ(1号機の北方向)



正門付近 (1号機の南西方向)



MP-8 (1号機の南方向)

