

プルームによるモニタリングポスト等での 線量率について

2023年12月25日

東京電力福島第一原子力発電所事故対策室

はじめに

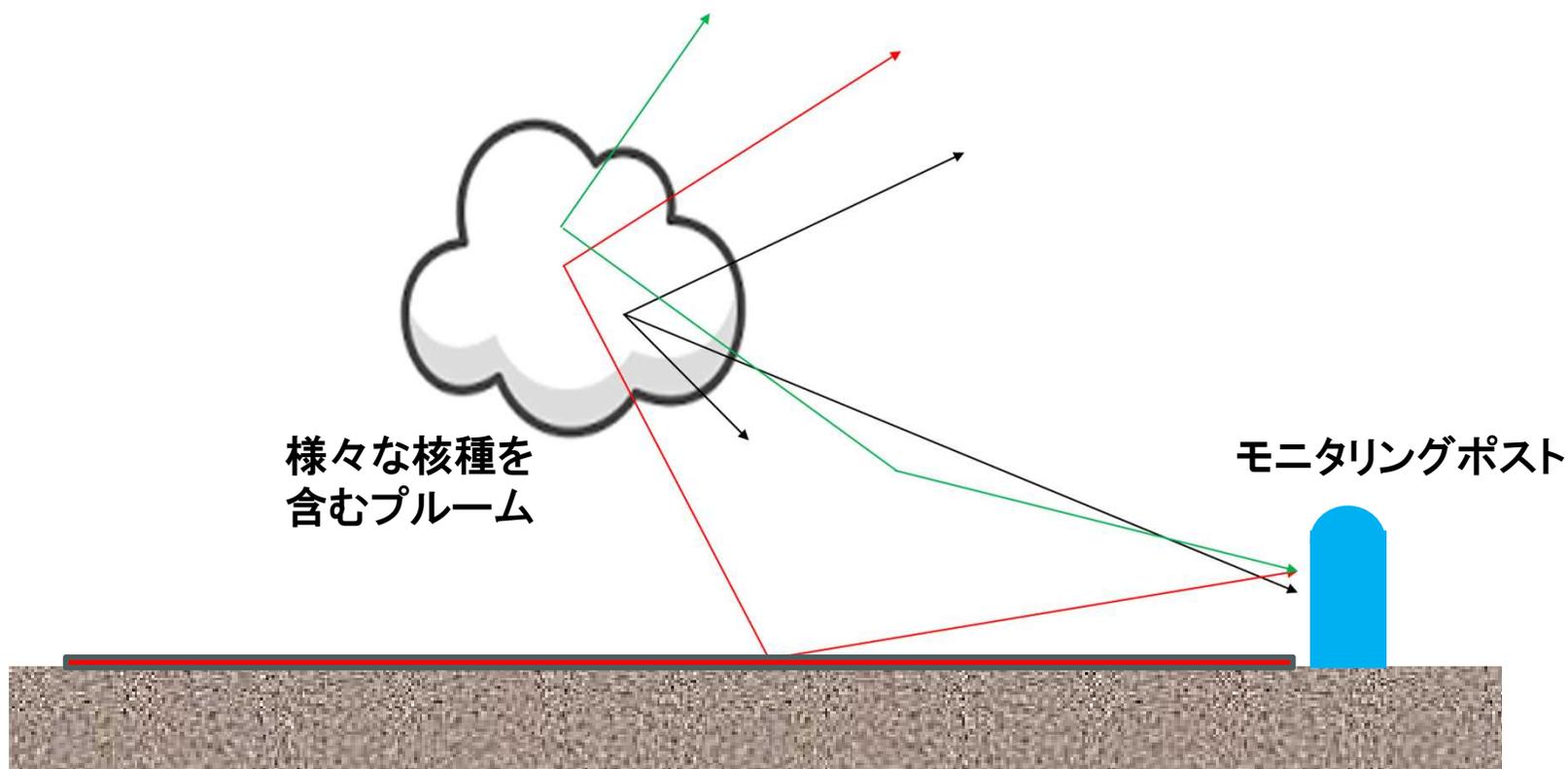
- 本資料は、モニタリングポスト等(以下「MP」という。)についての検討を進める上で共通認識とすべき事項について整理したものである。
- 原子力発電所の事故時におけるMPで測定される「線量率」から避難のために有益な情報を得ることやプラント挙動の分析に活用するためには、少なくとも以下の点を十分検討する必要がある。
 1. MPは、平常時の測定が中心である。
 - 一定以上の高線量率下での検出器の挙動やフォールアウトによるバックグラウンドの上昇などについては運用経験が乏しい。
 - 放射性核種を含むプルーム飛来による線量率上昇については一定の検討があるが、ほとんどが希ガス対象としている。
 2. 事故時(特に、事故後1ヶ月以内)に検出される放射性核種に関する知見が不足している。
 - 事故後の検討対象の放射性核種は、半減期の長い放射性セシウム(Cs-134, Cs-137)等に限られている。
 - 事故時には、福島県のMPデータは入手できる状況になかった。
 3. プルーム飛来に伴い周囲に沈着した放射性核種による線量率については、これまでほとんど経験がなかったことから検討されていない。

明確にすべき事項

- **放射性核種を含むプルームの飛来により、MPで測定される線量率の変化**
 - プルーム飛来がMPに及ぼす影響、線量率のピーク形状
 - 核種による影響(線量率への寄与)、核種による依存性
 - 線量率のピーク等がどのように時間変化するか
- **プルーム飛来により周辺に沈着した放射性核種による線量率**
 - 核種により、影響(線量率への寄与)がどう変わるか
 - どのように時間変化するか

本発表のトピック

- ① 核種による線量率の違いは？
 - ✓ 核種から放出される γ 線のエネルギー、崩壊当たりの放出数
- ② どのくらいの距離から、MPはプルーム中の放射性核種からの γ 線を検知するか？
 - ✓ 核種による違いは？
 - ✓ γ 線のエネルギーによる空気の透過率の違いの影響
- ③ プルーム飛来によるMP周辺の沈着による線量率
 - ✓ 周辺に沈着した放射性核種による空気吸収線量率は？
 - ✓ どの程度の領域から線量率に寄与するか？
 - ✓ 核種による違いは？



① 核種による線量率の違い

1F事故後～3月中に福島県や茨城県のMPの波高分布で測定された主な核種

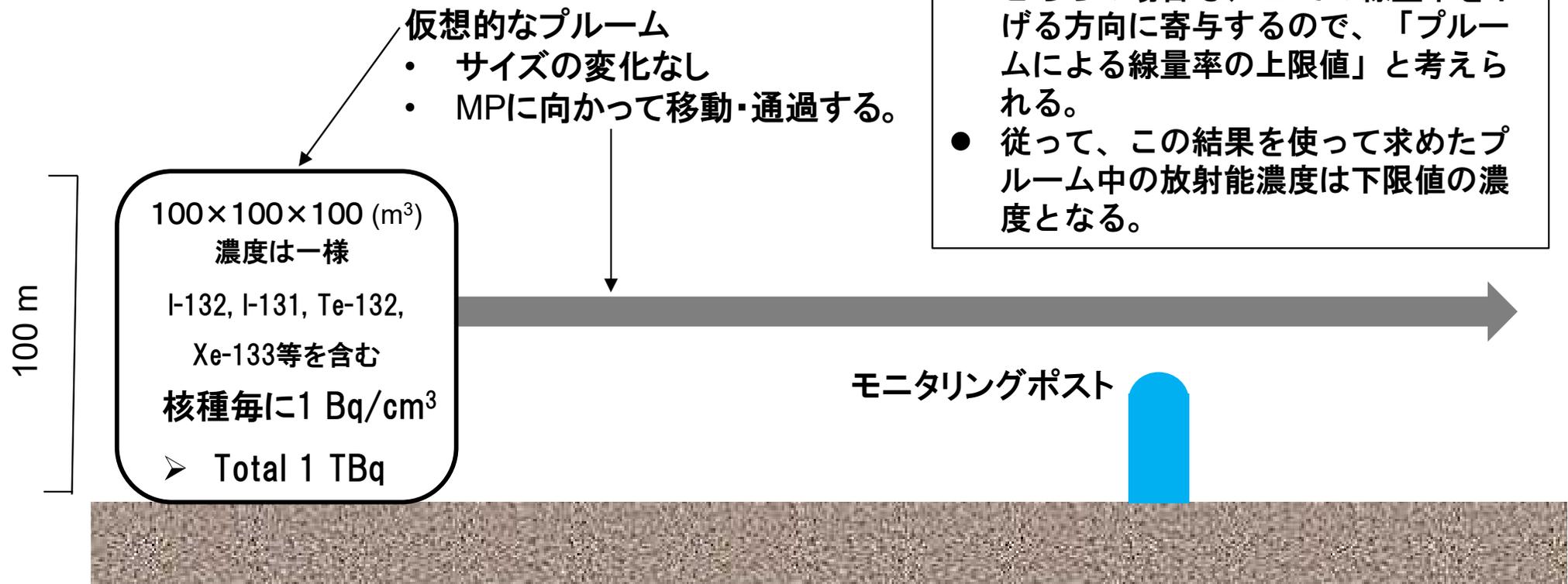
核種	半減期	γ線エネルギー (MeV)	放出割合	1cm線量当 量率定数 μ Sv/h per MBq at 1m	核種	半減期	γ線エネルギー (MeV)	放出割合	1cm線量当 量率定数 μ Sv/h per MBq at 1m		
Xe-133	5.247 d	0.081	38.0%	0.0171	I-132	2.295 h	0.506	4.90%	0.353		
Xe-135	9.14 h	0.249	90.0%	0.0435			0.523	16.00%			
		0.408	0.36%				0.668	98.70%			
		0.608	2.90%				0.67	4.60%			
		0.0802	2.60%				0.727	5.40%			
I-131	8.0207 d	0.284	6.10%	0.0651			0.773	75.60%			
		0.365	80.70%				0.812	5.50%			
		0.637	7.20%				0.955	17.60%			
		0.723	1.80%				1.136	3.00%			
		0.228	88.00%				0.0406	1.399		7.00%	
Te-132	3.204 d	0.228	88.00%	0.0406							

* 1cm線量当量率定数:真空中で1 MBqの放射能による1 m位置での1cm線量当量率(周辺線量当量率)

- ① 遮蔽となる空気が無い状態でも、核種によって崩壊当たりの周辺線量当量率が大きく異なる(上表)
- ② MPでの線量率は、「崩壊当たりの周辺線量当量率の違い」に加えて、エネルギーの違いによる空気の透過力の違いが加わることから、空気層とプルーム位置依存性が大きいことが推定できる。
 - エネルギーの高いγ線の放出割合が高いI-132の寄与は、同じ放射能でも「1cm線量当量率定数」の違いと透過力の違いにより、他の核種よりも上記の影響を受けにくい。

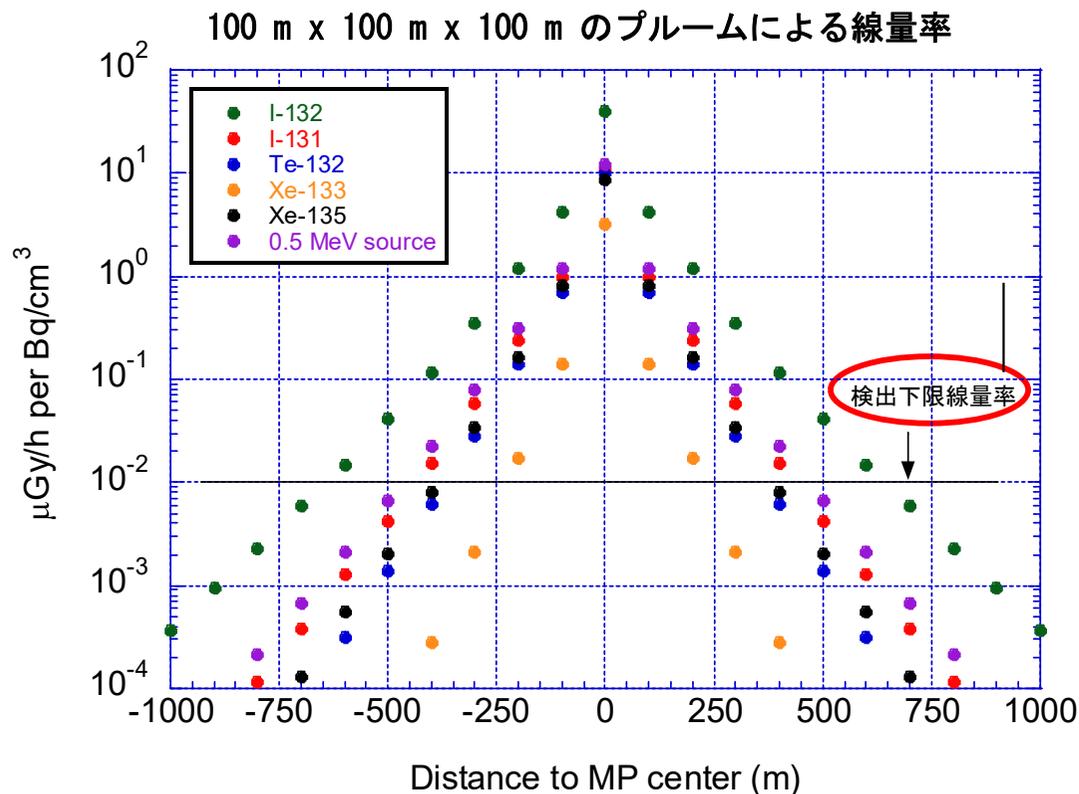
② どのくらいの距離から、MPはプルーム中の放射性核種からの γ 線を検知するか？

基礎的検討事項



- 各モニタリングポストでのプルームの広がり、100 m 立方より大きいと思われる。
- プルームの中心が常にMPを通過するわけではない。
- どちらの場合も、MPでの線量率を下げる方向に寄与するので、「プルームによる線量率の上限値」と考えられる。
- 従って、この結果を使って求めたプルーム中の放射能濃度は下限値の濃度となる。

結果：1 TBqの放射性核種を含むプルームとMPとの距離による線量率変化

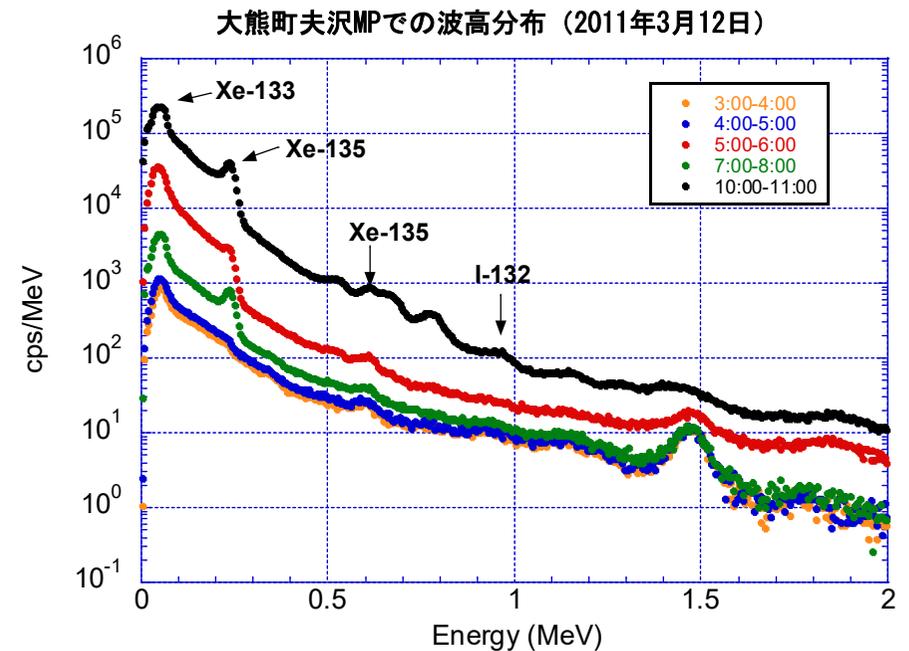
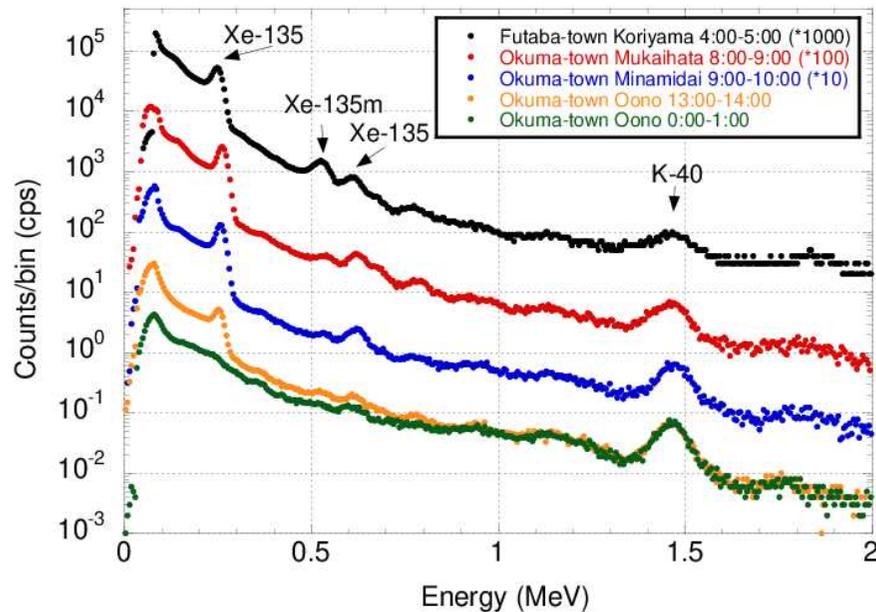


MPでの自然放射能による空気吸収線量率やその変動幅は、検出器の種類や周辺の環境により異なるが、プルームの飛来の検出下限値は0.01 $\mu\text{Gy/h}$ 程度とする。

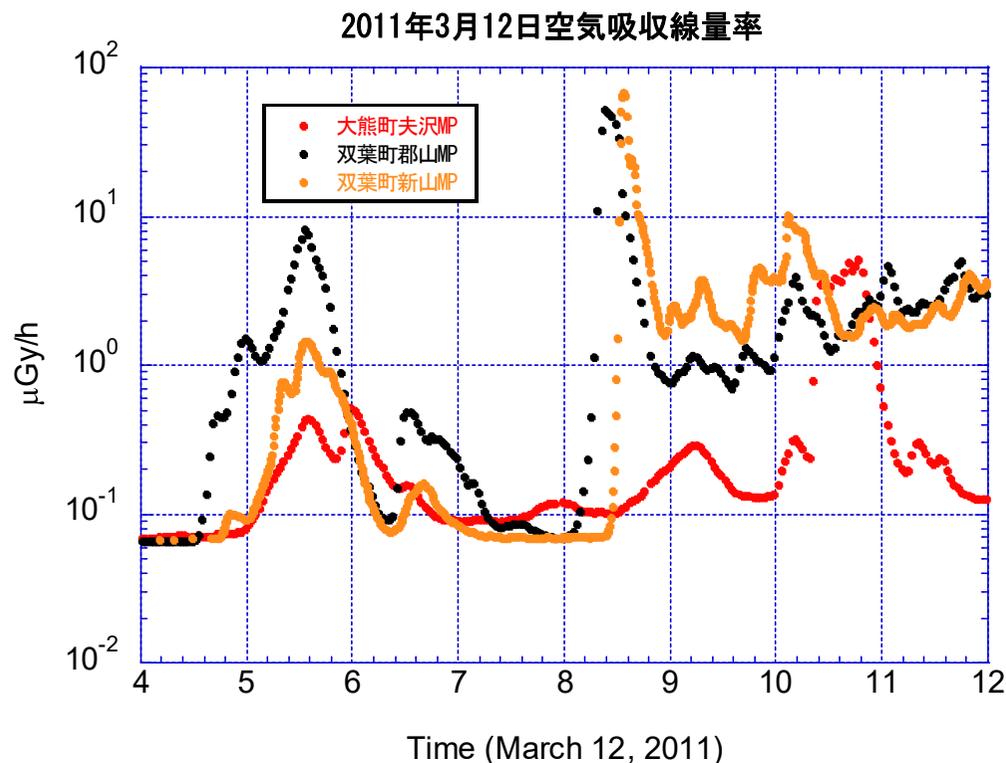
- MPからの距離は、移動距離(風速)に依存する。
 - 風速 1 m/s の場合には、250 m は 4.17 分
 - 風速 2 m/s の場合には、250 m は 2.08 分
- 100 m 立方のプルームでもMPに高い線量率を与える時間は短い。
 - 数分レベルで高い線量率が存在する場合には、原子炉からの放出が継続していることを意味する。
- エネルギーの高い γ 線を多く放出するI-132の寄与が同じ放射能当たりでは最も高い空気吸収線量率となる。
 - I-131, Te-132はI-132の1/4、
 - Xe-132はI-132の1/12
- モニタリングポストでのプルームの広がりか 100 m 立方という仮定は小さすぎるように思われる。
 - 得られた放射能と線量率の関係は上限値に近いと思われる。
- 核種組成が分かれば、モニタリングポストでの空気吸収線量率からプルーム中の放射能を求めることができる。
 - 空気吸収線量率からは核種組成を知ることは出来ない。
 - 波高分布データがあれば推定が可能

波高分布が得られているMPデータ

3月12日10時以前は、プルーム中の放射性核種は希ガス



3月12日午前中のMPデータ



- 1 TBq の希ガスを含む 100 m × 100 m × 100 m のプルームがMPに来た時の空気吸収線量率:
 - 3.26×0.78 (Xe-133) + 8.58×0.22 (Xe-135) = $4.43 \mu\text{Gy/h}$
- 5時～6時の間の大熊町夫沢MP、双葉町郡山MP、双葉町新山MP でのピーク時のXe-133放射エネルギーを推定することが出来る。

	時刻	μGy/h	希ガス TBq	Xe-133 TBq
大熊町夫沢MP	5:59	0.522	0.12	0.0919
双葉町郡山MP	5:33	8.05	1.82	1.42
双葉町新山MP	5:35	1.45	0.33	0.255

原子炉停止から1日後に放出される希ガス中の主な核種割合は、Xe-133が74.3%でXe-135が21.0%であるため、1 Bqの希ガス中には、0.78 BqのXe-133と0.22 BqのXe-135が存在しているとする。

原子炉での事象との対応

- プルームの飛来による線量率ピークの時刻は、原子炉内で生じている事象に対応していると考えられる。
- 原子炉とMPからの距離により、事象との時差が生じる。
 - プルームは、風に乗って移動することが多いので、移動速度は風速に依存すると思われる。
 - 例えば、1号機から3 km 先にある双葉町郡山MPの場合、風速 2 m/s の場合には 25 分の時差が生じる。

風速	MPまでの距離				
	1 km	2 km	3 km	6 km	8 km
	事象との時差 (分)				
1 m/s	16.7	33.3	50	100	133
2 m/s	8.33	16.7	25.0	50.0	66.7
3 m/s	5.56	11.1	16.7	33.3	44.4
5 m/s	3.33	6.67	10.0	20.0	26.7

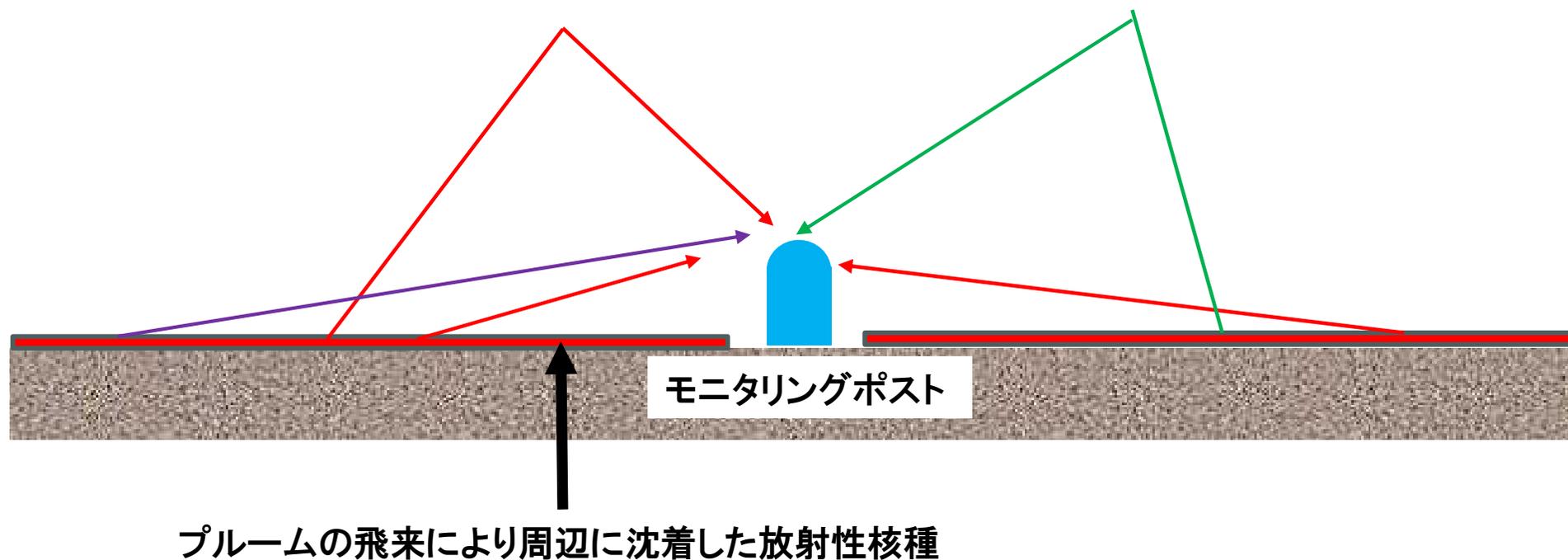
プルームの飛来に対するMPでの観測

- プルーム飛来に伴いMP周辺に沈着した放射性核種の情報と異なり、**プルームの飛来は、MP等での継続した測定でしか観測出来ない。**
 - 希ガス以外の核種の場合は、MPでの測定や人的サーベイ等による周辺への沈着状況からある程度推定が可能である。
 - 痕跡を残さない希ガスの場合は、他の方法では難しい。
- 事故初期に重要なI-131等は、プルームの飛来場所、時刻及び濃度が重要である。
 - MPでプルームの飛来が確認できれば、I-131等の吸入が問題となる事故初期では、プルームによる空気吸収線量率がI-132によるものとして濃度を求め、I-131とI-132の濃度が同じとして推定が可能。

③ プルーム飛来によるMP周辺の沈着による線量率

検討内容

- 周辺に沈着した放射性核種による空気吸収線量率は?
- どの程度の領域から線量率に寄与するか?
- 核種による違いは?



MP周辺での沈着による影響

- プルーム中に沈着性の放射性核種が含まれる場合、プルームがMPを通過した後に、MP周辺に沈着した放射性核種による線量率がMPにて観測される。
 - 沈着する放射性核種の汚染密度は、「気象条件」、「周辺環境(平坦な土壌、舗装された道路、草地、周辺の樹木等)」、核種の化学形態等がパラメータとなる。

具体的検討内容

- 周辺に沈着した放射性核種による寄与を理解するために、MPでの空気吸収線量率をegs5を用いて計算した。
 - 計算条件
 - 密度:1 Bq/cm²が広い土壌に一様分布
 - 線源半径は10, 50, 100, 500, 1000 mと設定
 - 核種:I-132、I-131、Te-132、Cs-134、Cs-137
 - 地表面から3m位置での空気吸収線量率(福島県MPは3mが多いため)

一様分布による高さ3 mでの空気吸収線量率

Radionuclide	I-132	I-131	Te-132	Cs-134	Cs-137	0.5 MeV source
線源半径 (m)	空気吸収線量率 μGy/h per Bq/cm ²					
10	2.54E-02 ± 1.10E-05	4.76E-03 ± 2.13E-06	3.81E-03 ± 2.29E-06	1.84E-02 ± 7.83E-06	7.91E-03 ± 3.10E-06	6.17E-03 ± 2.60E-06
50	5.37E-02 ± 2.97E-05	9.78E-03 ± 5.44E-06	7.37E-03 ± 4.79E-06	3.87E-02 ± 2.03E-05	1.51E-02 ± 8.66E-06	1.28E-02 ± 6.65E-06
100	6.25E-02 ± 4.02E-05	1.12E-02 ± 7.34E-06	8.10E-03 ± 5.94E-06	4.48E-02 ± 2.79E-05	1.75E-02 ± 1.15E-05	1.48E-02 ± 2.88E-05
500	6.93E-02 ± 5.68E-05	1.20E-02 ± 9.30E-06	8.41E-03 ± 6.70E-06	4.95E-02 ± 3.91E-05	1.91E-02 ± 1.55E-05	1.60E-02 ± 2.98E-05
1000	6.94E-02 ± 5.86E-05	1.20E-02 ± 9.33E-06	8.41E-03 ± 6.70E-06	4.95E-02 ± 3.94E-05	1.91E-02 ± 1.56E-05	1.60E-02 ± 2.98E-05
Ratio to I-132 for 1 km radius	1.00	0.173	0.121	0.713	0.275	0.231

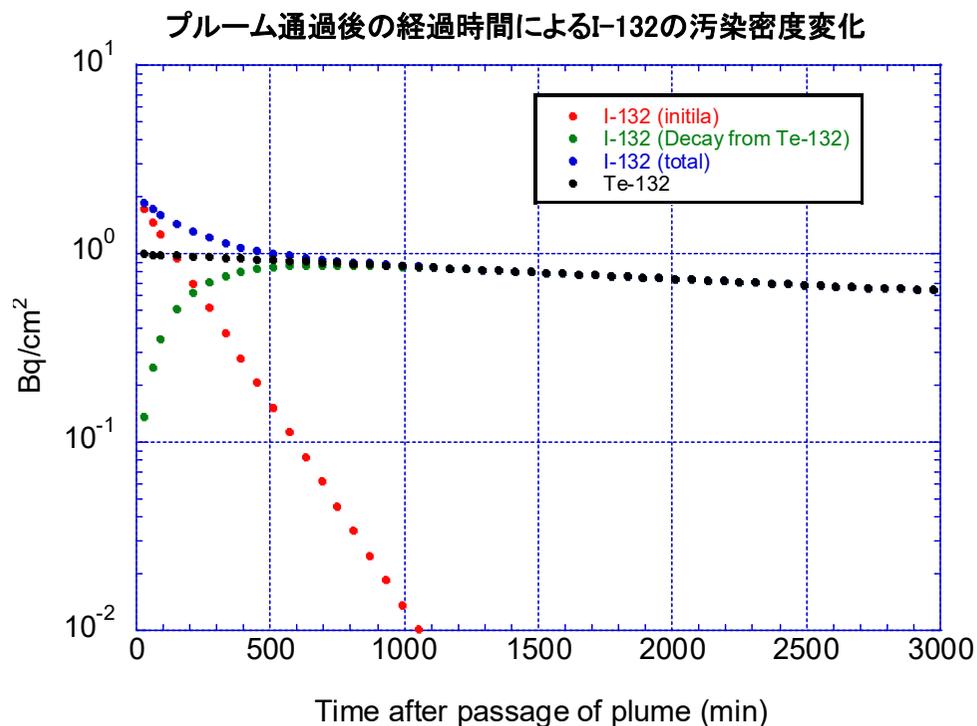
表 周辺に沈着した放射性核種による空気吸収線量率

- どの程度の領域から線量率に寄与するか？
 - MPでの空気吸収線量率へ寄与する領域は半径 500 m
 - ✓ 1F事故後の除染が難しかった要因の一つ
 - ✓ 500 m より先の領域も寄与があるので、500 m までの領域を除染すると寄与が見える。
- 核種による違いについて
 - 事故時の放射性 Cs の放出量は放射性 I より少ないことを鑑みると、I-132の寄与が支配的である。

広い線源による空気吸収線量率は、1F事故以前には誰も経験していない放射線場である

- 寄与の大きい I-132 による空気吸収線量率が 40 μGy/h の場合、 $40 / 6.93E-2 = 577 \text{ Bq/cm}^2$
- 半径 500 m の領域での総量は、 $577 \times \pi \times 50,000^2 = 4.5E+12 = 4.5 \text{ TBq}$ に相当する

沈着後の時間変化



- I. I-132の汚染密度がTe-132の汚染密度より高い場合、
空気吸収線量率はI-132の半減期(約2.3時間)で減衰
- II. 時間経過と共に、I-132はTe-132と永続平衡になり、
空気吸収線量率はTe-132の半減期(約3.2日)で減衰

- 更に時間が経過すると、Te-132及びI-132の放射能が減少するため、I-131の寄与が支配的となり、線量率はI-131の半減期(約8.0日)で減衰するようになる。
- 以前に飛来したプルームによる沈着量が新たに沈着した放射性核種より遙かに多い場合、プルーム通過後の空気吸収線量率はプルーム飛来前とほとんど変わらない場合がある。

まとめと知見の活用

① 核種による線量率の違い

- エネルギーの高い γ 線の放出割合が高いI-132の寄与は、同じ放射能でも「1cm線量当量率定数」の違いと透過力の違いにより大きくなる。

② MPは、プルーム中がどのくらいMPに近づくと放射性核種からの γ 線を検知するか

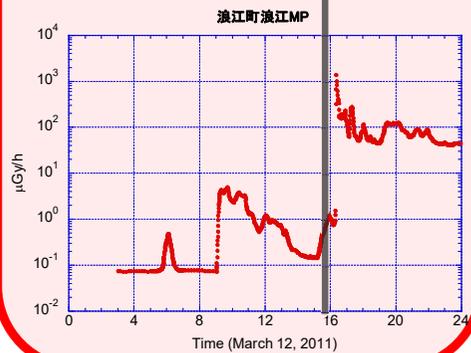
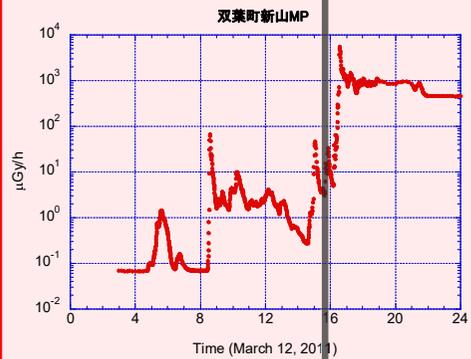
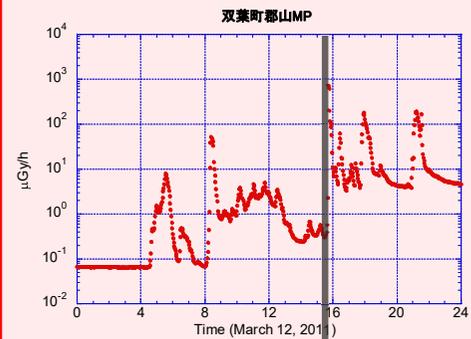
- $100 \times 100 \times 100$ (m³)の一樣濃度のプルームがMPに向かって移動・通過することを仮定して空気吸収線量率を計算
 - MPに高い線量率を与える時間は数分程度。
 - 波高分布を取得することが重要。

③ プルーム飛来によるMP周辺の沈着による線量率

- 一樣に広い土壤に沈着したことを仮定して空気吸収線量率を計算
 - MPでの空気吸収線量率へ寄与する領域は半径 500 m。
 - I-132の寄与が支配的。
 - 沈着後はI-132の半減期で減衰し、その後Te-132の半減期で減衰する。

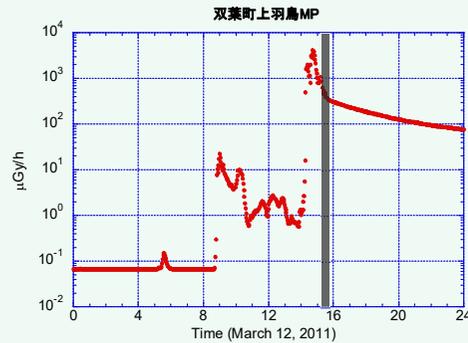
2011年3月12日のMPデータ

北

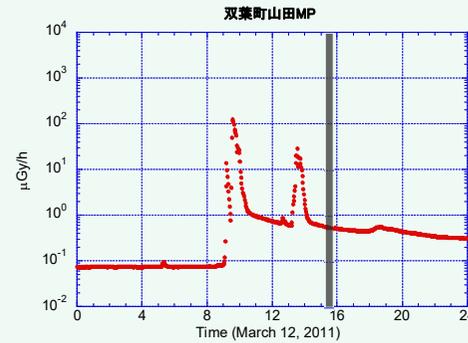


10E3-4オーダー

北西

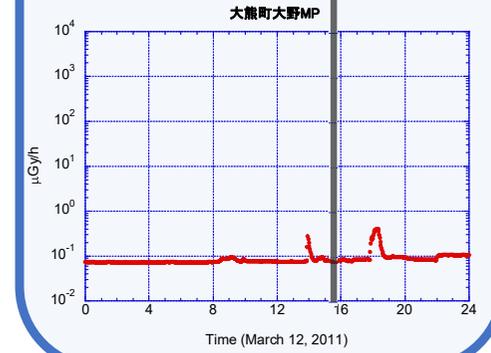
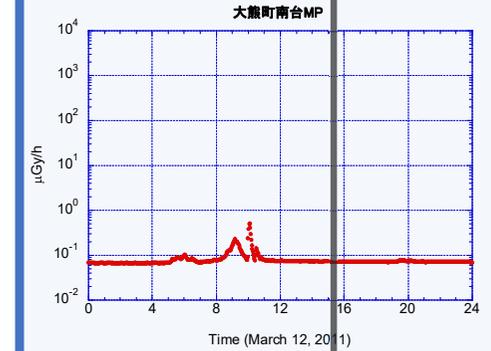
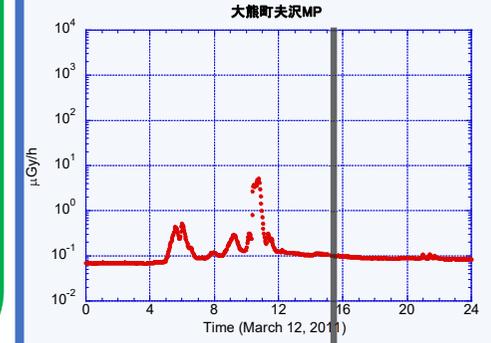


西

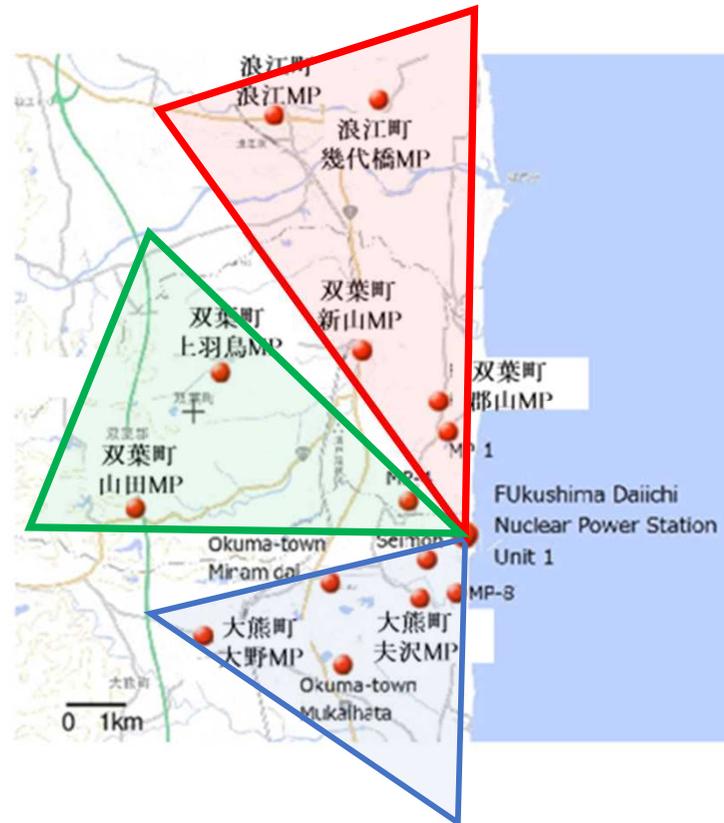


10E2-3オーダー

南



10E0-2オーダー

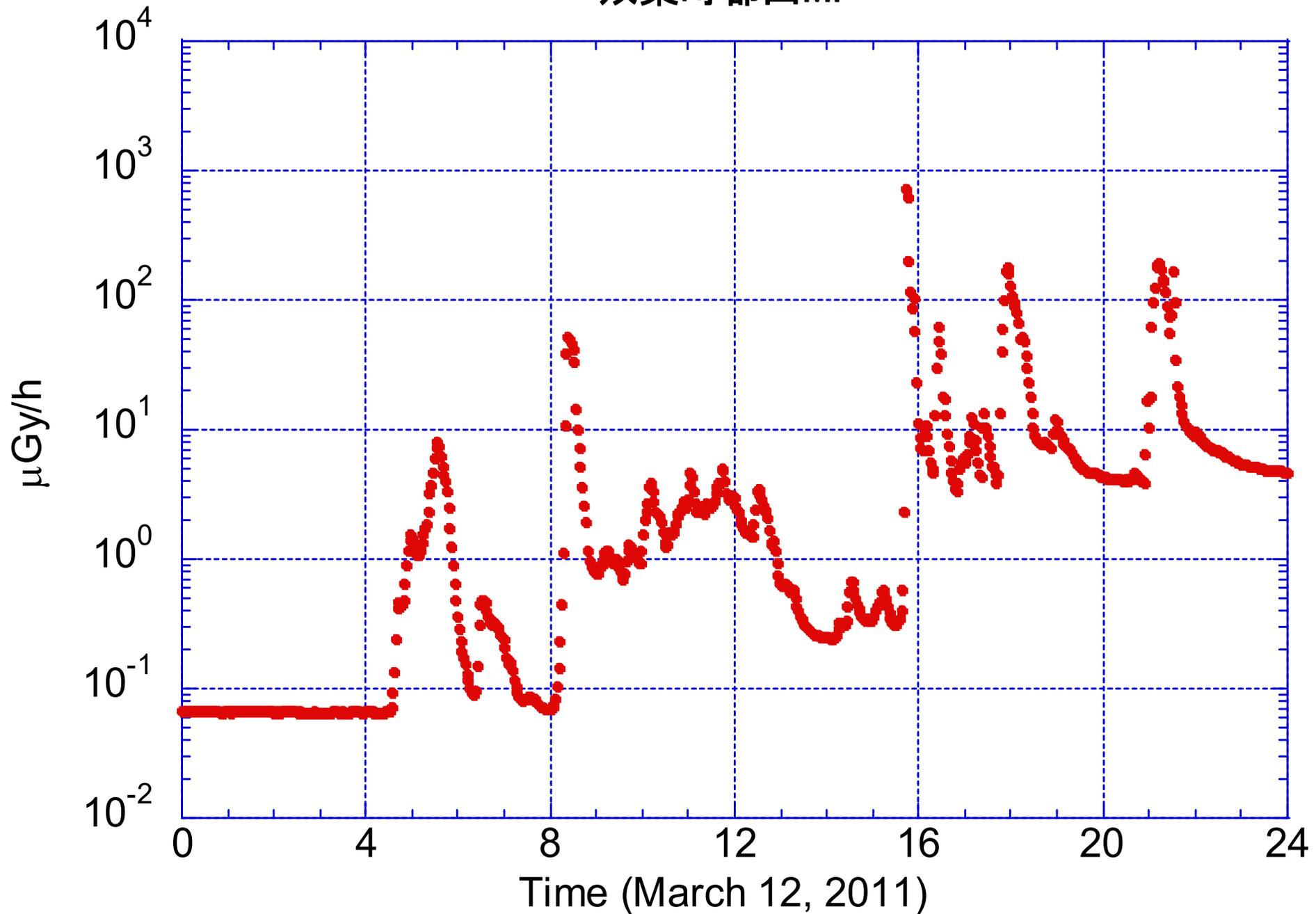


1号機からの距離

- MP-4: 1.1 km
- 大熊町夫沢MP : 1.8 km
- 大熊町大野MP : 5.2 km
- 双葉町郡山MP : 3.0 km
- 双葉町新山MP : 4.1 km
- 双葉町上羽鳥MP : 6.0 km
- 浪江町浪江MP : 8.7 km
- 浪江町幾代 : 8.5 km

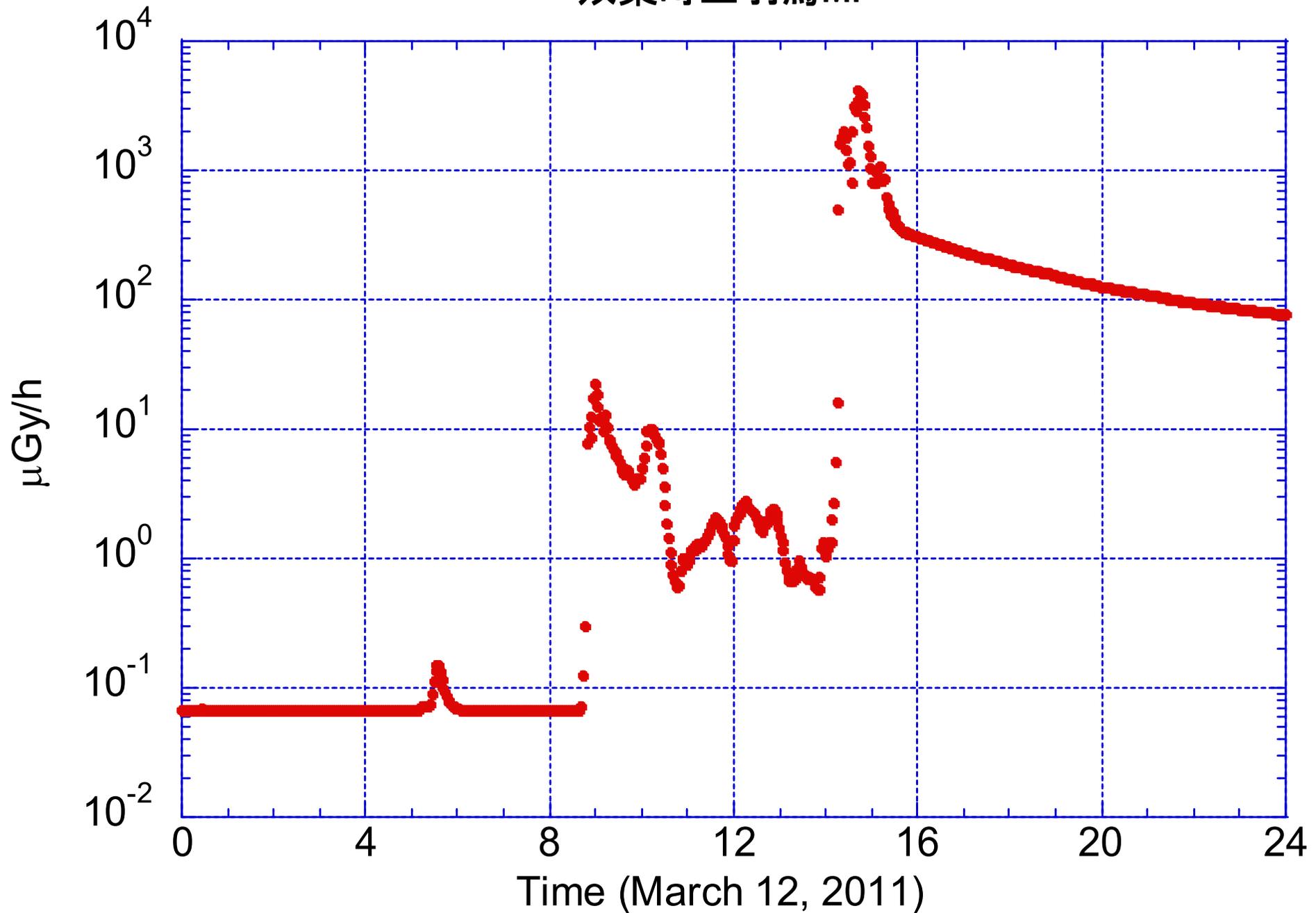
2011年3月12日のMPデータ

双葉町郡山MP



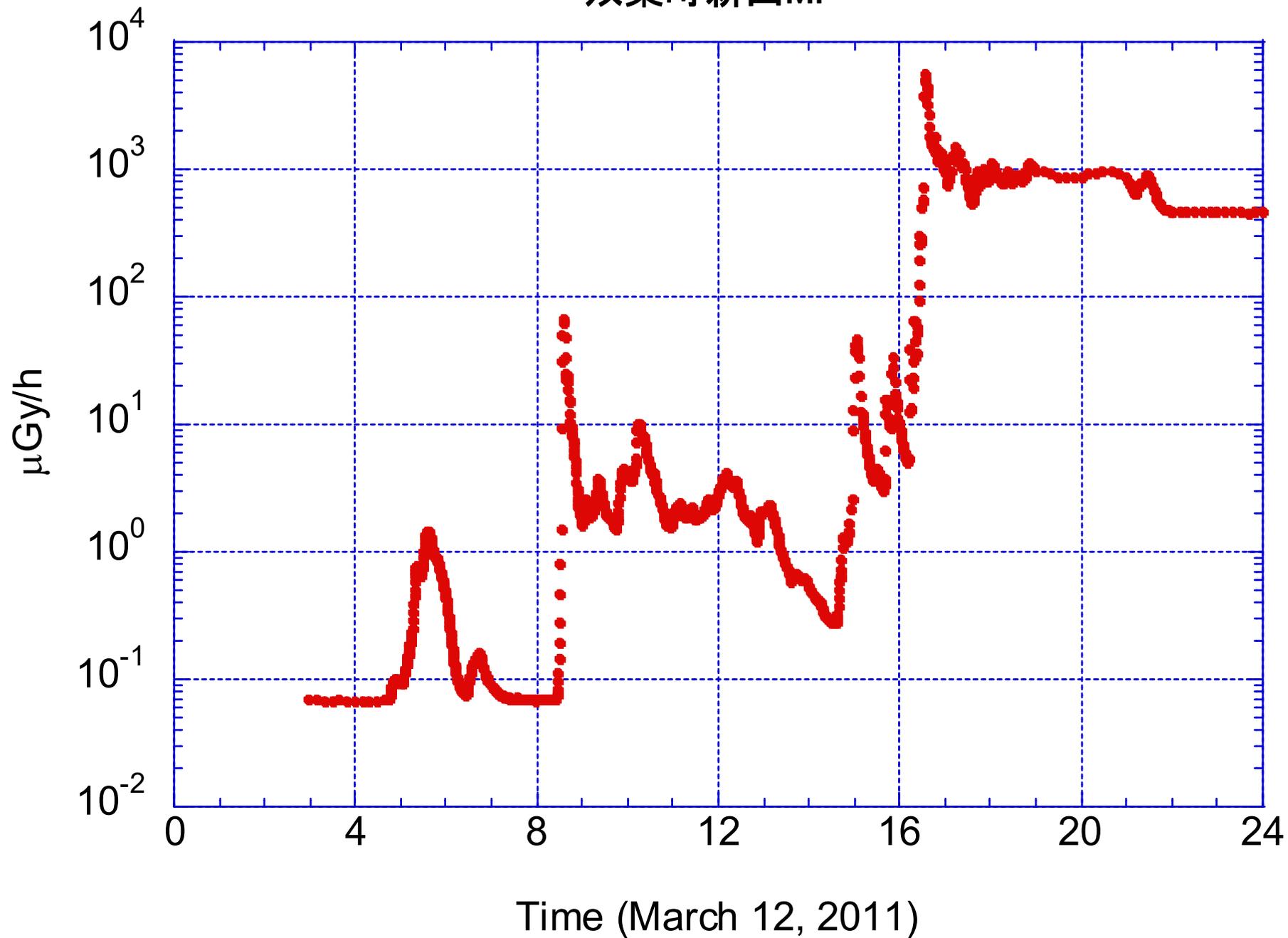
2011年3月12日のMPデータ

双葉町上羽鳥MP



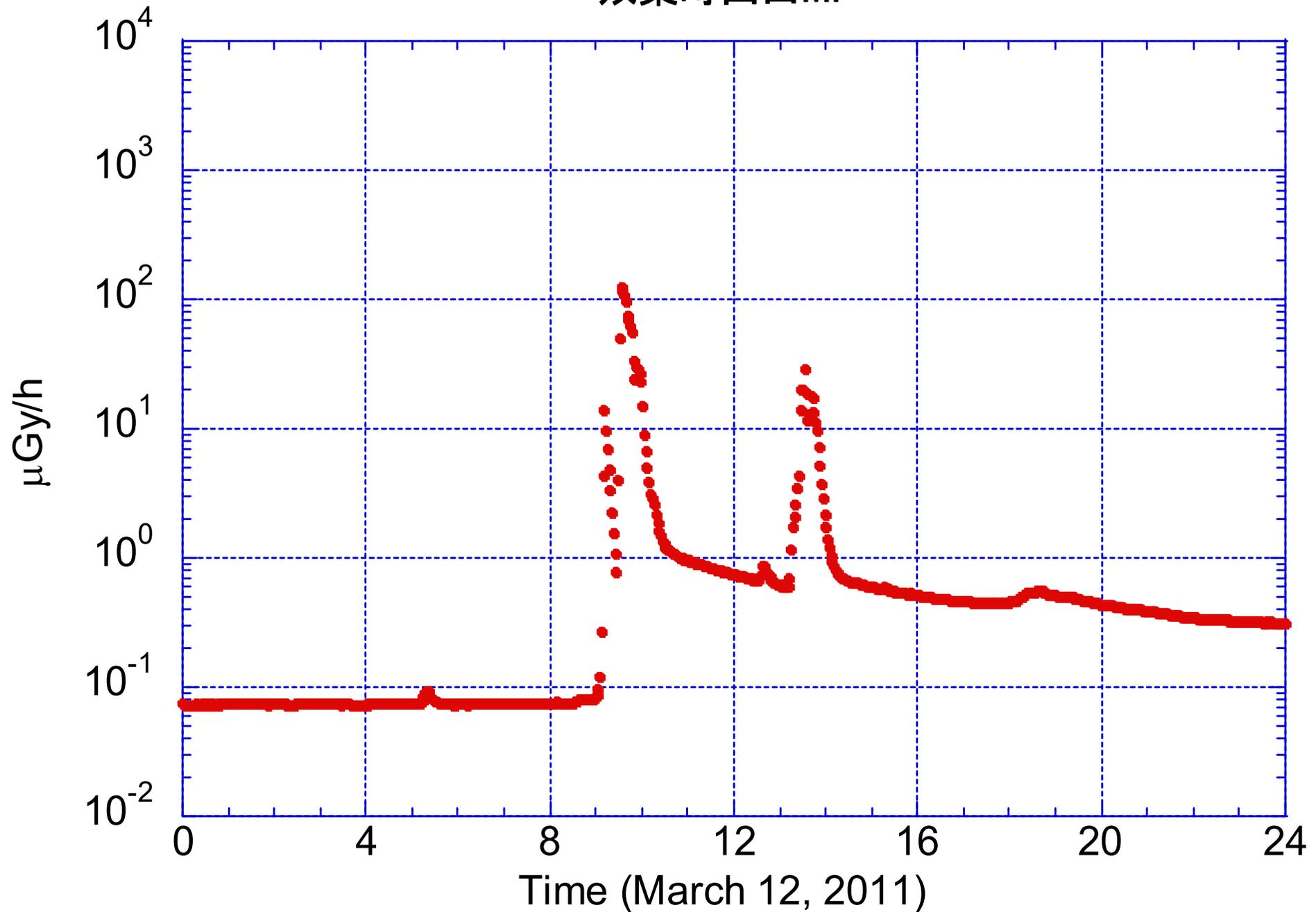
2011年3月12日のMPデータ

双葉町新山MP



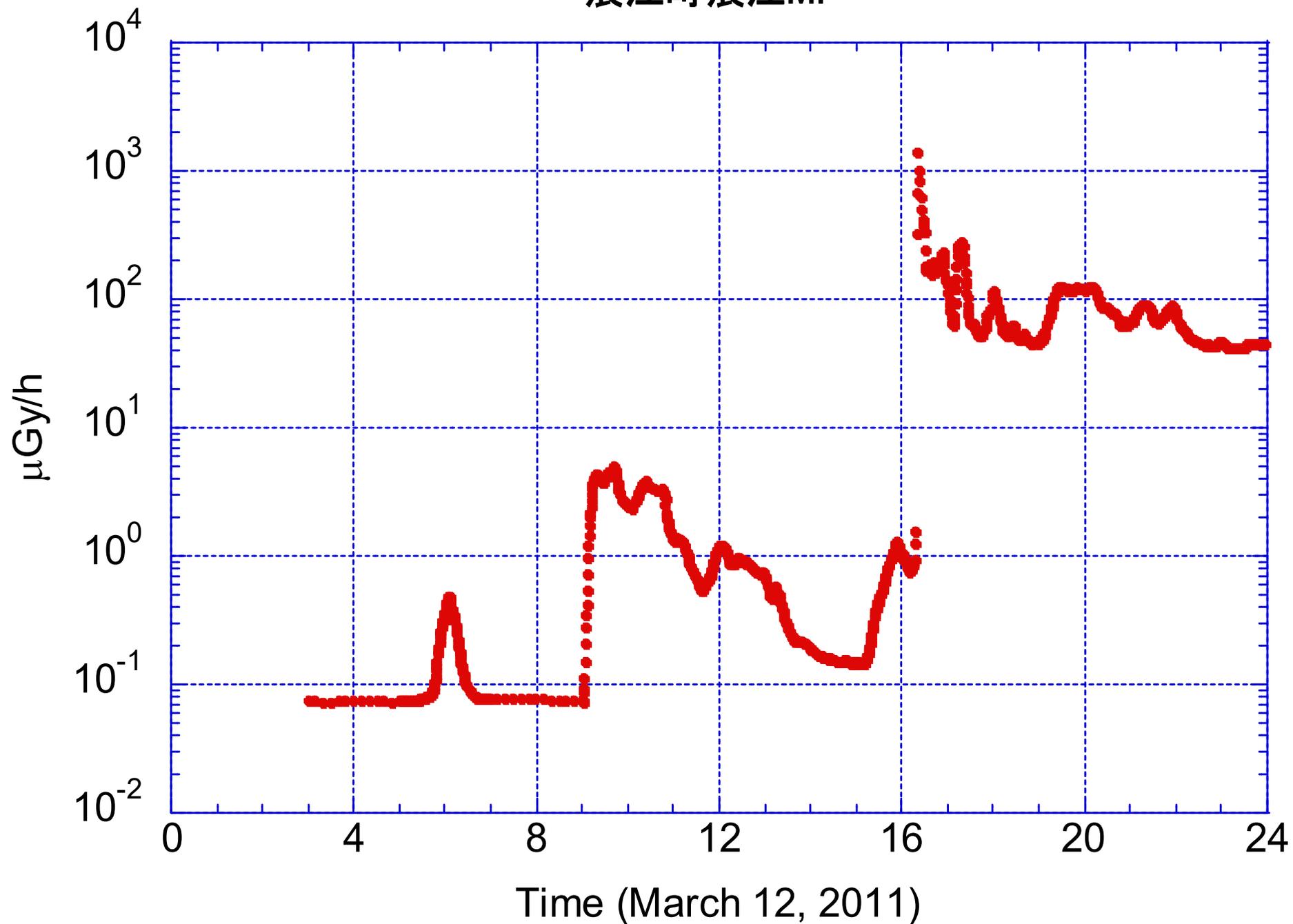
2011年3月12日のMPデータ

双葉町山田MP



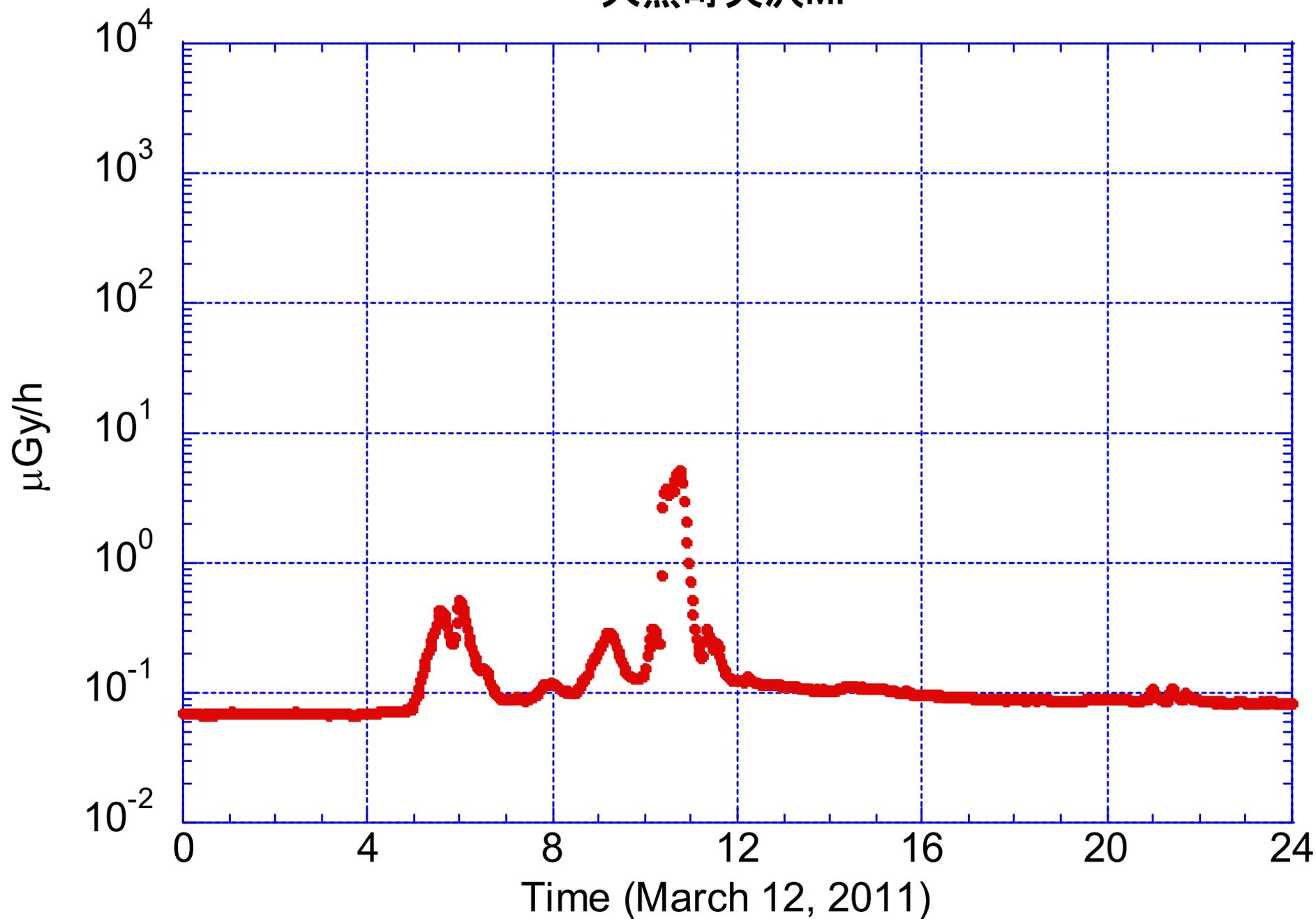
2011年3月12日のMPデータ

浪江町浪江MP



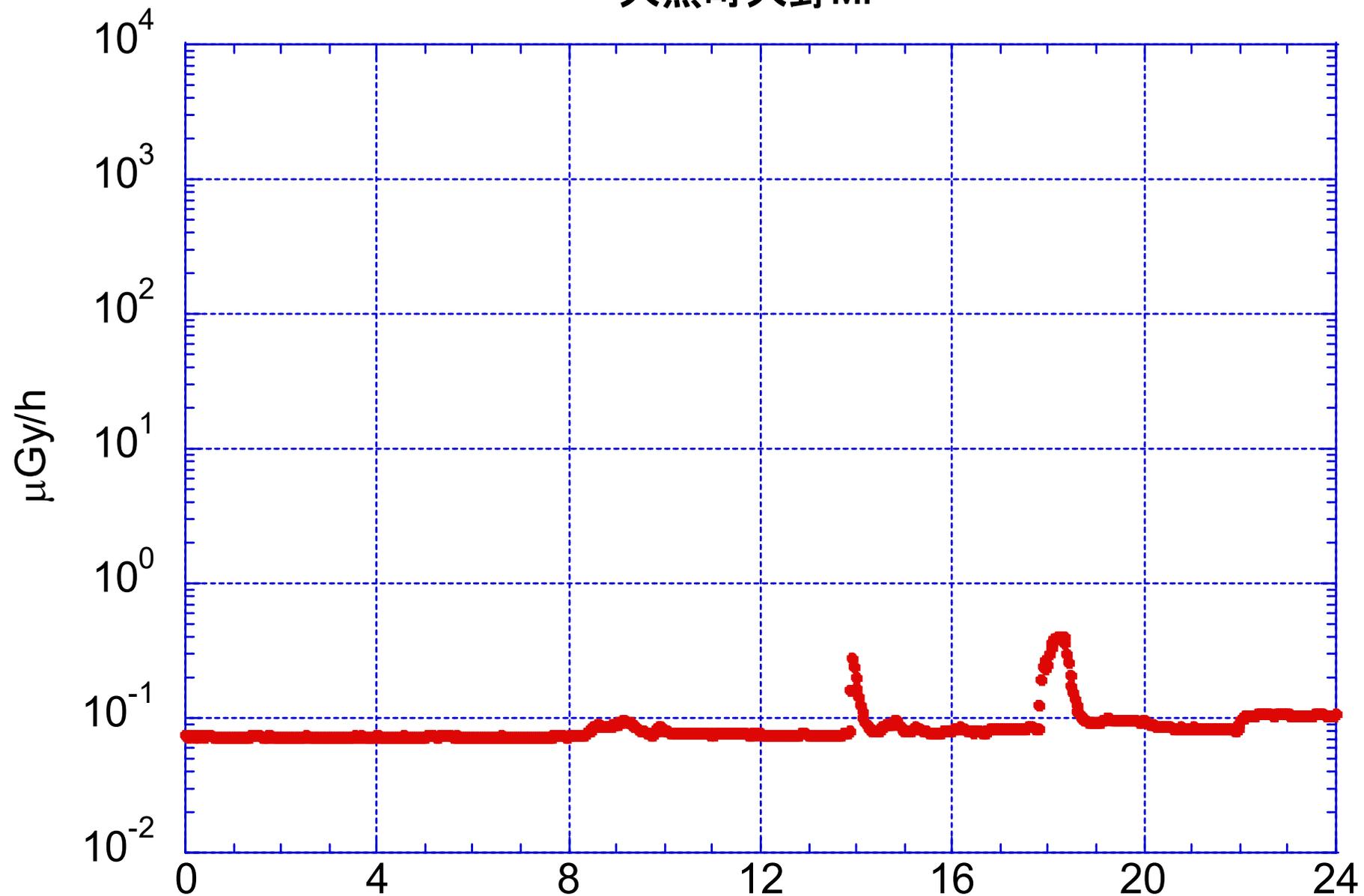
2011年3月12日のMPデータ

大熊町夫沢MP



2011年3月12日のMPデータ

大熊町大野MP



Time (March 12, 2011)

2011年3月12日のMPデータ

大熊町南台MP

