

福島第一原子力発電所事故における
放射性物質の大気中への放出量の推定について

平成24年5月

東京電力株式会社

目次

1	はじめに.....	1
2	放射性物質の放出について.....	1
3	放出量の評価方法について.....	1
3.1	評価フロー.....	1
3.2	DIANA について (図 3 の①).....	2
3.3	評価に用いた気象データについて (図 3 の②).....	3
3.4	評価で用いた空間線量率について (図 3 の③).....	4
3.5	各時刻の放出状況 (図 3 の④).....	5
3.6	各核種への振り分け (図 3 の⑤).....	5
4	評価結果.....	6
4.1	放出量の評価結果.....	6
4.2	放出量の経時変化.....	6
4.1 節	の放出量の経時変化を図 27 に示し、放出率の経時変化を図 28 に示す。.....	6
4.3	放射性物質の沈着量の評価結果.....	6
5	考察.....	7
5.1	放出量について他機関の評価結果との比較.....	7
5.2	実測の沈着量との比較.....	8
5.3	空間線量率データが変動する期間の評価値.....	8
5.4	空間線量率データが変動しない期間の評価値.....	10
5.5	事象ごとの評価.....	11
5.5.1	建屋爆発時における放射性物質の放出量について.....	12
5.5.2	格納容器ベントに伴う放射性物質の放出量について.....	13
5.5.3	原子炉建屋からの放出量について.....	13
5.6	福島第一原子力発電所からみて北西方向の地域の汚染要因について.....	14
6	まとめ.....	15
7	別紙.....	15
	参考資料.....	16
1	プルームの移動と空間線量率の変化について.....	16
1.1	モニタリング箇所上空にプルームが近づいてくるケース.....	16
1.2	モニタリング箇所上空にプルームが近づいて来ないケース.....	17
2	放射性核種の放出されやすさの比.....	18

1 はじめに

平成23年3月11日14時46分に発生した三陸沖を震源とする東北地方太平洋沖地震およびそれに随伴して発生した津波により、全交流・直流電源及び最終ヒートシンクを喪失した状態が継続した福島第一原子力発電所1～3号機では、燃料が損傷・熔融するとともに、原子炉格納容器にも損傷が生じたことから、放射性物質が環境中へ放出されるという事故に至った。

本資料は、事故調査の一環として、同事故に伴い、発電所から大気中へ放出された主要核種毎の放出量を推定するとともに、放出の時系列、格納容器ベントの効果、北西方向沈着の要因を明らかにすることを目的としている。

なお、推定に用いているシステムの限界や計算条件の不確実性のため、本資料の内容は、今後の事故調査の進展に伴い、見直す可能性がある。

2 放射性物質の放出について

事故後、放射性物質が1～3号機から放出され、大気中への放射性物質の放出としては、ベント・建屋爆発に伴う放出のほか、建屋爆発後は建屋からの継続放出があった。

本来であれば既設のモニタリングポスト、スタックモニタで大気中への放射性物質の放出を把握できるが、モニタリングポストについては地震により、スタックモニタについては津波に伴い電源が喪失したため、スタックモニタ等の機能が喪失した。そこで、発電所周辺にモニタリングカーを配置し、空間線量率や気象データ（風向、風速）等を測定し、放射性物質の放出状況の把握に努めた。

図1のように大気へ放出された放射性物質のうち、重力や降雨の影響を受けない希ガスは風によって運ばれるとともに拡散していく。一方、よう素やセシウム等は重力や降雨の影響を受け、風によって拡散しながら地表面及び海面へ降下する。更に、地表面に沈着した後も雨水によって河川に運ばれ、その後海洋へ移行するなど、複雑な挙動をする。

また、図2のように格納容器から放出された放射性物質のうち、大気に移行しないものとして、格納容器外から原子炉へ注水した水に随伴された放射性物質が、格納容器から漏洩し原子炉建屋内を経てタービン建屋に滞留するものがある（本報告書ではこの放射性物質の量は評価対象とはしていない）。

3 放出量の評価方法について

モニタリングカーなどで測定した空間線量率等や気象庁の気象観測所で観測された降雨などの気象データをもとに、発電所から大気中へ放出された放射性物質の量を評価した。

3.1 評価フロー

放出量評価の流れは以下のとおり。そのフローを図3に示す。また、①～⑤について次章以降に詳細を記載する。

ステップ1：観測データ（空間線量率、気象データ（風向、風速、降雨量、日射量））を当社の放射性物質の大気中の拡散を評価するシステム（DIANA：3.2節参照）へ入力し、大気中への放出量を推定する。

ステップ2：空間線量率の時間変化に基づき、ステップ1で得られた放出量に対して、希ガス、よう素、セシウムの放出割合を評価する。

ステップ3：ステップ2によって得られたセシウム137の放出量と気象データから地表面への沈着量を評価する。

3.2 DIANAについて(図3の①)

DIANA (Dose Information Analysis for Nuclear Accident) は、放射性希ガス・よう素および粒子状物質が大気中に放出された場合を想定して、10分毎に原子力発電所周辺の3次元移流拡散現象を模擬し、任意の地点における空間線量率を評価することが可能なシステムである。具体的な仕様は以下の通りである。

計算方法：測定された気象データ(発電所内の風向、風速)を元に、評価領域内(発電所を含む、東西50km×南北50km×高さ2000mの範囲、計算メッシュ：1km×1km×100m)の3次元の風場を地形の影響を考慮し作成し、粒子による移流拡散を計算

拡散粒子：0.5MeV換算の粒子を仮定

風場の評価：質量保存則を満足する風場の評価

移流拡散：ラグランジュ型仮想粒子拡散モデル

放出箇所：同時刻の放出を仮定する地点は一箇所

計算ステップ：10分毎(10分間は一定の放出率を仮定する)

沈着速度：沈着速度とは、放射性物質の沈着のしやすさを表わすものであり、下表の数値を用いて地表面沈着濃度を評価している。この数値は、以下の論文に記載されている数値であり、大気拡散の計算で一般的な数値である。

- Engelmann, R.J. (1968) The Calculation of Precipitation Scavenging in Meteorology and Atomic Energy - 1968, D.H.Slade, Ed., US AEC, TID-24190
- Crandall, W.K. et. al, An Investigation Of Scavenging Of Radioactivity From Nuclear Debris Clouds: Research In Progress, Lawrence Livermore Laboratory, 1973. UCRL-51328, TID-4500
- Sehmel, G.A., Particle And Gas Dry Deposition: A Review, Atmospheric Environment, 14, pp.983-1011, 1980

(乾性沈着の場合)

大気安定度	よう素 (cm/s)	セシウム (cm/s)
A~F	0.3	0.3

(湿性沈着の場合)

大気安定度	よう素(1/s)/(mm/hr)	セシウム(1/s)/(mm/hr)
A~D	1.0E-03	2.0E-04
E, F	1.0E-04	

降雨の条件：同時刻において、評価範囲領域内で均一な降雨であると仮定

沈着評価範囲：発電所北側は25km

発電所南側は25km

発電所東側(海側)は20km

発電所西側(陸側)は30km

以上の仕様による制限があるため、評価において不確実性がある。

3.3 評価に用いた気象データについて（図 3 の②）

DIANA の入力となる気象データには、風向、風速、大気安定度及び降雨があるが、地震に伴う電源喪失などの影響によって敷地内に設置してある気象観測設備の気象データは得られなかった。

風向、風速については、事故時に福島第一原子力発電所敷地内に配置したモニタリングカー（地上約 2m）にて測定した。

大気安定度については、福島第一原子力発電所から比較的近く、停電による欠測がない気象庁の船引の AMEDAS 観測地点で得られた日射量の値を用いて求めた。

評価に用いた地上 10m の風速については、モニタリングカーにて測定した地上 2m の風速と大気安定度を使用して、「有害大気汚染物質に係る発生源周辺における環境影響予測手法マニュアル（平成 20 年 2 月 経済産業省）」に基づき求めた。

風向に関しては、モニタリングカーで測定された 16 方位を使用した。なお、DIANA では地形影響を考慮しており、拡散時の地形影響による風向変動は評価している。

降雨については、発電所周辺の観測地点の中で基本的には放射性物質の放出があった時点の風下にある観測地点を選択し、文部科学省の実測の沈着量を再現するか確認し、最適な観測地点（表 1・図 4 参照）の降水量を用いた。

表 1 採用した AMEDAS 観測点

時間帯	時間降雨量(mm/h)	使用した AMEDAS 観測点
3 月 15 日 11:10~21:20	0~3	飯舘
3 月 15 日 21:30~24:00	0~3	原町
3 月 16 日	0~3	川前
3 月 21 日 AM	0~3	広野
3 月 21 日 PM	0~3	川前
3 月 22 日~3 月 23 日 AM	0~3	広野 ^{注 1}
3 月 23 日 PM	0~3	川前
3 月 25 日 0:00~18:00	0~3	津島
3 月 25 日 18:10~21:00	0~3	船引
3 月 25 日 21:10~3 月 26 日	0~3	広野
3 月 30 日~31 日	0~3	浪江 ^{注 2}

（注 1）：3/22 24:00 は欠測。前後 10 分間には降雨はないが、レーダーアメダス及び他地点の状況を勘案して 3mm/h と設定

（注 2）：3/31 8:00 は欠測。同地点 7:50 には降雨なく、8:10 は降雨（3mm/h）。レーダーアメダス及び他地点の状況を勘案して 3mm/h と設定

3.4 評価で用いた空間線量率について（図 3 の③）

通常、放射性物質の放出を監視するため、発電所周辺にはモニタリングポスト（図 5）を設置し、空間線量率を監視している。福島第一原子力発電所事故では、電源喪失に伴い、モニタリングポストの機能が喪失したため、発電所敷地内にモニタリングカーを配置し、事故時の空間線量率等を測定した。その測定結果と事象を記載したモニタリングデータは図 6～図 25 に示すとおり。

福島第一原子力発電所事故における放射性物質の放出は、格納容器ベントや建屋爆発といった事象発生時に加えて、損傷した格納容器から放射性物質が大気中に放出されていたと考えられる。

空間線量率データが有意に変動する場合は、参考資料のように、プルームが直接観測地点の周辺を通過することで空間線量率データは変動する。また、直接観測地点を通過しない場合でもプルームからの直接線の影響で空間線量率データは変動する。以上のことから、空間線量率データが変動している期間においては、空間線量率データの上昇幅をもとに、詳細に拡散計算をすることで、その時点の放出を経時的な放出率として評価することが可能である。

また、空間線量率データが変動しない場合においては、放出事象があったが空間線量率データが変動しない場合と放出自体がない場合がある。空間線量率データが変動しない期間については、放出量はピークを生じる程の大きな放出はないと考えられる。ただし、放出がないと仮定するのではなく、空間線量率データの 1% に相当する放射性物質の放出が継続しているという評価を行った。また、実際の空間線量率の測定データの揺らぎを計算したところ、空間線量率のおおよそ 1% 未満であったことから（表 2 と図 26）、空間線量率データが変動しない期間において、測定値の揺らぎよりも大きな 1% の放出率を仮定して評価することは保守的といえる。

表 2 ピークが観測されていない時間帯の空間線量率の標準偏差

時間帯	場所	空間線量率 (μ Sv/h)	標準偏差 (%)
3 月 12 日 22:00～22:30	MP-4 付近	～50	0.07%
3 月 14 日 0:00～2:00	MP-2 付近	～400	0.00%
3 月 15 日 15:30～16:30	正門付近	～500	0.89%
3 月 19 日 18:00～21:00	事務本館北	～3000	0.10%

3.5 各時刻の放出状況 (図 3 の④)

爆発・ベントなどの事象で放出の号機が特定されている場合は、当該号機の放出として、評価する。しかし、3月13日以降は、複数の号機で炉心損傷、それに伴う放射性物質の放出が発生しており、同一時刻に複数の箇所(号機)から放射性物質が放出されていると考えられるが、DIANAの仕様上、各放出箇所は1箇所と限定されていることから、炉内の状況や各種操作の状況及びふくいちライブカメラなどのデータから主たる放出号機を推定して、その号機のインベントリを用いて評価を行った。なお、ベントの場合は、排気筒高さから、爆発や建屋からの放出の場合は、建屋の高さからの放出を仮定している。

3.6 各核種への振り分け (図 3 の⑤)

上述の通り、放射性物質を0.5MeV換算の仮想粒子を拡散計算の対象として扱うDIANAを用いて、0.5MeV換算の仮想粒子の放出量を評価する。

その後、0.5MeV換算の仮想粒子の放出量を評価対象とする核種の放射エネルギーへ、核種毎のエネルギー換算係数などを使用して振り分け、放出量とした。

3.4節の方法で、時刻tにおけるDIANAで評価した0.5MeV換算の仮想粒子の放出率(R(t))とすると、核種毎の振り分けの考え方は、以下の式の通りである。

$$R(t)=Q'(t) (100X(t)*C1+10Y(t)*C2+Z(t)*C3)$$

R(t) : 空間線量率からDIANAで逆算される0.5MeV換算の仮想粒子放出率 (Bq/s)

X(t) : 時刻tにおける、希ガスのインベントリ (Bq)

Y(t) : 時刻tにおける、よう素のインベントリ (Bq)

Z(t) : 時刻tにおける、セシウムのインベントリ (Bq)

C1 : 希ガスのインベントリを0.5MeV換算値に変更する係数

C2 : よう素のインベントリを0.5MeV換算値に変更する係数

C3 : セシウムのインベントリを0.5MeV換算値に変更する係数

Q'(t) : ある放出量(0.5MeV換算値)を空間線量率から決定される放出率に変換するための係数 (1/s)

Q'(t)以外の数値は時刻tごとに決まるため、Q'(t)が決まる。以上の式から、時刻tの核種毎の放出率は、以下の通りとなる。

- 希ガス^{注1} : Q'(t)*100C1* X(t) Bq/s
- よう素 : Q'(t)*10C2* Y(t) Bq/s
- セシウム : Q'(t)*C3* Z(t) Bq/s

以上の考え方にもとづいて、放出率を評価している。炉内インベントリについては、ORIGENコードを用い、燃料5バッチ交換を想定し、平均的な組成として評価した。なお、ORIGENコードとは、核データライブラリと呼ばれる原子核の特性(核分裂断面積、核分裂収率、崩壊定数など)を用いて、原子炉内の核分裂生成物の生成および壊変による放射エネルギーを求めるコードである。

空間線量率のピークの形状を再現するような放射性核種の放出されやすさの比を検討した結果、希ガス、よう素、セシウムの比は、100:10:1であった。(参考資料 2章参照)なお、希ガスについては、全量が放出されたと評価された時刻以降は、放出がないものとして扱っている。セシウムについては、Cs-134とCs-137ともそれぞれ同じ放出されやすさの比を用いた。

注1 評価核種は、以下の通り

Kr-79.80.81.81m.82.83.83m.84.85.85m.86.87.88.89.90.91.92.93.94.95.96.97.98
 Xe-126.127.128.129.129m.130.131.131m.132.133.133m.134.134m.135.135m.136.
 137.138.139.140.141.142.143.144.145.146.147

4 評価結果

4.1 放出量の評価結果

前章の方法を用いて評価した、2011年3月中の大気中への放出量（放出時点での放射能量（Bq）の総和）は表3の通り。なお、評価期間は、平成23年3月12日から3月31日までとして、4月以降の評価は、別紙1のとおり3月の総量に対し1%未満であった。

表3 評価結果（単位 PBq=10¹⁵Bq）

希ガス（0.5MeV換算値）	I-131	Cs-134	Cs-137	INES評価 ^{注1}
約500	約500	約10	約10	約900

（注1）INES（国際原子力指標尺度）評価は、放射能量をよう素換算した値。ここでは限られた核種でしか評価できていないため、I-131とCs-137を使用して、事故の規模を評価した。Cs-137のみ評価に加えている。

（例：約500PBq+約10PBq×40（換算係数）=約900PBq）

4.2 放出量の経時変化

4.1節の放出量の経時変化を図27に示し、放出率の経時変化を図28に示す。

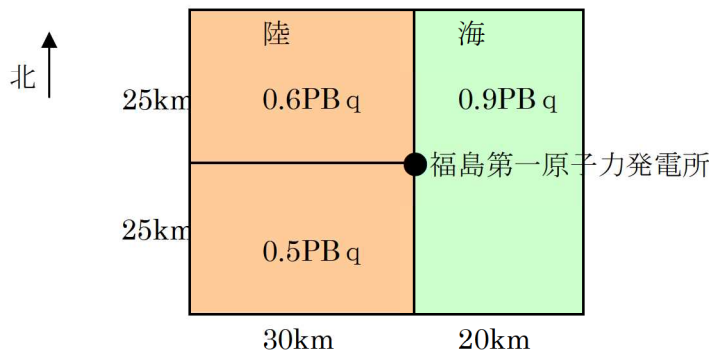
4.3 放射性物質の沈着量の評価結果

DIANAで評価した放出量をもとに、DIANAの評価範囲内におけるCs-137の沈着量を評価したところ、表4（簡単なイメージは表の下）のように福島第一原子力発電所から北側の陸地（西側30km×北側25kmの範囲）には0.6PBq、南側の陸地（西側30km×南側25kmの範囲）には0.5PBqの沈着があったと評価している。なお、東側（海側）20km×南北50kmの範囲は、0.9PBqであった。

表4 福島第一原子力発電所周辺のCs-137の沈着量（4月1日0:00現在）

	DIANAによる沈着量
北側（25km）	0.6PBq
南側（25km）	0.5PBq
総量	1PBq

（沈着量の評価範囲イメージ）



5 考察

5.1 放出量について他機関の評価結果との比較

他の機関での放出量評価結果を表 5 に示す。この結果から、Cs-137 の放出量については他の機関とほぼ同等となった。また、I-131 については他の機関の評価結果よりも約 3 倍程度多いとの結果になっている。当社の評価は、評価期間全体にわたって 1~3 号機における炉内インベントリからの放出されやすさの比は一定の比率を使っているため（ただし、各時刻の炉内インベントリは減衰を考慮した計算値を用いている。詳細は、参考資料 2 章参照）、I-131 の放出量が多くなっている可能性がある。例えば、日本原子力研究開発機構の大気放出量推定^{注1}では、環境中で測定された I-131 と Cs-137 の放出率は放出時期によって変動しているとの結果となっており（同等～約 100 倍）、今後、放出されやすさの比については、継続し検討を行う必要がある。

（注1）：平成 24 年 3 月 6 日 公開ワークショップ

「福島第一原子力発電所事故による環境放出と拡散プロセスの再構築」

（主催：独立行政法人日本原子力研究開発機構）

表 5 他の機関の評価結果

機関	公表日	評価期間	放出量 (PBq)				
			希ガス	I-131	Cs-134	Cs-137	INES 評価
日本原子力研究開発機構 原子力安全委員会	2011 年 4 月 12 日 2011 年 5 月 12 日	2011 年 3 月 11 日・ 2011 年 4 月 5 日	—	150	—	13	670
日本原子力研究開発機構 原子力安全委員会	2011 年 8 月 22 日	2011 年 3 月 12 日・ 2011 年 4 月 5 日		130		11	570
日本原子力研究開発機構	2012 年 3 月 6 日	2011 年 3 月 11 日・ 2011 年 4 月 10 日		120		9	480
原子力安全・保安院	2011 年 4 月 12 日	-	—	130	—	6.1	370
原子力安全・保安院	2011 年 6 月 6 日	-	—	160	18	15	770
原子力安全・保安院	2012 年 2 月 16 日	-	—	150	—	8.2	480
フランス放射線防護原子力 安全研究所 (IRSN ^{注2})	2011 年 3 月 22 日	2011 年 3 月 12 日・ 2011 年 3 月 22 日	2000	200	30		

（注2） IRSN で評価されたのは、希ガス、よう素、セシウムであり、核種毎の整理は行われていないことから、当社の評価と単純に比較することはできない。

5.2 実測の沈着量との比較

放射性物質の沈着量については、文部科学省 放射線量等分布マップの作成等に係る検討会にて調査が行われている。調査は平成 23 年 6 月から 7 月の期間で行われており、平成 23 年 6 月 14 日時点での沈着量に補正した結果（放射エネルギー）が公表されている。（図 29 参考）その調査結果をもとに、福島第一原子力発電所を含む、南北 50km、東西 30km の陸上範囲における Cs-137、Cs-134、I-131 の沈着量を算出した。結果は次の通りである。なお、DIANA では、3 月 31 日現在の沈着量を評価していることと、Cs-137 の半減期は、Cs-134 や I-131 に比べて長いいため、Cs-137 の 6 月 14 日現在の沈着量と比較することとした。

表 6 文部科学省の調査結果（沈着量）から計算

Cs-137	(参考) Cs-134	(参考) I-131
(北側) 0.8PBq	(北側) 0.7PBq	(北側) 1E-3 PBq
(南側) 0.3PBq	(南側) 0.3PBq	(南側) 8E-4 PBq
(合計) 1 PBq	(合計) 1 PBq	(合計) 2E-3 PBq

Cs-137 についての DIANA 評価結果と文部科学省の調査結果の比較から次のことがわかる。

- ① 総沈着量は概ね一致していること。
- ② 文部科学省の調査結果によると、Cs-134 と Cs-137 の沈着量はほぼ同程度であることから、発電所から放出された Cs-134 と Cs-137 の量は同程度であったと考えられ、今回の評価結果とも整合していること。
- ③ 文部科学省の調査結果によると南側に比べ北側の沈着量が大きいが、当社推定結果では南北は同等の値となっている。当社の沈着量の評価をする際、構内のモニタリングカーの 16 方位で風向の再現しているため、南北方向に誤差が生じていると考えられる。

文部科学省の航空機モニタリング結果（図 30）と DIANA による沈着評価結果を比較したものを図 31 に示す。これより、北西方向の評価においては汚染の高い方向について若干の方向の違いがあるものの、DIANA 評価でも北西方向に沈着が多いという傾向は再現されている。これは沈着量が多くなる降雨時において、風下方向の気象観測地点の降雨データを採用しており、放出の傾向は概ね再現できているものとする。

5.3 空間線量率データが変動する期間の評価値

前述の放出量評価のうち、空間線量率変動する期間の評価値を表 7 に、その内訳を表 8 に示す。なお、空間線量率変動する期間の放出量評価値は、平成 23 年 3 月 12 日から 31 日までの総量の大部分を占めている。

表 7 空間線量率変動する期間における評価値の総和（単位 PBq）

希ガス	I-131	Cs-134	Cs-137
約 500	約 400	約 10	約 8

表 8 空間線量率が変動する期間の評価値

No	日	時刻	推定 放出 号機	放出 高度 (m)	希ガス (PBq)	I-131 (PBq)	Cs-134 (PBq)	Cs-137 (PBq)	号機選定根拠 (DIANA の仕様上の制限のため、主放出号機を推定した)
1		04:00	1	約 30	20	3	0.06	0.04	炉心損傷しているのは 1 号機のみであり、ベント弁操作を行っていないため、建屋放出とした。
2		10:10	1	約 120	3	0.5	0.01	0.008	1 号機の SIC ベント弁操作を行っているため、非気筒放出とした。(実際にベントできていないかは不明)
3	3 月 12 日	10:50	1	約 30	0.2	0.03	0.0006	0.0004	No1 と同様。
4		14:00	1	約 120	4	0.7	0.01	0.01	No2 と同様。
5		15:30	1	約 30	10	3	0.05	0.04	1 号機で建屋爆発が発生しているため、建屋放出とした。
6		18:00	1	約 30	3	0.5	0.01	0.008	No1 と同様。
7		08:00	1	約 30	3	0.7	0.02	0.01	3 号機が炉心損傷するより前のタイミングであり (MAAP による推定)、オペフロが吹き飛んでいる 1 号機建屋を放出箇所とした。
8	3 月 13 日	09:00	3	約 120	1	0.3	0.005	0.003	ベントの実績から排気筒放出とした。
9		13:30	3	約 30	20	4	0.07	0.05	1 号機・2 号機は、D/W 圧力に大きな変動が見られないこと、3 号機ベント弁操作を行っていないことから、建屋放出とした。
10		02:00	3	約 30	10	7	0.1	0.09	他の放出場所を仮定した場合よりも線量率推移の再現性が比較的良好だったため、3 号機建屋を放出箇所とした。
11		07:20	3	約 30	2	1	0.02	0.02	No9 と同様。
12	3 月 14 日	11:00	3	約 30	1	0.7	0.01	0.009	3 号機で建屋爆発が発生しているため、建屋放出とした。
13		21:20	2	約 120	60	40	0.9	0.6	放出箇所については不明であるが、1・2 号機排気筒から放出されたものと仮定して評価した。(別紙 3.3.2 章参照)
14		06:10	1	約 30	5	4	0.1	0.07	2 号機・3 号機の D/W 内の圧力に変化がないため、1 号機の建屋放出とした。
15	3 月 15 日	07:20	2	約 30	80	60	1	0.9	5.5 章参照。
16		21:30	2	約 30	50	40	0.8	0.6	同上
17	3 月 16 日	10:00	3	約 30	100	100	2	2	8:30 に原子炉建屋からの白煙の大量噴出が確認され、3 号機の D/W 圧力が低下したため建屋放出とした。
18	3 月 18 日	15:20	1	約 30	20	20	0.7	0.5	2・3 号機の D/W 圧力に変化がないため、1 号機の建屋放出とした。
19		07:50	3	約 30	30	30	0.9	0.6	3 号機 D/W 圧力が変化しているため建屋放出とした。
20	3 月 19 日	08:30	3	約 30	7	6	0.2	0.1	
21		09:30	3	約 30	2	1	0.04	0.03	
22		03:40	2	約 30	0	1	0.03	0.02	
23		09:30	2	約 30	0	0.2	0.008	0.006	
24	3 月 20 日	13:50	2	約 30	0	20	0.5	0.4	
25		19:50	2	約 30	0	4	0.1	0.09	
26	3 月 21 日	16:20	2	約 30	0	2	0.07	0.05	18:20 に 2 号機から湯気が上がっていることが確認されているため、2 号機の建屋放出とした。
27		17:00	2	約 30	0	5	0.2	0.1	
28	3 月 22 日	15:10	3	約 30	0.2	0.3	0.01	0.007	7:11 に 3 号機から煙が上がっていることが確認されているため、3 号機の建屋放出とした。
29	3 月 23 日	13:40	3	約 30	2	6	0.2	0.2	16:20 に 3 号機原子炉建屋から黒煙が上がっていることが確認されているため、3 号機の建屋放出とした。
30	3 月 25 日	10:10	1	約 30	8	10	0.6	0.4	1 号機 D/W 圧力が変化しているため、1 号機の建屋放出とした。
31		18:30	1	約 30	0.6	0.8	0.05	0.04	
32	3 月 28 日	08:40	2	約 30	0	0.6	0.04	0.03	2 号機 D/W 圧力が変化しているため、2 号機の建屋放出とした。
33		09:40	2	約 30	0	20	1	0.9	
34		04:20	1	約 30	1	2	0.2	0.1	1 号機 D/W 圧力が変化しているため、1 号機の建屋放出とした。
35	3 月 29 日	06:50	1	約 30	4	6	0.5	0.4	
36		14:50	1	約 30	0.7	1	0.1	0.07	
37		16:50	1	約 30	0.1	0.2	0.02	0.01	
合 計					500	400	10	8	

凡例 S/C : サブレシジョンエンバー D/W : ドライウェル MAAP : Modular Accident Analysis Program

5.4 空間線量率データが変動しない期間の評価値

空間線量率データが変動しない期間の放出量評価値を表 9 に示す。

表 9 空間線量率データが変動しない期間の放出量

No	日	時刻		放出高度(m)	希ガス(PBq)	I-131(PBq)	Cs-134(PBq)	Cs-137(PBq)
1	3月12日	03:00	04:00	約30	0.000002	0.0000002	0.000000004	0.000000003
2		15:10	15:30	約30	0.00008	0.00002	0.0000004	0.0000003
3		15:40	18:00	約30	0.003	0.0006	0.00001	0.00001
4	3月13日	00:00	08:00	約30	0.001	0.0003	0.000006	0.000004
5		09:10	11:00	約120	0.001	0.0003	0.000005	0.000003
6		11:00	12:30	約30	0.002	0.0004	0.000007	0.000005
7		12:30	13:30	約120	0.04	0.009	0.0002	0.0001
8		17:00	20:40	約30	0.003	0.001	0.00003	0.00002
9		20:40	24:00	約120	0.003	0.001	0.00002	0.00002
10		00:00	02:00	約30	0.01	0.007	0.0001	0.00009
11	3月14日	04:00	05:20	約30	0.01	0.005	0.00009	0.00006
12		05:20	07:20	約30	0.07	0.04	0.0007	0.0005
13		09:20	11:00	約30	0.004	0.002	0.00004	0.00003
14		11:10	21:20	約30	0.002	0.001	0.00002	0.00002
15		22:20	23:40	約120	0.00003	0.00002	0.0000005	0.0000003
16		23:40	24:00	約30	0.008	0.005	0.0001	0.00008
17	3月15日	00:00	06:10	約30	0.02	0.02	0.0003	0.0002
18		10:20	16:10	約30	7	5	0.1	0.08
19		16:10	20:50	約30	0.5	0.4	0.009	0.006
20		20:50	21:30	約30	1	0.9	0.02	0.01
21	3月16日	00:00	02:20	約30	0.3	0.3	0.006	0.004
22		02:20	06:20	約30	6	4	0.1	0.07
23		06:20	08:30	約30	1	0.8	0.02	0.01
24		08:30	10:00	約30	0.7	0.6	0.01	0.009
25		13:00	24:00	約30	1	1	0.02	0.02
26	3月17日	00:00	21:30	約30	0.03	0.03	0.0007	0.0005
27		21:30	21:40	約30	30	40	1	0.8
28		21:40	24:00	約30	0.004	0.003	0.00009	0.00006
29	3月18日	00:00	05:30	約30	0.09	0.08	0.003	0.002
30		05:30	07:20	約30	0	2	0.07	0.05
31		07:20	15:20	約30	0.1	0.1	0.004	0.003
32		17:30	24:00	約30	0.1	0.1	0.004	0.003
33	3月19日	00:00	07:50	約30	0.06	0.06	0.002	0.001
34		08:00	08:30	約30	0.004	0.004	0.0001	0.00008
35		08:40	09:30	約30	0.007	0.006	0.0002	0.0001
36		09:40	24:00	約30	0.1	0.1	0.004	0.003
37	3月20日	00:00	03:40	約30	0	0.9	0.03	0.02
38		03:50	09:30	約30	0	0.5	0.01	0.01
39		09:50	11:20	約30	0	0.2	0.006	0.004
40		11:20	12:50	約30	0	0.2	0.006	0.004
41		12:50	13:50	約30	0	0.1	0.004	0.003
42		16:40	19:50	約30	0	0.7	0.02	0.02
43		20:10	24:00	約30	0	7	0.2	0.2
44	3月21日	00:00	16:20	約30	0	1	0.04	0.02
45		16:30	17:00	約30	0	0.03	0.001	0.0007
46		18:00	24:00	約30	0	0.2	0.008	0.006
47	3月22日	00:00	15:10	約30	0.3	0.3	0.01	0.007
48		16:30	24:00	約30	0.1	0.1	0.005	0.003
49	3月23日	00:00	13:40	約30	0.3	0.3	0.01	0.008
50		16:00	24:00	約30	0	0.2	0.008	0.005
51	3月24日	00:00	24:00	約30	0	3	0.1	0.1
52	3月25日	00:00	10:10	約30	0.04	0.04	0.003	0.002
53		10:30	18:30	約30	0.03	0.03	0.002	0.002
54		21:00	24:00	約30	0.01	0.01	0.0009	0.0006
55	3月26日	00:00	24:00	約30	0	0.2	0.01	0.008
56	3月27日	00:00	24:00	約30	0	0.2	0.01	0.009
57	3月28日	00:00	08:40	約30	0	0.09	0.006	0.004
58		08:50	09:40	約30	0	0.009	0.0006	0.0004
59		17:00	24:00	約30	0	0.08	0.006	0.004
60	3月29日	00:00	04:20	約30	0.02	0.03	0.002	0.002
61		05:50	06:50	約30	0.004	0.006	0.0005	0.0004
62		11:50	14:50	約30	0.01	0.02	0.002	0.001
63		16:20	16:50	約30	0.002	0.003	0.0003	0.0002
64		18:20	24:00	約30	0.02	0.04	0.003	0.002
65	3月30日	00:00	24:00	約30	0.02	0.04	0.003	0.002
66	3月31日	00:00	24:00	約30	0.02	0.04	0.004	0.003
合計					50	70	2	1

5.5 事象ごとの評価

前章までの結果をまとめ、1～3号機で発生した爆発、ベント等の事象毎に評価した放出量の評価結果を表10に示す。

なお、これらイベントによる放出量の総和は、Cs-137に関しては算出した放出量の総和の約1/10程度となっているが、前述のように、放出量の算定においては保守的な前提をおいている事に加え、これら事象以外にも格納容器からの漏洩による継続的な建屋放出があったためと考えられる。

表10 事象ごとの放出量

号機	日時	事象	放出量(PBq)			
			希ガス	I-131	Cs-134	Cs-137
1	3月12日 14時過ぎ	格納容器ベント	4	0.7	0.01	0.01
	3月12日 15:36	建屋爆発	10	3	0.05	0.04
3	3月13日 9時過ぎ ^{注1}	格納容器ベント	1	0.3	0.005	0.003
	3月13日 12時過ぎ ^{注1, 2}	格納容器ベント	0～0.04	0～0.009	0～0.0002	0～0.0001
	3月13日 20時過ぎ ^{注1, 2}	格納容器ベント	0～0.003	0～0.001	0～0.00002	0～0.00002
	3月14日 6時過ぎ ^{注3}	格納容器ベント	0～0.003	0～0.001	0～0.00002	0～0.00002
	3月15日 16時過ぎ ^{注3}	格納容器ベント	0～0.003	0～0.001	0～0.00002	0～0.00002
	3月16日 2時頃 ^{注3}	格納容器ベント	0～0.003	0～0.001	0～0.00002	0～0.00002
	3月17日 21時過ぎ ^{注3}	格納容器ベント	0～0.003	0～0.001	0～0.00002	0～0.00002
	3月18日 5時過ぎ ^{注3}	格納容器ベント	0～0.003	0～0.001	0～0.00002	0～0.00002
	3月20日 11時過ぎ ^{注3}	格納容器ベント	0～0.003	0～0.001	0～0.00002	0～0.00002
	3月14日 11:01 ^{注2}	建屋爆発	1	0.7	0.01	0.009
計			約20	約4	約0.09	約0.06

(注1) 1～3号機は建屋爆発やブローアウトパネル開放によって、格納容器から大気中へ直接、放射性物質が放出されたと考えられる。格納容器からの直接放出とベントによる放出を分離して評価することは困難であるため、建屋爆発・ブローアウトパネル開放が発生した後に実施したベント・建屋爆発については、格納容器から直接放出された放射性物質も含んだ評価となっている。

(注2) 線量率にピークが現れていないため、線量率に変動を与えない程度の放出を仮定して評価した。

(注3) 3号機のベントについては、3月13日に実施された3回のベントの評価結果より、ベント時の放出量が回を追う毎に減少していることがわかる。3月14日以降のベントについては、空間線量率に変動が確認されていないため、放射性物質の放出はさらに少ない可能性もあるが、3月13日20時過ぎのベント時の放出量と同量とした。

5.5.1 建屋爆発時における放射性物質の放出量について

1・3・4号機においては、損傷燃料から発生した水素ガスによるものと推定される爆発により原子炉建屋（以下、R/B）が損壊した。各建屋爆発における放射性物質の放出量の評価結果を次にまとめる。

- 1号機

1号機については、3月12日15時36分頃にR/B上部で爆発が発生し、屋根及び5階の外壁が損壊した。爆発時点では、南東の風が吹き、正門付近、モニタリングポスト（以下、MP）-4付近、MP-8付近のモニタリングカーにて空間線量率を測定していた。MP-4付近では爆発よりも少し前の時点で空間線量率にピークが現れている。この原因としては、線量率の測定時刻は、モニタリングカー等の観測者の腕時計等を基に記録されており、数分の誤差がありえる。また、爆発前に建屋から放出された蒸気によって空間線量率に変動を与えている可能性もある。このため、MP-4付近で観測された空間線量率のピークを基に、爆発による放出量を評価した。同建屋爆発における放射性物質の放出量の評価結果を表11に示す。

- 3号機

3号機については、3月14日11時1分頃にR/B上部で爆発が発生し、オペレーションフロアから上部全体とオペレーションフロア1階下の南北の外壁が損壊した。爆発時点では、MP-3付近、MP-4付近のモニタリングカーにて空間線量率を測定していたが、北西の風が吹いており、空間線量率に大きなピークは現れていない。ブルームの流れる方向に対しMPが風上にあっても多量な放射性物質の放出があれば直接線の影響で、MPの線量率にピークが現れる場合もある。しかし、3号機の建屋爆発では、北西の風が吹いており、空間線量率に大きなピークは現れていないので、多量な放射性物質の放出があったとは考えにくい。同建屋爆発における放射性物質の放出量の評価結果を表11に示す。

- 4号機

4号機については、3月15日6時12分頃、R/Bにおいて爆発が発生し、原子炉建屋5階屋根付近が損壊した。爆発時点では、北風が吹いており、爆発後から数十分間は空間線量率が測定されていない。当時の風速は2m/s程度であったことを考慮すると、建屋爆発に伴い放出されたブルームは、空間線量率の測定が再開された数十分後には発電所構外へ移動していると考えられ、4号機の建屋爆発に伴う放出量は評価できなかった。4号機の建屋爆発については、3号機の原子炉で発生した水素が、3号機のベントラインを経由し、4号機の非常用ガス処理系を逆流し、4号機の建屋に流入したものと考えている。平成23年8月25日に4号機の非常用ガス処理系のフィルタの線量測定を実施した際には、フィルタにわずかな量ながらも放射性物質が捕捉されていることが確認されており、4号機の建屋に流入した放射性物質は少なかったと考えられることから、4号機の建屋爆発に伴い放出された放射性物質の量も少なかったものと考えられる。

表 11 建屋爆発時における放射性物質の放出量の評価結果

号機	日時	放出量 (PBq)			
		希ガス	I-131	Cs-134	Cs-137
1	3月12日 15時36分頃	約10	約3	約0.05	約0.04
3	3月14日 11時01分頃	約1	約0.7	約0.01	約0.009
4	3月15日 6時12分頃	-	-	-	-
合計		約10	約3	約0.07	約0.05

4.1節の評価結果と比べると、いずれの号機も建屋爆発に伴う放出は少なかったと考える。

5.5.2 格納容器ベントに伴う放射性物質の放出量について

1～3号機はベントにて格納容器の減圧操作を試みている。1・3号機においては、格納容器ベントが成功したと考えられるが、2号機に関しては、格納容器ベントが成功したか分かっていない。

ベントによる放出量の評価結果を、表 12 に示す。このベント操作では、蒸気や水素とともに放射性物質が大気中へ放出されることとなる。今回の評価では、格納容器ベントに伴う放射性物質の放出量も評価しているが、別紙 2 に示す通り、格納容器ベントに伴う放出量は全体の 1%未満であり、支配的な放出ではなかったものと評価している。これは、格納容器ベントによって放射性物質の放出が低減できたためと考える。(別紙 2 参照)

表 12 格納容器ベントに伴う放出量とその他の事象に伴う放出量の比較

放射性物質 放出形態	希ガス (PBq)	I-131 (PBq)	Cs-134 (PBq)	Cs-137 (PBq)
格納容器ベント ^{注1}	約 5	約 1	約 0.02	約 0.01
建屋爆発	約 10	約 3	約 0.07	約 0.05
建屋からの放出	約 500	約 500	約 10	約 10
合計	約 500	約 500	約 10	約 10

(注 1) ベントに伴い蒸気が放出されたかどうかわかっていないことから、1・2号機の 1 回目のベント弁操作時の放出量は、格納容器ベント時の放出量に含めていない。

5.5.3 原子炉建屋からの放出量について

今回の事故では、格納容器ベント、建屋爆発に伴う放出の他に、R/B から大気中へ放射性物質が放出されたと考えている。R/B からの放射性物質の放出量の評価結果を表 12 に示す。R/B からの放出は、格納容器ベント、建屋爆発に伴う放出よりも放出量が大きくなっているが、これは放射性物質の漏えいが S/C のプールスクラビングを受けない形で生じたためと推定される。

格納容器から R/B への放出経路（漏えい箇所）については特定することが困難であるが、格納容器の設計に関する情報や現場調査の結果から、格納容器トップヘッドフランジのシール部から漏えいした可能性があると考えている。(別紙 3 参照)

5.6 福島第一原子力発電所からみて北西方向の地域の汚染要因について

福島第一原子力発電所からみて北西方向の地域については、図 30 に示す文部科学省の土壌サンプリング調査でも明らかなように、放射性物質によって他の地域よりも汚染の程度が大きい。前述のように建屋爆発および格納容器ベントに伴い放出された放射性物質の量は 4.1 節の評価結果に比べて少なく、汚染の要因は他の放出事象によるものであると考えられる。本章では、同地域の汚染要因について検討する。

○発電所北側の沈着量の推移について

DIANA による沈着量の評価結果（表 13）によると、3 月 15 日に発電所北側の沈着量が増えており、北西地域の汚染は同日の放出が関与したものと推定している。以下、3 月 15 日を対象に考察を行う。

表 13 Cs-137 の沈着量の推移(発電所北側 25km×西側 30km)

	3 月 15 日 0 : 00	3 月 16 日 0 : 00	4 月 1 日 0 : 00
Cs-137 の沈着量(単位 PBq)	0.004	0.3	0.6

○3 月 15 日の空間線量率について

図 9 によると、3 月 15 日には、7 時過ぎからの数時間程度で正門付近は数 100 μ Sv/h 程度から 10,000 μ Sv/h 程度まで線量率が急激に上昇し、同日正午過ぎには線量率が 1,000 μ Sv/h 程度まで低下しているものの、23 時過ぎにはまた 10,000 μ Sv/h 近くの線量率が測定されており、同日は放射性物質が放出されていたものと推定される。

○3 月 15 日の放出量について

上述の空間線量率の変動をもとに、3 月 15 日に発電所から放出された希ガス、よう素、セシウムの評価結果を表 14 に示す。この結果から、同日の放出量は、建屋爆発および格納容器ベントに伴う放出量よりも多かったことがわかる。このような放出は、1 号機及び 3 号機の格納容器ベントの際の挙動と大きく異なり、漏えいが S/C のプールスクラビングを受けない形で生じたためと推定される。

表 14 3 月 15 日の放出量

	希ガス (PBq)	I-131 (PBq)	Cs-134 (PBq)	Cs-137 (PBq)
2 号機建屋放出	100	100	2	2

○3 月 15 日における放射性物質の放出箇所について

同日の放射性物質の放出箇所については、2 号機において朝方確認された白い煙が 9:40 頃に増加していることが確認されており、ふくいちライブカメラの映像（図 32）でも確認できること、同時帯には線量が 10,000 μ Sv/h 程度まで増加していること、同日 7 時から 11 時の間に 2 号機の D/W 圧力が大幅に低下していることから、同日午前の放出箇所としては 2 号機建屋の可能性が高いと考えられる。他号機からの放出の可能性についても考えられるものの、3 号機については 3 月 20 日までは格納容器ベントで圧力が制御できており、放射性物質の放出は制御できていると考えられること、1 号機については 3 月 13 日、14 日には D/W 圧力が安定しており、15 日に放出が増加するとは考えにくいこと、同日未明から 7 時までには風向に大きな変化はなく、空間線量率を上昇させた事象は同日 7 時以降に発生した事象が関連していると考えられることから、1 号機及び 3 号機からの放出が 3 月 15 日の線量率の上昇に寄与した可能性は小さいと考えられる。同日午後の放出箇所も午前を引き続き、2 号機建屋である可能性が高いと考えられる。その理由としては、午前中の 2 号機建屋からの放出が突然停止するとは考えにくいこと、同日 23 時頃に風向が南東から北東に変わった際に、正門付近で同日午前に匹敵するような高い空間線量率が観測され、同日午前からの放出が継続していると考えられることが挙げられる。

○ 2号機建屋から放出されたプルームの軌跡と北西方向の地域の汚染の関係について

図 33、図 34 に風向・風速・大気安定度から推定した、2号機建屋から放出されたプルームの軌跡を示す。同図に示すように、プルームは初め、正門を含む南西の方向へ向かっており、このプルームの移動によって3月15日午前には正門付近の線量率が急激に上昇したものと推定される。その後、12時辺りから風向が南南東に変化し、福島第一原子力発電所からみて北西方向の高汚染地域にプルームが流れていくことがわかる。この風向は同日23時頃まで続いており、福島第一原子力発電所から放出されたプルームが12時過ぎから長時間に亘り北北西の方向へ流れ、同方向の地域の上空を浮遊していたと考えられる。これらのプルームは、23時過ぎに観測された降雨（図 35）の影響で、浮遊していた放射性物質が地表へ沈着し、福島第一原子力発電所からみて北西方向の地域に高い汚染をもたらしたものと推定している。

6 まとめ

大気中への推定放出量について、各機関での評価手法は異なるが、Cs-137については、当社の推定結果は、他機関とほぼ同等な値となった。また、文部科学省が実施したCs-137の土壤汚染密度測定値の結果から評価した沈着量とDIANAによる沈着量評価値は、ほぼ同等な沈着量であった。この結果からも、Cs-137については、概ね妥当な放出量評価結果であったと考えている。しかし、I-131については、当社の結果は他機関の3倍程度となっている。この要因として、放射性核種の放出されやすさの比を一定の比として仮定していることが要因として考えられる。

そのほかにも、評価全般として、主に以下のような不確実性がある。

- 評価期間の各時刻における発電所構内の1箇所の空間線量率データの推移から、DIANAを使用して、その空間線量率データを再現するような放出率を評価している。しかし、同時に2箇所以上の空間線量率データが取れている期間においては、そのすべての空間線量率データを再現した放出率とはなっていない。
- 風向は、モニタリングカーで測定された16方位のデータを使用している。
- DIANAの仕様上、評価期間の各時刻における放出箇所が1箇所と限られている。
- 発電所の降雨のデータがないことから、近傍のAMEDAS観測点のデータを使用している。

以上の不確実性があることから、今後、社外の研究機関等と情報交換を行い、引き続き情報収集に努め、新たな知見が得られた場合には、推定方法及び結果に反映していく。

7 別紙

- (1) 4月以降の評価値
- (2) 格納容器ベントによる影響について
- (3) 格納容器からの漏えいに関する考察

以上

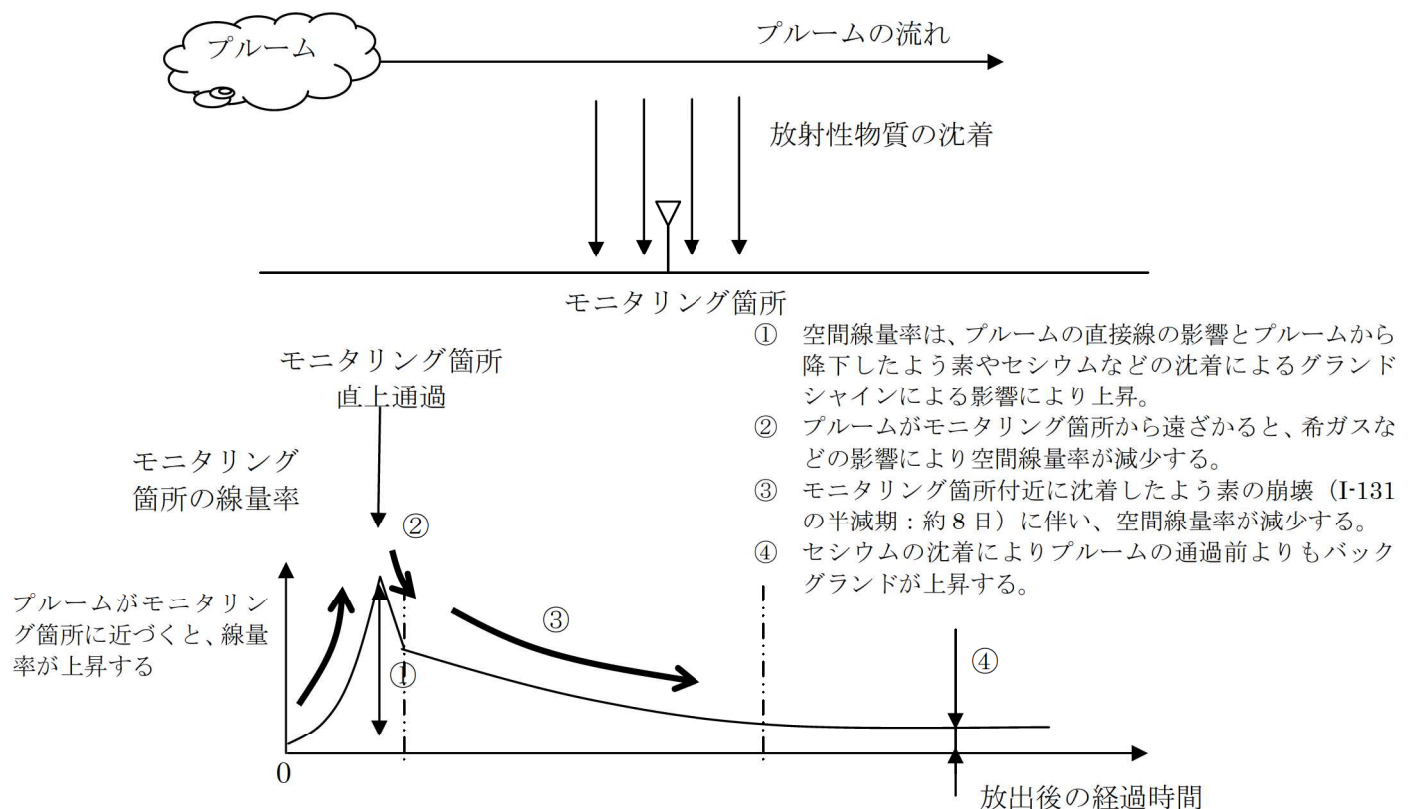
1 プルームの移動と空間線量率の変化について

事故後、モニタリングカーにて測定した空間線量率には複数のピークが現れている。空間線量率にピークが現れるケースには次の2つがある。

1.1 モニタリング箇所上空にプルームが近づいてくるケース

ベント・爆発等によって大気中に放出された放射性物質を含むプルーム（放射性物質を含んだ蒸気）は、発電所周辺の風に乗って拡散しながら移動をする。そのプルームがモニタリング箇所（モニタリングカー）、あるいはその付近の上空を通過した場合、空間線量率にピークが現れる。風速によっても異なるが、空間線量率の上昇率（または下降率）は次の後述の1.2節のケースよりも小さく、比較的ゆるやかに変化するのが特徴である。また、そのプルームは放射性物質を含んでいるため、移動の過程で、モニタリング箇所付近に放射性物質が沈着（降下）した場合は、空間線量率のバックグラウンドの上昇をもたらすことがある。

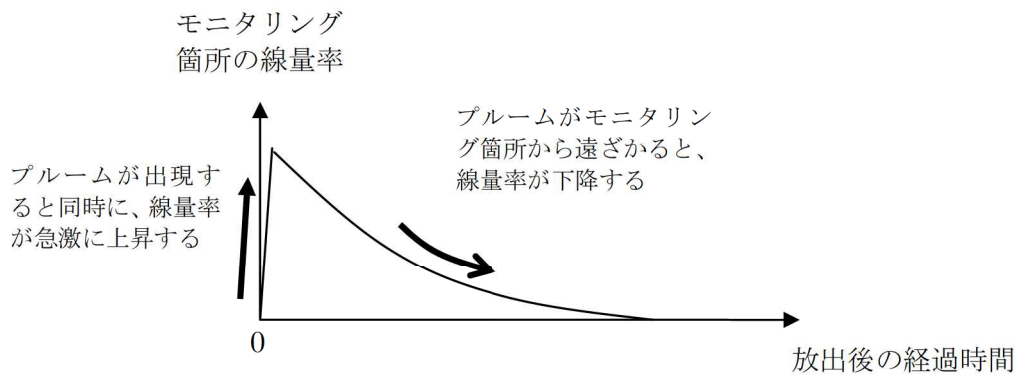
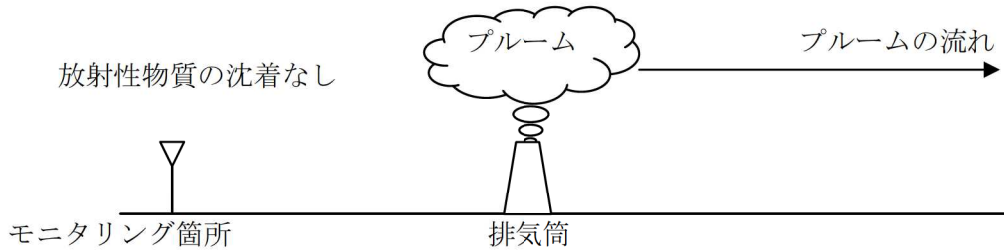
なお、風向の変化によって影響は受けるが、風速1 m/s程度の風が吹いている場合、排気筒から放出されたプルームは、10～20分程度でモニタリング箇所上空を通過し、発電所の敷地外に移動していくこととなる。よって、空間線量率にピークが現れるのは、その10～20分程度前に発生した放出事象と関連している可能性が高いと言える。



プルームの方向・気象条件によって、モニタリング箇所に放射性物質の沈着が起きる場合があり、モニタリング線量率のデータの上昇は、プルームの直接線の影響と放射性物質の沈着量によるグラウンドシャインによる影響によっておきると考えられる。（上図①参考）しかし、空間線量率データの上昇分をすべて直接線の影響として保守的に放出量を評価した。

1.2 モニタリング箇所上空にプルームが近づいて来ないケース

放射性物質を含んだプルームは直接線・スカイシャイン線を発するため、プルームがモニタリング箇所（モニタリングカー）、またはその付近の上空を通過しなくても、放射性物質が大量に放出されれば空間線量率にピークが現れることがある。この場合、空間線量率はプルームが放出された時点で急激に上昇する。その後、プルームがモニタリング箇所、その付近の上空を通過する場合は前述の 1.1 節のような空間線量率の変化を示すが、プルームがモニタリング箇所から遠ざかっていく場合は、空間線量率が緩やかに減少していく。また、放射性物質を含んだプルームは、モニタリング箇所付近を通過しないため、放射性物質の沈着はなく、バックグラウンドの上昇をもたらすことはない。



2 放射性核種の放出されやすさの比

放射性核種の放出されやすさの比は、号機、放出場所などの要因で変化することが考えられるものの、その数値の経時変化は把握できていない。そこで、今回の評価においては、土壌に沈着した放射性物質の量と減衰から放射性核種の放出されやすさの比を推定し、放出量評価に用いることとした。

具体的には、発電所周辺で測定した空間線量率を用い、そのバックグラウンドの減衰曲線から放射性核種の放出されやすさの比を推定した。バックグラウンドの減衰傾向は沈着した放射性物質（核種）の沈着量によって異なることから、これを利用した。放出されやすさの比の推定には、降雨が観測されていない時間帯、かつ空間線量率のピーク前後で相応の沈着がある時間帯を選定した。

今回の評価では①3月13日9時頃のMP-4付近のピーク、②3月14日21時過ぎのピーク、③3月20日15時頃の事務本館北のピークの3つの時間帯を選定し、よう素とセシウムの放出されやすさの比を推定した。その結果を図36、図37、図38に示す。

この結果より、放出されやすさの比を一意に決定するのは困難であるものの、よう素とセシウムの比をおおよそ10:1程度と仮定すれば、どの時間帯でも概ね減衰曲線が再現できると考えられる。このため、今回の評価では評価期間中を通じ、よう素とセシウムの放出されやすさの比を10:1と仮定し、放出量の評価することとした。

なお、2011年3月21日には発電所敷地内（事務本館北側）にて空气中放射能濃度を測定しているが、このデータを確認すると、よう素とセシウムの空气中放射能濃度の比は40倍程度となっており（表15参照）、同時期のよう素とセシウムの炉内インベントリの比は4倍程度であることを踏まえると、放出されやすさの比として10:1を使用することは概ね妥当であると考えられる。

表 15 事務本館北側の空气中放射能濃度
(3月21日10時19分～10時39分まで試料採取)

	放射能濃度(Bq/cm ³)	Cs-134 との比	Cs-137 との比
I-131	1.516E-3	44.8	39.9
Cs-134	3.383E-5	1	—
Cs-137	3.801E-5	—	1

また、上記のよう素とセシウムの放出されやすさの比を踏まえ、希ガスとよう素の比を推定した。その結果を図39に示す。希ガスとよう素の比を変化させることで、各ピークの後のバックグラウンドが上下に変動することになるが、希ガスとよう素の比として100:10程度であれば、空間線量率の推移が概ね再現できるため、今回の評価では、セシウムも含め、希ガス、よう素、セシウムの放出されやすさの比として100:10:1を用いて計算をおこなった。

なお、空間線量率の上昇分を放出された放射性物質の直接線によるものとしてDIANAで放出量进行评估しているため、図39において、沈着を多く及ぼす環境下では、グラウンドシャインの影響が大きくなり、空間線量率を再現しない場合もある。

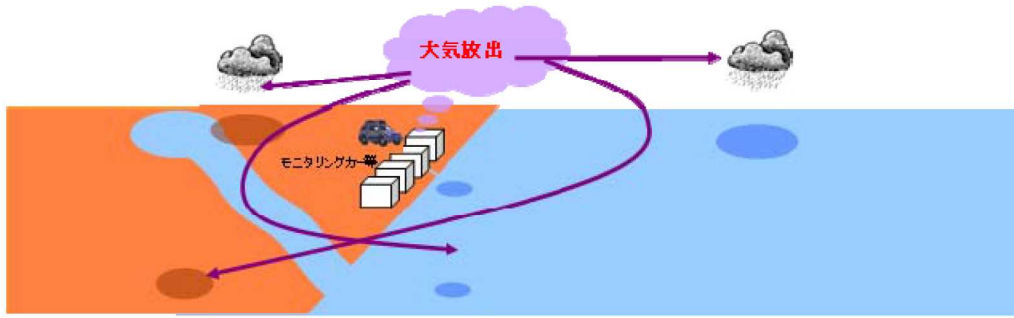


図 1 放出された放射能の移行イメージ

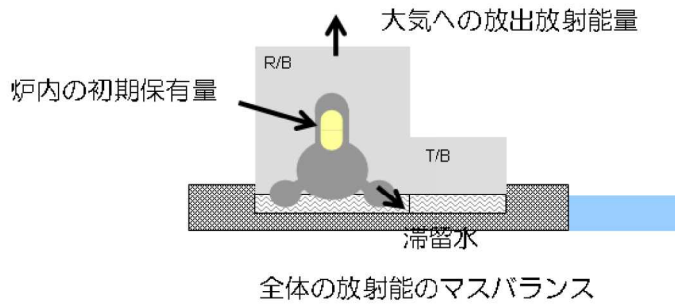


図 2 建屋内の放射能の移行イメージ

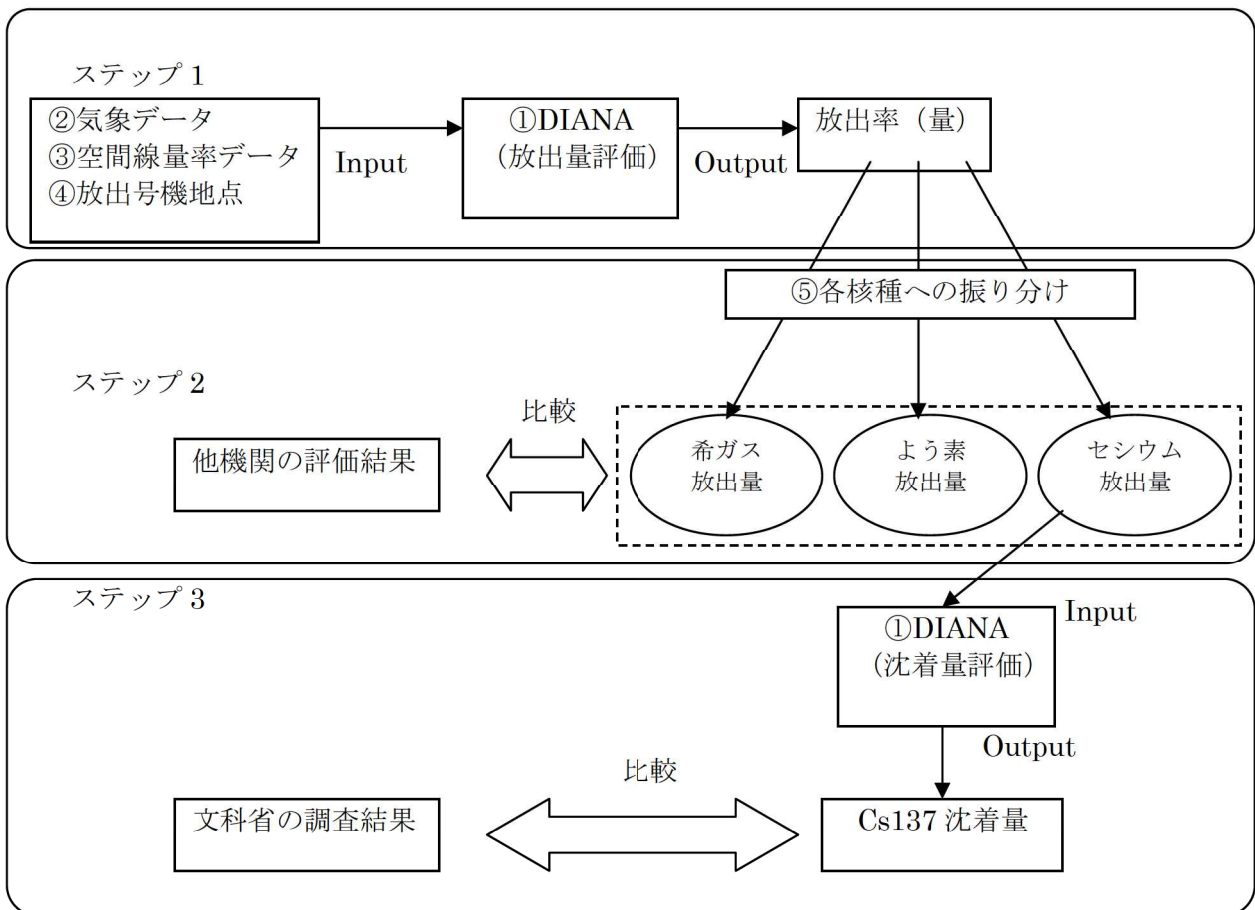


図 3 評価フロー



図 4 気象庁の気象観測地点



図 5 モニタリングポスト配置図

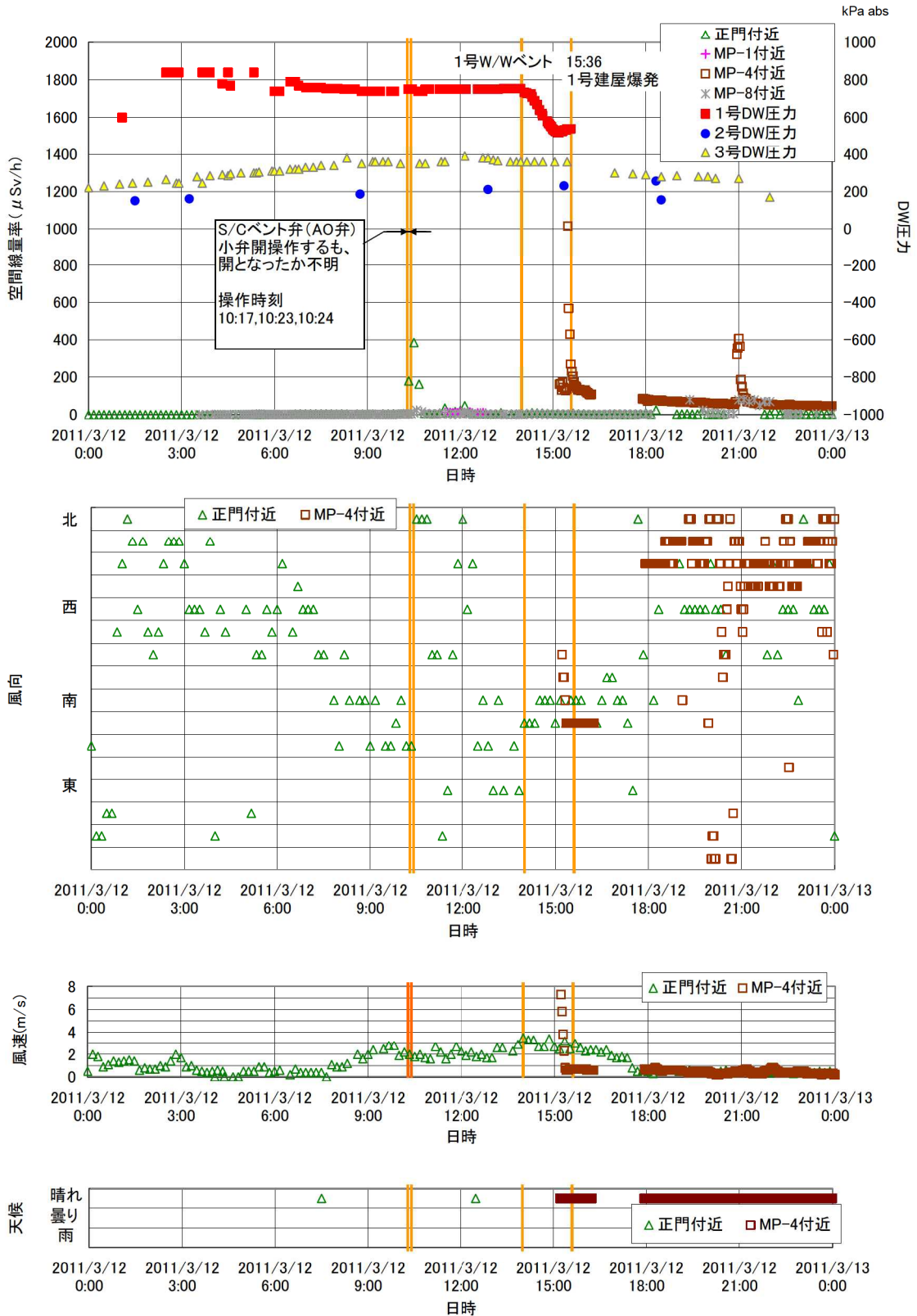


図 6 空間線量率の推移 (3月12日)

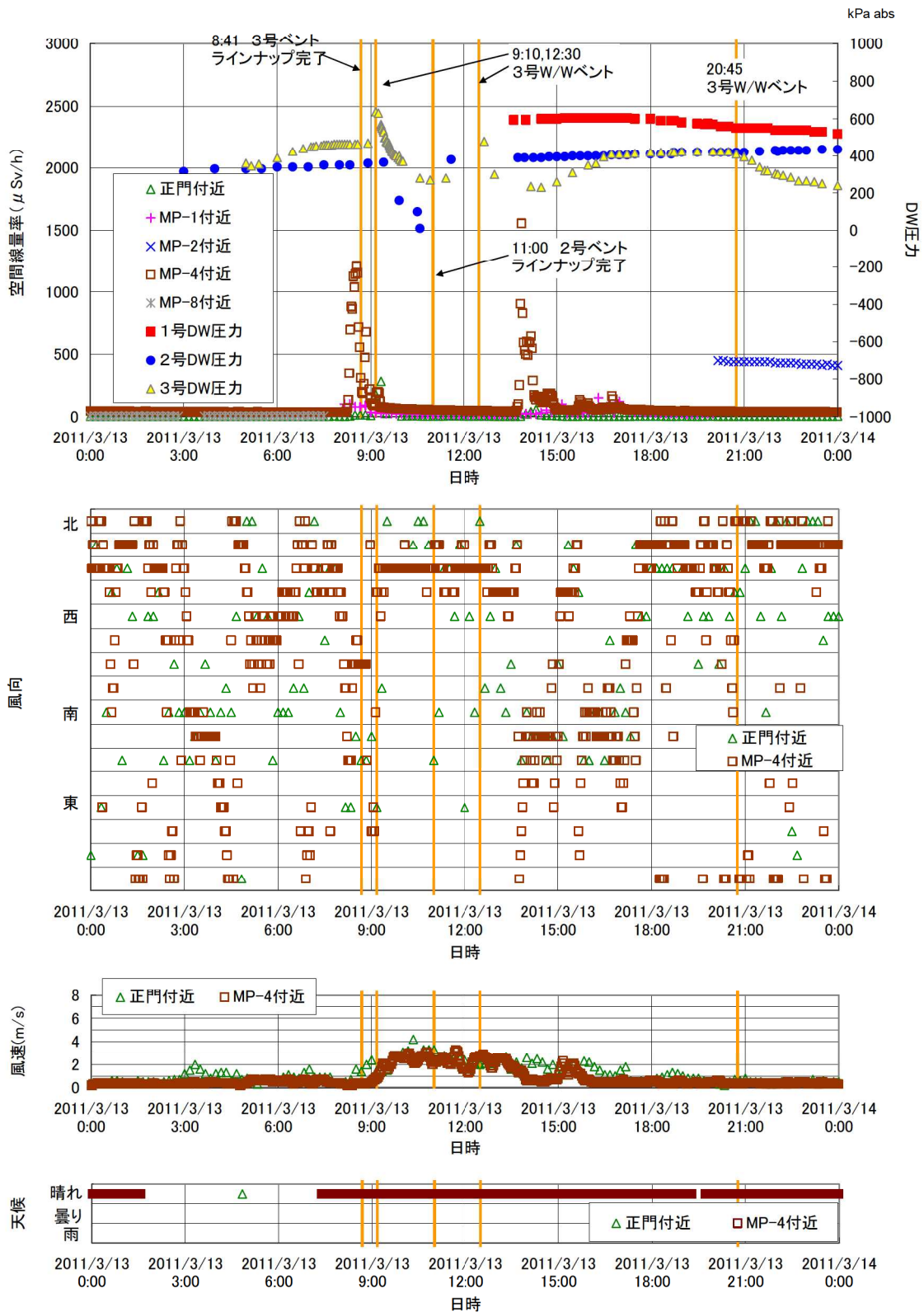


図 7 空間線量率の推移 (3月13日)

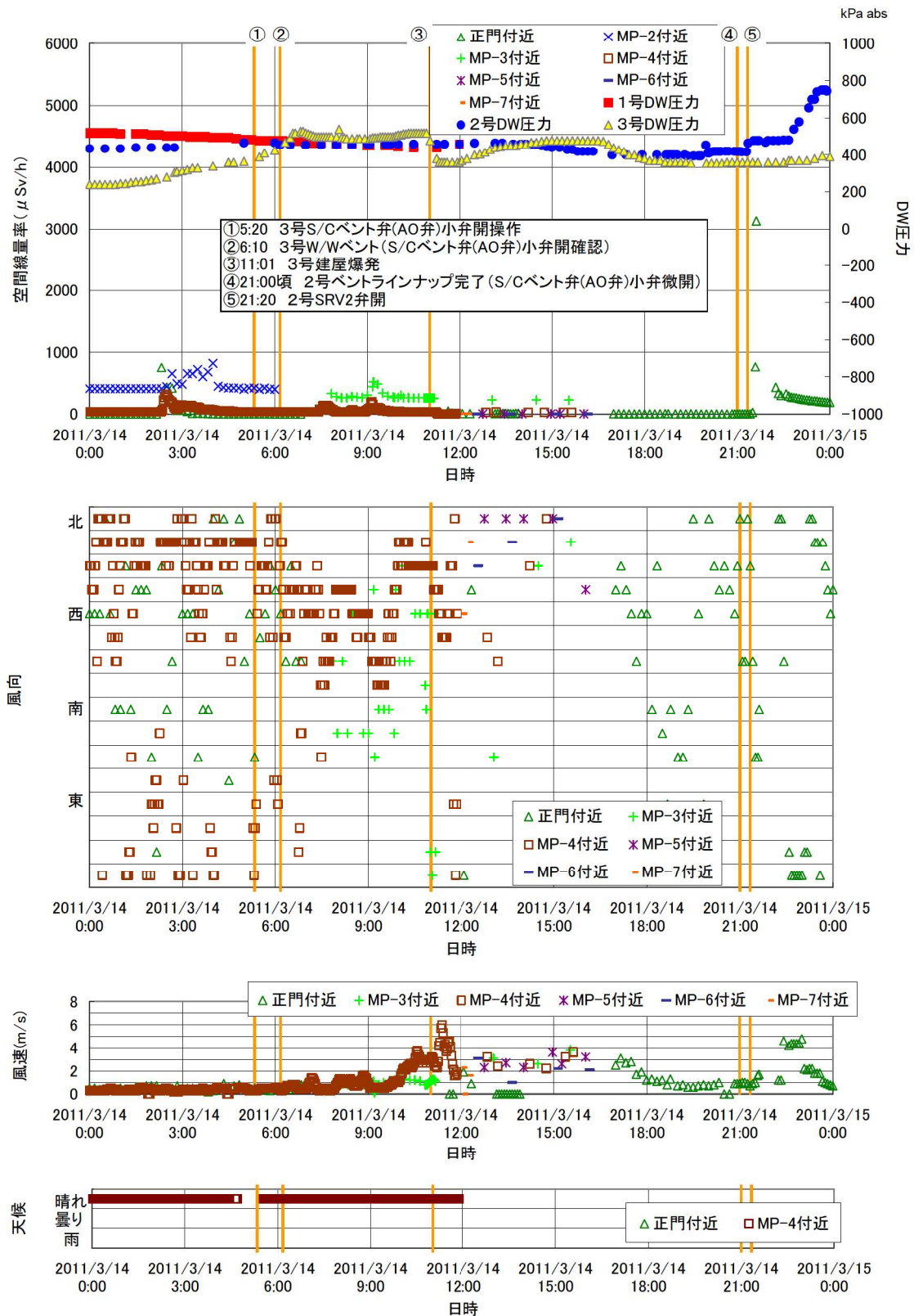


図 8 空間線量率の推移 (3月14日)

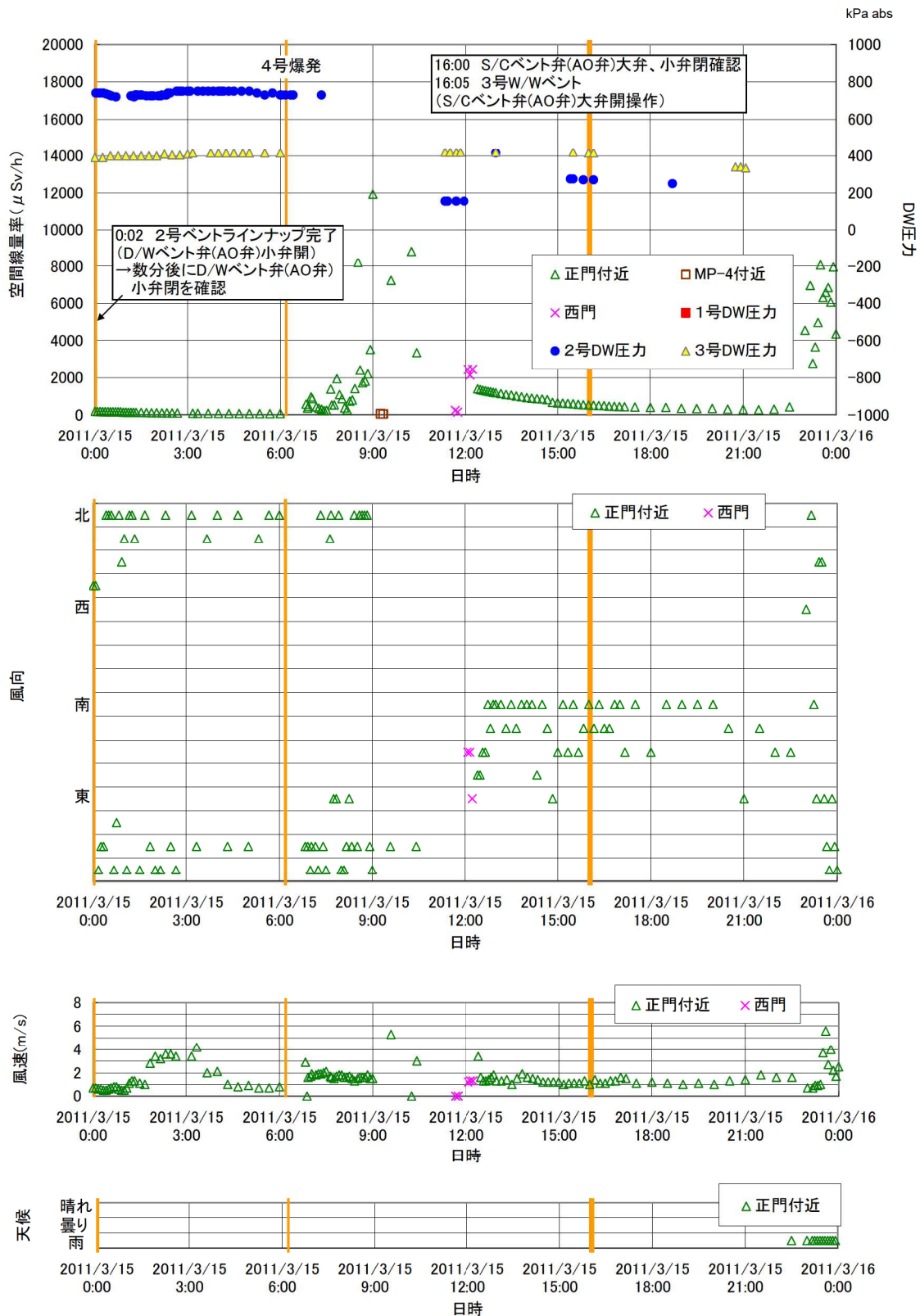


図 9 空間線量率の推移 (3月15日)

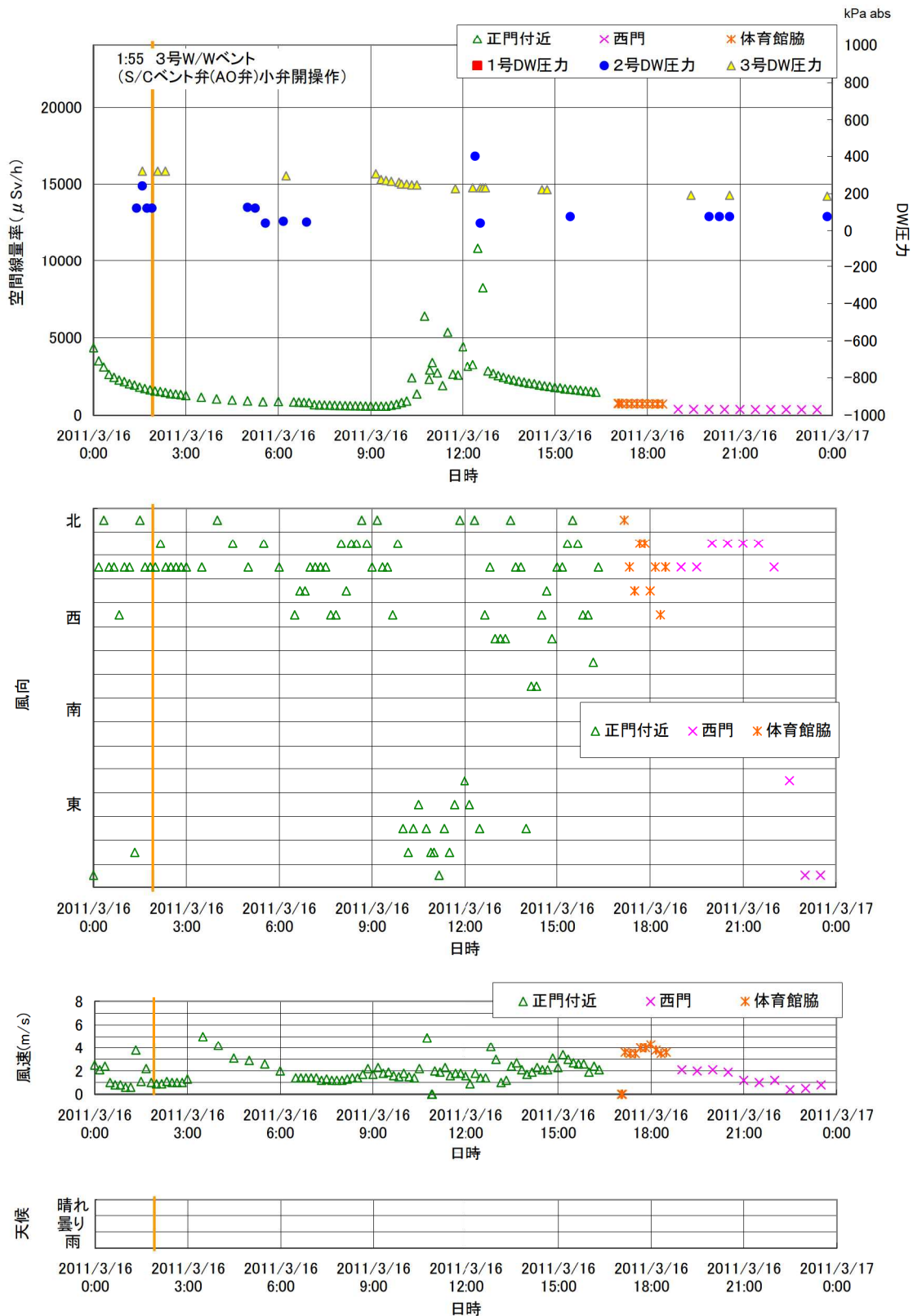


図 10 空間線量率の推移 (3月16日)

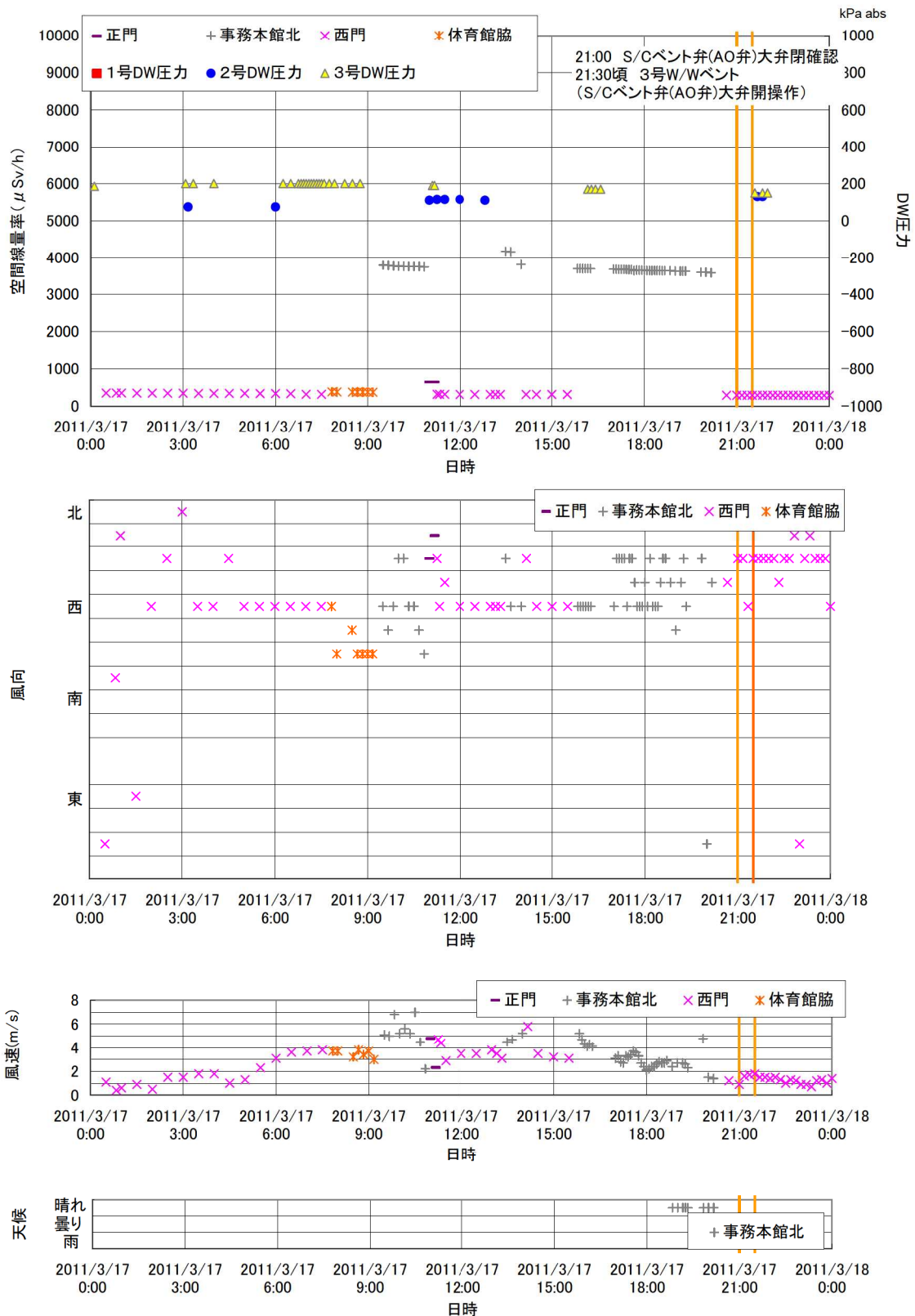


図 11 空間線量率の推移 (3月17日)

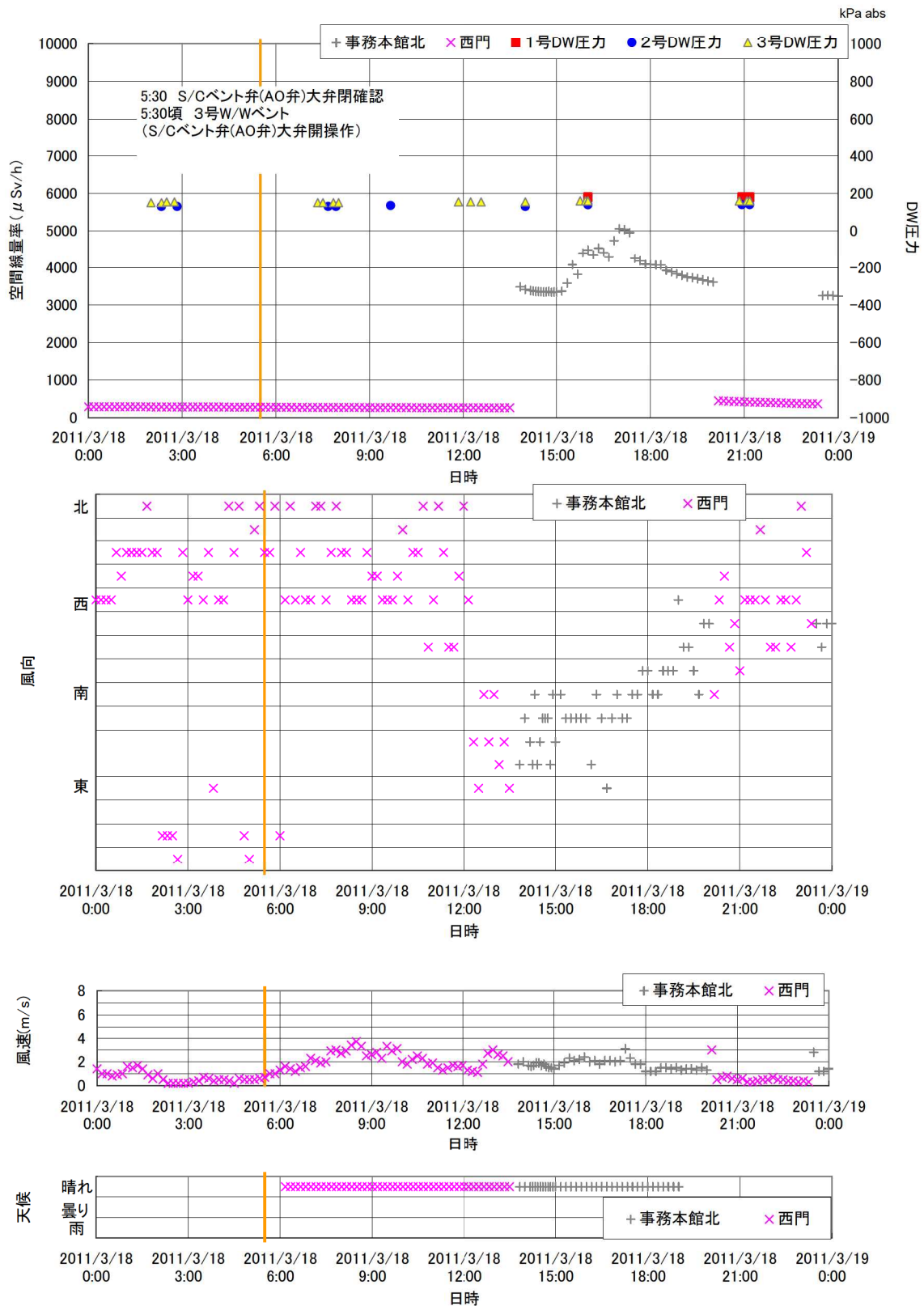


図 12 空間線量率の推移 (3月18日)

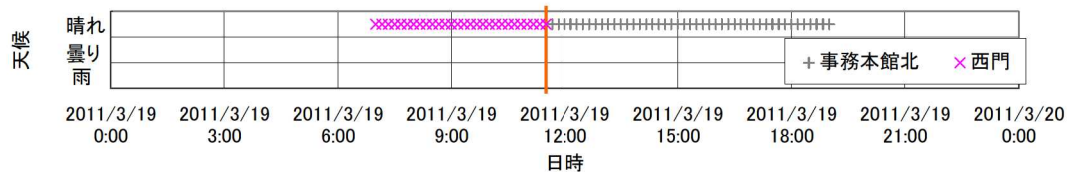
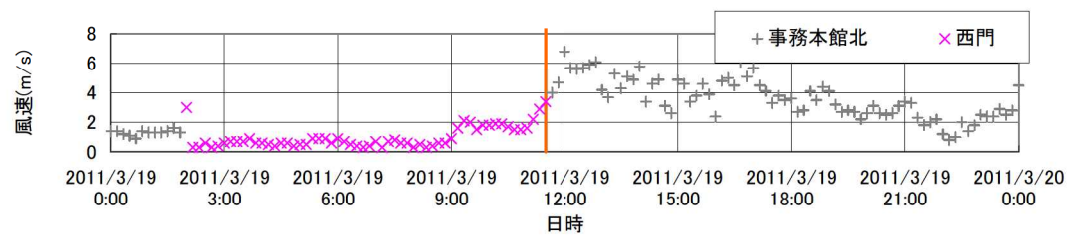
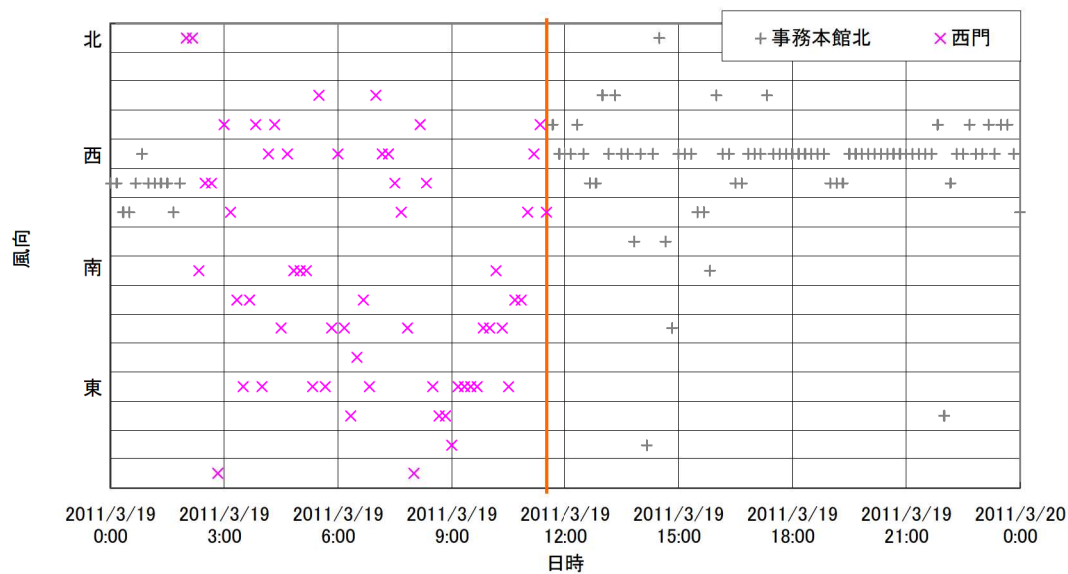
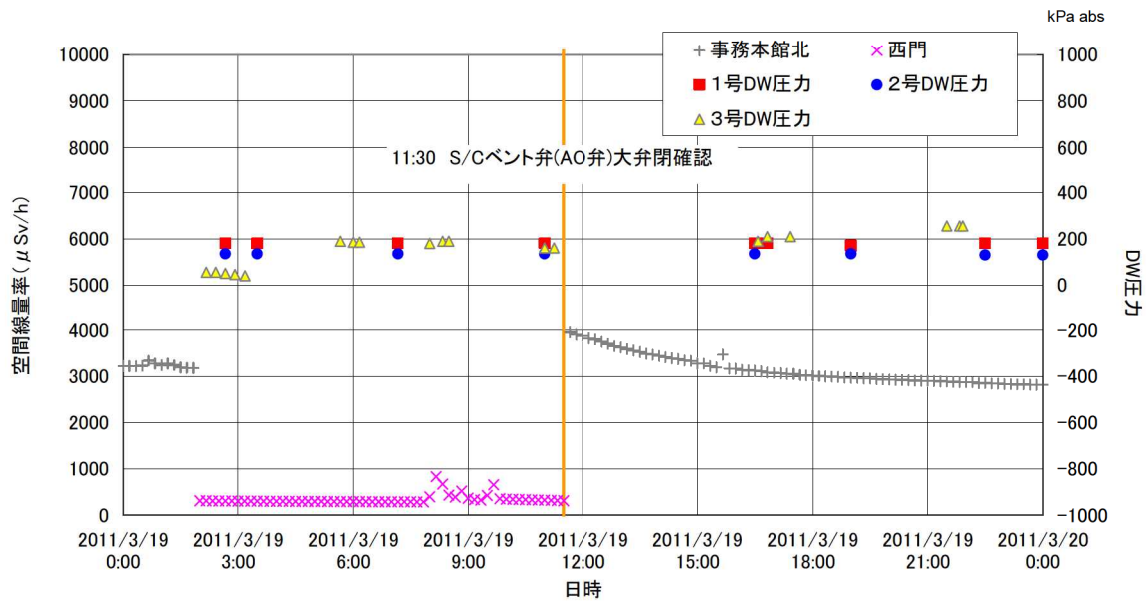


図 13 空間線量率の推移 (3月19日)

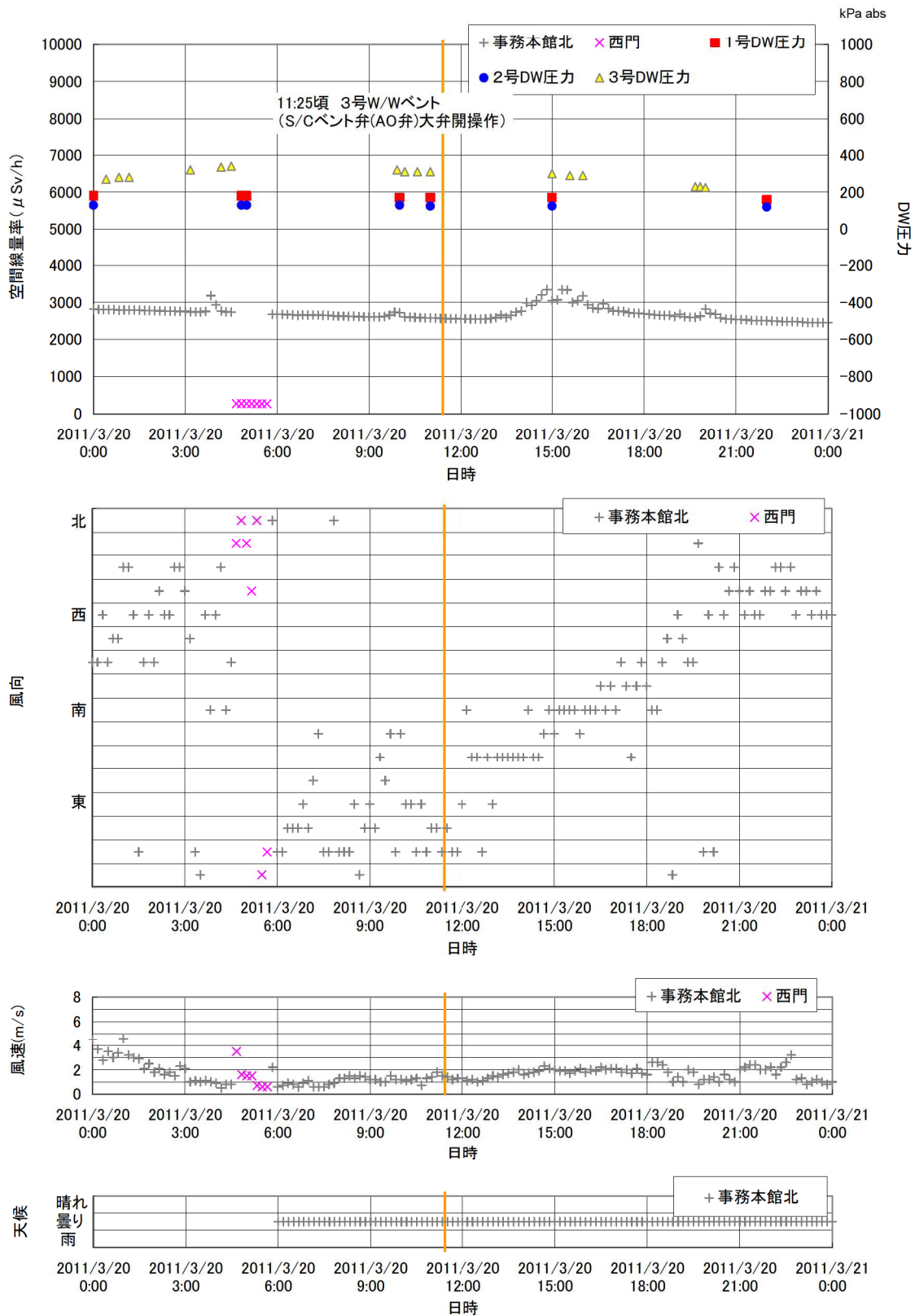


図 14 空間線量率の推移 (3月20日)

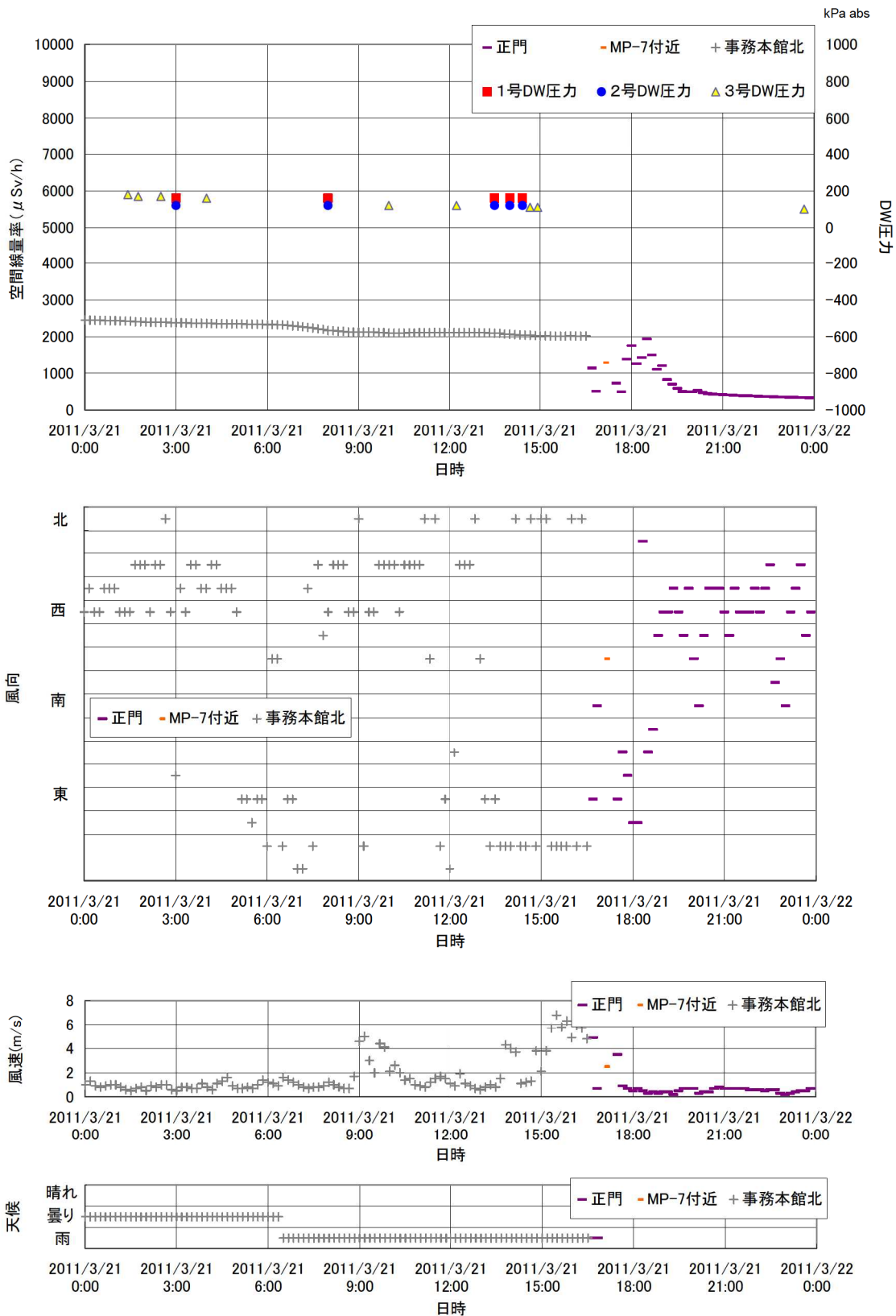


図 15 空間線量率の推移 (3月21日)

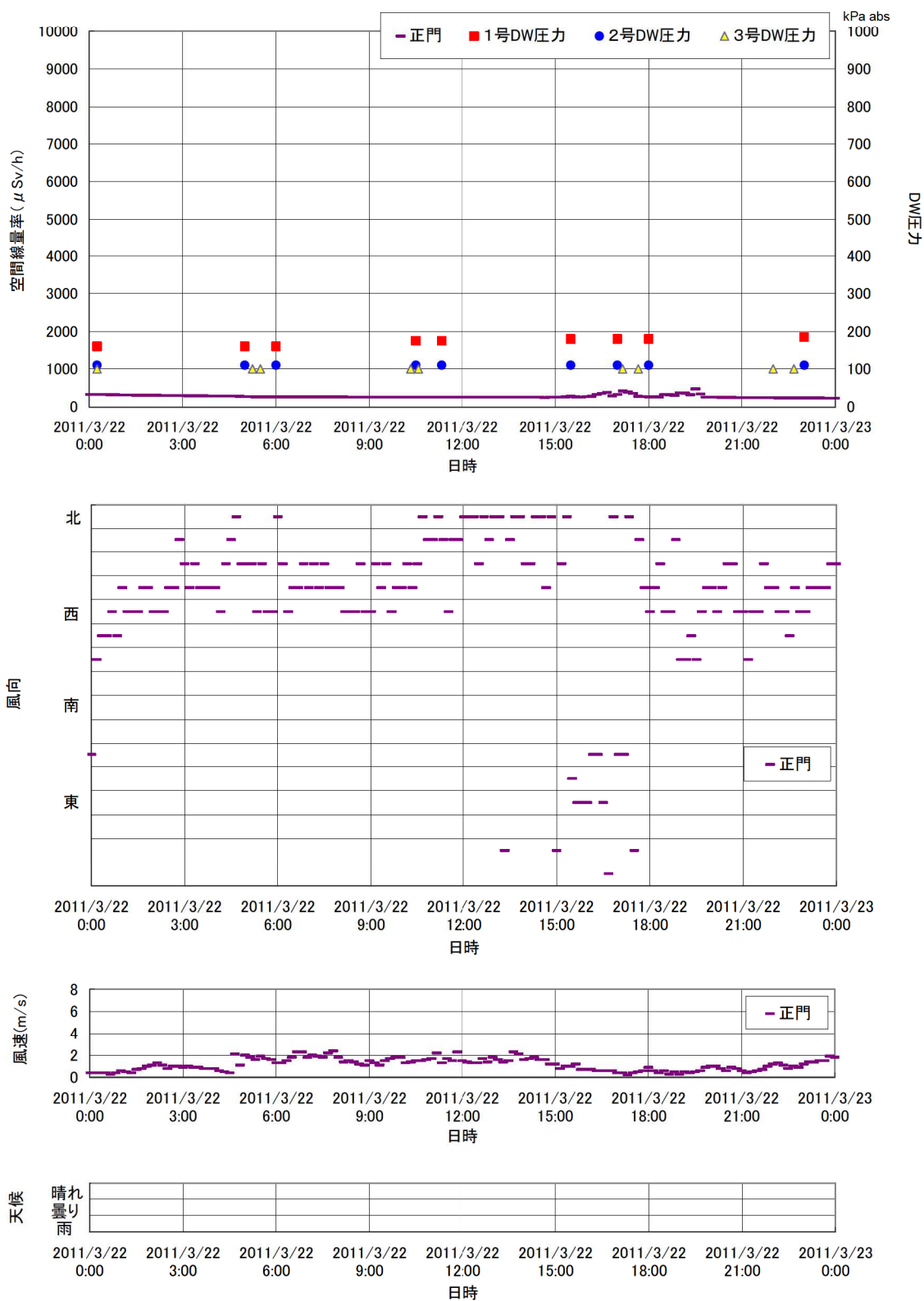


図 16 空間線量率の推移 (3月22日)

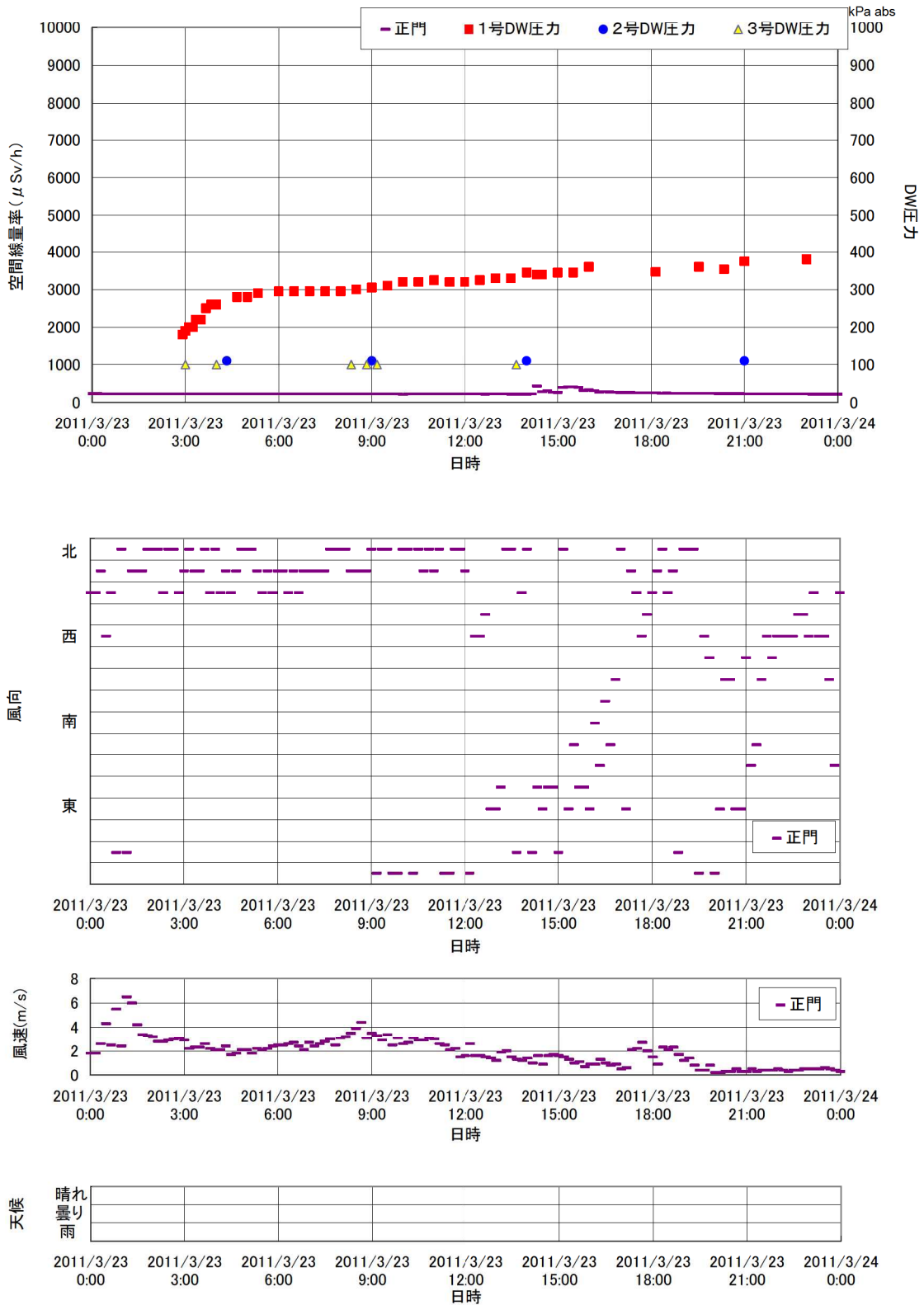


図 17 空間線量率の推移 (3月23日)

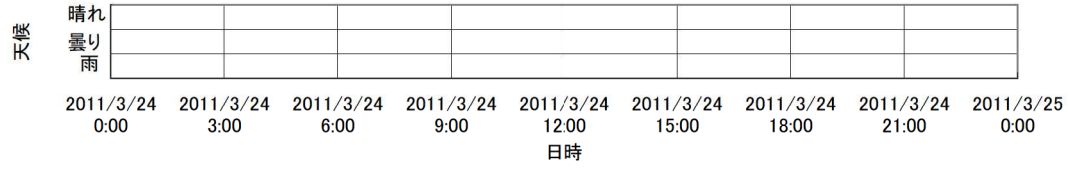
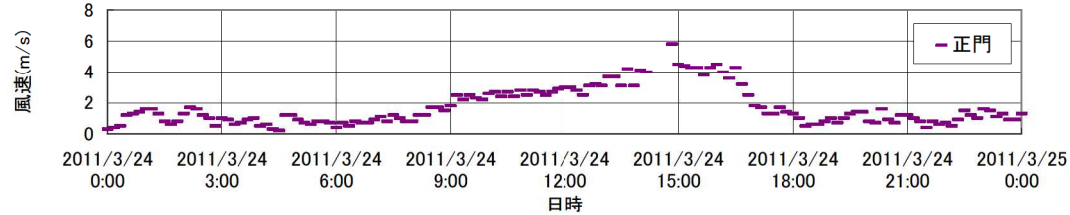
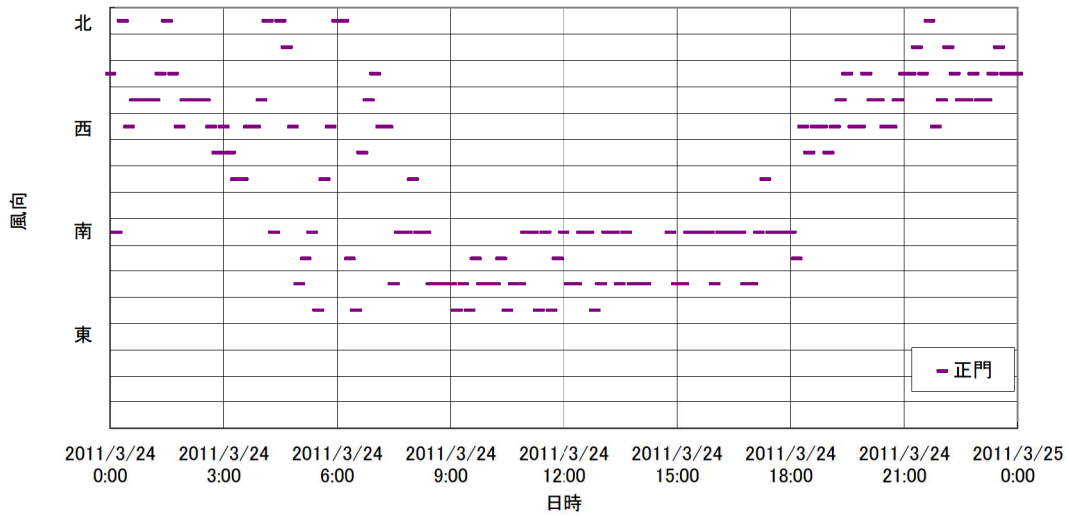
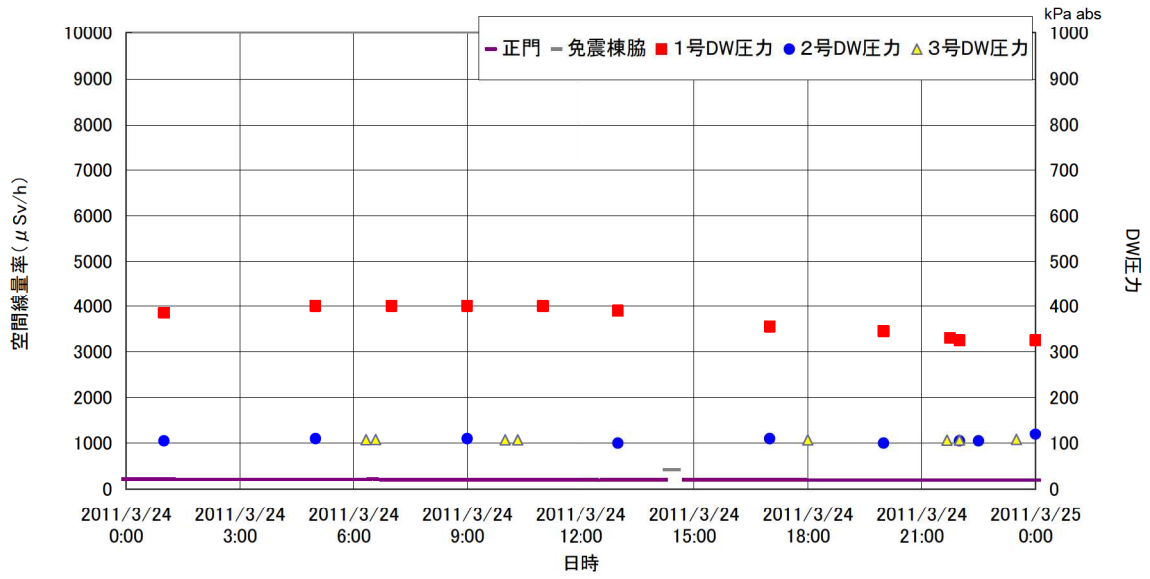


図 18 空間線量率の推移 (3月24日)

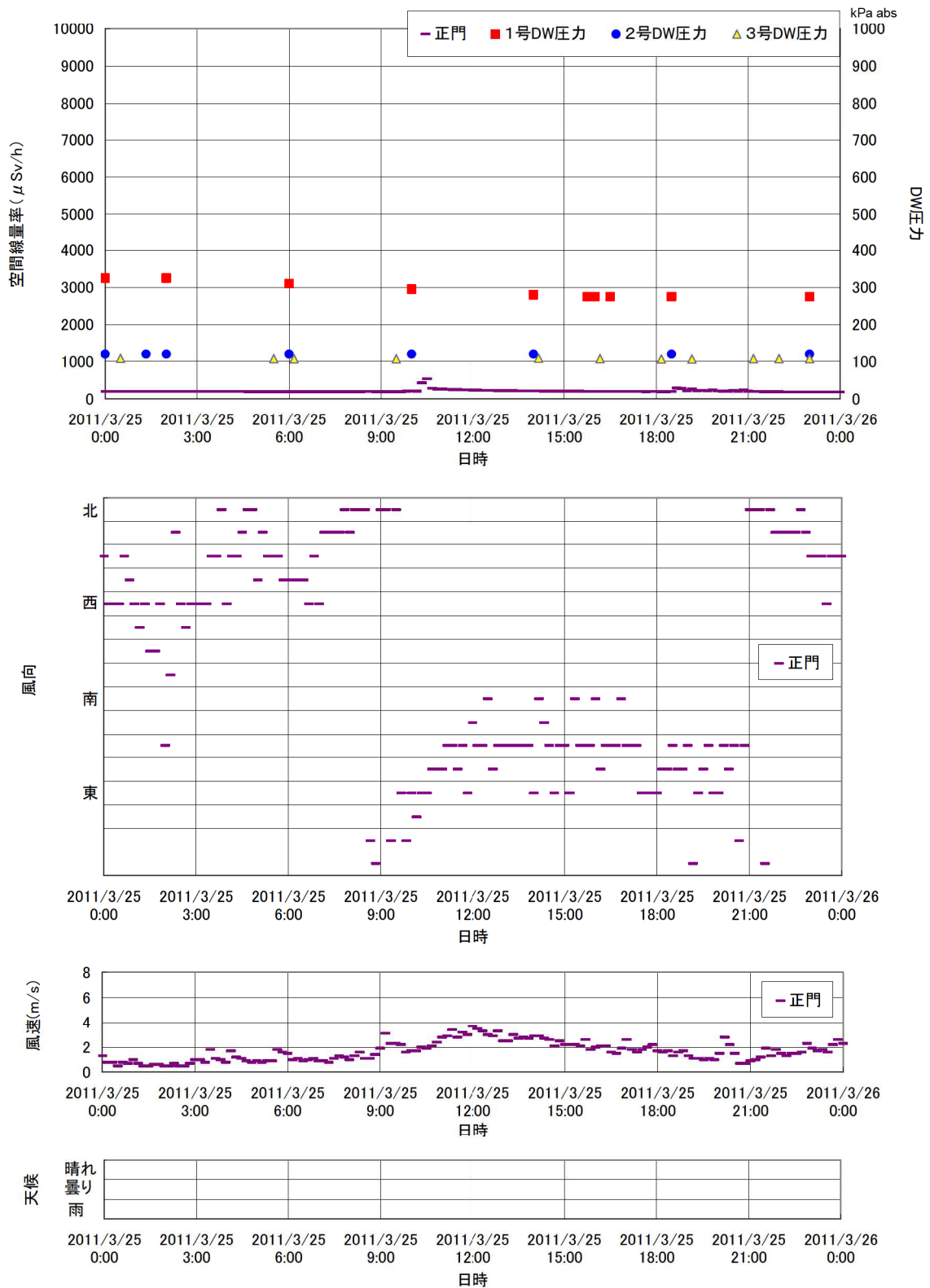


図 19 空間線量率の推移 (3月25日)

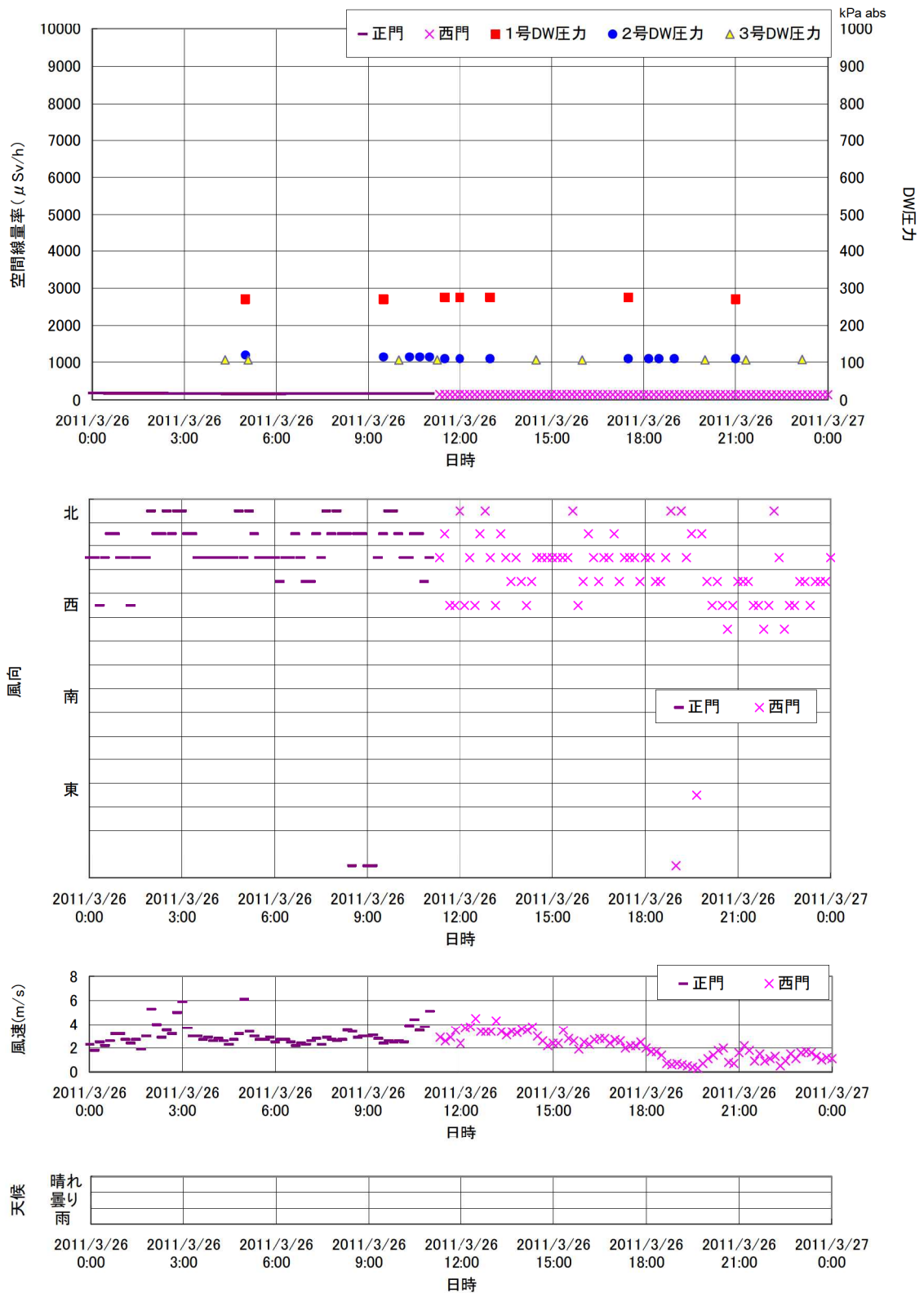


図 20 空間線量率の推移 (3月26日)

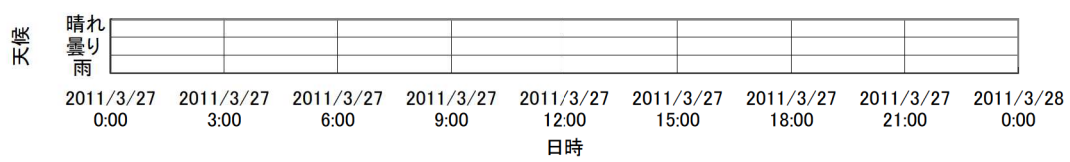
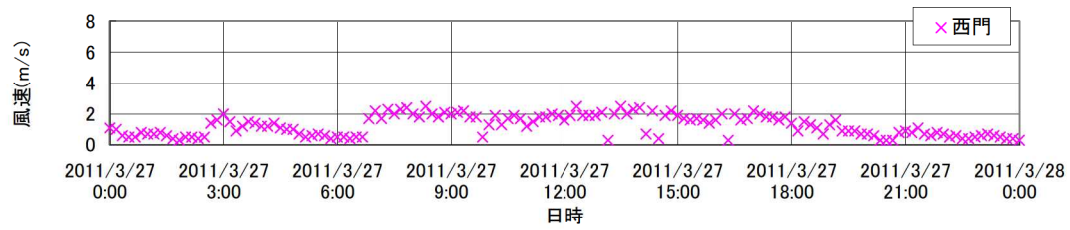
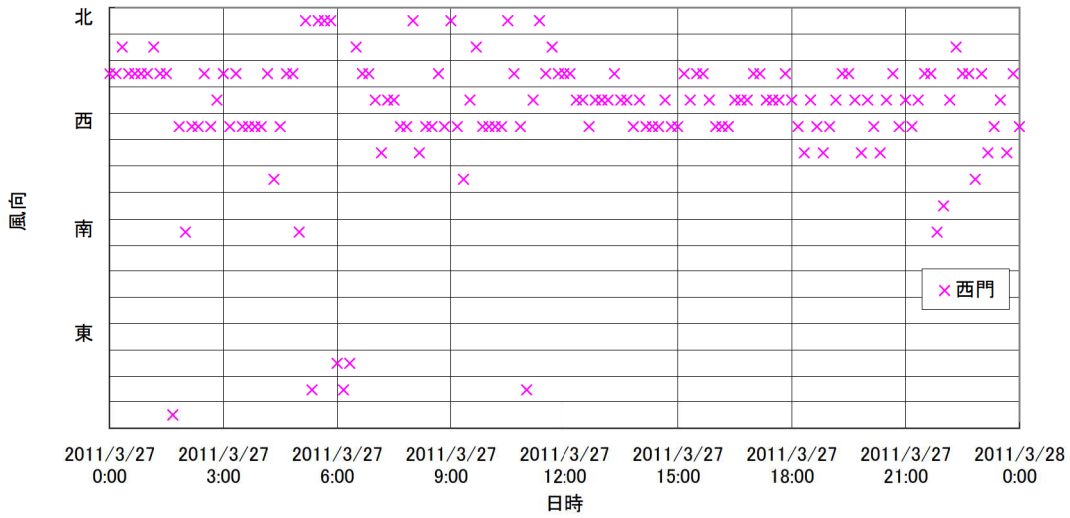
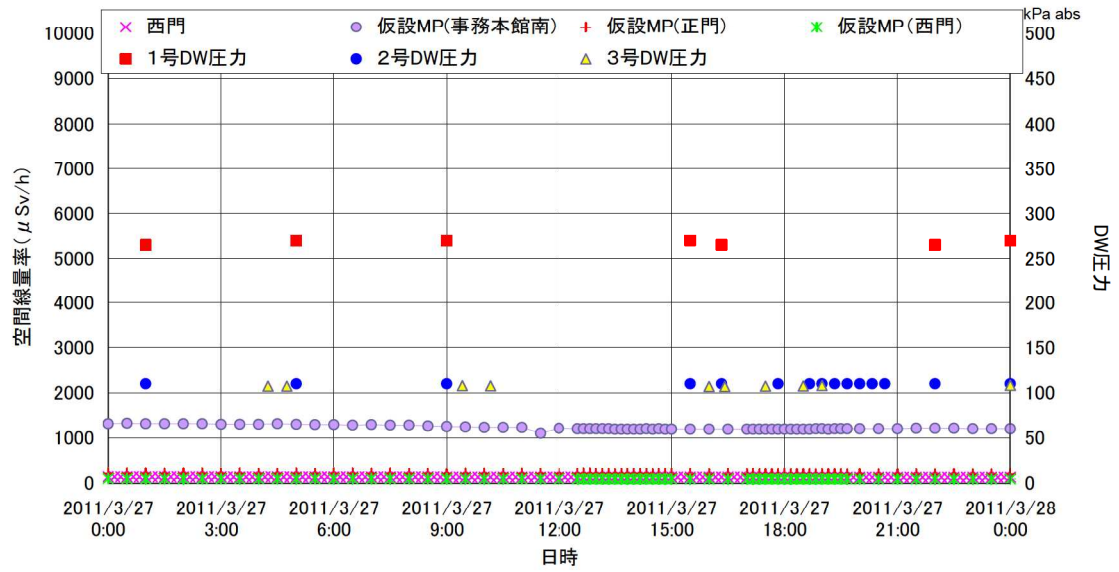


図 21 空間線量率の推移 (3月27日)

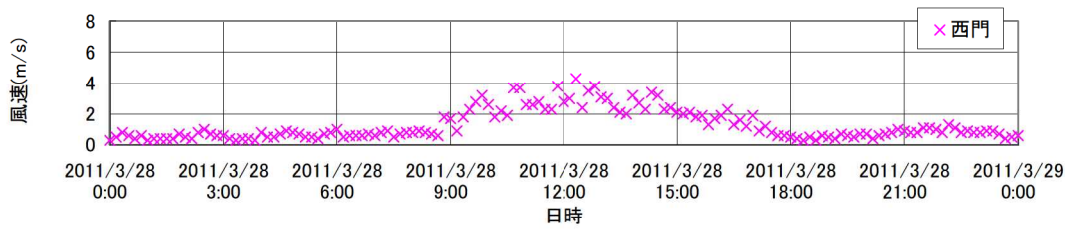
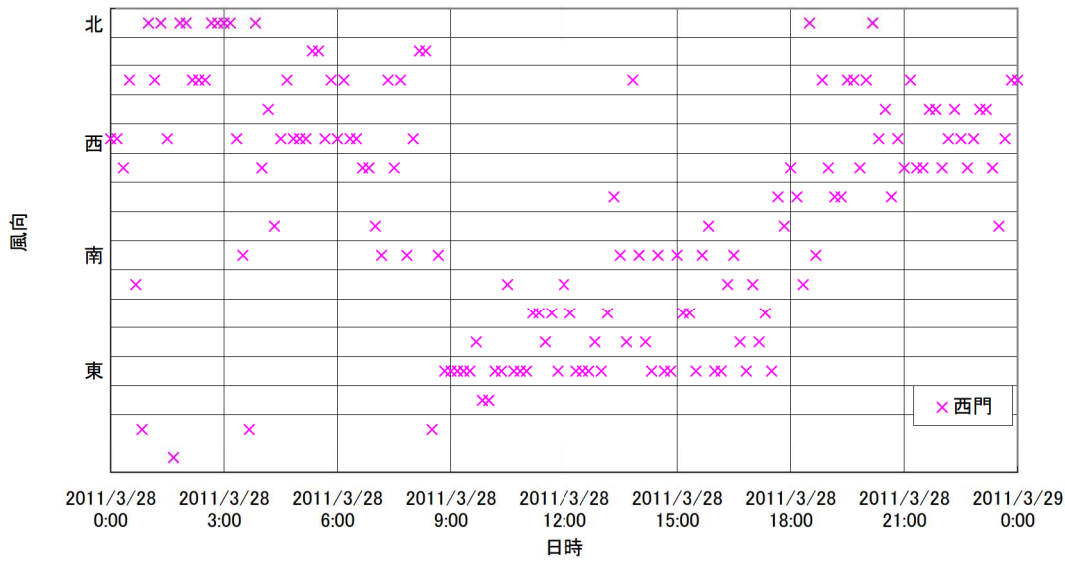
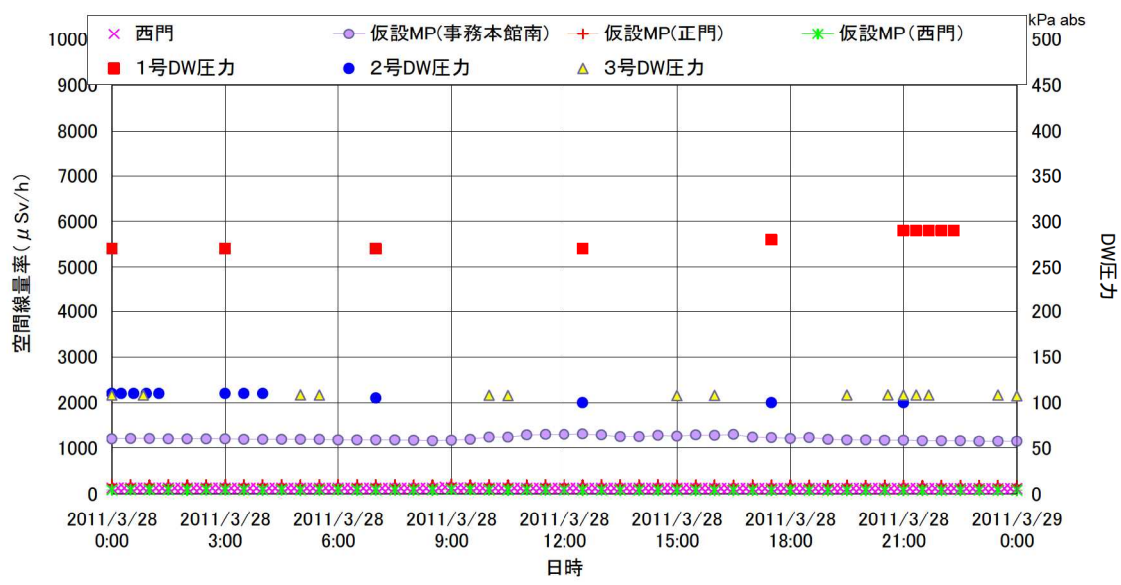


図 22 空間線量率の推移 (3月28日)

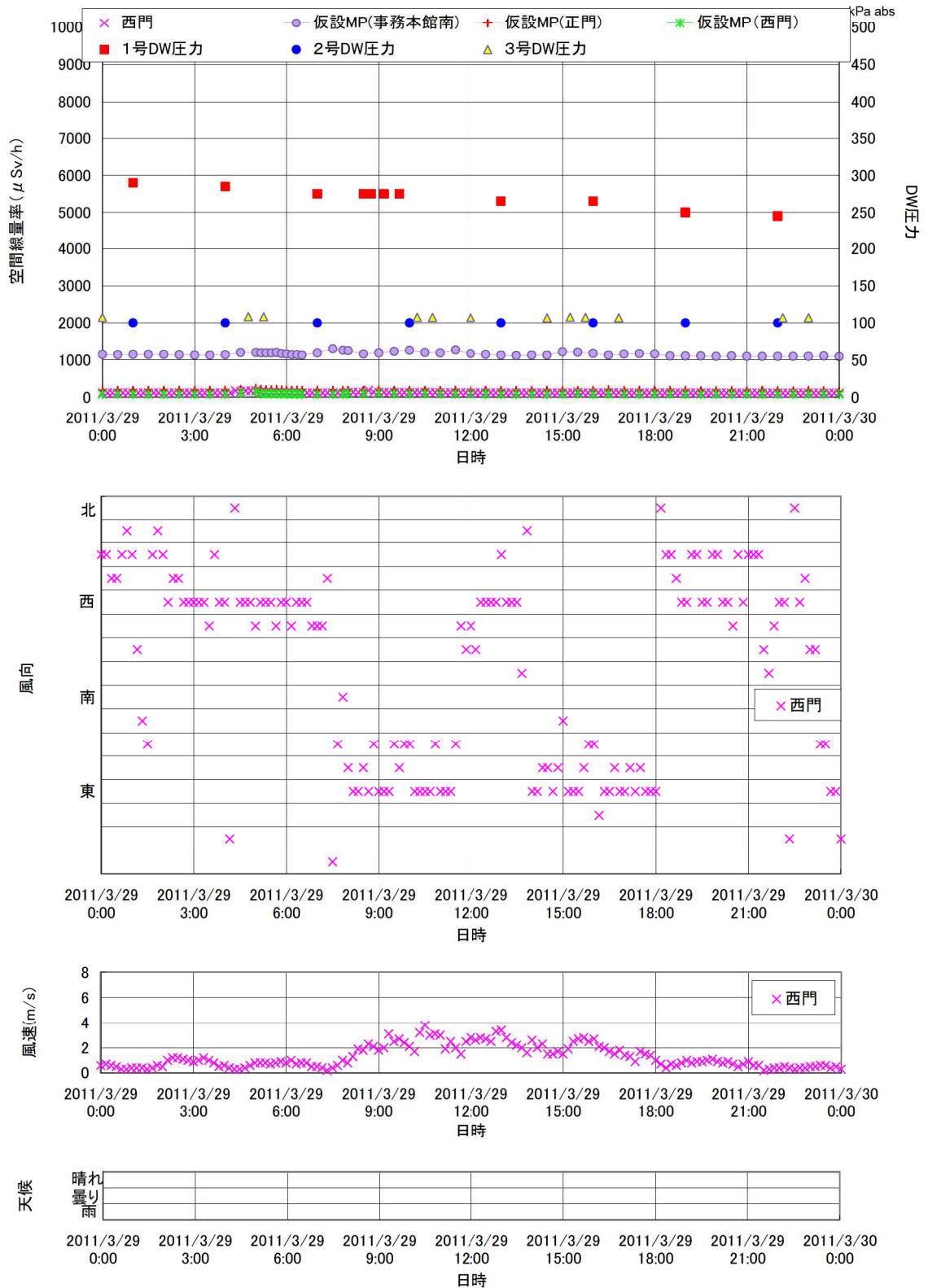


図 23 空間線量率の推移 (3月29日)

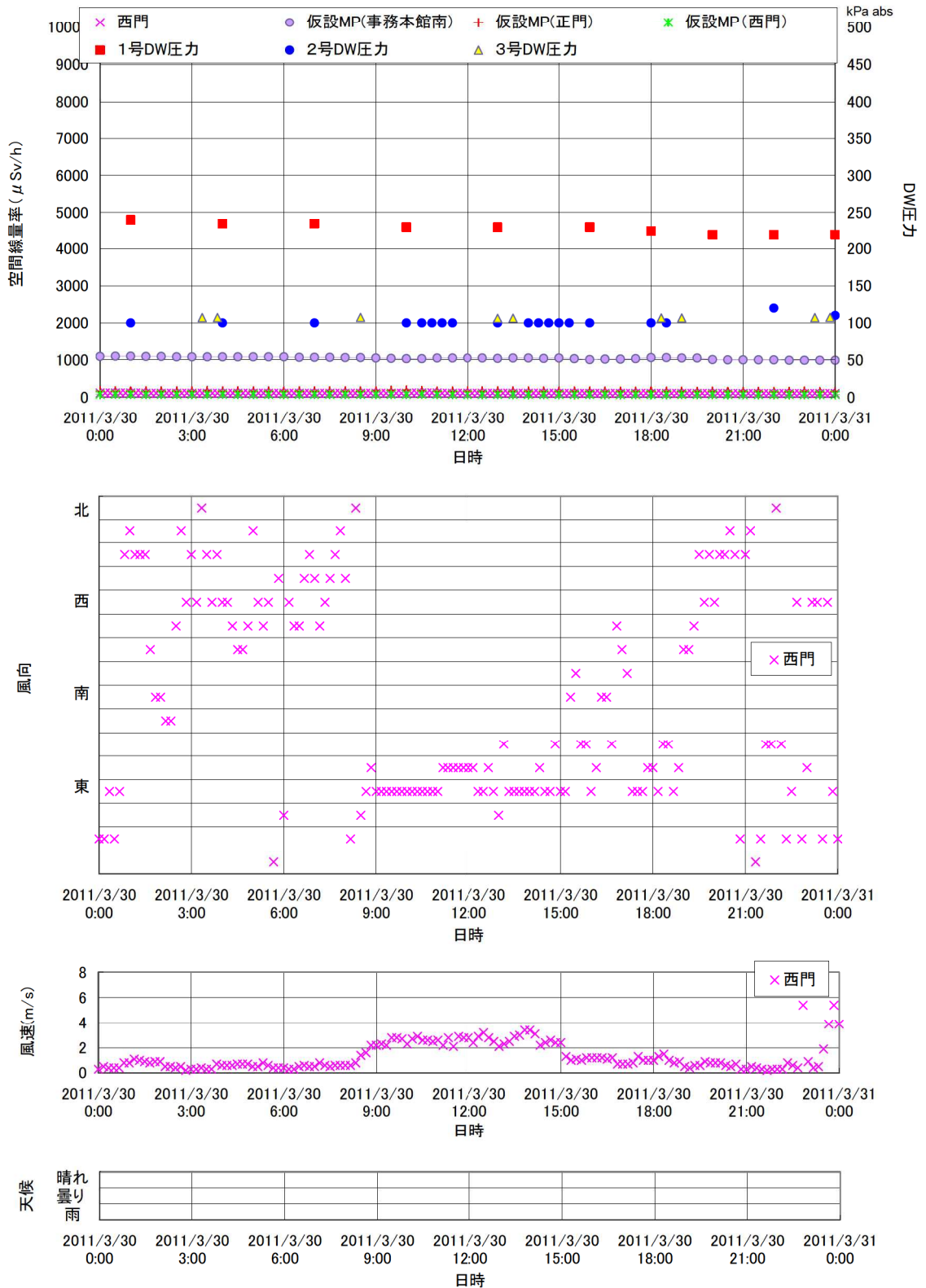


図 24 空間線量率の推移 (3月30日)

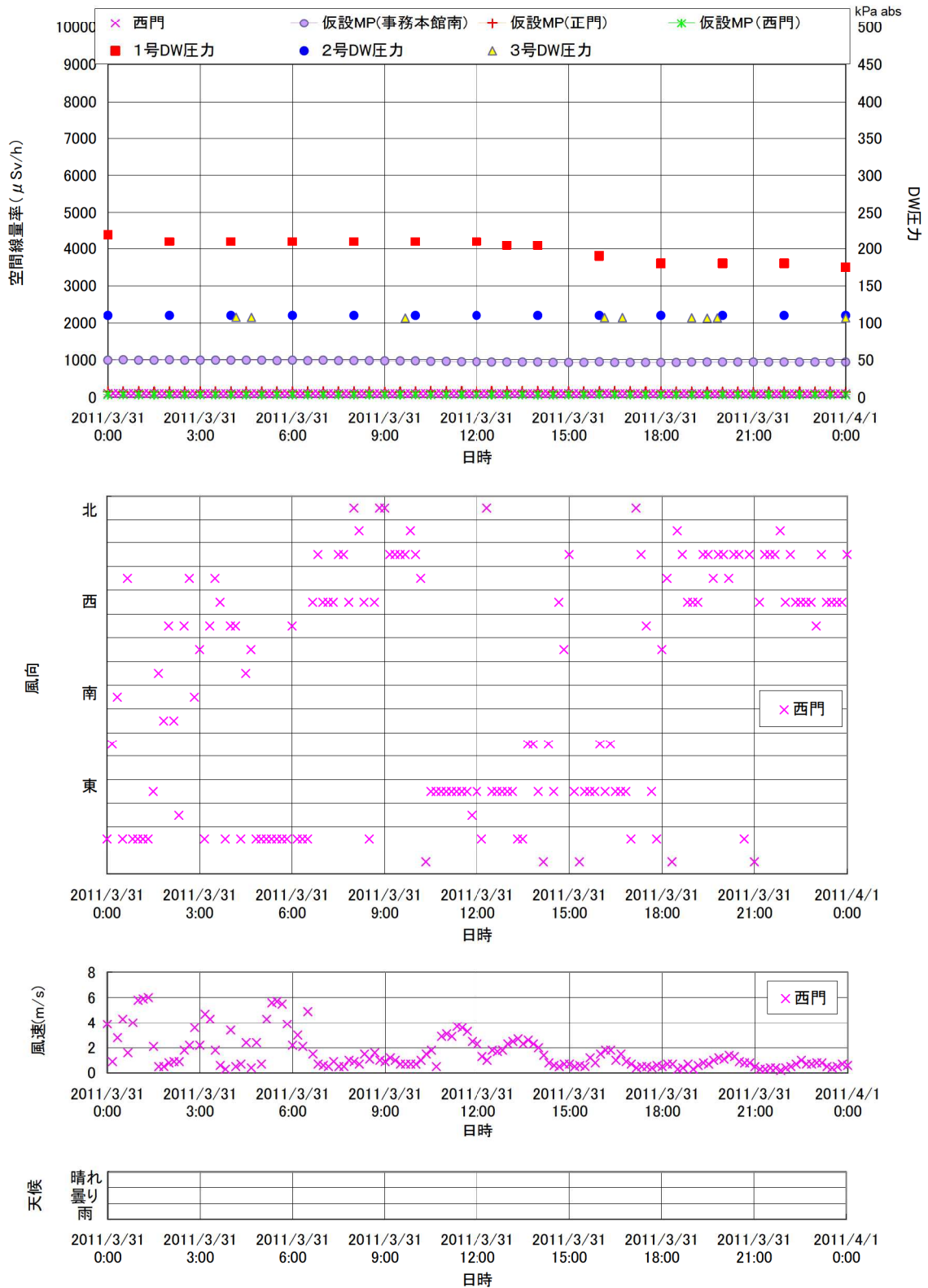
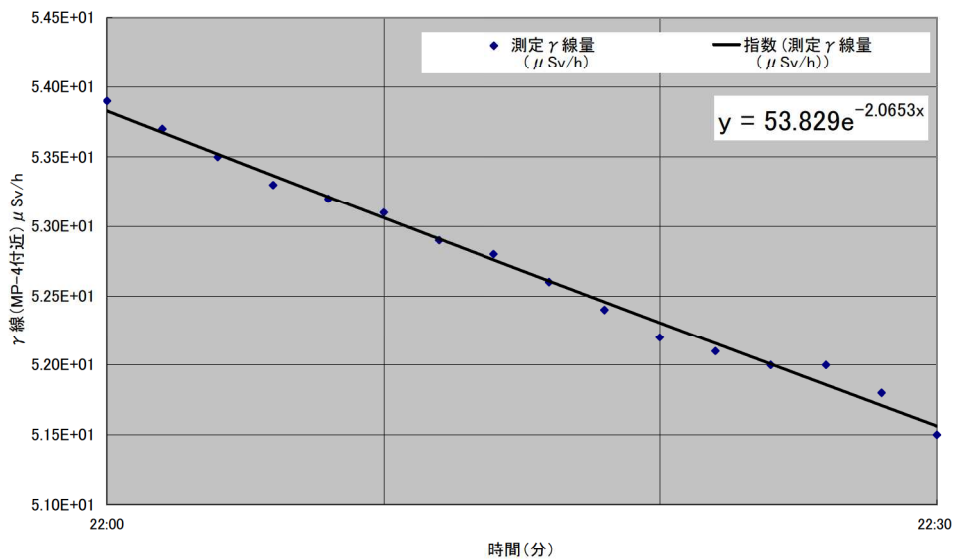
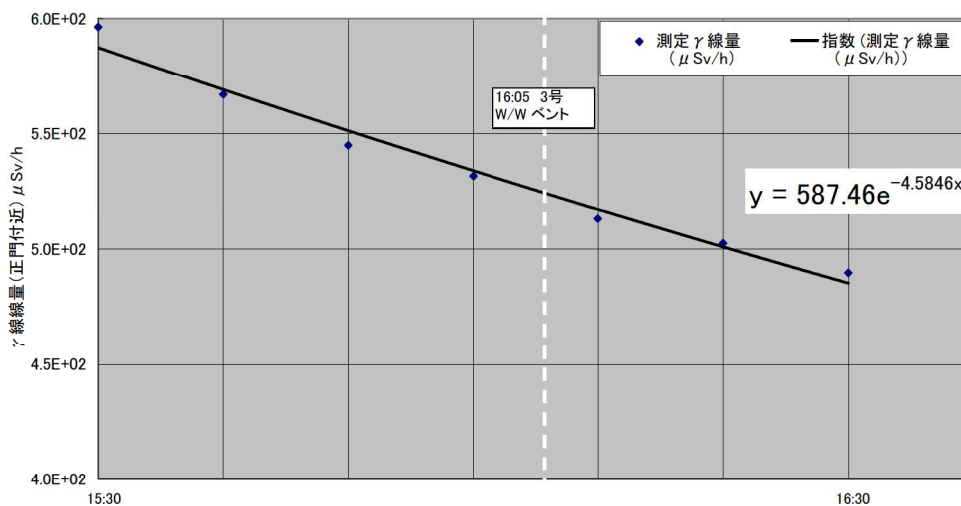


図 25 空間線量率の推移 (3月31日)

2011年3月12日 22:00-22:30 MP4付近のγ線線量(μSv/h)



2011年3月15日 15:30-16:30 正門付近のγ線線量(μSv/h)



2011年3月15日 15:30からの時間(16:30まで)

2011年3月19日 18:00-21:00 事務本館北のγ線線量(μSv/h)

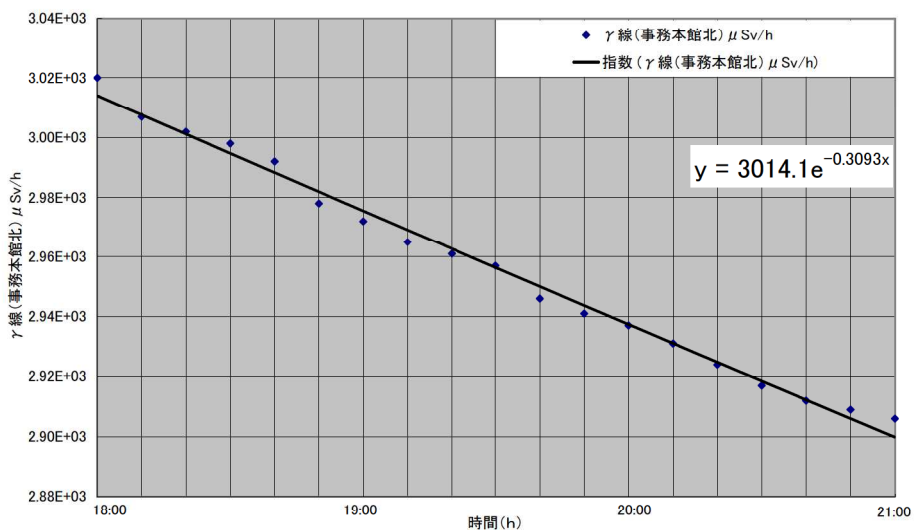


図 26 空間線量率の誤差

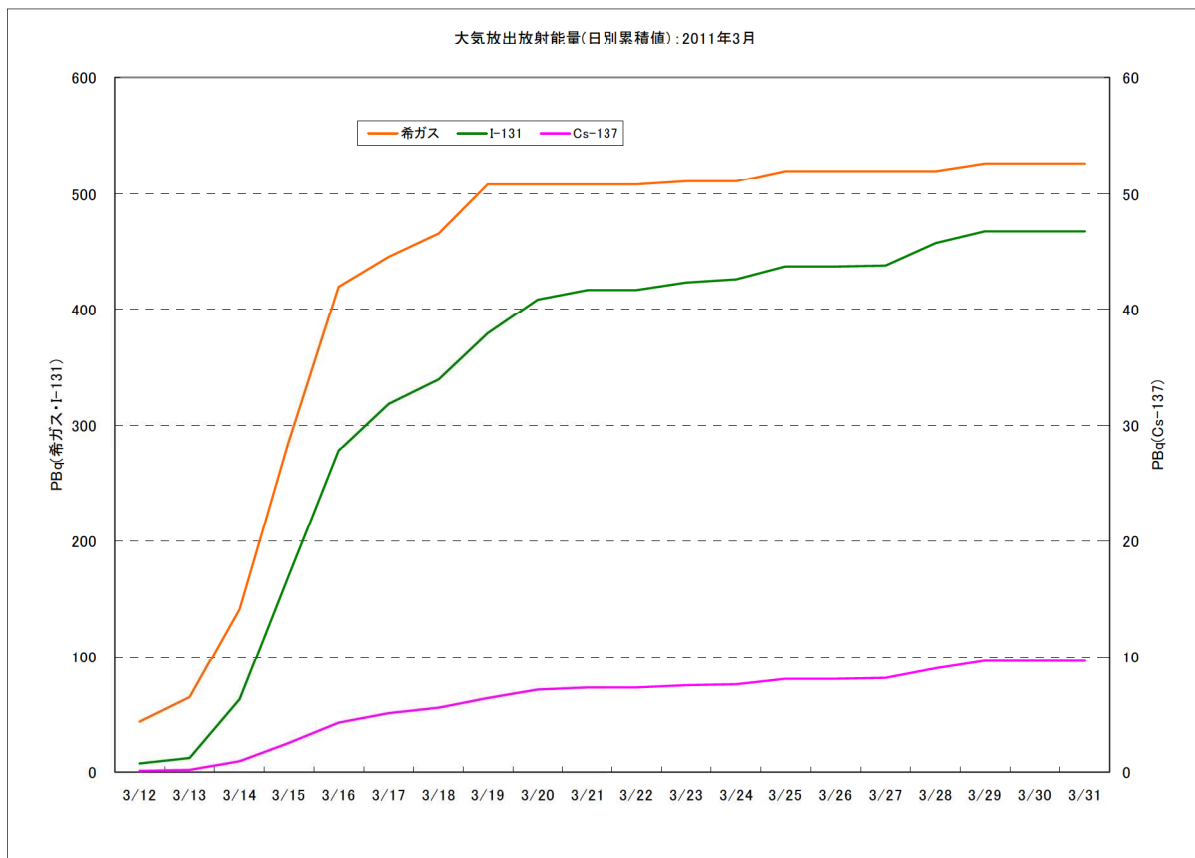
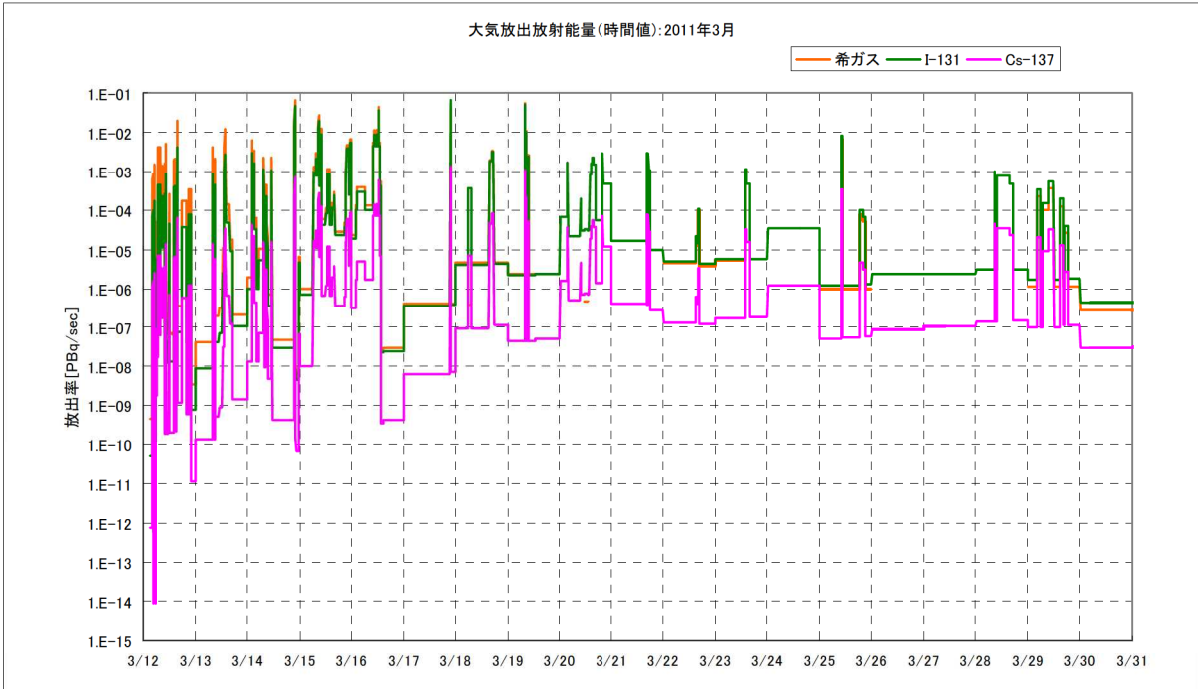
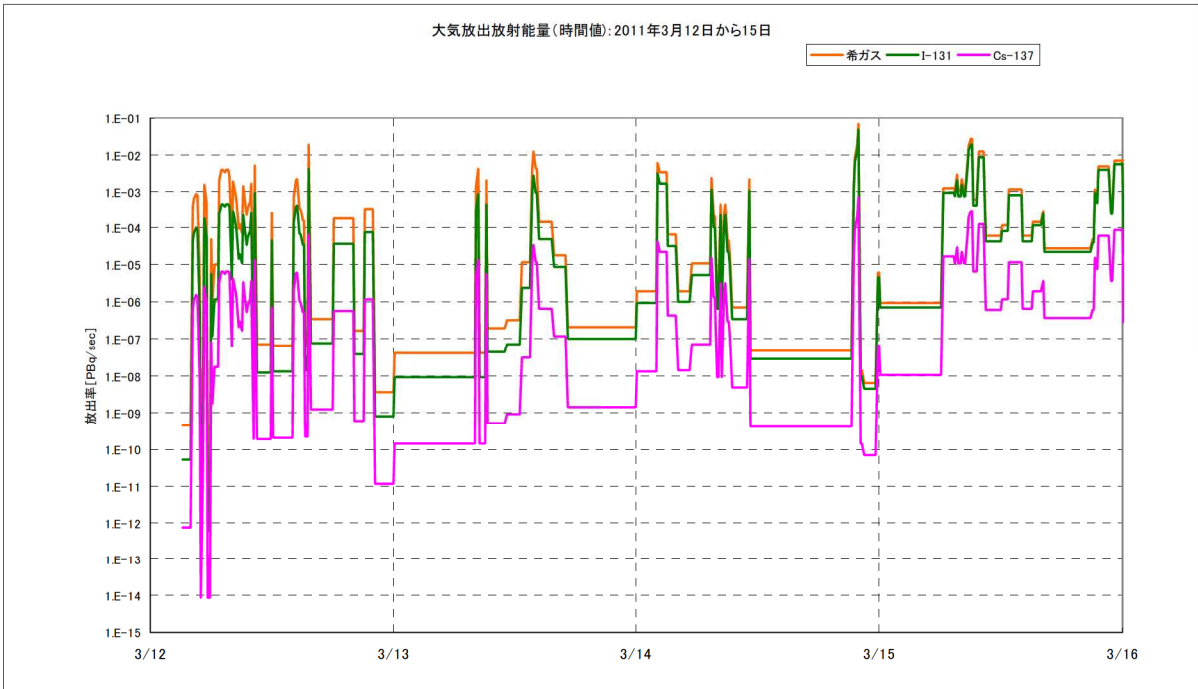


図 27 経時変化 (放出量の累積値)



(a) 経時変化 (放出率 PBq/s)



(b) 経時変化 (放出率 PBq/s) (3/12~3/15)

図 28 放出率の経時変化

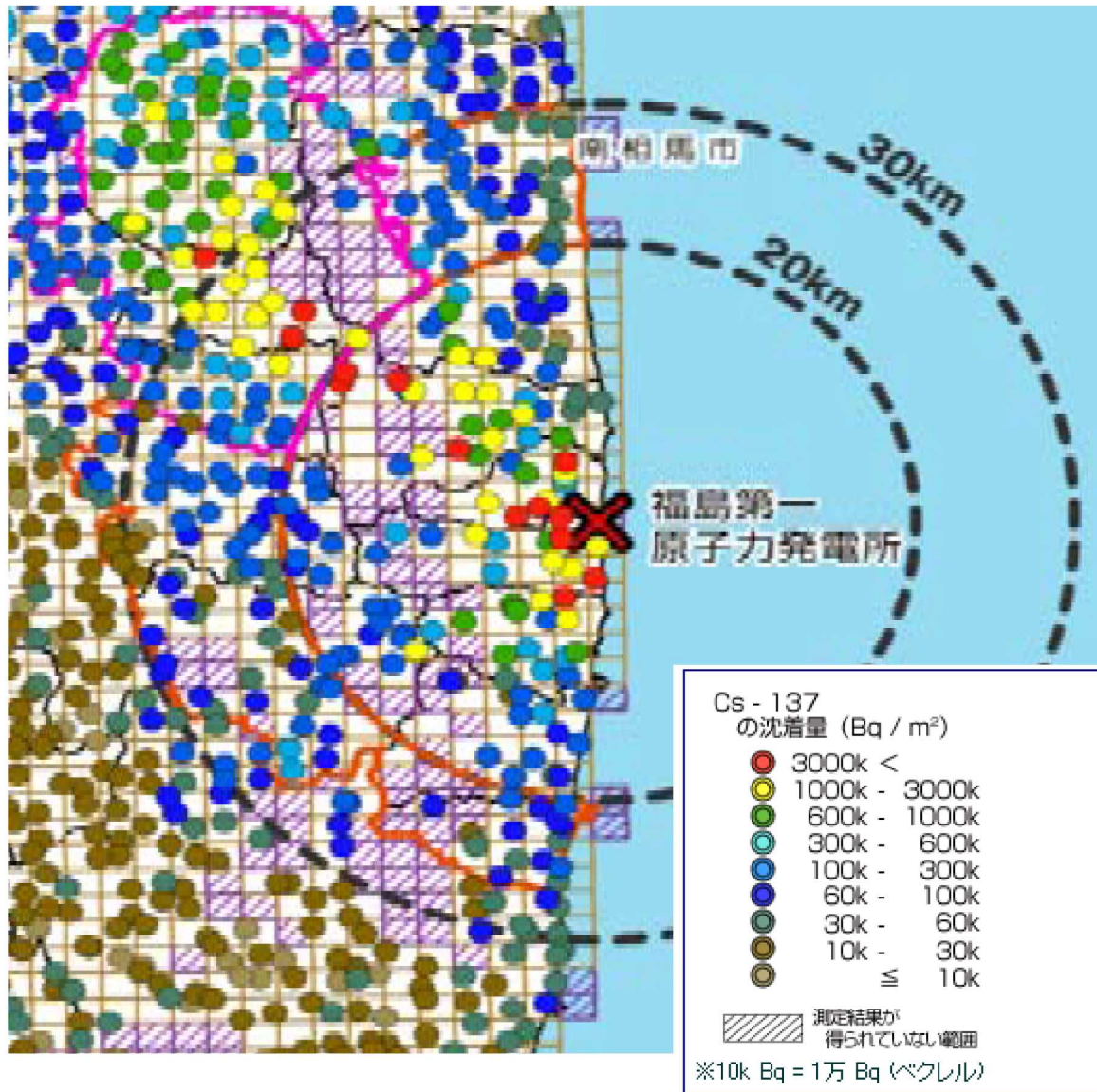


図 29 文部科学省による Cs-137 の沈着状況調査結果

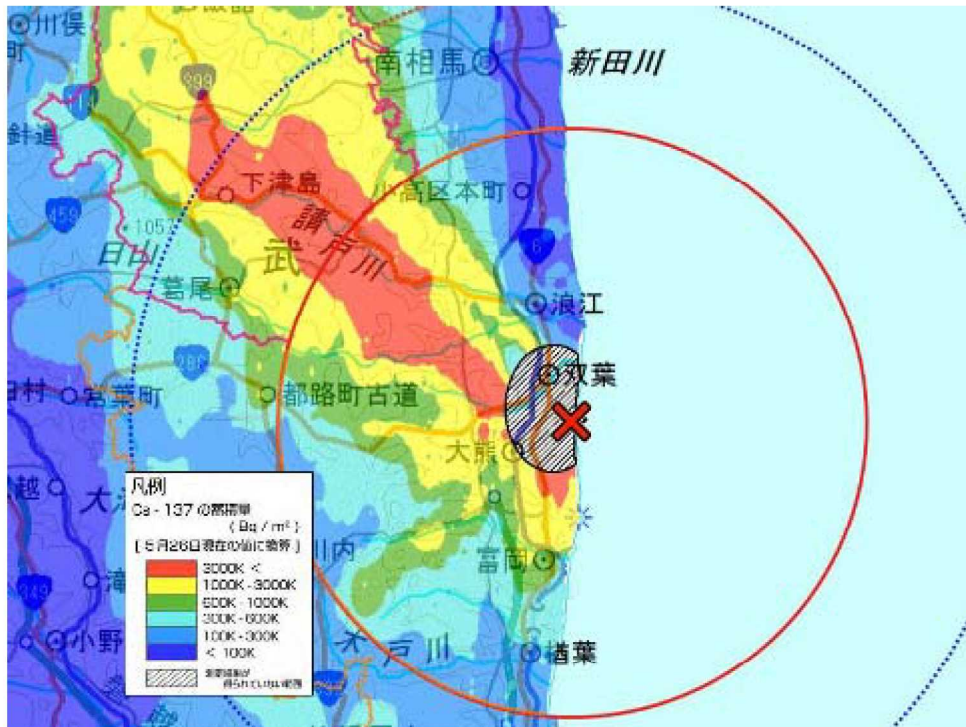


図 30 文部科学省の航空機モニタリング結果 (Cs-137 の沈着状況)
 (出典：文部科学省 放射線量等分布マップ HP <http://ramap.jaea.go.jp/map/>)

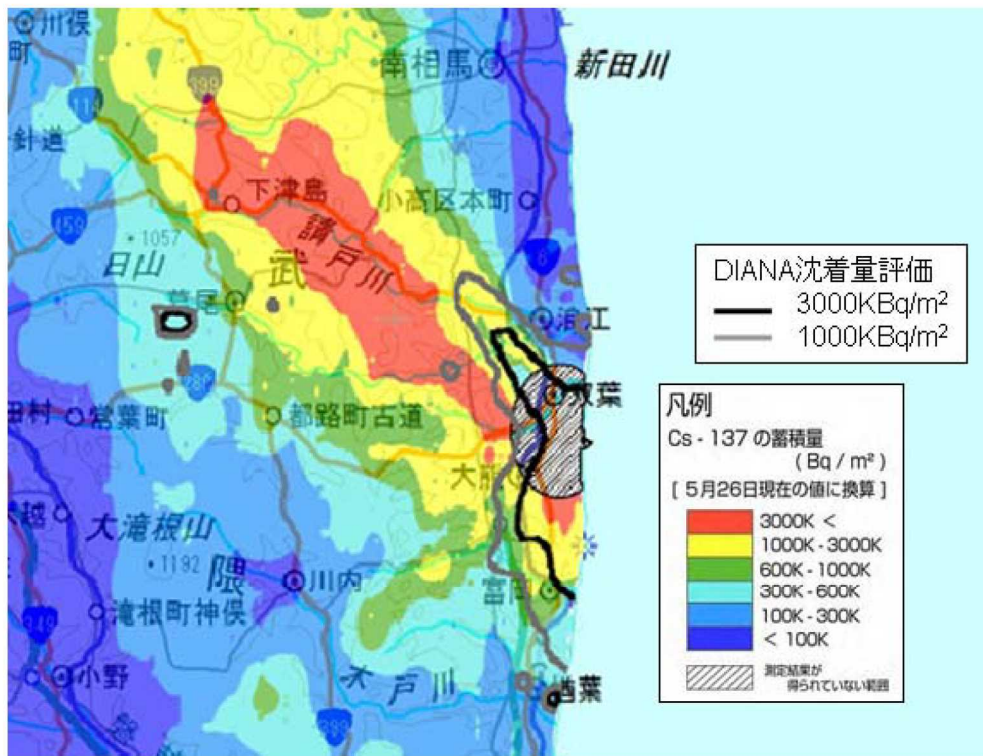


図 31 DIANA 評価結果と文部科学省の調査結果の比較 (Cs-137 の沈着状況)



図 32 ふくいちライブカメラの映像 (3月15日 10:00頃)

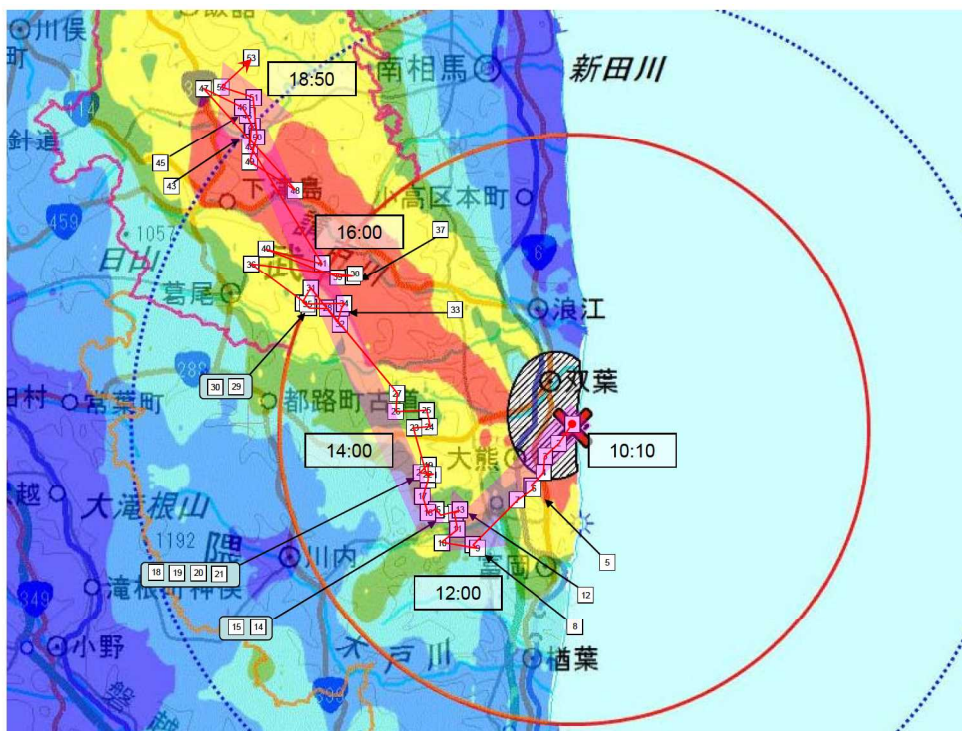


図 33 3月15日 10時過ぎの2号機建屋放出時に放出されたプルームの軌跡

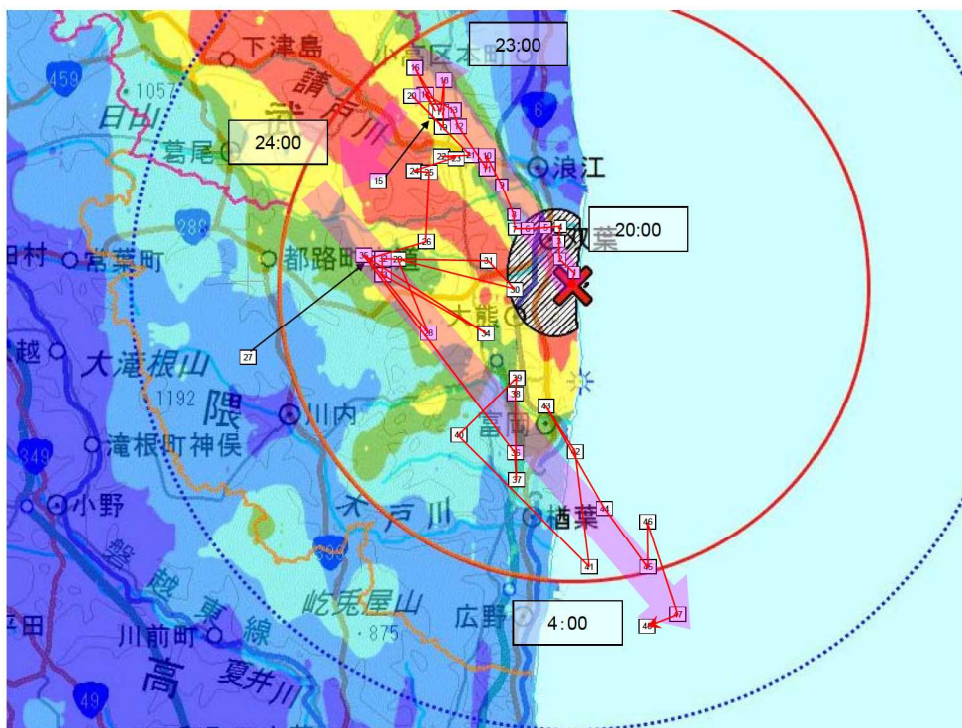


図 34 3月15日 20時過ぎの2号機建屋放出時に放出されたプルームの軌跡

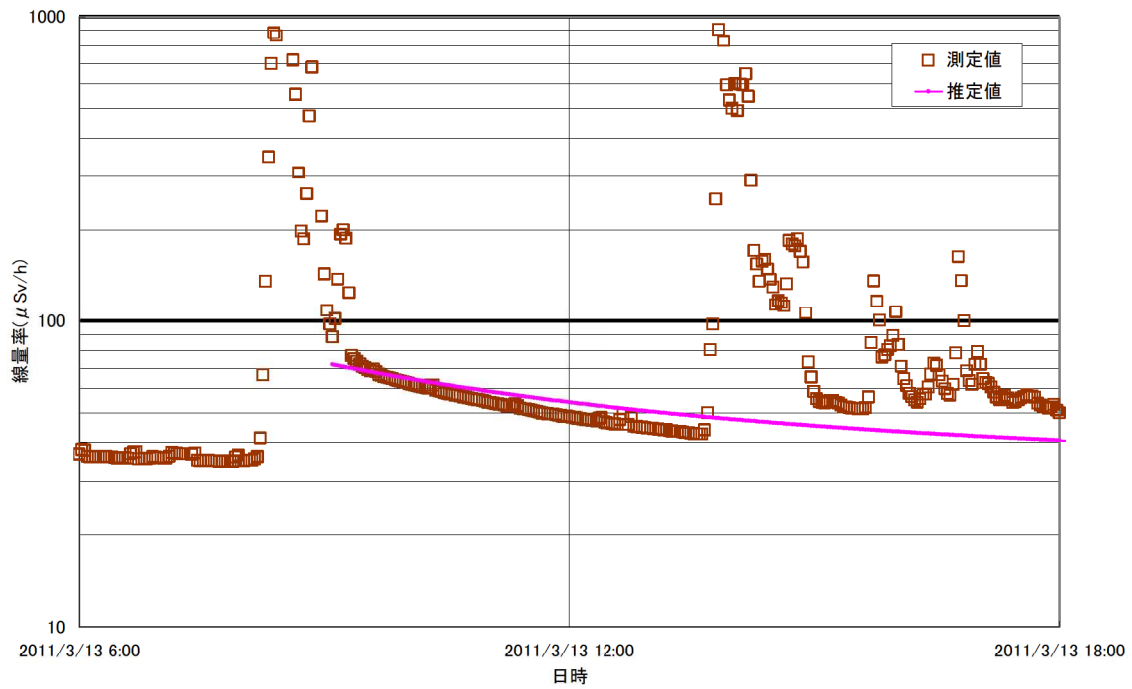


3月15日 23時の福島県内の雨雲の状況
 (出典：国立情報学研究所 HP <http://agora.ex.nii.ac.jp/earthquake/201103-eastjapan/weather/data/radar-20110311/>)

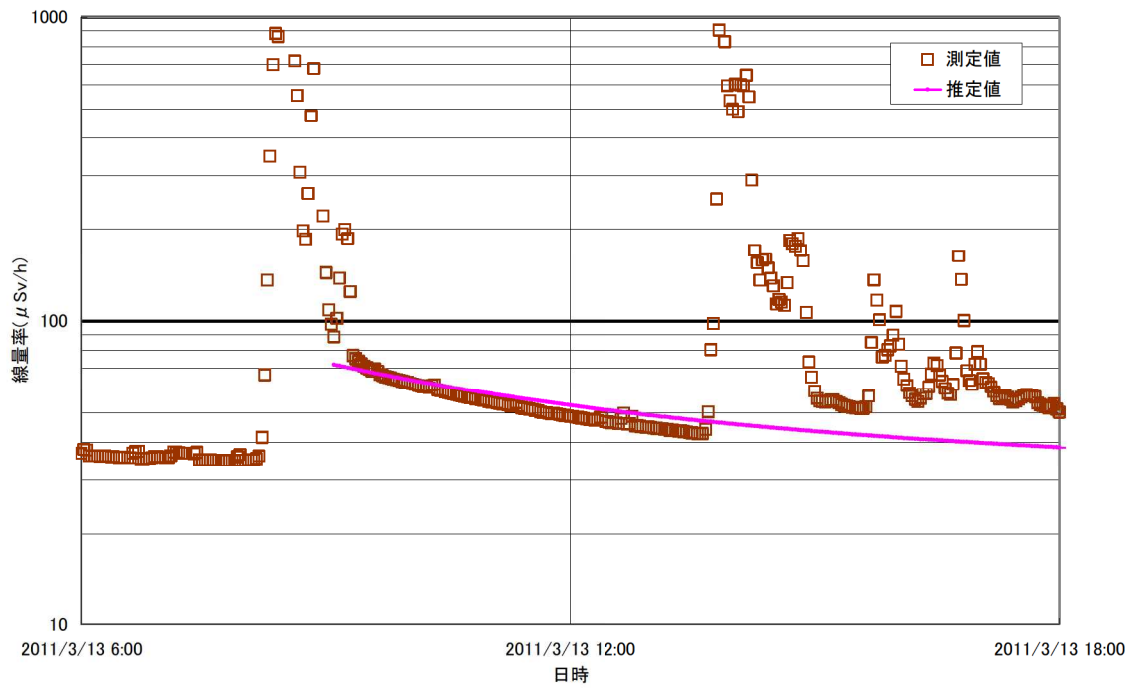


3月15日 23時30分の福島県内の雨雲の状況
 (出典：国立情報学研究所 HP <http://agora.ex.nii.ac.jp/earthquake/201103-eastjapan/weather/data/radar-20110311/>)

図 35 3月15日 23時ごろの福島県の雨雲の状況

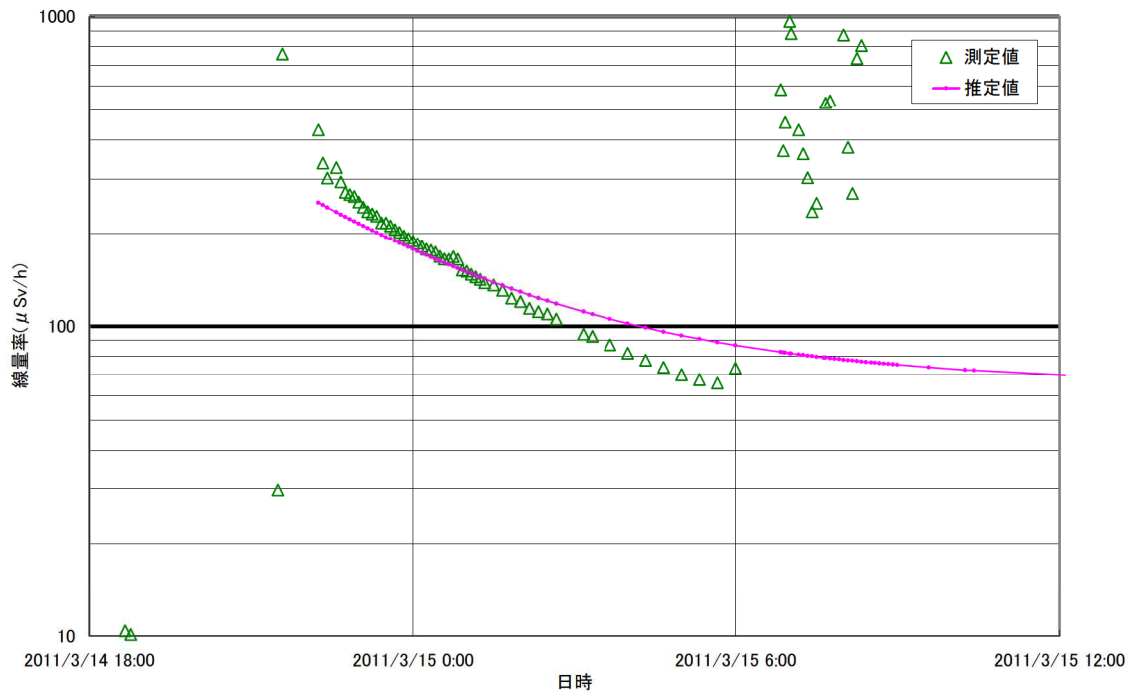


(a) よう素とセシウムの比を 2 : 1 と設定したケース

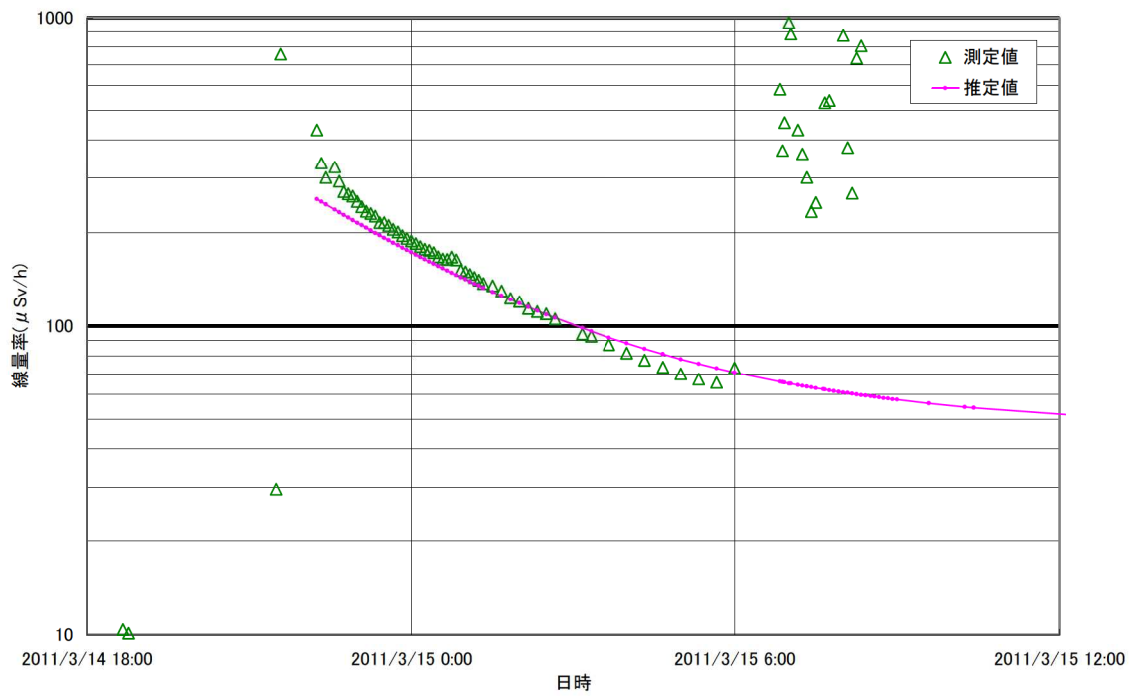


(b) よう素とセシウムの比を 10 : 1 と設定したケース

図 36 放射性核種の放出されやすさの比の推定 (①の時点)

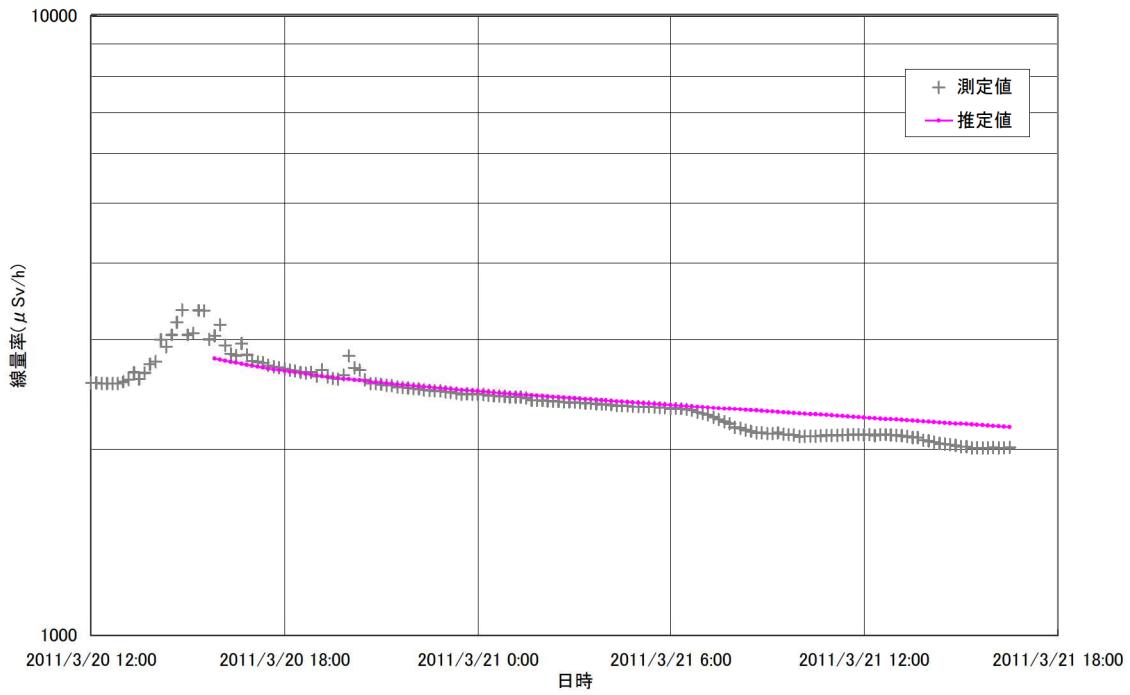


(a) よう素とセシウムをの比を 2 : 1 と設定したケース

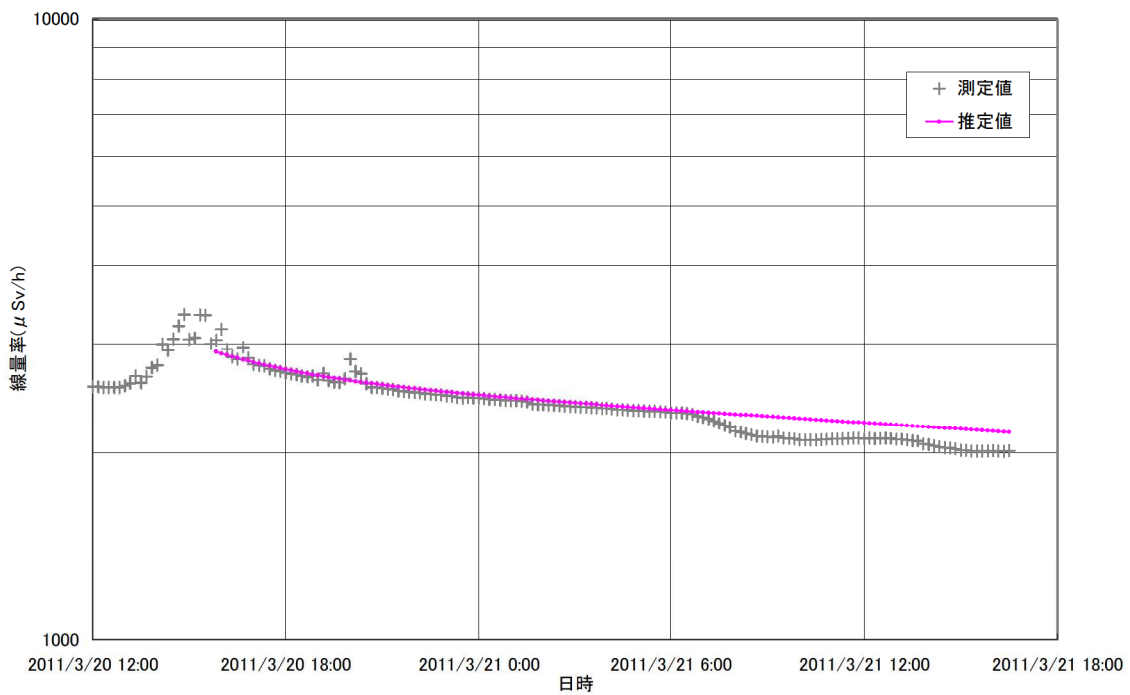


(b) よう素とセシウムをの比を 10 : 1 と設定したケース

図 37 放射性核種の放出されやすさの比の推定 (②の時点)

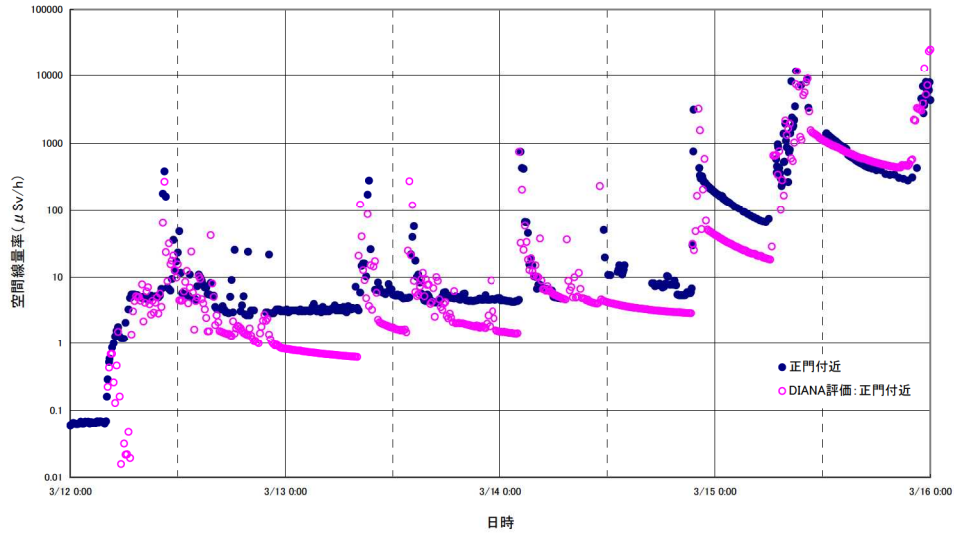


(a) よう素とセシウムの比を 2 : 1 と設定したケース

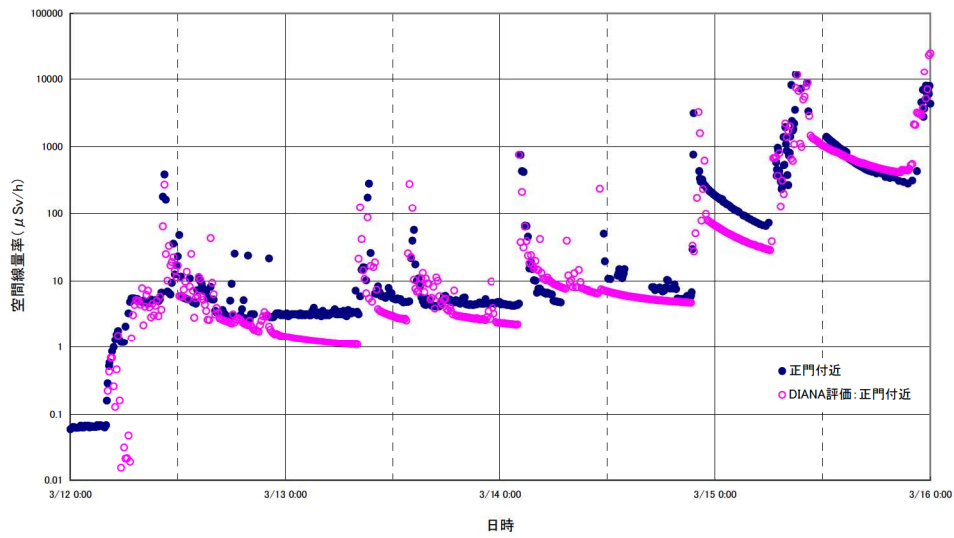


(b) よう素とセシウムの比を 10 : 1 と設定したケース

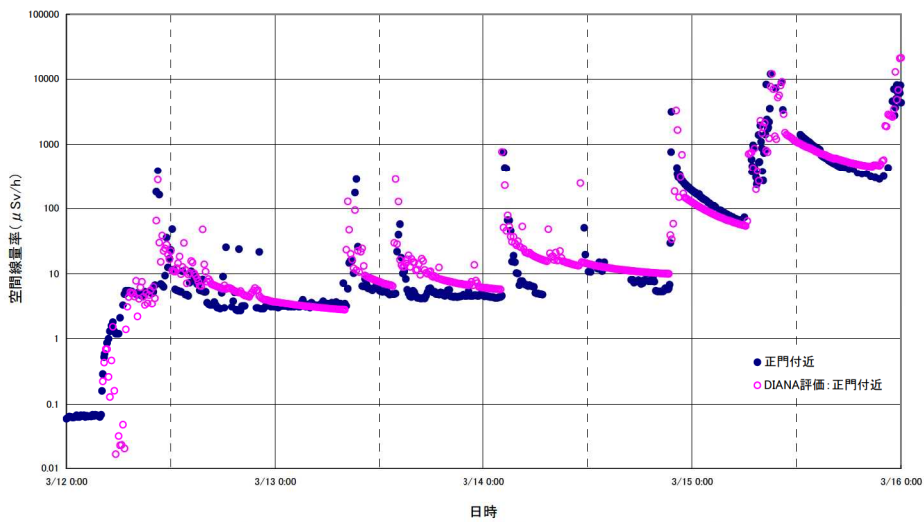
図 38 放射性核種の放出されやすさの比の推定 (③の時点)



(a) 希ガス、よう素、セシウムの比を 100 : 1 : 0.1 としたケース



(b) 希ガス、よう素、セシウムの比を 100 : 2 : 0.2 としたケース



(c) 希ガス、よう素、セシウムの比を 100 : 10 : 1 としたケース

図 39 DIANA 評価と空間線量率実測値の比較

4月以降の評価値

4月以降は、以下の内容の通り空气中放射性物質濃度（ダスト濃度）を基に評価した。

表 1 各月の評価結果

	Cs-134+Cs-137 の放出量 (PBq/月)	評価に用いた測定データ (Cs-134+Cs-137 合計値)
3月	約 20	当評価
4月	4×10^{-3}	西門付近の空气中放射性物質濃度（ダスト濃度） で今回評価（各月の全日の平均値で評価）
5月	1×10^{-3}	
6月	9×10^{-4}	
7月	7×10^{-4}	$1 \times 10^9 \text{Bq/h}$ (6/20-6/28) $\Rightarrow 7.44 \times 10^{-4} \text{PBq/月}$
8月	1×10^{-4}	$2 \times 10^8 \text{Bq/h}$ (7/26-8/12) $\Rightarrow 1.49 \times 10^{-4} \text{PBq/月}$
9月	1×10^{-4}	$2 \times 10^8 \text{Bq/h}$ (8/28-9/17) $\Rightarrow 1.44 \times 10^{-4} \text{PBq/月}$
10月	7×10^{-5}	$1 \times 10^8 \text{Bq/h}$ (10/3-10/13) $\Rightarrow 7.44 \times 10^{-5} \text{PBq/月}$
11月	4×10^{-5}	$6 \times 10^7 \text{Bq/h}$ (11/1-11/10) $\Rightarrow 4.32 \times 10^{-5} \text{PBq/月}$
12月	4×10^{-5}	$6 \times 10^7 \text{Bq/h}$ (11/26-12/6) $\Rightarrow 4.46 \times 10^{-5} \text{PBq/月}$

(括弧内は測定データの採取日期間を示す。)

[評価方法]

- 4月～6月：西門付近の空气中放射性物質濃度（ダスト濃度）を基に評価。なお、7月および8月と同様な手法で今回評価（詳細は別添参照）。
- 7月～8月：西門付近の空气中放射性物質濃度（ダスト濃度）を基に以下の条件で評価（詳細は別添参照）。
- 9月以降：原子炉建屋上部等の空气中放射性物質濃度（ダスト濃度）を基に評価。

評価および測定データについては、東京電力㈱ホームページの「東日本大震災後の福島第一・第二原子力発電所の状況」の以下に示す場所に掲載。

- 「プレスリリース」－「その他、報道配付資料」

（評価方法については、2011年11月26日公表の「福島第一原子力発電所1～3号機原子炉建屋からの現状の放射性物質放出量の評価方法」に掲載）

- 「発電所周辺の放射線量について」－「福島第一原子力発電所周辺の放射性物質の核種分析結果」－「発電所敷地内の大気」

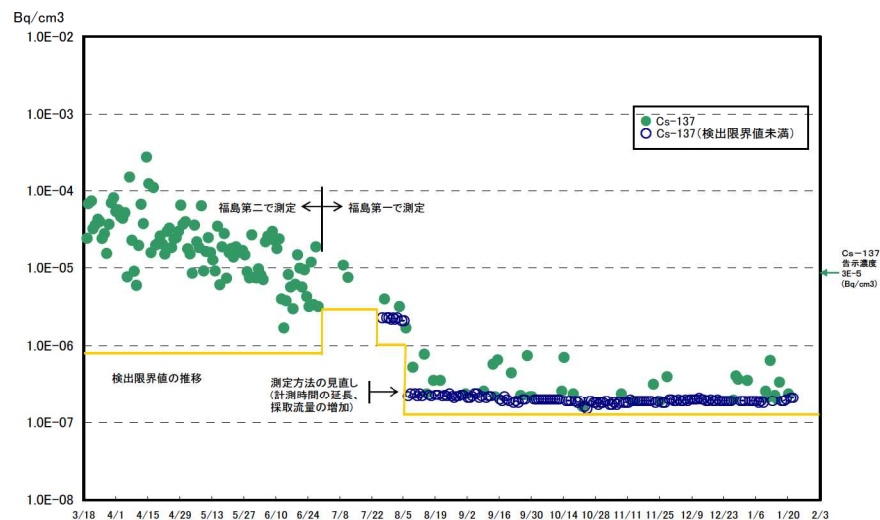


図 1 構内の空气中放射性物質濃度

実測された放射性物質濃度による放出量の推定

原子炉建屋から放出されている放射性物質について、発電所敷地内の放射性物質濃度の測定値に相当する放出量を以下の通り推定した。

1. 推定方法

「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針」に示された拡散式に基づき予め作成された濃度の分布グラフ（単位放出率当たりで大気安定度毎に作成）により、評価地点での単位放出量（1 Bq/s）あたりの濃度を読み取り、敷地周辺での測定値を当該読み取り値で除して放出量を算出する。

なお、添付図に示す濃度（Bq/cm³）の分布グラフより、下記条件における単位放出量（1 Bq/s）あたりの濃度を読み取る。

<分布グラフの読み取り条件>

気 象： 風速 1.0m/s、大気安定度 D

（拡散のし易さとして中庸の条件（中間状態）で設定）

放出点： 地表面（発電所近傍で安全側となる条件として設定）

評価地点： 風下方向 1km（原子炉建屋より西側 1km の発電所西門付近）

発電所西門付近における空気中の放射性物質濃度の測定値（Cs-134 および Cs-137）が、保守的に全て発電所から放出されているものとして、濃度の測定値（Bq/cm³）を上記の単位放出量（1 Bq/s）あたりの濃度で除して1、2、3号機合計の放出量（Bq/s）を算出する。

2. 計算例（4月分）

添付の分布グラフより、単位放出量（1 Bq/s）あたりの濃度は約 7×10^{-5} Bq/m³ と読み取れる（約 7×10^{-11} Bq/cm³）。

発電所西門付近における4月の空気中放射性物質濃度の測定値^{*1}（約 9.5×10^{-5} Bq/cm³）が保守的に全て発電所から放出されているものとする、1、2、3号機合計の放出量は、西門付近における空気中の放射性物質濃度の測定値と上記の1 Bq/sあたりの濃度を使用して以下の計算から約 4×10^{-3} PBq/月となる。

$$\begin{aligned} 9.5 \times 10^{-5} (\text{Bq/cm}^3) \div 7 \times 10^{-11} ((\text{Bq/cm}^3) / (\text{Bq/s})) &= 1.4 \times 10^6 (\text{Bq/s}) \\ &= 4 \times 10^{-3} (\text{PBq/月}) \end{aligned}$$

注1：測定値については東京電力㈱ホームページの「東日本大震災後の福島第一・第二原子力発電所の状況」の以下に示す場所に掲載している。

- 「発電所周辺の放射線量について」－「福島第一原子力発電所周辺の放射性物質の核種分析結果」－「発電所敷地内の大気」

以 上

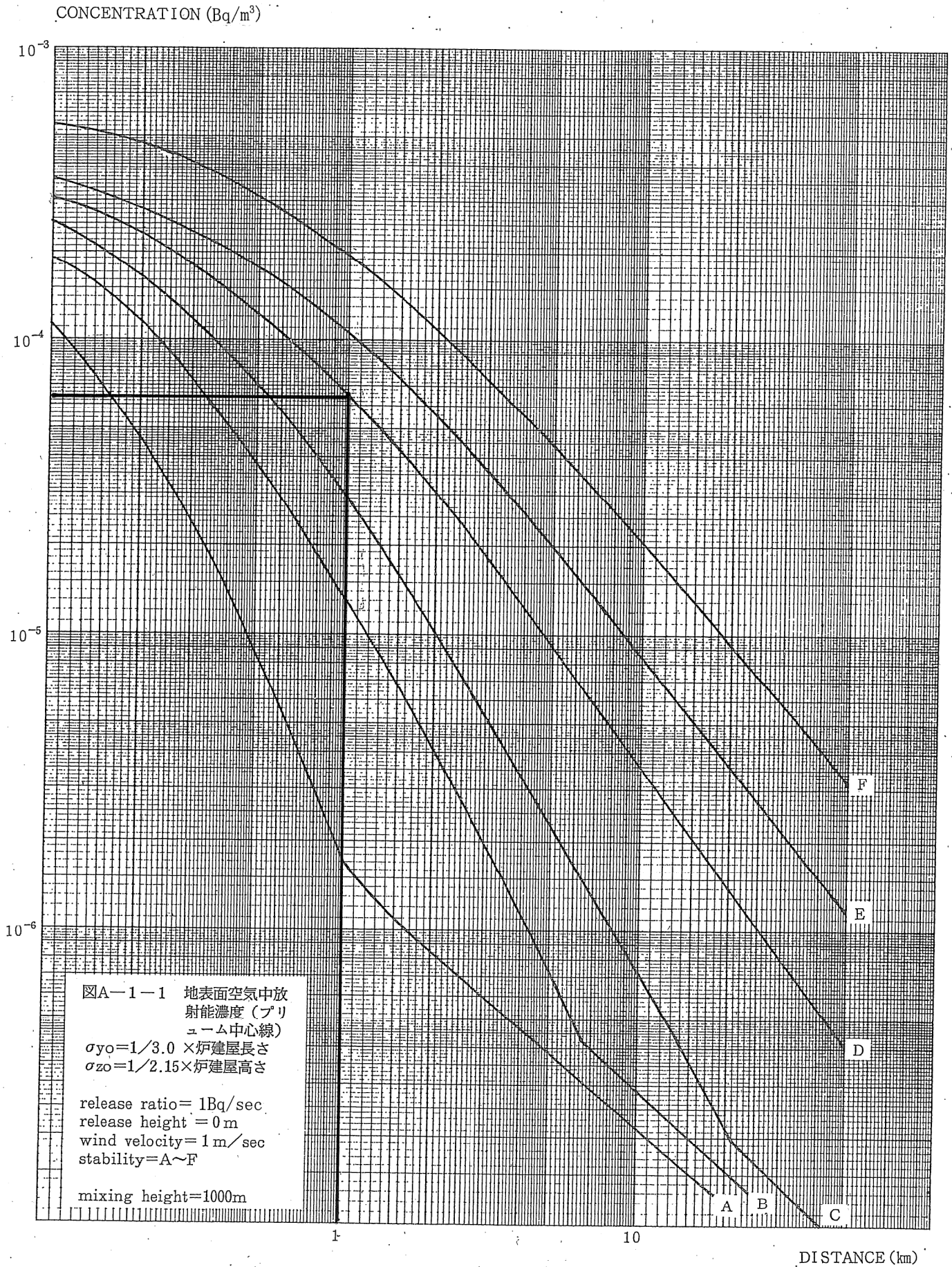


図 地表面空气中放射能濃度分布

格納容器ベントによる影響について

1 はじめに

福島第一原子力発電所1～3号機では、東北地方太平洋沖地震に伴う大津波によって注水機能と最終ヒートシンクを喪失した。

その結果、格納容器の圧力は原子炉から放出された蒸気により上昇し、さらに温度上昇した燃料被覆管（ジルカロイ）と蒸気が反応して発生した水素によっても加圧された。なお、この過程において燃料損傷も発生し、格納容器中に放射性物質が放出されている。

この格納容器圧力を下降させるため、各号機ともベントによる格納容器減圧操作を試みている。このベント操作では、蒸気や水素とともに放射性物質が大気中へ放出される。そこで、本資料では、ベント操作に伴う放射性物質の放出について考察するとともに、福島第一原子力発電所からみて北西方向の地域の汚染との関係についても検討した。

2 格納容器ベント弁操作について

ベントで蒸気を逃がすラインとしては、サプレッションチェンバー（以下、S/C）からのラインとドライウェル（以下、D/W）からのラインの2つがある。ベントを行う際には、これらのうちのいずれか（あるいは両方）のラインを構築するため、所要の弁操作を実施することとなる。いずれの号機においても、ベント弁（MO弁）を開放した上で、各々のラインに付いているAO弁（大弁または小弁）を開放する。ベントラインの構成については別図1-1、別図1-2に示す。

また、1～3号機におけるベント実績を別表1に示す。

3 各号機におけるベント弁操作と放射性物質の放出量に関する考察

3.1 1号機

○3月12日 10時過ぎのベント（S/Cベント弁小弁を操作）

3月11日の津波襲来によって全交流電源喪失（以下、SBO）にいたった1号機は、非常用復水器（IC）が機能喪失し、炉心からの除熱機能を喪失したため早期に炉心損傷し、原子炉圧力容器（以下、RPV）バウンダリの気相部から漏えいが発生したと考えられ、その結果としてD/W圧力が高まった。D/W圧力の上昇に伴い、電源がない状況におけるベント操作の手順検討を行い、S/Cベント弁小弁は手動で開けることが確認できたものの、現場は線量が高く、小弁の開操作はできなかった。そのため、遠隔操作によるS/Cベント弁大弁開操作の準備も進めつつ、3月12日10時17分、10時23分、10時24分には、計装用空気系（以下、IA系）の残圧を期待し、中操からS/Cベント弁小弁の開操作を実施した。同操作によりD/W圧力は低下していないことから、D/W圧力挙動からS/Cベント弁小弁が開いたかどうかは判断できない。同時間帯には正門付近の線量率が一時的に上昇（約400 μ Sv/h）していることから（本体資料の図6）、

大気中へ蒸気とともに放射性物質が放出されたものと考えられる。プルームの放出経路については、線量率が上昇した時刻とベント弁操作の時刻を踏まえると、S/C ベント弁小弁が開き D/W 圧力の低下が見られない程度の放出があった可能性と、建屋から直接大気中へ放出された可能性の両方が考えられ、放出経路については分かっていない。本評価においては、空間線量率の変動をもとに、排気筒から放射性物質が放出されたものと仮定して評価をおこなった。別表2に同時間帯に放出されたプルーム中の希ガス、よう素、セシウムの評価結果を示す。本体資料の4.1節の評価結果と比べると、同時間帯に大気中へ放出された量は支配的なものではなかったことがわかる。また、別図2-1に風向・風速・大気安定度から予測したプルームの軌跡を示す。図中の四角で囲まれた数字は、プルームの移動によって生じる線量率の最大点を10分毎にプロットしたものであり、プルームの軌跡を示すものとなる。この図には、文部科学省でおこなわれた土壌サンプリング結果（本体資料の図30）も重ねあわせて記載している。同時間帯に放出されたプルームは福島第一原子力発電所からみて北西方向の高汚染地域の付近を通過しているものの、上述のように、プルーム中の放射性物質の量は支配的なものではなかったとの評価結果が得られていることから、土壌汚染への寄与は少ないと考えられる。

○3月12日 14時過ぎのベント（S/Cベント弁大弁を操作）

3月12日14時過ぎにはS/Cベント弁大弁の開操作を実施しており、D/W圧力の低下が確認されていること、ふくいちライブカメラの映像（別図5-1）で排気筒上に蒸気が確認できることから、同ベントにより蒸気が放出されたものと考えられる。本体資料の図6に示すように、同ベントが実施された時刻には正門付近、MP-8付近に配置したモニタリングカーで線量率を測定しており、正門付近では空間線量率が $10\mu\text{Sv/h}$ 程度まで上昇しているため、空間線量率の変動をもとに、排気筒から放射性物質が放出されたものとして評価をおこなった。別表2に同ベントで放出された希ガス、よう素、セシウムの評価結果を示す。本体資料の4.1節の評価結果と比べると、同ベントによって大気中へ放出された量は支配的なものではなかったと考えられる。また、別図2-2に風向・風速・大気安定度から予測したプルームの軌跡（本体資料の図30にプルームの軌跡を重ね合わせた図）を示す。プルームは福島第一原子力発電所からみて北西方向の高汚染地域の上は通過しておらず、上述のように、同ベントに伴い放出された放射性物質の量は支配的なものではなかったとの評価結果が得られていることから、同ベントの土壌汚染への寄与は少ないと考えられる。

3.2 2号機

○3月14日 21時過ぎのベント（S/Cベント弁小弁を操作）

2号機では、1号機の状況を踏まえ、いずれベントが必要となることが予想された

ことから、ベントの準備を進め、3月13日11:00に中央制御室仮設照明用小型発電機を用いて電磁弁を励磁し、S/Cベント弁大弁を開操作した。しかしながら、格納容器圧力がラプチャーディスク作動圧(427kPa [gage])よりも低く、ベントされない状態が続いていた。3月14日11時01分には3号機の建屋爆発の影響で電磁弁励磁用回路が外れ、S/Cベント弁大弁が閉となったことから、S/Cベント弁大弁によるベントの復旧を進めつつ、3月14日21時頃にS/Cベント弁小弁の開操作を実施している。その後もD/W圧力は上昇しており、減圧ができていないとは考えられないものの、同時間帯には正門付近の線量率が上昇(約3,000 μ Sv/h)していることから(本体資料の図8)、大気中へ蒸気とともに放射性物質が放出されたものと考えられる。プルームの放出経路については、線量率が上昇した時刻とベント弁操作の時刻を踏まえ、S/Cベント弁小弁の開操作によってD/W圧力の低下が見られない程度の放出があった可能性と、建屋から直接大気中へ放出された可能性の両方が考えられ、放出経路については分かっていない。今回の評価では、空間線量率の変動をもとに、排気筒から放射性物質が放出されたものとして評価をおこなった。別表2に同時間帯に放出されたプルーム中の希ガス、よう素、セシウムの評価結果を示す。本体資料の4.1節の評価結果と比べると、大気中へ放出された量は支配的なものではなかったことがわかる。また、別図3に風向・風速・大気安定度から予測したプルームの軌跡(本体資料の図30にプルームの軌跡を重ね合わせた図)を示す。同時間帯に放出されたプルームは福島第一原子力発電所からみて北西方向の高汚染地域の上は通過しておらず、上述のように、プルーム中の放射性物質の量は支配的なものではなかったとの評価結果が得られていることから、同プルームの土壌汚染への寄与は少ないと考えられる。

○3月15日 0時過ぎのベント (D/Wベント弁小弁を操作)

その後もD/W圧力の上昇が続いたため、3月15日0:02にD/Wベント弁小弁の開操作を実施したが、数分後には閉であることが確認されており、D/W圧力の低下も確認されていない。また、同時間帯において正門付近の線量率が変動していないことから、放射性物質は放出されておらず、ベント弁操作による大気中への蒸気放出はなかったものと推定している。

3.3 3号機

○3月13日 9時過ぎのベント (S/Cベント弁大弁を操作)

3号機では、1号機の状況を踏まえ、いずれベントが必要となることが予想されたことから、ベントの準備を進め、3月13日の8:41にS/Cベント弁大弁の開操作を実施している。同ベントではD/W圧力の低下が確認されていること(緊対本部では同日9:20頃にベントが実施されたと判断)、ふくいちライブカメラの映像(別図5-2)で排気筒上に蒸気が確認できることから、ベントにより蒸気が放出されたと判断している。

また、本体資料の図7に示すように、同ベントが実施された時刻には正門付近、MP-1付近、MP-4付近に配置したモニタリングカーで線量率を測定しており、正門付近、MP-4付近では線量率が数百 μ Sv/hまで上昇しているため、空間線量率の変動をもとに、排気筒から放射性物質が放出されたものとして評価をおこなった。別表2に同ベントで放出された希ガス、よう素、セシウムの評価結果を示す。本体資料の4.1節の評価結果と比べると、同ベントによって大気中へ放出された量は支配的なものではなかったことがわかる。また、別図4-1に風向・風速・大気安定度から予測したプルームの軌跡（本体資料の図30にプルームの軌跡を重ね合わせた図）を示す。同時間帯に放出されたプルームは福島第一原子力発電所からみて北西方向の高汚染地域の上は通過しておらず、上述のように、同ベントに伴い放出された放射性物質の量は支配的なものではなかったとの評価結果が得られていることから、同ベントの土壌汚染への寄与は少ないと考えられる。

○3月13日 12時過ぎのベント（S/Cベント弁大弁を操作）

3月13日の12時過ぎにS/Cベント弁大弁の開操作を実施している。同ベントではD/W圧力の低下が確認されていること、ふくいちライブカメラの映像（別図5-3）で排気筒上に蒸気が確認できることから、ベントにより蒸気が放出されたと判断している。本体資料の図7に示すように、同ベントが実施された時刻には正門付近、MP-1付近、MP-4付近に配置したモニタリングカーで線量率を測定しているが、ベント弁操作時刻付近では線量率の上昇が確認されていないため、空間線量率に変動を与えない程度の放出を仮定し、排気筒から放射性物質が放出されたものとして評価をおこなった。別表2に同ベントで放出された希ガス、よう素、セシウムの評価結果を示す。本体資料4.1節の評価結果と比べると、同ベントによって大気中へ放出された量は支配的なものではなかったことがわかる。また、別図4-2に風向・風速・大気安定度から予測したプルームの軌跡（本体資料の図30にプルームの軌跡を重ね合わせた図）を示す。同時間帯に放出されたプルームは福島第一原子力発電所からみて北西方向の高汚染地域の上は通過しておらず、上述のように、同ベントに伴い放出された放射性物質の量は支配的なものではなかったとの評価結果が得られていることから、同ベントの土壌汚染への寄与は少ないと考えられる。

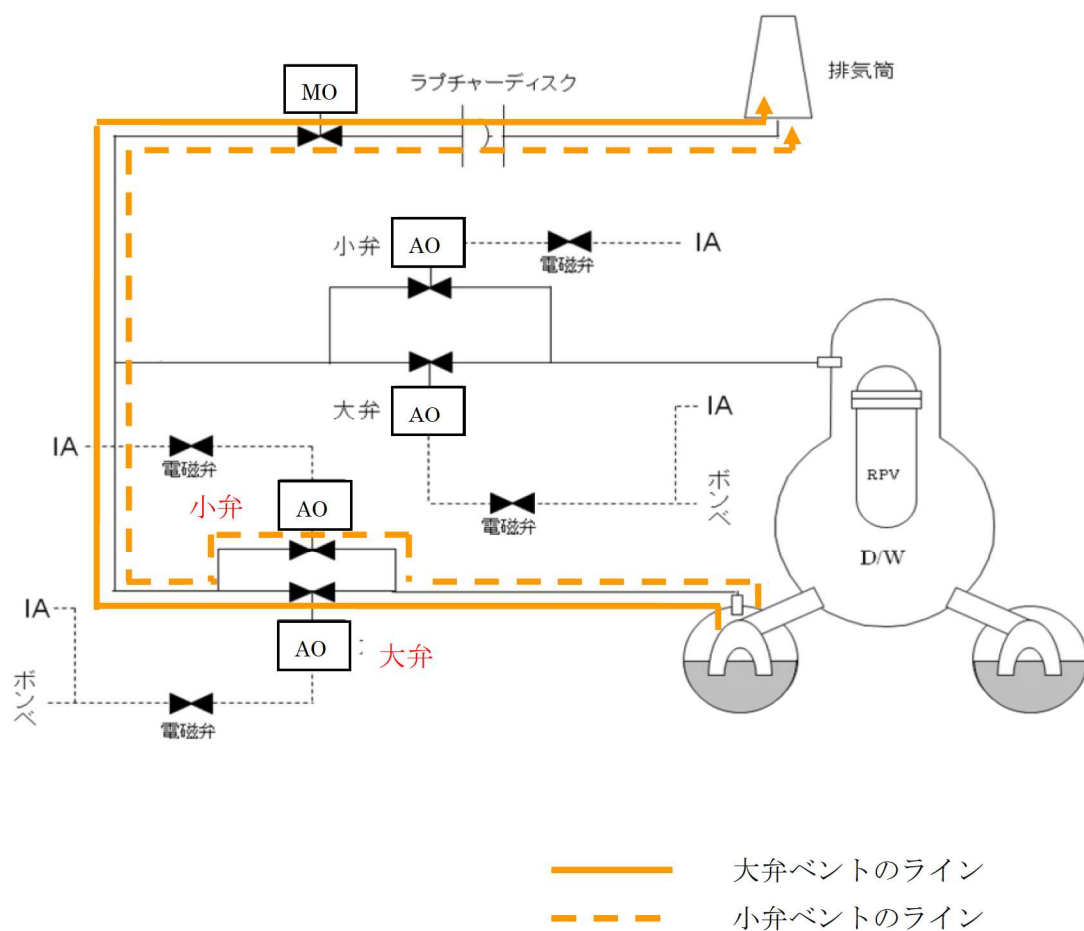
これ以降もS/Cベント弁大弁及び小弁操作を実施している。本体資料の図7～12、14に示すように、ベント弁操作を実施した時刻にはモニタリングカーで空間線量率を測定している（3月18日5時過ぎのベントは除く）が、いずれのベント弁操作においても線量率の上昇は確認されていない。別表2にベントで放出された希ガス、よう素、セシウムの評価結果を示す。3月13日の12時過ぎのベントについては、空間線量率に変動を与えない程度の放出を仮定し、排気筒から放射性物質が放出されたも

のとして評価をおこなったところ、同日 9 時過ぎ、12 時過ぎに実施されたベントよりも放出量が少なく、ベント時の放出量は回を追う毎に減少していることがわかった。3 月 14 日以降に実施したベントについては、空間線量率に変動が確認されておらず、上述のようにベントは回を追う毎に放出される量が減少しているため、3 月 14 日以降に実施したベントに伴い放出される放射性物質の量は保守的に 3 月 13 日 20 時過ぎのベントと同量とし、放出量は評価しなかった。いずれのベントについても、本体資料 4.1 節の評価結果と比べると、大気中へ放出された量は支配的なものではなかったと考えられる。また、別図 4-3～4-9 に風向・風速・大気安定度から予測したプルームの軌跡（本体資料の図 30 にプルームの軌跡を重ね合わせた図）を示す。同図に示すように、いずれのプルームも福島第一原子力発電所からみて北西方向の高汚染地域の上は通過しておらず、同ベントによる土壤汚染への寄与は少ないと考えられる。なお、3 月 20 日 11 時過ぎのベントによって放出されたプルームは福島第一原子力発電所からみて北西方向の高汚染地域の近くを通過しているものの、ベント時に放出された放射性物質の量は支配的なものではなかったとの評価結果が得られていることから、同ベントの土壤汚染への寄与も少ないと考えられる。

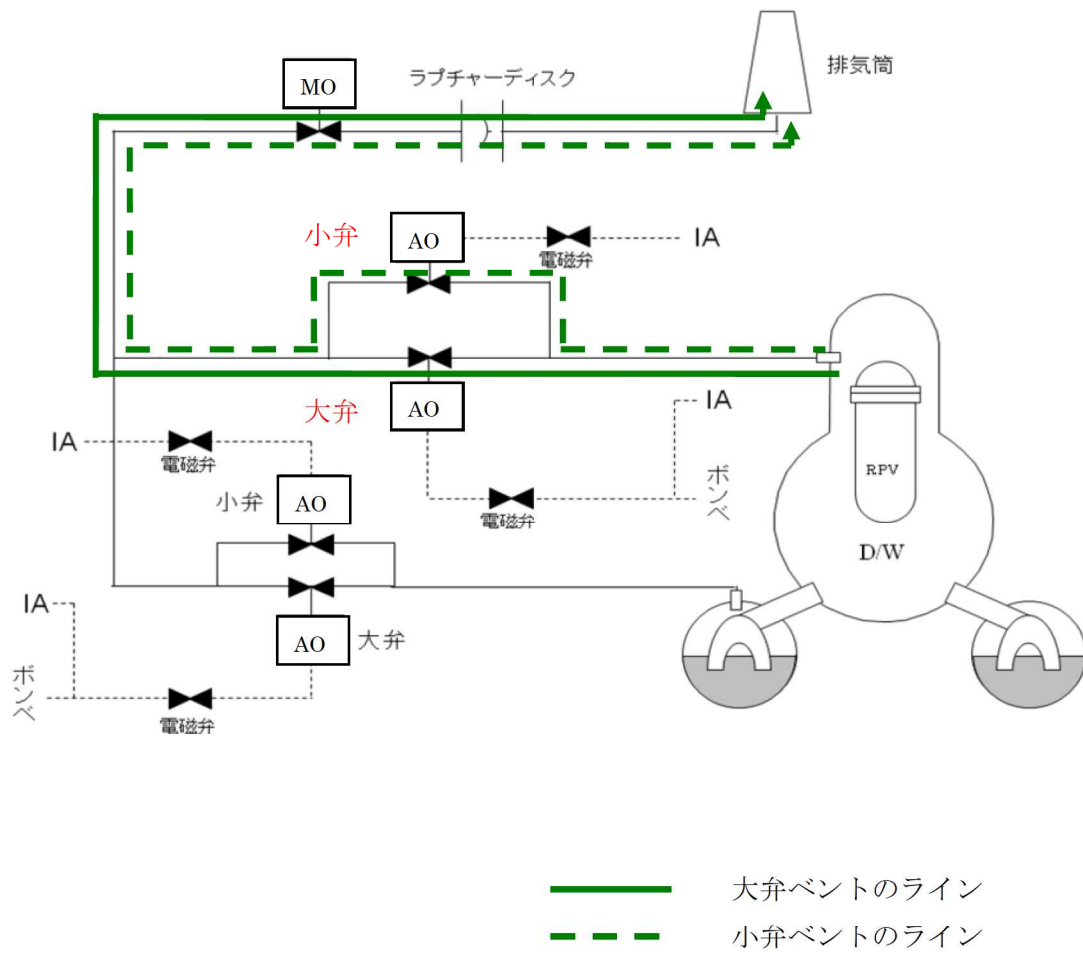
4 ベントによる放射性物質の放出のまとめ

1～3号機で実施したベントに伴い大気中へ放出された放射性物質の量は、本体資料 4.1 節の評価結果と比べると、支配的なものではなかった。これは、ベント時に放出された放射性物質が、スクラビング効果によって相当程度、低減されていたためと考えられる。また、ベントに伴い放出された放射性物質は福島第一原子力発電所からみて北西方向の地域の土壤汚染への寄与が少ないと考えられる。

以 上



別図 1 - 1 S/C ベントライン



別図 1-2 D/W ベントライン

別表1 ベント実績について

号機	日時	操作したベント弁	同弁閉確認時刻
1号機	3月12日 10時過ぎ	S/C ベント弁小弁	(開確認できず)
	3月12日 14時過ぎ	S/C ベント弁大弁	不明(D/W 圧力が12日 15:00頃から上昇)
2号機	3月14日 21時過ぎ	S/C ベント弁小弁	14日 23:35頃
	3月15日 0時過ぎ	D/W ベント弁小弁	開操作の数分後
3号機	3月13日 9時過ぎ	S/C ベント弁大弁	13日 11:17
	3月13日 12時過ぎ	S/C ベント弁大弁	不明(D/W 圧力が13日 15:00頃から上昇)
	3月13日 20時過ぎ	S/C ベント弁大弁	15日 16:00
	3月14日 6時過ぎ	S/C ベント弁小弁	15日 16:00
	3月15日 16時過ぎ	S/C ベント弁大弁	17日 21:00
	3月16日 2時頃	S/C ベント弁小弁	4月8日 18:30頃
	3月17日 21時過ぎ	S/C ベント弁大弁	18日 5:30
	3月18日 5時過ぎ	S/C ベント弁大弁	19日 11:30
	3月20日 11時過ぎ	S/C ベント弁大弁	4月8日 18:30頃

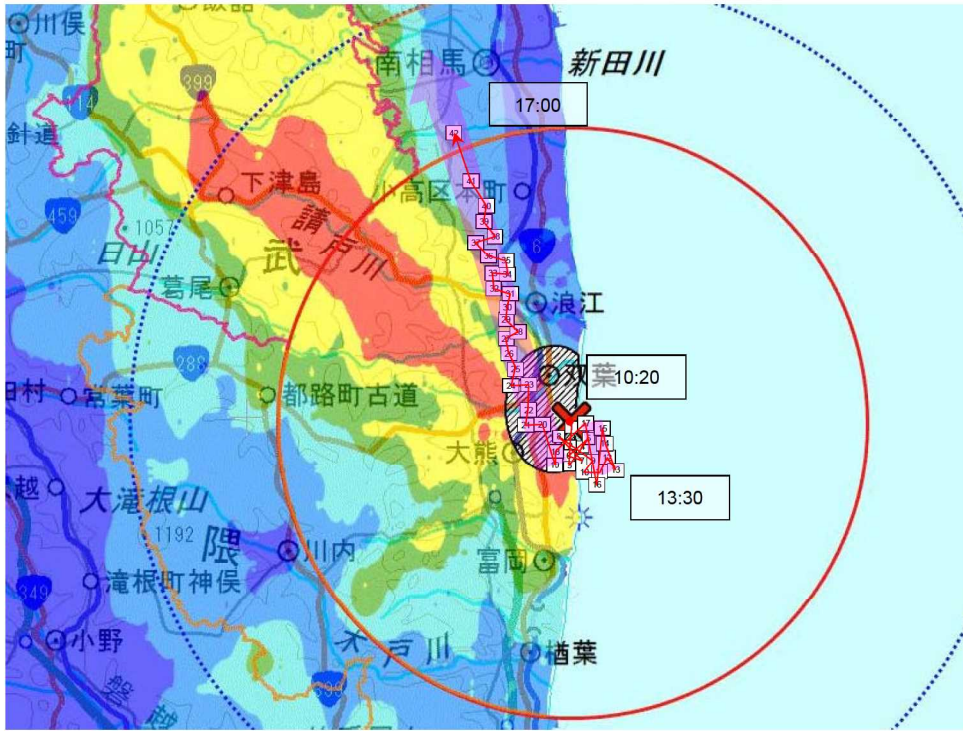
別表2 ベント弁操作時の放出量について

号機	日時	事象	放出量(PBq)			
			希ガス	I-131	Cs-134	Cs-137
1	3月12日 10時過ぎ	放出箇所不明	3	0.5	0.01	0.008
	3月12日 14時過ぎ	格納容器ベント	4	0.7	0.01	0.01
2	3月14日 21時過ぎ ^{注1}	放出箇所不明	60	40	0.9	0.6
3	3月13日 9時過ぎ ^{注1}	格納容器ベント	1	0.3	0.005	0.003
	3月13日 12時過ぎ ^{注1、2}	格納容器ベント	0~0.04	0~0.009	0~0.0002	0~0.0001
	3月13日 20時過ぎ ^{注1、2}	格納容器ベント	0~0.003	0~0.001	0~0.00002	0~0.00002
	3月14日 6時過ぎ ^{注3}	格納容器ベント	0~0.003	0~0.001	0~0.00002	0~0.00002
	3月15日 16時過ぎ ^{注3}	格納容器ベント	0~0.003	0~0.001	0~0.00002	0~0.00002
	3月16日 2時頃 ^{注3}	格納容器ベント	0~0.003	0~0.001	0~0.00002	0~0.00002
	3月17日 21時過ぎ ^{注3}	格納容器ベント	0~0.003	0~0.001	0~0.00002	0~0.00002
	3月18日 5時過ぎ ^{注3}	格納容器ベント	0~0.003	0~0.001	0~0.00002	0~0.00002
	3月20日 11時過ぎ ^{注3}	格納容器ベント	0~0.003	0~0.001	0~0.00002	0~0.00002

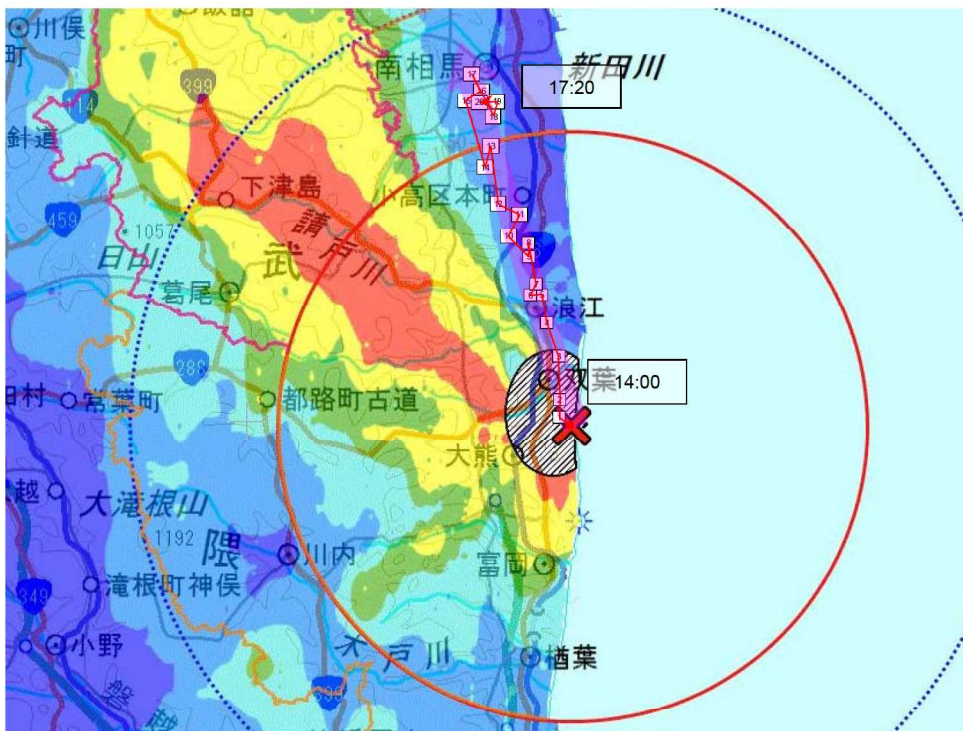
(注1) 1～3号機は建屋爆発やブローアウトパネル開放によって、格納容器から大気中へ直接、放射性物質が放出されたと考えられる。格納容器からの直接放出とベントによる放出を分離して評価することは困難であるため、建屋爆発・ブローアウトパネル開放が発生した後に実施したベント・建屋爆発については、ベント・建屋爆発で放出された放射性物質の他に格納容器から直接放出された放射性物質も含んだ評価となっている。

(注2) 線量率にピークが現れていないため、線量率に変動を与えない程度の放出を仮定して評価した。

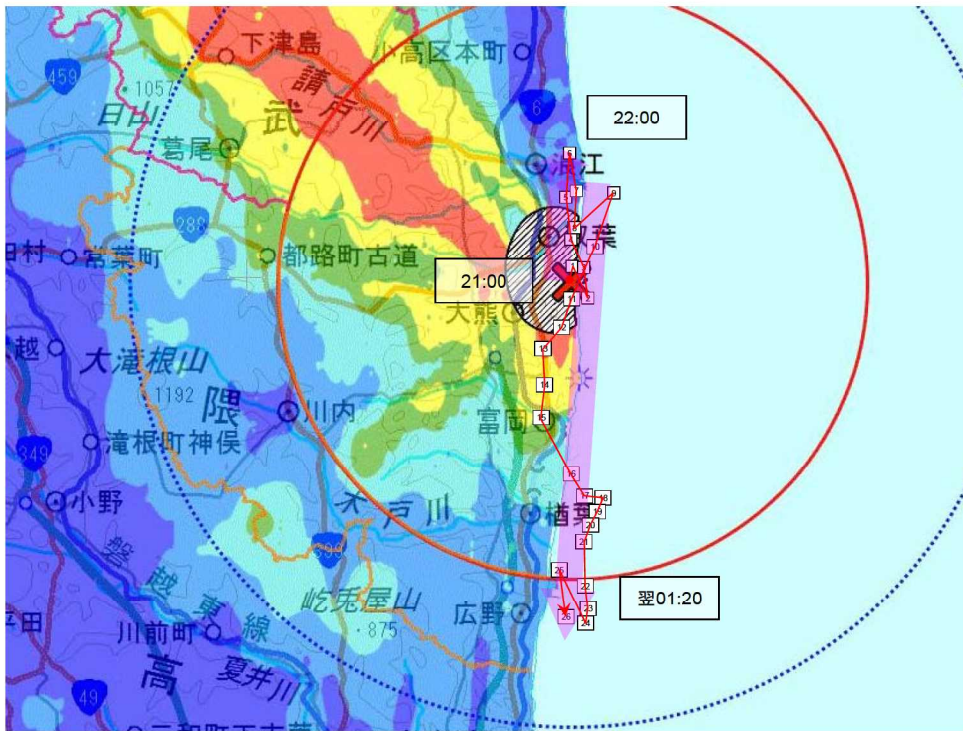
(注3) 3号機のベントについては、3月13日に実施された3回のベントの評価結果より、ベント時の放出量が回を追う毎に減少していることがわかる。3月14日以降のベントについては、空間線量率に変動が確認されていないため、放射性物質の放出はさらに少ない可能性もあるが、3月13日20時過ぎのベント時の放出量と同量とした。これは、それまでの沈着により、バックグランド値が上昇しており、バックグランド値の1%の値を用いる推定方法では過大な放出量となるため。



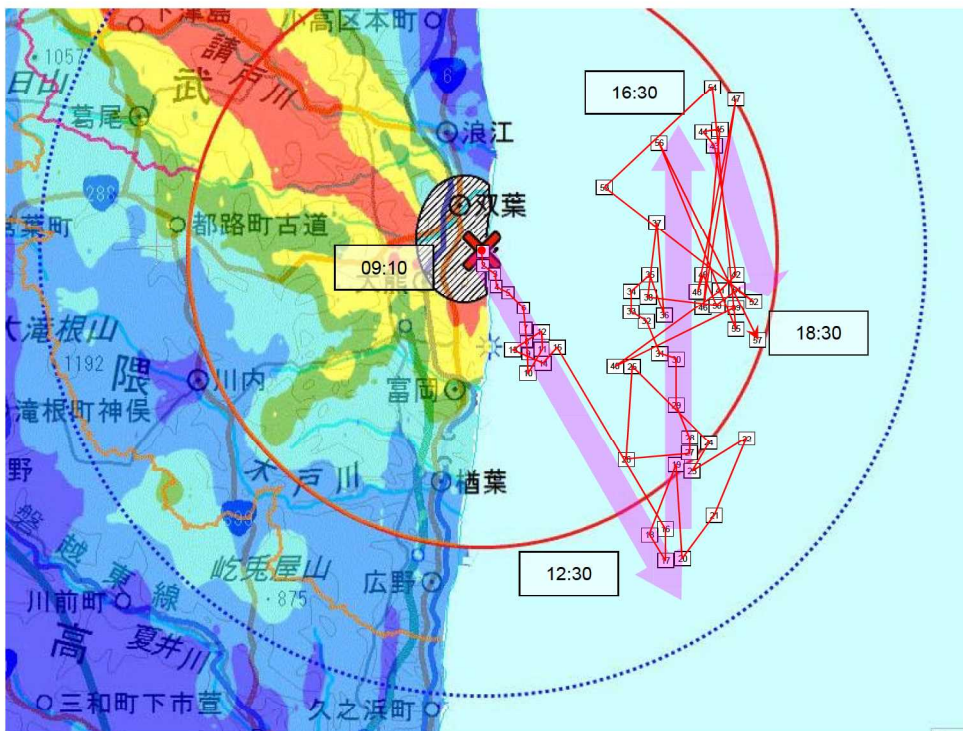
別図 2-1 3月12日 10時過ぎに放出されたプルームの軌跡



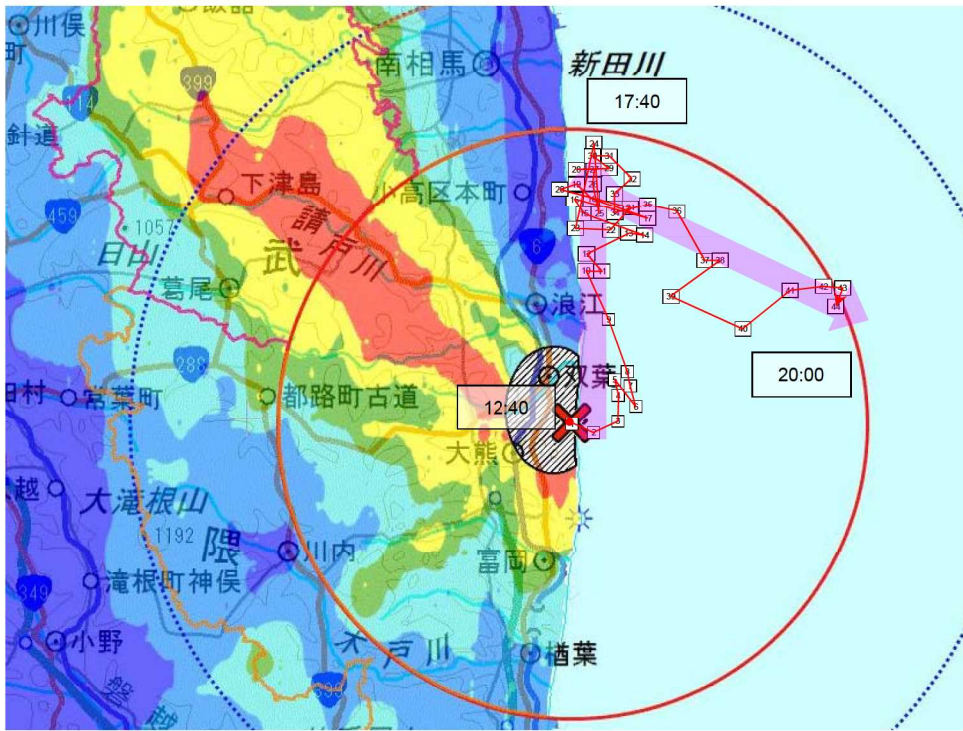
別図 2-2 3月12日 14時過ぎの1号機ベント時に放出されたプルームの軌跡



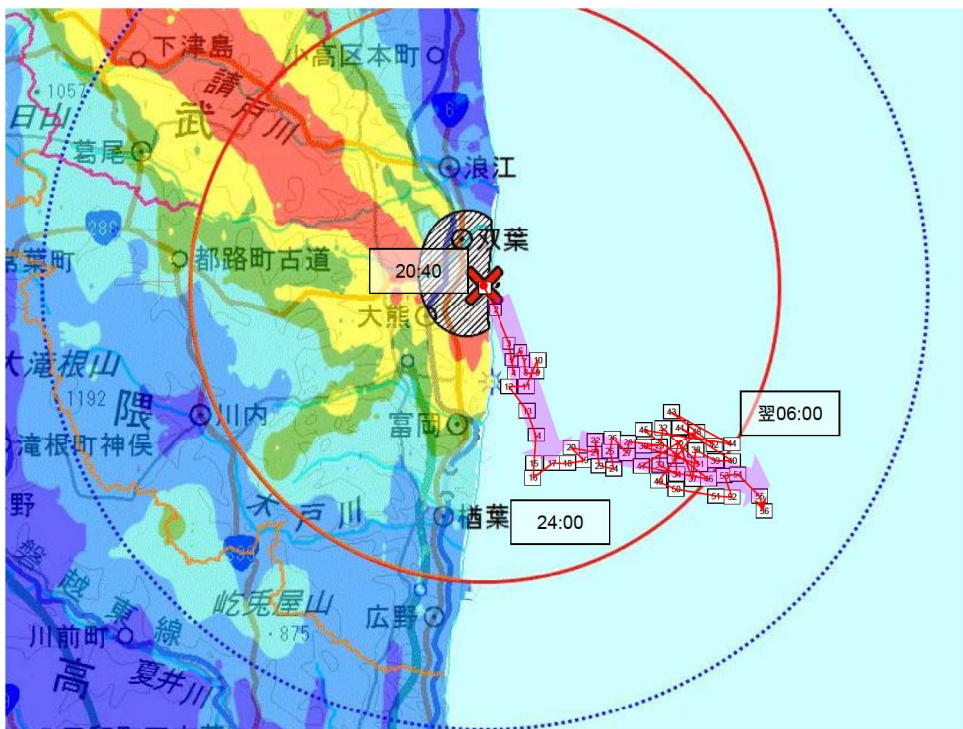
別図3 3月14日 21時過ぎに放出されたプルームの軌跡



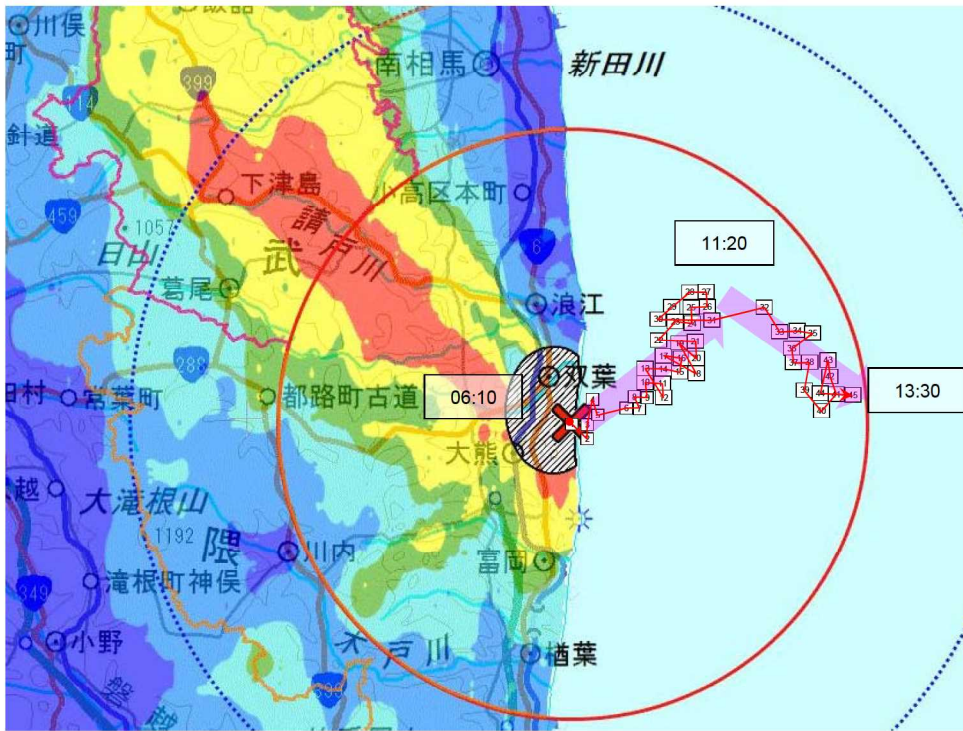
別図4-1 3月13日 9時過ぎの3号機ベント時に放出されたプルームの軌跡



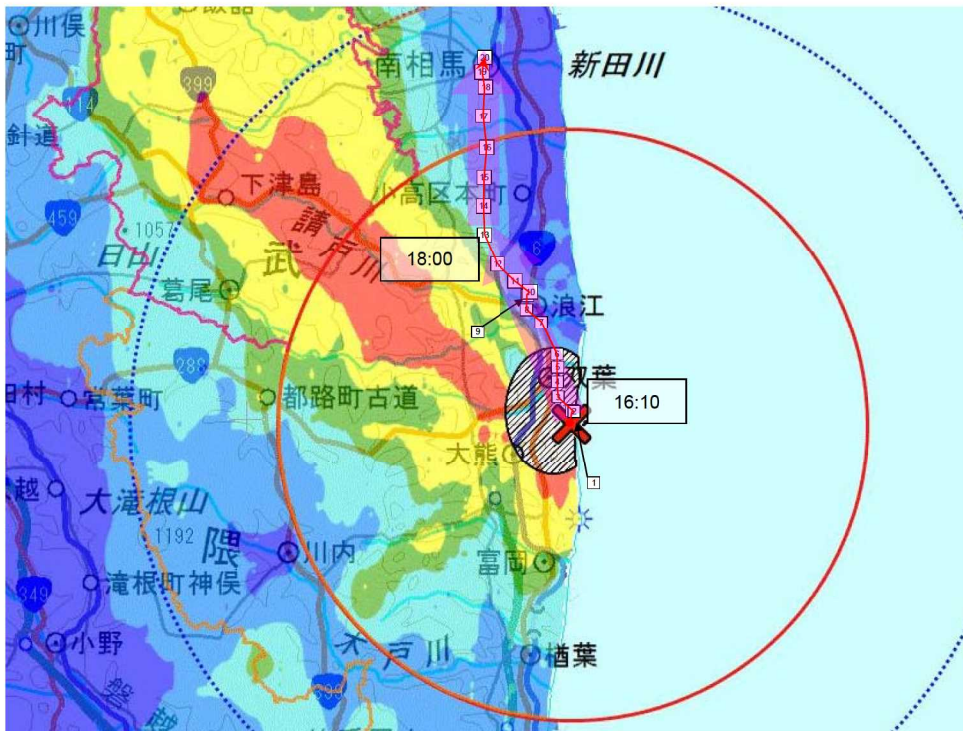
別図4-2 3月13日 12時過ぎの3号機ベント時に放出されたプルームの軌跡



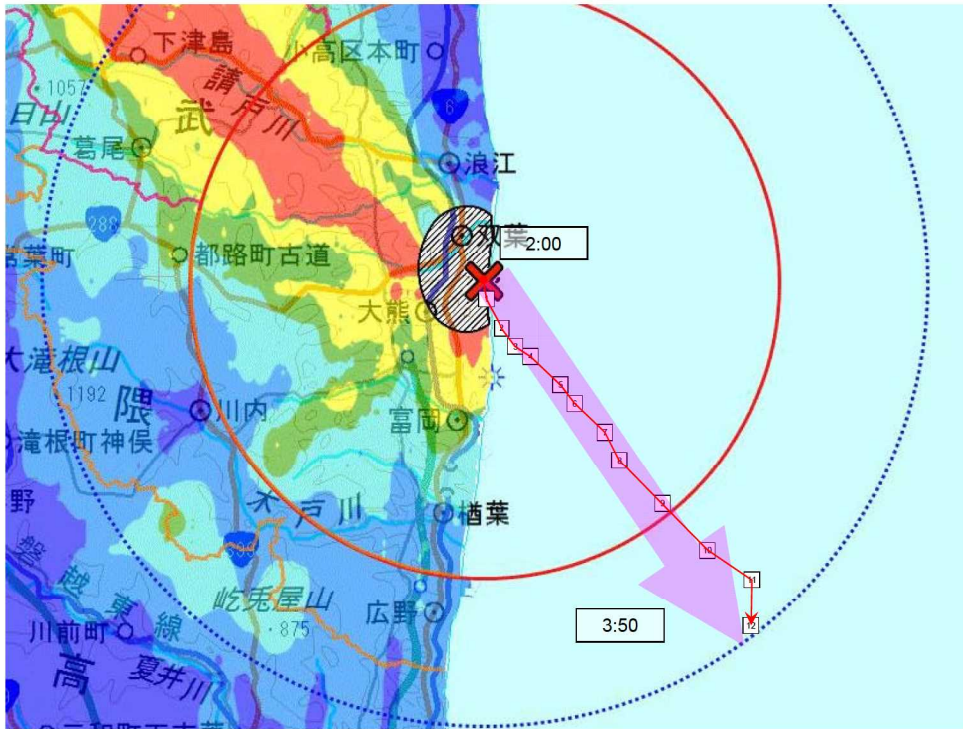
別図4-3 3月13日 20時過ぎの3号機ベント時に放出されたプルームの軌跡



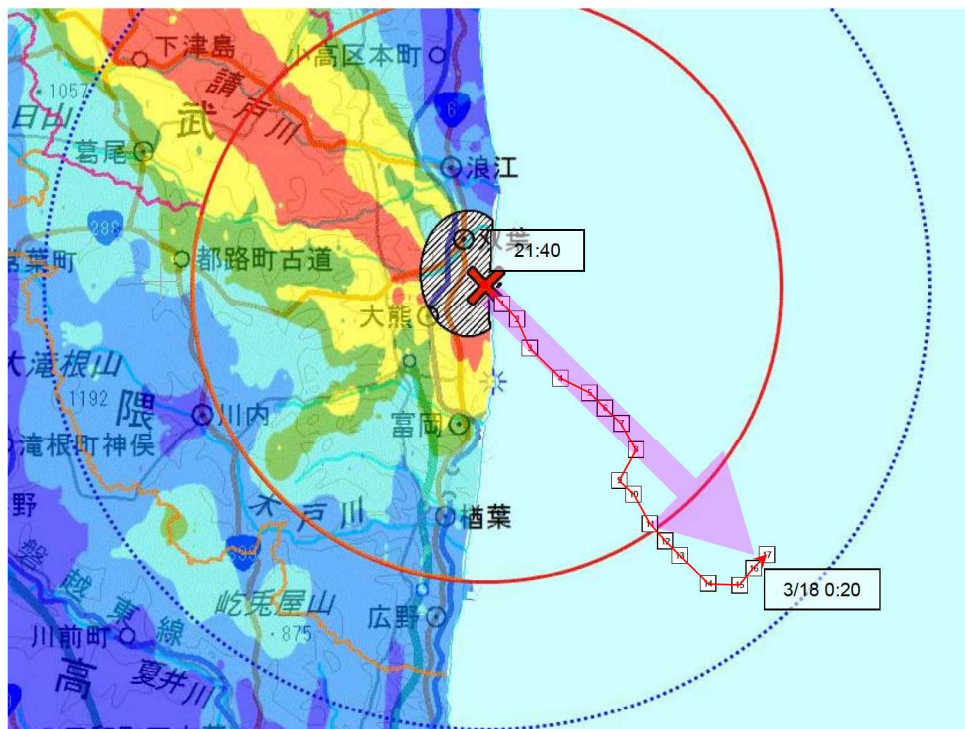
別図4-4 3月14日 6時過ぎの3号機ベント時に放出されたプルームの軌跡



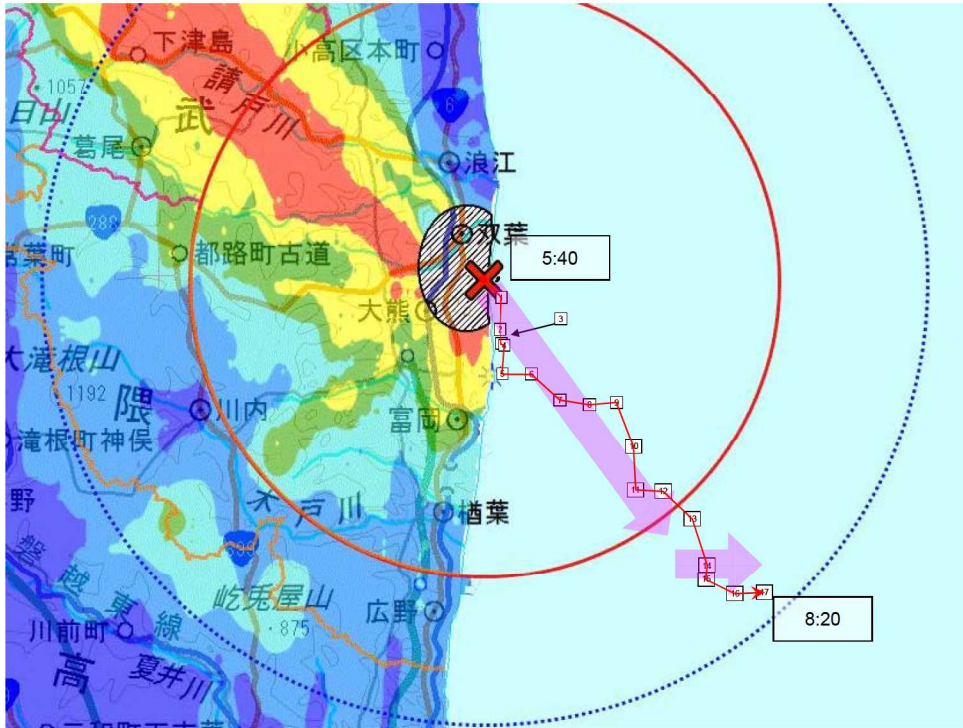
別図4-5 3月15日 16時過ぎの3号機ベント時に放出されたプルームの軌跡



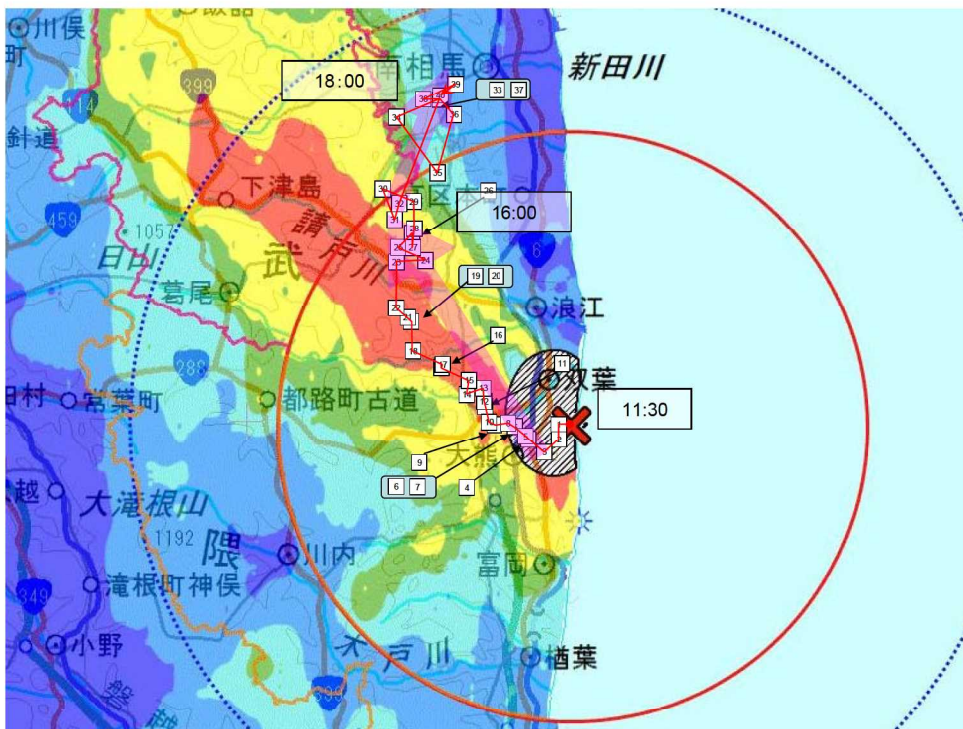
別図4-6 3月16日 2時頃の3号機ベント時に放出されたプルームの軌跡



別図4-7 3月17日 21時過ぎの3号機ベント時に放出されたプルームの軌跡



別図4-8 3月18日 5時過ぎの3号機ベント時に放出されたプルームの軌跡



別図4-9 3月20日 11時過ぎの3号機ベント時に放出されたプルームの軌跡



1,2号機共用排気筒からの蒸気

別図5-1 ふくいライブカメラの映像 (3月12日 15:00頃)



3,4号機共用排気筒からの蒸気

別図5-2 ふくいライブカメラの映像 (3月13日 10:00頃)



別図5-3 ふくいライブカメラの映像 (3月13日 13:00頃)

格納容器からの漏えいに関する考察

1 格納容器からの漏えい経路に関する考察

福島第一原子力発電所 1～3 号機では、事故により格納容器が高温・高圧環境に曝され、その後の格納容器の圧力挙動などから、格納容器からの漏えいが発生しているものと判断している。ここでは、格納容器からの漏えい箇所に関する推定を行うことを目的とする。

1.1 格納容器漏えい経路に関する主要な情報源

(1) 格納容器設計の観点から得られる知見

格納容器（以下、PCV）の設計によっては、高温・高圧環境に曝された際の漏えいの程度が異なるため、設計情報は PCV からの漏えい箇所の推定に資するものと考えられる。

(2) その他、PCV バウンダリ付近などで確認された情報から得られた知見

上記の他、現場調査などから、PCV バウンダリの健全性、原子炉建屋（以下、R/B）内外の汚染状況に関する情報などは PCV からの主たる漏えい箇所の推定に資すると考えられる。

1.2 PCV 設計の観点から得られる知見（別図 1）

(1) フランジ部

・外開き式フランジ

トップヘッドフランジ、移動式炉内計装系（以下、TIP）貫通部、制御棒駆動系（以下、CRD）ハッチ、サプレッション・チェンバー（以下、S/C）マンホールなどの外開き式フランジは、PCV 内に過大な圧力が作用することによりフランジが開口し、高温蒸気が有機シール材（シリコンゴム）に直接接触することにより、有機シール材が劣化する可能性がある。PCV に設置されているハッチ類について、「受圧面積/（フランジボルト総断面積×フランジボルト長さ）」の点では、トップヘッドフランジが最も開口し易く、次いで S/C マンホールが開口し易い構造となっている。これらのフランジが、有機シール材の劣化により漏えいを生じている可能性が高い。

・内開き式フランジ

機器ハッチなどの内開き式フランジは、PCV 内の圧力によりフランジが閉じる構造となっており、外開き式フランジと比較すると、高温蒸気が直接有機シール材に接触し、劣化を生じるような事象は考えにくい。

(2) 所員用エアロック

所員用エアロックは内開きの二重扉構造であるが、ラッチ機構で扉を抑えており、フランジ面はメタルタッチしていない。従って、高温蒸気が直接有機シール材に接触し、シール材が劣化している可能性が高い。

(3) 電気配線貫通部

キャニスタタイプの電気配線貫通部の高温・高圧試験では、400℃、700kPa [gage] の条件で有機シール材が劣化し、大きな漏えいを発生している知見がある。従って、高温・高圧の履歴を受けた場合、漏えいパスとなる可能性がある。

なお、1号機については、耐漏えい性の高いモジュールタイプに全て取り替えを実施済みである。

(4) ベローズ

ベント管及び一部の配管貫通部にステンレス鋼 (SUS 304) 製のベローズを設置している場合、PCV 内に注入された海水により、ベローズに応力腐食割れまたは孔食が発生し、漏えいパスとなる可能性がある。

(5) 真空破壊装置

1号機の真空破壊装置については、S/C 外にてベント管と接続されており、高温状態となった場合、弁シート部やカバーガスケットなどから漏えいする可能性がある。

1.3 その他、PCV バウンダリ付近などで確認された情報から得られた知見

1.3.1 1号機R/B1階における蒸気確認

平成23年6月3日に、1号機R/B1階南東部の不活性ガス系配管床貫通部において蒸気の流出が確認された(別図2)。6月3日のPCV内温度は100℃程度であり、蒸気の流出箇所の下階はトーラス室であることから、S/Cまたはドライウェル (D/W) からトーラス室へ流入した蒸気が流出していたものと推定される。ただし、蒸気の漏えい箇所がS/CであるかD/Wであるかの特定は困難である。

1.3.2 2号機原子炉直上部からの蒸気確認

平成23年9月17日に、2号機R/Bのブローアウトパネル開口部からダストサンプリングを実施した際に動画を撮影したところ、原子炉直上部から蒸気発生が確認された(別図3)。具体的に蒸気がどこから漏えいしているのか現時点では確認出来ていないが、動画映像から蒸気の漏えい箇所としては原子炉の上部に位置するPCV トップヘッドフランジ上部の原子炉ウェル上蓋付近からであると推定される。また、使用済燃料プールの温度が高くない(平成23年9月17日時点で約

34℃) ことから、確認された蒸気は PCV から漏えいしてきたものであると考えられる。PCV トップヘッドフランジ (及び原子炉ウェル上蓋) の構造は 1 号機、3 号機とも 2 号機と同様であり、1・3 号機でも 2 号機と同じ PCV 漏えいパスが存在している可能性が考えられる。

さらに、現在判明している R/B 内の空間線量測定結果によると、R/B5 階で確認された高線量 (約 200 mSv/h) は、4 階以下では確認されていない (別図 4)。2 号機は R/B 構造が維持されており、線量の分布と漏えい経路には相関性があると考えられることを踏まえると、5 階からの漏えいが主たるものであったことを示唆している。

1.3.3 3 号機上空からの熱画像確認

平成 23 年 3 月 20 日に、防衛省技術研究本部により 3 号機の R/B 上空から、赤外線サーモグラフィ装置等を用いた熱画像撮影が行われている。その結果、R/B 爆発後の 3 号機オペフロ上では、原子炉直上部に比較的高温な部位が存在することが判明している (別図 5)。当該箇所は、PCV トップヘッドフランジ上部の原子炉ウェル上蓋付近と考えられ、この場所から蒸気流出があった可能性を示唆している。

1.3.4 2・3 号機 R/B 中地下階三角コーナー調査結果

平成 24 年 3 月 14 日に、トーラス室の調査のために R/B 中地下階などの現場調査を行っている。その結果、三角コーナーの雰囲気線量は約 15~30 mSv/h であった。この値は、別図 4 や別図 6 で示される R/B1 階と同様か、それより低い数値であり、また、2 号機の R/B5 階で確認された塗装の剥がれもないことが確認できた (別図 7)。これは、三角コーナーエリアへのトーラス室からの蒸気漏えいは限定的であったことによるものと考えられ、下階から漏えいするより早く PCV 上部から蒸気漏えいがあった可能性を示唆している。

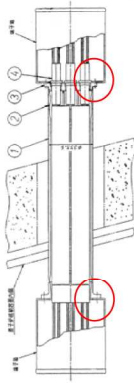
1.3.5 2 号機 R/B トーラス室調査結果

平成 24 年 4 月 18 日に、サーベイランナーにて 2 号機トーラス室内の現場調査を行っている。その結果、カメラにて点検した範囲内で、大きな漏えい、変形、損傷は確認されていない。特に、1.2 節 (1) にて PCV 設計の観点から漏えい想定箇所として挙げられていた S/C マンホールについてもカメラにて外観を点検した結果、大きな漏えい、変形、損傷は確認されておらず、爆発が発生した形跡は認められない。現場調査を行った当時、D/W 圧力が上昇傾向にあったことを踏まえると、2 号機格納容器内の気相部気密性も高いと考えられ、S/C マンホールからは液相漏えいのみならず、気相漏えいの可能性も小さいものと推定される。

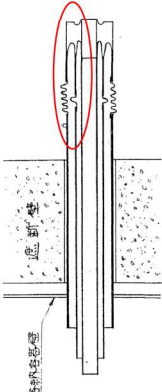
2 まとめ

1～3号機では、PCV上蓋の結合部分（トップヘッドフランジ）、機器や人が出入りするハッチの結合部分等、漏れ止めのためにシリコンゴム等を使用しているシール部分が高温に晒され、機能低下した可能性があると考えられ、現段階では漏えい箇所を特定することは困難である。しかしながら、気相部からの漏えいについては、その大きさ等を考慮すれば、主にトップヘッドフランジのシール部から生じた可能性があると考えている。

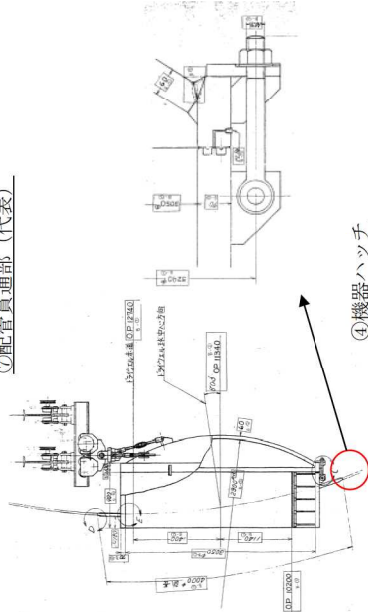
以 上



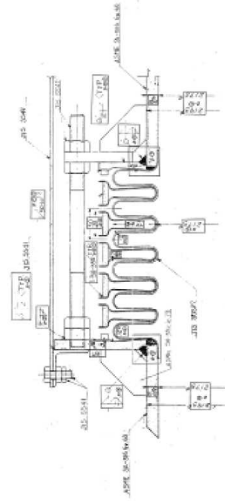
⑥電気配線貫通部 (代表)



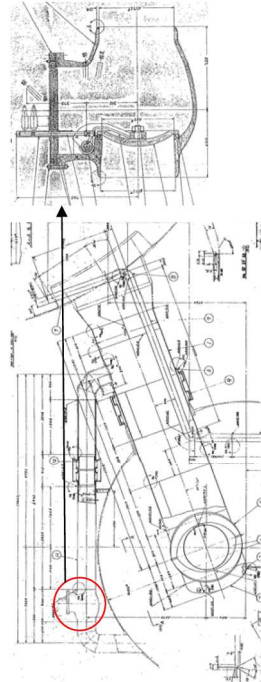
⑦配管貫通部 (代表)



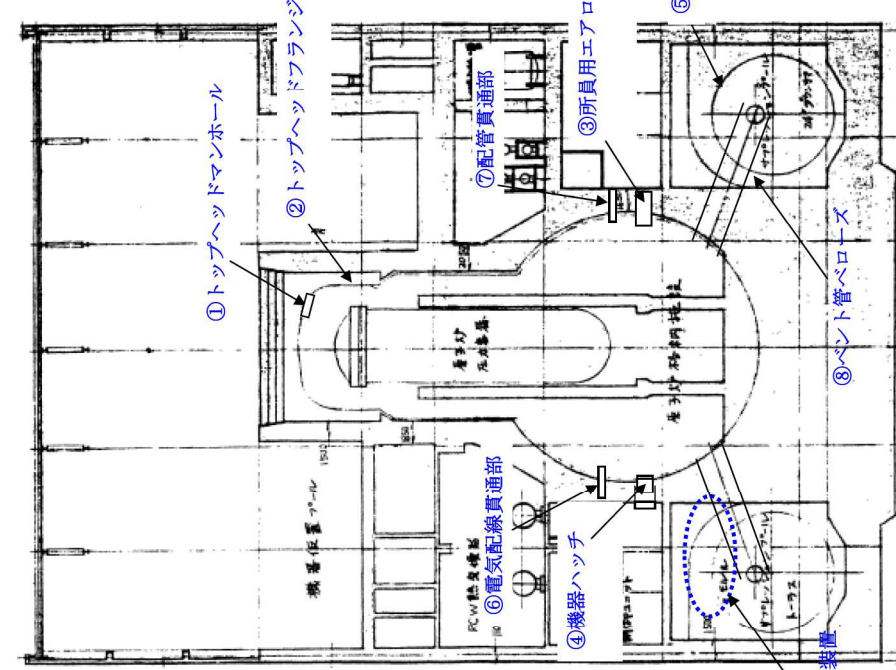
④機器ハッチ



⑨真空破装置 (1号機のみ)



⑨真空破装置 (1号機のみ)



①トップヘッドマンホール

②トップヘッドフランジ

⑦配管貫通部

③所員用エアロック

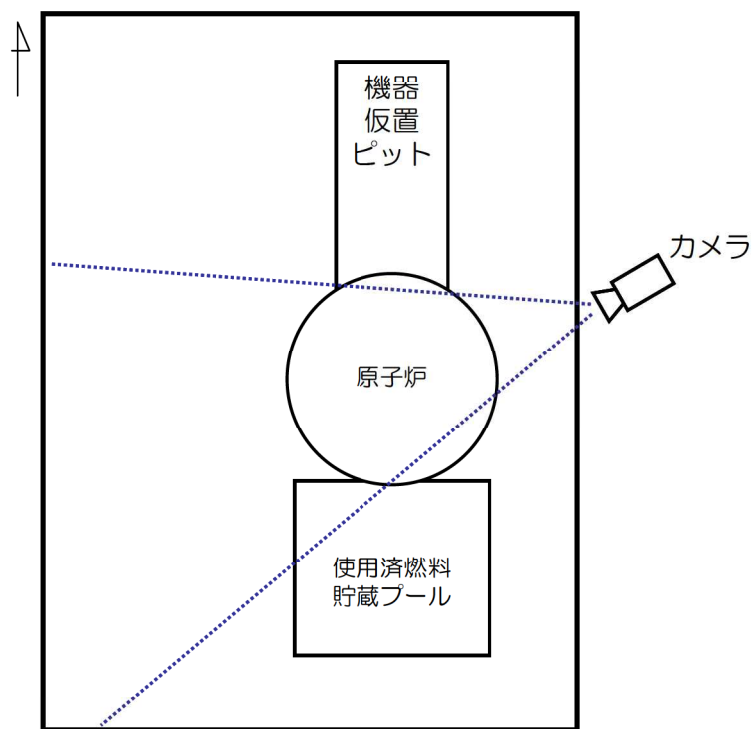
⑤S/Cマンホール

⑧真空破装置

別図1 PCV設計の観点から得られる知見

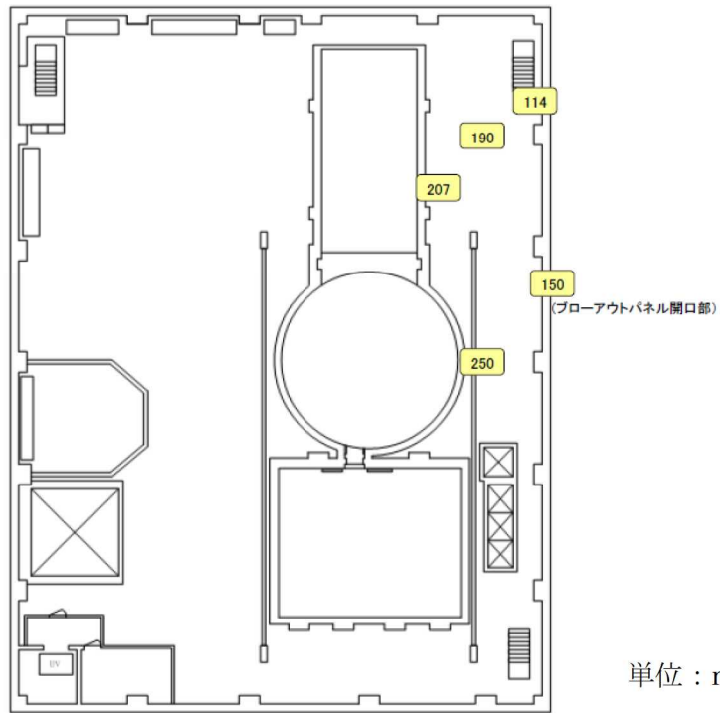


別図2 1号機 R/B1 階床貫通部からの蒸気放出（平成23年6月3日撮影）



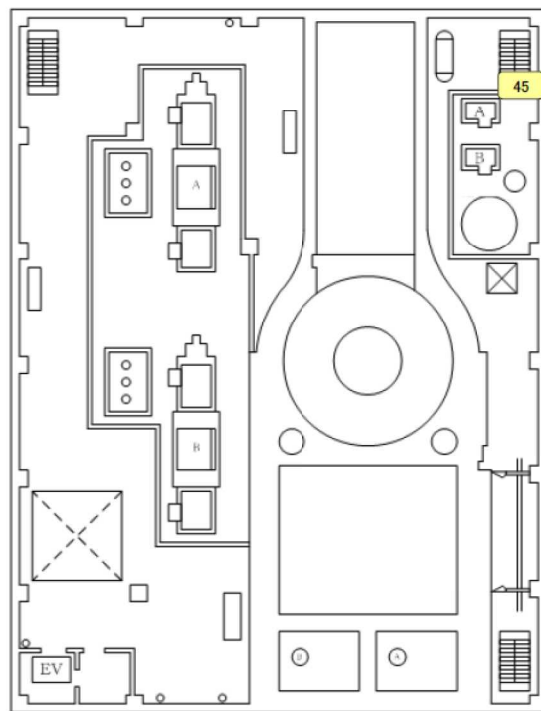
福島第一原子力発電所2号機原子炉建屋5階配置図

別図3 2号機 R/B5階での蒸気発生確認（平成23年9月17日撮影）



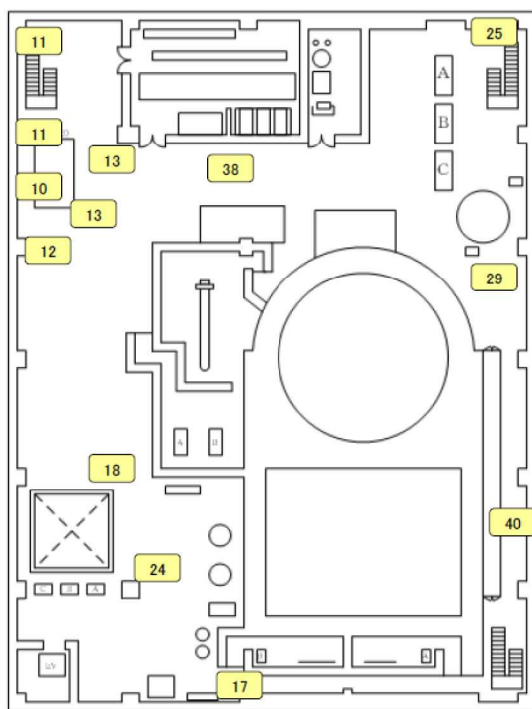
単位：mSv/h

別図 4-1 2号機 R/B 内の空間線量 (5階)



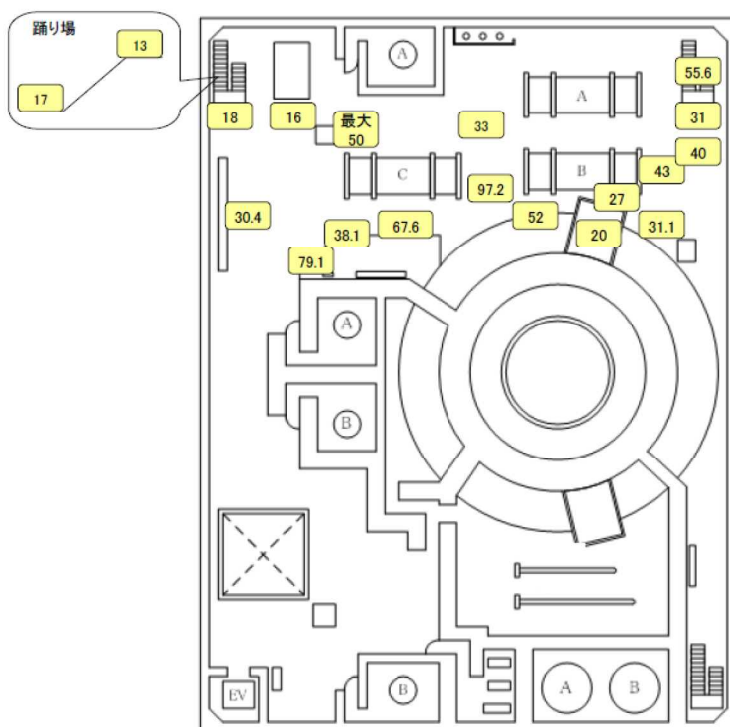
単位：mSv/h

別図 4-2 2号機 R/B 内の空間線量 (4階)



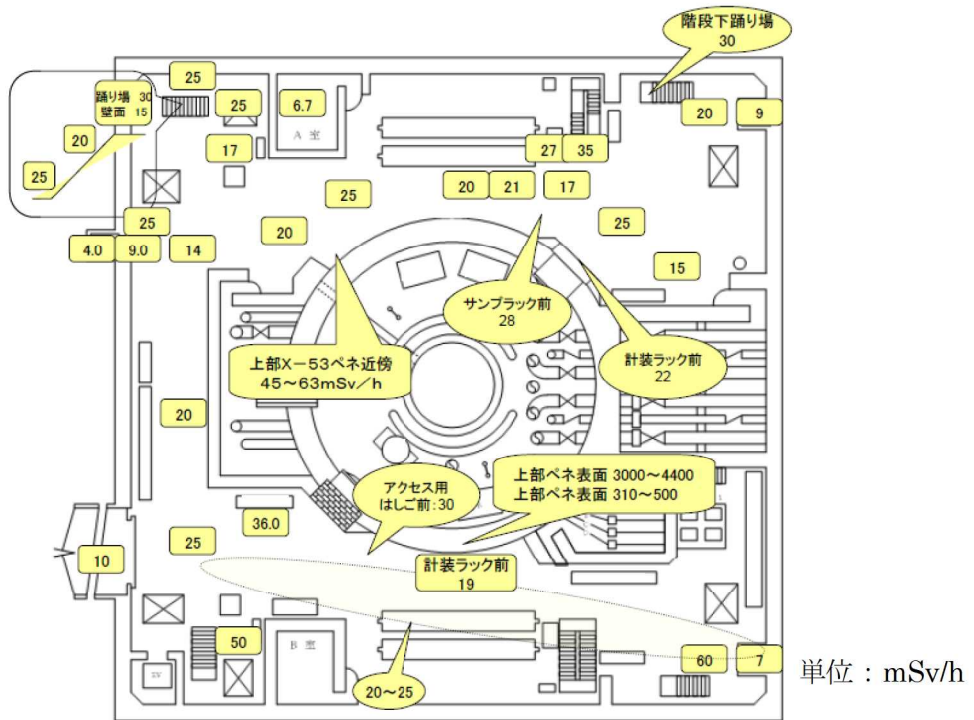
単位：mSv/h

別図 4-3 2号機 R/B 内の空間線量 (3階)

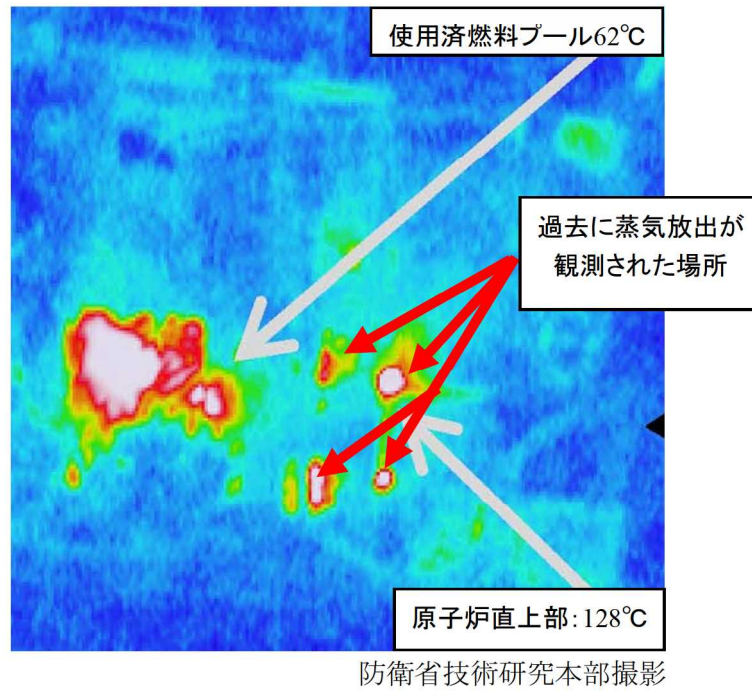


単位：mSv/h

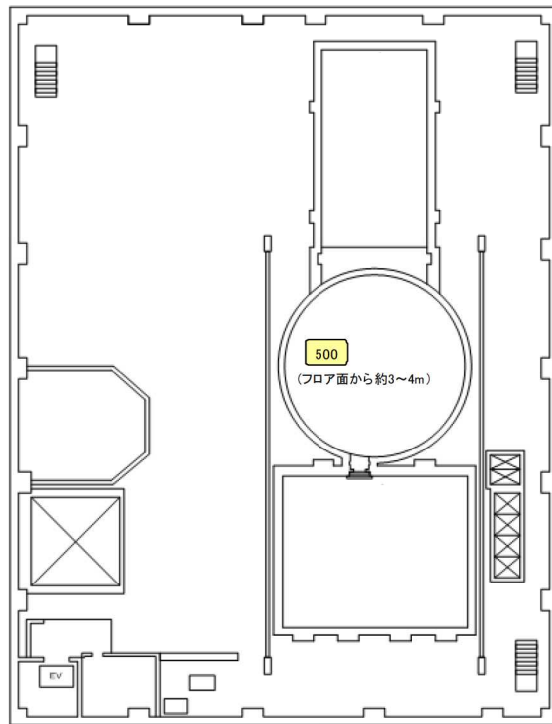
別図 4-4 2号機 R/B 内の空間線量 (2階)



別図 4-5 2号機 R/B 内の空間線量 (1階)

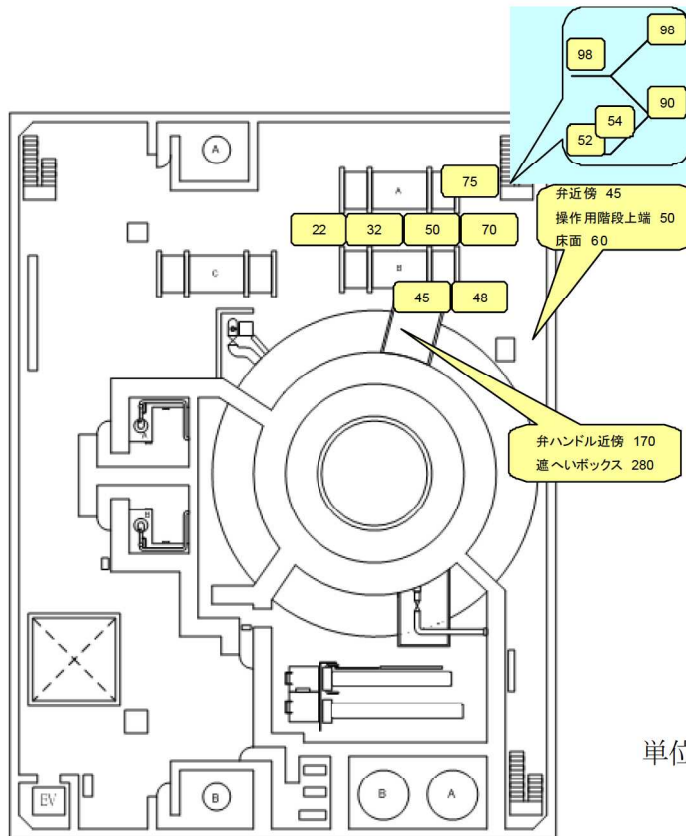


別図5 3号機 R/B 上空からの熱画像写真 (平成 23 年 3 月 20 日撮影)



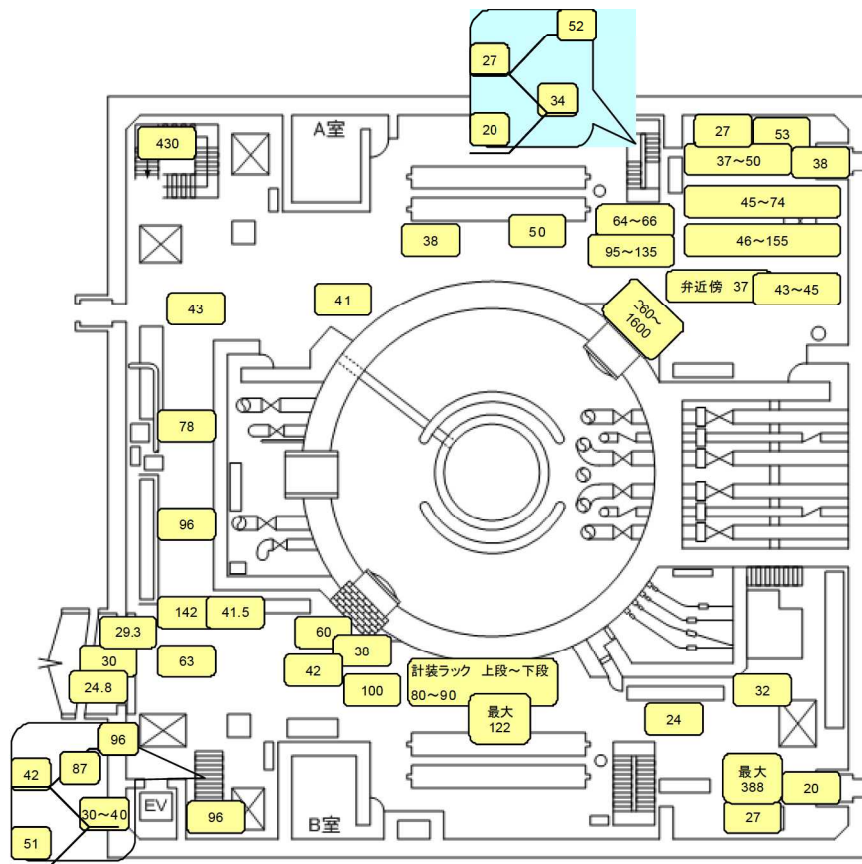
単位：mSv/h

別図 6-1 3号機 R/B 内の空間線量 (5階)



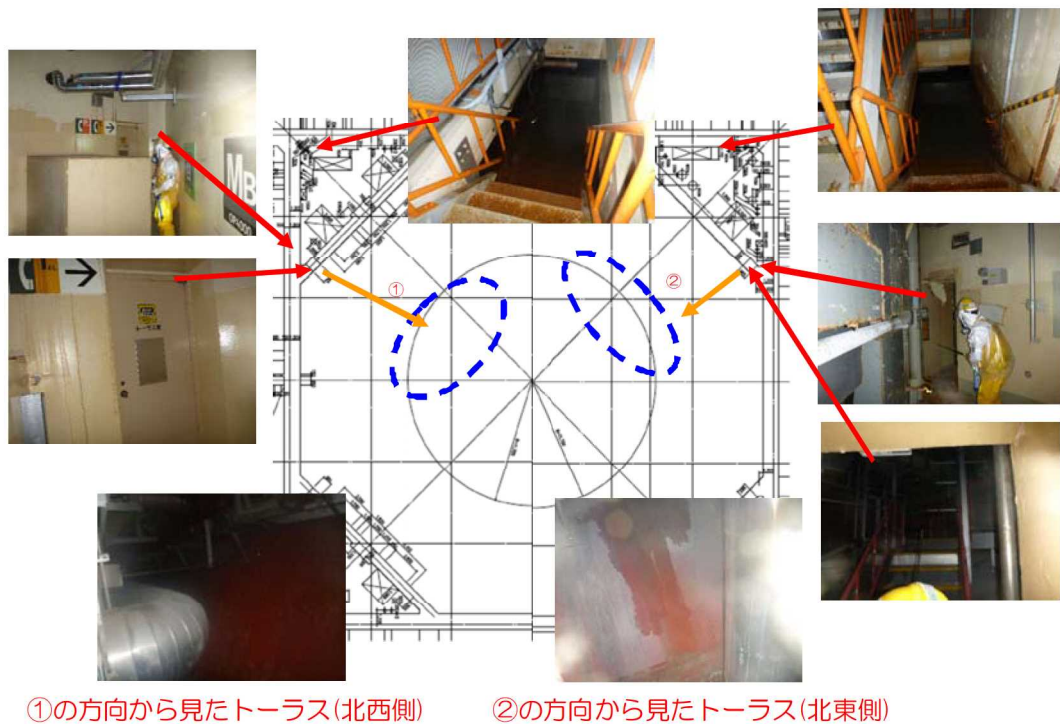
単位：mSv/h

別図 6-2 3号機 R/B 内の空間線量 (2階)

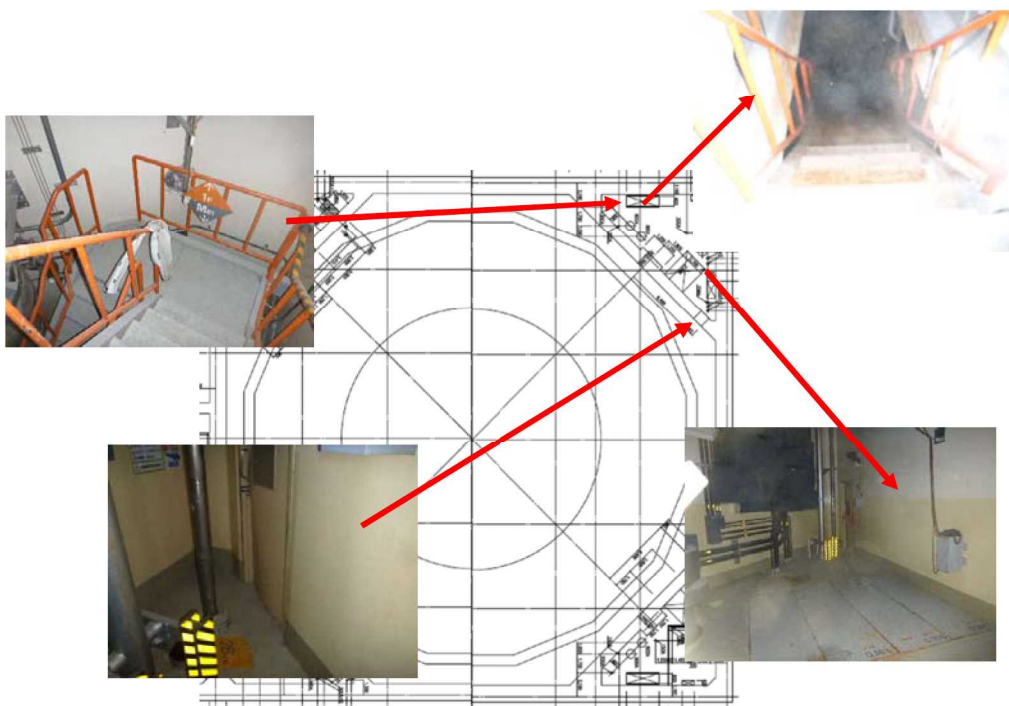


単位：mSv/h

別図 6-3 3号機 R/B内の空間線量 (1階)



別図 7-1 2号機 R/B 中地下階及びトールス室調査結果 (平成 24 年 3 月 14 日撮影)



別図 7-2 3号機 R/B 中地下階及びトールス室調査結果 (平成 24 年 3 月 14 日撮影)

3 号機格納容器からの漏えいと大量の蒸気放出について

1 はじめに

3号機では、3月13日8時41分に圧力抑制室（S/C）ベントのライン構成が完了し、13日9時24分にドライウェル（D/W）圧力の減少が確認されたことから、ベントが実施されたと発電所対策本部が判断している。その後、格納容器圧力が上昇した際に、S/Cベント弁（大弁・小弁）の開操作を実施している。

この間、計測されたD/W圧力は上昇と下降を繰り返しているが、時系列で整理されているベントタイミングと計測されたD/W圧力が低下するタイミングが一致していないものが多い。また、当時の状況はベント弁の開操作を実施したら、その開状態を維持していたが、仮設コンプレッサー使用によるベント弁駆動用空気圧の不足、ベント弁励磁回路の不具合、小型発電機の故障による電磁弁励磁維持の問題などにより意図せずベント弁が閉まってしまうような状況となり、開状態を維持することが非常に困難であったことが、当社福島原子力事故調査報告書 別紙2 福島第一原子力発電所及び福島第二原子力発電所における対応状況について（平成24年6月版）にて報告されている。D/W圧力は、注水による蒸気発生や水素発生、ベント操作等に応じて、増加・減少を繰り返したものの、3月21日に一時的に上昇した後、ほぼ大気圧で変動を示さなくなった。すなわち、最終的には格納容器からの気相漏えいが発生しているという説明がなされてきた。しかしながら、ベント開維持が難しかったとする一方で、どのベント操作が成功し、どのベント操作が失敗であったのかについては明らかにされていない。すなわち、ベント開操作の実施は必ずしもベントによる放出を意味しない場合があるが、公表された記録においては、ベント開操作時には必ずベントによる放出があったと誤解が生じる可能性がある状況であった。

なお、平成23年8月24日に実施した、原子炉建屋上部のダストサンプリングにおいて撮影された映像から、シールドプラグ縁辺部、歪みを生じたDSピットゲート周辺等から蒸気（湯気）の漏出が確認されており、格納容器からの主要な漏えいは、シールドプラグ直下にある格納容器上蓋のシール部の劣化により発生した隙間を漏えい経路としたものであると推定している。

本検討では、3月15日以降に観測された原子炉建屋の状況、ベント弁の開操作に対する格納容器圧力変化から、3号機のベントの成否、格納容器からの漏えい、観測されている建屋上部からの水蒸気放出の関係について検討を実施した（当該の内容は、3号機-8, 10, 11として課題設定している）。

本検討は、エネルギー総合工学研究所、株式会社東芝、日立 GE ニュークリア・エナジーの研究者・技術者との議論をふまえ取りまとめたものである。

2 3月15日以降に観測された原子炉建屋の状況

3月11日の地震発生後の記録は必ずしも十分ではないが、原子炉建屋等の状況を確認するうえでは、①ライブカメラの情報、②福島第一原子力発電所所員がデジタルカメラにて撮影した情報がある。ライブカメラの情報は時刻についてはほぼ正確であると考えられるが、遠方からの撮影であり、解像度はそれほどよくない。一方で、デジタルカメラの撮影は、原子炉建屋の至近から撮影しており解像度が高いものの、時刻情報はカメラ内部の時計を参照しており、この情報には不確かさがある。ただし、デジタルカメラの時刻情報は、電池切れ等により過去にリセットされてしまうような時間のずれを除けば、それほど大きなずれが発生することはないと考えられ、日付が概ねあっているのであれば、日オーダーでのずれが発生しているとは考えにくい。そのため、本検討ではライブカメラの時間はずれが無いものとし、デジタルカメラの画像については、ライブカメラの画像との比較も考慮して、大きなずれは無いことを確認して、評価に使用することとする。

2.1 ライブカメラの画像について

3月11日10時00分の画像

図1に3月11日10時00分の画像を示す。これは地震発生以前の画像であり、健全な状態の福島第一原子力発電所を捉えたものである。一番左の煙突状のものが5,6号排気筒であり、その右側に見える煙突状のものが3,4号排気筒であり、一番右側に見える煙突状のものがタービン建屋換気系排気筒である。この写真からは1,2号排気筒が確認できないが、1,2号排気筒は3,4号排気筒のすぐ後ろにあり、重なってしまっていて見えていない。なお、余震による影響によるものか、ライブカメラの撮影角度が時間帯によって変わっているが、その角度によっては1,2号機排気筒が見える場合がある。

タービン建屋換気系排気筒脇に見えている建物が廃棄物処理建屋である。3,4号排気筒の後ろに見えている建物が、4号機の原子炉建屋であるが、原子炉建屋周辺拡大図からもわかる通り、ライブカメラからは1~4号機はほぼ一直線に並んでおり、1~3号機をライブカメラ映像から比較することは困難である。

3月13日10時00分の画像

図2に3月13日10時00分の画像を示す。3号機は同日9時20分頃にベ

ントが成功したものと判断されているが、この画像はそれから約 40 分が経過した後の画像である。3, 4 号機排気筒部分の拡大図からもわかる通り、ベントにより水蒸気が放出されていることが確認できる。一方で、原子炉建屋部分に特異的な状況は観測されない。

3月13日13時00分および3月13日15時00分の画像

図3に3月13日13時00分および3月13日15時00分の画像を示す。記録上、11時17分にベント弁が閉まってしまったことを確認し、12時30分にベント弁開が確認されている（2回目のベント操作）ことから、13時00分のライブカメラ映像から確認できる水蒸気放出は、このベント操作が成功したことによるものと考えられる。15時00分のライブカメラ映像では明確な水蒸気放出は確認できない。

3月14日7時00分および3月14日10時00分の画像

図4に3月14日7時00分および3月14日10時00分の画像を示す。記録上、6時10分にベント弁（小弁）の操作を完了（4回目のベント操作）しているが、いずれの時間帯にもライブカメラの映像からは明瞭な水蒸気放出は確認できない。ただし、小弁操作のため、蒸気流量が小さく、ライブカメラでの映像からは確認できなかった可能性は残る。

3月15日7時00分の画像

図5に3月15日7時00分の画像を示す。この時点では、3, 4号排気筒からの水蒸気放出は確認できないが、原子炉建屋周辺の拡大図を見ると、どの号機からかは特定できないものの、原子炉建屋上部からと考えられる水蒸気放出が確認できる。

3月15日16時00分の画像

図6に3月15日16時00分の画像を示す。この時点では、3, 4号排気筒からの水蒸気放出は確認できないが、原子炉建屋周辺の拡大図を見ると、どの号機からかは特定できないものの、原子炉建屋上部からと考えられる水蒸気放出が確認できる。

3月15日17時00分の画像

図7に3月15日17時00分の画像を示す。記録上、16時05分にベント弁開操作の小型発電機の取り換えを実施し、ベント弁の開操作を実施（5回目のベント操作）しているが、ライブカメラの映像からは明瞭な水蒸気放出は確

認できない。一方で、16時00分の映像と同様に、原子炉建屋上部からと考えられる水蒸気放出は確認することができる。

3月16日10時00分の画像

図8に3月16日10時00分の画像を示す。この時点でも、3、4号排気筒からの水蒸気放出は確認できないものの、原子炉建屋上部からと考えられる水蒸気放出は確認することができる。これまでの映像では、廃棄物処理建屋の形状が明確に見えていたが、この時間帯では放出された水蒸気により一部が隠れるような状態となっている。そのため、この時間帯の原子炉建屋からの水蒸気放出、すなわち、格納容器からの漏えいは、かなり大規模であったものと考えられる。

2.2 デジタルカメラにより撮影された映像について

撮影日情報 3月15日7時31分の画像

図9に3月15日朝に撮影された画像を示す。この時点で、3号機原子炉建屋の上部からの水蒸気放出は始まっていることが確認できる。また、ライブカメラにて撮影された3月15日7時00分の映像に水蒸気が放出されているところが確認されていることから、この撮影日情報は概ね正しいものと考えられる。

撮影日情報 3月15日8時58分の画像

図10に3月15日朝に2号機の原子炉建屋を撮影した画像を示す。2号機原子炉建屋のブローアウトパネルは、1号機の水素爆発時に開いたことがわかっており、水蒸気はこのブローアウトパネルから放出されている。当社福島原子力事故調査報告書 別紙2 福島第一原子力発電所及び福島第二原子力発電所における対応状況について（平成24年6月版）においても、8時25分に原子炉建屋5階付近壁より白い煙（湯気らしきもの）があがっていることを確認、との記載があり、この撮影日情報についても概ね正しいものと考えられる。

撮影日情報 3月16日9時51分の画像

図11に3月16日朝に撮影された画像を示す。3号機原子炉建屋の上部からの水蒸気放出が継続していること確認できる。また、蒸気放出量は前日より多くなっているように見受けられる。これは、ライブカメラにて撮影された3月16日10時00分の映像とも整合していることから、この撮影日情報は概ね正しいものと考えられる。

2.3 観測された画像からの考察

3号機のベントは、ライブカメラの画像からは3月13日の1回目、2回目のベントでのみ3, 4号排気筒からの水蒸気放出が確認できるため、この2回についてはベントが実施されていると判断できる。3回目のベント開操作は夜間の実施であったことから、ライブカメラによる確認はできない。また、3月14日早朝の4回目のベント開操作では、小弁の開操作であることから、ベント管に流れる蒸気流量が小さかったとの可能性が残るものの、ベントによる放出は確認できない。3月15日夕方の5回目のベント開操作においても、排気筒の映像からはベントによる放出は確認できない。また、3月16日未明の6回目のベント開操作は夜間であったため、ライブカメラによる確認はできていない。

デジタルカメラによる映像から、3号機は3月15日の朝には、原子炉建屋上部からの水蒸気放出が確認されており、この時点では、格納容器から漏えいした気体（水蒸気、放射性物質を含む）が直接環境に放出されるような状態になっていたものと考えられる。ただし、同じ3月15日朝に、2号機原子炉建屋のブローアウトパネルからも水蒸気が放出されていることが確認されており、添付資料2-9, 10の検討から、2号機からの放射性物質の放出もあったものとする。



図1 福島第一原子力発電所ライブカメラの映像（撮影日 3月11日10時）
上：ライブカメラ映像全体 下：原子炉建屋周辺拡大図

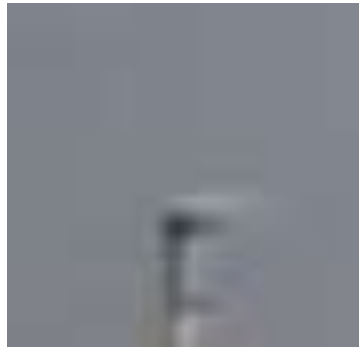


図2 福島第一原子力発電所ライブカメラの映像（撮影日 3月13日10時）
上：ライブカメラ映像全体 中： 3, 4号排気筒拡大図 下：原子炉建屋周辺拡大図

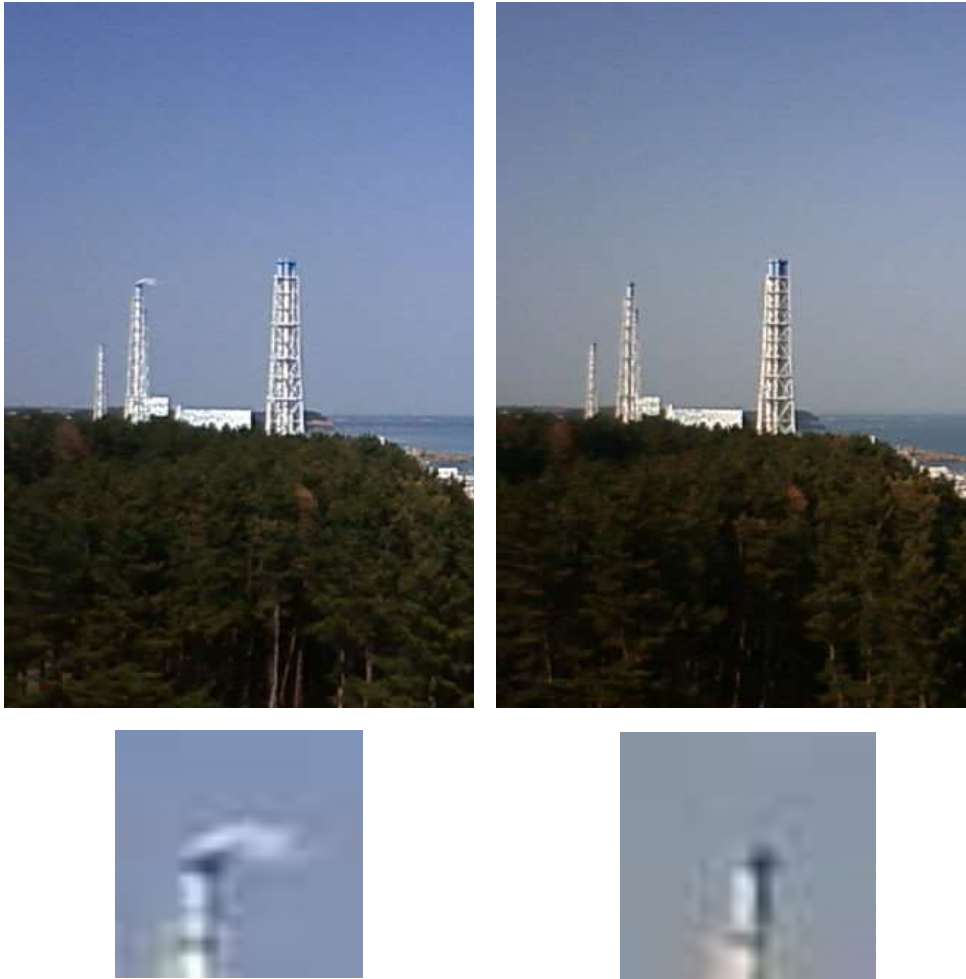


図3 福島第一原子力発電所ライブカメラの映像（抜粋）
（撮影日 左：3月13日13時 右：3月13日15時）
上：ライブカメラ映像（抜粋） 下：3,4号機排気筒拡大図

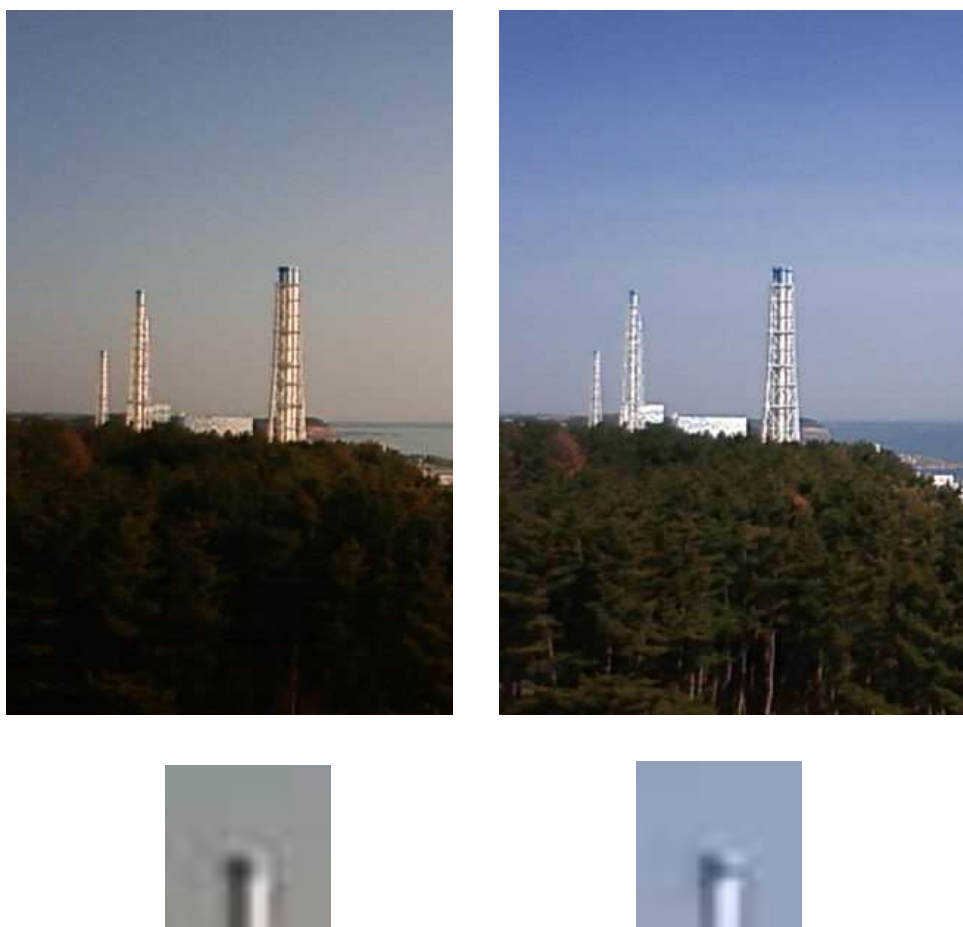


図4 福島第一原子力発電所ライブカメラの映像（抜粋）
（撮影日 左：3月14日7時 右：3月14日10時）
上：ライブカメラ映像（抜粋） 下：3,4号機排気筒拡大図

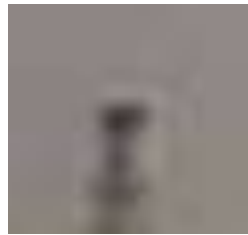


図5 福島第一原子力発電所ライブカメラの映像（撮影日 3月15日7時）
上：ライブカメラ映像全体 中： 3,4号排気筒拡大図 下：原子炉建屋周辺拡大図

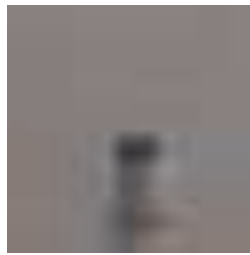


図6 福島第一原子力発電所ライブカメラの映像（撮影日 3月15日16時）
上：ライブカメラ映像全体 中： 3,4号排気筒拡大図 下：原子炉建屋周辺拡大図



図7 福島第一原子力発電所ライブカメラの映像（撮影日 3月15日17時）
上：ライブカメラ映像全体 中： 3,4号排気筒拡大図 下：原子炉建屋周辺拡大図

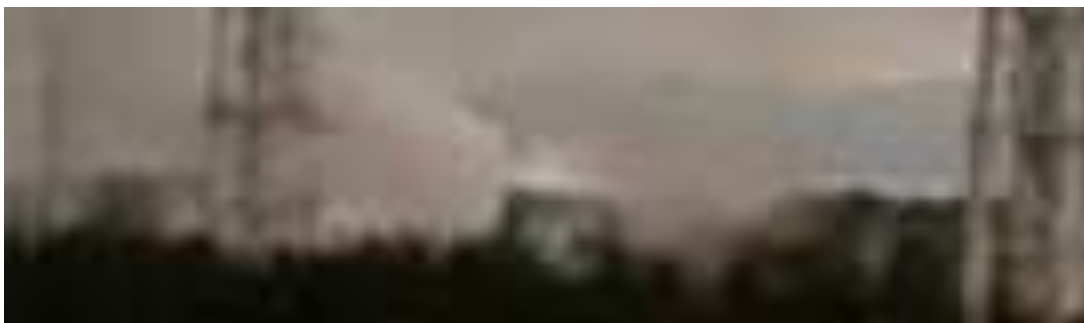
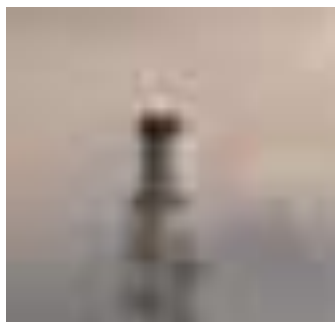


図8 福島第一原子力発電所ライブカメラの映像（撮影日 3月16日10時）
上：ライブカメラ映像全体 中： 3,4号排気筒拡大図 下：原子炉建屋周辺拡大図



図9 3号機からの蒸気放出の様子（撮影日情報 3月15日7時31分）



図 10 2号機からの蒸気放出の様子（撮影日情報 3月15日8時58分）



図 11 3号機からの蒸気放出の様子（撮影日情報 3月16日9時51分）

3 ベント弁の開操作に対する格納容器圧力変化に関する検討

前述の通り、ベント弁の操作は開く操作をした後は開状態を維持することを前提としており、意図的に弁を閉じるような操作は実施していない。一方で、開状態を維持することは困難であったとの報告もあり、ベントを実施しても格納容器圧力が下がらなかったとの報告もあるとおり、ベントの開操作の実施がすべてベントによる放出を意味している訳ではない。また、注意すべきであるのは、排気筒からの水蒸気放出が確認できている場合を除けば、直接的にベントの成否を判断することはできず、格納容器の圧力の上昇下降でベント弁の開閉を判断していたことがあったことである。つまり、格納容器圧力が上昇している場合でも、ベント配管から放出できる気体の量と比べて、格納容器への気体の流入量および格納容器内での気体の発生量が多い可能性もあるし、格納容器圧力が下がっている場合でも、ベントに伴う排気筒経由の放出以外の経路からの漏えいにより格納容器内の気体が流出していることを捉えている可能性があるということである。

したがって、この検討では、確実にベントによる格納容器内気体が放出されている1回目、2回目のベント時の格納容器圧力の挙動をベースケースとして、その他のベント開操作時における挙動を検討することとする。

3.1 3月13日6時から3月14日9時までの格納容器圧力変化に関する検討

この時間帯の格納容器圧力の変化を図12に示す。3号機は、添付資料3-3にて判明したHPCIの注水機能がHPCIの手動停止よりも早い時間に喪失していたことから、3月13日の5時頃には炉心損傷に至り、大量の水素が発生していたと推定されている。そのため、9時前まで継続している格納容器圧力の上昇は、非凝縮性ガスである水素が格納容器に移行してきたことが原因であると考えられる。また、9時頃の原子炉減圧時には、原子炉圧力容器内に存在していた水素が一気に格納容器に放出されることで、格納容器圧力が上昇し、ラプチャディスクの設定圧に到達したことで、ベントが実施されたものである。

この1回目のベントにおける格納容器圧力の変化をみると、9時10分の0.637MPa(D/W)、0.590MPa(S/C)から10時40分の0.270MPa(D/W)、0.220MPa(S/C)と、1時間30分間に約0.4MPa低下しており、比較的速い減圧が起こっている。

また、2回目のベント開操作については、原子炉圧力がチャートの読み値で3MPa程度まで急上昇した時間とほぼ同時期に格納容器圧力の低下からベント開が判断されている。その前に格納容器圧力が急激に上昇していることについて、これだけの原子炉圧力の急上昇があれば、ベント弁が開であっても格納容器圧力は上昇する可能性が高いと考えられるが、この時間帯にベント弁操作のた

めのボンベ交換作業が実施されたとの記録があるため、格納容器圧力が上昇している期間はベント弁が閉まっていた可能性も高い。いずれにしても、格納容器圧力の最大値と最小値がわかれば格納容器の減圧速度は評価可能であり、2回目のベント開操作時には、12時20分の0.750MPa(D/W)、0.700MPa(S/C)から13時35分の0.235MPa(D/W)、0.190MPa(S/C)と1時間15分の間に約0.5MPa低下するという、やはり比較的速い減圧が起こっている。

このことから、ベントによる放出が実施された場合には、格納容器圧力の比較的早い減圧、すなわち、1時間当たり0.25MPa～0.4MPa程度の減圧が予想される。

この時間帯の半ばには、格納容器圧力の上昇が観測されたことに起因して、19時00分からベント弁操作のための仮設コンプレッサーのつなぎこみを実施している。その後、21時10分ごろにD/W圧力が低下したことにより、ベント弁が開となったとの判断がなされている(3回目のベント開操作)。この際の格納容器圧力変化は、20時40分の0.425MPa(D/W)、0.375MPa(S/C)から24時00分の0.240MPa(D/W)、0.255MPa(S/C)と3時間20分の間に約0.2～0.15MPaの低下であり、1回目、2回目のベントによる減圧と比較すると非常に減圧速度が遅い。

さらに注目すべきは、D/W圧力とS/C圧力の関係である。この時点では、発熱源はD/Wにあると考えられるため、D/W圧力>S/C圧力であることは妥当である。そのため、S/Cベントによる放出がある場合、D/WからS/Cに気体が行き、排気筒から放出されることになるが、その移行の際に、S/C内の水を押しよける必要があるため、ある程度の差圧が発生することになる。21時ごろまで、D/WとS/Cの圧力に0.05MPa程度の差があるのは、物理的には妥当な状況である。しかしながら、22時30分に0.285MPa(D/W)、0.290MPa(S/C)と圧力が逆転し、24時00分には0.015MPaだけS/C圧力の方が高いという状態になる。これがベントによる格納容器圧力低下であるとする、圧力が低いところから圧力が高いところに気体が行くことを意味するため、物理的にはあり得ない状況である。

そのため、3回目のベント開操作とされているところでは、圧力低下の要因はむしろD/W側にあると考える方が自然である。この場合の、D/Wからの漏えいとしては、高温条件でのシール部の劣化が考えられる格納容器上蓋部分からの漏えいが最も可能性が高いと考えられる。

この時間帯の後半には、4回目のベント操作が記録に残っている(14日6時10分に開操作完了)。このベント操作はベント弁(小弁)であり、弁が開いたとしても、その流路面積は小さく、排出可能な流量は小さくなる。そのため、この操作によって圧力低下がみられなかったことは、ベント弁が開かなかった可能

性とベント弁が開いたものの流量が小さく結果的に圧力が上昇した可能性の二通りが考えられる。しかしながら、3回目のベント操作が実施された頃にかけてしまっていた漏えい口は、閉まる理由がないためここからの漏えいは継続していたものと考えられる。

3.2 3月14日9時から3月15日12時までの格納容器圧力変化に関する検討

この時間帯の格納容器圧力の変化を図13に示す。この時間帯では、3月14日11時には3号機で水素爆発が発生している。これは、原子炉建屋内に水素が漏えいしていたことが原因であり、3回目のベント操作が実施された頃には格納容器から原子炉建屋への漏えいが始まっていたとする推定は、現実の事故進展とも整合している。

なお、この水素爆発の発生前後も格納容器圧力が大きく低下していることが確認されている。この圧力低下の原因は明確ではないが、この際もD/W圧力とS/C圧力の逆転が発生しており、漏えいが発生しているとしても、D/W側に漏えいの原因があると考えられる。

3.3 3月15日12時から3月16日18時までの格納容器圧力変化に関する検討

この時間帯の格納容器圧力の変化を図14に示す。この時間帯では、記録上、5回目のベント開操作が実施されている。この際の、当社福島原子力事故調査報告書別紙2の記載を以下に転記する。

16:00, S/C ベント弁 (AO 弁) 大弁, 小弁の電磁弁の励磁に用いていた小型発電機の故障により, 同弁が閉になったことを確認。その後, 16:05, 小型発電機を取替え, S/C ベント弁 (AO 弁) 大弁の電磁弁を励磁し, 開操作実施。

開操作は実施されたものの、その成否については明確とはなっていない。実際、この時の格納容器の圧力低下についてS/C圧力は測定されていないが、16時00分に0.415MPa(D/W)から21時05分に0.335MPa(D/W)と5時間で0.1MPa弱とベントによる放出の際に予想される減圧速度と比較して小さい。2.にて示したように、3月15日の朝から3号機原子炉建屋上部からの水蒸気放出が継続的に確認されていることから、このような緩やかな格納容器圧力低下は、格納容器からの直接放出によるものである可能性が高いと考えられる。

3.4 格納容器圧力変化からの考察

3月13日から3月16日にかけての格納容器圧力の変化からは、ベントにより3, 4号排気筒経由で放出されたのは、1回目および2回目のベントのみであ

った可能性が高い。

また、原子炉への注水が安定的に実施されるようになったのは3月下旬であることから、3月16日ごろの燃料デブリは良好な冷却状態にはなかったと推定されるため、ベントによる格納容器内の気体の放出ができなくなって以降は、過熱と格納容器漏えいのバランスで格納容器圧力が上昇したり下降していたりしたと考えられる。

ただし、3回目以降のベント開操作が失敗していたとすると、4号機の水素爆発は、1回目および2回目のベントによって放出された水素が4号機に逆流*したことによって発生したことになる。したがって、この際の水素移動量が4号機の爆発を引き起こすのに十分であったかを検討する必要がある。

*:4号機では、3月14日10時30分頃 使用済燃料プールの状況確認に向かった当社社員が原子炉建屋内の放射線量が高く入域を断念したとの記録があり、また、その後の原子炉建屋の汚染状況から、この放射線は希ガス起因であると考えられる。希ガスはベントにより優先的に排出される非凝縮性ガスであることから、少なくとも、1回目（および2回目）のベントにより4号機への逆流が起こっていることは確実であると考えられる。

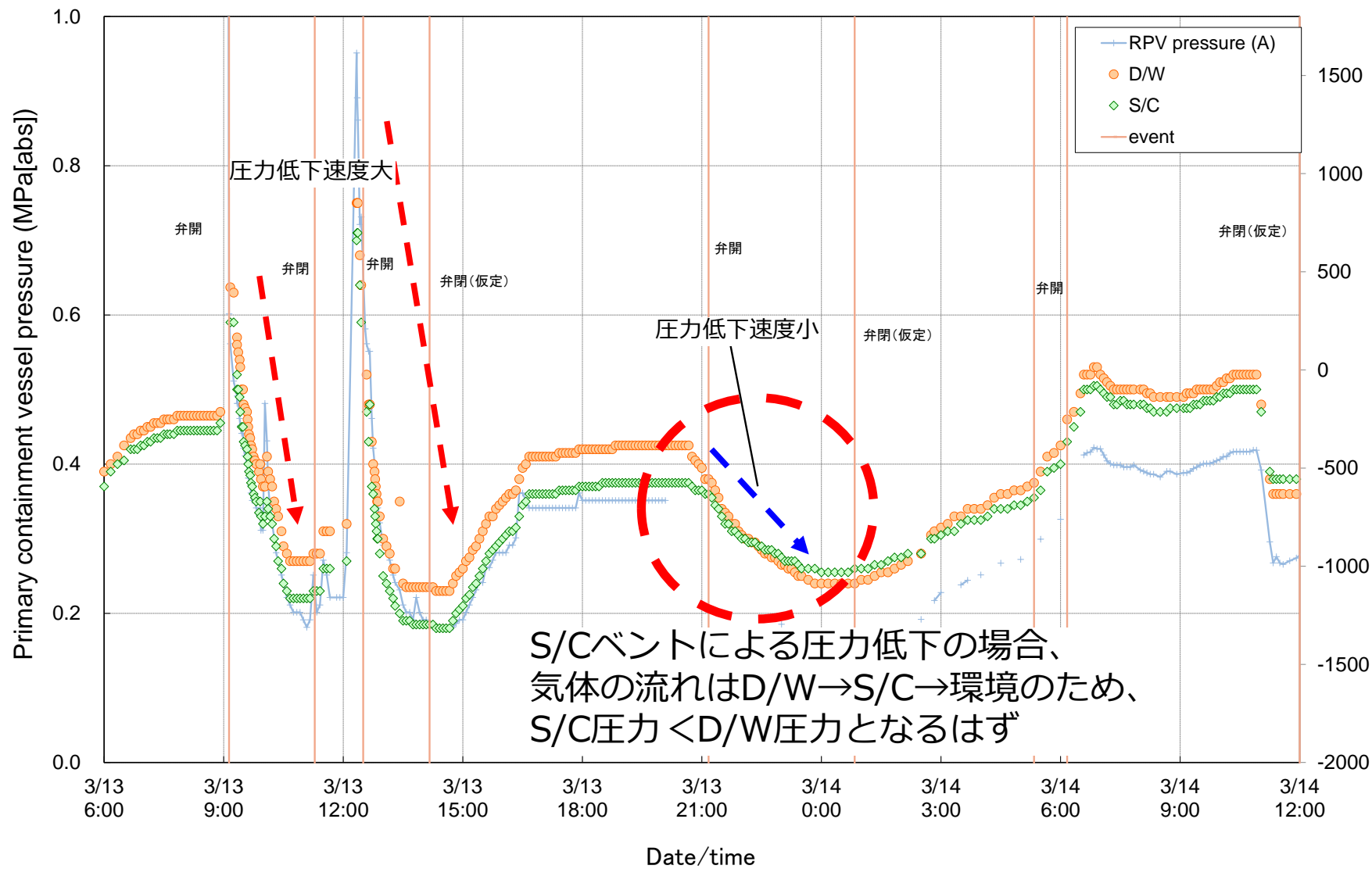


図 12 3号機の格納容器圧力の変化 (3月13日6時から3月14日12時)

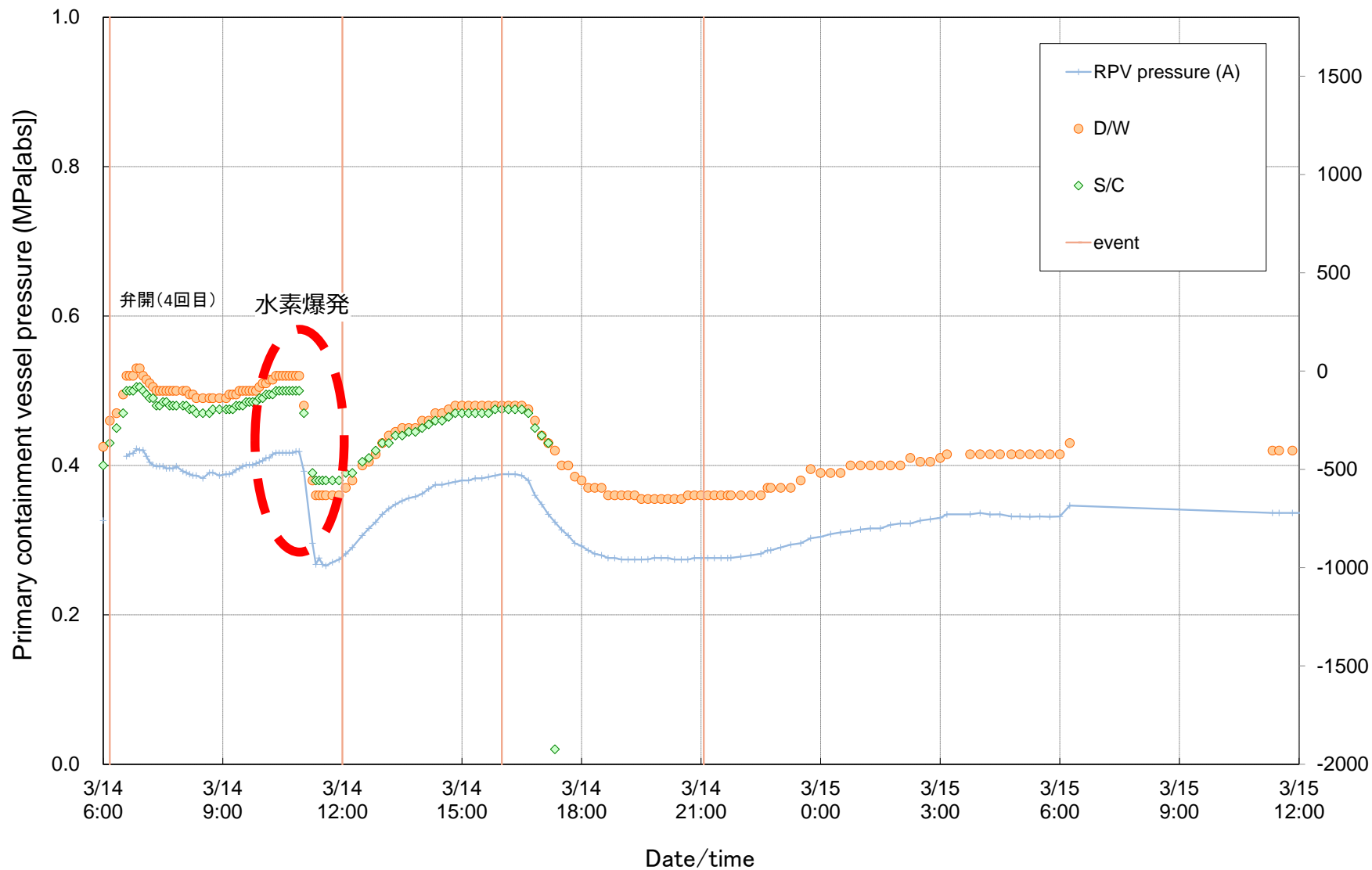


図 13 3号機の格納容器圧力の変化 (3月14日9時から3月15日12時)

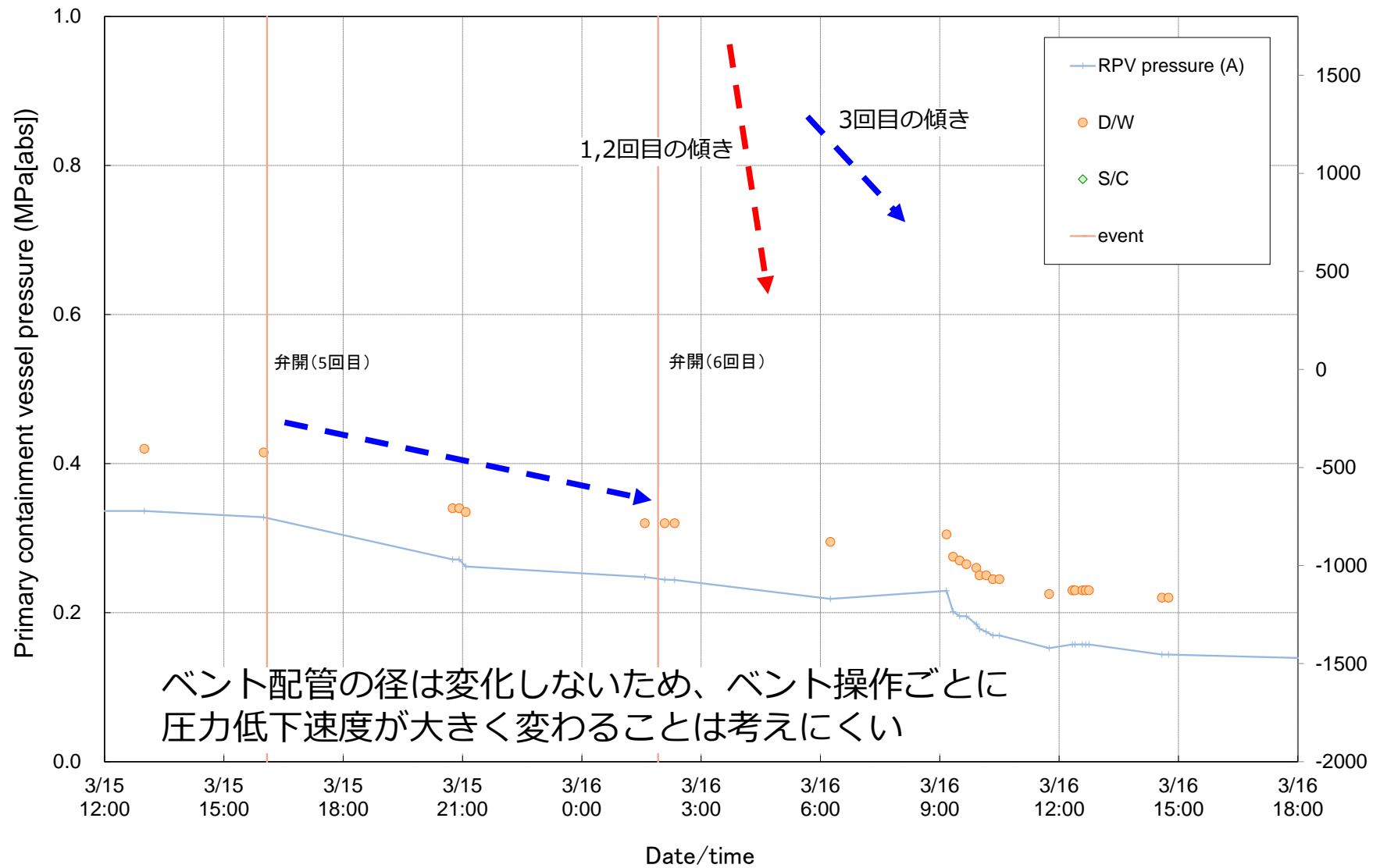


図 14 3号機の格納容器圧力の変化 (3月15日12時から3月16日18時)

4 まとめ

これまでの検討をまとめると、以下の通りとなる。

- ・ 3号機のベント開操作は、3月13日9時ごろの1回目、12時ごろの2回目のみが明確に成功している
- ・ 13日21時ごろの3回目のベント開操作時は、D/W圧力とS/C圧力の逆転が発生しており、ベントによる格納容器圧力の減少とは考えにくい
- ・ 3回目のベント開操作時には、D/Wから原子炉建屋への漏えいが発生していたとすると、3月14日11時に発生した水素爆発と整合する
- ・ 少なくとも3月15日の朝には、3号機の格納容器は漏えいにより環境に直接的に水蒸気・放射性物質を放出する状態になっていた
- ・ 3月15日の朝には、2号機も格納容器からの漏えいにより、ブローアウトパネルを通じて、環境に直接的に水蒸気・放射性物質を放出する状態になっていた（当社の推定では、環境汚染は2号からの放出が支配的）
- ・ 3月15日16時頃の3号機の5回目のベント時は、格納容器圧力の減少速度が緩やかであることから、格納容器からの漏えいによる圧力減少である可能性が高い
- ・ 写真等の情報からは、3月16日の3号機からの水蒸気放出はかなり大規模であった（この際の放出も15日に次ぐ規模と推定）

5 柏崎刈羽原子力発電所の安全対策との関係

添付資料3-6でも同様の結果が示されているが、福島第一原子力発電所1～3号機の各プラントの格納容器からはある程度定常的に放射性物質の漏出が起るような状態になり、ベントによる放出よりも支配的な放射性物質の放出経路となっていたと考えられる。従って、環境汚染を最小限にとどめるためには、格納容器の健全性を維持し、閉じこめ機能を確保することが重要である。

福島第一原子力発電所事故では、格納容器のトップヘッドフランジ、各ハッチのシール材（ガスケット）に使用しているシリコンゴムが高温蒸気に曝されるなど過酷な事故環境において劣化し、閉じこめ機能を喪失した可能性がある。そこで、柏崎刈羽原子力発電所では、当該ガスケット外側のフランジ面の箇所に、より高温蒸気に耐えられるバックアップシール材を追加塗布した。なお、シリコン性のシール材は高温蒸気曝露で劣化が進む傾向があるため、より耐性に優れたシール材（改良EPDM）に変更することも検討している。

また、格納容器エアロック均圧弁のシール材（フッ素樹脂）は重大事故環境下の放射線による影響で、シール機能が劣化することが考えられる。そこで、エアロック外側を貫通する均圧弁接続配管の原子炉建屋側の開放部に、環境耐性に優れたシール材をもつ閉止フランジを取り付け、重大事故環境下における健全

性維持を図っている。均圧弁については、フッ素樹脂よりも耐放射線性に優れ、耐高温性を有するシール材の適用も検討している。