

空間線量率モニタリングデータに基づく 1 号機事故進展の推定

1. はじめに

福島第一原子力発電所事故において、事故進展の過程で燃料から放出された放射性物質は、格納容器ベントや格納容器からの直接漏えい、原子炉建屋の爆発等により環境中へ放出された。この事故に伴う発電所外への放射性物質の放出、土壌への沈着等に関する評価については、モニタリングカーで測定した空間線量率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、主な事象毎の大気への放出量の評価や、福島第一原子力発電所から見て北西方向に高汚染地域が生じた要因の検討等を行い、「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）」[1]に取りまとめ公表している。この評価では、各時刻の放射性物質の放出源を、爆発・ベント等により号機が特定できる場合は当該号機に設定する一方、3 月 13 日以降の複数号機で炉心損傷が生じ放射性物質を放出したと考えられる期間は、評価当時の事故進展に関する知見に基づいて主たる放出号機を推定し設定している。この評価において、Cs137 の放出量の推定結果は他機関の放出量評価結果とほぼ同等な値となり、Cs137 の沈着量の推定結果は文部科学省が実施した Cs137 の土壌汚染密度測定値の結果から評価した沈着量とほぼ同等の値となったことから、放射性物質の放出量について、特に発電所敷地外の汚染に至る放出について一定の理解に至ったと考えている。しかしながら、放射性物質の放出自体とその原因となる各号機の事故進展との関係が全て特定できたわけではない（共通-7）。

事故時に観測された発電所敷地内外の空間線量率の推移は、放射性物質を放出した結果であり、その原因となる事故進展と因果関係がある。従って、空間線量率の変動傾向から放射性物質の放出挙動を推定することにより、それに至る事故進展についての情報を得ることが期待できる。そこで、事故進展挙動について把握することを目的に、空間線量率データの分析を行うこととした。

なお、本検討では 3 月 12 日 0:00 頃から 8:00 頃の期間に着目し、1 号機における放射性物質の放出に至る事故進展挙動を把握することを目的に、空間線量率の変動状況の分析を行った。

2. 発電所敷地内外の空間線量率モニタリングデータ

2.1. 発電所敷地内外の空間線量率モニタリングデータ

図 1、2 に 3 月 12 日 0:00 から 8:00 までの発電所敷地内の空間線量率モニタリングデータ及び発電所敷地外の空間線量率モニタリングデータ[2]を示す。

発電所敷地内の空間線量率は、通常放射性物質の放出を監視するモニタリングポスト（以下、MP）が電源喪失に伴い監視できなくなった¹⁾ため、モニタリングカーにより測定を行っていた。当該の時間帯においては、図 1 中に示すとおり、空間線量率は 1 号機から約 1km 離れた正門付近と MP8 付近で測定を行っていた。図 1 のグラフより、発電所敷地内の空間線量率は、3 月 12 日 4:00 頃までは低い値で安定していたが、4:00 頃から顕著な変動が始まることを確認できる。

発電所敷地外の空間線量率は、福島県のモニタリングポストにて地震発生以降も計測が行われていた。図 2 のグラフより、発電所敷地外の空間線量率は、3 月 12 日 4:30 頃までは低い値で安定していたが、4:30 頃から顕著な変動が始まることを確認できる。

このような、発電所敷地内外の空間線量率の顕著な変動が始まる頃、2 号機、3 号機では原子炉隔離時冷却系が運転を継続しており、原子炉水位は有効燃料頂部よりも高い位置で維持されていたことから、燃料損傷及びそれに伴う放射性物質の放出に至るような状況ではなかった。一方、1 号機は原子炉の冷却・除熱手段を喪失した状況が継続しており、既に過酷な状況に至っていた。（なお、各号機における当該時間帯の状態の推定については、本報告書本文を参照。）従って、本検討で対象とした 3 月 12 日 0:00 頃から 8:00 頃の期間の空間線量率の挙動は、1 号機からの放射性物質の移行・放出挙動を捉えたものであると考えられる。

¹⁾一部 MP については、中央制御室にて一部の期間データ採取可能であったことから、運転員が状況把握のためデータ採取を行っている。（当社ホームページ「東北地方太平洋沖地震発生当時の福島第一原子力発電所プラントデータ集 運転員採取データ」、平成 26 年 12 月 16 日公表）

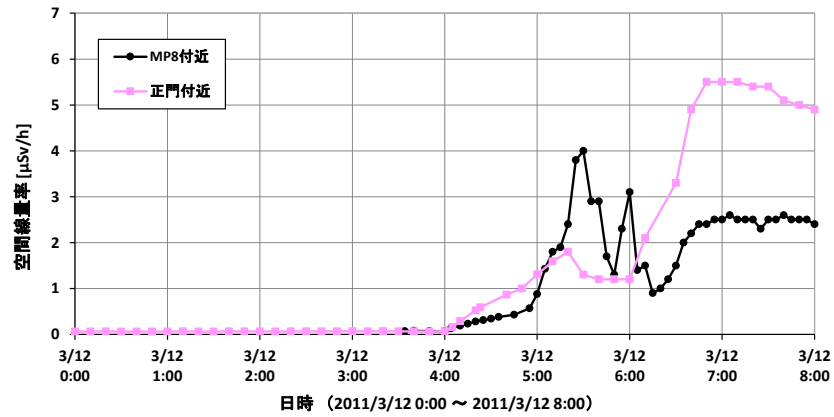


図 1 発電所敷地内の空間線量率モニタリングデータ[1]

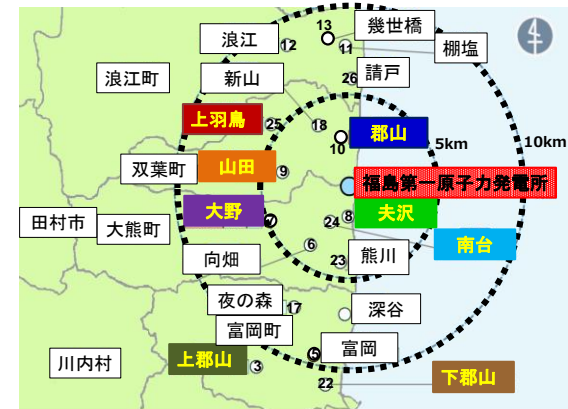
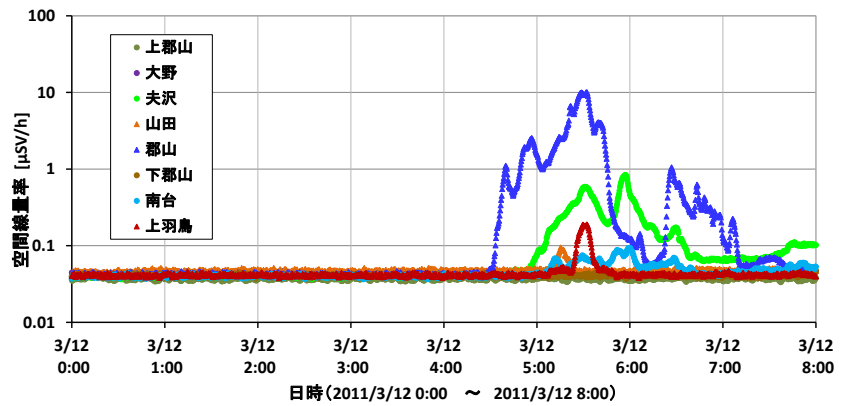


図 2 発電所敷地外の空間線量率モニタリングデータ[2]

2.2. 格納容器からの放射性物質の移行・放出

被覆管破損、燃料損傷により燃料から放出された放射性物質は、逃がし安全弁等を経由して圧力抑制室（以下、S/C）へ移行するか、原子炉圧力容器からの漏えいによりドライウェル（以下、D/W）へ移行することによって格納容器へ移行する。格納容器へ移行した放射性物質は、①格納容器ベント、②原子炉建屋内への漏えいを経て環境中へ放出される。

①格納容器ベント

格納容器破損防止のため、格納容器の除熱（減圧）を目的に実施する格納容器ベントでは、S/C もしくは D/W から排気筒を通じて格納容器中のガスを環境中へ放出する。この際、ガスに含まれる放射性物質を環境中に放出してしまうが、通常はプール水によってガス中の放射性物質を捕捉し、放出量の抑制を期待できる S/C からのベントを優先する。福島第一原子力発電所の事故においても、この S/C からのベントを実施している。格納容器ベントの場合、排気筒を放出点として放射性物質を環境中へ放出することとなる。

②原子炉建屋内への漏えい

一方、原子炉建屋内への漏えいを経る場合は、状況により移行・放出の過程が異なる。まず、格納容器から原子炉建屋内への漏えいについては、事故進展の状況によって放射性物質の漏えい量が変化する。格納容器は気密性はあるものの完全密閉にはできないことから、設計漏えい率以下の極微量のガスが原子炉建屋内へ漏えいしうる。格納容器圧力が上昇するに従って、少しずつガスの漏えい量が増加すると考えられる。さらに事故進展が進み、格納容器が過圧・過温状態に至ると、格納容器の比較的弱い部分（トップヘッドフランジシール等）の劣化により格納容器バウンダリが損傷し、本格的に原子炉建屋内へガスの漏えいが開始することとなる。

次に、原子炉建屋から環境中への放出は、排気筒から放出する場合と原子炉建屋から放出する場合がある。格納容器から原子炉建屋内へ放射性物質が移行した際、通常は非常用ガス処理系（以下、SGTS）の運転により、原子炉建屋は負圧に維持され、原子炉建屋内の空気は SGTS フィルタを通じて排気筒から建屋外に排気することになる。そのため、原子炉建屋内の放射能濃度を低減させると共に放射性物質の建屋外放出を抑制することができる。この場合、フィルタで捉えられなかった放射性物質の放出点は排気筒となる。しかし、福島第一原子力発電所事故において 1～3

号機では非常用交流電源喪失によって SGTS が運転できず、原子炉建屋を負圧に維持できなくなったため、密閉ではない原子炉建屋から放射性物質が放出することとなった。従って、このように SGTS 不動作の場合、放射性物質の放出点は原子炉建屋となる。

以上のように放射性物質は環境中へ放出されるが、本検討で対象とした3月12日0:00頃から8:00頃の期間は、1号機の格納容器ベント前であり、SGTS が不動作であったことから、放射性物質は格納容器から原子炉建屋内へ移行し、原子炉建屋から環境中へ放出する経路をたどったものと考えられ、放出点は原子炉建屋のみであったと推定できる。従って、原子炉建屋における放射性物質の移行・放出挙動に注目することが重要となる。

2.3. 空間線量率の変動挙動の特徴

空間線量率は、2.2.に示したように移行・放出した、放射性物質の壊変によって生じる放射線により変動する。本検討で対象とする時間帯に空間線量率を変動させる主な要因としては、(A) 原子炉建屋内に保持される放射性物質からの直接線・スカイシャイン線、(B) 原子炉建屋外に放出された放射性雲からのクラウドシャイン線の2つのパターンに分類できる。

(A) 原子炉建屋内に保持される放射性物質からの 直接線・スカイシャイン線

原子炉建屋内に移行した放射性物質による放射線は、原子炉建屋の外壁及び屋根を透過する。外壁及び屋根を透過する際、放射線の強度は弱められるが、原子炉建屋に保持される放射能の大きさと、外壁及び屋根の厚さ次第で、環境中の空間線量率を上昇させるだけの放射線が透過することとなる。なお、原子炉建屋5階部の外壁は下層階に比べて薄く、さらに1号機は他号機と比較して薄い構造²⁾となっていたことから比較的放射線の透過性が高い。外壁及び屋根を透過した放射線には、直接物体に到達する直接線と空気により散乱されたのち物体に到達するスカイシャイン線がある。図3に直接線・スカイシャイン線のイメージと直接線・スカイシャイン線による空間線量率の変動例を示す。直接線・スカイシャイン線による各測定位置の空間線量率は、風向に依存しない特徴がある。放射線源から各測定位置までの距離が遠いほど変動量は小さくなり、また遮蔽状況により空間線量率の変動量は異なるが、変動が観測される場合には測定位置によらず同じタイミングで変動する。従って、放射性物質が原子

²⁾壁材・屋根材の面積当たりの重量として、それぞれ、 0.13t/m^2 、 0.38t/m^2 を用いた。

炉建屋へ移行すると、建屋内に保持される放射性物質の量等に従って、グラフに示すように各測定位置の空間線量率が上昇する。その後の空間線量率の推移は、放射性物質の格納容器から建屋内への移行、建屋内で保持される放射性物質の減衰、建屋から環境中への放出、建屋内で保持される放射性物質の種類等によって決まる。

(B) 原子炉建屋外に放出された放射性雲からのクラウドシャイン線

原子炉建屋外に放出される放射性物質は、放射性雲を形成して拡散する。放射性雲中の放射性物質の壊変によって物体に照射される放射線をクラウドシャイン線と呼ぶ。図 4 にクラウドシャイン線のイメージとクラウドシャイン線による空間線量率の変動例を示す。放出された放射性雲は、大気中の風速や大気安定度によって広がり方は異なるが、基本的に風に乗って遙か遠方まで拡散していく。従って、各測定位置での空間線量率の変動は放出源からの方角によって大きく異なる。図 4 に示すように、測定位置が風下に位置する場合、測定位置に放射性雲が近づくにつれて空間線量率は上昇し、放射性雲が遠ざかるにつれて空間線量率は下降する。従って、クラウドシャイン線によって空間線量率が変動する場合、ピークを持つ変動を示す。ピークの高さや幅については、放射性物質の放出量、風向、風速、放射性物質の種類等によって決まる。放射性雲が遙か遠方まで拡散することから、直接線・スカイシャイン線と異なりクラウドシャイン線は発電所敷地外でも十分に観測される。(なお、放射性雲中の放射性物質が沈降し、土壤に沈着した放射性物質から物体に照射される放射線をグランドシャイン線と呼び、放射性雲が通過し空間線量率のピークを過ぎた後に、グランドシャイン線の影響を受け、沈着した放射性物質の減衰カーブに従って空間線量率が徐々に低下する挙動もある。本検討の対象期間ではこの傾向が見られていないことから、想定するパターンは(A)(B)の2つとしている。)

これら2つのパターンの空間線量率の変動挙動の特徴を踏まえ、発電所敷地内外の空間線量率モニタリングデータから、放射性物質の移行・放出につながった1号機の事故進展シナリオの推定を行った。

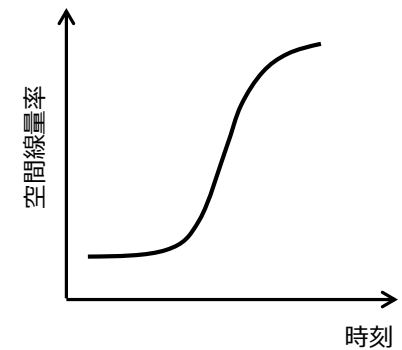
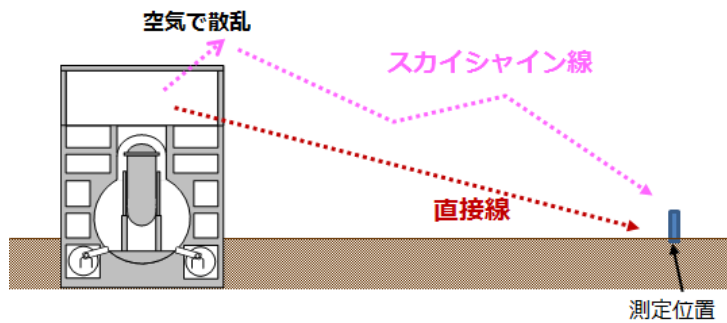


図3 (A)直接線・スカイシャイン線のイメージと直接線・スカイシャイン線による空間線量率の変動例

添付 1-11-7

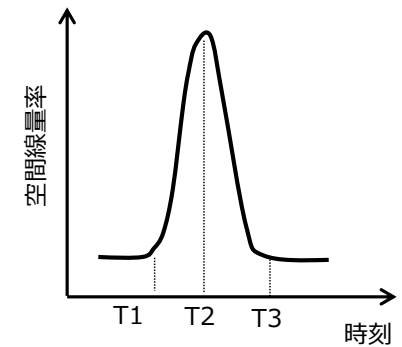
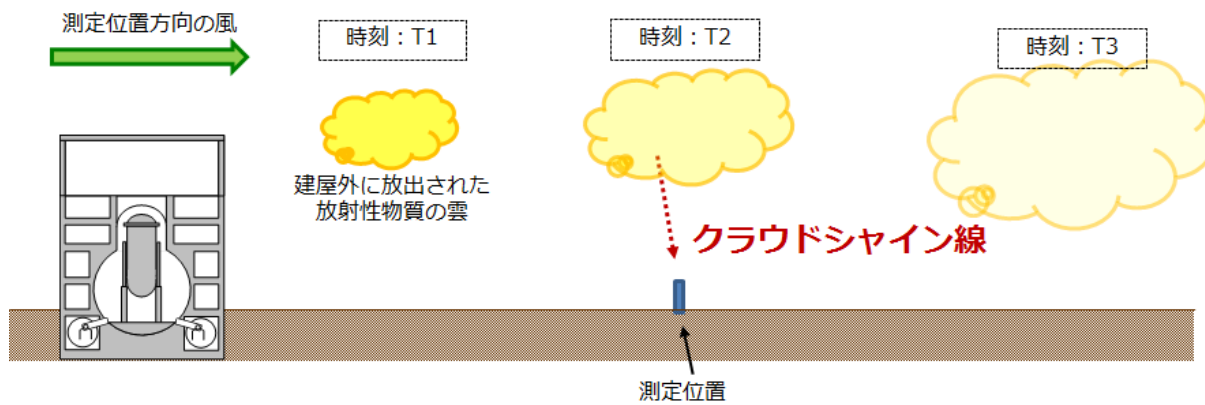


図4 (B)クラウドシャイン線のイメージとクラウドシャイン線による空間線量率の変動例

3. 1号機事故進展シナリオの推定

3.1. 空間線量率の変動挙動に基づく放射性物質の移行・放出挙動の推定

本検討の対象期間を図5で示す期間に分け、発電所敷地内外の空間線量率の変動挙動をもとに放射性物質の移行・放出挙動を推定した。その推定結果を以下に示す。

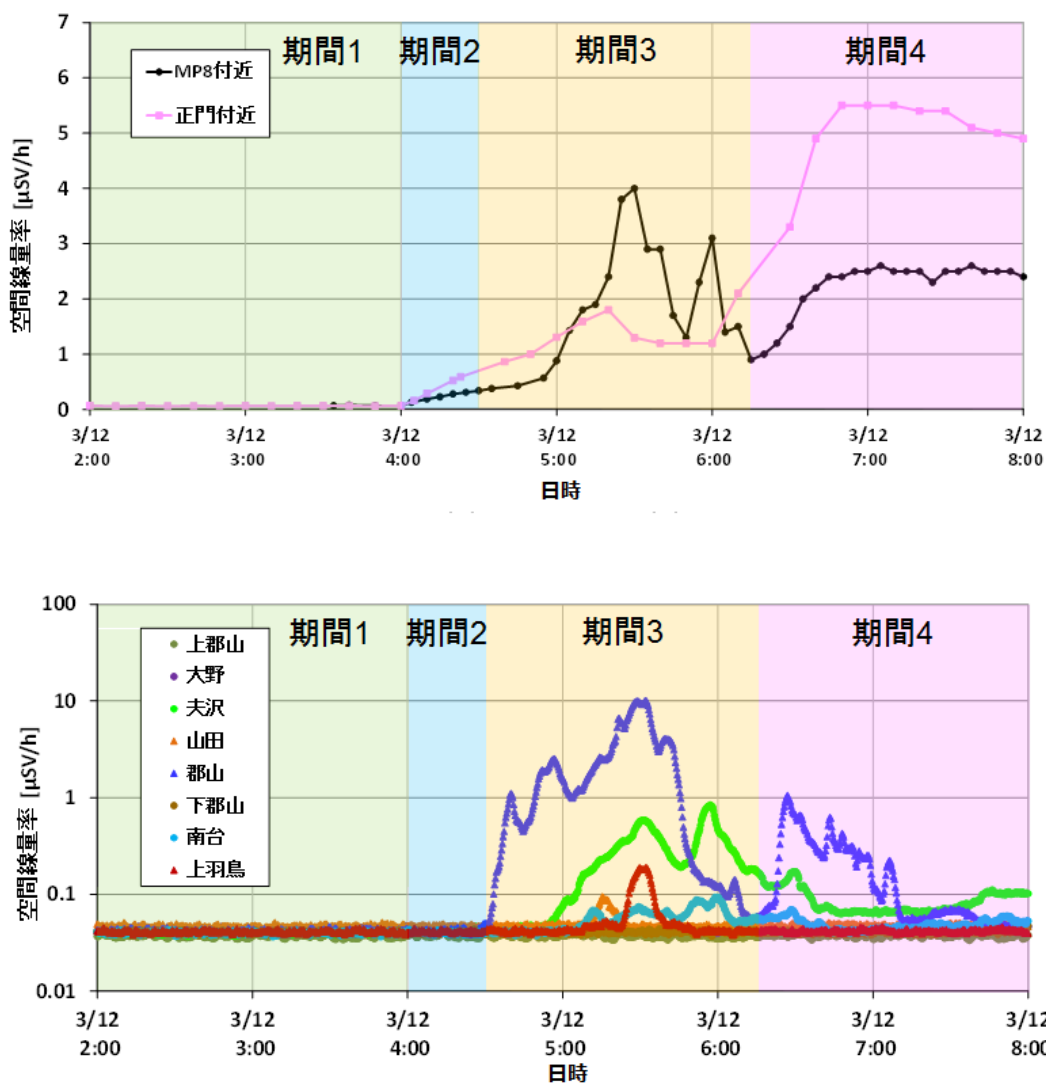


図5 空間線量率モニタリングデータと検討対象期間の区分
(上：発電所敷地内、下：発電所敷地外)

- ・ 期間 1 (4:00 頃まで) : 発電所敷地内外の空間線量率に大きな変化は確認されない。従って、原子炉建屋外で観測できるほど格納容器から原子炉建屋及び環境中への放射性物質の移行は顕著ではなかったと推定する。

- ・ 期間 2 (4:00 頃～4:30 頃まで) : 発電所敷地内の正門付近及び MP8 付近ではこの期間に空間線量率が同時に上昇したことが確認でき、ピークは現れていない。つまり、パターン A (直接線・スカイシャイン線の影響) の特徴が顕著に現れていると考えられる。従って、正門付近及び MP8 付近で観測できるほど格納容器から原子炉建屋への放射性物質の移行があったものと推定する。

- ・ 期間 3 (4:30 頃～6:00 過ぎまで) : 発電所敷地内外でパターン B (クラウドシャイン線の影響) の特徴である空間線量率のピークが現れている。郡山の MP にて 4:30 過ぎに最も早くピークが発生しているが、発電所から東側にあたる海方向の空間線量率が不明であることなどから、必ずしもこのときを起点に原子炉建屋の放出が始まったとは判断できない。なお、パターン B (クラウドシャイン線の影響) が顕著ではあるが、パターン A (直接線・スカイシャイン線の影響) も継続していると考えられる。従って、遅くとも 4:30 頃には原子炉建屋から環境中へ放射性物質が放出されたものと推定する。

- ・ 期間 4 (6:00 過ぎ～8:00 頃まで) : 発電所敷地内の正門付近及び MP8 付近で空間線量率がほぼ同時に上昇し、その後ほぼ水平で推移している。この傾向から、パターン A (直接線・スカイシャイン線による影響) の特徴が現れていると考えられる。これらの空間線量率は、それ以前の値と比較してより大きくなっていることが確認できる。従って、格納容器から原子炉建屋へ放射性物質の更なる移行があったものと推定する。なお、発電所敷地外における空間線量率にはパターン B (クラウドシャイン線の影響) の特徴であるピークが確認できる。従って、原子炉建屋から環境中への放射性物質の放出も継続していたものと推定する。

3.2. 推定した放射性物質の移行・放出挙動についての1号機格納容器圧力挙動の観点からの考察

ここでは、3.1.で推定した空間線量率の変動挙動に基づく放射性物質の移行・放出挙動を、1号機の格納容器圧力挙動の観点から考察する。

図6に発電所敷地内の空間線量率と1号機の格納容器圧力挙動を示す。D/W 圧力は2:45時点で0.84MPa[abs]であったが、4:19時点で0.78MPa[abs]、4:35時点で0.77MPa[abs]と低下傾向を示しており（図中①）、その後6:00時点の0.74MPa[abs]から6:30時点の0.79MPa[abs]へ上昇傾向を示している（図中②）。この格納容器圧力が変化している①、②の時間帯では、いずれも発電所敷地内の空間線量率は上昇している。3.1.の期間2、期間4に述べたとおり、これらの空間線量率の上昇傾向はパターンA（直接線・スカイシャイン線の影響）の特徴が顕著に現れていることから、①の時間帯で格納容器から原子炉建屋への放射性物質の移行があり、②の時間帯で更なる移行があったものと考えられる。格納容器圧力が低下傾向を示している①の時間帯においては、4:00頃に消防車にて原子炉注水を実施しているものの、高い原子炉圧力のため注水できていたとしても少量であったと考えられる（添付資料1-5参照）ことから、格納容器の冷却・除熱はほとんどできていない状況であったと推定される。従って、格納容器圧力の低下は、格納容器バウンダリが損傷し、格納容器ガスが漏えいしたために生じたものと考えられる。この状況は、4:00頃から空間線量率上昇に寄与する放射性物質の移行があったとの推定と整合している。一方、②の時間帯において、更なる放射性物質の移行があったと推定しているが、単純に格納容器の漏えい面積の増大によるガスの漏えい量の増加を想定すると、①の時間帯と同じく格納容器圧力は低下するはずである（なお、5:46から消防車注水を再開しているが、4:00頃の注水と同様、格納容器の圧力変化にはほとんど寄与していないと推定する）。しかし、②の時間帯では格納容器圧力は上昇している。つまり、①の時間帯で既に格納容器からガスの漏えいが始まり、格納容器圧力が低下傾向にある中で、それを上回るだけの圧力上昇を生じさせる何らかのイベントが格納容器内で発生したものと推定できる。これに伴い、格納容器からのガスの漏えい量が増加し、放射性物質の原子炉建屋への移行量が増加したものと考えられ、空間線量率の上昇はこの変化を捉えたものと考えられる。

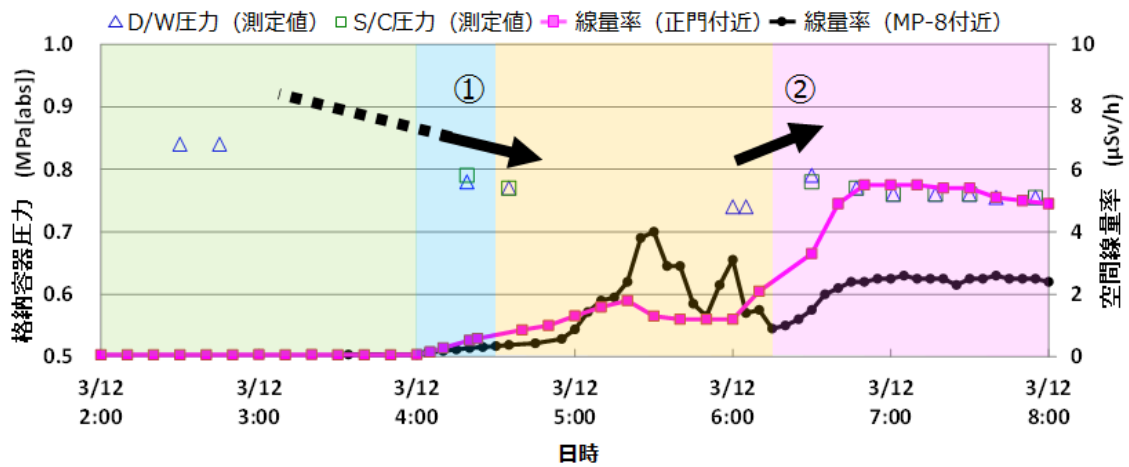


図6 発電所敷地内の空間線量率及び1号機格納容器圧力挙動

3.3. 1号機事故進展シナリオの推定

3.1.において推定した空間線量率の変動挙動に基づく放射性物質の移行・放出挙動と、3.2.における1号機格納容器圧力挙動の観点による考察から、1号機事故進展シナリオを以下に示すように推定した。

- 推定(1)： 3月12日4:00頃までは、原子炉建屋外で観測できるほど格納容器から原子炉建屋及び環境への放射性物質の漏えいは顕著ではなかったと推定する。
- 推定(2)： 4:00頃には、原子炉建屋外で観測できるほど格納容器から原子炉建屋への放射性物質の移行があったものと推定する。
- 推定(3)： 遅くとも4:30頃には、原子炉建屋から環境へ放射性物質が漏えいしたものと推定する。
- 推定(4)： 6:00頃に格納容器圧力を上昇させる何らかのイベントが発生し、放射性物質の原子炉建屋への移行量増加に寄与したものと推定する。

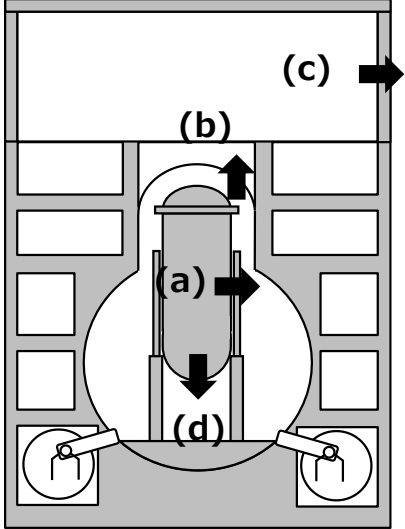
3.4. 1号機事故進展シナリオに関する既往検討と本検討での推定結果の比較

3.3.までに検討した空間線量率の変動挙動に基づいて推定した1号機事故進展シナリオについて、既往の検討である水位計指示値に基づき推定した事故進展シナリオ（添付資料1-6）と比較を行った。

表1に既往検討と本検討における事故進展シナリオを比較した表を示す。既往検討の事故進展シナリオでは、3月11日の時点で、燃料が溶融し、原子炉圧力容器から格納容器への放射性物質の移行が起きており、炉心部から圧力容器（下部ヘッド）へ溶融燃料の移行が起きていると推定している。つまり、放射性物質は既に格納容器内へ移行している状況にあり、本検討での<推定(1)>3月12日4:00頃まで原子炉建屋外で観測できるほどの格納容器から原子炉建屋及び環境への放射性物質の漏えいが顕著ではなかった状態、<推定(2)>4:00頃には観測できるほど格納容器から原子炉建屋へ放射性物質が移行した、との推定に矛盾はない。また、既往検討の事故進展シナリオでは、3月12日6:00頃に圧力容器（下部ヘッド）が損傷し、溶融燃料が格納容器へ移行したものと推定している。高温の溶融燃料が格納容器へ移行すると、格納容器圧力を上昇させることから、本検討での<推定(4)>6:00頃に格納容器圧力を上昇させる何らかのイベントが発生したとの推定に整合する。

以上のとおり、本検討における空間線量率の変動挙動から推定した事故進展シナリオは、既往の事故進展シナリオと整合することが確認された。

表 1 空間線量率モニタリングデータ等により推定した事故進展シナリオと既往検討における事故進展シナリオとの比較

日時	既往検討の事故進展シナリオ (添付資料 1-6)	空間線量率の変動挙動及び 格納容器圧力挙動に基づく事故進展シナリオ	<p>放射性物質移行経路の例</p>  <p>(a) 圧力容器（接続している各種配管） → 格納容器 (b) 格納容器 → 原子炉建屋 (c) 原子炉建屋 → 環境 (d) 圧力容器（下部ヘッド） → 格納容器</p>
3月11日	<ul style="list-style-type: none"> 燃料が溶融し、原子炉圧力容器から格納容器への放射性物質の移行が起きている。（図中(a)） 炉心部から圧力容器（下部ヘッド）へ溶融燃料の移行が起きている。 	<p><推定(1)> 3月12日 4:00頃までは、原子炉建屋外で観測できるほど格納容器から原子炉建屋及び環境への放射性物質の漏えいは顕著ではなかったと推定。</p>	
3月12日 4:00頃		<p><推定(2)> 4:00頃には、原子炉建屋外で観測できるほど格納容器から原子炉建屋への放射性物質の移行があったものと推定。（図中(b)）</p>	
4:30頃		<p><推定(3)> 遅くとも 4:30頃には、原子炉建屋から環境へ放射性物質が漏えいしたものと推定。（図中(c)）</p>	
6:00頃	<ul style="list-style-type: none"> 圧力容器（下部ヘッド）損傷（図中(d)） 	<p><推定(4)> 6:00頃に格納容器圧力を上昇させる何らかのイベントが発生し、放射性物質の原子炉建屋への移行量増加に寄与したものと推定。（図中(d)）</p>	

添付 1-11-13

4. まとめ

本検討では1号機事故初期の期間に注目し、放射性物質の放出に至る事故進展挙動の把握のため、発電所敷地内外の空間線量率の変動挙動及び格納容器圧力挙動を分析することにより事故シナリオを推定した。

空間線量率の変動挙動の分析にあたっては、空間線量率の変動の要因として、原子炉建屋内に移行した放射性物質による直接線・スカイシャイン線の影響と、原子炉建屋から放出された放射性雲によるクラウドシャイン線の影響とに分類し、期間ごとにいずれのパターンが顕著であるかに注目して、放射性物質の移行・放出挙動を推定した。

さらに格納容器圧力挙動の観点から考察を行い、事故進展シナリオを以下のように推定した。

- 推定(1) 3月12日 4:00頃までは、原子炉建屋外で観測できるほど格納容器から原子炉建屋及び環境への放射性物質の漏えいは顕著ではなかったと推定する。
- 推定(2) 4:00頃には、原子炉建屋外で観測できるほど格納容器から原子炉建屋への放射性物質の移行があったものと推定する。
- 推定(3) 遅くとも4:30頃には、原子炉建屋から環境へ放射性物質が漏えいしたものと推定する。
- 推定(4) 6:00頃に格納容器圧力を上昇させる何らかのイベントが発生し、放射性物質の原子炉建屋への移行量増加に寄与したものと推定する。

本検討で推定した事故進展シナリオについて、既往検討の事故進展シナリオと比較した結果、両者の推定に矛盾がないことを確認した。

参考文献

- [1] 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所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.
- [2] 福島県, “平成23年3月11日～3月31日(東日本大震災発生以降)にモニタリングポストで測定された空間線量率等の測定結果について”, <https://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/16025d/post-oshirase.html>.