

事故時に観測された中性子と燃料溶融との関連について

1. はじめに

福島第一原子力発電所 1～4 号機は 2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分に発生した東北地方太平洋沖地震の影響で発電所外からの電力供給を喪失し、その後に来襲した津波により非常用ディーゼル発電機も機能を喪失したため、発電所内の全交流電源を喪失するステーションブラックアウト (SBO) となった。発電所内の線量率を測定するモニタリングポストも電源喪失により機能を喪失し、発電所内の空間線量率の測定は、自動車に線量計を積み込んだモニタリングカーによるもののみとなっていた。

モニタリングカーは、3 月 13 日早朝、及び、3 月 14 日夜から 3 月 15 日未明にかけての二つの期間に中性子を検出した。検出された中性子の線量率は、中性子検出器の検出限度の $0.01 \mu\text{Sv/h}$ 、および、その 2 倍の $0.02 \mu\text{Sv/h}$ と非常に小さい値である。測定場所は正門近辺であり原子炉建屋からかなり距離が離れた場所であることから、原子炉から直接飛来した中性子を検出したものではないと考えられるが、放射性物質が放出され発電所内のガンマ線の線量率が上昇したタイミングで中性子が検知されたという状況でもないため、これまで中性子の検出の原因については不明としてきた。また、発電所内の土壌から、ウランやプルトニウム等が検出されているが、その漏えいタイミング、経路についても不明としてきている。

ここでは、これまでに明らかになった福島第一原子力発電所 1～3 号機の事故進展挙動から、中性子検出についての説明を試みる。

2. 2 号機、3 号機の事故進展について

2.1. 2 号機での燃料溶融が起こった時間帯に関する推定

2 号機の燃料溶融が発生した過程について、推定される注水と蒸気発生を関係を図 1 に示す。14 日 18 時 02 分に主蒸気逃がし安全弁 (SRV) により原子炉の減圧が開始された。その後、18 時 30 分頃には炉圧は 1MPa 程度まで減圧されている。この際に減圧前には燃料の有効燃料頂部 (TAF) を若干下回る程度であった原子炉水位(①18:00TAF-1.1m)は、減圧沸騰による水位の減少により、燃料の有効燃料底部 (BAF) 未満にまで短時間で原子炉水位が低下 (①18:30TAF-3.9m) した。19 時 54 分に消防車による注水を再開した後、20 時 15 分頃から原子炉圧力が上昇している。この後 21 時 20 分の SRV 開操作をしたとの記録のある時間帯に、原子炉圧力が低下するとともに、それまで一定であった格納容器圧力が上昇している。また、22 時 40 分から 23 時 25 分、3 月 15 日 0 時 6 分から 1 時 2 分にも、原子炉圧力の上昇開始とその後の原子炉圧力の低下開始が観測されている。

これら 3 回の原子炉圧力の挙動は、以下のような形で説明できると考えている。

- ・ ①の状態から、消防車による注水が始まり、シュラウド外に注水された水が炉心部に到達し、蒸気発生が開始する（②の状態）。
- ・ その後も、注水により水位が上昇することで蒸気発生量が増加する（③の状態）。
- ・ 蒸気は燃料の冷却に寄与するものの、過熱した燃料被覆管では水-ジルコニウム反応が発生し、水素と大量のエネルギーが発生する。
- ・ これにより、原子炉圧力が上昇することで、吐出圧力が 1MPa 程度である消防車からの注水が原子炉圧力に負けて原子炉内に届かなくなる。
- ・ そのため、原子炉水位は低下し、蒸気の発生量は減少する（④の状態）。
- ・ 水位が BAF 以下にまで達すると蒸気の発生はほとんどなくなり、原子炉圧力は減少に転じる（⑤の状態）。

原子炉圧力が消防車による注水が可能なるほどに低下すると、原子炉の状態は①に戻り、再度、同じパターンを繰り返すこととなる。これが 14 日夜から 15 日未明にまで繰り返し観測された原子炉圧力の上昇下降のメカニズムであると考えられる。③から④の状態では水-ジルコニウム反応が短時間のうちに進み大量のエネルギーが放出されることから、燃料温度が急激に上昇すると考えられるため、この期間で燃料の溶融が発生した可能性があると考えられる。

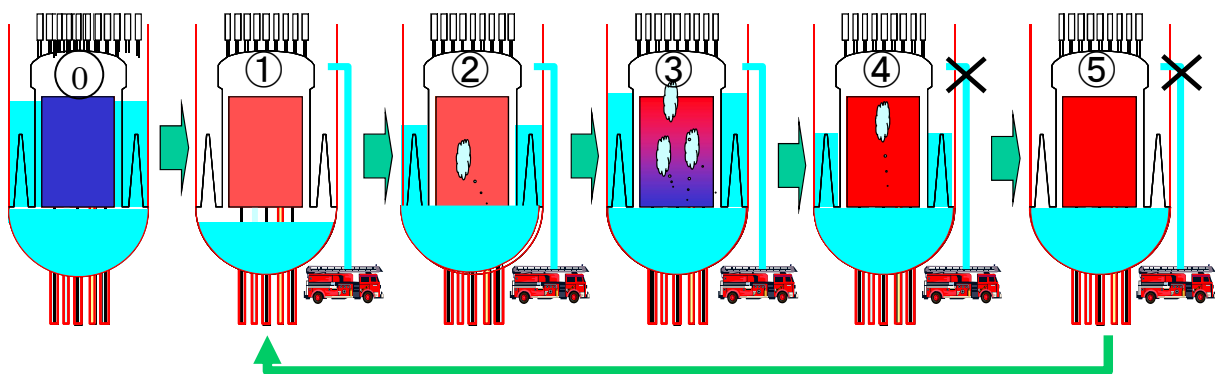


図 1 注水後の蒸気発生と圧力上昇

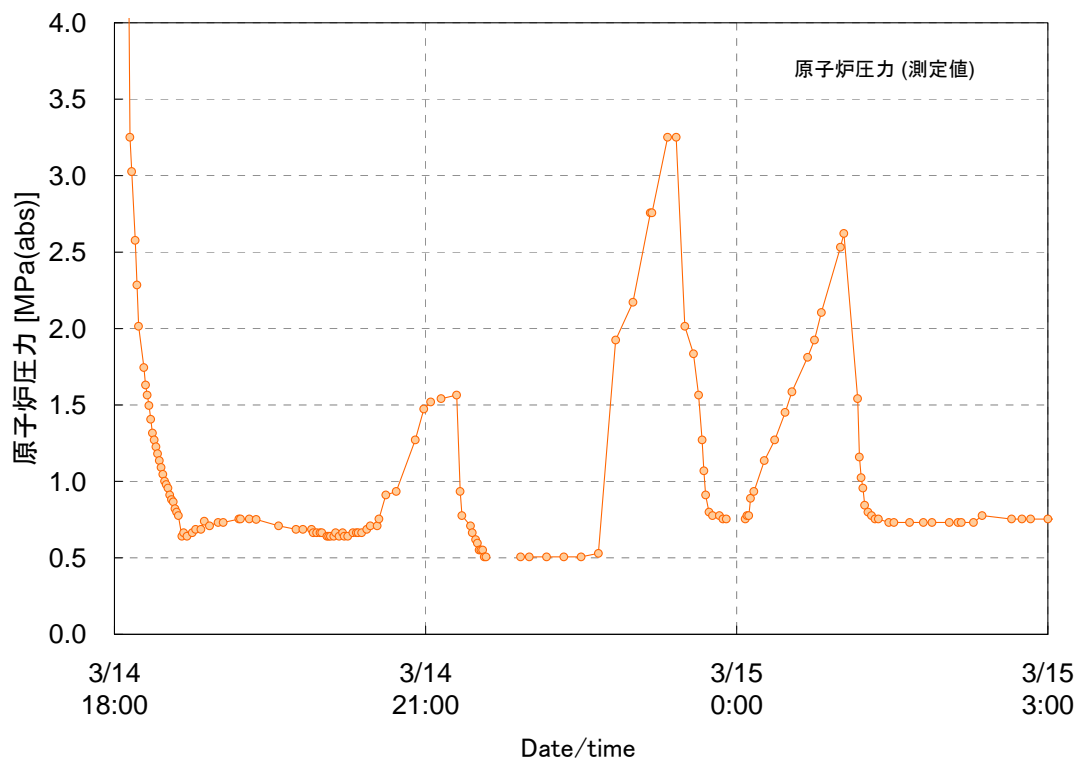


図2 14日夜から15日未明にまで繰り返し観測された原子炉圧力の上昇下降

2.2. 3号機での燃料溶融が起こった時間帯に関する推定

3号機の原子炉水位計測値と、当社が平成24年3月に公表したMAAP解析による原子炉水位の解析値の変化を図3に示す。添付資料3-4にて報告しているように、HPCIは運転員が手動停止する前に、原子炉に十分な水を注水できない状態となっていたと推定している。その結果、原子炉水位は、HPCIの停止時点でほぼTAF近辺にあった可能性がある。また、燃料域水位計で計測された13日7時35分以降の原子炉減圧前の水位は図4に示すとおりBAF+0.7m程度で一定値を示しているが、崩壊熱が継続的にエネルギーを放出している中、水位が一定値を維持することは考えにくい。そのため、この一定値の表示は、水位計の計測下限に到達してしまっているものが、水位計の基準水柱の蒸発等により水位を過大評価してしまっている可能性が高いと考えられ、実際の水位はBAF以下であったものと推定している。

以上のことから、3号機の事故進展過程においては、1号機の事故進展と同様に、原子炉圧力が高い状態のまま、沸騰により原子炉水位が徐々に低下し、水位がBAFに到達し、燃料が完全に露出するという経過をたどったものと推定される。水位が徐々に低下する過程では、燃料が気中に露出しても、下から吹き上げる蒸気により冷却（蒸気冷却）されるため、当初は燃料被覆管の温度は限定的なものとなる。しかしながら、水位が低下するにつれて、蒸気冷却により冷やさなくてはならない燃料の表面積は増加し、その一方で供給される蒸気は少なくなる。このよ

うな状況では、燃料被覆管の温度は徐々に上昇するものと考えられる。燃料被覆管の材料であるジルコニウムは、水蒸気と反応し酸化物を作るが、1200℃程度を越えると、酸化反応が正のフィードバックにより急激に進むこととなる。従って、それ以前の酸化反応の状況と崩壊熱の大きさに依存するが、この原子炉水位の低下過程において急激な酸化反応が進んだ場合には、発生した大量のエネルギーにより、この期間（3/13 5:00AM～7:00AM）に燃料が溶融した可能性がある。

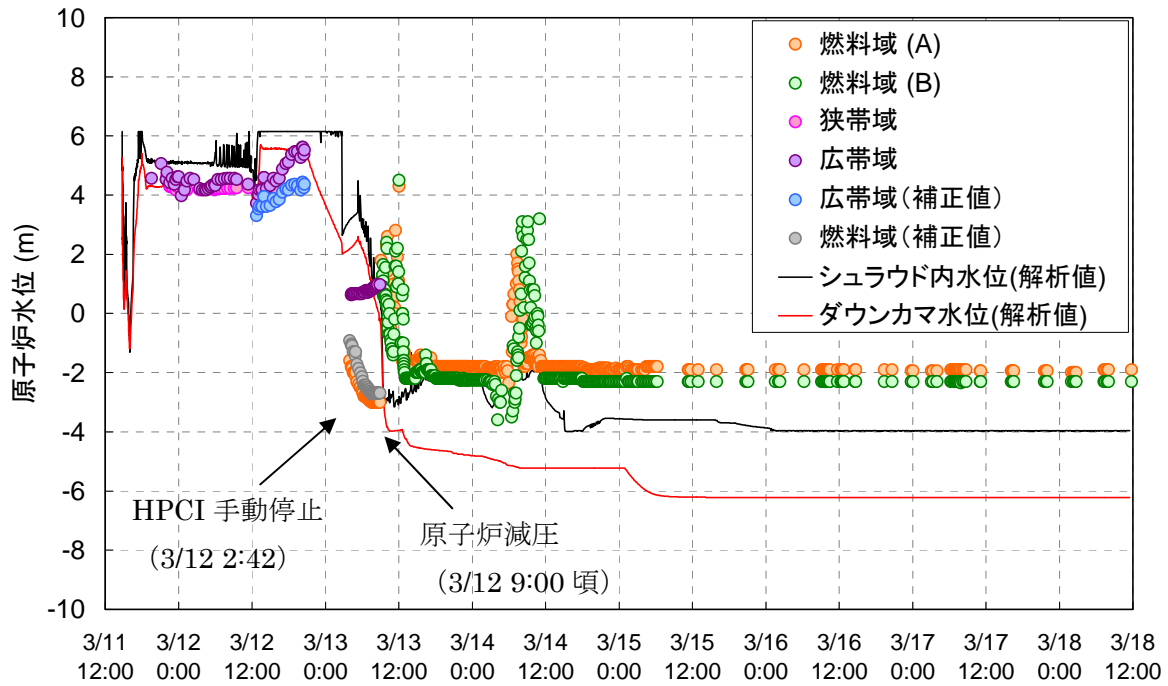


図3 3号機 原子炉水位の変化

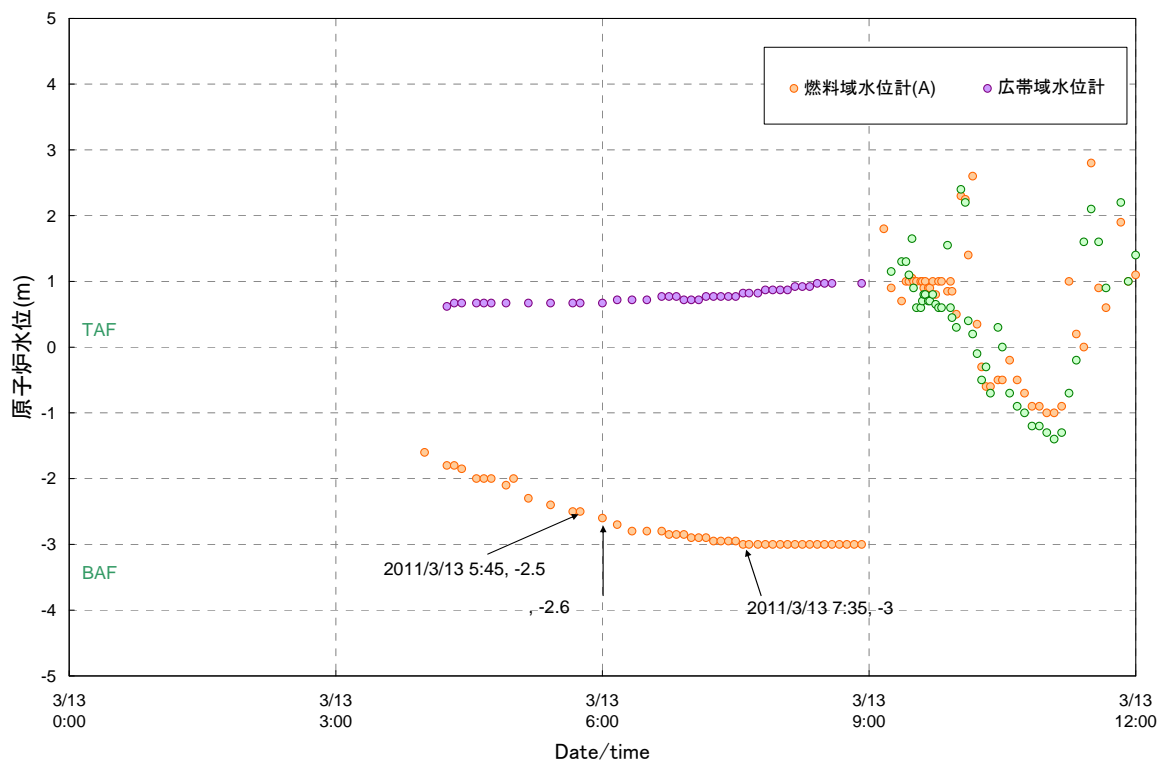


図4 3号機 原子炉水位の変化（拡大）

3. 中性子が検出されたタイミングについて

3.1. 3月13日の中性子計測

表1に3月13日に中性子が検出された時刻を示す。図5は正門付近での線量率（ガンマ線）の時間変化を示したものに、中性子の線量率が $0.01 \mu\text{Sv/h}$ となった時刻のプロットを青、中性子の線量率が $0.02 \mu\text{Sv/h}$ となった時刻のプロットを赤としたものである。中性子が検出された3月13日の午前は、9時頃の原子炉減圧とそれに伴うS/Cからのベントの影響で線量が上昇しているが、中性子検出とガンマ線線量率の変化に相関関係は見られない。すなわち、中性子検出は、ガンマ線線量率の上昇の原因となった放射性物質放出とは、関係しない現象によって引き起こされたものと考えられる。

一方で、厳密には一致しないが、原子炉水位の変化から予想される、3号機で燃料溶融が発生したと推定される時間帯を考慮すると、中性子検出と燃料溶融の関連が示唆される。すなわち、燃料溶融により一部気中に放出されたウランやプルトニウムなどのアクチノイド核種が、ガンマ線線量率の上昇を引き起こした放射性物質放出とは異なる経路で原子炉建屋外に漏れ出し、これらに含まれるプルトニウムやキュリウム等の自発核分裂により放出された中性子が検出された可能性がある。実際、過去の核実験時のフォールアウトによって蓄積したプルトニウムと同程度ではあるものの、プルトニウムの同位体組成から、明らかに福島第一原子力発電所での事故起因と考えられるプルトニウムが、発電所構内の土壤中から

検出されている。

なお、中性子が検出された正門付近は、図 6 に示すとおり約 1km 距離が離れていることから、原子炉からの中性子を検出したものである可能性は小さい。さらに、BWR は、水によって減速された中性子により核分裂を連鎖的に発生させるように設計されている。しかしながら、

- ・ 原子炉の炉心部には水がほとんど無い状態であったと考えられるため、中性子は減速されず、核分裂の連鎖反応が継続的に発生する状態、すなわち臨界にはなりにくい
- ・ 原子炉の炉心部は高温状態にあったと考えられ、ドップラ効果により負の反応度が添加される状況にあるため、臨界にはなりにくい
- ・ 炉心部が高温になると、制御棒が先に溶けてその能力を失う可能性があるが、制御棒は減速された中性子を主に吸収するように設計されているため、水のない（減速されていない）状況ではあまり吸収効果を発しない

という状況であったことから、計測された中性子は原子炉内で臨界になり、核分裂の連鎖反応が発生して放出された中性子が検出されたものではないと考える。

表 1 3月13日の中性子計測

中性子が検出された時間
2011/3/13 5:30
2011/3/13 5:40
2011/3/13 5:50
2011/3/13 6:30
2011/3/13 6:40
2011/3/13 7:10
2011/3/13 7:40
2011/3/13 8:00
2011/3/13 8:40
2011/3/13 9:30
2011/3/13 10:50

正門付近モニタリングカーの線量率(ガンマ線)推移

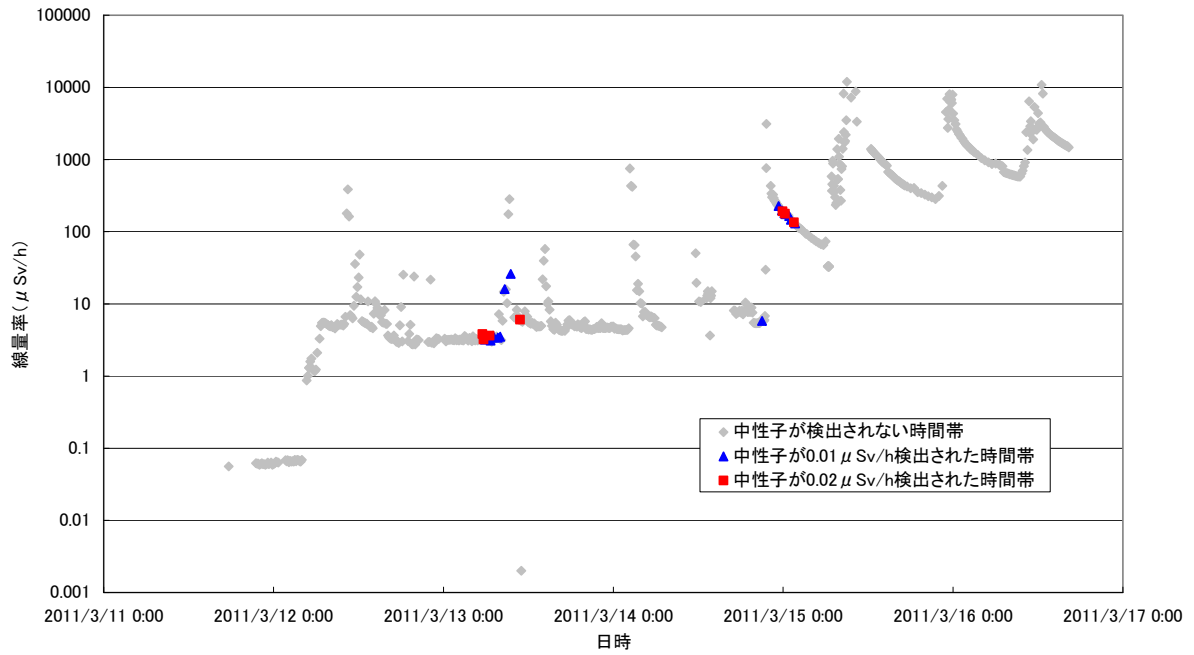


図5 正門付近での線量率変化（中性子が検出された時間のプロットに着色）



図6 福島第一原子力発電所1~4号機の原子炉建屋とモニタリングカーの位置関係

3.2. 3月14, 15日の中性子計測

表2に3月14,15日に中性子が検出された時刻を示す。図5のガンマ線線量率の変化と比較すると、最初に中性子が検出された3月14日の21:00は、急激なガンマ線線量率の上昇があった21時30分頃よりも前の時間帯であり、その後に検出されたのは23時20分以降である。3月14,15日についても、中性子検出とガンマ線線量率の変化に相関関係は見られない。

一方で、図7に中性子の検出時間と2号機の原子炉・格納容器圧力の関係を示すが、中性子は原子炉圧力の上昇が始まった後に検出されている。前述の通り、この原子炉圧力上昇は、消防車による注水が炉心部に到達し蒸気が発生したことによると考えられ、また、この際には水-ジルコニウム反応が発生して大量にエネルギーが放出され燃料が溶融したと考えられる。すなわち、原子炉圧力の上昇のあった時間帯に発生した燃料溶融によりウランやプルトニウムなどのアクチノイド原子が一部気中に放出され、ガンマ線線量率の上昇を引き起こした放射性物質放出とは異なる経路で原子炉建屋外に漏えいし、これらに含まれるプルトニウムやキュリウム等の自発核分裂により放出された中性子が検出された可能性がある。

表2 3月14,15日の中性子計測

中性子が検出された時間
2011/3/14 21:00
2011/3/14 23:20
2011/3/14 23:50
2011/3/14 23:55
2011/3/15 0:10
2011/3/15 0:15
2011/3/15 0:20
2011/3/15 0:50
2011/3/15 1:05
2011/3/15 1:30
2011/3/15 1:40

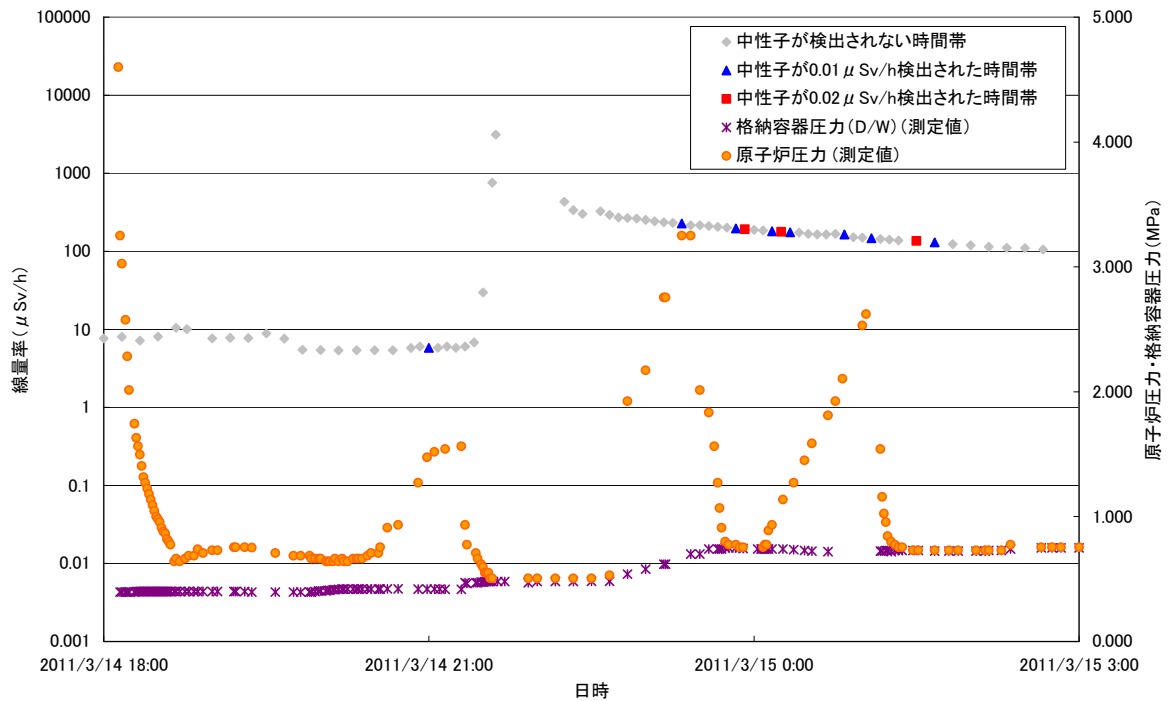


図7 中性子の検出時間と原子炉・格納容器圧力の関係

4. まとめ

モニタリングカーにより、3月13日早朝、及び、3月14日夜から3月15日未明にかけての二つの期間観測された中性子検出について検討を実施した。これまで、ガンマ線の線量率変化との相関が無いことから、中性子の検出の原因については不明とされてきた。しかしながら、事故進展挙動の理解が進んだことにより、燃料溶融が発生した時間帯が概ね明確化されたことで、中性子検出が燃料溶融と密接に関連した現象である可能性が示された。

中性子検出につながるアクチノイド核種の漏えい経路については、所員の安全を考える上でも重要であり、今後も継続的に検討を進めていくことが必要である。