

●特集● 福島原発災害、2年後のいま

福島第一原発事故への
地震動の影響

福島第一原発事故の直接的原因については、国会事故調を除く、政府事故調、東電事故調、民間事故調は想定外の津波による非常用電源喪失という基本線で一致した見解を表明している。国会事故調は地震動の影響の可能性を強く指摘している。本稿では、地震動の影響を指摘する諸論考を検討し、若干の考察を加え論理を補強し、事故の発端、津波到達前後、事態進展における地震動の主導的な役割を分析する。



岡本良治

1 なぜ直接的原因を問題にするのか

事故原因としては、背景となる根本的原因と引き金としての直接的原因に分けて考え、本稿では、直接的原因を議論する。事故の進展を決定的に悪化させた非常用交流電源の喪失の原因を、東京電力福島原子力発電所事故調査委員会(国会事故調)以外の報告書¹⁻³⁾は、すべて津波による浸水が原因としている。しかし、福島第一原発事故の直接的原因は何かについて、地震動か津波か、または地震動および津波か、両者の役割の関連、違いを明らかにすることは重要である。

地震動の影響が重要であれば、運転中、停止中であれ、原発が廃炉にならない限り、原発耐震設計審査指針の抜本的な再検討と新指針の策定が不可避である。地震動による発電所施設内のインフラの破壊・損傷が事故対応を遅らせたが、本稿ではそれ以外について、発端、津波到達前後、その後の事態進展にお

ける地震動の影響を議論する。

2 発端は地震動による外部電源の喪失

2011.3.11,14:46に発生した地震動により、外部送電線を支える原発西側の鉄塔が倒壊して、1-4号機の外部電源が喪失した。5-6号機が受電していた夜の森線の鉄塔も倒壊して、外部電源が喪失した¹⁻⁴⁾。関連して、3月11日、14:47「スクラム(制御棒挿入による原子炉緊急停止)成功」という事実認識に対して、国会事故調は「スクラム後、約30秒後から約50秒間、より強い地震動が継続した」と警告している⁴⁾。

強い揺れの順番が逆であればどうなったか。東電も外部電源喪失の原因が地震動の長い継続時間にあったことを認めているが²⁾、建造物や機器に対してこうした長時間の揺れがどのような影響を与えるかは未解明の課題である。原発が廃止されない限り、この点についても改めて耐震設計の再検討が求められるべきである⁵⁾。

3 地震後、早期に放射性キセノンの放出

Stohlら国際共同研究グループの論文⁶⁾によれば、最初にキセノン133の放出が始まったのは最初のベント弁開放以前であり、原子

●岡本良治(おかもと・りょうじ)●

1948年生まれ。九州大学大学院理学研究科博士課程単位取得退学。理学博士。九州工業大学名誉教授。専門:原子核物理学。共著『原発事故緊急対策マニュアル』(合同出版,2011)他

キーワード:地震継続時間(duration of the earthquake), キセノン133(xenon133), 小口径破損(small-bore damage), 水面揺動(sloshing), セシウム137(caesium137)

炉構成要素に構造的損傷がおそらくあったことを示す有力な証拠がある。キセノン133の放出量はチェルノブイリ原発事故の2倍以上で、歴史上最多である。

4 非常用電源喪失時刻と津波到達時刻

(1) 波高計と原発の距離と津波波形

沖合1.5キロに設置された波高計に記録された時刻と原発への到達時刻の有意の時間差、関連する時刻について、中央制御室の運転員の認識とコンピュータ記録にずれがある⁴⁾。

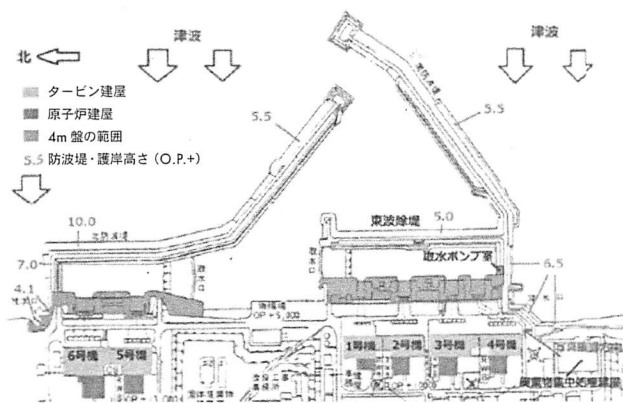


図1 津波と岸壁(原典：国会事故調報告書)

波長に比べて浅い波としての津波の速さ v は重力の加速度 g 、深さ h の場合、 $v = \sqrt{gh}$ と表される^{7,8)}。この公式は規則的な波だけにしか適用できないことに注意が必要という指摘⁹⁾もあるが、以下に述べるように、ここでは適用できると思われる。沖合1.5キロから図1に示す原発施設岸壁まで平均の深さが9～13mであるとすれば、津波の速さは毎秒10mから11mまでなので、沖合1.5km地点から約800mの防波堤先端までの距離約800mを通過する所要時間は70～80秒と考えられる。

防波堤の高さは5.7mで、福島第一原発の1～4(同5,6)号機のタービン建屋の敷地高は10m(同13m)であり、津波第1波の高さは約4mであるから、後述の6号機を除き、浸水の原因とは考えられないので、以下では津波第2波の影響のみを考える。

海の深さが一定で約10mとして、公式に代入し、波高計から原発までの1.5キロを通過する時間を計算すると、151秒となる。津波第2波(の波形立ち上がり)が15:35に波高計を通過したと見なせば、敷地への到着は午後3時35分頃+2.5分以降=午後3時37.5分以降となる。東電も「津波が1.5kmの所要時間は約2分半と認めている」ので、津波第2波の敷地への到達時刻は15時37～38分ごろとなる⁴⁾。

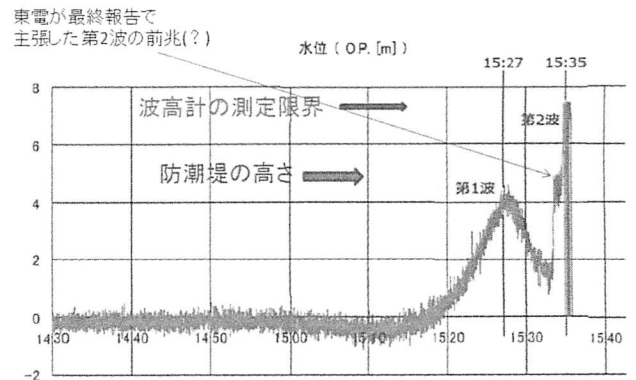


図2 波高の時間経過(国会事故調報告書の図に加筆)

国会事故調報告書⁴⁾では、東電が公開した一連の写真の内蔵時計(15:41:25～15:42:21)が数分進んでいたが、撮影時間間隔は正しいと解釈している。撮影時間間隔が正しいことは筆者も異存はない。すると、津波が防波堤先端に到達後4号機海側エリアに着岸するまで56秒経過している。

しかし、(最初に到達した)4号機海側エリアに着岸後、タービン建屋(海側エリアから約150m)を進み、または東側から遅れて押し寄せた津波が南側から、4号機海側エリアに着岸した津波を追い抜いて進み、次いで建屋内に浸水して関連機器に達するまでには、さらに時間を要する⁴⁾。

さらに、波高計の測定限界は±7.5mであるから、第2波が超えた+7.5m付近、およびより高い波高の記録は信頼性が低いと思われる。

東電は、2011年5月段階では、原子炉へ

の津波到達時刻を 15:42 としていたが、最終報告²⁾では、第 2 波の急な立ち上がりとその前駆的な 15:33 ころの急な水位上昇を強調しているように、微妙に主張を修正している⁴⁾。しかし、同じページに引用された、記録された津波波形も 2~3 分の幅を示しているように、第 2 波の波高変化は不連続的(パルスの)ではなく、実在波の一般的挙動から有限の時間を経過して最高波高に達すると想定すべきである¹⁰⁾。

この分析は、第一原発の津波の高さは断層活動で生じた 6 種類の津波の頂点が重なったためであるという東電の 8 月 8 日公表の解析でも、合成された波の半値幅は 2~3 分となっていることと整合的である¹¹⁾。

図 2 のグラフの特徴から、第 2 波のピークが波の立ち上がりから 2~3 分遅れると見なせば、海側エリアへの到着は午後 3 時 40 分前後になる。この推理が正しければ、東電が公開した一連の写真の内蔵時計の遅れがあったとしても無視できる程度であったこととなる。津波原因説を取っている文献¹²⁾においては、津波第 2 波が最初に到達したと思われる 4 号機に津波が到達した写真の時刻は、東電発表のとおり 15:42~としている。

以上の分析に関連して、津波第 2 波の写真撮影者情報の提供を東電が頑なに拒否していること、東電の津波再現計算の入力パラメータは非常用電源喪失が津波によることを説明するのに都合のよい方向に修正されたこと⁴⁾は東電にとっては津波原因説が急所的位置づけであることを示唆する。

(2) 国会事故調の分析

国会事故調の主張のうち、詳細に引用する価値があると思われる内容について以下にまとめる。① 1 号機 A 系はタービン建屋 1 階地下に設置されているが、他のディーゼル発電機と異なり、建屋外につながる給排気口が

開口していないので、津波浸水はかなり後になるはずであるから、その停止原因は津波ではあり得ないこと。② 1 号機 B 系, 2 号機 A 系, 3 号機 A 系 B 系, については津波到達後に停止したかどうかは微妙なタイミングである。③ 5, 6 号機については運転員の認識が正しければ、津波以外の原因によることになる。ただし津波第 1 波が防波堤北側を回り込んで浸水して 6 号機の 4m 盤に浸水した可能性はある⁴⁾。

それでは、いったん起動した非常用電源が、地震により関連機器に異常が起これ、その後、故障停止したのはなぜか? 国会事故調報告書は、非常用ディーゼル発電機の冷却水配管系統や燃料供給配管系統の損傷が時間の経過とともに、加熱や燃料切れにより停止する場合、地震による変形や機器、部品の移動による軸受け等のずれを生じて、運転継続中に加熱、焼き付け等を起こす可能性を指摘している⁴⁾。

5 1 号機への影響

(1) 格納容器の圧力上昇の原因

1 号機について田中三彦氏¹³⁻¹⁵⁾は地震動により、格納容器内で、圧力容器につながる複数の小口径配管の破損または破断が発生した可能性を、格納容器の圧力上昇の時間的経過の分析から推定した。これについては筆者も以前紹介したので¹⁶⁾、ここでは議論しない。

大規模の冷却水喪失がなかったことはほぼ明らかである。しかし、政府事故調最終報告書も「小規模の冷却水喪失があり、徐々に拡大した可能性」は、以下のように、認めている¹⁾。「地震発生後、津波到達までの間、格納容器又はその周辺部に、閉じ込め機能を喪失するような損傷に至らないような軽微な亀裂、ひび割れ等が生じた可能性まで否定するわけではない。また、仮にこのような軽微な損傷が生じたと仮定して、その後高温、高

圧状態下にさらされるなどして当該損傷が拡大し、結果として閉じ込め機能を喪失するに至ったかどうかは不明である」。

(2) 1号機の非常用復水器系配管の解析

地震動により1号機の非常用復水器系配管が破損した可能性があることを裏づける解析が原子力安全基盤機構により公開された。2011年12月9日の保安院主催の技術的知見に関する意見聴取会に提出された資料、福島第一原子力発電所1号機非常用復水器(IC)作動時の原子炉挙動解析では、「漏えい面積0.3平方センチメートル以下の場合、原子炉圧力、原子炉水位の解析結果と実機データとに有意な差はない」とされている。

0.3平方センチメートルの小さな穴でも初期の漏洩流量は1時間に7.2トンとなる。そして、保安院(当時)が2011年12月19日の市民団体との交渉で、以上の論理を認めた¹⁷⁻¹⁹⁾。また、これらの解析は気体分子運動論を用いた簡単な分析とも矛盾しない²⁰⁾。

6 2号機への影響

(1) 地震動に起因する水力学的荷重

福島第一原発のようなMark I型の圧力抑制室の健全性については1974年くらいから疑問が出されていた。福島第二原発の原子炉設計の経験もある渡辺敦雄氏は、冷却水喪失の際の高温蒸気などによる動的加重と地震動(との共振)による、圧力抑制室に貯留された水の水面揺動(スロッシング)による衝撃が重なった可能性²¹⁾を詳細に分析している。

(2) スロッシング現象の複合的影響

元原子炉格納容器設計者の後藤政志氏は、地震動の大きさ(加速度)が巨大でなくとも、継続時間が長いと、地震動で引き起こされる、(圧力抑制室の)水面の動揺が増幅されるという²²⁾。

配管破損(破断)が起こって冷却材(水蒸気)が噴出するときに、水面の動揺が重なる

噴出する冷却材を十分に減圧できなくなり、格納容器が破損する可能性も指摘している。地震動の継続時間がこれまでもなく長かった今回の地震では、水面の動揺が原発の状況を致命的に悪化させたおそれがある²²⁾。

さらに、原子力プラント全体にスロッシング現象を適用すれば、圧力抑制室の水面動揺が格納容器の機能喪失の原因となりうるだけでなく、使用済燃料プールの水面動揺がプール水の逸水につながることで、圧力容器内の水面動揺が炉心の核反応による出力振動(出力の空間的・時間的な変動)の原因ともなり得る、という重要な指摘もしている²²⁾。

(3) 事故進展と放射性物質放出シナリオ

田辺文也氏²³⁾は、観測データがない場合には簡易モデルで炉心推移を求め、それらと各種の観測データ分析を基に、2号機の圧力抑制室は3月12日正午頃までに地震または付加的なその後の負荷〔主蒸気逃し安全弁(SR弁)からの蒸気流入による動的荷重〕のために、格納容器と圧力抑制室を結ぶベント管が破損したと推定している。

この仮説で、15日1:00~6:00の圧力抑制室の放射線量率の減少、14日21:18のSR弁2個開の後の21:37のサイトでの空間線量率ピークの出現、格納容器の圧力計算で計測値の傾向を再現するには12日正午頃から格納容器の破損を仮定する必要があること、などが矛盾なく説明できる、と説得的に分析している。

(4) ベント管への地震動の影響

2012年7月21日に放映されたNHKの番組『NHKスペシャル メルトダウン連鎖の真相』²⁴⁾が、どの事故調報告書も言及していない事柄について、関係者のインタビューも交えて興味深い推論を行っている。

1号機が水素爆発をした後、14日夜、海水注入を行うため、SR弁を開けようとした

が、関係者も驚いたことに、これまで何回か開いていたSR弁が開かなくなった。その原因は何か。NHKによると、SR弁は加圧窒素ガスを吹き込み、その圧力と大気圧の差圧により開閉する構造になっていた。しかし、格納容器内圧が上昇したため、差圧が小さくなり、SR弁を駆動できなくなった。SR弁の構造に問題があったわけである。すなわち非常事態への対応装置に実証的裏づけが欠如している疑いが出た。

こうして注水も不可能となり、2号機の炉心の損傷はいつそう進んだ。さらに、上昇する格納容器圧力を逃がすために、ベント弁を開けようとしたが、これも開かなかった。その理由は何か。ベント弁を開けるための圧搾空気を送る配管が耐震設計のランクCとなっており、地震動によって破損した可能性が高いとNHKは推測している。この結果、格納容器内圧は耐圧限界を超えて上昇し、15日早朝の格納容器大破損につながったと推定されている。

7 3号機への影響

東電が2011年5月に公開した解析²⁵⁾では、「津波が到達する前に、地震によって高圧注水系の配管が壊れ、蒸気が漏れたと仮定すると、圧力容器の圧力が急激に低下するなど事故直後の状況をうまく再現できる」としていた。しかし、同年7月末に公表した見解²⁶⁾では、「高圧注水系の配管が破断して大量の蒸気が漏洩したとは考えられない」と否定した。

その理由は、その後の聞き取り調査の結果、3月13日に地下1階の高圧注水系のポンプ室に立ち入り、流量を絞ってポンプから別ルートへ冷却水を流すように調整していたことが分かったこと、また破断したなら、高温の蒸気が漏れてポンプ室に立ち入れないはず、という。しかし、東電は最終的には現場の破

損状況の確認が必要としている²⁶⁾。

東電側による社員または関連会社の社員の聞き取り調査はどの程度の客観性が保証されるだろうか。3号機のデータ推移と東電の事故調報告書をさらに批判的に検討する必要があるかもしれない。興味深いことに、3号機のSR弁も開かなかったことが『NHKスペシャルメルトダウン連鎖の真相』でも指摘されている²⁴⁾。

8 4号機への影響

前述のStohlらの研究は注目すべきことを指摘している⁶⁾。セシウム137放出のピークは3月14～15日であるが、12日～19日までの放出が大きく、それが4号機の使用済燃料プールへの放水が始まったのとちょうど時を同じくして急減している。このことは4号機の使用済燃料プールからも放出があったことを示している。この指摘が正しければ4号機にも地震動の有意の影響が出ている可能性がある。

9 近隣の原発への地震動の影響との比較

襲った津波の最大の高さは、福島第一、第二原発ではそれぞれ、15.5 mと7 mとの極端な差があったことが明暗を分けたとされている²⁾。しかし、地震の震度は共に6強であったが、地震動の瞬間的な作用を示す最大加速度も第一が550ガル（東西方向）、第二が305ガル（上下方向）と大きく異なった。

第一では、基準地震動（Ssレベル）から想定した最大加速度応答値を超えた²⁵⁾。女川原発では、津波の高さは13 mであったが、敷地が海拔14.8 mであった。しかし地震による部品の震動による電源盤の火災が発生し、後日これがもとで非常用ディーゼル発電機1台の故障が起こった可能性がある²⁸⁾。女川原発は非常用発電機1台が動かないまま、4月7日の余震にあい、外部電源3系統のうち、2系統が途絶し、別の発電機1台と1系

統は生き残ったが、一時は綱渡り状態に陥った²⁸⁾。周辺地域で過去の主な地震と比べても、4倍以上の余震回数が観測されている³⁰⁾。

おわりに

以上分析したように、福島第一原発事故の直接的原因において、巨大な津波が非常用電源の一部または大部分の「とどめを刺した」のは事実であるが、事故の発端、事故の進展、大量の放射性物質の放出について、地震動が主導的な役割を果たしたと筆者は考える。巨大技術システムの事故は、周辺装置から起こるともいわれる。配電盤など非常用炉心冷却装置系の周辺装置から過酷事故に至る可能性も想定すべきである^{5,31)}。

3.11地震により、福島第一原発の事務本棟は使用不能になった。しかし、2007年中越沖地震による柏崎刈羽原発への影響の教訓から2010年11月に福島第一原発に新たに建設されていた非常用の重要免震棟は無傷で生き残り、現地事故対策本部が物理的に機能できたことは象徴的である⁵⁾。

有益な議論とコメントについて、東日本大震災特別委員会の山本富士夫委員と福岡支部・核問題研究委員会の皆さんに感謝する。

注および引用文献

- 1) 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会「中間報告」(概要, 本文, 資料), 2011, 「最終報告」(概要, 本文, 資料) 2012. 特に, pp.29-32.
- 2) 東京電力「福島原子力事故調査最終報告書」2012.
- 3) 日本再建イニシアティブ・福島原発事故独立検証委員会「調査・検証報告書」(ディスカバー, 2012).
- 4) 東京電力福島原子力発電所事故調査委員会(概要, 本文, 資料) 2012. 特に, p.202, pp.213-215, 参考資料 pp.61-82.
- 5) 石橋克彦「福島原発震災: 大自然に対する無謀な戦いに敗れた今, 最善の戦後処理を急げ」『科学』**81**(5), 411-416.
- 6) A. Stohl et al., Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition, *Atmos. Chem. Phys.* **12**, 2313-2343 (2012). www.atmos-chem-phys.net/12/2313/2012/doi:10.5194/acp-12-2313-2012

- 7) ファインマン, レイトン, サンズ『ファインマン物理学 II 光, 熱, 波動』(岩波書店, 1980) pp.347-348.
- 8) 恒藤敏彦『弾性体と流体』(岩波書店, 1983) pp.158-162.
- 9) 河田恵昭『津波災害』(岩波新書, 2010), pp.53-78.
- 10) 日本科学者会議編『地震と津波』(本の泉社, 2012) pp.44-45, pp.86-88, pp.104-106, pp.110-112, pp.140-142, pp.144-148.
- 11) 「東電公表資料」2011年8月8日.
- 12) 大前研一『原発再稼働 最後の条件』(小学館, 2012), pp.34-35.
- 13) 田中三彦「福島第一原発の「耐震脆弱性」を注視する一問題「想定外の津波」より根深い」『科学』**81**(5), 420-425 (2011). (福島第一原発4号の元炉設計者).
- 14) 田中三彦「福島第一原発事故・東電シミュレーション解析批判と、地震動による冷却材喪失事故の可能性の検討」『科学』**81**(9), 945-960 (2011).
- 15) 田中三彦「予断を排した事故シナリオの検討を—1号機非常用復水器はなぜ即刻手動停止されたか」『科学』**81**(12), 1230-1238 (2011).
- 16) 岡本良治「福島第一原発事故の原因, 推移, 『収束方針』の分析」『日本の科学者』**47**(3), 8-12 (2012).
- 17) 事態の経過については以下のサイト, http://rengetushin.at.webry.info/201112/article_9.html
- 18) 原子力安全保安院(当時), 福島第一原子力発電所1号機非常用復水器(IC)作動時の原子炉挙動解析, <http://www.nisa.meti.go.jp/shingikai/800/28/004/231209-3-2.pdf>
- 19) 原子力安全保安院(当時)と市民団体との交渉, http://www.jca.apc.org/mihama/fukushima/gov_neg_2011_19_kakunin.pdf
- 20) 計算ノート.
- 21) 渡辺敦雄「水素爆発をもたらしたものは何か—Mark I型原子炉格納容器の圧力抑制室に関する水力学的動荷重問題」『科学』**81**(12), 1239-1245 (2011).
- 22) 後藤政志「格納容器の機能喪失の意味—スロッシングの検証なしに運転してはならない」『科学』**81**(12), 1246-1251 (2011).
- 23) 田辺文也『メルトダウン』(岩波書店, 2012) pp.43-49, pp.82-98.
- 24) NHKスペシャル「メルトダウン連鎖の真相」<http://www.nhk.or.jp/special/detail/2012/0721/> 動画とスクリプト, <http://birthofblues.livedoor.biz/archives/51372740.html>
- 25) 東京電力, 公表資料2011年5月24日.
- 26) 東京電力, 公表資料2011年7月28日.
- 27) 毎日新聞(2011年7月29日).
- 28) 朝日新聞(2011年5月31日).
- 29) 毎日新聞(2011年5月19日).
- 30) 気象庁, 報道発表資料2011年5月13日.
- 31) アイリーン・美緒子・スミス『原発を再稼働させてはいけない4つの理由』(合同出版, 2012) pp.34-38. (HPの最終閲覧日: 2012年12月5日).