

2017年1月10日

福島第一原発の将来—とくに2号機問題について

京都大学名誉教授・大飯原発差止京都訴訟原告団長 竹本修三

【要旨】 2011年3・11の東北地方太平洋沖地震（Mw9.0）により、福島第一原発は壊滅的な被害を被った。大気中への放射性物質の放出に関しては、稼働中の1～3号機のうち、1号機が2011年3月12日、3号機が3月14日に水素爆発を起こし、建屋の屋根が吹っ飛んだ。それに対して2号機は、水素爆発を起こしていない。しかし、事故から1年2カ月あまり経った時点での東電の調査によれば、放射性物質の全体の放出量のうち、1号機からは2割程度、2号機は4割強、3号機からは4割弱が放出されたという。地震時に稼働していた1～3号機の原子炉建屋は、いまだに線量値が高く、人間が立ち入って作業できる環境にないが、燃料がメルトダウンからメルトスルーして、溶け落ちた核燃料の一部は原子炉本体の圧力容器を包む格納容器の下のコンクリートも溶かした。また、配管の一部が損傷を受けたことも次第に明らかになりつつある。そうになると、原子炉の冷却水に含まれる放射性廃棄物を外部に漏らさないように処理するのは至難の業だと考えられる。福島第一原発事故が収束に向かっているととても言い難いが、今後さらに、大きな地震の揺れに遭遇すると、とくに心配なのは、圧力容器のなかに大量の核燃料デブリが残されている2号機である。2011年3月の事故で高温・高圧の過酷な環境に曝されても大破することもなくもちこたえた2号機の圧力容器であるが、新たな地震動でさらに破損が進み、核燃料デブリが格納容器やコンクリート層に急速に落下すると、新たに大量の放射性物質が大気中にまき散らされる可能性がある。そうになると、首都圏にも人が住めなくなり、とても東京オリンピックどころの話ではなくなるであろう。

1. 3・11地震に伴う福島第一原発の電源トラブル

2011年3月11日14時46分（日本時間）に発生した東北地方太平洋沖地震（Mw9.0）により、福島第一原発は壊滅的な被害を被った。

地震波の到達時に、6機ある原発のうち、1・2・3号機が稼働中であったが、4号機は定期点検作業で停止、5・6号機も停止中であった。東電の発表によれば、福島第一原発の敷地内で記録した地震の揺れの最大加速度は448ガルであったという。この地震の揺れを受けて、1号機が3月11日14時46分、2・3号機も14時47分頃に緊急停止したが、これはあらかじめ想定された通りであった。

ところがこの地震の揺れにより、1～4号機は、新福島変電所（福島県双葉郡富岡町）から電力供給を受けていた大熊線の発電所敷地内の受電遮断機や断路器、ケーブル類が大幅に損傷したため、外部から供給されていた交流電力の受電不能に陥った。また、5～6号機も、受電経路である夜の森線の敷地北西端にある第27号鉄塔が地震動による液状化の影響等で倒壊したため、受電不能に陥った。本来、どちらかの外部電源から受電できれば、発電所内で融通するシステムがあった。しかし、結果的には全機受電不能となり、福島第一原発は外部電源を一挙に喪失した。これから吉田昌郎所長達の現地従業員による壮絶な戦いが続く。

外部電源がすべて遮断された後、地下の非常用交流電源（ディーゼル発電機）が起動したが、地震波が到達した41分後の15時27分頃に津波の第一波、15

時 36 分頃に第二波が敷地を襲った。この津波の影響で、概ね 15 時 36 分に非常用交流電源も機能喪失した。15 時 40 分前後には津波が原因で非常用母線の機能が喪失し、全交流電源を失う結果となった。外部電源がほぼ復旧したのは、3 月 22 日以降である。

2. 1号機・3号機の問題

電力の供給がなくなり、原子炉ではもっとも大切な冷却機能が失われたため、1号機は地震発生からわずか3時間後に核燃料棒の露出が始まり、それから1時間後には燃料棒の損傷が始まっていた。そして、その日の19時30分頃には燃料棒が完全にむき出しになった。地震の前には60度程度であった炉心最高温度が250度以上に跳ね上がったという。その段階で、むき出しになった燃料が損傷してメルトダウンを起こしたと考えられる(文献(1)80ページ)。

翌12日の2時30分頃に1号機の格納容器の圧力が、設計上想定している最高使用圧力(427kPa)のほぼ2倍に当たる840kPaに達した。このことを知った吉田所長は、格納容器内の高まり過ぎた圧力を緩めるため、炉内の空気を外部に排出する作業、いわゆるベント作業を検討していた。このような稼働中の原子炉のベント作業は、これまで日本どころか世界でも一度も実施されたことはなかった。誰もが経験したことがないこの作業を手探りで検討しなければならず、真っ暗な原子炉建屋内で作業の確認に手間取ったほか、ベントは放射性物質を外部に撒き散らすことになるので、それに対する躊躇もあったようだ。

圧力容器の一部がすでに破損したためと思われる高濃度の放射線で原子炉建屋が汚染されたため、作業員がなかなか現場に近づけないという事情に加えて、操作マニュアルの不備もあって、ベントの作業は難航し、ようやくベント成功を確認できたのは、12日の14時30分であった。その約1時間後の15時36分、1号機の原子炉建屋は水素爆発を起こして大破した。水素爆発の原因は、高温の水蒸気と燃料棒を包む金属ジルコニウムが触れて水素が発生し、それが酸素と急激に反応して爆発に至ったと考えられている。しかし、この爆発が、ベントにより排出された多量の水素を含む水蒸気が原子炉建屋のオペレーションフロアに流れ込んだためか、あるいは、それ以前から圧力容器が損傷していて建屋内に水素が充満していたためかについては、十分に検証されていない。

そして、14日11時01分には3号機が同様に水素爆発を起こし、3号機建屋が大破した。話は戻るが、11日15時過ぎの津波発生直後に3号機の隔離時冷却系(RCIC)が辛うじて起動して原子炉を冷やし続けていたが、12日11時36分に、ついにそれが停止した。その後、高圧注水系(HPIC)という別の冷却装置が12日12時15分に自動起動したが、そのコントロールが手動でやってもうまくいかず、13日4時頃には3号機を冷却する手段をすべて失ってしまったことを吉田所長が確認している。その後、3号機のベントに向けた作業が急速に進められたが、ベントが成功したと思われたのは、13日の8時41分であった。

3号機のベントが開始されてから1日以上経った14日11時01分に1号機と同様の水素爆発が3号機で起きた。1号機の場合と違うのは、透明な爆発の直後、燃料プール付近で赤い炎が目撃されたあと、激しく爆発し、きのこ雲のような黒い噴煙が舞い上がったということである。この違いについて、メルトダウンした原子炉では様々な化学物質が発生するので、その種類や量の違いによって、差が出たのではないかとされている。3号機はMOX燃料を使用できるよう

になっていた。その後の数日間、3号機建屋からは何度も煙が上がっている。

さらに、15日6時14分頃、大きな衝撃音と振動が発生し、4号機建屋の損傷が確認された。4号機は炉心定期点検中で、炉に燃料は装荷されていなかったが、3号機と4号機はタービン建屋の配管でつながっていた。東電は、3号機の水素が4号機建屋に漏れて、水素爆発が発生したと推定している。しかし、4号機建屋の燃料プールに保管されていた1535体の燃料棒から水素が発生したのではないかとの疑問もあった。これについては、建屋付近の放射線量がきわめて高く、現場の確認さえ非常に困難な状況であったため、詳細は明らかにされていない。4号機燃料プールについては、12日午後に冷却装置が停止し、13日午後4時頃に冷却を再開した。水温は停止時の28度から37.6度まで上昇した。その後、水温は低下傾向にあったものが、再び上昇傾向になり、14日4時には84度に達したという（文献(1)185ページ）。そして4号機建屋が水素爆発を起こしたのは15日6時14分頃であった。この爆発に燃料プールに保管されていた1535体の燃料棒が無関係だったと言いきれるかどうかは、疑問が残る。

15日9時38分、4号機建屋内で火災を確認したが、11時まで自然に鎮火した。16日5時45分頃に再び火災の連絡があったが、6時15分に確認したところ、現場に火はなかったとのことである。なお、4号機建屋のプールに保管されていた燃料棒は、2014年12月20日までに撤去が完了したという。

3. 2号機の問題

地震時に炉内に核燃料棒が残っていた1・3号機建屋は、水素爆発によって屋根が吹っ飛び、内部にはがれきが散乱し、骨組みがむき出しになるという無残な姿がTVでもしばしば放映された。しかし、2号機建屋は、水素爆発を起こしておらず、ブローアウトパネルと呼ばれる最上階フロアに設置された通気孔が開いているのを除いて、たたずまいは事故前とほとんど変わっていない。

2号機では、全交流電源喪失の直前の11日15時39分にRCIC（隔離時冷却系）を手動で起動していて、その後、3日間もちこたえた。RCICは、原子炉から発生する蒸気力でタービンを回してポンプを動かし、原子炉に冷却水を送り込む仕組みになっている（文献(2)133ページ）。起動時には電源が必要だが、起動してしまうとバッテリーで蒸気量をコントロールできるそうだ。もし電源喪失前に起動していなければ、2号機は1号機と同様、すぐに冷却機能を失い、炉心損傷へと急転していた可能性が高い。細々と冷却機能を維持してきたRCICも14日13時25分には停止した。19時過ぎから格納容器のドライウェル圧力が上昇し、21時頃に燃料棒の入っている圧力容器内の圧力と格納容器内のドライウェル圧力がほぼ同じになったことから、この頃に圧力容器が破損し、水素が漏れ出したと推定されている。

2号機建屋が水素爆発を起こさなかった理由について、東電は以下のように説明している（http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/outline/2_5-j.html）。

「2号機はなぜ過酷事故に至ったか：炉心損傷の後の圧力容器及び格納容器の損傷に伴い、水素が原子炉建屋に漏洩したと推定されますが、2号機では原子炉建屋上部側面のパネルが1号機の水素爆発の衝撃で開きました。このため、水素が外部へ排出され、原子炉建屋の爆発が回避されたと推定されます。」

しかし、吉田所長は、14日13時過ぎに、2号機建屋のブローアウトパネル（通気孔）を開ける試みを模索している（文献(1)163ページ）。この矛盾をどう

考えたらよいのであろうか？ 2004年10月の中越地震（M6.8）の際に柏崎原発のブローアウトパネルが脱落した事故の経験から、ブローアウトパネルは従来よりも頑丈に取り付けられていたそうである。

15日6時14分に大きな衝撃音が発生し、4号機建屋が水素爆発したが、これと同じ頃、2号機の圧力抑制室の圧力計が0を示したという。そこで、圧力抑制室が破損した可能性があるかと判断した現場は、最小限の要員を残して第一原発から退避した。このときに爆発したのは4号機だけで、2号機は爆発ではなく、圧力抑制室付近で大きな損傷が起きたと東電は推測しているが、この頃に2号機建屋のブローアウトパネルが開いた可能性があるのではないかと推測されている。

2号機の格納容器内圧力は、15日7時25分にはまだ730kPaという高い値であったが、次に監視員が戻ってきて、11時25分に確認した際には155kPaまで低下していたという。この間に、格納容器に破損が生じて、格納容器から直接、放射性物質が急速に放出されたと推定されているが、このときまでには2号機建屋のブローアウトパネルが開いていなければならぬ。そうでないと、2号機が1・3号機と同様な水素爆発起こさなかったことの説明がつかない。

福島第一原発事故で大気中に放出された放射性物質は、15日に2号機から放出されたものが最も多かったとされている。1・3号機ではウェットベントに成功したが、2号機ではベントに失敗している。15日に2号機から放出された大量の放射性物質は、始めは南向きの風に乗って関東地方へ拡散したが、北西への風が変わった夕方に降り出した雨で土壤に降下し、原発から北西方向へ延びる帯状の高濃度汚染域を作り出したと考えられている。

事故から1年2カ月あまりが経った2012年5月24日に、東電が独自の解析プログラム・DIANAを使った「放射性物質の大気中への放出量の推定」を発表している。それによると全体の放出量のうち、1号機からは2割程度、2号機は4割強、3号機からは4割弱が放出されたとみている。

原発では、たとえメルトダウンしても、放射性物質は格納容器の内部に封じ込められ、すぐに原子炉建屋に漏れ出すことはないと考えられてきた。しかし、2号機の建屋は、メルトダウンの後、比較的短時間で蒸気に包まれ、放射線量が急上昇した。その漏洩ルートを探った結果、2号機が危機的状況に陥るのを遅らせる立役者ともなったRCIC（隔離時冷却系）が、皮肉にも放射性物質の漏洩に絡んでいたと推測されている（文献(2)146ページ）。

4. 福島第一原発の現状

東京新聞のWebから迎える2016年11月26日付の記事【福島第一原発の現状】「2号機格納容器調査へ」を読むと、「東電は2017年1月から、2号機の格納容器内にロボットを入れて中の様子を調べる方針を示した」と書かれている。この記事には、福島第一原発の1～4号機の現状の図が示されているので、これを本稿の図1として引用した。

これより先、東電は、2016年7月28日に宇宙から飛来したミュオン粒子という素粒子を使い、福島第一原発2号機の原子炉をX線のように透視する調査の画像を公開した。その結果によると、圧力容器の下部に180～210トンに相当する物質の影が映っていた。東電は、2号機には「核燃料の大部分が容器内に残っていると推定される」としている。そして、2017年1月からロボットを入れて、2号機の格納容器内を調べることになったということである。

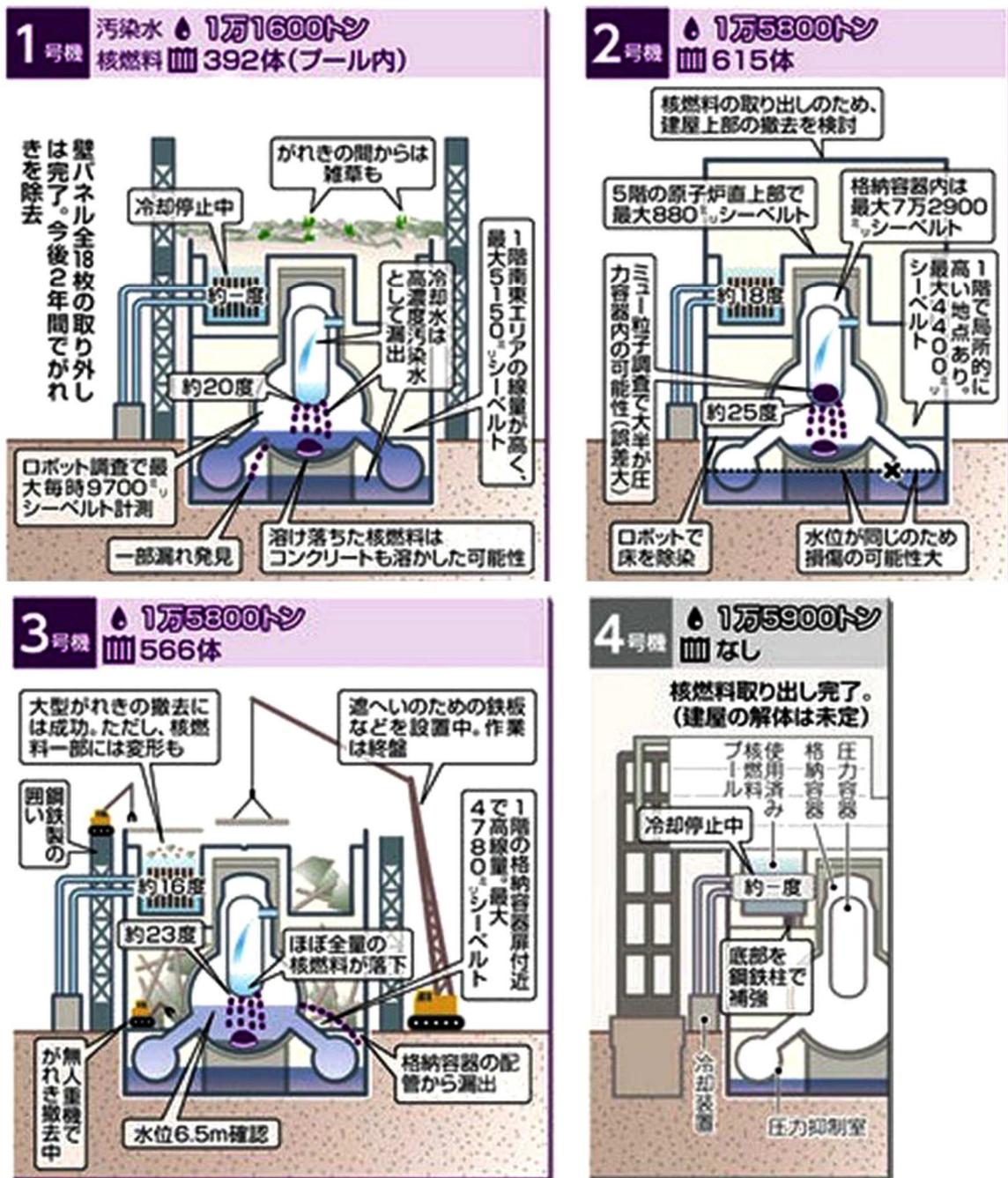


図1 福島第一原発の1～4号機の現状 (2016年11月26日現在)。

福島第一原発の1～3号機がメルトダウンを起こしただけではなく、溶融した核燃料が金属製の原子炉圧力容器を損傷し、格納容器に落下していたという解析結果が、2011年11月末に経産省所管の財団法人エネルギー総合工学研究所と東電によって明らかにされた。これによって事故の深刻さが改めてクローズアップされた。頑丈にできている圧力容器が大きく破壊され、格納容器も健全ではなく孔が開いているとみられることから、核燃料中に含まれる放射能の大気中への大量放出につながった(文献(3)17ページ)。

図1を見ると、定期点検作業中の4号機原子炉内に核燃料はなく、プールに保存されていた燃料棒もすでに撤去されたようである。地震時に稼働中であっ

た1～3号機の炉内の核燃料はメルトダウンからメルトスルーして、溶け落ちた核燃料の一部は原子炉格納容器を抜けて、その下のコンクリートをも溶かしているが、溶けたコンクリートの厚さは高々1mであり、コンクリート床の厚さは7.6mあるので、基盤までメルトスルーしていることはないというのが東電の見解である。

しかし、前章で述べたように、2号機の放射性物質の漏洩ルートとしてRCIC系の配管が疑われている。さらに、国会事故調査委員会（黒川 清 委員長）は、その報告書のなかに、「地震による配管損傷の可能性」として「主因を津波のみに限定すべきではなく、地震による損傷の可能性も否定できない。地震動で1号機のIC（非常用復水器）の配管に細長いひび割れが生じ、そこから冷却材噴出事故が起きなかったとは断言できない」と述べている（文献(3) 5～6ページ）。このほかにも、格納容器につながっている弁や多数の配管類が損傷している可能性は十分ありうる。そうなると、配管類から直接汚染水が基盤に浸透していることも考えておかなければならない。

核燃料デブリが格納容器内に留まっていれば、冷却水に含まれる放射性廃棄物を外部に漏らさないように処理することは比較的容易であろう。しかし、原子炉の圧力容器、格納容器が既に損傷している状態に加えて、配管類にも孔が開いているとすると、汚染された冷却水を外部に漏らさないように処理するのは、至難の業と考えられる。

溶け落ちた燃料を冷却するため、今でも原子炉に注水が続けられている。東電は、1～4号機を「氷の壁」で囲う凍土壁で汚染水を外部に漏らさないようにしているが、凍土壁で1～4号機を囲ったとしても、囲いのなかの地下水は深いところで外部とつながっている。そこから漏れ出す汚染水は海洋汚染にもつながっているのではあるまいか。

東電の説明（www.tepco.co.jp/decommision/planaction/waterprocessing/）による汚染水対策は、まず、福島第一原発の山側から海に流れ出ている地下水のうち、1日あたり約300トンが原子炉建屋に流れ込み、新たな汚染水となっているということだ。東電としては、原子炉建屋内に滞留している汚染水中に含まれるセシウムおよびストロンチウムの濃度を低減し、最終的に多核種除去設備（ALPS）を使ってトリチウム以外の大半の放射性物質を取り除いているという。しかし、汚染水によるリスクを大幅に低減することができたというだけで、放射性物質を完全に取り除けるわけではない。精一杯やって、現状の到達点はここまでということだと思うが、何か騙されているような気になる。現在の技術では取り除くことが困難な物質であるトリチウムが残っているため、タンク内の汚染水は増え続けている。この増え続ける汚染水をどう処理するかも大問題である。原子力規制委員会の田中俊一委員長は、2016年3月23日の記者会見で、「海に捨てればよい」と言ったそうだが、それで国民が納得するだろうか。

原発の安全性という面からだけでなく、費用の面から考えても、米国物理学会プラズマ部会長を務めたこともあるプラズマ物理学の世界的権威である長谷川 晃 大阪大学名誉教授にお聞きした話では、福島第一原発事故の被害がこれ以上広がらないと仮定しても、事故処理の費用は年間の国家予算に匹敵する規模になるという。原子力発電は安価という神話は、はっきり崩れているということになり、筆者もまさにその通りと思う。

5. 福島第一原発への今後の地震の影響について

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震（Mw9.0）は、海・陸のプレート境界で起こった超巨大海溝型地震であり、南北約500km、東西約200kmの領域が一度に破壊した。図2は、気象庁により発表されたこの地震の本震の震央位置とその後の約4か月間の主な余震の分布を示すとともに赤枠で余震領域の範囲を示してある。

2016年の11月22日に福島県沖で発生した地震（M7.4）や同年12月28日に茨城県北部で発生した地震（M6.3）も図2の赤枠で示した東北地方太平洋沖地震の余震領域に含まれている。この範囲では、マグニチュード7クラスの地震がまだまだ起こると考えておかなければならない。

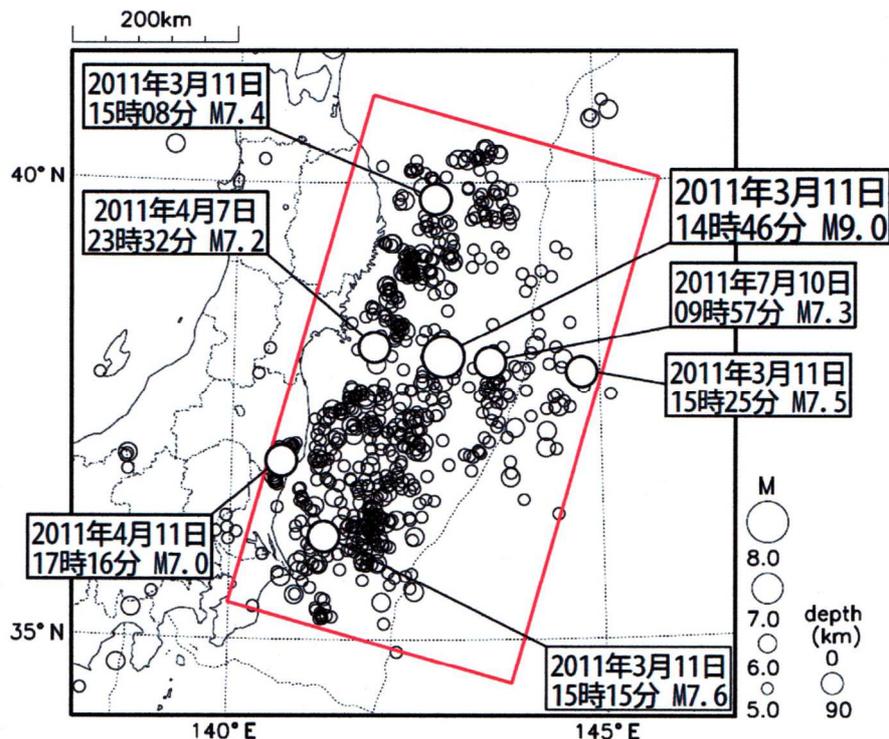


図2 東北地方太平洋沖地震（2011年3月11日）と余震領域（気象庁）。

また、図2に示した東北地方太平洋沖地震の震源域の北側には十勝沖、南側には房総沖がある。海・陸のプレート境界に位置しながら、今回の超巨大海溝型地震では割れ残ったこれらの領域のひずみが解放されると、マグニチュード8以上の海溝型地震が起きることになる。とくに、房総沖で新たな海溝型地震が起きると、首都圏でも地震・津波の影響を免れないことになるであろう。

このように、福島第一原発で、そう遠くない将来に震度6強とか震度7の揺れに見舞われる可能性を無視できないとなると、一番心配するのは、压力容器のなかに大量の核燃料デブリが残されている2号機がどうなるかということである。2011年3月11日以降の過酷事故で、压力容器が大きく破壊され、格納容器も健全ではなく孔が開いているとすると、次に震度6強とか震度7の揺れに遭遇したときに、压力容器の破壊がさらに進み、压力容器から収納容器の底に核燃料デブリが急激に落下する過程で、収納容器あるいは配管類の孔から大量の

放射性物質が外部に撒き散らされることになる。

また、**図 1** に示されている各燃料プールに保管されている燃料棒の数は、1号機が 392 本、2号機が 615 本、3号機が 566 本となっている。平常時に電源が確保されていれば、これらの燃料棒を現状のままでも当面冷やし続けることは可能であろうが、停電時にどうなるか、また強い地震で揺すられた場合にどうなるかを真剣に考えておかなければならない。

6. まとめ

2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震に伴う福島第一原発の事故は、1、3、4号機の原子炉建屋が水素爆発によって吹っ飛んだことが、鮮烈な印象として、われわれの心に残っている。水素爆発は、放射性物質を含む炉内の空気を外部に排出するベント作業が原因となったという説明が東電からあった。この爆発で大量の放射性物質が大気中に撒き散らされたが、それで炉内の圧力を下げることができて、結果として原子炉の大規模爆発を防ぐことができたのなら、それもやむなしというのが広く国民の間で認知されていた理解だったと思う。

3月25日に近藤駿介原子力委員会委員長（当時）が「福島第一原子力発電所の不測事態シナリオの素描」を発表しているが、そこには、半径 170 キロは強制移住、250 キロも避難とあった。170 キロ圏には新潟県や北関東が含まれ、250 キロ圏だと東京や横浜も含まれる。この広大なエリアで数 10 年にわたって人が住めなくなるという最悪のシナリオである。しかし、吉田昌郎所長達以下、約 70 名の現地従業員等による決死の奮闘に加えて、偶然の気象条件も幸いして、そこまで広範な被害が及ぶ事態には至らなかった。

しかし、地震時に稼働中であった 1～3号機の圧力容器及び格納容器が早い段階から損傷しており、格納容器につながっている多数の配管類にも問題があったとすると、ベント作業の有無にかかわらず、大気中への放射性物質の放出は避けられなかったのではないか。ただ、当時の原子力委員会が考えていた「最悪のシナリオ」には至らなかった。

福島第一原発がそう遠くない将来に震度 6 強とか震度 7 の揺れに見舞われると、新たな大気中への放射性物質の大量放出もありうると考えられる。そうになると、「最悪のシナリオ」も視野に入れなくてはならず、首都圏にも人が住めなくなるかも知れない。とても東京オリンピックどころの話ではなくなるだろう。

また、高濃度の放射線で汚染されていて作業員がなかなか現場に近づけないという事情のため、ロボットを用いた検査・補修の方法が検討されているが、これらの高度のロボット技術がテロ犯罪に利用されないことを願っている。

本稿をまとめるにあたり、長谷川 晃 大阪大学名誉教授と小岩昌宏 京都大学名誉教授から数多くのご助言をいただいた。このお二人の先達に厚く御礼を申し上げますとともに、本稿は、主に下記 3 冊の本を参照したことを付記する。

- (1) 大鹿 靖朗：メルトダウン ドキュメント福島第一原発事故、講談社文庫、(2013 年 2 月)。
- (2) NHK スペシャル「メルトダウン」取材班：福島第一原発事故 7つの謎、講談社現代新書 2295、(2015 年 1 月)。
- (3) 日本科学技術ジャーナリスト会議：4つの「原発事故調」を比較・検証する、水曜社、(2013 年 1 月)。