

日本の原子力発電と地球科学

Nuclear Power Plants in Japan and Earth Science

2015 年 3 月

公益社団法人日本地震学会

日本地震学会モノグラフ「日本の原子力発電と地球科学」

編集委員会

目次

はじめに・・・・・・・・末次 大輔, 川勝 均, 橋本 学, 金嶋 聡, 香川 敬生	1
1. 招待論文	
地震列島・日本の原子力発電所と地震科学・・・・・・・・石橋 克彦	3
変動帯に立地する原子力関連施設の耐震安全性評価に関わる地質学的問題 ・・・・・・・・池田 安隆	12
活断層研究と地震被害軽減・・・・・・・・渡辺 満久	20
福島第一原子力発電所の事故で発生した放射性廃棄物の処理・ 処分に内在する課題・・・・・・・・佐藤 努	26
2011 年 3 月 3 日の地震調査研究推進本部事務局と電力事業者による日本 海溝の長期評価に関する情報交換会の経緯と問題点・・・・・・・・橋本 学, 島崎 邦彦, 鷺谷 威	34
2. 一般募集論文	
原子力発電所の地震動評価研究：私の履歴書・・・・・・・・植竹 富一	45
日本地震工学会の研究ロードマップとその補遺について・・・・・・・・香川 敬生	50
2011 年東北地方太平洋沖地震による福島第一・第二原子力発電所周辺の 津波シミュレーション解析から示唆される津波波源モデルの違いによる 津波被害想定の不確定性について・・・・・・・・藤原 了, 是永 眞理子	56
福島第一原子力発電所周辺の強震動と SPGA の関係・・・・・・・・野津 厚	64
地震と原発の不都合な関係 ～強震動予測を巡って～・・・・・・・・東井 怜	70
3. 転載論文	
天然原子炉と福島原発事故 地球化学者黒田和夫の遺したもの ・・・・・・・・小嶋 稔	83

放射性廃棄物地層処分技術ワーキンググループ設立をめぐって ——日本地震学会からの回答と考え方・・・・・・・・・・加藤 照之	86
原発の基準地震動と超過確率・・・・・・・・・・浜田 信生	92
4. 関連資料	
日本惑星科学連合 JpGU Meeting 2013 ユニオンセッション U-06 「地球科学者の社会的責任」プログラムおよび第2部「原子力発電所 に関わる科学アセスメントと地球科学的知見」講演予稿・・・・・・・・	96

はじめに

2011 年東北地方太平洋沖地震による地震動と津波により、福島第一原子力発電所において炉心溶融事故が発生し、このため甚大な放射能被害が生じた。地震多発国日本における原子力発電所の設置については、地球科学に密接な関連を持つものにもかかわらず、一部の地震・地質研究者が耐震安全性の観点から関わってきたのを除いて、多くの研究者は一種のタブーとしてあえて無関心な態度をとり続けてきたように思える。私たち本モノグラフの編集者も例外ではない。福島第一原子力発電所の大事故と今も続く被害、またこれまでの発電で蓄積された多量の放射性廃棄物への対応を迫られていることは、我々が地球科学と原子力発電所の深い関係から逃げるわけにいかないことを痛感させる。

私たちは、地球科学界の中で、日本における原子力発電所の在り方について地球科学的見地からの議論を行う場をオープンにかつ継続的に設けることは、地球科学と社会とのかかわりを考える上で第一に必要な作業であると考えた。そこで 2013 年 5 月におこなわれた日本地球惑星科学連合大会のユニオンセッション U-06「地球科学者の社会的責任」の第 2 部として、「原子力発電所に関わる科学アセスメントと地球科学的知見」を企画開催した。このセッションでは地球科学の知見が立地調査や審査にどのように使われてきたかに関して、これまで立地審査に関わってこられた地球科学研究者の方々からの経験に基づくご意見を共有することができた。今後もフォーカスを変えながら、日本の原子力発電に関係するテーマのセッションを開催していきたいと考えている。

本モノグラフ「日本の原子力発電と地球科学」は、このユニオンセッションの第 2 部での講演とともに、第 1 部「東日本大震災からのメッセージ」での講演も含めた日本の原子力発電に関連する発表、そして 2014 年 6-8 月に日本地震学会会員を対象に実施した論文公募への投稿を中心に編まれている。この公募は、「日本の原子力発電に対し、立地審査や安全審査において地球科学研究がこれまでどのように関わり、今後どのように関わるべきかについての論文を募ります。また、福島第一原発事故や核廃棄物処分に関する地球科学的視点からの論文も受け付けます」という趣旨説明の下で行われた。

ユニオンセッションで日本の原子力発電に関係する講演をされた方々全員に本モノグラフへの寄稿をお願いした。最初の 4 論文は、それに応じて寄稿してくださった石橋克彦、池田安隆、渡辺満久、佐藤努の各氏の論文である。石橋氏は地震学的な見地から、池田、渡辺両氏は変動地形学的見地から日本における原子力発電が抱える問題を提起されており、佐藤氏には今も続く福島第一原発の汚染水や廃棄物の処理についての貴重な報告をしていただいた。また編集者の一人（橋本）が、日本海溝地震活動長期評価に関する国と電力事業者との情報交換の経緯について報告する。掲載した公募論文は、投稿論文のうち公募趣

旨に合致した植竹富一、香川敬生、野津 厚、藤原 了・是永眞理子、東井 怜の各氏による 5 論文である。原子力発電に関わる強震動評価や、津波評価に関する批判と改善への意見を含む多様な意見論文が寄せられた。そのほか、小嶋 稔、加藤照之、浜田信生の各氏には、それぞれ岩波「図書」、岩波「科学」、日本地震学会ニュースレターに掲載された論文を、著者の方々と各編集部の許可を得て転載させていただいた。小嶋氏の転載論文は、オクロ自然原子炉についてのユニオンセッションでの講演に沿った内容の論文である。加藤氏には核廃棄物地層処分に関する日本地震学会の対応についての報告を転載させていただいた。浜田氏の転載論文はユニオンセッションでの基準地震動設定に関する氏の質問内容を敷衍したものである。日本地震学会ニュースレターでは浜田論文掲載後も他の会員との間で基準地震動に関する議論が続けられ、それらは日本地震学会ホームページから閲覧することができる。このような議論がニュースレターでオープンに展開されることは、私たちがまさに期待していたことである。本モノグラフでは議論の発端となった浜田氏の論文のみを掲載している。巻末には日本地球惑星科学連合の許可を得て、2013 年大会予稿集から、本モノグラフ企画の元となったユニオンセッション「地球科学者の社会的責任」のプログラムと第 2 部「原子力発電所に関わる科学アセスメントと地球科学的知見」の講演要旨を転載させていただいた。

言うまでもなく、本モノグラフは日本地震学会の意見を代表する論文を掲載するという目的で編まれたものではない。むしろ会員が持つ意見の多様性が反映されたモノグラフとなっている。本モノグラフの出版により、原子力発電に関する地球科学的検討が各学会やシンポジウム、出版物等によって開かれた形でおこなわれるようになればと願っている。

日本地震学会モノグラフ「日本の原子力発電と地球科学」編集委員会
末次大輔、川勝 均、橋本 学、金嶋 聡、香川敬生

地震列島・日本の原子力発電所と地震科学

神戸大学名誉教授 石橋克彦

狭小で人口稠密な地震列島・日本は、技術が未完成で莫大な放射能を内蔵する原子力発電所の建設には適さない。ところが、地震学が古めかしくて地震活動が静穏だった 1950~60 年代に、地震・地震動・津波を甘くみた原発が計画され、増殖してしまった。現代地震学が 60 年代後半に誕生したが、事態は改善されなかった。かくして、2011 年東北地方太平洋沖地震による福島原発事故が、起こるべくして起こった。原発震災をまねいてしまった今こそ、地震列島の原発の耐震安全性を抜本的に高めるべきだが、原子力規制委員会の新規制基準はきわめて不十分である。原発震災を二度とくり返さないために、地震学は、地震現象についての最新知見を（未知の点を含めて）社会に説明し続ける責任がある。

1. はじめに

筆者は、日本地球惑星科学連合 2013 年大会のユニオンセッション「U-06 地球科学者の社会的責任」の第 2 部「原子力発電所に関わる科学アセスメントと地球科学的知見」（5 月 24 日、幕張メッセ国際会議場）において、表題の招待講演をおこなった。第 2 部の総合タイトルに適合するかどうか自信がなく、講演内容は予稿（石橋，2013）とはかなり違ってしまっただが（時間的制約もあった）、本稿では予稿を敷衍したい。

2011 年 3 月 11 日（3.11）の東北地方太平洋沖地震（ $M_w9.0$ ）によって東京電力福島第一原子力発電所 1~4 号機が同時過酷事故を起こした時点で、日本には 17 ヶ所の原子力発電所（以下「原発」、ただし、この語は個々のユニットを意味する場合もある）があり、54 基の大型発電用原子炉があった。さらに 2 ヶ所の新規の原発と、それらを含む 3 基の発電炉が建設中だった。

日本列島は、地球の表面積の 0.3% たらすが（国土と領海のほかに排他的経済水域の一部を含む）、その範囲内で地球の全地震の約 1 割が発生

する（例えば、宇津（1999）の表 16.2；図 1）。このような地震列島に全世界の発電炉の約 13%（2010 年初頭現在）が集中しているのは、異様な状況というべきであった（図 1、図 2 も参照）。

筆者は、“地震と原発”の問題に関心をもつのが遅かったが、震災論の視点からその重大性に心底気が付いてからは、「原発震災」という言葉と概念を提起して（石橋，1997；Ishibashi, 2003）警鐘を鳴らしてきた（石橋，2012a）。原発震災というのは、大地震で原発の重大事故が起こり、大規模放射能災害と通常の震災とが複合・増幅しあう破局的災害のことである。

2007 年 7 月の新潟県中越沖地震（ $M6.8$ ）で東京電力柏崎刈羽原発の全 7 基の原子炉が強震動被害を受けたのち、筆者は、日本列島が大地震活動期に入っているという認識も踏まえて、この事態は大自然が日本人に発したポツダム宣言にも擬せられ、これを無視すればヒロシマ・ナガサキにつぐ第三の大量被曝である原発震災を生じかねないと述べた（例えば、石橋，2008）。しかし、この懸念は日本社会にまったく届かず、わずか 4

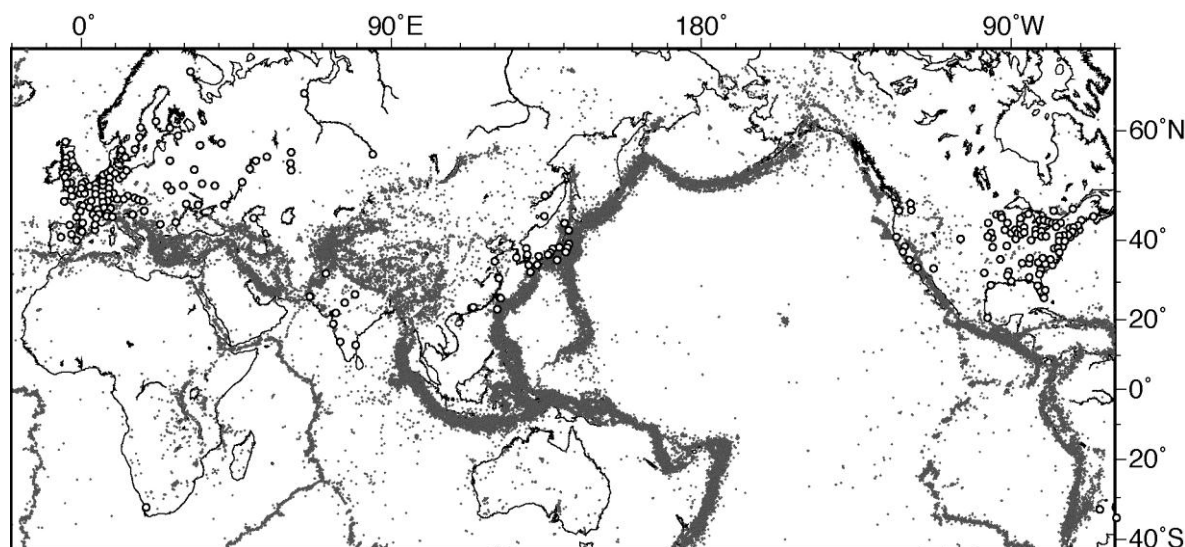


図 1 世界の地震と原子力発電所の分布。グレーの点は、1990 年 1 月 1 日から 2013 年 11 月 30 日までの $M4.0$ 以上、深さ 40 km 以下の地震 15 万 8761 個の震央を、米国地質調査所の PDE と QED によってプロットしたもの（作図：原田智也）。白丸は、2010 年 1 月現在の世界の原子力発電所（原子力資料情報室（2010）による。ブラジルの原発 1 ヶ所が図の外側にある）。

年たらずで、最悪レベルではなかったが、3.11の「福島原発震災」が起きてしまった。

このような事態を招いた責任は日本の地震科学界にもあるだろう。そのような観点から日本の原発の耐震安全性の問題を振り返り、今後の課題を考えてみたい。ただし、本稿は試論の段階であり、取り上げるのは問題の一部だけである。

2. 日本の原発の地震脆弱性

筆者は、日本の既存の原発は、①地震科学の進歩、②地震活動の消長、という二つの重要な要因のそれぞれが、原子力開発利用と皮肉な巡り合わせになったために、地震国でありながら「地震に弱い」という宿命を背負ったと考えている。

①に関しては、原発が本格的に新・増設され始めた1960年代から70年代前半が、現代地震学の2本柱である“地震の断層模型論”とプレートテクトニクスの誕生・普及の前夜だった。活断層研究もまだ盛んではなかった。まして、日本で最初の商用原子炉が計画・着工された1950年代後半は、古色蒼然たる地震学の時代であった。そのために、活断層やプレート境界巨大断層の直近に原発が建てられ、古めかしい地震学の知識にもとづいて地震と地震動と津波が甘く想定された。

福島第一原発1号機についても、設置が許可された66年当時は、それが東北日本の陸のプレートの最前線付近に位置し、足元に太平洋プレート

が沈み込んでいて、目の前にプレート境界巨大断層が存在するなどとは思ってもよらなかった。

②に関しては、原発建設ラッシュの時期が日本列島の地震活動静穏期で、大地震の洗礼を受けないまま原発が増えてしまった。工学者は、地震の最大級の威力を知ることなく、工学技術で耐震性が確保できると慢心した。なお、“大地震の活動期と静穏期”というのは、厳密に認定するのはむずかしい。統計的検定の対象にならないわけではないが、空間範囲の取り方などに任意性があり、任意性を排除しようとする地学的に無意味になりかねない。それにもかかわらず、例えば日本列島のある範囲ないし全域で、大地震が続発した時期と散発的だった時期とが認められる。

以上の2点は、現代地震学の知見が工学分野に普及した段階で、また予期していなかった激しい地震現象を経験した段階で、既存原発の耐震安全性を見直して抜本的に改善すればよかったのだが、それがなされなかった。また地震学の側は、最新の知見を工学や社会に速やかに伝えようとする熱意が乏しかったように思える（これは、長周期地震動に関しても言えることである；例えば、石橋、2012d）。以上の状況は、2012年9月に原子力規制委員会が新設された以降も変わっていない。したがって、日本中の原発と核燃料施設（図2）が、依然として、耐震強度を超える地震動や大津波や地盤の変形・破壊を受けて大事故に至る

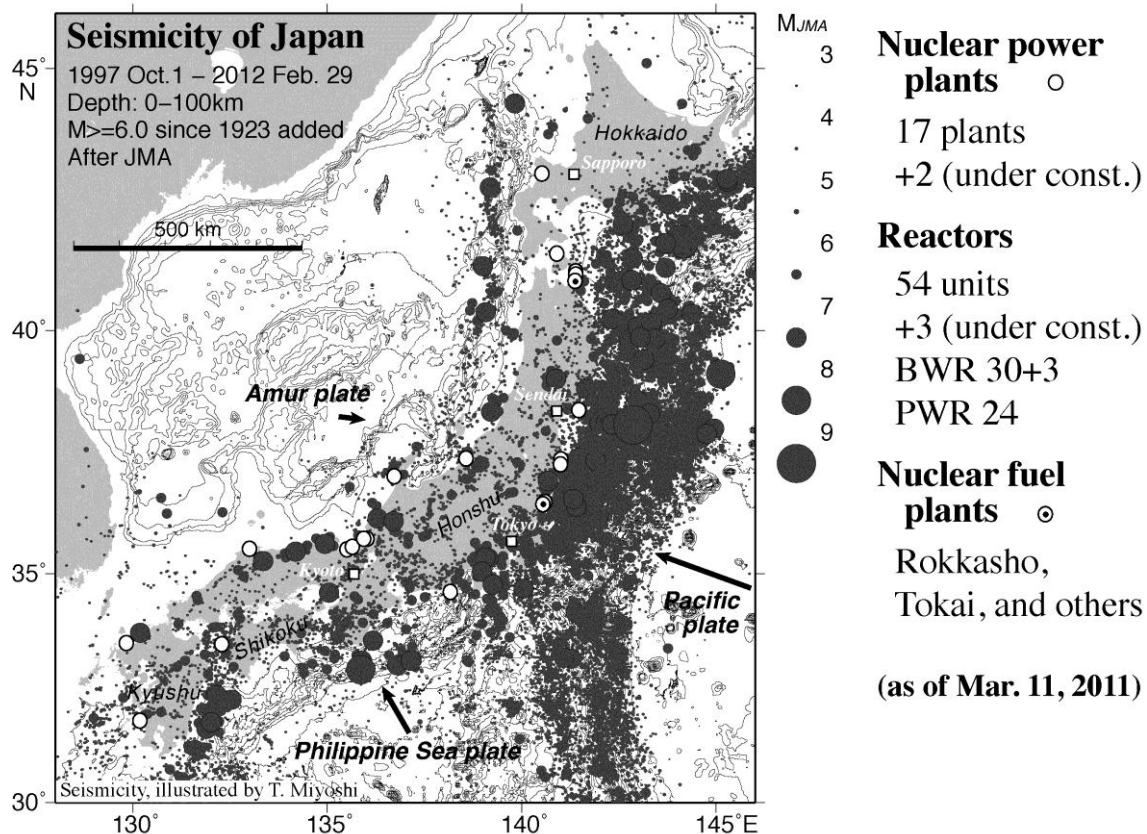


図2 日本列島付近の地震活動（気象庁のデータによる。作図：三好崇之）と日本の原子力発電所（白丸）および主要な核燃料施設（目玉印）。

可能性をもっていると考えられる。

3. 原発の耐震基準の変遷と地震・地震学

前節で述べたことを具体的に確認するために、原発の耐震基準の変遷を、福島第一原発に注目しながら概観し、関連する事項を略述する。紙数の関係もあり、本稿では津波には触れない。詳しくは石橋（2011c）や東京電力福島原子力発電所事故調査委員会（2012a；以下「国会事故調報告書」）を参照されたい。

3.1 出発点

日本の原子力開発利用は、政治家主導による原子力予算の突然の成立（1954年4月）によって始まった（例えば、吉岡，2011）。商業発電用原子炉の第1号は、紆余曲折を経て、日本原子力発電（以下「原電」、57年11月設立）の東海発電所（茨城県東海村）のものとなった（66年7月営業運転開始，98年3月運転終了）。

これはイギリスのコールダーホール型炉（天然ウラン燃料黒鉛減速炭酸ガス冷却型，GCR，Gas-cooled Reactor）の改良型（電気出力16.6万kW）である。56年から導入の動きが強まったが、イギリスの設計が地震をまったく考慮していないことが問題で，57年1月の日本学術会議主催の第1回原子力シンポジウムでもこの点が議論になった（例えば、中島・服部，1975）。

原子力委員会（56年1月発足）は57年3月に原子炉地震対策小委員会（委員長は、のちに霞ヶ関ビルの構造設計をした武藤清）を設置し、旧建設省建築研究所に新設された振動台による炉心の模型実験、東京大学工学部と早稲田大学理工学部での模型実験、東京大学地震研究所による東海村の地盤調査などもおこなった。同小委の仕事は原電に引き継がれ、武藤を団長とする耐震設計調査団が渡英してイギリス側と協議を重ねた。59年3月に、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」（原子炉等規制法，57年12月施行）に従って設置許可申請書を提出してからも、設計変更がくり返されたが、59年12月に設置許可がおり、60年1月に着工された。

東海原発の安全審査をつうじて浮き彫りになったのは、審査基準がまったくないことと、審査の中立性が確保されていないこと（審査委員のかなりが、審査される原電側の委員や技術顧問を兼任）だった（中島・服部，1975）。政府・電力会社・メーカー・学者が挙国一致で原発建設に邁進したという実情のなかで、安全審査は形式的な一コマに過ぎなかったから、当然といえば当然なのだが、とくに審査の非中立性は、現在まで続いている悪弊である。

安全論争に熱心だったのは素粒子論グループを中心とする物理学者たちだった。地震問題が中核の一つだったわけだが、地震学界の動きはわか

らない。東大地震研所長的那須信治がほとんどあらゆる局面に参加しているが、当時の地震学の実力も関係してか、表立った働きはみえない。ただし大崎（1987）が、「この発電所の設計計画に当たっては、河角・那須・金井ら当時の第一線にあった地震学者が、十分な工学的センスをもって、全面的な協力を惜しまなかった事実も、耐震工学史に特筆すべきことであろう」と述べている。

第1号原発の建設には非常に多くの問題があったが、地震と縁のないイギリス製のものだったために、はからずも耐震設計に関しては日本人がゼロから独自の方策を創ることになった。前述の地震対策小委の報告書には、原発の耐震設計の根本方針として、地震の際に①放射能に対する公衆および従業員の安全を保証する、②修理が困難な部分および致命的重要部について十分な強度と供用性を保証する、の2点が明示され、その後の原発耐震設計の基礎となった。基本的に剛構造にすることや、建物・構造物の重要度に応じて耐震設計の厳しさを変えることなども記された。

耐震設計は、基本的に日本の建築基準法に準拠した静的震度法によったが、補助的に動的解析がおこなわれた（大崎，1987）。再現期間を100年としたときの地表における最大加速度の期待値は約150Gal、深さ約20mの支持岩盤上では50～70Galと推定された。しかし、後述の旧指針による基準地震動S2の最大加速度は380Galであり、さらに78年11月に営業運転を開始した東海第二原発の新指針によるSs（後述）の最大加速度は600Galだから、初期の推定は非常な過小評価だったといえる。なお、3.11の東北沖超巨大地震による東海第二原発の地震動は、一部の周期帯でSsを上回った（原子力安全・保安院，2011）。

3.2 耐震基準の模索

コールダーホール型原子炉は多くの問題があったため、日本の2番目以降の原発はすべてアメリカ製の軽水炉（減速材・冷却材として普通の水を用いる）になった。原電敦賀原発1号機（福井県敦賀市、沸騰水型、BWR，Boiling Water Reactor）が66年4月に、東京電力福島第一原発1号機（BWR）と関西電力美浜原発1号機（福井県美浜町、加圧水型、PWR，Pressurized Water Reactor）が66年12月に、それぞれ設置許可を受け、やがて原発建設ラッシュを迎える。

耐震設計に動的解析が取り入れられるようになり、入力地震動は原発ごとに独自の手法で検討された。敦賀1号機は1948年福井地震（M7.1）を考慮し、368Galの最大加速度をもつ地震動に対してもAsクラスの最重要施設が安全機能を保持できるとした（As，A，B，Cという重要度分類が初めて用いられた）（大崎，1987）。これにたいして福島第一1号機では、「福島県近辺は、会津付近を除いて全国的に見ても地震活動性（サイスミ

シティ)の低い地域の一つにあたっており、とくに原子炉敷地付近は、地震による被害をうけたことがない」(原子力委員会原子炉安全専門審査会の66年11月の報告)とされ、機能保持検討用地震動の最大加速度は265Galだった。

耐震設計の基準に関しては、61年頃から通商産業省(現経済産業省)を中心に(事業者用の)技術基準の整備が進められ、70年10月には日本電気協会(電気関連事業者で構成される社団法人)の電気技術基準調査委員会原子力専門委員会耐震設計分科会がとりまとめた『原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1970』が公開された。これは、官・学・民の総力を挙げて作った感がある(のちに何度か改訂された)。

この時期に地震学会内で原発の耐震設計基準に言及した文献として金井(1967)がある。700字弱の短いものだが、「いわゆる strongest probable earthquake は何とか目安をつけられるにしても、strongest possible earthquake を想定することは容易でない」、「この関係では、まだ基準というものが作成されていないばかりでなく、基準を作成するという考え方自体にもいろいろ批判がある」、「既に得られている強震計の記録から類推すると地震動の最大加速度は非常に大きな値になり、実用の域を越えそうであるから、過去の大地震で構造物におこった現象を重んじるべきである」という考えは、一般構造物の場合には、相当程度とり入れている。ところが、原子力施設は高度の安全性が要求されるのに過去の事例を求めることができないところに、議論の分れるもとがある」などと書かれていて、耐震安全性の担保がかなり不十分なまま原発建設が進められたことがうかがわれる。

3.3 旧指針と耐震バックチェック

1978年9月になってようやく、原子力委員会が「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」を策定した。翌月に原子力安全委員会(以下「安全委」)が発足し、81年7月に同委が建築基準法の改正を取り入れて、あらためて同指針を決定した(以下「旧指針」)。これは、原発の新・増設の安全審査の際に耐震設計方針の妥当性を評価するためのものである。ここでは、地震動に関することだけをみておこう。

耐震設計用の地震動は、解放基盤表面(基盤に仮想したほぼ水平で相当の抗がりのある自由表面)において2種類策定することとされた。それらは、設計用最強地震(将来起こりうる最強の地震;過去の地震とA級活断層の一部を考慮)による基準地震動S1と、設計用限界地震(およそ現実的ではないと考えられる限界的な地震;5万年前以降に活動した活断層と地震地体構造を考慮)による基準地震動S2(M6.5の直下地震も想定)である。そして、重要度分類Aクラスの施

設はS1にたいして弾性範囲内にとどまること、Asクラスの施設はS2で一部塑性域に入ってもよいが安全機能を保持することを求めた。

旧指針は、それまでの安全審査の経験を踏まえたものではあるが、以前に設置許可された原発の耐震安全性を旧指針に照らして評価する「耐震バックチェック」を、規制庁(当時は資源エネルギー庁)は速やかにおこなうべきであった。しかし、その指示が事業者に出されたのは旧指針決定から11年も経過した1992年であり、その結果が公表されたのは1995年の阪神・淡路大震災のあとだった(東京電力福島原子力発電所事故調査委員会, 2012b)。

福島第一原発について東京電力は、S2の最大加速度を370Galとした。そして、S2より求めた模擬地震波を入力しても施設の安全機能は維持されると報告した。しかし、1~6号機のいずれにおいても、重要な配管の評価点に、発生応力値の許容値にたいする割合が70%を超えるような点が複数存在し、約90%以上の箇所もあった。しかも計算に際して、減衰定数が原設計より引き上げられていた(東京電力福島原子力発電所事故調査委員会, 2012b)。地震動がS2を超えた場合の安全性に疑問を投げかける結果といえる。

3.4 新指針と耐震バックチェック

1995年の阪神・淡路大震災によって耐震工学にたいする国民の不信感が一挙に高まり、原発は大丈夫かという不安が増大した。また、旧指針は地震科学の最新知見からみて古すぎるのではないかという疑問も強くなった。安全委は、2001年7月によりやく耐震指針検討分科会(以下「分科会」)を設置して旧指針の改訂作業を始め、5年以上をかけて2006年9月に新たな「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」(以下「新指針」)を決定した(例えば、石橋, 2007)。なお、筆者も01年12月の第4回分科会から委員になり、信頼性の高い新指針ができるように努力したが、審議の進め方と最終案に到底納得できず、06年8月28日の第48回(最終回)の途中で辞任・退席した。

新指針は、基本的な考え方は旧指針と同じである。旧指針から大きく変わった点は、基準地震動(Ssに一本化)、地震動評価法(断層モデルを用いた手法を重視)、活断層の評価期間(過去5万年間から12~13万年間に拡張)、鉛直方向の地震動の個別評価、耐震重要度分類(AおよびAsクラスをSクラスに統合)、地震随伴事象(周辺斜面崩壊等と津波)の考慮を明記、「残余のリスク」(基準地震動を上回る地震動によって施設に重大な損傷が発生して放射能災害が生じるリスク)の明示、などである。

旧指針の、M6.5直下地震を想定した基準地震動(最大加速度375Gal)に代わるものとして、

新指針では「震源を特定せず策定する地震動」が導入され、マスメディアなどでは厳しくなったようにいわれた。しかし、「震源と活断層を関連付けることが困難な」過去の内陸地殻内地震の観測記録を参照することとされ、いっぽうで強い地震動を観測した過去の地震の幾つかを“活断層と関連づけられる”として除外した加藤・他（2004）の論文が模範解答的に出たので、最大加速度は結局 450 Gal 程度にしかならなかった。

筆者は、「震源と活断層を関連付けることが困難な」という規定は恣意性を許すから「明瞭な地表地震断層が出現しなかった過去の内陸地殻内地震」に修正することを主張したが、通らなかった。国会事故調報告書が明らかにしたところによれば、全電力会社が加わる電気事業連合会（電事連）が、指針の大幅な改訂は既設炉の存続や原発訴訟に悪影響が出るからと裏で強く干渉し、分科会で特定委員に電事連の意向を代弁させたりしたが、「震源を特定せず策定する地震動」に関しても 450Gal に抑えるべく裏工作をした（石橋，2012e）。指針改訂が 2001 年まで始まらなかったのも、電事連が周到な準備をしていたためで、規制庁側（資源エネルギー庁と安全委）も協力していた（石橋，2012e）。

新指針決定の翌日、旧原子力安全・保安院（以下「保安院」；2001 年新設）が原子力事業者にたいして、既存原発の新指針に照らした耐震バックチェックの実施を求めた。福島第一原発に関しては、5 号機の耐震バックチェックの中間報告の審議が 09 年に終わり、最大加速度 600Gal の基準地震動 S_s にたいして耐震安全性が確保されているとされた。しかし実際は、安全性が評価されたのは限られた設備の限られた部位にすぎなかった。国会事故調報告書によれば、東京電力は、3.11 原発事故の直前の時点でも、新指針の要求を満たさない機器・配管系が多数あることを把握しながら耐震補強工事をほとんど実施していなかった。すなわち、最大加速度 600Gal の基準地震動 S_s に耐えられるとはいえない状態で巨大地震の地震動を受けたのである。ほかの原発でも耐震バックチェックと耐震補強工事の不備が残っていないかどうか、確認する必要がある。

4 起こるべくして起きた福島原発事故

福島原発事故は、人類史上初めての「原発震災」を生じてしまった。事故直後から東電と政府は、事故は大津波によるもので想定外だと決めつけ、大方のマスメディアもそれを受け入れて、それが日本の政府と社会の公式見解になっているようである。しかし筆者は、日本のどの原発でいつ起きても不思議ではない事態がたまたま 3.11 に福島で起きたのであって、けっして想定外ではなく、また激しい地震動によって重大事故が始まった可能性を否定できないと考えている。

筆者は、1998 年 10 月のエントロピー学会第 16 回シンポジウム特別講演で「厳しい地震情勢の日本列島に、地震現象をきわめて甘くみた原発がほぼ満遍なくばらまかれている。どれかが当たる確率は低くないでしょう。そこに暮らしている私たちは、まさに風前の灯火といっても過言ではないと思います」と述べたが（石橋，2012c）、たまたま 2011 年 3 月 11 日に福島第一原発が「当たってしまった」のだと思う。

元原子炉压力容器設計者の田中三彦は、事故発生翌日午後に水素爆発を起こした 1 号機について、激しい地震動によって配管の破損が起こり、津波や電源喪失とは関係なく、重大な「冷却材喪失事故」（LOCA, Loss of Coolant Accident；核暴走と並ぶ過酷事故）が発生したと、事故直後から推測している（田中，2011a~e, 2012）。筆者も、福島第一原発における地震記録からみても、地震動で重大な損傷が生じた可能性は十分あると考えてきた（石橋，2011a, b, 2012b; Ishibashi, 2011）。

国会に設置された「東京電力福島原子力発電所事故調査委員会」（国会事故調；田中三彦と筆者も委員を務めた）の報告書（前出の国会事故調報告書；2012 年 7 月提出）は、「結論と提言」で「当委員会は、事故の直接的原因について、『安全上重要な機器の地震による損傷はないとは確定的には言えない』、特に『1 号機においては小規模の LOCA が起きた可能性を否定できない』との結論に達した」と述べている。また「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について（中略）少なくとも 1 号機 A 系の非常用交流電源喪失は、津波によるものではない可能性があることが判明した。全交流電源喪失は津波による浸水と断定する前に、このような基本的な疑問に対する筋の通った説明が必要である」とも記している（第 2 部，2.2）。

図 3 に、3.11 東北沖地震による福島第一原発の揺れがどんなものだったかを示す（1~4 号機側の敷地南部）。(b) の“はぎとり波”（観測波から推計された解放基盤表面での地震動）を (c) の基準地震動と比べると、実際の揺れの最大加速度（675Gal）が基準地震動のそれ（600Gal）を上回ったことと、実際の振動継続時間が基準地震動よりもずっと長かったことがわかる。 S_s -2H は全体でも 60 秒ほど、強い揺れ（300Gal 程度以上）は 20 数秒ほどにすぎないのにたいして、“はぎとり波”では、かなりの揺れが 120 秒程度、強い揺れに限っても 50 秒以上続いている。これは、原発施設全体に“繰り返し荷重”として厳しく作用し、疲労破壊を起きやすくしただろう。また床応答スペクトルを大きくして原子炉建屋各階の機器・配管系への影響を増大させる傾向をもつ。応答スペクトルでみても、実際の地震動が、いくつかの周期帯で基準地震動を上回っている。

基準地震動による原子炉建屋基礎版（地下 1

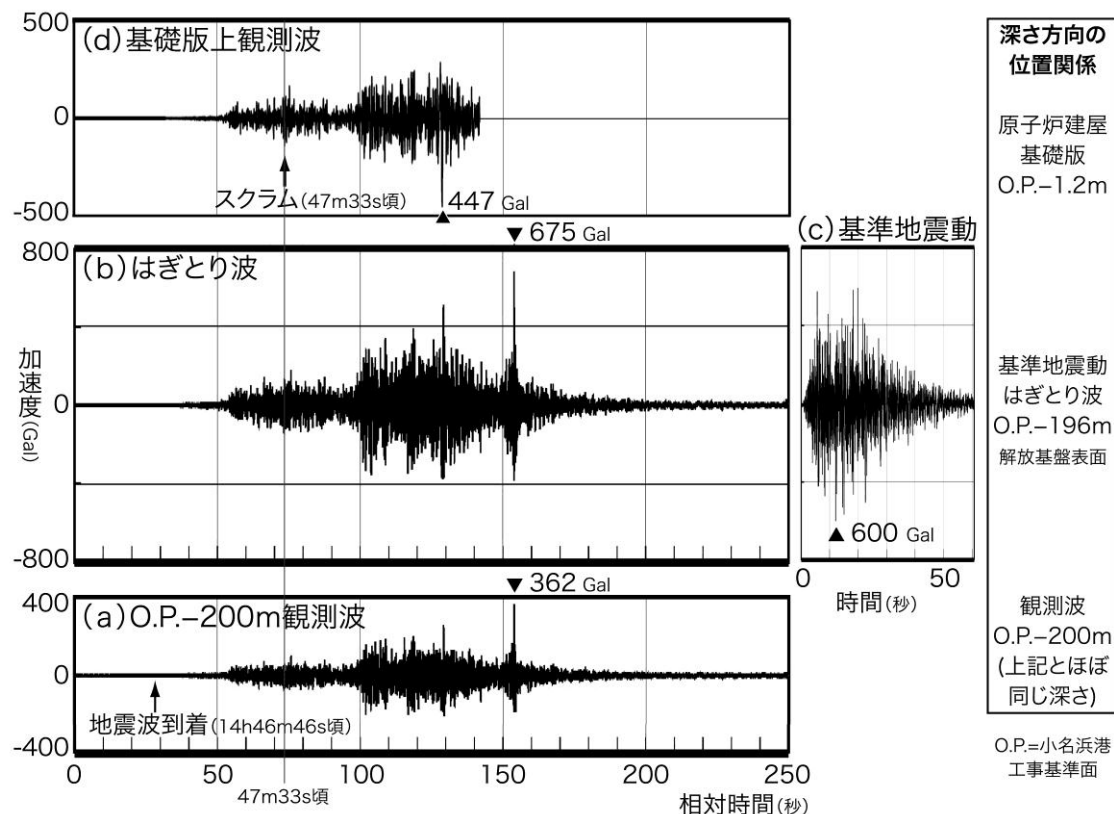


図3 東北地方太平洋沖地震による福島第一原発の揺れと基準地震動の加速度時刻歴波形(1例)。(a) 自由地盤系南地点の O.P.-200 m の観測波(EW 方向)。(b) 左記の“はぎとり波”(EW 方向)。(c) 基準地震動 Ss-2H(Ss-2 の水平成分)。(d) 1 号機原子炉建屋基礎版上の観測波(EW 方向)。横軸はある時刻からの経過時間、縦軸は加速度で、ともにスケールをそろえてある。▼または▲と数字は、それぞれの波形の最大加速度の位置と絶対値。石橋 (2012f) の図3 (国会事故調報告書の図 2.2.1-1 を一部改訂) を転載。出典等は報告書を参照。

階の床)での揺れの最大値(最大応答加速度)は、2・3・5 号機の EW 方向でそれぞれ 438, 441, 452 Gal と計算されていたが、観測された最大加速度は、それぞれ 550, 507, 548 Gal で、最大応答加速度を 15~26% 上回っていた。ほかの号機や NS 方向のいくつかも最大応答加速度に近かった。

図 3(d) でわかるように、基礎版上の観測波は途中で切れている。記録装置の不具合によるとのこと、他の成分・号機でもほとんど同様である。東京電力と保安院は、このような観測地震波を入力した地震応答解析の結果から安全機能は保持されたとしたが、“はぎとり波”からみて記録中断後にも強震動が続いたはずで、結論には納得できない。その他ごく限られた目視調査なども加えて彼らは全号機で重要機器の地震動による損傷はなかったと推測したが、非常に問題が多く説得力はない(詳細は国会事故調報告書を参照)。

要するに、運転中だった 1~3 号機の原子炉は自動的にスクラム(原子炉緊急停止)したが、その約 30 秒後に激しい揺れが襲い、想定を大きく超える長時間続いた。したがって、“止める”機能が働いたからといって、原発が地震動で無事だった(“冷やす”と“閉じ込める”)機能も保持さ

れた)とはいえない。基準地震動にたいするバックチェックと耐震補強がほとんど未了だった事実を考え合わせると、むしろ、安全上重要な機器・配管系が地震動で損傷した可能性を否定できない。格納容器の中に入って検証できるのはずっと先のことだが、その可能性を排除せずに現段階でできるかぎりの検討をすべきであろう。

田中(2013)は、国会事故調が 2012 年 7 月に終了したあとも検討を続け、1 号機原子炉建屋の水素爆発が 5 階で起きたとされているが最初は 4 階で生じた可能性が高いこと、4 階の水素は非常用復水器(IC)の配管が地震動で損傷したことによって供給された可能性が高いこと、を改めて指摘した。国会事故調の協力調査員だった伊東良徳は、東京電力が 2013 年 5 月に初めて公表したデータも用いて、1 号機の非常用交流電源の A 系・B 系ともに電源喪失の原因は津波着岸前に生じていたことを論証した(伊東, 2013)。

5 原子力規制委員会の新規規制基準の問題点

2012 年 9 月に、それまでの原子力安全・保安院と原子力安全委員会に代わって、原子力規制委員会と事務局の原子力規制庁が発足した。13 年 7

月には、改正された原子炉等規制法にもとづく原子力規制委員会規則として、「新規制基準」（以下「新基準」）が施行された。これは世界でもっとも厳しい安全基準などといわれる。しかし、実際はきわめて問題が多く、地震関係にかぎっても、原発の安全性を保証できない基準である。

新基準は「深層防護」を徹底するとしている（原子力規制委員会，2013b）。深層防護というのは、IAEA（国際原子力機関）が原子力施設の事故防止と事故の影響緩和のために推奨している「安全対策の多段階設定」という考え方である。具体的には5層からなり、第1層は安全を重視した余裕ある設計と高品質の建設・運転、第2層は設備の監視・制御・保護のシステム、第3層は想定事故を起こさず、もし起きてしまったときは重大事故（シビアアクシデント）に進展しないための工学的安全設備と事故対応手順、第4層は重大事故が起きてしまったときの施設内での対策、第5層は放射性物質が外部環境に放出されてしまった場合の施設外での緊急時対応、となっている。ここで非常に重要なのは、各階層が、前後の階層に期待せずに最善の安全対策を尽くすことと、自分の前の階層が破られると思って防護対策を講じることである。

ところが新基準は、（耐震安全性に話をかぎるが）第1層が致命的に甘い。例えば3.4で述べた「震源を特定せず策定する地震動」の抜本的改善を期待したが、基本的に新指針を踏襲しており、「震源と活断層を関連づけることが困難な」という表現は変わっていない（原子力規制委員会，2013a）。従来模範解答的に参照されてきた加藤・他（2004）に代わる形で「収集対象となる内陸地殻内の地震の例」が表掲されて少し改善されたが、2007年新潟県中越沖地震による柏崎刈羽原発1号機の解放基盤表面での最大加速度が1699Galだった（原子炉建屋基礎版での観測記録からの推計；例えば、東京電力株式会社，2008）ことからみれば非常に不十分である。

このままでは、今後“想定外”の地震動によって事故が起こり、第2・3層の設備・システムも耐震性不足で重大事故に至ってしまうことがあるだろう。そのときは新基準で新たに追加された第4層（従来の安全指針体系では第3層までしか考えていなかった）で対応するというのだが、要するに、重大事故が起きてよい、応急的対応で放射能放出をギリギリで食い止めるという（大地震と余震のなかでは失敗が懸念される）非常に危険な規制基準だといわざるをえない。

国会事故調報告書は「事故の直接的原因」についての結論に、「しかし未解明な部分が残っており、これについて引き続き第三者による検証が行われることを期待する」と付言している。しかし規制委は、この問題を真剣に調査しようとせずに、事故原因が不明なまま、地震動を軽視した基準を

作ったわけである（規制委には「東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会」<https://www.nsr.go.jp/committee/yuushikisya/jiko_bunseki/>があるが、そこでの1号機原子炉建屋4階に関する聴き取り調査などが杜撰であることを田中（2013）が指摘している）。

原子力委員会が1964年に安全審査の基礎として定めた「原子炉立地審査指針」（原子力委員会，1964）が新基準でまったく無視されているのも大きな問題である。この指針は現実には有名無実だったが、安全審査の際に立地条件の適否を判断するためとして、「(1)大きな事故の誘因となるような事象が過去においてなかったことはもちろんであるが、将来においてもあるとは考えられないこと。また、災害を拡大するような事象も少ないこと」を原則的立地条件としている。筆者は旧指針改訂の分科会で、「原子炉施設は、直下に過去または将来の浅い大地震の震源域が存在すると高い確度で判断される場合、その場所への設置を避けなければならない」と基本方針に明記することを提案したことがあるが（石橋，2007，第2回）、このような基本的立地条件を新基準に盛り込むべきだったと思う。立地審査指針は、原則的立地条件の(2)(3)で公衆の放射線被曝からの安全確保もうたっている。これも本質的に重要なことだが、新基準では無視された。

6. 使用済み核燃料の処分と地震現象

原発の利用と不可分な根本的課題として、使用済み核燃料の処分がある。いまの日本では再処理を実施し、生じた高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）を地層処分することになっている。

しかし、変動帯・日本で地層処分が可能（10万年後まで安全）だとは、地震学からは言えないと筆者は考えている。地震の影響としては、震源断層面のズレの直撃、強震動、ひずみ・応力の変化があるが、特定の処分場候補地が、今後10万年間これらの影響を受けないかどうかという予測は、現在の地震学の守備範囲を超えているからである（詳細は、石橋克彦「私の考え：地震学からみた高レベル放射性廃棄物地層処分について」<<http://historical.seismology.jp/ishibashi/opinion/chisoushobun.html>>を参照されたい）。

ただし、そもそも日本列島で地層処分が可能かどうかに関して、あらゆる関連学協会による常設研究会のようなものを日本地球惑星科学連合のなかに設置してもよいのではないだろうか（連合大会で2000年から地層処分のセッションが続けられているが、基本的に実施を前提にした基礎的・技術的研究発表の場である）。

7 結語—原発耐震論はトランス・サイエンス

福島原発事故までの日本の地震科学は、総体として、地震と原発に関する地震科学的基本知識

(背景知識)を社会に提供することに熱心ではなかったと思われる。しかし原発の場合、「立地条件が安全確保の第一歩」といえるから、地震列島の原発の安全性について一般市民の関心や懸念が高まれば、地震科学の最新知見と未解明の点を説明する責任があるだろう。1995 年阪神・淡路大震災と 2007 年柏崎刈羽原発地震被災は大きな節目だったが、地震科学界には特段の動きはなかった(95 年は筆者も無関心だった)。

社会的問題は往々にして政治的色彩が強くなるので、中立を保つために関わらないほうがよいという感覚が強いかもかもしれないが、石橋(2000, 2012d)が指摘したように、中立を守るといって沈黙をきめこむこと自体が一つの政治的效果をもたらすことに注意しなければならない(“原発と地震・津波”に関して地震学者が何も言わなければ、現状で安全だというに等しくなる)。注意深さが不要ないとはいわないが、科学的成果に忠実であることと、それを誠実に社会に還元するという姿勢が基本的に重要だろう。

最後に、きわめて重要なのは、ある特定の原発サイトで想定すべき最強の地震動はどのようなものかといった問題は、現在の地震科学では客観的に解答できないということである。この種の問題は、A. Weinberg が提唱した「トランス・サイエンス」(科学によって問うことはできるが、科学によって答えることのできない問題群からなる領域；例えば、小林, 2007)の典型例である。専門家は、幅のある予測と可能性の程度などを提示して(よく確率的にしか答えられないといわれるが、意味のある確率を付与すること自体が困難な場合が多い)、最終的には利害関係者や関心ある人々や社会全体が科学以外の基準(例えば、予防原則)によって決めるべきであろう。日本の現状では、専門家が“科学的に”一意的に決定できるという感覚が根強いが、それに荷担せず、その感覚を正していく努力が必要であろう。

謝辞：図の一部を作ってくださった原田智也・三好崇之両氏に感謝いたします。

文 献

原子力安全・保安院, 2011, 日本原子力発電株式会社東海第二発電所における平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震観測記録のはざとり解析について, 平成 23 年 11 月 8 日, <<http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/shingikai/800/26/004/4-3.pdf>>, (参照 2014-1-25).

原子力委員会, 1964, 原子炉立地審査指針及びその適用に関する判断のめやすについて, <http://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/nc/t19640527001/t19640527001.html>, (参照 2014-1-25).

原子力規制委員会, 2013a, 基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド, <http://www.nsr.go.jp/nra/kettei/data/20130628_jitsuyoutaishin.pdf>, (参照 2014-1-25).

原子力規制委員会, 2013b, 実用発電用原子炉に係る新規制基準について一概要, <http://www.nsr.go.jp/committee/kisei/data/0013_08.pdf>, (参照 2014-1-25).

原子力資料情報室(編), 2010, 原子力市民年鑑 2010, 七つ森書館, 330 pp.

石橋克彦, 1997, 原発震災—破滅を避けるために, 科学, **67**, 720-724, <https://www.iwanami.co.jp/kagaku/K_Ishibashi_Kagaku199710.pdf>, (参照 2014-1-25).

石橋克彦, 2000, 災害科学としての地震学のあり方—大災害を未然に防ぐ批判精神を, 日本地震学会講演予稿集2000年度秋季大会, A64.

石橋克彦, 2007, 原子力発電所の耐震設計審査指針改訂の諸問題, 第 1 回 指針改訂の審議を振り返る, 第 2 回 基準地震動を考える(1)および 2007 年新潟県中越沖地震, 第 3 回 基準地震動を考える(2)とまとめ, 科学, **77**, 884-890, 920-929, 1206-1217.

石橋克彦, 2008, 核施設の地震災害リスクについての基本的考え方(日本の原子力発電所の地震リスクの諸問題), ワークショップ「柏崎刈羽原子力発電所地震災害の政策的意味」, 科学技術社会論学会 2008 年度年次研究大会予稿集, <<http://jssts.jp/annualmeeting/2008/proceeding/session21/A-2-1-WS-set.pdf>>, (参照 2014-1-25).

石橋克彦, 2011a, 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**, 411-416.

石橋克彦, 2011b, 地震列島の原発, 石橋克彦(編)「原発を終わらせる」, 岩波書店, 115-128.

石橋克彦, 2011c, 原子力発電所の耐震問題, 吉岡斉(編)「[新通史]日本の科学技術 第 1 巻」, 原書房, 356-380.

石橋克彦, 2012a, 原発震災—警鐘の軌跡, 七つ森書館, 334 pp.

石橋克彦, 2012b, いまこそ「地震付き原発」との訣別を, 「原発震災—警鐘の軌跡」, 七つ森書館, 13-30.

石橋克彦, 2012c, 巨大地震と原発, 「原発震災—警鐘の軌跡」, 七つ森書館, 77-97.

石橋克彦, 2012d, 「地震学会は国の施策とどう関わるか／地震学研究者・コミュニティの社会的役割とは何か」についての私見, 東北地方太平洋沖地震対応臨時委員会(編)「地震学の今を問う(東北地方太平洋沖地震対応臨時委員会報告)」, 日本地震学会, 23-25.

石橋克彦, 2012e, 電力会社の「虜」だった原発耐震指針改訂の委員たち—国会事故調報告書の衝撃, 科学, **82**, 841-846.

石橋克彦, 2012f, 地震列島の原発の必然的帰結としての“福島原発震災”, 黒田光太郎・井野

- 博満・山口幸夫（編）「福島原発で何が起きたか—安全神話の崩壊」, 岩波書店, 19-26.
- 石橋克彦, 2013, 地震列島・日本の原子力発電所と地震科学, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会予稿集, U06-09, <<http://www2.jpgu.org/meeting/2013/session/PDF/U-06/U06-09.pdf>>, (参照 2014-1-25).
- Ishibashi, K., 2003, Genpatsu-shinsai: Catastrophic multiple disaster of earthquake and quake-induced nuclear accident anticipated in the Japanese Islands, presented in Session JSP11 (Geophysical risk and vulnerability: The population-hazard interaction) in the 23rd. General Assembly of IUGG, <http://historical.seismology.jp/ishibashi/opinion/0307IUGG_Genpatsu_Abstract.pdf>, (参照 2014-1-25).
- Ishibashi, K., 2011, The Fukushima Genpatsu Shinsai (Earthquake-Nuclear Combined Disaster): Take the best possible measures to quickly resolve the problem in the aftermath of reckless disregard of the forces of nature, Japan Echo Web (Print Digest), June-July 2011, 70-81, <<http://www.japanpolicyforum.jp/en/archives/others/pt20110729174705.html>>, (参照 2014-1-25).
- 伊東良徳, 2013, 福島原発 1 号機の全交流電源喪失は津波によるものではない, 科学, **83**, 1045-1054.
- 金井 清, 1967, 第 8 章 耐震設計基準 (日本) と地震学 §8.7 原子力発電所 (案), 地震 2, **20**, no. 4 「特集号 日本の地震学の概観」, 320-321.
- 加藤研一・宮腰勝義・武村雅之・井上大榮・上田圭一・壇一男, 2004, 震源を事前に特定できない内陸地殻内地震による地震動レベル—地質学的調査による地震の分類と強震観測記録に基づく上限レベルの検討, 日本地震工学会論文集, **4**, no.4, 46-86, <http://www.jaee.gr.jp/stack/submit-j/v04n04/040403_paper.pdf>, (参照 2014-1-25).
- 小林傳治, 2007, トランス・サイエンスの時代, NTT出版, 296 pp.
- 中島篤之助・服部 学, 1975, コールダー・ホール型原子力発電所建設の歴史的教訓 I, 原子力安全問題研究会 (編) 「原子力発電の安全性」, 岩波書店, 3-10.
- 大崎順彦, 1987, 第 I 章 1. 入力, 断層, 動的解析等, 大崎順彦・渡部丹 (監修) 「原子炉施設の耐震設計」, 産業技術出版, 3-21.
- 田中三彦, 2011a, 福島第一原発事故はけっして“想定外”ではない—議論されない原発中枢構造の耐震脆弱性, 世界, 岩波書店, 2011 年 5 月号, 134-143.
- 田中三彦, 2011b, 福島第一原発の「耐震脆弱性」を注視する—問題は「想定外」の津波より根深い, 科学, **81**, 420-425.
- 田中三彦, 2011c, 原発で何が起きたのか, 石橋克彦 (編) 「原発を終わらせる」, 岩波書店, 3-34.
- 田中三彦, 2011d, 福島第一原発 1 号機事故・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**, 945-960.
- 田中三彦, 2011e, 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**, 1230-1238.
- 田中三彦, 2012, 福島原発事故における地震による機器損傷の真相に迫る, 黒田光太郎・井野博満・山口幸夫 (編) 「福島原発で何が起きたか—安全神話の崩壊」, 岩波書店, 1-8.
- 田中三彦, 2013, 福島第一原発 1 号機原子炉建屋 4 階の激しい損壊は何を意味するか—改めて, 地震動による IC 系配管破損の可能性を問う, 科学, **83**, 1055-1066.
- 東京電力福島原子力発電所事故調査委員会, 2012a, 調査報告書 (本編), 641 pp, <<http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/3856371/naaic.go.jp/index.html>>, (参照 2014-1-25).
- 東京電力福島原子力発電所事故調査委員会, 2012b, 調査報告書 (参考資料), 237 pp, <http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/3856371/naaic.go.jp/pdf/naaic_sankou.pdf>, (参照 2014-1-25).
- 東京電力株式会社, 2008, 新潟県中越沖地震の観測記録と解放基盤表面における地震動の推定について, 新潟県 第5回地震, 地質・地盤に関する小委員会 (平成20年6月3日開催) 資料No. 2, <http://www.pref.niigata.lg.jp/HTML_Article/2-jisin5.pdf>, (参照 2014-1-25).
- 宇津徳治, 1999, 地震活動総説, 東京大学出版会, 894 pp.
- 吉岡 斉, 2011, 新版 原子力の社会史—その日本的展開, 朝日新聞出版, 422 pp.

変動帯に立地する原子力関連施設の耐震安全性評価 に関わる地質学的問題

東京大学大学院理学系研究科・地球惑星科学専攻 池田安隆

原子力関連施設の耐震安全性審査の最大の問題は、地震動のリスクに関する科学的知見と工学的・経済的・社会的要請とが完全に分離されず、審査の過程において過度な妥協やつじつま合わせが行われてしまうことにある。同様な問題は、多くの地震学者が参画した地震防災プロジェクトにおいても起こった。本報告では、こうした様々な要請を一旦忘れ、純粋に科学的見地から変動帯に立地する原子力関連施設の地震災害リスクを検討する。また理学者としての筆者の立場から、自然災害と原子力災害との本質的な違いについて議論し、理学が自然災害の軽減に対してどのような貢献をすべきかについて私見を述べる。

1. はじめに

旧・原子力安全委員会は、1981年に制定された「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」を2006年に改訂した。この「新指針」に基づいて既設の原子力発電施設すべてについて耐震安全性の再評価（いわゆる「バックチェック」）が実施された。耐震安全性の評価は各事業者自身が行い、その結果を先ず原子力行政の推進機関である旧・原子力安全保安院（経済産業省に属す）に報告する。原子力安全保安院は評価結果の妥当性を確認した後、最終審査機関である原子力安全委員会（内閣府に属し、原子力政策の推進サイドから独立した第三者機関）に報告し審査をゆだねる。

世間一般に余り認識されていないことは、このような審査にあたって、その根拠となるデータの取得と解釈を事業者自身が行って報告書にまとめるということである。審査を行う側の原子力安全委員会が独自に調査を行う事は全くない。審査を裁判に例えれば、原子力事業者は被告人である。検察側が全く証拠を提出せず、被告側の証拠だけを基に行う裁判で真相を解明できるか否か、答えは言うまでも無いであろう。もうひとつ一般に誤解されていると思われることは、新たに発足した原子力規制委員会の位置づけである。政府は、旧・原子力安全保安院と旧・原子力安全委員会とで二重に存在していた審査機関を、原子力規制委員会に一元化することによって効率化を図ったと説明し、マスコミもおおむねこれに同調する報道をした。しかし、これは「効率化」の一方でダブルチェックの機能が働かなくなったことを意味する。しかも旧・原子力安全保安院は、国策として原子力行政を推進するサイドに属していたので、厳密な意味での審査機関では無い。しかしそれでもなお、ある種歯止めの役割を果たしてきたと思われる。

筆者は2008年から2011年までの数年間、旧・原子力安全委員会・耐震安全性評価特別委員会の専門委員として原子力関連施設の耐震安全性バックチェック審査に関わった（2011年3月11日

以降、審査会合は開催されていない）。その経験から判断すれば、耐震安全性審査の最大の問題は、地震動のリスクに関する科学的知見と工学的・経済的・社会的要請とが完全に分離されず、審査の過程において過度な妥協やつじつま合わせが行われてしまうことにある（たとえば、池田、2012）。同様な問題は、多くの地震学者が参画した国策としての地震防災プロジェクトにおいても起こった。

誤解を恐れずに単純化すれば、行政官僚は無謬性と一貫性を、企業は利潤を、技術者は技術的挑戦を、半ば本能的に追求する。さらに付け加えれば、科学者組織も含めたこれら集団の間で利益誘導へと向かう力が働く。そしてこれらの巨大な慣性力に抗しうる科学者は多くない。組織の持つ慣性力は、大学以外の国立およびそれに準ずる研究機関に所属する科学者にとってより深刻である。川勝（2012）は、防災に関わる問題をトランスサイエンス領域に属すると位置づけ、社会の広範な分野との共同作業によって解決すべきであるとの見解を述べた。しかし、そのような共同作業が原子力安全委員会等の場で実際に行われたという例を（寡聞にして）筆者は知らない；現実に起こった共同作業はむしろ、過度な妥協やつじつま合わせとであった。

本報告では先ず、こうした様々な要請を一旦忘れ、純粋に科学的見地から変動帯に立地する原子力関連施設に関わる地震災害のリスクを検討する。また理学者としての筆者の立場から、一般の自然災害と原子力災害との本質的な違いについて議論し、理学が地震災害を含む自然災害一般の軽減に対してどのような貢献をすべきかについて私見を述べる。理学は、社会の要請に直接応えることを目的とする実学ではなくて、虚学（= pure science）である。社会の要請にたいして理学が答えるべきことは何なのか、という問に容易に答えを出すことはできない。しかしその答えが過度な妥協やつじつま合わせをして真実を曲げることと無きことだけは確かである。

2. 地震ハザードとしての断層

地震ハザードとなる断層は、大は沈み込み帯の巨大逆断層から小は露頭スケールの小断層まで、様々な規模にわたって存在する。また、これらの断層が動くことによって引き起こされる災害は、

(a) 地震動による災害、(b) 地震動が二次的に引き起こす現象(斜面崩壊、地滑り等；津波もこれに含めておく)によって生じる災害(c) 断層のずれによって生じる災害、の3通りに分類できる。(c) は地表断層をまたいで構造物を造った場合に起こる災害であり、地震動とは無関係であるが、広い意味で地震災害に含めておこう。原子力発電施設の耐震安全性を評価するということは、地震ハザードの存在をもれなく認識した上で、当該施設が被り得る被害の大きさとその発生頻度とを予測することである。

地震ハザードとしての断層は、重要度の順に次の3つ(2番目の項目をさらに細分すれば4つ)に分類できる：(1) 沈み込み帯の巨大逆断層、(2a) 規模の大きい顕在活断層、(2b) 規模の大きい伏在活断層、(3) 小規模活断層(露頭スケール)。ここで言う重要度とは、活動頻度(地震発生頻度)と発生する地震の規模である。次節では、これらについて順に説明する。

3. 活動頻度と地震規模からみた危険度ランキング

(1) 沈み込み帯の巨大逆断層

最も注意を要する断層は、沈み込み帯の巨大逆断層である。これらは数十年～千年に一度の高頻度で活動し、大振幅かつ継続時間の長い地震動を発生するからである。原子力発電施設の耐震安全性評価に当たっては、最大加速度が問題とされるが、海溝型の巨大地震に特徴的な大振幅・長継続時間の揺れに対する安全性が十分か否かの検討は不十分であるように感じられる(この点に関して筆者は専門外であるから、これ以上言及しない)。また、海溝型巨大地震は巨大津波や斜面崩壊等の二次的ハザードの要因でもある。

海溝から沈み込んだ海洋プレートは大量の水をマントル供給し、その水はマントルの部分溶融を引き起こし火成活動の原因となる。火成活動は地殻を厚くし、地殻や最上部マントルの熱構造を改変することによって、沈み込み型造山運動の主要な原因となる。プレート境界の固着に伴って蓄積される歪みはこの造山帯に集中する。そのうちの弾性歪みは固着面の急速なすべりに伴って解放されて巨大地震を起こす；残る非弾性歪みは永久変形(＝造山運動)として造山帯に蓄積される。東北日本弧の場合、2011年東北地震の前に測地学的に観測されていた歪みのうち～90%が弾性歪みであったことが、非弾性変形速度を地質

学的に見積もることによって明らかにされている(Okada and Ikeda, 2011; Ikeda, 2012; 池田ほか, 2012)。

沈み込み帯の地震ハザードを評価するうえで先ず重要なことは、発生する地震の最大規模を予測することである。島弧に蓄積された弾性歪みを有効に解放するには、固着面全体を深部から地表まで一気に破壊することが必要である(このような地震を完全歪解放地震と呼んでおこう)。破壊領域の長さ L が十分に大きいとき(固着域の幅の2～3倍以上のとき)、断層面上でのすべり量は飽和値に達して完全歪解放が実現する(たとえば、Matsu'ura and Sato, 1997)。断層面の強度が一定だと仮定すると、すべり量の飽和値 D_{max} は固着面の(傾斜方向の)幅 W に比例するはずであるから、最大地震のモーメント解放量は、

$$\max M_o = \mu D_{max} WL \propto W^2 L$$

となり、固着面の幅の2乗に比例して増加するが、長さに対しては線形にしか増えない。つまり、完全歪解放地震は、それが複数セグメントにわたって連動したとしても、モーメント解放の総量は、個々のセグメントで単独に起こった地震のモーメント解放量を単純に足し合わせただけにしかない。したがって、最大地震の大きさを予測する上で最も重要なパラメーターは固着領域の幅である(池田ほか, 2012)。

Fujii and Matsu'ura (2000) の経験則によれば、 $W > 100$ km (南海トラフ程度)の沈み込み帯では、 L が 200～300 km を越えるとすべり量は飽和する；その場合の飽和値は $D_{max} = 5$ m であるから、たとえ $L = 1000$ km におよぶ長大な連動破壊が生じたとしてもその規模は $M_w 8.8$ 程度である。水準測量データによれば、1946年南道海地震($L \sim 300$ km)および1964年東南海地震($L \sim 200$ km)にともなって、地震間の変動を打ち消すようなセンスの隆起・沈降が生じている

(Yoshikawa *et al.*, 1964; 吉川, 1968; Fukahata *et al.*, 1996)；これは、震源域より深い領域は地震間に固着していないこと、およびこれら2つの地震が完全歪解放地震と見なしうる事を示す(池田ほか, 2012; 震源域のサイズは異なるが、変動のパターンは図1Aに近似する)。琉球海溝やマリアナ海溝は、GPSによる測地変動のパターン(Sagiya *et al.*, 2000; Kato *et al.*, 2003)から見ると南海トラフより更にカップリング領域の幅が狭いと予想される。従って、これら2つの沈み込み帯で仮に数百kmを超える長さの連動破壊が起こったとしても、すべり量・マグニチュードともに南海トラフの場合よりずっと小さいであろう。

一方、日本海溝のように $W = 200 \sim 300$ km に及ぶ幅広い固着域があると、(2011年東北地震のように) $L = 500$ km でもすべり量は飽和せず、 M_w

9.0 の超巨大地震が発生する。日本海溝北部から千島海溝では、2011 年 3 月 11 日地震の震源域と同じく、広いカップリング領域と長期にわたる弾性歪みの蓄積が認められる (図 1B)。したがって、この領域では依然として Mw 9 クラスの超巨大地震が発生する可能性がある (Ikeda, 2012; 池田ほか, 2012)。

完全歪解放地震の特筆すべき特徴は、破壊が自由表面 (=海底) まで達して、そこが開放端になるということにある。そのために、最大すべり量が自由表面で生じる (たとえば, Wu *et al.*, 1991; Rudnicki and Wu, 1995)。それは半無限媒質の自由表面における境界条件を如何にして実現するかを考えれば自明である。同様な理由から、完全歪解放地震の最大すべり量は、破壊が地表まで達しない (破壊面の up-dip 側に固定端がある) 地震のすべり量の 2 倍以上になる (Rudnicki and Wu, 1995)。その結果、海溝付近での地表変形が大きくなって巨大な津波を引き起こす事になるであろう (Geist and Dmowska, 1999)。2011 年東北地震とは、まさにこのような完全歪解放地震であり、その物理的本質は単純である。

次に重要なことは、このような完全歪解放地震の再来間隔を予測することである。この目的のために津波堆積物の調査は有効である (例えば, Minoura and Nakaya, 1991; 平川ほか, 2000, など)。しかし、津波堆積物の情報のみから、震源域の広がり地震の規模を推定することは一般に難しい。そこで重要になるのは、問題とする古地震が海岸部の隆起・沈降を伴ったか否かということにある。地震間に起こった大きな歪みを完全に打ち消すような変動が地震時 (および地震後の余効変動として) 起こることが完全歪解放イベントの特徴であるから (Ikeda, 2012; 池田ほか, 2012; 図 1)、海岸 (とくに微小な海水準変化に敏感に反応して変化する干潟環境) における古海水準復元がこのようなイベントを判定する決め手となる (Atwater, 1987; Atwater *et al.*, 1992, 2004; Cisternas *et al.*, 2005; Shennan and Hamilton, 2006; Sawai *et al.*, 2004)。

(2a) 規模の大きい顕在活断層

比較的規模の大きい (マップスケールの) 活断層が起こす地震は Mw 7 級のいわゆる内陸直下型地震である。この種の断層は、問題とする核施設の近傍にあれば強震動の要因となる。活動頻度は、数千~数万年に一度程度であることがトレンチ掘削調査等で明らかになっている。ここでは、地表まで断層面が達している顕在活断層 (2a) と地下に埋もれた伏在活断層 (2b) とに分けて記述する。

活断層とは現在の応力場で地震を起こし得る断層のことであるが、地震を起こし得るか否

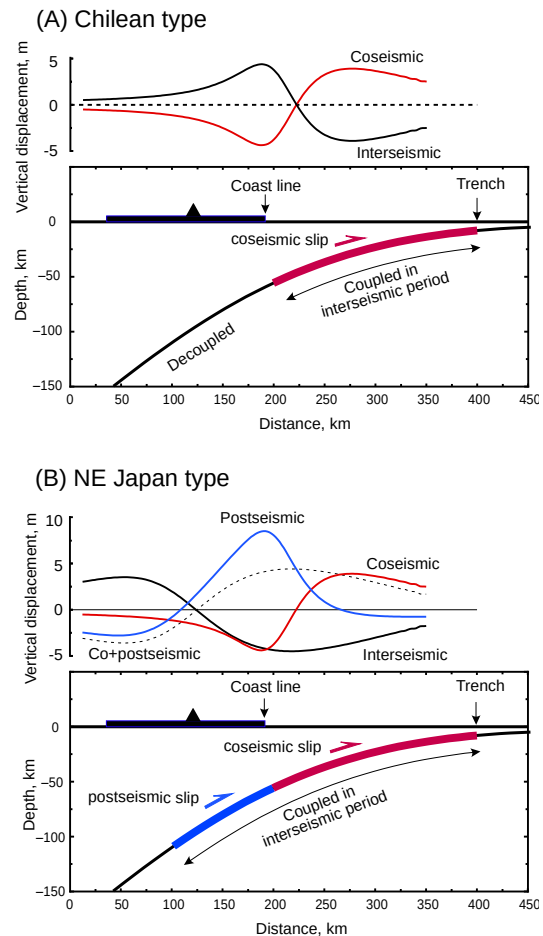


図 1. 超巨大地震発生場の類型 (Ikeda, 2012; 池田ほか, 2012). (A) (B) 両図とも、下図は海溝に直交する断面。沈み込み帯の形状は東北日本を横切る断面の形状で代表させてある。上図は地震時 (赤実線)、地震直後 (青実線)、および地震間 (黒実線) の垂直変位量を示す。(A) チリ型。1960 年チリ地震 (Mw 9.5), 1700 年カスカディア地震 (Mw 9.0), および 1964 年アラスカ (Mw 9.2) 地震がこのタイプに属する。このタイプの地震発生場では、地震間の固着領域と地震時の破壊領域 (下図の赤太実線) とが一致するので、地震間変動のパターンと地震時変動のパターンとがほぼ正反対の関係にある。(B) 東北日本型。今のところこのタイプの地震発生場は 2011 年東北地震 (Mw 9.0) の例しか知られていない。地震時に破壊する領域 (下図の赤太実線) よりさらに深部に固着領域 (青太実線) があることを特徴とする。深部固着域は地震直後 (おそらく数十年間) に余効すべりをおこして固着を解放する。地震時の変動パターンはチリ型沈み込み帯と変わらないが、海岸部が地震間に沈降することおよび地震直後に急速な隆起が起こることとでチリ型と区別できる。

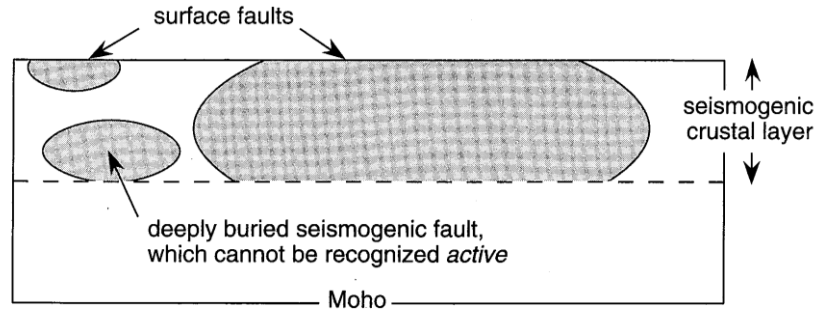


図 2. 活断層として認識できる断層とできない断層 (池田ほか, 1996). 砂目は破壊領域を示す. 断層面が比較的高角ならば, 大きな破壊領域を持つ断層は地表まで達している可能性が高いので, 活断層としてマッピングし得る. 一方, 地下深部に伏在する断層は, 地震を起こし得る断層であるか否かを地質学的に確かめることができず, したがって活断層として認識できない.

かは最近の地質時代における活動の有無によって判断する. 断層面が地表まで達しているもの (顕在断層, surface faults) は, 地表調査やトレンチ掘削調査等によって最近の地質時代における活動を確認することができる. 顕在活断層については空中写真判読を含む従来型地表調査でマッピングすることが可能であり, 既に日本列島では分布の全貌がほぼ明らかになっている (活断層研究会, 1980, 1991; 九州活構造研究委員会, 1989; 岡田篤正・東郷正美編, 2000; 池田ほか編, 2002; 中田・今泉編, 2002, など).

しかし, 後述する地下深部に伏在する断層は, 現在の応力場の下で地震を起こし得る断層であるか否かを地質学的に確かめることができないから, 「活断層」としてマッピングすることができない (図 2).

伏在断層と並んで防災上厄介な問題は, 活動度の低い長大な断層である. 過去の造山運動に伴って成長した長大かつ成熟した断層は, (断層面の強度が低いため) たとえ現在の応力場に非調和な配置であっても低い頻度で活動している場合がある. この種の断層が一旦破壊を始めると, 止めどなく破壊が伝播して大規模な地震を発生する可能性がある. 極端な例の一つは, 2008 年に四川省で起こった Mw 7.9 の汶川地震である. この地震はプレート内で起こる地震としては最大級である. 震源となった龍門山断層は, 長さ 300 km にわたって破壊したが, さらにその北東に 200 km にわたる未破壊な延長部分を遺す長大な断層である. 龍門山断層は揚子プラットフォームの北西縁を画する西傾斜の逆断層であり, 中生代の三疊紀後期からジュラ紀に活動して長大な断層に成長した. 最近の地質時代の活動は微弱であり, 周辺のチベット高原内に発達する横ずれ断層群と比べると平均すべり速度は一桁以上小さい; そのため, この断層は防災上ほとんど注目されていなかった (池田, 2008; Burchfiel *et al.*, 2008).

要するに, 断層の活動度とそれが発生する地震の規模とは無関係であり, 低頻度ではあっても大きな地震を起こす断層が存在する. こうしたやっかいな断層は, 変動帯の中だけに存在するのではない; 安定大陸の内部でさえ緩慢な応力の蓄積があり, 長大な「古傷」が再活動して大地震を起こす例がある. たとえば, 1811-1812 年に北米大陸のミシシッピ中流域で起きた地震群 (New Madrid earthquakes, M 7.5-7.7) や最終氷期末～後氷期にスカンジナビア半島で起こった地震 (Mw~8.2) である.

日本列島にも中新世以前の造山運動で形成された古傷断層が多数あり, その中には双葉断層のように長大で大地震を起こす可能性があるものが存在する. こうした断層の活動性評価は未だ十分に行われていない.

(2b) 規模の大きい伏在活断層

被害を起こすような規模の内陸直下型地震を発生させる断層は, 上記の顕在活断層以外にも上部地殻内に多数伏在していることは明らかである. このうち, 断層面の先端が地下浅部 (数 km 以浅) まで達している断層 (浅部伏在断層) は, 物理探査やボーリング等によってその位置と活動性を評価できる可能性があるが, より深部に伏在する断層についてはお手上げである. 図 3 は, 地表で認識できる比較的小規模な逆断層 (横浜断層) と地下に伏在する断層の関係を示す地震探査記録である. この例では, 西傾斜の逆断層が地下 ~500 m で東傾斜の正断層に当たって連続を断たれる. 地下に伏在する 2 條の正断層は, 主として中新世に活動した断層であることを地質構造から読み取ることができる. 表層で認められる圧縮構造は, これら伏在断層が (逆断層として) 再活動した結果生じた可能性が高いが, それを直接証拠立てることは困難である.

日本列島の伏在活断層のマッピングはまだ十

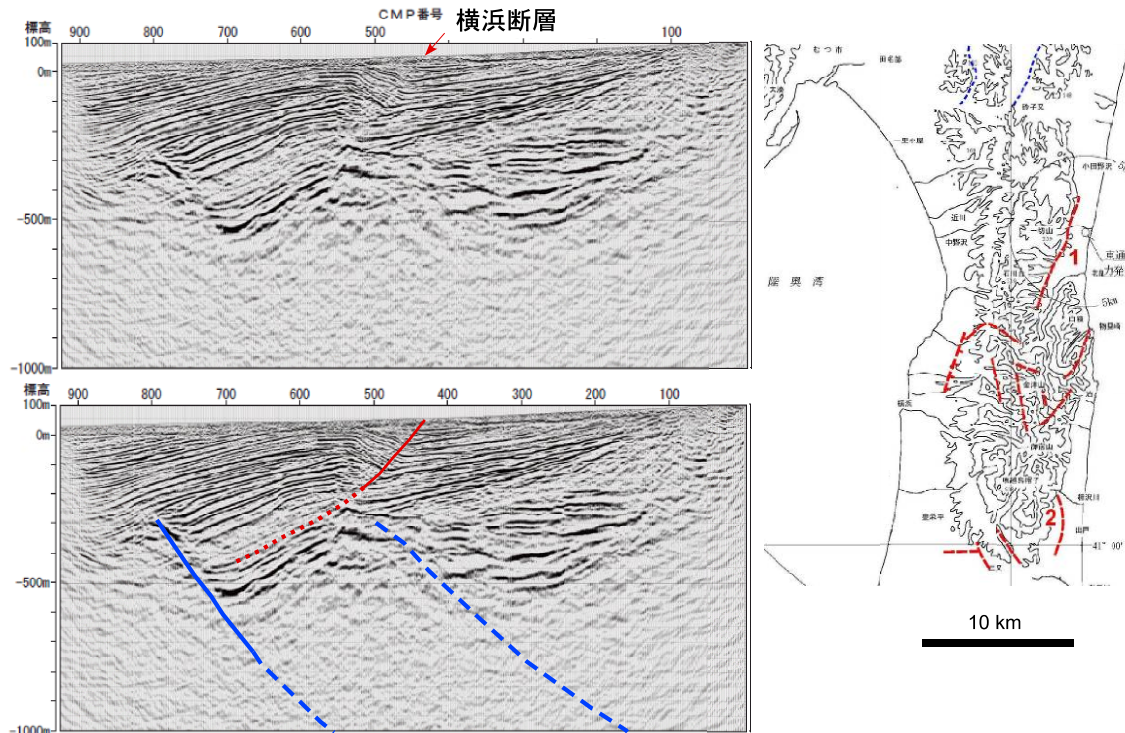


図 3. 下北半島中部の横浜断層（右図の断層 3）を東西に横切る反射法地震探査断面（左上図）とその解釈（左下図）。東北電力（2009）の資料による；左下図中の断層の解釈は筆者による。横浜断層（赤線）は、より深部に存在する断層群（青線）の活動に伴う二次的断層であると考えられる。

分行われていないので、その全貌はわからない。しかし、規模の大きな地震（島崎，2008，によれば $M 7.5$ 以上）は、震源断層面の大きさが地震発生層の厚さに比べて十分大きいから、断層面が地表まで達している可能性が高い（図 2）。したがって、地形・地質学的方法で認識される活断層（顕在断層と浅部伏在断層）以外に、規模の大きな内陸直下型地震（ $M 7.5$ 以上）の発生源となり得る深部伏在断層が存在する可能性は、一般的に小さいと言ってよいだろう。

(3) 小規模活断層（露頭スケール）

空中写真で変位地形が識別できない程度の小規模な活断層は多くの場合、(2a) や (2b) に分類される主断層にともなう二次的な断層であり、活動頻度は極めて低く（数万年に 1 度以下）、ずれの量も小さい（数十 cm/event 以下）。この種の小断層が問題となるのは、それがずれることによって核関連施設に損傷が起こりうる場合のみである。

4. 自然災害研究と理学

最後に、理学者としての筆者の立場から、一般の自然災害と原子力災害との本質的な違いについて議論し、理学が地震災害を含む自然災害一般の軽減に対してどのような貢献をすべきかについて私見を述べたい。

(1) 実学と虚学

日本の大学はアメリカの大学（そのうちで特に州立大学）と並んで実学に偏している。第二次大戦後のアメリカでは、帰還兵に奨学金が支給されたことによって、大学生の数が大幅に増えた。その受け入れ先は主として州立大学であり、そこでは学生定員の大幅増と大学間の競争の激化が起こった。大学間の競争激化はベビーブーム世代が入学する 1960 年代後半まで続いた。大学の評価は、学生数、外部資金の獲得量、および生産される論文数に基づいて行われた。また、大学の運営において理事および理事会が強い権限を持ち、教授会メンバーが参加する民主的な大学運営とはほど遠い状態にあった。東西冷戦下における軍拡競争を反映して、外部資金は広い意味で軍事研究に関係した実学を支えるものが主であった（たとえば、Anderson, 1996）。軍事研究を生命科学・環境・防災研究等に置き換えれば、これとまさに同じことが半世紀後に日本の大学で起こっている。その端緒となったのは旧帝国大学の大学院重点化であり、それに続く文部省・科学技術庁の合体と国立大学の法人化とによってこの流れは決定的となった（大崎，1999，2011）。

こうした風潮の中で、日本では多くの理学者が実学としての地震防災研究に中途半端に関わるようになった。とくに、旧・科学技術庁系の大型

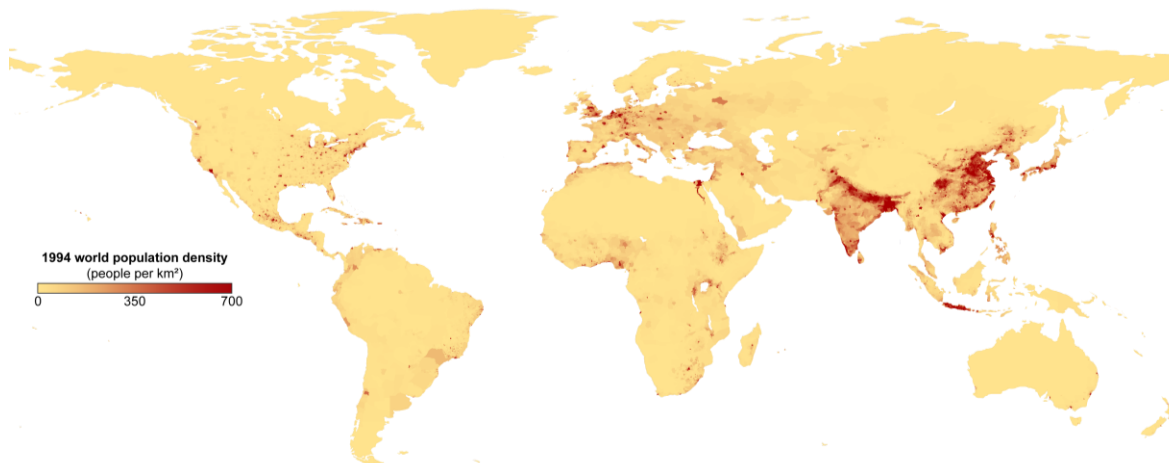


図4. 世界の人口密度分布（1994年）. 図の出典：National Center for Geographic Information and Analysis (1999) <http://visibleearth.nasa.gov/view.php?id=53005>

研究予算（ほとんど実学目的）が、地震調査推進本部の設立や文部・科技二省庁の合体を機に大学に流れるようになったことによって、この風潮が加速された。実学とは社会の要請に直接応えることを目的とする学問であり、最終的にはその成果を社会に実装して完結する。一方、理学は虚学（= pure science）である。「虚学」とは本来、リベラルアーツや理学を志す者が自らの学問に誇りと（少しニヒリスティックな）気概を込めて使った呼称であるが（たとえば、堀米，1969），現在では否定的な意味で使われることが多い。理学者（の多く）は本来実学的研究に向いていないし、そのような訓練と教育を受けていない。にもかかわらず、多くの理学者が大型研究費獲得を動機として国策としての地震防災研究に参画した。

その結果失ったものは、自由な学問的発想と健全な批判精神とを発露できる開かれた学会であり、それが生み出す学問としての活性である。国策に深く関与することは、一方で無謬性と一貫性を重視する行政の論理によって陰に陽に（意識的にせよ無意識的にせよ）縛られることを意味する；同様に、産学協同は利潤追求の論理に縛られることに通ずる。虚学を志す者がかつて守ってきた学問の自由とは、この種の束縛からの自由であった。

理学者は実学的自然災害研究ではなく、虚学的な動機に基づく自然災害研究をめざすべきであり、ひいてはそれが真の意味で社会に貢献する道であると筆者は考える。巨大地震や火山噴火といった地質現象そのものを理学的な動機に基づいて研究することは、災害の軽減に何らかの形で役立つかもしれない。しかし、これを自然災害研究とは呼べない。それでは、理学的自然災害研究とはどんなものがあり得るであろうか？

(2) 人類と自然災害

巨大地震も火山噴火もそれ自体は当たり前の自然現象にすぎない；そこに人間がいなければ災害は起こらない。図4に示す世界の人口密度分布をみると、人口密度が極端に高いところは東南アジアに集中していることが分かる。とくに集中しているのは、ヒマラヤ南麓からベンガル湾へと広がるガンジス・ブラマプトラ川流域の平野、黄河流域、四川盆地を含む揚子江流域、およびスンダ列島・日本列島等の火山弧である。奇妙なことに、これらの地域は地震、津波、火山噴火、斜面崩壊、洪水、泥流・土石流、大陸内部から偏西風で拡散する風成塵等の地質ハザードに加え、マラリア等のバイオハザードに満ちている。その原因は、高温の熱帯の海から夏季モンスーンで運ばれる大量の降水と、プレートの沈み込みに伴う火山活動や大陸衝突に伴う地殻変動によって起伏の大きな地形が形成されることにある。

自然災害の危険が大きくかつ瘴癘の地を、人類は何故居住地として選ぶのであろうか？地球上には地質ハザードやバイオハザードがもっとずっと少ない地域がいくらかでも存在する。にもかかわらず、人類はあえて危険に満ちた土地を選んで居住してきたらしい。

人類の生存に最も必要なのは食料生産であり、それは元を辿ればすべて生物の一次生産に依存する。生物一次生産に必要なのは、(1) 水、(2) 温度、(3) 炭素、(4) 窒素、および (5) 無機栄養塩類である。高温・湿潤な熱帯・亜熱帯地域は、(1) (2) の条件にかなう。炭素と窒素は大気から供給されるので、(3) (4) の条件は地球上何処でも変わらない。問題は (5) の栄養塩類である。生物の一次生産に必要な栄養塩類は、バッファーとしての土壌を介して岩石から供給される。土壌中の栄養塩類は、溶脱によって枯渇していく；溶脱作用は熱帯・亜熱帯湿潤地域で特に活発であるから、(1) (2) の気候条件は栄養塩の維持とは相

反する。農業生産もまた土壌中の栄養塩を消費するから、高い農業生産性を長期にわたって維持するためには、土壌を定期的に更新し続ける必要がある。

地表面（土壌）を更新するプロセスとして挙げられるのは先ず、洪水、泥流・土石流などである。これらは上流の山地斜面で生産された新鮮な土壌を下流の沖積平野へ運搬する。先に人口密集地として挙げたガンジス・ブラマプトラ川中下流域（図 4）では、数年に一度の高頻度で平野域の数十％が冠水する洪水が発生し、起伏の大きい高ヒマラヤから運搬された新鮮な土壌が大量に堆積する。大河川の沖積作用がインダス、メソポタミア、エジプト、黄河流域等における古代文明を持続的に支えたことはよく知られているが、もう一つの重要な地表面更新プロセスは、火山活動である。地下深所から供給される（特に玄武岩質の）マグマは、栄養塩類を豊富に含む。マグマが破碎されて細粒化した火山灰は、広範囲に堆積して土壌の理想的な母材となる。ジャワ島は世界一人口密度が高い地域の一つであるが（図 4）、千年以上にわたってこの人口を支えたのは島弧火山活動がもたらす栄養塩であったと考えられる。同様に、溶脱作用を受けにくい乾燥地域から供給される風成塵も理想的な土壌母材である。黄河中流域には第四紀を通じて堆積した厚さ数百 m に達する黄土が存在する；黄土は風成塵を母材とする古土壌（化石土壌）である。黄土高原における農業は、現生の風成塵に加えて、この古土壌を持続的に消費することで生産性を維持してきた可能性がある。さらに津波さえも土壌更新プロセスの一つといえるだろう。結局、先に地質ハザードとして挙げたプロセスが全て土壌更新プロセスでもあることが分かる。

以上の考察から、自然災害と疾病のリスクに富んだ環境が人類の生存に最良の環境であるという結論を得た。地球上で最も良い人類の居住地域は、熱帯～亜熱帯湿潤地域の変動帯、とくに火山弧、であるといえるかもしれない。人類と自然災害との関わりは決して単純では無く、それを過去から現在までにわたってグローバルに探求することは、学問的な面白さに富んでいる。これは、自然科学だけでは解決できない、したがって虚学（= pure science）の広い分野が連携して取り組むべき、重要な課題である。

人類と自然災害との関わりを過去から現在までにわたって探求することは、「防災」に対する根源的な問いかけに通ずる；こうした虚学的自然災害研究のゴールは、防災とは如何にあるべきかという提言を社会に示すことであるが、問いかけだけで終わったとしても研究する意義がある。何故なら、実学的災害科学は、当面する災害を防ぐという喫緊の要請に応えることを目的とする

当為の学問であるために、当為そのものの妥当性が検証されることは無いからである。それを検証することが虚学に課された社会的責任であり、そのために虚学はあらゆる束縛から自由である必要がある。

(3) 自然災害と原子力災害

最後に本論文の当初の趣旨に立ち返って、自然災害と原子力災害との本質的な違いを検討する。上述のように、自然災害を起こし得る地質プロセスは同時に土壌の更新という恩恵をもたらす。洪水は人命を奪い農地を荒廃させるが、数年を経ずしてそこはもっと豊かな農地によみがえる。最も極端な例は巨大カルデラ噴火である。阿蘇カルデラ級の噴火が起これば九州全域と西日本の一部に相当する広大な土地が火砕流に覆われて焦土と化し、事前に避難できたとしても避難民の一部は難民となって他国をさまようかもしれない（たとえば、高橋，2003）。しかし、一世代後の難民は豊かによみがえった土地に戻ることが可能であろう。一方、ひとたび甚大な原子力災害が起これば、事実上永久に国土を失うことになるだろう。

参考文献

- Anderson, T. H., 1996, *The Movement and The Sixties: Protest in America from Greensboro to Wounded Knee*, Oxford Univ. Press, 544 p.
- Atwater, B. F., R. Furukawa, E. Hemphill-Haley, Y. Ikeda, K. Kashima, K. Kawase, H. M. Kelsey, A. L. Moore, F. Nanayama, Y. Nishimura, S. Odagiri, Y. Ota, S. C. Park, K. Satake, Y. Sawai, and K. Shimokawa, 2004, Seventeenth-century uplift in eastern Hokkaido, Japan, *Holocene*, **14**, 487-501.
- Atwater, B. F., 1987, Evidence for great Holocene earthquakes along the outer coast of Washington State, *Science*, **236**, 942-944.
- Atwater, B. F., N. H. Jiménez, and C. Vita-Finzi, 1992, Net late Holocene emergence despite earthquake-induced submergence, south-central Chile, *Quat. Int.*, **15/16**, 77-85.
- Burchfiel, B. C., L.H. Royden, R.D. van der Hilst, B.H. Hager, Z. Chen, R.W. King, C. Li, J. Lü, H. Yao, and E. Kirby, 2008, A geological and geophysical context for the Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, People's Republic of China, *GSA Today*, **18**, No. 7, 4-11, doi: 10.1130/GSATG18A.1.
- Cisternas, M., B. F. Atwater, F. Torrejon, Y. Sawai, G. Machuca, M. Lagos, A. Eipert, C. Youlton, I. Salgado, T. Kamataki, M. Shishikura, C. P. Rajendran, J. K. Malik, Y. Rizal, and M. Husni, 2005, Predecessors of the giant 1960 Chile earthquake, *Nature*, **437**, 404-7.
- Fujii, Y., and M. Matu'ura, 2000, Regional difference in scaling laws for large earthquakes and its tectonic implication, *Pure Appl. Geophys.*, **157**, 2283-2302.

- Fukahata, Y., C. Honsho, and M. Matsu'ura, 1996, Crustal movements on Shikoku, southwest Japan, inferred from inversion analysis of leveling data using ABIC, *Tectonophysics*, **257**, 239-252.
- Geist, E. and R. Dmowska, 1999, Local tsunamis and distributed slip at the source, *Pure Appl. Geophys.*, **154**, 485-512.
- 平川一臣, 中村有吾, 原口強, 2000, 北海道十勝沿岸地域における巨大津波と再来間隔, 月刊地球号外, **28**, 154-161.
- 堀米庸三, 1969, 虚学の精神あるいは学問の没意味生について, 季刊芸術, **10**, 36-42.
- 池田安隆, 島崎邦彦, 山崎晴雄, 1996, 「活断層とはなにか」, 東京大学出版会, 220 p.
- 池田安隆, 今泉俊文, 東郷正美, 平川一臣, 宮内崇裕, 佐藤比呂志, 2002, 「第四紀逆断層アトラス」, 東京大学出版会, 240 p.
- 池田安隆, 2008, 2008 年 5 月 12 日中国四川省の地震について, 地質学会ニュースレター 2008 年 6 月号.
- Ikeda Y., 2012, Long-term strain buildup in the northeast Japan arc-trench system and its implications for the gigantic subduction earthquake of March 11, 2011, *Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake*, March 1-4, 2012, Tokyo, Japan, pp. 238-253, <http://www.jaee.gr.jp/event/seminar2012/eqsympo/proceedings.html>.
- 池田安隆 (談), 2012, 下北半島沖の大陸棚外縁断層: 地下に横たわる巨大な断層を原発安全審査はどうあつかったのか, 科学, **86**, 644-650.
- 池田安隆, 岡田真介, 田力正好, 2012, 東北日本島弧-海溝系における長期的歪み蓄積過程と超巨大歪み解放イベント, 地質学雑誌, **118**, 294-312.
- Kato, T., J. Beavan, T. Matsushima, Y. Kotake, J. T. Camacho, and S. Nakao, 2003, Geodetic evidence of back-arc spreading in the Mariana Trough, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1625, doi: 10.1029/2002GL016757.
- 活断層研究会, 1980, 「日本の活断層-分布図と資料-」, 東京大学出版会, 363 p.
- 活断層研究会, 1991, 「新編・日本の活断層-分布図と資料-」, 東京大学出版会, 437 p.
- 川勝均, 2012, トランスサイエンスとしての地震予知・長期予測, 日本地震学会東北地方太平洋沖地震対応臨時委員会編, 「地震学の今を問う」(東北地方太平洋沖地震対応臨時委員会報告), 53-54.
- Matsu'ura, M. and T. Sato, 1997, Loading mechanism and scaling relations of large interpolate earthquakes, *Tectonophysics*, **227**, 189-198.
- Minoura, K. and S. Nakaya, 1991, Traces of tsunami preserved in intertidal lacustrine and marsh deposits: Some examples from northeast Japan, *J. Geol.*, **99**, 265-287.
- 中田高, 今泉俊文編, 2002, 「活断層デジタルマップ」, 東京大学出版会.
- 岡田篤正, 東郷正美編, 2000, 「近畿の活断層」, 東京大学出版会, 363 p.
- Okada, S. and Y. Ikeda, 2012, Quantifying crustal extension and shortening in the back-arc region of Northeast Japan, *J. Geophys. Res.*, **117**, B01404, doi:10.1029/2011JB008355.
- 大崎仁, 1999, 「大学改革 1945~1999」, 有斐閣, 350 p.
- 大崎仁, 2011, 「国立大学法人の形成」, 東信堂, 230 p.
- Rudnicki W. and M. Wu, 1995, Mechanics of dip-slip faulting in an elastic half-space, *J. Geophys. Res.*, **100**, 22,173-22,186.
- Sagiya T., S. Miyazaki, and T. Tada, 2000, Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan, *Pure Appl. Geophys.*, **157**, 2303-2322.
- Sawai Y., K. Satake, T. Kamataki, H. Nasu, M. Shishikura, B. F. Atwater, B. P. Horton, H. M. Kelsey, T. Nagumo, and M. Yamaguchi, 2004, Transient uplift after a 17th-century earthquake along the Kuril subduction zone, *Science*, **306**, 1918-1920, doi: 10.1126/science.1104895.
- Shennan, I. and S. Hamilton, 2006, Coseismic and pre-seismic subsidence associated with great earthquakes in Alaska, *Quaternary Sci. Rev.*, **25**, 1-8.
- 島崎邦彦, 2008, 活断層で発生する大地震の長期評価: 発生頻度推定の課題, 活断層研究, **28**, 41-51.
- 高橋正樹, 2003, 大規模カルデラ噴火のリスクと予測可能性, 月刊地球, **25**, 857-860.
- 東北電力株式会社, 2009, 「東通原子力発電所新耐震指針に照らした耐震安全性評価(中間報告の概要)」, 原子力安全委員会・耐震安全性評価特別委員会・資料第 WG4-2-3 号, http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/senmon/shidai/taishin_godo_WG4/siryo2-3.pdf.
- Wu, M., J. W. Rudnicki, C. H. Kuo, and L. M. Keer, 1991, Surface deformation and energy release rates for constant stress drops lip zones in an elastic half-space, *J. Geophys. Res.*, **96**, 16,509-16,524.
- 吉川虎雄, 1968, 西南日本外帯の地形と地殻変動, 第四紀研究, **7**, 157-170.
- Yoshikawa, T., S. Kaizuka, and Y. Ota, 1964, Crustal movement in the Late Quaternary revealed with coastal terraces on the southeast coast of Shikoku, southwestern Japan, *J. Geod. Soc. Japan*, **10**, 116-122.

活断層研究と地震被害軽減

東洋大学社会学部 渡辺満久

海底活断層の位置形状は、陸上と同じ変動地形学的手法によって精密に知ることができるようになった。地震発生領域や津波波源域を具体的に想定して被害予想を行うためには、海底活断層の重要性をよく知ることが必要である。また、原子力施設の安全を確保するためにも、活断層の位置・形状を知り、想定すべきことを正しく想定する必要がある。地震被害軽減のためには活断層研究を進めていくことが必須であり、変動地形学的に活断層の位置・形状を精査することが望まれる。

1. はじめに

日本地球惑星科学連合 2013 年度連合大会、ユニオンセッション U-06「地球科学者の社会的責任」は、第 1 部「東日本大震災からのメッセージ」、第 2 部「原子力発電所に関わる科学アセスメントと地球科学的知見」、第 3 部「安全安心に係わる科学情報発信のあり方」から構成されていた。筆者は、第 1 部の招待講演者であったが、第 2 部の内容に関してもコメントした。

第 1 部に関しては、海底活断層と巨大地震・津波発生との関係について述べる。最近、海底地形に関するデータが集積し、陸上と同じ変動地形学的手法によって海底活断層の位置・形状が詳細に検討できるようになった。その結果、歴史地震の震源域と海底活断層の位置との比較が可能となり、いわゆるプレート境界型の地震と、海底活断層が引き起こす固有地震との関係を検討することが可能となった。

第 2 部に関しては、原子力施設周辺の活断層評価について考えたい。地震被害のうち、「揺れ」による被害は、発生しうる地震規模を適切に想定していれば、工学的にその被害を軽減することは可能であろう。一方、活断層の近傍に現れる「ズレ」による被害は、工学的に防ぎようがない部分がある。「ズレ」による被害をなくすには、活断層の位置・形状を正確に知り場所を適切に選べば

よい。著者はこのような観点から、20 年以上前から、公共建造物などの設置に関しては活断層近傍を避けるべきだと考えてきた。しかし、これに対しては強硬な反対意見がある。かつてはその理屈を全く理解できなかったが、最近非常によく理解できるようになったので、紹介したい。

2. 海底活断層と震源域・津波波源域

近年、海底地形の高分解能数値データを利用することが可能となり、海底を立体視することにより、陸上の変動地形解析と同様の方法で海底活断層の位置・形状を詳細に検討することが可能となった（中田ほか，2009；後藤ほか，2009）。その結果、精度の高い海底活断層マップが作成され、海底活断層と歴史地震の震源域・津波波源域との対応関係も議論されつつある。これらの研究成果の詳細は別稿にて報告する準備が整っているので、本稿ではそれらの概要を紹介するにとどめる。

(1) 南海トラフ

南海トラフ周辺においては、トラフ底から陸側斜面にかけて、複数の海底活断層が存在することが知られている（東海沖海底活断層研究会，1999）。今回、それらを含めて新たに複数の活断層の位置・形状が正確に判読された（中田・後藤，2010；

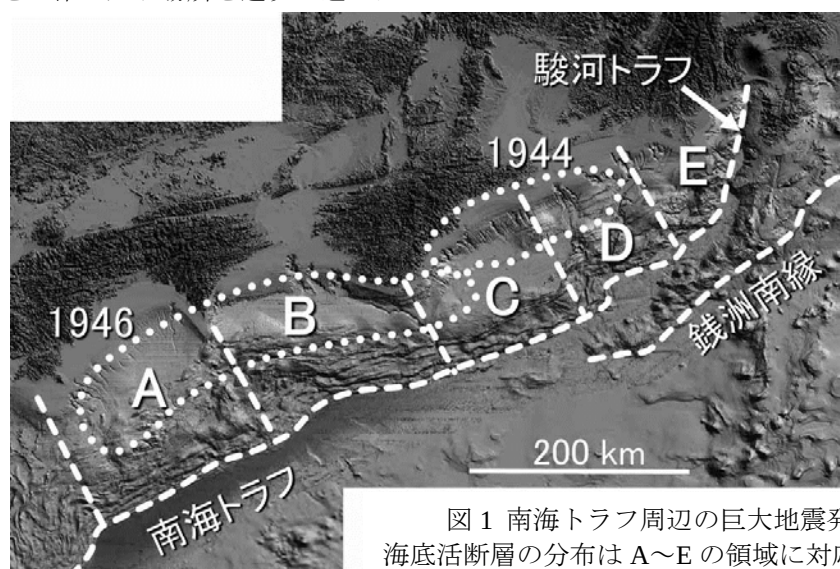


図 1 南海トラフ周辺の巨大地震発生領域
海底活断層の分布は A～E の領域に対応しない。

渡辺ほか, 2010; 後藤ほか, 2010; 泉ほか, 2011). いずれも, 比高数 100m 以上の断層崖 (撓曲崖) を形成されており, 固有の活動を繰り返されてきたことがわかる.

なお, 本論では, 活断層が繰り返し同じようなズレを起こすことを「固有の活動」, それによって発生する (同じような場所で同じように繰り返し発生する) 地震を「固有の地震」, と呼ぶ.

地震学的には, 南海トラフの走向に沿って 5 つの巨大地震発生領域 A~E が設定され (図 1; 石橋・佐竹, 1998), それぞれが固有の地震を起こすとともに, 複数の領域が連動するとさらに大きな地震が発生すると考えられている. しかし, 海底活断層の正確な位置・形状を見ると, 複数の領域を跨いで分布するものや, 領域の中で連続しなくなるものが多く, 設定された領域に対応するような海底活断層はほとんど確認できない.

1944 年東南海地震と 1946 年南海地震の震源域 (図 1 の点線) では, その南縁に沿うような海底活断層が認定される. これらは, 領域とは対応しておらず, 領域を跨いだ固有の活動があるように見える (渡辺ほか, 2010). また, 津波波源域の

特徴から見ると, 1498 明応地震は南海トラフの活断層ではなく, 銭洲南縁の活断層が引き起こした巨大地震と考えた方が合理的であるとの見解も表明されている (中田ほか, 2013).

このように, 南海トラフにおける巨大地震の発生領域に関しては, 海底活断層の位置・形状との関係から慎重に再検討する必要がある.

(2) 日本海溝

日本海溝周辺の変動地形解析によって, アウターライズの正断層群, 海溝陸側斜面の規模の大きな正断層と逆断層が精度よく認定することができた (図 2; 渡辺ほか, 2011). とくに, 陸側斜面の逆断層の位置・形状については, これまでの活断層分布図と比較して精度は格段に向上した. これらの逆断層のほとんどは, 既存の音波探査記録でも確認できる. 逆断層の隆起側には, 逆断層に特有のバルジが形成されており, 撓曲崖の比高は数 100m 以上に達している. これらの海底活断層の位置と歴史地震の震源域 (地震調査委員会, 1999) との対応も良好である.

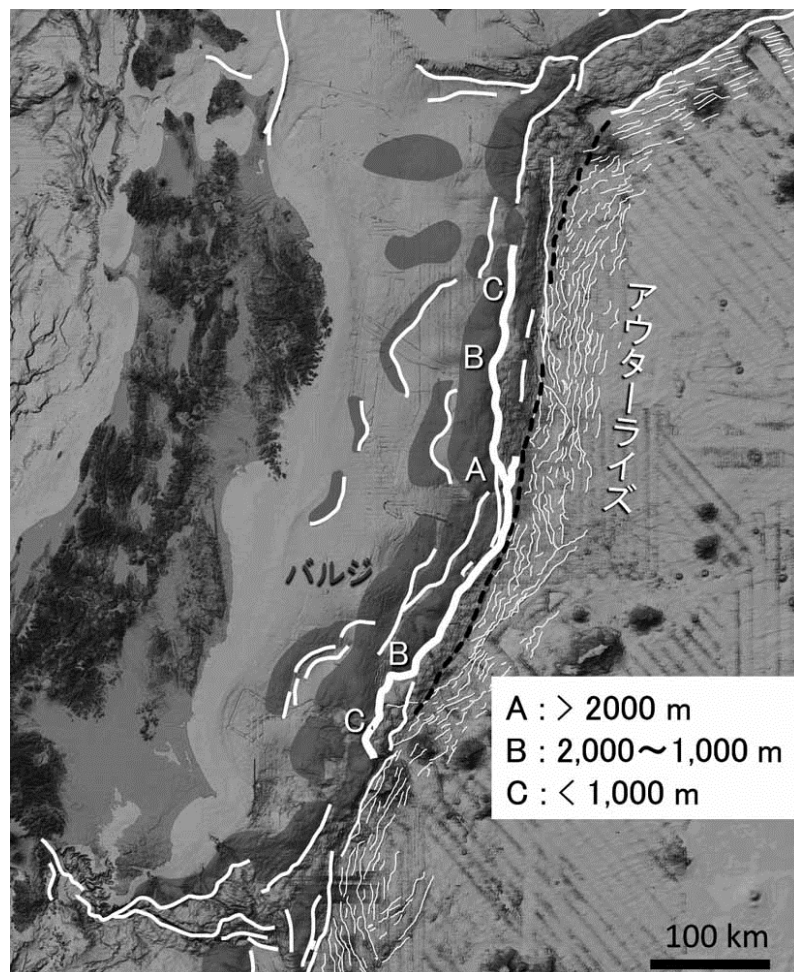


図 2 日本海溝周辺の活断層

黒破線が海溝軸, 白い線が活断層である. 陸側斜面にはバルジや撓曲崖を伴う逆断層が多く, 太線が 2011 年に動いたと考えられる逆断層である.

日本海溝軸付近とそのやや陸側には、2011 年の東北地方太平洋沖地震（M9.0）の震源域に対応する、延長約 500km の長大な逆断層が認められる（図 2 の太い線）。震源域との対応関係から、この長大な活断層が 2011 年東北地方太平洋沖地震を引き起こした可能性が高い（中田ほか、2011；渡辺ほか、2011、2012a,b）。

我々が想定している海底活断層は海溝軸ではなく、やや陸側に位置していることが多い。しかし、金華山沖の断層トレースは海溝軸に沿っている。2011 年東北地方太平洋沖地震時には、金華山沖の日本海溝軸で大きな変位が確認されたとされており（Fujiwara et al., 2011; Maeda et al., 2011）、我々の判読結果と調和的である。

この長大な海底活断層が形成した撓曲崖（断層崖）の比高は、最大で 3,000m 近くに達しており、この海底活断層に固有の活動が繰り返されてきたことを示している。バルジの規模と沈み込むプレート境界の形状をもとに断層モデルを設定し、撓曲崖の比高が 2,000m 以上(A)の部分には 25m, 1,000~2,000m(B)の部分には 16m, 1,000m 未満(C)の部分には 8m の変位を与えて地震時の地殻変動と発生する津波の特徴を計算した。その結果、地震時の陸域の地殻変動の特徴はほぼ完全に再現できた。また、地震学的に計算された津波は、三陸海岸北部では観測結果より小さくなるが、変動地形に基づく計算結果では三陸海岸北部でも高い津波を再現することができた。

(3) アスペリティモデルと海底活断層

地震学的には、プレート境界にはアスペリティが存在し、そこでの破壊が巨大地震となるとされている。また、複数のアスペリティが連動した場合には、2011 年東北地方太平洋沖地震のような超巨大地震が発生すると説明されている。地震時には、破壊は海底のどこかに伝わるが、規則性はなく、海底活断層と地震の発生場所・規模との関係はないと考えられているようである。

しかしながら、海溝周辺の海底活断層はいずれも比高数 100m 以上の断層崖（撓曲崖）を形成しており、固有の活動を繰り返していることは確実である。また、歴史地震の震源域と海底活断層の位置はほぼ一致している。地震時の破壊が「どこかへ伝わる」ということではなく、プレート境界に様々の大きさの活断層があり、それぞれが固有の活動を繰り返しているのであろう。2011 年東北地方太平洋沖地震も、延長 500km に達する長大な逆断層の固有の活動であったと考えられる。

海底活断層は固有の活動を繰り返しているのであり、その位置・形状は、地震の発生場所・規模を予測する上で極めて重要な情報である。巨大地震の発生位置や津波の特徴なども、海底活断層との対応で検討すれば、よりリアリティに富む結

果が得られ、地震被害の軽減に資することができるであろう。

筆者は、東日本大震災から学ぶべきことの 1 つが、「たぶん大丈夫（想定しなくてもよいだろう）ではダメだ」ということだと思っている。十分な合理性をもって語られているモデルに対しては、真摯に対応してゆくことが重要であり、変動地形学的な見解も検討してゆく必要があると思われる。

3. 原子力施設と活断層

(1) 「揺れ」による被害と「ズレ」による被害

地震被害は、「揺れ」による被害と「ズレ」による被害に区別して検討する必要がある（渡辺、2013）。前者は軟弱地盤地域で大きくなる傾向があり、建造物の耐震性の向上が必要とされる。工学的に十分な手当てがされていれば、建造物は破壊されずに済む可能性がある。硬い岩盤の上などでは、一般に、揺れは小さいようであるが、地震規模を適切に想定していなければ被害が出ることは避けられない。近くにある活断層を見逃していると、大きな被害が出る可能性があるので十分な注意が必要となる。

「ズレ」による被害は、地盤（土地）の食い違い（永久変形）によって発生する。1995 年兵庫県南部地震以来、日本や台湾などで活断層による地盤の「ズレ」が確認され、「ズレ」た場合には被害の発生は免れないことが確認されている。

ただ、地盤の「ズレ」が想定される場所に建造物を設置しなければ、「ズレ」の被害は発生しない。活断層の位置・形状を精査し、土地利用を制限すればよい。これに対し、「地震被害は軟弱地盤地域でも大きいのであり、活断層近傍の土地利用を制限することに意味はない」といった批判を受けることがある。対策をすれば防げる被害であるのに、「他でも被害が出るから無意味である」という理屈は理解できるものではない。

ところで、1995 年兵庫県南部地震の際、北淡町で野島断層と「地震に強い家屋」が有名となった（図 3）。現在は、野島断層保存館—北淡震災記念公園の一部となっている。この家屋が壊れなかったのは、「揺れに強かった」という意味である。「活断層の上に建っていたが壊れなかった」と誤解している方もいるようであるが、それは全くの間違いである。野島断層の上になかったので壊れなかったのである。

(2) 原子力施設と活断層

日本の原子力施設周辺では、あるはずの活断層が無視され、無視できない場合にはできるだけ短く「値切る」という異常な安全審査が行われてきた（渡辺、2009）。筆者が知る限り、活断層に係

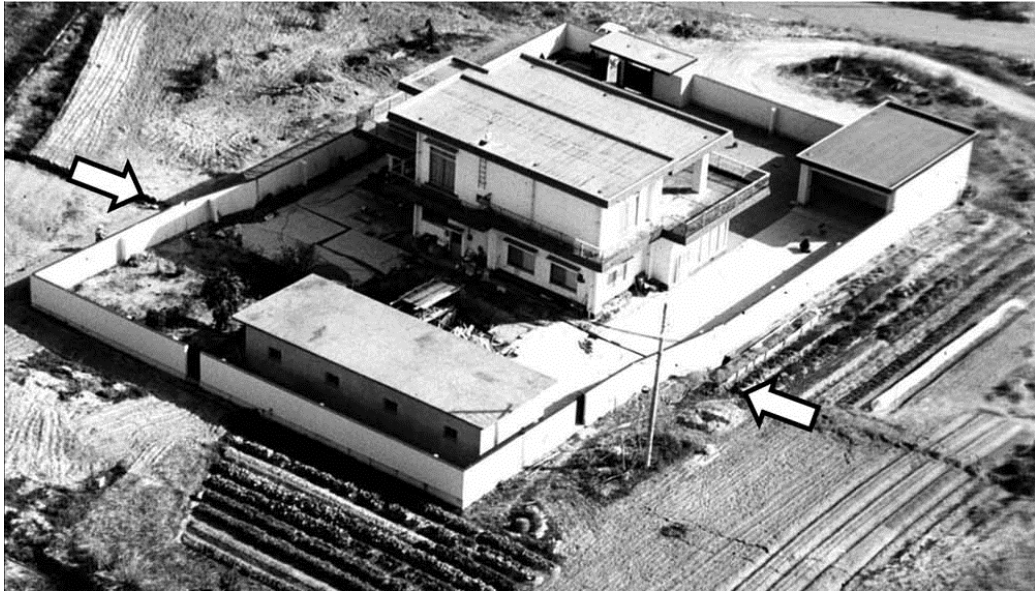


図3 北淡町の野島断層と敷地の被害
家屋には被害がなかったのは、活断層の上にはなかったためである。

わる問題が指摘できない原子力施設は、佐賀県の玄海原子力発電所だけであるように思われる。その他の施設に関しては、活断層の無視や値切りの状態にあり、発生すると予想される地震規模が正しく想定されていないと考えられる。また、2012年より注目を浴びているように、敷地内にも活断層があるために、「ズレ」による被害が問題となっている施設も複数指摘されている。

敦賀原子力発電所の敷地内を通過する浦底断層の近傍において、2号炉直下のD-1破砕帯（G断層）と走向・傾斜が類似する、「耐震設計上考慮する断層等」（K断層）が新たに確認された。G断層の横で、G断層と似た構造をもつ断層が「最近活動している」ことが、「新たに」確認された事実は極めて重大である。審査当時の既存ルール（新指針と安全審査の手引き）には「グレーはクロである」という精神が貫かれている。ルールを正しく理解すれば、今回の規制委員会の判断が正しいことは明白である。その精神は、新基準や手引きにも引き継がれている。

ところで、これに関する報道などで、気になっていることがある。原子炉建屋などの重要施設直下の地盤が「ズレ」るかどうかは、重大な問題であることに疑いはない。しかし、問題の本質は、浦底断層のような第1級の活断層の近傍に原子力発電所を建設していることにある。そのような場所であるから、重要施設直下の地盤の安定性が問題となるのである。

敷地内破砕帯（断層）問題への関心だけが異常に高まり、本質的な問題が軽視されている気がしてならない。まず、大きな活断層が周辺に存在しているかどうかを正確に把握する必要がある。それによって、想定すべき地震動が決まってくる。また、その活断層の活動によって敷地がどのよう

な動きをするのか、傾くことは無いのか、敷地内断層はないのかなど、原子力の安全性を脅かすさまざまな問題を見逃さずに審査を行う必要がある。

下北半島においても、同様の指摘ができる。東通原子力発電所や六ヶ所再処理工場の敷地を変形させる活断層が無視されてきたことは大問題である。しかし、問題の本質は、事業者も政府の安全審査会（旧原子力安全・保安院、旧原子力安全委員会）も、海域から陸域まで連続する活断層本体（図4、大陸棚外縁断層－六ヶ所断層）は活断層ではないと必死に否定してきたことにある（渡辺、2009、2013；渡辺ほか、2008、2009）。

この地域で想定されている地震規模はM6.8であるが、大陸棚外縁断層が引き起こすであろうと思われる地震規模はM8を超える。地震エネルギーは1/100程度にまで値切られている。また、海底活断層本体や六ヶ所断層が動くことによる「ズレ」も全く想定されていない。変動地形学的に、活断層の位置・形状を正確に把握することは極めて重要な作業である。

原子力施設に高度な安全性が求められることに異論があろうはずはない。危険性が否定できないのであれば、それに正しく対処することが絶対に必要である。しかし、「そんなことをしたら稼働できなくなる、疑わしくは止めず」で審査してきたと、旧原子力安全委員会のメンバーが取材に答えている（朝日新聞、2012）。先に、活断層近傍の土地利用に警鐘を鳴らすべきだという見解に対して「批判」があることを紹介した。この批判は、かつての安全審査に従事していたこのメンバーとメンバーに近い「専門家」をから発せられていたのである。活断層近傍の土地利用を制限されると、「大変困る事態」となることを知ってお

建物を造ればよいのである。

4 結論

海底活断層は、気まぐれに現れているわけではなく、固有の活動を繰り返している。したがって、地震発生領域や津波波源域を具体的に特定するためには、海底活断層の位置・形状を知ることは極めて重要な課題となる。また、変動地形学的に活断層の位置・形状を精査しておくことは、原子力施設の安全性を担保するための第1歩である。その上で、想定すべきことを想定し、高度な安全性を確保しなければならない。

東北地方大震災および福島事故で学んだ教訓を胸に、2度と悲劇を繰り返さないように、今後も活断層研究を進めてゆく必要がある。

引用文献

- 朝日新聞, 2012, プロメテウスの罠―地底をねらえ, 22. (2012年10月17日).
- Fujiwara, T., S., Kodaira, T., No, Y. Kaiho, N. Takahashi, and Y. Kaneda, 2011, The 2011 Tohoku-Oki Earthquake: Displacement Reaching the Trench Axis, *Science*, 334, 1240.
- 後藤秀昭・中田 高・渡辺満久・鈴木康弘・徳山英一・隈元 崇・加藤幸弘・西澤あずさ・泉 紀明・伊藤弘志・渡邊奈保子・植木俊明・梶 琢, 2009, アナグリフでみる南海トラフの変動地形. 2009年活断層学会秋季大会, P-13.
- 後藤秀昭・中田 高・渡辺満久・鈴木康弘・徳山英一・隈元 崇・佐竹健治・加藤幸弘・西澤あずさ・泉 紀明・伊藤弘志・植木俊明・梶 琢, 2010, 詳細 DEM 画像を用いた南海トラフ西部の海底活断層. 日本地震学会秋季大会, 19.
- 石橋克彦・佐竹健治, 1998, 古地震研究によるプレート境界巨大地震の長期予測問題, *地震*, 50, 1-21.
- 泉 紀明・加藤幸弘・西澤あずさ・伊藤弘志・渡辺奈保子・中田 高・後藤秀昭・植木俊明・梶 琢, 2011, 3 秒グリッド DEM から作成したフィリピン海プレート北縁部の 3D 画像. 海洋情報部研究報告, 47 号, 83-89.
- 地震調査委員会, 1999, 「日本の地震活動―被害地震から見た地域別特徴―〈追補版〉」. 395pp.
- Maeda, T., T. Furumura, S. Sakai, and M. Shinohara, 2011, Significant tsunami observed at the ocean-bottom pressure gauges at 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, 63(7), 803-808.
- 中田 高・渡辺満久・鈴木康弘・後藤秀昭・徳山英一・隈元 崇・加藤幸弘・西澤あずさ・泉 紀明・伊藤弘志・渡邊奈保子・植木俊明・梶 琢, 2009, 詳細海底地形図による熊野海盆-南海トラフの微小活断層の判読. 2009年活断層学会秋季大会, P-12.
- 中田高・後藤秀昭, 2010, 南海トラフの海底活断層を詳細地形データから探る, *科学*, 80, 852 - 857.
- 中田 高・徳山英一・隈元 崇・渡辺満久・鈴木康弘・後藤秀昭・西澤あずさ・松浦律子, 2013, 南海トラフ南方の銭洲断層と 1498 年明応地震. 地球惑星科学関連学会 2013 年連合大会, SSS35-03.
- 中田 高・後藤秀昭・渡辺満久・鈴木康弘, 2011, 日本海溝と南海トラフの海底活断層にもとづく地震特性の比較. 2011 年度日本地震学会秋季大会, P1-72.
- 島崎邦彦, 2011, ねじ曲げられた科学, *科学*, 82, 冒頭エッセイ.
- 島崎邦彦, 2012, 招待講演: 東日本大震災が「想定外」に至る分岐点, 2012 年日本地理学会秋季大会予稿集, S1701.
- 東海沖海底活断層研究会 編, 1999, 「東海沖海底活断層」東京大学出版会.
- 渡辺満久・中田 高・鈴木康弘, 2008, 下北半島南部における海成段丘の撓曲変形と逆断層運動. 活断層研究, 29, 15-23.
- 渡辺満久, 2009, 原子力関連施設周辺における活断層評価への疑問. *科学*, 79, 179-181.
- 渡辺満久・中田 高・鈴木康弘, 2009, 原子燃料サイクル施設を載せる六ヶ所断層. *科学*, 79, 182-185.
- 渡辺満久, 2010, 原子力施設安全審査システムへの疑問. *環境と公害*, 39, 35-41.
- 渡辺満久・中田 高・後藤秀昭・鈴木康弘・徳山英一・隈元 崇・佐竹健治・加藤幸弘・西澤あずさ・泉 紀明・伊藤弘志・植木俊明・梶 琢, 2010, 詳細 DEM 画像から探る相模トラフ〜紀伊半島沖の海底活断層. 日本地震学会秋季大会予稿集, 18.
- 渡辺満久・中田 高・後藤秀昭・鈴木康弘, 2011, 日本海溝沿いの活断層の分布と地震・津波. 日本地理学会 2011 年度秋季大会, 416.
- 渡辺満久・中田 高・後藤秀昭・鈴木康弘・隈元 崇・徳山英一・西澤あずさ・木戸ゆかり, 2012, 日本海溝とその周辺の活断層と巨大地震. 日本地理学会 2012 年度春季学術大会,
- 渡辺満久・中田 高・鈴木康弘・後藤秀昭・隈元 崇・徳山英一・西澤あずさ・木戸ゆかり・室井翔太, 2012, 日本海溝とその周辺の活断層と巨大地震. 地球惑星科学関連学会 2012 年連合大会, SSS38-P08.
- 渡辺満久, 2013, 原子力規制委員会の活断層評価―張り子の虎ではないのか? 日本原子力学会誌, 55, 577-581.

福島第一原子力発電所の事故で発生した 放射性廃棄物の処理・処分に内在する課題

北海道大学大学院工学研究院 佐藤努

東京電力福島第一原子力発電所の事故により、オンサイトやオフサイトに大量の放射性廃棄物を持つこととなってしまった。これらの中には、人類にとって処理・処分の実績がなく、とても取扱いが困難な廃棄物も含まれる。これらは全て後世に負の遺産として残してしまうことになるので、事故を起こした東京電力はもちろんのこと、エネルギーを享受した現代に生きる我々も英知を結集して後世の負担を限りなく少なくする責務を有している。本モノグラフでは、異なる分野の様々なバックグラウンドを有している方々を対象として、オフサイト・オンサイトの汚染と発生している放射性廃棄物の現状や放射性物質を除去・回収・処理・廃棄するための技術と課題について紹介する。

1. はじめに

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震により発生した津波被害により、東京電力・福島第一原子力発電所において、炉心および使用済燃料貯蔵プール内の燃料が冷却できなくなった。このことが要因となって燃料が損傷し、炉心を冷却していた水との反応で水素爆発を引き起こし、大量の放射性物質が外部に放出され周辺に甚大な影響を与えるに至った（ただし、発電所外に放出された放射性核種は多く見積もっても5%程度で、の残りの95%は原子炉内に燃料や汚染水として残存している）。発電所の周辺環境（オフサイト）に放出された主な放射性核種は、揮発しやすい ^{131}I （半減期：約8日）、 ^{137}Cs （半減期：30年）、 ^{134}Cs （半減期：約2年）、 ^{90}Sr （半減期：約29年）等であるが、放射線量の観点からは ^{131}I 、 ^{137}Cs 、 ^{134}Cs が注目すべき核種と考えられている。しかし、周知のように放射性核種は時間とともにその放射線量が減少し、 ^{131}I は80日経過する毎に放射線量が1/1000に減少していくので、事故発生から数カ月間に検出できなくなっている。したがって、オフサイトの当面の除染・回収作業の対象は ^{137}Cs や ^{134}Cs と考えて差支えないし、発生する廃棄物の処分安全性を考える時もCsが評価対象となる。

一方、福島第一原子力発電所（オンサイト）内では、メルトダウンした燃料（通常燃料デブリと呼ばれている）や土壌、ガレキ、伐採木、汚染水、燃料の循環注水冷却に伴い発生する汚染水処理二次廃棄物等の「事故廃棄物」が多量に発生し、現在までのところ燃料は手つかず、それ以外はサイト内で保管されている。事故廃棄物のうち、土壌、ガレキ、伐採木の主なものは水素爆発で放出された放射性核種で汚染されたものなので、当面の除染・回収作業の対象は ^{137}Cs や ^{134}Cs となるが、汚染源に近い ^{90}Sr についても無視できない。それに対して、燃料や汚染水二次廃棄物は上記揮発性核種以外にも大量に含まれるので、処理・処分対象とする核種は多い。

このように、オフサイト・オンサイトともに多

種多様で大量な廃棄物が生じ、それらは安全に処理・処分する必要がある。本モノグラフでは、オフサイト・オンサイトの汚染と発生している放射性廃棄物の現状や放射性物質を除去・回収・処理・廃棄するための技術と課題について紹介する。ここで紹介する内容に関する情報は、東北地方太平洋沖地震以降に日本全国で緊急かつ鋭意に調べられてきたもので、まだ論文等で紹介されていないものがほとんどである。また、それらの情報は常にアップデートされているので、ここに記述する内容が将来変更される可能性も高い。可能な限り現段階でそれらにアプローチできる最新情報を参考文献としてリストアップするが、将来にわたって内容や引用が保証されていないことをお断りしておく。

2. オンサイトに溜まる事故廃棄物の発生状況と特徴

オンサイトに溜まる事故廃棄物は、汚染水処理二次廃棄物、土壌、ガレキ、伐採木、燃料デブリ、解体廃棄物に分類され保管されている。それぞれの詳細は、日本原子力学会の「福島第一原子力発電所事故により発生する放射性廃棄物の処理・処分」特別専門委員会が作成している報告書（同学会のホームページで公開予定）で明らかになる予定である。平成26年1月までの発生状況をまとめると、汚染水処理水が412,816 m^3 、水処理二次廃棄物が多数（詳細は後述）、土壌が615 m^3 、ガレキと伐採木がともに71,000 m^3 、燃料デブリと解体廃棄物がともに不明となっている。当然のことながら、処理によって敷地内以外に放出する可能性のある汚染水処理水以外の廃棄物量は、今後増え続けるものであって減る可能性は全くない。

これらの事故廃棄物は、事故によりコントロールできない状況で発生したために、今までに発生している放射性廃棄物とは大きく異なる特徴を持つ。共通している特徴は以下のとおりである。

- ① 物量が多いこと。
- ② 1～3号機の炉心燃料を起源とした汚染であるので、放射化物や運転廃棄物由来のもの

は含まれている可能性があること。

- ③ 発電所の廃止措置作業が状況に応じて変化するために発生量の想定が困難であること。
- ④ 汚染範囲が広く、高線量箇所もあるため、核種組成（特に長半減期核種）に関するデータが非常に限定的であること。
- ⑤ 処理・処分や保管の実績が乏しいか全くないこと。

このように、「どんな廃棄物」が「何時」「どれくらい」発生するか」の想定が困難で、想定したとしても大きな不確実性が伴う。しかしながら、それを覚悟しながらも効率的・効果的に研究や開発を進めていく必要があることを念頭に置いておく必要がある。

3. 汚染水の処理と発生廃棄物の処理・処分

2013年12月現在、発電所内に溜まる汚染水の浄化では、図1に示すようなシステムが採用されている。このシステムは、タービン建家等に滞留した放射線レベルの高い滞留水の流出防止を目的として、集中廃棄物処理建家に移送・貯蔵した滞留水を処理し、原子炉への注入水に利用するためのものである。このシステムは4つの装置で構成され、油分を分離した後に、米国 Kurion 社製ゼオライトを含有する「セシウム吸着装置」および東芝製の「第二セシウム吸着装置」で放射性 Cs を除去し、最後に海水の塩分を除く工程（逆浸透膜(RO)と蒸発濃縮を併用した工程）となっている。汚染水処理システムが稼働した当初は、仏国のアレバ社の「除染装置」でフェロシアン化ニッケルあるいはフェロシアン化鉄も使用されていた。汚染水の放射線量のほとんどが Cs 由来であるので、第一義的に汚染水からの ^{137}Cs や ^{134}Cs の除去を念頭に置いたシステムということになる。この処理システムは汚染水の放射線量を低減することには成功している。しかし、この汚染水

処理装置の稼働率が向上すればするほど、処理に伴い高濃度の放射性廃棄物が発生することになる。稼働から2014年3月11日までに発生した廃棄物は、Kurion社の吸着塔466本、東芝社の吸着塔98本、アレバ社の汚泥597m³に達する。

上述の汚染水処理システムの他に多核種除去装置（ALPS:Advanced Liquid Processing System と呼ばれる）という汚染水処理システムも設置されている（図2）。上述の汚染水処理設備では、放射性物質のCsを主に除去しているが、それ以外の除去が困難であった。ALPSではセシウム以外の告示濃度限度を超えている62種の放射性物質（トリチウムを除く）の除去が可能となっている（表1）。このALPSは平成26年3月現在で試験運転中であるが、すでに前処理設備から発生する澱物を保管する容器が240基、吸着塔15塔が廃棄物として発生している。

これらは現在、敷地内の保管場所にあるが、一部の廃棄物では含まれる核種の種類と濃度が把握できず、処理・処分法の見通しは立っていない。また、放射性廃棄物の処理・処分法を定めた原子炉等規制法を適用できるかどうかが問題で、新しく法律を整備する必要があるかもしれない。このように、汚染水処理に伴い発生する廃棄物にはいくつもの課題が指摘されているが、その他にも筆者の研究分野から見ると以下に示すような三つの大きな課題が内包する。

一つめの課題は、汚染水を共沈法で処理した後に大量に発生する澱物の処理・処分方法である。アレバ社の「除染装置」発生したフェロシアン化ニッケルあるいはフェロシアン化鉄、ALPSの鉄および炭酸塩共沈で発生した澱物がこれに当たる。通常、有害重金属等を含有する廃水の処理で生成した澱物は、処理場周辺に埋め立て処分されるか管理型処分場等に処分される。これに関しては、鉱山廃水処理の分野での経験が豊富である。

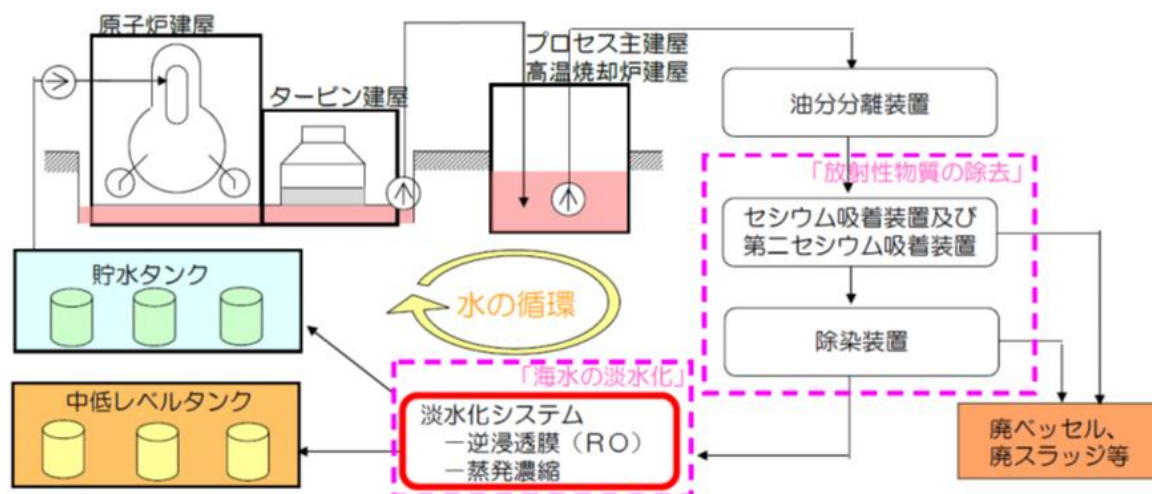


図1 福島第一原子力発電所で採用されている汚染水処理システムの概要

ただし、放射性 Cs を管理項目にしている管理型処分場は現存しないので、現行法のままでは同様な方法での処分は認められない。したがって、他の放射性廃棄物と同様に処理あるいは処分されるのが普通と考えるのがもっとも確からしい。しかし、我が国ではこのような澱物の形で放射性廃棄物を処理・処分した例はなく、どのように澱物を処理・処分するかが大きな課題となる。フェロシアン化ニッケルあるいはフェロシアン化鉄を澱物の形状のまま処分することは、ハンドリングの観点から困難で、ドラム缶に詰めるか固化する必要があるものと考ええる。通常であれば、他の低レベル放射性廃棄物と同様に、セメントなどで固化するものと考えるが、フェロシアン化物はアルカリ条件では安定性に乏しいという報告がある。さらに、土壤に生息する微生物の中には、フェロシアン化物をシアン化物イオンにまで分解する能力を有するものがあるという報告もある。放射性 Cs はもちろんのこと、シアン化物イオンも猛毒な物質であることから、処分方法や処分後の長期挙動評価のためのデータが早急に必要となる。

二つめの課題は、保管や処分の観点から、共沈法という定量的な評価が難しい処理方法を採用していることである。フェロシアン化物共沈法では Cs、鉄共沈法では放射性の Ni や Co、炭酸塩共沈法では吸着塔での Sr の吸着を阻害する非放射性の Mg や Ca を除去することを目標に処理が実施されている。しかし、共沈法で生成される固相は熱力学的に準安定相が生成することが多く、そのような準安定相は反応性が高く表面積も大きい。それゆえに、共沈法によって、化学的挙動や半減期の異なる様々な核種が汚染水から除かれている可能性が高い。もしそうであるならば、処分困難な廃棄物を日夜大量に作成しているこ

とになる。また、共沈時に汚染水から除去された核種の中には、非常に弱くホストに吸着しているものがあり、含水量の多い澱物を保管している最中に浸出液の中に溶け込んで漏れ出る恐れもある。保管容器が健全であれば問題はないが、保管期間が長くなれば大きな問題に発展する可能性がある。さらに、共沈法で生成された澱物は準安定相であるために、保管期間中に安定相に変化する可能性も否定できない。安定相に変化する際に吸着していた核種が漏れ出す可能性も十分予想される。

三つめの課題は、放射性 Cs に代表されるような発熱性核種を吸着・共沈して回収する場合には、吸着材や共沈材処分の安全評価上、それらの熱的性質に関するデータが必要である。ちなみに、発電所内に溜まる汚染水の浄化に使用・保管されている Kurion 製の吸着塔の中心部の温度は 360℃、東芝製の吸着塔の中心部は 500℃と報告されている。したがって、Cs を吸着したゼオライト等は、処分の際のハンドリング性を考慮すると吸着塔のまま処分するかセメントやガラスなどで固化する必要があるものと予想される。しかし、温度の低下の前に固化するのであればセメントの熱影響やゼオライトとセメントとの相互作用など、処分の安全評価上重要となる項目の検討も早急に必要となる。

緊急時の対応として汚染水の浄化効率が優先されたため、システム稼働の当初では発生廃棄物のことまで思いを巡らせる余裕はなかったと推察する。しかし、状況が落ち着いてきた現状では、発生廃棄物の処理・処分のことも十分考慮してシステムや仕様を再考する必要があるものと考え

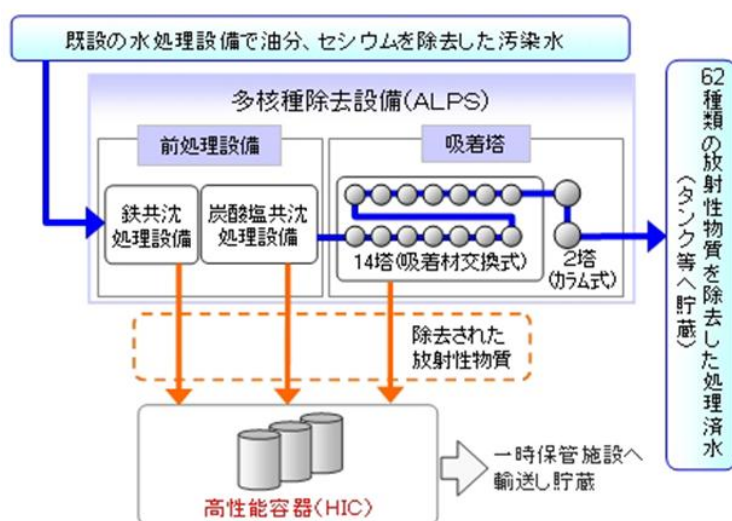


図2 福島第一原子力発電所内に設置されている多核種除去装置(ALPS)の概要

核種	半減期	核種	半減期
1 ルビジウム(Rb)-86	約19日	32 バリウム(Ba)-140	約13日
2 ストロンチウム(Sr)-89	約51日	33 セリウム(Ce)-141	約32日
3 ストロンチウム(Sr)-90	約28年	34 セリウム(Ce)-144	約280日
4 イットリウム(Y)-90	約64時間	35 プラセオジム(Pr)-144	約17分
5 イットリウム(Y)-91	約58日	36 プラセオジム(Pr)-144m	約7分
6 ニオブ(Nb)-95	約35日	37 プロメチウム(Pm)-146	約6年
7 テクネチウム(Tc)-99	約210,000年	38 プロメチウム(Pm)-147	約3年
8 ルテニウム(Ru)-103	約40日	39 プロメチウム(Pm)-148	約5日
9 ルテニウム(Ru)-106	約370日	40 プロメチウム(Pm)-148m	約41日
10 ロジウム(Rh)-103m	約56分	41 サマリウム(Sm)-151	約87年
11 ロジウム(Rh)-106	約30秒	42 ユロピウム(Eu)-152	約13年
12 銀(Ag)-110m	約250日	43 ユロピウム(Eu)-154	約9年
13 カドミウム(Cd)-113m	約15年	44 ユロピウム(Eu)-155	約6年
14 カドミウム(Cd)-115m	約45日	45 ガドリニウム(Gd)-153	約240日
15 スズ(Sn)-113m	約290日	46 テルビウム(Tb)-160	約72日
16 スズ(Sn)-123	約130日	47 プルトニウム(Pu)-238	約88年
17 スズ(Sn)-126	約100,000年	48 プルトニウム(Pu)-239	約24,000年
18 アンチモン(Sb)-124	約60日	49 プルトニウム(Pu)-240	約6,600年
19 アンチモン(Sb)-125	約9年	50 プルトニウム(Pu)-241	約14年
20 テルル(Te)-123m	約120日	51 アメリシウム(Am)-241	約430年
21 テルル(Te)-125m	約58日	52 アメリシウム(Am)-242m	約150年
22 テルル(Te)-127	約9時間	53 アメリシウム(Am)-243	約7400年
23 テルル(Te)-127m	約110日	54 キュリウム(Cm)-242	約160日
24 テルル(Te)-128	約70分	55 キュリウム(Cm)-243	約29年
25 テルル(Te)-129m	約34日	56 キュリウム(Cm)-244	約18年
26 コウ素(1)-129	約16,000,000年	57 マンガン(Mn)-54	約310日
27 セシウム(Cs)-134	約2年	58 鉄(Fe)-58	約45日
28 セシウム(Cs)-135	約9,000,000年	59 コバルト(Co)-58	約71日
29 セシウム(Cs)-136	約13日	60 コバルト(Co)-60	約5年
30 セシウム(Cs)-137	約30年	61 ニッケル(Ni)-63	約100年
31 バリウム(Ba)-137m	約38分	62 亜鉛(Zn)-65	約240日

表1 多核種除去装置(ALPS)で除染が見込まれる核種

4. オフサイトの土地・水・建物・道路・里山等の除染

国際放射線防護委員会(ICRP: International Commission on Radiological Protection)は、緊急避難区域から外側にありながらも、放射能に汚染された環境で生活する場合には、被ばく量が1-20mSv/年の範囲に収まるように提案している。また、長期的には1mSv/年以下を目指し、土地・水・建物・道路・里山等の居住地周辺ではALARA(As Low As Reasonably Achievable)の概念が適用されるべきとしている。ALARAの概念とは、国際放射線防護委員会が1977年勧告で示した放射線防護の基本的考え方を示す概念で、「すべての被ばくは社会的、経済的要因を考慮に入れながら合理的に達成可能な限り低く抑えるべきである」という基本精神に則り、被ばく線量を制限することを意味している。ALARAの概念は頻繁に誤解されることが多いのだが、合理的でない防護を無理して行う必要はない(As low as possibleではない)というのもALARAの主張である。したがって、緊急避難区域や計画的避難区域の解除のためには、

- ① 暫定的な目標として、少なくとも1-20mSv/年の範囲に収まるように被ばく量を抑える、
- ② それ以上に被ばく量を抑えるためにはどのような対策が可能か、そしてその対策にかかる費用はどれくらいか、またそれらを実施した結果どの程度の低減が可能になるかを明確にする、

③ それらの対策によって生じる二次的なリスク(作業員の被爆や処分場の安全性等)の有無を明確にする、

④ それらの対策が合理的に実行可能で二次的に発生するリスクが十分に小さければ実施し、被ばく量の一層の低減に努める、
というプロセスが必要となる。このプロセスを「ICRPは1-20mSv/年の範囲と言っており、一般公衆の被ばく量限度は1mSv/年なのだから、1mSv/年以下に被ばくを抑えるにはどのような対策をとるべきか」というところから始めてしまうと、1mSv/年以下にできないうちは避難を継続しなければならないことになってしまい、それがReasonably Achievableでないことは明らかである。

上述のように、緊急避難区域や計画的避難区域解除のための除染作業では、

① 1-20mSv/年の範囲に収まるような除染方法であるかどうか？

② 除染コストがReasonableかどうか？

③ 作業員の被爆低減が図られているかどうか？

④ 発生する廃棄物は安全に処分しやすいものであるかどうか？

等の条件についてチェックされていることが必要になってくる。土壌等の放射能汚染は¹³⁷Cs(半減期約30年)と¹³⁴Cs(半減期約2年)によるものであり、近々の自然減衰は期待できないことから、放射性Csを効率よく除去することが求められている。

土地・水・建物・道路・里山等から放射性Csを効率よく除去するためには、まず初めにそれぞれの媒体におけるCsの存在状態を理解する必要がある。無機化学種の存在状態を理解するための観点は多数あるが、放射性核種の場合にはその移動性や植物への移行性の観点から、水で抽出可能なフラクション(溶解態)、酢酸アンモニウム溶液で抽出可能なフラクション(交換態)、土壌粒子等に強く固定されているフラクション(懸濁態)等に区別されることが一般的である。Csイオンが粘土あるいは粘土鉱物に固定化されることは周知の事実であり、大気圏核実験やチェルノブイリ事故、そして今回の福島第一発電所事故に由来する¹³⁷Csの研究より、土壌中ではそのほとんどが懸濁態で存在することが明らかとなっている。したがって、粘土あるいは粘土鉱物を多く含む土壌では、フォールアウト(放射性降下物)として沈着したCsが土壌表面付近に濃集してあまり移動していない。事実、福島第一原発事故由来の放射性Csのほとんどは深さ5cm程度までにとどまっている。¹³⁷Csを利用した堆積物の年代決定では、Csが堆積物中を移動しないことが前提となっていることから、Csが土壌中を浸透し難いイオンであることがうかがえる。したがって、汚

染した土地から Cs を除去する際の基本的な考え方は、様々な土地利用があるのでそう簡単ではないが、Cs が濃集している土壌の表面部分を削ることに他ならない。ただし、その場合は、作業員が Cs を濃集した表面土壌粒子を吸いこんで内部被ばくしないための方策や、削った部分が基準値以上の放射線量を有する場合は放射性廃棄物になるので、処分するまでの隔離や保管、およびその減容化（放射能の高い面分だけ分級して集める方策）が必要になる。汚染土壌の固定化剤としてポリイオンコンプレックスを用いることにより、除染効率を上げてかつ作業員の被曝を防ぐ方法を提案している。この方法では、土壌の固定化および剥離作業中の浮遊塵の発生を抑制でき、固定化した後の固化物に水を加えると再びゲル状に軟化するため固化物の後処理などに柔軟に対応できるなどの有用性が期待できる（図 3）。今後は、様々な土地利用に対応した表層土壌の固化や分級方法の開発が望まれている。



図3 天然ポリイオンコンプレックスで固定化し剥離された土壌片

汚染された水の分布は非常に多様で、海水、河川水、ため池や湖、プール、農業用水等、化学的性質や放射性 Cs の存在状態なども様々である。したがって、一律に除染・回収作業の方策について議論できるものではない。ただ、子供たちが使用するプールや飲用あるいは農業用水として使用されるため池の水等の中に、Cs がイオンとして溶けている割合は非常に少ない。水から放射性 Cs が検出されたとしても、そのほとんどは懸濁している粘土粒子に固定化された Cs であるので、Cs イオンに選択性のある材料を使用しても、その除去効果はあまり期待できない。むしろ、懸濁粒子を捕獲する材料（例えば大きな空隙を有する珪藻土等）を使用すると、効率的に放射性セシウムを回収することができるし、水に懸濁するような小さな粒子を捕獲しているので、そこから生ずる廃棄物の容積は小さく抑えることができる。

建物の壁面や道路の場合は、高圧洗浄機などを使用した放射性物質の除去が実施されている。

ただし、洗浄によって放射性 Cs が消滅するわけではないので、洗浄水が流れる先（排水溝や側溝、溝渠等）で吸着材等により回収することが好ましい。現在までに実施されてきた除染作業では、水による洗浄では十分に除染できない場合があり、その場合は粘土鉱物（ベントナイト等）を混ぜた懸濁液の散布（乾燥後捲れ上がった粘土は回収して放射性廃棄物として隔離・保管）、あるいは道路のように作業条件の良い場合は、鉄粉の高速吹き付けによる表面削剥（発生粉塵は吸引回収して放射性廃棄物として隔離・保管）で対処可能なようである。

一般的に、里山（森林）の放射線量は他に比べて高いことが知られている。これは、福島第一発電所からの放射性核種が大気によって運ばれてきて雨により沈着するか、標高の高い山にぶつかってそのまま沈着するためである。里山の場合は居住地に近いので、居住地でいくら建物や土地などを除染しても里山の除染をしない限り空間線量率の低減は期待できない。また、風によって放射性 Cs が里山から運ばれたり、里山での土壌のエロージョンによって Cs を固定化した粘土懸濁液が居住地に到達すると再汚染されることになる。したがって、里山の除染は、汚染の下流側にある居住地よりも優先して実施されるべきものとする。里山は傾斜地であるためエロージョンによって粘土粒子ごと流される可能性が高い。降雨時に土壌粒子を懸濁した色水が里山の斜面を流れていることが観察されることから、エロージョンによる放射性 Cs の移動は容易に予想可能である。里山や森林は通常であれば人の手が入り管理されているが、事故後に間伐等の管理がおろそかになっているとエロージョンによる放射性 Cs の移動を抑制することが難しくなることを失念してはならない。

5. 土地・水・建物・道路・里山等の除染除染によって発生した廃棄物の仮置と処分

上述のように、除染は避難区域解除のために必須であり早期に望まれていることである。しかし、除染により大量の廃棄物が発生し、それを処分する必要がある。廃棄物中の ^{137}Cs の濃度にもよるが、低レベル放射性廃棄物処分と同じように考えると 100 年程度安全に隔離する必要がある廃棄物である。廃棄物の処分地や処分方法を選定するまでには時間がかかることが予想されるので、それまでは仮置したり中間貯蔵したりする必要がある。そのため、環境省は「処分場の建設に向けたロードマップ」を 2011 年 10 月 29 日に発表した。図 4 は、そのロードマップに基づいて決められた福島県内で除染に伴い発生する土壌・廃棄物の処理フローを示したものである。このようなロードマップや処理フローが存在することに

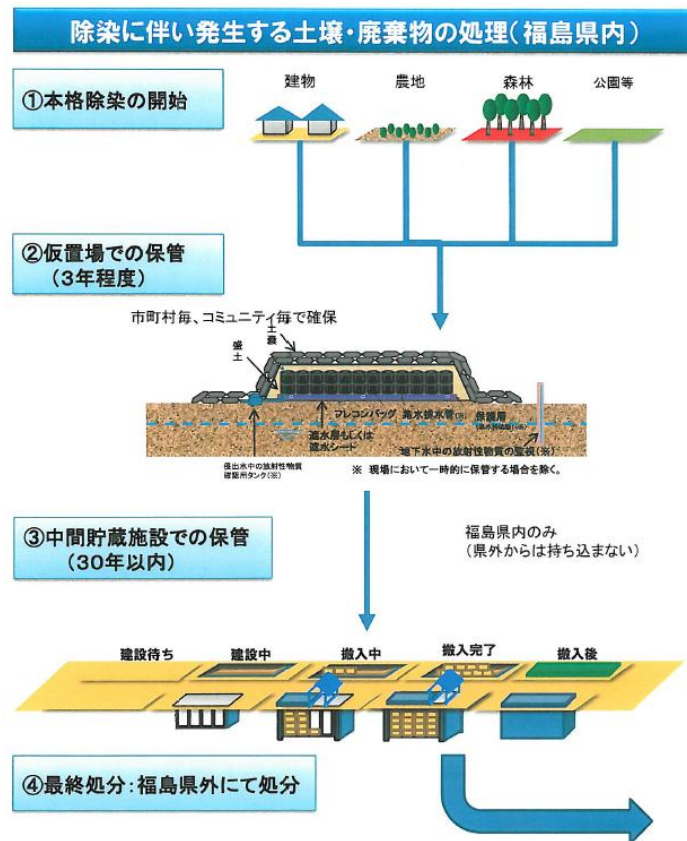


図4 福島県内で除染に伴い発生する土壌・廃棄物の処理フロー

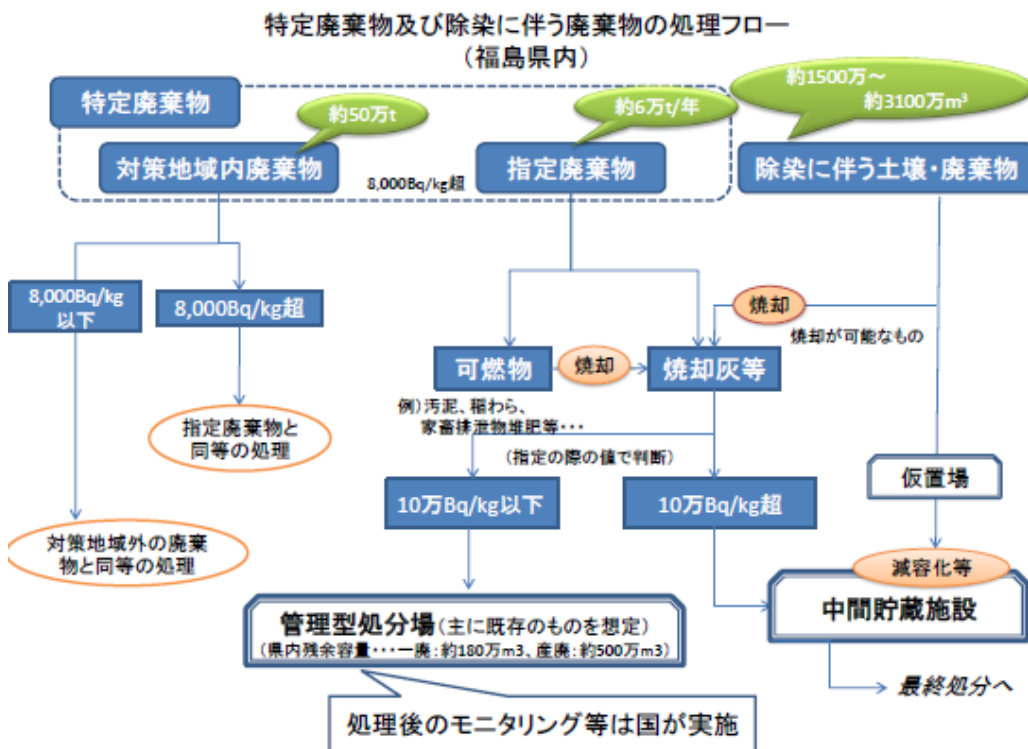


図5 福島県で発生した特定廃棄物および除染に伴う廃棄物の処理フロー

よって統一のとれた対応ができるし、仮置場の設置がなければ本格的な除染を開始できないので、ロードマップの提示は早期の除染を望むものにとっては大歓迎であった。本論ではこのロードマップに対する詳細なコメントは控えるが、特に除染に伴う土壌・廃棄物のプロセスの詳細が明確でなく（図5参照。それ以外の廃棄物は詳細に区分されているのに対して、除染に伴う土壌・廃棄物は中間貯蔵の前に「減容化等」としか示されておらず、またその減容化の詳細は何も決まっていない）、実施の可能性に関して大きな疑問を抱いてしまう。例えば、前述のように100年程度隔離すれば十分な廃棄物を30年中間貯蔵し、その後さらに移動（しかも福島県外に）して最終処分することが将来世代に負担の無い現実的な選択なのだろうか？除染の推進が国により加速された2011年12月初めの段階では、市町村やコミュニ

ティー毎に設置する予定の仮置場の設置もままならない状況で、早期の本格的な除染の開始を阻む大きな要因となっていた。現在は、仮置の設置が進み（図6）、中間貯蔵施設（図7）の建設に向けて検討されている段階である。それら施設の安全性を示すことはもちろんのこと、住民の方々にどうしたら安心してもらえるか早急に検討・提示されるべきと考える。

6. おわりに

上述のように、福島ではオンサイト、オフサイトともに、多様な対象物と多様な状況に応じた放射性Csの除去・回収が必要である。また、それらの作業から必ず発生する放射性廃棄物の処分のことも念頭において除染や回収が実施される仕組みの構築も必要である。さらに、除染作業で



図6 福島県に設置されている仮置場の状況



図7 中間貯蔵施設のイメージ図

発生する放射性廃棄物は、ガレキ、メルトダウンした燃料、原子炉やその建屋、土壌、伐採木等 2011 年 3 月 11 日まで想定していなかった放射性廃棄物であり、廃棄物や処理・処分の新しい枠組みの構築も必須となる。除染や回収の効率だけが優先されてこれらのことが後回しになると、大きなしっぺ返しがあることを忘れてはならないであろう。廃棄物処分の分野では頻繁に「世代間の公平性」が議論される。しっぺ返しが次世代のつけとして残らないように、現世代で全力を挙げて取り組むべき課題と考える。

謝辞

本稿をまとめるにあたって、多くの方々との議論や福島でのモニタリングや除染作業が参考になっていることは言うまでもない。以下にお世話になった方々を列挙し感謝したい。文部科学省（放射性物質の分布状況等に関する調査研究）、農水省（農地土壌等における放射性物質除去技術の開発）、山田裕久博士（物質・材料研究機構）、長縄弘親博士、柳瀬信之博士、三田村久吉博士、永野哲志博士、松永武博士、安藤麻里子博士、小嵐淳博士、永井晴康（日本原子力研究開発機構）、長尾誠也教授（金沢大学）、伊藤健一准教授（宮崎大学）、横山信吾博士、中田弘太郎博士（電力中央研究所）八田珠郎博士（国際農林水産業研究センター）、氏家亨氏（国土防災技術株式会社）、武島俊達氏（株式会社アステック東京）、寺田信行氏（株式会社活里）、宮野靖敏氏（株式会社エルフォート）日本原子力学会バックエンド部会有志の皆さま、北海道大学環境地質学研究室の皆さま。

参考文献

- Cremers, A., Elsen, A., De Preter, P. and Maes, A., 1988, Quantitative analysis of radiocaesium retention in soils, *Nature*, **335**, 247-249
- ICRP, 2007, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4).
- ICRP, 2009, Application of the Commission's Recommendations to the Protection of People Living in Long-term Contaminated Areas After a Nuclear Accident or a Radiation Emergency. ICRP Publication 111. Ann. ICRP 39 (3).
- 環境省, 2011, www.env.go.jp/jishin/rmp/attach/roadmap111029_a-0.pdf
- 環境省, 2013, http://josen.env.go.jp/soil/interim_storage_facility.html#03
- Koarashi, J., Atarashi-Andoh, M., Matsunaga, T., Sato, T., Nagao, S., Nagai, H., 2012, Factors affecting vertical distribution of Fukushima accident-derived radiocaesium in soil under different land-use conditions, *Science of the Total Environment*, **431**, 392-401.
- Maes, A., Verheyden, D. and Cremers, A., 1985, Formation of highly selective cesium-exchange sites in montmorillonites, *Clays and Clay Minerals*, **33**, 251-257.
- Matsunaga, T., Koarashi, J., Atarashi-Andoh, M., Nagao, S., Sato, T., and Nagai, H., 2013, Comparison of the vertical distributions of Fukushima nuclear accident radiocaesium in soil before and after the first rainy season, with physicochemical and mineralogical interpretations: *Science of the Total Environment*, **447**, 301-314.
- Meeussenm J.C.L., Kelzem M.G., Riemsdijk, W.H., Haan, F.A.M., 1992, Dissolution behavior of iron cyanide (Prussian Blue) in contaminated soils, *Environ. Sci. Technol.*, **26**, 1832-1838.
- 文部科学省, 2011, http://radioactivity.mext.go.jp/ja/distribution_map_around_FukushimaNPP/0002/5600_091412.pdf
- 内閣府原子力安全・保安院, 2011, <http://www.nsc.go.jp/anzen/shidai/genan2011/genan042/siryo2-1.pdf>
- 長縄弘親, 熊沢紀之, 斉藤浩, 柳瀬信之, 三田村久吉, 永野哲志, 鹿嶋薫, 福田達也, 吉田善行, 田中俊一, 2011, ポリイオンコンプレックスを固定化剤として用いる土壌表層の放射性セシウムの除去, 福島県飯舘村における除染試験の速報, 日本原子力学会和文論文誌, Advance Publication by J · stage, doi:10.3327/taesj.J11.017.
- 日本原子力研究開発機構, 2011, <http://www.jaea.go.jp/fukushima/pdf/josentebiki/01v2.pdf>
- Spezzano, P., 2005, Distribution of pre- and post-Chernobyl radiocaesium with particle size fractions of soils, *Journal of Environmental Radioactivity*, **83**, 117-127.
- 東京電力, 2011, http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/images/handouts_111105_01-j.pdf
- 東京電力, 2011, www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/images/handouts_110714_06-j.pdf
- 東京電力, 2013, http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu14_j/images/140205j0101.pdf
- Tsukada H., Takeda, A., Hisamatsu, S. and Inada, J., 2008, Concentration and specific activity of fallout 137Cs in extracted and particle-size fractions of cultivated soils, *Journal of Environmental Radioactivity*, **99**, 875-881.

2011年3月3日の地震調査研究推進本部事務局と電力事業者による日本海溝の長期評価に関する情報交換会の経緯と問題点

京都大学防災研究所 橋本 学

東京大学 島崎 邦彦

名古屋大学減災連携研究センター 鷺谷 威

2011年2月、地震調査委員会長期評価部会は「三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価（第二版）」（案）をとりまとめ、公表を待つ段階にあった。しかし、3月11日の東日本大震災の発生により、この評価案は公表されることはなかった。ところが、その後の政府と国会の両福島原発事故調査委員会により、この評価に関して事務局が電力事業者に対して事前説明を行い、電力事業者側より修文の要請を受けて修正していたことが明らかにされた。本論では、行政文書開示請求で取得した文書を示し、その問題点について議論する。

1. はじめに

2012年5月の地球惑星科学連合2012年大会のユニオンセッションU-06における橋本の発表に対して、島崎より発せられた質問とそれに対する橋本の回答が噛み合わず、多くの聴衆に疑問を残す結果となった。この質疑は、三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価（以下、三陸～房総沖の長期評価）に関する地震調査研究推進本部（以下推本）事務局と電力事業者の会合（以下、推本事務局の資料に従い「情報交換会」）に関するものであった。複数の方より、経緯の説明をすべきであるとのご指摘をいただいたため、行政文書開示請求により文書を取得し、地震学会員はじめ多くの方に示すつもりであったが、諸般の事情により報告が遅れてしまったことをお詫びする。

本論では、取得した文書を示し、この質疑の詳細について振り返るとともに、この会合に関する問題点について議論する。

2. ユニオンセッションでの質疑と行政文書開示請求の経緯

橋本は、地球惑星科学連合2012年大会において、日本地震学会東北地方太平洋沖地震対応臨時委員会の報告として、「国の施策への向き合い方：advocatesからcriticsへ」と題する発表を行った（橋本・川勝・鷺谷、2012）。この発表に対して、島崎より「三陸～房総沖の長期評価に関して推本が電力事業者に対して説明していたことについてどう考えるか」との質問がなされた。これに対して、その場では橋本から適切な回答をすることができず、聴衆から十分な理解を得ることができなかった。

当時、島崎、橋本、鷺谷らは、推本地震調査委員会長期評価部会の海溝型分科会（第二期）の委員として、南海トラフの地震の長期評価について議論していた。2011年12月、政府の「東京電力福島第一原子力発電所における事故調

査・検証委員会」（以下、政府事故調）は、中間報告を公表した。この中に「東電から文部科学省に対し、改訂案の表現を工夫してほしいと要請した」との記載があったため、2012年1月に地震調査委員会、長期評価部会および海溝型地震分科会関係者にメールと添付文書にて経緯の説明があった。島崎の質問は、この経緯に対してどう考えるか、というものであった。橋本が回答に躊躇したのは、守秘義務の問題を懸念したこと（メールは委員限りとされていた）と、平野大臣（当時）の会見でも同じ問題が取り上げられていたものの（2012年2月28日）、この会見の内容に対する理解が不十分で混乱したためである。

連合大会の後、複数の方から、経緯を地震学会員に説明するべきである、とのご指摘をいただいた。このため、著者らは推本事務局に前記添付文書の自主的な公開を求めた。しかし、事務局からは、すでにメディアに対しては行政文書開示請求で対応しており、また、個人情報の問題もあるので、行政文書開示請求でお願いしたい、との回答があった。そこで、橋本が著者らを代表して図1の行政文書開示請求を行い、当該文書を得た。請求は2012年8月3日に行い、開示の決定は9月5日になされている（図2）。この決定を受けて、9月14日に開示の実施方法について申し出、最終的に文書が発送されたのは9月18日である（図3）。なお、開示文書においては、個人情報に関わる部分は黒塗りになっている。

3. 開示文書の内容

3.1 情報交換会開催の経緯

文書に記載された経緯を見ると、推本事務局は、長期評価改訂結果の公表前に自治体等に対して頻繁に説明を行っていることが分かる（図4～5）。これは、行政機関として必要なサービスと捉えていいだろう。しかし、三陸～房総沖の長

期評価については、自治体に加え、原子力安全・保安院（以下、保安院）と電力事業者に対して事前説明を行うことが必要と、事務局が判断していることが、まず注目される（図 4 中「●経緯」参照）。事務局は、保安院との打ち合わせを 2011 年 2 月 22 日（図 4、図 10 の正誤表も参照）に行っているが、その内容は記載が無い。この打ち合わせにおいて、電力事業者との情報交換会が提案された可能性がある。

2 月 23 日の長期評価部会において更なる改訂がなされた後、3 月 3 日に問題の情報交換会が開催された。この会には、電力側より 9 名、推本事務局からは 3 名が出席した。この席で、推本事務局より長期評価部会における再改訂案について説明がなされ、これに対して電力事業者側からの要望があった。注目すべきは、3 月 29 日にも電力事業連合会等との意見交換会が予定されていたことである（図 4）。資料によると、3 月 29 日は活断層の評価に関するものであったことがわかる。

3. 2. 評価文修正案の内容

さて、「三陸～房総沖の長期評価」の評価文の修正内容はどのようなものであったのか？ 3 月 8 日時点の修正案を図 6～8 に示す（図 9 の正誤表も参照）。2 月 23 日の長期評価部会での改訂はゴシック体で表記され、意見交換会後の事務局による修正部分には下線が施されている。

長期評価は、主文とこれに関する解説と資料を掲載した説明文からなる。説明文は専門家向けの詳細な資料を掲載しているのに対し、主文はメディアや行政担当者向けに評価のエッセンスが書かれている。

情報交換会後の修正は、以下の通りである。

- 1) 主文の「2-2 次の地震 宮城県沖から福島県沖にかけて」の節において、「なお、貞観地震の震源域は推定できたものの、貞観地震以外の震源域は不明である。」が加わったこと、
- 2) 主文の「3 今後に向けて」の章において、「貞観地震については津波堆積物調査等から断層モデルが推定されたが、今後新しい知見が得られれば、断層モデルが改良されることが期待される。また、貞観地震の地震動についてと、貞観地震が固有地震として繰り返し発生しているかについては、これらを判断するのに適切なデータが十分でないため、さらなる調査研究が必要である」が加わったことである。説明文にも同趣旨の修正がなされている。

これらの修正が、電力事業者からの「貞観地震以外の地震の津波はどこから来たのか（震源域がどこなのか）は、まだわかっていないので、貞観地震が繰り返していると誤解されぬようにしてほしい。」、あるいは「貞観地震の地震動についてはよく分からないので出していないこと、

15 世紀のものはよく分からないことなどが理由も含めて分かるようにしてもらいたい。」との意見を受けたものであることは明白である（図 5 「電力事業者の反応と事務局の回答」中の下線部で、「→」より上が電力事業者の発言要旨）。内容的には大きな変更ではなく、科学的にもデータの限界を踏まえれば、これ以上踏み込んだ記載はできないであろう。

しかし、主文の「3 今後に向けて」における修正（図 6）は、原案では説明文にのみ記載されていた事項であった。主文に記載することにより、その内容が強調される結果となったと理解できる。「今後に向けて」は課題となっている事項に触れ、将来の解決を目指すために書かれることが多い。貞観地震の断層モデルの改良可能性が述べられているが、東電の研究者を主著者とするグループは日本地球惑星科学連合 2011 年大会における発表「福島沿岸周辺における津波堆積物調査」（及川・他、2011）において、津波が標高 4-5m を越えない可能性が高いと主張していた。また、地震動が繰り返されるかどうか不明な点については、説明文に新たに加えられ、さらに主文に記載されたものである。東京電力福島第一原子力発電所における地震動の評価の場合（2009 年 6 月 24 日の原子力安全・保安部会地震・津波、地質・地盤合同 WG）において、産業技術総合研究所の岡村行信氏が貞観地震の地震動を考慮するよう主張されており（総合資源エネルギー調査会、2009）、そのような背景からみると、中立的な記述と言えるかどうか疑問である。

4. 政府および国会事故調査委員会の報告

さて、このような推本事務局と電力事業者との関係に対して、政府と国会の事故調査委員会は、どのように論評しているのだろうか？この点を確認しよう。

まず、政府事故調は、最終報告書の中では、下記のように述べている。

（3）長期評価の改訂に当たり東京電力より要請された表現ぶりの見直しへの対応

中間報告 VI 3（8）c（b）のとおり、長期評価改訂に際し東京電力株式会社（以下「東京電力」という。）は、平成 23 年 3 月 3 日文科科学省に対し、本文中の記述について「貞観三陸沖地震の震源はまだ特定できていないと読めるようにしてほしい、貞観三陸沖地震が繰り返し発生しているかのように読めるので表現を工夫してほしい」等と要請した。本要請に対し、文科科学省は、誤解を与える可能性のある表現については分かりやすくする観点から修正するよう

検討したい旨回答した。これは、科学的知見に基づく事実関係の変更はできないが、誤解を与える可能性のある表現については、より分かりやすくする観点から表現方法を工夫すべきと推本事務局として判断したためであった。なお、同日時点の文案は、東北地方太平洋沖地震の発生を踏まえて全面的に書き改められ同年11月に公表されたが（地震調査委員会、2011）、貞観地震の事実関係については平均発生間隔600年程度で繰り返し発生する東北地方太平洋沖型の地震として明記されており、東京電力の要請が反映されることなく記述は改訂されている。

（政府事故調最終報告書、307-308ページ；下線部および参考文献の引用は筆者記入）

このように、政府事故調は評価文案の改訂について、誤解のないように工夫する、という推本事務局の主張に沿った見解を示している。

一方、国会の東京電力福島原子力発電所事故調査委員会（以下、国会事故調）の見解は、やや異なる。

4）東電の地震調査研究推進本部の津波評価への干渉

東北沖で起きる大地震について、推本は長期評価の改訂を平成21（2009）年6月から進めており、平成23年（2011）年4月に公表予定だった。この中には福島第一原発沖で貞観地震に相当するような巨大津波が発生する可能性の指摘が含まれていた。

推本事務局である文部科学省地震・防災研究課は、東電、東北電力、日本原子力発電の3社と長期評価についての非公式会合（情報交換会）を本事故が発生する8日前の3月3日開いた。

東電は「貞観地震が繰り返して発生しているようにも読めるので、表現を工夫していただきたい」と要望した。文部科学省（以下「文科省」という）の開示した文書によると、この会合後に担当者は「繰り返し発生しているかについては、これらを判断するのに適切なデータが十分でないため、さらなる調査研究が必要である」という一文を加える修正案を作っていた。

文科省資料によれば、現時点で把握している電気事業者との公表前の意見交換会は平成23（2011）年3月3日の一度のみという。

推本がまとめた評価結果を、規制当局である保安院が使用するというのが本来の姿である。ところが評価結果を規制対象となる電力会社が改変しようとしたのは大いに問題がある。文科省の対応も問題であったと考えられる。（国会事故調報告書、501ページ；下線は筆者挿入）

特に重要な点は、最後の指摘（下線部）である。政府事故調はこの点については触れていない。

5．議論とまとめ

さて、この一連の経緯をどのように捉えるべきだろうか？「科学的な議論の内容に変化がないのであるから、結果的に大きな問題ではない」とする立場もあるだろう。しかし、本当にそういえるだろうか？

一般に、長期評価や中央防災会議等の報告は、主文とこれに関する解説と資料を掲載した説明文からなる。説明文は専門家を読者に想定しているのに対し、主文はメディアや行政担当者を意識して書かれている。現実には2013年5月発表の南海トラフの地震活動の長期評価（第二版）では、説明文では計算手法の違いによる幅の広い値が示されているにも関わらず、主文に記載された確率の値が新聞の見出しとなった。このように、主文に記載することにより、新聞記事の見出しにもなることがあり得るわけである。主文に記載するということは、社会的には（少なくともメディアにとっては）その内容の重要度が高いと委員会が結論したと捉えられる。前記の原子力安全・保安部会地震・津波、地質・地盤合同WGでの議論なども考慮して、もっと慎重になるべきではなかったか？

推本の評価に対して、規制対象となる電力事業者側が公表前に改変を働きかけたことに対する国会事故調による批判は重い。文書にあるように、事務局としても科学的な内容に改変は加えないように細心の注意を払っていたと思うが、公表前のタイミングで要望を聞いたこと自体が間違いであった。こうした事前説明が常態化していた点は、国会事故調によって指摘された「規制の虜」の誇りを免れない。この結果失墜した信頼を取り戻すことは、容易ではない。

政府の機関の一つとして、政策の擦り合わせを行う、ということはあることであろう。しかし、推本の評価は地震科学に基づいた地震に関する評価であり、社会や行政の合理性を考慮した評価であってはならない、と筆者らは考える。少なくとも評価に参加した（している）研究者は、社会や行政の合理性により結論が変わることは許容しないだろう。社会や行政の合理性を加味して、政策を決めることは別なメカニズムで行うべきである。推本は今一度その基本方針を確認し、明確に社会に伝えることが必要である。

もちろん、推本が常に社会や行政の合理性も配慮しつつ評価を進めるのであれば、それも一つの選択肢としてあり得るだろう。しかし、そのためには、やはりその趣旨を明確に宣言し、地震科学の研究者のみからなる組織で議論する

のではなく、広い分野の専門家の議論を踏まえるよう、組織の改編をすべきである。

最後に、どのようなケースにおいても、科学として妥当な評価がなされているのか、を批判的に検証していくことは、地震科学研究者の責務の一つであることは間違いない。

なお、開示文書中の個人名が特定される部分については、著者の判断により割愛した。

参考文献

橋本学・川勝均・鷺谷威，国の施策への向き合い方：advocates から critics へ，地球惑星科学連合 2012 年大会，U06-08, 2012.

地震調査委員会，三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価（第二版）について，2011 年 11 月 25 日，http://www.jishin.go.jp/main/chousa/11nov_sanriku/index.htm, 2011.

地震調査委員会，南海トラフの地震活動の長期評価（第二版）について，2013 年 5 月 22 日，http://www.jishin.go.jp/main/chousa/13may_nankai/index.htm, 2013.

及川兼司・高尾誠・宇佐見光宣・宮脇理一郎，福島県沿岸周辺における津波堆積物調査，地球惑星科学連合 2011 年大会，SSS032-P25, 2011. 総合資源エネルギー調査会，原子力安全・保安部会耐震・構造設計小委員会地震・津波，地質・地盤合同 WG（第 32 回）議事録，<http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/shingikai/107/3/032/gijiroku32.pdf>, 2009.

東京電力福島原子力発電所事故調査委員会，報告書（平成 24 年 6 月 28 日），641pp., 2012.

東京電力福島第一原子力発電所における事故調査・検証委員会，最終報告，平成 24 年 7 月 23 日，448pp., 2012.

行政文書開示請求書

平成 24 年 8 月 3 日

文部科学大臣 殿

氏名又は名称：（法人その他の団体にあってはその名称及び代表者の氏名）

京都大学防災研究所 教授 橋本 学

住所又は居所：（法人その他の団体にあっては主たる事務所の所在地）
〒611-0011

京都府宇治市五ヶ庄 TEL 0774(38)4191

連絡先：（連絡先が上記の本人以外の場合は、連絡担当者の住所・氏名・電話番号）

行政機関の保有する情報の公開に関する法律第 4 条第 1 項の規定に基づき、下記のとおり行政文書の開示を請求します。

記

1. 請求する行政文書の名称等

（請求する行政文書が特定できるよう、行政文書の名称、請求する文書の内容等をできるだけ具体的に記載してください。）

平成 24 年 2 月 1 日付け 地震調査研究推進本部事務局作成 第 175 回長期評価部会参考資料
平成 23 年 3 月 3 日の地震本部事務局と東京電力との長期評価改訂に関する情報交換会等について（案）

2. 求める開示の実施の方法等（本欄の記載は任意です。）

ア又はイに○印を付してください。アを選択された場合は、その具体的な方法等を選択又は記載してください。

ア 事務所における開示の実施を希望する。
＜実施の方法＞ ① 閲覧 ② 写しの交付 ③ その他（ ）

イ 写しの送付を希望する。

開示請求手数料 (1 件 300 円)	 200円	（受付印）
------------------------	---	-------

図 1. 平成 24 年 8 月 3 日付け提出の行政文書開示請求書（一部）

24 受文科開第 1444 号
平成 24 年 9 月 5 日

行政文書開示決定通知書

京都大学防災研究所
橋本 学 様

文部科学大臣
平野 博文

平成 24 年 8 月 3 日付け（平成 24 年 8 月 6 日受付）で請求のありました行政文書の開示について、行政機関の保有する情報の公開に関する法律（以下「法」という。）第 9 条第 1 項の規定に基づき、下記のとおり、開示することとしましたので通知します。

記

1 開示する行政文書の名称
・長 175 参考資料 14 平成 23 年 3 月 3 日の地震本部事務局と東京電力との長期評価改訂に関する情報交換会等について（案）

2 不開示とした部分とその理由
委員の氏名・役職については、個人に関する情報であって、特定の個人を識別することができるものであり、公にすることにより個人の権利利益を害するおそれがあるもの、また、公にすることにより国の機関の審議における率直な意見の交換若しくは意思決定の中立性が不当に損なわれるおそれがある。よって、法第 5 条第 1 号及び第 5 号に該当すると判断し、不開示とします。
「日本海溝長期評価情報交換会」上の出席者のメールアドレスのうち法人の職員のメールアドレスについては、個人に関する情報であり、公にすることにより個人の権利を害するおそれがあるもの（法第 5 条第 1 号）、また、国の職員のメールアドレスについては、公にすることにより国の事務事業に支障を及ぼすおそれがあるもの（法第 5 条第 6 号）に該当するため不開示とします。

* この決定に不服がある場合は、行政不服審査法（昭和 37 年法律第 160 号）第 6 条の規定により、この決定があったことを知った日の翌日から起算して 60 日以内に、文部科学大臣に対して異議申立てをすることができます。（なお、決定があったことを知った日の翌日から起算して 60 日以内であっても、決定があった日の翌日から起算して 1 年を経過した場合には異議申立てができなくなります。）
また、この決定の取消しを求める訴訟を提起する場合は、行政事件訴訟法（昭和 37 年法律第 139 号）の規定により、この決定があったことを知った日から 6 か月以内に、国（訴訟において国を代表するものは法務大臣となります。）を被告として、同法 12 条に規定する裁判所に処分取消しの訴えを提起することができます。（なお、決定があったことを知った日から 6 か月以内であっても、決定の日から 1 年を経過した場合には処分取消しの訴えを提起できなくなります。）

3 開示の実施の方法等（* 同封の説明事項をお読みください。）
(1) 開示の実施の方法等
下記に記載した方法のうち、希望される方法等により、開示の実施を受けられます。

図 2. 平成 24 年 9 月 5 日付けの文部科学大臣名の開示決定通知書

平成24年 9月14日

行政文書の開示の実施方法等申出書

文部科学大臣 殿

氏名又は名称 橋本 亨

住所又は居所 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄 京都大学防災研究所

連絡先電話番号 0774-28-4191

行政機関の保有する情報の公開に関する法律第14条第2項の規定に基づき、下記のとおり申出をします。

記

1 行政文書開示決定通知書の番号等
 * 日 付 平成24年9月5日
 文書番号 24受文科開第 1444号

2 求める開示の実施の方法
 下表から実施の方法を選択し、該当するものに○印を付してください

行政文書の名称	種類・量	実施の方法
長175 参考資料14 平成23年3月3日の地震本部事務局と東京電力との長期評価改訂に関する情報交換会等について（案）	A4判文書 6枚 （カチー4枚含む。） （片面0枚、両面3枚）	1 図 覧 ①全部 ②一部（ ） 2 複写機により白黒で複写したもの（①全部） ②一部（ ） 3 複写機により白黒で複写したもの（①全部） ②一部（ ）

3 開示の実施を希望する日

4 「写しの送付」の希望の有無 ☒ 有 ☐ 無 : 同封する郵便切手の額 80円

ここに収入印紙を貼ってください
 ※収入印紙を貼られる前に下記をお読みください。

(受付印)

開示実施手数料 6,000円

（開示実施手数料について）
 実施を希望される方法に応じて、下記の額の収入印紙をお貼りいただくようお願いいたします。

①閲覧を希望される場合 _____ 無料

②複写機により白黒で複写したもの（①全部）
 希望される場合 _____ 無料

上記の以外の実施を御希望される場合は、御提出前にお問い合わせください。

文部科学省

24.9.18

文書情報管理室

*担当課等 研究開発局地震・防災研究課 Tel 03-5253-4111 (内線 4439)

図3. 平成24年9月14日付けの行政文書の開示の実施方法等申出書.

平成 23 年 3 月 3 日の地震本部事務局と東京電力との長期評価改訂に関する
情報交換会等について(案)

平成24年2月1日

地震本部事務局

●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書の記載（404ページ 10-14行目抜粋）

東京電力は、同月3日に文部科学省で開催された推本の長期評価改訂に関する情報交換会の概要を説明するとともに、文部科学省に対し、「貞観三陸沖地震の震源はまだ特定できていないと読めるようにしてほしい。改訂案は貞観三陸沖地震が繰り返し発生しているかのようにも読めるので、表現を工夫してほしい。」などと要請したことを紹介した。

●経緯

地震本部事務局では、従来から、長期評価を公表する前に、関係する自治体等に事前説明（情報交換会）を行っている。

事前説明は、事務局にとっては長期評価に対する反応や意見を伺える等、自治体等にとっては事前の対応準備ができる等のメリットがある。

三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価（以下、三陸房総の長期評価）については、関係する自治体のみならず、特に貞観タイプの地震に関連して沿岸部に重要施設を保有する電力事業者（東京電力（以下、東電）・東北電力・日本原子力発電）にも事前説明が必要と判断した。事前説明の日程、場所、参加者は以下のとおり。

なお、岩手県からは、事前説明は必要ないとの回答を得た。

事前説明等の日程、場所、参加者（日付はいずれも平成23年）

日付	会議名	場所	参加者
1/21	内閣府（防災担当）	局2会議室	課長、管理官、補佐
1/26	第165回長期評価部会	16F特別会議室	管理官、企画官、調査班
1/27	宮城県沖地震長期評価改訂の説明	宮城県庁	課長、管理官
1/31	宮城県沖地震長期評価改訂の[]への説明	3階2特別会議室	課長、管理官
2/ 9	第218回地震調査委員会	3F1特別会議室	局長、審議官、調査班
2/27	原子力安全・保安院との打ち合わせ	局1会議室	課長、管理官、企画官
2/23	第166回長期評価部会	3F2特別会議室	管理官、企画官、調査班
3/ 3	日本海溝長期評価説明 （東京電力を含む電力事業者対応）	6F3会議室	管理官、本部係長、 技術参与
3/11	東北地方太平洋沖地震発生		
3/23	（未実施）三陸沖～房総沖の長期評価改訂の自治体説明	福島県庁他	管理官、本部係長
3/29	（未実施）電力各社（電事連）と地震本部事務局との 意見交換会	5F3会議室	管理官、企画官

図 4. 文部科学技術省より開示された文書。経緯説明のページ。

●各者の反応とそれに対する事務局の対応

事務局の対応の基本方針は、表現方法などでより分かりやすくできること以外の変更はしない。

1/27 宮城県の反応

- ・南部海溝寄りと宮城県沖の連動で津波想定をしていることから、連動の可能性が全くないというような記載にならないようにして欲しい。
- ・貞観地震等の記載は、科学的事実であり、書かれることは仕方ないが、県として対応が難しい。

1/31 [] の反応

- ・宮城県が、被害想定を検討中であり、県に丁寧に説明すること。
- ・「30年確率99%」が県民に浸透していることから、その表記に留意すること。

2/23 長期評価部会の意見

(別紙 「三陸房総の長期評価のH23. 2/23長期評価部会からの修正案」 **青字ゴシック部分**を追記)

- ・宮城県沖の地震について一度に破壊しない場合も書いておいた方がよい。一度に破壊した場合はM7.3、別々の地震として発生した場合には規模は小さくなると推定されるという意味のことを後に加えてはどうか。
- ・貞観タイプの次の地震について、恐らく巨大津波と書いてもどのくらい巨大かということを知らないとそんなに響かない。むしろ陸地数kmまで浸水している事実が重要でそれを記載すべき。

3/3 電力事業者の反応と事務局の回答

(別紙 日本海溝長期評価情報交換会) の通り

(別紙 「三陸房総の長期評価のH23. 2/23長期評価部会からの修正案」 **赤字下線部分**を追記)

- ・産総研のモデル10でも中位段丘位面の説明ができない。貞観地震の波源域もわかってないのでそれがわかる書き振りにして欲しい。
→産総研のモデル10は、少なくともこれくらいの規模はあるということを示すものであり、評価に載せる。
- ・活断層の地域評価が始まるということなので、電力各社との意見交換会を開催してもらいたい。
→意見交換会を後日開催したい (3/29 予定となった)。
- ・長期評価の改訂にあたり、相当資料を集めた科学的根拠を否定するものではない。ただ、世間には一部の文言のみを過大に受け取る方もいるので評価文の説明を詳しくするようにご配慮いただきたい。
- ・貞観地震以外の地震の津波はどこから来たのか(震源域がどこなのか)は、まだわかっていないので、貞観地震が繰り返していると誤解されぬようにして欲しい。
→内容は変えずに、誤解を生じにくいように文章を修正した。
- ・貞観地震の地震動についてはよく分からないので出していないこと、15世紀のものもよく分からないことなどが理由も含めて分かるようにしてもらいたい。
→地震動についての繰り返しは不明なので、それが分かるようにする。

三陸房総の長期評価のH23.2/23長期評価部会からの修正案(H23.3.8 時点)

2/23 長期評価部会で報告した評価文案と、2/23長期評価部会の意見と電力事業者の反応を踏まえて修正した評価文案(3/8 時点)を以下の表に示す。2/23長期評価部会の意見を踏まえた修正部分を青字ゴシックで、電力事業者の反応を踏まえた修正部分を赤字下線で表記した。

この修正案は事務局内で検討後、長期評価部会メーリングリストにて照会し、さらに地震調査委員会メーリングリストにて照会した上で4月の地震調査委員会で成文とする予定であった。

表 新旧対応表

2/23 長期評価部会での評価文案	3/8 時点の事務局修正の評価案
<主文> 2-1 過去の地震 宮城県沖から福島県沖にかけて 869年に地震があり、地震動及び津波を伴い、死傷者を伴った(貞観地震)。地質調査等からこの地震の震源域は少なくとも宮城県沖と三陸沖南部海溝寄りから福島県沖にかけての海域を含み、地震の規模はM8.3程度と推定される。	<主文> 2-1 過去の地震 宮城県沖から福島県沖にかけて 869年に地震があり、地震動及び津波を伴い、死傷者を伴った(貞観地震)。地質調査等からこの地震の震源域は少なくとも宮城県沖と三陸沖南部海溝寄りから福島県沖にかけての海域を含み、<u>当時の海岸線から1.5-4kmの内陸の平野部まで巨大津波が遡上したと推定される。</u>この地震の規模はM8.3程度と推定される。
<主文> 2-2 次の地震 宮城県沖から福島県沖にかけて 宮城県中南部から福島県中部にかけての沿岸で、巨大津波による津波堆積物が過去2500年間で4回堆積しており、そのうちの一つが869年の地震(貞観地震)によるものとして確認された。最新は西暦1500年頃の津波堆積物で、貞観地震のものと同様に広い範囲で分布していることが確認された。貞観地震以外の震源域は不明であるが、巨大津波を伴う地震が発生する可能性があることに留意する必要がある。	<主文> 2-2 次の地震 宮城県沖から福島県沖にかけて 宮城県中南部から福島県中部にかけての沿岸で、巨大津波による津波堆積物が過去2500年間で4回堆積しており、そのうちの一つが869年の地震(貞観地震)によるものとして確認された。最新は西暦1500年頃の津波堆積物で、貞観地震のものと同様に広い範囲で分布していることが確認された。<u>これらの地域では、巨大津波が複数回襲来したことに留意する必要がある。</u> <u>なお、貞観地震の震源域は推定できたものの、貞観地震以外の震源域は不明である。</u>
<主文> 3 今後に向けて (記載なし)	<主文> 3 今後に向けて <u>・貞観地震については津波堆積物調査等から断層モデルが推定されたが、今後新しい知見が得られれば、断層モデルが改良されることが期待される。また、貞観地震の地震動についてと、貞観地震が固有地震</u>

3

図 6. 文部科学技術省より開示された文書. 三陸～房総沖の地震活動の長期評価案の原案と説明会後の事務局改訂案の新旧対照表. 青いゴシックの部分が2月23日の長期評価部会による改訂. 赤い下線部が3月3日説明会後の事務局改訂部分. 図9の正誤表も参照のこと.

	<u>として繰り返し発生しているかについては、これらを判断するのに適切なデータが十分でないため、さらなる調査研究が必要である。</u>
<説明文> 2-2-1 過去の地震について 宮城県沖から福島県沖にかけて 少なくとも宮城県沖と三陸沖南部海溝寄りから福島県沖にかけての領域を震源域とする地震が869年に発生した（貞観地震）。日本三代実録にはこの地震に伴った津波の様子が記述されており、地質調査からもこの津波による津波堆積物が見つかっている。（後略）	<説明文> 2-2-1 過去の地震について 宮城県沖から福島県沖にかけて 少なくとも宮城県沖と三陸沖南部海溝寄りから福島県沖にかけての領域を震源域とする地震が869年に発生した（貞観地震）。日本三代実録にはこの地震に伴った津波の様子が記述されており、地質調査からもこの津波による津波堆積物が見つかっている。 石巻平野全体では当時の汀線は現海岸線よりも1 km 内陸にあったと推定でき、貞観津波の浸水域は当時の汀線から少なくとも約3 km内陸まで及んだと考えられた。仙台平野では当時の海岸線の位置は現在の海岸線よりも0.5-1 km程度内陸にあったと存在していたと推定され、貞観津波の遡上距離は少なくとも2 kmと考えられた。名取市及び岩沼市では当時の海岸線の位置が現在の海岸線よりも1 km程度内陸にあったと推定され、貞観津波の遡上距離は少なくとも4 kmと考えられた。亘理町では当時の海岸線の位置は現在の海岸線よりも1.5-2 km程度内陸にあったと推定され、貞観津波の遡上距離は少なくとも2 kmと考えられた。山元町では当時の海岸線の位置は現在の海岸線よりも0.5-1 km程度内陸にあったと推定され、貞観津波の遡上距離は少なくとも2 kmと考えられた。南相馬市では当時の海岸線の位置が現在とほぼ同じであると仮定し、貞観津波の遡上距離は少なくとも1.5 kmと推定された。（後略）
<説明文> 2-2-5 次の地震について 宮城県沖 宮城県沖については、1897年以降で1897年、1933年、1936年、1937年、1978年、2005年の6回の地震について、1933年、1936年、1937年を1つの活動（規模が最大の1936年を代表とする）としてまとめる。さらに2005年の地震を次の地震と一連の活動として回数に数えないとする。すると、計算に用いるのは1897年、1936年、1978年で、平均発生間隔は40.7年、今後30年以内の発生確率は90%程度以上（96%～	<説明文> 2-2-5 次の地震について 宮城県沖 宮城県沖については、1897年以降で1897年、1933年、1936年、1937年、1978年、2005年の6回の地震について、1933年、1936年、1937年を1つの活動（規模が最大の1936年を代表とする）としてまとめる。さらに2005年の地震を次の地震と一連の活動として回数に数えないとする。<u>このように考えると</u>、計算に用いるのは1897年、1936年、1978年で、平均発生間隔は40.7年、今後30年以内の発生確率は90%程度以

図7. 文部科学技術省より開示された文書。三陸～房総沖の地震活動の長期評価案の原案と説明会後の事務局改訂案の新旧対照表（2ページ目）。

非公開資料

99%) になる(表 4-5)。これは、次の地震で、1978 年の地震のアスペリティ群のうち 2005 年の地震で破壊されなかったアスペリティが破壊するとして、その規模はM7.3 前後を想定している。用いたばらつきの値は、海溝型地震の平均値 0.19(地震調査委員会, 2001a, b)から活断層の地震の平均値 0.24(地震調査委員会, 2001a)とした。また、ある時点までに地震が発生しなかったという条件で、その時点から 30 年以内に地震が発生する確率を図 35-2 に示す。(後略)	上 (96%~99%) になる(表4-5)。これは、次の地震で、1978年の地震のアスペリティ群のうち2005年の地震で破壊されなかったアスペリティが 1 度に破壊した場合、その規模はM7.3前後と推定される。アスペリティが別々に破壊した場合、その規模はM7.3もしくはそれ以下と推定される。用いたばらつきの値は、海溝型地震の平均値0.19(地震調査委員会, 2001a, b)から活断層の地震の平均値0.24(地震調査委員会, 2001a)とした。また、ある時点までに地震が発生しなかったという条件で、その時点から30年以内に地震が発生する確率を図35-2に示す。(後略)
<説明文> 2-2-5 次の地震について 宮城県沖から福島県沖にかけて 石巻市、仙台市、山元町、相馬市における堆積物の地域間対比によると、西暦1500年頃、貞観地震(西暦869年)、西暦430年頃、紀元前390年頃に全地域で共通してみられる巨大津波による堆積物が見つかった(文部科学省 研究開発局他, 2010)。 貞観地震が固有地震として繰り返し発生しているかは不明である。	<説明文> 2-2-5 次の地震について 宮城県沖から福島県沖にかけて 石巻市、仙台市、山元町、相馬市における堆積物の地域間対比によると、西暦1500年頃、貞観地震(西暦869年)、西暦430年頃、紀元前390年頃に全地域で共通してみられる巨大津波による堆積物が見つかった(文部科学省 研究開発局他, 2010)。 また、貞観地震の地震動についてと、貞観地震が固有地震として繰り返し発生しているかについては、これらを判断するのに適切なデータが十分でないため不明とした。

図 8. 文部科学技術省より開示された文書。三陸～房総沖の地震活動の長期評価案の原案と説明会後の事務局改訂案の新旧対照表 (3 ページ目)。

【正誤表】

(誤)	(正)
(1 ページ 表 左カラム7段目 原子力安全・保安院との打ち合わせの日付) 2/27	2/22
(3 ページ 表 右カラム3段目) <主文> 2－2次の地震 宮城県沖から福島県沖にかけて 宮城県中南部から福島県中部にかけての沿岸で、巨大津波による津波堆積物が過去2500年間で4回堆積しており、そのうちのひとつが869年の地震（貞観地震）によるものとして確認された。最新は西暦1500年頃の津波堆積物で、貞観地震のものと同様に広い範囲で分布していることが確認された。<u>これらの地域では、巨大津波が複数回襲来したことに留意する必要がある。</u> <u>なお、貞観地震の震源域は推定できたものの、貞観地震以外の震源域は不明である。</u>	<主文> 2－2次の地震 宮城県沖から福島県沖にかけて 宮城県中南部から福島県中部にかけての沿岸で、巨大津波による津波堆積物が過去2500年間で4回堆積しており、そのうちのひとつが869年の地震（貞観地震）によるものとして確認された。最新は西暦1500年頃の津波堆積物で、貞観地震のものと同様に広い範囲で分布していることが確認された。<u>これらの地域では、巨大津波が複数回襲来したことに留意する必要がある。</u> <u>なお、貞観地震の震源域は推定できたものの、貞観地震以外の震源域は不明である。</u>

図9. 文部科学技術省より開示された文書. 三陸～房総沖の地震活動の長期評価案の原案と説明会後の事務局改訂案の新旧対照表の正誤表.

原子力発電所の地震動評価研究：私の履歴書

東京電力株式会社 植竹富一

地震学と原子力発電の関係を考える資料となると考え、自らが電力会社で係わった地震動研究を振り返ってみた。電力会社は、原子力発電所の地震動評価に生かすべく、長年にわたり地震観測や地震動研究を実施し、知見拡充に努めてきた。震源、地下構造のモデル化や地盤特性評価に新たな考え方が導入されれば、それに対応すべく検討を実施し、新しい観測事実が確認された場合は、その解明のための検討を実施してきた。地震動研究の進展は、原子力発電所の耐震安全性の向上のために活用されている。

1. はじめに

2011 年東北地方太平洋沖地震の際に福島第一原子力発電所の原子炉建屋で観測された地震動は、原子力発電所の耐震設計用地震動（基準地震動）を一部周期帯で超えるもののほぼ同等の地震動であった（東京電力, 2011; 原子力安全・保安院, 2011）。地震動により運転中の原子炉は自動停止し、送電線のトラブルなどで外部からの電源供給が途絶えたものの、非常用ディーゼル発電機が起動し原子炉の冷却が開始された。しかし、設計の想定をはるかに超える津波の来襲により、配電盤等が水没し全電源を喪失、原子炉は冷却機能を失い原子力事故が発生した[事故に至る過程の検証は、東京電力(2013)や原子力規制委員会(2014)を参照のこと]。原子力発電所の耐震設計に係わる仕事をしてきた者として、誠に残念な事故である。

福島第一原子力発電所の原子力事故により、今、改めて地震学と原子力発電との関係が問われている。私のように、当事者企業の内部にいて地震動の研究や評価に係わる立場の人間も地震学会にいてことを明らかにしておくべきと考え、筆を執ることとした。

私が 30 年近く前に、東京電力への入社を希望したのは、地震学の知見を社会に生かせないかと思ったからである。当時、指導教官に相談したところ、まともに地震動を検討しているのは、原子力関連ぐらいとの話であった。東京電力に入社し、柏崎刈羽原子力建設所で、原子力発電所の建設現場を一年 4 ヶ月経験、その後、本店の原子力建設部に異動、柏崎刈羽原子力発電所 6・7 号機の安全審査対応業務を行った。この時には、原子力発電所における地震観測の管理も担当した。その後、社内の研究所に異動し、原子力発電所の地震動評価のための地震動研究を中心に、電力設備の地震対策のための研究を実施してきた。

耐震設計において、地震動評価が重視されることは当然とも思われるが、設計という実務においては、必ずしも地震動が必要とされているわけではない。通常のビルや橋などの耐震設計では、個別に地震動を評価する必要はなく、それぞれの構造物の設計基準で与えられた地震力（地震動の影響を構造物に加わる力で表現したもの）で設計すれば十分とされている。これに対して、原子力発

電所の安全上重要な機器や構造物の耐震設計では、敷地毎に策定された地震動を用いた動的な解析による評価と、指針で定められた静的地震力による評価の両方で検討が行われる。ただし、機器や構造物の設計では、地震以外の要因が支配的な場合も多い。例えば、配管の太さ・厚さは、中を通る蒸気や水の圧力・温度で決まっているし、通常は耐震要素と考えられる壁の厚さも場所によっては放射線の遮蔽性能で決められる。地震動評価自体は、設計の一条件を決めているに過ぎない面もある。

以下、私が直接・間接に係わった範囲で、原子力発電所の地震動評価のために実施されてきた研究を紹介する。設計への応用を意識した研究のため、工学系学会での発表が多く、地震研究者の目に触れにくいこともあり、敢えて紹介する次第である。

2. 鉛直アレイ観測と地震動評価

原子力発電所の耐震設計に用いる地震動は、解放基盤表面と呼ばれる概ねせん断波速度 (V_s) 700 m/s 以上の硬質地盤が露頭していると仮定した位置で定義される。実際には $V_s=700$ m/s 以上の層が露頭していることは少なく、 $V_s=700$ m/s 未満の表層の影響を評価し、表層がない状態での地震動を計算でつくりだしている。したがって、原子力発電所の耐震設計に於いては、解放基盤表面位置の設定及び適切なサイト特性の評価が重視されている。また、設計用地震動の標準的スペクトル特性として、大崎スペクトルと呼ばれる強震観測記録に基づくスペクトルモデル(Ohsaki, 1979)を用いていたことから、その妥当性検証ないし改良が課題とされていた。

以上の背景の下、解放基盤から上の地盤の増幅特性評価のための研究が、電力共通研究（電力各社が共通の課題のため共同で実施する研究）として実施されてきた。鉛直アレイと水平アレイを組み合わせた南関東・伊豆地域の観測（1978 年～）(Omote et al., 1980)、基盤となる花崗岩層に達する鉛直アレイと露頭岩盤観測点の組み合わせによる福島県東部地域の観測（1981 年～）(Omote et al., 1984)が、現在も継続している。30 年以上も観測研究が継続されており、観測データに基づく実証的な研究が重視されていることが分かる。また、

各原子力発電所においても、鉛直アレイ観測が継続的に実施されている。

こういった観測データをもとに、基盤から地表までの波動伝播性状や地震動増幅特性、地盤の減衰定数などの検討が行われた(例えば、武村・他 1993; 藤堂・他, 1995)。私も原子力建設部在籍中は、研究の担当者として参加していた(例えば、植竹・他, 1990)。一連の研究成果をもとに応答スペクトルの予測式が作成され(高橋・他, 1998)、最終的に、耐専スペクトルと呼ばれる設計用の地震動モデル(Nishimura et al, 2001; Noda et al., 2002) が作成された。耐専スペクトルは、震源の面的な広がりを考慮、地震基盤相当 ($V_s=2.2\text{km/s}$) でスペクトルを定義、上下動も評価、などの点で、大崎スペクトルから改善されており、原子力発電所の地震動評価に活用されている。

3. 観測記録による地下構造評価と応用

地下深部の情報を得るためには、大深度のボーリングや大規模な物理探査を実施する必要がある。そういった調査の代わりに、地震観測記録を利用し、深い地盤構造を推定するための研究を行った。レシーバー関数を用いて地震基盤から上の構造を推定する手法(小林・他, 1998a,b)や表面波群速度を用いる手法(植竹・他, 1997)について検討を行い、発電所の地下構造評価への適用を試みた。

また、K-NET, KiK-net が全国に展開されてからは、広域の地震動の合理的評価を目指して、強震観測記録のインバージョンにより日本列島の三次元 Q 値構造を求めその特徴を分析する研究を行った(中村・植竹, 2002, 2004 など)。さらに、求められた三次元 Q 値構造と統計的グリーン関数法を組み合わせ、地震動予測に適用する試みも行っている(中村・植竹, 2013; 中村・他, 2014)。

こういった研究は、原子力発電所の地震動評価のみに役立つわけではなく、広く地震動特性を考える上で役立つものと考えている。

4. 地震動評価の基礎データ拡充

4.1 福島地域に関する検討

電力共通研究で実施している福島県東部の強震観測で得られたデータは、福島地域の地震動特性評価にも活用されている。私が関わったものとして、福島県沖の海域における震源特性の地域性評価(Takemura et al., 1993)、スペクトルインバージョンを用いた地域の減衰特性(Q 値)とサイト特性の評価(Kato et al, 1992)が行われている。また、K-NET が展開されてからは、K-NET のデータと組み合わせたサイト特性評価を行い、サイト特性の空間変化の検討も行っている(植竹・池浦, 2002)。

1938 年の塩屋崎沖地震群については、福島第一・第二原子力発電所の前面海域で発生した複数

の M7 級地震が含まれることから、発電所の地震動評価に生かすことを前提に震源モデルの評価を進めた。理論計算グリーン関数によるインバージョン(植竹・他, 2006)、1987 年に発生した M6 級群発地震を経験的グリーン関数としたインバージョン(芝・他, 2004)、そして震度分布をデータとしたインバージョン(神田・他, 2006)を行っている。さらにインバージョン結果を基に、強震動評価に用いるためのモデル化を行い(池田・他, 2008)、福島第一・福島第二原子力発電所の基準地震動策定の基礎データとして活用した。基準地震動の策定においては、塩屋崎沖の複数の M7 級の震源断層を組み合わせた M8 級の地震を想定しているが、2011 年東北地方太平洋沖地震のように、福島県沖から茨城県沖や宮城県沖に広がるような震源は考えていなかった。

4.2 新潟地域(中越沖地震前)

柏崎刈羽原子力発電所では、3 点の水平アレイ及び鉛直アレイによる強震観測が行われており、地震観測記録を用いて地下構造との関係を検討した。新潟地域の堆積層が厚いことから、周期数秒以上のやや長周期地震動が観測されるのではないかと考えていたところ、1990 年に中越地域で中規模地震が発生した。発電所の観測記録から位相速度を評価し、地下構造との対応を検討(植竹, 1992)した。また、新潟地域の強震記録の収集し、記録の分散性状から地下構造の違いを検討した(植竹, 1995)。さらに、新潟地域でも K-NET などのデータと組み合わせたスペクトルインバージョン解析を実施しサイト特性の評価を行った(金谷・他, 2006)。

柏崎刈羽原子力発電所の地震動評価に用いることを念頭に、新潟地域で過去に発生した地震の震源モデル作成を試みている。1828 年越後三条地震については、震度分布に基づき断層面の推定を試みた(植竹・他, 2005; 徳光・他, 2006)。1751 年越後・越中の地震についても同様な検討を実施した(菅原・植竹, 2009)。1670 年の地震については、新潟平野の M7 級地震の発生系列を調べるために震央位置の再検討を行っている(宇佐美・他, 2010, 2011)。1802 年佐渡小木の地震については、震度分布及び地殻変動データから断層面の検討を行っている(中村・他, 2010; 南雲・他, 2011)。また、1964 年新潟地震については、気象庁の波形記録(変位記録)をデータとしたインバージョンにより、断層のすべり分布の検討を行った(Shiba and Uetake, 2011)。なお、柏崎刈羽原子力発電所の基準地震動の作成対象の震源には、より発電所に近い活断層が用いられており、上記の研究で推定された断層モデルは用いられてはいない。

4.3 新潟地域(中越沖地震後)

2007年新潟県中越沖地震($M_{JMA}6.8$)は、柏崎刈羽原子力発電所の前面海域で発生した。柏崎サイトで得られた地震動記録は、継続時間は10秒程度であるが、震源のアスペリティに対応すると考えられる大きな3つのパルスから構成されていた。3つめのパルスは、発電所の北側と南側で振幅が異なっており、サイト地盤の褶曲構造による増幅と解釈された。設計用の解析では、地盤構造として平行成層のような一次元構造が仮定されていることから、柏崎刈羽原子力発電所の観測記録は、地下構造の不整形性に基づく地震動の空間変化を強く意識させることとなった。2009年の駿河湾の地震の際にも、中部電力・浜岡原子力発電所で敷地の一部で大きな増幅が確認され、地下構造の不整形・不均質の影響とされている。なお、実用発電用原子炉に係わる新規規制基準においては、基準地震動策定にあたり、地震動評価のための地下構造調査とモデル化、地震観測記録への地下構造の影響評価が明記された(原子力規制委員会, 2013a, 2013b)。

観測された地震動は、震源特性、伝播特性、サイト特性のそれぞれの観点から分析がなされ、それを反映した基準地震動が設定された。しかし、知見の拡充のため、引き続き検討が行われている。震源特性については、断層面の再評価の反映(芝・他, 2010)や特性化の見直し(芝・他, 2012)を実施するとともに、広域の三次元構造を考慮したインバージョンを試みた(引間・植竹, 2011)。不整形構造の影響評価については、二次元モデルの計算(植竹・他, 2011)に加え、三次元モデルでの計算の試み(Tsuda et al., 2011)も行っている。さらに、発電所敷地内では、2007年新潟県中越沖地震の直後に、微動アレイ観測や稠密地表地震観測が実施され、記録の分析を基に深部地下構造の評価が行われている(佐藤・他, 2010; 東・他, 2010)。稠密地震観測は現在も継続しており、記録の蓄積とともに地震動の空間変化に関する知見が蓄積されている(Uetake et al., 2013)。今後、詳細な地下構造との関連解明が期待される。

また、柏崎刈羽原子力発電所の敷地外ではあるが、基準地震動の対象である長岡平野西縁断層帯周辺に観測網を展開し、高感度速度計及び加速度強震計による地震観測を40地点で実施している。その内20地点ではGPSによる地殻変動観測も実施している(関根・他, 2010)。観測に基づく研究により、断層帯周辺の地震活動の特徴や地震動特性が把握できると考えられる。こういった情報を公表していくことにより、発電所の地震対策ばかりでなく、地域の地震防災にも活用できると考えている。

5. おわりに

地震学と原子力発電の関係を考える資料になると考え、自らが電力会社で係わった原子力発電

所の地震動研究を振り返った。電力会社では、原子力発電所の地震動評価の検証・改善を目指し、長年にわたり地震観測や地震動研究を実施してきた。また、地震動研究の進展への対応や新たな観測事実の解明のため検討を進めてきた。例えば、震源の評価は、点から面に、さらには不均質断層モデルに対応が図られ、地盤応答も1次元モデルの評価から、2・3次元の不整形・不均質の影響検討を行うようになってきた。

企業で行われる研究は、事業目的に合致していることが必要であり、私の係わる研究の大部分は社内的には原子力発電所の耐震性評価が目的である。しかし、地震動評価研究自体は社会のニーズであり、広く社会に有益なものと考えている。今後も、多くの方々と協力して、原子力発電所の地震対策を進める研究に取り組み、結果的に社会に貢献していこうと考えている。

福島第一原子力発電所の原子力事故は、関係者にとって大変悔やまれる事故であり、2度と起こしてはならないという思いは強い。ただし、今回のような事故の再発を防ぐためには、地震・地震動研究者だけが頑張れば良いというものではなく、多くの分野の協力の下、総合的な耐震安全性を検討していく必要があると考えている。

謝辞

編集委員のコメントにより、文章表現が改善されました。記して感謝いたします。

参考文献

- 原子力安全・保安院, 2011, 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震時に取得された地震観測記録の分析について(東京電力(株)福島第一、第二原子力発電所)(平成23年9月30日)、地震・津波の解析結果の評価に関する意見聴取会(第1回)配付資料。
<http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/shingikai/800/26/001/1-4-1.pdf>
原子力規制委員会, 2013a, 敷地内及び敷地周辺の地質・地質構造調査に係る審査ガイド, 平成25年6月。
http://www.nsr.go.jp/committee/kisei/h25fy/data/0011_07.pdf
原子力規制委員会, 2013b, 基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド, 平成25年6月。
http://www.nsr.go.jp/committee/kisei/h25fy/data/0011_07.pdf
原子力規制委員会, 2014, 東京電力福島第一原子力発電所 事故の分析 中間報告書(平成26年10月)。
<http://www.nsr.go.jp/nra/kettei/data/20141007-chukanhokoku.pdf>
東 貞成・佐藤浩章・植竹富一・徳光亮一・引間和人, 2010, 柏崎刈羽原子力発電所における連続地震観測記録に基づくやや長周期地震動の

- 解析, 第 13 回日本地震工学シンポジウム論文集, 3800-3805.
- 引間和人・植竹富一, 2011, 3 次元構造モデルを考慮した理論的グリーン関数による 2007 年新潟県中越沖地震の震源過程解析, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, SSS023-P12.
- 池田 孝・加藤研一・植竹富一・敦賀隆史, 2008, 1938 年塩屋崎沖地震群の震源モデルの特性化と地震動評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 633 号, 1951-1958.
- 金谷淳二・池浦友則・土方勝一郎・植竹富一, 2006, 新潟県中越地域の強震記録を用いたスペクトルインバージョン解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 303-304.
- 神田克久・武村雅之・加藤研一・八代和彦・植竹富一, 2006, 震度インバージョン解析による 1938 年塩屋崎沖地震の短周期地震波発生域, 第 12 回日本地震工学シンポジウム論文集, 222-225.
- Kato, K., M. Takemura, T. Ikeura, K. Urao and T. Uetake, 1992, Preliminary analysis for evaluation of local site effects from strong motion spectra by an inversion method, *J. Phys. Earth*, **40**, 175-191.
- 小林喜久二・植竹富一・真下 貢・小林啓美, 1998a, 地震動初期微動部の水平/上下スペクトル振幅比の逆解析による深部地盤構造の推定法, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, 1083-1088.
- 小林喜久二・植竹富一・真下 貢・小林啓美, 1998b, 深い地盤構造評価のための P S 変換波の検出方法に関する検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 505 号, 45-52.
- 南雲秀樹・菅原正晴・中村亮一・植竹富一, 2011, [講演要旨] 震度データと上下動地殻変動データに基づく享和 2 年(1802)佐渡小木地震の断層モデルの推定, 歴史地震, **26**, 103.
- 中村亮一・植竹富一, 2002, 加速度強震計記録を用いた日本列島下の三次元減衰構造トモグラフィ, 地震 2, **54**, 475-488.
- 中村亮一・植竹富一, 2004, 強震記録データによる東北地方の三次元減衰構造, 地震 2, **56**, 447-455.
- 中村亮一・植竹富一・宇佐美龍夫・渡辺 健, 2010, [講演要旨] 史料にもとづく享和 2 年(1802)佐渡小木地震の沈降域の推定と断層モデルの考察, 歴史地震, **25**, 126.
- 中村亮一・植竹富一, 2013, 2011 年東北地方太平洋沖地震の統計的グリーン関数手法による広域的強震動評価ー広域的地震動の三次元減衰構造の影響についてー, 日本地震工学会大会 2013 梗概集, 187-188.
- 中村亮一・植竹富一・引間和人, 2014, 三次元 Q 構造を考慮した統計的グリーン関数法による強震動評価ープレート境界巨大地震の広域強震動予測ー, 第 14 回日本地震工学シンポジウム論文集, 3587-3596.
- Nishimura, I., S. Noda, K. Takahashi, M. Takemura, S. Ohno, M. Tohdo, T. Watanabe, 2001, Response Spectra for Design Purpose of Stiff Structures on Rock Sites, SMiRT16, K01/1133.
- Noda, S., K. Yashiro, K. Takahashi, M. Takemura, S. Ohno, M. Tohdo, T. Watanabe, 2002, Response Spectra for Design Purpose of Stiff Structures on Rock Sites, Proc. of The OECD-NEA Workshop on the Relations between Seismological Data and Seismic Engineering Analyses, 16-18.
- Ohsaki, Y., 1979, Guideline for Evaluation of Basic Design Earthquake Ground Motions.
- Omote, S., K. Ohmatsuzawa and T. Ohta, 1980, Recently Developed Strong Motion Earthquakes Instruments Array in Japan, Proc. of 7th World Conf. Earthq. Eng., **2**, 41-48.
- Omote, S., Y. Ohsawa, B. Ohmura, S. Iizuka, T. Ohta and K. Takahashi, 1984, Observation of Earthquake Strong-Motion with Deep Boreholes -- An Introductory Note for Iwaki and Tomioka Observation Station in Japan --, Proc. of 8th World Conf. Earthq. Eng., **2**, 247-454.
- 佐藤浩章・東 貞成・植竹富一・徳光亮一・引間和人, 2010, 位相速度とレシーバー関数の同時逆解析による柏崎刈羽原子力発電所の深部地下構造の推定, 第 13 回日本地震工学シンポジウム論文集, 3617-3624.
- 関根秀太郎・澤田義博・佐々木俊二・阿倍信太郎・田澤芳博・土方勝一郎・西村 功・植竹富一, 2010, 長岡平野西縁断層帯における微小地震観測網の構築, 日本地震学会 2010 年秋季大会予稿集, D11_08.
- 芝 良昭・中村 操・植竹富一, 2004, 焼きなまし法と経験的グリーン関数を用いた震源インバージョンによる 1938 年塩屋崎沖地震群の震源過程の解明, 日本地震工学会大会 2004 梗概集, 236-237.
- Shiba, Y. and T. Uetake, 2011, Rupture process of the 1964 $M_{JA}7.5$ Niigata earthquake estimated from regional strong-motion records, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **101**, 1871-1884.
- 芝 良昭・引間和人・植竹富一・水谷浩之・津田健一・早川崇・田中信也, 2011, 高精度余震分布と三次元速度構造モデルに基づく 2007 年新潟県中越沖地震の震源モデルの再評価, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, SSS023-P13.
- 芝 良昭・引間和人・植竹富一・津田健一・早川崇・田中信也, 2012, スーパーアスペリティを考慮した特性化震源モデルによる 2007 年新潟県中越沖地震の広帯域強震動シミュレーション, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, SSS26-08.
- 菅原正晴・植竹富一, 2009, 震度分布に基づく 1751 年越後・越中の地震の断層モデルの評価,

- 歴史地震, **24**, 11-119.
- 高橋克也・武村雅之・藤堂正喜・渡辺孝英・野田 静男, 1998, 様々な岩盤上での強震動応答スペクトルの予測式, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, 第一分冊, 547-552.
- Takemura, M., T. Ikeura and T. Uetake, 1993, Characteristics of source spectra of moderate earthquakes in a subduction zone along the Pacific Coast of the southern Tohoku district, Japan, *J. Phys. Earth*, **41**, 1-19.
- 武村雅之・池浦友則・高橋克也・石田 寛・大島 豊, 1993, 堆積地盤における地震波減衰特性と地震動評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 446 号, 1-11.
- 藤堂正喜・羽鳥敏明・千葉 脩・高橋克也・武村雅之・田中英朗, 1995, 堆積地盤における上下地震動の特性と Qp 構造, 日本建築学会構造系論文集, 第 475 号, 45-54.
- 徳光亮一・菅原正晴・植竹富一, 2006, 震度分布性状から見た 1828 年三条地震の断層モデルの評価, 歴史地震, **21**, 173-180.
- 東京電力株式会社, 2011, 福島第一原子力発電所における平成 23 年東北地方太平洋沖地震時に取得された地震観測記録の分析に係わる報告(平成 23 年 5 月 16 日).
http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11_j/images/110516ab.pdf
- 東京電力株式会社, 2013, 福島第一原子力発電所 1~3 号機の炉心・格納容器の状態の推定と未解明問題に関する検討第 1 回進捗報告(平成 25 年 12 月 13 日).
http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu13_j/images/131213j0102.pdf
- Tsuda, K., T. Hayakawa, T. Uetake, K. Hikima, R. Tokumitsu and H. Nagumo, 2011, Modeling 3D Velocity Structure in the Fault Region of the 2007 Niigataken Chuetsu-oki Earthquake with Folding Structure, 4th IASPEI/IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion.
- 植竹富一・菅原良次・大島豊・高橋克也・藤堂正喜・羽鳥敏明・千葉脩・福沢六朗, 1990, アレー地震観測記録にもとづく上下地震動特性の検討: その 1: 鉛直アレー観測記録による増幅特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), 305-306.
- 植竹富一, 1992, 新潟県南部の浅発地震によるやや長周期地震動の解析, 地震 2, **45**, 317-325.
- 植竹富一, 1995, 新潟県南部の浅発地震により励起された表面波について, 地震 2, **48**, 99-107.
- 植竹富一・山中浩明・菅原正晴, 1997, やや長周期表面波の群速度の逆解析による地下構造の推定と地震動評価への応用, 日本建築学会構造系論文集, 第 496 号, 37-43.
- 植竹富一・池浦友則, 2002, 東北地方南部太平洋岸地域における K-NET 観測地点の地盤増幅特性, 地震 2, **55**, 285-290.
- 植竹富一・中村亮一・宇佐美龍夫・渡邊 健, 2005, 1828 年越後三条地震の地変等の記事について, 歴史地震, **20**, 233-242.
- 植竹富一・金谷淳二・土方勝一郎・加藤研一・中村 操, 2006, 波形インバージョン解析で得られた福島県東方沖のアスペリティ分布, 第 12 回日本地震工学シンポジウム論文集, 382-385.
- 植竹富一・徳光亮一・西村 功・土方 勝一郎, 2011, 柏崎刈羽原子力発電所の褶曲構造が新潟県中越沖地震の地震動特性に与えた影響ー地下構造のモデル化と差分法による波動伝播評価ー, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 660 号, 311-318.
- Uetake, T., K. Hikima, S. Higashi and H. Sato, 2013, Evaluation of subsurface structure in the Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Station using dense array observation data, Proceedings of the 11th SEGJ International Symposium, No.202.
- 宇佐美龍夫・植竹富一・渡邊 健・中村亮一, 2010, 寛文 10 年(1670)四万石の地震の再考, 歴史地震, **25**, 81-90.
- 宇佐美龍夫, 植竹富一, 渡邊 健, 中村亮一, 2011, [訂正] 寛文 10 年(1670)四万石の地震の再考, 歴史地震, **26**, 116-117.

日本地震工学会の研究ロードマップとその補遺について

鳥取大学大学院工学研究科 香川敬生

日本地震工学会に設置された「原子力発電所の地震安全問題に関する調査委員会」は、「原子力発電所の地震安全に関する地震工学分野の研究ロードマップ」を学会として策定すべく、2008年10月から当初2011年3月までの活動期間で検討を実施した。報告書とりまとめの最終段階で2011年東北地方太平洋沖地震が発生し、福島第1原子力発電所における全電源喪失から炉心熔融に至る過酷事故に至った。これを受け、それまで準備してきた「研究ロードマップの検討結果」はそのままの形で第Ⅰ部とし、第Ⅱ部として「東日本大震災をふまえた補遺」を2011年10月までにとりまとめ、今後20年程度の課題を報告書として上梓した。筆者もこの委員会に参加し、強震動に関する分野を共同執筆した。原子力発電所の地震安全問題は地震学の範疇にとどまらず、土木・建築構造物および機械系の機器や配管の耐震安全性まで広い範囲を扱っている。この調査報告書の一端を紹介することで、原子力発電所の地震安全研究における地球科学（特に地震学）の役割について、情報共有ができることを願う。

1. はじめに

2007年新潟県中越沖地震では、東京電力柏崎刈羽原子力発電所において設計値を大きく上回る地震動が観測されたが、全ての原子炉が冷温停止に至り大きな事故には繋がらなかった。しかし、設計値を超える地震動を受けた原子力発電所の安全性が定量的に評価できているのかとの課題や、発電所内の狭い範囲でも観測地震動の大きさが大きく異なることなど、多くの課題が提起された。

このような状況を受け、日本地震工学会に「原子力発電所の地震安全問題に関する調査委員会（委員長：亀田弘行 京都大学名誉教授）」が設置され、安全確保を目指したプロセスを体系化し、その確立に必要となる今後20年程度の間に取り組むべき課題を抽出する活動として、2008年10月から「原子力発電所の地震安全に関する地震工学分野の研究ロードマップ」の策定を日本原子力学会に設置された「原子力発電所地震安全特別専門委員会」と連携して進めた。そのとりまとめに至った時点で2011年東北地方太平洋沖地震が発生し、東京電力福島第1原子力発電所において地震動による送電線被害による外部電源喪失および津波による非常電源喪失から全電源が失われ、炉心熔融に至る過酷事故が発生した。

これを受けて委員会内で議論をおこない、ほぼ完成に至っていた「研究ロードマップの検討結果」をそのままの内容で第Ⅰ部（日本地震工学会、2012a）とし、委員会内の議論を反映した「東日本大震災をふまえた補遺」を第Ⅱ部（日本地震工学会、2012b）としてとりまとめ、2011年10月に調査委員会報告書を作成した。報告書の目次については、日本地震工学会ホームページ（http://www.jaee.gr.jp/jp/wp-content/uploads/2012/02/120507houkoku_mokuji.pdf）で入手できる。

筆者はこの調査委員会で強震動に関する分野を共同執筆しており、日本地震学会がモノグラフ

「日本の原子力発電と地球科学」の論文を一般公募するにあたり、上記の日本地震工学会原子力発電所の地震安全問題に関する調査委員会報告書の内容を紹介することに思い至った。ここでは、原子力発電所の地震安全問題が地震学だけでなく多岐にわたっていることを共通理解とするために、第Ⅰ部「研究ロードマップの検討結果」の概要について紹介するとともに、第Ⅱ部「東日本大震災をふまえた補遺」に筆者が寄稿した内容を中心にとりまとめたい。

2. 原子力発電所の地震安全に関する地震工学分野の研究ロードマップ

地震安全問題は地震学の範疇にとどまらず、土木・建築構造物および機械系の機器や配管の耐震安全性まで広い範囲を扱っている。そのため、日本地震工学会原子力発電所の地震安全問題に関する調査委員会がとりまとめた地震工学研究ロードマップは、「地震リスク（リスク課題）」、「耐震裕度」、「ハザードの理解」を三つの柱とし、これに「社会技術的課題」を加えてまとめられている（表1）。

表1 研究ロードマップ構築への基本事項

基本事項		技術的・研究的な課題（大項目）
リスク課題	設計	要求性能（耐震強度、運転継続性、再使用性） 意思決定方法（安全目標、残余のリスク）
	システム評価	リスク評価（地震PSA）のUsability向上 不確定性の同定・低減 深層防護を反映する機能防護システムの評価
	情報基盤	ナレッジデータベースの整備
耐震裕度		nominalな耐震裕度・実体としての耐震裕度 応答・挙動の解析法（設計および評価） 維持・管理・診断の工学的的方法
ハザードの理解		地震ハザード評価手法の高度化 対象地震・地震動の決定プロセス 水平動/上下動 パルスの扱い方
社会技術的課題		

これらの各課題について、研究ロードマップの各大項目を中心に概観する。また、表中および解説で現れる、馴染みの少ない用語について簡単に紹介する。

(1) 地震リスク

①**耐震設計**：大項目「要求性能」で耐震強度と運転継続性、再使用性の観点、また「意思決定法」ではプラント設計における安全目標と残余のリスクが課題として取り上げられている。プラントの設計にあたっては地震という自然現象の不確定性の下でも安全性確保を目指した工学的意思決定をおこなう必要がある。「残余のリスク」とは、設定した設計用地震荷重を上回る揺れに見舞われた場合に発生する事象を、その災害の大きさと対応する確率などによって示し、それへの対応を準備するものである。

②**システム評価**：大項目「リスク評価（SPSA）の usability 向上」では、上記「残余のリスク」を評価する際に必要となる、地震の確率論的安全評価（Seismic Probabilistic Safety Assessment）を利用する際の課題解決を対象としている。また、「不確定性の同定・提言」ではイベントツリーを、「深層防護を反映する機能防護システムの評価」ではフォールトツリーを検討項目としている。イベントツリーは、例えば地震動評価にあたって、断層の長さや、終端位置が確定できずに不確定な複数の候補がある場合、それぞれの可能性に専門家集団の評価に基づく確率を与えて分岐させ、複数のパラメータを組み合わせで多くのケースを解析することで不確定性を考慮した解析をおこなう方法である。フォールトツリーは、ある事象に起因して発生が懸念される複数の事象を樹木の枝のように分岐させ、事故に至るプロセスを解析する手法で、多段階の安全確保体制よりなる原子力発電所の深層防護（異常発生防止、異常が事故へ拡大することの防止、万一の事故が放射性物質の異常な放出に至らないような対策）の検討で活用される。

②**情報基盤**：「ナレッジのデータベースの整備」が大項目として掲げられ、地震リスクに関する情報基盤整備の意義、整備すべき内容、課題が示されている。

(2) 耐震裕度

大項目「nominal な耐震裕度・実態としての耐震裕度要求性能」で建屋、設備（配管、タンク、

ポンプ、電気品など）、地盤、のそれぞれの破壊のメカニズムについて、実験を通じた実態としての耐震裕度の評価と、そうして得られた実力値に基づいて評価をおこなう体系化の必要性をまとめている。なお、耐震裕度は、構造物の真の限界に対する設計外力の比として評価される値である。実際の構造物は設計モデルよりも複雑であり、個々の構成要因は設計外力を越えると即破壊に至るわけではなく、それぞれ余裕を持っている。これらにより、構造物は総合的に大きな設計裕度を持つことになるが、その裕度をできるだけ精度良く評価しておくことが課題となっている。

大項目「応答・挙動の解析法（設計及び評価）」では、建屋のFEM解析に加えて、設備（構造や動的機器）、地盤および屋外土木構造物などサブシステムの設計および評価の課題がまとめられている。強震動分野と共通するテーマとして、地盤の減衰の考え方が課題として取り上げられている。

大項目「維持・管理・診断の工学的手法」では、経年劣化と既設発電所の耐震性能照査が取り上げられている。

(3) ハザードの理解

大項目「地震ハザード評価手法の高度化」、「対象地震の決定プロセス」では、精密な調査に基づく不確定性の定量的評価、サイト補正、深部地盤構造の影響が取り上げられている。地球科学に関連する課題として、

- ・地震調査研究推進本部（地震本部）と原子力分野の断層評価の整合性
- ・津波波源モデルと強震動評価用震源モデルの統合的理解

がロードマップへの反映事項とされている。

大項目「水平動/上下動」では、上下地震動の正確なシミュレーションがハザード評価に求められ、建物の上下共振とそれが設備に及ぼす影響が課題となっている。

大項目「パルスへの扱い方」では、1995年兵庫県南部地震やその後の被害地震で確認されたパルス状地震動の発生メカニズム（震源、サイトの問題）の整理と、それが影響する周期帯域の特定、正確なシミュレーション技法の確立がロードマップへの反映事項として挙げられている。

(4) 社会技術的課題

これまでに紹介した「地震リスク」、「耐震裕度」、「ハザードの理解」の三本柱に対して、付帯的な関連事項ではあるが、

- ・役割分担論（ハザード、PSA(Probabilistic Safety Assessment)など）
- ・公衆への技術的説明
- ・マルチリスク下での地震安全

- ・地震防災
- ・人材育成
- ・国際リーダーシップ

がロードマップへの反映事項として取り上げられている。

3. 東日本大震災をふまえた補遺

まず、第Ⅱ部でとりまとめた地震工学的研究ロードマップについて簡単に紹介する。基本事項のうち「地震リスク」、「耐震裕度」では津波への取り組みが不十分であったこと、「ハザードの理解」では運動型巨大地震の発生を南海トラフに限定し、日本海溝沿いでは想定していなかったことを、第Ⅰ部で欠けていた重要事項として指摘し、安全性評価のさらなる高度化による安全の確保を目指して、ロードマップの拡充をおこなっている。

具体的な反映事項として、地震・津波 PSA、津波リスクの認識、地震工学・耐津波工学の連携による総合的津波対策、また本震後の地震工学的対策を基本事項「地震リスク」で取り上げている。基本事項「耐震裕度」では、防潮堤建設の工学的要点、プラントの水密設計、低サイクル疲労を研究ロードマップへの反映事項として指摘している。

「ハザードの理解」では、巨大余震のハザード評価技術、ハザード評価における観測資料と計算機科学の協働をロードマップへの反映事項とし、第Ⅱ部で新たに設けられた基本事項「新しい概念」では、ハザードの理解に関する事項に、東北地方太平洋沖地震をはじめ近年の地震災害を踏まえた地球科学的な視点が紹介されている。

また、「新しい概念」の中には、同時多発および連鎖的被害拡大による「安全の破綻（セーフティー・バースト）」の概念（高田，2005）が紹介され、このようなリスクに対して、構造物に弱点を作らないロバストネス、他のシステムに依存しない自律性、時間進展を取り込んだ動的リスク管理の重要性が述べられている。

以下、第Ⅱ部の基本事項「新しい概念」として紹介された地球科学的な視点について筆者が関わった項目について抜粋・要約し、現時点の私見を加えつつ紹介する。

(1) ハザード評価における観測資料と計算機科学の協同

2011年東北地方太平洋沖地震では、近代の地震観測で捉えられておらず、科学的に十分には解明できていなかった巨大事象が未曾有のハザードをもたらすことになった。このような事象に対応するためには、技術者が十分な「科学的想像力」を持ち、それを共有できる環境を育むことが必要である。

原子力発電所の地震動評価では、目の前の対象

断層や地震が取り上げられることになるが、その立地や自然災害への安全性を検討する上では、日本列島全体としての活動史（地震、津波、火山、風水害）をきっちりと編み、低頻度だが巨大な事象を考えねば成り立たない地形・地質の成因を解明し、現在の国土形成に及ぼした自然現象を遺漏無く把握されているべきである。少なくとも、原子力発電所が立地する周辺の地形、地質がどのように形成され、そこに巨大地震などがどのように関与したかを説明できていることは重要である。このような研究の実施には幅広い学問分野の連携が必要となり、原子力防災に留まらない国家プロジェクトとして新たな調査検討を実施することが望まれる。

日本列島の過去を読み解いていく過程で、それに基づいて将来発生する可能性のある事象を設定し、それによるハザードを評価しなければならない。そのためには、コンピュータ・シミュレーションを援用することになる。計算機の進歩とともにより詳細なモデルによる地震動、津波伝播の生成、伝播のシミュレーションが可能となっており（Furumura et al., 2011）、ボトルネックは計算機の処理能力よりもむしろ計算に用いる震源、地下構造モデルの解像度および精度となっている。近年発生した地震や津波では膨大な観測記録が得られているため、まずこれらを十分に説明できる震源および地下構造モデルの構築を目指し、波動伝播モデルの高度化をおこなう必要がある。加えて、地震動、津波のシミュレーション技術をより高度化し、現実的な問題に対処できるようにすることも必要である。その際、得られたモデルの不確定性およびシミュレーションの手法の限界と分解能にも配慮しておく必要がある。

また、様々な仮定に基づく限定的なモデル化ではあるものの、複数の震源域が連動する海溝型地震のサイクルシミュレーションが行われ、過去の発生履歴との比較が行われるまでになっている（堀，2009など）。内陸地震についても同様の検討が行われつつある（Hillers et al., 2006など）。このようなシミュレーションによって過去の巨大地震発生の時系列や付随する中小地震の規模別発生頻度が系統的に再現できるようになれば、シミュレーションを将来に向けて実施することにより、予測すべき地震あるいは津波像を知ることができる。これによって、実際の現象に比べて極めて短い過去50年ほどの観測から得られた統計量を単純に未来に外挿するのではなく、その時点の科学的知見に基づいて未来の事象をより精度良く評価できるようになっていくことが期待される。その際、シミュレーション結果が過去の事例を逸脱して巨大となる場合も考えられる。しかし、それが物理的に合理的な結果であれば十分に尊重し、過去の事例に過度にとらわれずに「未来

に起こる可能性が少しでもある事象を予測する」と言う立場で評価することが望まれる。

(2) ハザードの理解に関する新しい概念の必要性

①地震の規模とハザードの大きさ

一般には、地震の規模が大きくなるにつれてハザードが大きくなると考えられている。これは津波については真であるが、地震動については必ずしも真とは言えない。ここで重要となる要因は、地震動や津波が伝播する際の減衰特性である。津波の減衰は非常に小さい。地震動については、周期帯によらず減衰係数が一定であれば、同じ距離を伝播するうちに波長の短い短周期成分ほど大きく減衰する。また、実体波の幾何減衰が距離に反比例するのに対して表面波では距離の平方根に反比例するため、表面波は減衰が小さい。このため、短周期の実体波は減衰が大きく遠方に伝わらず、長周期の表面波は遠方まで伝播する。

このため、原子力発電所の耐震設計に重要な周期1秒よりも短い帯域では、震源断層のうち対象サイトに近接する強震動生成域から生じた実体波の影響を強く受けるが、東北地方太平洋沖地震のように大きく広がる断層面全体からの影響は受けない。マグニチュード9の超巨大地震であるにもかかわらず、既往のM7クラスの地震による観測記録を大幅に上回るような記録が随所で得られることはなかった。この周期帯では、地震の規模よりも断層からの距離が地震動に大きく影響する。特に、最大加速度に影響するごく短周期の地震動ほどその傾向が大きい。

周期1秒から20秒程度のもう少し長い周期帯では、表面波が遠方にまで影響を及ぼすことになる。長い周期帯の地震動を生じるためにはそれなりの大きさの断層破壊が必要となるため、この周期帯では地震の規模もハザードの大きな要因となる。東北地方太平洋沖地震で大阪湾岸の高層ビルに被害を生じているが、周期約7秒の長周期地震動にビルが共振したことがその理由である。

津波は非常に長周期の波動現象であり、また減衰が小さいため、サイト近傍の局所的な断層破壊ではなく断層面全体の変動がその規模に影響する。変動を受ける海水の量が多いほど、つまり地殻変動の量とそれが及ぶ面積が大きくかつ水深が深いほど、巨大な津波が発生して広範囲に伝播することになる。

原子力発電所では短周期の地震動と津波が大きなハザード要因となるが、上記のようにこれらふたつの事象は異なった周期帯の事象である。短周期の地震動について、断層モデルに基づく手法を用い、震源モデルおよび減衰を含めた地下構造モデルを適切に設定して評価すれば、超巨大断層全体による地震動と、サイトに近接する強震動生成域のみによる地震動に本来大きな差は生じな

いと考えられる。しかし、ここに距離減衰式による簡便法を持ち込み、その式を構築した観測記録の範囲を超えた巨大地震に適用すると、過大な地震動を与えてしまう場合がある。これが地震規模を大きくしたハザード設定を厭う傾向を生み、それが津波の過小評価に繋がったことが懸念される。津波の評価については、その地域で考慮すべき最大の地殻変動を想定する必要がある。

近年、地震規模が大きい場合に地震動レベルが飽和する新しい距離減衰式も提案されており（Abrahamson and Silva, 2008 など）、我が国においても、今回の東北地方太平洋沖地震およびその後発生した大地震の観測記録を取り込んだ新しい評価式を構築し、工学的な地震動評価に活用することが望まれる。また、津波と短周期の地震動を統一的に説明できる断層モデルの構築と、それをを用いた合理的なシミュレーションを指向することがより重要となる。

②地震の発生頻度について

一般に、巨大な地震ほど発生頻度が低いことは周知である。また、我が国においては西暦416年に地震があったことが「日本書紀」に記され、599年に発生した地震では複数の地震被害の記載から大まかな震源位置と地震の規模を推定することができている。これらをはじめ歴史時代の地震および津波をとりまとめた資料が作られており（宇佐美, 1996, 渡邊, 1998 など）、近代になるほどその精度は高くなっている。

このため、年代および地域に偏りがあるものの、日本列島で発生した地震については1000年以上のデータの蓄積がある。その中には、同じ領域で繰り返し発生している地震がいくつもあり、南海トラフで発生する東海・東南海・南海地震や宮城県沖地震など平均的な発生間隔と発生した場合の地震規模が評価できるものも存在する。しかし、歴史資料期間では発生していない地震や見逃された地震、あるいは発生しても1回のみ地震については、発生間隔も平均的な地震の規模も評価することができない。2011年東北地方太平洋沖地震以前にも、「日本三代実録」に記された西暦869年の貞観地震津波による堆積物の調査（穴倉・他, 2007）から東北地方太平洋沖地震と同程度の地震が発生していたことが解明されつつあった（菅原・他, 2011 など）が、地震防災や耐震設計に活用されることはなかった（島崎, 2011）。

また、明治以降に発生した地震については地震計で捉えられた波形が遺されており、最大値や周期特性など地震動の物理的な情報を得ることができる。ただし、大振幅でも振り切れない強震記録が得られるようになったのはアメリカで1940年代以降、日本では1960年以降であり、応答ス

ペクトルなどを評価できる強震観測の歴史は 50 年程度に過ぎない。簡便な地震ハザード評価に用いられる距離減衰式はこのような記録の統計分析に基づいており、最近の 50 年程度に発生した地震動の平均像になっている。1995 年兵庫県南部地震以降に設置された強震観測網と、その後の地震活動の活性化に伴って記録は膨大に増えているが、ひとつの地震を多くの観測点で記録した観測場所による違いを反映したデータセットが主なものである。同じ震源域の地震を同じ場所で数回にわたって観測した事例は希であり、規模の大きい地震でそのような記録は得られていない。

確率論的手法で将来発生する地震による地震動を、ばらつきを含めて議論する場合、対象サイトは決まっているので、ここで評価すべきばらつきは対象断層における毎回の破壊進行の違いによるばらつきとなる。しかし、用いるデータにはそのような観測事例は含まれておらず、ばらつきとして評価されるのは、補正はなされずとも、対象地震とは別の地震による、対象地点ではない複数の観測地点によるばらつきとなる。確率論的手法ではここにエルゴード性を導入してこの問題を回避することになるが、その妥当性を検証しておくことが必要である。近年、動力学的断層破壊モデルを用いた地震発生サイクルと地震のシミュレーション (Hillers et al., 2006 など) や、ひとつの断層で多数の断層破壊シナリオ (数十万年相当) による地震動分布を統計的に評価する試み (香川, 2014 など) も見られ、それらを援用した検討が望まれる。

低頻度の現象といえども一度発生すると大きなハザードをもたらすことになる。このため、ハザード評価と確率評価はそれぞれ独立におこない、それを工学的に合理的に判断することが望まれる。ハザードに確率を掛けた期待値としてしまうことで、低頻度巨大災害が比較的頻繁に発生する中規模ハザードに埋もれないように、評価プロセスを検討することが望ましい。

4. おわりに

原子力発電所の地震安全研究における地球科学 (特に地震学) の役割について検討するため、日本地震工学会「原子力発電所の地震安全問題に関する調査委員会」が 2011 年東北地方太平洋沖地震の教訓を含めて 2011 年 10 月までに「原子力発電所の地震安全に関する地震工学分野の研究ロードマップ」としてとりまとめた内容を紹介した。特に、第 II 部「東日本大震災をふまえた補遺」における筆者の文書を改めて要約した。

2011 年東北地方太平洋沖地震の発生まで、国家プロジェクトとして実施されて来た原子力発電について、工学分野がどのような取り組みをおこない、今後の課題をどう捉えているかを知ること

は、この問題を議論する前提として不可欠と思われる。その中で地球科学 (特に地震学) が何をすべきかを前向きに考える必要がある。原子力発電の是非について、またこれまでの発電によって多量に蓄積した放射性廃棄物の管理、処分の問題について、社会的合意を形成するために地球科学研究の成果が果たす役割は重い。

また、地震国日本がこれまでに培ってきた世界的にも高度な原子力発電所の耐震安全評価技術を海外に提供することで、世界の原子力施設の安全性のより一層確保することも重要な国際貢献のひとつと考えられる。ここにも地球科学研究の視点をより反映することで、更なる安全を目指すことが出来るとものと期待される。

このような背景で、現在は既にある施設および廃棄物に学際的に対応せねばならない状況と言え、地球科学分野から適切な情報を提供し、その対処法を工学分野と連携して高めて行くことが望まれる。本論がその協働の一助となることを期待する。

参考文献

- Abrahamson, N. A. and W. J. Silva, 2008, Summary of the NGA ground-motion relations, *Earthquake Spectra*, 24, 67-97.
- Furumura, T., K. Imai, and T. Maeda, 2011, A revised tsunami source model for the 1707 Hoei earthquake and simulation of tsunami inundation of Ryujin Lake, Kyushu, Japan., *J. Geophys. Res.*, 116, B02308, doi:10.1029/2010JB007918.
- Hillers, G., Y. Ben-Zion and P.M. Mai, 2006, Seismicity on a fault controlled by rate-and-state dependent friction with spatial variation of the critical slip distance, *J. Geophys. Res.*, 11, B01403, doi: 10.1029/2005JB003859.
- 堀高峰, 2009, 境界地震の規模と発生間隔変化のメカニズム, *地震 2*, Vol. 61, 特集号「日本の地震学: 現状と 21 世紀への萌芽」, pp. S391-S402.
- 香川敬生, 2014, 多数の断層破壊シナリオによる強震動の空間分布の変動特性, 第 14 回日本地震工学シンポジウム論文集, no. 1204.
- 日本地震工学会, 2011a, 原子力発電所の地震安全に関する地震工学分野の研究ロードマップ 第 I 部 研究ロードマップの検討結果, 日本地震工学会原子力発電所の地震安全問題に関する調査委員会報告書,
- 日本地震工学会, 2011b, 原子力発電所の地震安全に関する地震工学分野の研究ロードマップ 第 II 部 東日本大震災の発生をふまえた補遺, 日本地震工学会原子力発電所の地震安全問題に関する調査委員会報告書,
- 宍倉正展・澤井祐紀・岡村行信・小松原純子・Than Tin Aung・石山達也・藤原治・藤野滋弘, 2007, 石巻平野における津波堆積物の分布と年代, 活断層・古地震研究報告, No.7, pp.31-46.

- 菅原大介・今村文彦・松本秀明・後藤和久・箕浦幸治, 2011, 地質学的データを用いた西暦 869 年貞観地震津波の復元について, 自然災害科学, Vol. 29, No.4, pp.501-516.
- 島崎邦彦, 2011, 超巨大地震 貞観地震と長期評価, 科学, Vol.8, No.5, pp. 397-402.
- 高田毅士, 2005, Safety Burst(安全の破綻)WG 報告, (社)日本工学アカデミー, EAJ Information, No. 121.
- 宇佐美龍夫, 1996, 新編日本被害地震総覧 [増補改訂版], 東京大学出版会, 493p.
- 渡邊偉夫編, 1998, 日本被害津波総覧 第 2 版, 東京大学出版会, 238p.

2011 年東北地方太平洋沖地震による福島第一・第二原子力発電所周辺の津波シミュレーション解析から示唆される津波波源モデルの違いによる津波被害想定の不確定性について

伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 原子力・エンジニアリング部
藤原了・是永眞理子

筆者達は過去の学会報告や論文投稿（日本地球惑星科学連合 2013 年大会:藤原・ほか, 2013a, 日本地震学会 2013 年度秋季大会:藤原・ほか, 2013b, The 11th SEGJ International Symposium:Fujihara et al., 2013c, 日本原子力学会和文論文誌:藤原・ほか, 2014a）において, 2011 年東北地方太平洋沖地震（以後, 東北沖地震）の 5 つの既往津波波源モデルを用いて福島第一原子力発電所（以後, 1F）・福島第二原子力発電所（以後, 2F）・福島県相馬市相馬港周辺域の広域津波シミュレーション解析を実施し, 津波波源モデル間の性質の差異が, 陸域に作用する津波波圧値に有意な差異を生じさせることを示した. 本稿では, 上記の学会報告や論文などから, 1F・2F における津波波圧評価の内容について再掲し, 東北沖地震の津波波源モデル間の性質の差異が, 1F・2F に到来する津波による被害想定に及ぼす不確定性を示す. また, 防災の視点から, 地震津波関連の知見やデータ活用および運用と地球科学研究がどのように関連すべきかについての私見を述べる.

1. 緒言

一般的に, 巨大津波に対する防災対策（安全なインフラ施設候補地選定, 津波災害避難経路策定, インフラ施設設計における部材強度評価など様々な用途）を進める上で, 津波シミュレーションの解析結果は, 様々な用途に活用される重要な情報である. 2011 年東北沖地震以降, 津波シミュレーション解析結果の活用についての重要性及び津波シミュレーション技術の精度に対する要求は年々増している.

津波シミュレーションの精度が担保されるためには, 海底地形・陸上標高データや津波波源モデルデータが十分に整備されていることが重要である. 現状の様々な津波シミュレーション解析業務では, 津波波源を設定するにあたって, 断層全体に平均滑りや不均質滑り分布を考慮した静的モデル, さらに破壊伝播を考慮した不均質滑りモデルを用いるなど幾つかの方法が存在する. 津波シミュレーション解析の上流工程で, これらの方法によって設定される津波波源は各々異なる特徴を有する場合があるために, 津波シミュレーション解析の最終工程で算出される津波挙動についても有意な差異が生じる可能性が懸念される. そのような事情を踏まえ, 津波シミュレーションを実施する際には, どのような性質の津波波源モデルを用いるのかについて注意深く検討する必要がある.

しかしながら, 現状の防災地震・津波工学において, 様々な津波波源モデルが陸域の津波挙動をどの程度バラつかせ, どの程度過小・過大評価するかについての知見はまだまだ十分に得られていない. これらの事情は, 産官学の各機関が津波シミュレーション解析結果の 2 次的活用に基づいて巨大津波に対する防災対策を

進める上で, どの津波波源モデルを採用するかによる防災施策上の判断ミス（極度に危険側[過小評価側]の基準設定）が起これうる可能性を示唆するものでもある.

筆者達は過去の学会報告（藤原・ほか, 2013a; 藤原・ほか, 2013b; Fujihara et al., 2013c）において, 幾つかの既往の東北沖地震・津波波源モデルを用いた福島県相馬市相馬港周辺の津波シミュレーション解析に基づき, 相馬港周辺に作用する津波波圧（到来する津波が構造物などに作用する圧力）について, 採用する波源モデル間でどの程度の差異が生じるのかについての分析を行い, 津波波源モデルの差異が陸域に作用する津波波圧値に有意な差異を生じさせることを示した.

本稿では, 上記の学会報告や論文などから, 1F・2F における津波波圧評価の内容について再掲し, 東北沖地震の津波波源モデル間の性質の差異が, 1F・2F に到来する津波による被害想定に及ぼす不確定性を示す. また, 防災の視点から, 地震津波関連知見・データの活用・運用と地球科学研究がどのように関連すべきかについての私見を述べる.

2. 解析手法

2. 1 津波シミュレーション

津波伝播の評価は, 非線形長波理論に基づき, スタッカード Leap Frog スキームを用いた有限差分法により津波伝播シミュレーションを行う. 津波シミュレーションの初期水位は, Okada (1992) に基づき評価する. 水深および標高データについては, 海上保安庁, 海洋情報研究センター, General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) および国土地理院のデ

デジタルデータに基づいて地形モデルを作成する。図1 (a) に解析領域図を示し、図1 (b), (c), (d) に、考察する 1F・2F 周辺域における津波シミュレーション・波圧評価ポイントの分布図を示す（藤原・ほか, 2014a からの再掲）。

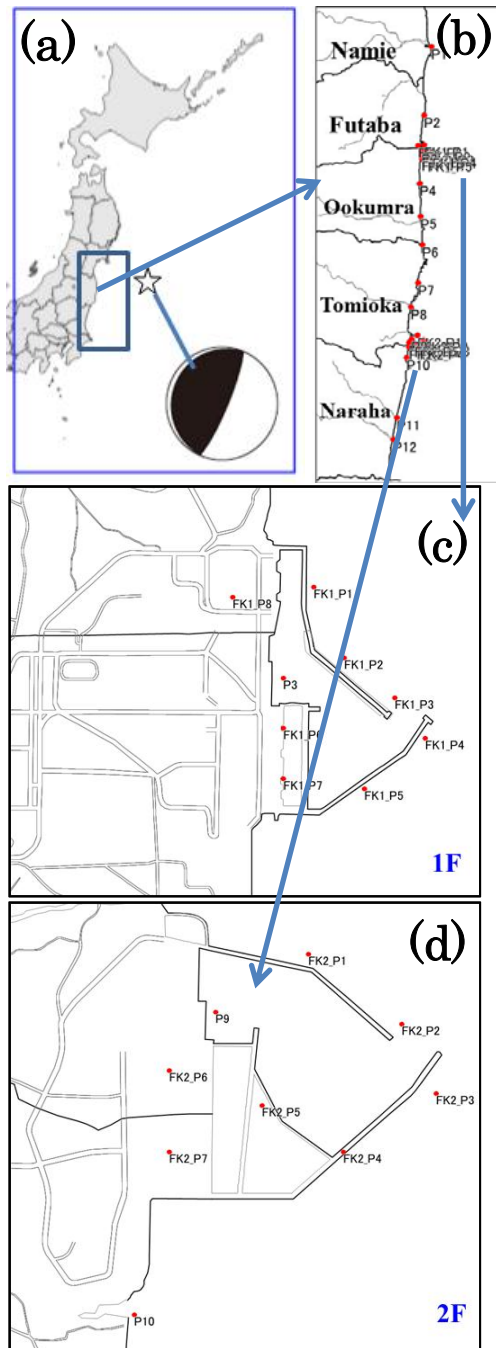


図1 津波解析の解析領域（藤原・ほか, 2014a からの再掲）。(a) 津波解析の解析領域。☆印は東北沖地震の震源位置。(b) 福島第一発電所(1F)と福島第二発電所(2F)の周辺領域。(c) 1F 周辺における津波解析結果の評価ポイント分布。(d) 2F 周辺における津波解析結果の評価ポイント分布。

2. 2 津波波圧評価

津波波圧の評価は、谷本・ほか(1984)に基づき行う。陸域における津波遡上に際する波圧評価に関しては、鉛直方向の流動性を考慮した3次元流体解析に基づくアプローチ（例、藤原・ほか, 2012c）なども行われているが、本稿では、津波波源モデルの差異による津波レスポンスの相対的な差異レベルを評価することに主眼を置く都合上、波圧の絶対値についての厳密性には大きく拘らないこととし、長波理論に基づく津波シミュレーション及び波圧算定式（谷本・ほか, 1984）の活用による分析手法を選択こととする。

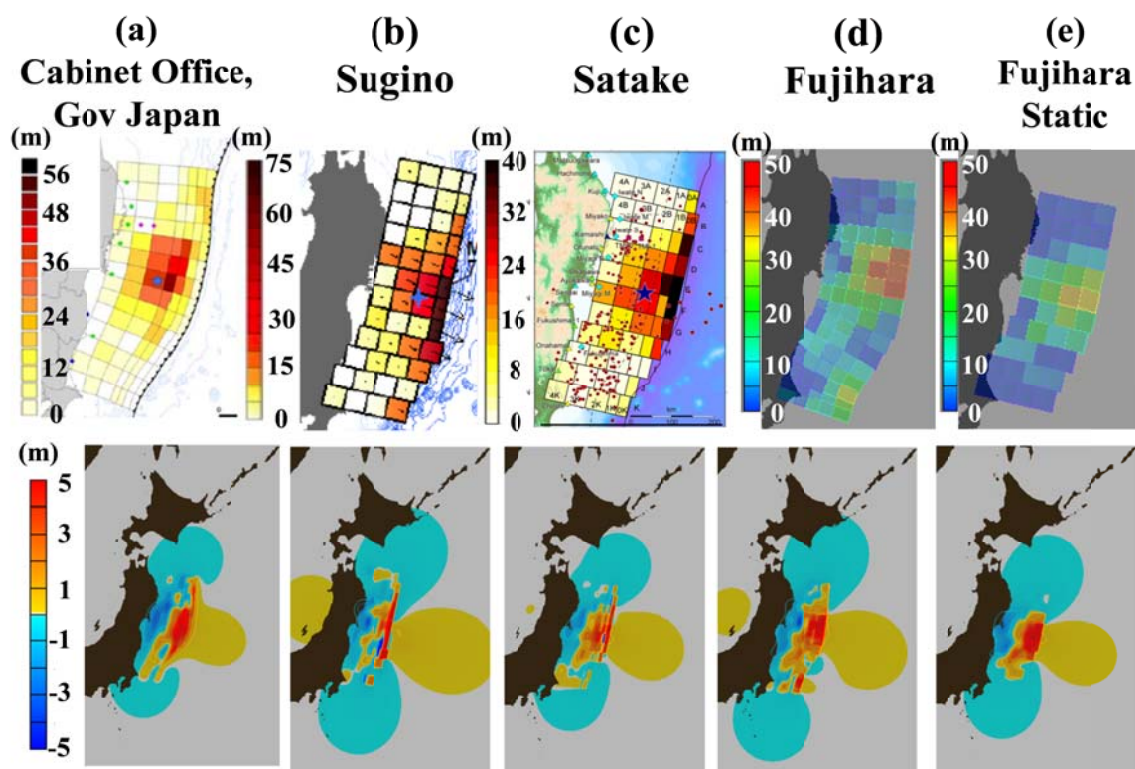
2. 3 津波波源モデル

津波波源モデルについては、内閣府モデル（内閣府, 2012）、杉野モデル（杉野・ほか, 2012）、佐竹モデル（Satake et al. 2013）、藤原モデル・藤原・静的モデル（藤原・ほか, 2012a；藤原・ほか, 2012b；Fujihara et al. 2013c）の5つの津波波源モデルを分析対象とする。なお、5つの波源モデルを用いた今回の解析では、共通の計算手法及び地形モデルを用い、津波波源モデルの差異のみに着目することとする。

5つの津波波源モデルのうち佐竹モデルは、波形インバージョン解析の津波グリーン関数の算出の際、断層運動に起因する鉛直方向の変動に加え、水平成分の効果（Tanioka and Satake, 1996）を加える形で解析を行っており、その点については留意する必要がある。ここでは、産官学の各機関が行う現状の防災向け津波シミュレーション解析において一般的に行われる津波波源モデルの活用方法を可能な限り模倣するという点から、佐竹モデルに対して追加の微調整を行うことをせずに、他の4つの津波波源モデルと同様に、津波シミュレーション解析の入力としてそのまま活用することとする。

図2に5つの東北沖地震・津波波源モデルとその初期水位分布（波源モデルから算出される地震直後の水位）を示す（藤原・ほか, 2014a からの再掲）。波源モデルの幾何学的性質や初期水位分布については、津波波源モデル間で多少の特徴的差異が確認される。5つの津波波源モデルに基づく津波シミュレーションは波源近傍のGPS波浪計津波観測記録と概ね整合的である（内閣府モデル, VR[Variance Reduction]=72 %; 杉野モデル, VR=73 %; 佐竹モデル, VR=69 %; 藤原モデル, VR=87 %; 藤原・静的モデル, VR=61 %; 佐竹モデルについては、津波グリーン関数の算出過程が他手法と異なるので、ここではあくまで参考値と考える）。

Tsunami Source Models



Initial Tsunami Height Distribution

図2 2011年東北沖地震の様々な津波波源モデルと初期水位モデル(藤原・ほか, 2014aからの再掲). (a) 内閣府モデル(2012). (b) 杉野・ほか(2012)による杉野モデル. (c) Satake et al. (2013)による佐竹モデル. (d) 藤原・ほか(2012a)などによる藤原モデル. (e) 藤原・ほか(2012a)などによる藤原・静的モデル.

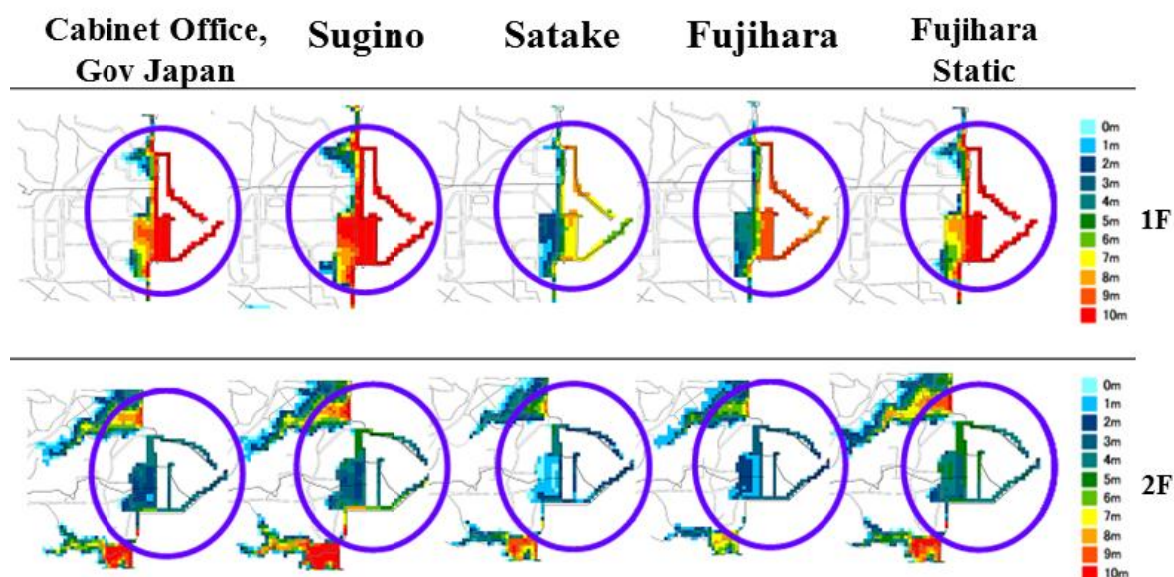


図3 複数の津波波源モデルを用いた津波シミュレーションから計算された1F(上図)および2F(下図)周辺における津波浸水深分布(藤原・ほか, 2014aからの再掲). 解析結果は、津波波源モデル間における最大浸水深についての有意なレベルの相対的差異を示している.

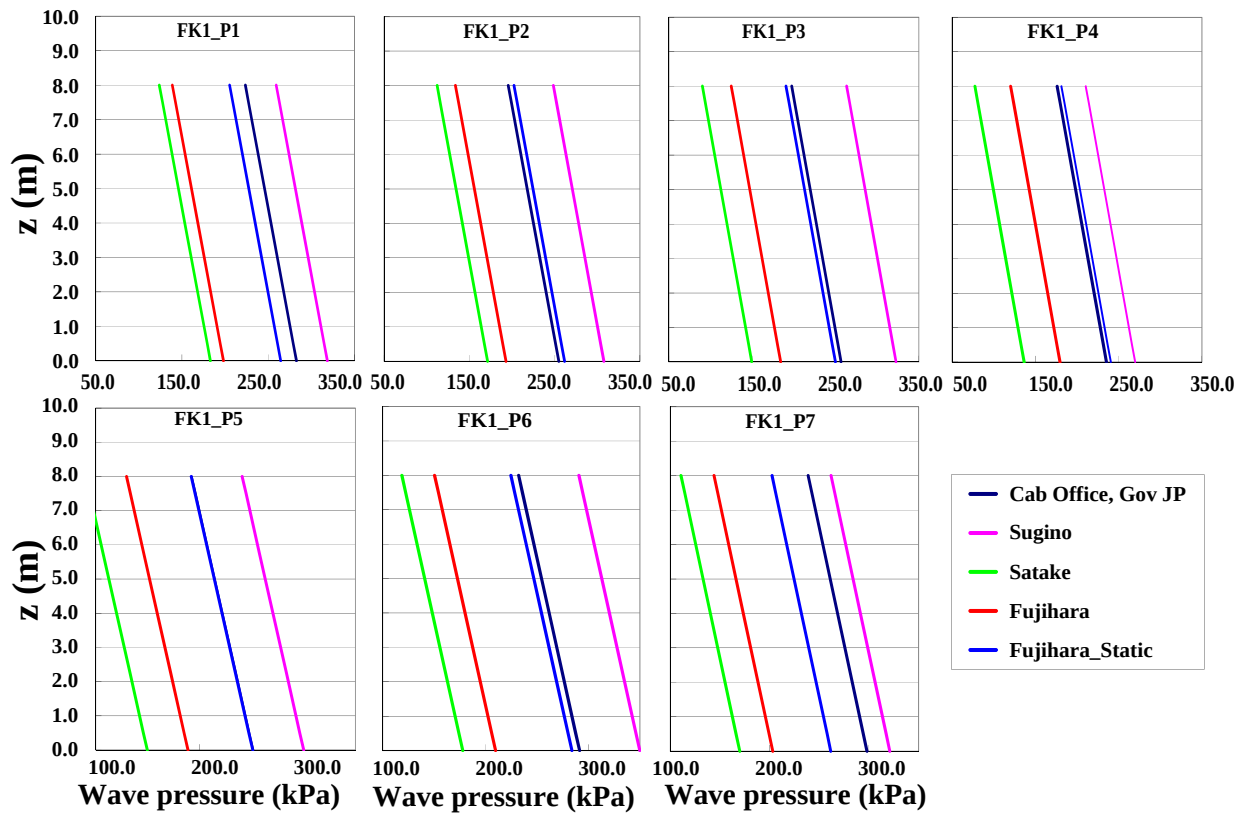


図4 複数の津波波源モデルを用いた津波シミュレーションから算出された1F周辺における津波波圧分布 (kPa) (藤原・ほか, 2014a からの再掲)。

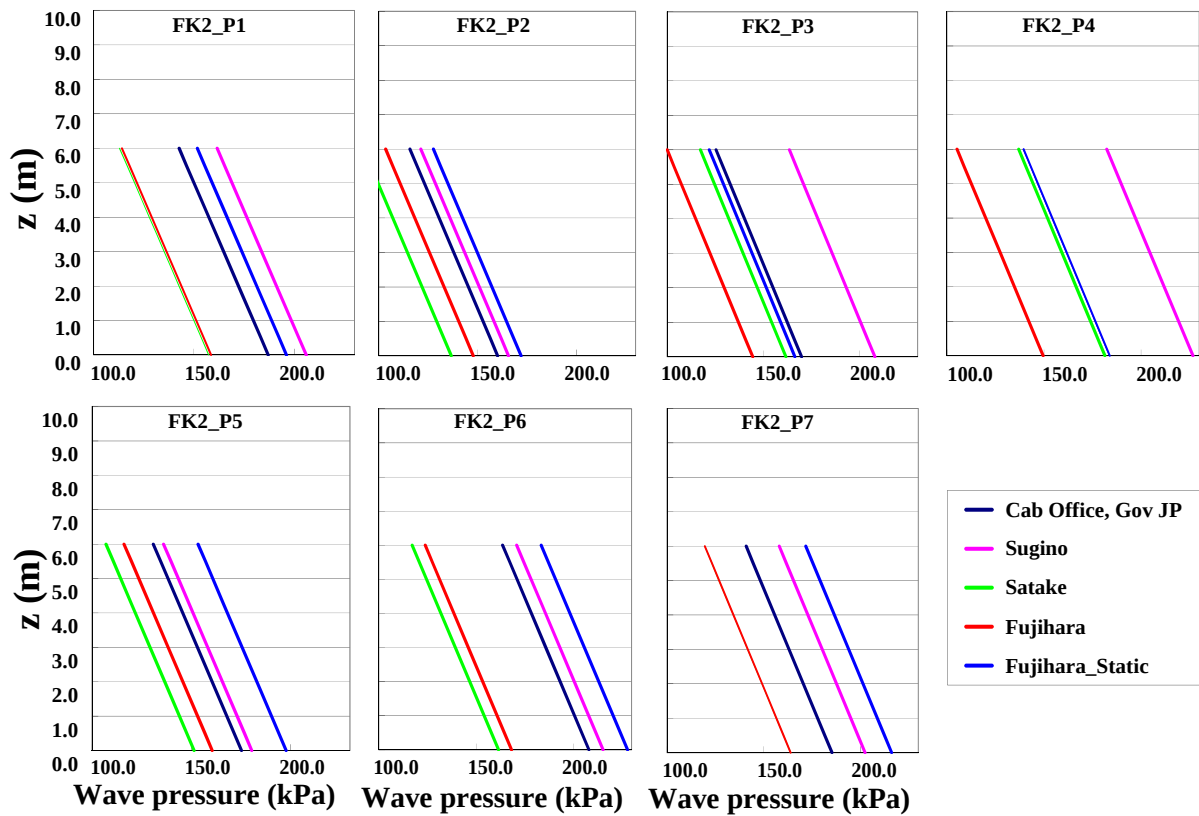


図5 複数の津波波源モデルを用いた津波シミュレーションから算出された2F周辺における津波波圧分布 (kPa) (藤原・ほか, 2014a からの再掲)。

3. 解析結果：津波水位分布及び津波波圧の差異評価

図3に、5つの波源モデルを用いた津波シミュレーションにより算出された、1F・2F周辺域における津波浸水深（水位値から標高値と地殻変動量を差し引いた流体の厚さに相当）の分布図を示す（藤原・ほか、2014a からの再掲）。シミュレーション結果は、浸水深の比較において有意なレベルの相対的差異が津波波源モデル間で確認できる事を示している。最も大きいレベルと最も小さいレベルの浸水深分布を比較すると、約2倍程度もの差異が存在することが確認できる。図4と図5に、5つの波源モデルを用いた津波シミュレーションにより算出された、1F・2F周辺域における津波波圧の分布図を示す（藤原・ほか、2014a からの再掲）。 z は陸上地面を基準とした高さである。波圧評価ポイントは、図1(c)・(d)を参照。

解析結果は、津波波圧分布の比較において有意なレベルの相対的差異（最大で約2倍程度）が津波波源モデル間で存在することを示している。各評価ポイントの最大波圧値の一覧を表1に示した（藤原・ほか、2014a からの再掲）。

表1 各評価ポイント（図1参照）における最大津波波圧値（kPa）の一覧表（藤原・ほか、2014a からの再掲）。

Region	Evaluating point	Cab Office, Gov JP model	Sugino model	Satake model	Fujihara model	Fujihara Static model
1F	FK1_P1	282.74	318.49	182.94	198.06	264.48
1F	FK1_P2	254.89	307.79	171.44	192.98	261.66
1F	FK1_P3	256.71	322.55	149.45	184.16	249.87
1F	FK1_P4	235.41	269.83	136.62	179.63	240.63
1F	FK1_P5	251.74	300.26	149.70	188.85	251.20
1F	FK1_P6	291.46	349.98	177.97	209.81	283.98
1F	FK1_P7	298.08	321.11	169.97	203.19	261.66
2F	FK2_P1	187.05	205.97	157.40	158.60	196.13
2F	FK2_P2	160.18	165.71	136.73	147.88	172.06
2F	FK2_P3	169.79	207.86	161.64	144.43	166.31
2F	FK2_P4	183.74	226.78	181.41	149.59	183.92
2F	FK2_P5	175.32	180.50	151.45	160.58	197.84
2F	FK2_P6	208.06	215.32	161.55	168.24	227.91
2F	FK2_P7	185.32	202.48	163.93	163.98	216.21

1F: 福島第一原子力発電所, 2F: 福島第二原子力発電所

4. 考察

複数の既往津波波源モデルを用いて原子力施設周辺の広域津波シミュレーション解析を実施し、津波波源モデル間において、原子力施設周辺に作用する津波波圧にどの程度の差異が生じるのかについての分析を行った。下記に考察および防災対策の仕組み全体に対する今後の検討についての私見を述べる。

4.1 津波波源モデル差異に起因する津波波力のバラつきについて

本稿では次の点について示した。①津波波源

モデルの差異が、津波波力の評価誤差にまで発展する可能性、②本稿の分析対象範囲内における、津波波圧評価値の最大値と最小値のレンジ（誤差は数倍程度）。

一般的に津波シミュレーション解析結果を含む地球科学的な解析により得られる様々な知見は、防災対策上の様々な判断材料（例：設置する堤防の高さ・強度評価、各種インフラ施設の設計仕様作成、避難経路範囲シナリオ策定など）へ活用されることが想定される。本稿で示した解析結果は、地球科学的な成果を活用し防災対策を実施する運用者、および津波・地震現象を対象とする地球科学者へ向けた重要な知見と思われる。

本稿では様々な性質の5つの津波波源モデルを分析対象とし、静的モデルと破壊伝播の効果を考慮したモデルとの比較を行った。破壊伝播効果を考慮したモデルの中では、震源以浅に大きな最終すべりが分布する杉野モデルや内閣府モデルによる津波シミュレーション結果が1Fおよび2Fの多くの評価ポイントで大きな浸水深や波圧値を示す。一方で、すべり分布モデルとしては規模が小さい静的モデル（藤原・静的モデル）による津波シミュレーション結果も杉野モデル・内閣府モデルと同等レベルの波圧値や浸水深値を示し、2Fの幾つかの評価ポイントでは、5つの分析対象の中で最も大きな波圧値を示す。

破壊伝播の効果を考慮しない静的モデルは巨大断層帯の各小断層において一瞬に破壊が生じると仮定するために、断層運動の結果生じる海底面変動には、そのピークを含む分布が形成され津波計算の連続式へ入力される。長波理論に基づく津波伝播評価では、波数分散性が低く、波源付近の津波がそのままの状態沿岸まで伝播し、沿岸での津波高が波源近傍での初期水位ピークを反映した値になりやすいと考えられる。一方、破壊伝播を考慮した波源モデルでは、小断層ごとに破壊開始する時刻が異なるために、海底面変動量が津波波源過程の継続時間中に段階的に連続式へ入力される。このため、破壊伝播が終了した時点の初期水位変動のピークはなまりやすい傾向にあると考えられる。

2011年の東北沖地震発生直後の時期では、静的な津波波源モデル（例：Fujii et al., 2011）が、津波防災関連業務で多く活用された。その後、東北沖地震の津波波源モデルについては、地震波形インバージョン解析に一般的に用いられてきた Multiple time-window アプローチが東北沖地震の津波発生に適用されて以来（Satake et al., 2013）、その時空間様式が明らかにされつつあるが、津波ハザード関連解析業務など、過去の古地震・津波についてのデー

タ・知見が必要とされる津波解析には、未だ静的な津波波源モデルが活用される。現状では、具体的なアスペリティモデルが提案されている巨大地震事体のごく少数で、歴史地震・津波記録しかなく静的波源モデルしか作れない場合の方が多い。今回の東北沖地震の事例においては、静的な津波波源モデルは相対的に大きなレスポンス（波圧、浸水深）を示したが、静的な津波波源モデルが常に安全側の津波リスク評価に適するかどうかについては注意を要すると考えられる。静的な津波波源モデルとより精密なアスペリティを考慮した不均質波源モデルとで、原発など特定の施設にどの程度の津波波圧の差が生じることを評価しておくことは、安全側の津波防災対策の基準を定めるために重要であり、本稿で着目した内容には、その点での意義があると思われる。

現状、防災施策運用に際しては、一般公開された津波波源モデル数値データや断層パラメータ情報がそのまま活用される場合が多いと思われるが、今後、津波に対する防災対策基準を更に検討する際には、津波波源モデルの不確定性についての検討が必要であると考え。また不確定性の評価のための手法論の確立も重要であると考え。

4. 2 技術面に対しての、今後の検討事項

筆者たちは、陸域の重要インフラ施設への津波被害予測システムの高精度化を目指して、図6に示される（藤原・ほか, 2014a からの再掲）「地震・津波波源モデルの高精度化」、「3次元津波解析による津波波力の評価」、「大規模数値シミュレーションによる詳細構造解析」、およびそれらの一元連動化を検討している。

3次元津波解析による津波波力の評価について、筆者達はこれまで連結津波シミュレーションのアプローチを用いて、福島県・相馬港周辺や岩手県・石巻周辺における3次元流体解析などの検討（藤原・ほか, 2012c, 藤原・ほか, 2014b）を行ってきた。今後も継続して、鉛直方向の流体運動の影響を考慮した形でインフラ施設に対する津波被害の評価を詳細に行っていく。

震源モデルの精度については、これまでインバージョン解析の難しさ・不確定性に関して様々に議論されている（例: Mai, 2007; 八木, 2012）。筆者たちは地震・津波波源の高精度化を目指して以下をこれまで検討してきた。

- ① 東北沖地震の津波波形インバージョンの際に、津波波源・断層面形状の影響によって滑りの作用する方向に違いを生じさせる要因（藤原・ほか, 2012a; 藤原・ほか, 2012b）。
- ② 3次元不均質地下構造を考慮した、地震波

形インバージョン解析による東北沖地震の地震波生成すべり分布モデルの構築（藤原・ほか, 2013d, Fujihara et al., 2013e）。

- ③ 東北沖地震発生時における、地震波生成継続時間に対する津波生成継続時間の比較（Fujihara et al., 2013c）。

東北沖地震を含めた超巨大地震の震源過程については、3次元地下構造の影響、広帯域・地震波観測周期帯における振る舞い（例: 浅野・岩田, 2011; Asano and Iwata, 2012）など、まだまだ全体として統合的に明らかになりきっていないことが多い。今後も継続して、地震津波防災の視点から、インフラ施設に対する外力項の評価を詳細に行っていく。

津波波力に対する構造解析については、FEMによる大規模数値シミュレーションを今後進めていく予定とする。

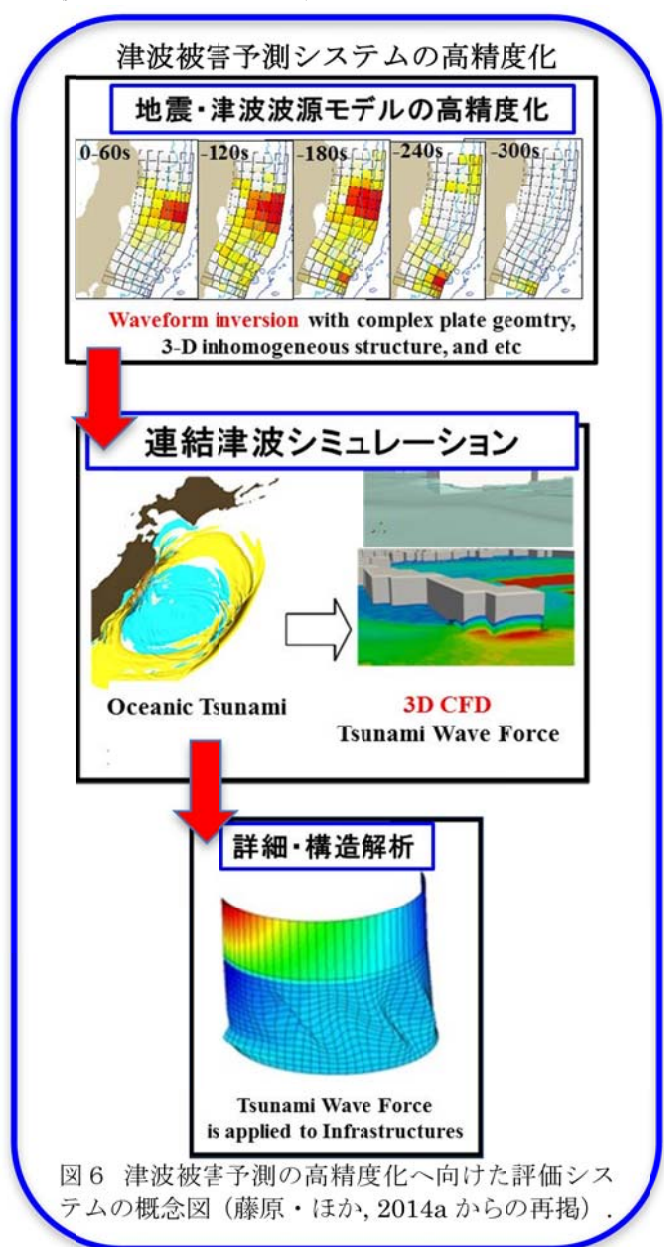


図6 津波被害予測の高精度化へ向けた評価システムの概念図（藤原・ほか, 2014a からの再掲）。

4. 3 防災対策仕組み全体としての、今後の検討

下記に、防災対策の仕組み全体に対する今後の検討についての私見を述べる。

① 防災施策関連者と地球科学研究者とのコミュニケーションの促進

地震・津波に対する防災活動の運営には、それに関わる様々な個人および組織の考え方の違いが存在する。原子力施設に関わる諸問題・その他の防災上の命題にとっては、地震・津波解析から得られる知見は応用であり運用である一方で、地球科学の研究者にとっては、地震・津波・火山の諸現象は、研究すべき推定対象・素過程そのものである。

今後、地球科学の研究者は地震・津波・火山などの現象自体の理解に注力する一方で、防災対策全体の中での地球科学研究の位置づけ・重要性を意識して防災施策関係者との意見交換をはかっていくことが大事であり、また防災施策担当者側からのニーズを地球科学の研究者へ伝える双方向のコミュニケーションも必要であると考ええる。

② 防災に取り組む次世代育成の促進

将来を見据えて、科学技術を活用した防災問題に将来取り組む若い世代の研究者および政策運営者の育成およびその仕組み作りを促進することも重要であると考ええる。そのためにも、現役の防災関係者及び研究者には、（現役大学院生などの階層も含めた）将来の防災関係者も含む形で、より多くの情報を整理した形でアウトプットしオープンな情報共有を検討することが望まれる。

③ 様々な研究分野間の情報交換の促進

防災というキーワードで関連付けられる原子力、土木、建築、火山、地震、地震津波工学など、様々な研究分野の融合および分野間の情報交換は、今後の重要な取り組みになるべきであると考ええる。そうする事などにより、科学大国日本における防災対策に関するシナジー効果はより大きなものとなることが期待される。

④ 非専門家・ジェネラリストへの簡潔・明瞭な情報発信の促進

国の防災施策の策定及び実施運用へ強い権限を持つ関係者の大半は、地震や津波や火山の専門家以外のジェネラリストである。ジェネラリストは様々な事象・案件についての重要な原理原則を論理的に把握し、様々な分野からの重要知見を組み合わせ活用することに長ける一方で、専門的な知見についての助言を必要とする。

今後、地球科学関連の学会が、全体としてより防災活動全体の今後へ向けた視点に立っていく場合、研究者は専門誌向けの執筆とは別途、

専門家以外のジェネラリストや一般向けの情報発信をより意識的かつ活発に行っていく必要があると思われる。その際、簡潔かつ明瞭な情報発信（例：背景・問題点、問題解決のための手段、入力データ、解析結果、結果のうち防災上有益な点が、紙一枚程度のボリュームに文字と図により示されたような概略資料など）をできることが望ましい。防災研究の最先端にいる研究者が、非専門家も理解できる形での情報発信を今以上に促進していくことで、この国の防災技術および防災対策はさらに良いものになるとと思われる。

以上を踏まえ、将来に東北沖地震と同程度かそれ以上の規模の地震が発生した際の津波到来に対する防災対策の観点からも、本稿の報告内容を含む多くの情報を活用し、防災対策をより最適なものにすることが重要だと考える。

謝辞

國司晴夫氏、橋本紀彦氏、中村均氏らの技術的コメントに記して感謝致します。

参考文献

- 浅野公之、岩田知孝、2011、2011年東北地方太平洋沖地震の広帯域強震動生成と震源破壊過程の関係、日本地震学会 2011 年秋季大会。
- Asano, K. and T. Iwata, 2012, Source model for strong ground motion generation in the frequency range 0.1-10 Hz during the 2011 Tohoku earthquake, Earth Planets Space, **64**, 1111-1123.
- 藤原了、是永真理子、田宮貴洋、秋山伸一、2012a、震源断層面の形状を考慮した津波インバージョン解析、日本地震学会 2012 年度秋季大会。
- 藤原了、是永真理子、田宮貴洋、秋山伸一、2012b、津波波形インバージョン解析における震源断層面形状の影響の検討、日本地震工学会・年次大会 2012。
- 藤原了、唐木田泰久、中村均、國司晴生、秋山伸一、田宮貴洋、是永真理子、佐藤暁拓、田向剛、臼井嘉哉、金伝栄、2012c、非線形長波理論と3次元流体解析との連結による津波シミュレーションの開発、2012年第17回計算工学講演会。
- 藤原了、田宮貴洋、是永真理子、秋山伸一、國司晴夫、2013a、津波波源モデルの違いによる津波挙動の差異の評価、日本地球惑星科学連合大会 2013 年大会。
- 藤原了、田宮貴洋、是永真理子、橋本紀彦、2013b、津波波源モデルの違いによる津波波力の差異の評価、日本地震学会 2013 年度秋季大会。

- Fujihara, S., T. Tamiya, M. Korenaga, N. Hashimoto, 2013c, Evaluation of Difference in Tsunami Wave Pressure among Different Tsunami Source Models, Proc. The 11th SEGJ International Symposium 2013, 547-550. doi: 10.1190/segj112013-137.
- Fujihara, S., M. Korenaga, K. Kawaji, S. Akiyama, 2013d, Duration of Tsunami Generation Longer than Duration of Seismic Wave Generation in the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki Earthquake, American Geophysical Union, Fall Meeting 2013, abstract #S32A-03.
- 藤原了, 河路薫, 是永眞理子, 秋山伸一, 2013d, 3次元地下構造を考慮したグリーン関数による2011年東北地方太平洋沖地震のすべり分布モデル, 第128回(平成25年度春季) 学術講演会-物理探査学会.
- Fujihara, S., K. Kawaji, M. Korenaga, S. Akiyama, 2013e, Source Model of 2011 Tohoku-Oki Earthquake Estimated from Seismic Waveform Inversion Considering 3-D Inhomogeneity of Underground Structure. Proc. the 11th SEGJ International Symposium, Yokohama, Japan, doi: 10.1190/segj112013-125, 497-501.
- 藤原了, 是永眞理子, 田宮貴弘, 2014a, 2011年東北地方太平洋沖地震の津波シミュレーション解析: 津波波源モデルの違いによる福島第一原子力発電所・福島第二原子力発電所施設周辺に作用する津波波力の差異の評価, 日本原子力学会和文論文誌, 投稿中.
- 藤原了, 是永眞理子, 河路薫, 橋本紀彦, 田宮貴洋, 荒木啓司, 谷本早紀, 2014b, 2011年東北地方太平洋沖地震の連結津波シミュレーション: 宮城県石巻周辺の津波遡上過程の評価, 日本地震学会2014年度秋季大会.
- Fujii, Y., K. Satake, S. Sakai, M. Shinohara, T. Kanazawa, 2011, Tsunami Source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Earth Planets Space, **63**, 815-820.
- Mai, P., J. Burjanek, B. Delouis, G. Festa, C. Francois-Holden, D. Monelli, T. Uchide, J. Zahradnik, 2007, Earthquake source inversion blind test: Initial results and further developments, 2007 AGU Fall Meeting.
- 内閣府防災情報のページ, 地震・津波対策, <http://www.bousai.go.jp/jishin/index.html>.
- Okada, Y., 1992, Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bull. Seismol. Soc. Am., **Vol. 82, No. 2**, 1018-1040.
- Satake, K., Y. Fujii, T. Harada, Y. Namegaya, 2013, Time and Space Distribution of Coseismic Slip of the 2011 Tohoku Earthquake as Inferred from Tsunami Waveform Data, Bull. Seismol. Soc. Am., **103**, 1473-1492.
- 杉野英治, 呉長江, 是永眞理子, 根本信, 岩渕洋子, 蛭沢勝三, 2013, 原子力サイトにおける2011東北地震津波の検証, 日本地震工学会論文集, **Vol. 13 No. 2** 特集号「2011年東日本大震災」その3, 2_2-2_21.
- 谷本勝利, 鶴谷広一, 中野晋, 1984, 1983年日本海中部地震津波による津波力と埋立護岸の被災原因の検討, 第31回海岸工学講演会論文集, 257-261.
- Tanioka, Y., K. Satake, 1996, Tsunami generation by horizontal displacement of ocean bottom, Geophys. Res. Lett., **23**, 861-865.
- 八木勇治, 2012, 2011年東北地方太平洋沖地震の震源過程, 地震, **64**, 143-153.

福島第一原子力発電所周辺の強震動と SPGA の関係

独立行政法人港湾空港技術研究所 野津 厚

福島第一原子力発電所周辺の強震動と SPGA（強震動パルス生成域）との関係を検討した。東北地方太平洋沖地震の 9 つの SPGA の中で最も強い地震波を励起した宮城県沖の SPGA4 は対象地域から遠かったためさほど強い地震動をもたらさなかった。福島県沖の 3 つの SPGA は SPGA4 ほど強いものではなかったが、距離が小さかったため比較的強い地震動をもたらした。原子力発電所のように、一旦事故が起これば国民生活全般を脅かしかねない重要施設の耐震性の検討においては、東北地方太平洋沖地震の SPGA4 に相当するような強い SPGA の破壊が陸域の近傍で生じるような条件を考慮することが必要である。

1. はじめに

福島第一原子力発電所の事故を受けて、今後の原子力発電所の安全性を検討するにあたり、まずは、事故の全体像を解明することが必須であるが、その中には、発電所周辺の強震動がどのように生成されたかの解明も含まれなければならない。

東北地方太平洋沖地震の際に観測された強震動のうち、特に震源特性と関連が深いと考えられる震源に近い位置での強震動は、明瞭なパルス（強震動パルス）によって特徴付けられている（野津, 2012a; 野津他, 2012）。著者は、宮城県沖から茨城県沖にかけて 9 つの SPGA（Strong-motion Pulse Generation Area, 強震動パルス生成域）からなる震源モデルにより、これらのパルスを含む強震動が説明できることを示している（野津, 2012a; 野津他, 2012; 野津, 2012b）。ただし、これらの震源モデルの作成時においては、福島第一原子力発電所に近い K-NET 大熊（FKS007）と KiK-net 浪江（FKSH20）の記録は未回収であったため、使用していなかった。その後、防災科学技術研究所の尽力によりこれらの記録が回収・公開されたため、これを利用して、福島第一原子力発電所周辺の強震動と SPGA との関係を検証した。

2. 走時の検討

東北地方太平洋沖地震に対して著者が提案している震源モデルは、図 1 および表 1 に示すように、宮城県沖から茨城県沖にかけて 9 つのサブイベント（SPGA）が次々に破壊し、震源近傍にパルスをもたらすとするモデルである。この震源モデルでは、福島県沖で 3 つの SPGA が 7-11s ほどの間隔をおいて破壊するとしている。これらと福島第一原子力発電所周辺の強震動との関係を検証した。この地震に対して提案されている震源モデルの中には福島沖に 1 つのサブイベントを仮定しているものもあるので[例えば Kurahashi and Irikura (2013)], サブイベントの数は重要な検討項目である。

図 2～図 4 は福島県沖の各 SPGA からの S 波の伝播の様子を示したものである。図の縦軸は各

SPGA から観測点までの直線距離、横軸は震央での破壊開始時刻を原点としている。赤の破線は S 波速度を 3.9km/s と仮定した場合に各地点に S 波が到来するはずの時刻を示しているが、FKS007 と FKSH20 のいずれにおいても、対応する位相をはっきりと確認することができる。そして、これらの位相が FKS007 と FKSH20 のいずれにおいても主要動を構成している。よって、福島第一原子力発電所周辺の強震動の主要な部分は福島県沖の 3 つの SPGA の破壊によってもたらされたと見ることができる。特に SPGA7 の破壊によってもたらされた地震動は大きかった。

3. 強震動シミュレーション

著者の提案している震源モデルを用い、FKS007 と FKSH20 を対象として強震動シミュレーションを行った。厳密に言えば、東北地方太平洋沖地震に対して著者は二通りの震源モデルを用意している。それらは、個々の SPGA を小断層に分割してグリーン関数の重ね合わせで SPGA からの地震動を計算するもの（これを SPGA モデルと称している；野津, 2012a; 野津他, 2012）と、個々の SPGA による震源スペクトルだけをモデル化したもの（疑似点震源モデル；野津, 2012b）である。ここでは疑似点震源モデルによる計算結果を示す。

疑似点震源モデルでは、震源スペクトルは ω^{-2} モデル（Aki, 1967）に従うと仮定する。これに伝播経路特性とサイト増幅特性（野津・長尾, 2005）を乗じることにより、対象地点での地震動のフーリエ振幅が計算され、これと対象地点における中小地震記録のフーリエ位相を組み合わせ、フーリエ逆変換することにより、サブイベントからの地震動の時刻歴波形が求まる。さらに、複数のサブイベントからの地震動を、サブイベントの相対的な破壊時刻を考慮して重ね合わせることにより、地震動の全体が計算できる。東北地方太平洋沖地震の疑似点震源モデルのパラメータを表 1 に示す。なお、表 1 に示すパラメータのうち、 M_0 は地震モーメント、 A_0 は短周期レベルと呼ばれ、それぞれ、サブイベントから励起される地震動の

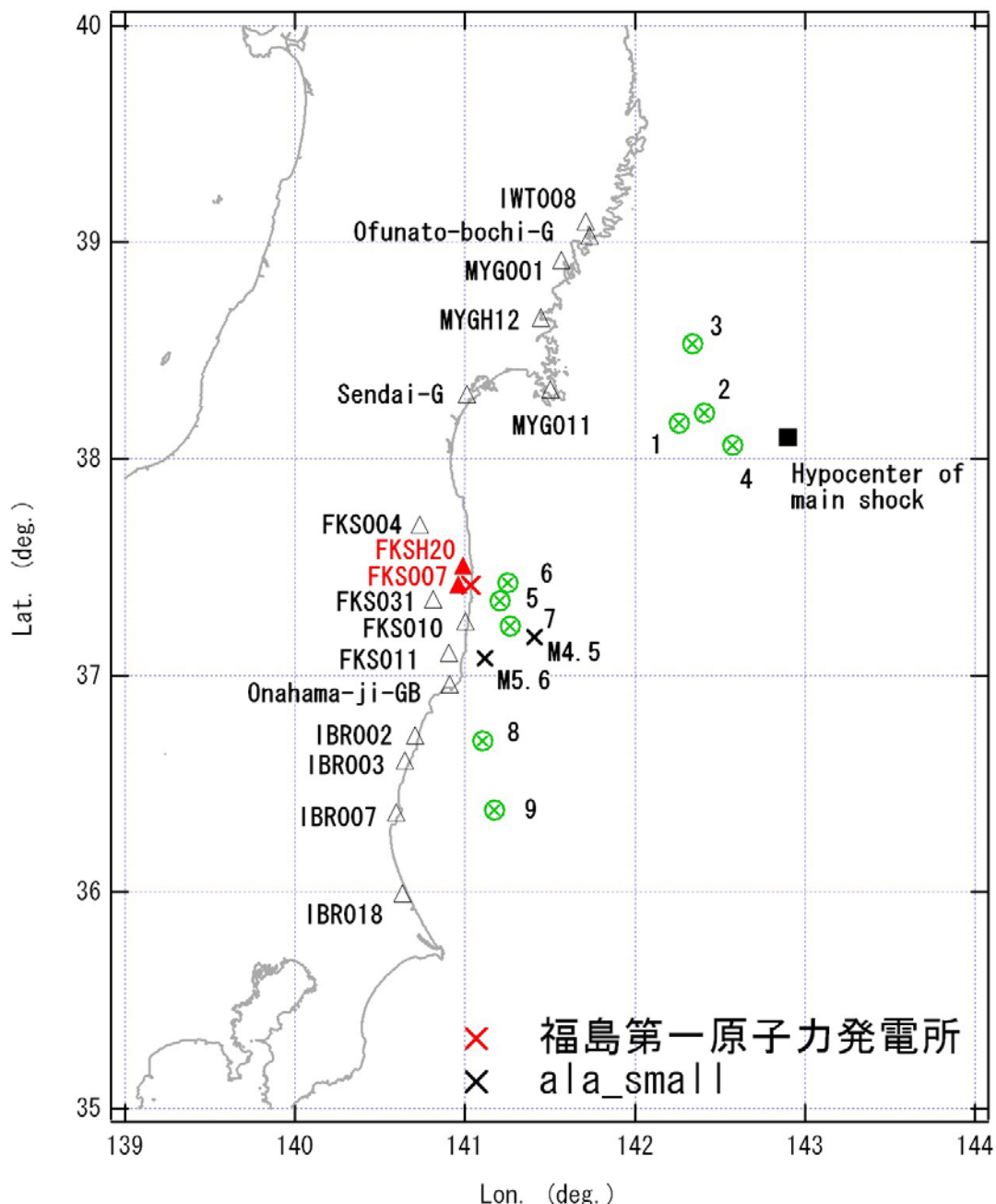


図1 福島第一原子力発電所と SPGA (1-9) の位置関係

低周波側と高周波側のレベルを決めるパラメータである。

ここでは、位相特性を決めるための中小地震記録は、FKS007 に対しては既往の研究(野津, 2012b)を参考に 2005/10/22 の地震 (M5.6) の記録を用い、FKSH20 に対しては、同じ地震の記録が得られていなかったため、震源位置を参考に、2001/11/25 の地震 (M4.5) の記録を用いた。これらの地震の位置を図1に示す。また、FKSH20 については、観測記録のフーリエスペクトルとサイト増幅特性のピーク周波数が大きく異なり、表層地盤の非線形挙動の影響が大きいと判断されたため、非線形パラメータ(野津・盛川, 2003)を用いたシミュレーションを行った。非線形パラメ

ターには、堆積層における平均的な S 波速度の低下率を表す ν_1 と、堆積層における平均的な減衰定数の増分を表す ν_2 の二つがある。 ν_1 には地震動の卓越周波数を低下させる効果が、 ν_2 には後続位相の振幅を小さくする効果がある。これらの値については、ここでは試行錯誤により、最も振幅の大きい SPGA7 に対しては $(\nu_1, \nu_2)=(0.35, 0.1)$ 、次に振幅の大きい SPGA6 に対しては $(0.5, 0.1)$ 、それ以外に対しては $(0.8, 0.02)$ と設定した。

FKS007 と FKSH20 の速度波形 (0.2-1Hz) に関する計算結果と観測結果の比較を図5に示す。構造物に対して影響の大きい帯域の地震動がほぼ適切に計算できている。FKS007 と FKSH20 のフーリエスペクトル (0.2-10Hz) に関する計算結果

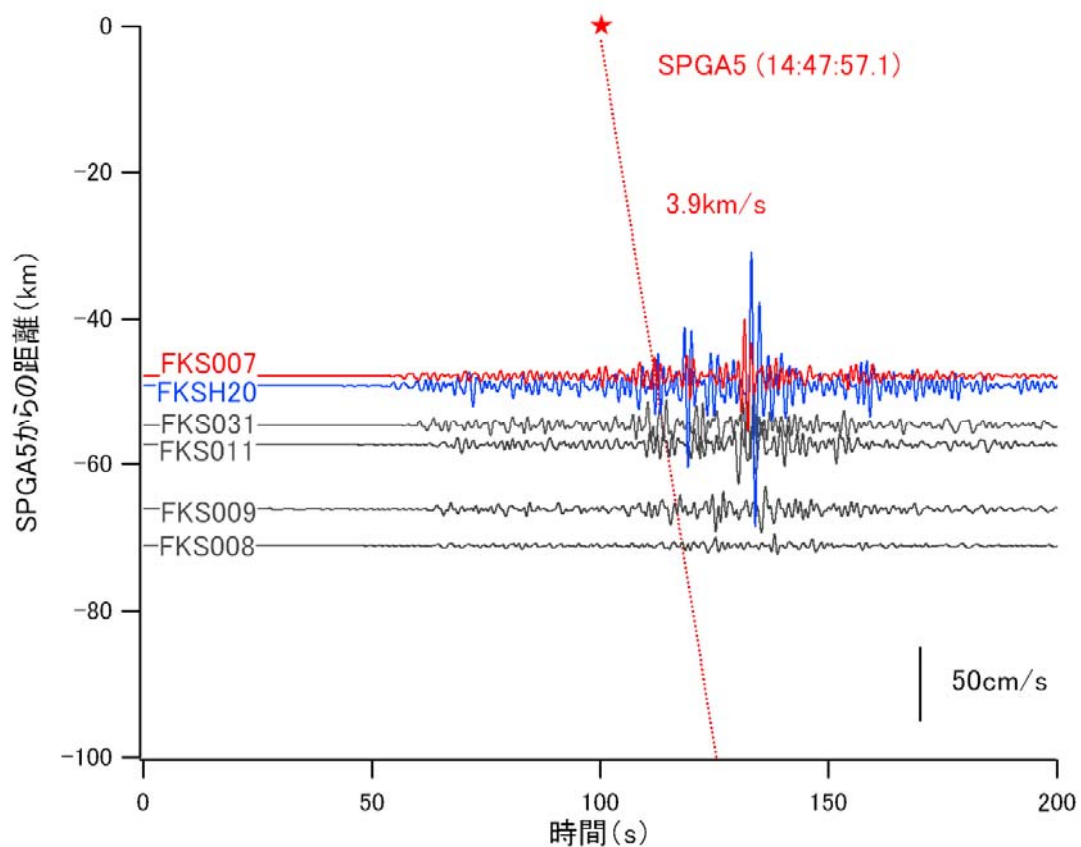


図2 SPGA5からのS波の伝播の様子

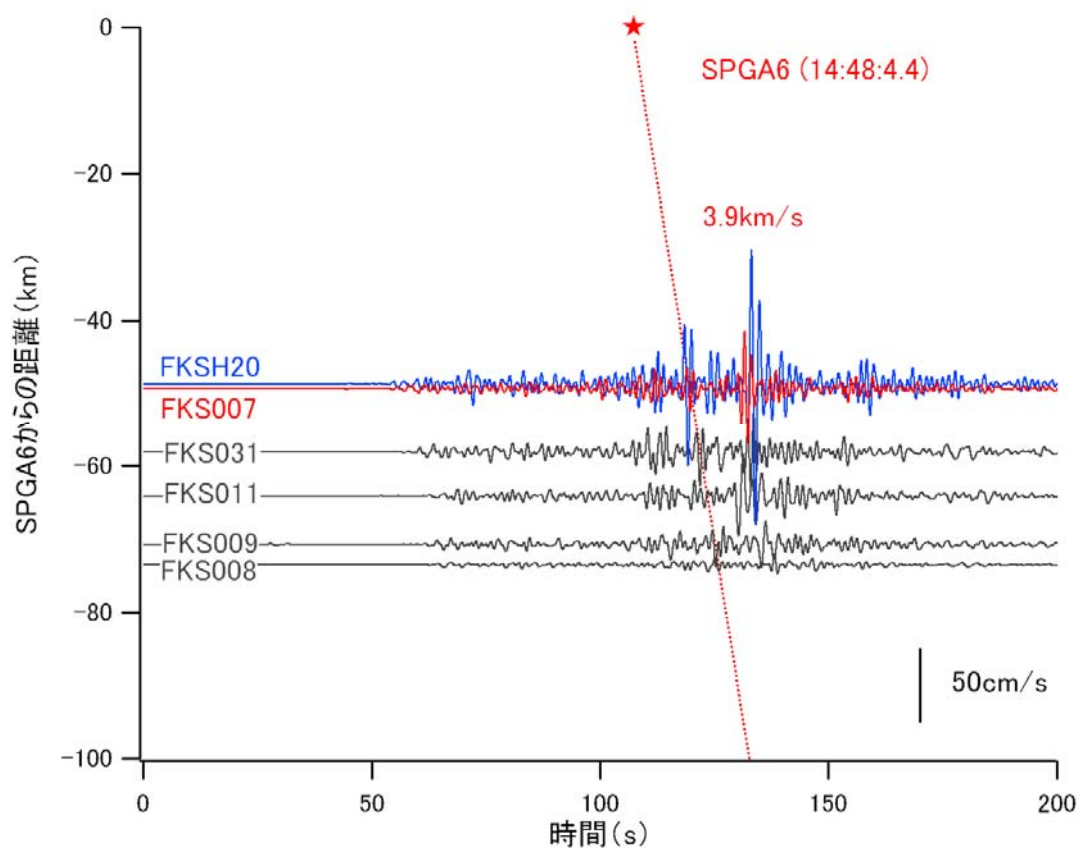


図3 SPGA6からのS波の伝播の様子

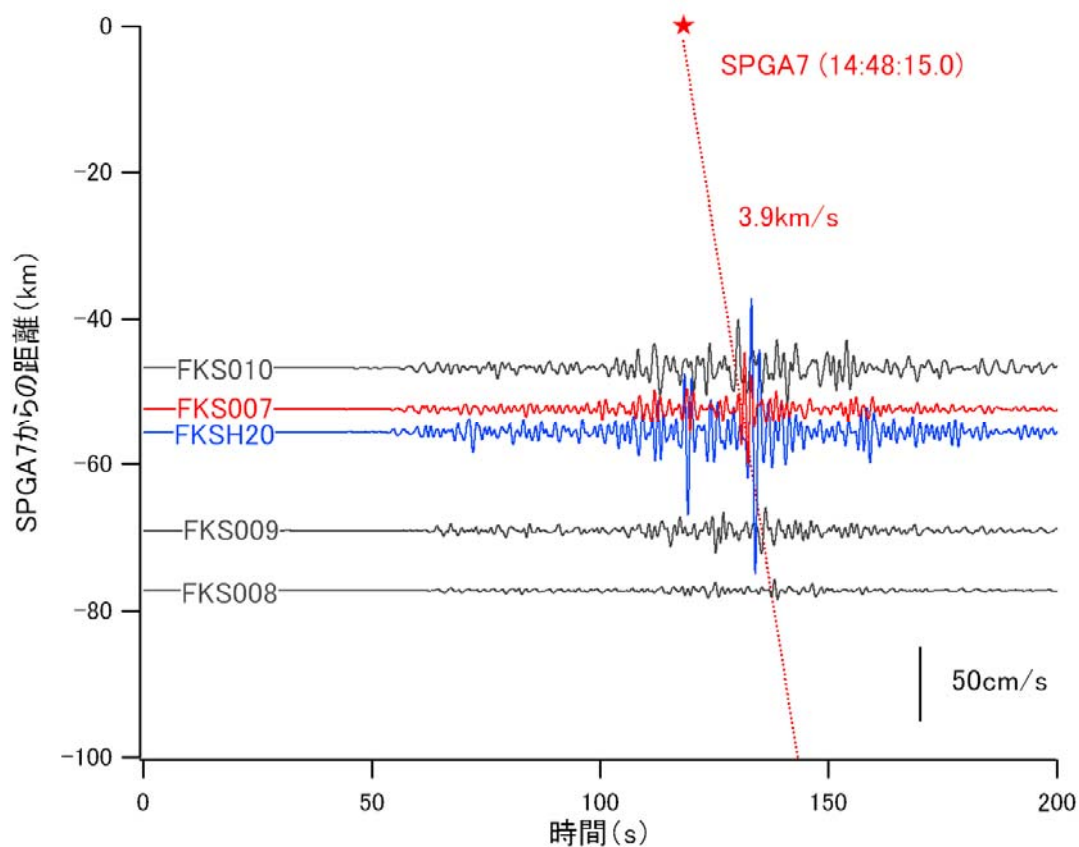


図4 SPGA7 からの S 波の伝播の様子

表 1 震源パラメーター (疑似点震源モデル)

	Rupture time (h:m:s)	Longitude (deg.)	Latitude (deg.)	Depth km	M_0 Nm	f_c Hz	A_0 Nm/s^2
SPGA1	14:46:43.5	142.263	38.166	33.6	$8.0\text{E}+18$	1.05	$3.5\text{E}+20$
SPGA2	14:46:46.9	142.411	38.214	31.8	$8.0\text{E}+18$	0.74	$1.7\text{E}+20$
SPGA3	14:47:33.4	142.338	38.532	35.3	$4.0\text{E}+18$	0.91	$1.3\text{E}+20$
SPGA4	14:47:26.3	142.574	38.062	28.3	$2.3\text{E}+19$	0.79	$5.7\text{E}+20$
SPGA5	14:47:57.1	141.208	37.345	42.2	$2.5\text{E}+18$	0.74	$5.4\text{E}+19$
SPGA6	14:48:04.4	141.252	37.428	42.2	$2.5\text{E}+18$	0.74	$5.4\text{E}+19$
SPGA7	14:48:15.0	141.267	37.228	40.5	$5.0\text{E}+18$	0.74	$1.1\text{E}+20$
SPGA8	14:48:25.8	141.102	36.696	38.8	$8.0\text{E}+18$	0.53	$8.9\text{E}+19$
SPGA9	14:48:30.9	141.176	36.378	35.3	$1.6\text{E}+19$	0.37	$8.6\text{E}+19$

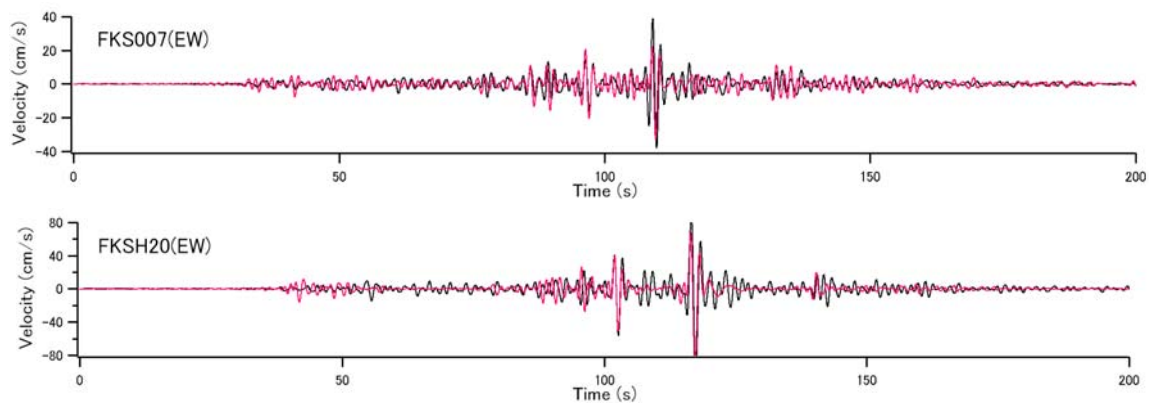


図 5 FKS007 および FKSH20 での速度波形 (0.2-1Hz) の計算結果 (赤) と観測結果 (黒)

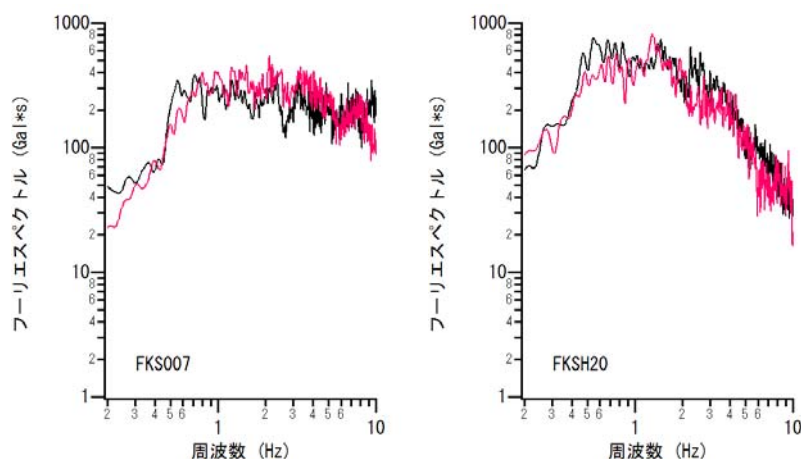


図6 FKS007 および FKSH20 でのフーリエスペクトル（水平 2 成分合成，バンド幅 0.05Hz の Parzen ウィンドウを適用）の計算結果（赤）と観測結果（黒）

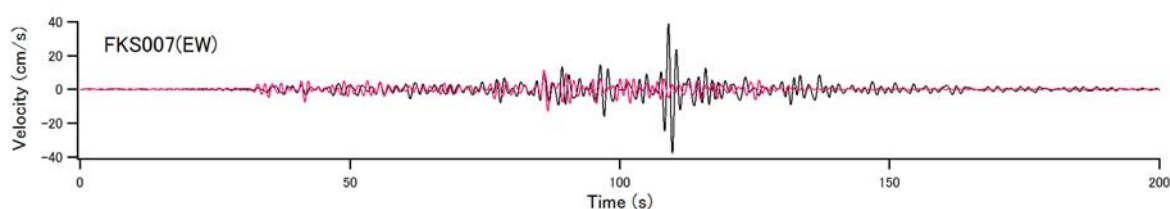


図7 FKS007 の速度波形（0.2-1Hz）に対する SPGA1～SPGA4 の寄与（赤）と観測結果（黒）

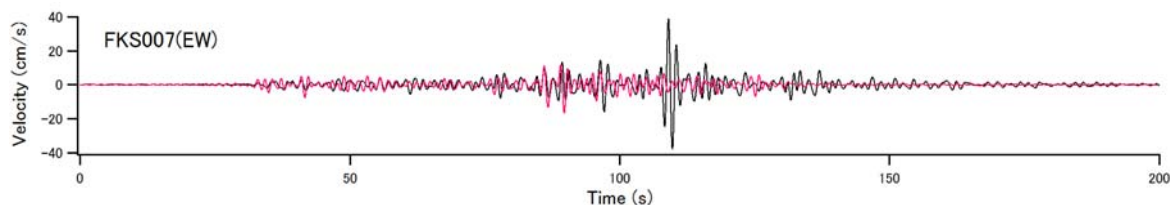


図8 FKS007 の速度波形（0.2-1Hz）に対する SPGA1～SPGA5 の寄与（赤）と観測結果（黒）

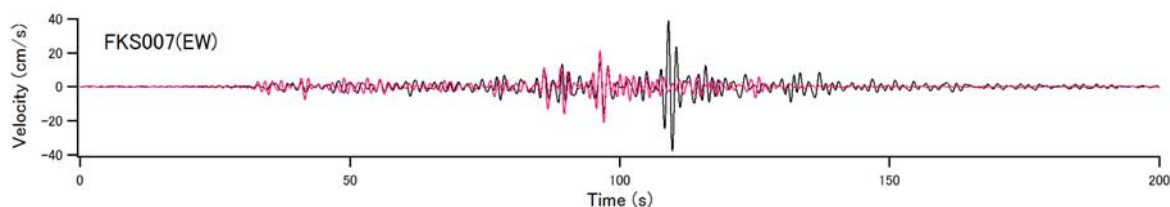


図9 FKS007 の速度波形（0.2-1Hz）に対する SPGA1～SPGA6 の寄与（赤）と観測結果（黒）

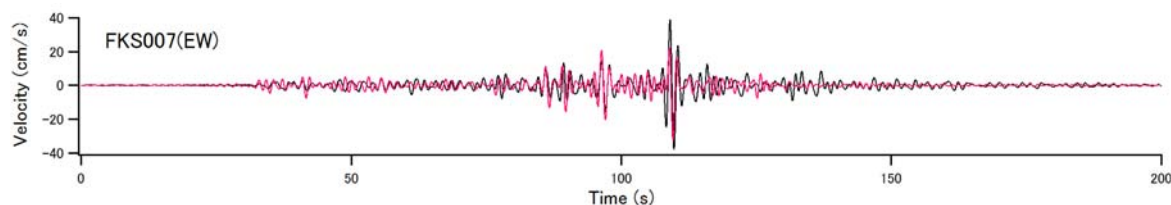


図10 FKS007 の速度波形（0.2-1Hz）に対する SPGA1～SPGA7 の寄与（赤）と観測結果（黒）

と観測結果の比較を図6に示す。この帯域でフーリエスペクトルの計算結果も良好である。なおここには示していないが 0.2-10Hz の帯域における速度 envelope の計算結果も良好であった。

FKS007 の速度波形に対する各 SPGA の寄与を図7～図10に示す。宮城県沖の SPGA1～

SPGA4 を考慮するだけでは、波形の主要な部分を説明することができない（図7）。福島県沖の3つの SPGA を考慮することで、主要動を説明することができる（図8～図10）。

以上の結果から、福島第一原子力発電所周辺の強震動と SPGA の関係について次のように整理

できる。

まず、14時46分43秒から14時47分26秒にかけて宮城県沖で4つのSPGAが破壊し、特にSPGA4は9つのSPGAの中で最も強い地震波を励起したが（表1の地震モーメント M_0 と短周期レベル A_0 参照）、宮城県沖のSPGAから福島第一原子力発電所までかなり距離があったため、これらはさほど強い地震動をもたらさなかった。

続いて14時47分57秒から14時48分15秒にかけて福島県沖で3つのSPGA（SPGA5～SPGA7）が破壊した。これらのSPGAは先述のSPGA4ほど強いものではなかったが、距離が小さかったため、福島第一原子力発電所周辺に比較的強い地震動をもたらした。福島県沖のSPGAの中ではSPGA7が相対的に強かったため、福島第一原子力発電所周辺の強震動の最大振幅はSPGA7の破壊によってもたらされた。

14時48分25秒から30秒にかけてはさらに茨城県沖で2つのSPGAが破壊したが、これらは距離が大きいため、福島第一原子力発電所周辺の強震動への寄与は小さかった。このことは、茨城県沖の2つのSPGAの影響を含む場合（図5上）と含まない場合（図10）の計算結果があまり異なることから理解できる。

なお、SPGAについては、Kurahashi and Irikura (2013)が指摘しているように、強震動生成域（SMGA）の中で局所的に応力降下量の高い部分と解釈することも可能であると考えられる。

4. 原子力発電所の安全性の検討のための海溝型巨大地震による強震動の想定について

以上の分析からわかることは、東北地方太平洋沖地震の際に福島第一原子力発電所周辺で観測された地震動は、けしてworst case scenarioと呼べるようなものではなかったという点である。東北地方太平洋沖地震の際に最も強い地震波を励起したSPGA4は、震央より西側であったとは言え、仙台市から見ても150kmも沖合であった。福島県沖の陸域に近い場所でもSPGAの破壊は見られたが、それらは相対的に弱いものであった。すなわち、東北地方太平洋沖地震においては、強いSPGAの破壊は比較的沖合で、相対的に弱いSPGAの破壊は陸域の近傍で生じたことになるが、このようなSPGAの配置となったことは幸運な偶然と言うほか無い。なぜなら、SPGA4のような強いSPGAの破壊が比較的沖合で生じ陸域の近傍で生じなかった理由を現代の地震学では説明できないからである。

福島第一原子力発電所の事故を受けて、今後の原子力発電所の安全性を検討するにあたり、東北地方太平洋沖地震の教訓から学ぶことが求められているが、地震動についていえば、東北地方太平洋沖地震において我々が幸運な偶然に恵まれたということがその教訓の最たるものである。

原子力発電所のように、一旦事故が起これば国民生活全般を脅かしかねない重要施設の耐震性の検討のために、大規模なプレート境界地震を対象として基準地震動を策定する場合においては、東北地方太平洋沖地震のSPGA4に相当するような強いSPGAの破壊が対象施設の近傍で生じるような条件を考慮することが必要である。別の言い方をすれば、SMGAの中で局所的に応力降下量の高い部分[例えばKurahashi and Irikura (2013)]が対象施設の近傍に存在するケースを考慮すべきである。

しかしながら、現時点で原子力規制委員会が作成している審査ガイド(案)(原子力規制委員会, 2013)においては、アスペリティ（SMGAに相当）の位置や応力降下量の不確かさには言及されているが、SPGA（もしくはSMGAの中で局所的に応力降下量の高い部分）の位置や応力降下量の不確かさには言及されていない。これでは、上述のような東北地方太平洋沖地震の教訓を反映した審査ガイドであるとは言えない。本稿で述べたような観点からの審査ガイドの改訂が望まれる。

謝辞

防災科学技術研究所のK-NET, KiK-netの記録を利用しました。心より御礼申し上げます。

参考文献

- Aki, K., 1967, Scaling law of seismic spectrum, J. Geophys. Res., **72**, 1217-1231.
- Kurahashi, S. and K. Irikura, 2013, Short-period source model of the 2011 M_w 9.0 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., **103**, 1373-1393.
- 原子力規制委員会, 2013, 基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド(案),
- 野津厚, 2012a, 2011年東北地方太平洋沖地震を対象としたスーパーアスペリティモデルの提案, 日本地震工学会論文集, **12**, 21-40.
- 野津厚, 2012b, 強震動を対象とした海溝型巨大地震の震源モデルをより単純化する試み—疑似点震源モデルによる2011年東北地方太平洋沖地震の強震動シミュレーション—, 地震, **2**, 65, 45-68.
- 野津厚, 盛川仁, 2003, 表層地盤の多重非線形効果を考慮した経験的グリーン関数法, 地震, **2**, 55, 361-374.
- 野津厚, 長尾毅, 2005, スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等の強震観測地点におけるサイト増幅特性, 港湾空港技術研究所資料, No.1112.
- 野津厚, 山田雅行, 長尾毅, 入倉孝次郎, 2012, 海溝型巨大地震における強震動パルスの生成とその生成域のスケーリング, 日本地震工学会論文集, **12**, 209-228.

地震と原発の不都合な関係 ～強震動予測を巡って～

東井 怜

国内で初めて震源直近の地震記録が多数観測された 1995 年兵庫県南部地震、そのころから始まる「大地震活動期」にあって、各地の原子力発電所も例外なく、建設時想定しなかったような強震動を経験し始め、設計用地震動を超えるケースも出てきた。原子力規制行政はその都度要因分析を電力会社に課し、それをもとに学識者による検証作業を重ねてきた。だが、そうした検討は時として非常に歪められてきた。「原発震災」という惨禍を経験し、規制のシステムが改められてもなお、その欠陥が克服されるという期待感がもてない。東日本大震災前に原発で観測された強震動事例に沿って、規制行政や電力会社の対応を振り返り、原発の基準地震動の策定方法を見直すべき機会が多々見逃されてきたことを述べ、その理由を探りたい。

1. はじめに

1995 年 1 月 17 日、兵庫県南部地震が発生した。チェルノブイリ原発事故（1986 年 4 月）から 10 年も経たないころのこと、この 2 つを重ね合わせて、ほどなく地元住民や反原発を主張する市民の間で原発の耐震性に対する不安が増大し、当時の原子力規制官庁は、耐震設計審査指針（1978 年制定、1981 年一部改訂 以下旧指針）の無かった時代に建設された初期の原発 28 基に関する耐震安全性の確認を行わざるを得なくなった。また、原子力安全委員会（科学技術庁）は「平成 7 年兵庫県南部地震を踏まえた原子力施設耐震安全検討会」を設置し、安全審査に用いる関係指針類の妥当性の検討を始めた。だがその結論は「兵庫県南部地震を踏まえても、その妥当性が損なわれるものではないことを確認した」というもので、その年の 9 月には報告書が公表された（原子力安全委員会、1995a）。初期の原発 28 基については、大方の基準地震動が格上げされたものの、取り立てて耐震補強工事を行ったという報告もなく、いずれも耐震上問題なしとされた（原子力安全委員会、1995b）。

筆者の地震学への関心は阪神・淡路大震災に端を発する。秋になって淡路島や神戸市内を訪れ、地震のエネルギーに驚愕した。それと前後して原子力安全委員会の報告書の子細に見たところ、70 頁余の本文には課題満載なのに、結論だけは飛躍して太鼓判を押している。科学的とはとてもいえないではないか、これが原子力規制行政の常套手段かと、初めて具体的に『原子力の安全性に対する国のお墨付き』に疑惑を抱くこととなった。以来、原発が大地震に耐えられるだろうかという疑問が、次々と起こる地震を通して届く自然からの警告と向き合うなかで、次第に原発震災（石橋、1997）の危惧へと膨らんでいった。2001 年に原子力安全委員会における耐震設計審査指針の改訂作業が開始されると、その第 1 回から傍聴し、5 年越しの耐震指針検討分科会をフォローし、続

けて原子力安全・保安院（以下、保安院）及び原子力安全委員会による耐震バックチェック審議も見守り、特に東海地震による浜岡原発震災の未然防止に取り組んできた。

だが、とうとう 2011 年 3 月 11 日、福島で原発震災を招いてしまった。いまだに事故は収束できず、環境への放射能の放出が続くなかで、全機停止をやむなくされた既設の原発に対し、新規制のもと再稼働をめざして次々と審査が進められていく。筆者は地震学会会員ではあるが地震学者ではない。しかしながらこれまでの経験を踏まえて、市民の目から地震学と原発の関係を振り返ってみた。不幸な結果を招いてしまった後のことゆえ、今更の思いは強い。だが地震に関する審査ガイドは、津波が新たに加えられたのみで、改善されたとはいえない。本稿がさらなる惨禍を断つための議論を進める一歩になればと願う。

2. 兵庫県南部地震後の検証

「平成 7 年兵庫県南部地震を踏まえた原子力施設耐震安全検討会」報告書は、2015 年 1 月現在規制委員会の HP、旧組織等の情報→「第 44 回原子力安全委員会臨時会議 平成 7 年 9 月 29 日」に納められている（原子力安全委員会、1995a）。

報告書は、耐震指針の妥当性の検討に際して、以下の 3 点を、検討すべき事項として挙げた。

- ① 地震及び地震動の評価方法に問題はないか。
- ② 鉛直地震力の評価方法に問題はないか。
- ③ 活断層評価及び直下地震の規模に係る考え方に問題はないか。

それらの検討は、震源に近く（震央距離 23km）、時刻歴波形が得られている神戸大を評価地点に選び、そこに原発を建設すると仮定して、審査指針で採用されている地震及び地震動の評価方法、鉛直地震力の評価方法、活断層評価及び直下地震の規模に係る考え方に基づいて基準地震動の応答スペクトルを試算し、これを神戸大における観測結果と比較するとしている。その結果が、いずれも「兵庫県南部地震に照らしても、その妥当性

が損なわれるものではないことを確認した」なのであった。以下に①～③のそれぞれについて、検討会報告とその問題点を記す。

① 地震・地震動の評価手法

報告書では、神戸大学で観測された地震動の応答スペクトルに対して、全体的に大きめの値となっていることが確認され（図1）現行手法に問題はないとしている。しかし、気象庁マグニチュード（ M ）7.2 の観測記録との比較でよしとする根拠も、漠然と大きめなどという評価でよしとする理由も示されず、筆者には到底納得できなかった。報告書は、全体的に定性的記述に終始し、そこから第三者が報告内容の正当性を客観的に判断するには余りにも基礎的なデータが不足していた。たとえば、考察は速度値に基づき行なわれているにも関わらず、観測波の時刻歴波形図は加速度ばかり示されており、あるいは評価地点とした神戸大の震央距離（23km）も示さないといった具合で、あえて比較できないように伏せたとすら思われるような記述であった。まずは $M7.2$ の地震を兵庫県南部地震の震源に想定して、既存の経験式による応答スペクトルや時刻歴波形を求め、観測記録と比較することによって、距離減衰式の妥当性を検証すべきだったのではないか。それを可能にするような貴重なデータが得られたのである。だが、そのような検証はどこにも見当

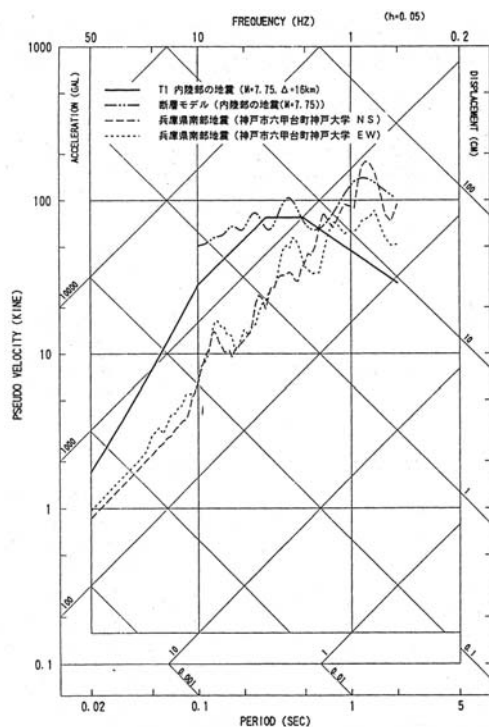


図1 神戸大学において想定される地震の岩盤での擬似速度応答スペクトル（実線）、観測されたスペクトル（破線：南北成分、点線：東西成分）、断層モデルに基づくスペクトル（2点鎖線）の比較。（原子力安全委員会，1995）

たらなかった。

当時各原発の設置許可申請において、解放基盤表面における基準地震動（当時は水平方向のみ）は、「大崎の方法」（大崎，1984）による応答スペクトル法が採用されていた。まず考慮する地震ごとに、マグニチュードと震源距離から、岩盤上の経験式である速度減衰式を用いて評価地点の解放基盤表面における最大速度振幅を求め、これを基に応答スペクトル（大崎のスペクトル）を作成する。次に、それらの応答スペクトルを包絡するように設計用応答スペクトルを設定し、その模擬地震波（速度時刻歴波形）を作成して基準地震動とする。ところが、神戸大におけるこれらの最大速度を、報告書においてはいずれも記していない。検討にあたって想定した地震のリストと、それらの応答スペクトルを重ね合わせた図があるのみだ。国会での質問主意書に対して、応答スペクトルを規定する最大速度振幅（金井式，Kanai and Suzuki, 1958）については、 $M7.2$ の地震に対して 18.4 カイン（cm/秒）であったことをはじめ、検討した地震についてそれぞれ回答したもの、模擬地震波については解放基盤面深さが不明のため作成していない、としている（秋葉議員質問主意書への答弁書，1995）。いっぽう観測記録については、試算と比較するどころか、速度波形も最大速度値も記載せず、なぜか速度波形を微分して作成したという加速度波形と最大加速度値のみを記載している。本文中には、神戸大の水平動の最大速度が NS 成分で 55 カインであると記されているが、金井式による 18.4 カインはこの値の3分の1にすぎず、現行指針で用いている大崎の方法では観測データを説明できない。

さらに大崎の方法においては、評価地点が震央に近い場合、ある一定の範囲（「震央域外縁距離」といい、マグニチュードによる）内では「震源距離及び応答スペクトルは、震央距離にかかわらず震央域外縁距離に基づいて算定することとされている。」（今村議員質問主意書への答弁書，1995）という。すなわち、マグニチュードごとに決まる「震央域外縁」内の地点ではどこでも、その震央域外縁と同一の最大速度と応答スペクトルが算定され、それ以上大きくはしないということだ。報告書では、地震地体構造に基づく $M7.75$ の地震の震央距離を 16km としてあるが、検討会では震央距離約 20km 地点における震源距離に置き換えて算出し、最大速度は 27.5 カインになったという（秋葉・今村議員質問主意書への答弁書，1995）。しかし報告書にはこの点についての説明は一言もなく、「震央域外縁距離」の文言すらない。

金井式は岩盤上の経験則ではあるが、遠距離小地震（ $4.0 \leq M \leq 5.1$ ）のデータに基づくもので、当時近距離データは得られていなかった。震央から 20km 以内の大・中規模地震の観測記録などほ

とんど入手されていなかった頃だから、貴重な実測データを基に、経験式等の妥当性を検証することが必要不可欠だったはずだ。だが、大崎の方法に関して、「検討会は、兵庫県南部地震による地震動の観測値のみをもって同方法の妥当性を評価することは適切ではないこと、兵庫県南部地震による最大速度振幅のうち解放基盤表面における観測値であると確認されたものがないこと」を理由に、大崎の方法に基づく算定法について「ご指摘の評価を行わなかった」という（秋葉・今村議員質問主意書への答弁書、1995）。現行指針の妥当性を問うと言いつつ、実は現行法に問題はないと示すための話法であったことが、今ならよく解るのだが。

図1には、大崎スペクトルのほかに、断層モデルによる応答スペクトルも描き加えられている。断層モデルは、原発においては当時まだほとんど活用されていなかったはずであるが、そんなことは断りなく、市民向け資料として長周期の側で採用し合成した結果を配布している。要するに検討会が行ったことは、神戸大に原発を設置する場合、M7.2の兵庫県南部地震を超えるM7.75を考慮することになるから現行指針でよろしい、というにすぎない。それは基準地震動の算定方式以前の問題で、何ら手法に係わる検討でもない。役所の無誤謬性を主張されただけであった。既存の手法を検証するというのであれば、こうした従来の欠陥をまず整理し、その上でより実測に近い結果を導く手法を、改善策として提起すべきであった。

② 上下動

原子力安全委員会（1995a）では、大きな上下動が観測されていることを認めつつ、「一般に構造物の耐震設計を支配するのは水平地震力であり、鉛直地震力の影響は小さいもの」「建築基準法を始めとして、鉛直地震力を規定していないものが多い。」と、一般の建築物並みで良しという従来通りの見解を前提に、新たな知見を探ろうという姿勢はなく、改善の必要性を認めていない。原発は構造物以上に配管、弁、動的機器等々の信頼性が要で慎重な検証が必要だが、その点についても定性的な見解を繰り返すのみで、上下動に限らず原発独自の検証など行っていない。

唯一の定量的評価が加速度比・速度比である。各方面から約200に上る地点の観測データを収集し、埋め立て地盤や構造物の影響の推測される観測記録を除いた125点について、上下動と水平動の比に関する4点のグラフを示している。横軸はいずれも断層からの距離（次の③参照）で対数表示である。図2は、市民側が報告書の図の元データを入手して、横軸を実数目盛に変換した図である。震源に近いほど上下動の割合は高くなり、20キロ以内ではほとんどが耐震設計審査指針で基準とされている0.5を超えることが分かる。と

ころが報告書では距離に関係なくそれらの平均値を算出し、0.45であるから指針は従来通りでよいと結論した。これだけばらつきの大きいデータと、原発の安全性に係わる数値について、平均で語ることは妥当だろうか。さらには、水平動の最大値発生時刻における加速度比（データ数は23に激減、平均値は0.13）を示すグラフ（図3）を挿入し、「平均値は0.1程度、最大値は0.3程度となり、1/2を大きく下回ることとなった」などと記している。地元各地で開催された住民向けの説明会等で配布した科学技術庁のレジュメには図3しか掲載していない。

当時50キロ未満はおろか1～2キロなどという断層至近距離のデータなど得られていなかったのであるから、原子力安全委員会は貴重なデータとして真摯に受けとめ、耐震指針見直しの参考とすべきであった。

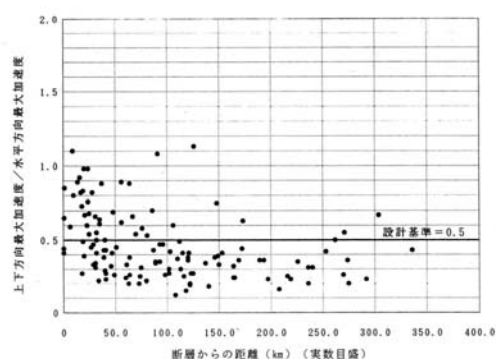


図2 最大加速度の上下動・水平動比（縦軸）と断層からの距離（横軸）。原子力安全委員会(1995a)の元データに基づき作成。

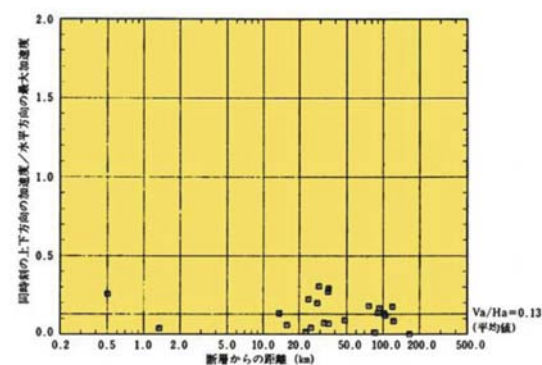


図3 最大水平動時刻における上下動・水平動比（縦軸）と断層からの距離（横軸）。（原子力安全委員会,1995）

③ 活断層評価と直下地震

この課題についても原子力安全委員会は、「今回活動したとされる活断層の活動の再来期間は5万年より短い」「耐震設計審査指針では敷地又はその近傍で活断層が認められない場合においてもM6.5の直下地震による地震動を考慮することとしている。」として、当時の審査指針の

見直しを不要と切り捨てた。

ところが、旧指針より前に設計された原発の基準地震動に対する資源エネルギー庁の見直しでは、この M6.5 直下地震の想定を取り入れたことが効いて、基準地震動が引き上げられている。福島第一原発を例にとると、基準地震動 S1（設計用最強地震：将来起こりうる最強の地震動で過去の地震と A 級活断層の一部を考慮）は 180 ガル（12.2 カイン）、基準地震動 S2（設計用限界地震：起こる可能性が低い限界的な大地震で、5 万年前以降に活動した活断層と地震地体構造を考慮）は 270 ガル（20.8 カイン）であるが、直下地震の想定 370 ガル（13.6 カイン）を加えて S2 を 2 種類とした。他の原発も同様で全国一律に 370～380 ガルが加わり、神戸大評価地点と違って近くに長大な活断層がない原発サイトでは、これが最大の基準地震動となった。

ところでこの直下地震は M6.5 と想定しているので、震央域外縁距離は明記されていないが 7.2km 程度で、そこでの震源距離は一律 10km とされている。①に述べたように、大崎の方法によると震央から半径 7.2km の範囲内の最大速度は一定とされ、震源直上といえども同じだから 13.6 カイン（最大加速度 370 ガル）というわけだ。果たしてそれでいいのか。

じつは検討会はこの点を検証している。距離減衰式として福島の式（福島，1994）および福島・田中の式（福島・田中，1992）と、本震の観測記録とを比較した図を、入倉（1995）から報告書に転載しているのであるが、前者が速度、後者が加速度であり、横軸は震央距離ではなく断層からの距離を対数目盛で取っており、どちらも断層に近づくにつれて増大する傾向を示す。大崎の方法で用いている震央域外縁距離内一定に反する経験式であり、かつ断層から至近距離あるいは断層沿いでは、強震動は断層からの最短距離に依るという予測式である。ここでは震央距離 23km に位置する神戸大のデータは、最大速度が 50 カイン強、最大加速度が約 300 ガルで、断層からの距離約 2 km としてプロットされているのである。報告書では同文献の考察を引用して、今回の観測値が断層からの距離が遠くなるにしたがって小さくなっていること、及び経験式とほぼあっていることを記している。神戸大の 55 カインは、決して増幅などによる異常値ではないことを確認しているのだ。それでどうして「震央域外縁距離」内速度一定という仮定が観測データに合わないことを認めず、これに基づく現行指針で良いという①の結論になるのか。

こうしたことから、阪神・淡路大震災後、原発に批判的な学識者らの援助を得てにわかに原発の耐震設計を勉強し始めていた市民たちは、とくに大崎のスペクトル（金井式ほかの経験式類）は

過小評価であること、活断層の評価期間を 5 万年前で切るのは不適切、直下地震として M7.2 を想定すべき等々を指摘し、国会議員らの協力を得て、旧指針は改訂すべきと科学技術庁交渉等を繰り返した（例えば、秋葉・今村議員質問主意書への答弁書，1995）。地元説明会でも住民は地盤問題を含めこれらの質問で食い下がった。そうした説明会に登壇した検討会委員のなかには、指針の改訂見込をあっさり肯定する学識者もいた。

3. 基準地震動を次々と超える強震動記録

3-1. 大地震活動期に入って

原子力安全委員会の評価にもかかわらず、その後今日までに基準地震動 S1 と S2 を超えるケースが 8 例も明らかとなっている。基準地震動を超えたか否かは、原発の施設健全性を確認するうえできわめて重要であるが、地震学的には少し違う。地震や地震動の想定が正しいかどうか、ひとつひとつの回帰式が適切か、観測された記録と比べるべきなのだ。その意味で、兵庫県南部地震における検証はスタートラインとして重要であった。ところが結論が先に立ち、算出した基準地震動が兵庫県南部地震の地震動を超えたから妥当、として真実を隠ぺいしてしまった原子力安全委員会の誤謬が、後々まで修正されずに継承されてきた。そればかりか政府、電力会社はこの評価の後、原発の耐震安全性のキャンペーンに乗り出した。耐震性に不安を抱く者には、まさに広報宣伝によって安全神話を売り込むとしか見えず、かえって不信を募らせていった。

たしかに原発ではかつて地震動の観測記録は小さかった。最大加速度値は、かなり大きな地震でも数ガルから数十ガルということが続いていた。兵庫県南部地震の少し前の 1993 年、女川原発が地震で自動停止したことがあった。自動停止の設定値に達しないのに、地震に誘発された出力異常により止まってしまったのだが、このときの記録が 121 ガルであり、おそらくこれが当時国内の原発で記録された最高記録と思われる。ところがそれは、日本の原発がたまたま大地震に遭遇しなかったに過ぎないからであることがほどなくわかる（石橋，2014）。

3-2. 地震本部「地震動予測地図」との比較

2005 年 3 月、文部科学省地震調査研究推進本部（以下、地震本部）は「全国を概観した地震動予測地図」（J-SHIS）を初めて公表した（地震調査研究推進本部，2005）。「向こう 30 年間に 3% の可能性」とはじき出された最大速度値を示している。予測マップには最大加速度値は表記されていないため、筆者らは、最大速度値を全国の原発の各サイトで想定される J-SHIS 予測マップから読み取り、基準地震動の最大速度値と比較してみた（東井，2012）。前者を棒グラフ、後者を折れ

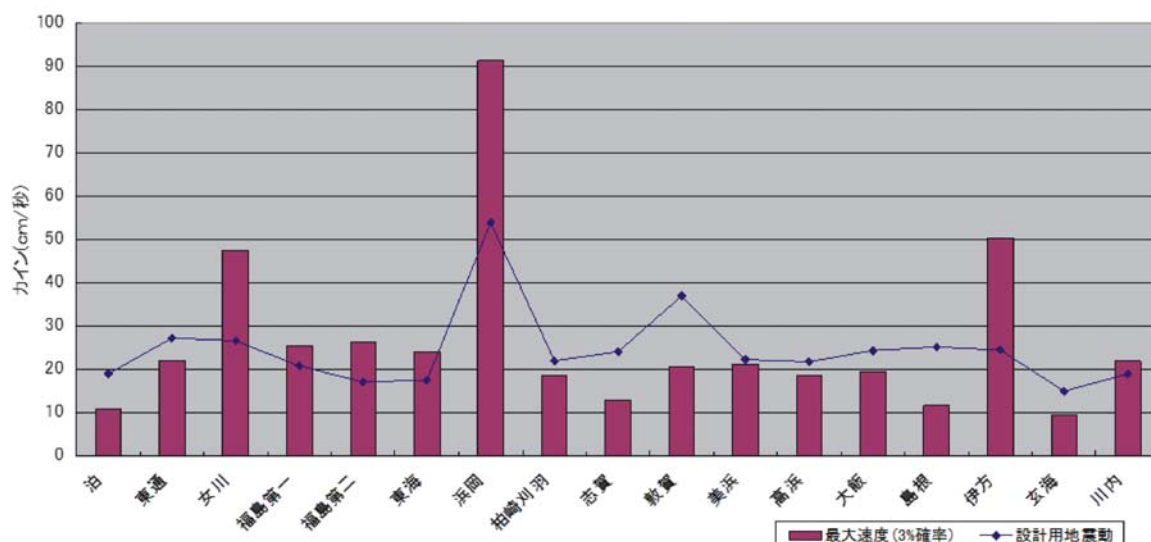


図4 原発サイトにおける J-SHIS による最大速度値 (期間 30 年, 確率 3%, 工学的基盤) と基準地震動の最大速度値の比較 (東井, 2012)

線で示す (図 4)．地震本部は，工学的基盤面での予測値を基に地表予測値を割出し，予測マップにはその両方の値を示していた．だがこの工学的基盤面が原発の解放基盤表面とは異なり V_s (S 波速度) を 400m/s としているため，予測値を一律に 1.45 で除して (地震本部による換算方法) 原発の解放基盤面相当の 700m/s に修正した上で作成したものである．

この比較により浜岡，伊方，女川の順で基準地震動が J-SHIS の地震動予測よりも低く設定されており，基準地震動が過小に評価されている恐れが浮き彫りとなった．この時点では，さらに福島第一，第二，東海，川内の各原発で，予測マップの方が大きい値を示した．はたして現実はどうなるであろうか．基準地震動を超える実例こそが，地震及び地震動の評価方法の検証を可能にしてくれるはずだ．

3-3. 2005.8.16 宮城県沖の地震 (プレート境界地震, M7.2, 震央距離 73km, 震源深さ 42km, 震源距離 84km, 最大加速度値 251.2 ガル) —女川原発で初の基準地震動超過—

この地震で，東北電力女川原発 1～3 号全基がすべて緊急停止した．設計用最強地震 S1 (最大速度 20.1 カイン，最大加速度 250 ガル) と並ぶ地震動 251.2 ガルが保安確認用地震計 (1 号機) で観測された．その後東北電力が行った解析により，解放基盤面相当の -8.6m に入力した地震波 (はざとり波という) の最大加速度値は NS 成分 235 ガル, EW 成分 284 ガルで，EW 成分で S1 を上回ったうえ，S2-N (375 ガル) の応答スペクトルをも 0.05 秒前後の短周期領域で超えたと推定された (東北電力，2005a, p12)．

この S2-N は，直下地震 M6.5 による S2 地震動

で，3 種の基準地震動の応答スペクトルのうち周期 0.2 秒より短周期側では最大の振幅をもつが，観測記録はプレート境界地震によるものだから，地震動の評価手法を検証するために S2-N と比較するのは適切ではない．プレート境界地震に対しては，M7.5 を考慮して S2-D (325 ガル) が設定されている．その応答スペクトルが，S1 相当といふべき M7.2 の地震 (2005 年宮城県沖) により，機器・配管の固有周期が集中する短周期領域で超えられたことは，深刻に受け止められなければならなかった．女川原発はもちろんのこと，浜岡，福島，東海等，プレート境界地震を考慮すべき地震に抱える原発は，少なくともここで基準地震動の検証を行うべきであった．

こうした解析は，2006 年 9 月に完成する新耐震設計審査指針改訂の最終段階の時期と重なり，原子力安全委員会が設置する指針検討分科会にも持ち込まれた．しかし検討分科会での基準地震動の策定に関する議論は内陸地殻内の地震に主力が注がれ，傍聴していた筆者にはなぜかプレート境界地震には深入りしたくないという雰囲気を感じられ，不審に思った．じつは 2002 年 7 月以降，地震本部が進める長期評価の報告書を巡って中央防災会議事務局からの圧力が度々加えられていたことを東日本大震災後知った (柳田，2012a,b; 添田，2014; 福島原発告訴団上申書，2014)．2003 年 7 月には内閣府中央防災会議に，「日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会」が設置されている．

初めて設計を超える地震動を経験した女川原発に係る規制側の審議は，設備の健全性確認が重点であった．再稼働させることが関心事であったのだ．旧指針では基準地震動 S1 に対して原子炉設備は弾性範囲にとどまることを要求し，S2 に

対しては塑性変形を許すが機能保持を要求している。基準地震動を上回る地震動への耐震性は保証されていない。一般市民は様に不安を表明した。指針検討分科会でも、耐震裕度の確認には関心を示したが、基準地震動を超えた要因分析としては、女川沖の地震は平均的なプレート間地震から外れるという地域特性に求めた、東北電力と保安院の報告を妥当として終えてしまった。

東北電力は、基準地震動を超えた周期帯に固有周期をもつ設備をはじめ、重要施設に対する点検を行うとともに、安全確認用地震動としてはぎり波を包絡するような応答スペクトルから時刻歴波形（580ガル、29.4カイン）を作成し、地震応答解析を行った（東北電力、2005a, p22）。3基とも、保安院や原子力安全委員会の審議後、順次運転再開が認められるに至ったが、それは安全確認用地震動に対する女川原発のチェックでしかない。プレート境界地震の地震動特性や伝播特性に関する何らかの徴候を見逃したかもしれないのである。

3-4. 2003.5.26 三陸南地震（海洋プレート内地震, M7.1, 2003 年宮城県沖の地震ともいう、震央距離 48km, 震源深さ 72km, 震源距離 87km, 最大加速度値 225 ガル）—女川原発では 2003 年にも

東北電力は 2005 年宮城県沖地震のはぎり波を公表した際に、2003 年 5 月の三陸南地震でもはぎり波の加速度応答スペクトル（最大加速度値は 239 ガル）が極短周期の一部で S1 を上回っていたことを明らかにした（東北電力、2005b）。S2 を超えないとはいえ、この地震は海洋プレート内地震であったから、海洋プレート内地震の想定見直しの機会とするべきであったのに、東北電力は公表すらしなかったのである。

この地震で、福島第一原発（震源から 170 キロ）の記録は NS 成分で 117 ガルであったが、大熊町の K-NET 記録は NS 成分が 72.2 ガル、EW 成分が 91.6 ガル、UD 成分が 54.7 ガルで、原発内の方が大きかった。第一原発は 6 号機の原子炉建屋基礎版での記録である。ここにも、海洋プレート内地震の周期特性や距離減衰式、サイトの地盤特性などに関する貴重な情報が潜んでいたはずである。東北地方太平洋沖地震による福島原発サイトの凄まじい地盤変状を知るにつけ、惜しまれてならない。

3-5. 2007.3.25 能登半島地震（内陸地殻内地震, M 6.9, 震央距離約 18km, 深さ約 11km, 震源距離約 21km, 最大加速度値 225 ガル）—能登半島地震で S2 応答スペクトルも超過—

北陸電力志賀原発では、この地震で「計測震度 6.0」すなわち「震度 6 強」を記録した。速報用計測震度計が 1 号機原子炉建屋基礎版上（地下最下階）に設置されていると知って、筆者が問い合わせたものである。最大加速度値 225 ガルもこの震度計の記録だという。幸い 1・2 号機とも運転停止中であった。

北陸電力の解析によると、-10m の解放基盤面でののはぎり波は、最大加速度値が 292 ガルで S1（375 ガル）も S2（490 ガル）も超えないものの、応答スペクトルは原子炉建屋、燃料集合体の固有周期に等しい 0.2 秒あたりで S1 を超え、さらに長周期では S2 も超えている（図 5）（北陸電力、2007, p8）。北陸電力は 2005 年女川原発と同様、はぎり波を包絡するよう修正した応答スペクトルから模擬地震波を作成し（図 6）、地震応答解析を行って運転再開を認められた。この模

せたものである。最大加速度値 225 ガルもこの震度計の記録だという。幸い 1・2 号機とも運転停止中であった。

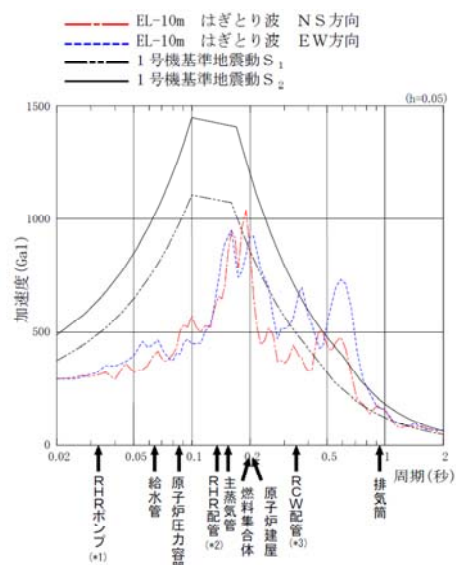


図 5 志賀原発における 2007 年能登半島地震のはぎり波（赤：南北成分、青線：東西成分）と基準地震動 S1（二点鎖線）、S2（実線）の比較（北陸電力、2007）。原発の主要設備の固有周期も示す。

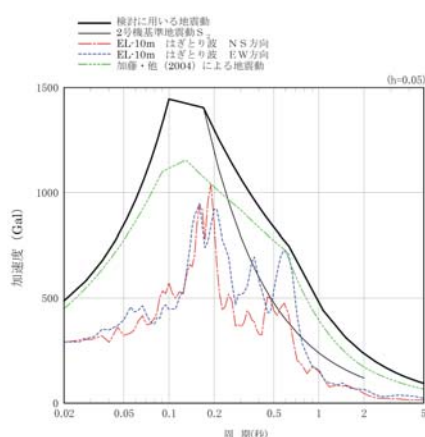


図 6 志賀原発の地震応答解析に用いられた加速度応答スペクトル（太実線）と基準地震動 S2（細実線）、はぎり波（図 5 と同じ）、加藤他(2004)による地震動（三点鎖線）の比較。（北陸電力、2007）

擬地震波は長周期側のみの修正のため、S2 の最大加速度値は 490 ガルで従前と変わることはな

かった（北陸電力，2007，p36）。

3-6. 2007 年 7 月 16 日中越沖地震（浅部伏在断層、M6.8、震源深さ約 17km、震央距離約 16km、震源距離約 23km。最大加速度値 680 ガル）－柏崎刈羽原発で原発震災の予兆－

原発が初めて本格的に地震の襲撃を受けた。破損・変形、ひび・剥離、はそれぞれ 1000 件程度、水漏れ・油漏れは合わせて 600 件余、電源喪失・地絡も多々あり、翌年 1 月末までに 3,270 件の被害を数えた。原発周辺が厳しい震災状況のなか、地盤沈下による変圧器火災の消火に手間取り、海への汚染水流出や大気中への放射能漏れを起こすなど、福島原発震災の予兆ともいえるべき現象が多々みられた。

この地震は、阪神・淡路大震災後東京電力が「活断層がないことを確認している」と強気に宣伝していた地点で発生した。活断層、震源断層探しに時間を費やし、断層モデルも種々提案されたが、最終的には東大地震研や産業技術総合研究所などにより、柏崎刈羽原発の敷地の直下、ほぼ敷地境界線まで、既知の海底活断層 F-B が伸びていると認定された（原子力安全委員会，2008）。震源断層面直上に原発を建ててしまったことが、原発被災の最大の要因である。

地震発生から 10 か月後によりよく公表された東京電力の報告書（東京電力，2008a）からはそのほかにも数々の新事実が明らかになった。7 基のプラントに残された強震計記録は、互いに大きく異なる地震動を示し、それらを基に解析された東京電力のはざとり波は、基準地震動 S2（450 ガル）の 1.2～3.8 倍とまちまちで、最大は 1 号機の EW 成分 1699 ガルだ（図 7）。7 基のうち 1～4 号が柏崎市に、5～7 号が刈羽村に立地するが、とりわけ大きいのは柏崎側で 4 基とも 1000 ガルを超え、応答スペクトルは全周期にわたって完全に S2 を超えている（図 8）。増幅の要因は、主に原発サイトの地盤が深さ 5～6km 以浅で大きくうねり、地震波を屈折させた結果とされた（東京電力，2008a，p76）。

幸いなことに、原子炉建屋基礎版への入力地震動は、最大の 1699 ガルを受けた 1 号機でも 680 ガルだから、水平成分振動は 4 割に減衰したことになる。減衰した理由は埋め込み効果で、45m も埋め込まれた半地下式原発であったからだという。それでも S2 に対する 1 号機基礎版の応答は 273 ガルであったから、設計用地震動の約 2.5 倍もの強震動に襲われたことになる。上下方向に関しては埋め込み効果は少なく、特に 6 号機の入力波は水平成分観測波（322 ガル）を超える 488 ガルを記録した。

地元では地盤が悪いことは周知の事実であり、建設当初より反対運動の大きな理由の一つでもあった。別名「トーフの上の原発」と揶揄され、

柏崎側 4 基と刈羽側 3 基の中間地は「蟻地獄」と呼ばれ東京電力も立地を避けている。1 号機地震観測小屋の計測震度計は「震度 7」を記録、5 号機地震観測小屋では、地表レベルとしては最大の加速度 EW 成分 1223 ガル、水平方向合成値 1567 ガルを記録し、サイトの内外を問わずいずれもこの地震における最大を記した。これだけ劣悪な地盤に原発を 7 基も建設してしまったことが判明した今、再稼働のための審査を進める前に、地元や首都圏を始めとする消費者を含めて公論を図るべきではないか。

柏崎刈羽原発には総数 97 台の地震計が設置されていたが、観測波形がとれたのはその 3 分の 1、残りは旧式でメモリー不足のため本震のデータは失われてしまったという。東京電力ではその理由を、IC メモリー容量が 40MB、測定可能範囲が 1000 ガルであったためなどと説明した。いかに地震を甘く見ていたかが分かる。その他、柏崎刈羽原発の被災に伴う情報を筆者は、耐震指針改訂の経緯などとともに、浜岡原発震災への警鐘のため、その時々ホットニュースとしてインターネット新聞に投稿してきたが、結果的に福島原発震災の予告編となってしまった。3.11 後過去記事す

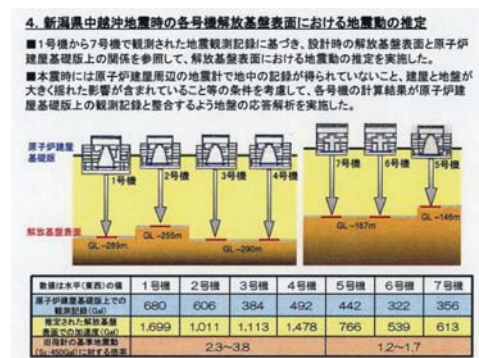


図 7 中越沖地震時の柏崎刈羽原発の各号機原子炉建屋基礎版上の観測値から推定された、解放基盤における地震動（東京電力，2008b）

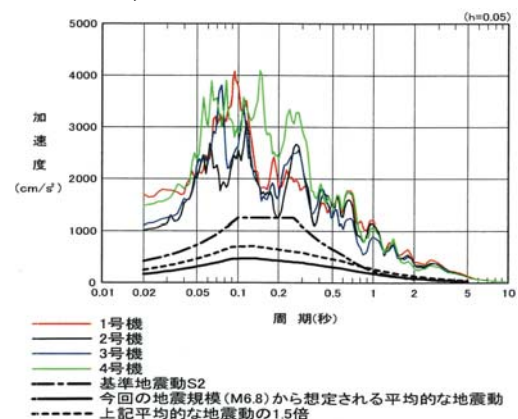


図 8 中越沖地震時に柏崎刈羽原発 1～4 号機で推定されたはざとり波と基準地震動 S2 の比較（応答スペクトル）。（原子力安全・保安院，2008）

べてを収録して発刊した（東井，2012）。

4. 想定東海地震と浜岡原発

4-1. M6.5 の地震動が想定東海地震に匹敵

2009 年 8 月 11 日、駿河湾を震源とする地震が発生、判定会が 30 年の歴史の中で初めて召集され、初めての観測情報を発令した。最大震度 6 弱を記録したのは、想定東海地震で陸側プレートが最も大きく跳ね上がるとされている御前崎、牧之原、焼津あたりであった。震源は駿河湾内、ほぼ想定東海地震の震源域の東端に位置し（図 10）、M6.5、震源深さ 23km、震央距離は原発から 37km で、震源距離同 43.5km であった。

地震発生から 10 日後、中部電力は浜岡原発の地震観測データ類とその分析結果を保安院に提出した（中部電力、2009）。浜岡サイトには 5 機 of 原発があり、総数 200 台ほどの強震計が設置されていて、詳細な地震波形が記録された。それによると、原子炉建屋基礎版の最大加速度値が、4 号機の 178 ガルに対し、わずか 440m しか離れていない最新鋭の 5 号機（2005 年 1 月運転開始）が 439 ガルと 2.5 倍を記録していた。ただちに、耐震バックチェック審査中の保安院から、5 号機突出の要因分析が中部電力に課された。以来 5 号機の異常増幅要因に焦点が当てられ、長い時間が費やされたが、ここでも地盤特性という局所的な要因に集約され、基準地震動策定の妥当性を検証しようという声はあがっていない。

図 9 は 1～5 号機それぞれの原子炉建屋基礎版における最大加速度観測値を、設計時に想定された S1 (450 ガル) 応答値（例えば中部電力、2009、p 32）と比較したものである（東井、2012）。東へ行くほど大きくなる傾向を示し、最も東に位置する 5 号機で S1 応答値と並んでしまった。S1 は、M8.0 の想定東海地震や M8.4 の安政東海地震を考慮して作成されていた（中部電力、2009）。2001 年の中央防災会議（中防）専門調査会モデル（以下、中防モデル）では、試算した 4 ケースのうち浜岡原発地点での最大の予測値は、解放基盤面相当で 395 ガルである。中部電力は「はぎとり波」をなかなか公表しないので、これと観測波を応答スペクトルで比較してみたところ、観測波は水平、上下方向ともに一部の周波数帯で中防モデルの想定東海地震を超えていることが確認できた。一体どうしてこのようなことになったのか。駿河湾地震は海洋プレート内地震なので地震タイプは異なるが、M6.5 にすぎない。それでも中防モデルは過小評価ではないといえるのか。

4-2. 中防モデルのアスペリティ配置

図 10 は中央防災会議による想定東海地震（中央防災会議、2001）の地震動予測図（2001 年 12 月）で、地表面のデータを算出する前の、工学的基盤の予測図である。中防は地表面の予測図しか

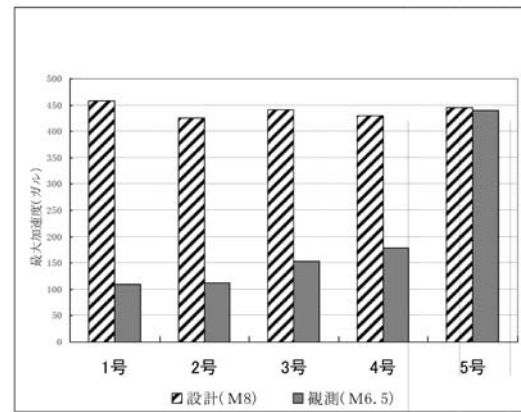


図 9 2009 年駿河湾地震時に浜岡原発各号機において観測された加速度（灰色）と基準地震動 S1 による建屋応答の比較（東井、2012）

公表していないので、原発の解放基盤面と同じほぼ $V_s=700\text{m/s}$ で定義されている工学的基盤におけるデータを手し（衆議院予備的調査、2002）、メッシュごとに専門調査会の 4 ケースのうちの最大の値を拾って作成している（東井、2012）。凡例は、浜岡原発の基準地震動 450 ガル (S1)、600 ガル (S2) で区分してある。原発周辺は、北西部の山岳地帯を除けば震源域内で最低レベルであり、ここが S1 を超えないような結果となっている。

中部電力は新耐震指針に基づくバックチェックに際して、基準地震動 S_s を 4 種類策定した。 S_s とは S1, S2 に代わって新耐震指針で導入された基準地震動で、「供用期間中に極めてまれではあるが発生する可能性があり、施設に大きな影響を与えるおそれがあると想定することが適切な地震動」と定義された。図 11 上は、このうちの 3 種類と中防の想定東海地震（浜岡地点における断層モデル）および S1, S2 の加速度応答スペクトルを、縦軸を通常目盛に変換して比較し易くした。

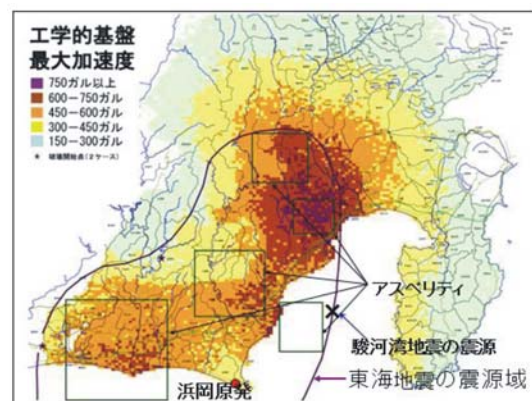


図 10 2001 中央防災会議の想定東海地震に基づく工学的基盤における地震動予測図（東井、2012）

断層モデルによる2種類は、中防モデルを基本形とし、その上で不確かさを加味して策定している（中部電力, 2007a,b）が、そもそも中防モデルに

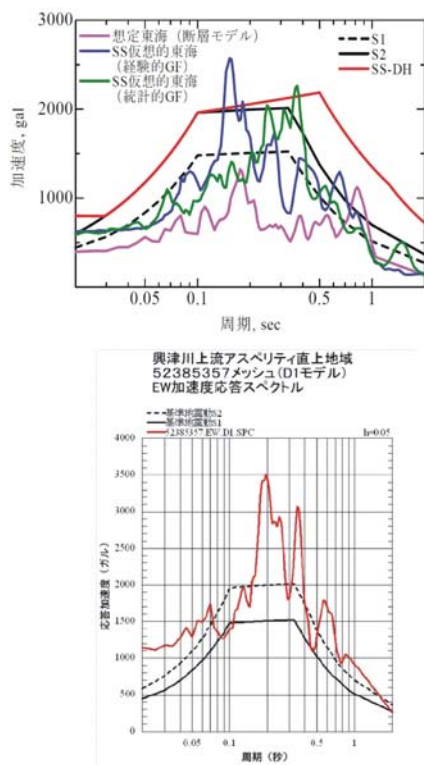


図 11 (上) 浜岡原発の直下にアスぺリティを移動した中部電力の仮想的東海地震のSs応答スペクトル(青、緑及び赤)。基本とした中央防災会議の浜岡地点における断層モデル(紫)の数倍である。S1(黒実線)、S2(黒破線)は建設時の基準地震動。

(下) 中央防災会議の想定東海地震断層モデルにおいて、S2を大幅に超える強い加速度値を示す地点の応答スペクトル例(赤)。上下とも、浜岡原発運転差止訴訟最終準備書面(2007)より。

おける浜岡地点の振幅は、原発の設備の固有周期が集中する周期帯では、S1に比べても半分程度しかない。同じ中防モデルでもS1のほぼ2倍を超えるような特に強い最大加速度値を示す地点もある。図11下はその1例であるが、周期全体にわたってS1を超え、0.2秒付近ではS2の2倍に近い。この地点は、図10で上から2番目のアスぺリティ直上に位置する。新幹線と高速道路のみに沿って最大加速度値を図示した図12を見ると、アスぺリティの直上に入るとともに最大加速度値が大きくなることが一目瞭然である。どのアスぺリティからも遠くにある浜岡原発周辺は、とりわけ低いレベルという結果になった。

なお4種類のSsのうち時刻歴波形の加速度振幅がもっとも大きくなるのはSs-DHの800ガルで、200ガルもアップしたようにみえるが、応答スペクトル図をみれば、原発の設備の固有周期が集中する周期帯ではS2(600ガル)をなぞっているにすぎず、原発の機器にとってはほとんど厳しくなっていない。ところが最大加速度値はもっとも高い周波数の振幅で決まるので、Ss-DHのその領域を一定値800ガルに設定したことで、一気に200ガルも上がり、基準地震動が非常に厳しくなったようにみえる。基準地震動を考慮するときは、最大加速度値で語られることが多いが、応答スペクトル図、さらには速度・加速度波形まで考慮しなければ、みかけの大小に惑わされる危険性があることに注意する必要がある。このことは、現在進行中の原子力規制委員会の審査においても散見されるところである。いっぽうSs-DHの長周期側も嵩上げしているが、この周期帯に固有周期をもつ設備のない原発の安全性にはあまり関係がない。

いずれにしても、基本形とする中防モデルが小

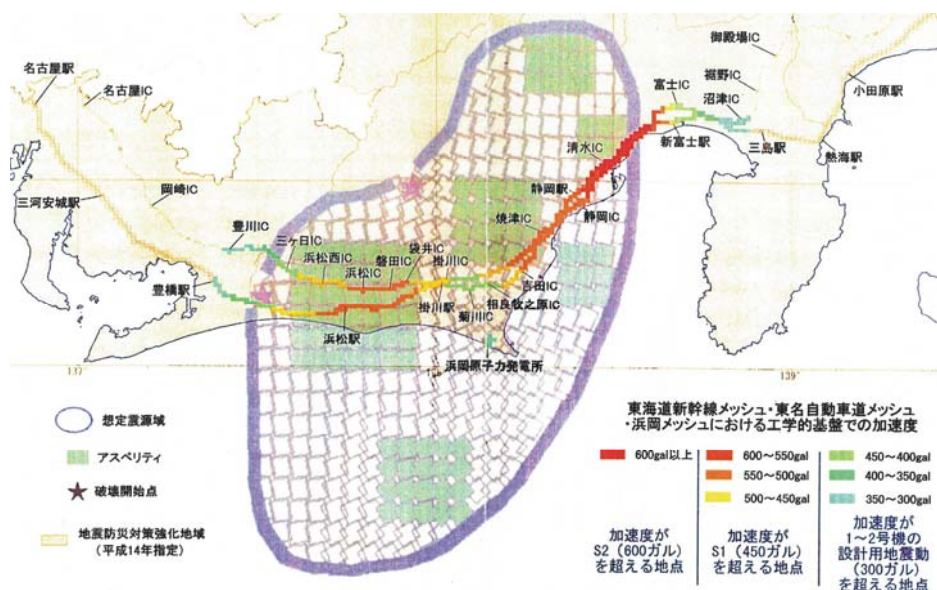


図 12 中央防災会議による想定東海地震断層モデル(紫線の範囲)による東海道新幹線・東名高速道路・浜岡原発における工学的基盤での加速度。薄緑の四角形は想定されているアスぺリティ。衆議院予備的調査(2002)元データに基づき作成。

さすぎ、極めて憂慮する事態が続いていたのである。そうした現実を直視できない中部電力は、あくまでも中防モデルに固執していた。耐震指針改訂が完了する前から新指針に基づく基準地震動 Ss の策定に着手し、新指針確定後は、どこよりも早く浜岡 3・4 号機のバックチェック結果を保安院に提出し、2007 年 4 月から審査を受けていた。ところが中越沖地震、駿河湾地震、東北地方太平洋沖地震と次々に襲来する現実の地震により地震動評価の見直しをやむなくされ、その都度大がかりな地質調査を繰返してきた。新耐震指針が改訂されてから 8 年が過ぎるが、浜岡原発は、いわば自然から不合格通知を再三突き付けられて、いまだに新しい基準地震動も定まらず、耐震性の確認もされていない。これが通常の社会であれば、不合格の決定というものだ。

4.3. 浜岡 5 号の運転再開に向け理不尽な動き

ところが浜岡 5 号機は、2011 年 1 月、「想定東海地震にも耐える」として地震発生から 1 年 5 か月余りで運転再開に至った。その時の経緯は全く納得のいかないものであった。駿河湾地震で異常増幅が判明した当該のプラントであり、その要因が反映されなければ浜岡原発の基準地震動が定められない、として保安院のバックチェック審査も休止状態が続いていたのである。ここではその要因分析の行方に関しては省略するが、運転再開への経緯を追って置く。

まず 2010 年 3 月末、中部電力は要因分析をまとめた報告書を保安院に提出、浜岡 4 号のバックチェック審議中の委員会の WG（地震・津波、地質・地盤合同ワーキンググループ、以下合同 WG）で説明した。地盤調査の結果、敷地東側に位置する 5 号機周辺の地下 300~500m に「低速度層」が確認されたこと、そこを経由して到達する北東方向からの地震波のみが増幅する傾向を確認したという（中部電力、2010a）。委員たちもすぐ納得できるものではなく、その後も WG のたびに注文が付けられた。同時に 3・4 号機の耐震バックチェックに関して残された課題が保安院事務局によって整理され、論点整理メモにはいくつもの重要課題が記載されていた。8 月には、耐震評価を審議する構造 WG から、要因分析の見直しを含めて合同 WG へ差し戻しを受けた。5 号機の運転再開はとてもハードルが高いと思われた。

ところが 11 月の第 46 回合同 WG で事態は急変する。保安院が「仮想的東海地震に対して増幅を考慮したとしても耐震設計上重要な主な施設の機能維持に支障がないものとする」（原子力安全・保安院、2010）とする見解案をまとめたのだ。そもそも合同 WG の審査対象ではない耐震安全性にまで踏み込んでいる。「仮想的」とは中部電力のモデルで、海のアスぺリティをサイト直下に移動したケースである（中部電力、2010b, p48）。

また増幅特性としては、過去のわずかな観測記録から、増幅した伝播方向からの地震波を平均して水平方向が 2.3 倍、鉛直方向が 1.7 倍になったと算出し、同等の増幅を仮定した「影響確認用地震動」を作成、これに対して耐震安全性を確認したという（原子力安全・保安院、2010）。この「影響確認用地震動」は、わずか 6 日前に開催された第 45 回会合で委員から指摘されたコメントに対応するべく突如登場したものである。保安院の見解案は、すべて中部電力がパワーポイント（例えば、中部電力、2010a, b）を用いてその間説明してきた内容であるが、中部電力自身は報告書も修正せずいっさい文書にまとめてはいないし、また「影響確認用地震動」に対しては地震応答解析も実施せず、簡便な応答倍率法で発生値を算出し、余裕を確認したというに過ぎない。評価基準値との比較を示す中部電力の耐震評価結果表に至ってはわずか 1 枚のパワーポイントのみで、そこには「耐震設計上重要な主な施設」と称して、8 つの設備名だけが挙げられ、評価点もそれぞれ 1 点ずつしかない。それ以外の重要設備機器については、評価結果など 1 つとして示していない。8 設備とは、原子炉、格納容器、原子炉建屋、主蒸気配管、制御棒、炉心支持構造物、余熱除去ポンプ、同配管で、まさに原発の心臓部のみである。観測記録が基準地震動を超過したこれまでの例でも、被害が小さかった場合には、耐震評価のための地震応答解析を重要施設（およそ 100 設備）のみに絞ることはあった。5 号機にしても、この日までの耐震評価ではそうした一覧表を示していた。しかし、この日の最強モデルではさらに「主な」重要施設として、それらのうちのたった 8 例ですませたのだった。

この「影響確認用地震動」では、水平動は 2.3 倍した結果、約 1454 ガルになったという。中部電力は過去に耐震補強を実施済みとしているが、それは 1000 ガルを想定して行ったものだ。それでほんとうに 1500 ガルまで耐えられるのか。一方、上下動に関してはわずか 186 ガルで、水平動に対して余りにも小さい。だがそれまでと違って、委員からはほとんど発言もなくパスしてしまった。構造 WG も後日開催されあっさり了承した。耐震バックチェックと異なり、原子力安全委員会にはまったく諮られなかった。

5 号機は、その運転再開にあたって、地元静岡県から、想定東海地震に耐えられると国が保証することを、地震後の運転再開条件とされていた。とすれば保安院は耐震評価結果まで確認しなければならぬはずだが、基準地震動が決まらないのに、どうやって地震応答解析をするのかと思っていたが、こういう詭弁を使っただけである。筆者はすぐに地元の静岡県や立地・隣接 4 市へ赴き、担当に説明した。それぞれに理解は示したものの、

年が明けて開催された 4 市合同の浜岡原発安全等対策協議会では、保安院の説明を受け、ほとんど質疑を求めることもなく再起動を了承したのであった。これだけ無理を通したものの、5 号機は 3 か月ほど発電したのち、3.11 原発震災を経験した政府の要請を受けて中部電力自ら運転を停止した。

その後、規制担当は原子力規制委員会に替わり、中部電力は新基準適合性審査のための申請を、浜岡原発 4 号機のみについて、2014 年 2 月に提出した。1 年後の現在、まだ審査中である。新たな基準地震動 S_s は、同じサイト内で 1200 ガル領域と 2000 ガル領域の 2 本立てとし、5 号機は後者の対象としているが、新規規制基準への申請はまだである。

5. 地震・地震学と原発の設計用地震動評価

5-1 あらゆる地震タイプの事例で想定超

原子力発電所の設計用地震動評価について、兵庫県南部地震から東北地方太平洋沖地震に至る地震との関係を振り返ってみた。なんと、2003 年三陸南のスラブ内地震に始まって、プレート境界地震、内陸地殻内地震、活断層がないとされていた伏在断層による地震等々、地震の種類のすべてにおいて、設計用基準地震動 $S1 \cdot S2$ が超えられた事例が揃っているではないか。最大加速度値は超えていなくても、応答スペクトルの一部でのみ超えるというケースもある。原発サイトには 100 台 200 台といった数の強震計が設置され、地下深部から建物の各階、屋上にいたるまで様々なデータが把握されている。すると、いずれかのフロアの記録が設計で想定された応答を超えると、この事例をキャッチすることもあるだろう。これほどの観測網は他に例がないと思われる。電力各社はそれらデータを公開することで地震学に寄与することができる。他の観測所と同様に、地震発生後ただちにデータ提供することを早急に実現してもらいたい。

原発で設計用地震動を超えた場合には、いずれの場合も被害調査の次にまず健全性評価・点検に目が行く。しかし地震学にとっては、どんな地震によってどのように超えられたのか、あるいはたとえ超えなかったとしても、地震の種類、規模や距離等を踏まえたときに妥当な記録といえるのかどうかを考察することは、一般的な強震動評価手法を検証するうえでも有効だろう。ところがデータは私企業のものであり、その分析は電力会社に委ねられてきた。そのため、地震被害調査における当たり前のこともなされていない。福島原発にあっては、原子炉施設の被害調査と同様で、高線量下のため現場にアクセスすらできていない。それどころか、事故対応のために現状保存すらされず、どんどん人の手が入ってしまった。柏崎刈羽原発や浜岡原発で判明した異常増幅の要因は、

ほんとうに地盤だけの問題なのだろうか。駿河湾地震では、浜岡原発の設計用基準地震動を超えてはいないが、想定東海地震の震源域で起きた地震である。せめてこの 2 サイトの異常増幅は、学究的なフェアな立場で調査できないものか。過去の事例を振り返って、第三者によるそうした中立的な検証がなされていればと切に思う。

原発は余りにも巨大な利害と直結している。恣意的な調査や事業者都合の良いまとめを排除することは容易ではない。敷地内活断層の認定についても、福島原発震災後の新規規制体制の中で熾烈なせめぎ合いを見せている。新規規制についてはここでは触れなかったが、電力各社は、厳しめの活断層評価を受け入れた場合、その後の地震動評価手法の中で調整し辻褄合わせをしているのではないかと、という疑いを筆者は消せないでいる。既設炉の基準適合性審査にあっては、工事認可申請の段階で、例えば機器・配管等設備の地震応答解析において、減衰常数をはじめあらゆるテクニックを駆使して、評価基準値内に納めようとする工夫が凝らされ耐震余裕を切り詰めてはいないか。ここはまたその道の専門家に検証を委ねたい。

5-2 まとめ

■原発が全機停止しているほんとうの理由

この 3 月末、首都圏から原発の電気が消えて 4 年目に入る。全国的にも 1 年半が経過する。この全基停止はいわば「免許停止」を受けたものだが、原発側の過失ではなく規制側の瑕疵による。未曾有の惨禍を経て、政府が従来の原子力規制における次の 3 点の瑕疵—①大規模な自然災害への対策が不十分、②過酷事故対策を規制の対象にしていない、③いったん設置許可した既設の原発等には、最新の基準への適合を求めない、を特に問題視し、「新規規制基準は、これらの問題点を解消（規制委員会 HP）」するものとして原子炉等規制法を改正（12 年 6 月）し、新たに原子力規制委員会を設置した（12 年 9 月）のである。上記③については、法に基づく技術上の基準に適合するよう維持することを電力会社に課した。新增設時だけでなく、いったん許可された原発もつねに最新の技術基準に適合していないと違法な状態とされることとなったのだ（バックフィット）。とりわけ今回は①、②に係る新たな基準を満たさない限り今後の稼働（発電・売電）はできないため、現在はすべての原発が「免許停止状態」なのであり、許認可の再取得が求められている。

ところがこの審査内容が問題である。先頭に行く九州電力川内原発 1・2 号機は、設置変更申請に関する基準適合性審査が 9 月にパスしたことで、あたかも再稼働の許可が下りたように社会は受け止めている。だが耐震基準を例にとると、規制委員会の審査は基準地震動 S_s の認定までで、

耐震性は未確認なのだ。地震応答解析の評価結果は次の段階の工事計画認可申請書で提示され審査されることになっている（原子力市民委員会，2014）。さらに施工後の検査等々，まだまだ多くの審査をクリアしなければ，免許の復活はない。いわば受験票が受理されたか書類審査を通過しただけの状態，筆記試験は現在実施中，実技・実地試験はこれからだというのに，合格扱いしているのである。

では，川内原発やそれに続く関西電力高浜原発等の審査において，基準地震動 S_s の認定までは妥当といえるだろうか。現実の地震により基準地震動が超えられた例をいくつも見てきたが，そこで炙り出された課題はまだ正式に取りあげられず，解決したとは言えない。規制委員会では，福島原発事故の誘因を津波と断定して，その地震動の評価手法にはほとんどメスを入れないまま審査にあたっている。

■地震学会としての発言を

原発の建設と稼働に，その後の安全確保に，地震学の成果と地震学者が深く関わってきた。その結果，取り返しのつかないところまで来てしまった。もはや決断のときではないだろうか。川内原発の巨大噴火を巡る審査に関して，火山学会から発出された「巨大噴火の予測と監視に関する提言」（火山学会，2014）を横目に，地震学会にも大いなる期待を込めて社会への発信を求める。

謝辞 本稿に収録した図のうち，図2は藤田祐幸氏，図10，12は河本和朗氏にかつて作成依頼したもので，今回掲載に快諾いただいた。また兵庫県南部地震直後に，市民に地震学の手ほどきをしてくださった生越忠氏始め良心的な研究者諸氏に心より感謝申し上げる。

参考文献

東井 怜，2012，「浜岡 ストップ！原発震災」，新泉社。
秋葉議員質問主意書への答弁書，1995，衆議院議員秋葉忠利君提出原子力発電所の地震・地盤に関する質問に対する答弁書，平成8年2月13日 内閣総理大臣 橋本龍太郎。
http://www.shugiin.go.jp/internet/itdb_shitsumona.nsf/html/shitsumon/134024.htm
中部電力，2007a，浜岡原子力発電所3,4号機「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の改訂に伴う耐震安全性評価結果の報告について，耐震・構造設計小委員会(第12回)配付資料12-3,4 2007.4.4 p20。
<http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g70612a13j.pdf>
中部電力，2007b，浜岡原子力発電所3,4号機「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の改訂に伴う耐震安全性評価に関わる報告－基

準地震動 S_s の策定について－，耐震・構造設計小委員会，地震・津波WG（第1回）配付資料，地震W1-4，2007.4.23。

<http://www.meti.go.jp/committee/materials/g70531cj.html>

中部電力，2009，駿河湾の地震に対する浜岡原子力発電所における地震観測データの分析について，原子力安全・保安院第34回合同WG資料，合同W34-2，2009.8.27。

<http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/shingikai/107/3/034/34-2.pdf>

中部電力，2010a，駿河湾の地震を踏まえた地震動増幅特性の検討状況について，原子力安全・保安院第46回合同WG資料，合同W46-1 2010.3.31。

<http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/shingikai/107/3/046/f0000002-46.html>

中部電力，2010b，駿河湾の地震を踏まえた浜岡原子力発電所5号機の耐震安全性への影響確認（これまでの報告内容のまとめ），原子力安全・保安院第56回合同WG資料，合同W56-3（合同W55-5改），2010.11.16，p48。

<http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/shingikai/107/3/056/221116.html>

中央防災会議，2001，東海地震に関する専門調査会報告。

<http://www.bousai.go.jp/jishin/tokai/senmon/pdf/siryu2-2.pdf>

福島美光，1994，地震波の発生・伝播の理論を背景とした入力地震動の経験的予測，東京工業大学博士論文。

福島美光・田中貞二，1992，新しいデータベースを用いた最大加速度の距離減衰式の改訂，日本地震学会秋季大会講演予稿集，p116。

福島原発告訴団上申書，2014，12月9日提出(福島原発告訴団ブログ12.12)。

<https://drive.google.com/file/d/0B6V4ZwGwBEaxVzJScGZJUllqUGc/view?usp=sharing>

原子力安全委員会，1995a，「平成7年兵庫県南部地震を踏まえた原子力施設耐震安全検討会結果について」及び「図表(1),(2)」第44回原子力安全委員会臨時会議 資料(1)。

<http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/anzen/shidai/genan1995/genan044/genan-si044.htm>

原子力安全委員会，1995b，「指針策定前の原子力発電所の耐震安全性について」及び「図表(1)(2)(3)」，第44回原子力安全委員会臨時会議資料(2)，資源エネルギー庁。

<http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/anzen/shidai/genan1995/genan044/genan-si044.htm>

原子力安全委員会，2008，平成19年(2007年)新潟県中越沖地震の評価，2008.1.11，規制委員会HP，地震調査研究推進本部からの報告等。

<http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/taishinko>

- jo/houkoku_j.htm
 原子力安全・保安院, 2008, 新潟県中越沖地震により柏崎刈羽原子力発電所において大きな揺れが生じた要因とそこから得られる知見について, 平成 20 年 5 月.
- 原子力安全・保安院, 2010, 駿河湾の地震において 5 号機の観測記録が他号機に比して大きかったことの要因分析等に係る審議状況の整理について (案), 原子力安全・保安院 第 56 回合同 WG 資料, 合同 W56-4, 2010.11.16.
<http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/shingikai/107/3/056/56-4.pdf>
- 原子力市民委員会, 2014, 川内原発審査書案に対する総合的意見, 2014 年 8 月 4 日.
http://www.ccnejapan.com/20140804_CCNE_01.pdf
- 浜岡原発運転差止訴訟最終準備書面, 2007, 2007.3.19, 原告側準備書面 (28) p 16, p 25.
http://www.geocities.jp/ear_tn/hamadoc/Gsyomen28-070319.pdf
- 北陸電力, 2007, 能登半島地震を踏まえた志賀原子力発電所の耐震安全性確認について (報告) 原子力安全・保安院第 2 回構造 WG 資料 構造 W2-2(1), 2007.5.24, p8, p36.
<http://www.meti.go.jp/committee/materials/g70612cj.html>
- 今村議員質問主意書への答弁書, 1995, 衆議院議員今村修君提出「平成七年兵庫県南部地震を踏まえた原子力施設耐震安全検討会」の報告書に関する質問に対する答弁書, 平成 7 年 12 月 22 日 内閣総理大臣 村山富市.
http://www.shugiin.go.jp/internet/itdb_shitsumona.nsf/html/shitsumon/134011.htm
- 入倉孝次郎, 1995, 兵庫県南部地震の強震動と被害の関係, 土質工学会・阪神・淡路大震災報告会講演概要集.
- 石橋克彦, 2014, 地震列島・日本の原子力発電所と地震科学, 日本地震学会モノグラフ (本号)
- 石橋克彦, 1997, 原発震災--破滅を避けるために, 科学, 67, 720-724.
- 地震調査研究推進本部, 2005, J-SHIS, 地震ハザードステーション, 期間: 30 年, 条件: 最大ケース, 地図タイプ: 3%の確率で一定の揺れに見舞われる領域図, 表示内容: 工学的基盤の最大速度, 基準日: 2005 年 1 月 1 日.
<http://www.wold.j-shis.bosai.go.jp/>
- Kanai, K., and T. Suzuki, 1958, Expectancy of the maximum velocity amplitude of earthquake motions at bed rock, Bull. Earthq. Res. Instit., 46, 663-666.
- 加藤研一・宮腰勝義・武村雅之・井上大榮・上田圭一・壇一男, 2004, 震源を事前に特定できない内陸地殻内地震による地震動レベル—地質学的調査による地震の分類と強震観測記録に基づく上限レベルの検討, 日本地震工学会論文集, 4, no.4, 46-86.
- 火山学会, 2014, 巨大噴火の予測と監視に関する提言, 2014.11.2.
<http://www.kazan.or.jp/doc/kazan2014/images/teigen.pdf>
- 大崎順彦, 1984, 原子力発電所設計用の基準地震動に関するガイドライン - 主として大崎スペクトルについて -, ORI 研究報告 84-01, (株) 大崎総合研究所
- 衆議院予備的調査, 2002, 東海地震の強震動予測に基づく主要施設の耐震安全性に関する予備的調査 (細野豪志君外 44 名提出, 平成 14 年衆予調第 3 号) についての報告書 (平成 14 年 7 月 25 日災害対策特別委員会命令) 平成 14 年 10 月衆議院調査局; 下記より『平成 14 年版「国会の動き」における「予備的調査」』参照.
<http://homepage3.nifty.com/s1mashi/study-memo/yobiteki.html>
- 添田孝史, 2014, 「原発と大津波 警告を葬った人々」, 岩波新書.
- 東北電力, 2005a, 女川原子力発電所における宮城県沖の地震時に取得されたデータの分析・評価および耐震安全性評価について (報告), 原子力安全・保安院 第 1 回耐震・構造設計小委員会資料 1-5, 2005.11.29, 図 1, 図 10.
<http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g60113b07j.pdf>
- 東北電力, 2005b, 基準地震動の応答スペクトルを超えることとなった要因分析・評価結果について, 原子力安全・保安院第 1 回耐震・構造設計小委資料 1-5 別紙-3, 2005.11.29, p3-88.
<http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g60113b10j.pdf>
- 東京電力, 2008a, 柏崎刈羽原子力発電所における平成 19 年新潟県中越沖地震時に取得された地震観測データの分析及び基準地震動について, 原子力安全・保安院第 9 回合同WG 資料, 合同 W9-1-2, 2008.5.22.
<http://www.meti.go.jp/committee/materials/g80522aj.html>
- 東京電力, 2008b, 「柏崎刈羽原子力発電所における平成 19 年新潟県中越沖地震時に取得された地震観測データの分析及び基準地震動に係る報告書(概要)」5 月 22 日プレスリリース別添資料.
http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu08_j/images/080522a.pdf
- 柳田邦男, 2012a, 圧殺された「警告」, 「原発事故 失敗の本質」文藝春秋 2012.5 月号.
- 柳田邦男, 2012b, 保安院「消せない罪」, 文藝春秋 2012.6 月号.

天然原子炉と福島原発事故 地球化学者黒田和夫の遺したもの

小嶋 稔

(本稿は岩波書店『図書』2013年7月号初出論文の転載である)

福島原発事故は放射能物質の流出で環境へ甚大な災害をもたらした。さらに私を含む同位体地球化学を専攻する者の多くは、福島第一原発1号炉のメルトダウンした核燃料が再臨界を起こし大規模な核分裂連鎖反応を起こすのでは、との危惧を払拭し切れない。もしそのような事態となれば日本の半分が壊滅するとの菅元首相の警告が現実のものになってしまう。加えて、こうした危惧を裏付けるように去年7月に経済産業省で行われた「福島第一原子力発電所事故に関する技術ワークショップ」は、たいへんショッキングであった。原子力研究開発機構の研究者等は、3月11日の原発事故の直後にウランの核分裂連鎖反応の再臨界の可能性を議論している。綿密な計算結果から連鎖反応の可能性が高かったにも拘らず、何故か大規模なウランの核分裂連鎖反応が起きなかった。しかしこの幸運は、海水の注入により、予想もしなかった中性子吸収効果と言う全くの偶然に助けられた結果だったと結論している。さらに、この驚く様な事実に関する一般への報道が筆者の知る限り皆無に近い、というのも又驚きである。

過去2年、放射能汚染の議論・報道が毎日のマスコミを賑わしている反面、更に深刻な再臨界の議論が専門家の間ですら皆無に近い。しかし、1972年9月フランス原子力庁が発表したガボン共和国(西アフリカ)での「オクロ天然原子炉」発見は、再臨界は原子炉に限らず自然界でも起きる事を証明した。福島第一原子力発電所の1号炉のメルトダウンしたウラン核燃料が現在どのような状態なのかよく分かっていない。しかし、メルトダウンの現状は、極めて厳密なコントロール下で正常運転中の原子炉より「オクロ天然原子炉」の“火元”になったオクロ・ウラン鉱床の状態に近い可能性も否定出来ない。

東電原発事故の対応は、現状では殆ど汚染除去等の対症療法に限られているのは事態の緊急性からやむを得ない面もあるが、より長期的な視点からの再臨界の議論は、その結果の重要性から看過されてはならない。「オクロ天然原子炉」は、こうした問題の解明に貴重な手掛かりを与えてくれる。ここでは今後の日本と日本人の最大の課題となった福島原発事故の処理問題に「オクロ天然原子炉」の持つ極めて重要な科学的意義を述べたい。また「天然原子炉」と言う画期的なアイデ

アを世界で始めて提案した地球・宇宙化学者故黒田和夫教授 - 生涯の3分の2以上を帰化した合衆国で過ごし日本には比較的馴染みの薄かった - の素顔の一面も紹介したい。まず現今のウラン核燃料原子力発電の歴史をごく簡単に眺めよう。

ナチの脅威から逃れイタリアからアメリカ合衆国に亡命したエンリコ・フェルミ(ノーベル物理学賞受賞者)を中心にシカゴ大学の研究者等は、キャンパスの隅にある運動場の地下の実験室で始めて原子炉の実験に成功した。第2次世界大戦最中の1942年のことである。実験計画は極秘のベールに包まれ詳細が発表されたのは戦後暫くたったの事である。この原子炉の出力はわずか1ワット、豆電球を点す程度の実験炉であった。サッカー場の片隅には「1942年12月2日、人類はここに始めてウランの連鎖反応から原子エネルギーをとりだすことに成功した」、と書いた小さな掲示板が建っている。当時として人智を尽くして創り上げた精巧の極みとも言えるべき原子炉は嘗て自然界にも存在しなかったと、あたかも人智は天知を超えたと言わんばかりの高らかなファンファーレにも聴こえる。実験に際し、フェルミ等は当然ながら核分裂連鎖反応が周りの自然界に“飛火”しないか、と言う懸念を綿密に検討し、その結果を踏まえ実験に踏み切った。然し、この“自然を超えた人智”という思い込みが間違いだった事がシカゴ大学の実験原子炉成功の30年後に実証された。その理論的予測は当時アーカンソー大学に赴任して間もない黒田和夫が1956年に発表した画期的な論文であるが、“天然原子炉”の発見というフランス原子力庁の1972年の公式発表迄ほぼ完全に無視された。

フェルミ等の創った原子炉が如何に人々を驚嘆させたかは、当時の合衆国・国防委員会(National Defense Research Committee)の長官が、“イタリアの航海者が新世界に上陸した”と賞賛した事からも伺える。余談ながら此の賞賛のメッセージは、原子炉の建設が極秘研究として遂行されたため暗号文で贈られたと言う事である。此の様に、フェルミの業績は同じくイタリア出身のコロンブスのアメリカ大陸発見にも例えられ、更には、ガリレオ以来イタリアが生んだ最高の物理学者とも称されたフェルミの名声とも重なって原子炉の完全性に対する世間の懸念を和らげるのに貢献した事は容易に推察される。

一方の黒田和夫は 1917 年に福岡県に生まれ、東京帝国大学理学部化学科を卒業、1944 年には異例の若さで同教室の助教授に就任したが、1949 年助教授を休職し新婚の妻を残しアメリカに渡った。冷戦下のアメリカは日本やドイツなど旧敵国の優れた科学者に永住権を与え招いていた。サンフランシスコに着いた黒田は、移民局の役人に提示した“occupied Japan”のスタンプの押された旅券をくずかごに捨ててしまえ“と言われ仰天したと書いている。

アメリカに渡った黒田は渡米 3 年後にアーカンソー大学に準教授の職を得、化学を専攻するオランダ系アメリカ人と再婚以降 1987 年に名誉教授として退職する迄同大学で地球・宇宙化学の研究と学生の指導に当たった。黒田の死後ルイズ夫人は、黒田の遺品の中にあった戦時中の日本の原爆開発計画に関する文書を日本に返還し、文書は現在理化学研究所の資料室に丁寧に保管されている。黒田自身は、当時の日本の原爆計画には直接関わってはいないが、偶然の巡り逢わせで、理化学研究所で進行中だった原子爆弾開発計画に巻き込まれた。終戦前日の 8 月 14 日、理研で原爆計画に関わっていた旧知の研究者が東大の黒田の研究室を訪れ、廃棄処分を命じられていた原爆計画に関する文書を持参し秘匿を頼んだ。明くる 15 日は無条件降伏受諾の日であり、原爆計画と黒田の直接の関わりはわずか 10 日であっけなく終わった。黒田自身の記録（17 億年前の原子炉―講談社ブルーバックス B720, 1988）や後年黒田と筆者との会話の記憶を基にこの間の経緯を簡単に辿ってみよう。

広島に原爆が投下された 8 月 6 日、黒田は理学部長の水島三郎教授に呼び出された。講座主任の木村健二郎教授（当時黒田は教授の女婿）がたまたま不在のため助教授の黒田が替わりに呼ばれたもので、政府から広島に落とされた新型爆弾が原子爆弾かどうか、との問い合わせがあった、と言うのである。黒田は即座に、間違いなく原子爆弾です、と答えた。こうして黒田は木村教授のかわりに（当時木村教授は理研で進行中の原爆開発計画の化学部門の総括者でもあった）海軍省に赴いた。そこで黒田は海軍省の高官に原子爆弾に関する総ての文献資料を早急に纏めて作成する様要求される。さらにその高官は今後の原爆製造にも責任を任せたいとの口ぶりだった。日本の原爆計画は、開戦前後から陸軍の管轄下で理研を中心に進められて来たが、戦争が末期的状態になり、此れ迄傍観していた海軍も敗色濃厚な戦争の推移に居た堪らず俄に原爆開発に飛び付いたのだろう。

国家存亡の危機的状況下での要請である。海軍省を出た黒田は、その足で焼け残っていた神田の学士会館に行き、部屋を強要する。会館側は黒田

の高揚感に圧倒されたのであろうか、最上の部屋を提供した。黒田はここから東大に通い原爆関係の文献をしらべ始めた。しかし黒田の「原爆プロジェクト―海軍省版」は敗戦であっけなく消滅したが、敗戦前日の 14 日に旧知の研究者が密かに持ち込んだ書類は、後年日本の原爆研究の歴史を辿る唯一の公式文書として貴重な存在となった。露見すれば厳しい処罰も予想される危険を冒して思い切った行動をとった研究者が誰だったのか分からない。さらに黒田がどのようにしてアメリカに持ち込んだのかも、不明である。

筆者が初めて黒田に会ったのは、1978 年箱根で開催された希ガス地球化学に関する日米科学シンポジュームの折であった。黒田は彼の講演の最初のスライドに日の丸を示し、これは日本の旗に非ず、自身の生涯の研究テーマの太陽であるとわざわざ断り講演を始めたのが印象深い。あとで本人から聞いた話では、此のスライドは彼のアメリカの大学の学期最初の講義に必ず学生に見せるものだ、と言う。10 年程後、第 2 回目のシンポジュームがアメリカ側の主催でイエローストーン国立公園で開かれた。此の折に黒田は、“一回目の箱根では日本は旗色が悪かったが、このイエローストーンの会では、日本の完全勝利に終わった”と述べ、日本の研究者には面映い思いを、又アメリカの研究者にはまたか、の苦笑いを誘った。こうした黒田の些か子供っぽい対抗意識は、生涯を通し黒田の言動に見られる。

戦時中、黒田の研究は自然界とりわけ温泉水等に含まれるラジウム含有量の調査であった。アメリカに渡った黒田は、1951 年ニューヨークで開かれたアメリカ化学会（American Chemical Society）の創立 75 周年記念特別年会の「地球化学シンポジューム」の招待講演者として始めて国際会議の檯舞台に立った。此のシンポジュームで黒田の温泉水のラジウム含有量に関する研究発表を聞いたアーカンソー州立大学化学科のエドワード教授は、大変興味を示し、黒田を同大学へ招いた。アメリカの南部アーカンサス州は、首都は後年人種差別撤廃運動の発端となったリットルロックで、極めて保守的な土地柄である。エドワード教授は、州の国立公園内にある温泉の熱源は地下にあるラジウムなのではと言う考えの持ち主で、此れを証明しようと黒田の研究に目をつけた。結果は無論否定的であった。現在では恐らく地球化学者の殆どは此の様な仮説は一笑に付すであろうが、筆者は、現在でもこうした話が意外な尾を引いている事をアメリカの南部での学会で実感する機会に出会っている。

アーカンサス州の隣のテネシー州にはアメリカ最大規模のオークリッジ国立原子力研究所が有る。筆者は 2010 年にテネシー州で開催された地球・宇宙化学では最も権威のあるとされるゴー

ルドシュミット国際会議で地元選出の合衆国上院議員が国の原子力政策に関する招待講演を行い、あらゆるエネルギーに比べ原子力が桁違いに有利だとする熱のこもった主張を聞いた。上院議員は、サッカー場一面程度の敷地があれば、アメリカ一の放射性廃棄物の処理なら充分かなえる、との主張を聞き、鼻白んだ記憶が生々しい。現在でも大規模な温泉の熱源が原子核エネルギーだとする極論を必ずしも否定しない原子力エネルギー擁護派の一部科学者の見解は、身近くの大規模な温泉群(テネシー州の国立公園にはアメリカでも最大規模の温泉がある)に永年なじんできたテネシー州の住民に取り、原子炉の安全性の間接的な保証にもなり、アメリカでもとりわけ保守的でしかも大規模な原子力研究所を持つ南部諸州には強い政治的アピールを持つのであろう。

黒田は、温泉水のラジウム含有量の研究の傍ら、1947 年になってようやく発表されたフェルミ等の原子炉理論に強く興味をひかれ、独自の研究を始めた。フェルミ等が核分裂連鎖反応が外部に“飛火”するのを恐れ、詳しい研究を行った事は既に述べた。此の一環として、フェルミ等はかつてキュリー夫人がラジウムを抽出したチェコのヨアヒムス・ウラン鉱床をはじめ、多くのウラン鉱床で核分裂連鎖反応の痕跡が有るか否かの詳しい調査を行った。然しこの詳細な研究結果からはその痕跡は見出せなかった。ところが黒田は此の結論には重大な見落としが有るのに気が付き、ウラン核分裂連鎖反応は自然界でも起こり得ると主張した。此の主張がシカゴ大学のフェルミらの研究グループ等の強い反発を受け、無視され続けるが、20 年後事態は意外な発展を見せる。

1972 年フランス原子力庁はかつてフランスの植民地だった赤道直下西アフリカにあるガボン共和国のオクロ鉱山から産出されたウラン鉱石が極めて異常な同位体組成を持ち、その同位体組成は現在の原子炉で使用済のウラン燃料の燃えカスと酷似していると発表した。更に原子力庁は、その同位体異常は 20 年程前に黒田が予言した天然原子炉仮説でほぼ完全に説明出来る、と結論した。これを報じたフランスの「ル・モンド」はフェルミ等の原子炉は自然の故知を真似たにすぎないと、フェルミらの偉業はさておき、黒田の画期的なアイデアを認めなかったシカゴ学派への皮肉とも取れる論評を載せている。フランスの科学者による天然原子炉の発見を賞賛することで、アメリカに押され気味の当時のフランス科学界が一矢を報いた、との思いも透けて見える。ともあれ黒田の画期的な予言はこうしてようやく陽の目を見る事になった。

1972 年オクロ天然原子炉の発見以来、天然原子炉の地球化学的研究は原子炉から出る放射性物廃棄物処理のモデルとして重要視されてきた。

こうした研究の結果オクロ天然原子炉は、今から約 20 億年前にウランが臨界に達し、約 15 万年間に渡り原子の火が、間欠的に燃え続けた。その間の総出力は現在の 100 万キロ・ワット級の原子力発電炉 5 基を 1 年間フル稼働した時の発生する熱エネルギーに相当する、と結論された。さらにオクロ天然原子炉は約 15 万年間連続的に核反応を起こしていたのではなく、可成り間欠的だったと推定されている。

現在の福島第一原発の 1 号炉はメルトダウンを起こし、原子炉から漏れ出した約 35 トンのウラン燃料は、これも一緒に熔融した周りの物質と混じり合い極めて複雑な化学組成の物質(デブリ)を創り原子炉格納容器下部に溜まっていると思われるが、詳しい状況は極度に高い放射線のため直接測定は不可能で実態は分からない。シカゴ大学の研究者等が天然原子炉の可能性を無視したのは、現在の鉱床ウランに含まれる水の量に基づいて計算を行い(ウラン核分裂連鎖反応を起こすには水の存在が不可欠である)、核分裂連鎖反応の“延焼”を推定した結果であった。他方、自然界でウランが鉱床として形成される際には、ウランは先ず岩石中から徐々に水に溶けしみ出し、こうして集まってきた水の中で沈殿堆積しウラン鉱を形成した、と言う点に黒田は注目した。つまり豊富な水の存在はウラン鉱床形成に不可欠の条件であった。さらにウランの鉱床の中には形成年代が古いものがあり、この二つの条件が重なるとウラン核分裂連鎖反応がより起り易い状態になる。

ウラン鉱床の古さが問題になる理由は、ウランは共に放射崩壊する二つの同位体ウラン-235 とウラン-238 からなり、年代が遡る程それぞれの量が増える。一方でウラン核燃料として用いられるウラン-235 の放射崩壊半減期はウラン-238 の 7 分の一と短い(約 7 億年)ため、古くなる程ウラン-235 の相対的な割合が高くなる。したがって 20 億年前に遡ると、その割合は現在の約 3.7 倍(現在のウラン-235 とウラン-238 の割合は約 0.7%)となり、現今原子力発電に用いられている濃縮ウラン燃料(2~5%)にほぼ近い値となる。したがって、福島第一原発 1 号炉のメルトダウン・デブリウランが置かれている環境は、水の存在とウラン-235 の濃縮という核分裂連鎖反応を起こす二つの重要な要因を満たす事になり「オクロ天然原子炉」の環境により近づくことになる。

黒田の提案した「オクロ天然原子炉」は、福島原発事故の今後の処理に科学的に大きな教訓を与えてくれる。福島第一原発の 1 号炉のメルトダウン・デブリスが不幸にしても一つの「天然原子炉」にならない事を願い、黒田の遺訓を活かしこの深刻な問題に一刻も早い対応を訴えたい。

(おじま みのる・地球惑星科学)

放射性廃棄物地層処分技術ワーキンググループ設立をめぐって —— 日本地震学会からの回答と考え方

日本地震学会会長 加藤照之

(本稿は岩波書店『科学』2014年2月号初出論文に加筆修正を行ったものである)

高レベル放射性廃棄物の処理に関しては、1999年に国内での地層処分が「技術的に可能である」との報告、いわゆる「第2次取りまとめ」^{*1}が核燃料サイクル開発機構より提出され、2000年に設立された実施主体である原子力発電環境整備機構（NUMO）によって検討が進められたものの、その後一向に進展していない^{*2}。問題を所管する経済産業省資源エネルギー庁は、その理由として地層処分の安全性等について国民の理解が得られていないと考え、「国民理解の醸成に向けた取組の強化」の一環として地層処分の安全性等の検討・評価を行うための「地層処分技術ワーキンググループ（WG）」を総合資源エネルギー調査会原子力小委員会のもとに設置することになった^{*3}。このWGの委員選出に関して、公益社団法人日本地震学会（以下、地震学会）は他の関連学会と共に、資源エネルギー庁より「中立性・公平性を確保するため」として委員の推薦依頼を受けた【参考資料1】（末尾に掲載）。地震学会では理事や代議員から意見を聴取して回答をとりまとめることとした。その結果、地震学会からは日本学術会議による提言に依拠して、WGが第三者機関であることを明示するなど2項目の要望を付記して条件付きで推薦することとした【参考資料2】。これに対して資源エネルギー庁は、学会からの推薦を受けることなく、会員に対して個別に打診をして委員を選出した。本稿では、この依頼に対する地震学会の対応とその考え方について述べたい。私は、今、地震学会の会長を務めているため本稿を起草したが、その内容は、地震学会の総意

にもとづくものではなく、経緯のとりまとめと、それに付随した個人的な意見であることをまずお断りしておく。

推薦依頼に至る経緯

高レベル放射性廃棄物の地層処分のこれまでの経緯に関する詳細は他にゆずるが^{*4}、日本での地層処分が一向に進まないことから、内閣府に設置され原子力に関しての基本方針を策定している原子力委員会は、日本学術会議に対して取り組みの進め方等についての審議依頼を2010年に行った。これに対して日本学術会議は2012年9月に回答をしている^{*5}。この回答において日本学術会議は、これまで地層処分が進まなかった理由として「原子力発電をめぐる大局的政策についての合意形成に十分に取り組まないまま高レベル放射性廃棄物の最終処分地の選定という個別的課題について合意形成を求めるのは、手続き的に逆転している」との判断に立脚し、(1)高レベル放射性廃棄物の処分に関する政策の抜本的見直し、(2)科学・技術的能力の限界の認識と科学的自律性の確保、などの提言を行った。特に(2)に関しては「安全性と危険性に関する自然科学的、工学的な再検討にあたっては、自律性のある科学者集団（認識共同体）による、専門的で独立性を備え、疑問や批判の提出に対して開かれた討論の場を確保する必要がある」としている。この回答を受けて原子力委員会では、技術や処分場選択の検討過程について「担当大臣は（中略）学界、国民の声を踏まえつつ監査し、国や当事者に適宜に適切な助言を行う独立の第三者組織を、きちんと

*1—核燃料サイクル開発機構：「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ」（1999年11月），http://www.jaea.go.jp/04/tisou/houkokusyo/dai2jitorimatome_so.html

*2—たとえば、NUMOが行った文献調査への公募に対して、2007年に高知県東洋町が応募したが、住民の反対により応募を取り下げるといった事案があった。

*3—放射性廃棄物WG 第一回会合配布資料2「国民理解の醸成に向けた取組の強化」（事務局提出資料），http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/denkijigyuu/houshasei_haikibutsu/pdf/25_03_02_00.pdf

*4—たとえば、安俊弘：「高レベル放射性廃棄物地層処分：概念発達史と今日の課題」，科学，83（10），1152（2013）

*5—日本学術会議：「回答—高レベル放射性廃棄物の処分について」（2012年9月11日），<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-22-k159-1.pdf>

なお、日本学術会議「学術の動向」2013年6月号にはこの問題を広く議論するために実施された学術フォーラム「高レベル放射性廃棄物の処分を巡って」（2012年12月2日）にもとづく特集が組まれている。

機能させる強い決意を持って自ら整備すべきである」などの見解を2012年12月に表明した^{*6}。

一方、経済産業省は、2013年7月5日に総合資源エネルギー調査会原子力小委員会放射性廃棄物WGの第一回会合を開催し、その場で事務局より今回の「地層処分技術WG」が提案された。その際の説明資料^{*3}によれば、今回のWGの設置の目的は、放射性廃棄物の処分に関する「国民理解の醸成に向けた取組の強化」のための方策の一つとして「地層処分の安全性・技術的信頼性に対する理解に向けた取組」のため、地層処分の安全性・技術的信頼性について、あらためて現時点の評価、課題を明らかにすることであるとしている。実質的には、NUMOによって行われようとしている、放射性廃棄物の地層処分に関する2000年以降の科学的知見の収集とそれにもとづく「第2次取りまとめ」の再評価の検証が目的であるとのことである。この時の説明等について議事録なども参照したが、配布資料には上記の日本学術会議の回答やそれにもとづく原子力委員会の見解などの記載があるものの、口頭説明では触れられていないようである。事務局としては前述の経緯は承知の上で、本課題に関しては資源エネルギー庁が主導すべき案件として、新たに設立されるWGは同じ原子力小委員会の下部組織として設立されることとなったようである。

推薦依頼に対する地震学会の対応

今回の依頼に関して、地震学会では、まず理事会のメーリングリストおよび2013年8月5日の理事会を通じて意見交換を行った。そこでは、委員を推薦することについて、“この依頼文では地震学会の推薦委員がWGで何をやるのかよくわからない”、“科学的議論を行うなら引き続いて日本学術会議がやるべきではないか”、“廃棄物処理を進めようとする国の政策に学会が一方的に加担させられる懸念がある”、などの否定的な意見が出された。一方、“委員推薦を行わない場合、「地層処分技術WG」での議論に地震学の知見が反映されないのは問題ではないか”、との意見もあり、さらに広く意見を聞く必要があることが認識された。そこで、地震学会の代議員メーリングリストを利用して代議員の意見を聞くこととし、その後、回答を検討することとした。

代議員メーリングリスト上では8月7日から8月22日にかけて理事会からの要請によって意見の募集・意見交換が行われた。ここにおいてもまた、賛成・反対の立場から多くの意見が述べら

れた。それらをすべて述べることは不可能であるので、ここではそれらの概要を示す。

まず、学術会議の回答に関連して“WGが、学術会議の回答や原子力委員会の見解に示された独立の第三者的な立場をとっているようには受け取れない”、“日本学術会議などに働きかけてWGのあり方について議論してもらうべきである”などの意見が目立った。一方で、“委員を推薦したうえで、「安全神話」形成に資する議論は拒否し、学術会議の回答の順守をWGで主張すべき”という意見もあった。

また、WGの目的について、“WGが、原子力行政を推進しようとする側に加担して新たな「安全神話」を形成しようとするもので、そのような決定に加担することになりかねない”、とする懸念が多く寄せられた。“委員の責任範囲について明文化された規定があるべきで、科学的な議論についての責任と、その議論をうけた施策に関する行政的責任とは明確に分離されているべきである”、との指摘もあった。

最後の指摘については、地震予知研究のあり方について議論してきた地震学会として、重視したい点である^{*7}。科学者の意見や判断はさまざまな仮定や仮説にもとづく不確実性を伴ったものになるはずである。とりわけ、不確実な災害発生予測のもとで避難すべきかどうかを判断する場合などのように、科学的に不確実な将来予測にもとづいて二値的判断を下すことになった場合、その判断は行政的にあるいは国民合意のもとに行われるべきで、結果としての責任は科学者だけが負うべきものではないとの考え方である。科学が行政に恣意的に利用されたり、本来行政主体が負うべき判断の責任が科学者だけに転嫁されることのないように、科学・技術の議論は行政的な判断とは独立して行わなければならないと考えている。

また、この問題に関して地震学がどこまで貢献できるかということについても議論があった。

“数百年程度までのことであれば地震研究者が意見を述べることは可能であり、推薦することに賛成”、との賛成意見がある一方で、“少数の委員が地震学会を代表して派遣されても地震学会内の多数意見だけでなく諸説をレビューできるか懸念があり、役割に限界がある”などの意見もあった。これらの意見をふまえ、地震学会ではまず、学会内の議論で重視された下記の2件の懸念事項：

^{*6}—原子力委員会：「今後の高レベル放射性廃棄物の地層処分に係る取組について（見解）」（2012年12月18日），
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/kettei/121218.pdf>

^{*7}—たとえば2009年にイタリアのラクイラで発生した地震災害に関して、政府委員会に参加した地震研究者ら7名が訴追され、全員に禁固刑が下された。この判決に対して、地震学会をはじめ国内外の多くの地球科学関連学会から、憂慮や懸念を示す声明が発表された。

・WG が自律性・独立性を保った第三者組織となっているかを明確にすること

・WG に参加する専門家委員の役割と責任分担を明確にし、規則として作成すること

の 2 点を明示しつつ回答を行うこととした。これらの懸念については資源エネルギー庁担当者と 9 月 30 日に意見交換を行い、それらをふまえて、10 月 1 日の理事会において回答を審議した。その結果、これら 2 件の懸念事項はいずれも解消されていないと判断した。これらの 2 条件は、いずれも地震学会が自律的な科学者集団として活動するうえで非常に重要な事項であると理事会は結論づけ、そのことを回答に明確に記載することとした。一方で、これらの懸念があるものの、WG に地震学の専門家が不在になるのはよくないと考えられることや、社会的に大きな問題に立ち向かう地震学会としてのあり方なども判断材料として考慮すべきであると考えてに至り、これらのことを総合的に勘案して、私は理事会に対して、

・地震学会からは委員を推薦する。

・ただし 2 件の懸念事項が解消できるまで、推薦を保留する。

という趣旨の回答文案を提示し、文案の字句修正を行ったうえで了承された。回答は 10 月 3 日付けで資源エネルギー庁宛に送付した【参考資料 2】。この回答に対して、資源エネルギー庁は、何の説明もないまま、個別に一会員に委員就任を依頼してきた。この会員は地震の専門家が WG にいないよりは、個人としてでも参加して地震学の知見を述べるべきであると判断して依頼を受諾し、個人として WG に参加することとなった。

地震学会は学会からの回答が無視されたことに対して遺憾の意を表明すると共に、回答に対してどのように対応をしたのかの説明を求めたが【参考資料 3】、事前の意見交換の際の主張にもとづく非公式の回答があっただけで、公式の回答は得られていない。なお、この推薦依頼を受けた他の学会の対応についてであるが、WG 第二回会合の資料によると、日本火山学会、日本第四紀学会、日本応用地質学会、土木学会、日本地下水学会、日本地質学会の 6 学会は推薦であり、日本活断層学会は推薦ではなく紹介となっている。日本活断層学会では、学会代表ではなくあくまで個人としての参加であることを明確にするため、学会内から候補者推薦を募った上で資源エネルギー庁に対して複数の候補者を紹介し、人選は資源エネルギー庁に委ねる形をとったとのことである。また、地震学会と同様に上に挙げた 2 点について要望を行ったとのことであり、地震学会と似た対応をとったといえよう。

本来、このような課題に対しては、学術の推進を目的とする学会として足並みを揃えて対処す

ることが望まれるが、今回の問題において図らずも地震学会の対応は他の学会と異なる形をとることとなった。

参考までに、この WG の委員長は同庁原子力小委員会の放射性廃棄物 WG の委員を務められている朽山修氏であり、同 WG から 4 名の委員が本 WG にも委員として参加している。地震学会会員で個別に参加している委員は「放射性廃棄物 WG 委員推薦」の形がとられている。

科学的・技術的検討のあるべき姿

放射性廃棄物はすでに相当の量が蓄積されつつあり、今後、原子力行政がどの方向を向くかにかかわらずその処分をどうするのかは避けて通れない課題である。処分の方法には地層処分だけでなく「海溝処分」「海底下処分」「宇宙処分」などさまざまな方式があるが^{*8}、自国内処分が国際的な合意となっており、現在のところ地層処分が唯一の現実的な処分方法と考えられている。仮に地層処分を行うとしても、地震の多発する日本においては、単に数万年～数十万年という長い時間スケールでの地層の安定性にとどまらず、直近の地震による天然バリアや人工バリアの耐震性などの検討が重要である。また 2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震という M9 の超巨大地震を経験した現在では、このような低頻度超巨大地震の発生予測やその影響なども重要な検討課題として挙がってくるだろう。したがって、地震学会としても放射性廃棄物の地層処分という問題に背を向けるわけにはいかないと認識している。であるからこそ、この問題の科学的・技術的な側面の検討結果については国民から信頼されるものでなければならない。

今回の WG の設置は日本学術会議からの回答やそれにもとづく原子力委員会の見解に沿ったものとは言えないように思われるが、その一方で、日本学術会議の協力団体であるわれわれ学術団体に「中立性・公平性」を保つためとして委員の推薦を依頼してきた。これに対して、WG の第三者性に関する懸念を地震学会が表明したところ、彼ら自身が設定した「中立性・公平性のために学会推薦を行う」というルールによらずに、別の方法によって委員を選考した。この理由については、事前の意見交換の際の聞き取りにおいて資源エネルギー庁の担当者が、“今回の WG の設置は資源エネルギー庁として実施するものであるため、資源エネルギー庁が事務局として関わらない第三者組織というものでは認められない”としていたことから、地震学会の要望は受け入れられない、と判断した結果と受け止めている。

各学会から参加している委員の選出過程がど

*8—たとえば、吉田英一：地層処分 —— 脱原発後に残される科学課題、近未来社（2012）

うであれ、WG においては真摯な科学的・技術的な議論が行われることを期待したいが、せっかくのそのような科学的な議論によって出された結論や提言が、WG の位置づけのために国民から信頼されないのであれば残念というほかはない。放射性廃棄物 WG の委員でもあるジャーナリスト・環境カウンセラーの崎田裕子氏は、処分場の選定に関する地域住民への理解が進まないことについて「地層処分への信頼が醸成されていないこと」「立地選定過程への信頼がないこと」「発信される情報への信頼がないこと」の 3 つの問題を指摘している^{*9}。そして、これを解決するための方策として地域対話の仕組みを補強するために第三者機関を創設する必要性を指摘している。「独立性・自律性」を備えた第三者機関とは、たとえば日本学術会議があげられよう。回答を行った日本学術会議は自らこのような組織をつくることを考えてよいように思われる。あるいは、原子力利用を推進する組織とは独立して意思決定を行う組織として昨年創設された原子力規制委員会のような組織を立ち上げ、そこに議論を付託することなどが考えられるだろう^{*10}。

そもそも、日本学術会議からの回答にあるように、問題の本質は日本の原子力発電に関する政策が廃棄物処分に関することも含めて国民的な合意が形成されないままに進められてきたという「手続き的に逆転」した状態にあるので、日本学術会議からの回答^{*5}を尊重し、原子力政策について廃棄物の処理を含む全体のグランドデザインを再構築してそれを国民に問うことから始めなければならないはずである。このために WG が単なる「第 2 次取りまとめ」の再確認に終わることなく、地層処分が科学的に可能かどうかを含めた抜本的な問題点の洗い直しを行うことを望みたい。

一方、これから洗い出されるであろう幾多の問

*9—崎田裕子：「高レベル放射性廃棄物 処分地選定へ地域対話」，読売新聞「論点」，2013 年9 月19 日付

*10—最近、政府（内閣官房）の「原子力委員会の在り方見直しのための有識者会議」は報告をとりまとめ、その中で、原子力委員会はその組織を抜本的に見直して、原子力利用の推進を担うのではなく、委員会の中立性を確保しつつ、放射性廃棄物の処理・処分をはじめ原子力の平和利用と核不拡散および原子力利用に関する重要事項に関する諸課題の管理、運営の観点から活動すべきとの考え方をとりまとめた。この新組織の立ち上げを急ぎ、今回立ち上げられたWG の議論を新原子力委員会の枠組みの中で行うことを検討してみてもどうか。

原子力委員会の在り方見直しのための有識者会議：「原子力委員会の在り方の見直しについて」（2013 年12 月10 日）22 ページ，http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/genshiryoku_kaiji/pdf/houkoku.pdf

題点を科学的に議論する場としての学会の立場も重要である。しかしながら、地震学的な立場からの検討が地震学会内においてこれまで十分に行われてきたとはいえない。地震学会ができることは限られているが、講演会でのセッションや、シンポジウムを通じてさまざまな側面から詳細かつ定量的な議論がなされる必要がある。また、日本学術会議などを通じ、関連する他学会と連携して議論することも必要になるだろう。地震が多発する日本列島において数万年～数十万年という長期にわたって安定する処分場が選定できるのか、という国民からの疑問に対して、地震学の立場からも十分に信頼を得られる答えを示すことが求められている。

今回の地震学会の対応が適切だったのかどうかについては意見が分かれるところがあるだろう。自然の原理を探究する理学の立場を中心にする学会が、社会の要請にどう応えていけばいいのかは、これからも大きな課題であろう。今回、地震学会がどのように内部での議論を重ねたのかを記しておくことで、難しい課題に取り組む方々の参考になれば幸いである。

【参考資料 1】

2013 資人第407号
平成25 年8月1日

総合資源エネルギー調査会臨時委員の推薦について（依頼）

公益社団法人 日本地震学会
会長 加藤 照之 殿

資源エネルギー庁長官 上田 隆之（印）

時下、ますますご清祥のこととお慶び申し上げます。

さて、高レベル放射性廃棄物の最終処分は、エネルギー政策上の重要課題であり、地下300m以深に処分する地層処分に向けて取組み進めておりますが、2000年に処分制度が創設されて以降、現在も処分地選定の調査に着手できておらず、かつ東日本大震災の発生により地層処分への技術的信頼性について懸念が高まっている状況です。

我が国における地層処分については、1976年以降、核燃料サイクル開発機構（現：日本原子力研究開発機構）を中心に当時の最新の技術・知見に基づく検討がすすめられ、1999年に「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次とりまとめ」（以下、第2次とりまとめ）としてその成果が取り纏められました。また、原子力委員会によりこれを踏まえた検討がなされ、2000年に、

我が国でも地層処分が可能であるとの評価がなされました。

しかし、前述の東日本大震災の発生をうけ、日本学術会議及び原子力委員会より、地層処分の安全性・技術的信頼性について最新の科学的知見を踏まえた定期的な確認・評価を行っていくことや、専門家による審議の必要性の提言がなされております。そのため、最新の科学的知見を反映した現時点の評価や今後の研究開発課題を早急に示すことが必要との認識にたち、資源エネルギー庁総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会の下に「地層処分技術WG」（仮称）を設置し、検討を進めることといたしました。

具体的には、第2次とりまとめ以降の最新の科学的知見の収集・整理、それを踏まえた地層処分の技術的信頼性に関する評価について、本WGにて、その網羅性や評価の妥当性を検討していく予定です。

本検討にあたっては、中立性・公平性を確保する観点から、地層処分に関連する学会より推薦して頂いた委員を中心として検討して参りたいと考えています。つきましては、地層処分に関連の深い貴学会に臨時委員の推薦方御承諾いただけますようお願い申し上げます。なお、御承諾いただけます場合には、お手数ながら、推薦状を本年8月30日迄に、当庁放射性廃棄物等対策室宛にお送りくださるようお願い申し上げます。

（お問い合わせ先）

〒100-8931 東京都千代田区霞が関1丁目3番地1号
経済産業省資源エネルギー庁電力・ガス事業部
原子力立地・核燃料サイクル産業課
放射性廃棄物等対策室 担当：常盤、阿部

【参考資料2】

25 公社日地会第62 号
平成25 年10 月3 日

資源エネルギー庁長官
上田 隆之 殿

公益社団法人日本地震学会 会長 加藤照之（印）

前略

2013 資人第407 号（平成25 年8 月1 日付）でご依頼のありました総合資源エネルギー調査会に対する臨時委員の推薦につきまして、下記のようにご回答申し上げます。よろしくお取り計らいください。

草々

回答：日本地震学会からの推薦を一時保留する。

理由及び付帯意見：

- ・「地層処分」に関する科学的検討は極めて重要であり、地震学的見地から意見を述べることは重要であると考えている。
- ・したがって、日本地震学会からは、依頼のWGへの推薦を行う。
- ・しかしながら、一方、そこで議論される内容がどのような課題であれ、学会からの委員推薦に当たっては、推薦を依頼されている委員会やWG 等について自律的な科学者集団である学会としての評価基準に基づいて行われるべきである。
- ・第一の評価基準としては、当該委員会・WG 等が、所掌する議論や検討課題に関連する利害関係者から独立しており、また自律的な運営が保障されていることが必要である。
- ・とりわけ「地層処分」に関する件については、原子力委員会からの諮問に対して日本学術会議から、「自律性のある科学者集団（認識共同体）による、専門的で独立性を備え、疑問や批判の提出に対して開かれた討論の場を確保する必要がある」と回答されていることをふまえ、原子力委員会は「実施主体の取組をレビューし、適宜に実施主体並びに政府に対して取組の改善を行う使命をきちんと果たせる第三者組織を整備すること」とする見解を提出している。今回の依頼にあるWG はこのような第三者組織であるべきと考えられるが、そのことが明確でないように思われる。
- ・第二の評価基準としては、「当該委員会・WG 等に参加する委員の役割、責任範囲が明確になっていて、科学的・技術的結論と行政的判断・結論が明確に分離されている」必要がある。
- ・科学的・技術的な検討結果に基づいて行政的判断が下される場合、純粋に科学的根拠に基づく不確実性や技術の限界等を踏まえた結果の表明を行うのが科学者の責務であり、それに基づく行政的判断とは明確に区別されねばならない。行政的判断に対する責任を科学者が負うことは科学者としての責務の限界を越えている。
- ・今回の依頼について、本学会から「前記に記した委員の役割や責任範囲が明確に記された規則等があるかどうか」の問い合わせを行ったが、「そのような規則はない」という回答であった。このことは参加する委員会・WG の委員の責任について疑義を生じさせるものであり、学会としては強い危惧を覚えるものである。
- ・以上の検討結果として、日本地震学会は、資源エネルギー庁に対し、今回のWG への委員の推薦依頼に対する前提条件として、（1）WG が「地層処分」の実施主体や政府に対して取組の改善を行う使命をきちんと果たせる第三者組織となっているかを明確にすること、（2）WG に参加する委員の役割と責任分担を明確にし、行政的判断の責任を負わないことを明確にした規則等の文書を上位の組織において作成、承認すること、の2 点を要望したい。
- ・前記の2 条件が満たされたとき日本地震学会理事会が認めた時点において、本学会より委員を推薦することとする。
- ・なお、前記の2 条件が満たされたうえでWG が開始さ

れることが望ましいと考えられるので、それまでWGの設置を延期することを要請したい。

以上

地震学会からの推薦ができる環境を整えていただきたくお願い申し上げます。

ご回答をお待ちいたしております。

草々

公益社団法人日本地震学会 会長 加藤照之（印）

【参考資料3】

25 公社日地会第63 号

平成25 年11 月8 日

資源エネルギー庁長官

上田 隆之 殿

前略

過日、平成25年8月1日付でご依頼いただいた「地層処分技術WG」に対する回答をさせていただきましたが、その後、本学会の田所敬一会員より、委員就任依頼があり受けることにした、との連絡を受けました。また、第一回の会合が開催されたことをメディアを通じて知りました。私どもからは「学会から推薦するものの、2つの懸念があるので一時推薦を保留する」と回答いたしました。これに対して、貴庁は学会への説明もないままに別途個別に委員への就任依頼をされました。まずはこのことについて事実関係を明確にさせていただきたいと思います。また、この理解が正しいとするならば、地震学会からの回答を無視されたことに対する遺憾の意を表明いたします。

私どもの回答に付した下記の条件について、対応できないと判断されたものと推測されますが、これらに対してどのようにお考えになられたのかについてご説明いただきたいと思います。

（1）WGが「地層処分」の実施主体や政府に対して取組の改善を行う使命をきちんと果たせる第三者組織となっているかを明確にすること。

（2）WGに参加する委員の役割と責任分担を明確にし、行政的判断の責任を負わないことを明確にした規則等の文書を上位の組織において作成、承認すること。

（こちらに関しては、公開されたネット上の動画では、会議の冒頭に委員長から関連する発言がありましたが、本来委員を委嘱する際に周知すべき重要な項目ですので、規則等の文書として事前に準備すべきであり、ご対応は不十分と思います）

なお、公開されました委員会配布資料のうち、委員名簿において、通常は見られないような各学会からの推薦、紹介、会員等の記載が見られました。これは先の依頼文書にあります「中立性・公平性を確保する観点から、地層処分に関連する学会より推薦された委員を中心として…」と書かれていることに対応しているものと思われますが、他の学会推薦の方々との区別が明確でなく誤解を招く表現です。実際、メディア報道では誤って推薦として報道されていたところがありました。このような誤解を避けるよう表現を改めていただきたいと思います。

放射性廃棄物の地層処分は極めて重要な国家的課題であり、地震学会としても解決のために学術の立場からの貢献を惜しまない所存です。そのためにも、私どもの付した条件を真摯に受け止めて対応いただき、

付記）学会と貴庁の間で交換された、平成25年8月1日付のご依頼の文書にはじまるWGへの委員推薦に関する一連の文書については透明性を確保する観点からすべて公開させていただきますのでご承知おきください。

原発の基準地震動と超過確率

浜田信生

(本稿は日本地震学会ニュースレターVo.25, No. 3「会員の声」投稿文の転載である)

地震学の知見や研究成果は、防災や教育など社会の様々なところで利用されている。学会の目的の一つに「地震学の進歩・普及を図り、もってわが国の学術の発展に寄与する」とあることから学会の活動が社会に貢献しているとすれば、それは結構なことである。その活用は、学会員が直接関与している場合もあれば、まったく関係なく勝手に利用されている場合もあり、その全貌を把握することは一概には困難である。従ってその利用の仕方に適切でない場合や間違っていることがあっても、学会がそれを直ちに認識し更正を求めることは難しい。また注意義務も責任も学会にはない。しかし、原発問題のように社会に重大な影響を与える問題で、地震学の知見や研究成果が正しく活用されているか疑問があるような場合には、地震という自然現象を学問の対象とした人の集団である学会が、どのような姿勢で臨むかは議論が必要であろう。学会及び学会員が関与していないから、或いは責任がないからといって、傍観していて良いかどうかは、地球科学者の社会的責任という観点からは検討の余地がある。その事例として原発の基準地震動とその超過確率に関する問題を取り上げる。

1. はじめに

2013年の地球惑星科学連合学会では、「地球科学者の社会的責任」というセッションで原子力発電所に関する問題が取り上げられた。その中で筆者は原発の基準地震動に関する質問をしたが、時間も限られた中で議論は不可能であったので、改めて基準地震動に関する疑問について触れてみたい。なお原子力関係の用語の定義については、理解不足もあり、正確さを欠く表現があるかもしれないことは、初めにお断りしておく。

2. 基準地震動と超過確率

基準地震動は、原子力発電所を建設する際の耐震設計の基準になる強震動のことで、設置場所で予想される揺れ(加速度)のことであり水平、上下動成分の応答スペクトルで表され、数値は特定の周期の加速度を示しているようである。2011年東北地方太平洋沖地震までの基準は、2006年に改訂された発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針(原子力安全委員会、2006)に基づいて、各電力会社が原発毎に定め、旧原子力安全・保安院が審査して承認するという手続きが踏まれ、原子力規制委員会でも審査の内容については見直しが行われているが、ほぼ形式は踏襲されている(原子力規制委員会、2013)。なお基準地震動は、解放基盤と呼ばれる原子炉建屋の基礎を置く地盤上において、建屋などがいない状態の揺れとして定められるもので、地表や建屋内で実際に観測される地震動とは観測条件が異なる。地表や建屋内で観測される地震動は、解放基盤上での地震動に換算され、基準と比較される、もしくは逆に、解放基盤での基準地震動を、それぞれの観測条件での地震動に変換して観測された地震動と比較が行われている。

基準地震動は予想される最大の揺れであると

しても、それを上回る揺れが絶対にはないことから、各電力会社が基準地震動を策定する際の資料には、基準地震動を上回る揺れが起きる超過確率(日本原子力学会、2007)も必ず記載されており、審査指針でもそれを参照することになっている。その超過確率を例えば(九州電力、2009)、(原子力安全基盤機構、2008)、(四国電力、2009)など見ると、年あたりの基準地震動を越える揺れが発生する確率はほとんどの場合、 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ /年、場所によっては $10^{-4} \sim 10^{-6}$ /年となっており、基準地震動を越える揺れは、1万年から10万年、場所によっては100万年に1回の非常に希な現象ということになる。以上から、いずれの原発でも基準地震動を上回る揺れが観測される頻度は、1万年に1回以下と推定されていることになる。問題は、実際にはこの基準地震動を上回る揺れが、最近しばしば観測されていることにある。

まず耐震設計基準が改定される前の2005年8月の宮城県沖地震(Mj7.2)では、女川原発で改定される前の基準地震動を越える揺れが観測され(原子力安全・保安院、2006)、基準地震動は375galから新しい設計基準を満たす580galに引き上げられた。志賀原発では2007年3月の能登半島地震(Mj6.9)で、新しい指針によって改訂された基準地震動600galは越えなかったが、改訂前の490galを越える地震動が観測された(北陸電力、2009)。さらに、2007年7月には新潟県中越沖地震(Mj6.8)により柏崎刈羽原発で、基準地震動の倍近い地震動が観測され、基準地震動は地震後大幅に引き上げられている(原子力安全・保安院、2009a)。そして、2011年3月の東北地方太平洋沖地震では、女川原発(東北電力、2011)と、福島第一原発(原子力安全・保安院、2012)で基準地震動をやや上回る地震動が観測さ

れた。新旧の基準の違いはあり、旧基準では超過確率は明確でないが、過去十年間に、基準地震動を上回る地震動が4つの地震で観測されたことになる。特に女川原発では基準の改定前、改訂後の二度にわたって基準を超える揺れに見舞われたことになる。全国に商業用原子力発電施設は17カ所、実験用施設を含めても20カ所あまりに過ぎない。それぞれの場所で1万年に1回以下の頻度でしか期待できないような希有の強震動が、10年間に4回も起きるとは一体どういうことだろうかというのは、筆者ばかりでなく事情を説明されるなら誰でも抱く素朴な疑問である。

3. 残余のリスクと確率論的安全評価（PSA：Probabilistic Safety Assessment）

2006年の耐震設計審査指針には、残余のリスクという用語が明記されている。そこには「地震学的見地から基準地震動を上回る地震動が生起する可能性は、否定できない」として、基準地震動を上回る地震動の影響により重大な事故が起きることのリスクに注意し、これらのリスクを「残余のリスク」と呼び、残余のリスクを最小にする努力を求めている。現実の基準地震動は、前述のように「生起する可能性は否定できない」レベルとは思えないが、それはともかくとして、技術の世界に絶対の安全は存在しないことを考えれば、残余のリスクの評価は原発の安全確保のためには欠かせない。残余のリスク評価と関連するのが、確率論的安全評価（PSA）である。

図1の模式図をご覧頂きたい。横軸は地震動の強さ、縦軸は地震動による原発のある部品の損傷確率を示している。真ん中の縦線は、基準地震動を表している。実際の工業製品は強度に必ずばら

つきがあり、曲線A（fragility curve と呼ばれる）で表されるような損傷確率を持ち、基準以下でも僅かではあるが、壊れる可能性がある。その一方で基準を越えたとしても直ちに壊れるとは限らず、強度に余裕を持っている。この余裕は業界用語では裕度と呼ばれ、一般の用語では安全係数に対応する。いっぽう曲線Bは、ハザード曲線と呼ばれ、横軸は同じであるが、縦軸は地震動の発生頻度を表したもので、地震動が大きくなるほど発生頻度は小さくなる。A、Bの曲線が交わる部分は、部品に損傷が起きる領域を示しており、この部分について原子炉の重大事故の発生に結びつく確率を評価しようとするのが、確率論的安全評価（PSA）である。A、Bの曲線が交わる部分の面積を出来るだけ小さくするように設計することで安全性の向上が図られるが、一方で原子炉建設のコストも上昇する。

話は少しそれるが図2を比較のため参照されたい。この場合は地震動の代わりに横軸は津波の高さ、縦軸は津波により事故が起きる確率を表したもので、福島第一原発を思い浮かべると、基準の津波の高さは5.5mとなる。図1との違いは曲線Aの立ち上がりの急なことで、基準を超える、つまり防潮堤を津波が越えたと、直ちに損傷が起きることを示している。地震動と津波の違いは、津波には裕度がまったく設けられていなかったことにある。工業製品では、重要度に応じて、すべての部品に安全係数をかけて作るのが常識であるが、福島第一原発の場合、地震動には安全係数がたっぷりかけられていたが、津波に対してはまったく考慮されなかったことになる。事故の原因を想定外の津波に帰する主張もあるが、福島第一原発の現状は、初めから安全設計の思想を満た

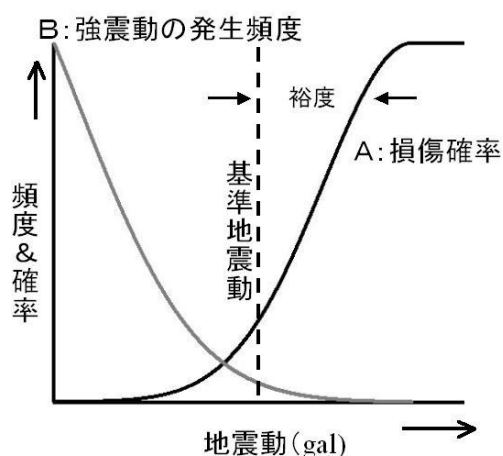


図1 地震動の頻度と損傷確率

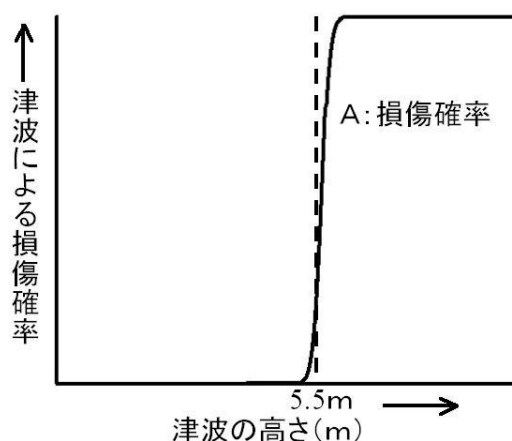


図2 津波による原発の損傷確率

していなかったことになる。ちなみに曲線Aの勾配をできるだけ緩やかになるように設計することが、安全設計のために重要と言われている。

4. 基準地震動についての疑問

原発の耐震設計では裕度を大きくとっているため、例えば現在の基準地震動を越える強震に見舞われたとしても、原子炉の重大な損傷はこれまでに起きていない。そのことは各電力会社が後から行う耐震に関するバックチェック、あるいは公的機関が行うクロスチェックと呼ばれる検証作業で示されている（原子力安全・保安院，2009b）。しかしながら、10年間で4回も基準を上回るという事態をどう評価すべきであろうか。基準地震動の策定方法か、基準地震動の超過確率の計算のいずれか、もしくは両方に誤りがあると考えるのが自然であろう。10年間で4回というのは、地質学的時間スケールの中では偶然起きうるかもしれないが、今回たまたまそうなったとは考え難い。

表1は現在の発電用原子炉の基準地震動の一覧である。我が国では1980年代終わりに気象庁が87型電磁式強震計の展開を始めたのを皮切りに、1995年の兵庫県南部地震の後には、K-NET、KiK-net、気象庁や自治体の計測震度計の観測網など、高密度のデジタル強震観測網が展開されて来た。1993年の釧路沖地震（Mj7.5）では釧路地方気象台で900galを、1995年の兵庫県南部地震（Mj7.3）では神戸海洋気象台で800galを越える強震動が観測されたのを皮切りに、続々と500galを越える強震動が観測されている。表

原子力発電所(電力会社)	基準地震動 Ss 単位(gal)
泊(北海道電力)	550
東通(東北電力)	450
女川(東北電力)	580
福島第一(東京電力)	600
福島第二(東京電力)	600
東海第二(日本原子力発電)	600
柏崎刈羽1～4号機(東京電力)	2300
柏崎刈羽5～7号機(東京電力)	1209
浜岡(中部電力)	800
志賀(北陸電力)	600
敦賀(日本原子力発電)	800
美浜(関西電力)	750
高浜(関西電力)	550
大飯(関西電力)	700
島根(中国電力)	600
伊方(四国電力)	570
玄海(九州電力)	540
川内(九州電力)	540

表1 各原発の基準地震動一覧

1の値とそれら観測された強震動を比較すると、解放基盤上と地表という観測条件の違いはあるにせよ、基準地震動の値が1万年に1回以下の頻度でしか観測されない希な値とは筆者には思えない。実際の超過確率はせいぜい1000年から100年に1回程度でしかないと思われる。超過確率の推定が10倍から100倍の誤差を持つとすると、ハザード曲線と確率論的安全評価に無視できない影響を与えるはずである。原子炉の炉心損傷事故の発生確率を、1万年に1回以下に抑えるという原発の総合的な安全基準への影響は、まぬがれないのではなからうか。

基準地震動の策定については、地震学会は何ら関与もしていないし責任もない。しかし策定には、地震学の知見が多々動員されている以上、基準地震動の策定に関わった方々には、学会員に対しては勿論のこと、一般社会に対しても上記の素朴な疑問についての説明責任があると考え次第である。原発関係の各種調査報告書には、学会員の論文が多々引用されているが、特に理学関係の論文は、引用されていることすらご存知ない学会員も多い。地震学以外の分野で論文がどのように利用されているか、適正に活用されているか、少しは関心を払うことが望ましいと思う。

参考資料

原子力安全委員会，2006，発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針

<<http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/shinsashishin/pdf/1/si004.pdf>>

原子力安全・保安院，2006，平成17年8月16日に発生した宮城県沖の地震を踏まえた女川原子力発電所の耐震安全性について

<<http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/koho/symposium/files/miyagi/p01.pdf>>

日本原子力学会，2007，原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準：2007

原子力安全基盤機構，2008，柏崎刈羽原子力発電所の基準地震動 Ss に関するクロスチェック解析報告 3. 基準地震動 Ss の超過確率評価
<<http://www.nsr.go.jp/archieve/nisa/singikai/107/3/021/21-2-2.pdf>>

北陸電力，2009，能登半島地震を踏まえた志賀原子力発電所の耐震安全性確認について（修正）
<<http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g70824b19j.pdf>>

四国電力，2009，伊方発電所「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の改訂に伴う耐震安全性評価結果（中間報告に対する原子力安全・保安院での審議状況の反映）II-6 基準地震動 Ss の策定

<<http://www.ensc.jp/pc/user/HOUDOU/h21/o211228/2/2-6.pdf>>

原子力安全・保安院, 2009a, 新潟県中越沖地震を受けた柏崎刈羽原子力発電所に係る原子力安全・保安院の対応 (中間報告)

<<http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g90309b03j.pdf>>

原子力安全・保安院, 2009b, 原子力発電所に関する耐震バックチェックについて

<<http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g90925a08j.pdf>>

東北電力, 2011, 女川原子力発電所における平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震時に取得された地震観測記録の分析および津波の調査結果に係わる報告書

<http://www.tohoku-epco.co.jp/ICSFiles/afielldfile/2011/04/07/110407_np_b.pdf>

原子力安全・保安院, 2012, 平成 23 年東北地方太平洋沖地震による福島第一及び福島第 2 原子力発電所の原子炉建屋等への影響・評価について～中間とりまとめ～

<<http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/backcheck/files/240913-4.pdf>>

原子力規制委員会, 2013, 基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド (案)

<http://www.nsr.go.jp/committee/yuushikisya/shin_taishinkijyun/data/0010_03.pdf>

日本惑星科学連合 JpGU Meeting 2013

ユニオンセッション U-06

「地球科学者の社会的責任」

プログラムおよび

第2部「原子力発電所に関わる科学アセスメントと地球科学的知見」

講演予稿集

日時：2013年5月24日 9:00～18:00

場所：幕張メッセ

ユニオンセッション U-06 地球科学者の社会的責任 コンビーナ：春山 成子，山岡 耕春，末次 大輔

開催趣旨（スコープ）：

東日本大震災後の被害想定，イタリアでの地震学者の裁判，原子力発電所敷地内の活断層調査など，地球科学は社会の意思決定と深く関わらざるを得ない．本セッションでは3部構成で，地球科学者の社会的責任に関する議論の場を提供する．招待講演を優先するが一般講演も歓迎する．

第1部 東日本大震災からのメッセージ 東日本大震災から2年がたち，災害復興にむけた活動が行われている．一方，イタリアでは地震学者に関わる裁判が起きている．このような現状を踏まえ，減災にむけた災害科学にかかわる既知の知見，技術を一般社会にも正しく伝達し，総合的な減災への道筋を考えなければならない時期に来ている．このサブセッションでは社会科学と理学，工学分野のコラボレーションを考えたい．

第2部 原子力発電所に関わる科学アセスメントと地球科学的知見 2011年東北地方太平洋沖地震は福島第一原子力発電所事故による甚大な放射能被害をもたらした．地震大国日本における原子力発電所の設置については，耐震安全性の観点から地震・地質研究者が関わってきた．またひとたび事故が起こればその被害想定・予測には気象学・海洋学・土壌学などの様々な地球科学関連分野の学術が必要となる．地球科学界として，日本における原子力発電所の在り方について地球科学的見地からの議論を行う場をオープンにかつ継続的に用意することは，地球科学と社会とのかかわりを考える上で必要な作業である．一方，科学的知見が様々な調査・審査の目的で使われているにもかかわらず，分野が少し離れれば，専門家でもそれがどのように使われているのかを知らないのが実情である．そこで本サブセッションでは，様々な調査・審査・予測に地球科学の知見がどのように使われてきたかについての知識を共有し，今後の地球科学と日本の原子力発電所の関係を考えるきっかけとしたい．

第3部 安全安心に関わる科学情報発信のあり方 2009年4月にイタリアのラクイラで発生した地震（Mw6.3）は，政府の委員会が「安全宣言」を出した直後に発生し，死者は300人にもなった．この安全宣言を聞いて安心して家の中で過ごし，家屋の倒壊によって亡くなった人々も多いとされている．実際には政府の委員会は被害地震発生の可能性を完全に否定したわけではなく，行政担当からメディアを通じて発信される段階で「安全宣言」となってしまったようである．本サブセッションは，このような安全安心にかかわる不確実性を持った地球科学の情報発信のありかたについて，広く議論の場を提供したい．

プログラム（★は招待講演，太字は本論文集掲載）

- 第1部 東日本大震災からのメッセージ（座長：春山成子，松本淳，氷見山幸夫，須貝 俊彦）**
- 09:00★ 自然大規模災害に対する地球科学者の社会的・知的貢献 三浦保範
 - 09:25★ 被災者と仮設住宅・岩手県宮古市での現状 岩船昌起
 - 09:50★ 東日本大震災の災害・復興状況から防災を考える 田中茂信
 - 10:15 低頻度大規模災害の定量的リスク評価・比較手法の一試案 小山真人
 - 10:30 **福島原発再臨界の危惧とその対策 地球科学からの提言** 小嶋稔・羽場麻希子
 - 11:00★ 津波堆積物調査・研究から津波災害地形誌へ 平川一臣
 - 11:25★ **活断層研究と地震被害軽減** 渡辺満久
 - 11:50★ **福島第一原子力発電所の事故で発生した放射性廃棄物の処理・処分に内在する課題** 佐藤努
 - 12:15★ 3.11 大津波が沿岸域の植生に与えた影響とその後の推移 原慶太郎
- 第2部 原子力発電所に関わる科学アセスメントと地球科学的知見（座長：末次大輔，川勝 均）**
- 14:15★ **地震列島・日本の原子力発電所と地震科学** 石橋克彦
 - 14:40★ 活断層と耐震安全性評価・活断層評価に係わった経験からのコメント 杉山雄一
 - 15:05★ 地球科学研究の原子力施設の耐震安全性へのかかわり 入倉孝次郎
 - 15:30★ **変動帯に立地する原子力関連施設の耐震安全性評価に関わる地質学的問題** 池田安隆
- 第3部 安全安心に関わる科学情報発信のあり方（座長：隈本邦彦，土井恵治，山岡耕春）**
- 16:15★ ラクイラ裁判では何が争われたのか 鈴木真美
 - 16:35 裁かれた科学者たち：ラクイラ地震裁判を読み解く 瀬瀬一起・大木聖子
 - 16:50 ラクイラ地震裁判に対して公表された声明と，3項目の異なる視点からの提案 山科健一郎
 - 17:05★ リスク評価が誤るリスクにどう備えるか：警告を可能にする社会的条件 平川秀幸
 - 17:30★ 火山噴火予知の不確実性を踏まえた情報発信 山里平
 - 17:45★ 地震活動解析に基づく地震発生確率予測の現状 前田憲二

U06-09

会場:国際会議室

時間:5月24日 14:15-14:40

地震列島・日本の原子力発電所と地震科学

Nuclear power plants in the seismic Japanese Islands and earthquake science

石橋 克彦^{1*}Katsuhiko Ishibashi^{1*}¹ なし¹ none

● 2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震(M 9.0)によって、東京電力福島第一原子力発電所が「原発震災」(石橋, 1997)を引き起こし、その深刻な被害はいつ収まるともされない。それを許してしまった責任は、私たち日本の地球科学界にもあるだろう。本講演では、地震科学を中心に、地震列島・日本の原子力発電所(以下、原発;核燃料施設も含む)に学界がどう関わってきたかを振り返り、今後どうすべきかを考える。

● 地球惑星科学(理学)としての地震科学は、その知見が安全性の基礎となっているものであっても、社会的な具体的課題(原子力発電所、大規模埋め立て施設、リニア新幹線など)にまで首を突っ込む必要はないという考え方が強いと思われる。しかし、災害科学としての側面を無視できないから、これらの施設(大きな震災要因でもある!)の地震・津波安全性についての国民的関心が高い場合には、問題の有無を検討し、学界内で原則的な問題意識を共有し(個別的には意見の相違がありうる)、必要があれば社会に説明するような活動をするべきだろう。原発の場合、「立地条件が安全確保の第一歩」だから、地震列島・日本の原発の安全性について地震科学が関心を寄せ、一般市民の疑問に答える責任があるのは当然だと考えられる。社会的問題は往々にして政治的色彩が強くなるので、中立を保つために関わらないほうがよいという感覚が強いかもしれないが、石橋(2000, 2012)が指摘したように、中立を守るとして沈黙をきめこむこと自体が一つの政治的效果をもたらすことに注意しなければならない(「原発と地震・津波」に関して地震学者が何も言わなければ、現状で安全だというに等しくなる)。

● 日本の商用発電炉の第1号は日本原子力発電の東海原発(59年設置許可、66年運転開始、98年運転終了)だが、無地震国イギリスの原子炉を導入したために耐震安全性が大きな問題となった。しかし、政官業学の挙国一致体制で建設する中に限られた地震学者が加わっただけで、地震学界の関心は薄かったようである(物理学者たちは熱心に議論した)。当時は日本列島の地震活動・強震動・津波に関する観測データと理論が著しく不十分だったから、地震科学の影が薄かった面もあるかもしれない。60年代後半から70年代にかけて確立・普及した震源断層模型論とプレートテクトニクスは、原発の耐震安全性向上のために積極的に普及されるべきだったと思われるが、地震科学界からの積極的な発信はなかったらしい。活断層に関しても同様だった。1995年阪神・淡路大震災と2007年新潟県中越沖地震による柏崎刈羽原発被災は、「原発と地震・活断層」問題の大きな節目だったが、地震科学界には特段の動きはなかった。

● 要するに、福島原発震災までの日本の地震科学は総体として、日本列島の地震・津波現象に関する最新知見を原子力の世界に伝達することにも、地震と原発に関する見取り図を社会に提供することにも、熱心ではなかった。さらに、一部の専門家が「原子力ムラ」に取り込まれ、活断層・想定地震・基準地震動・津波を過小評価して原発の安全性を低めている状況に、関心を払わなかった。これらは本来、原発の是非とは無関係に、科学の社会的責任として取り組むべきことであっただろう。福島原発震災を経た現在でも、原子力関係者・政財界人・マスメディア・評論家をはじめとする日本社会は、原発の安全性の根底をなす地震・津波・火山・気象・地滑り等の自然現象を軽視し、よく理解していないから、学界として普及活動をおこなう必要があると考えられる。さらに、それ以前の課題として、例えば「活断層」に関する認識が地形、地質、地震研究者相互で相異なっているというような大きな問題があるから、(原発に限ったことではないが)連合大会の場で(通常セッションとは別に)公開の討論会を開くなどの努力が必要だと思われる。

● なお、原発の利用と不可分な根本的課題として使用済み核燃料の処分がある。いまの日本では再処理を実施し、生じた高レベル放射性廃棄物を地層処分することになっている。しかし、変動帯・日本で地層処分が可能(10万年オーダーで安全)と科学的に言えるかどうかは、地震科学の根本問題にも係わって未解決だろう。2012年9月には、日本学術会議が原子力委員会に地層処分政策の抜本的見直しを提言した。そもそも日本列島で地層処分の安全性が保証できるのかどうかに関して、あらゆる関連学協会による常設研究会のようなものを本連合のなかに設置してもよいのではないだろうか(連合大会で2000年から地層処分のセッションが続けられているが、基本的に実施を前提にしている)。

キーワード: 原子力発電所, 日本列島, 安全性, 地球科学, 地震, 地層処分

Keywords: nuclear power plant, Japanese Islands, safety, Earth science, earthquake, geological disposal

U06-10

会場:国際会議室

時間:5月24日 14:40-15:05

活断層と耐震安全性評価 - 活断層評価に係わった経験からのコメント Active fault and seismic safety evaluation: comments from experience of active fault assessment for nuclear power plants

杉山 雄一^{1*}Yuichi Sugiyama^{1*}¹ 産総研活断層・地震研究センター¹ Active Fault and Earthquake Research Center, AIST

講演者が原子力発電所の活断層評価に係わった 2001 年から 2012 年の間では、1) 敷地近傍の断層が活断層か否かの判断、2) 活断層が運動する範囲の評価(最大規模の地震の評価)が、活断層研究者に求められた最も重要な課題であった。原子力発電所の敷地内や重要構造物直下の断層が活断層である可能性の検討は、耐震設計審査指針の改訂(2006 年 9 月)に伴うバックチェックや追加調査の報告書が提出された 2008 年 3 月以降、とりわけ 2012 年 4 月の敦賀発電所の現地調査以降、重要な論点になった。

敷地近傍の断層が活断層か否かの判断に関しては、現代の活断層学に基づき、誰が見ても活断層と判断できるような断層については、意見が割れることはなかったと思う。一方、地形、地質、地球物理の各データから常識的に推定される結論が矛盾する断層や、同じデータについて研究者によって異なる解釈・判断が示された断層もあった。このような“むずかしい断層”の中には、詳細な追加調査によって、その実像が明確になった例もある(例えば下北半島西岸の横浜断層)。このような経験から、“むずかしい断層”の評価に当たっては、可能な限り信頼性の高いデータの取得に努め、自身とは異なる意見も検討した上で判断を下すべきであると考えます。

活断層の運動については、この問題に対する事業者の後向き姿勢が印象に残っている。一般防災を主目的とする地震本部の活断層評価では、松田(1990)の“5km ルール”を採用し、活断層帯から発生する最大規模の地震の評価に努めてきたと思う。これに対して、電力事業者による原子力発電所の耐震安全性評価のための活断層評価では、審査指針の改訂以前、セグメントの長さをできるだけ短くし、単独破壊のみ、もしくは極めて少ない数のセグメントの運動のみを想定したものが多かった。残念ながら、このような活断層評価は指針改定後にも見受けられた。

2011 年東北地方太平洋沖地震は多くの震源域が運動した地震であったことから、安全審査の場においても敷地近傍・周辺活断層の運動が再検討された。その中で、運動範囲のサイト遠方への拡大による短周期地震動への寄与はあまり大きくなく、敷地近傍での不均質断層破壊と地震動の増幅の過小評価をなくすことの重要性を再認識させられた。最大規模の揺れについては、理論的な研究や観測を進めることと合わせて、歴史と地層中に残された過去の事例を更に掘り起こし、過小でなく且つ過大でもない評価を不断にさぐって行く必要があると感じる。

ある断層が活断層であるか否か、どのような性格・性状で、今、活動サイクルのどのあたりにいるのか(再活動の切迫性)などに関する“科学的な評価”は、真理であるとは限らない。むしろ、真理の周りをうろろうしており、時には大きくかけ離れていることもある。我々は常に真理に近づこうと努力しており、努力する義務を負っているが、それでもなお真理に到達しておらず、各自の経験やものの考え方に左右され、社会・文化・時代背景(地球科学的パラダイムを含む)に影響・制約されていることを自覚しなければならないと思う。また、自身の専門分野だけでなく、周辺他分野のデータを咀嚼し、公平・公正に吟味できる目を養う必要があると考える。特定のデータのみでは時に誤った結論に繋がる。

なお、原子力施設の安全性の評価は、上記のような“科学的な評価”に基づいて行う必要があることは論を待たないが、“科学的な評価”とは別の場でより広い視点から行うべきである。また、2006 年の耐震設計審査指針の改訂は、事業者が断層に関する判断の変更を公表する機会を与えた側面があったと考える。今後の耐震安全性の審査指針等の改定についても、単なる厳格化に留まらず、事業者のより高い安全性確保への動機付けとなり、より高度な活断層評価に必要な科学的知見の拡大と技術の開発・革新(例えば信頼性の高い OSL 年代測定法や断層破碎物質を用いた活動年代測定法の確立)を促進するものであることを期待する。

キーワード: 活断層, 原子力発電所, 運動, 耐震安全, 原子力安全, 審査指針

Keywords: active fault, nuclear power plant, multi-segment rupture, seismic safety, nuclear safety, regulatory guide

U06-11

会場:国際会議室

時間:5月24日 15:05-15:30

地球科学研究の原子力施設の耐震安全性へのかかわり

Contribution of Earth scientists and engineers to seismic safety of nuclear power plants in Japan

入倉 孝次郎^{1*}Kojiro Irikura^{1*}¹ 愛知工業大学¹ Aichi Institute of Technology

1. はじめに：原発の耐震設計審査指針は、1978年に当時の地震学、地震工学の知見を結集して原子力委員会により策定された。その後若干の修正が行われたが、2006年9月の改訂まで、この耐震指針に基づいて基準地震動を評価し、原子力発電所の耐震設計の安全審査が行われてきた。この1978年の耐震指針は、建設予定の原発の敷地周辺域における活断層調査が義務付け、活断層の長さに基づいて将来発生する地震規模の評価、震源距離、地盤特性等を考慮して、設計用の基準地震動を策定する、など、当時としては、国際的にも先駆的な規定がなされていた。しかしながら、2005年の宮城沖地震、2007年能登半島地震などが原子力発電所の近傍で発生し、観測された地震動が経験的關係式のレベルを上回るなど、基準地震動の評価の上で問題があることが明らかになってきた。もう1つの問題は、津波の評価やそれに対する原子力発電所の施設や機器の耐震安全性の評価は明記されていなかった。1995年兵庫県南部地震以後、基盤的調査観測の整備により、活断層と地震活動の関係や断層運動による地震動評価の研究が急速に進んだ。原子力安全委員会は、2001年に耐震設計審査指針分科会を設置し「耐震設計審査指針」の改訂の検討を行った。分科会は、考慮すべき活断層の認定方法、確率論的評価手法の是非、過去の安全審査のあり方などの問題点などをめぐって紛糾したが、5年にわたる議論の末、2006年9月により改訂指針をまとめた。

2. 耐震設計審査指針（2006年）改訂の主要点

基本方針として、「敷地周辺の地質・地質構造並びに地震活動性等の地震学及び地震工学的見地から施設の供用期間中に極めてまれではあるが発生する可能性があり、施設に大きな影響を与えるおそれがあると想定することが適切な地震動」を策定、これによる地震力に対して、耐震設計上重要な施設が「その安全機能が損なわれないように設計」されなければならない、施設は、「地震により発生する可能性のある環境への放射線による影響の観点からなされる耐震設計上の区分ごとに、適切と考えられる設計用地震力に十分耐えられるように設計」されなければならない、の3点が規定されている。解説において、地震学的見地からは、策定された地震動（基準地震動）を上回る強さの地震動が生起する可能性は否定できないとして、想定を超える地震力に対するリスク評価の必要性が定められている。したがって、施設の設計に当たっては、策定された地震動を上回る地震動が生起する可能性があること、それによるリスクを「残余のリスク」とし、「残余のリスク」を合理的に実行可能な限り小さくするための努力が払われるべきである、と規定されている。

3. 地震・津波に対する安全設計審査指針の見直し

東北地方太平洋沖地震による福島第一原子力発電所の事故を受けて、原子力安全委員会は見直し案を2012年3月にまとめた。今回の地震に伴う津波の発生ならびにそれによる原発事故から得られた知見・教訓を踏まえて、津波の評価やその安全性確保の認識を高め、その重要性を強調するため、原子力発電所の津波に対する安全設計に関わる事項を明確に規定することとした。津波に関しては、地震随伴現象としてではなく、独立な章とを設けることとした。基準津波の策定方針として、「プレート形状、すべり欠損分布、断層形状、地形・地質並びに火山の位置等から考えられる適切な規模の津波波源を考慮すること。この場合、国内のみならず世界で起きた大規模な津波事例を踏まえ、津波の発生機構やテクトニクス背景の類似性を考慮した上で検討を行うこと。

4. 原子力規制委員会の発足（2012年9月19日）

福島第一原発の事故の反省から、日本の原発の安全規制の見直しが行われ、2012年原子力規制委員会が発足した。地震学を専門とする島崎邦彦氏が原子力規制委員になったことで、原子力施設の地震や津波に対する安全性がより厳密に評価されることが期待される。原子力規制委員会の発足後、原発の新安全基準が検討され、耐震・耐津波についても骨子案がまとめられ、2013年2月7日-28日にパブコメが実施されている。

耐震・耐津波の骨子案は、旧原子力安全委員会の専門委員会が福島第一の事故を受けて審議された地震・津波に対する安全設計審査指針の見直し案を再検討し、安全評価の厳格化を意図したものになっている。基準津波の策定とそれに対応した防潮堤等津波防護施設の等の設置の要求、活断層の認定基準の明確化と副断層を含む活断層露頭に重要構造物の設置の禁止、より精密な基準地震動策定のための敷地近傍の三次元的地下構造の把握、などが規定されている。その他、既存原発の周辺の活断層の再評価が行われ、多くの地球科学研究者が原発の耐震安全性の強化に関わっている。

キーワード: 原子力発電所, 耐震設計審査指針, 基準地震動, 基準津波, 活断層

Japan Geoscience Union Meeting 2013

(May 19-24 2013 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2013. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



U06-11

会場:国際会議室

時間:5月24日 15:05-15:30

Keywords: nuclear power plant, regulatory guide, design basis ground motion, design basis tsunami, active fault

U06-12

会場:国際会議室

時間:5月24日 15:30-15:55

変動帯に立地する原子力関連施設の耐震安全性評価に関わる地質学的問題 Geological issues for evaluating the seismic durability of nuclear-energy facilities in tectonically active regions

池田 安隆^{1*}Yasutaka Ikeda^{1*}¹ 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻¹Dept. Earth Planet. Sci., Univ. Tokyo

旧・原子力安全委員会が行った原子力関連施設の耐震安全性バックチェックに専門委員会委員として関わった経験から判断すれば、耐震安全性審査の最大の問題は地震動のリスクに関する科学的知見と工学的・経済的・社会的要請とが完全に分離されず、審査の過程において過度な妥協やつじつま合わせが行われてしまうことにある。同様な問題は、多くの地震学者が参画した国策としての地震防災プロジェクトにおいても起こった。本報告では、こうした様々な要請を一旦忘れ、純粋に科学的見地から変動帯に立地する原子力関連施設に関わる地震災害のリスクを検討する。

地震ハザードの原因となる断層は(重要度の順に)次の4つに分類できる:(1)沈み込み帯の巨大逆断層,(2a)規模の大きい顕在活断層,(2b)規模の大きい伏在活断層,(3)小規模活断層(露頭スケール)。これらのうちで(1)沈み込み帯の巨大逆断層は最も注意を要する;これらは数十年から数百年に一度の高頻度で活動し、大振幅かつ継続時間の長い地震動を発生する(地震の規模は M_w 8~9)。巨大津波や斜面崩壊等の二次的ハザードの要因でもある。(2a)(2b)に分類される比較的規模の大きい活断層が起こす地震は M_w 7級であるが、問題とする核施設の近傍にあれば強振動の要因となる。この種の活断層は、数千から数万年に一度の頻度で活動する。過去の造山運動に伴って成長した長大かつ成熟した断層は、現在の応力場に非調和な形状であっても低い頻度で活動している場合がある(たとえば、2008年 M_w 7.9 Wenchuan地震の震源となった龍門山断層)。この種の断層が一旦破壊を始めると、止めどなく破壊が伝播して大規模な地震を発生する可能性がある。日本列島では、顕在活断層(2a)はほぼもれなくマッピングされているが、伏在活断層(2b)の存在は十分に分かっていない。(3)の小規模活断層は、多くの場合(2a)や(2b)に分類される主断層にともなう二次的な断層であり、活動頻度は極めて低く(数万年に1度以下)、ずれの量も小さい(数十cm/event以下)。この種の小断層が問題となるのは、それがずれることによって核関連施設に損傷が起こりうる場合のみである。

キーワード: 地質災害, 沈み込み帯, プレート境界断層, 伏在断層, 顕在断層, 地震再来間隔

Keywords: geologic hazard, subduction zone, plate-boundary fault, blind fault, emergent fault, earthquake recurrence interval