

# 耐震問題：レガシー・イシューは解決したか？

佐藤 暁

さとう さとし  
原子力情報コンサルタント

1987年4月23日午前5時13分、福島第一原子力発電所から南南東38kmの沖合、深さ47kmを震源とするマグニチュード6.5の地震が発生。福島第一の周辺が震度4で揺れるも富岡町の自宅で就寝中の私は目も覚まさず。しかし、普段通り出勤するとすぐ、1, 3, 5号機がスクラム停止したことを知らされました。ところがそれが、地震によるスクラムではなく中性子束「高」の信号によってだと言うのです。

中性子束とは、原子炉内でウラン燃料が核分裂をしたときに発生する中性子の飛び交う密度のことで、出力に比例します。したがって、これを計測することで原子炉の熱出力を監視することができます。この検出器は特殊で、当時の日本では製造技術がなく、GEがオハイオ州のメーカーに製造させ納めていました。直径5mm長さ25mmの小さな電極チェンバーにウラン(U)がコーティングしてあり、これに中性子が当たってプラスに荷電した核分裂生成物が飛び出し、マイナスの電極に引き寄せられて電気信号となります。運転中の原子炉では、こうして出力が常時監視されています。

ところがこの中性子検出器はGEにとって顧客からの苦情の最も多い製品のひとつでした。突然勝手に異常信号を出して原子炉を止めてしまうことがあり、担当の同僚はいつもビクビクして体調を壊していたものです。その故障原理の一つが、プラスに荷電した核分裂生成物がマイナスの電極面に引き寄せられてできるミクロの「山」。あるところまで成長した時点で山頂とプラス電極との間に放電(ミクロの落雷)が起こり、「出力急上昇」かのような誤信号を発信するのです。そこでGEは、定期的に人工雷をおこさせて「山」を破壊して下さいと、対策の実行を顧客に依頼していました。

地震による中性子束「高」と知らされた私たちが真っ先に想像したのは、例のミクロの山が崩れて起こった放電でした。しかし、東京電力から提供されたデータを見る限りそうとも理解できず、関係者は首を捻りました。別件で引き回されていた私は、この問題が結局どのように分析されて解決されたのかを知らずにいました。

(故)高木仁三郎氏が、この事象が発生した翌月(5月)号の「原子力資料情報室通信」で、地震によって、正の反応度印加が起こった可能性を指摘していたということを最近知りました。私たちが、自社が納入している検出器の品質に対するコンプレックスから真っ先に「誤信号」を疑ったのに対し、高木氏は、実際の異常な核反応という線から原因を考察したわけです。結局、正しかったのは高木氏でした。地震と異常な核反応を結び付ける何かが存在するかもしれないなどは、私の周りの人々は誰も考えませんでした。しかし、定常的に沸騰が起こっているBWR(沸騰水型原子炉)の中で燃料が揺すられると、たとえば、瞬間的にボイド(泡)が多く沸き立ち、その直後にボイド密度が低下することで、高木氏が指摘した正の反応度印加は確かに起こり得ます。

## 1 高木仁三郎氏の指摘(その1)

正の反応度(核反応が促進される要因)が、実際に地震によって印加されたとする氏の推測は正しく、やがて燃料集合体の設計変更に反映されます。

(地震によって1本1本の燃料棒がぐらつかないようにスプリングが固くされました。)

BWRでは、定格出力での運転中、運転サイクル末期に向けて徐々に、最終的にはほとんどの制御棒が完全に引き抜かれた状態になっており、主

に出力制御を担っているのが泡(ボイド)です。これは、出力が増加すると水中の泡の体積率が増加→中性子を減速させる効果が低下→核反応が不活化化→そして出力が低下、という自動的なフィードバックになっています。

そのため、たとえば原子炉からの出口蒸気の配管が急閉止するトラブルが発生すると、急激に原子炉圧力が上がって泡が潰れ、瞬間的に原子炉出力が上昇します。ただし、この場合に関しては、原子炉は圧力上昇によっても出力上昇によってもスクラム停止し、燃料破損が起これないよう保護されます。また、原子炉に突然、正の反応度が印加される事象としては、低温水が流入されるシナリオ、完全挿入されている制御棒が突然抜けてしまうシナリオが、すでに「設計事故」として評価されています。しかし、地震で燃料棒の周りの泡が振り払われて核反応が加速するという現象については、解析されたことも実験されたこともありませんでした。

どうせスクラム停止するのだから問題ないと思うかもしれませんが、念のため心配しなければならぬのは、スクラム停止という「急ブレーキ」よりも核反応の加速という「急アクセル」が上回ってしまう事態、つまり、核燃料も頑強な原子炉圧力容器をも、水蒸気爆発によって瞬時に破壊する核暴走です。これは、福島事故とはまったくスケールが違いますので、確率がどうこうではなく、絶対に起これないことを確認しておく必要があります。

米国電力研究所(EPRI)が、地震発生後の原子力発電所の対応指針(TR-6695)を1989年12月に発行し、NRCは、この内容を概ね認める方針で、1997年3月、規制指針(RG 1.166)を発行するのですが、その中にわざわざ「(地震発生後は)中性子束の変化がなかったか確認すること」との文言を追加するよう指示しています。どのようなルートでNRCが知るようになったのかはわかりませんが、少なくともこの頃までには米国も、地震が原子炉出力を急上昇させる引き金になることを理解していたということです。そして、そのような出来事

が、2011年8月23日、実際に起こりました。

米国東部バージニア州で、マグニチュード5.8の地震が発生しました。この地震で、震源地から18kmの地点にあるノース・アンナ原子力発電所1,2号機がスクラム停止しています。その第一の原因が、1,2号機とも「中性子束変化率高」という信号でした。同原子力発電所の原子炉には、出力が2.25秒間で5%を超えて上昇か下降をするこの信号が発信され、スクラム停止する保護機能が備えられています。地震計は設置されていましたが、所外電源喪失のため、警報は作動していません。

中性子束の記録を調べてみると、地震直後に出力が急減しすぐ急増しています。スクラム信号は急減の段階で発信されますが、制御棒の動作よりも早く出力上昇が起これています。幸い100%を超えてはいなかったようですが。

ここで疑問に思う方がいるかもしれません。この原子炉が、実は加圧水型(PWR)だからです。福島でのスクラムを説明するのに使った「泡の振り払い」はないはずですが、事業者も、「地震による炉内構造物の運動による相乗効果」と、報告書を書いた本人も十分納得しているのかどうか怪しい説明をしています。(おそらくこれは、地震による振動が、燃料被覆管の周りのサブクール沸騰の状態に変化を与えたのだろうとの推測をやや曖昧に述べているのだと思われます。)

いずれにしても大事なことは、BWRだけでなくPWRにおいても、地震による原子炉出力への顕著な外乱があるということ、それが現実に関わったということです。

## ② 高木仁三郎氏の指摘(その2)

1987年の福島第一のスクラム停止に関して高木氏は、スクラム設定値として地震加速度が220ガル(Gal)というのは高過ぎる、このような地震加速度は、震度5でも発生することがない高さだとも述べています。そして4,6号機がスクラム停止しなかったことについて、地震による影響を受けたまま運転継続を許す不安全性を指摘しています。まったくそのとおりで、その後スクラム設

定値が、約半分のレベルにまで大幅に引き下げられました。もともと福島第一の1号機を建てたときの設計基準地震動は、最も重要な安全設備に対してでさえ0.27 g(265 Gal)でした。

なお、この場合の設計基準地震動は、解放基盤表面における最大加速度として与えられ、地震の規模を表すマグニチュードとは別で、一般には、設備に対する影響と関連するパラメータと理解されています。しかし、正確にはこれが唯一のパラメータではなく、原子力発電所における地震発生後の対応を規定した前述のNRCの規制指針(RG 1.166)は、次のいずれかに該当した場合には、原子炉を停止させなければならないと規定しています。

- 振動帯域2~10 Hzにおける最大加速度が0.2 g以上
- 振動帯域1~2 Hzにおける最大速度が毎秒6インチ(約15 cm)以上
- 累積絶対速度(CAV)が0.16 g秒以上

CAVとは近似的に言う、観測された地震加速度の時刻歴波形が描く図形の面積を累積した値のことで、これが0.16 g秒というのは、地震による設備破損が起こるか否かの閾値として、もともとEPRIが提唱した値です。2007年の新潟県中越沖地震において柏崎刈羽原子力発電所4号機で観測された地震波形を解析すると、これが3 g秒を超えています。揺れ時間の長かった2011年の東北地方太平洋沖地震による福島第一のCAVは、これをさらに遥かに上回っていたはず。そして、設備の損傷は、見えるところでも見えないところでも、各所に起こっていたはず。

### ③ 地震による影響の現実

論より証拠。2011年の東北地方太平洋沖地震では、少なくとも次の状況が地震によって発生していました。(福島第一の場合、津波とその後の過酷事故への転落にともなう水素爆発などによってかなりがマスクングされてしまいましたが、他の原子力発電所からの報告も含めて示します。)

- 所外電源回線の喪失(東通、女川、福島第一、福島第二、東海)
- 変圧器の保護装置(遊圧弁、放圧管)の動作による遮断(女川、東海)
- 変圧器損傷(油漏れ)(福島第二)
- 所内配電システムの故障、火災(女川)
- 使用済燃料プールからの大量溢水(福島第一、東海)
- 非常用ディーゼル発電機の故障、運転停止(東通、東海)
- サプレッション・プールの水位高によるインターロック(水源切替)作動(女川)
- 低圧タービンの動翼がケーシング側に激しく擦過(女川、東海)
- 過酷事故対策用淡水タンクの損傷(福島第一)
- 敷地内道路の損傷(福島第一)
- 建屋内非常灯の破損(福島第一)

以上の項目は、直接には、「止める、冷やす、閉じ込める」の安全機能に属するものではありませんが、いずれも過酷事故の発生を促し対処を妨げるものばかりで、軽視できないだけでなく、次に述べるように、それらの連動、複合効果について、慎重に考える必要があります。

前述のノース・アンナ原発でも、複数の変圧器の瞬時圧力継電器(上述、遊圧弁、放圧管と同機能)が作動したことで、所外電源喪失が発生しており、復旧までに7時間を要しています。鉄塔が倒壊するような目立った損傷が起こらなくても、所外電源喪失はあっさり発生するものだという事です。非常用ディーゼル発電機も、4基すべてが自動起動していますが、そのうち1基は冷却水の漏れによって、49分後に停止されています。

### ④ 地震による原子炉事故のシナリオ

地震によって配管が破断して原子炉の冷却材が喪失し、空焚きが起こるといった事故シナリオは、1960年代から最も古典的なものとして、米國がこれを「最大想定事故」と呼んでいたのに対し、日本はこれを「技術的見地からは起こり得ない」と説明した上で、「仮想事故」と呼びました。私

は、このシナリオにだけスポット・ライトをあてる過剰なこだわりをあまり快くは思ってきませんでした。少なくとも以前には、確かにこれが現実味のあるシナリオだったように思い返されます。

前述のさまざまな地震による影響と、以下の過去に発覚した不正や安全上の技術的な問題を個々のピースとして1枚のジグソー・パズルを組立てた場合、恐ろしい暗示の絵が完成します。

- A) マークI型サプレッション・プール(トラス)の強度不足。(大口径配管の破断による冷却材喪失事故(LOCA)時の動荷重で損傷する可能性。)
- B) 原子炉再循環系配管の応力腐食割れ問題の隠蔽。(1号機には、深さ不明の全周亀裂が隠蔽されていた大口径配管も。)
- C) シュラウドの応力腐食割れ問題の隠蔽。(燃料集合体に対する地震による水平方向の加速度と変位が増加し、スクラム機能への影響と反応度印加の可能性。)
- D) 格納容器漏洩試験の不正工作。
- E) サプレッション・プール内に設置されていた非常用炉心冷却系(ECCS)の取水口ストレーナの過小設計。(ECCSによるLOCAの収束不可。)

これらの問題が解決されたのは、A)が1990年頃まで、B)、C)が2000年頃まで、E)が2000年以降となっており、ずいぶん長い間、幸運に守られてきたことがわかります。小出しにすると重大さに気づかず、世間も鷹揚になりがちですが、できあがった暗示の絵は、次のことを矢継ぎ早に私たちに問いかけてきます。

1987年の地震(震度4)がもっと激しかった場合、核暴走は起こっていなかったのか? 深さ不明の全周亀裂が隠蔽されていた配管の交換前に、大地震があった場合、LOCAが発生していたのではないのか? シュラウドの割れが隠蔽されたままで交換される前に大地震があった場合、原子炉はスクラム停止できていたのか? 地震によるLOCAに続いて地震による電源喪失(SBO)も重複し、サプレッション・プール(トラス)が強度不足のために地震とLOCAの荷重に耐えられず破損した場合、原子炉事故はどのように進展するのか? そのような原子炉事故が発生した上に、地

震によって対策設備が破損して使えず、敷地内の道路が地震で壊れて所外から資機材が持ち込めない場合、原子炉事故はその後どのように進展するのか? 地震によって引き起こされ、地震によって一層悪化する原子炉事故から、周辺住民は、地震によって壊れた道路を迂回しながら避難しきれぬのか? そのような避難先はあるのか? などなど……。

実はこれは、新しい問題提起ではありません。本誌1997年10月号に、石橋克彦教授が、「原発震災——破滅を避けるために」と題して寄稿した論文の趣旨そのものでした。

## 5 難攻不落のレガシー・イシュー

設計基準地震動の策定手順や耐震設計基準の策定に携わる専門家、学識経験者の方々が、もし皆、地震と原子炉事故との複雑な関連についてより関心をもち、十分な知識を備えていたとしたら、取り組み姿勢が違って、策定された設計基準地震動やできあがった耐震設計基準も、以前のものとは違っていたのではないのでしょうか。地震が、いかに原子炉の安全性を支えるさまざまな機能と、事故の発生を防ぎ進展を抑えるための設備に対して限なく影響するかということ認識し、社会的良識が共有されていたとしたら、決して安易な妥協はできなかったはずで

しかし現実には、厳しい安全側の設計基準地震動の策定や耐震設計基準の要求がいかに原子力発電所の建設や改造工事を困難でコスト高にするのかについての懸念を吹き込まれた方々が大勢で、少しでも先延ばしに、少しでも緩いままにしていた、ということなのでしょう。ところが皮肉にも、場当たりの人をごまかすことはできても自然を欺き続けることはできず、耐震性評価を二度も三度もやり直し、修理や改造工事にはより莫大な費用がかかり、結果的には、小欲のために大損をしてしまったように見受けられます。

〈どこが間違っているのかはわからない。でも変だ。〉——日本と同じ地震多発地帯である米国カリフォルニア州にあるディアブロ・キャニオン原

子力発電所の設計基準地震動が0.75 g(735 Gal)であるのに対し、福島第一を含む多くの日本の原子力発電所のそれは当初、むしろ地震の発生が稀な米国中東部の値に近く、たった0.27 g(265 Gal)でした。「最強地震(S<sub>1</sub>)」を超える可能性が否定できないことから念のために設定したと言っている「限界地震(S<sub>2</sub>)」さえ、現実にはちよくちよく超過が起って来ました。

〈きっと何かがおかしい。途中の計算過程はよくわからない。でも答えはきっと違う。〉——日本の基準は、多くの人々にそのように怪しまれながらも、しぶとく生き延びてきました。

私は、本誌の前々号(2015年1月号)で、「レガシー・イシュー」について述べました。何度やっつけたと思っても蘇り、原子炉の安全を脅かし続ける執拗な問題のことです。地震は、日本の原子力の安全問題として、最強で難攻不落のレガシー・イシューだったと思います。しかし、それは、地震という奥の深い自然現象の不可知さのためだったのでしょうか。

## ● レガシー・イシューの攻略法

地震によって、たとえば格納容器の中や原子炉建屋の各階に設置されている機器がどのような揺れ方をするのかを推定するためには、複数の段階からなる複雑な計算プロセスを順番にたどらなければなりません。

- (1) 震源から硬質の岩層を伝わってきた地震動による、原子力発電所が設置された地点の解放基盤(地下数百m)での揺れ。
- (2) 解放基盤から発せられる地震動による原子炉建屋が設置された基礎版の揺れ。
- (3) 基礎版に固定された格納容器や原子炉建屋の各階での揺れ。
- (4) 格納容器や原子炉建屋の各階の床や壁に固定された個々の機器の揺れ。

というのが大雑把な順番です。親亀の背中に子亀、子亀の背中に孫亀、孫亀の背中に曾孫亀が乗っているときの、親亀の背中のぐらつきが、ここまでの議論の中での設計基準地震動に相当します。曾

孫亀の安全(個々の機器の健全性)は、親亀の背中のぐらつきだけで決まるわけではありませんが、まずは何より先にこれが決められなければなりません。

どの段階にも(入力)×(伝達関数)=(出力)の計算プロセスがあるわけで、そこには様々な理論式や、限られた測定データとバラつきの多い物性値などを統計的に処理して単純化した経験式によって組み立てられた計算モデルが用いられ、結果に不確定さと「さじ加減」の余地があるのは当然です。しかし、このような半ばブラック・ボックスを入念にチェックしていても、結局、〈どこが間違っているのかはわからない。でも変だ〉というモヤモヤを晴らすことは容易ではありません。そのようなアプローチによっては、レガシー・イシューを攻略するのは簡単ではなさそうです。

前述した「原発震災」で石橋教授は、あやふやさの一切ない確固とした筆致で、設計基準地震動を策定する従前の考え方の誤りを指摘し、文中、「設計用最強地震による基準地震動 S<sub>1</sub>」としては、現行の「設計用限界地震による基準地震動 S<sub>2</sub>」よりも強大なものを設定しなければならないし、S<sub>2</sub>としてはさらに大きなものが要求されるのである」と明言しています。地震発生の原理と地震史を使って、小賢しく「さじ加減」された理論に挑んでいます。なるほど。地震のことはコンピューターにではなく地球に聴け、地球は間違っていると語っている、ということなのでしょう。

もう一つの攻略法があります。複雑な伝達関数のアルゴリズムも知らず、地震史にも通じておらず、地震発生の原理についても一般常識程度の知識しかない私にもできる方法です。それは、日本以外の国の手法と比較して見ることです。特に、怪しい「さじ加減」の仕方についての比較が重要なポイントです。実は私は、これを2007年に一度試みています。柏崎刈羽原子力発電所が、当時の設計基準地震動を大きく上回る地震に見舞われた年です。

どこに間違いがあったのかを探り出そうとして、比較の対象に選んだのが、米国NRCが1997年3月に制定していた規制指針 RG 1.165 “Identifi-

ation and Characterization of Seismic Sources and Determination of Safe Shutdown Earthquake Ground Motion”でした。この表題にある Safe Shutdown Earthquake Ground Motion (SSE) というのが、日本でいうところの  $S_2$ 、その後の  $S_s$  に当たります。当時ですでに10年前に制定されたものでしたが、確率論的地震ハザード評価 (PSHA) という手法を用いて SSE を策定する手順が述べられています。しかし、何度も繰り返し読んだ末に、とうとう投げ出してしまいました。馴染みがなく難解な上、米国では、これが制定されてから新設された原子力発電所がなく、実例をなぞりながら理解することができなかったからです。

それでも間もなくしてその機会が得られるようになりました。ジョージア州のヴォーグル原子力発電所に3,4号機が増設されることになり、事業者が、SSEの策定プロセスに RG 1.165 の PSHA を採用した ESP 申請書 (Early Site Permit Application, Rev.5 2008年12月) を提出したからです。一方日本では、九州電力が2013年7月8日付で、川内原子力発電所に対する「設置変更許可申請書」と「工事計画認可申請書」を提出しました。(その後、それぞれに対する二度の修正があり、各2014年9月4日付と2014年10月8日付の修正版の追加をもって最終化。) これでようやく設計基準地震動の策定プロセスに関する日米比較ができるようになりました。

## 7 設計基準地震動策定手順の日米比較

川内原発に対しては、解放基盤表面(親亀の背中)の揺れに対する設計基準地震動 ( $S_s$ ) の策定までが、「設置変更許可申請書」の中で述べられており、そこから先(子亀、孫亀)の作業が、「工事計画認可申請書」に引き継がれています。これに対してヴォーグルの場合は、親亀から孫亀まですべて ESP 申請書に記載されています。いろいろ指摘したい細かいこともありますが、以下では  $S_s$  の策定までの手順に関して述べます。

日本の解放基盤表面は、岩盤の剪断波 ( $S$  波) 速度に対し、0.7 km/s 以上であることが条件とのこ

とで、川内原発に関しては、これが原子炉格納施設基礎位置 (EL. -18.5 m) で十分満足されており ( $S$  波速度 1.5 km/s)、原子炉格納施設基礎が解放基盤表面にそのまま築かれることとなります(親亀と子亀が一匹の亀)。この点、解放基盤表面が地表から約 250 m 下の柏崎刈羽原発などの敷地とは異なるようです。ちなみに柏崎刈羽原発の場合、この約 250 m の岩層を原子炉建屋基礎に到達するまでの段階で、地震加速度がかなり減衰されます。

### 7.1 ヴォーグル原発のアプローチ

ヴォーグルの ESP 申請書では、敷地の地下約 300 m にある硬質岩盤 ( $S$  波速度 2800 m/s) を日本の解放基盤のように扱い、まずはここでの地震動スペクトルを求めます。日米差は、いきなりここから始まります。それは、ヴォーグルが確率論 (PSHA) を採用していることによるもので、一様ハザード・スペクトルと過去の地震のデータにもとづいて、ディ・アグリゲーション(再分解)と呼ばれる手順により、地震規模と震央距離が特定された架空の地震が設定されます。

ディ・アグリゲーションとは、注目する地点(原子炉設置予定地)における地震ハザードの寄与度の分布を、地震規模(マグニチュード、 $M$ )と震央距離(km)の2変数の面上に展開する作業のことですが、この場合、低振動数帯域(1~2.5 Hz)において、震央距離 100 km 以上の地震のハザードが 5% 以上の寄与を有するときは、そのような地震も SSE の策定に含めるよう規制指針 (RG 1.165) で規定されています。結果としてヴォーグルでは、高振動数帯域(5~10 Hz)に対しては  $M$  5.6 で震央距離 12 km の地震、低振動数帯域に対しては  $M$  7.2 で震央距離 130 km の地震が選ばれています。これら2種類の地震を想定することで、いかなる振動数帯域においても、平均年超過確率を  $10^{-4}$  以下に抑えることができます。そして、同規制指針は、こうして得られる2セットの SSE を低振動数から高振動数の帯域までそっくり包絡する最終的な SSE を策定するよう規定しています。

## 7.2 川内原発のアプローチ

以上を予備知識に川内原発の「設置変更許可申請書」を見ると、日米の「さじ加減」の違いがはっきりします。「さじ加減」とは言っても、「手抜き」という意味ではありません。上述した米国のアプローチでは、2セットのSSEを1つに包絡させていますが、日本の専門家は、これに対して次のように異議を唱えるかもしれません。「M5.6で震央距離12kmの地震とM7.2で震央距離130kmの地震が同時に発生するはずがないのに、なぜ合体させるのか。別々のままでいいではないか。」川内原発には実際、Ss-1、Ss-2、Ss-Lのように、2セットどころか3セットの設計基準地震動が別々に策定されています。これらのうちSs-2は、当初はなかったのですが、原子力規制委員会の意見が反映されて追加されました。

基準地震動は、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」と「震源を特定せず策定する地震動」を評価した上で決定します。前者については、内陸地殻内地震、プレート間地震、海洋プレート内地震(川内原発の場合には、これらに桜島の噴火による地震も加わる)について検討用地震を複数選定し、それぞれについて応答スペクトルにもとづく地震動評価と断層モデルを用いた手法による地震動評価が行われますが、川内原発のSs-1の策定においては、震度5弱程度以上の地震は推定されないとの理由から、内陸地殻内地震以外が除外されます。他方、後者については、地震の分類をせずに評価をします。結局、17の断層を検討し、応答スペクトルを包絡してSs-1が決定されています。

ところが、免震重要棟内の緊急対策所の設計用としては、Ss-1の策定段階で排除されたプレート間地震の考慮が復活し、琉球海溝にM9.1の地震が想定され、Ss-Lが策定されます。このスペクトルは、低振動数(長周期)帯域でSs-1よりも大きな地震加速度を有するのが特徴です。

原子力規制委員会は、震源を特定しないで策定する方法に、より厳しい評価ケースとして、2004年に北海道留萌支庁南部で発生した地震を

考慮するよう意見を述べ、その結果Ss-2が追加されました。

以上のように3セットの設計基準地震動が策定されたわけですが、最後に大事な仕上げのステップが残っています。Ss-1とSs-2に対し、今や国際的コンセンサスである年超過確率 $10^{-4}$ 以下の要件に適合していることを示すことです。米国のアプローチはこれが出発点だったわけですが、日本のアプローチではこれが終点です。これには、日本原子力学会が2007年に定めた方法にもとづいて算定した解放基盤表面における地震動の一樣ハザード・スペクトルが比較に使われ、 $10^{-4}$ ~ $10^{-5}$ 程度であることが確認されたと結んでいます。

## 7.3 規制者と事業者の折衝

不確定さのある安全問題に関する規制は、本来、まずは過剰なほど十分な保守性を含んだ要件があり、その後の知見と経験の積み重ねにもとづいて、慎重に緩和が検討されていくのが正常です。いわば、したたかな店主(規制者)との値引き交渉です。しかし、過去の日本では、まずスカスカの要件があり、その後の苦い経験と海外情報により、牛歩のペースで渋々強化され、まるで、弱気な従業員(規制者)がケチな経営者(事業者)を相手に賃上げ交渉をしているようでした。

さて、最初540 GalのSs-1を提示した九州電力に、620 GalのSs-2の追加を受け入れさせたのだから、原子力規制委員会もたいしたものだと皆さん思うかもしれません。では、それらの時刻歴波形(設計基準地震動のスペクトルに合うように、一様乱数の位相をもつ正弦波の重ね合せによって人工的に作成したもの)を見てみましょう(図1)。Ss-2は、最大加速度こそSs-1を上回っていますが、強い地震動は2秒間そこそこです。思い出して下さい。地震と破損の関係は、最大加速度だけではなく、むしろCAV値(近似的にギザギザの総面積)との関係をより重視するのが最近の考え方ははずです。もし、ある装置に対して耐震試験を行う場合、皆さんの直感では、どちらの振動波形がより過酷でしょうか。

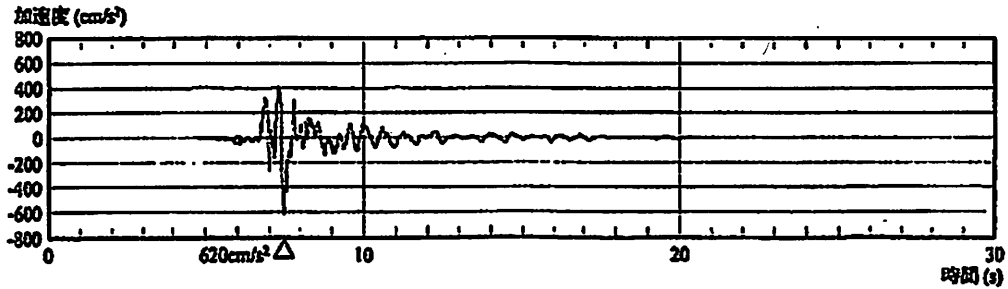
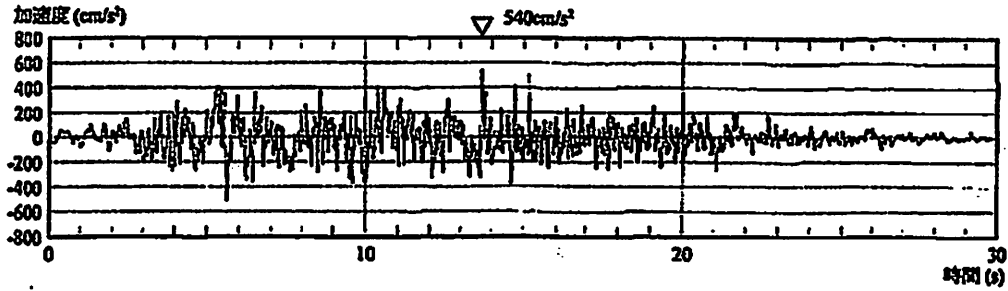


図1—上：Ss-1(水平方向)，下：Ss-2(水平方向)  
それぞれ，川内原発「設置変更許可申請書」第7.5.6.58図，第7.5.6.59図より転載。

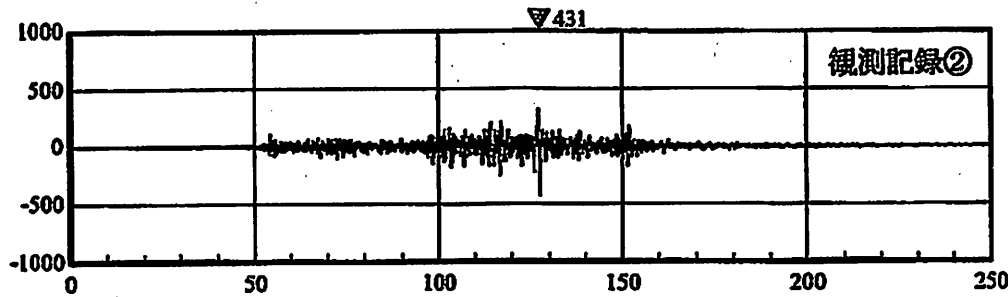
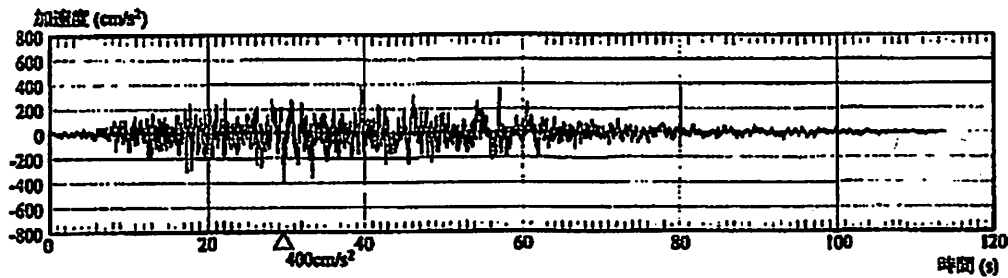


図2—上：Ss-L(水平方向)  
川内原発「設置変更許可申請書」第7.5.7.11図より転載。  
下：福島第一6号機原子炉建屋基礎版上の加速度時刻歴波形(東西方向)  
東京電力「福島原子力事故調査報告書(中間報告書，2011年12月2日)」添付3-2 図1-6より転載。

ついでに，Ss-Lの時刻歴波形も見てください。CAV値はさらに大きくなります。しかし，震源地から約180 kmも離れた福島第一原発が東北地方太平洋沖地震に見舞われたときに観測された地震波形は，さらに継続時間が長く，厳しいものでした(図2)。

なぜ，ちびちびとした「賃上げ交渉」のようにではなく，最初に，Ss-1もSs-2もSs-Lもすべ

て包絡した設計基準地震動のスペクトルを設定するよう求め，そこから議論を始めなかったのでしょうか。前項3に列記した実際の地震による影響の中には，たとえば，周期が数秒オーダーの使用済燃料プールのスロッシング(水面が揺れてできる波)による大量溢水も含まれています。これ一つを思い起こすだけで，米国の規制指針(RG 1.165)の予備知識などなくても，せめてSs-1とSs-Lは一



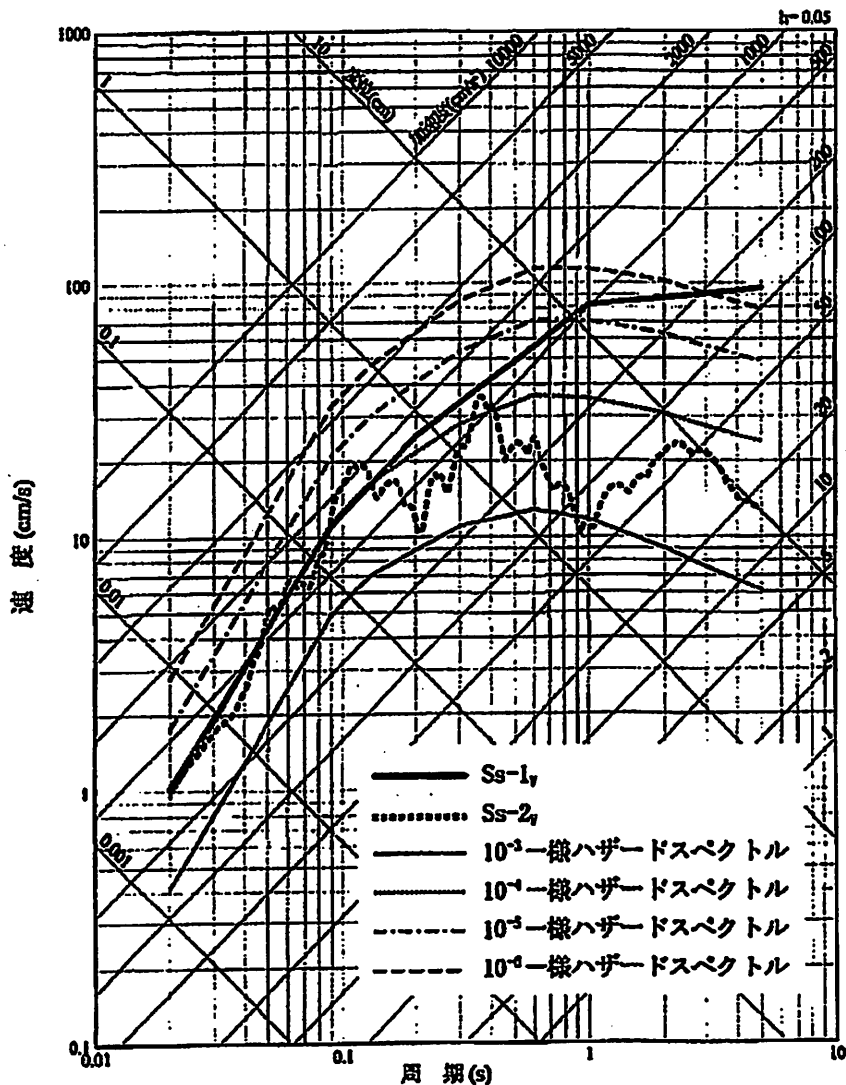


図3—基本地震動の応答スペクトル及び日本原子力学会(2007)の方法により算定した解放基盤表面における地震動の一概ハザード・スペクトルの比較(鉛直方向)  
川内原発「設置変更許可申請書」第7.5.6.61図より転載。

つのスペクトルに合体させたほうがよいと考えないでしょうか。

さて、最後に、日本原子力学会の方法にもとづく一概ハザード・スペクトルと比較して、年超過確率が $10^{-4}$ ~ $10^{-5}$ 程度であるとの結論があったわけですが、実際にSs-2の図を見るとそのようにはなっておらず、 $10^{-3}$ ~ $10^{-4}$ 程度(一部 $10^{-3}$ 以上)であることがわかります(図3)。

#### 7.4 日米差の背景にあるもの

NRCの規制指針が2セットのSSEを包絡するよう規定し、ヴォーグルのESP申請書でも実際にそのように1つのSSEを策定しているのは、それが、策定プロセスに含まれるさまざまな不確定さや不可知性を補うマージンになるからなのでしょう。

そして、日本がそうしない、否、したくないのは、設計基準地震動のスペクトルが膨らんで、耐震補強工事の範囲が拡大してしまうからなのでしょう。設計基準地震動を2セット、3セットと増やせば、解析作業の量は増えますが、コンピューターがやってくれます。(実際のところSs-1は、免震重要棟内の緊急対策所の設計専用に限定していますので、解析作業の量は2倍です。)一方、耐震補強工事が増えるのは、コストの問題もありますが、外聞もよくありません。

しかし、そうこうしているうちに実際に地震がおそいます。たとえば、福島第一3号機の原子炉建屋基礎版上における2011年の地震の観測スペクトルを解析応答スペクトルと比べると、Ss-1、Ss-2、Ss-3と3セットも策定していたにもかかわらず、みごとにスリと隙を抜けられているよ

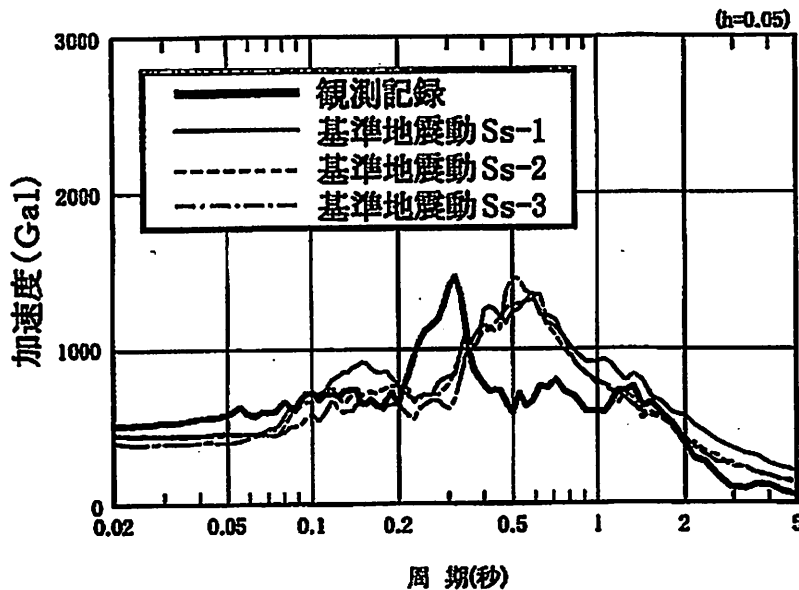


図4—福島第一3号機原子炉建屋基礎版上の  
応答スペクトル(東西方向)  
東京電力「福島原子力事故調査報告書(中間  
報告書, 2011年12月2日)」添付3-2 図  
2-3より転載。

うに見えます(図4)。東京電力は、これを「概ね同程度」と評していますが、この図がそのように目に映るうちは、何度も自然の鉄槌を受け続けることになるのでしょう。

耐震問題がレガシー・イシューだった理由は、単に、自然現象の不可知さのためだけではなかったように思えます。

## レガシー・イシューは解決されたか？

石橋教授の「原発震災」には、次の指摘が含まれています。

- 活断層のないところにも大地震が発生する。
- $S_1$  は従来の  $S_2$  よりも大きく、 $S_2$  はさらに大きくすべきはず。
- 地震地体構造の調査検討によって限界的な地震の規模と場所が想定できるとされているが、安全担保の客観的根拠にはならない。

牛歩の17年が過ぎ、ようやくすべてが受け入れられるようになったかに見えます。「震源を特定せず策定する地震動」が、設計基準地震動の策定手順の中に盛り込まれるようになりました。 $S_1$  は  $S_2$ 、 $S_2$  は  $S_3$  となりましたが、いずれも大幅に上方修正されました。安全担保は引っ込め、「年超過確率」が示されています。

しかし、レガシー・イシューは解決したのでしょうか。今度こそ本当に解決させたいという思い

で取り組んでいるのでしょうか。

今回取り上げた川内原発の「設置変更許可申請書」は、原子力規制委員会によってすでに承認されており、「工事計画認可申請書」のほうも時間の問題だと噂されています。7.2項に既述した川内原発のアプローチは、おそらく、かなりの類似性をもって、他の日本の原発にもすでに適用され、これからも適用されていくものと思われます。今もう一度この問題を問い直すことが、大切なチャンスかもしれません。