

国際環境 NGO グリーンピース委託レポート  
2015年4月28日

## 川内原発における耐震性評価の問題： 国際基準と日本基準



© Greenpeace

執筆者：佐藤 暁（原子カコンサルタント）



## グリーンピース委託レポート

### 『川内原発における耐震性評価の問題：国際基準と日本基準』 要旨

国際環境 NGO グリーンピース委託レポート『川内原発における耐震性評価の問題：国際基準と日本基準』は、国際環境 NGO グリーンピースが 1984 年から 2002 年まで原子力技術者としてゼネラル・エレクトリックに勤務した経歴のある原子力コンサルタント、佐藤 暁氏に委託して作成、2015 年 4 月に発表したものです。レポートでは、九州電力が申請し、原子力規制委員会が承認した川内原発再稼働申請の内容を耐震性評価の観点から検証したものです。

以下は、レポートにおいて指摘されている主要な論点です。

- 国際原子力機関(IAEA)は、安全な設計の基準となる地震動を策定する際には、確率的に 1 万年～10 万年に 1 回の頻度(年超過率  $10^{-4}$ ～ $10^{-5}$ )で発生する規模の地震を基準とするよう推奨している。一方、九州電力が提示している設計基準地震動には、部分的に 1000 年～1 万年に 1 回(年超過率  $10^{-3}$ ～ $10^{-4}$ )という高頻度の発生確率が示されており、これは IAEA の指針への違反にあたる。
- 九州電力が提出した設置変更許可申請書では、重要免震棟を除く施設に関し、川内原発で考慮すべき地震を内陸地殻地震のみに限定し、プレート間地震や海洋プレート内地震などの地震を検討していない。この結果、過去の原発事故の際に大きな影響をもたらした低振動数(長周期)領域の地震動の影響が過少評価されている。
- 低振動数(長周期)領域の地震動を軽視することは、原発内のタンク、プール、変圧器などへの、液体に発生するうねりの力による破壊(スロッシング現象)や、クレーン、低圧タービン、埋設配管などの機器に大きな損害をもたらす可能性を軽視することにつながる。
- 地震による振動の影響で、原子炉内の燃料が突発的に過剰な核反応を起こし(反応度印加)、原子炉の緊急停止につながった事例が日米で報告されている。この現象に関しても低振動数(長周期)領域の地震動の影響の可能性があり、この点についての検証がないことも大きな問題である。
- 九州電力が新たに策定し原子力規制委員会が承認した Ss-1、Ss-2、Ss-L という 3 種類の基準地震動は、以前の基準と比べてかなり思い切った引き上げになってはいるものの、ア

アメリカのヴォーグル原発に適用されている確率論的地震ハザード評価(PSHA)の手法とは大きく異なっており、この日本独特な手法の独自性が国際的に認められ得るものとは考えがたい。

上記の観点から、レポートでは、川内原発で新たに採用された設計基準地震を策定するためのプロセスは不十分なものであると結論付けています。特に遠方の震源からもたらされる低振動数(長周期)領域の地震動の影響が恣意的に分離されていることなどはその顕著な例といえるでしょう。

著者は、レポートで論じている内容が川内原発に特有なものではなく、日本国内の全原発に当てはまる性質のものであることを明言しています。アメリカや他国の事例と比較しても、日本の基準地震動策定のプロセスには不透明な部分が大きく、十分に包括的な考慮がされているとは言えない現状にあります。このような手続きをもって「世界最高水準」を標榜することは論外と言わざるをえません。

## 川内原発における耐震性評価の問題：国際基準と日本基準

### 概要

以下、筆者の所感の概要であり、それぞれの詳細と根拠を、本書において後述する。

- (1) 地震基盤の応答スペクトル、及び解放基盤表面における応答スペクトルの求め方が、プロセスの概要を大雑把に述べただけで、大部分がブラック・ボックスである。客観的検証が不可能であり、原子力規制委員会がこれを十分に行ったことを印象付けるエビデンスがない。
- (2) 結局、基準地震動は、上述の Ss-1 と Ss-2 の他、免震重要棟設計用のものとして Ss-L が加えられ、合計 3 種類が設定されている。しかし、本来望ましいのは、これら 3 種類の基準地震動を全て包絡したスペクトルである。特に、震度 V 以上の地震が推定されないからという理由によって、Ss-1 と Ss-2 のスペクトルに、より寄与の大きいプレート間地震による低振動数(長周期)領域のスペクトルが重ねられていないのは、誤った判断によるものと懸念される。実際、過去、日本の原子力発電所において発生した地震被害は、その多くが低振動数(長周期)領域の寄与によるものである。Ss-L のスペクトルの低振動(長周期)領域は、免震重要棟以外の設備に対しても適用されるべきである。
- (3) 原子力安全基盤機構(2005)と日本原子力学会(2007)の一樣ハザード・スペクトルの信頼性が不明であり、非保守的である可能性もある。しかし、原子力規制委員会が、それらの策定プロセスにまで遡及し、客観的に適正さを検証したというエビデンスがない。
- (4) 原子力安全基盤機構(2005)による日本列島の領域区分は、余りにも大雑把過ぎる印象がある。福島第一、福島第二、東海、柏崎・刈羽が全て同一の区分、浜岡、志賀、若狭湾沿岸も全て同一の区分に属していて、そのような広大な区分に対し、「一樣ハザード・スペクトル」を与えるというのは、かなり粗雑な印象がある。しかし、原子力規制委員会が、客観的にそれらの適正さを検証したというエビデンスがない。
- (5) 九州電力は、上記の一樣ハザード・スペクトルとの対比に基づき、策定した基準地震動の年超過確率が  $10^{-4}$ ~ $10^{-6}$  程度、あるいは  $10^{-4}$ ~ $10^{-5}$  程度と総合的な評価を述べている。しかし、実際の図から、たとえば Ss-2(垂直方向)のスペクトルを読み取ると、むしろ  $10^{-3}$ ~ $10^{-4}$  と読み取られ、部分的には  $10^{-3}$  よりも大きいところさえある。この誤りについて、原子力規制委員会は指摘していない。

以上の所感に基づき筆者は、九州電力が策定し、原子力規制委員会が承認した Ss-1、Ss-2、Ss-L からなる 3 種類の基準地震動について、従前の 180Gal というレベルに比べてかなりの思

い切った引き上げにはなっているものの、手法が、少なくとも米国の確率論的地震ハザード評価 (PSHA) の手法とは大きく異なっており、その独自性が国際的に認められ得るものとは同意できない。著者の個人的意見としては、低振動数(長周期)側と高振動数(短周期)側を分離してスペクトルを設定したことだけでも、この手法が適切であるとは思われない。

- (6) 原子炉格納容器の地震応答解析においては、地盤-建物相互作用 (SSI) が重要な要因となる。この要因に対する考慮は、工事計画認可申請書のモデル図においては見受けられるものの、水平方向ばねと回転方向ばねの特性が実際には与えられておらず、解析に反映されているのかどうか不明である。これが適切に解析に反映されていない場合、非保守的(実際の震動に対して過小評価)になっている可能性がある。
- (7) 低振動数(長周期)側が過小評価されることで、タンク、プール、変圧器などのスロッシング現象や、燃料交換機、天井クレーン、気象観測塔など長スパンの設備や構造物、プールの内張りステンレス鋼板、低圧タービン、埋設配管、トレンチなど大きな変位が許容されない機器などへの影響が、過小評価となる。
- (8) 低振動数(長周期)大振幅の地震動が過小評価されることで、過酷事故対策や保安対策、自衛消防隊の活動にも不都合な事態が発生する可能性がある。たとえば、可搬式設備運搬用道路の損傷、防護柵ゲートの故障、建屋内非常灯の破損は、迅速な過酷事故対応を妨げる可能性がある。雪や火山灰が降積して固有振動数が低下している建屋屋上への地震荷重が増し、それが崩落した場合、下にある重要機器の破損を誘発する可能性がある。
- (9) 地震による振動で、燃料被覆管周りの冷却水の沸騰状態 (PWR におけるサブクール沸騰を含む) に外乱が生じ、正の反応度が印加される現象が既知である。幸い、かつての事象では燃料破損には至っていないが、より激しい地震による振動で、炉心の熱設計に対する安全限界を超過し、大規模な燃料破損や原子炉圧力バウンダリーの損傷が生じることがないのか、確認すべきである。

なお、以上の問題点は、川内原子力発電所に特有なものではなく、BWR を含む日本国内の全原子力発電所に対して当て嵌まる性質のものである点に注意する必要がある。

## 目次

	<u>表題</u>	<u>ページ</u>
1	背景	1
2	九州電力による評価のアプローチ	4
3	著者の検討アプローチ	7
3.1	ヴォーグル原子力発電所の場合	7
3.2	新潟県中越沖地震(2007)と東北地方太平洋沖地震(2011)の経験	13
3.3	地震による反応度印加の未解析問題と燃料破損などの可能性	16
4	問題点の解説	17
5	結論	26
6	参考資料	30

## 1. 背景

基準地震動の策定は、耐震性評価の実務に着手する前のプロセスであり、これに誤り(顕著な非保守性)があった場合には、程度と範囲(周期帯域)にもよるが、その影響が、これに続く耐震性評価と対策工事にも大きく波及する場合がある。

基準地震動の策定に関しては、国際的なコンセンサスがあり、2003年に国際原子力機関(IAEA)が発行した「原子力発電所の耐震設計と認定」と題した安全指針(NS-G-1.6)が、設計基準の地震規模として、発生頻度が $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 回/年(平均)、 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 回/年(メジアン)と設定する考え方を示している。

実際、2011年の福島事故をきっかけに、欧州原子力安全規制者グループ(ENSREG)の主導、および助言によってEU諸国とスイス、ウクライナにおいて実施された「ストレス・テスト」の報告書を見ても、この考え方が実践されていることが分かる。すなわち、各国が提出した報告書には、地震や洪水に対する設計基準をどのように定めているかが述べられており、それらを一覧にした次表からも明らかのように、ほとんどの国々が「10,000年に1回」を選んでいる。(メジアン=最頻値で100,000年に1回と平均値で10,000年に1回はほぼ同じ。)

これに対して日本は、10,000年に1回であるべき設計基準地震の超過を、2000年以降だけで数度も繰り返し、中には、超過の後で引き上げたにもかかわらず、その値がすぐまた超過した例さえあり、いかに策定プロセスに慎重さが欠落していたか、客観的事実として印象付けている。なぜ、「10,000年に1回」であるべきかと言えば、それは、IAEAが1999年に「原子力発電所に対する基本的安全原則(Basic Safety Principle for Nuclear Power Plants)」と題して発行した文書(INSAG-12)の中(第27項)にもある「安全目標(Safety Goal)」「(その一つとして、フルスケールの炉心損傷の発生頻度に対しては10,000炉年に1回とある)との整合性にある。

それだけに、この数値には軽視できない重要性がある。「世界最高水準」を標榜する日本が、これを無視することは論外なはずである。

ストレス・テスト報告書にあるEU諸国(+スイス、ウクライナ)の設計基準

国名	炉型	設計基準地震		設計基準洪水 発生頻度(年)
		発生頻度(年)	加速度(注)	
フランス	PWR	1,000(MHPE)	0.1~0.3g	1,000
ドイツ	PWR/BWR	100,000(メジアン)	42~210ガル	10,000
イギリス	ガス冷却/PWR	10,000	0.13~0.25g	10,000
オランダ	PWR	30,000	75ガル	1,000,000
ベルギー	PWR	10,000	0.21g	10,000
スペイン	PWR/BWR	220,000	0.20g	10,000
スウェーデン	PWR/BWR	100,000	0.15g	該当せず
フィンランド	PWR/BWR	100,000(メジアン)	0.082g	該当せず
チェコ	VVER	10,000	0.1g	10,000

スロバキア	VVER	10,000	0.344g	100
ハンガリー	VVER	10,000	0.25g	10,000
ルーマニア	CANDU	1,000	0.2g	10,000
ブルガリア	VVER	10,000	0.2g	10,000
スロベニア	PWR	10,000	0.6g	10,000
リトアニア	RBMK(廃炉)	—	60～100 ガル	—
ウクライナ	VVER/RBMK	10,000	0.1～0.12g	10,000
スイス	PWR/BWR	10,000	0.21g	10,000

(注: 1g=980.665 ガル)

一般論として、設計基準地震の策定方法には、決定論的方法と確率論的方法がある。日本が失敗を重ねてきた伝統的方法は前者である。しかしこのことは、必ずしも前者の后者に対する劣等性を意味するものではない。

たとえば、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に対しても決定論的方法が適用されており、1976年には0.75g(735Gal)の応答スペクトルも追加され、厳しい評価が求められている。そして、このことによる影響もあり、同原子力発電所の建設工事は大幅に遅れ、商用運転を開始したのは、1985年(1号機)と1986年(2号機)である。他方、九州電力川内原子力発電所が商用運転を開始したのは、1984年(1号機)と1985年(2号機)であり、ほとんど同時期なのではあるが、その設計基準地震は180Galに設定されていた。(格納容器と原子炉停止装置に対しては270Gal) 1986年10月、九州電力の原子力部門の幹部1名を含む日本からの一行が、ディアブロ・キャニオンを訪問している。これを取材した地元紙(テレグラム・トリビューン)の10月13日付の記事によれば、同発電所の耐震性を視察するためであったらしい。このとき、735Galと180Galの差を知って何の思いも抱かなかったとは考え難いが、結果的に川内原子力発電所では、そのまま30年間も見直しされなかったことになる。

前掲の表中、フランスの場合、1,000年に1回(MHPE)とあるが(MHPEとはMaximum Historically Probable Earthquakeのこと)、実際には余裕のため、マグニチュードを0.5加算して地震加速度を求め、設計基準地震を定めているという。また、スペインの場合、初めに「220,000年に1回」と設定したわけではなく、先に決定論的に0.2gを決め、後年これを確率論的評価に当て嵌めたところこの頻度に相当することが確認されたと述べているものである。

以上のように、決定論的な設定方法は、米国、フランス、スペインでも適用されており、それが不安全側だと決めつけるべきではない。しかし今や、それがどんな値であれ、確率論的にどのような意味を持つのかを説明できなければならない時代なのであり、そのような変化は、国際的には福島事故が起こる10年前からすでにあったものなのである。

因みに、決定論的方法は台湾でも採用され、4つの原子力発電所の設計基準地震が設定されている。マークI型BWRのある第一発電所が0.3gで、他は0.4gである。ストレス・テストは台湾においても2011年8月から2013年5月までに実施され、規制当局(AEC)が公式に依頼書を送

り、ENSREG の独立評価(ピア・レビュー)を受けている。ENSREG の報告書は 2013 年 11 月に発行されているが、次のような評価結果が述べられている。

まず地震に対しては、「今の設計基準地震は、最新の国際的要件に適合していない。特に、外部事象が超過確率  $10^{-4}$ /年未満であるべきとする要件に適合していない。」(5.1.1.6)と述べられている。溢水に関しては、降雨に対して 10,000 年に 1 回の頻度が考慮されているものの津波の評価が不十分であるため、「他の形態の溢水ハザードについても超過確率  $10^{-4}$ /年に対して評価されなければならない。」(5.2.3 項)と述べられている。更に、強風に対しては、100 年間で最大の風速に余裕値を加えて設計基準を設定したとのことではあるが、やはり ENSREG の報告書は「全ての発電所で全ての外部事象に対して  $10^{-4}$ /年を適用すべき」(5.3.3 項)と述べ、その適正さを認めていない。

さて、九州電力川内原子力発電所の設置変更許可を見ると、明らかに上述した国際情勢の変化への対応が見受けられる。すなわち、まずは決定論的手法によって 540Gal(基準地震動 Ss-1)を決定し、次にこれが、確率論的には  $10^{-4}$  から  $10^{-6}$  の年超過確率に相当することを示している。ただしその後、原子力規制庁の指導に従い、北海道留萌支庁南部地震の考慮という理由で、これに 620Gal(基準地震動 Ss-2)が追加されている。それでも年超過確率としては、依然  $10^{-4}$  から  $10^{-6}$  の間にあるという。

しかし、これらの結論を受け入れる際に思い出されるのは、日本の過去の評価手法とそれによって決定された基準地震動が、余りにも頻繁に信頼を裏切ってきた過去の事実である。そして、今新たに示されている 540Gal や 620Gal も、依然、難解なアルゴリズムと不確定さの多い数多くのパラメータで算出されたものであり、第三者的には「ブラック・ボックス」からのアウトプットである。また、これと比較する年超過確率  $10^{-3}$ 、 $10^{-4}$ 、 $10^{-5}$ 、 $10^{-6}$  の一様ハザード・スペクトルにしても、それらがどのように決定されたのか分かり難い。いわば、分かり難いもの同士の比較をしての良好な結果を見ているだけであり、依然、疑念を十分払拭することができない。

川内原子力発電所が属する南九州が、日本列島の中では厳しい地震の影響を比較的受け難い領域なのかもしれないが、カリフォルニア州のディアブロ・キャニオンに対して設定されている 735Gal を依然かなり下回っている新しい基準地震動、Ss-1(540Gal)と Ss-2(620Gal)が、本当に同区域において 10,000 年から 1,000,000 年に 1 回ほどにしか発生しないものなのか。

本書では、これらの問題も検討、考察していく。

## 2. 九州電力による評価のアプローチ

以下は、九州電力が提出した膨大な設置変更許可申請書(一部補正を含む)と工事計画認可申請書(一部補正を含む)のうち、耐震性評価に関する九州電力による評価のアプローチについて、著者がその解釈したところを大雑把にまとめたものである。

設置変更許可申請書では、次の3種類の基準地震動、すなわち、1)敷地ごとに震源を特定して策定する地震動、2)震源を特定せず策定する地震動、及び3)免震重要棟設計用基準地震動が評価されている。これらのうち、3)免震重要棟設計基準地震動は、緊急時対策所(免震重要棟内)のみを対象としている。地震発生状況については、次の4つのケース、すなわち、1)内陸地殻内地震、2)プレート間地震、3)海洋プレート内地震、及び4)その他(桜島噴火)が考慮されている。ただし、各基準地震動と各地震発生状況の対応は、次のように限定されている。

	内陸地殻地震	プレート間地震	海洋プレート内地震	その他 (桜島噴火)
敷地毎に震源を特定して策定する地震動	○(震央から200km以内の断層)	除外(震度Ⅴ以上は推定されないため)	除外(震度Ⅴ以上は推定されないため)	○
震源を特定せず策定する地震動	○(加藤ほかによる上限レベル)	除外(震度Ⅴ以上は推定されないため)	除外(震度Ⅴ以上は推定されないため)	除外
免震重要棟設計用基準地震動	○ 長大な活断層(3)	○ 琉球海溝(Mw9.1)	除外	除外

基準地震動は、敷地の深層部にある地震基盤における応答スペクトルを定め、次にその上にある地質の特性に元に解放基盤表面における応答スペクトルを求め、最終的に、解放基盤表面における応答スペクトルに対応した時刻歴波形を得る。

「敷地毎に震源を特定して策定する地震動」に関しては、14の断層を震源としたものと3回の桜島噴火に起因した地震が検討対象とされているが、これら全ての応答スペクトルを包絡した設計用応答スペクトルが設定される。又、「震源を特定せず策定する地震動」に関しては、敷地の地盤物性に基づいて求めた他に、原子力規制委員会からの指導により、2004年北海道留萌支庁南部地震の知見を考慮し、K-NET 港町観測点における地盤情報を使い、その場合の応答スペクトルも追加で求めている。最終的に設定された解放基盤表面の各応答スペクトルに対応する時刻歴波形から読み取られる地震加速度は、次の結果となっている。

			設計基準地震動(Gal)	弾性設計用地震動(Gal)
免震重要棟 以外の設備	設計用 応答スペクトル	水平	540	324
		垂直	324	195
	震源を特定せず 策定する地震動	水平	620	372
		垂直	320	192
免震重要棟		水平	400	
		垂直	240	

こうして川内原子力発電所 1、2号機に対し、新たな設計基準地震動は、540Gal/620Galとなり、従前の最大加速度 180Gal と比べて劇的に引き上げられた。

最後に、このように引き上げられた応答スペクトルの年超過確率を評価する。これに対しては、国際的に  $10^{-4}$  以下であることがコンセンサスとしてあるため、これに適合しているかどうか評価を試みたものと思われる。

原子力安全基盤機構(2005)は、日本列島を 8 区分、そのうち九州を 3 区分に分け、それぞれの区分に、年超過確率が  $10^{-3}$ 、 $10^{-4}$ 、 $10^{-5}$ 、 $10^{-6}$  である地震基盤における一様ハザード・スペクトルを設定している。又、日本原子力学会(2007)も一様ハザード・スペクトルの設定方法を定めており、これを用いることで、やはり、地震基盤と解放基盤表面に対し、年超過確率が  $10^{-3}$ 、 $10^{-4}$ 、 $10^{-5}$ 、 $10^{-6}$  である一様ハザード・スペクトルを設定することができる。

そこで、すでに得た地震基盤と解放基盤表面における応答スペクトルが、これらの一様ハザード・スペクトルと対比し、どの辺りの年超過確率に位置するのかをみる。結果は次の通りであり、国際的コンセンサスのレベルに適合している。

川内 1、2号機の応答スペクトル		対比する一様ハザード・スペクトル	
		原子力安全基盤機構	日本原子力学会
地震基盤応答 スペクトル	Ss-1(設計用応答スペクトル)	$10^{-4} \sim 10^{-6}$ 程度	$10^{-4} \sim 10^{-6}$ 程度
	Ss-2(震源不特定で策定)		
解放基盤表面 応答スペクトル	Ss-1(設計用応答スペクトル)		$10^{-4} \sim 10^{-5}$ 程度
	Ss-2(震源不特定で策定)		

以上までのステップで、解放基盤表面における設計基準地震が決定された。各建屋は、この上に設置されている。原子炉格納施設の場合、厚さ約 8m、重さ  $8.58 \times 10^5 \text{kN}$ (約 87,500 トン)の基礎があり、その上に原子炉格納容器や外部遮蔽建屋などが設置されている。蒸気発生器も、内部コンクリートを介して基礎に設置されている。施設一帯は、標高(EL)13m の敷地に建てられており、基礎や床面の底部は、原子炉格納容器が EL -18.5m、原子炉補助建屋が EL-9m、燃料取扱建屋が EL-0.10m、ディーゼル建屋が EL9.3m、主蒸気管建屋が EL9.2mである。

ポンプや配管、タンクなどの機器は、各建屋の床や壁によって支持されるため、解放基盤表面の設計基準地震を元に、各階の床面の設計用床応答曲線を求めることになる。ここから先は、工事計画認可申請書の範囲となる。その最初のステップとして、まずは建屋をモデル化し、時刻歴波形と減衰定数を入力することで、各床面の設計用応答曲線を得る。当然、上の階に行くに従って増幅され、大きな加速度となる。

それぞれの建屋のそれぞれの階に設置されている各機器の地震荷重は、機器の種類と固定方法に応じた減衰定数を入力し、その応答を解析することで求められる。当該の機器に作用するのは、そのような地震荷重だけではなく、自重や内圧などの常時作用している荷重や、事故時の動荷重もある。そのような組み合わせ荷重を元に、当該機器の各部位に生じる応力を有限要素

法などのコンピュータ解析によって求め、それを許容応力と比較することで、耐震性評価の結果が判定される。

原子力規制委員会は、以上の一連のプロセスに対する審査において、すでに解放基盤表面における応答スペクトルを求めるところまではそれを適正であると承認しており、現在、次のステップである工事計画認可申請書を審査中である。

### 3. 著者の検討アプローチ

本書では、川内原子力発電所に対する評価法を、現在、米国ジョージア州で建設工事が進むヴォーグル(Vogtle)原子力発電所 3/4 号機に対して適用された評価法と比較し、その差異に注目することで問題点を抽出していく。更に、2007 年新潟県中越沖地震と 2011 年東北地方太平洋沖地震において実際に経験された被害が、そのような問題点とどのように関連しているのかについても指摘する。

#### 3.1 ヴォーグル原子力発電所の場合

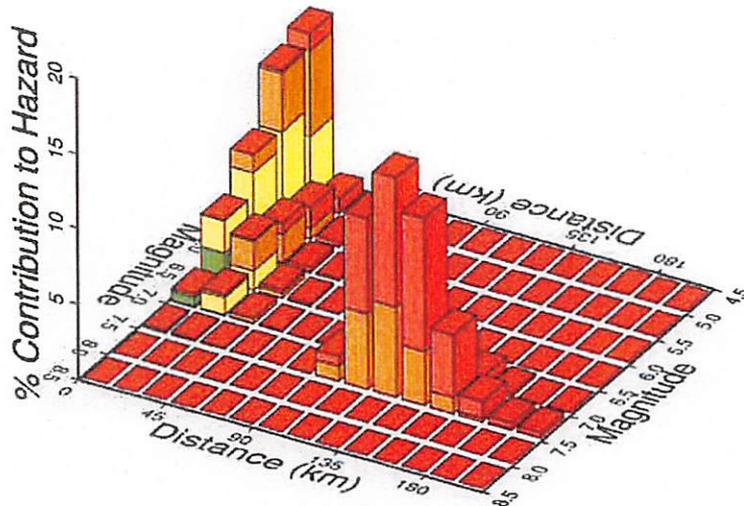
同原子力発電所は、サバンナ川を挟んでサウスカロライナ州と接しているが、サウスカロライナ州と言えば、1886 年 8 月 31 日、M7.3 の大地震があり、2,000 棟の建物が倒壊し、死者 60 人以上を出す震災に見舞われている。当時、その影響は隣接する緒州を越え、かなり遠方にまで及んだ。そのような歴史的出来事は、当然、同原子力発電所の基準地震動の設定において特殊な要因となって反映されている。

その設定手法としては、NRC の規制指針 RG 1.165 "Identification and Characterization of Seismic Sources and Determination of Safe Shutdown Earthquake Ground Motion", Rev.0 March 1997 が適用されている。同規制指針にある手法は、確率論的地震ハザード解析 (PSHA) に基づくものであり、注目する振動数 (1Hz、2.5Hz、5Hz、10Hz) のそれぞれに対し、統計的に推定された最頻値 (メジアン) の年超過確率が  $10^{-5}$  となる地震加速度のレベルとして、最終的な SSE (日本で称するところの  $S_s$ ) の応答スペクトルが設定される。その場合、振動数 (周期) に対し、高振動数 (短周期: 5~10Hz) と低振動数 (長周期: 1~2.5Hz) の二つの帯域に分けて評価される。以下、ヴォーグル原子力発電所の場合について、簡単にそのステップを辿ってみる。

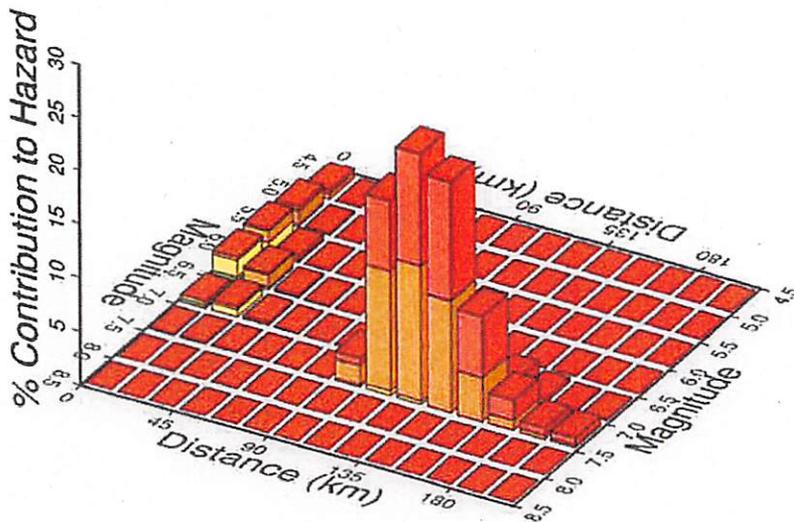
まず、ディアグリゲーション (deaggregation) と呼ばれるステップから始まる。これは、年超過確率  $10^{-5}$  に相当する加速度の地震に対し、発生源までの距離 (km) と規模 (M) の二因子について、寄与率の分布に展開する作業のことである。遠方になればなるほど地震の規模は大きくならなければならないが、そのような規模の地震が稀であるならば、遠方の地震の寄与は小さいことになる。ところがその場合に注意しなければならないのが、振動数 (周期) の効果である。それは、振動数の高い (周期の短い) 地震波は、より距離による減衰を受けやすいからである。逆に、振動数の低い (周期の長い) 地震波の場合には、より遠方にまで伝搬する。

そのため、高振動数 (短周期) に対しては震源地が遠方の地震の寄与を無視することができても、低振動数 (長周期) に対しては遠方の地震の寄与が無視できない場合がある。RG 1.165 は、震源地からの距離が 100km 以上の地震の寄与率が 5% を超える場合には有意と見做すことを求めている。ヴォーグル原子力発電所の場合には極端にこのケースに当て嵌まっていて、低振動数 (長周期) だけではなく高振動数 (短周期) においてさえ、隣のサウスカロライナ州を震源とする遠方の地震が大きな寄与率を占めている。少し詳細を略すが、こうしてヴォーグル原子力発電所の場合には、低振動数 (長周期) の帯域に対しては距離 130km の地点で発生する M7.2 の地震、

高振動数(短周期)の帯域に対しては距離 12km の地点で発生する M5.6 の地震を、それぞれ代表的なものとして設定し、応答スペクトルを策定していくプロセスの対象とする。



年超過確率  $10^{-5}$  の加速度に寄与する地震の  
距離(km)/規模(M)別寄与率の分布 《高振動数(短周期)帯域》

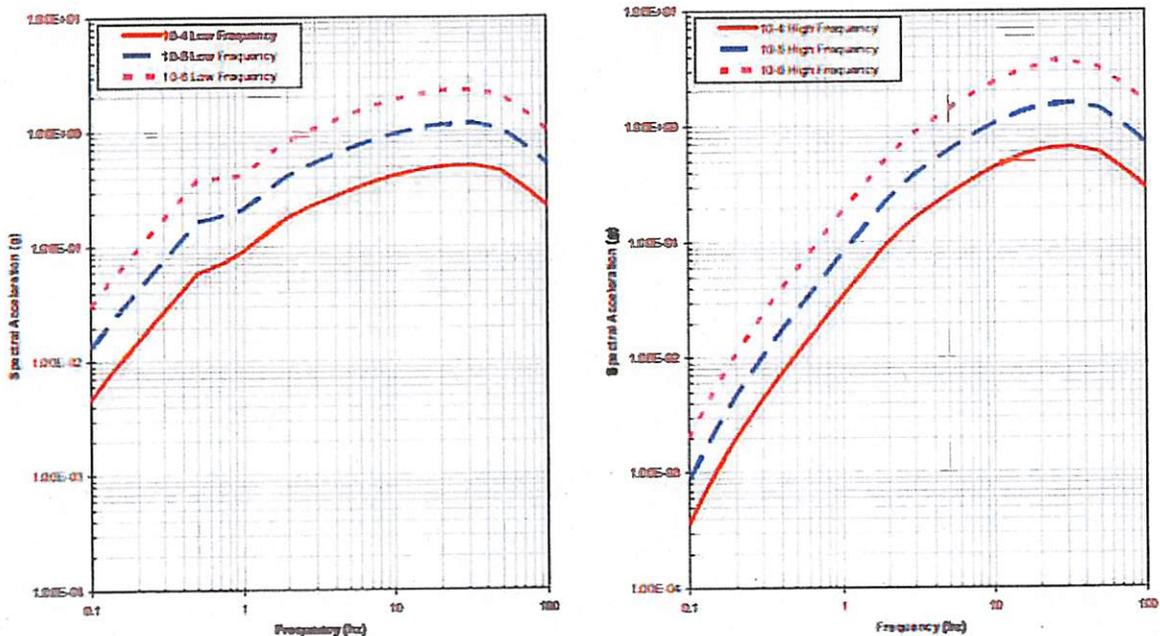


年超過確率  $10^{-5}$  の加速度に寄与する地震の  
距離(km)/規模(M)別寄与率の分布 《低振動数(長周期)帯域》

たまたまヴォーグ原子力発電所の場合のディアグリゲーションの結果は極端なものとなったが、このような傾向は、わざわざ地震多発ポイントを選んで立地場所としない限り、多くの原子力発電所に対しても当て嵌まる。すなわち、低振動数(長周期)の帯域に対しては、遠方を震源とす

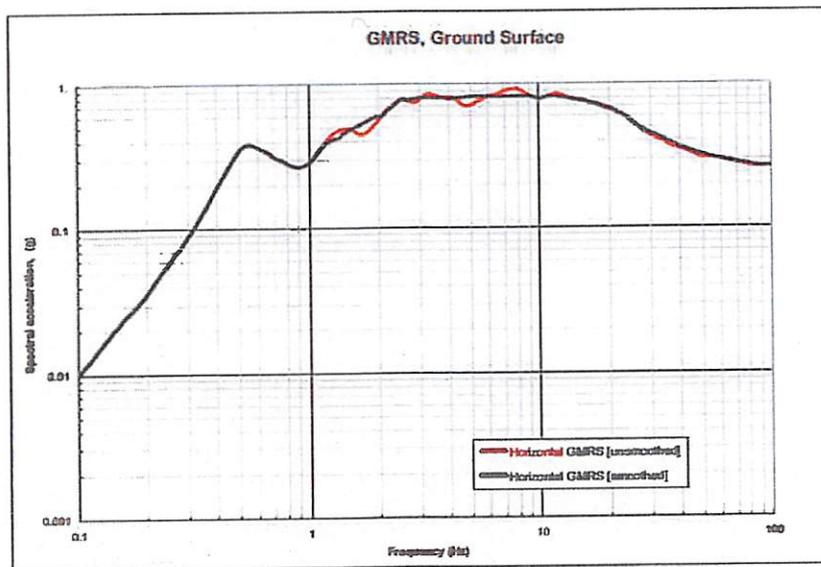
る地震の寄与を考慮しなければならないということである。なお、「遠方」と言う場合どこまでを意味するかというと、200 マイル(320km)までである。

さて、そのような 2 種類の代表的な地震が、原子力発電所の敷地の直下まで硬質岩(Hard Rock)を伝ってくる。硬質岩の定義は、剪断波(S 波、横波)の伝搬速度が毎秒 9200 フィート(約 2800m)以上の岩層とされており、ヴォーグル原子力発電所の場合には、約 300m 以深の地下である。(設置変更許可申請書や工事計画認可申請書における「地震基盤」が、ほぼこれに相当していると思われる。)まずは、このポイントにおけるスペクトルが設定される。高振動数(>10Hz)の帯域が同程度の加速度(g)であっても、長距離を渡ってきた地震波のスペクトルは、低振動数(<1Hz)の帯域においてより大きな加速度を有している。



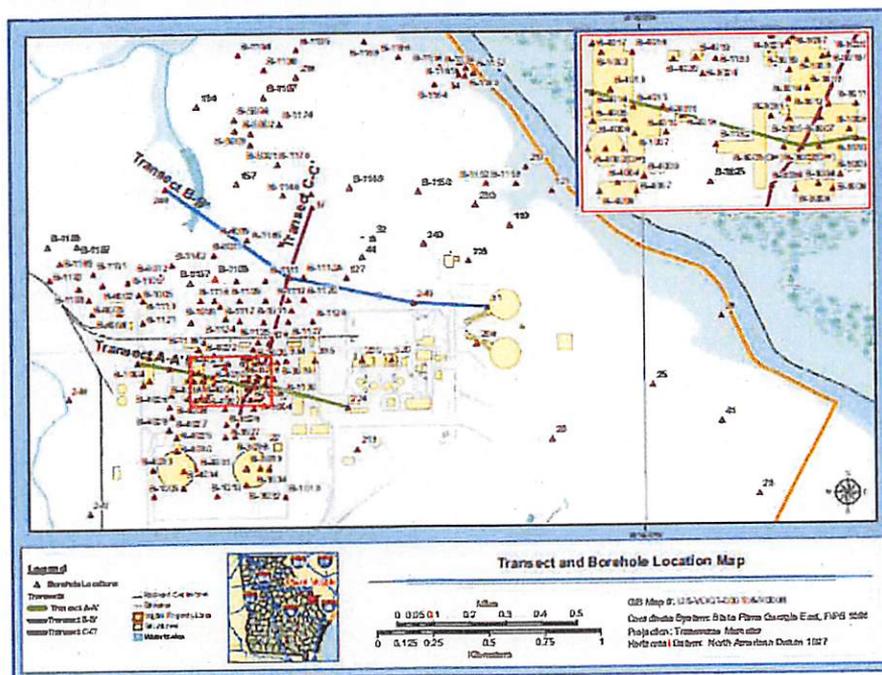
硬質岩における地震波スペクトル: 130km/M7.2(左)、12km/M5.6(右)

このような地震のスペクトル、すなわち、ヴォーグルの場合では、上図に示される 2 種類の硬質岩におけるターゲット・スペクトルは、いずれも排除されずに評価されなければならない、それぞれ地表に向かって伝搬する過程で、増幅、または減衰する。我々が得たいのは、解放基盤表面における応答スペクトルであるが、それは、各ターゲット・スペクトルがそのような増幅、または減衰を経た末にできる 2 つの応答スペクトルを包絡したものとして設定される。増幅、減衰は、一様ではない。ある振動数においては大きな増幅をするが、別の振動数においては逆に減衰するということもある。従って、地下 300 メートルにおけるターゲット・スペクトルの形は、解放基盤表面では大きく変形している。

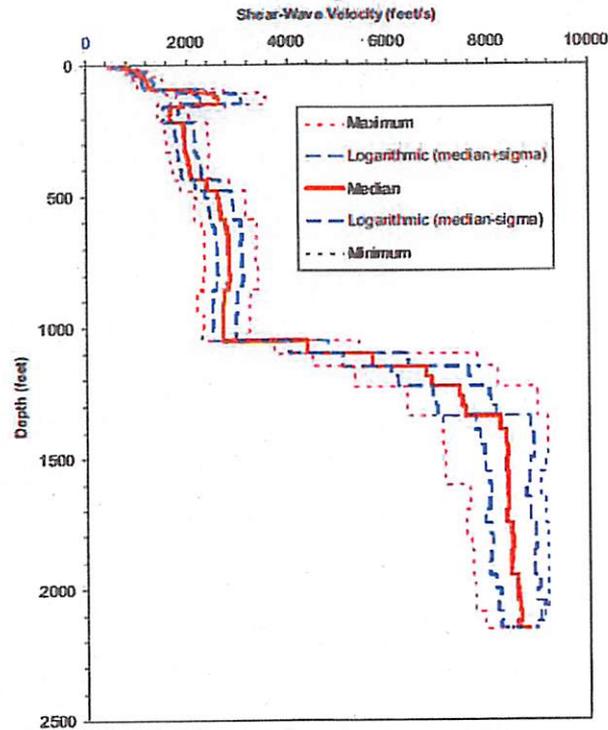


こうして遂に、解放基盤表面の応答スペクトルが得られている。

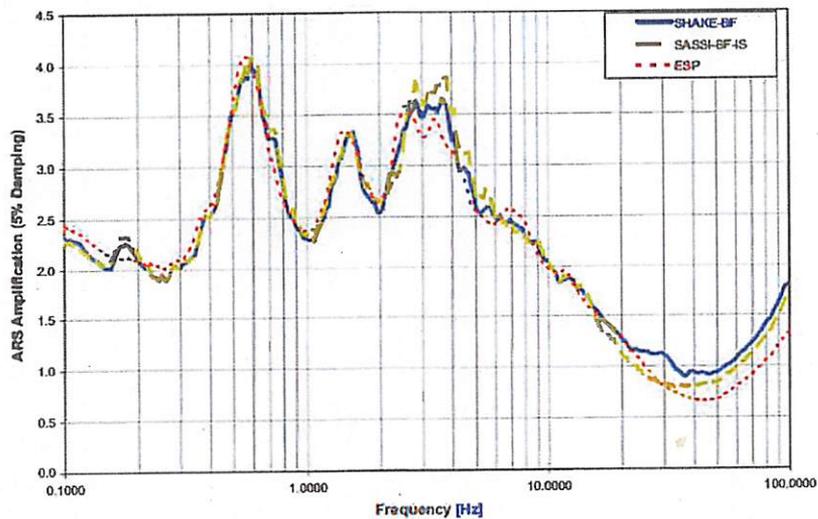
ここで、前述のターゲット・スペクトルと解放基盤表面の応答スペクトルの間の関係を左右するのが、ヴォーグルの場合には厚さ300mもある岩層の特性である。もちろん厳密に言えば、X、Y、Z 三軸のどの方向に対しても不均質なのであるが、これをより正確に把握するために実施される作業の一つがボーリングである。ヴォーグルの場合、予定敷地内とその周辺の合計 186 か所で実施され、深いものは 400m まで行っている。そうして採取された個々のサンプルに対し、様々な物性の測定が実施され、S 波速度もその一つである。



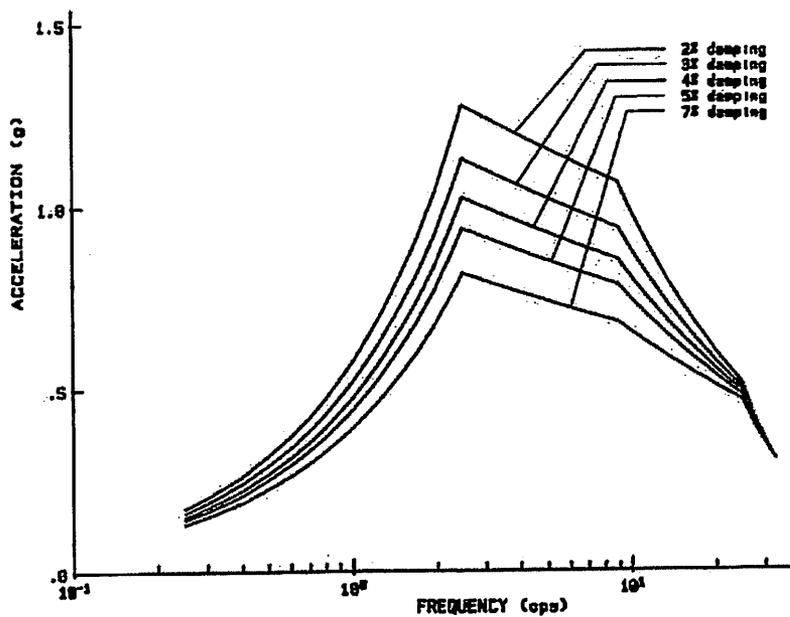
S 波速度は、一般に深さにつれて増加する傾向はあるが、かなりのバラつきがある。ヴォーグ  
ル原子力発電所 3、4 号機の予定敷地の土層は、S 波速度 300m/s 未満の不安定な砂層で、液  
状化の可能性もあることから、広大な範囲を深さ約 26m まで掘削して取り除き、バックフィル(埋  
め戻し)を行っている。



結局、増幅率のスペクトルは下図のようになる。各振動数のポイントにおいて、ターゲット・スペ  
クトルに、この増幅率スペクトルの値を乗じたものが、前掲の解放基盤表面の応答スペクトルであ  
る。ただしこのスペクトルには、減衰率 5% が使われていることに注意が必要である。

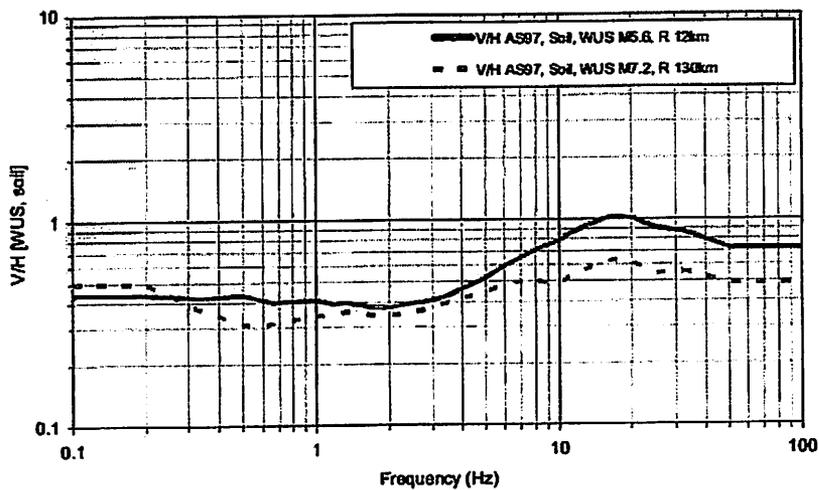


この減衰率 5% の仮定は、最も標準的に使われているようであるようではあるが、この値に対する感度は大きく、実際の減衰率がこれよりも小さい場合には、高振動数(短周期)側(3Hz 近辺)の加速度を顕著に増大させる。なお、前掲の増幅率スペクトルを見ると、まさにその振動数帯域に、大きな増幅率が重なっている。また、増幅率の大きな帯域は、低振動数(長周期)側(0.4~0.9Hz の近辺)にも存在する。これが、解放基盤表面の応答スペクトルのプロファイルに大きな影響を及ぼしている。

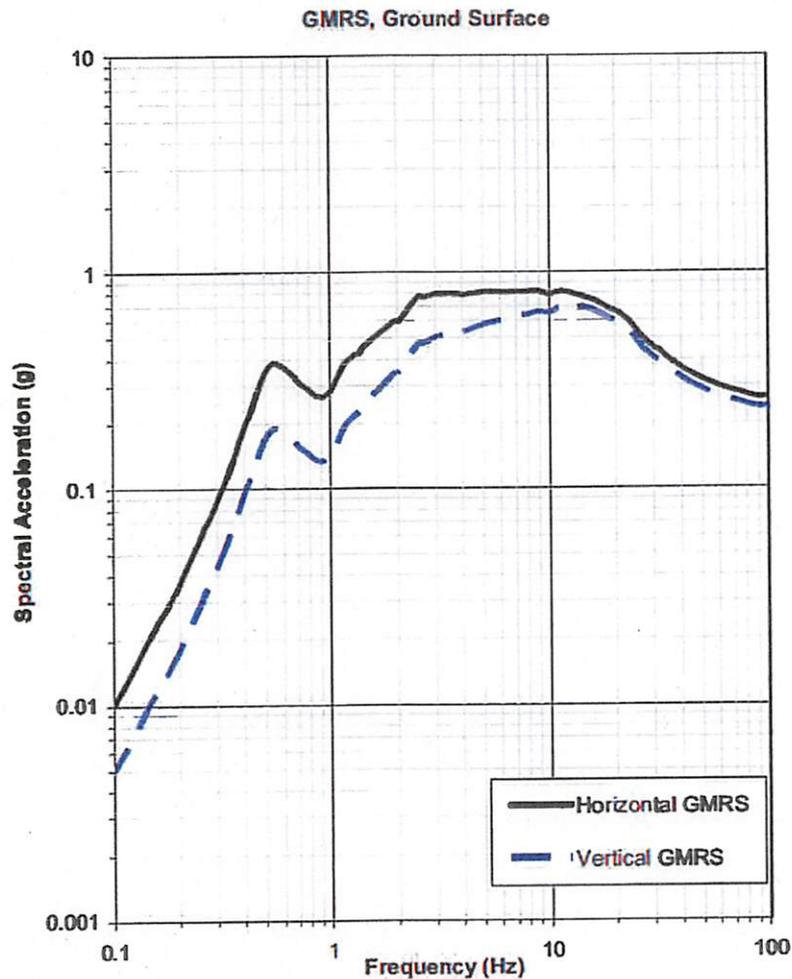


ここまで論じてきたのは、水平方向の応答スペクトルについてである。垂直方向の応答スペクトルは、これに、垂直対水平の比(V/H)のスペクトルを乗じて行われる。遠方を震源とする地震の場合、横揺れ(水平)に対して縦揺れ(垂直)が、より減衰される。

Vertical/Horizontal Ratios: WUS Soil



こうして、解放基盤表面における水平方向と垂直方向の最終的な応答スペクトルが出来上がるのであるが、ここまでのプロセスを振り返ってみると、いかに多くの要因が関わっていて、それらが、所々において、どれほどの不確定さを含んだものなのかが分かる。



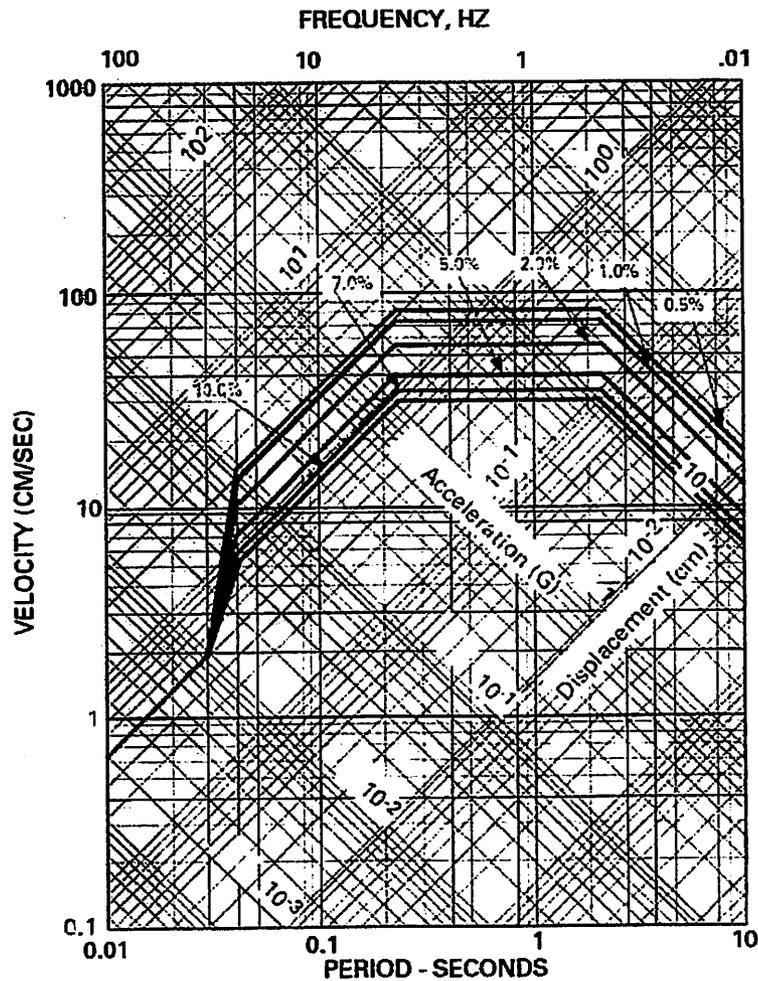
以下、2007年新潟県中越沖地震と2011年東北地方太平洋沖地震において実際に経験された被害が、このような問題点とどのように関連しているのかについても指摘する。

### 3.2 新潟県中越沖地震(2007)と東北地方太平洋沖地震(2011)の経験

前項(3.1)では、ヴォーグル原子力発電所 3、4号機の解放基盤表面における応答スペクトルが設定されるまでの過程を辿り、その中で、遠方を震源とする地震による低振動数(長周期)領域の寄与を考慮することの重要性を度々強調した。

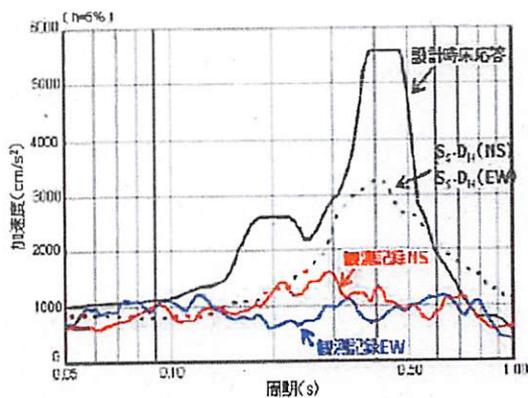
低振動数(長周期)の地震動は、次図(台湾第四原子力発電所のPSARから抜粋)の応答スペクトル図からも分かるように(この図では横軸の単位が周期であるため、低振動数は右側の帯域

となる)、加速度(左斜め 45° の軸)は小さいが、変位置(右斜め 45° の軸)が大きいのが特徴である。これは、正弦波  $\sin(2\pi/T)t$  の波形の加速度を考えた場合、速度、変位のそれぞれが、1 回積分、2 回積分で求められ、それぞれ  $(T/2\pi)$  倍、 $(T/2\pi)^2$  倍されるため、長周期(低振動数)の地震動の変位が、より増大していくためである。

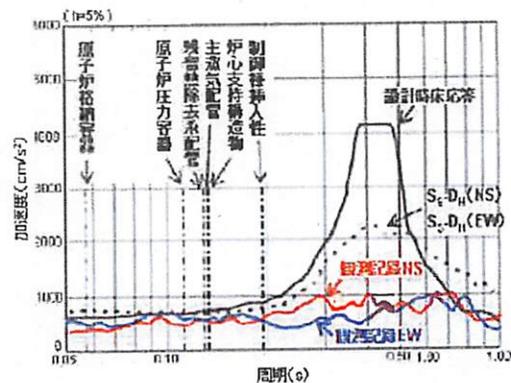


従って、遠方を震源とする地震の寄与を無視することによる潜在的な低振動数(長周期)側の過小評価は、加速度によってよりも、振幅によって被害を生じさせる可能性がある。また、長周期の固有振動数を有する機器や構造物、スロッシング現象との共振も考慮しなければならない。

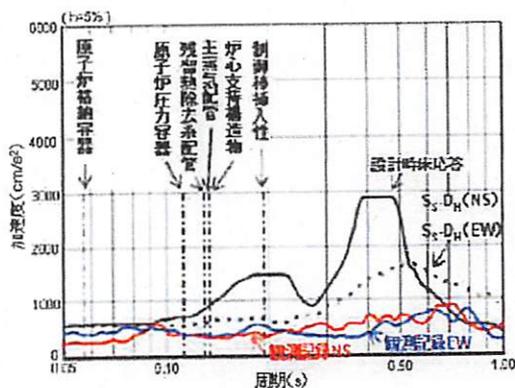
現に、たとえば東海第二発電所の場合、原子炉建屋の各階において、2011年の地震の際に観測された地震動は、長周期側において設計応答スペクトルを超えている。次図には、1秒(1Hz)までしか示されていないが、10秒(0.1Hz)までの帯域には更に顕著な超過があったかもしれない。たとえば、使用済燃料プールのスロッシングの周期は数秒のオーダーであり、次図の範囲の外側にある。そして、大量(25m<sup>3</sup>)の溢水が発生したと報告されている。



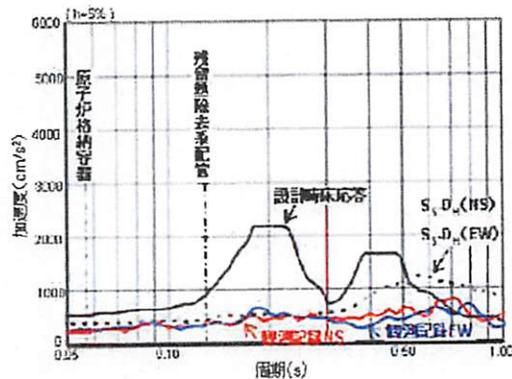
6階



4階



2階



地下2階

東海第二発電所の原子炉建屋各階における地震動の記録  
(平成 25 年 8 月付、原子力安全推進協会の報告書から)

使用済燃料プールからの思わぬ大量溢水は、東海第二発電所その他、福島第一原子力発電所においても報告されていた。地震によるスロッシングは、変圧器内部の絶縁油の油面とサプレッション・プールの水面においても発生している。女川原子力発電所の主変圧器、所内変圧器の避圧弁が、油面の揺れによって圧力上昇を感知し、開放している。東海第二発電所の変圧器においても同じ事象が発生し、放圧管が開いたと報告されている。更に、女川 3 号機においては、サプレッション・プールのスロッシングが、「水位高」の信号を発信した。

女川原子力発電所と東海第二発電所では、低圧タービンのブレードが著しく損傷した。高振動数がローターを励振したのか、低振動数がタービン建屋床面を励振したのかなどのメカニズムは不明であるが、東海第二発電所の場合の原子炉スクラムは、原子炉建屋の地震加速度によってではなく、タービン振動高によるタービン・トリップによってであったと報告されている。日本の原子

力発電所の場合、タービン発電機の軸方向が原子炉の中心に向かっておらず、タービン・ミサイルが発生した場合、原子炉に向かって投射される。米国 NRC の規制指針 (RG 1.115) は、そのような配置のタービンに対し、タービン・ミサイルの発生頻度を  $10^{-5}$  回/年 以下となるよう求めているが、このように、地震が原子炉をスクラムさせる前にタービンのブレード(動翼)を静翼側に激しく接触させるものだとすると、タービン・ミサイルの発生頻度にも有意な影響が懸念される。

新潟県中越沖地震では、柏崎刈羽原子力発電所の原子炉建屋の天井クレーンに損傷が確認された。原子炉建屋に貫入する消火系配管が破断して、大量の内部溢水も発生しているが、地盤の変形によるものだったのか、大きな振幅を伴う地震動によるものだったのかは不明である。

以上の 2007 年と 2011 年の地震に伴う様々な出来事は、それらのうちの多くが、川内原子力発電所に対しても起こり得るものである。

### 3.2 地震による反応度印加の未解析問題と燃料破損などの可能性

2011 年 8 月 23 日、米国ヴァージニア州でマグニチュード 5.8 の地震が発生した。これによって、震源地から約 18km 離れたノース・アンナ原子力発電所 1、2 号機(地震発生時に定格出力で運転中)が同時にスクラム停止しているが、その原因については、中性子束の急変(一旦低下後に上昇)(High Flux Rate Reactor Trip)と報告されている。

実は、このような地震に伴う中性子束の急変が確認された事例は、1987 年 4 月 23 日、福島第一 1、3、5 号機でも発生している。このときの地震は、震源の位置が同原子力発電所から南南東 38km、深さ 47km、マグニチュード 6.5 であった。地震によって燃料集合体が揺さぶられ、燃料棒の周囲の気泡が振り払われたことによって、反応度が急上昇したことが原因と推測されている。

2011 年のノース・アンナの事象では、そのような現象が、BWR だけでなく PWR の原子炉においても発生することを示した点で重要である。両ケースとも幸いスクラムによって鎮静しているが、スクラム応答までに過激な出力上昇が発生し、燃料破損や圧力バウンダリの損傷を生じさせることがないことが確認されてはいない。BWR に対しては最小限界出力比(MCPR)、PWR に対しては最小限界熱流束比(DNBR)が、それぞれ安全限界(SL)を超えないことを確認しておく必要がある。

#### 4. 問題点の解説

(1) 地震基盤の応答スペクトル、及び解放基盤表面における応答スペクトルの求め方が、プロセスの概要を大雑把に述べただけで、大部分がブラック・ボックスである。客観的検証が不可能であり、原子力規制委員会がこれを十分に行ったことを印象付けるエビデンスがない。

九州電力の設置変更許可申請書の記載内容は、ヴォーグル原子力発電所3、4号機のESPと比較した場合、最終的に解放基盤表面における応答スペクトルを得るまでの途中の段階的プロセスに関する説明が著しく省略されている。具体的には以下のプロセスについて。

- 「地震基盤の応答スペクトル」が、どのようにして決定されているのか。
- 「地震基盤の応答スペクトル」が「解放基盤表面における応答スペクトル」に変換されるに当たっての増幅スペクトルが、どのように設定されているのか。
- 水平方向の応答スペクトルから垂直方向の応答スペクトルを得るための V/H 比のスペクトルが、どのように設定されているのか。
- 上記、それぞれのプロセスにおける不確定さによって、最終的な解放基盤表面における応答スペクトルは、どの程度の誤差(非保守性)を有するのか。

(2) 結局、基準地震動は、上述の Ss-1 と Ss-2 の他、免震重要棟設計用のものとして Ss-L が加えられ、合計3種類が設定されている。しかし、本来望ましいのは、これら3種類の基準地震動を全て包絡したスペクトルである。特に、震度 V 以上の地震が推定されないからという理由によって、Ss-1 と Ss-2 のスペクトルに、より寄与の大きいプレート間地震による低振動数(長周期)領域のスペクトルが重ねられていないのは、誤った判断によるものと懸念される。実際、過去、日本の原子力発電所において発生した地震被害は、その多くが低振動数(長周期)領域の寄与によるものである。Ss-L のスペクトルの低振動(長周期)領域は、免震重要棟以外の設備に対しても適用されるべきである。

Ss-L のスペクトルを Ss-1 や Ss-2 から分離せず、Ss-L の低振動数(長周期)側を包絡したスペクトルとして Ss-1 と Ss-2 のスペクトルが設定されるべきではないのか。あるいは、そのように修正された Ss-1 と Ss-2 の両スペクトルを包絡した単一の応答スペクトルを Ss として設定すればよかつたのではないのか。米国 NRC の規制指針(RG 1.165)にもそのような趣旨が規定されており、「プレート間地震によっては、震度 V 以上の地震の発生が推定されない。」との説明が、そのようにしないことの正当性として妥当であるとは思われない。

現に、低振動数(長周期)の帯域のスペクトルが非保守的だったことは、観測されており、必ずしもそのことが原因であるとは断言ができないかもしれないが、予想を超える大量のスロッシングによる溢水の事態も発生している。

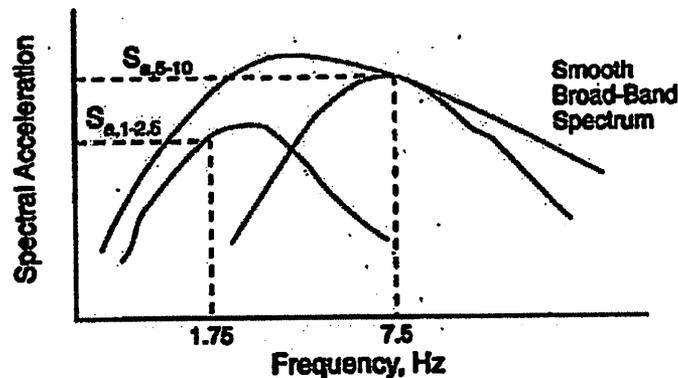


Figure F.3 Development of a Site-Specific SSE Spectrum

RG 1.165 付属書 F より

(3) 原子力安全基盤機構(2005)と日本原子力学会(2007)の一樣ハザード・スペクトルの信頼性が不明であり、非保守的である可能性もある。しかし、原子力規制委員会が、それらの策定プロセスにまで遡及し、客観的に適正さを検証したというエビデンスがない。

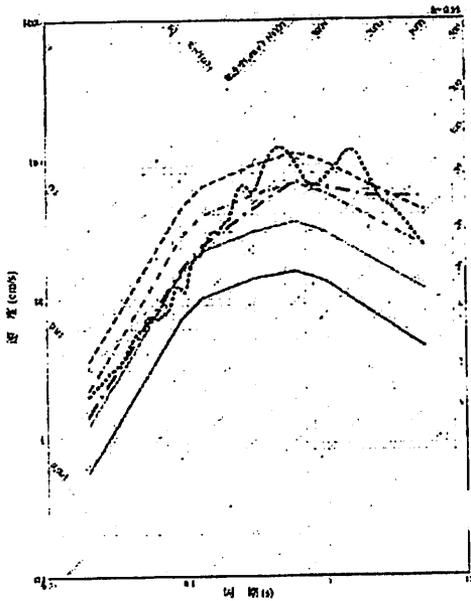
これらの一樣ハザード・スペクトルが、当時、どのような目的で、どのような知見とデータ、手法に基づいて作成されたものなのか不明である。特に東日本においては、これらの作成年以降に、設計基準地震の超過が多発しており、その後これらの一樣ハザード・スペクトルを見直す理由はなかったのだろうか。これらの一樣ハザード・スペクトルが非保守的であるとすると、川内原子力発電所に対する年超過確率「 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 程度」という最終的な評価も見直す必要がある。

米国ではNRCが、米国エネルギー省(DOE)と米国電力研究所(EPRI)との共同研究で、米国中東部における地震ハザードの確率論的な評価を行い、その成果をNUREG-2115としてまとめ、公開している。この内容とも比較した上で、上記の一樣ハザード・スペクトルに関しては、次の疑問と懸念がある。

- 原子力安全基盤機構と原子力学会の一樣ハザード・スペクトル(各、第 7.5.6.41 図、第 7.5.6.42 図)の違いが顕著であるにもかかわらず、それについて議論されていない。ともに同一対象である地震基盤に対する一樣ハザード・スペクトル(水平方向)なのであるから、互いに大差があるべきではない。原子力規制委員会はこれに注目し、それらの信頼性に対する見解を述べるべきである。
- 特に、原子力安全基盤機構の一樣ハザード・スペクトルは、米国中東部のそれと比べても低めであり、信憑性に疑いがある。

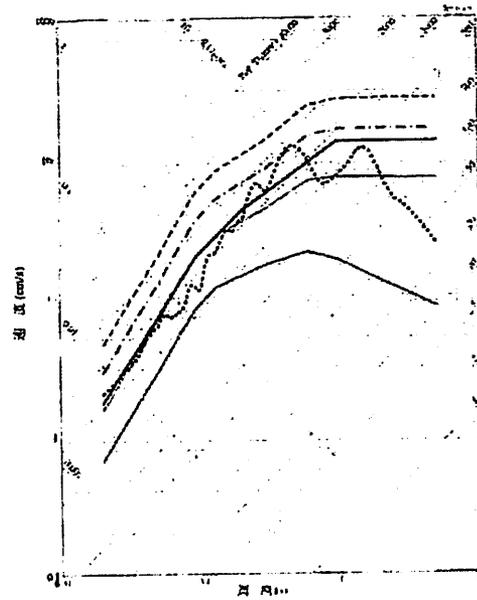
設置変更許可申請書(平成 26 年 6 月 24 日付一部補正)、第 7.5.6.42 図は、地震基盤における応答スペクトルであると説明されている。一方、同第 7.5.6.60 図は、解放基盤表面における応答スペクトルである。両図を比べると、2004 年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動のスペクトルと  $S_{s-2H}$  のスペクトルが、全く同じである。どちらか(第 7.5.6.42 図の方?)が誤りではないのか。

- - - - 震源を特定せず想定する地震動  
 (加藤ほか(2001)による応答スペクトル)  
 - - - - 震源を特定せず想定する地震動  
 (2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動)  
 ————  $10^3$ -様ハザードスペクトル  
 ————  $10^4$ -様ハザードスペクトル  
 - - - -  $10^5$ -様ハザードスペクトル  
 - - - -  $10^6$ -様ハザードスペクトル



第7.5.6.42図 震源を特定せず想定する地震動の応答スペクトル及び領域震源による地震動の一樣ハザードスペクトル(水平方向)

————  $S_0=1_0$   
 - - - -  $S_0=2_0$   
 ————  $10^3$ -様ハザードスペクトル  
 ————  $10^4$ -様ハザードスペクトル  
 - - - -  $10^5$ -様ハザードスペクトル  
 - - - -  $10^6$ -様ハザードスペクトル



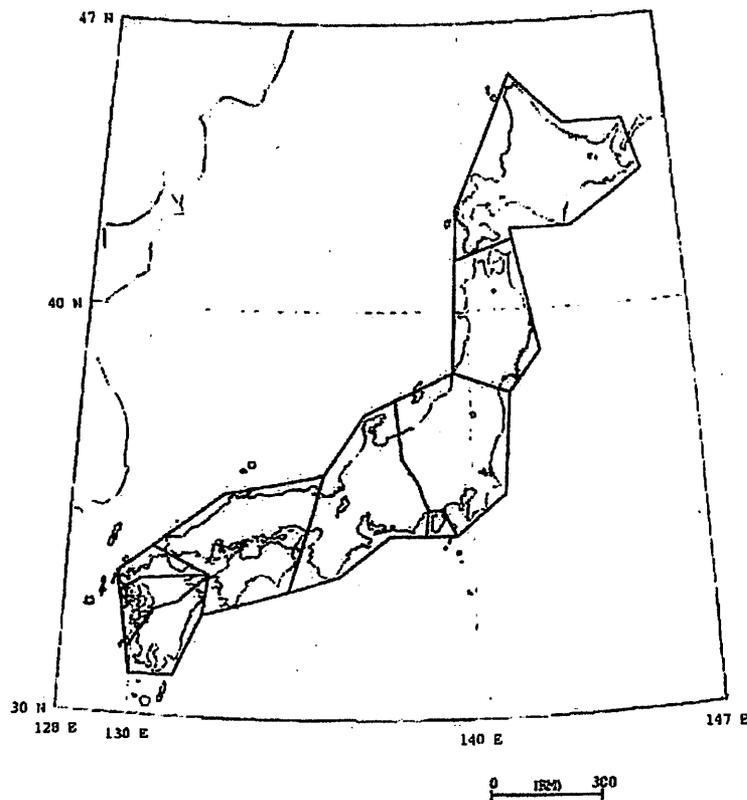
第7.5.6.40図 高準地震動の応答スペクトル及び解放蒸気表面における地震動の一樣ハザードスペクトル(水平方向)

(4) 原子力安全基盤機構(2005)による日本列島の領域区分は、余りにも大雑把過ぎる印象がある。福島第一、福島第二、東海、柏崎・刈羽が全て同一の区分、浜岡、志賀、若狭湾沿岸も全て同一の区分に属している、そのような広大な区分に対し、「一樣ハザード・スペクトル」を与えるというのは、かなり粗雑な印象がある。しかし、原子力規制委員会が、客観的にそれらの適正さを検証したというエビデンスがない。

設置変更許可申請書(平成26年6月24日付一部補正)、第7.5.6.42図は、日本列島を8つの区分に分けているが、中国・四国地方が大きな一区分であるのに対し、伊豆半島だけが一区分で、九州は3つの区分に細分されているなど、区分の基準が不可解で、申請書の本文にもその説明がない。因みに、同申請書(平成25年7月8日)、第7.5.6.45図は、地震調査委員会(2009)による領域震源の区分であり、両図の区分の仕方には顕著な違いがあるが、平成26年6月24日付一部補正により同区分図は削除されてしまっている。このことから、それでは前述の日本原子力学会(2007)の一樣ハザード・スペクトルは、どのような区分図に対応したものなのかという疑問が生じる。一方、米國中東部に対しても区分(Seismotectonic Zone)の設定はあるが、

NUREG-2115には、その根拠となる情報も含まれている。

原子力安全基盤機構(2005)による領域区分図を見る限り、志賀と浜岡に、同一の「一様ハザード・スペクトル」が適用されるということには違和感がある。また、伊方原子力発電所のある佐田岬半島には4つの区分が近接しており、わずかに離れた所に、互いに異なる「一様ハザード・スペクトル」が4つも存在することを示唆している。以上は、「一様ハザード・スペクトル」の信頼性に疑念を抱かせるように思われる。

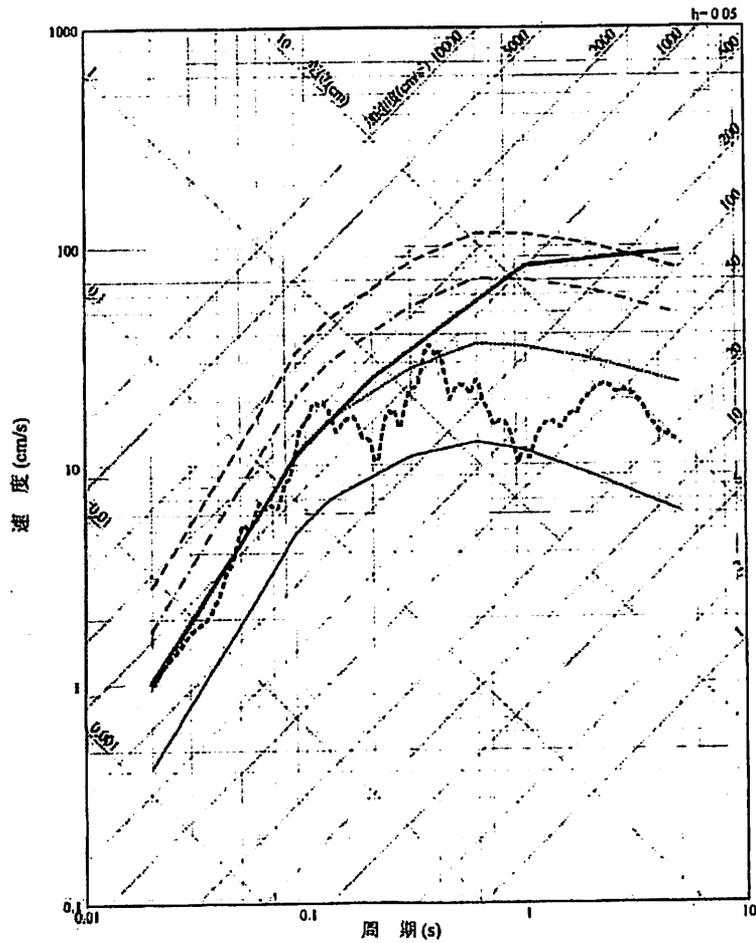
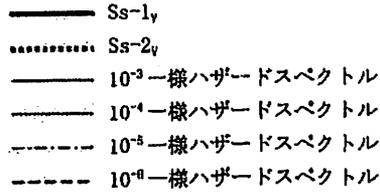


(5) 九州電力は、上記の一様ハザード・スペクトルとの対比に基づき、策定した基準地震動の年超過確率が  $10^{-4} \sim 10^{-6}$  程度、あるいは  $10^{-4} \sim 10^{-5}$  程度と総合的な評価を述べている。しかし、実際の図から、たとえば Ss-2(垂直方向)のスペクトルを読み取ると、むしろ  $10^{-3} \sim 10^{-4}$  と読み取られ、部分的には  $10^{-3}$  よりも大きいところさえある。この誤りについて、原子力規制委員会は指摘していない。

設置変更許可申請書(平成 26 年 6 月 24 日付一部補正)、第 7.5.6.61 図は、解放基盤表面における基準地震動の応答スペクトル(垂直方向)を示している。本図中、Ss-2V に注目した場合、本文にあるように、年超過確率が  $10^{-4} \sim 10^{-6}$  であると読み取ることはできない。

そもそも Ss-2 の応答スペクトル(水平方向も垂直方向も)は、激しいジグザグを含んだ生スペクトルであって、そのまま基準地震動の応答スペクトルとするには不自然である。なぜ Ss-1 の応答スペクトルと同じように、包絡する 4 本の線分として策定しなかったのか。あるいは、なぜ Ss-1 の

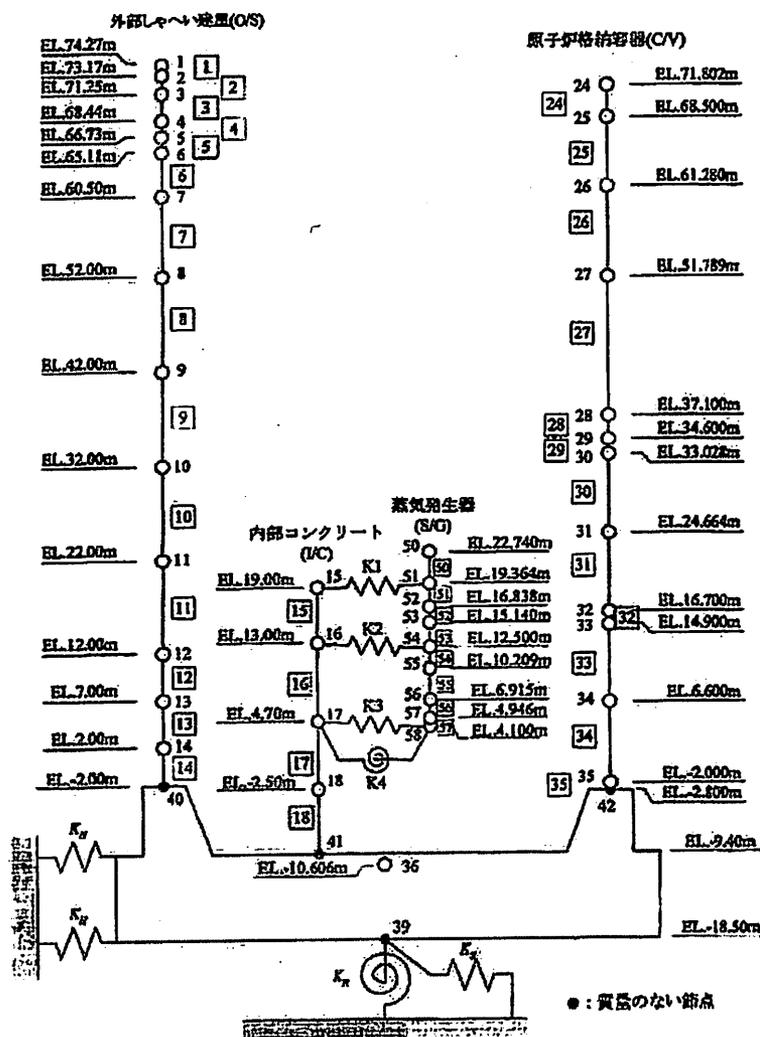
応答スペクトルに併合せなかつたのか。



(6) 原子炉格納容器の地震応答解析においては、地盤-建物相互作用 (SSI) が重要な要因となる。この要因に対する考慮は、工事計画認可申請書のモデル図においては見受けられるものの、水平方向ばねと回転方向ばねの特性が実際には与えられておらず、解析に反映されているのかどうか不明である。これが適切に解析に反映されていない場合、非保守的(実際の震動に対して過小評価)になっている可能性がある。

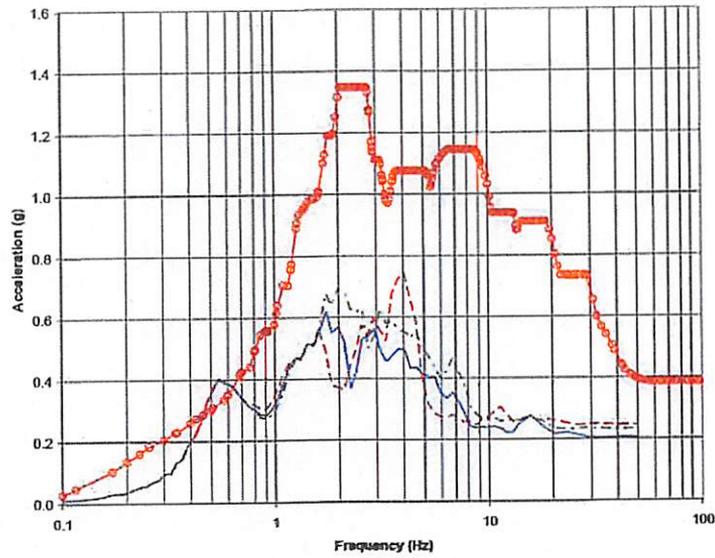
川内原子力発電所第1号機、工事計画認可申請書、添付資料3-7(設計用床応答曲線の作成方針)、第2-1図は、原子炉格納施設の地震応答解析モデル(水平方向)を示したものである。図中、 $K_H$ 、 $K_y$ は水平方向ばねであり、 $K_R$ は回転方向ばねであるが、これらに対してだけ第2-1表に

値が抜けている。そして、同申請書の一部補正(平成26年10月8日付)においては、第2-1図の質点の高さ(EL)の情報が全て消去され、第2-1表は全て削除されている。そのため、原子力規制委員会が、九州電力によるSSIの評価をどのように確認したのか不明である。

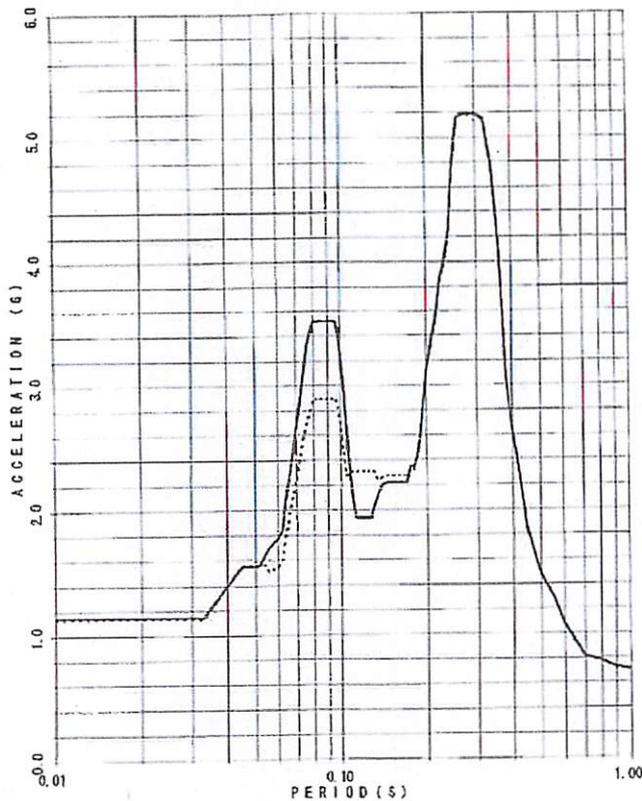


第2-1図 原子炉格納施設の地震応答解析モデル(水平方向)

SSIの解析が適切に行われていない場合、潜在的な低振動数(長周期)側(< 1Hz)の高い加速度が見落とされている可能性がある。現に、ヴォーグルの建屋には、SSIの感度解析により、低振動数(長周期)側(< 1Hz)に顕著な加速度のピークが発覚している。(下図、青、緑、紫の線)



他方、川内原子力発電所の建屋に対しては、下図のように解析が周期 1 秒 (1Hz) までで打ち切られ、潜在的な長周期 (低振動数) の帯域におけるピークに対する関心が見られない。



そのことによる問題の可能性の一つが、スロッシング周期との共振である。ヴォーグルの場合、下表のように周期が数秒 (表中の数字は振動数であるため、その逆数が周期となる) であるため、そのような可能性が現実的である。川内原子力発電所の場合にも、適切な SSI の感度解析を行い、スロッシングによるプール水の大量溢水が起こらないことの確認を行う必要がある。

Tank and Seismic Response Direction	Frequency Hertz
Fuel Area	
Fuel Pool, EW	0.39
Fuel Pool, NS	0.26
Fuel Transfer Canal, EW	0.68
Fuel Transfer Canal, NS	0.26
Cask Loading Pit, EW	0.39
Cask Loading Pit, NS	0.37
Cask Washdown Pit, EW	0.39
Cask Washdown Pit, NS	0.36

(7) 低振動数(長周期)側が過小評価されることで、タンク、プール、変圧器などのスロッシング現象や、燃料交換機、天井クレーン、気象観測塔など長スパンの設備や構造物、プールの内張りステンレス鋼板、低圧タービン、埋設配管、トレンチなど大きな変位が許容されない機器などへの影響が、過小評価となる。

低振動数(長周期)の地震動は、加速度は小さいが、変位量が大きいことが特徴である。それによって、過度な変形が起こり、プールの内張りステンレス鋼板が裂けたり、低圧タービンのタービン・ミサイルの発生頻度が増加したりする可能性が懸念される。

気象観測塔や(川内原子力発電所の場合には該当しないが)排気筒などの高い構造物の場合には、最大風速による風荷重とカルマン渦による励振に、地震荷重を重ねる必要があるが、この場合、風荷重によって固有振動数が低い側にシフトすることにも注意が必要である。

原子炉運転中の安全評価だけでなく、原子炉停止後に行われる燃料交換作業も考慮する必要がある。その場合、スロッシングによって、燃料交換機のマストには水平荷重が発生する。使用済燃料キャスクを取扱い中の天井クレーンに対する影響については、垂直方向の振動によって荷重が著しく増すことがないか、慎重な評価が必要である。

(8) 低振動数(長周期)大振幅の地震動が過小評価されることで、過酷事故対策や保安対策、自衛消防隊の活動にも不都合な事態が発生する可能性がある。たとえば、可搬式設備運搬用道路の損傷、防護柵ゲートの故障、建屋内非常灯の破損は、迅速な過酷事故対応を妨げる可能性がある。雪や火山灰が降積して固有振動数が低下している建屋屋上への地震荷重が増し、それが崩落した場合、下にある重要機器の破損を誘発する可能性がある。

(9) 地震による振動で、燃料被覆管周りの冷却水の沸騰状態(PWRにおけるサブクール沸騰を含む)に外乱が生じ、正の反応度が印加される現象が既知である。幸い、かつての事象では燃料破損には至っていないが、より激しい地震による振動で、炉心の熱設計に対する安全限界を超過し、大規模な燃料破損や原子炉圧力バウンダリーの損傷が生じることがないのか、確認すべきである。

スクラム作動の設定値未満の地震で、反応度印加の感度が斯くも高い場合があるという事実は重大である。突発的な反応度印加は、設計基準事故の一形態として幾つかのパターンが考慮され、事故解析が行われてはいるが、このようなパターンの解析が行われていない。

## 5. 結論

以下は、川内原子力発電所の耐震解析に見出される問題点に基づく結論であるが、川内原子力発電所のみならず、日本の全ての原子力発電所に共通している可能性がある。

- 米国の規制指針(RG 1.165)では要件となっている、低振動数(長周期)帯域のスペクトル成分に強大な遠方地震の寄与を含めることが欠落しており、非保守的な応答スペクトルが策定されてしまっている。激しいジグザグの生スペクトルをそのまま設計応答スペクトルとしている(Ss-2)のも不自然であり、包絡線分で設定すべきである。
- そのような非保守的な応答スペクトルを元に時刻歴波形が策定され、これに基づいて各建屋の設計用床応答曲線が策定されてしまっているため、その低振動数(長周期)側も非保守的になっている可能性がある。
- 一様ハザード・スペクトルの概念が、確率論的な評価の中で正しく展開されているのか疑念がある。原子力安全基盤機構(2005)が策定したものと、日本原子力学会(2007)が策定したものとの間には顕著な差異があり、前者は、米国中東部の一様ハザード・スペクトルと比べて低めとなっている。更に、地震基盤のスペクトルと解放基盤のスペクトルが混用されている可能性のあるところも見られる。
- 解放基盤における設計用の応答スペクトルが、一様ハザード・スペクトルに対する年超過確率が $10^{-4}$ ~ $10^{-6}$ 程度であるとの解釈に誤りがあり、国際的コンセンサスである年超過確率 $10^{-4}$ に適合していることが裏付けられていない。
- 一様ハザード・スペクトルの策定プロセスが、領域区分の設定の根拠についても含め、説明が欠落している。NUREG-2115 と同等の資料が存在し、その内容に対する審査もなされるべきである。
- 地盤-建物相互作用(SSi)が、適切に評価されていない可能性があり、それによって、低振動数(長周期)側の床応答スペクトルが、非保守的になっている可能性がある。
- 過去の被害や影響(新潟県中越沖地震、東北地方太平洋沖地震、米国)に関する知見の活用が不十分であり、地震による影響(加速度だけとは限らない)については、構造物の健全性に対してだけでなく、少なくともスロッシングや、タービン・ミサイル、反応度印加に対する寄与についても評価するべきであり、その目的のため、評価する床応答の振動数帯域は、1~100Hz(周期としては0.01~1秒)ではなく、0.1~100秒(周期としては0.01~10秒)に広げる必要があると思われる。

## 6. 参考資料

本書は、以下の図書に基づいて、題記に関する所感の一部と、それぞれの技術的な根拠を述べたものである。

- 九州電力株式会社が原子力規制委員会宛に平成 25 年 7 月 8 日付で提出した「川内原子力発電所の発電用原子炉設置変更許可申請書」、平成 26 年 6 月 24 日付による一部補正、及び平成 26 年 9 月 4 日付による一部補正、並びに、以上に対する原子力規制委員会の評価書(九州電力株式会社川内原子力発電所の発電用原子炉設置変更申請書(1号及び 2 号発電用原子炉施設の変更)の核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律に規定する許可の基準への適合について)。
- 九州電力株式会社が原子力規制委員会宛に平成 25 年 7 月 8 日付で提出した「工事計画認可申請書(川内原子力発電所 1 号機の変更の工事)」、平成 26 年 9 月 30 日付による一部補正、及び平成 26 年 10 月 8 日付による一部補正。

著者が、上記図書の内容と結論の適正さを考察、検討するに当たって拠り所にした資料、および情報には以下が含まれる。

- A) 米国原子力規制委員会(NRC)の規制指針 RG 1.165 "Identification and Characterization of Seismic Sources and Determination of Safe Shutdown Earthquake Ground Motion", Rev.0 March 1997
- B) 米国エネルギー省(DOE)、米国電力研究所(EPRI)、NRC の共同研究にもとづく報告書、NUREG-2115(DOE/NE-0140, EPRI 1021097) "Central and Eastern United States Seismic Source Characterization for Nuclear Facilities"(2012)
- C) 米国ジョージア州 Vogtle 原子力発電所 3、4 号機の増設に向けて、事業者(Southern Nuclear Power Company)が、NRC に対して提出した予定敷地に対する事前認可(Early Site Permit)の申請書のうち、Part 2(敷地に対する安全解析書 Site Safety Analysis Report)
- D) 国際原子力機関(IAEA)の安全指針である NS-G-1.6 "Seismic Design and Qualification for Nuclear Power Plants"(2003)
- E) 2007 年新潟県中越沖地震と 2011 年東北地方太平洋沖地震を含む過去の日本の原子力発電所における地震による被害に関する情報、およびそれらに係わる全般的考察
- F) 米国のノース・アンナ原子力発電所の運転事業者から NRC に提出された不適合報告書(LER)2011-003-00 "Dual Unit Reactor Trip and ESF Actuation During Seismic Event With a Loss of Offsite Power" (2011 年)