

## 8.16宮城県沖地震と耐震指針の見直し

2005.9.29 柏崎市庁舎にて 湯浅欽史

\* 自己紹介：1967-1998、東京都立大学土木工学科、力学専攻

\* 今日の話：【 】8.16宮城県沖地震と女川原子力発電所

【 】耐震指針検討分科会での審議状況

【注】右詰めの中括弧内は、図の出典を示す

### 【 】8.16宮城県沖地震と女川原子力発電所

#### (1) 地震の概要(気象庁発表)

< 図-1 9/14地震調査委員会 気象庁作成(1) >

政府の地震調査委員会は2003年「30年以内に99%の確率でM7.5前後の地震が宮城県沖に起き」と想定した。今回の8.16地震はM7.2だったので、そのエネルギーは想定されていた宮城県沖地震M7.5の約35%と思われる(グーテンベルグ・リヒターの式による)。

A 震央分布図(2002年以降)領域 a 内の断面図によって、震源が西下がり帯に分布していること、ならびに、8.16本震M7.2/9.12余震M4.7の位置関係、および8.16地震M6.3/8.31地震M6.3と本震との立体的位置関係がわかる。

領域 b 内の時空間分布図によって、本震の東西に余震がばらついていて、時間経過とともにこの領域中の歪が収まっていく様子がうかがえる。

領域 b 内のM-T / 回数積算図の二枚(2002年以降および8.15以降)によって、定常的な小地震活動と(周期的な)大地震の発生、その収束過程がうかがえる。9.12最大余震の位置に注意。

B 震央分布図(1923年以降)および領域 c 内のM-T 図は、M7.1超の過去5地震の場所的・時間的関係を示している。

#### (2) 女川原発で設定していた地震(動)との比較

			地震規模 M	震央距離 (km)	時系列の 最大加速度 振幅(gal)	時系列の 最大速度 振幅(kine)	申請書の 計算速度 (kine)*
最強 地震動 S1	過去の地震	1897仙台沖	7.4	48	250	20.1	7.9
		869三陸沿岸	8.6	201			5.4
		該当なし	-	-	-		
限界 地震動 S2	活断層	海底活断層F6	6.2	12.1	325	26.6	6.9
		海底活断層F7	6.5	21.0			6.3
	地震地体構造	宮城沖プレート	7.6	20			10.8
	直下型地震		6.5	10(=X)	375	13.5	13.4
8.16 地震(動)		宮城沖プレート	7.2	73	284**	(未発表?)	-

gal=cm/s<sup>2</sup>、地球の重力加速度(1G)=980gal (cf. f = m 力 = 質量 × 加速度)

kine=cm/s、

\* : 女川原子力発電所原子炉設置変更許可申請書(2号原子炉の増設)、第5.6-1表、1987年、で、いわゆる金井式によると思われる。その左2欄は「指針策定前の原子力発電所の耐震安全性」、資源エネルギー庁、1995年。なお、1978年策定指針に基づく申請書記載S1地震動の最大速度

振幅7.9kineが、1995年の安全性確認結果で20.1kineとされた経緯は明らかでない。

\*\* : はぎとり波のEW方向(図-6、後述)

今回の8.16地震を耐震設計用の最強地震動S1(後述)と比較すると、規模は小さく(M7.2<M7.4)かつ遠い(73>48)にもかかわらず、地震動は大きかった(284gal>250gal)。S1用の地震を想定する方式に問題があったのか、あるいは想定地震から地震動を推定する計算式に誤りがあるのか、どちらかと考えられる。

		時系列の最大 加速度(gal)	速度応答スペクトル(図-6) の周期0.05秒での読取り値	
			加速度(gal)	速度(kine)
最強地震動S1		250	438	3.5
限界地震動S2	プレート型S2-D	325	570	4.5
	直下型S2-N	375	673*	5.4
8.16地震動		284**	888*	7.0

倍率(=観測値/設計値) 1.32 1.30

\* : 新聞発表の値

\*\* : はぎとり波のEW方向(図-6、後述)

耐震設計用限界地震動S2を超える破壊作用を受けているので、固有周期の短い(0.05秒付近)機器・配管類が、破断に至らないとしても、損傷を受けた可能性が高い。それ以上に重大なのは、現状では既設のすべての原発が同じ可能性を持っていることになり、上記の地震および地震動の推定方法への疑念とともに、【 】で述べる耐震指針見直しに反映される必要がある。

### (3) 女川原発1号機の地震計 - 保安確認用と岩盤用

<図-2 26回耐震分科会 東北電力資料 7頁>

保安確認用の地震計は1号機の原子炉建屋地下2階基礎版(OP+2.3m)上に2個設置されている。なお「OP」とは、女川基準での標高を示す記号である。

今回観測された最大加速度の値(単位gal)は次の通りである。

	NS(南北)	EW(東西)	UD(上下)
トラス室	251.2	195.3	133.4
CS(B)室	221.6	181.5	120.2

この値によって点検方針を決める。今回は大幅に越えたので、定期点検並みの検査を実施している、とのことであった。

また、ほかに波形を記録しないトリップ用地震計が各原子炉建屋に設置されており、設定値200galを超えると緊急自動停止(スクラム)する。今回は3炉ともスクラムした。

<図-3 53回原子力安全委員会 添付資料1 図1>

構造物や機器・配管類の耐震設計は、解放基盤表面(後述)を基準とする地震動によって、規定されている。この設計用地震動との比較のために、女川原発では解放基盤表面相当位置とされるOP-8.6mに地震計が設置されている。なお、岩盤中を地震波が伝播する状況を把握するために、地表付近から約150mの深さまで、4個の地震計が設置されている(図-3)。

OP-8.6mで観測された加速度波形の最大値(gal) : NS233 / EW221 / UD112

#### (4) 「はぎとり波」とは

震源から発した地盤振動が原発サイトに到達したときの地震波は、それが通過してきた地質・地盤のせん断波速度に影響される。女川原発サイトのせん断波速度は、地表付近が1000m/s、深いところで2600m/sである。そこでサイト共通の耐震基準としては「ある程度の硬さの地盤が地表面に露出している」と仮想した場所で、設計用地震動が規定されている。女川では「硬さ」としてせん断波速度1500m/sが選ばれている。この仮想した場所を「解放基盤表面」と呼ぶ。

もう一つの問題は、多くのサイトでは、解放基盤表面の上に柔らかい表層地盤があって、その上に原発建屋が載っていることが多い。女川原発では、OP-8.6mが「解放基盤表面相当位置」とされている。地表はOP+18.7mなので、厚さ27.3mの表層地盤が解放基盤表面に被さっている。表層地盤の揺れによってエネルギーが吸収されるので、OP-8.6mでの観測値はそれがない場合に比べて小さくなっている、と考えねばならない。

それゆえ、8.16地震が設計用地震動を超えていたか否かを判定するには、OP-8.6mでの観測値を用いて解析し、表層地盤がなかったときの地震動を求める必要がある。その解析結果を「はぎとり波」と呼ぶ。はぎとり波と設計用地震動の大きさを比較することになる。

< 図-4 9/2東北電力(参考資料3) 14頁 >

はぎとり波の加速度波形の最大値(gal) : NS235 / EW284

#### (5) 耐震設計用地震動 : S1とS2

現行の耐震指針では、「弱・強」二種類の基準地震動を規定している。重要な構造物・機器類は、最強地震動S1によっては弾性的挙動の範囲内にとどまり、地震が過ぎ去った後には元と同じ状態に戻ることが求められている。それを越える限界地震動S2に対しては、弾性状態を超えて塑性状態になり、元と同じ状態には戻らなくなる。S2によって変形やひび割れ等を被ってもよいが、必要な機能を保持して、敷地境界での放射能の放出を小さくすることとしている。

女川における最大加速度として、S1は250gal、S2は325gal、直下型地震S2-Dは375galと規定されている((2)の表を参照)。

ある瞬間にかかる力は加速度( $\text{cm/s}^2$ )で表されるが、地震動の周期と構造物等の固有周期が一致する共振現象を別にしても、地震動の破壊作用は時間の長さにも依存している。そこで78年指針以降は、[加速度×時間]すなわち速度、カイン( $\text{cm/s}$ )で設計地震動を規定している。構造物等の固有周期に対する速度応答スペクトルを規定し、それを用いて作成したS1模擬地震動およびS2模擬地震動に対して、構造物等の設計をすることとしている。

< 図-5 9/2東北電力「お知らせ」注\*2 >

「応答スペクトル」とは、設備の固有周期の違いによって揺れの強さがどのように異なるかを示すものである(図-5の説明を参照)。

#### (6) はぎとり波の速度応答スペクトル

< 図-6 26回耐震分科会 東北電力資料 6頁 >

8.16地震での女川原発1号機について、はぎとり波の速度応答スペクトルと、最強地震S1ならびに限界地震動S2の速度応答スペクトル(折れ線図)を図-6に示す。この図の周期0.05秒の点で読取った加速度と速度の値を、前記(2)の表にいくつか記した。

このはぎとり波の速度応答スペクトルを見ると、周期0.4秒付近でS1を超え、また周期0.05秒付近では加速度も速度も、S2も超えていた、との解析結果になっている。耐震設計指針の規定を超える地震動を受けていた((2)の表参照)、ということになる。固有周期の短い(固有振動数の高い)機器類が損傷を受けた可能性が高い。

### (7) 建屋用の地震計

1号機建屋には、基礎版(OP+2.3m)に4個、1階(OP+15.0m)に2個、5階(OP+44.7m)に4個、屋上(OP+61.575m)に2個、の建屋用地震計が設置されている。これらの観測データを解析することによって、建屋や建屋内の構造物や機器・配管類などが受けたと思われる力や変形を計算でチェックし、地震後の健全性を評価することとしている。

<図-7 26回耐震分科会 東北電力資料 9頁>

1号機建屋観測用地震計の最大加速度(gal)

	NS	EW	UD
基礎版上	263	194	164
1階	326	243	177
5階	910	714	445
屋上	1449	1424	525

東北電力の説明によると、基礎版上での加速度観測値、NS263はS1応答値を超えている、とのことである。(ただし、解放基盤表面OP-8.6mに耐震設計用の250gal入力したときの応答加速度が、基礎版OP+2.3mでいくらの値(設計値)になるかは明示されていない)

速度応答スペクトルについては、基礎版上の周期0.4秒付近でS1を超え、屋上の周期0.15秒付近ではS2を超えていることが読み取れる。なお、屋上には機器類が設置されていない。

<図-8 26回耐震分科会 東北電力資料 10頁>

## 【 】耐震指針検討分科会での審議状況

### (1) 経緯について

1995.1.17阪神淡路大震災(M7.2)がきっかけとなり、土木構造物や建築物の設計基準を見直す気運が高まった。さらに2000年の鳥取県西部地震では、活断層がないとされてきた地域でM7.3の大地震が発生した。現行の耐震指針では、文献等の記録がある歴史地震と、地形・地質から読み取れる活断層とを主要な根拠として、最強地震動S1と限界地震動S2を規定している。したがって地震空白地帯では、小さな地震しか設定されないことになる。この事情は昨秋の新潟県中越地震にも通じる。今回の見直しでは、限界地震動S2を超える事態にどう対処するのか、および空白地帯での地震動をどう設定するのか、の二つが大きな課題になる、と思われる。

原子力安全委員会の原子力安全基準・指針専門部会は、2001年7月から、地震・構造物・機器類等の専門家19名を委嘱して、耐震指針検討分科会を発足させた。すでに4年を経過し、まとめの段階に入りつつある。以下、この間の論点のいくつかを紹介する。安全委員会事務局が作成した、基準地震動の策定フロー(案)を図-9に示す。

< 図-9 26回耐震分科会 [26-3] 13頁 >

### (2) 決定論的設計法 / 確率論的設計法

現行指針では、サイト毎に設計用模擬地震動を作成し、構造物や機器類に作用する外力の大きさを確定する。その外力によって発生する「応力」等が材料固有の「強度」を安全率で除した許容応力以内に収まるように設計する。これは「決定論的設計法」と呼ばれる。

他方「確率論的設計法」では、構造物や機器類の耐力を外力を超えて破壊に至る確率を、ある値以内に収める。外力が確定値なら、頑丈に作るほど破壊確率を小さくすることができる。また、外力がばらつく場合には、外力を大きく規定しておくほど、実際に起きる外力がその規定値を超える確率は小さくなる。

今回の見直し作業で、地震力を現行の枠内で大きくしたのでは、決定論的設計法では対処し難いとの懸念から、確率論的設計法の導入が企図されているのではないかと推測される。その導入が認められれば、破壊するか否か / 安全か否かではなく、どのくらい小さな破壊確率ならば社会的に受容されるのかという問題に、原子力発電所の安全性に関する議論を移し替えることができるのだから。

外力を固定し、部材の寸法や強度を確率的に取り扱う試みがかなり行なわれてきており、計算手法が整備され、多くのデータが蓄積されてきている。しかし、外力としての地震力を確率的に取り扱うには、めったに起らない大地震のわずかな実証データに基づいて、百万分の一とか千万分の一とかいう極低確率の事象の生起確率を定量的に判定しなければならない。その上、実施例数も一般産業施設に比し何桁も少なく、実証性は無きに等しい。原子力発電所の耐震設計を確率論的に扱うことには、そのような原理的な困難が付きまとう。

安全委員会の事務局が作成した案では、確率論的手法を設置許可の直接の判断事項とはせず、参照事項としている(図-9右端の点線枠)。

### (3) 弾性設計の位置づけ

現行指針では【 】(5)で述べたように、最強地震動S1を受けても弾性状態にとどまることを基本とし、それに付加して、限界地震動S2でも機能が維持されることとしている。今回の見直しでは、(S2より大きな?)基準地震動Ssによっても機能維持が保たれること、を中心に据え、住民の不安を払拭したい、という方向でほぼ固まりつつある。

とはいえ、材料が降伏限界を越えて塑性状態に入り、破断せずに部材が大きな変形を生じる過程を解析的に計算していくには、複雑で膨大な数値計算を要するという時間的・経済的な制約がある。そのうえ、実用に耐えうる簡潔な弾-塑性理論には大胆な単純化仮定が不可欠で、論理的に十分明晰であるとは必ずしもいえず、そこでの計算に必要な材料物性の値も、データ蓄積・信頼性が弾性定数に比し圧倒的に小さい。構造物等の力学的挙動(力と変形の対応関係)を明確に把握しておくことの重要性から、分科会の議論は、(Ssより小さな)ある程度までの地震力に対しては弾性範囲内にあることを、副次的に確認しておくことが必要ではないか、という方向で審議されている。

#### (4) 設計用地震動を二種類とするか否か

これは、上記の弾性設計用に、Ssよりも小さな地震動を、Ssとは独立に規定しておくのか、という論点である。現行では地震の再来期間が1万年と5万年と、二種類の地震動を、S1およびS2として独立に規定している。

地震の専門家からは、地帯構造論等を勘案して、あるサイトで可能性ある“目一杯”の地震動を想定することは可能だが、それとは別に再来期間等で区別される小さな地震動を想定することは困難である、との意見が強い。図-5を見ても分るように、S1とS2とでは単に大きさだけでなく、周波数による応答特性も異なっている。だからこそ大きさも性質も異なる二種類の地震動を必要とするとの意見もある。しかし大勢としては、基準地震動Ss一種のみとし、工学的判断としてSsの(=1/2~1/3)倍の地震動を用いて、補足的に弾性内にとどめる応答計算を実施しよう、という流れにある。

その場合の値をサイト毎に決めるのか、あるいは構造物等の種類毎にきめるのか、そうではなく一律の値とするのか、今のところ意見は広く分布している。

#### (5) 既設原発への適用

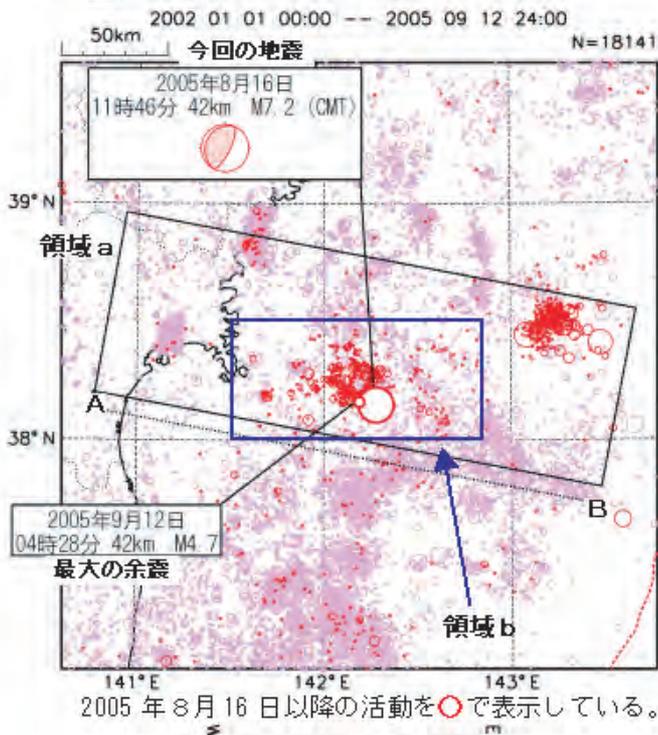
多くの関係者に最も関心を持たれている論点であるが、審議は未だ入口に至っていない。

ここ数年の原子力発電所をめぐる出来事で、シュラウドのひび割れや溶接部の欠陥や配管の減肉などが次々に明らかになってきている。中性子照射で原子炉材料が劣化する、熱応力疲労の進行、ステンレス被覆の下のひび割れなど、30年を経て原発の老朽化が進行し、定期検査での労働者被曝が増大しているが、それでも検査では発見しえない欠陥が残らざるをえず、安全評価の解析の基となるべき現状把握は容易ではない。現在の健全性が不明確な既設原発に、限界地震動S2を超える基準地震動Ssを規定することが、耐震指針の見直しでは求められている。

既設の原発に直接利害関係をもつ住民や自治体から、これからの審議への意見表明が待たれる論点であると思う。

8月16日 宮城県沖の地震

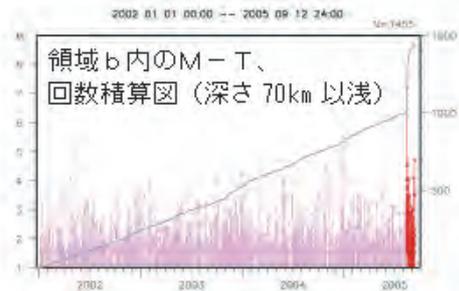
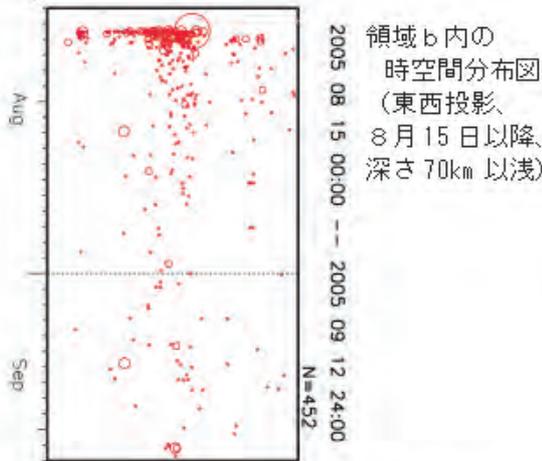
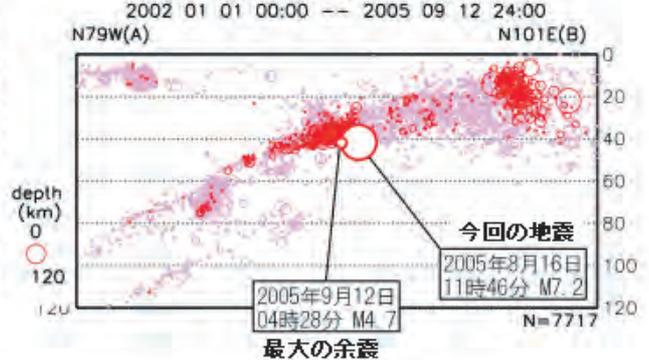
【A】震央分布図（2002年以降、 $M \geq 1.5$ ）



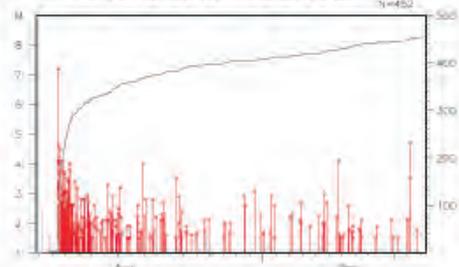
2005年8月16日11時46分に宮城県沖の深さ42kmでM7.2（最大震度6弱）の地震が発生した。発震機構は西北西-東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で、太平洋プレートと陸のプレートの境界で発生した地震である。

余震活動は次第に減衰しているが、24日頃からは余震域から東北東に約100km離れた場所で活動が活発化した。また、9月12日にはこれまでの最大となるM4.7（最大震度2）の余震が発生している（【A】）

領域a内の断面図（A-B投影）



領域b内のM-T、回数積算図（8月15日以降、深さ70km以浅）



今回の地震の震源付近では1936年および1978年宮城県沖地震が発生している。（【B】）

【B】震央分布図（1923年8月以降、 $M \geq 6.0$ ）

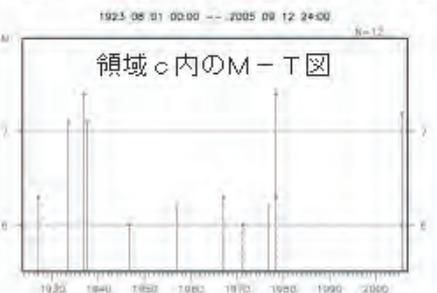
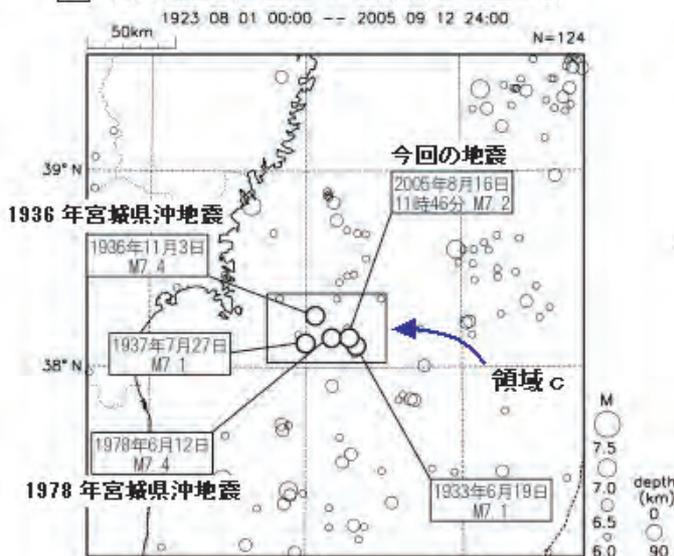
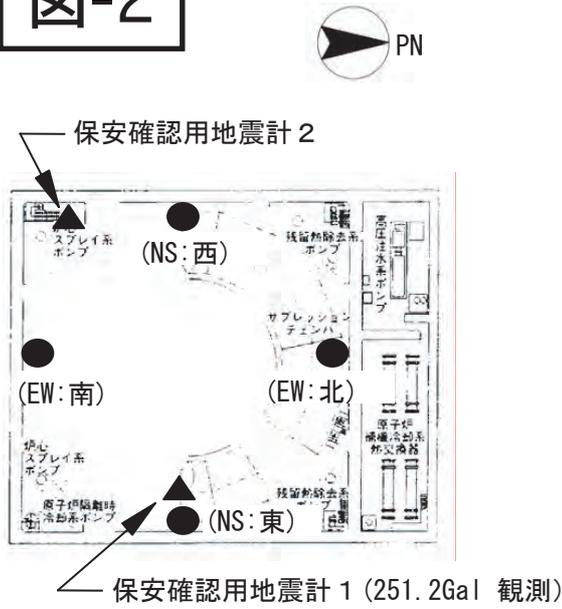
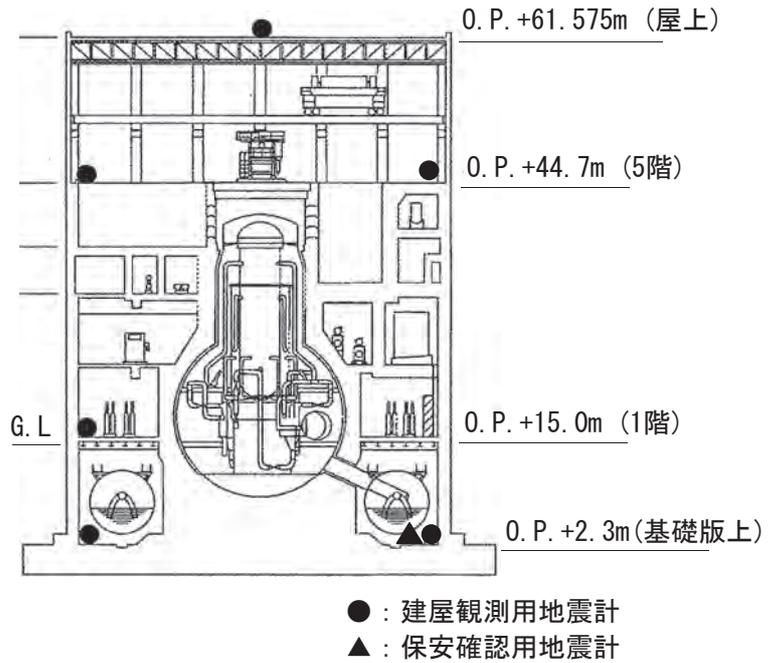


図-2

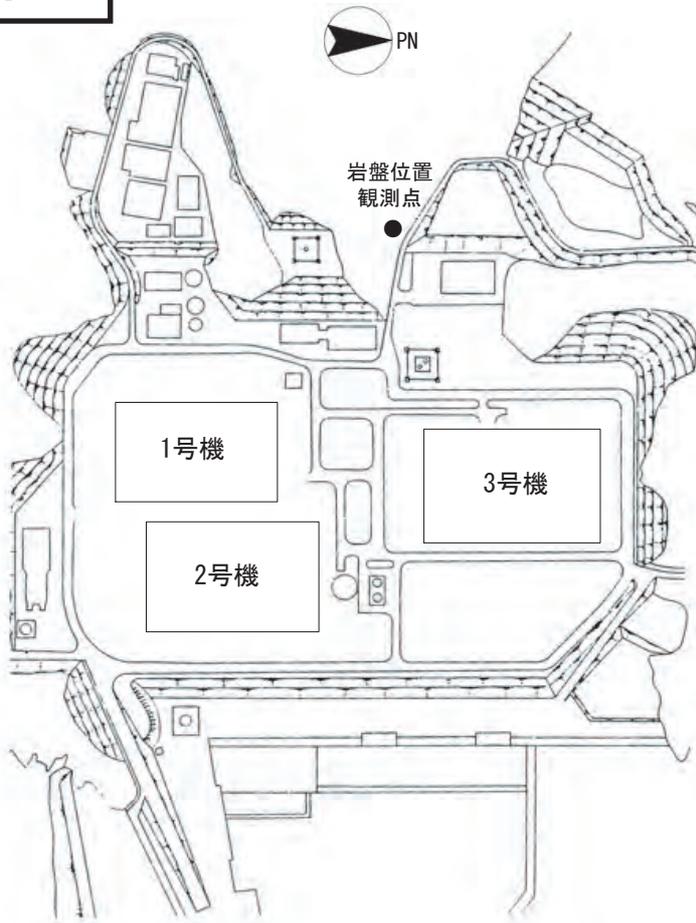


1号機原子炉建屋平面図  
(基礎盤上O.P. +2.3m )

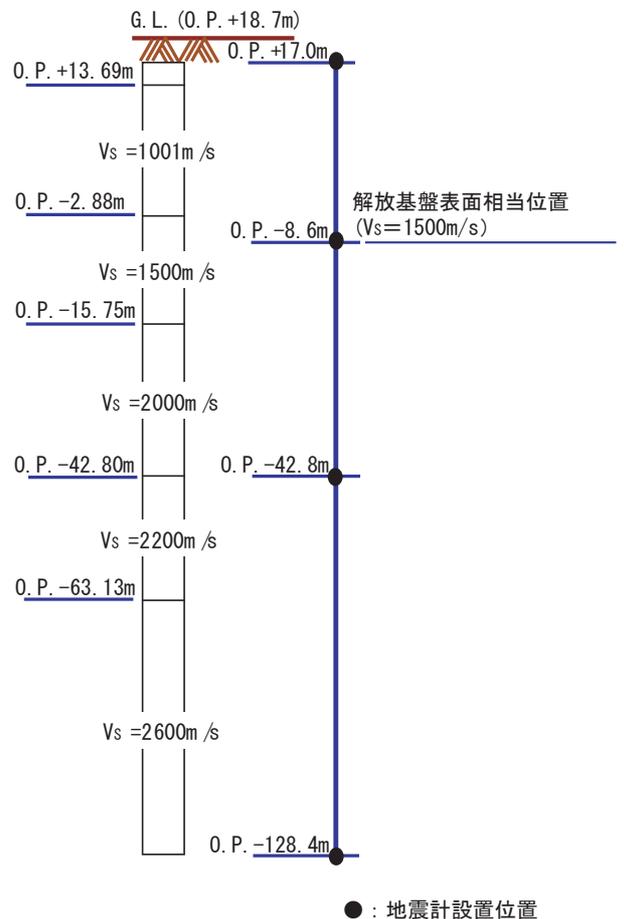


1号機原子炉建屋断面図

図-3



岩盤地震計位置図

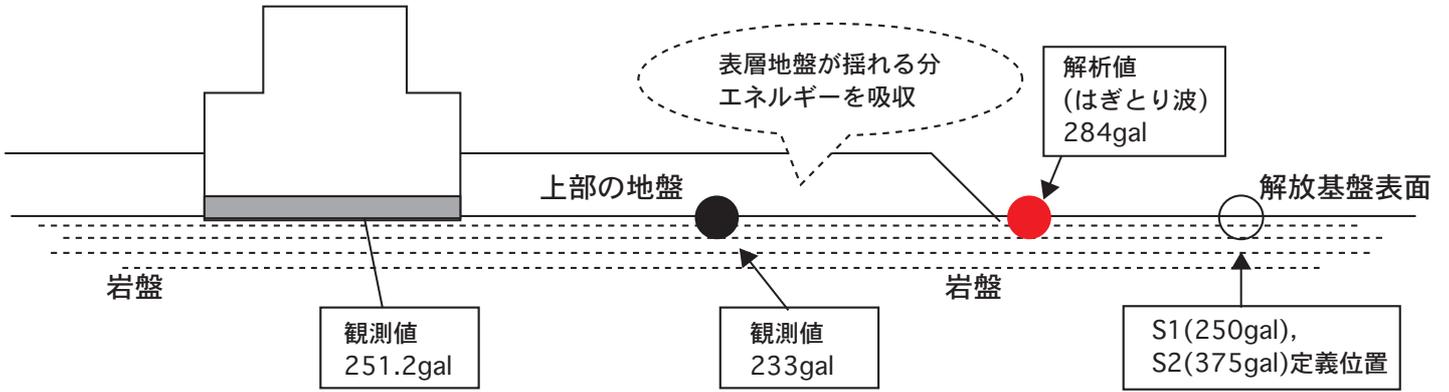


深さ方向の地震計位置

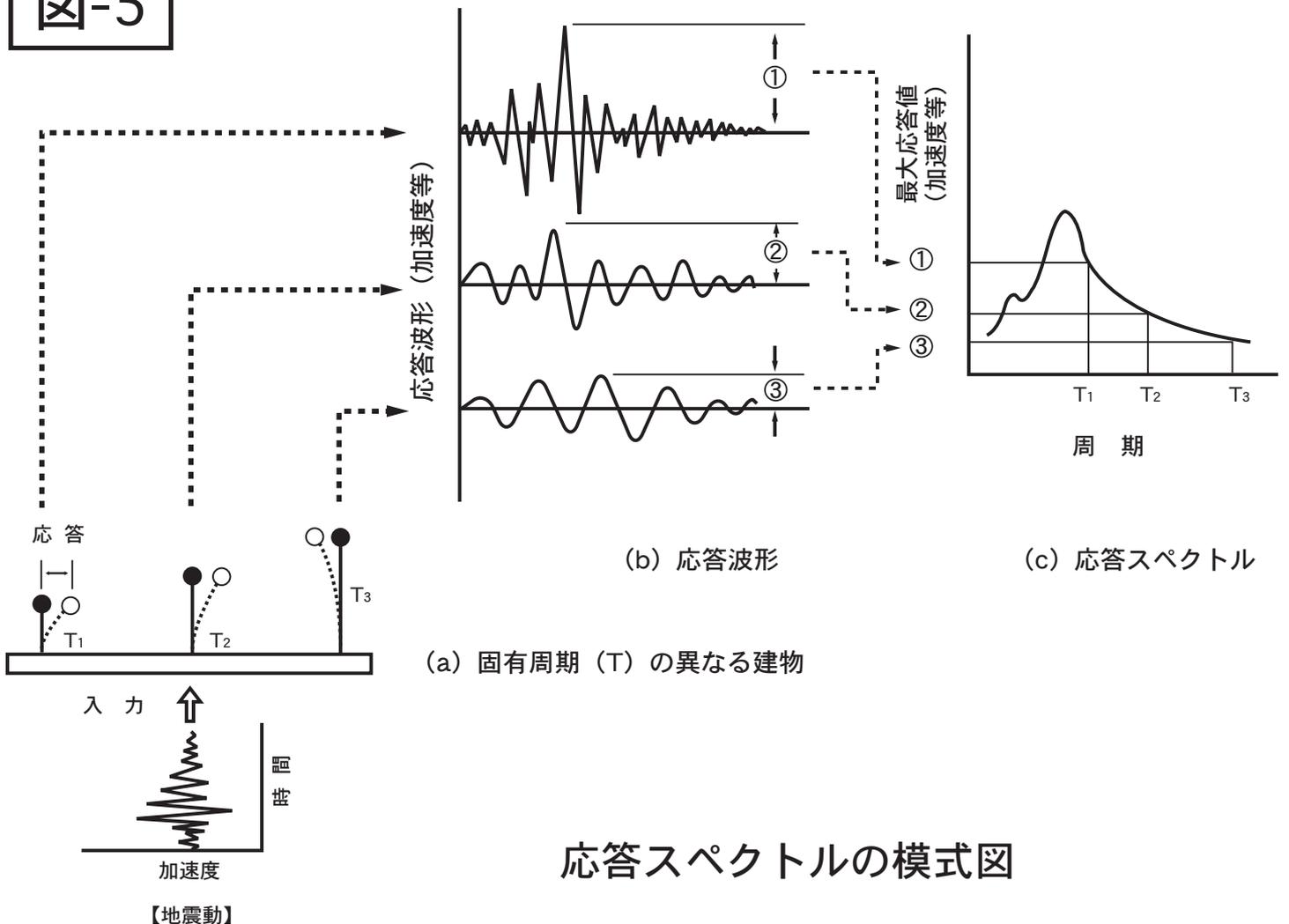
# 図-4

解放基盤表面：

固い岩盤が広がりを持ってむき出しになっている状態。つまり、岩盤の上に載っている上部の地盤や建物の振動による影響を全く受けない岩盤の表面。

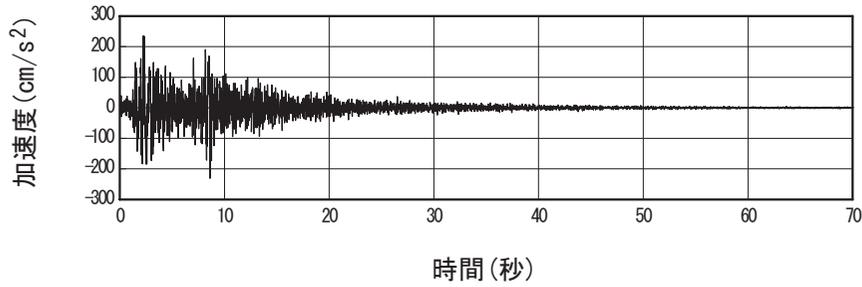


# 図-5

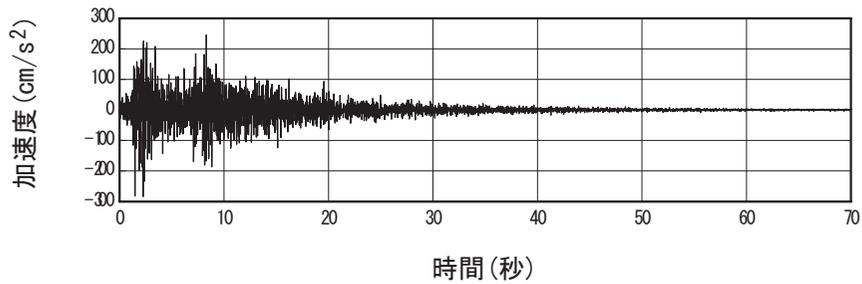


応答スペクトルの模式図

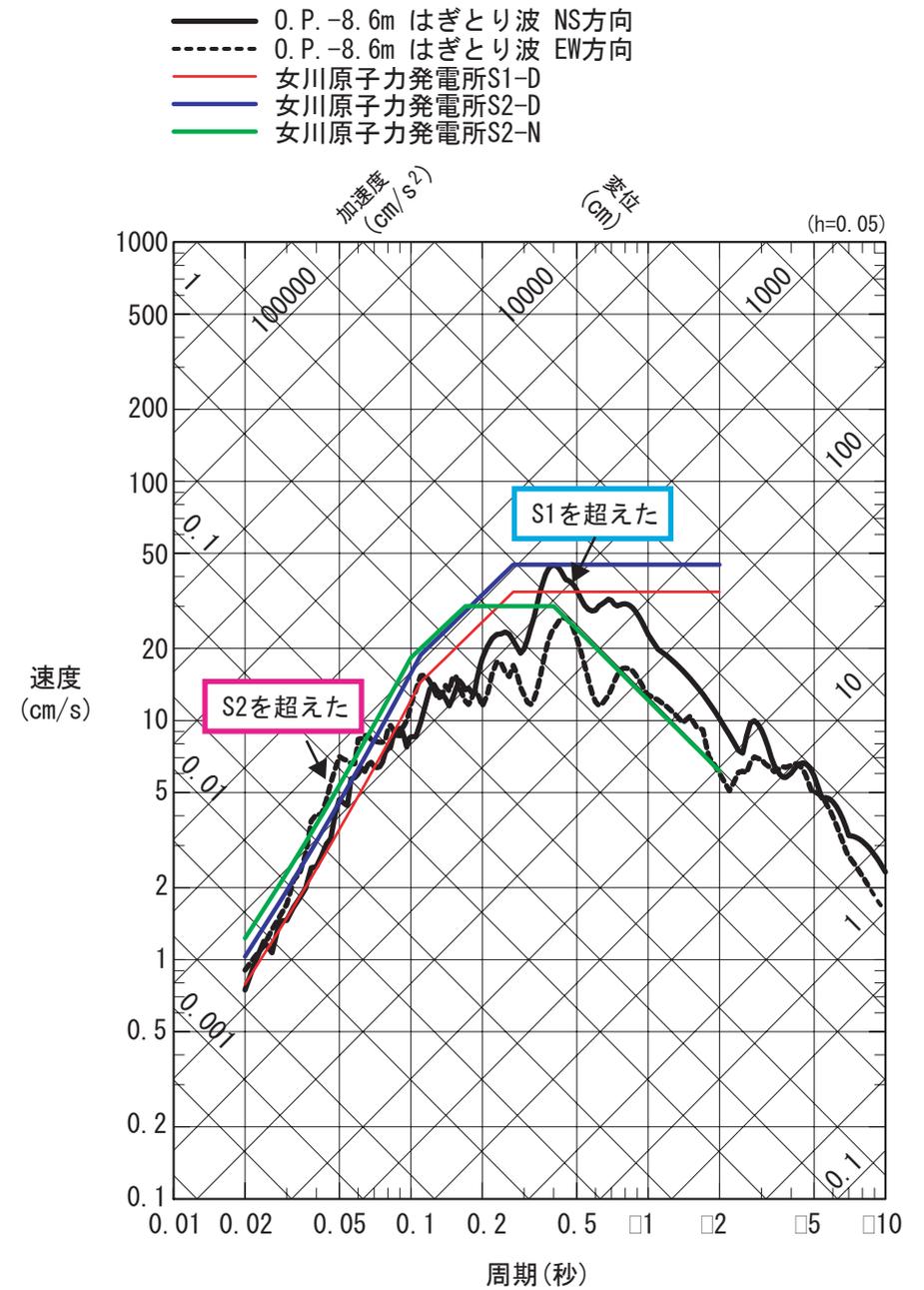
図-6



O.P. -8.6m はぎとり波 加速度波形 NS方向 MAX=235Gal



O.P. -8.6m はぎとり波 加速度波形 EW方向 MAX=284Gal



はぎとり波の応答スペクトル

図-7

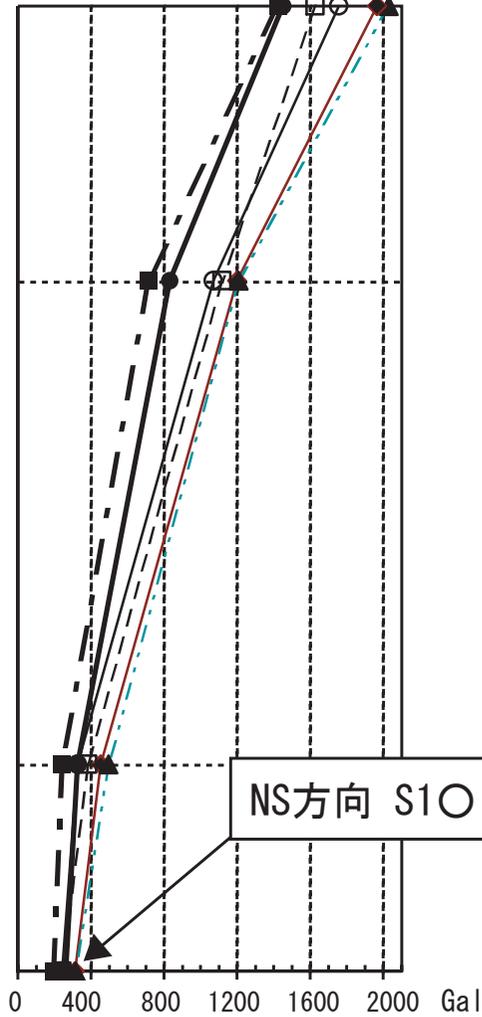
- ◆— NS S2応答
- NS S1応答
- NS 観測波
- -▲- - EW S2応答
- -□- - EW S1応答
- -■- - EW 観測波

屋上  
O. P. +61.575m

5階  
O. P. +44.7m

1階  
O. P. +15.0m

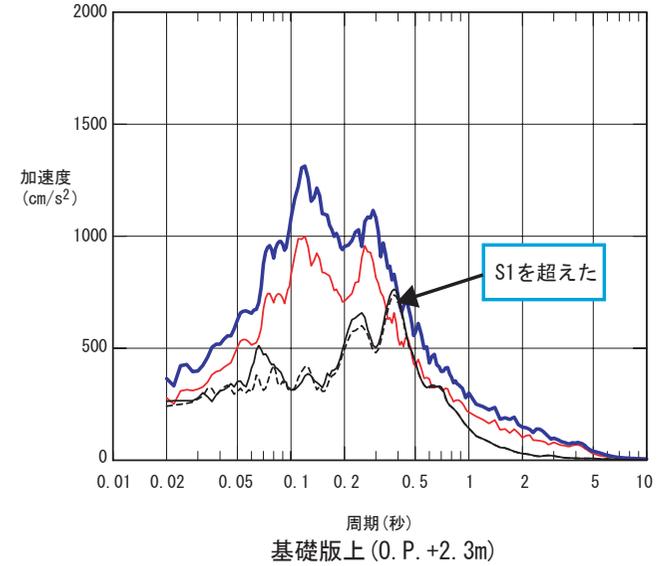
基礎版上  
O. P. +2.3m



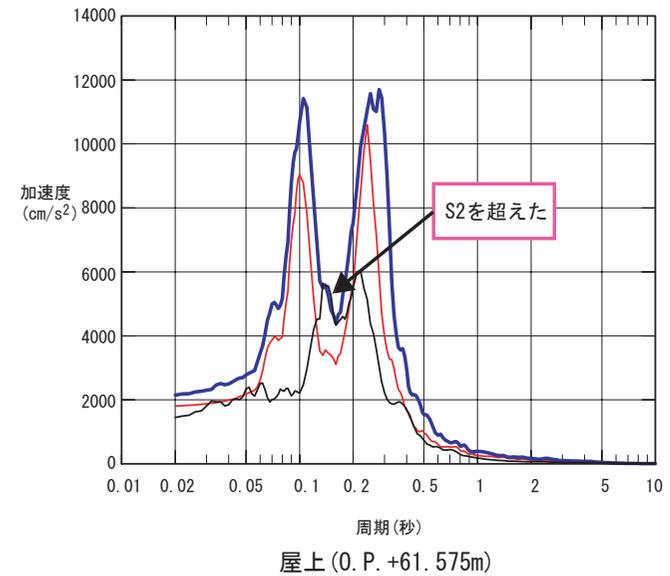
観測記録の最大加速度分布  
女川1号炉原子炉建屋

図-8

- S1応答
- S2応答
- 観測記録(東)
- - - 観測記録(西)



- S1応答
- S2応答
- 観測記録



# 図 基準地震動の策定フロー（案）

（震分第16-4号 図-1 基準地震動の策定フロー（案）を加筆、修正）

