本件発電所の地震に係る安全性について

令和元年5月16日

日本原子力発電株式会社

総論

○本件発電所では、設計から現在に至るまで一貫して、詳細な調査結果を踏まえた検討を行い、想定される自然現象に対して安全性を確保できるよう必要な対応を講じている。

○マグニチュード９の巨大地震である2011年東北地方太平洋沖地震を経験した現在においては、本地震の前から蓄積されている知見等に加えて、本地震に関する国内外の知見や敷地で得られた豊富な地震観測データを用いて、地域的な特性を高い精度で把握した上で十分に安全側の地震動評価を行い、耐震安全性を確保している。

目次

1　本件発電所における地震に係る安全確保の考え方
　1－1　地震に係る安全確保の考え方
　1－2　地域的な特性を詳細に把握するための各種調査の取り組み
　1－3　巨大地震に関する知見
　1－4　安全側の地震動評価結果の例

2　地震の起こり方と地震による揺れの評価

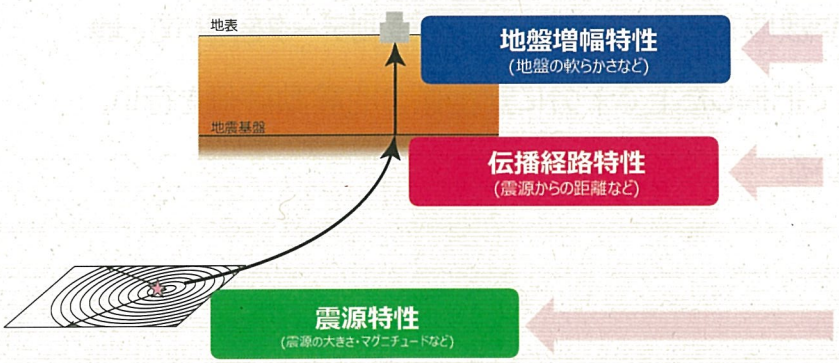
3　本件発電所における基準地震動の策定

4　本件発電所の耐震安全性

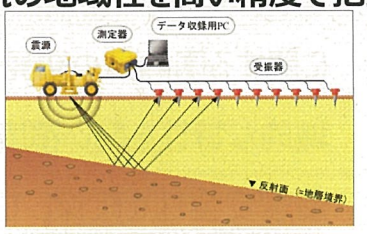
1－1　地震に係る安全確保の考え方

(1)**地震動評価に重要な「地域的な三つの特性（震源特性、伝播経路特性、地盤増幅特性）」を高い精度で把握する。**
・敷地及び敷地周辺の詳細な活断層調査や地下構造調査を実施。
・地下1000mまで複数の地震計を設置し、多数の地震観測データを取得。
・東北地方太平洋沖地震を契機に進展した数々の知見の蓄積。
(2)豊富な知見や地域的な特性を踏まえ、**信頼性の高い手法を用いて、安全側の地震動評価を行い、そのうえで十分な余裕を持った耐震設計**を行う。

地震の揺れを決める三つの特性



それぞれの地域性を高い精度で把握



地下構造調査等



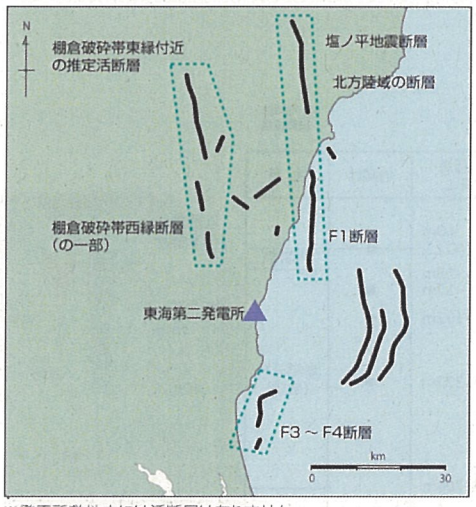
活断層調査等

1－2　地域的な特性を詳細に把握するための各種調査の取り組み

敷地及び敷地周辺の活断層調査

震源特性
（震源の大きさ・マグニチュードなど）

○敷地の調査の結果、本件発電所の敷地には将来活動する可能性のある断層等は認められなかった。
○敷地周辺の調査の結果、左図の断層を震源として考慮する活断層として評価する。



※発電所敷地内には活断層はありません

（凡例）

━━	発電所の耐震設計をする際に考慮している断層
┅┅	異なる断層が連動することを想定して考慮している断層



地質や断層の調査のイメージ

1－2　地域的な特性を詳細に把握するための各種調査の取り組み

敷地周辺の広域に亘る地下構造調査

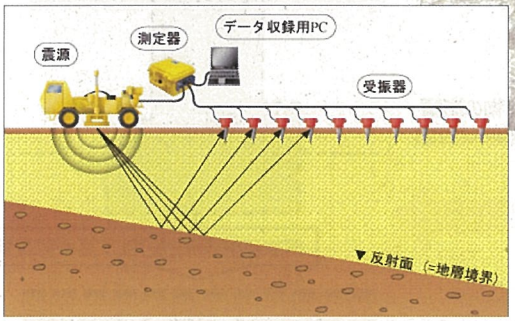
伝播経路特性
（震源からの距離など）

地盤増幅特性
（地盤の軟らかさなど）

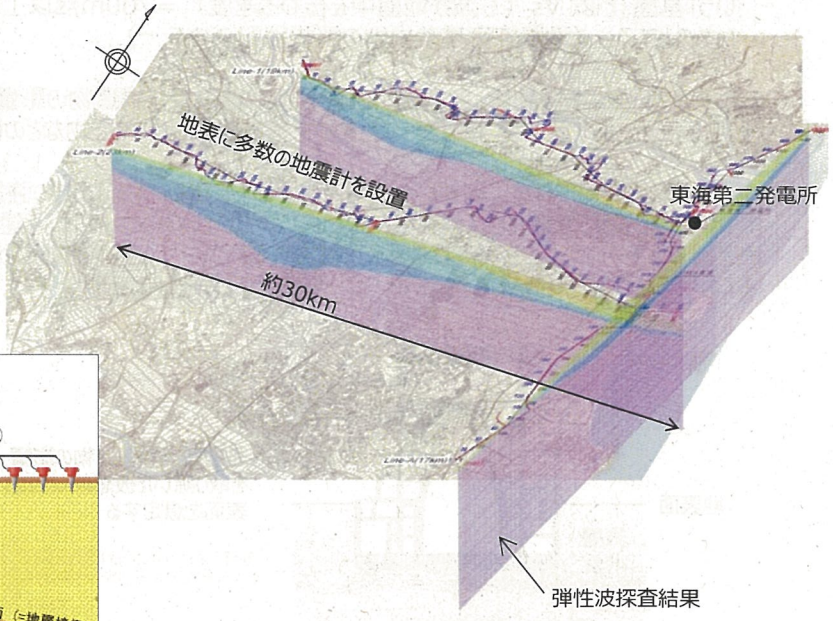
○敷地から30km程度離れたところまで地下構造調査を実施し、地域的な特性を高い精度で把握する。

震源（起振車）
人工的に揺れを発生させ、約30kmの測線に多数の地震計を設置して観測した記録を用いて地下深部までの構造を可視化する。





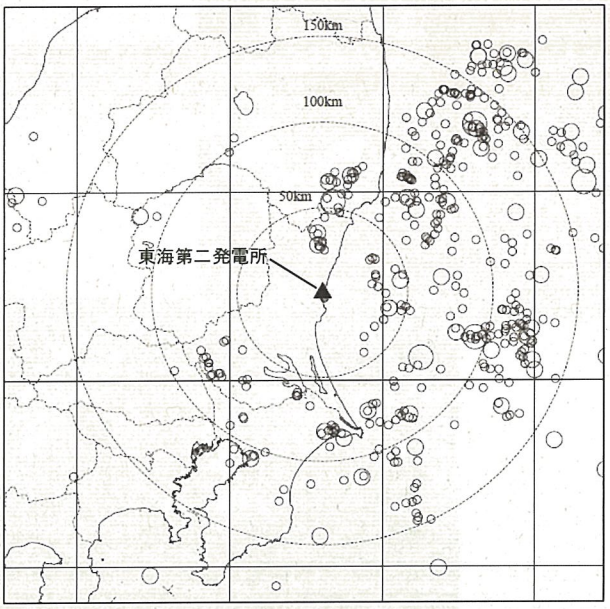
弾性波探査のイメージ



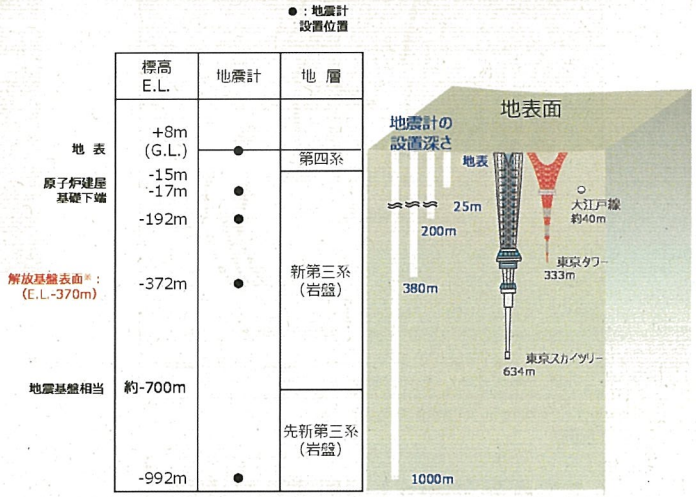
敷地における地震観測

伝播経路特性（震源からの距離など）　地盤増幅特性（地盤の軟らかさなど）

○地下約1000mの大深度まで複数の深さで地震観測を実施している。
○M5以上の地震として、400地震以上の多数の観測記録を取得している。



震央分布図



地震観測点位置（深さ方向）

※解放基盤表面：基準地震動を策定するために、基盤面上の表層や構造物がないものとして仮想的に想定する自由表面であって、著しい高低差がなく、ほぼ水平で相当な拡がりを持って想定される基盤の表面をいう。

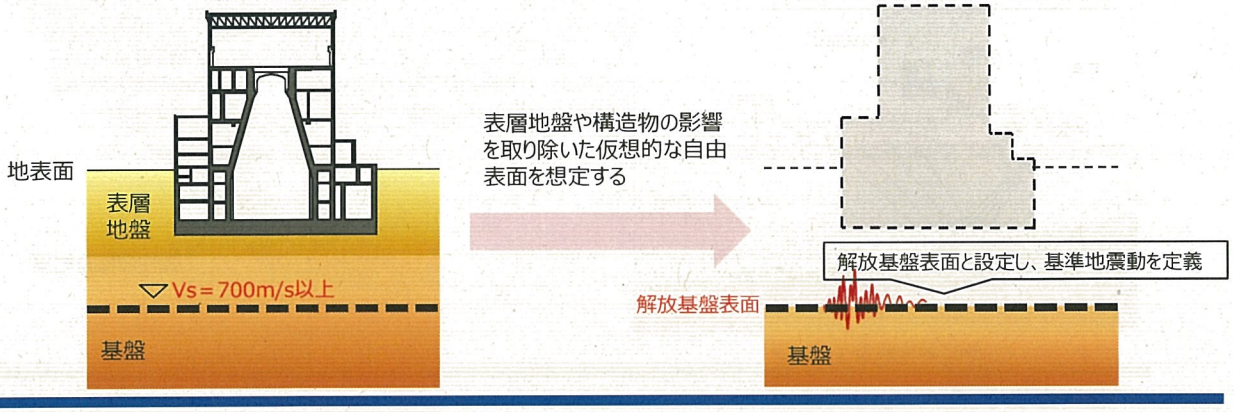
【解説】解放基盤表面

質問事項 第２－１

○基準地震動は、解放基盤表面の位置において策定される。
⇒解放基盤表面は、基準地震動を策定するにあたって、基盤面上の表層地盤や構造物がないものとして仮想的に設定する自由表面であり、著しい高低差がなく、ほぼ水平で相当な広がりをもって想定される基盤の表面をいう。ここでいう「基盤」とは、Vs（Ｓ波が地盤中を伝わる速度）＝700m/s以上の硬質地盤であって著しい風化をうけていないものとする。（設置許可基準規則の解釈別記２の５一）

○敷地の地表面の地震動は、各地点の表層地盤や地形及び構造物の影響を受ける。これらの影響を取り除いた仮想的な自由表面である解放基盤表面で地震動を策定してから、構造物などの耐震性を評価するという手法を採用したもの。

○なお、地震調査研究推進本部によるレシピでは、「工学的基盤」までの強震動を計算してから、地表における強震動を計算する方法が提案されている。ここでいう「工学的基盤」については、「建築や土木等の工学分野での構造物設計の際には、地震動設定の基礎とする堅固な地盤。構造物の種類や地盤の状況によって目安とするS波速度は異なるが、多くの場合300～700m/sとされている。（丙D第18号証22頁）



地震観測記録の有用性

震源特性・伝播経路特性・地盤増幅特性
⇒地震動

①観測記録は、この三つの特性のすべてが反映されている。
②更に、敷地の観測記録であれば、当該敷地における地域性も反映されている。

敷地の観測記録により、地域性の反映に資する検討や評価を行うことも可能となる。

東北地方太平洋沖地震の知見

震源特性（震源の大きさ・マグニチュードなど）　伝播経路特性（震源からの距離など）　地盤増幅特性（地盤の軟らかさなど）

○東北地方太平洋沖地震は、岩手県沖から茨城県沖までの南北500kmにわたる巨大な震源域が活動した国内初の地震である。

○世界的に見ても、1900年以降に観測された地震の中で4番目の地震にあたる最大級の地震である。

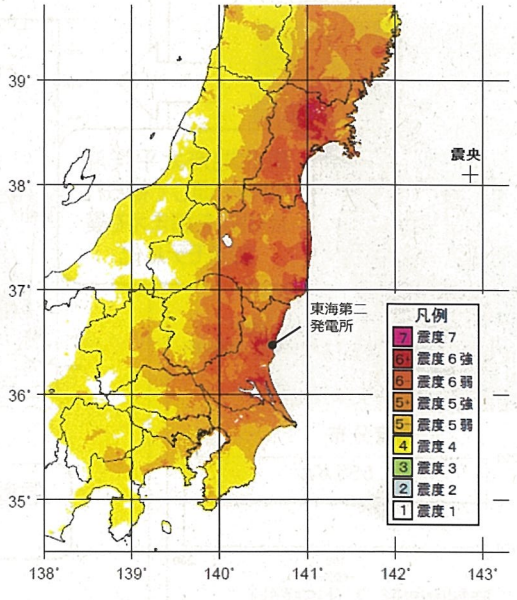
地震の概要

・発生日時：平成23年3月11日14時46分
・場　　所：三陸沖（牡鹿半島の東南東、約130km付近）
・深　　さ：約24km
・規　　模：Mw9.0※
・主な震度：最大震度7　宮城県栗原市
　　震度6弱　東海村

※：Mw（モーメントマグニチュード）は、巨大地震の規模を正確に表す指標として使われている。

・20世紀以降の主な大地震
＜世　界＞
1. 1960年チリ地震（Mw9.5）
2. 1964年アラスカ地震（Mw9.2）
3. 2004年スマトラ沖地震（Mw9.1）

＜日本＞
1. 1933年三陸沖地震（Mw8.4）
2. 1994年北海道東方沖地震（Mw8.3）
3. 1958年択捉島沖地震（Mw8.3）



1－3　巨大地震に関する知見

東北地方太平洋沖型地震の今後の発生確率

日本海溝沿いの地震活動の長期評価

（平成31年2月26日 地震調査研究推進本部より公表）

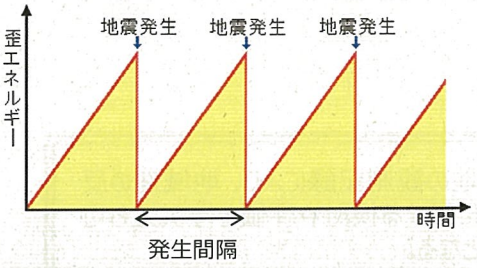
○東北地方太平洋沖型地震の今後３０年の地震発生確率は、ほぼ０％

主な海溝型地震の評価結果（地震発生確率）

評価の詳細はこちら



【解説】地震の周期性（平均発生間隔）



東北地方太平洋沖型地震：約550年～600年

活断層（後述の塩ノ平地震断層）による地震：約12500年

地震調査研究推進本部HPより抜粋・加筆

1－4　安全側の地震動評価結果の例

東北地方太平洋沖型地震の評価

震源特性（震源の大きさ・マグニチュードなど）　伝播経路特性（震源からの距離など）　地盤増幅特性（地盤の軟らかさなど）

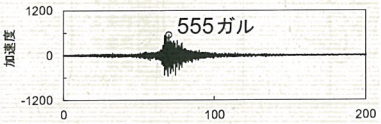
○最大級の地震である東北地方太平洋沖地震について、その発生を前提としながら、各種の安全側の条件を追加して、更に重ねている。

観測データ

2011年東北地方太平洋沖地震



震度分布

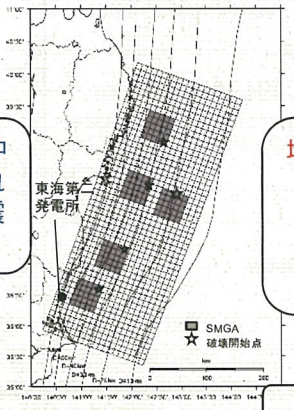


時刻歴波形※3（NS成分）

東北地方太平洋沖地震を通じて得られた知見を踏まえて震源をモデル化

本件発電所の不確かさを考慮した地震動評価

2011年東北地方太平洋沖型地震（基本震源モデル）



震源モデル

地震の揺れが大きくなるよう条件を追加

追加した条件

①震源を敷地の**近くに移動**

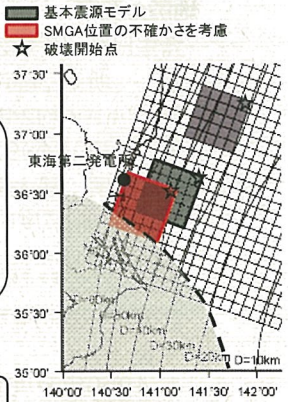
②揺れの**強さを1.5倍**

更に

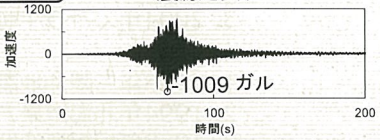
条件を重ねて考慮

信頼性の高い手法で評価

2011年東北地方太平洋沖型地震（SMGA※1位置と短周期レベルの不確かさを重畳）



震源モデル



時刻歴波形※3（NS成分）

※1　Strong Motion Generation Area（強い揺れを出す領域）

※2　短周期レベルとは、震源特性のうち強震動に直接影響を与える短周期側の成分の強さを表す値。

※3　基準地震動Ssを定義している解放基盤表面（本件発電所では標高-370m）におけるはぎとり波。

目次

1　本件発電所における地震に係る安全確保の考え方

2　地震の起こり方と地震による揺れの評価
　2－1　地震発生のメカニズム
　2－2　地震の揺れを決める三つの特性と地域性
　2－3　地震動評価

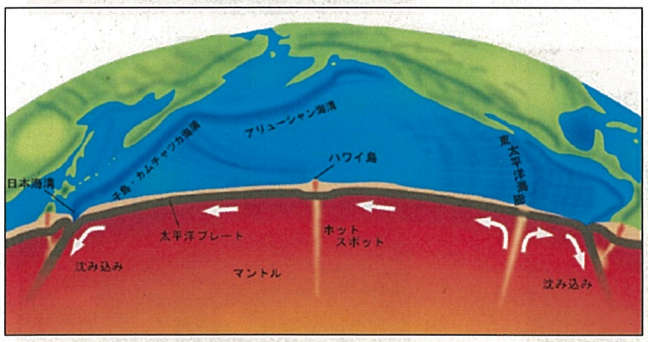
3　本件発電所における基準地震動の策定

4　本件発電所の耐震安全性

2－1　地震発生のメカニズム

地震の要因はプレートの運動

プレートテクトニクス
○地球の表面は十数枚のプレート（硬い岩盤）で覆われている。
○これらのプレートはそれぞれ違う方向に、年間数cmの速さで動いている。
○この動きによって、プレートどうしの間に圧縮したり、引張りあったりする力が働く。
○このプレートの運動が生み出す巨大な力が、地震を引き起こす。



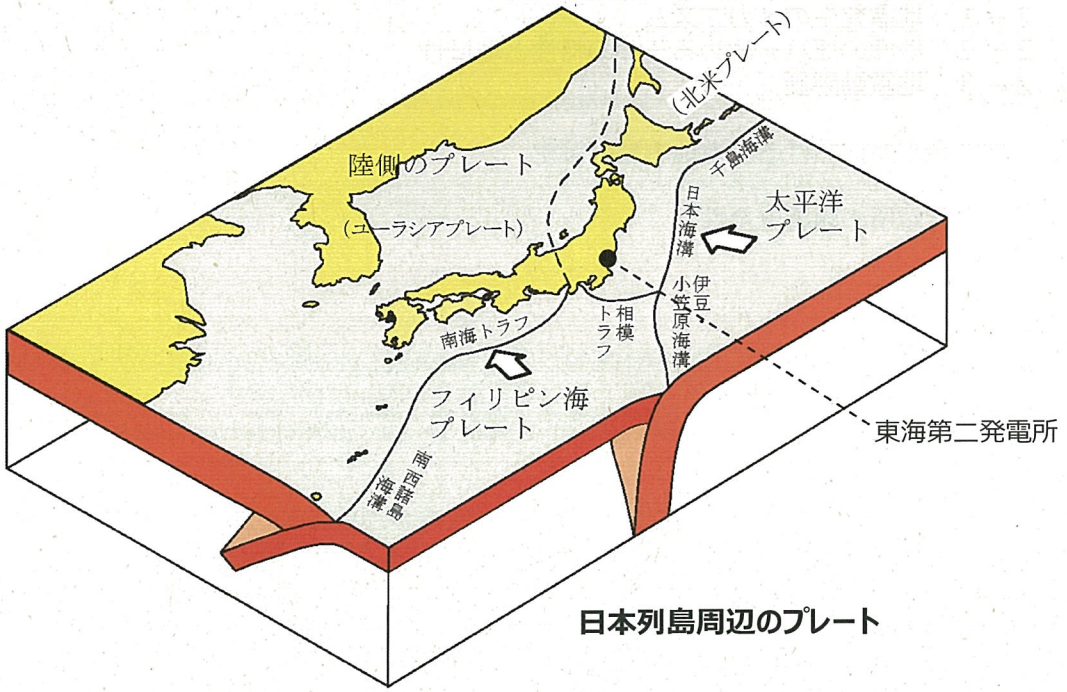
地球表面のプレート運動



世界のプレート境界

日本列島とプレートの関係

○日本周辺では、海のプレートである太平洋プレート、フィリピン海プレートが、陸のプレート（北米プレートやユーラシアプレート）の方へ年間数cm程度の速度で動いており、陸のプレートの下に沈み込んでいる。

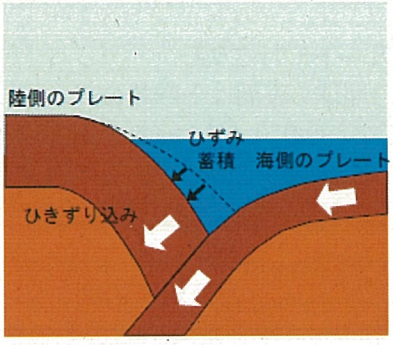


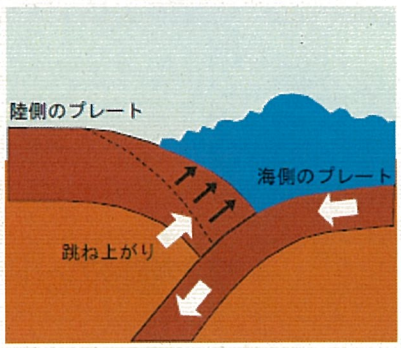
日本列島周辺のプレート

プレート間地震のメカニズム

○海のプレートが陸のプレートの下に沈み込む際、陸のプレートの先端部もいっしょに引きずり込まれる。

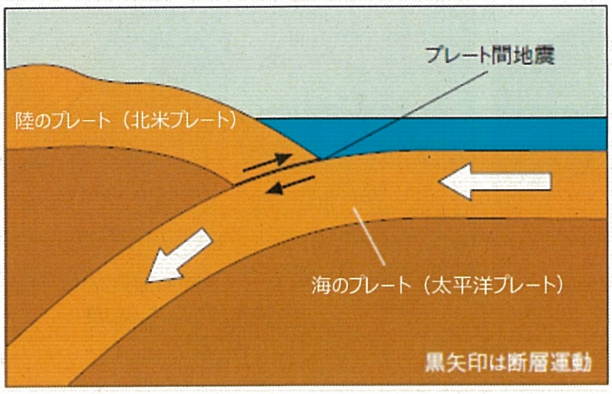
○陸のプレートと海のプレートが接する部分がひずみに耐え切れなくなると、そこを巨大な断層面として陸のプレートの先端が跳ね上がるような断層運動が起き、地震が発生する。これを「プレート間地震」という。





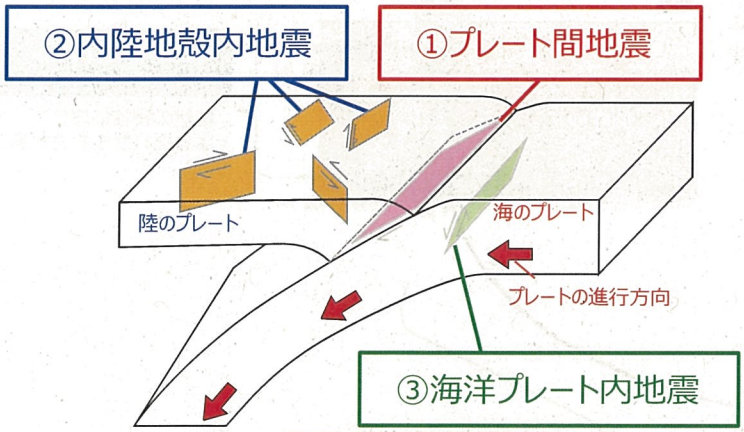
プレートの境界

■プレート間地震の発生の仕組み



地震の発生する場所と地震のタイプ

○地震は、発生する場所によって、
①プレート間地震　②内陸地殻内地震（活断層の地震）　③海洋プレート内地震
に大別される。



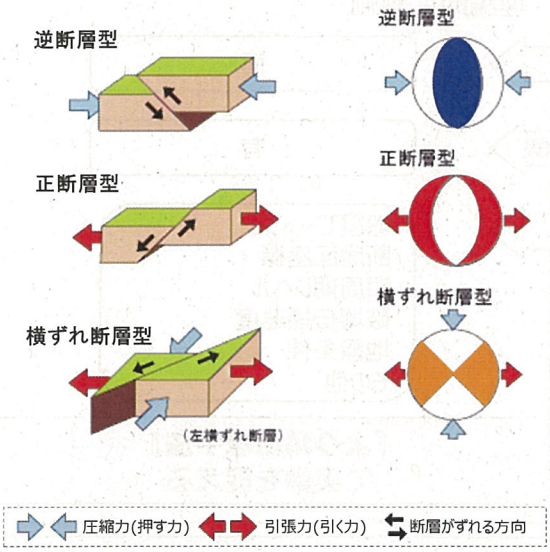
地震の発生する場所と地震の発生様式（タイプ）

発生様式ごとの最近起きた地震

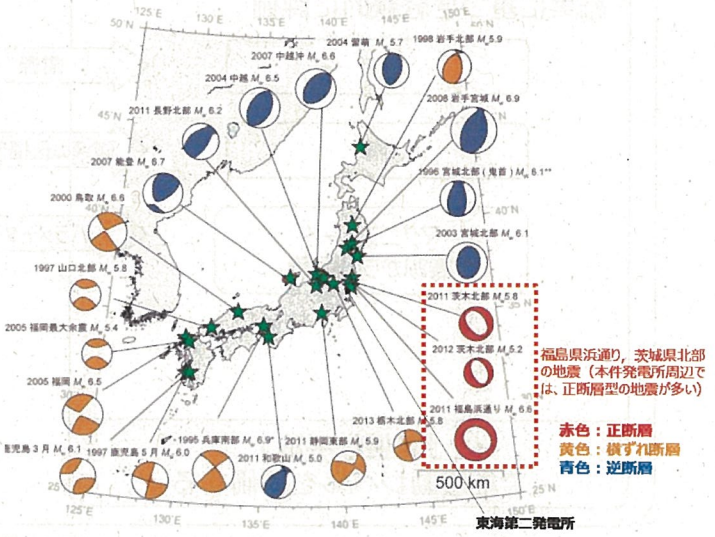
①プレート間地震	2005年宮城県沖地震 **2011年東北地方太平洋沖地震** など
②内陸地殻内地震	1995年兵庫県南部地震 1997年鹿児島県北西部地震 2005年福岡県西方沖地震 2007年能登半島沖地震 2007年新潟県中越沖地震 **2011年福島県浜通りの地震** 2016年熊本地震　など
③海洋プレート内地震	2001年芸予地震 2009年駿河湾の地震　など

内陸地殻内地震（活断層による地震）のメカニズム

○内陸地殻内地震は、逆断層型、正断層型及び横ずれ断層型の三つの型に分けられる。
○本件発電所周辺では正断層型の地震が多く発生している。



逆断層型・正断層型・横ずれ断層型の発震機構解
新安全設計基準に関する検討チーム（2013）に加筆



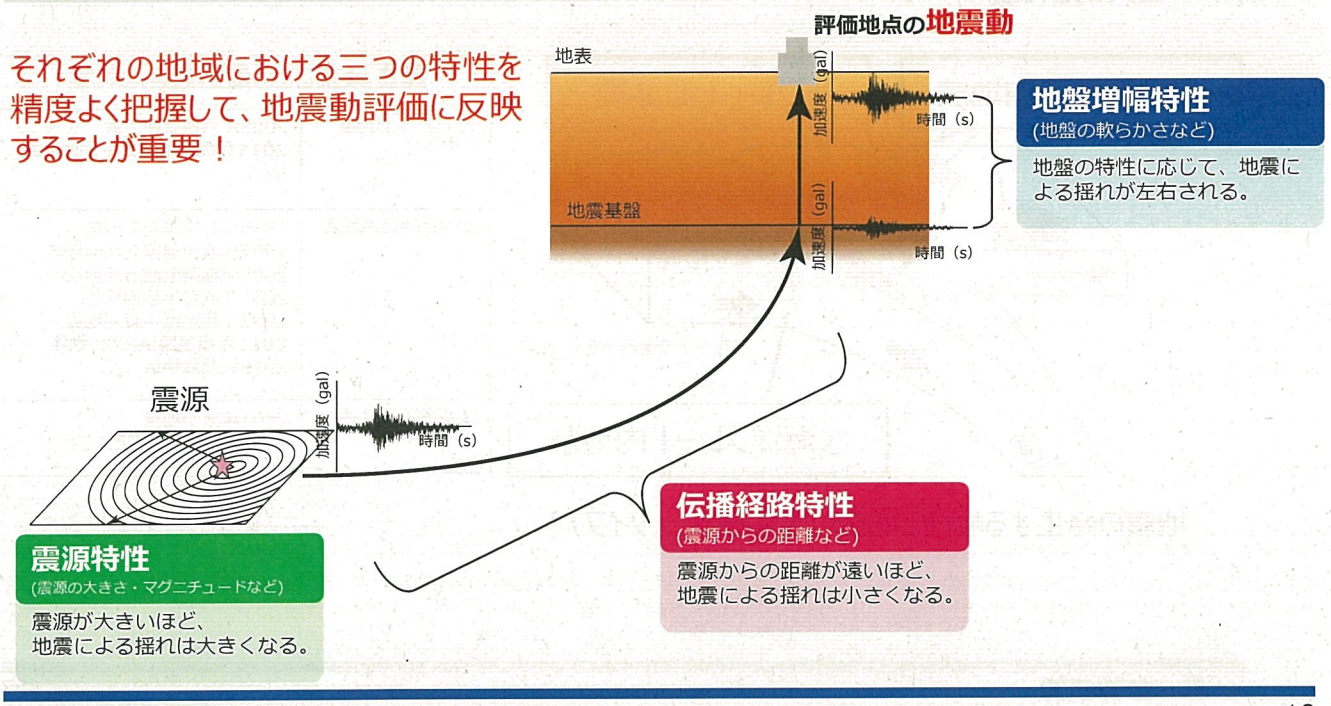
近年発生した内陸地殻内地震

2－2　地震の揺れを決める三つの特性と地域性

○「地震」が生じると、震源断層面からエネルギー（地震波）が放出される。そして、地震波がある地点に到達すると地盤に揺れが生ずる。この揺れが「地震動」である。

○地震動には、**三つの特性**があり、それぞれに**地域性**がある。

それぞれの地域における三つの特性を精度よく把握して、地震動評価に反映することが重要！



地盤増幅特性
(地盤の軟らかさなど)
地盤の特性に応じて、地震による揺れが左右される。

伝播経路特性
(震源からの距離など)
震源からの距離が遠いほど、地震による揺れは小さくなる。

震源特性
(震源の大きさ・マグニチュードなど)
震源が大きいほど、地震による揺れは大きくなる。

2－3　地震動評価
地震の揺れの評価手法

応答スペクトルに基づく手法		**断層モデルを用いた手法**
多数の地震観測記録を統計処理した結果に基づき経験的に評価		**三つの特性を詳細にモデル化**して理論的に評価
点	震源	面
無	破壊の伝播効果	有
マグニチュード 震源からの距離	パラメータ※	地震モーメント 断層面座標 短周期レベル 破壊伝播速度 地盤条件 その他
『簡便な手法』 で地震動レベルを評価する		**『より精緻な手法』** で実像を捉える

基準地震動の策定に当たっては、これら両者を用いて地震動評価を行うことで
より信頼性が高く安全側の評価が可能

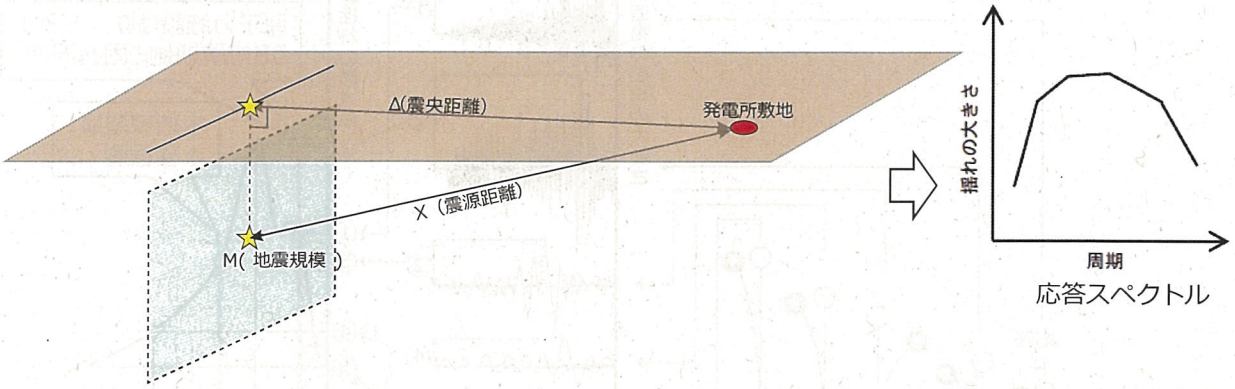
※地震の揺れを計算する上で必要な数値

応答スペクトルに基づく手法

○一般に地震動は、地震規模が等しければ、震源からの距離が離れるほど、その揺れの大きさは小さくなる。

○応答スペクトルに基づく手法（距離減衰式ともいう）は、このような特徴を比較的単純な関係式で表現した地震動評価手法である。

○少ないパラメータで地震動の応答スペクトルを評価できる（簡便な手法）。

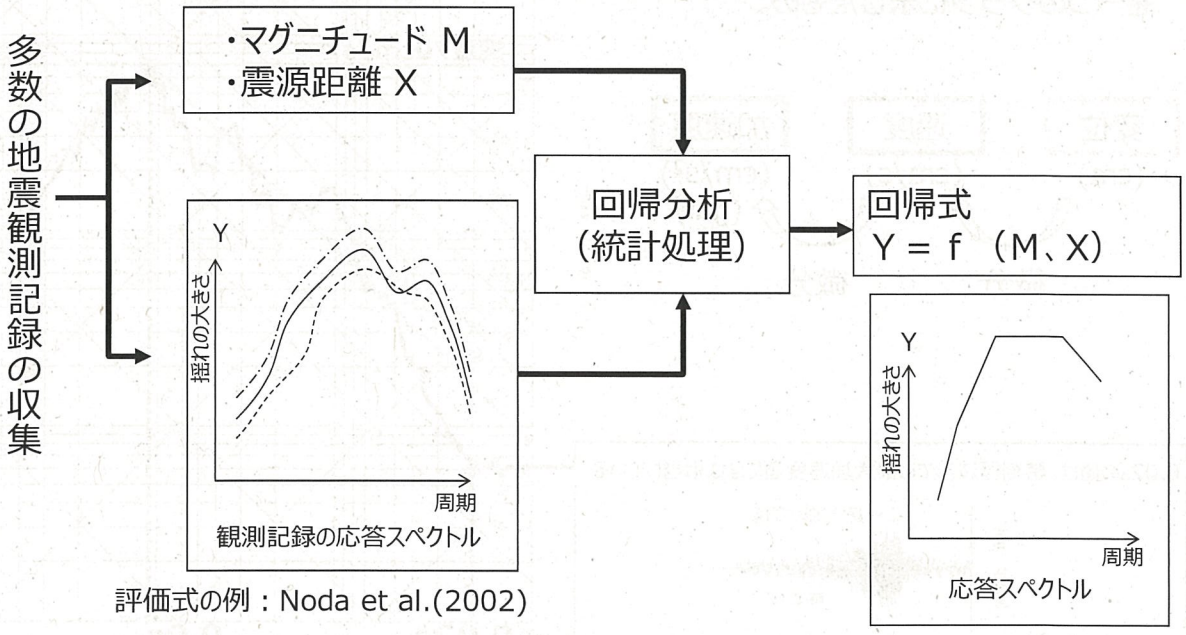


応答スペクトルに基づく地震動評価のイメージ

応答スペクトルに基づく手法

○地震の規模：M（マグニチュード）、震源距離：Xと、その地震の応答スペクトルとの関係を多数の地震観測記録から回帰分析等により求めたもの。

○ただし、回帰に用いた地震のデータベース等に基づく適用範囲を吟味する必要がある。



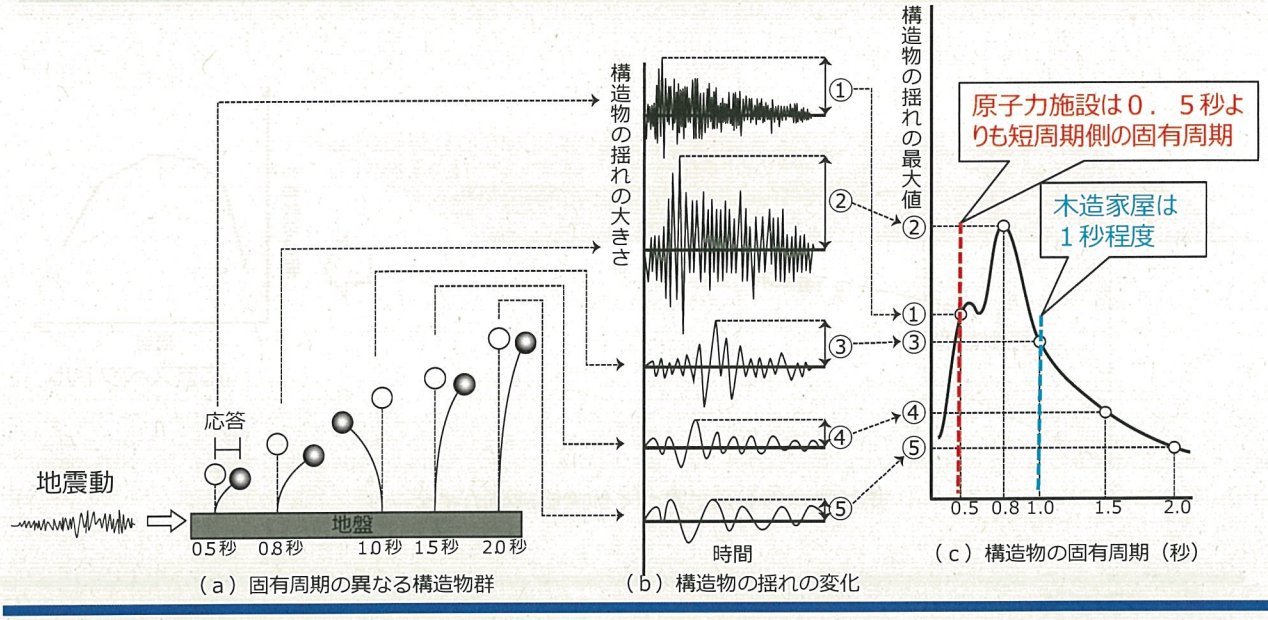
評価式の例：Noda et al.(2002)

【解説】応答スペクトル

○地震動には様々な周期の波が含まれる。

○建物等には特定の揺れやすい周期があり、同じ周期を持つ地震動が到来すると大きく揺れる。

○「応答スペクトル」とは、様々な周期を有する建物等に対して地震動がどのくらいの揺れを生じさせるかを、横軸に周期、縦軸に最大応答値をとって分かりやすく描いたもので、その地震動によって建物等に生じる揺れの大きさが把握できる。

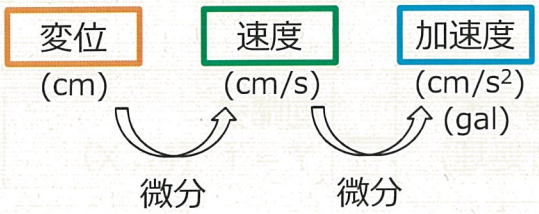


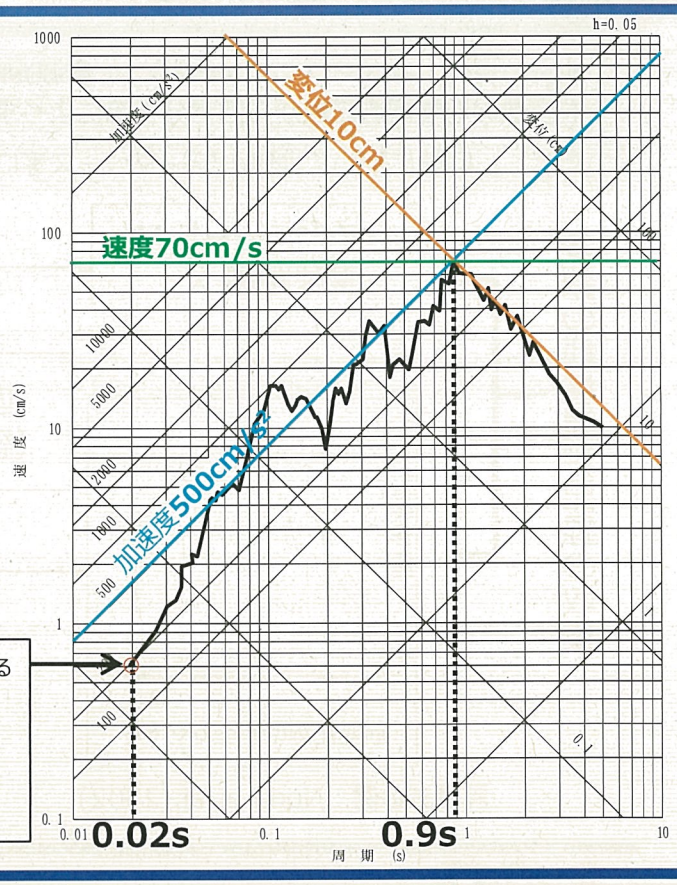
（ａ）固有周期の異なる構造物群　（ｂ）構造物の揺れの変化　（ｃ）構造物の固有周期（秒）

【解説】応答スペクトル（トリパタイト）のグラフの見方

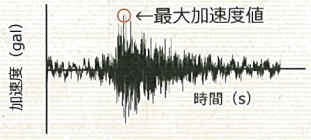
質問事項 第１－１

○トリパタイトとは、正弦波sin(ωt)を微分すると円振動数(1/ω)倍になる関係を利用して、変位・速度・加速度の関係を一つのグラフに示したもの。





0.02sの値は、時刻歴波形での最大加速度値にほぼ相当している

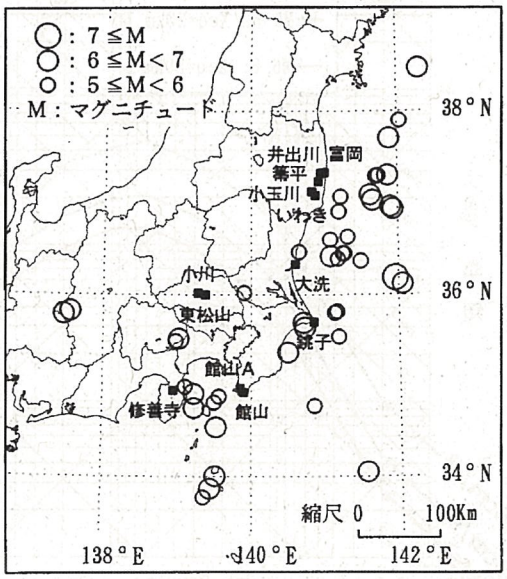


応答スペクトルに基づく手法　Noda et al.(2002)

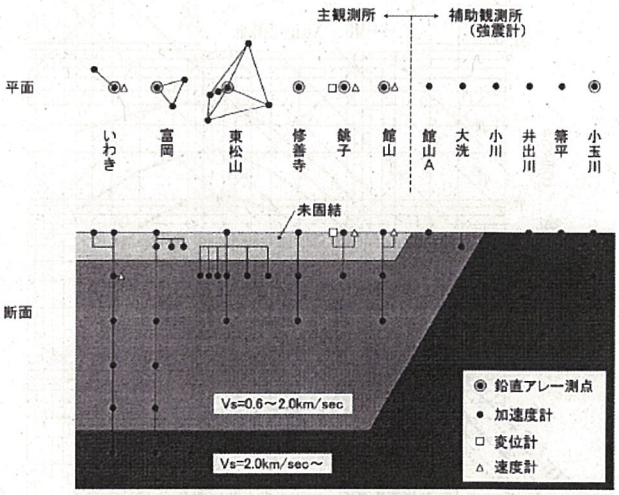
質問事項
第１－３

○電力共同の取組みとして、鉛直アレイ地震観測が世界に先駆けて1977年から実施されている。

○Noda et al.(2002)の手法は、この観測記録を回帰分析して作成された。



観測点配置と震央分布



観測点配置

応答スペクトルに基づく手法　Noda et al.(2002)の適用範囲

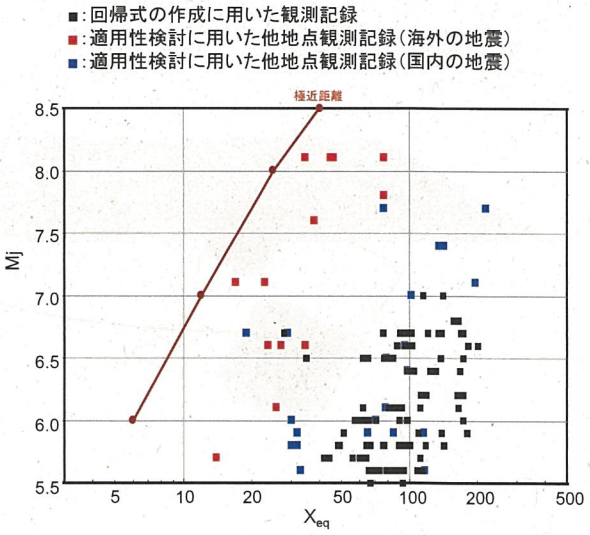
質問事項
第１－３

○Noda et al.(2002)については、その回帰式の作成に用いた観測記録だけでなく、国内外の観測記録を用いた適用性の確認もなされている。

○Noda et al.(2002)を含む距離減衰式を地震動評価に用いる際には、このような適用性が確認されている範囲から、評価する震源が大きく外れていないことを確認して、評価の信頼性を確保する。

1．回帰分析に用いた地震の諸元
　5.5 ≦ Mj ≦ 7.0（Mj：気象庁マグニチュード）
　h ≦ 60km （h：震源深さ）
　28km ≦ Xeq ≦ 202km（Xeq：等価震源距離）

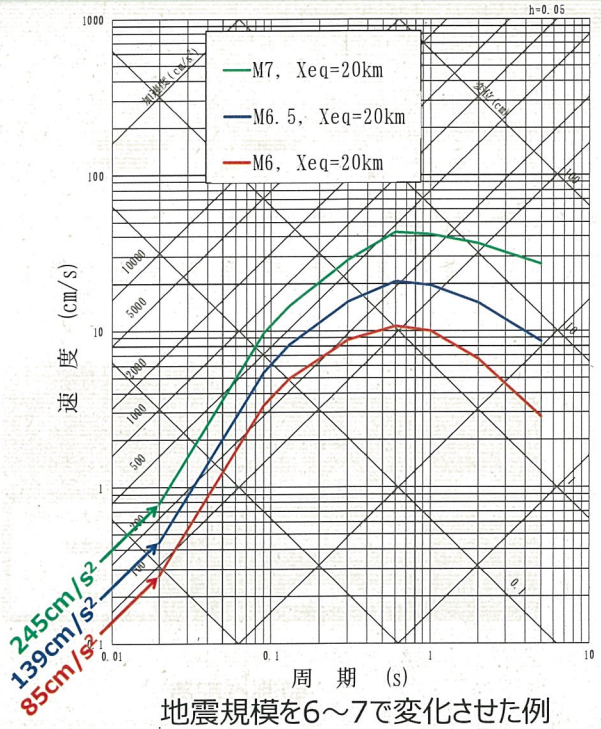
2．観測記録を用いて距離減衰式の適用性について検討した際に用いた地震の諸元
　5.4 ≦Mj ≦8.1
　h ≦60km
　14km ≦ Xeq ≦ 218km



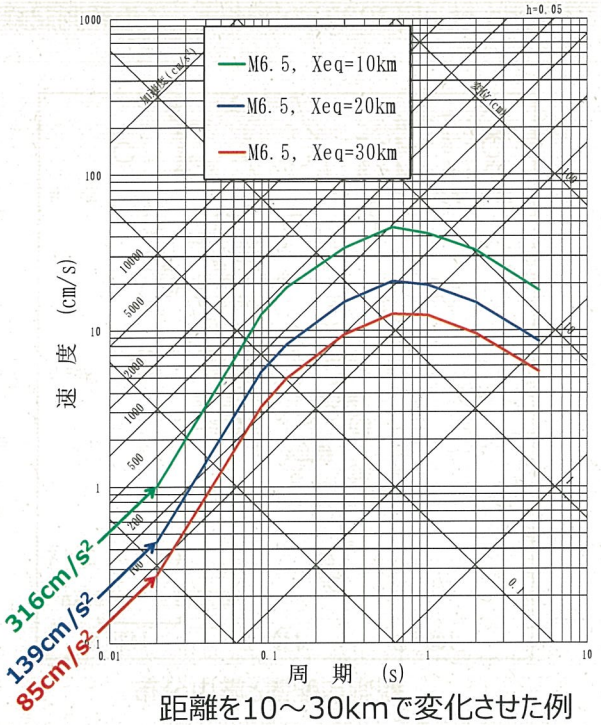
【解説】応答スペクトルの手法（Noda et al.(2002) の例）

質問事項
第１－３

○応答スペクトルの手法（Noda et al.(2002))を用いて、地震規模(Mj)と震源距離(Xeq)について、パラメータスタディを行った計算例を示す。地盤条件（S波速度）はVs=700m/sとして計算。



地震規模を6～7で変化させた例
（Xeq=20km、水平方向）



距離を10～30kmで変化させた例
（Mj＝6.5、水平方向）

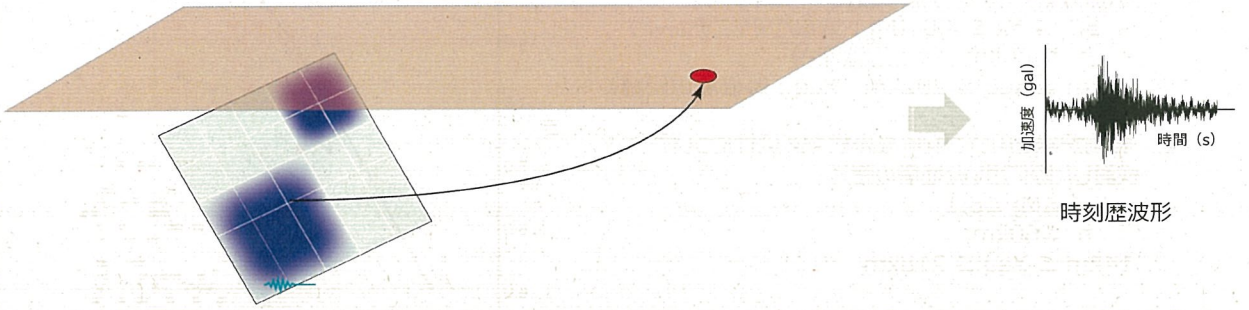
２－３ 地震動評価

断層モデルを用いた手法

○断層モデルは震源の断層面を詳細にモデル化したもの。

○多くのパラメータが必要であるが、詳細な地震動を評価するのに適している。(詳細な手法)

○なお、断層モデルを用いた手法については、レシピにおいてパラメータ設定等が提案されている。



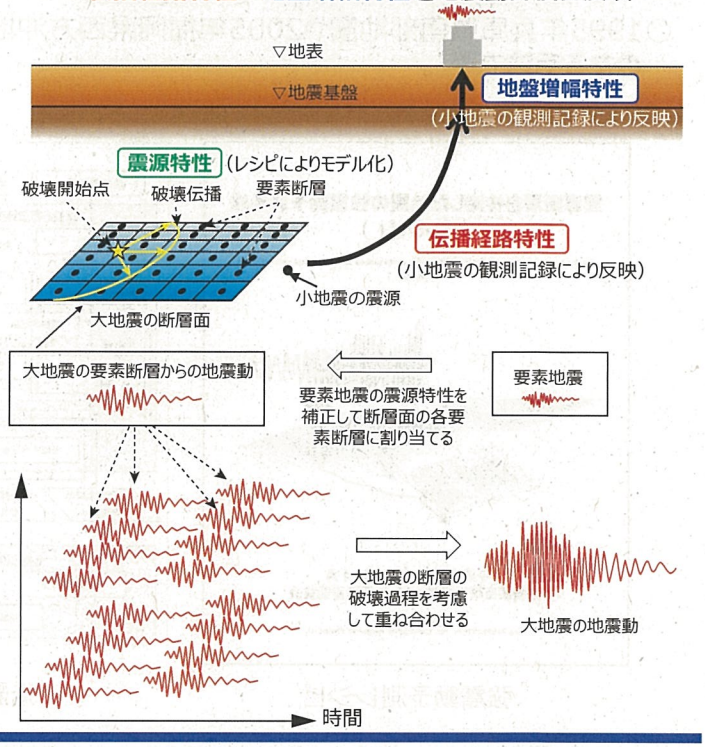
時刻歴波形

断層モデルを用いた手法

震源特性（震源の大きさ・マグニチュードなど）　伝播経路特性（震源からの距離など）　地盤増幅特性（地盤の軟らかさなど）

三つの特性を詳細にモデル化して理論的に評価する手法

敷地で得られた小地震の観測記録を要素地震とする。
⇒**伝播経路特性・地盤増幅特性を地震動評価に反映**



経験的グリーン関数法の特徴

敷地の観測記録には、地域性の反映された伝播経路特性、地盤増幅特性の影響が含まれている。

⇩

この観測記録を地震動評価に用いることで、敷地の伝播経路特性、地盤増幅特性を地震動評価に反映することができる。

（参考）
経験的グリーン関数法の他にも
・統計的グリーン関数法
・理論的手法
・ハイブリッド合成法
などがある。

断層モデル手法に用いる要素地震の選定

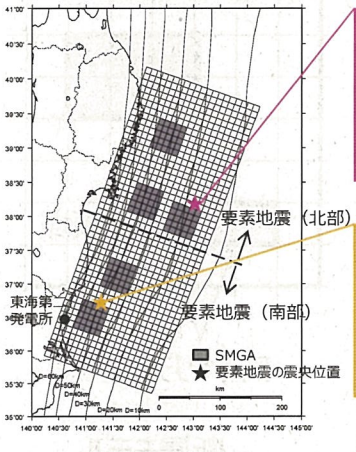
伝播経路特性（震源からの距離など）　地盤増幅特性（地盤の軟らかさなど）

○経験的グリーン関数法に用いる要素地震は、できるだけ想定する地震の震源域やその近傍で発生した同じメカニズム（地震のタイプ）の中小地震を選定することが望ましい。

⇒評価結果に、伝播経路特性・地盤増幅特性の地域性を精度よく反映することができる。

①プレート間地震の例

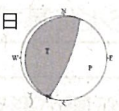
（東北地方太平洋沖型地震※）



要素地震の震央位置

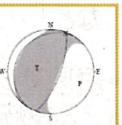
要素地震（北部）

発生日　2011年3月10日
地震規模※1　M6.8
震源深さ※1　9.3km
地震モーメント※2　5.51E+18(N·m)



要素地震（南部）

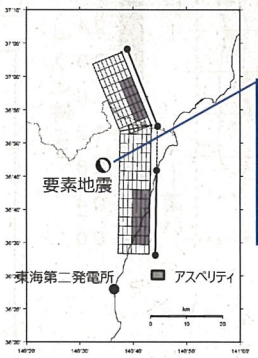
発生日　2009年2月1日
地震規模※1　M5.8
震源深さ※1　47.0km
地震モーメント※2　4.65E+17(N·m)



要素地震のメカニズム解
（下半球）

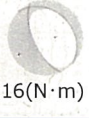
②内陸地殻内地震の例

（F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震）



要素地震の震央位置

発生日　2011年4月14日
地震規模※1　M5.1
震源深さ※1　8.8km
地震モーメント※2　2.41E+16(N·m)



要素地震のメカニズム解
（下半球）

※東北地方太平洋沖型地震のように地震規模が大きく、震源断層が広域になる場合には、震源域を領域分けして、それぞれの領域に要素地震を選定する。

※1　気象庁による。
※2　F-netによる。

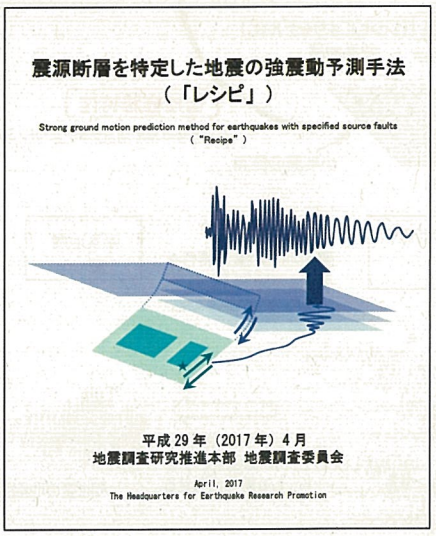
2－3　地震動評価

レシピによる震源特性パラメータの設定

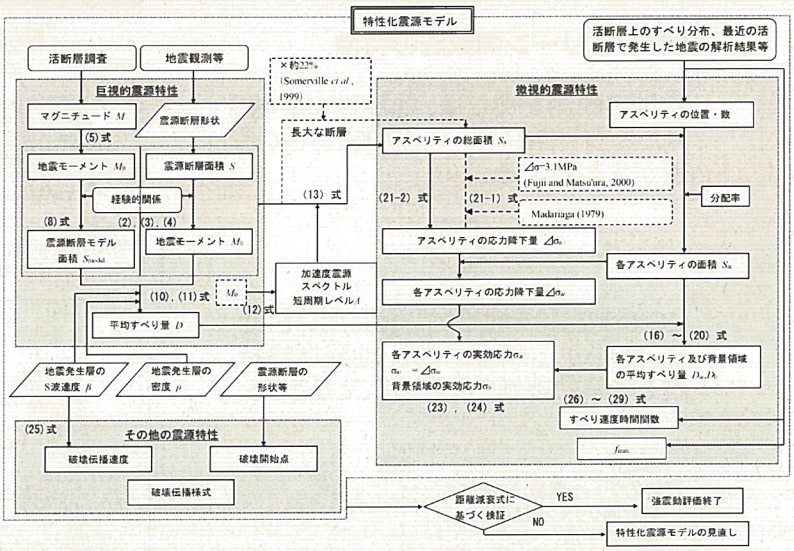
震源特性
(震源の大きさ・マグニチュードなど)

○政府の機関である**地震調査研究推進本部**により、誰が計算しても同じ結果となるように断層モデルを用いた手法の地震動評価の手順が「レシピ」として取りまとめられている。（丙D第18号証）

○1995年兵庫県南部地震や2005年福岡県西方沖地震等の観測記録を用いて検証がなされた**信頼性のある手法**である。



強震動予測レシピ



活断層で発生する地震の震源特性パラメータ設定の全体の流れ

2－3　地震動評価

震源のモデル化における重要なパラメータ

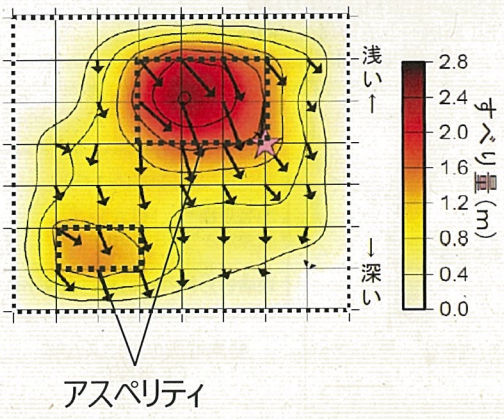
震源特性
(震源の大きさ・マグニチュードなど)

○不均質な震源断層面を、レシピに基づき特性化して震源モデルを作成する。

○アスペリティ※とは、活断層などの断層面上で、通常は強く固着していて、ある時に急激にずれて強い地震波を出す領域（強震動生成域）のこと。

○地震のゆれの評価で重要なパラメータは、「短周期レベル」と「アスペリティの位置」である。

※巨大なプレート間地震の場合は、SMGA（Strong Motion Generation Area）と言うことがある。



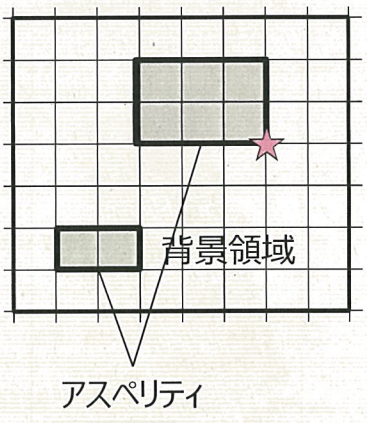
実際の地震（震源）の様子

レシピに基づきモデル化

- 断層の形や位置
- 断層の大きさ
- 地震規模
  など

- 短周期レベル
- アスペリティの位置
- アスペリティの面積
- アスペリティ、背景領域の平均すべり量
  など

設定する詳細なパラメータ



断層モデル

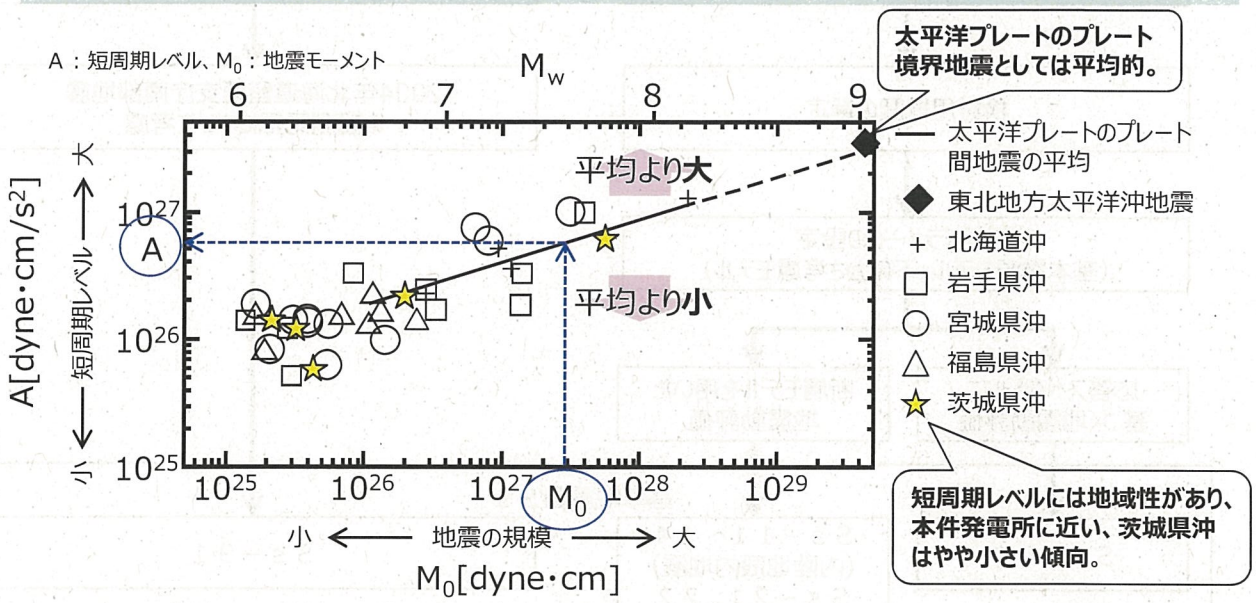
短周期レベルにおける地域特性

震源特性
(震源の大きさ・マグニチュードなど)

○短周期レベルは、震源から放出される短周期帯の揺れの大きさを表している。

○短周期レベル（A）は、過去の地震から統計的に推定した、地震の規模を表す地震モーメント（M_0）との相対的な関係から設定することができる。

○短周期レベルには地域性があり、平均に比べ、宮城県沖は大きく茨城県沖はやや小さい傾向にある。



佐藤(2012)に基づき作成

目次

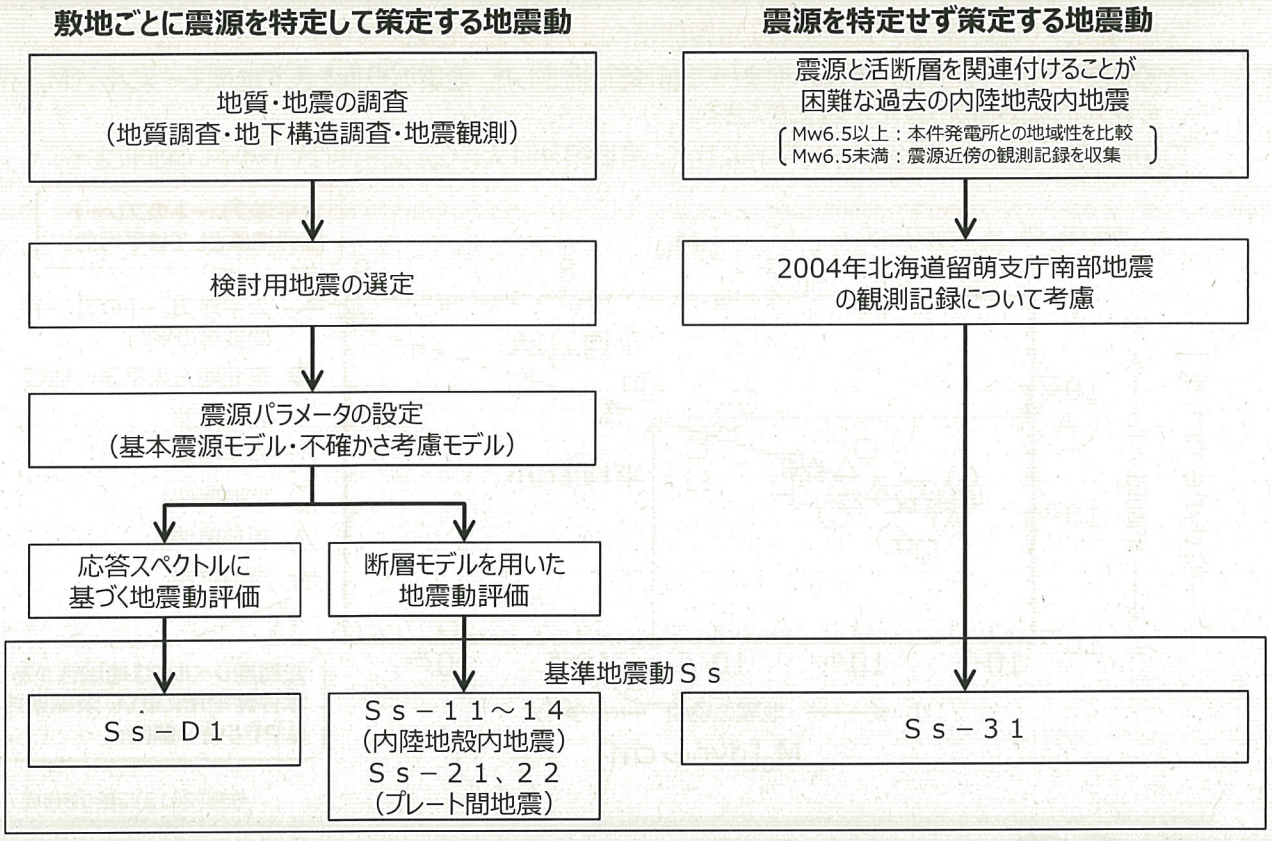
1　本件発電所における地震に係る安全確保の考え方

2　地震の起こり方と地震による揺れの評価

3　本件発電所における基準地震動の策定
3－1　基準地震動の策定フロー
3－2　地下構造評価
3－3　プレート間地震の地震動評価
3－4　内陸地殻内地震の地震動評価
3－5　震源を特定せず策定する地震動
3－6　基準地震動Ｓｓの策定

4　本件発電所の耐震安全性

3－1　基準地震動の策定フロー



【参考】基準地震動の策定フロー

敷地ごとに震源を特定して策定する地震動

○プレート間地震、内陸地殻内地震、海洋プレート内地震それぞれについて、詳細な地質・地震の調査を行い、地震が起きた場合に本件発電所に大きな影響を与えると予想される地震を検討用地震として選定。

○選定した検討用地震に対して、安全側の配慮として、地震動が大きくなるよう不確かさを考慮して評価する。

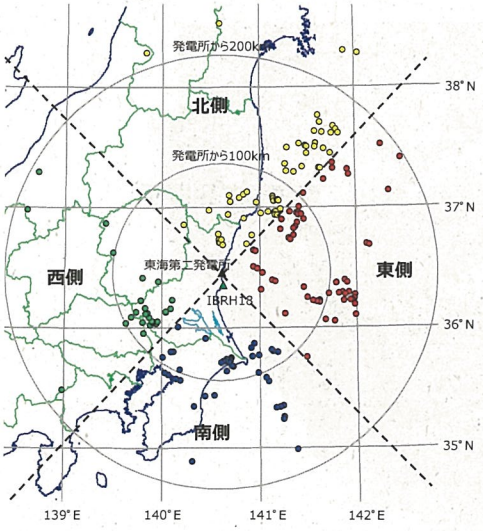
震源を特定せず策定する地震動

○敷地周辺の詳細な地質・地震の調査を実施しても、なお敷地近傍において発生する可能性のある内陸地殻内地震の全てを事前に評価しうるとは言い切れないことから、全国共通で考慮すべきと位置付けられた地震動。

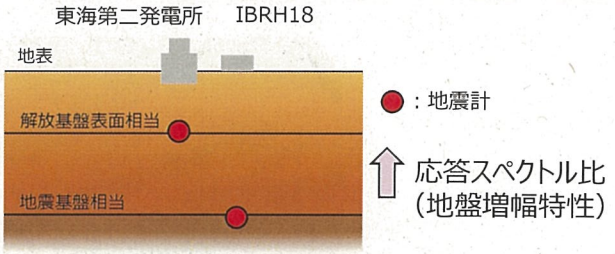
①地震観測記録に基づく検討

地盤増幅特性
（地盤の軟らかさなど）

○本件発電所とKiK-netひたちなか（IBRH18）の地震観測記録を用いて、応答スペクトル比（解放基盤相当／地震基盤相当）を計算し、地震波の到来方向による違いを分析することで、本件発電所周辺の地下構造が地震動に与える影響を確認する。



震央分布図
（Ｍ４．０以上、震源距離２００ｋｍ以内の１９１地震）



$$R_{TKI2/IBRH18}(T)=\frac{S_{TKI2}(T)\cdot X_{TKI2}}{S_{IBRH18}(T)\cdot X_{IBRH18}}$$

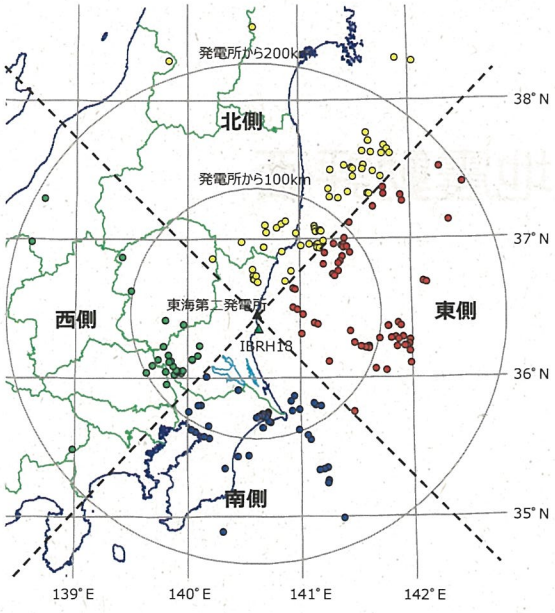
$R_{TKI2/IBRH18}(T)$ ：地盤増幅特性
$S_{TKI2}(T)$　：東海第二発電所観測記録（深さ約380m）の応答スペクトル
$S_{IBRH18}(T)$　：IBRH18観測記録（深さ約500m）の応答スペクトル
X_{TKI2}　：東海第二発電所から震源までの距離
X_{IBRH18}　：IBRH18から震源までの距離

①地震観測記録に基づく検討

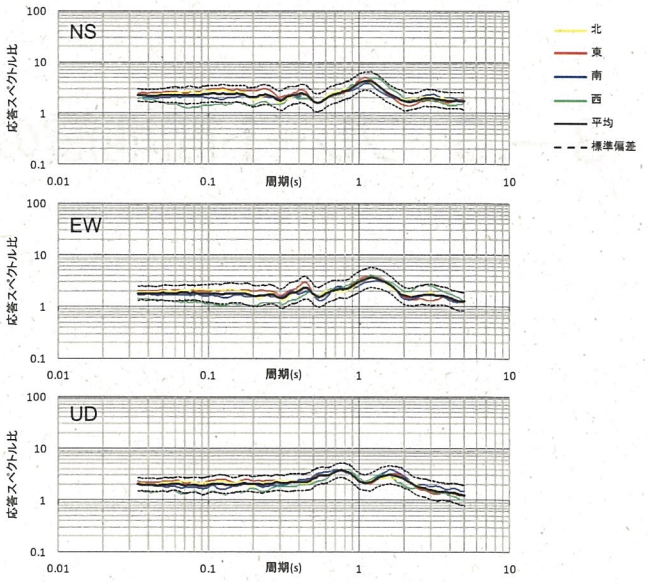
地盤増幅特性
（地盤の軟らかさなど）

質問事項
第１－１

○どの方向からくる地震波も同様の増幅傾向であり、特異な傾向は見られない。



震央分布図
（Ｍ４．０以上、震源距離２００ｋｍ以内の１９１地震）

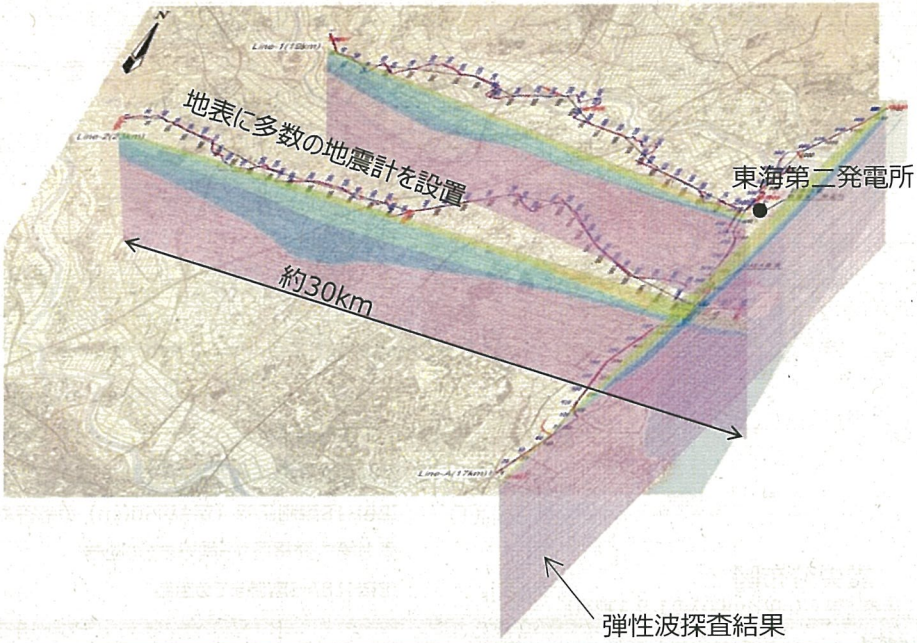


領域ごとの平均応答スペクトル比（４領域）

②地下構造調査に基づく検討

伝播経路特性（震源からの距離など）　地盤増幅特性（地盤の軟らかさなど）

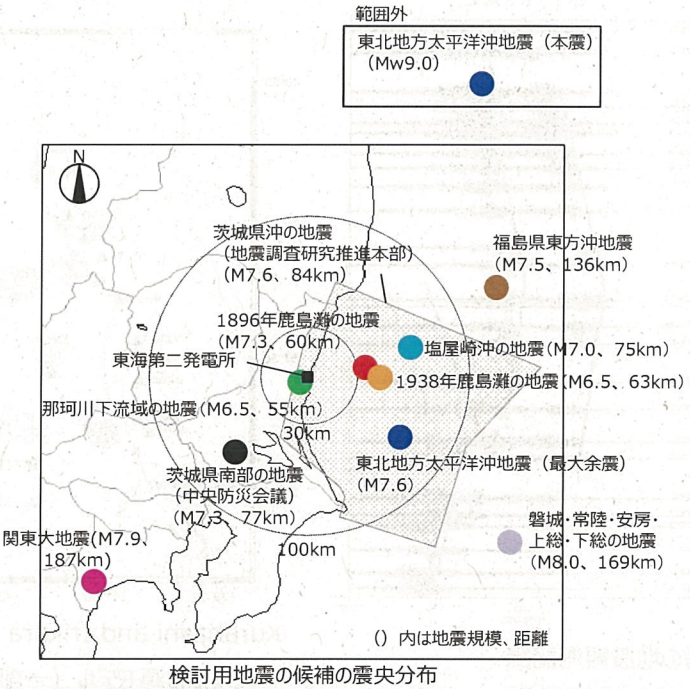
○屈折法地震探査や微動アレイ探査など、複数の地下構造調査を実施し、敷地直下には特異な形状を示す地下構造は無いことを確認した。
○広域の地下構造調査に基づき、敷地周辺の地下構造が本件発電所の地盤増幅特性に大きな影響を与えないことを確認した。



3－3　プレート間地震の地震動評価

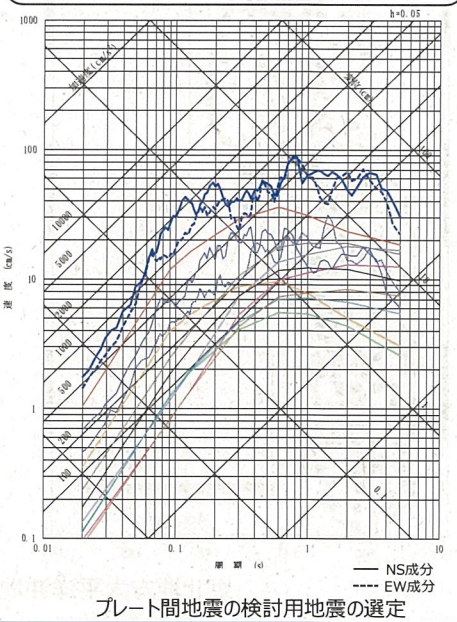
検討用地震の選定

○敷地周辺で発生した過去の被害地震等を詳細に調査し、2011年東北地方太平洋沖型地震を検討用地震に選定した。



検討用地震の候補の震央分布

東北地方太平洋沖地震（本震）は
他の地震を大きく上回っている



プレート間地震の検討用地震の選定

地震動評価の考え方

各種知見　観測記録

地域性を精度よく把握

基本震源モデル

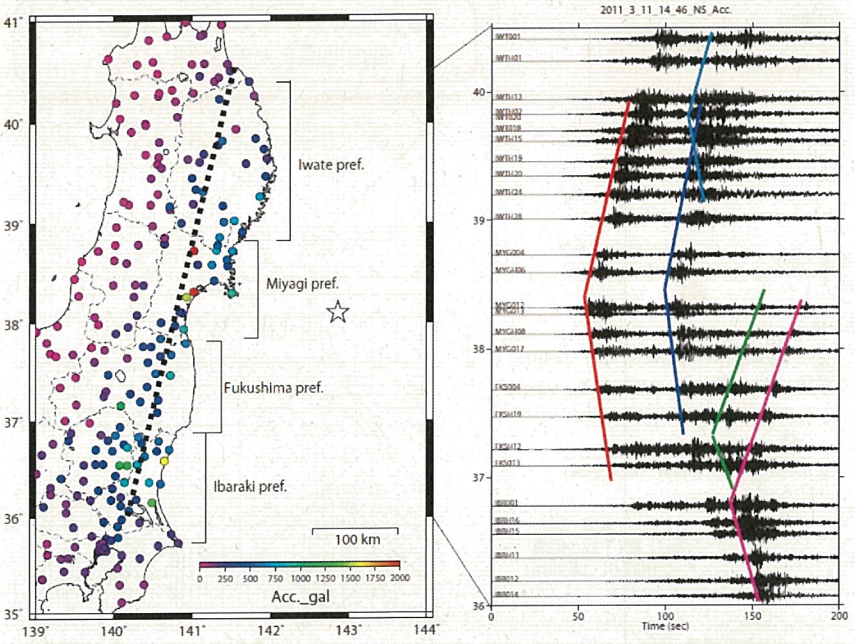
更なる安全側の配慮

不確かさ考慮モデル

○SMGA位置や短周期レベルを安全側に設定していることを確認。
○東北地方太平洋沖型地震は**今後３０年の地震発生確率がほぼ０％**であるが地震動評価に反映。

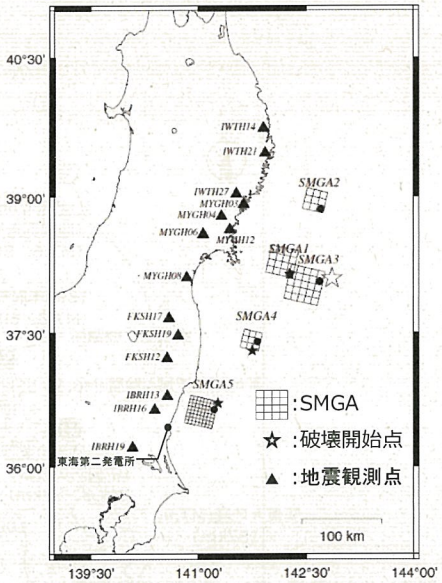
基本震源モデルの設定　地震観測記録を説明する各研究者の震源モデルの知見

○2011年東北地方太平洋沖地震では東北日本で多数の地震観測記録が得られており、この記録を再現する震源モデルが提案されている。



東北地方太平洋沖地震の地震観測記録

入倉・倉橋（2012）より抜粋

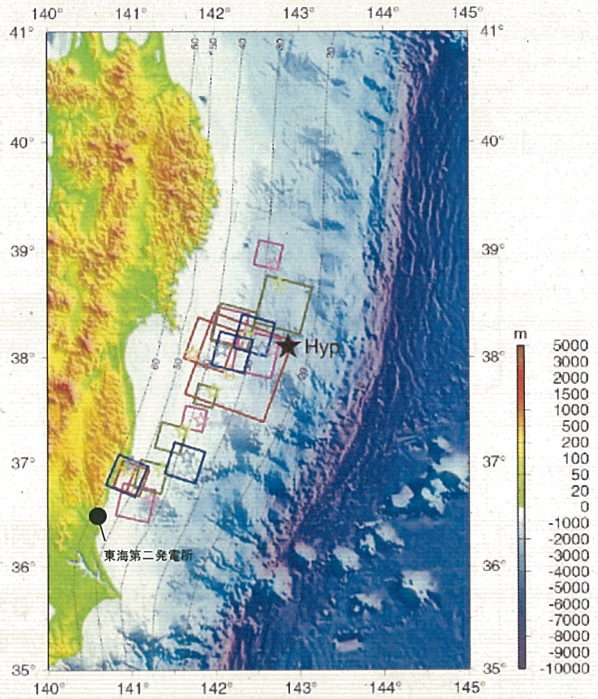


Kurahashi and Irikura（2013）による震源モデル（一部加筆）

基本震源モデルの設定　地震観測記録を説明する各研究者の震源モデルの知見

○2011年東北地方太平洋沖地震の地震観測記録を説明する震源モデルは複数の研究者によって提案されている。

○いずれの震源モデルでも、地震動を強く放出する領域（SMGA※＝強震動生成域）は、太平洋沿岸の陸域に近い宮城県沖から茨城県沖の領域にわたって複数存在している。



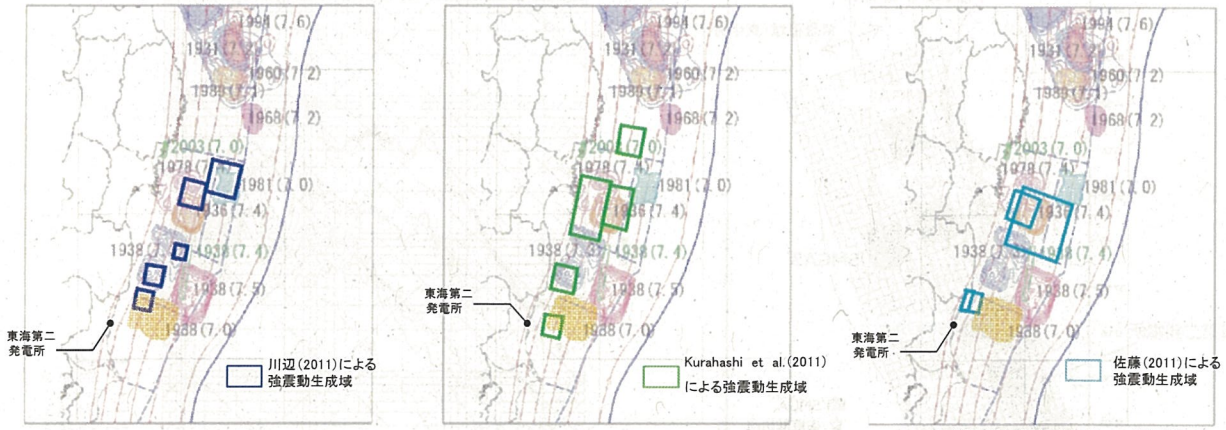
Kurahashi and Irikura(2012)
Asano and Iwata(2013)
Kawabe and Kamae(2013)
Satoh(2012)

※ Strong Motion Generation Area

基本震源モデルの設定　地震観測記録を説明する各研究者の震源モデルの知見

○各文献で示されたSMGAと、過去に発生したプレート間地震の震源域を比較すると、両者は概ね対応していると考えられる。

⇒SMGAは、過去に発生した地震の位置を手掛かりに配置することができる。

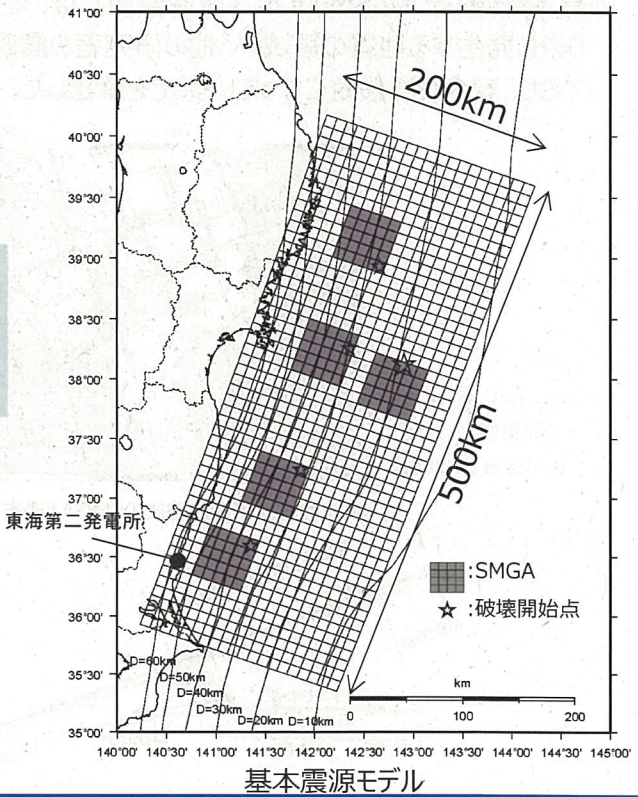


中央防災会議(2012)に一部加筆

東北地方太平洋沖地震の強震動生成域と過去の地震の震源域との比較

基本震源モデルの設定

○東北地方太平洋沖型地震として、これまで説明したSMGAに関する各種知見や、敷地で得られた東北地方太平洋沖地震の貴重な観測記録等を踏まえて、基本震源モデルを設定した。



基本震源モデル

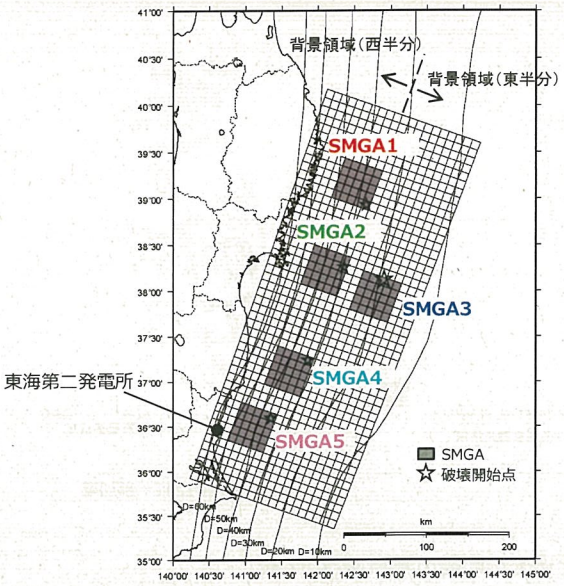
敷地に与える影響の大きいSMGAの確認

震源特性
（震源の大きさ・マグニチュードなど）

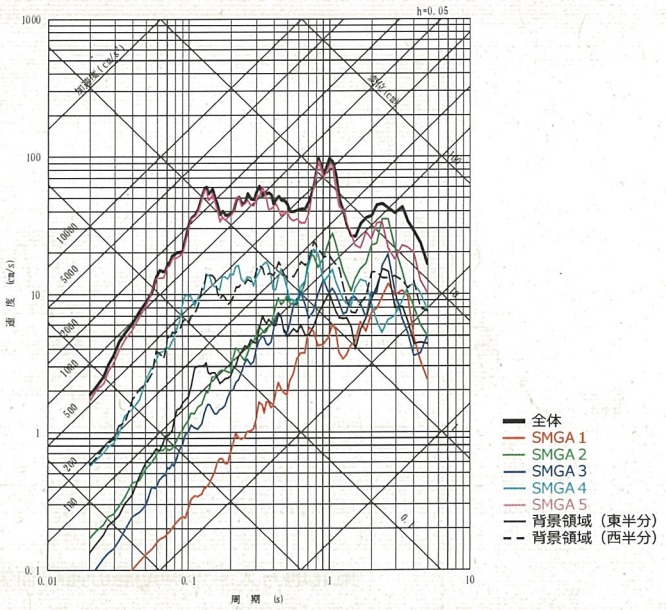
○各SMGAの本件発電所の解放基盤表面における揺れの強さを比較する。

○南北に500kmと巨大な断層面であるが、敷地の地震動は茨城県沖のSMGA5でほぼ決まっている。
（他のSMGAは敷地の地震動にほとんど影響しない。）

○SMGA5の位置と短周期レベルが地震動評価上重要である。



基本震源モデル

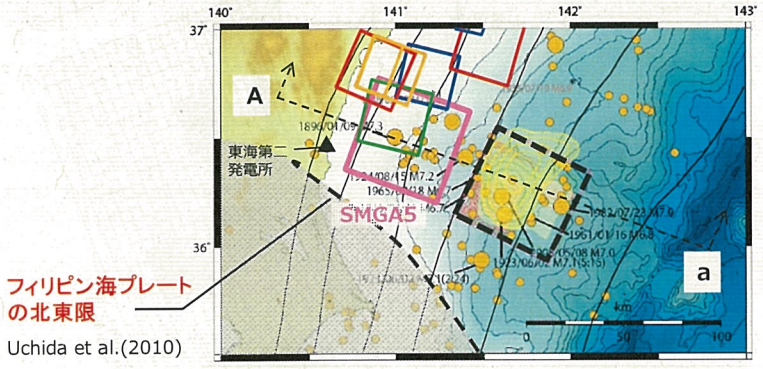


NS成分

基本震源モデルにおけるSMGA5の位置

震源特性
（震源の大きさ・マグニチュードなど）

○基本震源モデルのSMGA５（茨城県沖）は、地震調査研究推進本部（2012）による茨城県沖で繰り返し発生する地震の領域や、他の研究者の震源モデルのSMGAに比べて本件発電所に近い位置となっており、安全側の設定になっていることを確認した。



東北地方太平洋沖地震のSMGAと過去に発生した地震の分布

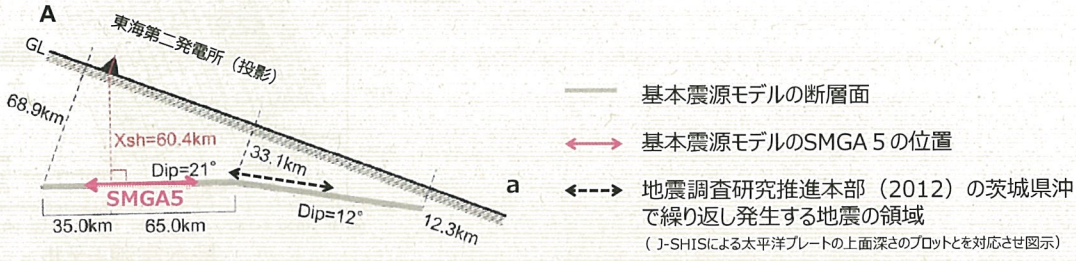
地震調査研究推進本部（2012）による
茨城県沖の繰り返し発生する地震の想定震源域

基本震源モデルのSMGA５

Asano and Iwata（2012）によるSMGA
Kurahashi and Irikura（2013）によるSMGA
川辺・釜江（2013）によるSMGA
佐藤（2012）によるSMGA

1923年～2008年8月に発生した深さ60km以浅の地震の震央分布
M≧7.0
M≧6.0

地震調査研究推進本部（2012）に一部加筆

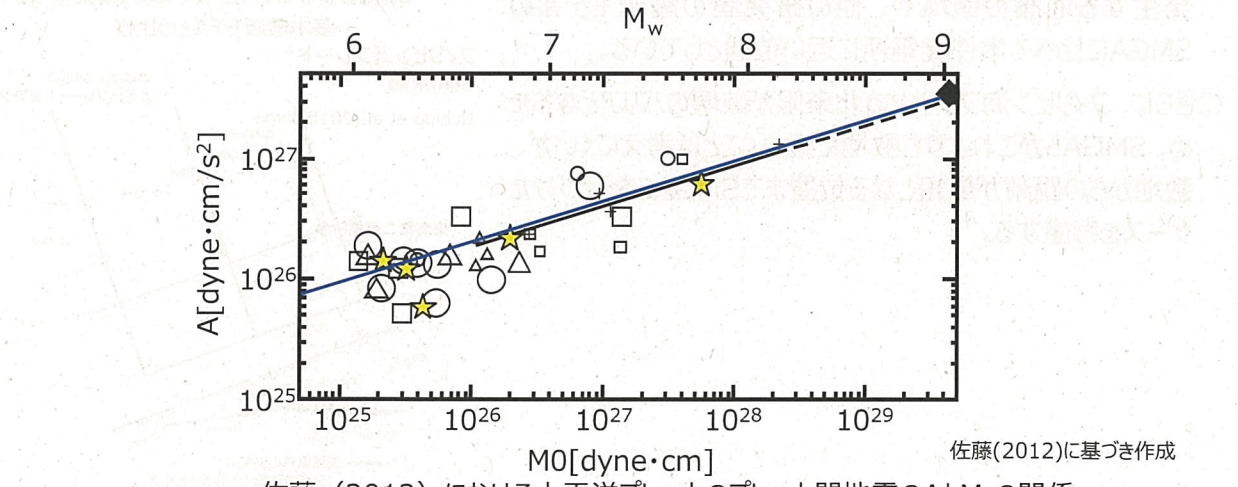


基本震源モデルのSMGA５と茨城県沖で繰り返し発生する地震の領域との比較

基本震源モデルにおける短周期レベルの設定

震源特性
(広源の大きさ・マグニチュードなど)

○基本震源モデルの短周期レベルについては、茨城県沖では他の地域に比べて小さい傾向であるが、宮城県沖、福島県沖、茨城県沖の平均的な値を採用しており、安全側の設定になっていることを確認した。



佐藤(2012)に基づき作成

佐藤（2012）における太平洋プレートのプレート間地震のAとM_0の関係

不確かさの考慮

○敷地の地震動に与える影響の大きい、SMGA位置及び短周期レベルの不確かさを考慮した地震動評価を行う。

評価ケース	地震規模	短周期レベル	SMGA位置	破壊開始点
基本震源モデル	Mw9.0	宮城県沖、福島県沖、茨城県沖で発生する地震の平均※1	過去に発生した地震の震源域を参考に配置	破壊が敷地に向かう位置に設定
SMGA位置の不確かさ	Mw9.0	宮城県沖、福島県沖、茨城県沖で発生する地震の平均※1	SMGA 5 を敷地に最も近い位置に移動	破壊が敷地に向かう位置に設定
短周期レベルの不確かさ	Mw9.0	基本震源モデルの1.5倍※2	過去に発生した地震の震源域を参考に配置	破壊が敷地に向かう位置に設定

不確かさを考慮して設定するパラメータ

※1 茨城県沖で発生する地震に対しては大きめの設定となっている。
※2 すべてのSMGAの短周期レベルを1.5倍している。

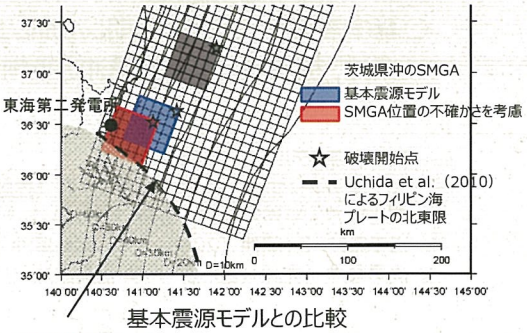
不確かさの考慮① SMGA位置の不確かさ

震源特性
（震源の大きさ・マグニチュードなど）

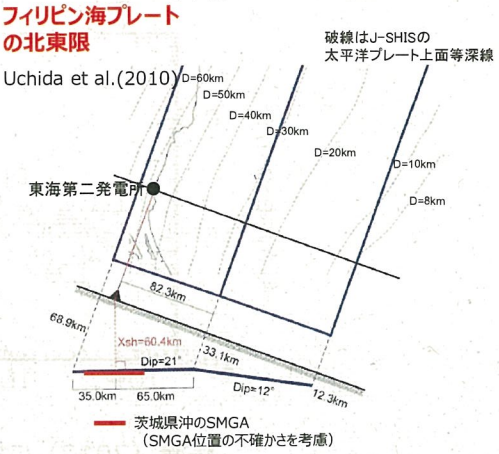
質問事項
第3－2

○前述の通り、基本震源モデルのSMGA5の位置は、地震調査研究推進本部（2012）による茨城県沖で繰り返し発生する地震の領域や、他の研究者の震源モデルのSMGAに比べて本件発電所に近い位置としている。

○さらに、フィリピン海プレートの北東限が破壊のバリアとなるため、SMGA5がこれよりも敷地に近づくことは考えにくいが、敷地からの距離が最短となる位置までSMGA5を近づけたケースを考慮する。



基本震源モデルとの比較



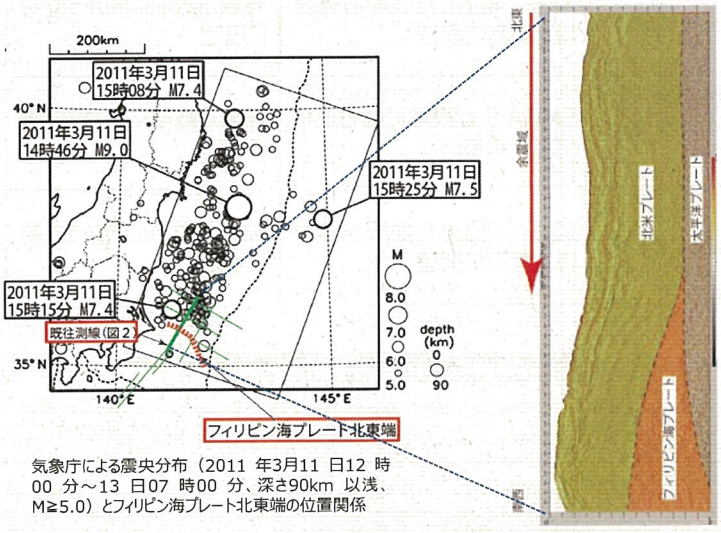
SMGA位置（断面図）

【解説】東北地方太平洋沖地震の破壊について

震源特性
（震源の大きさ・マグニチュードなど）

○東北地方太平洋沖地震では、フィリピン海プレートがこの地震の**破壊伝播のバリア**として作用した可能性が指摘されている。

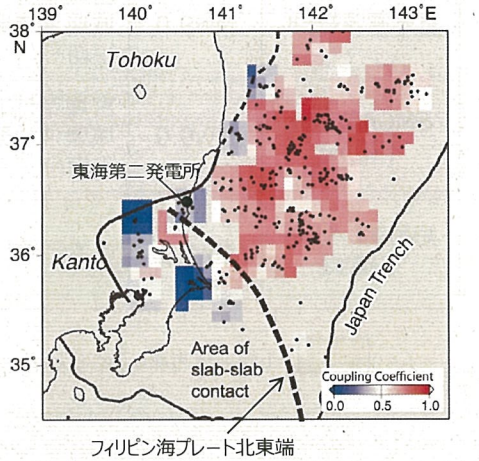
○長谷川ほか(2013)によると、「北から伝播してきた破壊が、上盤側がフィリピン海プレートに変わり、**プレート間結合度が小さく、すべり遅れがほとんどない領域**に入ると、そこで破壊がとまったということになる」とされている。



気象庁による震央分布（2011 年3月11 日12 時00 分～13 日07 時00 分、深さ90km 以浅、M≧5.0）とフィリピン海プレート北東端の位置関係

反射法地震探査に基づく解釈図
房総沖では、銚子付近から南東方向に向って、フィリピン海プレート北東端が太平洋プレートと接している。

海洋研究開発機構(2012)に一部加筆



• 繰り返し小地震の位置

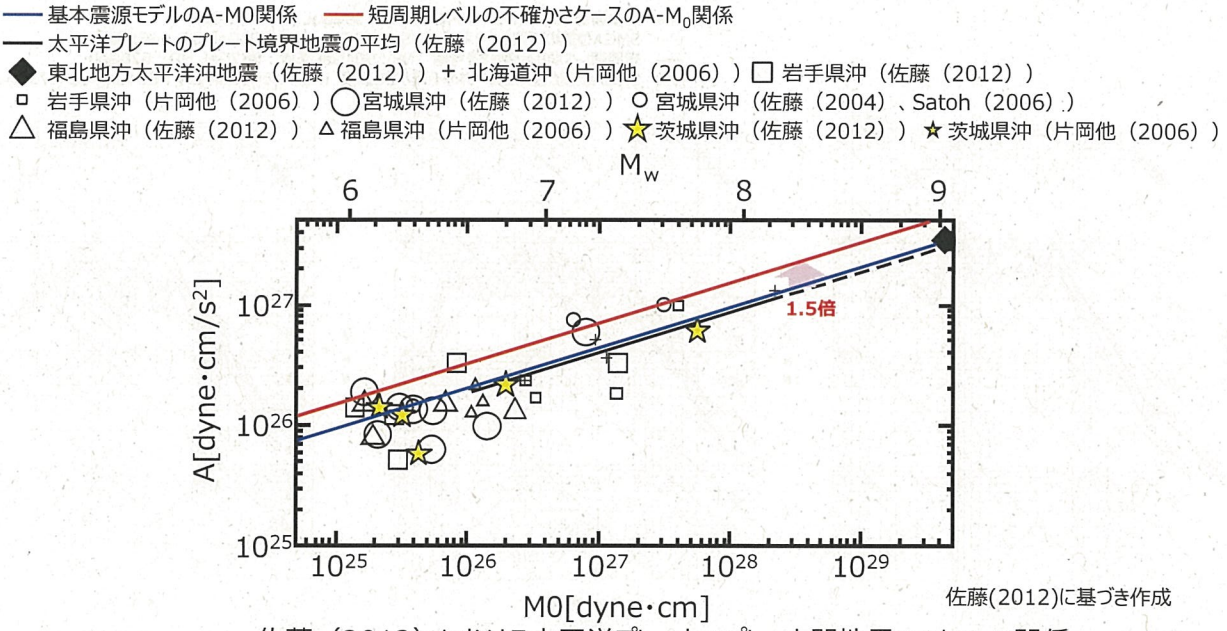
長谷川ほか(2013)に一部加筆

繰り返し小地震のすべり量の積算から推定されたプレート間結合度の分布

不確かさの考慮② 短周期レベルの不確かさ

震源特性
(震源の大きさ・マグニチュードなど)

○不確かさとして考慮する短周期レベルについては、太平洋プレートの領域で発生する地震の短周期レベルを概ねカバーするように基本震源モデルの1.5倍を考慮する。



佐藤(2012)に基づき作成

佐藤（2012）における太平洋プレートのプレート間地震のAとM_0の関係

不確かさの重畳

○SMGA位置、短周期レベルの不確かさを考慮した地震動評価を行う。

○さらに、これらの不確かさの重畳を考慮して安全側の評価とする。

評価ケース	地震規模	短周期レベル	SMGA位置	破壊開始点
基本震源モデル	Mw9.0	宮城県沖、福島県沖、茨城県沖で発生する地震の平均※1	過去に発生した地震の震源域を参考に配置	破壊が敷地に向かう位置に設定
SMGA位置の不確かさ	Mw9.0	宮城県沖、福島県沖、茨城県沖で発生する地震の平均※1	SMGA 5 を敷地に最も近い位置に移動	破壊が敷地に向かう位置に設定
短周期レベルの不確かさ	Mw9.0	基本震源モデルの1.5倍※2	過去に発生した地震の震源域を参考に配置	破壊が敷地に向かう位置に設定

不確かさの重畳を考慮して安全側の評価とする

SMGA位置の不確かさと短周期レベルの不確かさの重畳	Mw9.0	基本震源モデルの1.5倍※2	SMGA 5 を敷地に最も近い位置に移動	破壊が敷地に向かう位置に設定

不確かさを考慮して設定するパラメータ

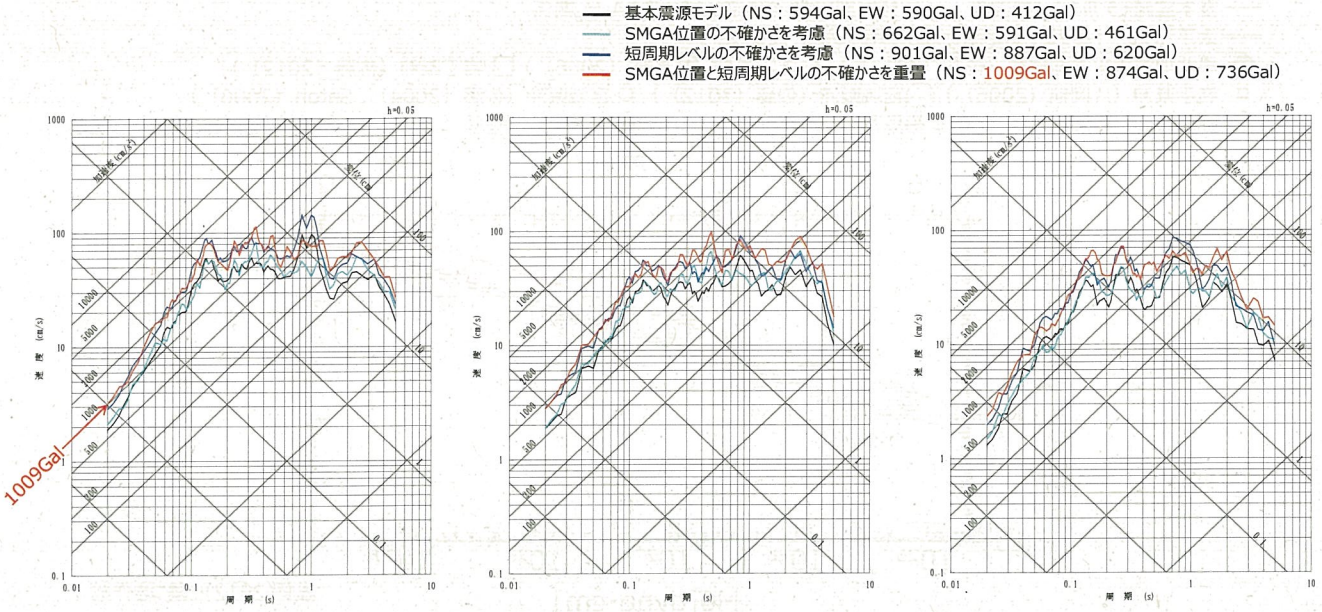
※1 茨城県沖で発生する地震に対しては大きめの設定となっている。
※2 すべてのSMGAの短周期レベルを1.5倍している。

3－3　プレート間地震の地震動評価

断層モデルを用いた手法による地震動評価

○断層モデルを用いた手法による各地震動評価結果を示す。

○SMGA位置と短周期レベルの不確かさを重畳させたケースは、 NS方向で1009Galの地震動評価結果となった。



NS方向　　EW方向　　UD方向

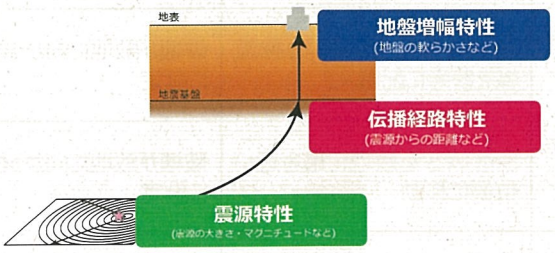
3－3　プレート間地震の地震動評価

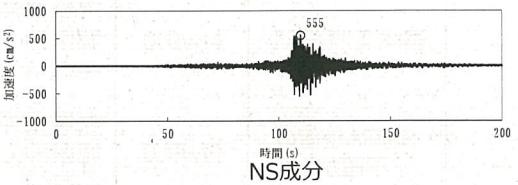
応答スペクトルに基づく手法による地震動評価

質問事項
第１－３

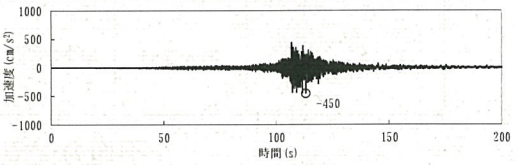
○東北地方太平洋沖地震の地域特性（震源特性・伝播経路特性・増幅特性）が含まれている観測記録を、応答スペクトルに基づく手法による地震動評価とする。

地震の揺れを決める三つの特性

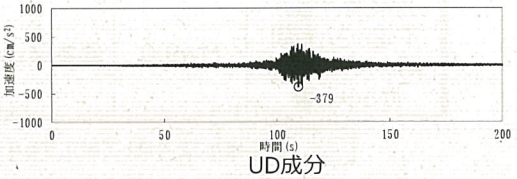




NS成分



EW成分



UD成分

時刻歴波形

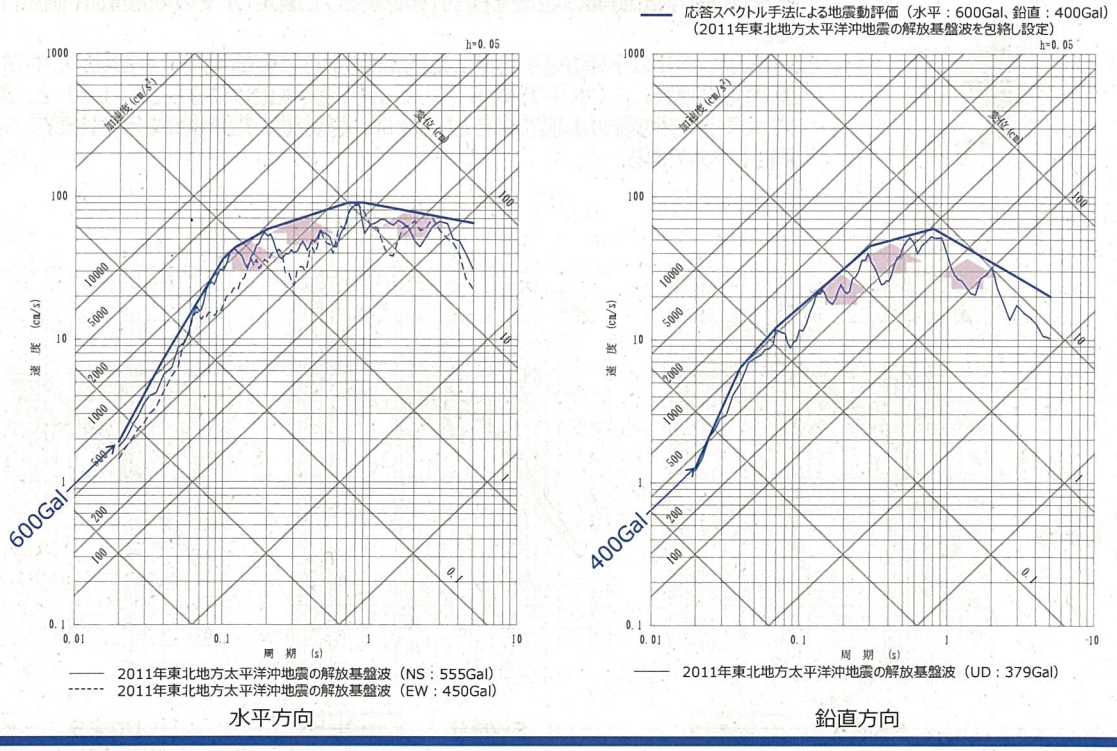
○「2011年東北地方太平洋沖型地震」については、Noda et al.（2002）の方法の適用範囲の上限であるM8.5を超える巨大地震である。

○また、2011年東北地方太平洋沖地震のような巨大地震では、複数の強震動生成域が時間的にも空間的にも離れて連動し、敷地での揺れは、特に短周期域において敷地近傍の強震動生成域の影響が支配的となる特徴がある。このような複雑な震源過程から生成される強震動を短周期から長周期にわたり精度よく評価でき、実務に活用されている実績のある距離減衰式はないと考えられる。

3－3 プレート間地震の地震動評価

応答スペクトルに基づく手法による地震動評価

○ 観測記録の谷となる周期帯をかさ上げして安全側の評価とする。



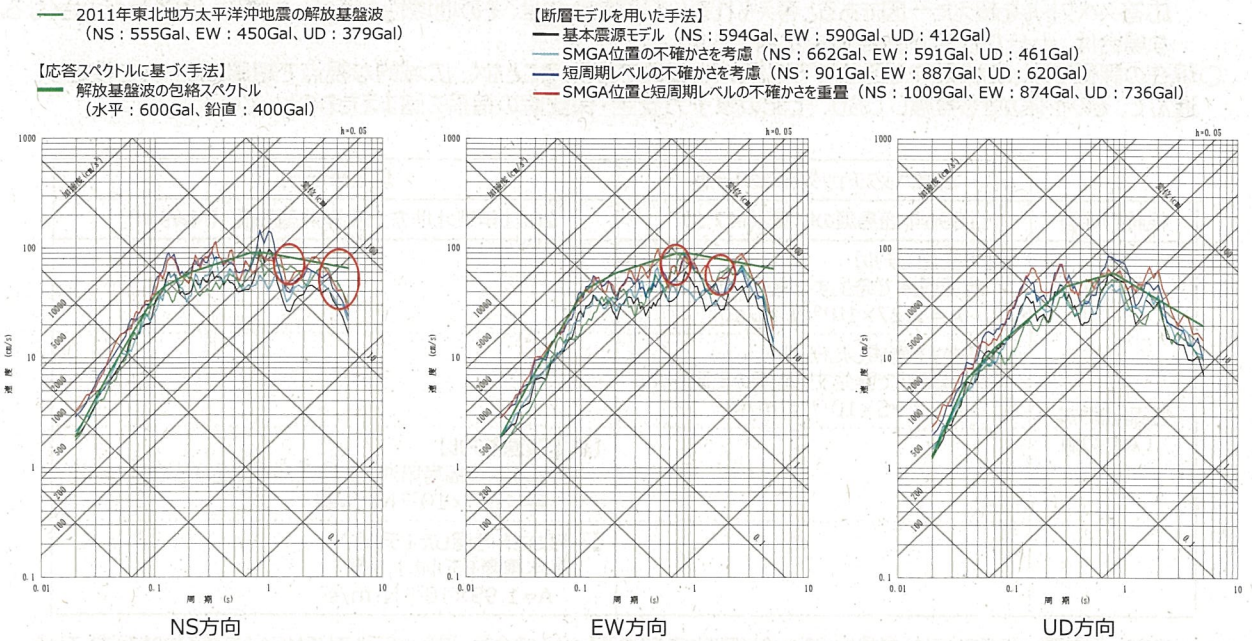
水平方向　　鉛直方向

3－3 プレート間地震の地震動評価

二つの手法による地震動評価の関係

○解放基盤波の包絡スペクトルは、断層モデル手法の結果よりも解放基盤波が大きくなる周期帯（赤丸部分）において十分に余裕があり、断層モデル手法の結果と補完的であることを確認した。

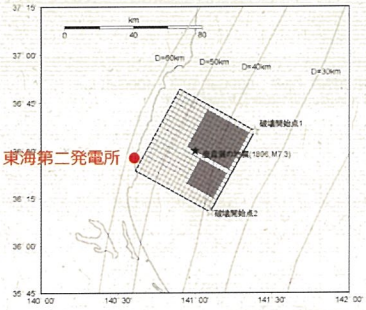
→両手法による評価を行うことで、いずれの周期帯においても安全側の評価となっている。



NS方向　　EW方向　　UD方向

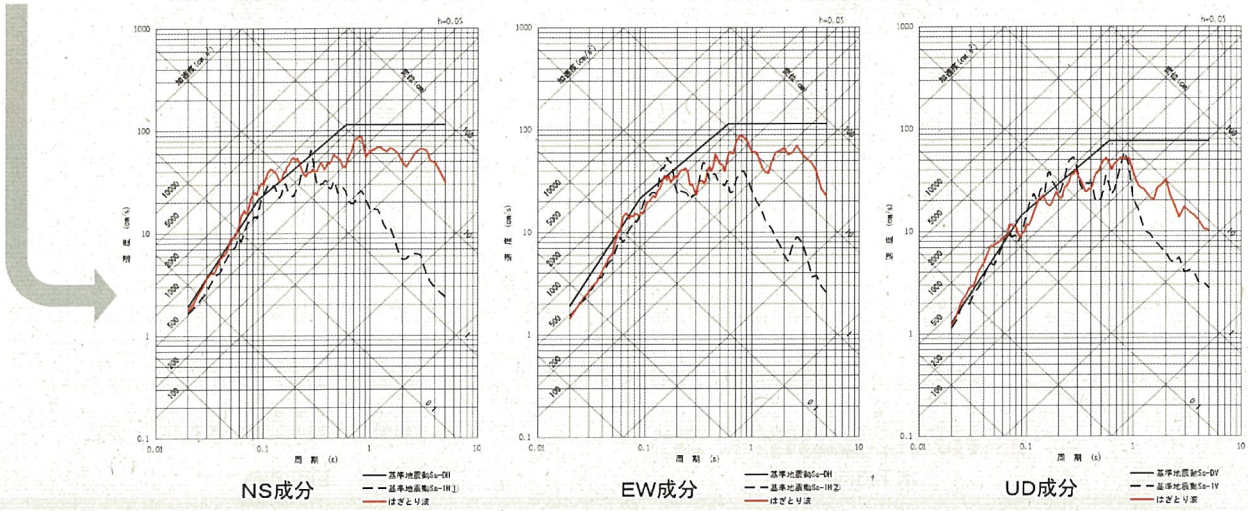
【解説】耐震バックチェック時点での地震動評価と現在の地震動評価①

質問事項
第１－２



○東北地方太平洋沖地震発生当時、耐震バックチェックにおいて、プレート間地震である1896年鹿島灘の地震を検討用地震として選定し、その地震動評価を行っていた。

○短周期レベルの不確かさを考慮した鹿島灘の地震の断層モデルを用いた手法による基準地震動Ｓ$_S$（水平方向Ｓ$_S$－１$_H$①・②、鉛直方向Ｓ$_S$－１$_V$）と、東北地方太平洋沖地震の本震のはぎとり波とは、地震動の短周期成分で比較すると概ね同じレベルである。



【解説】耐震バックチェック時点での地震動評価と現在の地震動評価②

質問事項
第１－２

○原子力安全・保安院は、科学的・技術的観点から、東北地方太平洋沖地震ないし津波を徹底的に分析するなどして、原子力発電所の安全規制に反映させるために調査・検討を進めた。
⇒その中間取りまとめ（丙D第81号証26頁）において、「東海第二発電所における基準地震動Ss策定における検討用地震の応力降下量の設定にあたっては、地域性を考慮する観点から、1896年鹿島灘の地震の基本モデルの設定において、応力降下量を平均的レベルより低く設定していたことが、はぎとり波の応答スペクトルが基準地震動Ss－Dの応答スペクトルを超えた一因であると考えられる」、「当院としては、その地域性を考慮した際に、地震動が小さくなるような場合は、十分な検討が必要であると考える」とした。

○現在の評価では、茨城県沖で発生する地震の地域性にこだわることなく、広域的な視点で短周期レベルを設定し、進んで、その不確かさも考慮しており、上記の原子力安全・保安院の指摘を踏まえたものとしている。

	耐震バックチェック当時のモデル	現在のモデル
検討用地震	1896年鹿島灘の地震（M7.3）	2011年東北地方太平洋沖型地震（Mw9.0）
短周期レベル（A）の値	【基本震源モデル】 茨城県沖で発生する地震の平均レベル $A=2.27\times10^{19}$ N・m/s^2	
	【不確かさを考慮したモデル】 茨城県沖で発生する地震の上限レベル $A=3.75\times10^{19}$ N・m/s^2	
		【基本震源モデル】 宮城県沖、福島県沖、茨城県沖で発生する地震の平均 $A=1.33\times10^{20}$ N・m/s^2
		【不確かさを考慮したモデル】 基本震源モデルの1.5倍 $A=1.99\times10^{20}$ N・m/s^2

※なお、短周期レベルについては、耐震バックチェック当時ではすべてのアスペリティの合計、現在のモデルではSMGA５に係るものを記述している。

3 － 4　内陸地殻内地震の地震動評価（活断層による地震）

活断層調査と評価の考え方

震源特性
（震源の大きさ・マグニチュードなど）

【活断層調査】
○活断層による地震は、大よそ1000年またはそれ以上の間隔で、何度も同じところで繰り返し活動するとの性質がある。そこで、この繰り返しの活動を通じて累積された地表又は地表付近における痕跡を調査する。

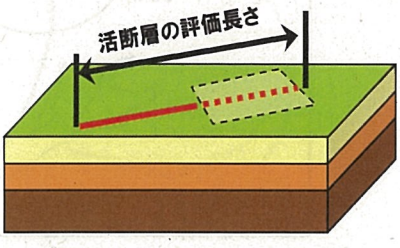
・文献調査
・変動地形学的調査
・地表地質調査
・地球物理学的調査　等

敷地周辺における詳細な各種調査結果を踏まえ・・・

【活断層評価】
○抽出した活断層につき、「延ばす」、「繋げる」などの判断を行い、敷地に与える影響を大きくする。

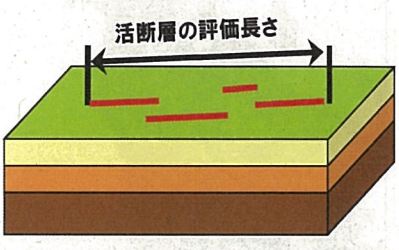
活断層の延長上に確実な否定根拠が認められない場合

延ばす



複数の活断層が認められる場合

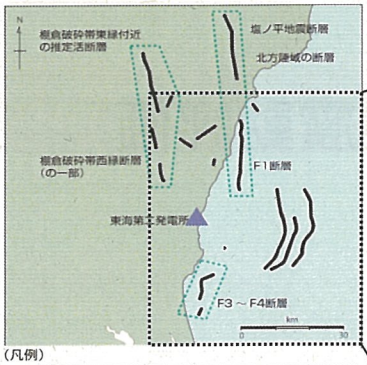
繋げる

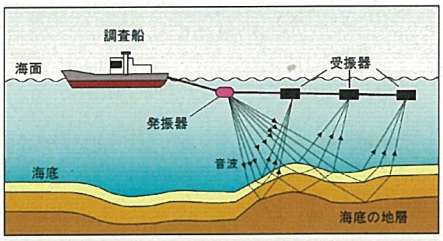


活断層調査の例（海上音波探査）

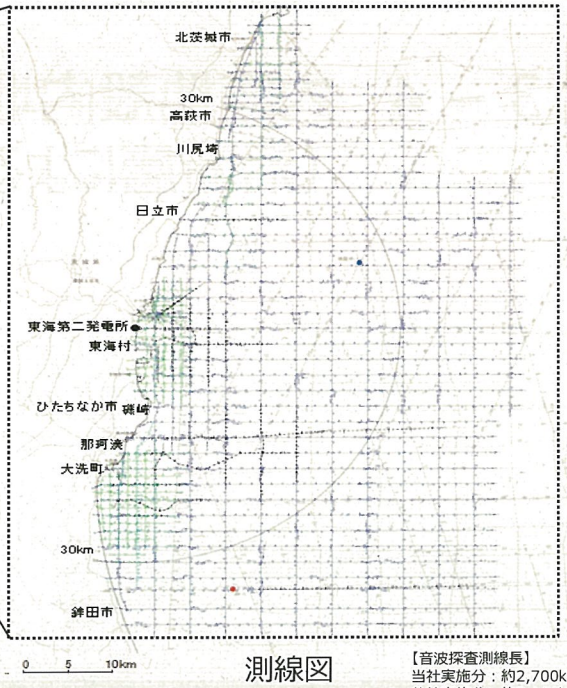
震源特性
（震源の大きさ・マグニチュードなど）

○敷地周辺の海域において、活断層の分布を明らかにすべく、海上音波探査により地質構造を詳細に調査した。





海上音波探査のイメージ



測線図

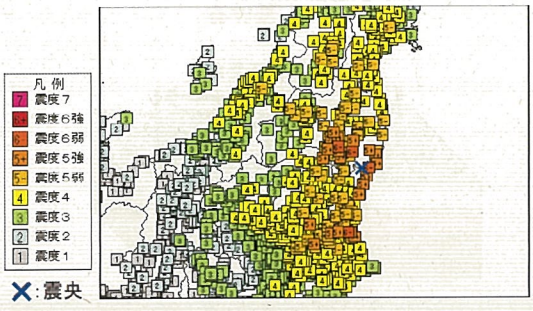
【音波探査測線長】
当社実施分：約2,700km
他社実施分：約2,100km

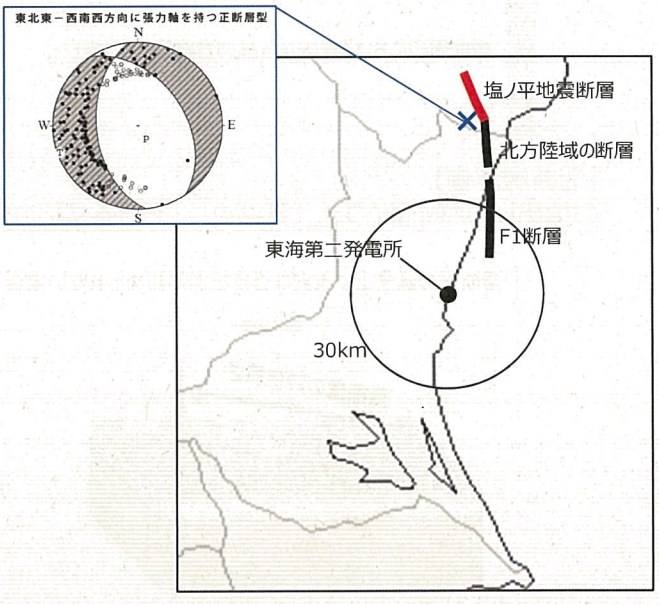
2011年福島県浜通りの地震と塩ノ平地震断層

震源特性
（震源の大きさ・マグニチュードなど）

○2011年福島県浜通りの地震では、本件発電所を含む茨城県、福島県の広い範囲で揺れが観測された。
○この地震で塩ノ平地震断層が活動したとされている（国土地理院の調査によると、ほぼ南北から北北西－南南東方向に延びた西落ちの地表変状が長さ10km以上にわたり出現したとされている）。

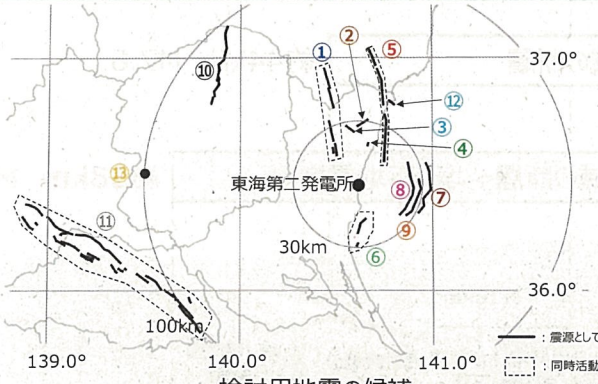
- 発震日時　：
  2011年4月11日17時16分
- 場所　：　福島県浜通り
  （いわきの西南西、約30km付近）
- 地震諸元　：
  規模　M7.0
  深さ　6km（暫定値）
- 本件発電所からの震央距離　：　54km
- 本件発電所周辺での震度　：　震度4





検討用地震の選定

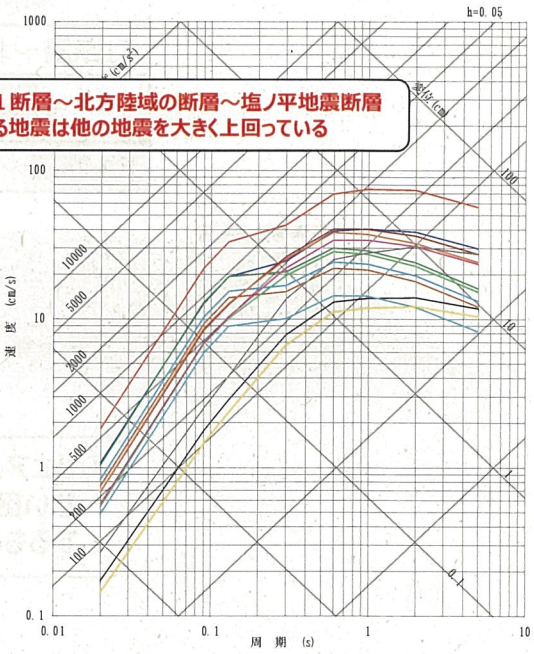
○敷地周辺の活断層や過去の被害地震を詳細に調査した結果を踏まえ、Ｆ１断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震を検討用地震として選定した。



検討用地震の候補

※規模は松田式で算定。

		地震名	長さ (km)	規模 M※	距離 (km)
活断層による地震	①	棚倉破砕帯西縁断層～同東縁付近の推定活断層	42	7.5	37
	②	関口－米平リニアメント	6	6.8	27
	③	竪破山リニアメント	4	6.8	25
	④	宮田町リニアメント	1	6.8	21
	⑤	Ｆ１断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層	58	7.8	31
	⑥	Ｆ３断層～Ｆ４断層	16	6.8	22
	⑦	Ｆ８断層	26	7.2	26
	⑧	Ｆ１６断層	26	7.2	30
	⑨	Ａ－１背斜	20	7.0	22
	⑩	関谷断層	40	7.5	92
	⑪	深谷断層帯・綾瀬川断層	82	8.0	130
	⑫	Ｆ１１断層	5	6.8	38
被害地震	⑬	818年関東諸国の地震	－	7.5	102



内陸地殻内地震の検討用地震の選定

【解説】松田式について

質問事項
第２－２

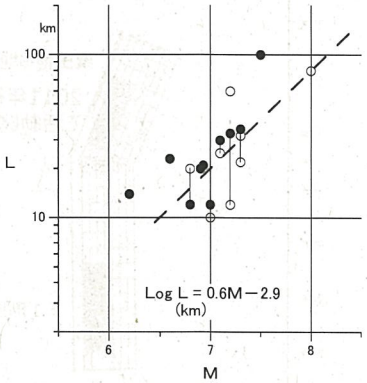
○松田式は、松田時彦東京大学名誉教授が松田（1975）において提案したもので、提唱者の名前から松田式と呼ばれる。具体的には、以下に示す断層長さと地震のマグニチュードとの関係を表す経験式で、日本の内陸部に発生した14地震のデータを基にしている。（丙D第32号証）

$$\mathrm{Log}\,L = 0.6 \cdot M - 2.9$$

○松田式には、その検討当時、各地で地形・地質学的方法などで断層が見出されるようになった時代背景がある。松田（1975）では、それらの断層から発生する地震の規模・発生間隔についての考え方として、地震は地殻に蓄えられた歪みエネルギーの急激な解放であること、その歪みエネルギーの大小は歪み領域の大小によること、そして歪み領域の大小は断層のディメンジョン（大きさ）の大小に反映しているという考え方が示されている。

○松田式で用いた14地震のデータについて、平成15年に気象庁が改訂した算出方法によりマグニチュードを再評価した数値に置き換えて、マグニチュード（Ｍ）と活断層長さ（Ｌ）との関係を描き直した結果（右図）によれば、これら14地震のデータの多くは、松田式（同図中の破線）よりも上側にプロットされており、松田式によるＭは安全側の値として算出されているといえる。

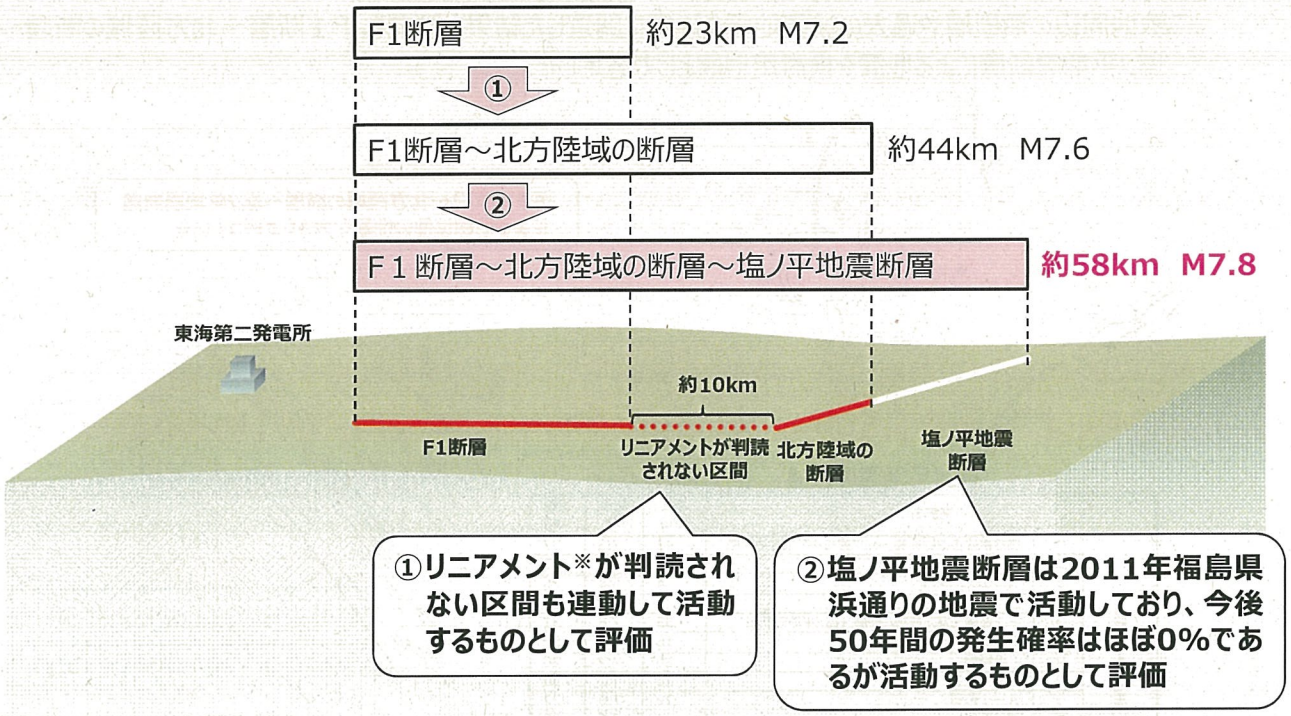
○松田式は、地震調査研究推進本部が活断層で発生する地震の規模の評価を行うために用いるなど、広く実務の用に供されている手法である。同部は、「主要活断層帯の大半を占める長さ100km以下の断層帯については、現時点でも松田（1975）が主に20kmから80kmの断層長の地震データから経験的に得た推定式…を用いて地震規模を評価することが最も確からしいと考えられる」とも解説している。（「暫定版『活断層の長期評価手法』報告書」（平成22年11月25日　地震調査研究推進本部 地震調査委員会長期評価部会）６、26頁等）



・破線は松田式を、Ｌは断層長さを、○は地表地震断層長さを、●は地震学的及び測地学的データから得られた断層長さ（震源断層長さに相当）を示す。
・一つの地震について複数の知見がある場合は、線で結んだ。

F１断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層　断層長さの設定の考え方

震源特性



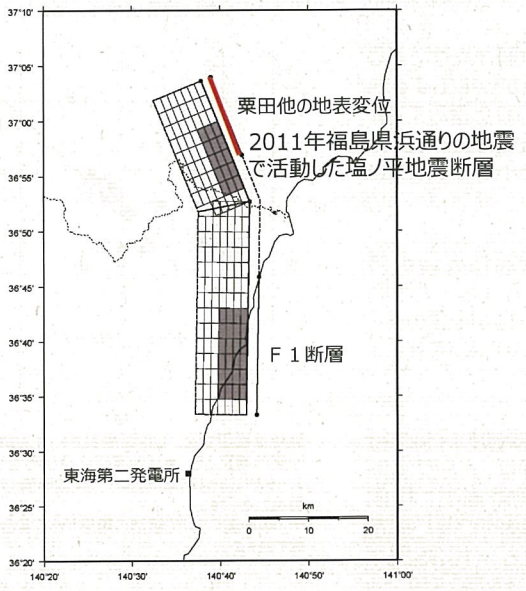
※リニアメントとは、断層による変位等により地表に現れた直線的な地形のこと。

塩ノ平地震断層の地震発生確率

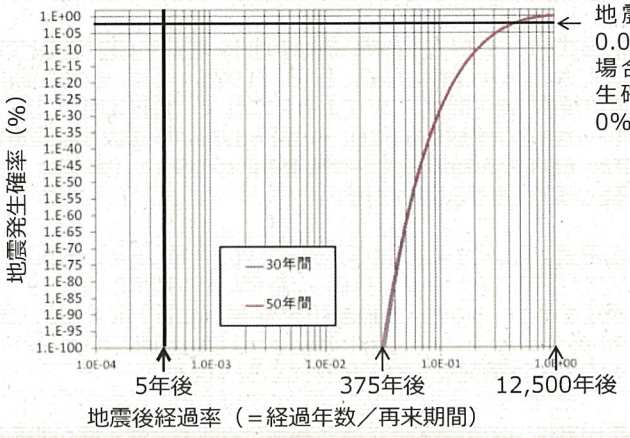
質問事項
第３－１

○塩ノ平地震断層の今後50年間における地震発生確率はほぼ０％。

○「塩ノ平地震断層」と「Ｆ１断層及び北方陸域の断層」が同時活動する場合の地震発生確率は更に低いにもかかわらず、これらを考慮せずに同時活動するとの保守的な設定を行っている。



基本震源モデル



地震本部では0.001%未満の場合は地震発生確率を「ほぼ0%」としている。

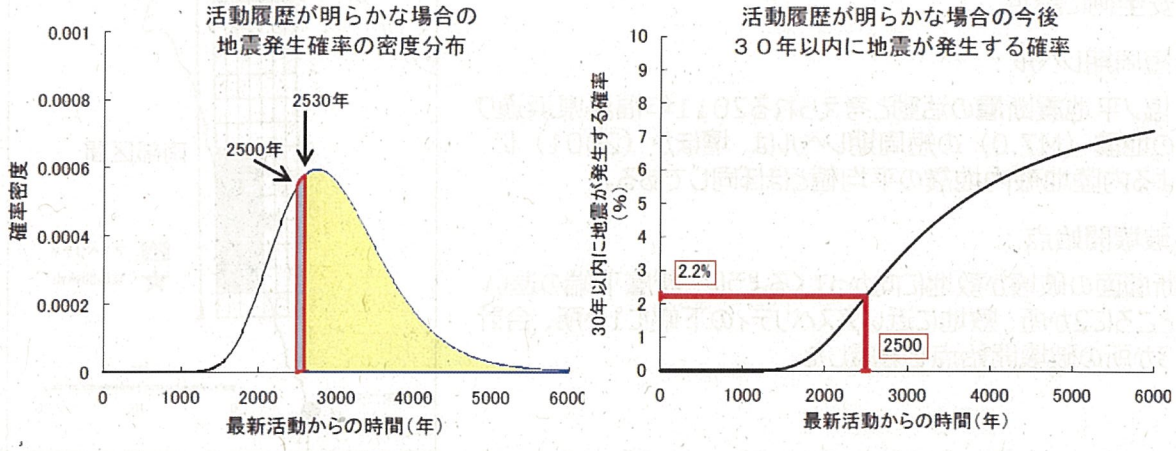
（塩ノ平地震断層の再来期間を12,500年間として評価）

地震発生確率の算定結果

期間	地震発生確率
今後30年間	6×10^{-1338}パーセント
今後50年間	1×10^{-848}パーセント

【解説】地震発生確率の計算方法

主要活断層帯の地震や海溝型地震は繰り返し発生し、その活動間隔は BPT 分布（Brownian Passage Time 分布）に従うと考えられている。BPT 分布は、次の模式図の例では左のような確率密度関数となり、例えば過去の最新活動時期から 2500 年後～2530 年後に再び地震が発生する確率は水色部分の面積となる。仮に現在「最新活動から 2500 年経過」していると、「今後 30 年以内に地震が発生する確率」は「水色の面積÷（水色の面積＋黄色の面積）」となる。最新活動からの経過年数とその時点から 30 年以内に再び地震が発生する確率は、次の模式図の例では右のようになる。



地震調査研究推進本部 地震調査委員会「全国地震動予測地図 手引・解説編 2018年版」より抜粋

３－４ 内陸地殻内地震の地震動評価

地震動評価の考え方

調査結果　観測記録

地域性を精度よく把握

基本震源モデル

更なる安全側の配慮

不確かさ考慮モデル

○Ｆ１断層、北方陸域の断層及び塩ノ平地震断層が同時活動するとし、断層長さを安全側に考慮。
←**塩ノ平地震断層の今後50年間における地震発生確率はほぼ０％である**が地震が起きるものとして評価。
○アスペリティ位置などを安全側に考慮。

基本震源モデルの設定

震源特性
(震源の大きさ・マグニチュードなど)

○調査結果を踏まえて、安全側の設定となるよう基本震源モデルを設定した。

○アスペリティ位置：

地質調査結果に基づき、南部区間と北部区間にそれぞれ一つずつ、起こりうる位置まで敷地に最も近くなるように配置。

○断層傾斜角：

敷地に与える影響が大きくなるように西側へ60°傾斜させ、安全側に設定。

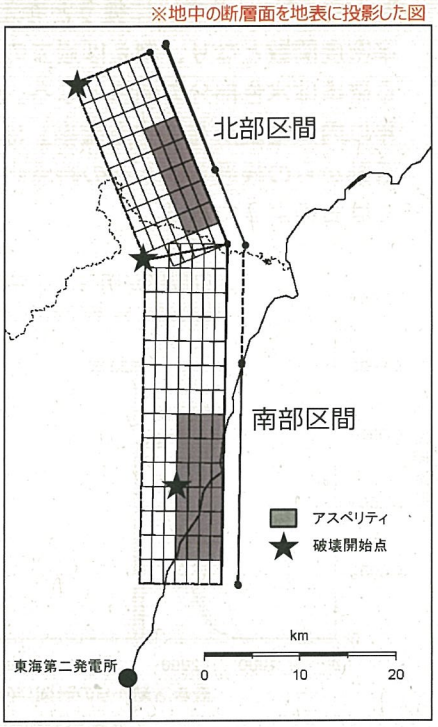
○短周期レベル：

塩ノ平地震断層の活動と考えられる2011年福島県浜通りの地震（M7.0）の短周期レベルは、壇ほか（2001）による内陸地殻内地震の平均値とほぼ同じである。

○破壊開始点：

断層面の破壊が敷地に向かってくるように、断層下端の遠いところに2か所、敷地に近いアスペリティの下端に1か所、合計3か所の破壊開始点を考慮した。

※地中の断層面を地表に投影した図



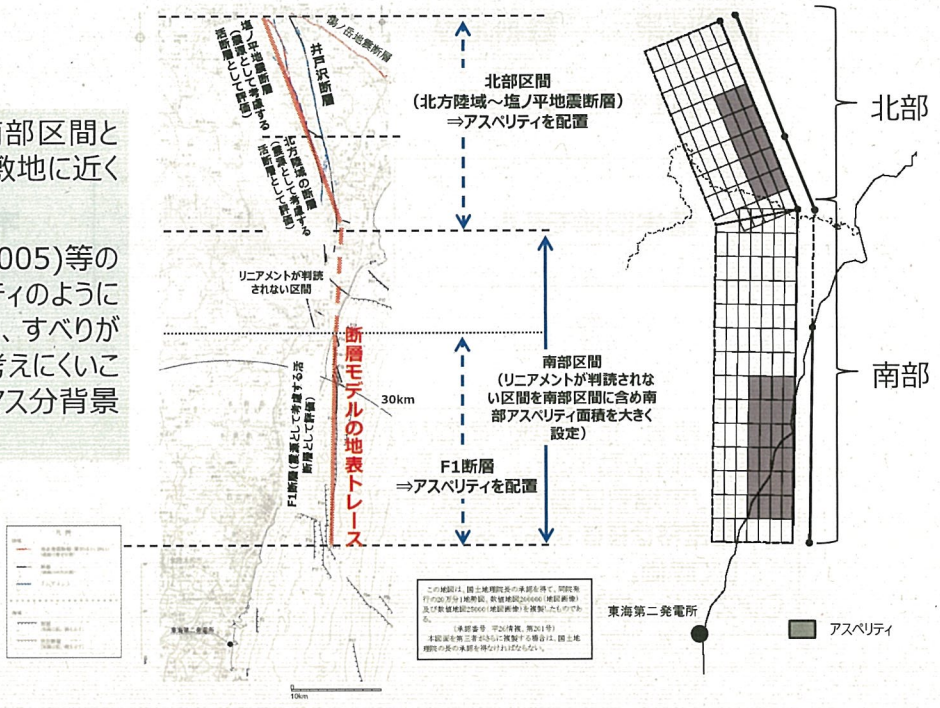
地質・地震の調査結果を踏まえた基本震源モデル

基本震源モデルにおけるアスペリティ位置の設定

震源特性
(震源の大きさ・マグニチュードなど)

○地質調査結果に基づき、南部区間と北部区間にそれぞれ一つ、敷地に近くなるように配置する。

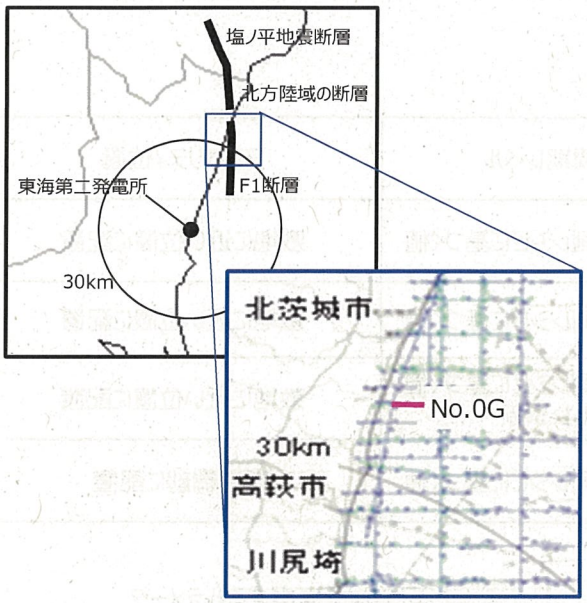
○なお、Manighetti et al.(2005)等の知見を踏まえると、アスペリティのように大きなすべりが生じる領域と、すべりがない領域が隣接することは考えにくいことから、断層端部との間に1マス分背景領域を設定する。

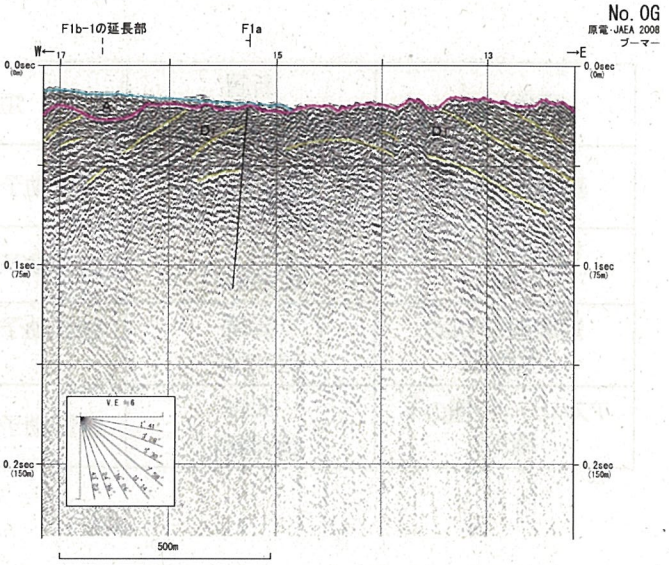


基本震源モデルにおける傾斜角の設定

震源特性
(広源の大きさ・マグニチュードなど)

○Ｆ１断層における海上音波探査により得られたデータからは、断層の傾斜角は高角であると考えられるところを、敷地に与える影響が大きくなるように西傾斜60°と安全側に設定した。





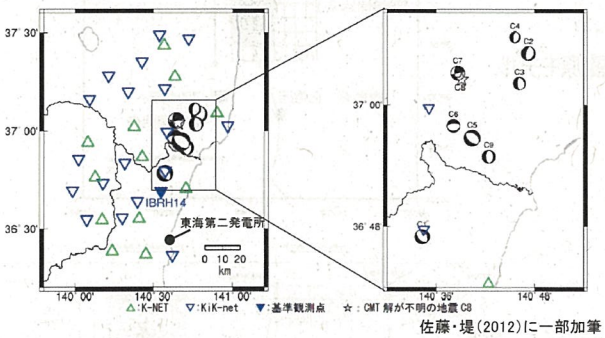
※2011年福島県浜通りの地震の分析結果を踏まえ、F1断層から塩ノ平地震断層までの全長にわたって安全側に60°と設定した。

基本震源モデルにおける短周期レベルの設定

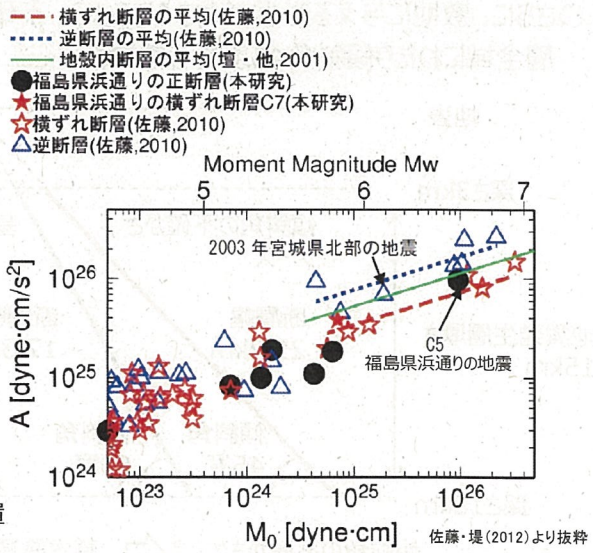
震源特性
(広源の大きさ・マグニチュードなど)

○塩ノ平地震断層の活動と考えられる2011年福島県浜通りの地震（M7.0）の短周期レベルは、壇ほか（2001）による内陸地殻内地震の平均値とほぼ同じであるとされており、特異な値ではないことを確認。
○その上で、レシピに沿って短周期レベルを設定した。

佐藤・堤（2012）では、東北地方太平洋沖地震後に福島県浜通り付近で発生した正断層の地震群の強震記録を用いて、スペクトルインバージョンにより短周期レベルを推定している。



スペクトルインバージョンに用いた地震の震央位置と観測点位置



佐藤・堤（2012）による福島県浜通りの地震群の地震モーメントと短周期レベルとの関係

不確かさの考慮

○敷地に与える影響の大きい、断層傾斜角、短周期レベル、アスペリティ位置の不確かさを考慮した地震動評価を行う。

評価ケース	断層 傾斜角	短周期レベル	アスペリティ位置
基本震源モデル	60度 （西傾斜）	強震動予測レシピに基づく値	敷地に近い位置に配置
断層傾斜角の 不確かさ	45度 （西傾斜）	強震動予測レシピに基づく値	敷地に近い位置に配置
短周期レベルの 不確かさ	60度 （西傾斜）	強震動予測レシピに基づく値 の1.5倍	敷地に近い位置に配置
アスペリティ位置の不 確かさ	60度 （西傾斜）	強震動予測レシピに基づく値	断層端部に配置

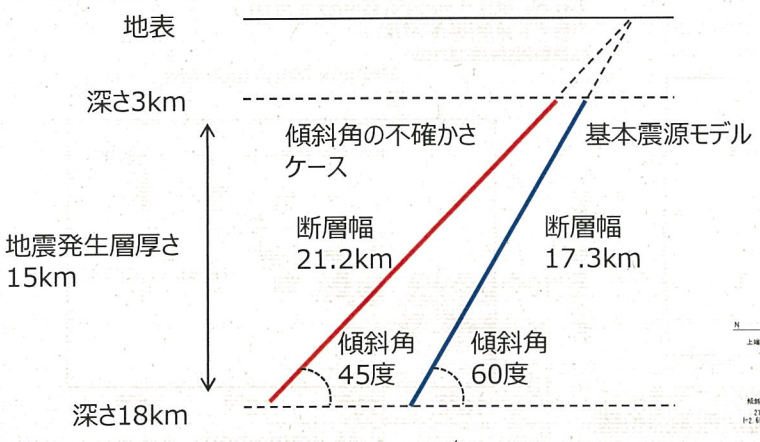
不確かさを考慮するパラメータ

傾斜角の不確かさの考慮

震源特性
(震源の大きさ・マグニチュードなど)

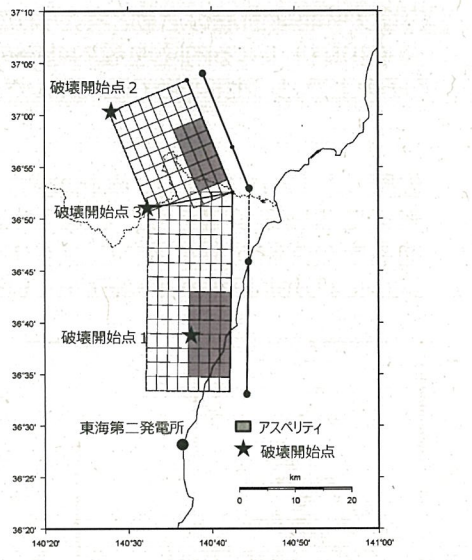
○基本震源モデルでは、Ｆ１断層における海上音波探査により得られたデータからは断層の傾斜角は高角であると考えられるところを、敷地に与える影響が大きくなるように西傾斜60°と安全側に設定した。

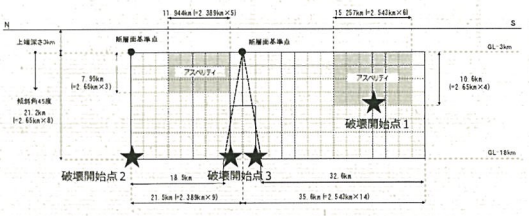
○さらに、敷地に与える影響が大きくなるよう、不確かさとして断層全域にわたり傾斜角45度を考慮する。



	傾斜角の不確かさケース	基本震源モデル
地震モーメント （地震の規模）	7.32×10^{19}N·m	5.21×10^{19}N·m

断面図（模式図）





断層傾斜角の不確かさを考慮した震源モデル

短周期レベルの不確かさの考慮

震源特性
(震源の大きさ・マグニチュードなど)

○塩ノ平地震断層の活動とされている2011年福島県浜通りの地震の短周期レベルは、内陸地殻内地震の平均程度であった。

○逆断層型の内陸地殻内地震である2007年新潟県中越沖地震では、同規模の地震と比べ地震動（短周期レベル)が約1.5倍大きいという知見が得られている。

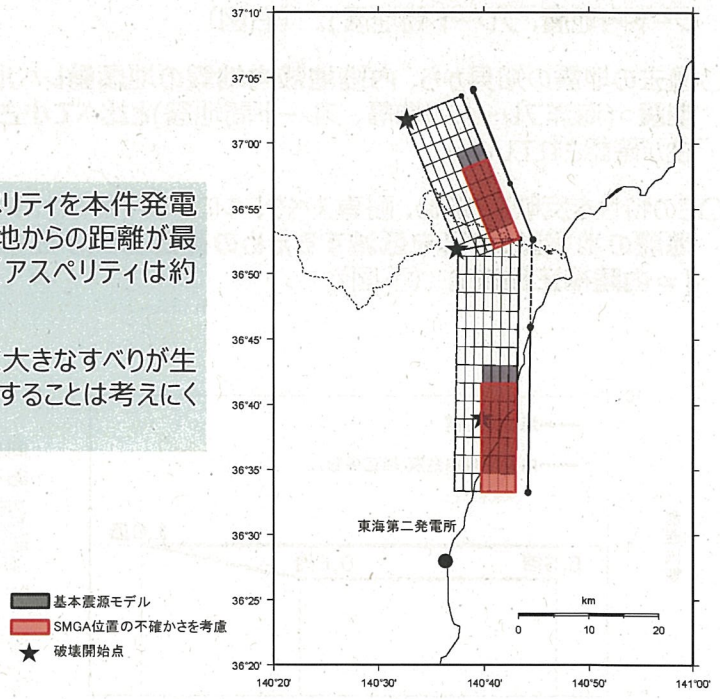
○Ｆ１断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震の評価では、保守的に短周期レベルを1.5倍とする不確かさを考慮した。

アスペリティ位置の不確かさの考慮

震源特性
(震源の大きさ・マグニチュードなど)

○前述の通り、基本震源モデルのアスペリティを本件発電所の近くに配置しているが、さらに、敷地からの距離が最短となる位置まで近づけたケース（アスペリティは約2.5km近づく）を考慮する。

○なお、前述の通り、アスペリティのように大きなすべりが生じる領域と、すべりがない領域が隣接することは考えにくい。



アスペリティ位置の不確かさを考慮した震源モデル

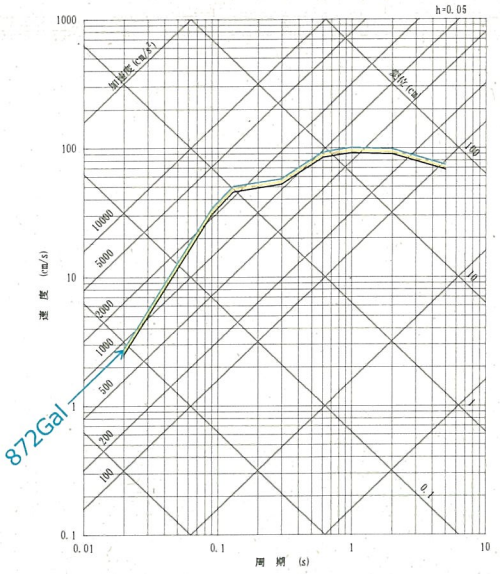
応答スペクトルに基づく手法による地震動評価

○応答スペクトルに基づく手法による地震動評価を実施した。

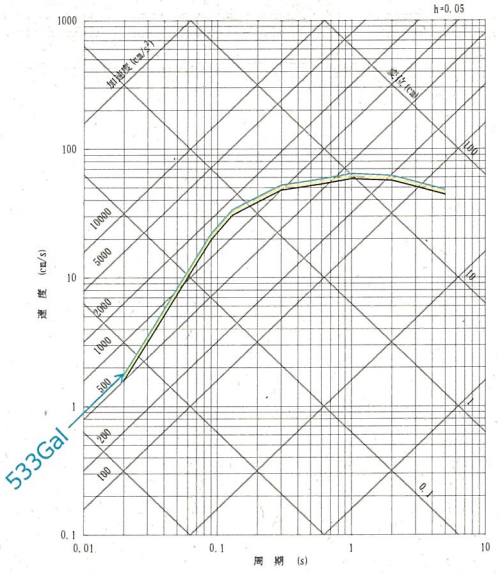
○Noda　et al.(2002)を採用し、内陸補正係数（0.6倍）は安全側に考慮していない。

F１断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震

———	基本震源モデル	（M7.8、Xeq= 26.3 km）	（水平：790Gal、鉛直：501Gal）
———	断層傾斜角の不確かさを考慮	（M7.8、Xeq= 25.3 km）	（水平：831Gal、鉛直：527Gal）
———	アスペリティ位置の不確かさを考慮	（M7.8、Xeq= 24.4 km）	（水平：872Gal、鉛直：553Gal）



水平成分



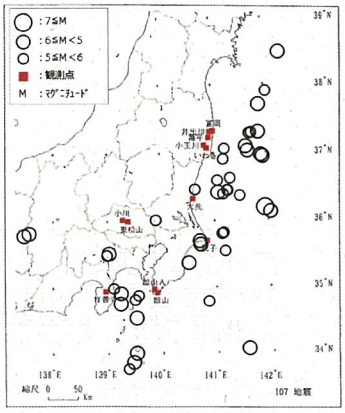
鉛直成分

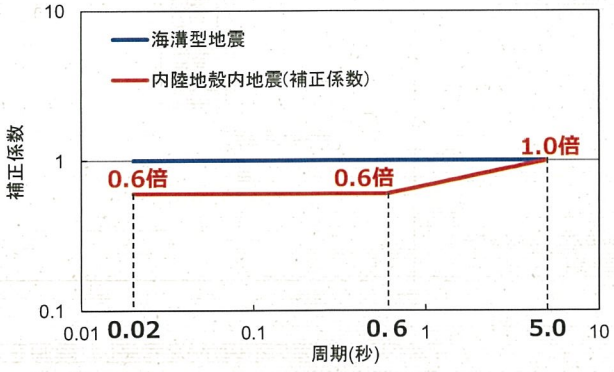
【参考】Noda et al.(2002)の内陸補正係数

○Noda　et al.(2002)のデータベースの多くは、**海溝型地震**(海洋プレート内地震、プレート間地震)。（右図）

○過去の地震の知見から、**内陸地殻内地震の地震動レベルは海溝型地震**（海洋プレート内地震、プレート間地震)**と比べて小さいという特性**が確認されている。

○この特性を反映するため、耐専スペクトルによる評価では、**内陸地殻内地震の地震動レベルを低減するための補正係数**が提案されている**(＝内陸補正係数)**。（下図）





内陸補正係数

同じ地震規模、同じ距離の場合、
ある地点での評価結果は・・・

海溝型地震の場合
⇒ 最大加速度**1000ガル**

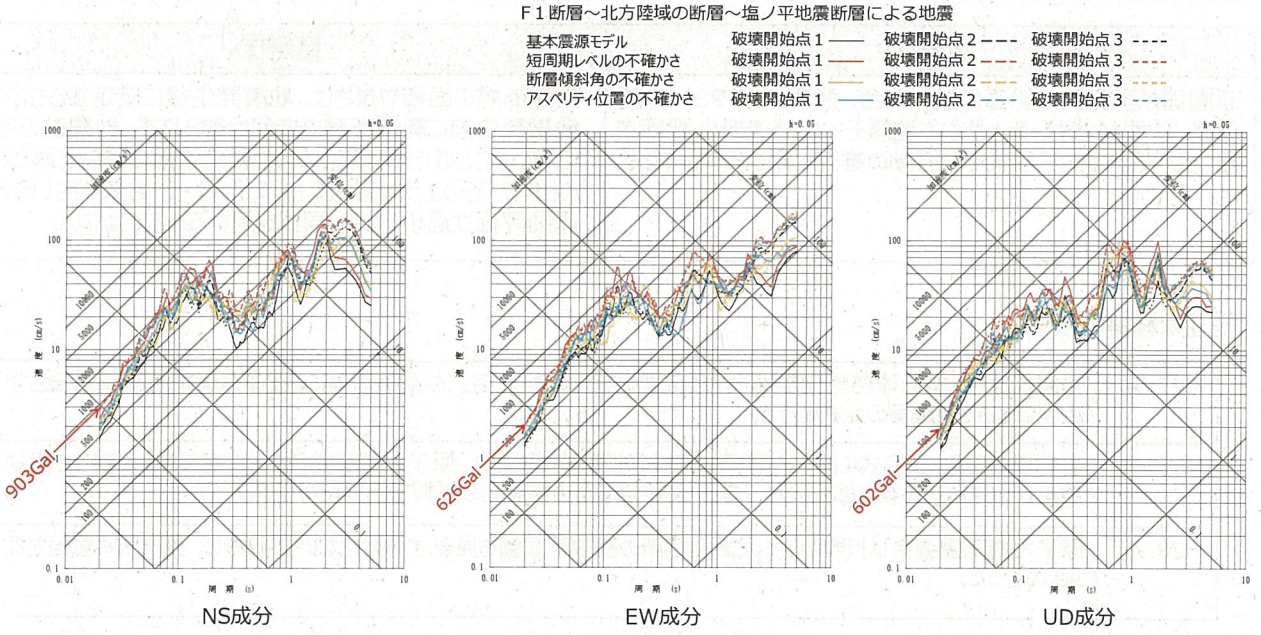
内陸地殻内地震の場合
⇒ 最大加速度**600ガル**

3－4　内陸地殻内地震の地震動評価

断層モデルを用いた手法による地震動評価

○経験的グリーン関数法を用いて地震動評価を実施した。

○本件発電所で得られた観測記録を要素地震とした経験的グリーン関数法を採用することで伝播特性・増幅特性を地震動評価に反映している。

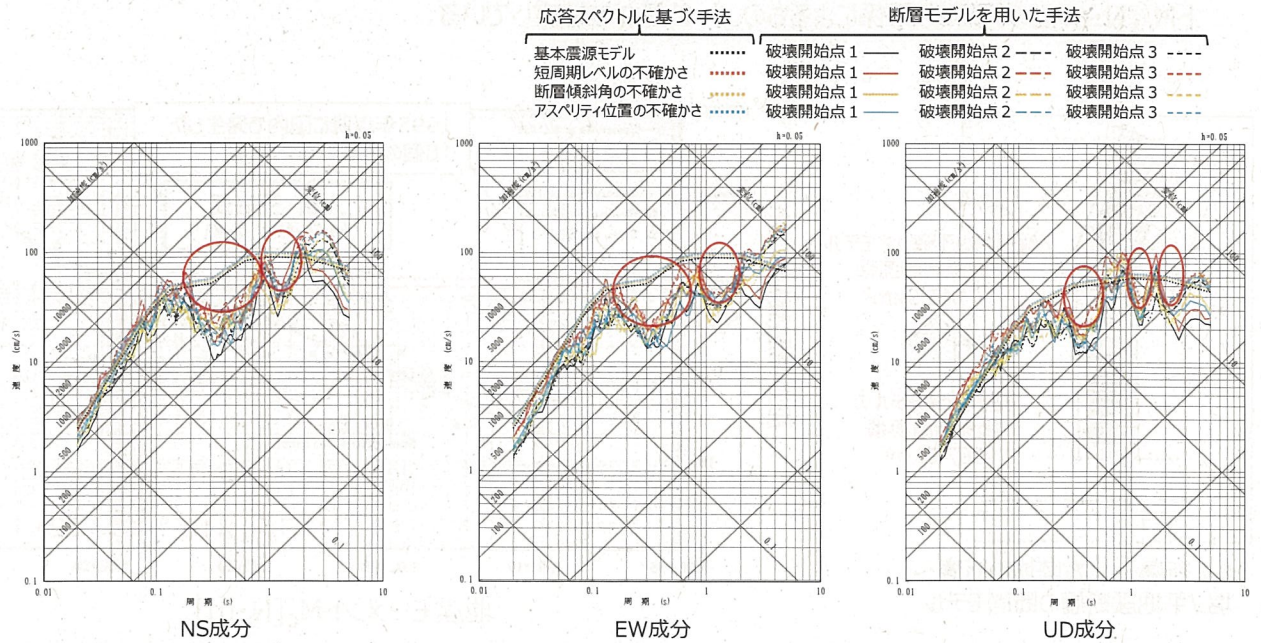


NS成分　　EW成分　　UD成分

3－4　内陸地殻内地震の地震動評価

二つの手法による地震動評価の関係

○これら二つの手法による地震動評価を行った結果、応答スペクトルに基づく手法の結果が断層モデルを用いた手法の結果よりも大きくなる周期帯として、赤丸部分があり、両者は補完的な関係になっている。



NS成分　　EW成分　　UD成分

【参考】島﨑邦彦前原子力規制委員会委員長代理の見解について

○強震動予測レシピで採用されている内陸地殻内地震の震源断層面積と地震モーメントとの関係を表す入倉・三宅式に関し、島﨑邦彦前原子力規制委員会委員長代理は、以下の見解①と見解②とを述べ、原子力規制委員会における検討等がなされた。

見解①	見解②
断層面が垂直又は鉛直に近い場合、武村（1998）の関係式（「武村式」）等と比べて地震モーメントを過小評価することから、入倉・三宅式を地震動の推定に用いるべきではない。	震源断層の面積や長さは、地震発生後に確定するもので、地震発生前に震源断層の情報は得られず、地震動の推定に用いることのできる情報は、地震発生前の情報に限られることから、そのような情報をもとに入倉・三宅式を用いると地震動評価は過小となり、同式を用いるべきではない。

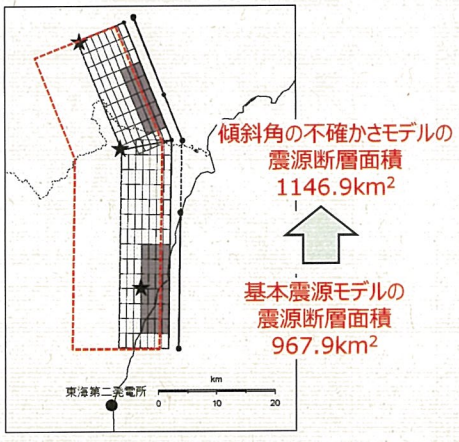
※主な経緯

H27.5	島﨑氏は、日本地球惑星科学連合大会において、入倉・三宅式の過小性等に係わる見解を発表。その後も学会等において同趣旨の発表を行う。
H28.6	島﨑氏の入倉・三宅式に関する見解について新聞報道がなされ、原子力規制委員会は、島﨑氏との間での面談、島﨑氏の見解に係わる関西電力（株）大飯発電所の地震動の試算を行うなどの検討を行う。
H28.7	原子力規制委員会は「現時点で大飯発電所の基準地震動を見直す必要はない」と判断し、島﨑氏の意見を採用しなかった。

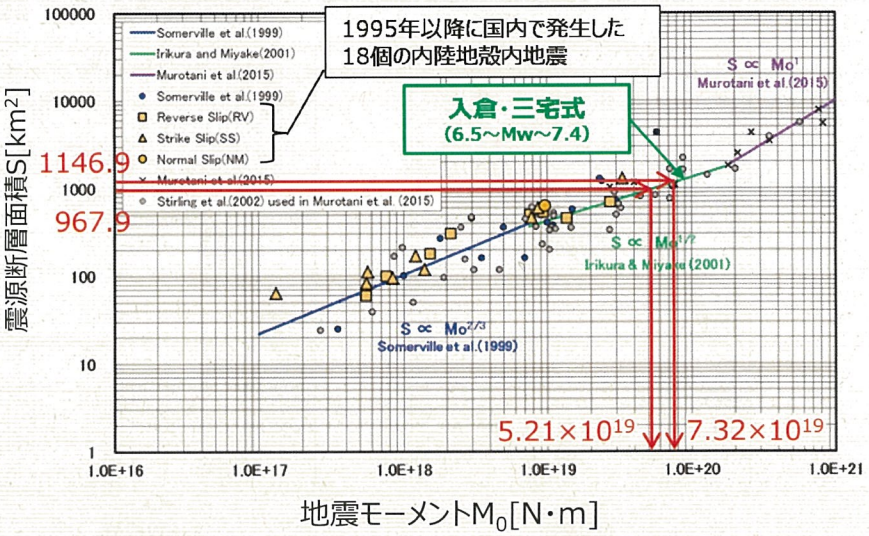
【参考】地震モーメントと震源断層面積との関係

○宮腰ほか(2015)では、1995年以降に国内で発生した最新18個の内陸地殻内地震に関する震源インバージョン結果と、入倉・三宅式とが調和的であることが確認されている。

○本件発電所におけるF１断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震の地震モーメントの設定に当たっては、強震動予測レシピに採用されている入倉・三宅式（震源断層面積S(km²)と地震モーメントM_0(N・m)との経験的関係によるもの。）に基づき設定している。



F１断層～北方陸域の断層～
塩ノ平地震断層の断層モデル



（宮腰ほか(2015)に加筆）

【参考】島﨑氏の見解①

見解①	断層面が垂直又は鉛直に近い場合、武村式等と比べて地震モーメントを過小評価することから、入倉・三宅式を地震動の推定に用いるべきではない。

【結論】
○見解①は、本件発電所の地震動評価を過小とする根拠となるものではない。

理由①：本件発電所における断層傾斜角の設定
Ｆ１断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震については、「断層面が垂直又は鉛直に近い場合」には当たらない。

理由②：島﨑氏自身の証言（名古屋高裁金沢支部／大飯原発３、４号機運転差止請求事件）
「これらの式が出たからといって、皆さん誤解されているかと思うんですけれども、どの式が悪いだとかどの式がいいかという話ではありません。それぞれの式は、しかるべきデータに基づいて作られているので、ある意味、どの式も正しいわけです」

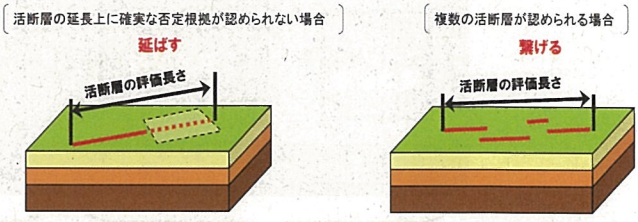
理由③：入倉・三宅式に関する多くの学術的研究ないし検証
○入倉・三宅式と武村式とで算出される地震モーメントの値が異なり得ることは、入倉・三宅（2001）において既に認識されていた事柄である。
○その原因について、宮腰ほか（2015）は、入倉・三宅式は、震源断層面上の不均質なすべりを前提に妥当性ないし信頼性を有するのに対し、武村式は、このような不均質なすべり分布を前提とした震源断層の長さとは異なる断層長さを参照して提案された式であることによるものであることを、明らかにしている。
○特に、島﨑氏が入倉・三宅式の過小性を確信したとする2016年熊本地震について、原子力規制委員会は、同地震の震源断層面積と地震モーメントとの関係が入倉・三宅式と整合していることを確認し、また、引間・三宅（2016）も、熊本地震の強震波形等を用いた解析による震源断層モデルを広く収集するなどして、入倉・三宅式は有効であるとしている。

【参考】島﨑氏の見解②

見解②	震源断層の面積や長さは、地震発生後に確定するもので、地震発生前に震源断層の情報は得られず、地震動の推定に用いることのできる情報は、地震発生前の情報に限られることから、そのような情報をもとに入倉・三宅式を用いると地震動評価は過小となり、同式を用いるべきではない。

【結論】
○見解②は、本件発電所の地震動評価を過小とする根拠となるものではない。

理由
○原子力発電所の基準地震動の策定においては、各種の詳細な調査結果に基づき、対象地点における地域性を踏まえながら、保守的な条件設定を行って震源断層を設定することにより、過小評価に至らないようにすることが十分に可能である。
○本件発電所においても、震源断層について保守的な条件設定を行っている。



※本件発電所の原子炉設置変更許可に関する意見公募手続における原子力規制委員会の回答
「審査に当たっては、震源断層の幅の設定次第で、入倉・三宅式は他の関係式に比べて、同じ断層の長さに対する地震モーメントを相対的に小さく算出する可能性もあることに留意して、震源断層の長さや幅等に係る保守性の考慮が適切になされているかという観点でも確認しています。また、アスペリティを敷地に最も近い位置に配置したケースや、短周期の地震動レベルを基本ケースの１．５倍としたケース等、地震動評価に影響が大きいと考えられるパラメータの不確かさを考慮したケースについても地震動評価が行われており、新規制基準に適合していることを確認し、妥当であると判断しています」

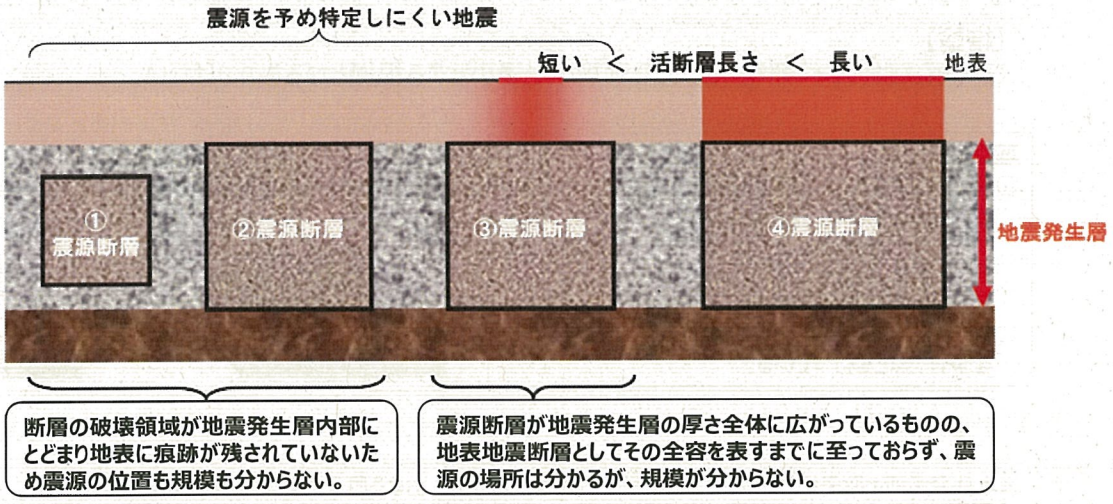
3 － 5　震源を特定せず策定する地震動

震源を特定せず策定する地震動とは

質問事項
第２－３

○震源を予め特定しにくい地震として念のため評価する地震動。

○震源と活断層を関連づけることが困難な過去の内陸地殻内地震で得られた観測記録を基に設定する。



Mw6.5未満の地震

震源の位置も規模も分からないどこでも発生すると考えられる地震

Mw6.5以上の地震

事前に活断層の存在が指摘されていなかった地域で発生し、地表付近に一部の痕跡が確認された地震

震源を特定せず策定する地震動とは

質問事項
第２－３

○審査ガイドにおいて、「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」として例示されている以下の16地震を対象に検討する。

表-1　収集対象となる内陸地殻内の地震の例

No	地震名	日時	規模
1	2008年岩手・宮城内陸地震	2008/06/14, 08:43	Mw6.9
2	2000年鳥取県西部地震	2000/10/06, 13:30	Mw6.6
3	2011年長野県北部地震	2011/03/12, 03:59	Mw6.2
4	1997年3月鹿児島県北西部地震	1997/03/26, 17:31	Mw6.1
5	2003年宮城県北部地震	2003/07/26, 07:13	Mw6.1
6	1996年宮城県北部（鬼首）地震	1996/08/11, 03:12	Mw6.0
7	1997年5月鹿児島県北西部地震	1997/05/13, 14:38	Mw6.0
8	1998年岩手県内陸北部地震	1998/09/03, 16:58	Mw5.9
9	2011年静岡県東部地震	2011/03/15, 22:31	Mw5.9
10	1997年山口県北部地震	1997/06/25, 18:50	Mw5.8
11	2011年茨城県北部地震	2011/03/19, 18:56	Mw5.8
12	2013年栃木県北部地震	2013/02/25, 16:23	Mw5.8
13	2004北海道留萌支庁南部地震	2004/12/14, 14:56	Mw5.7
14	2005年福岡県西方沖地震の最大余震	2005/04/20, 06:11	Mw5.4
15	2012年茨城県北部地震	2012/03/10, 02:25	Mw5.2
16	2011年和歌山県北部地震	2011/07/05, 19:18	Mw5.0

Mw6.5以上（２地震）

審査ガイドでは、「活断層や地表地震断層の出現要因の可能性として、地域によって活断層の成熟度が異なること、上部に軟岩や火山岩、堆積層が厚く分布する場合や地質体の違い等の地域差があることが考えられる。」とされている。

このような観点から、震源域と本件発電所の敷地近傍の地質学的、地震学的背景を比較し、地域性が類似していた場合に考慮。

Mw6.5未満（１４地震）

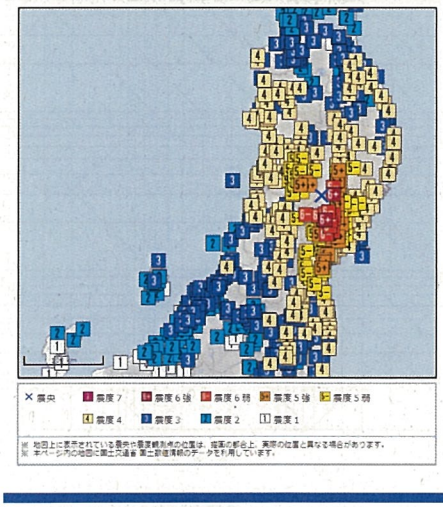
全国共通に考慮すべきとの観点から、震源近傍の観測記録を適切に収集し、敷地への影響の観点から整理。

震源を特定せず策定する地震動（Mw6.5以上の地震）

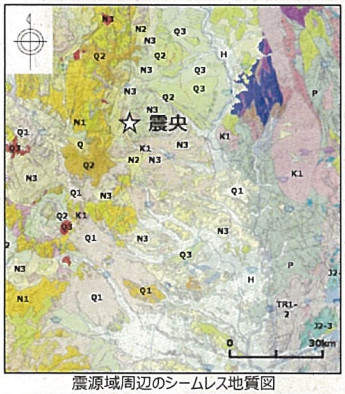
質問事項
第２－３

●地震発生日時（気象庁）
- 発生日時：平成20年6月14日08時43分
- 地震規模：Mj7.2（Mw6.9）
- 震源深さ：8km
- 震源位置：北緯39°1.7′ 東経140°52.8′

●各地の震度及び被害状況
各地の震度（気象庁）は以下のとおり
- 震度6強：岩手県　奥州市
  宮城県　栗原市
- 震度6弱：宮城県　大崎市
- 震度5強：岩手県　北上市、一関市、金ヶ崎町、平泉町
  宮城県　仙台市、名取市、登米市、利府町、加美町、涌谷町、美里町
  秋田県　湯沢市、東成瀬村
- 地震による津波の発生はなし



○岩手・宮城内陸地震の震源域及び本件発電所の敷地近傍について、それぞれの地域の特徴を比較した結果、地質学的・地震学的背景が異なることから、同地震の観測記録を収集対象外とした。



震源域周辺のシームレス地質図
（産業技術総合研究所、地質図Naviに加筆）

地質学的背景
- 岩手・宮城内陸地震の震源域
  ⇒カルデラが密集し複雑
- 本件発電所の敷地近傍
  ⇒カルデラは分布せず、久米層がほぼ水平に分布

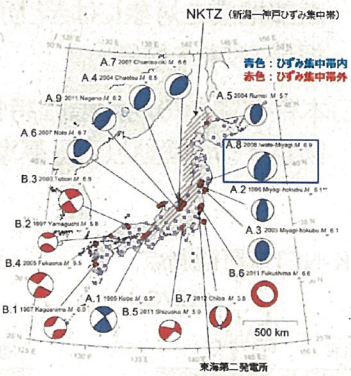


図１　本研究で解析した地震群の本震震央位置と本震のCMT解。ハッチの部分がひずみ集中帯。

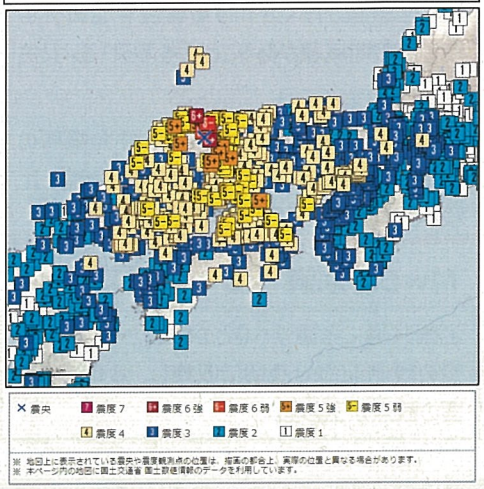
防災科学技術研究所（2013）に一部加筆

地震学的背景
- 岩手・宮城内陸地震の震源域
  ⇒ひずみ集中帯・逆断層
- 本件発電所の敷地近傍
  ⇒ひずみ集中帯外・正断層

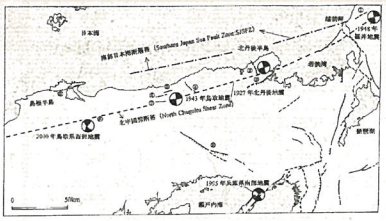
震源を特定せず策定する地震動（Mw6.5以上の地震）

●地震発生日時（気象庁）
・発生日時：平成12年10月6日13時30分
・地震規模：Mj7.3（Mw6.6）
・震源深さ：11km
・震源位置：北緯35°16.5′ 東経133°20.9′

●各地の震度及び被害状況
各地の震度（気象庁）は以下のとおり
・震度6強：鳥取県　境港市、日野町
・震度6弱：鳥取県　西伯町、溝口町、会見町、岸本町、淀江町、日吉津村
・震度5強：鳥取県　米子市
島根県　仁多町、安来市、宍道町
岡山県　哲多町、落合町、大佐町、新見市、美甘村
香川県　土庄町
・地震による津波の発生はなし

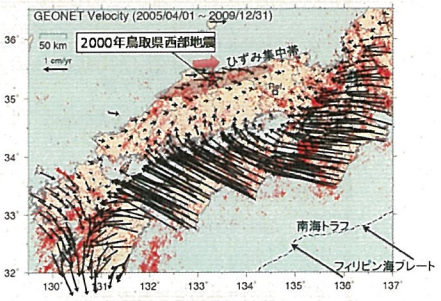


○鳥取県西部地震の震源域及び本件発電所の敷地近傍について、それぞれの地域の特徴を比較した結果、地質学的・地震学的背景が異なることから、同地震の観測記録を収集対象外とした。



山陰地方の主な地震の発震機構と活断層
岡田（2002）より抜粋

岡田（2002）では、「第四紀中期以降に新たな断層面を形成して、断層が発達しつつあり、活断層の発達過程としては初期ないし未成熟な段階にある。」とされている。



西村(2015)に一部加筆

地質学的背景
・鳥取県西部地震の震源域
⇒未成熟な断層
・本件発電所の敷地近傍
⇒久米層がほぼ水平に分布

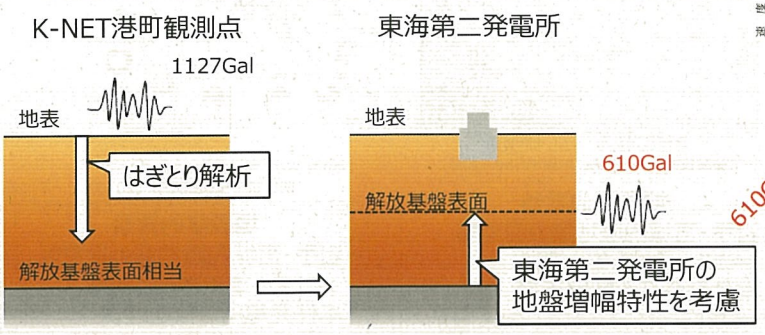
地震学的背景
・鳥取県西部地震の震源域
⇒ひずみ集中帯・横ずれ断層
・本件発電所の敷地近傍
⇒ひずみ集中帯外・正断層

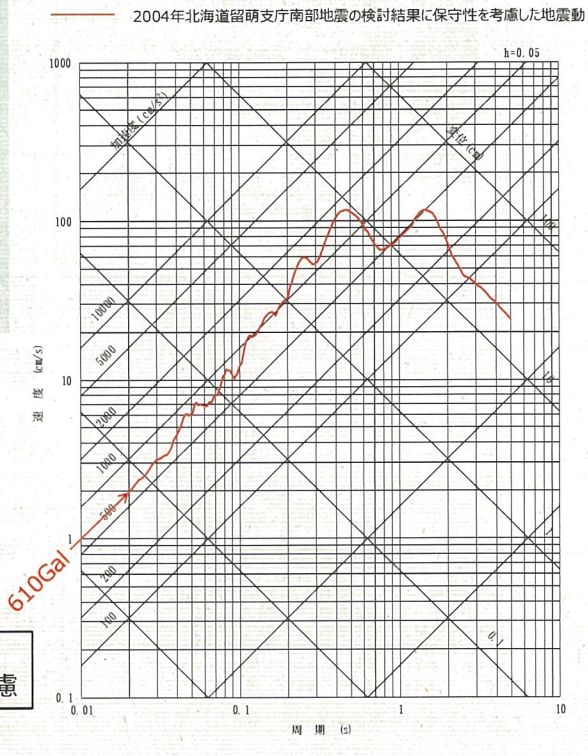
震源を特定せず策定する地震動（Mw6.5未満の地震）

○16地震のうち、地表断層が出現しない可能性のある14地震を対象に震源近傍の観測記録を収集。

○敷地に及ぼす影響が大きいと考えられる観測記録、かつ精度の高い地盤情報が得られている2004年留萌支庁南部地震を対象にはぎとり解析を行い、解放基盤表面相当のゆれを推定。

○本件発電所の地盤増幅特性を考慮して震源を特定して策定する地震動として、基準地震動に反映。



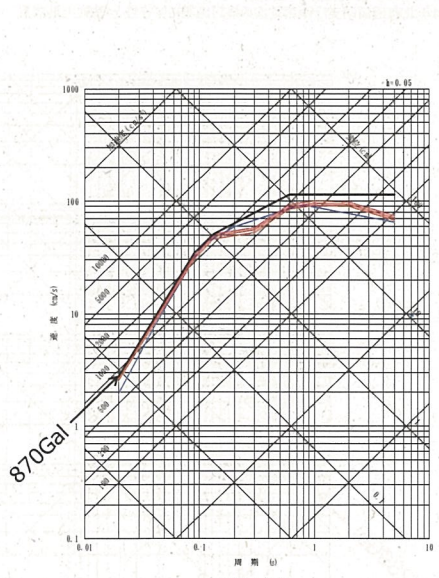


水平成分

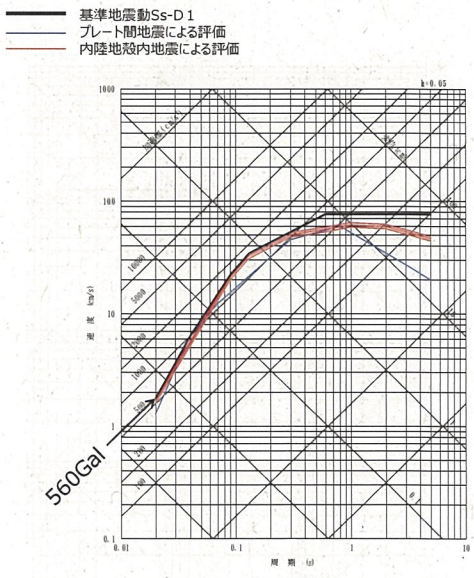
３－６　基準地震動Ｓｓの策定

応答スペクトルに基づく手法

○応答スペクトルに基づく手法の地震動評価結果をすべて上回るように基準地震動Ss-D1を策定した。



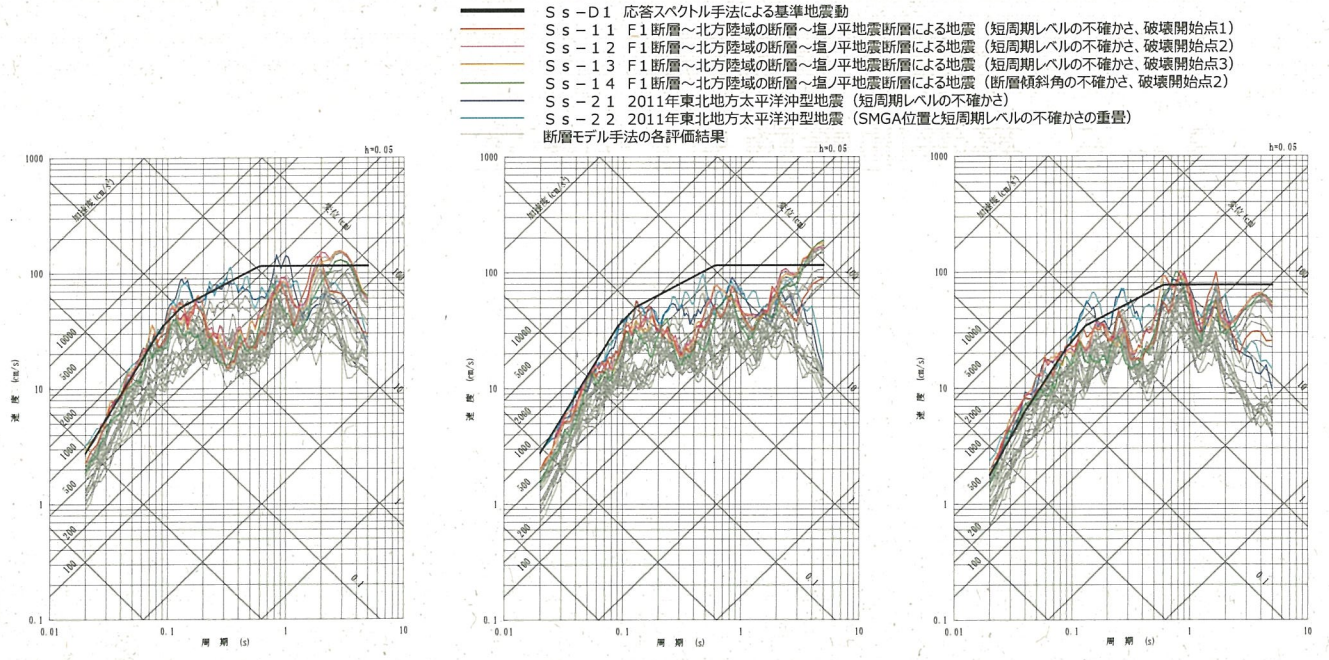
水平成分



鉛直成分

断層モデルを用いた手法

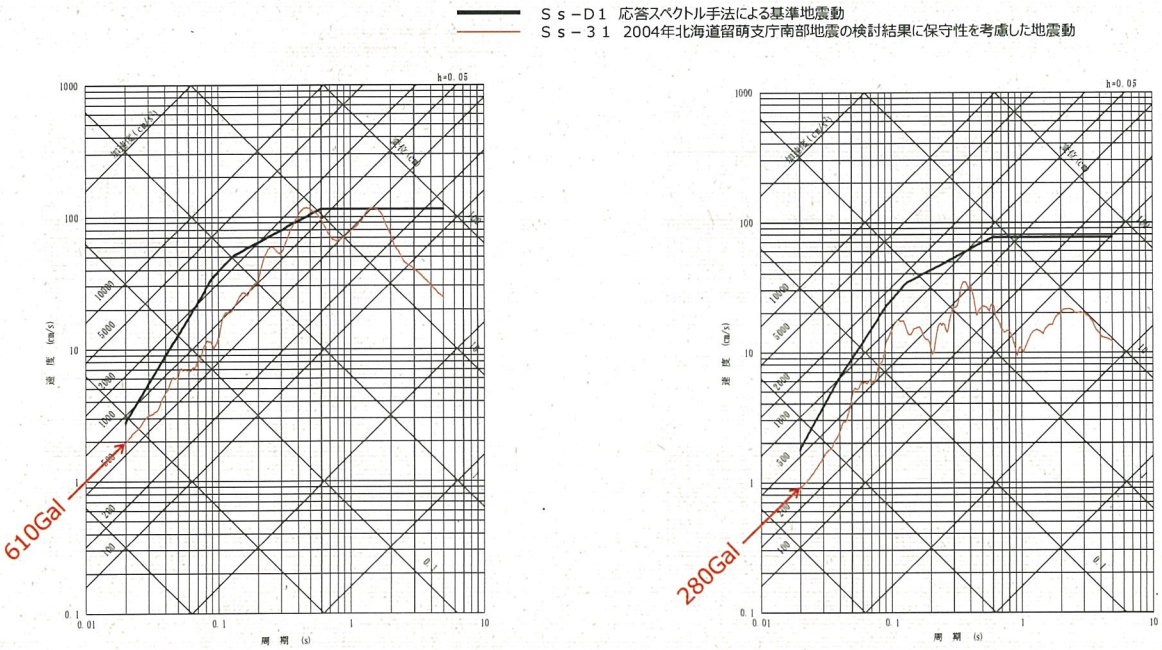
○各地震発生様式の断層モデル手法による地震動評価結果のうち、一部周期帯で基準地震動Ｓｓ－Ｄ１を上回る６ケースを断層モデル手法による基準地震動に選定し、それぞれＳｓ－１１、Ｓｓ－１２、Ｓｓ－１３、Ｓｓ－１４、Ｓｓ－２１、Ｓｓ－２２とした。



NS成分　　EW成分　　UD成分

震源を特定せず策定する地震動

○2004年北海道留萌支庁南部地震の検討結果に保守性を考慮した地震動は、一部周期帯で基準地震動Ｓｓ－Ｄ１を上回るため、基準地震動に選定し、Ｓｓ－３１とした。



水平成分　　上下成分

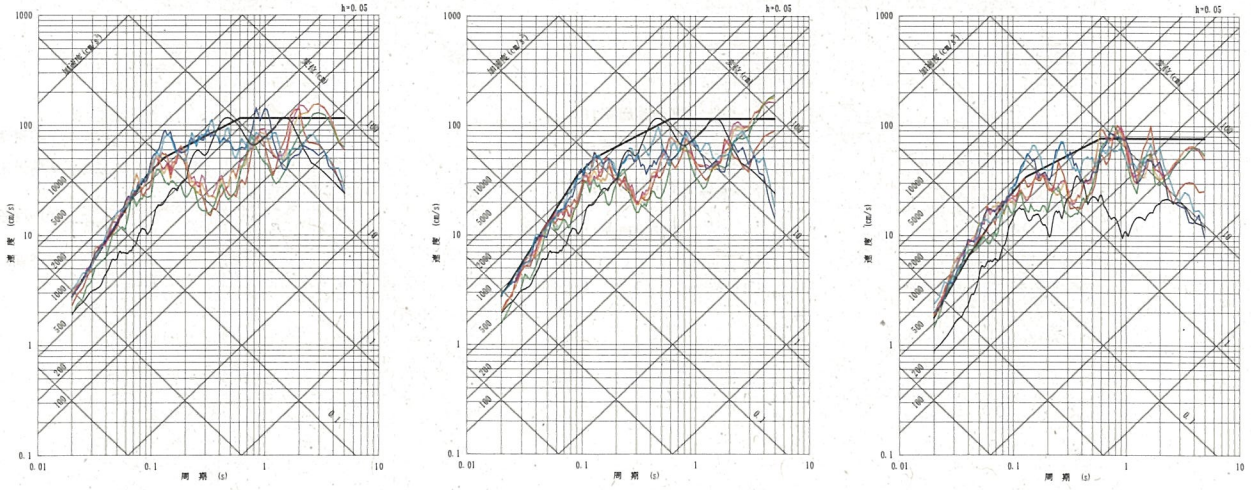
本件発電所で策定した基準地震動

基準地震動		最大加速度（cm/s²）		
		NS成分	EW成分	UD成分
Ｓｓ-Ｄ１	応答スペクトル手法による基準地震動	870		560
Ｓｓ-１１	Ｆ１断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震（短周期レベルの不確かさ、破壊開始点1）	717	619	579
Ｓｓ-１２	Ｆ１断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震（短周期レベルの不確かさ、破壊開始点2）	871	626	602
Ｓｓ-１３	Ｆ１断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震（短周期レベルの不確かさ、破壊開始点3）	903	617	599
Ｓｓ-１４	Ｆ１断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震（断層傾斜角の不確かさ、破壊開始点2）	586	482	451
Ｓｓ-２１	2011年東北地方太平洋沖型地震（短周期レベルの不確かさ）	901	887	620
Ｓｓ-２２	2011年東北地方太平洋沖型地震（SMGA位置と短周期レベルの不確かさの重畳）	1009	874	736
Ｓｓ-３１	2004年北海道留萌支庁南部地震の検討結果に保守性を考慮した地震動	610		280

注）Ss-14、Ss-31については、最大加速度値でSs-D1を下回っているが、長周期側の周期帯でSs-D1を一部上回っていることから、基準地震動として選定している。

本件発電所で策定した基準地震動

Ｓｓ－Ｄ１　応答スペクトル手法による基準地震動
Ｓｓ－１１　Ｆ１断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震（短周期レベルの不確かさ、破壊開始点1）
Ｓｓ－１２　Ｆ１断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震（短周期レベルの不確かさ、破壊開始点2）
Ｓｓ－１３　Ｆ１断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震（短周期レベルの不確かさ、破壊開始点3）
Ｓｓ－１４　Ｆ１断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震（断層傾斜角の不確かさ、破壊開始点2）
Ｓｓ－２１　2011年東北地方太平洋沖型地震（短周期レベルの不確かさ）
Ｓｓ－２２　2011年東北地方太平洋沖型地震（SMGA位置と短周期レベルの不確かさの重畳）
Ｓｓ－３１　2004年北海道留萌支庁南部地震の検討結果に保守性を考慮した地震動

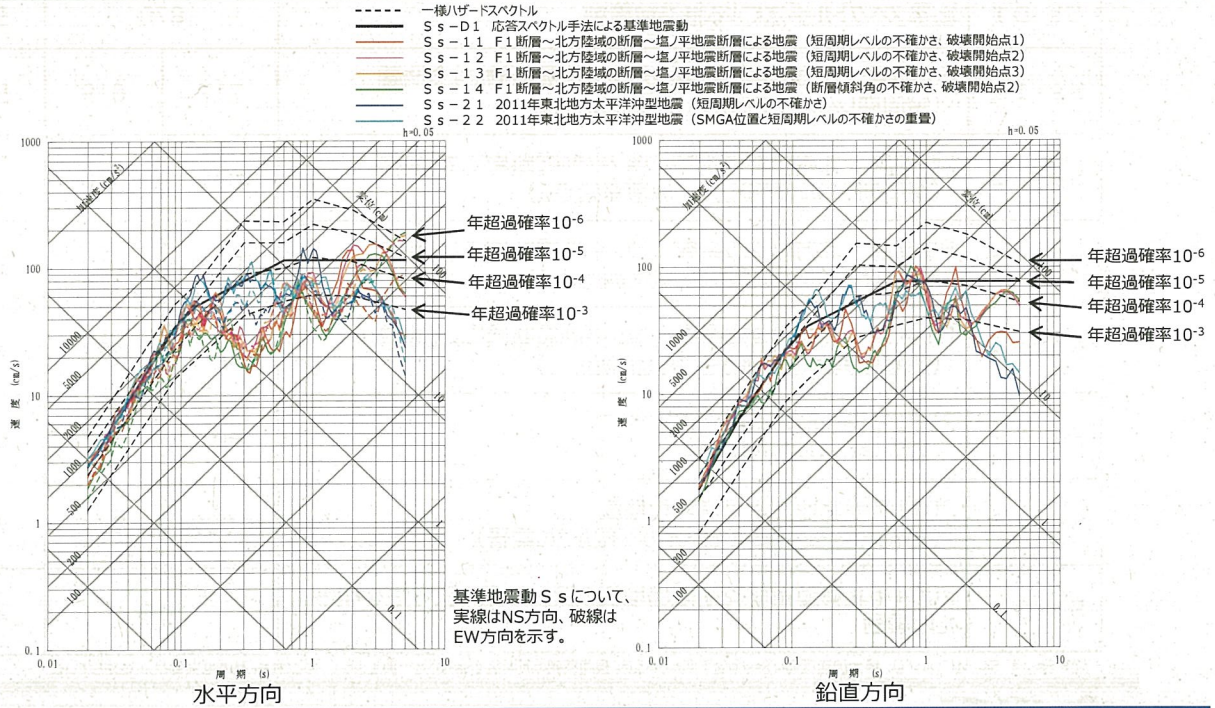


NS方向　　EW方向　　UD方向

基準地震動Ｓｓ（敷地ごとに震源を特定して策定する地震動）の超過確率の参照

質問事項
第２－４

○基準地震動Ｓｓ－Ｄ１の年超過確率は10^{-4}～10^{-5}程度である。
○基準地震動Ｓｓ－１１～２２の年超過確率は、基準地震動Ｓｓ－Ｄ１を超過する周期帯で10^{-4}～10^{-6}程度である。

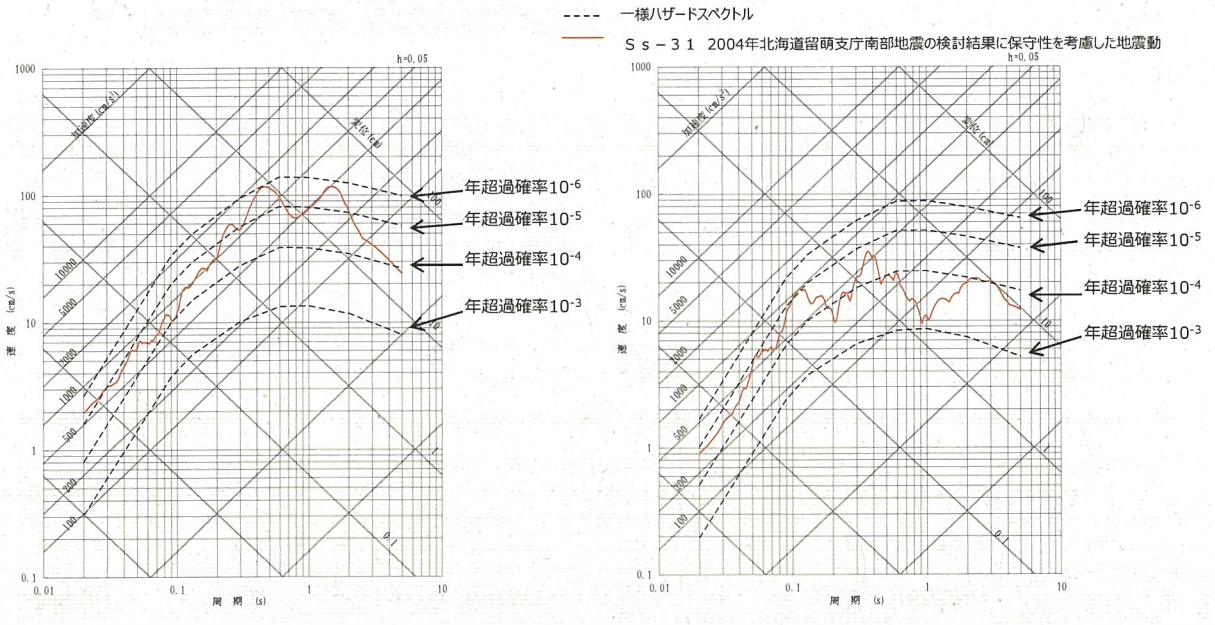


水平方向　　鉛直方向

基準地震動Ｓｓ（震源を特定せず策定する地震動）の超過確率の参照

質問事項
第２－４

○基準地震動Ｓｓ－３１の年超過確率は、10^{-4}～10^{-6}程度である。



水平方向　　鉛直方向

【解説】基準地震動Ｓｓの超過確率の参照

質問事項
第２－４

基準地震動の年超過確率とは？

- 原子力発電所において、基準地震動を超過する揺れに見舞われる事象が、1年でどれくらいの確率で生ずるのかを表すもの。
- 本件発電所では、地震ハザード評価により、基準地震動の応答スペクトルがどの程度の年超過確率に相当するかを確認している。
- 地震ハザード評価とは、原子力発電所に影響するすべての地震を対象として、活断層データや歴史地震データ等に基づき震源を想定したうえで、ロジックツリー（ケース分岐と重み）を設定し、揺れの強さとその超過頻度の関係を対象震源ごとに求め、これを足し合わせて評価するもの。
- 日本原子力学会（2015）※には、地震ハザード評価の手順が取りまとめられており、その基本的な考え方は、地震調査研究推進本部が全国を対象として作成している確率論的地震動予測地図と同様である。

※一般社団法人日本原子力学会「原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準：2015」

○設置許可基準規則解釈では、「なお、上記の『敷地ごとに震源を特定して策定する地震動』及び『震源を特定せず策定する地震動』については、それぞれが対応する超過確率を**参照**し、それぞれ策定された地震動の応答スペクトルがどの程度の超過確率に相当するかを把握すること」とある。
⇒超過確率は、「参照」することが求められるのであって、その数字の絶対値をもって、安全か否かの判断を行っているものではない。

○「参照」とあるように、策定した基準地震動を違った観点から見てみる、というもの。

目次

1　本件発電所における地震に係る安全確保の考え方

2　地震の起こり方と地震による揺れの評価

3　本件発電所における基準地震動の策定

4　本件発電所の耐震安全性
4－1　本件発電所の耐震安全性確保の考え方
4－2　本件発電所の基本的な構造
4－3　耐震重要度に応じた具体的耐震設計
4－4　耐震上の余裕

従前の経緯

設計・建設時

○本件発電所の自然的立地条件に係る特性を把握したうえで本件発電所の設計及び建設を行った。

○その際、一般の建物より強くて頑丈な構造を取り入れるなどし、耐震安全性の確保に努めた。

運転開始以降

○運転開始以降も適宜知見を確認し、必要に応じ対策を講じるなどの対応を継続して行ってきている。

・旧耐震指針による耐震安全性の確認（平成７年）

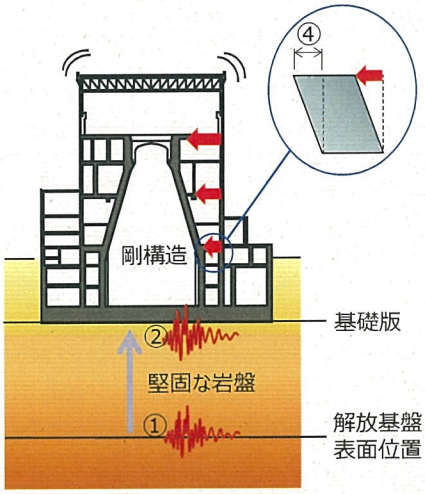
・改訂耐震指針による耐震安全性の確認（平成18年）

○今般策定した基準地震動に対しても、本件発電所の耐震安全性が確保されることを確認している。

基準地震動を用いた耐震設計の概要

○原子炉建屋等の耐震設計上重要な施設については、堅固な岩盤への支持、剛構造の採用など、耐震性に配慮した構造を採用している。

○このように耐震性に配慮した構造の下で、耐震設計を行うなどして安全機能を確認している。



（耐震性に配慮した基本的構造）

岩盤支持、剛構造等を採用

（地震動と地震力との関係）

④地震力が作用した結果、構造物や設備の構造部材に、変形や応力が生じる。

③入力した地震動により、構造物自体やその内部にある各設備が振動して地震力として作用する。

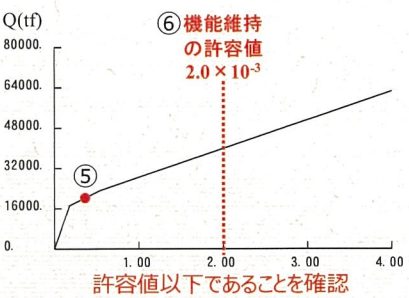
②解放基盤表面位置から上層に伝わった地震動が、基礎版の底部及び側面から構造物に入力される。

①基準地震動は、解放基盤表面において定義され、その位置における地盤の揺れを表す。

（具体的耐震設計）

⑤地盤、建物、設備をモデル化し、そのモデルを用いた各種解析を行い、変形や応力を算出する。

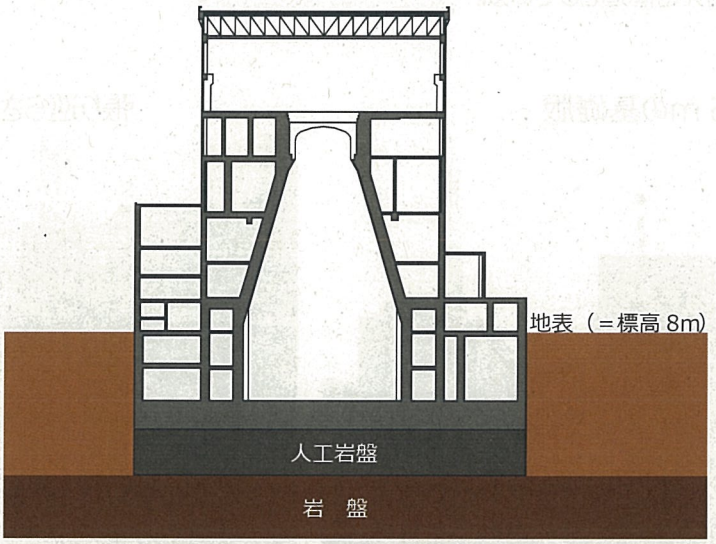
⑥算出した変形や応力について、許容値と比較して、安全機能を確保できるかを確認する。



許容値以下であることを確認

岩盤支持

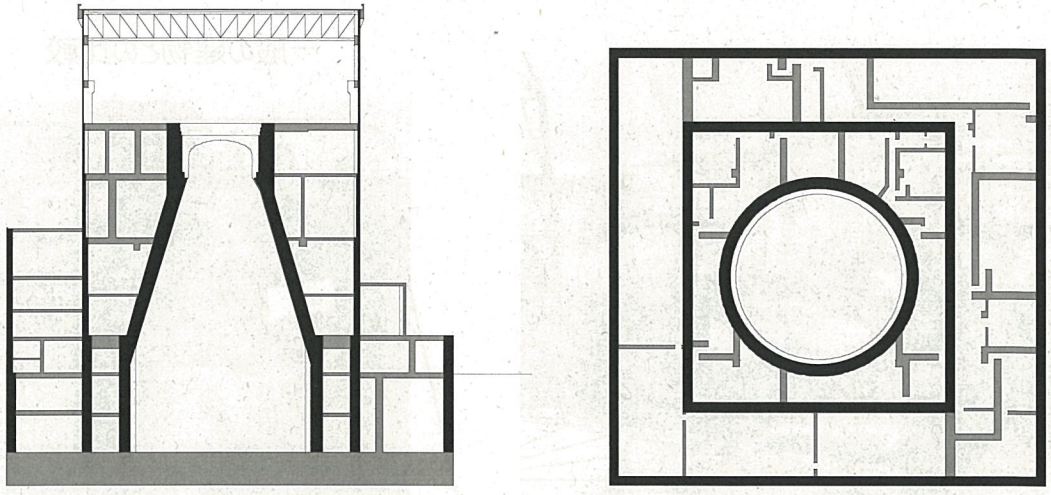
○原子炉建屋等、重要施設については、地震力に対し十分な支持性能を有する地盤に支持することを目的として、岩盤に直接もしくは人工岩盤を介して設置している。



原子炉建屋の設置のイメージ

剛構造設計と構造バランスのとれた設計

○本件発電所では、安全上重要な建物・構築物につき、剛構造の設計を取り入れ、また、その一部に力が集中することなく全体で地震に抵抗するよう、バランスの良い構造や配置設計としている。



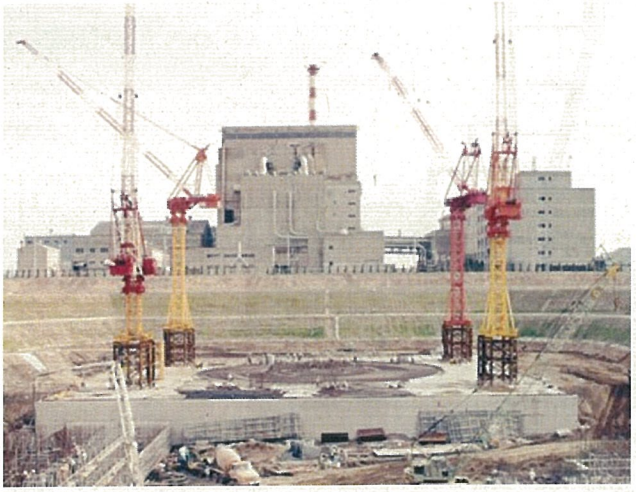
構造設計の特徴
○重量の重い円錐状の鋼製格納容器等を厚さ5mの頑丈な基礎盤中央部に設置
○平面方向は、中央部の円筒型耐震壁を囲むように正方形の耐震壁を配置したバランスのよい構造
○上下方向は、地震力が上下の階にスムーズに伝達するよう耐震壁を上階・下階で連続させて配置

剛構造①

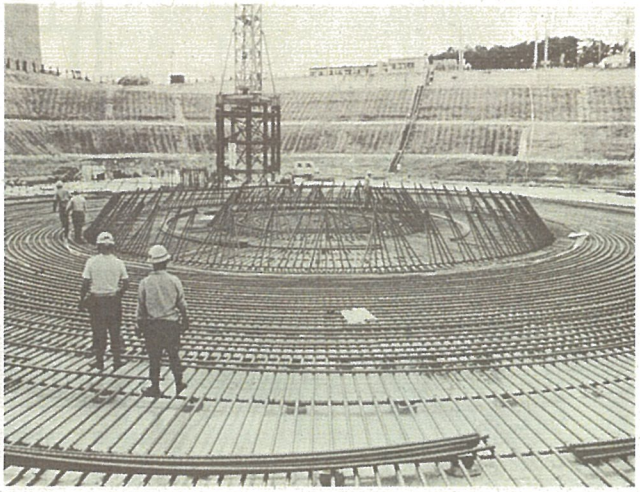
○原子炉建屋は、平面が約67m×約67mの鉄筋コンクリート造（一部鉄骨造）の建物であり、その基礎に当たる部分に、厚さ５mの基礎版を設置している。

○基礎版には鉄筋を張り巡らし、原子炉建屋全体の重量を支えることができるようにした上で、上部の建物からの地震力にも耐える構造としている。

厚さ５mの基礎版



張り巡らされた鉄筋

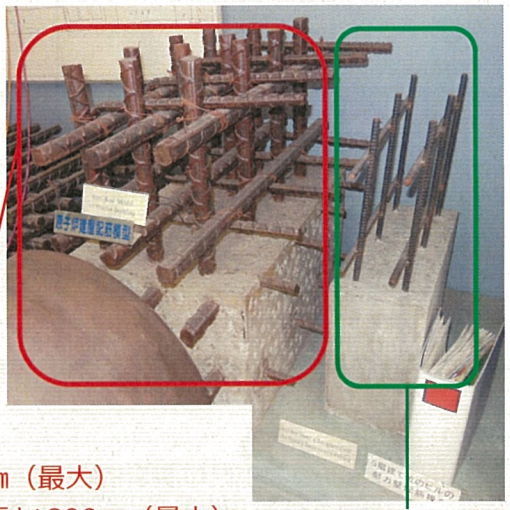


剛構造②

○原子炉建屋は、直径約40㎜の太い鉄筋を縦・横に配した厚さ約1.8mの耐震壁からなる鉄筋コンクリート製の構造物であり、一般の建物より強くて頑丈な構造としている。



一般の建物との比較



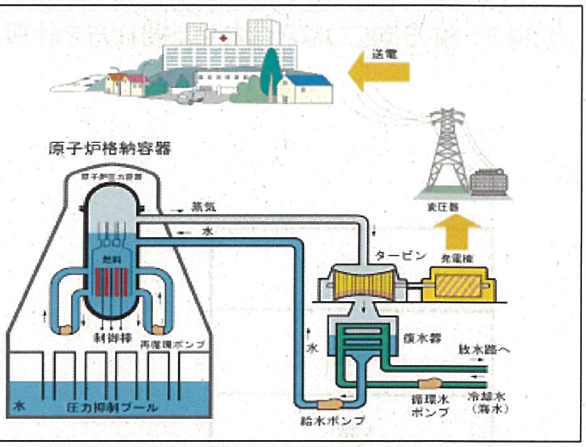
原子炉建屋
鉄筋：直径38㎜（最大）
コンクリート：壁厚さ1800㎜（最大）

５階建て位のビル

耐震重要度分類

原子力発電所には、内部に放射性物質を有する施設、放射性物質の環境への放出を防止する施設や、これらのいずれにも属さない施設など、様々な施設が設置されている。

⇒例えば、タービンや発電機は、発電を行う意味では重要であるが、原子力発電所の安全確保の上では重要度は高くない。



○放射性物質が周辺環境に異常に放出されるリスクから周辺公衆を守るという観点から、各施設について、原子力発電所の安全を確保する上での重要度に応じて、Ｓクラス、Ｂクラス、Ｃクラスに、それぞれ分類する。

＝耐震重要度分類

○Ｓクラスの施設の耐震安全性を確保できれば、原子炉の停止、炉心の冷却、放射性物質の閉じ込めという安全機能を維持することができる。

基準地震動を用いた耐震評価の流れ

・最新の知見やデータを踏まえて、本件発電所の敷地における地域性を詳細に考慮しつつ、様々な保守的な条件設定を重ねた地震動評価を行うなどして、基準地震動を策定。

・その基準地震動を建物・構築物への入力条件として、耐震Ｓクラスといった重要施設の耐震評価を行う。

【建物・構築物】

地震応答解析

・建物・構築物全体（床、壁等）をモデル化。

・地震時に働く力を計算。

→ **発生値と許容値との比較による評価**

・地震応答解析で求めた力に耐えられることを確認。

【機器・配管系】

床応答解析

・地震応答解析の結果から建物の各階に設置される機器・配管系の評価に用いる床応答を作成。

→ **発生値と許容値との比較による評価**

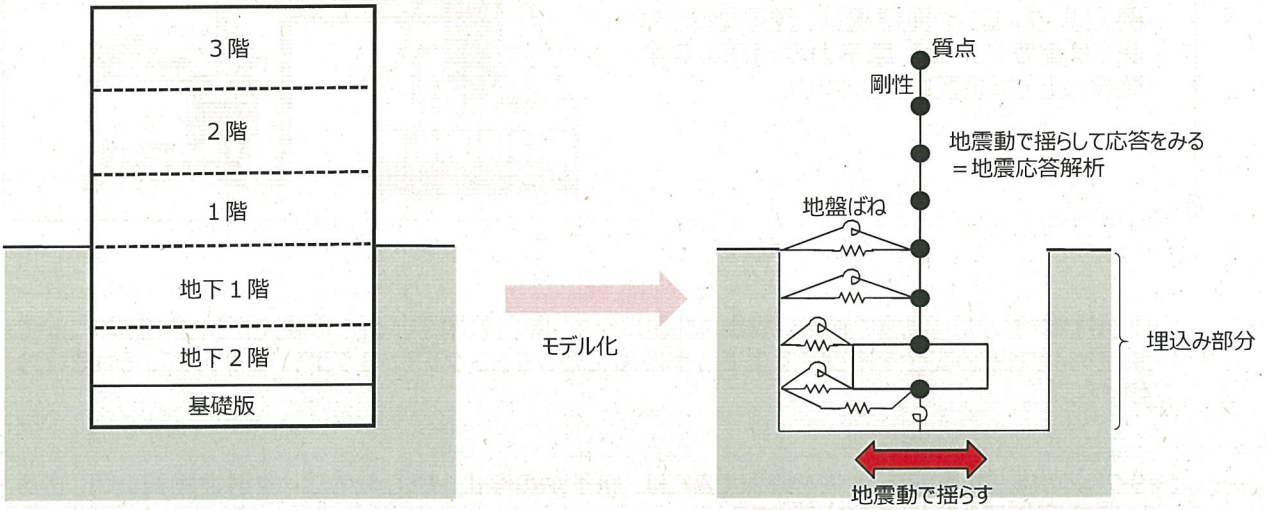
・床応答により各機器等の揺れによる力や変形を求め、それに耐えられることを確認。

※許容値

設計上の上限値。一般社団法人日本電気協会の策定した民間規格であるJEAG4601等に定められている。

【解説】建物の地震応答解析に用いる質点系モデル

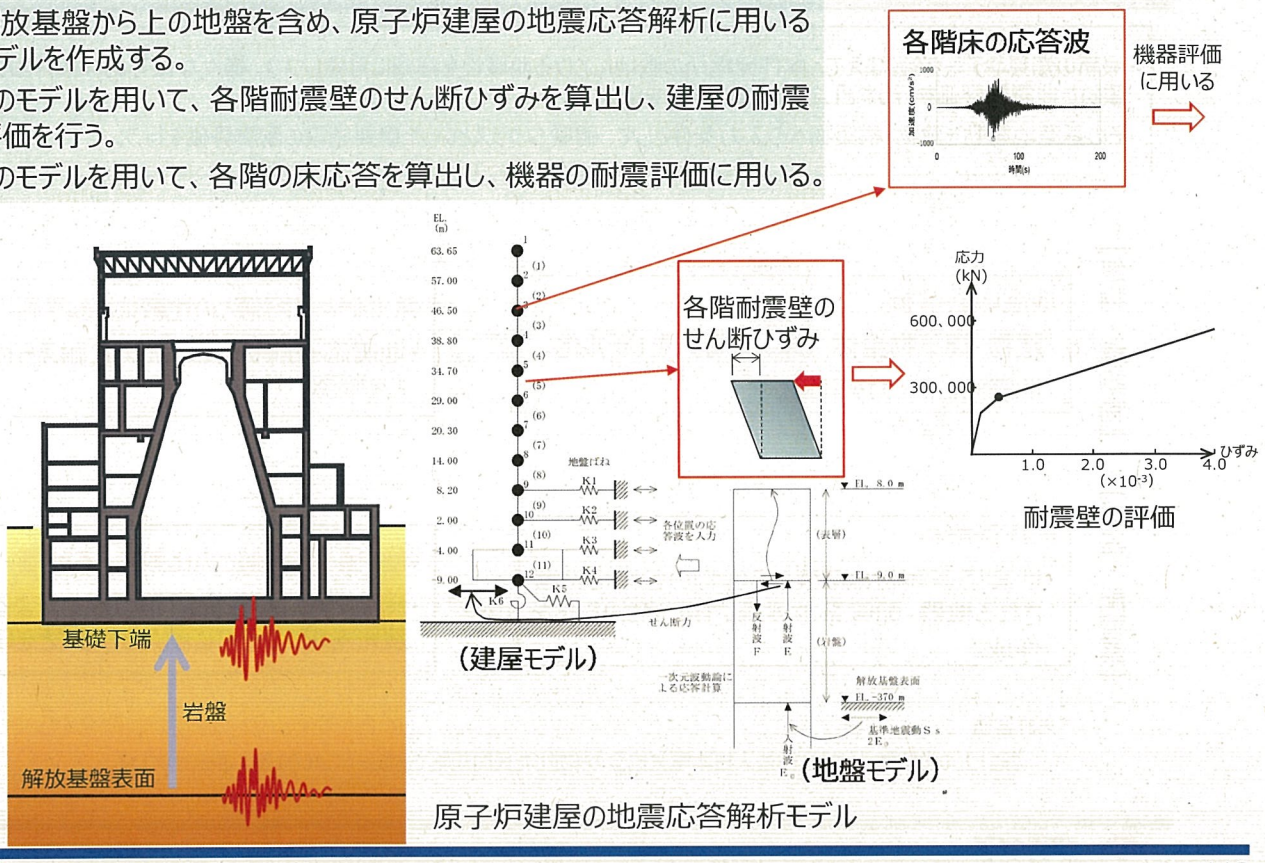
○質点系モデルとは、建物の1階分の質量を集約した質点と、階層間の壁の剛性（変形しにくさ）を持った棒で、縦方向につなぎ合わせた揺れ方を計算するモデルのこと。



4－3　耐震重要度に応じ具体的耐震設計

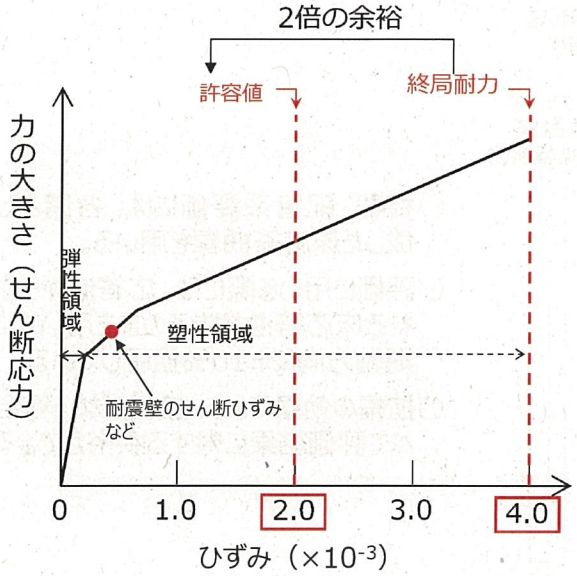
原子炉建屋の耐震性評価①

○解放基盤から上の地盤を含め、原子炉建屋の地震応答解析に用いるモデルを作成する。
○このモデルを用いて、各階耐震壁のせん断ひずみを算出し、建屋の耐震評価を行う。
○このモデルを用いて、各階の床応答を算出し、機器の耐震評価に用いる。



原子炉建屋の地震応答解析モデル

原子炉建屋の耐震性評価②



○終局耐力とは、建物・構築物が耐えることのできる最大の力を表す。

→終局耐力以下であれば、破壊することはない。

○JEAG4061においては、原子炉建屋の耐震壁について、基準地震動を用いた地震応答解析により得られる変形量（せん断ひずみ）の許容値は、2.0×10^{-3}とされている。

→終局耐力時のひずみ（4.0×10^{-3}）に対して２倍の余裕を持たせている。

○具体的耐震設計では、地震応答解析等により求めた変形量が、許容値を下回っていることを確認する。

※ひずみは、
変形の大きさ／計算部分の高さにより算出する。

機器・配管系の耐震性評価①

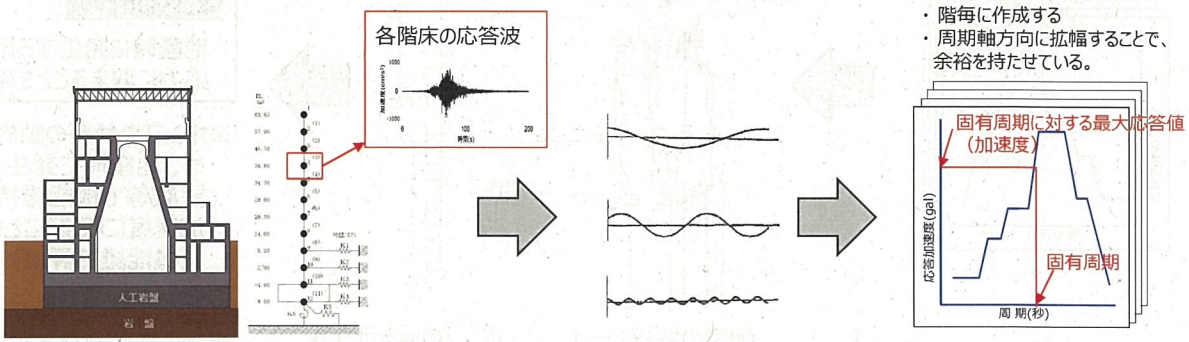
○建物・構築物の各階の床、地震波それぞれについて、周期に対する応答加速度を評価した床応答曲線を作成する。

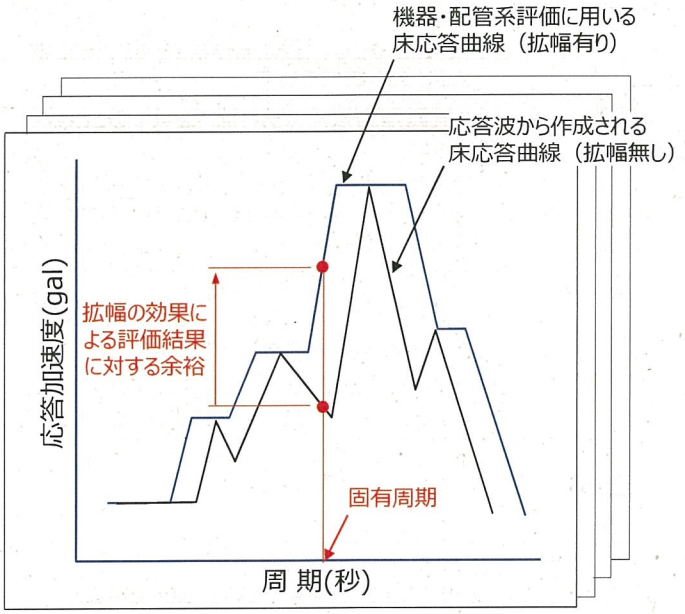
○機器等は、特定の揺れやすい周期（固有周期）を有しており、この周期と同じ周期を持つ地震動が到来すると、共振して大きく揺れる。

○「床応答曲線」とは、各床の周期毎の揺れの大きさを表すもので、いろいろな周期を有する機器等に対して地震動がどのくらいの揺れを生じさせるかを、横軸に周期、縦軸に応答加速度をとり、床毎に評価したもの。

○床毎に「床応答曲線」を作成することで、当該床に設置した機器等の固有周期が分かれば、地震動によって機器毎に生じる揺れの大きさを把握できる。

【建物の地震応答解析】　【周期毎に解析】　【床応答の作成】





○機器・配管系評価には、各階ごとに作成した床応答曲線を用いる。

○評価に用いる際には、応答波から作成される床応答曲線をそのまま用いずに、周期軸方向に±10%拡幅している。

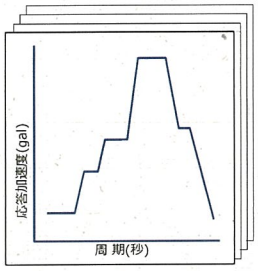
○拡幅の効果により、拡幅がない場合に比べて評価結果に対する余裕ができる。

機器・配管系の耐震性評価②

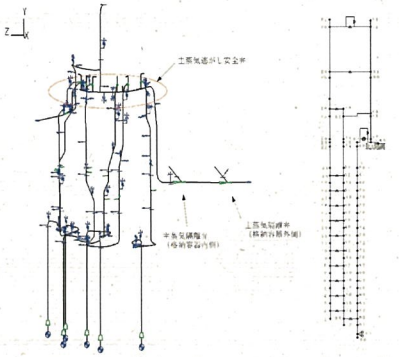
○機器・配管系の評価では、地震の条件として床応答曲線を用いる。配管等複雑な構造物については、地震時に揺れを適切に模擬できるように解析モデルを用いて計算を行う。

○評価は、地震等による荷重による構造物の変形によって機能が喪失することを防止する観点から行う【構造強度評価】。

【床応答曲線】



【解析モデルを用いた計算】



配管の解析モデル　　ポンプの解析モデル

【評価の実施】

構造強度評価

地震時に発生する応力が許容応力に収まることを確認

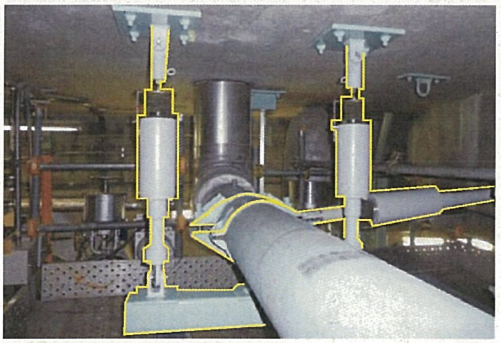
※ポンプや弁等の動的機器については、地震時に発生する加速度が試験等で機能維持が確認された加速度に収まることも確認している（機能維持評価）。

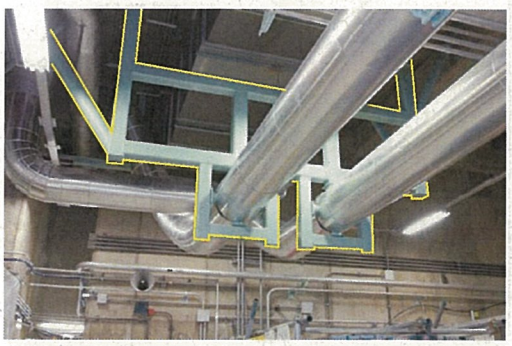
基準地震動に照らした耐震安全性の確認

○耐震重要設備について基準地震動を用いて耐震安全性を評価した結果、建屋や設備の更新の必要はなく、健全性が確保されることを確認した。一部の既存設備については耐震補強を行う。

○例えば、原子炉建屋については、基準地震動を用いた解析を行うなどして、地震時に原子炉建屋に発生する応力や変形などを計算し、その計算結果が許容値を下回ることを確認した。また、機器関係の設備として制御棒駆動機構、残留熱除去系、圧力容器、格納容器等について、地震時に対象設備に発生する応力を計算し、その計算結果が許容値を下回ることなどを確認した。

【配管系のサポート補強例】





【解説】弾性設計用地震動Ｓｄについて

質問事項
第２－５

○設置許可基準規則解釈においては、弾性設計用地震動Ｓｄについて、基準地震動Ｓｓの応答スペクトルの比率0.5を下回らない値として設定し、これを用いた耐震評価を行うことが求められている。本件発電所においては、基準地震動Ｓｓの応答スペクトルの比率として0.5を用いて弾性設計用地震動Ｓｄを設定し、その耐震評価を行い、許容値を満足することを確認した。

○弾性設計用地震動Ｓｄを用いて耐震評価を実施することに対する必要性については、平成18年9月に改訂された耐震設計審査指針の解説において、「基準地震動Ｓｓによる地震力に対する施設の安全機能の把握を確実なものとする」と説明されている。

発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針（平成１８年9月改訂）の抜粋

（解説）

Ⅲ．耐震設計方針について

（１）　弾性設計用地震動Sdの設定の必要性について

旧指針においては、基準地震動について、施設の建物・構築物及び機器・配管系の重要度に相応し、地震動S1及び地震動S2の２種類に区分して策定することとしていたが、今次改訂においては基準地震動Ssのみを策定することとした。

施設の耐震安全性を確保するための耐震設計の考え方においては、この基準地震動Ssによる地震力に対して、耐震安全上重要な施設の安全機能が保持されることが基本である。さらに、この基準地震動Ssに対する施設の安全機能の保持をより高い精度で確認するために、工学的な観点から基準地震動Ssと密接に関連付けられる弾性設計用地震動Sdの設定についても合わせて規定することとしたものである。

（２）　弾性設計用地震動Sdの設定について

本指針の６．の耐震設計方針で規定した「地震力に対して耐える」ということは、ある地震力に対して施設全体として概ね弾性範囲の設計がなされるということを意味する。この場合、弾性範囲の設計とは、施設を弾性体とみなして応力解析を行い、施設各部の応力を許容限界以下に留めることをいう。なお、ここでいう許容限界とは、必ずしも厳密な弾性限界ではなく、局部的に弾性限界を超える場合を容認しつつも施設全体として概ね弾性範囲に留まり得ることで十分である。

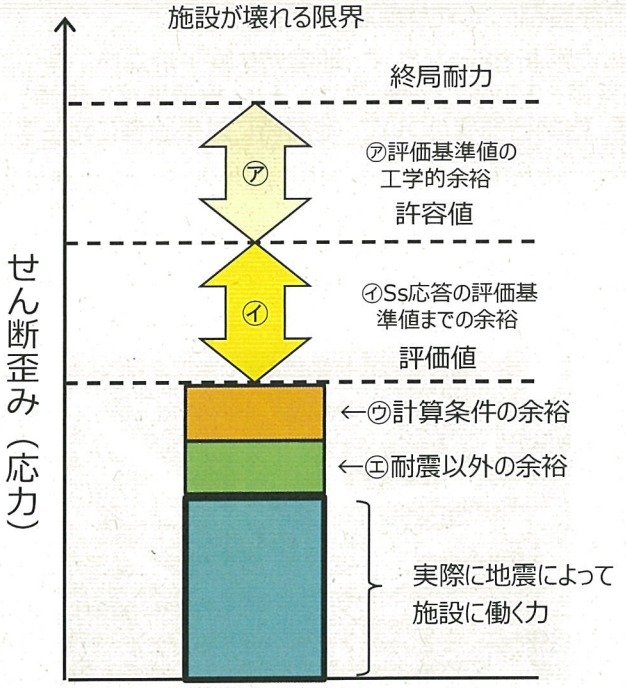
Ｓクラスの各施設は弾性設計用地震動Sdによる「地震力に耐える」ことを求めているが、この弾性設計用地震動Sdは工学的判断に基づいて設定するものである。弾性限界状態は、地震動が施設に及ぼす影響及び施設の状態を明確に評価することが可能な状態であり、施設が全体的に弾性設計用地震動Sdによる地震力に対して概ね弾性限界状態に留まることを把握することによって、基準地震動Ssによる地震力に対する施設の安全機能保持の把握を確実なものとする。すなわち、弾性設計用地震動Sdは、旧指針における基準地震動S1が耐震設計上果たしてきた役割の一部を担うことになる。

弾性設計用地震動Sdは、施設、もしくはその構成単位ごとに安全機能限界と弾性限界に対する入力荷重の比率を考慮して、工学的判断から求められる係数を基準地震動Ssに乗じて設定することとする。ここで、当該係数の設定に当たっては、基準地震動Ssの策定の際に参照した超過確率を参考とすることができる。

この弾性設計用地震動Sdの具体的な設定値及び設定根拠について、個別申請ごとに、十分に明らかにすることが必要である。

なお、弾性設計用地震動Sdと基準地震動Ssの応答スペクトルの比率（Sd／Ss）の値は、弾性設計用地震動Sdに求められる性格上、ある程度以上の大きさであるべきであり、めやすとして、0.5を下回らないような値で求められることが望ましい。

耐震上の余裕のイメージ



㋐耐震設計時の判定の基準となる許容値は、実際に建物・構築物が壊れる限界値に対し、十分余裕を持った値を設定
㋑許容値に対して工学的な判断のもと持たせる余裕
㋒地震によって働く力を計算する過程で、評価値が非安全側とならないように計算条件の設定等での余裕
㋓耐震以外の条件や計算手法を保守的に設定して組み合わせる等の余裕

大型高性能振動台による実証試験

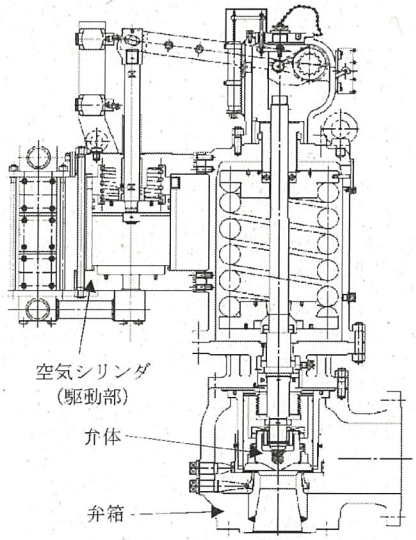


配管系の加振試験状況

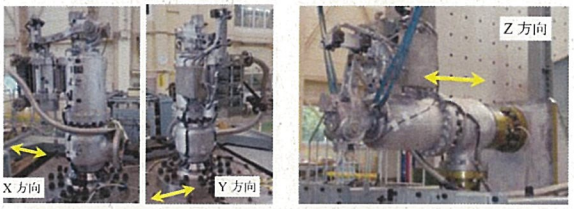
○1982年度から2004年度まで、財団法人原子力発電技術機構（当時）多度津工学試験センターにおいて、大型高性能振動台を用いて「原子力発電施設耐震信頼性実証試験」が実施された。
○この試験では、重要設備の耐震設計手法の妥当性の確認や、実際に設備が壊れるまで加振することで限界の揺れを確認し、実際の発電所設備に余裕があることを確認した。
○本件発電所を含む原子力発電所が極めて高い耐震性を有することは、本試験によっても確認されており、例えば、配管系については、許容値の8.5倍の応力が発生するような加振を繰り返して、ようやく破断するに至った。

実機大試験体による実証試験

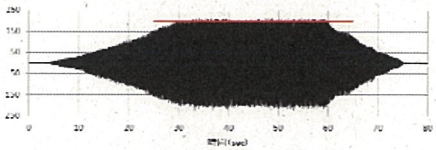
○近時の取組みの一例として、主蒸気逃がし安全弁の実機大の試験体を製作し、一般財団法人電力中央研究所の共振振動台を用いた試験を実施し、地震時において機能維持が可能な加速度を確認した。
○主蒸気逃がし安全弁の耐震性について、20×9.8m/s^2（20Ｇ）まで機能維持可能であることを確認した。



試験体の構造図



試験状況図



駆動部応答加速度

まとめ

○このように当社は、本件発電所の設計から現在に至るまで一貫して、詳細な調査結果を踏まえた検討を行い、想定される自然現象に対して安全性を確保できるよう必要な対応を講じている。

○当社は、今後とも、国内外の最新知見の収集に加え、自主的な調査・研究を継続して科学的・技術的知見の拡充に努めることにより、本件発電所の安全性・信頼性の向上に万全を期していく所存である。