

東京電力福島第一原子力発電所の 外部事象に対する防護の検討について

平成26年10月3日
東京電力株式会社



東京電力

目次

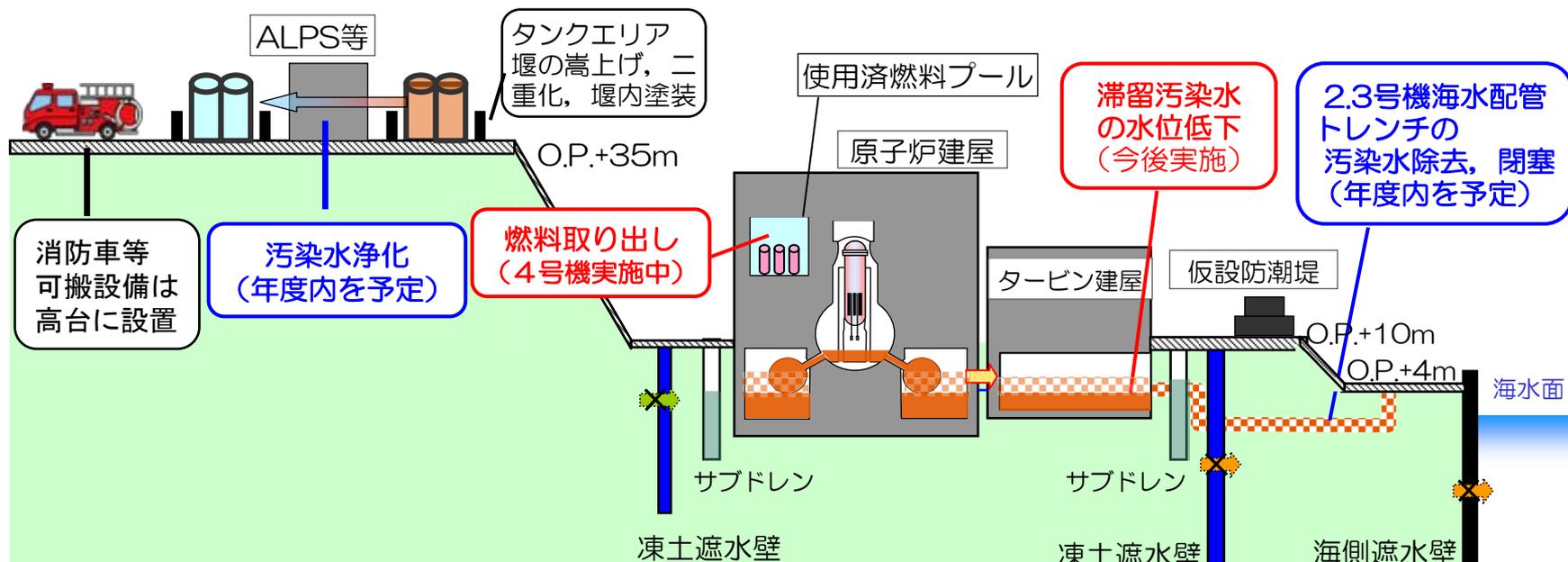
1. 防護対策の考え方について
 1. 1 防護対策と除去・低減対策について
 1. 2 福島第一におけるリスクの特徴
 1. 3 防護対策の考え方
 1. 4 防護対策の検討にあたっての評価の考え方
2. 優先的に検討すべき防護対象について
3. これまでの地震・津波への対応状況
4. 検討用地震動・津波の評価
 4. 1 検討用地震動の評価
 4. 2 検討用津波の評価
5. 検討用地震動・津波を踏まえた対応について
 5. 1 燃料デブリ
 5. 2 使用済燃料
 5. 3 建屋地下滞留汚染水
 5. 4 タンク内汚染水

1. 防護対策の考え方について

1. 1 防護対策と除去・低減対策について

福島第一におけるリスクを効率的かつ現実的に低減していくため、地震・津波に対する防護対策について、以下のように進める

- 放射性物質の除去・低減対策（廃止措置）を着実に実施していく
- 地震，津波に対しては，これまで実施してきた対策に加え，より大きなハザードへの備えとして防護対策を今後も段階的・継続的に実施
- 防護対策は，除去・低減対策が完了するまでの期間に応じた，適切に実施していく



1. 防護対策の考え方について

1. 2 福島第一におけるリスクの特徴

福島第一の特徴を踏まえ、リスクを効果的に低減していくことが重要

- 時間の経過に伴い**燃料(及びデブリ)のリスク(崩壊熱)**は減少(図1,図2)。原子炉を運転しておらず、新しい放射性物質も発生しない
- 揮発性の希ガスやよう素は大部分が既に減衰
- **建屋地下滞留汚染水, タンク内汚染水等, 事故由来のリスクが存在**
 - ◆ ただし、建屋地下滞留汚染水に含まれる放射性物質濃度は減衰・水処理により減少(セシウム137濃度は、事故時(H23.6)の約1/50に減少)
- 廃止措置に向けた工程の進展によりリスク源の除去・低減が進む等、**リスク源の状況は変化していく**

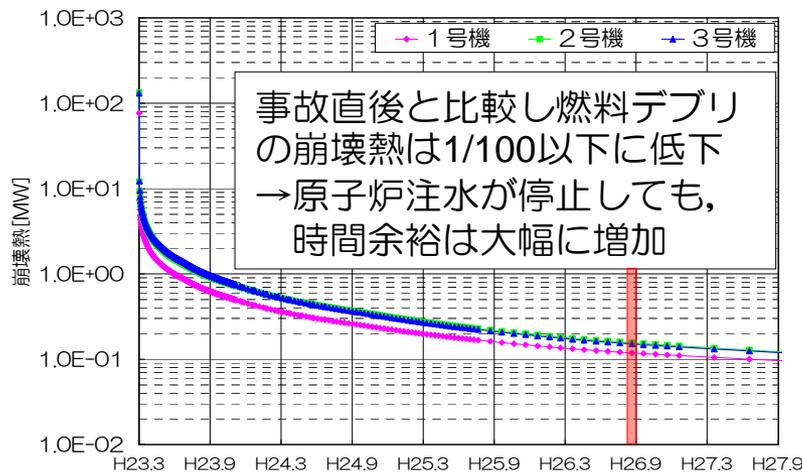


図1 燃料デブリの崩壊熱の推移

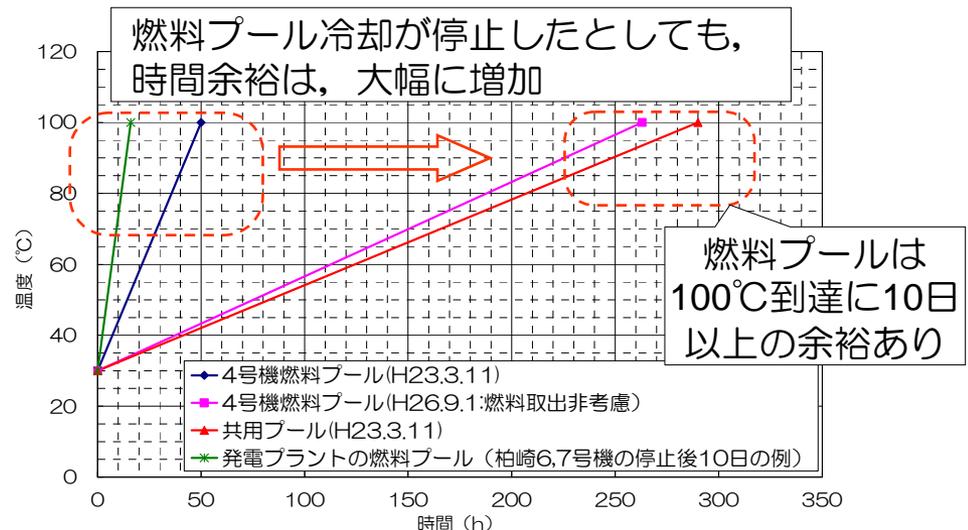


図2 燃料プール冷却停止時の水温上昇評価

1. 防護対策の考え方について

1. 3 防護対策の考え方

防護対策の検討にあたっては、以下を前提とすることが妥当

- **段階的アプローチにより効果の高い対策から実施**

福島第一の状況を踏まえ、リスクを着実かつ早期に低減できる対策、効果的な対策に優先的に取り組む。そのため、部分的な達成度となるものであっても、早期に着実に効果が上がる対策から着手する段階的アプローチを考慮する

- ◆ ただし、将来の廃止措置方針に不確かさがあることを踏まえ、将来の工事への影響についても配慮することが必要

- **時間軸等をふまえて有効な対策を実施**

防護対策に要する期間と除去・低減対策に要する期間の両者の時間軸を踏まえることに加え、下記の要素も考慮し有効な対策を実施する

- ◆ 防護対策が除去・低減対策等の廃止措置の工事に干渉し、廃止措置の工程遅延をもたらすことが無いように配慮
- ◆ 廃止措置の要員確保に影響しないように、被ばく線量に配慮
- ◆ 高線量率等の現場環境を踏まえ実施可能性を考慮

- **機動的対応を活用**

恒久設備だけではなく、可搬設備を活用した機動的対応により重要な機能を維持する

- ◆ 機動的対応は柔軟性が高く、様々な原因による機能喪失に対応可能
- ◆ 一方で機動的対応による機能確保には時間が掛かるが、崩壊熱の低下等により機動的対応のための時間的余裕は増加傾向
- ◆ 恒久設備への対策には制約（高い線量率の現場環境等）

1. 防護対策の考え方について

1. 4 防護対策の検討にあたっての評価の考え方

防護対策について検討を行う際は、以下について配慮する必要がある

■ 地震・津波の影響評価の考え方

- 防護対策の優先度を適切に判断するためには、地震・津波による影響をできるだけ現実的に評価する必要がある（発電プラントの安全設計のような、保守的に評価し、保守的な判断基準に照らして妥当性を確認する手法の適用が必ずしも適切でない場合がある）

■ 防護対策の目標

- 防護対策の検討にあたっては、何らかの目標設定が必要
- 今回の検討対象が大規模な地震・津波のような発生確率が小さい事象であることに鑑み、発生確率に応じた目標（例えば、放射性物質の現実的な移行経路を想定した上で、公衆の健康に直接の影響を与えない）を設定し、放出による影響をより低減する観点から防護対策を想定した上で優先度を判断することが妥当

2. 優先的に検討すべき防護対象について

- 施設全体のリスクを効果的に低減していくため、優先的に検討すべき防護対象を選定し、検討・対策を実施することが効果的と考えられる
- 選定においては以下の観点が考えられる
 - 放射性物質の量 : 影響の大きいリスク源から検討すべき
 - 性状（漏えいしやすさ）：液体か固体か等
 - 施設・設備の脆弱性：堅牢な施設・設備に保管されている場合は優先度低
 - 漏えい対策 : 漏えい時の影響緩和策が整備済みの場合は優先度低
- 上記観点に基づき、**検討の優先度が高いリスクとして**、以下が考えられる
 - **燃料デブリ**の冷却中断
 - ◆ 燃料デブリ温度上昇による、格納容器からのセシウム等放出量の増加
 - **使用済燃料**の冷却中断
 - ◆ 使用済燃料損傷による燃料棒内の放射性物質の放出
 - **建屋地下滞留汚染水**の漏えい
 - **タンク内汚染水**の漏えい

3. これまでの地震・津波への対応状況

■ 対応状況（概要）

- **現行基準地震動**を用いた評価を行い、建屋・設備等の耐震性を確認
- 福島沖の**アウターライズ津波**を想定。敷地への遡上を防ぐため仮設防潮堤を設置（高さO.P.+12.4～14.2m）
- アウターライズ津波を超える津波として、**東北地方太平洋沖地震相当の津波を想定した対策を実施**
 - ◆ 可搬式設備を用いた原子炉注水，使用済燃料プール注水
 - ◆ 滞留汚染水流出防止のため，汚染水貯留建屋（タービン建屋等）の開口部閉止（実施中）
- 原子炉注水機能の強化，使用済燃料の移動，汚染水漏えい対策等のリスク低減対策（廃止措置）については，地震や津波に限定された対策ではないが，地震・津波への対策としても有効

■ リスク低減対策（例）

- 燃料デブリ
 - ◆ 原子炉への注水源，注水手段，経路は多重性，多様性を確保
 - ◆ 設備の故障等により冷却が中断した場合に，消防車，電源車等可搬設備を活用した機動的対応により注水を再開する手順を整備

3. これまでの地震・津波への対応状況

■ リスク低減対策（例）（続き）

- 使用済燃料
 - ◆ 設備の故障等により冷却が中断した場合に、消防車、電源車等可搬設備を活用した機動的対応により注水を再開する手順を整備

- 建屋地下滞留汚染水
 - ◆ 漏えい経路となりえる2, 3号機海水配管トレンチの閉塞作業を実施中（年度内を予定）
 - ◆ 地下水バイパス、凍土壁等の地下水流入対策を実施、滞留水水位を下げ滞留水量の低減を図る

- タンク内汚染水
 - ◆ タンク劣化、ヒューマンエラー等による漏えいに備えた影響緩和策を実施中であり、地震による漏えいが発生しても港湾外への流出を緩和可能
 - ◆ 現在多核種除去設備(ALPS)等により放射性物質の除去を進めており、リスクの低減が進んでいる（年度内を予定）
 - 多核種除去設備の増設、高性能多核種除去設備の設置に取り組んでいる

4. 検討用地地震動・津波の評価

検討用地地震動及び検討用津波の評価結果の概要は以下の通り

表1. 検討用地地震動策定結果 水平方向 最大加速度値 (gal)

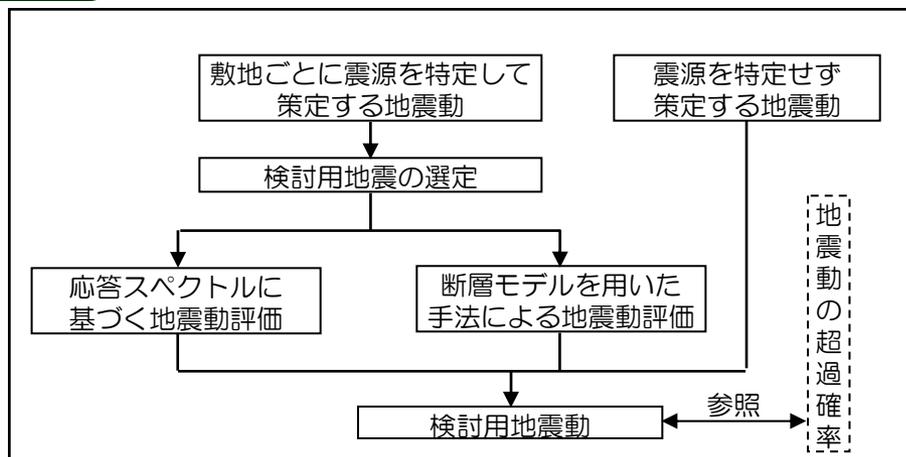
| 今回 | | 東北地方太平洋沖地震 | 従来 | |
|----------|-----|------------|-----------|-----|
| 検討用地地震動① | 900 | 675 | 基準地震動Ss-1 | 450 |
| 検討用地地震動② | 722 | | 基準地震動Ss-2 | 600 |
| | | | 基準地震動Ss-3 | 450 |

表2. 検討用津波策定結果 (m)

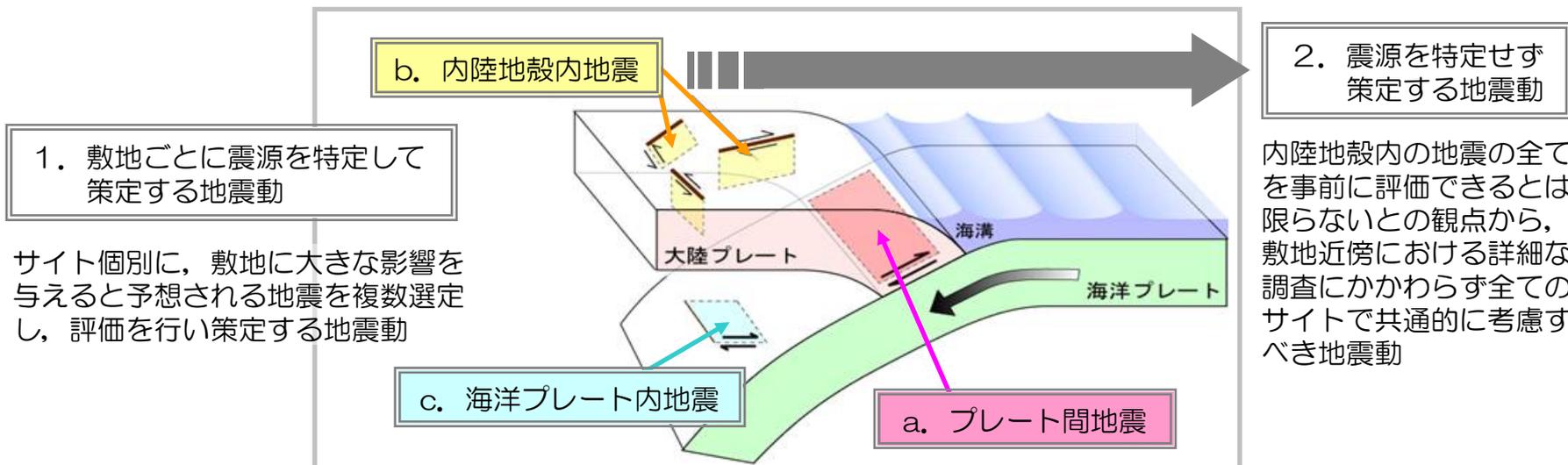
| | 今回 | 東北地方太平洋沖地震浸水高 | 従来 |
|------|----------------------|---------------------|---------------------|
| 最高水位 | O.P.+26.3 敷地北側沿岸部 | O.P.+15.5 1～4号機側 | O.P.+6.1 6号取水ポンプ |

4. 1 検討用地震動の評価

検討用地震動の策定フロー



策定において考慮する地震



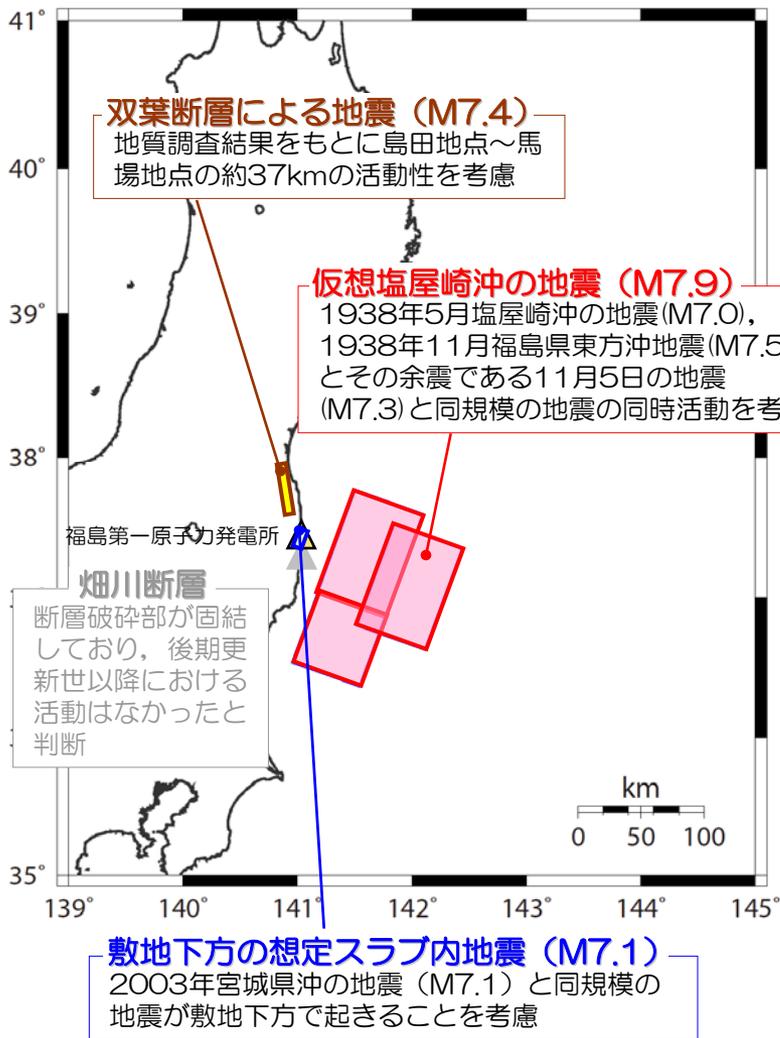
4. 1 検討用地震動の評価（前提条件等への対応状況）

『検討用地震動及び検討用津波の前提条件等』への対応状況

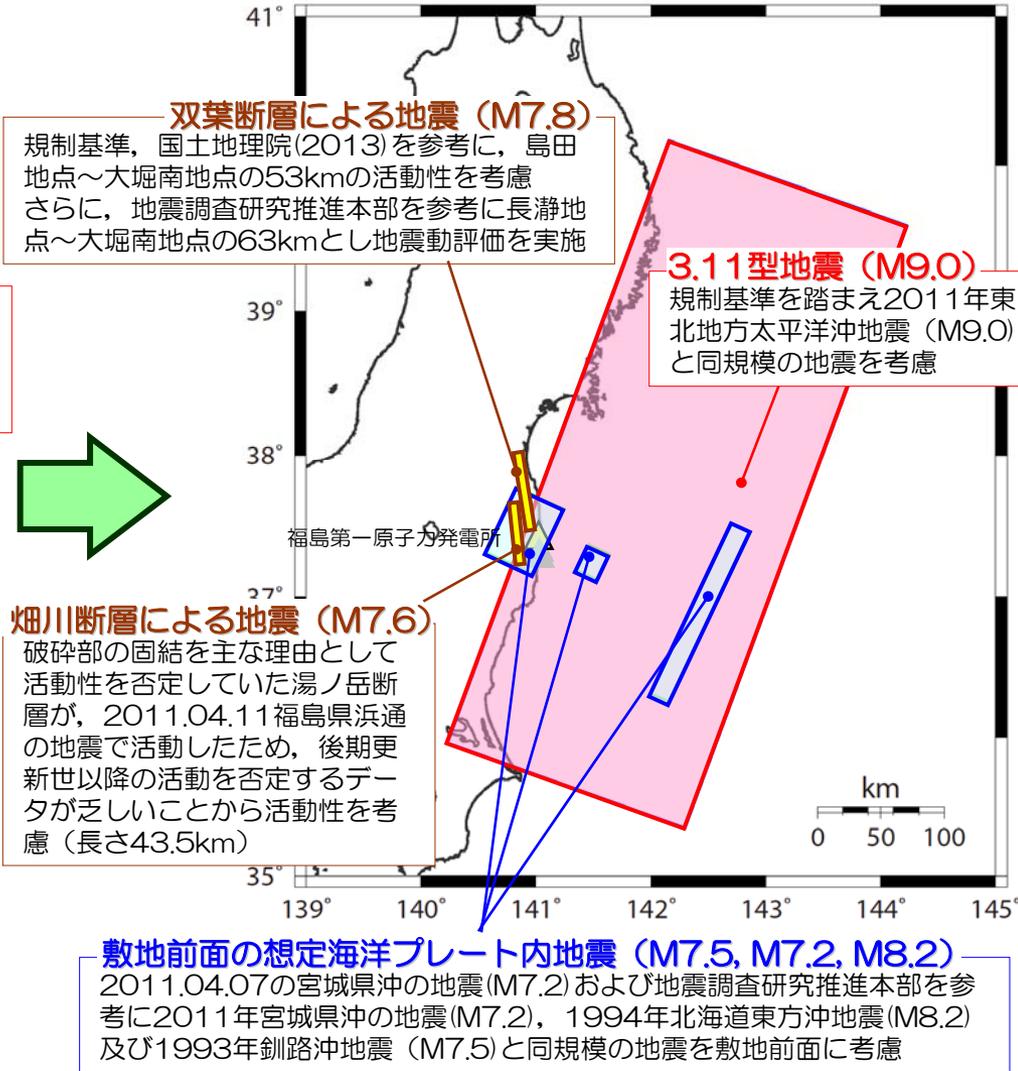
| | 前提条件等 | 対応状況 | 該当ページ |
|---|--|--|---------------------------------------|
| ① | 地震動については、敷地における観測結果など東北地方太平洋沖地震の知見を踏まえて想定する。 | <ul style="list-style-type: none"> ・2011年東北地方太平洋沖地震の知見である、『複数の領域が連動して発生すること』を踏まえて、同規模の地震を想定。 ・地震動評価は、敷地における北地点・南地点の2点の鉛直アレイ観測点のうち、短周期側では南地点が大きくなる傾向にあることを踏まえ、南地点で代表させ、敷地における観測記録を活用して実施。 ・2011.04.11浜通の地震では、破碎部の固結を主な理由として活動性を否定していた湯ノ岳断層が正断層として活動したため、破碎部の固結を根拠に活動性を否定していた断層評価、海域に分布する正断層の評価を変更（敷地への影響を比較し、双葉断層による地震に加え、畑川断層による地震を検討用地震として加え、地震動評価を実施） | P13,14 P19,20 P12,15,16 |
| ② | 震源モデルの設定では、敷地に最も厳しい位置に強震動生成域を移動させるなどする。 | <ul style="list-style-type: none"> ・2011年東北地方太平洋沖地震と同規模の地震を想定した3.11型地震(M9.0)では、強震動生成域を敷地に近付けて評価を実施 ・なお、他の検討用地震の評価においても、不確かさを考慮して実施。 | P14 P15,16,17,18 |
| ③ | 解析に使用する震源モデルについては、川辺・釜江(2013)モデルなど実績のあるモデルを使用する。 | <ul style="list-style-type: none"> ・3.11型地震(M9.0)については、提案されているモデルと比較のうえ、諸井ほか(2013)でモデル設定を行い評価を実施。（本震時の解放基盤波と比較することで地震動レベルの妥当性を確認） ・震源モデルについては、想定する地震に関して提案されている特性化震源モデル等も参考としながら、原則として、地震調査研究推進本部による強震動予測レシピ等に基づき設定 | P13,14 P15,17 |
| ④ | 新規制基準に準拠するなど、これまでの検討を加味する。 | <ul style="list-style-type: none"> ・審査ガイドに照らし合わせ、要求事項を可能な限り評価に反映。未反映の事項についても引き続き検討を実施予定。 ・平成25年11月18日の面談、平成26年2月5日の中間報告を踏まえて検討を実施。 | P10~24 |

4. 1 検討用地震動の評価（考慮した地震の比較）

これまでの評価で考慮



今回の評価で考慮



4. 1 検討用地震動の評価（プレート間地震）

検討用地震

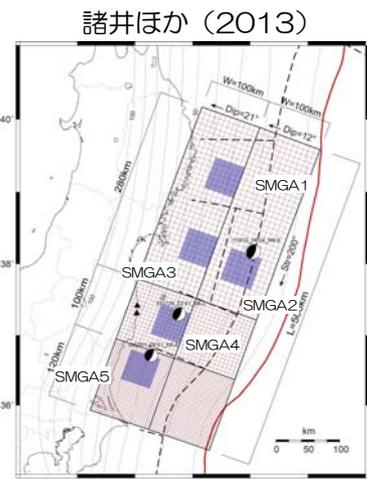
3.11型地震（2011年東北地方太平洋沖地震と同規模の地震を想定）

地震動評価

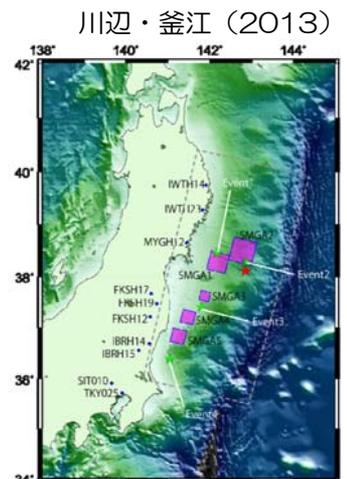
- 応答スペクトルに基づく地震動評価
 - ・ 地震規模が大きくNoda et al. (2002)の適用範囲外，その他の距離減衰式も適用が困難。
- 断層モデルを用いた手法による地震動評価
 - ・ 要素地震として適切な記録が得られていることから，経験的グリーン関数法により評価。
 - ・ 評価にあたっては，東北地方太平洋沖地震の解放基盤波と基本震源モデルの結果を比較し，妥当性を確認。

震源モデルの設定

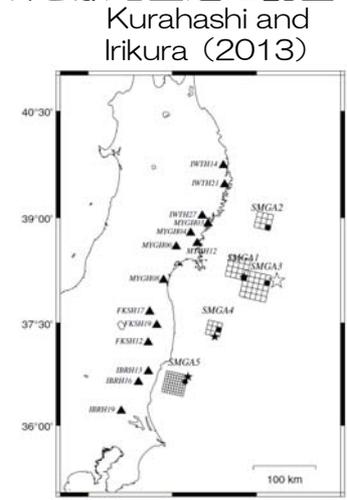
- 基本震源モデルは，2011年東北地方太平洋沖について提案されている震源モデルを確認のうえ，諸井ほか(2013)に基づき設定。
- 敷地前面の強震動生成域を敷地至近に配置したケースを不確かさとして考慮。



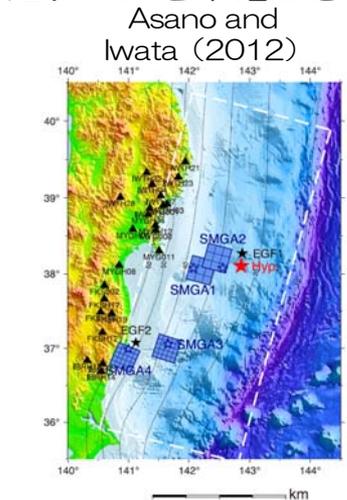
| | L (km) | W (km) | Mo (N·m) × 10 ²¹ | 応力降下量 (MPa) |
|-------|--------|--------|-----------------------------|-------------|
| SMGA1 | 50 | 50 | 2.00 | 24.6 |
| SMGA2 | 50 | 50 | 2.00 | 24.6 |
| SMGA3 | 50 | 50 | 2.00 | 24.6 |
| SMGA4 | 50 | 50 | 2.00 | 24.6 |
| SMGA5 | 50 | 50 | 2.00 | 24.6 |



| | L (km) | W (km) | Mo (N·m) × 10 ²⁰ | 応力降下量 (MPa) |
|-------|--------|--------|-----------------------------|-------------|
| SMGA1 | 40 | 40 | 5.02 | 20.4 |
| SMGA2 | 50 | 50 | 11.0 | 21.6 |
| SMGA3 | 21 | 21 | 0.643 | 15.7 |
| SMGA4 | 28 | 28 | 1.02 | 10.5 |
| SMGA5 | 30 | 30 | 2.58 | 23.1 |



| | L (km) | W (km) | Mo (N·m) × 10 ²⁰ | 応力降下量 (MPa) |
|-------|--------|--------|-----------------------------|-------------|
| SMGA1 | 34.0 | 34.0 | 2.68 | 16.0 |
| SMGA2 | 25.5 | 25.5 | 1.41 | 20.0 |
| SMGA3 | 42.5 | 42.5 | 6.54 | 20.0 |
| SMGA4 | 23.1 | 23.1 | 1.24 | 25.2 |
| SMGA5 | 35.2 | 35.2 | 5.95 | 26.0 |



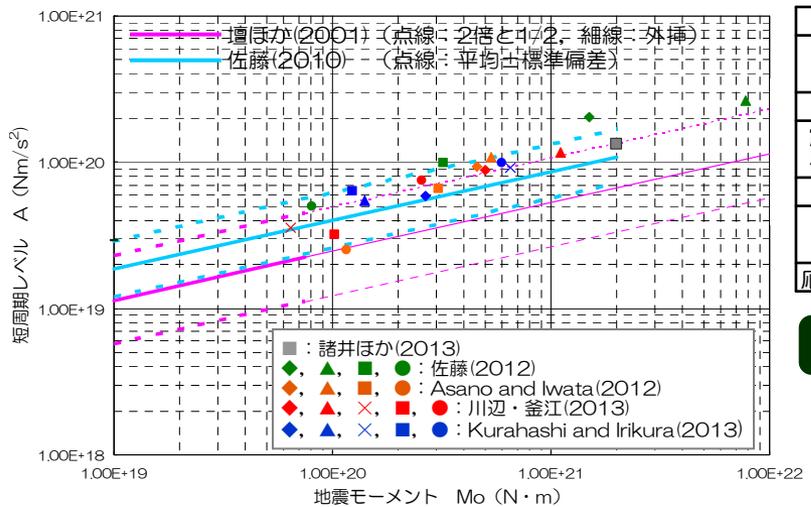
| | L (km) | W (km) | Mo (N·m) × 10 ²⁰ | 応力降下量 (MPa) |
|-------|--------|--------|-----------------------------|-------------|
| SMGA1 | 36 | 36 | 4.57 | 23.9 |
| SMGA2 | 36 | 36 | 5.33 | 27.8 |
| SMGA3 | 35 | 35 | 3.07 | 17.5 |
| SMGA4 | 35 | 35 | 1.16 | 6.6 |



| | L (km) | W (km) | Mo (N·m) × 10 ²⁰ | 応力降下量 (MPa) |
|-------|--------|--------|-----------------------------|-------------|
| SMGA1 | 45.0 | 45.0 | 14.9 | 39.77 |
| SMGA2 | 90.0 | 90.0 | 77.3 | 25.85 |
| SMGA3 | 30.0 | 30.0 | 3.23 | 29.10 |
| SMGA4 | 15.0 | 30.0 | 0.806 | 20.57 |

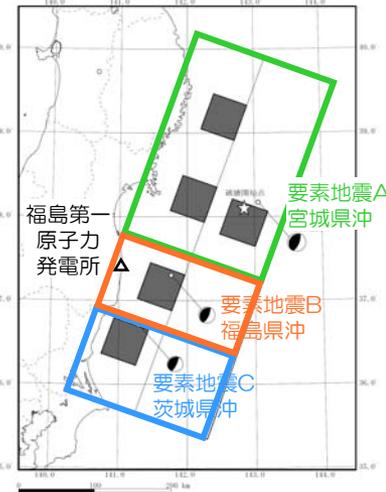
4. 1 検討用地震動の評価（プレート間地震）

震源モデル



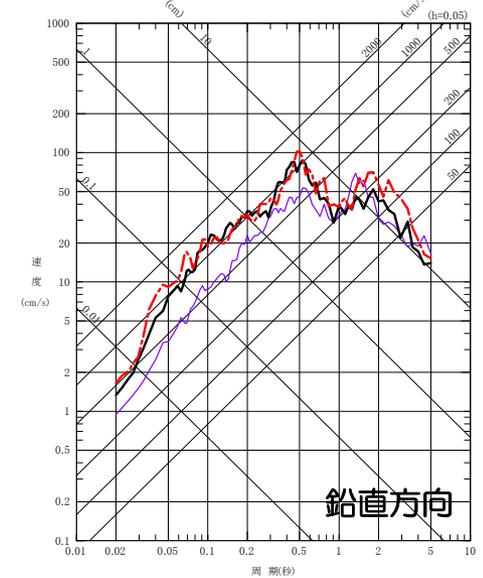
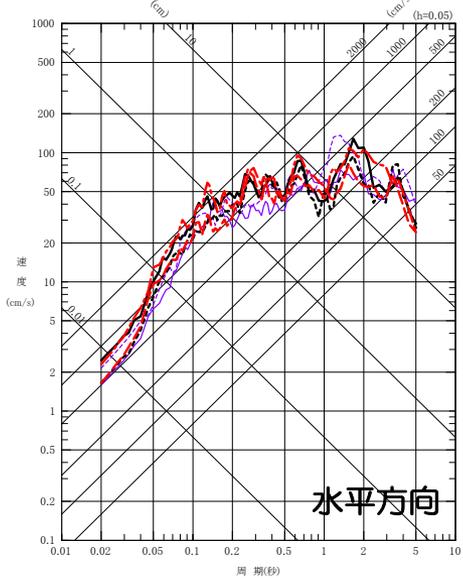
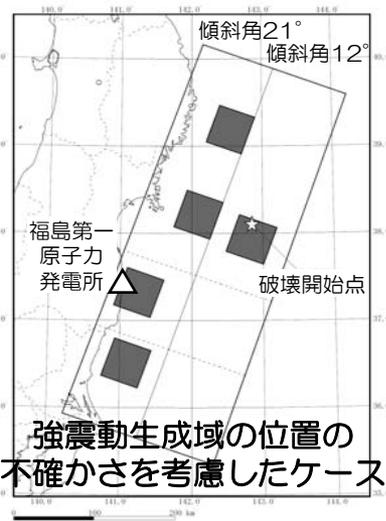
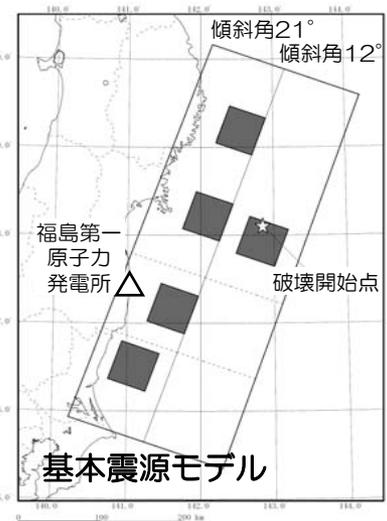
要素地震

| 項目 | 要素地震A | 要素地震B | 要素地震C |
|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 発生日時 | 2011.3.10 6:24 | 2007.11.26 22:51 | 2009.2.1 6:51 |
| マグニチュード | 6.8 | 6.0 | 5.8 |
| 震源位置 | 東経(°) 143.045 北緯(°) 38.172 | 東経(°) 141.757 北緯(°) 37.304 | 東経(°) 141.279 北緯(°) 36.717 |
| 震源深さ(km) | 9.3 | 44.1 | 47.0 |
| 地震モーメント ×10 ¹⁷ (N·m) | 55.1 | 7.66 | 4.65 |
| 応力降下量(MPa) | 11.8 | 4.1 | 10.4 |



評価結果

- 東北地方太平洋沖地震解放基盤波 (NS方向)
- - 東北地方太平洋沖地震解放基盤波 (EW方向)
- 基本震源モデル (NS方向)
- - 基本震源モデル (EW方向)
- · - 強震動生成域位置の不確かさ考慮 (NS方向)
- · - 強震動生成域位置の不確かさ考慮 (EW方向)



4. 1 検討用地震動の評価（内陸地殻内地震）

検討用地震

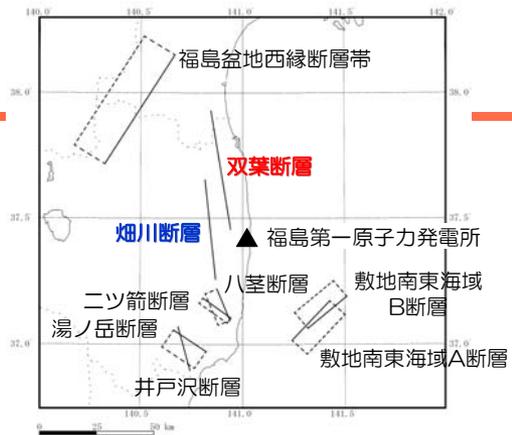
双葉断層による地震
畑川断層による地震

地震動評価

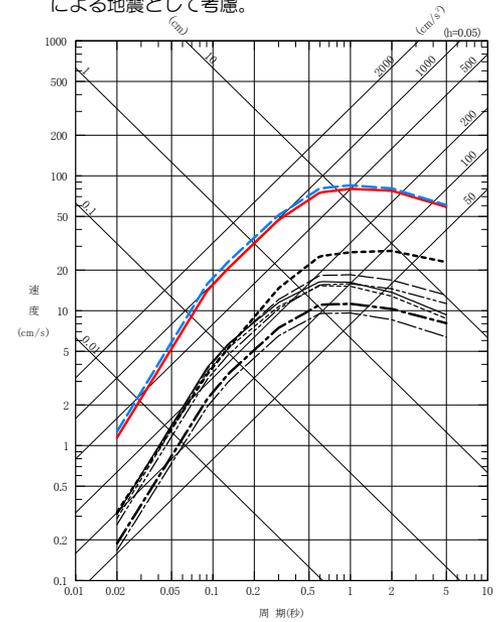
- 応答スペクトルに基づく地震動評価
 - ・ Noda et al.(2002)に基づき評価。
 - ・ ただし、敷地周辺で発生した内陸地殻内地震の観測記録が得られていないことから、内陸地殻内地震の補正による低減は考慮しない。
- 断層モデルを用いた手法による地震動評価
 - ・ 敷地において要素地震として適切な記録が得られていないことから、統計的グリーン関数法及び理論的手法を用いたハイブリッド合成法により評価。

震源モデルの設定

- 巨視的断層パラメータのうち、断層の位置・断層長さについては、地質調査結果に基づき設定。ただし、双葉断層については、地質調査結果から断層長さ53kmと考えられるものの、地震調査研究推進本部の長期評価を参考に断層の北端について予め不確かさを考慮して63kmと設定。
- 断層の傾斜角は、地質調査結果及び地震調査研究推進本部の長期評価を参考に90°を基本として設定し、不確かさとして60°を考慮。
- 地震発生層は、速度構造や微小地震分布等に基づき上端深さ3km、下端深さ18km、厚さ15kmと設定。



- 双葉断層による地震 (M7.7, Xeq=26km)
 - - - 福島盆地西縁断層帯による地震 (M7.8, Xeq=82km)
 - - - 井戸沢断層による地震 (M7.0, Xeq=56km)
 - - - 畑川断層による地震 (M7.6, Xeq=22km)
 - 八茎断層による地震 (M6.8, Xeq=34km)
 - - - 二ツ箭断層による地震 (M6.8, Xeq=36km)
 - - - 湯ノ岳断層による地震 (M6.9, Xeq=56km)
 - - - 敷地南東海域A断層による地震 (M7.1, Xeq=50km)
 - - - 敷地南東海域B断層による地震 (M7.1, Xeq=44km)
- ※ 2011年福島県浜通りの地震(M7.0, M6.4)は井戸沢断層による地震として考慮。



Noda et al.(2002)による検討用地震の選定

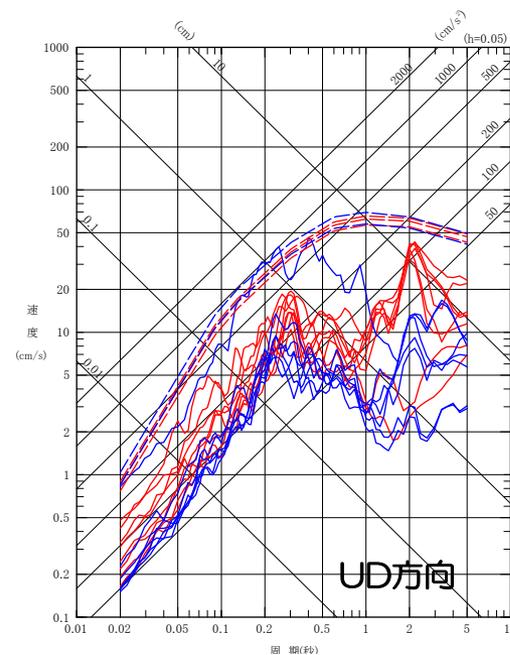
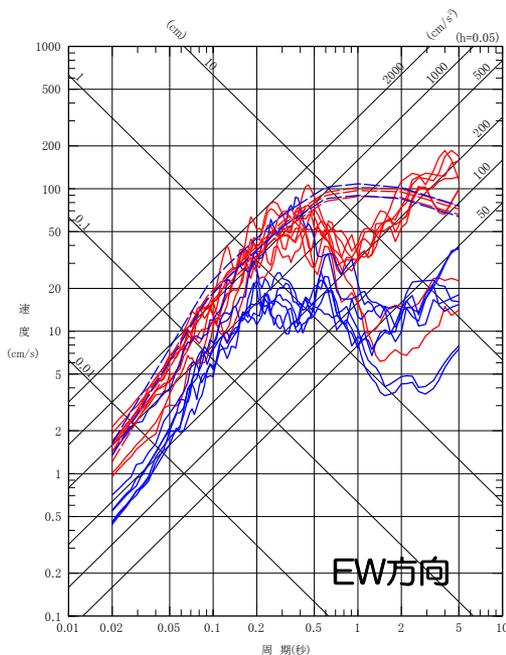
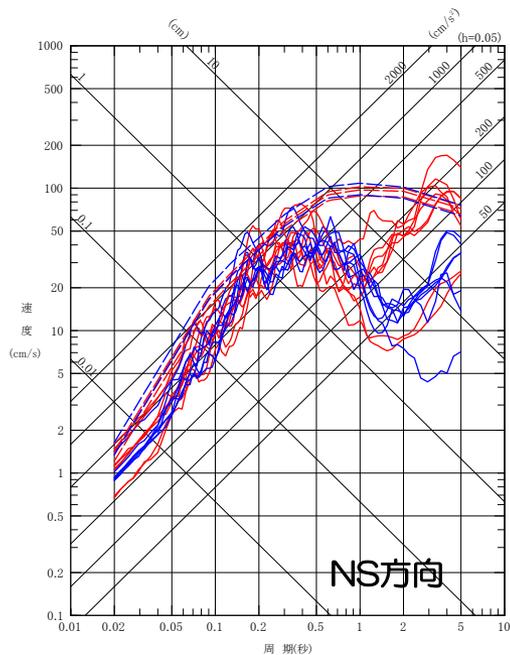
4. 1 検討用地震動の評価（内陸地殻内地震）

震源モデルの設定

- アスペリティの位置は、断層上端へ均等に配置することを基本とし、不確かさとして敷地至近に配置したケースを考慮。（畑川断層については、予め敷地に近い位置に設定しているためアスペリティ位置の不確かさは考慮しない）
- 応力降下量は、不確かさとして強震動予測レシピの1.5倍の値を考慮。
- 断層モデルの破壊開始点は、巨視的断層面中央下端を基本とし、不確かさとして巨視的断層面端部とアスペリティ端部を考慮。

評価結果

- 双葉断層による地震（断層モデル）
- - 双葉断層による地震（Noda et al.(2002)）
- 畑川断層による地震（断層モデル）
- - 畑川断層による地震（Noda et al.(2002)）



4. 1 検討用地震動の評価（海洋プレート内地震）

検討用地震

- 2011年型地震(M7.2)
(2011年宮城県沖の地震を想定)
- 1994年型地震(M8.2)
(1994年北海道東方沖地震を想定)
- 1993年型地震(M7.5)
(1993年釧路沖地震を想定)

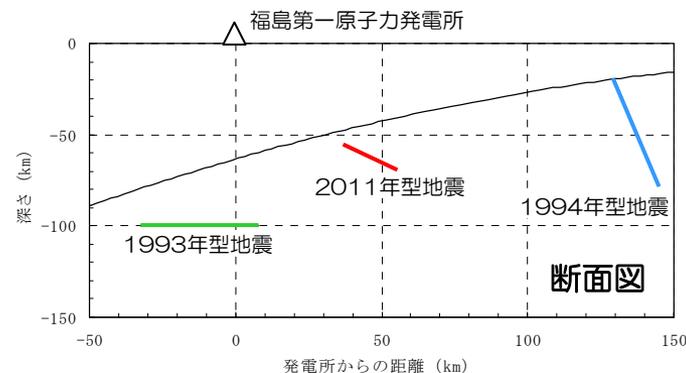
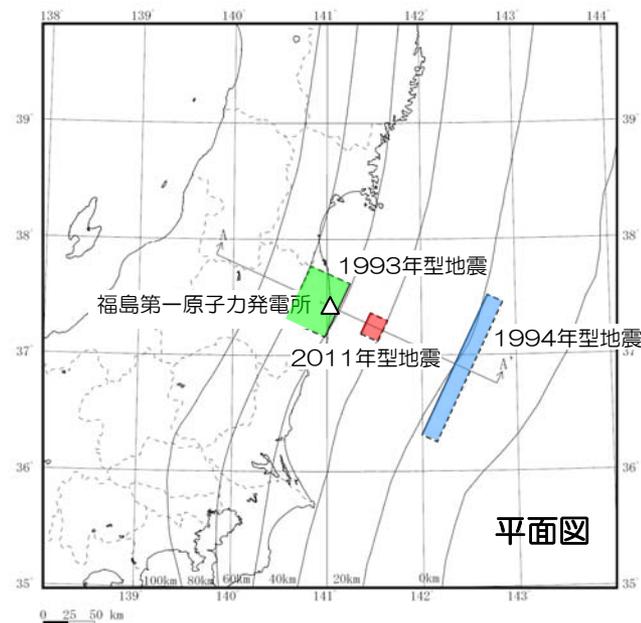
「敷地前面の想定海洋プレート内地震」と総称

地震動評価

- 応答スペクトルに基づく地震動評価
 - ・ Noda et al.(2002)に基づき評価。
 - ・ 評価にあたっては、敷地における観測記録を用いて算定した補正係数を考慮。
- 断層モデルを用いた手法による地震動評価
 - ・ 要素地震として適切な記録が得られていることから、経験的グリーン関数法により評価。

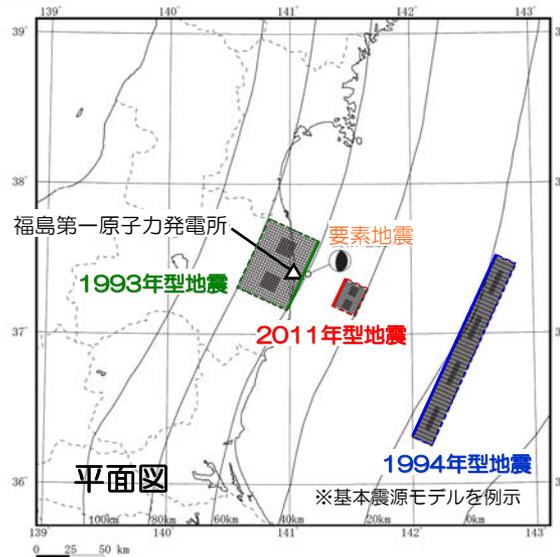
震源モデルの設定

- 基本震源モデルは、各地震の規模、太平洋プレートの深さ方向の位置関係を保持して敷地前面に想定し、笹谷ほか(2006)に基づき設定。
- 2011年宮城県沖の地震(M7.2)において大加速度の記録が得られた要因に関する知見を反映し、応力降下量及び断層傾斜角の不確かさを重畳させて考慮し、併せて破壊開始点の不確かさの影響も考慮。



4. 1 検討用地震動の評価（海洋プレート内地震）

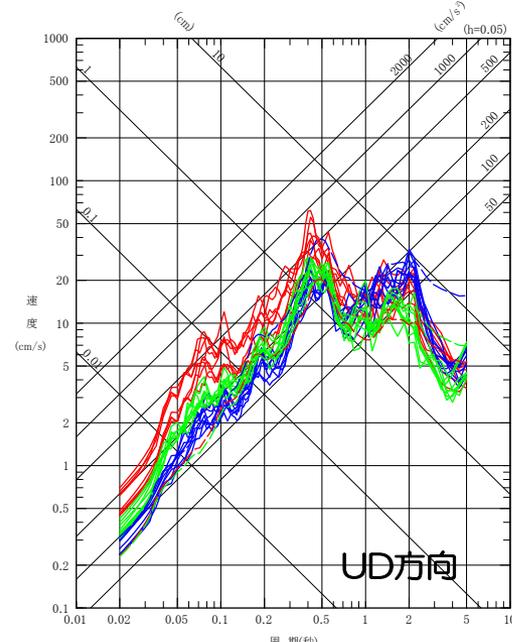
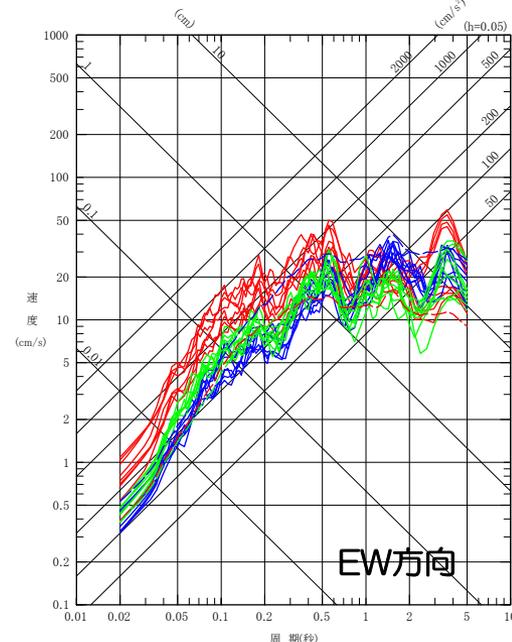
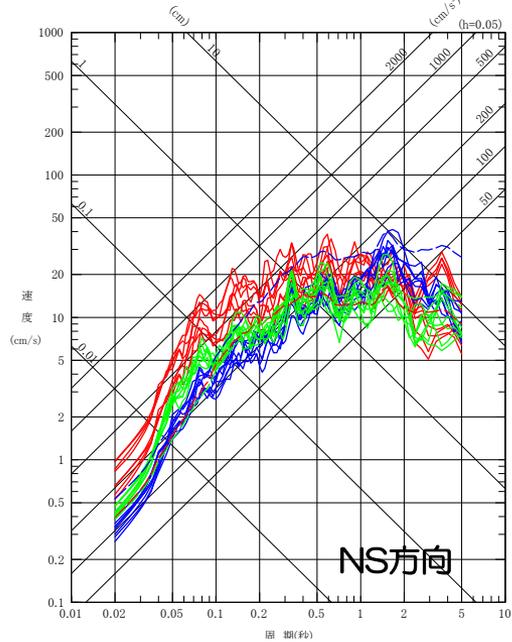
震源モデル・要素地震



| 項目 | 福島県沖の地震 | |
|---------------|-----------------------|---------|
| 発生日時 | 2003年2月16日 12時03分 | |
| マグニチュード | 5.2 | |
| 震源位置 | 東経 (°) | 141.149 |
| | 北緯 (°) | 37.402 |
| 震源深さ (km) | 63.2 | |
| 地震モーメント (N·m) | 3.00×10^{16} | |
| 応力降下量 (MPa) | 33.0 | |

- 2011年型地震（断層モデル）
- - - 2011年型地震（Noda et al.(2002)）
- 1994年型地震（断層モデル）
- - - 1994年型地震（Noda et al.(2002)）
- 1993年型地震（断層モデル）
- - - 1993年型地震（Noda et al.(2002)）

評価結果



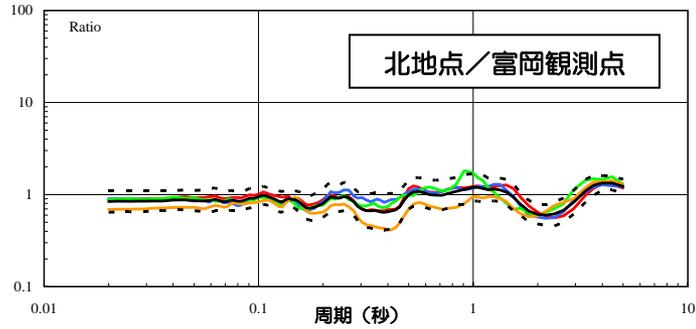
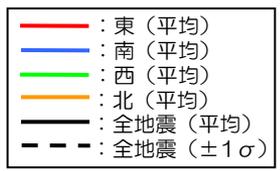
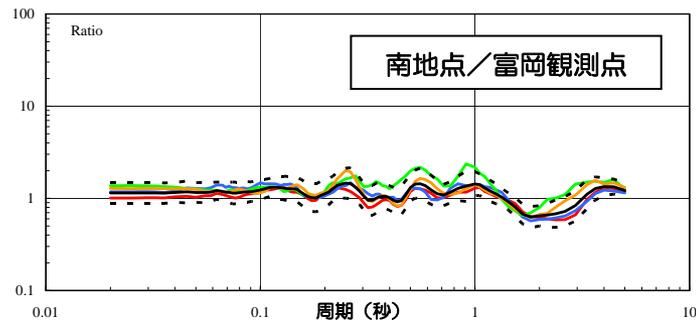
4. 1 検討用地震動の評価（地下構造の評価）

■ 地下構造による伝播特性の分析

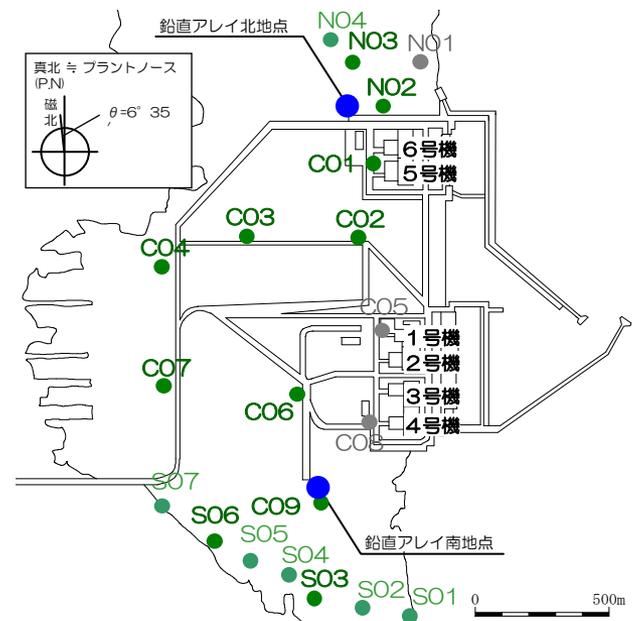
敷地内においては、地震観測が実施されており、多くの観測記録が得られていることから、これらの記録を分析し、地下構造による伝播特性を評価

■ 鉛直アレイ観測記録（●印）

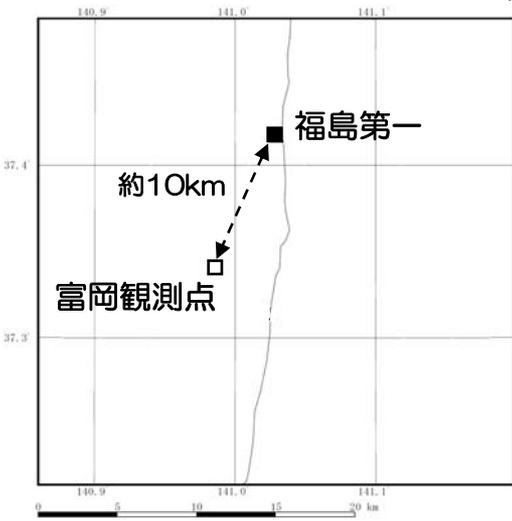
富岡観測点に対する到来方向別の水平方向スペクトル比



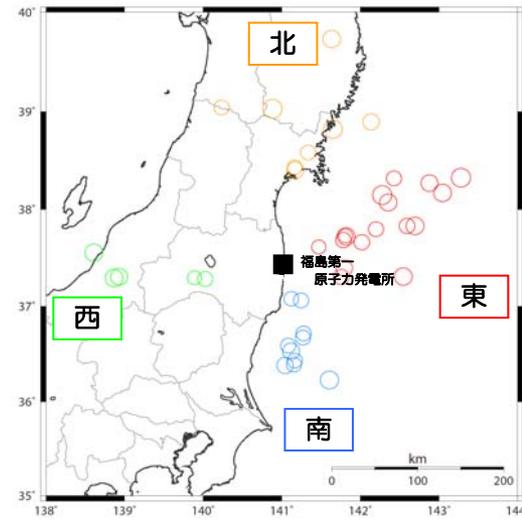
- 到来方向別の明瞭な差は確認されない
- 短周期側は、富岡観測点よりも北地点が小さく、南地点が大きくなる傾向



敷地内の地震観測点



富岡観測点と福島第一の位置関係

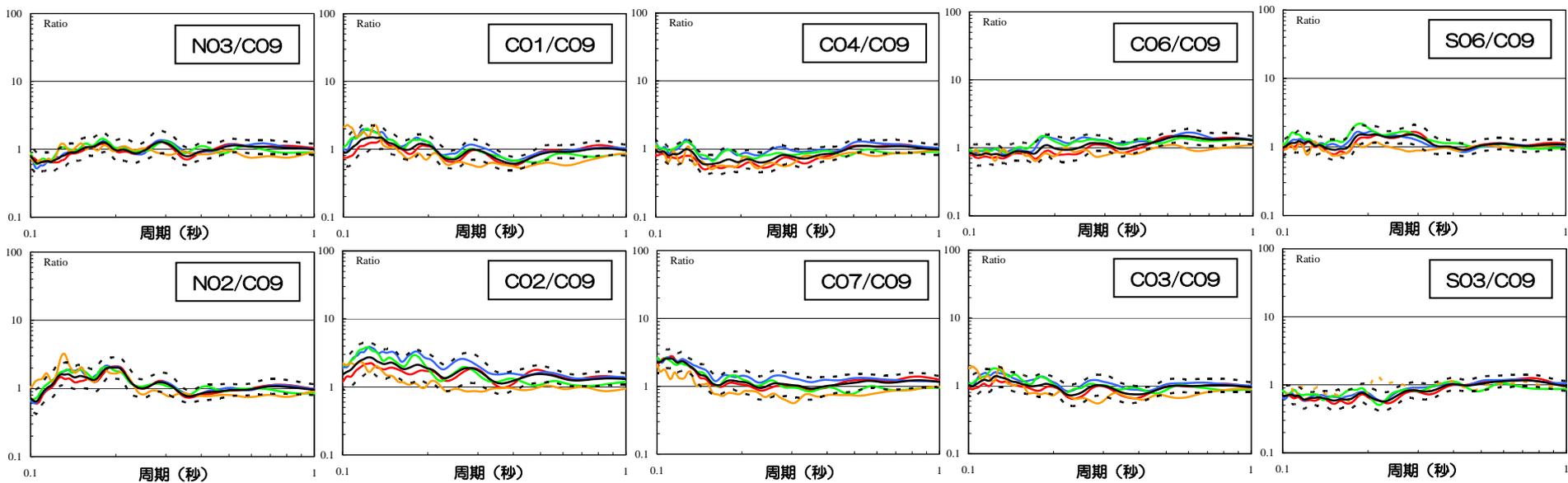


敷地周辺における地震の区分

4. 1 検討用地震動の評価（地下構造の評価）

■ 水平アレイ観測記録（●印 抜粋）

C09地点に対する到来方向別の水平方向スペクトル比



・ いずれの観測記録からも、敷地内の各地点において、到来方向による明瞭な差は確認されない

■ 地下構造モデルの設定

水平／上下スペクトル比の逆解析による地下構造推定法 [小林ほか(2005)]に基づき、増幅率の大きい鉛直アレイ南地点を代表し、地下構造モデルを設定
設定された地下構造モデルは、敷地における微動アレイ結果と整合することを確認

| 標高 (m) | 層厚 (m) | 密度 ρ (t/m ³) | S波速度 V_s (m/s) | P波速度 V_p (m/s) | Q 値 | 備考 |
|--------|--------|-------------------------------|------------------|------------------|-----|--------|
| -196 | | | | | | 解放基盤表面 |
| -300 | 104 | 1.8 | 810 | 2260 | 100 | 最深部地震計 |
| -420 | 120 | 1.9 | 870 | 2100 | 100 | |
| -620 | 200 | 2.0 | 1010 | 2200 | 100 | 地震基盤面 |
| -1030 | 410 | 2.0 | 1160 | 2520 | 100 | |
| -2780 | 1750 | 2.7 | 2800 | 5500 | 300 | |
| | | 2.7 | 3550 | 6000 | 300 | |

4. 1 検討用地震動の評価（震源を特定せず策定する地震動）

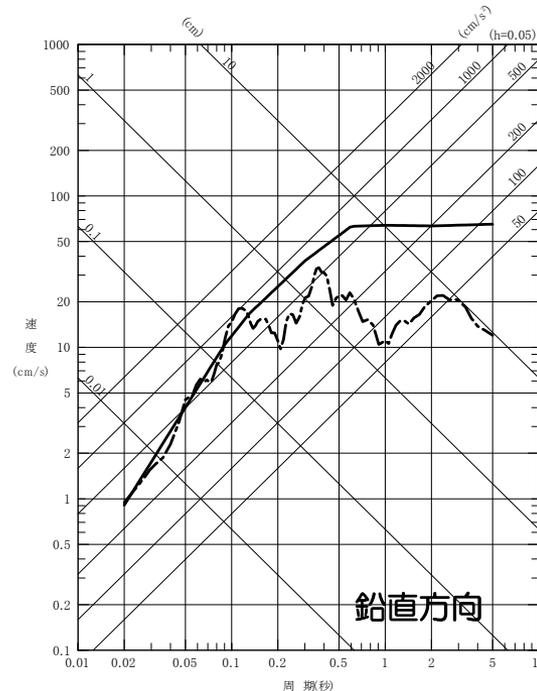
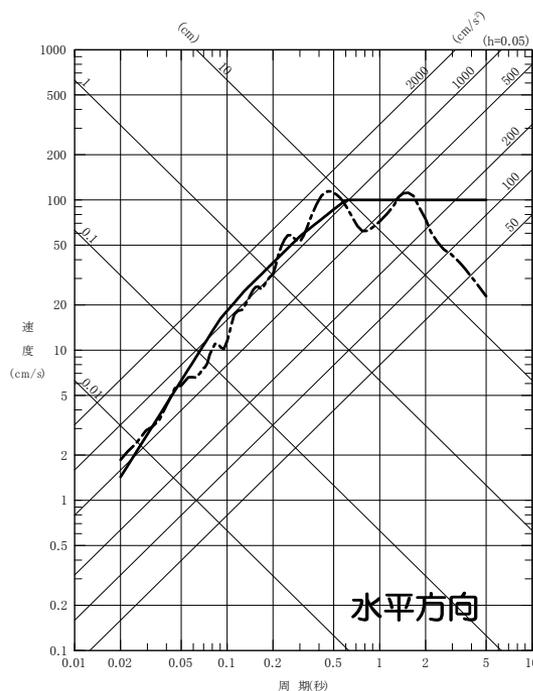
- 震源近傍の硬質地盤上の強震記録を収集し設定された加藤ほか(2004)による応答スペクトルに対し，Noda et al.(2002)の方法により求めた地盤増幅特性を用いて，「震源を特定せず策定する地震動」の応答スペクトルを設定。
- 加えて，審査ガイド例示16地震のうち，解放基盤表面相当の地震動が評価されている2004年北海道留萌支庁南部地震のHKDO20港町観測点の佐藤ほか(2013)による推計結果も併せて考慮。

審査ガイド 例示16地震

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 |

加藤ほか(2004)による応答スペクトル
 佐藤ほか(2013)による推計結果

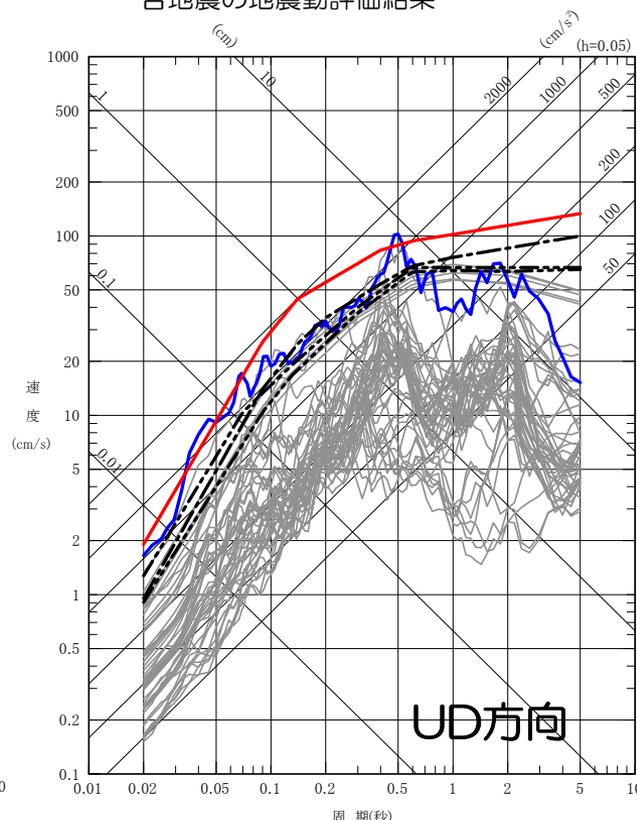
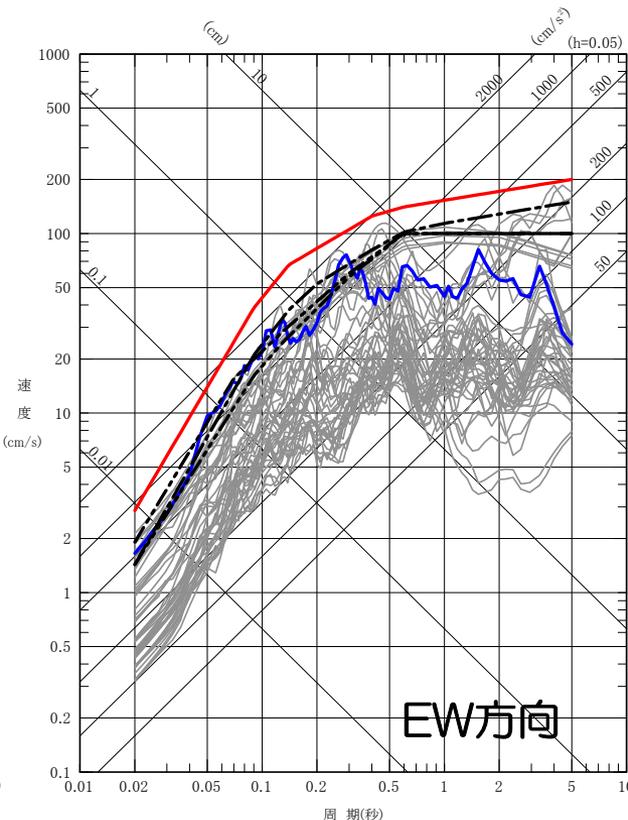
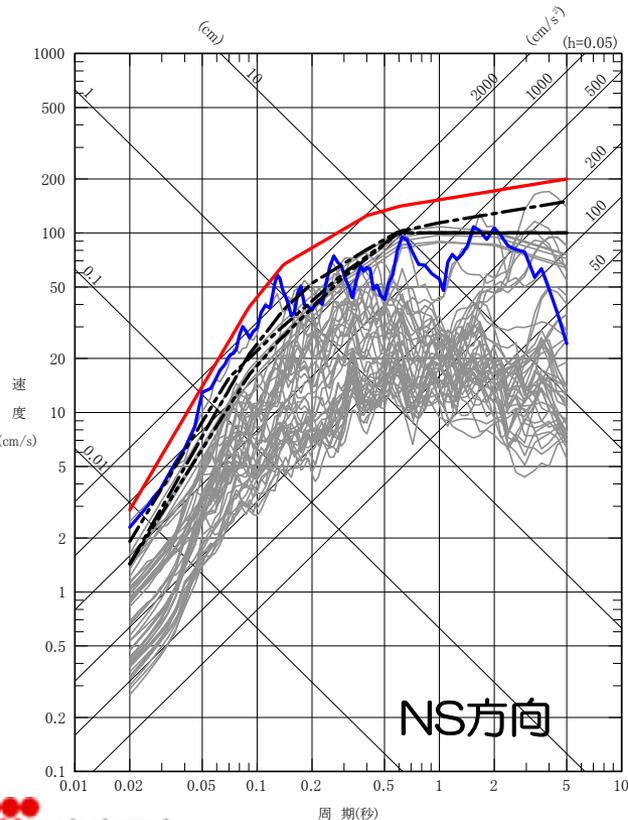


4. 1 検討用地震動の評価（検討用地震動）

- 「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」の評価結果を踏まえ検討用地震動①を策定。
- 強震動生成域の位置の不確かさを考慮した3.11型地震の断層モデルの評価結果を検討用地震動②として策定。

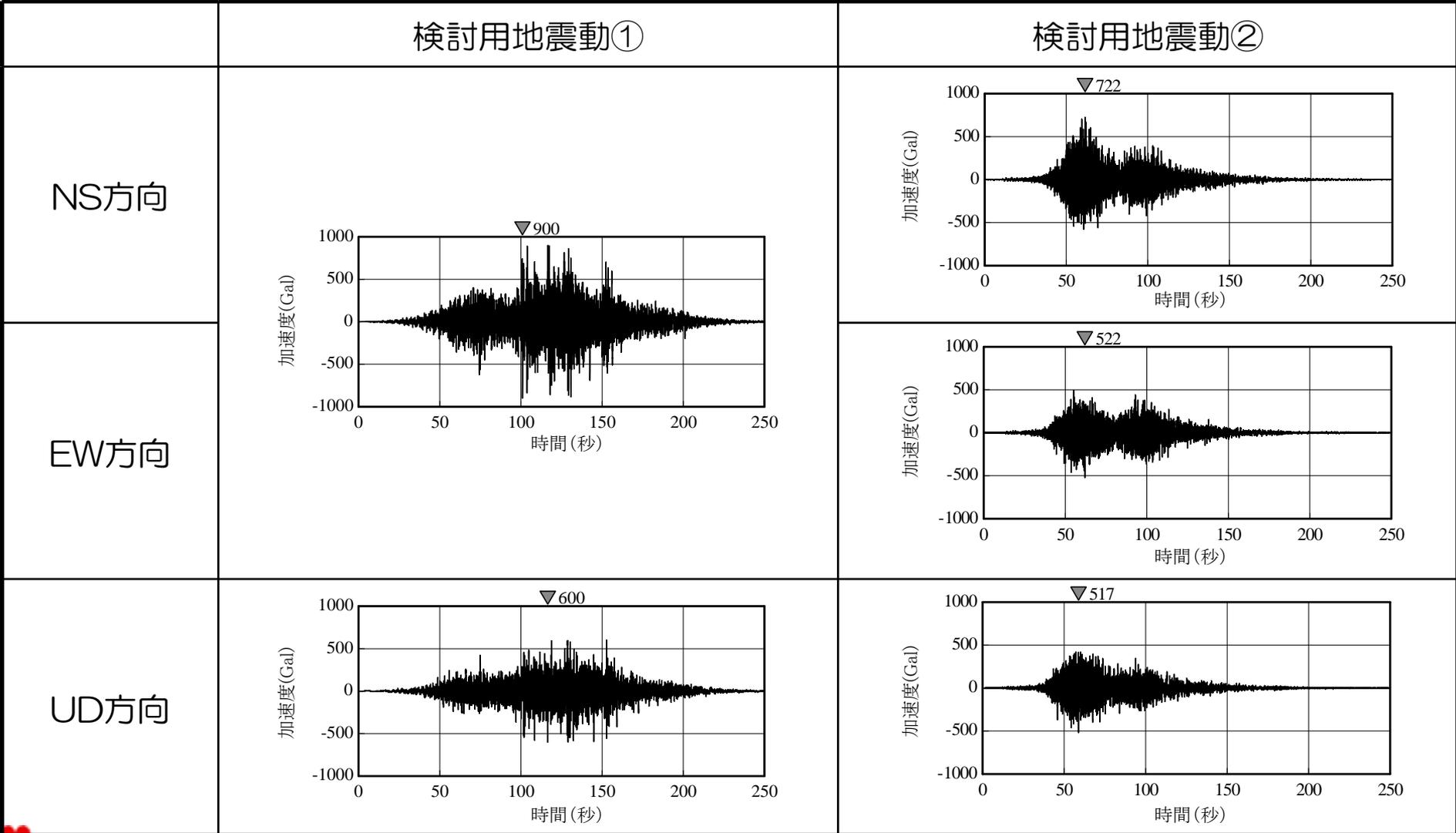
擬似速度応答スペクトル

- (今回) 検討用地震動①
- (今回) 検討用地震動②
- (従来) 基準地震動Ss-1
- (従来) 基準地震動Ss-2
- (従来) 基準地震動Ss-3
- 各地震の地震動評価結果



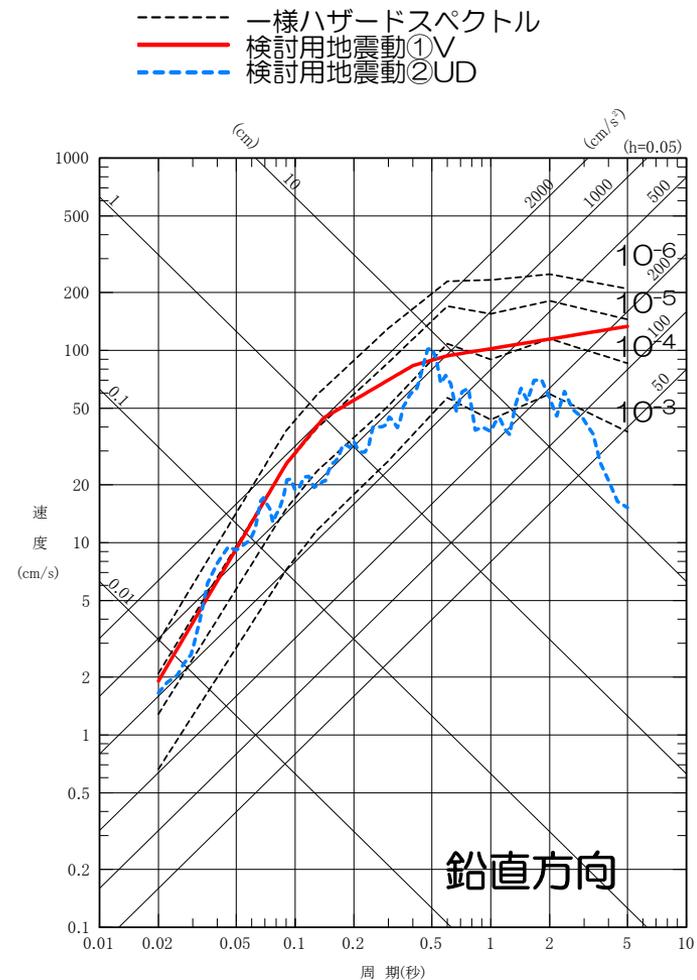
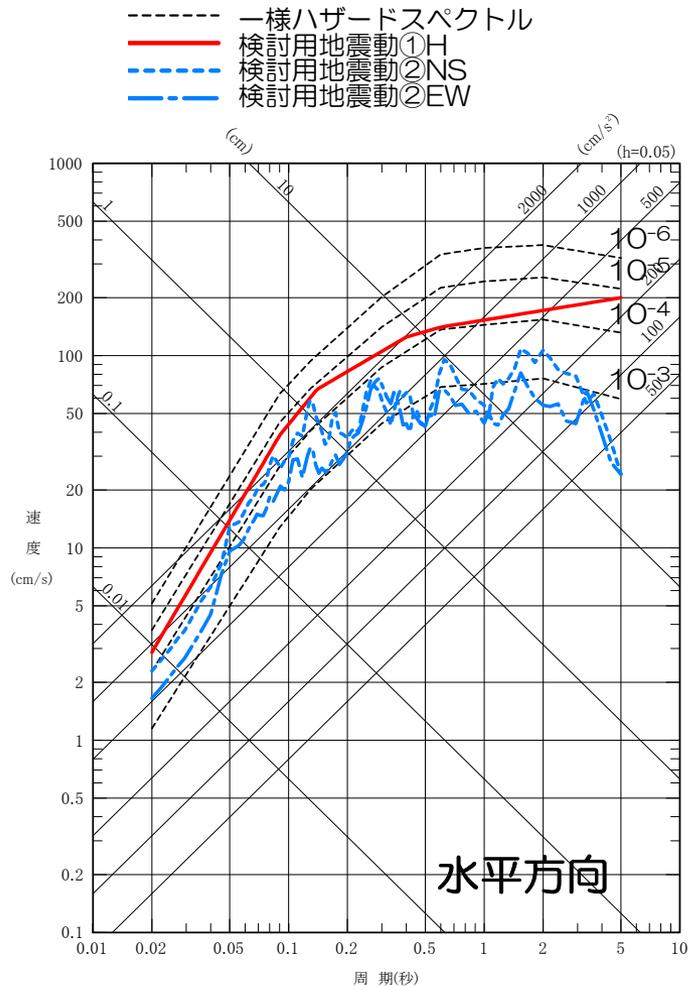
4. 1 検討用地震動の評価（検討用地震動）

加速度時刻歴波形



4. 1 検討用地震動の評価（超過確率の参照）

- 検討用地震動の応答スペクトルと日本原子力学会(2007)の方法に基づき試算した敷地における地震動の一樣ハザードスペクトルを比較。
- 策定した地震動の応答スペクトルの年超過確率は 10^{-4} ~ 10^{-5} 程度。

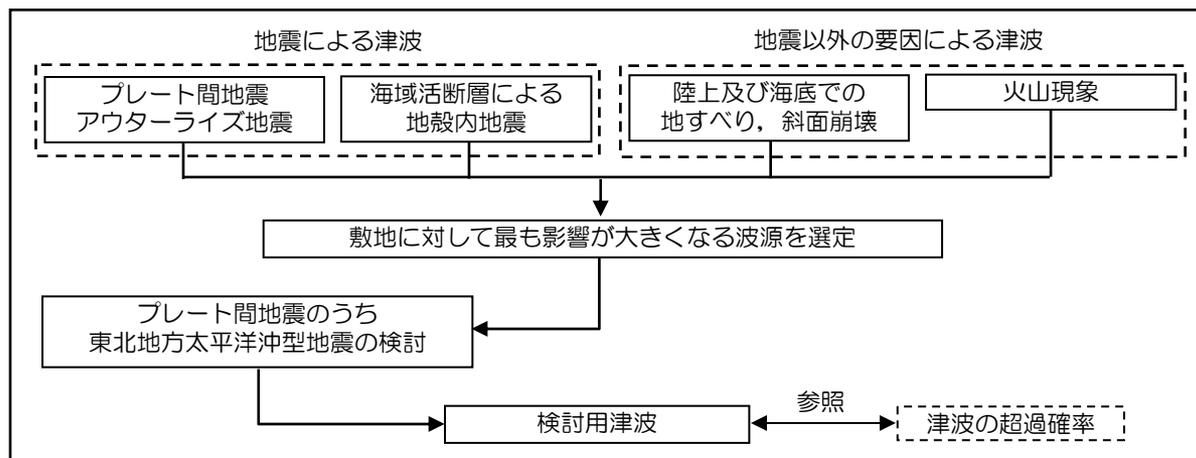


4. 2 検討用津波の評価

新規制基準を踏まえた津波評価

- 原子力規制委員会（2013）「基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド」に準拠するとともに、2011年東北地方太平洋沖地震の知見などを踏まえて、供用中に施設に大きな影響を及ぼすおそれがある津波を評価した。
- 検討用津波の波源としては、東北地方太平洋沖型地震、千島海溝～日本海溝北部の地震、津波地震型及びアウターライズ地震型などを考慮した。
- 波源の不確かさを考慮し、福島第一原子力発電所に対して最も影響が大きくなるモデルを検討した。
- 検討の結果、東北地方太平洋沖型地震が敷地に最も影響を与えた。

検討用津波の策定フロー



4. 2 検討用津波の評価（前提条件等への対応状況）

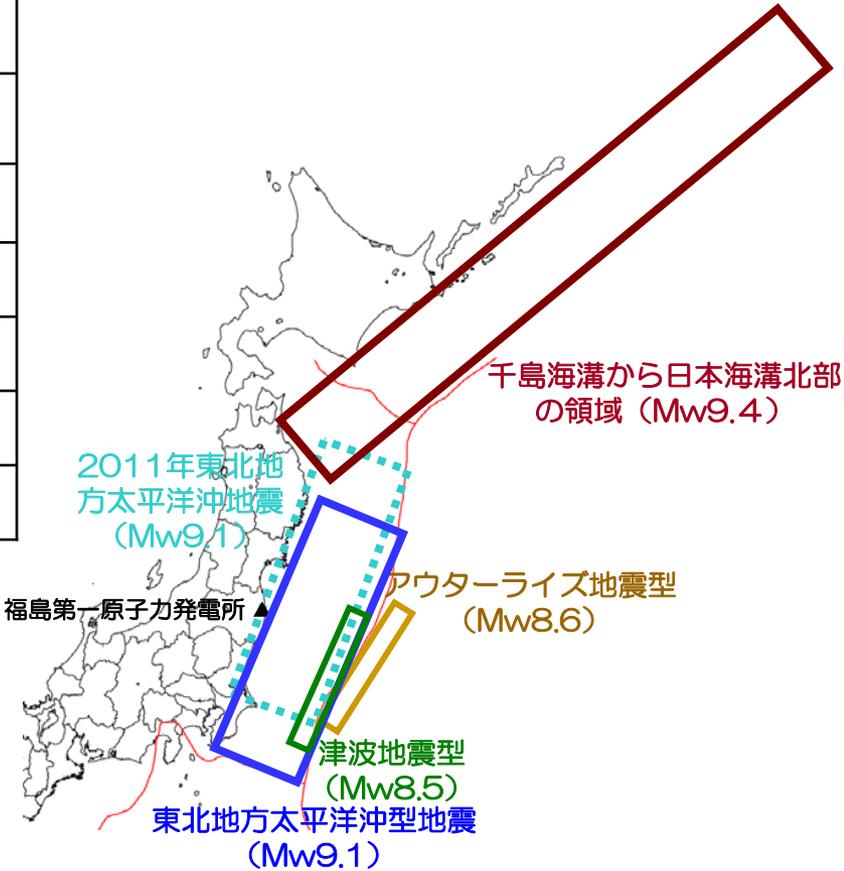
『検討用地震動及び検討用津波の前提条件等』への対応状況

| | 前提条件等 | 対応状況 | 説明資料 該当ページ |
|---|--|---|---------------|
| ① | 津波については、東北地方太平洋沖地震の知見を踏まえて、日本海溝から千島海溝沿いの領域を設定する。 | <ul style="list-style-type: none"> ・2011年東北地方太平洋沖地震の知見である、『複数の領域が連動して発生すること』を踏まえて、同規模の地震を、敷地への影響が最大となる位置に想定。 ・波源モデルの設定では、2011年東北地方太平洋沖地震の発生直後であることを考慮。 ・千島海溝沿いの領域については、2011年の波源域を含まない、日本海溝北部から千島海溝の波源モデルについて評価を実施。 | P27, 28 |
| ② | 波源モデルのすべり域は、すべり分布の不均一性を考慮し、サイト前面に設定するなどする。 | <ul style="list-style-type: none"> ・原子力規制委員会「基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド」を踏まえ、特性化波源モデルを作成し、超大すべり域・大すべり域の位置を変えた検討を行い、敷地への影響が最大となる位置に配置して評価を実施。 | P27, 28 |
| ③ | 津波の解析にあたっては、津波対策を反映した地形モデルを用い、その効果を確認する。 | <ul style="list-style-type: none"> ・2011年東北地方太平洋沖地震の福島第一原子力発電所における平均地殻変動量の反映として、0.662mの沈降を初期潮位に加算。 ・北防波堤損壊区間は復旧状況を反映し堤高をO.P.+3.5mとした。4号機南側の仮設防潮堤（高さO.P.+14m）は考慮していない。 | P31 |
| ④ | 新規基準に準拠するなど、これまでの検討を加味する。 | <ul style="list-style-type: none"> ・審査ガイドに照らし合わせ、要求事項を可能な限り評価に反映。未反映の事項についても引き続き検討を実施予定。 ・平成25年11月18日の面談、平成26年2月5日の中間報告を踏まえて検討を実施。 | P25～33 |

4. 2 検討用津波の評価（評価結果）

検討用津波の評価結果

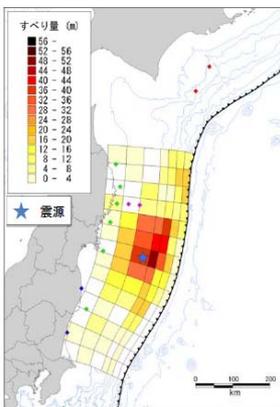
| 名称 | 既往地震 | 既往地震規模 Mw | 検討規模 Mw | 最高水位 (旧検潮所) |
|------------------|----------------------------|--------------|------------|----------------|
| 東北地方太平洋 沖型地震 | 2011年東北地方 太平洋沖地震 | 9.0 ~9.1 | 9.1 | O.P.+23.2m |
| 千島海溝から 日本海溝北部 | 500年間隔地震 | 8.5 ~8.8 | 9.4 | O.P.+11.5m |
| 津波地震型 | 1677年延宝房総地震 1896年明治三陸地震 | 8.2 8.3 | 8.5 | O.P.+14.5m |
| アウターライズ 地震型 | 1933年昭和三陸地震 | 8.4 | 8.6 | O.P.+5.2m |
| 海域の活断層 | — | — | 6.8 | O.P.+2.8m |
| 海底地すべり | — | — | — | O.P.+2.0m |
| 陸域斜面崩壊 | 該当なし | | | |
| 火山活動 | 該当なし | | | |



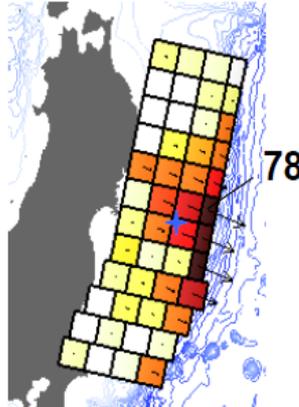
4. 2 検討用津波の評価（東北地方太平洋沖型地震の検討）

検討用津波（東北地方太平洋沖型地震）の検討

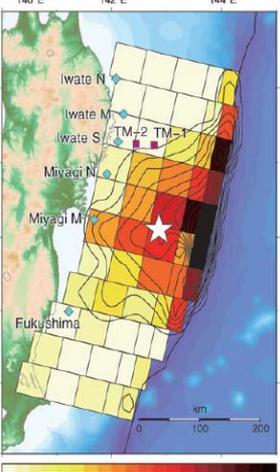
2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波を再現する詳細津波波源モデル



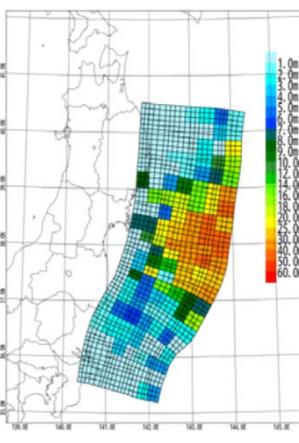
内閣府(2012)



(独)原子力安全
基盤機構(2011)

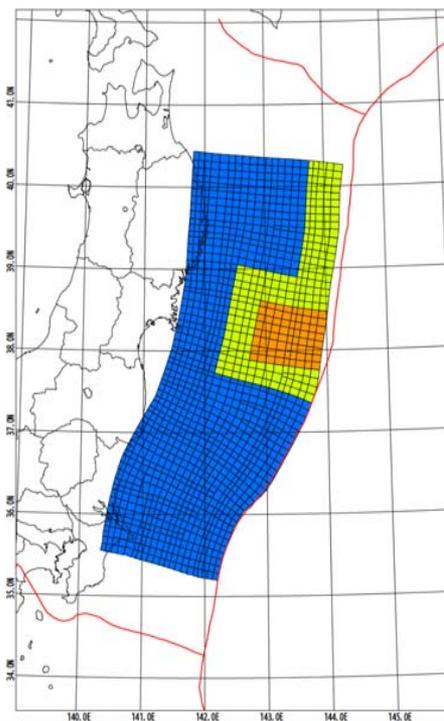


Satake et al.(2013)



東京電力

再現する波源モデルを単純化

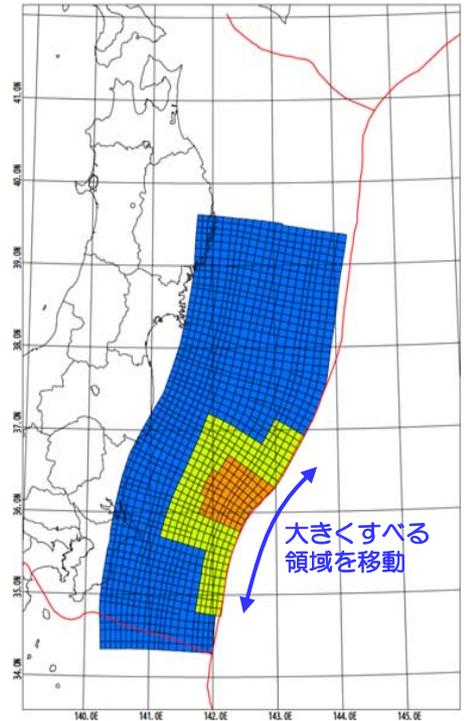


すべり分布の単純化

- 将来想定である検討用津波の評価のため、すべり分布を単純化

| すべり量の凡例 | |
|----------|--------|
| ■ 超大すべり域 | 36. 6m |
| ■ 大すべり域 | 18. 3m |
| ■ 背景領域 | 5. 7m |

検討用津波の波源モデル

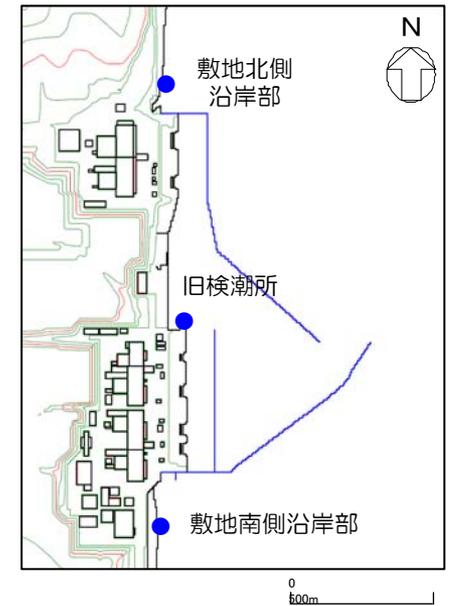
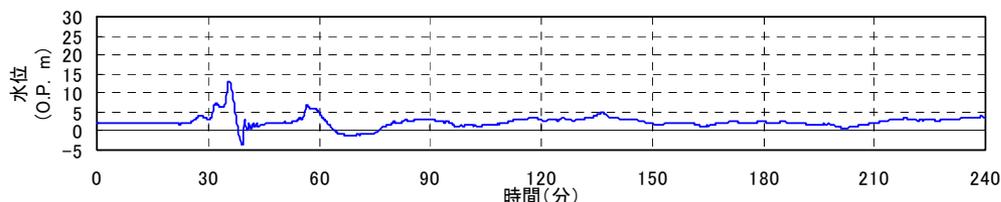
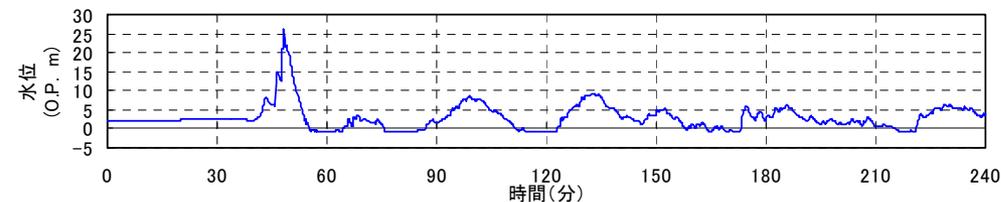
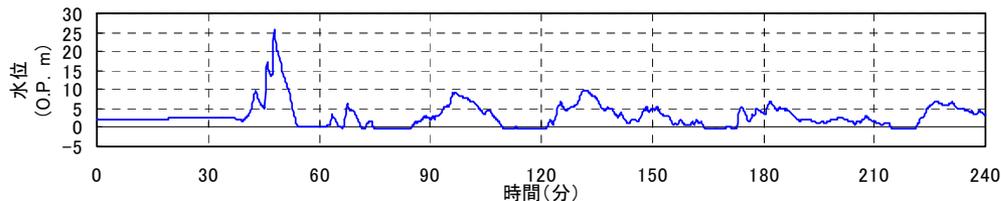
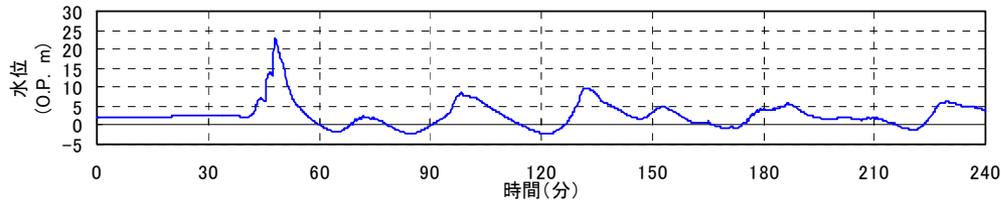


敷地での最大ケースを選定

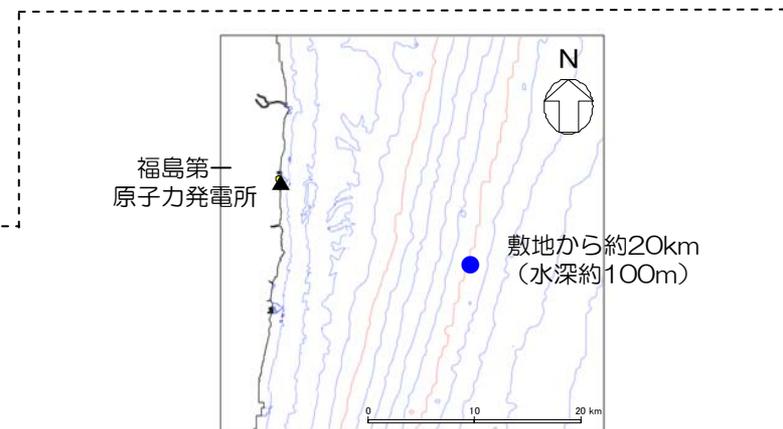
- 領域全体を日本海溝の南端まで移動
- 大きくすべる領域を、敷地への影響が最大となるよう、複数設定し、最大ケースを選定

4. 2 検討用津波の評価（時刻歴波形）

検討用津波（東北地方太平洋沖型地震）の時刻歴波形



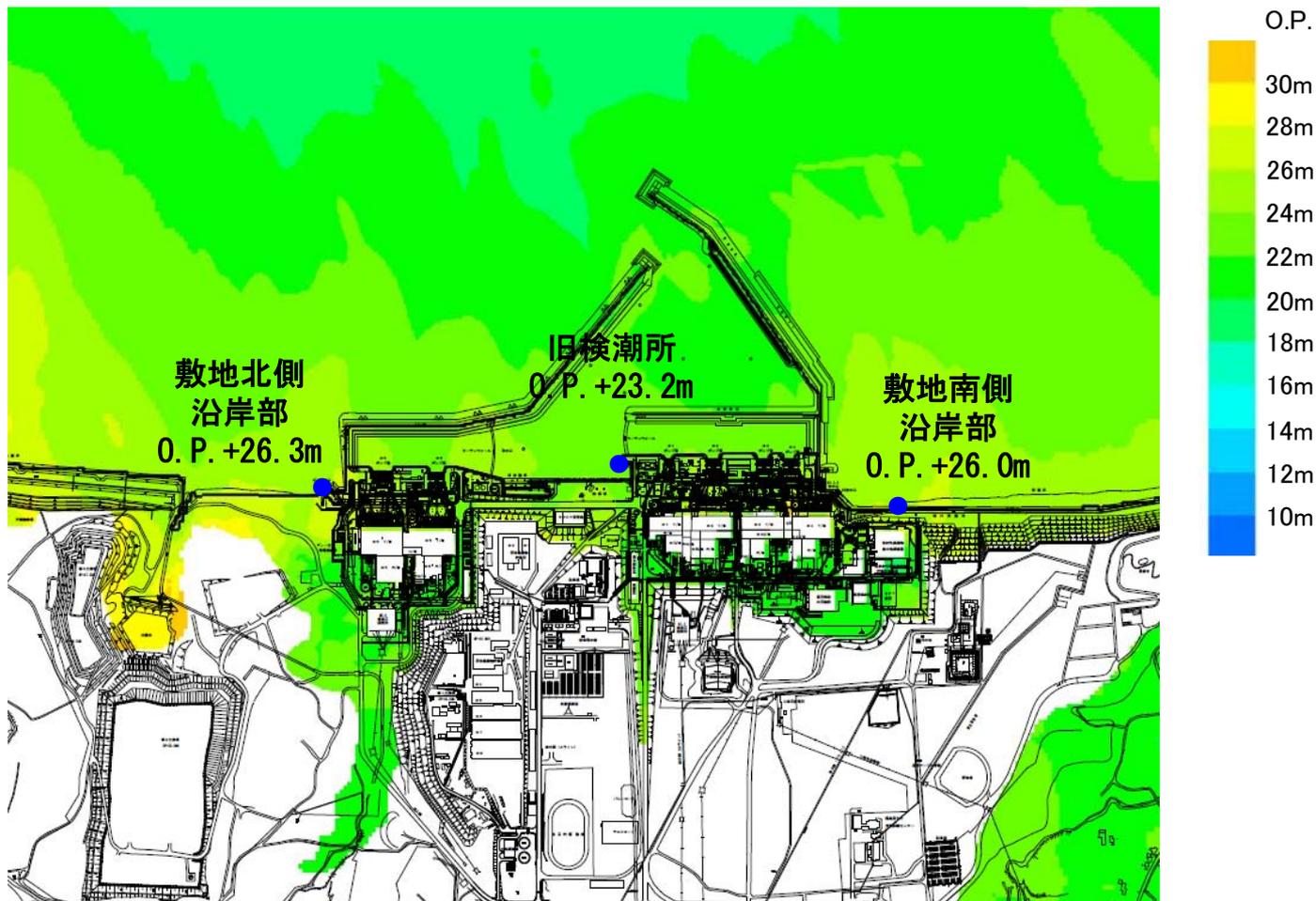
評価位置



沖合地点の評価位置

4. 2 検討用津波の評価（最高水位分布）

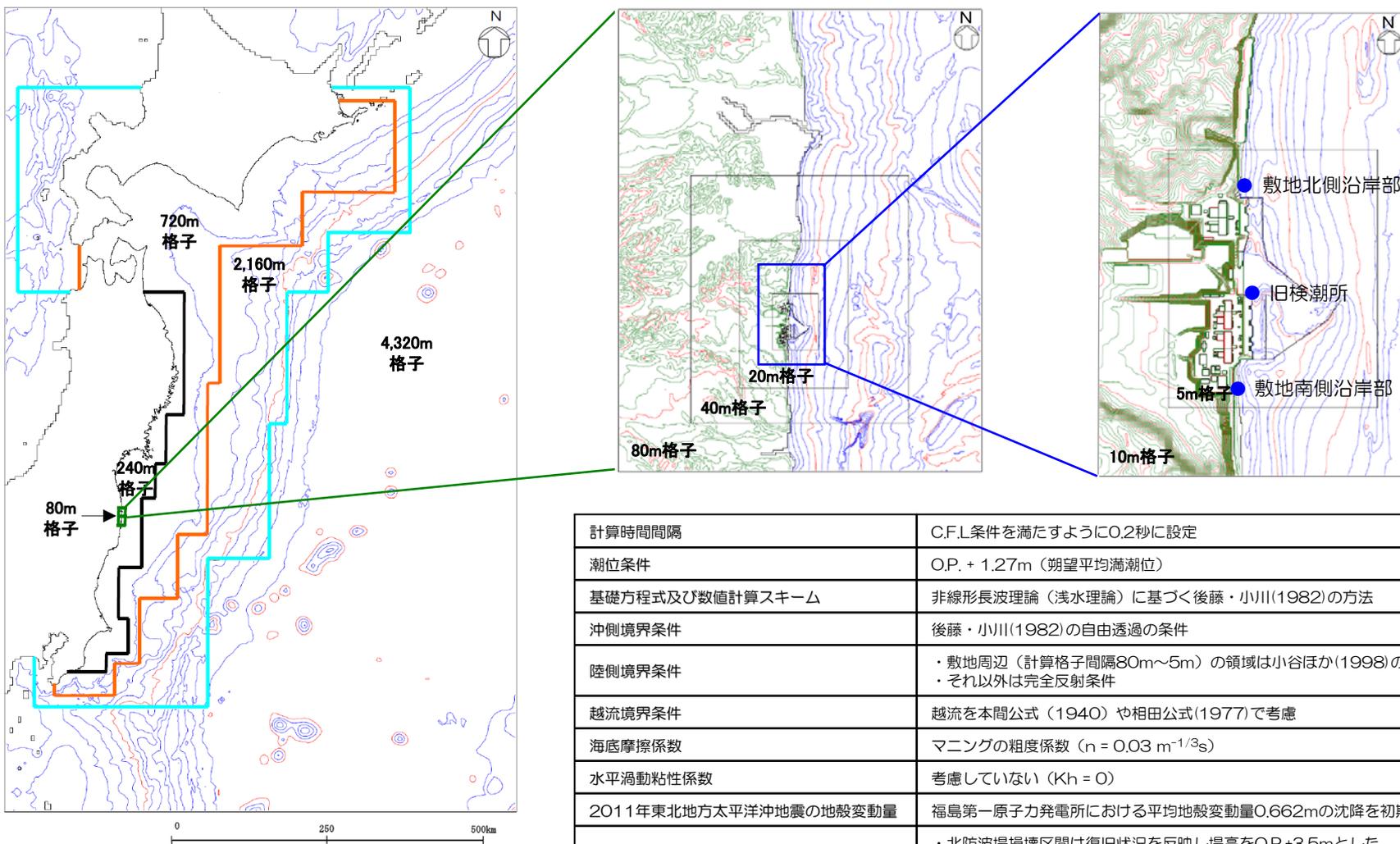
検討用津波（東北地方太平洋沖型地震）の最高水位分布



検討用津波の最高水位分布 [O.P. (m)]

4. 2 検討用津波の評価（【参考】評価手法）

【参考】検討用津波の評価手法：格子分割及び計算条件

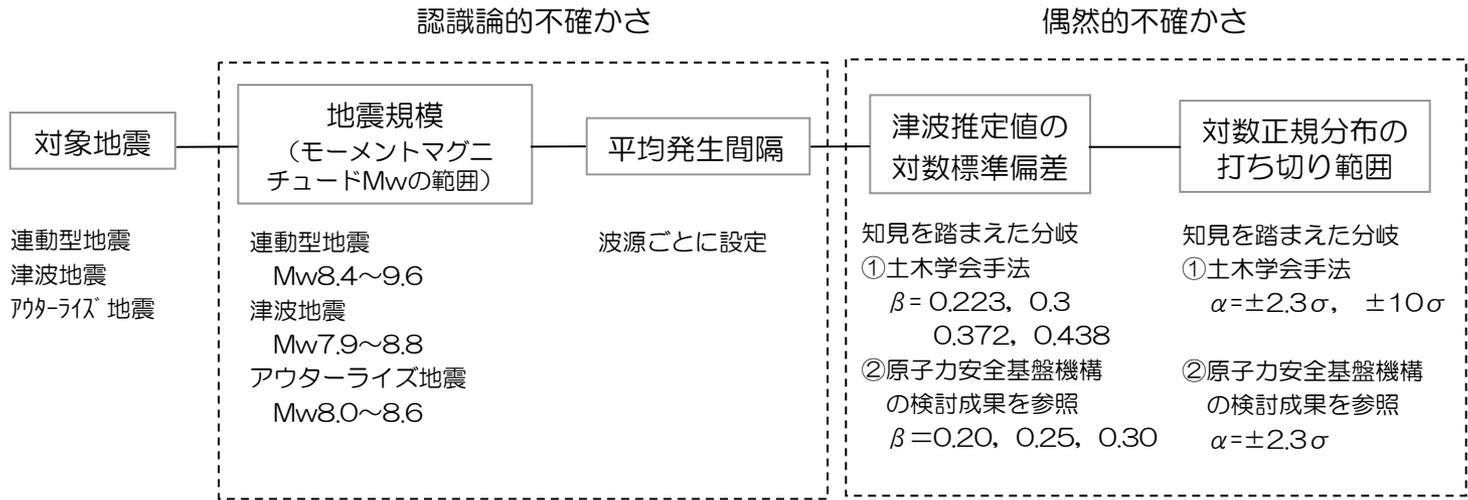


| | |
|-----------------------|---|
| 計算時間間隔 | C.F.L条件を満たすように0.2秒に設定 |
| 潮位条件 | O.P. + 1.27m (期望平均満潮位) |
| 基礎方程式及び数値計算スキーム | 非線形長波理論 (浅水理論) に基づく後藤・小川(1982)の方法 |
| 沖側境界条件 | 後藤・小川(1982)の自由透過の条件 |
| 陸側境界条件 | <ul style="list-style-type: none"> 敷地周辺 (計算格子間隔80m~5m) の領域は小谷ほか(1998)の陸上遡上境界条件 それ以外は完全反射条件 |
| 越流境界条件 | 越流を本間公式 (1940) や相田公式(1977)で考慮 |
| 海底摩擦係数 | マンングの粗度係数 ($n = 0.03 \text{ m}^{-1/3\text{s}}$) |
| 水平渦動粘性係数 | 考慮していない ($Kh = 0$) |
| 2011年東北地方太平洋沖地震の地殻変動量 | 福島第一原子力発電所における平均地殻変動量0.662mの沈降を初期潮位に加算 |
| 防波堤・防潮堤 | <ul style="list-style-type: none"> 北防波堤損壊区間は復旧状況を反映し堤高をO.P.+3.5mとした 4号機南側の仮設防潮堤 (高さO.P.+14m) は考慮していない |

4. 2 検討用津波の評価（超過確率の参照）

超過確率の参照：確率論的津波水位評価の概要

- 確率論的津波ハザードの検討にあたっては、地震による津波を検討対象とし、解析手順は日本原子力学会(2012)・土木学会(2011)（以下、「土木学会手法」という。）に基づき実施した。
- 検討対象の地震は、日本海溝～千島海溝における連動型地震、津波地震、アウターライズ地震とした。
- 認識論的不確かさとして、地震規模、平均発生間隔、波源のモデル化等を考慮した。
- 偶然的な不確かさとして、津波推定値のばらつきを対数正規分布として考慮した。
- ロジックツリーは、日本原子力学会(2012)・土木学会手法に基づき、2011年東北地方太平洋沖地震後の知見を反映した設定とし、地震の発生直後であることを考慮した。



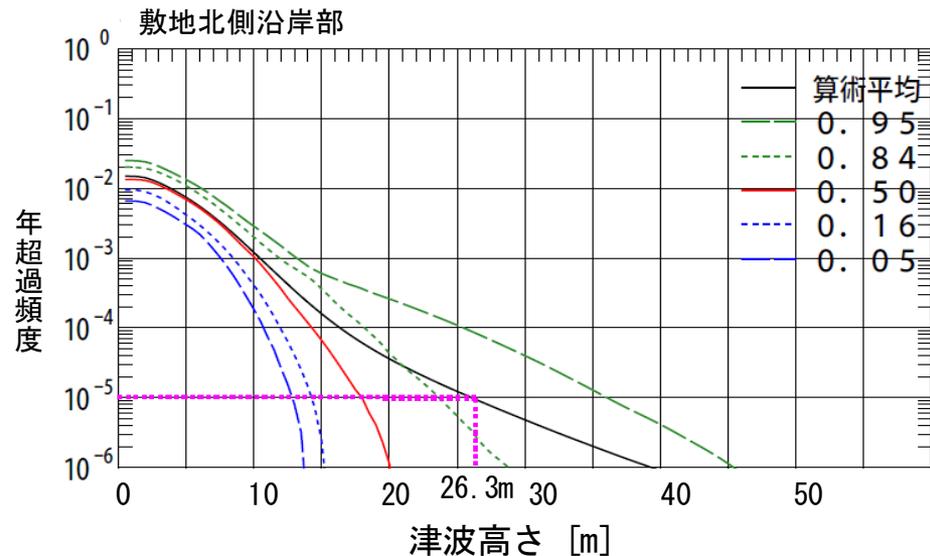
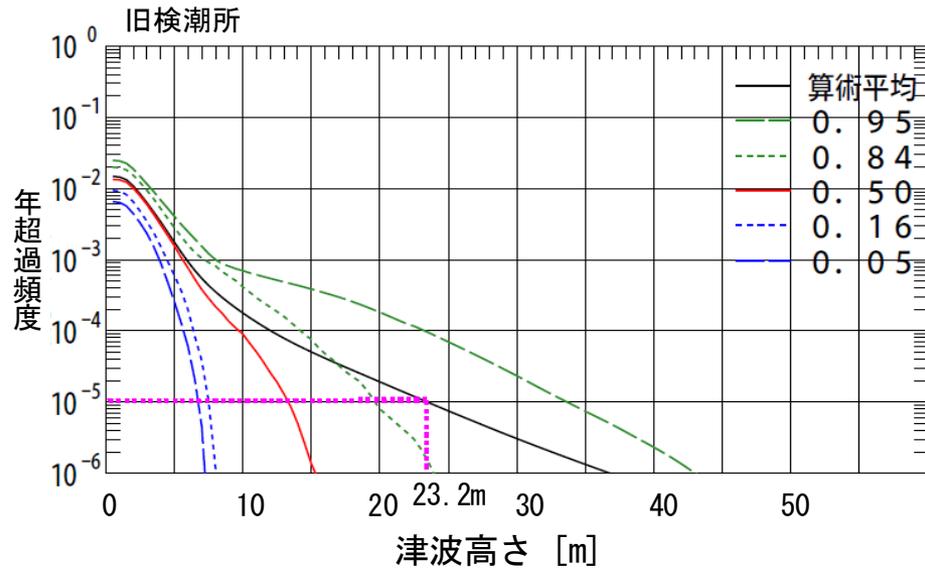
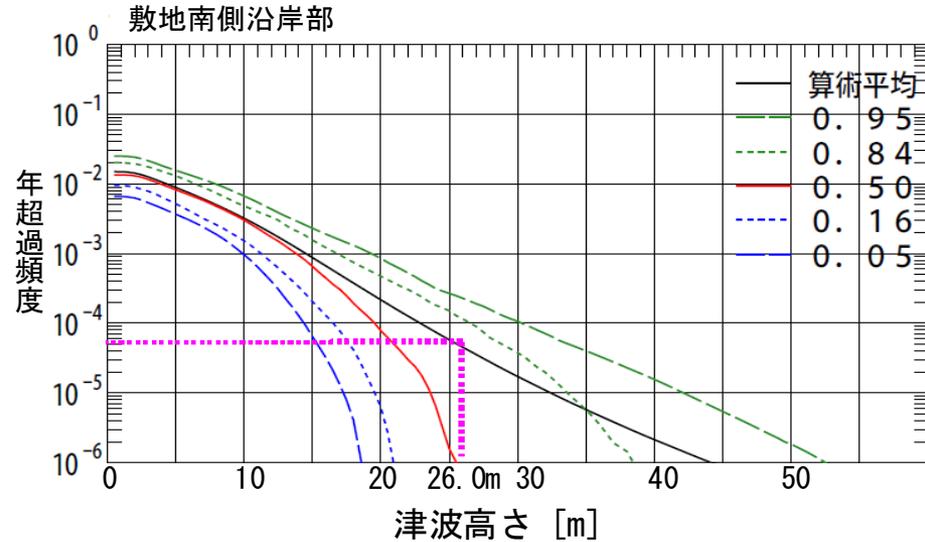
ロジックツリーの概要

4. 2 検討用津波の評価（超過確率の参照）

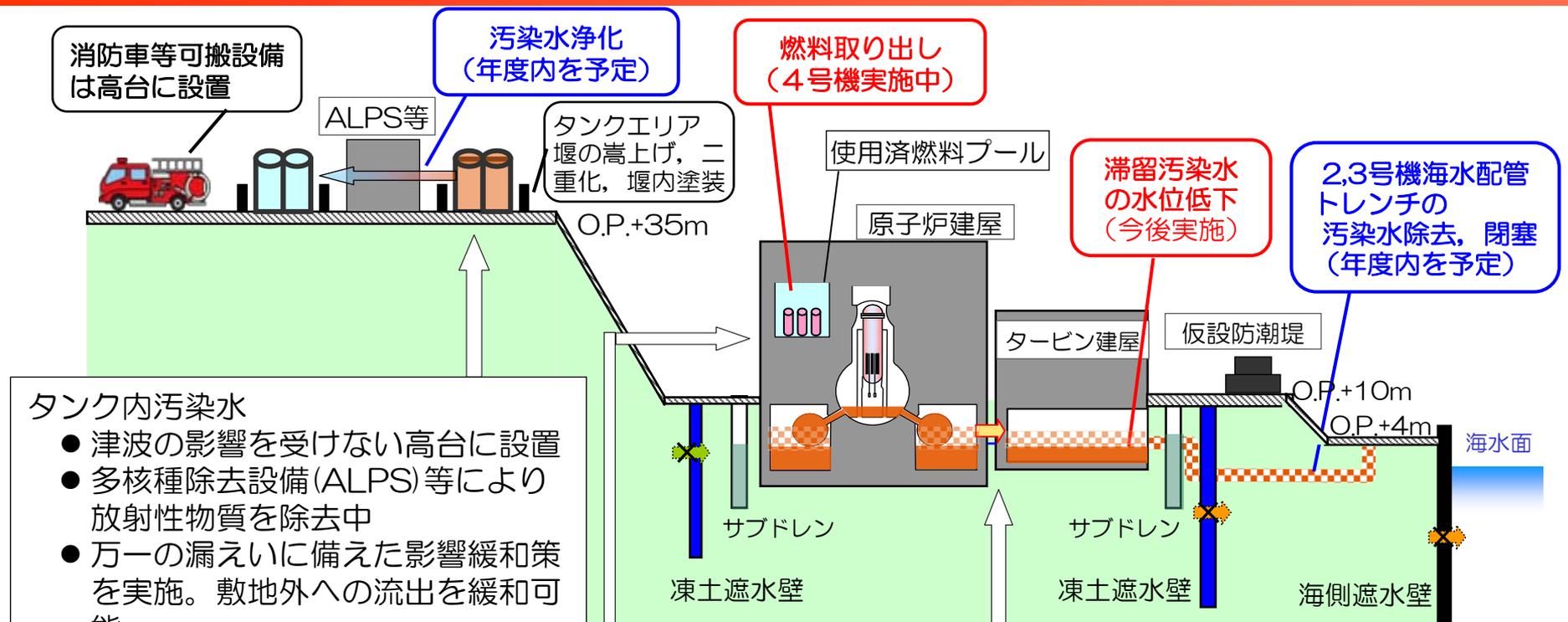
超過確率の参照：確率論的津波水位評価の結果

福島第一原子力発電所における検討用津波の年超過頻度

| 位置 | 検討用津波水位 | 年超過頻度（算術平均） |
|---------|------------|------------------------|
| 旧検潮所 | O.P.+23.2m | 1×10^{-5} 程度 |
| 敷地南側沿岸部 | O.P.+26.0m | $10^{-4} \sim 10^{-5}$ |
| 敷地北側沿岸部 | O.P.+26.3m | 1×10^{-5} 程度 |



5. 検討用地震動・津波を踏まえた対応について



消防車等可搬設備は高台に設置

汚染水浄化 (年度内を予定)

燃料取り出し (4号機実施中)

滞留汚染水の水位低下 (今後実施)

2,3号機海水配管トレンチの汚染水除去, 閉塞 (年度内を予定)

タンク内汚染水

- 津波の影響を受けない高台に設置
- 多核種除去設備 (ALPS) 等により放射性物質を除去中
- 万一の漏えいに備えた影響緩和策を実施。敷地外への流出を緩和可能

燃料デブリ, 使用済燃料の冷却

- 可搬設備を活用した機動的対応により注水を再開できる見込み
- 消防車, 電源車等は津波の影響を受けない高台に設置

建屋地下滞留汚染水

- 放射性物質濃度は減衰・水処理により大幅に減少 (セシウム137濃度は, 事故時(H23.6)の約1/50)
- 大規模津波発生時, 現状では2, 3号機海水配管トレンチが流出経路として大きく寄与する可能性がある。閉塞作業を進めており, 閉塞後は流出量は閉塞前の3割程度 (事故時放出量の0.1%程度) まで低減する見込み
- 地下水流入対策を実施, 滞留水水位を下げ滞留水量を低減

● 今後, 検討用地震動・津波に基づく評価を実施し, 脆弱性が高いと考えられる箇所を優先して信頼性向上対策を検討・実施していく

5. 検討用地震動・津波を踏まえた対応について

5.1 燃料デブリ

[現状]

- 原子炉建屋耐震壁の耐震性は現行基準地震動に対して大きな余裕があり、検討用地震動に対しても構造として耐えられる見込み
 - ◆ 1～4号原子炉建屋のせん断ひずみ評価結果(損傷考慮)：現行基準地震動 $0.12\sim 0.17\times 10^{-3} < \text{基準値}(4\times 10^{-3})$
- 地震後の時間経過によって、リスクは減少している
 - ◆ 崩壊熱は継続的に減少しており、仮に冷却機能が失われても、安全確保のための対応を実施するための時間的余裕は増加
 - デブリの崩壊熱：～0.2MW
〔1F2/3の停止12h後(約20MW)の1/100以下〕
 - ◆ 希ガス、よう素等の揮発性が高く半減期が短い放射性物質は既に大幅に減少(外部に放出されやすい放射性物質は大幅に減少)
 - ◆ 仮に冷却機能が失われても、1日程度での注水再開により、敷地境界での線量は殆ど無視できるレベル (10^{-4}mSv/年以下) に抑えられる見込み

| | 希ガス | よう素131 | セシウム134 | セシウム137 |
|------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 事故時大気放出量 (3月まで) | $5\times 10^{17}\text{Bq}$ | $5\times 10^{17}\text{Bq}$ | $1\times 10^{16}\text{Bq}$ | $1\times 10^{16}\text{Bq}$ |
| 注水停止時(25h) の放出量(評価) | — (充分少ない) | — (充分少ない) | $4.3\times 10^5\text{Bq}$ | $1.4\times 10^6\text{Bq}$ |

5. 検討用地震動・津波を踏まえた対応について

5. 1 燃料デブリ（続き）

[対応状況]

- 原子炉への注水源，注水手段，経路は多重性，多様性を確保
 - ◆ 注水ポンプの多重化，予備機の分散配置
 - ◆ 水源を複数利用できるように準備
 - ◆ （最近の信頼性向上対策の例）：3号機復水貯蔵タンクを水源とする運用を開始し，配管長の縮小，水源の保有水量の増加等信頼性が向上
- 仮に設備の故障等により冷却が中断した場合でも，消防車，電源車等可搬設備を活用した機動的対応により注水を再開できる見込み
 - ◆ 消防車等の可搬設備は，津波の影響を受けない高台に保管
 - ◆ 津波襲来時の瓦れき撤去手順を整備。より大きな地震動により斜面が崩落した場合の消防車移動ルート確保について整備中
- 窒素封入についても同様に再開できる見込み

- 冷却が中断しても，消防車等の可搬設備を活用した機動的対応により，注水を再開できる見込み
 - 崩壊熱の低下により，機動的対応の時間的余裕は増加傾向—
- 今後の検討用地震動・津波に基づく評価を活用し，機動的対応への影響確認等を行い，信頼性向上策を検討・実施していく

5. 検討用地震動・津波を踏まえた対応について

5.2 使用済燃料

[現状]

- 原子炉建屋耐震壁の耐震性、共用プールの耐震性は現行基準地震動に対して大きな余裕があり、検討用地震動に対しても基本的な維持機能（使用済燃料プールの健全性）は確保できる見込み
- 地震後の時間経過によって、リスクは減少している
 - ◆ 崩壊熱は継続的に減少しており、仮に冷却機能が失われても、安全確保のための対応を実施するための時間的余裕は増加
 - 使用済燃料プールの崩壊熱：～0.5MW(ユニット)、約1.5MW(共用)
〔発電プラントの例：KK6/7で約11MW-停止10日後〕
 - プール水位が燃料上部2m（放射線が充分遮へいされるレベル）に下がるまで、20日以上余裕
 - ◆ 希ガス、よう素等の揮発性が高く半減期が短い放射性物質は既に大幅に減少（外部に放出されやすい放射性物質は大幅に減少）
- 使用済燃料プールへの落下物等により、水中で使用済燃料が破損したと仮定して評価を実施した結果でも、敷地境界外の実効線量は0.1mSv以下※である
 - ※1号機使用済燃料プール内の全燃料が破損するという保守的な仮定をした場合の評価結果

5. 検討用地震動・津波を踏まえた対応について

5.2 使用済燃料（続き）

[対応状況]

- 仮に設備の故障等により冷却が中断した場合でも、消防車、電源車等可搬設備を活用した機動的対応により注水を再開できる見込み
 - ◆ 消防車等の可搬設備は、津波の影響を受けない高台に保管
 - ◆ 津波襲来時の瓦れき撤去手順を整備。より大きな地震動により斜面が崩落した場合の消防車移動ルート確保について整備中

- 冷却が中断しても、消防車等の可搬設備を活用した機動的対応により、注水を再開できる見込み
— 崩壊熱の低下により、20日以上の上の時間的余裕がある —
- 今後の検討用地震動・津波に基づく評価を活用し、機動的対応への影響確認等を行い、信頼性向上策を検討・実施していく

5. 検討用地震動・津波を踏まえた対応について

5. 3 建屋地下滞留汚染水

[現状]

- 建屋地下階の耐震性は現行基準地震動に対して大きな余裕があり，検討用地震動に対しても構造として耐えられる見込み
 - ◆ 3号タービン建屋のせん断ひずみ評価結果：現行基準地震動 $0.15 \times 10^{-3} < \text{基準値}(4 \times 10^{-3})$
- 建屋地下滞留汚染水の放射性物質濃度は減衰・水処理により減少
 - ◆ セシウム137濃度は，事故時(H23.6)の約1/50に減少
 - ◆ セシウム134の半減期は約2年であり，事故後3年半で約3割まで減衰。セシウム137濃度よりさらに減少

| | よう素131 | セシウム134 | セシウム137 |
|------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 事故時海洋放出量 (9月まで) | $1.1\text{E} \times 10^{16}\text{Bq}$ | $3.5 \times 10^{15}\text{Bq}$ | $3.6 \times 10^{15}\text{Bq}$ |
| 建屋地下滞留汚染水 放射性物質総量概算 | — (充分少ない) | $3.7 \times 10^{14}\text{Bq}$ | $1.1 \times 10^{15}\text{Bq}$ |

5. 検討用地震動・津波を踏まえた対応について

5.3 建屋地下滞留汚染水（続き）

[対応状況]

- 仮に汚染水処理設備が停止しても、1ヶ月程度は原子炉への注水等による滞留水増加に耐えられる見込み
 - ◆ 現行タービン建屋水位～管理水位(OP3000→4000)までの余裕は約23,000m³
- 大規模津波襲来時の影響
 - ◆ 現状では2, 3号機海水配管トレンチ, 及び同トレンチを通じたタービン建屋からの漏れいが流出経路として大きく寄与する可能性があるが, 閉塞作業を実施中(年度内を予定)
 - ◆ 2, 3号機海水配管トレンチ閉塞後は, 流出量は閉塞前の3割程度に低減する見込み
 - 事故時の放出量と比較すると, 0.1%程度まで低減する見込み
(ヨウ素及びセシウムについて, 大気放出及び海洋流出(~H23.9)を考慮)
- 今後の対策
 - ◆ 滞留水量の低減による放射性物質量の低減
 - 地下水流入対策による滞留水水位低下(地下水バイパス, 凍土遮水壁等)
 - 汚染水の滞留する範囲(建屋及び区画)の縮小
(今後の廃止措置及び汚染水量を踏まえ, 低減効果の高い建屋・区画のドライアップ)
 - ◆ 津波影響評価結果及び汚染水除去スケジュールを踏まえ, 流出防止策を検討・実施
 - 汚染水の滞留する建屋・区画に対し, 開口部の閉塞, 止水等の対策を実施

大規模津波襲来時に備え,

- 建屋地下滞留汚染水の除去・低減を確実に実施することが基本的な対応
- 津波襲来時の滞留水流出防止対策を今後検討・実施

5. 検討用地震動・津波を踏まえた対応について

5.4 タンク内汚染水

[現状]

- 現行基準地震動による評価では、転倒等の観点から耐性を確認
- 東北地方太平洋沖地震時にも、耐震クラスの低い既設タンクの多くは漏えいに至っておらず、耐震評価上の基準値を超えたとしても直ちに大規模な漏えいに至るものではないと考えられる
- 高台に設置されているため、津波の影響は受けない

[対応状況]

- タンク劣化、ヒューマンエラー等による漏えいに備えた影響緩和策を実施中であり、地震による漏えいが発生しても港湾外への流出を緩和可能
 - ◆ タンクエリアの堰の嵩上げ、二重化、堰内塗装
 - ◆ 排水路ルートを港湾外から港湾内に変更
- 現在多核種除去設備(ALPS)等により放射性物質の除去を進めており、リスクの低減が進んでいる。さらに、多核種除去設備の増設、高性能多核種除去設備の設置に取り組んでいる
- スロッシングによる漏えい対策として、タンク容量と貯蔵量の推移を考慮しつつタンク水位の低下等について検討中

- 多核種除去設備等による処理を確実に進め、汚染水の除去自体を早急に実施することが基本的な対応（年度内を予定）
- 今後の評価結果を踏まえ、漏えい防止策の拡充等の信頼性向上策を検討・実施していく